

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.

Tesis Doctoral

**Morphing Arquitectónico:
transformaciones entre las casas
Usonianas de Frank Lloyd Wright**

Autor

Arq. Rodrigo Herrera Velazco

Director

Dr. Arq. Ernest Redondo Domínguez

**Universidad Politécnica de Cataluña
BARCELONA**

**Programa de Doctorado
COMUNICACIÓN VISUAL EN ARQUITECTURA Y DISEÑO
Departamento de Expresión Gráfica Arquitectónica I
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona**

Barcelona, Noviembre 2011

Tesis presentada para obtener el título de Doctor por la Universidad Politécnica de Cataluña

Volumen único



AGRADECIMIENTOS

A Ernest Redondo por la orientación, los buenos consejos y el capitaneo de la tesis.

A los profesores del Departamento EGAI/ETSAB/UPC.

A Javier Barrallo.

A Ignasi Grau.

A la familia de Euskadi.

A todos los amigos que me han acompañado y ayudado en esta travesía.

DEDICADO

A Jaime y María Cristina, mis padres, por estar ahí siempre.

A mis hermanos y a mi familia, por su apoyo.

A Nerea por armarse de paciencia, por su versatilidad y por “tener aguante T_T”.

A Mara por hacerme tener dos partos seguidos...

SUMARIO.

SUMARIO.	005
RESUMEN / ABSTRACT.	009
1.- INTRODUCCIÓN.	011
1.1. Prólogo.	011
1.2. Problemática y objetivos.	013
1.3. Metodología de la investigación.	015
1.4. Estructura de la Investigación.	017
1.5. Motivaciones.	019
2.- EL ESTADO DE LA CUESTIÓN.	021

2.1. Antecedentes y presentación general.	021
2.1.1. Primeros tratadistas y científicos.	022
2.1.2. Fotografía y Cinematografía.	026
2.1.3. Gráficos por Ordenador y efectos especiales.	031
2.1.4. Programas de morphing.	036
2.2. Utilización del morphing en arquitectura.	038
2.3. Visión General y estado del arte.	047

3.- LA TÉCNICA DEL MORPHING. 061

3.1. Objetos gráficos y su transformación.	063
3.1.1. Transformación de un objeto gráfico.	065
3.1.2. Tipos de transformaciones simples.	066
3.2. Las aplicaciones de las transformaciones de la forma.	068
3.2.1. Animación.	068
3.2.2. Modelado de la forma y deformadores.	069
3.2.3. Corrección geométrica y distorsiones.	073
3.2.4. Encaje y correspondencia.	075
3.3. Metamorfosis y gráficos por ordenador (Morphing).	078
3.3.1. Definición.	078
3.3.2. Clasificación (Tipos de morphing).	078
3.4. Morphing de dos dimensiones.	080
3.4.1. Implementaciones con técnicas de morphing 2D.	082
3.5. Morphing tridimensional: El objeto, su representación y transformación.	090
3.6. Métodos basados en volumen.	092
3.6.1. Implementaciones con técnicas de morphing basados en volumen.	097
3.7. Métodos basados sobre representaciones de frontera.	110
3.7.1. Implementaciones con técnicas de morphing basados en fronteras.	111
3.8. Resumen técnica de morphing.	123
3.8.1. Adquisición volumétrica y modelado de la forma.	123
3.8.2. Deformación y mezcla.	124
3.8.3. Visualización del resultado.	127
3.9. Aplicaciones generales del morphing.	129

4.- CASAS USONIANAS. 135

4.1. Elección y antecedentes.	135
4.2. Definición de las casas Usonianas.	137
4.3. Diseño Usoniano.	138
4.3.1. Reticulas Usonianas.	138

4.3.2. Transformaciones planimétricas.	140
4.3.3. Programa y morfología Usoniana.	142
4.4. Casas Usonianas del estudio.	146
5.- MORPHING CASAS USONIANAS.	169
5.1. El entendimiento de las combinaciones arquitectónicas.	172
5.2. Configuración del modelo.	178
5.2.1. Análisis Planimétrico.	178
5.2.2. Morfología.	179
5.2.3. Elementos formales: del modelo arquitectónico al modelo gráfico.	181
5.3. Topología.	185
5.3.1. Análisis de formas a través de la topología.	185
5.3.2. Transformación topológica.	186
5.3.3. Evolución topológica: transformaciones con cirugía topológica.	189
5.3.4. Topología aparente del modelo gráfico.	192
5.4. Control de transición (formas claves) y mapeado de puntos geométricos.	195
5.5. Estrategia de transformación.	199
5.6. Animación y generación de modelos híbridos.	202
5.7. Optimización del morphing arquitectónico: requisitos para un buen morphing.	207
6.- CONCLUSIONES.	215
6.1. Análisis Histórico.	215
6.2. Tipos y características de los objetos gráficos.	217
6.3. Problemática del procedimiento.	219
6.4. Resumen y comentarios respecto de las implementaciones revisadas.	220
6.5. Consideraciones para un proceso arquitectónico combinatorio.	223
6.6. Sobre Wright-Usonian y el morphing.	225
6.7. Proyección de futuro.	227
7.- BIBLIOGRAFÍA.	229
7.1. Libros y revistas.	229
7.2. Páginas Web.	235
7.3. Artículos.	236
8.- ÍNDICE.	243

9.- VIDEOS.**Interior cubierta posterior**

RESUMEN.

Esta tesis investiga sobre el proceso de transformación de la forma arquitectónica, analizando una técnica específica denominada morphing. La técnica del morphing se utiliza en los gráficos por ordenador para la transformación de la forma entre dos o más objetos dados. Desde un punto de vista técnico, se revisan y actualizan las metodologías y aplicaciones existentes, sus características específicas y sus incidencias sobre la arquitectura. Desde un punto de vista práctico, se utilizan una serie de modelos de las casas Usonianas de Frank Lloyd Wright, con el fin de experimentar la técnica y ver qué utilidades se pueden obtener a partir de su lógica de diseño. Como resultado de este análisis se obtiene una metodología genérica para el procedimiento de un morphing arquitectónico.

Palabras clave: *morphing, metamorfosis, intermediación, mezcla formal, combinación formal, forma promedio, morfismo, transformación, evolución formal, interpolación formal.*

ABSTRACT.

This thesis investigates the transformation of architectural form, analyzing a specific technique called morphing. Morphing is a technique used in computer graphics to transform a form between two or more given objects. From a technical point of view, the existing techniques are reviewed and updated, as well as their specific characteristics and impact on architecture. From a practical point of view, some models of Usonian houses of Frank Lloyd Wright are used to experience the technique and see which utilities are available from his design logic. As a result of this analysis a generic methodology for the process of architectural morphing is obtained.

Keywords: *morphing, metamorphosis, keyframing, inbetween, shape blending, shape averaging, shape interpolation, shape evolution, morphable model.*

1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Prólogo.

La investigación que presenta el siguiente documento parte de la curiosidad por entender una de las primeras problemáticas que nos concierne como entendidos en la disciplina arquitectónica: **la forma**. En esta temática, se investiga sobre la forma en el proceso de diseño arquitectónico. Este proceso tiene lugar al comienzo del proceso creativo, cuando se definen las formas que tendrá el objeto arquitectónico. La manera de caracterizar esta forma se basa en encontrar las propiedades que involucran a los objetos en cuanto a figuras espaciales. Se utilizan la geometría y la topología como ciencias de carácter necesario para el conocimiento de estas formas espaciales conforme a leyes y principios generales.

Al comienzo del proceso creativo y a medida que se van creando las formas, el proceso de diseño arquitectónico va ejecutando múltiples ensambles y ajustes de modelos. Estos ajustes se entienden como un proceso formal que agrupa un conjunto de actividades o eventos que se realizan o suceden de forma alternativa o simultánea. Estos procedimientos están dirigidos a lograr un cambio o alteración de las propiedades que atañen a la forma. La acción de transformar una forma en otra es una acción abstracta, basada en un conocimiento y su realización. Este conocimiento es un conjunto organizado de datos e información que permite resolver un

determinado problema o tomar una decisión frente a la transformación. La alteración del estado de la forma genera una manifestación en la conformación de la entidad que se transforma. Este fenómeno, puede ser identificado, explicado y accionado en base a parámetros geométricos, instrucciones programables, funciones matemáticas, sintaxis gramaticales, etc; según corresponda.

Para una generación que empezó dibujando en un tablero y terminó sus estudios utilizando el *mouse*, el uso del ordenador ha significado la ruptura radical con determinadas tradiciones. Los cambios tecnológicos que se han producido en las décadas de los ochenta-noventa han revolucionado la naturaleza de cómo se elabora un proyecto arquitectónico. Con los medios digitales el proyecto deja de ser concebido para situaciones concretas y comienza a modificarse con operaciones sobre el modelo en constante transformación. Se busca una arquitectura flexible, extensible y que sea transformable para poder adaptarse a futuros cambios. Es una arquitectura de mayor utilidad, totalmente contraria al edificio rígido e inmutable. Las tareas proyectuales adoptan procedimientos más complejos y el programa arquitectónico es más irregular e indefinido. De este modo, el proyecto arquitectónico se encuentra con nuevos instrumentos de representación en continuo desarrollo. Esto permite liberar las metodologías de desarrollo, flexibilizar criterios, diversificar resultados, potenciar la creatividad y finalmente, conceder al proyecto de arquitectura un marcado **carácter experimental**⁽¹⁾.

Esta tesis investiga sobre **el proceso de transformación de la forma arquitectónica**, analizando una técnica específica denominada **morphing**, que se utiliza en los gráficos por ordenador (*computer graphics*) para la transformación de la forma entre dos o más objetos dados.

El morphing es una técnica informática que se desarrolla a comienzo de la década de los ochenta. Para explicar de qué trata, se alude siempre a los ejemplos más prácticos y recordados de la técnica del morphing. En primer lugar se alude al videoclip de Michael Jackson titulado "Black or white" del año 1991, en el cual se muestra una secuencia de diversas caras con diferentes rasgos que van cambiando una tras otra. La segunda alusión hace referencia a la película "Terminator 2" del mismo año, donde el antagonista, un personaje con cuerpo amorfo, experimentaba una serie de transformaciones entre formas humanas y no humanas.

La utilización del morphing en arquitectura se da a comienzo de los noventa y tiene su desarrollo en la década pasada. Sin embargo, la multiplicidad de metodologías para el diseño arquitectónico mediante gráficos por ordenador la han mantenido en un segundo plano, dejándola como una técnica más experimental de índole **transformativo** por detrás de las nuevas técnicas de orden generativo. Esta tesis pretende actualizar las particularidades de esta técnica y sus incidencias sobre la arquitectura. A modo práctico, se utilizarán una serie de modelos de las **casas Usonianas** de **Frank Lloyd Wright**, con el fin de experimentar la técnica y ver qué utilidades se pueden obtener a partir de la lógica del diseño de Wright.

Espero que el aporte de esta tesis sirva de base para la inspiración de nuevas investigaciones sobre el tema y que anime a nuevos investigadores al estudio del diseño de otros arquitectos de forma similar.

(1) Ver: Muñoz Cosme, Alfonso. 2008. El proyecto de arquitectura: Concepto, proceso y representación. Barcelona: Reverté.

1.2. Problemática y objetivos.

El diseño arquitectónico es un proceso heterogéneo que busca traducir en formas válidas los resultados de una serie de variables albergadas en enfoques, estrategias y metodologías. Éstas a menudo son influidas, entre otras, por las condiciones técnicas, económicas, antecedentes socio-culturales, experiencias y poder creativo del propio diseñador. La metodología de diseño relacionada con ese poder creativo individual no se basa en la intuición, ya que principalmente está regida por pautas de desarrollo adquiridas a través del ejercicio proyectual. Si bien en el proceso de diseño la idea formal nunca es estacionaria, debido a que siempre está variando y va siendo explorada desde múltiples puntos de vista, resulta cada vez más fácil precisar la configuración de esta imagen mental. Esto se debe a que en la arquitectura de estos últimos veinte años han ido emergiendo un conjunto de técnicas en las que por medio de herramientas gráficas, es posible desarrollar estas formas imaginadas.

Como sucede en arquitectura la mayoría de las veces, los avances que se desarrollan en otras áreas de investigación con el tiempo son adaptadas o reformuladas, con el fin de obtener otros usos alternativos al verdadero fin con el que fueron desarrolladas. La técnica del morphing no es una herramienta que haya sido implementada para la arquitectura. De hecho, sus inicios se dieron al comienzo de la década de los ochenta, siendo su principal utilización el cine (efectos especiales), la medicina y la biología. El impacto en los despachos de arquitectura se fue extendiendo de forma gradual, retrasándose hasta comienzos de los noventa. Por lo demás, si bien el grado de interés por esta técnica es variable según el área de especialización abordada, es significativo que mientras los especialistas en gráficos por ordenador enfocaban su preocupación en la optimización del proceso; para los arquitectos, el gran valor adquirido de esta técnica era la experimentación y virtuosismo de poder mezclar formas disímiles obteniendo formas intermedias inesperadas.

Un aspecto importante a tener en cuenta, era la controversia planteada en relación a los parámetros de transformación que definían un morphing “*óptimo*” entre dos objetos gráficos. Para la industria de los efectos especiales, un morphing “*óptimo*” era un problema formal que involucraba argumentos perceptivos. Su versión era que la transformación propuesta debía convencer al espectador de que podía ser un fenómeno creíble. Posteriores publicaciones respecto al tema elaboraron una serie de propiedades y directrices que debían ser seguidas a fin de obtener una buena transformación. Estos principios eran entendidos como una guía para obtener resultados satisfactorios y naturales. Por otra parte y en forma paralela, algunos investigadores utilizaban como base **los principios generales para realizar una buena animación** propuestos en la década de los ochenta, siendo la premisa fundamental que el resultado final de un morphing fuera una animación.

A modo general, existe bastante información especializada de la técnica del morphing desarrollada en las diferentes implementaciones (reportes de artículos) y libros que hablan sobre el tema. Para un arquitecto este tipo de material no es fácil de procesar, ya que es un tipo de información muy técnica referida a los gráficos por ordenador. Por otra parte, en el ámbito arquitectónico existen variados ejemplos respecto al uso de esta técnica. Si bien la información que se publica sólo se refiere a los resultados y representaciones gráficas obtenidas con esta herramienta, en general, la información específica respecto a la técnica es ambigua y de orden genérico.

Se parte de la suposición de que un morphing para arquitectura a nivel técnico y en conjunto con las variables involucradas en el proceso de transformación, no presenta diferencias con respecto a un morphing empleado para otra finalidad (cinematográfica, publicitaria, médica, etc.). En dicho caso, se plantea una primera interrogante referida a las disparidades entre los usos de esta técnica: *¿Qué diferencias existen entre un morphing arquitectónico y un morphing con una finalidad distinta? ¿Cuáles son las variables que determinan de forma particular un morphing para arquitectura?*

Una segunda interrogante tiene relación con la controversia anteriormente descrita y que se refiere a los parámetros de transformación que definen un morphing “óptimo”. De esta forma, cabe realizar el mismo cuestionamiento para el ámbito arquitectónico con el fin de caracterizar e identificar estos parámetros: *¿Cómo debería ser un morphing “óptimo” para arquitectura? ¿Cuáles son los parámetros de transformación que inciden en la obtención de un morphing “óptimo”?*

El tercer cuestionamiento viene dado por la particularidad que presenta la técnica del morphing, es decir, en el hecho de que la transformación entre formas es posible si se puede obtener el modelo gráfico de ambas formas. Desde una perspectiva arquitectónica y tomando en cuenta esta particularidad técnica, donde todo modelo gráfico se puede mezclar, se plantea la interrogante sobre: *¿Cuáles son las obras o proyectos posibles de combinar?* Por otra parte y dejando de lado las propiedades morfológicas, se cuestionan: *¿Qué aspectos hacen coherente la combinatoria arquitectónica? ¿Cuáles son las lógicas de la combinatoria para un morphing arquitectónico?* Estos cuestionamientos y propósitos se irán desarrollando en capítulos posteriores de la tesis.

Una vez presentada la problemática, lo anteriormente expuesto se traduce en **cuatro objetivos fundamentales** para esta tesis:

- 1.- Obtener una visión actualizada a nivel teórico y práctico de las principales técnicas para elaborar un morphing.
- 2.- Concentrar la información especializada referida a la técnica del morphing y poder relacionarla desde un punto de vista arquitectónico.
- 3.- Explorar y señalar las variables que inciden en la elaboración de un morphing y en especial, aquellas que se pueden incluir en el ámbito arquitectónico.
- 4.- Definir y relacionar los parámetros para describir y valorar un morphing arquitectónico adecuado (“óptimo”).

1.3. Metodología de la investigación.

Básicamente, la metodología de esta tesis se basa en dos aspectos fundamentales. Por un lado, la recolección, revisión y análisis de la bibliografía específica relacionada con el morphing. Por otra parte la experimentación de la técnica con unos modelos de animación tridimensional.

Lo primero, consistió en revisar y analizar las publicaciones en libros de arquitectura referidas a la técnica del morphing. Además, se realizó una recolección, revisión y análisis histórico de los artículos publicados en diferentes revistas de investigación especializadas en el área de los gráficos por ordenador, que trataban sobre técnicas para la transformación de objetos gráficos y morphing.

Dada que gran parte de esta selección de información no estaba relacionada con la arquitectura, se privilegió la información gráfica de cada artículo de investigación, junto con lo novedoso de la técnica y sus posibles utilidades en un ámbito arquitectónico. En ciertos artículos más que privilegiar la técnica, también se valoró la interface de los programas propuestos y sobre todo, las herramientas para la manipulación y transformación de elementos gráficos. En algunos casos, los investigadores dejaban los programas para ser bajados directamente de la red, lo que permitía implementar algunas técnicas de morphing específico. En este sentido, cuando el programa no estaba disponible, los comentarios respecto a la interface del programa y sus herramientas eran extraídos directamente de lo publicado en sus artículos.

Dentro de toda esta información referida al morphing, se ha favorecido el estudio de la técnica tridimensional sobre la técnica en dos dimensiones. Además, se tomó como material base y de referencia el artículo de **Lazarus y Verroust**⁽²⁾, que realiza un estudio general de los diferentes tipos e implementaciones de morphing hasta el año 1998 y también, el libro publicado por **Gomes et al.**⁽³⁾ sobre warping y morphing en objetos gráficos del año 1999. Otro libro de referencia, pero de orden más generalista y con mayor retórica, es el libro de Vivian Sobchack⁽⁴⁾ que habla especialmente sobre morphing 2D. El libro de Kostas Terzidis⁽⁵⁾ trata en forma general desde una visión arquitectónica el tema de la transformación para gráficos por ordenador. Dentro de las técnicas de transformación está incluido el morphing, pero no es un libro que profundice demasiado en el tema.

Para implementar el morphing entre modelos arquitectónicos, se eligieron las casas Usonianas de Frank Lloyd Wright dada su configuración y simpleza a la hora de trabajar con formas tridimensionales para la exploración de la técnica del morphing. Wright es un clásico de la arquitectura, sus ideas y principios en la concepción de estas casas (herencia de las Pradera) facilitó el análisis y experimentación de la técnica, sumando nuevas variables al estudio de la transformación. Se seleccionaron nueve casas principalmente por su sencillez volumétrica, sus características topológicas en las formas de los elementos arquitectónicos y finalmente por su

(2) Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1998. Three-dimensional metamorphosis: A survey. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 373-89.

(3) Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, y Luiz Velho. 1999. *Warping and morphing of graphical objects*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

(4) Sobchack, Vivian. 2000. *META morphing: Visual Transformation and the Culture of Quick-Change*. Minneapolis: University of Minnesota Press.

(5) Terzidis, Kostas. 2003. *Expressive form: A conceptual approach to computational design*. London [u.a.]: Spon Press.

configuración tipológica en la distribución planimétrica.

Las plantas de arquitectura de las casas Usonianas se obtuvieron del libro recopilatorio de William Storrer⁽⁶⁾, así también en muchos de los casos se utilizaron fotos de los proyectos, junto con imágenes de los alzados originales que aparecen en su mayoría en el libro de Pfeiffer & Futagawa⁽⁷⁾ sobre las casas Usonianas. Se realizó un estudio funcional de los diferentes recintos que componían el programa arquitectónico de cada casa. Se utilizó la división del programa que proponía Wright (área social/área privada) con el fin de realizar la correspondencia volumétrica entre las casas. Las volumetrías de cada casa fueron modeladas a la misma escala, de forma que los modelos estaban compuestos en base a elementos formales independientes para su correlación.

Para explorar la técnica del morphing, se utilizó uno de los programas más populares para la animación y modelado tridimensional (Autodesk 3ds Max) y para el renderizado de imágenes y videos se utilizó el motor de render V-Ray. En el cálculo y procesamiento de todo el material gráfico se utilizaron dos ordenadores:

- **Unidad 1:** Proc. Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU T9400 @2.53GHz / RAM: 4,00 GB / T.Graf. NVIDIA Quadro FX 2700M - 512 MB. / Sist. Oper. W. Vista de 64 bits - S.P. 2.

- **Unidad 2:** Proc. Intel(R) Core (TM) i5-2410M CPU@ 2.30GHz / RAM: 8,00 GB / T.Graf. NVIDIA GeForce GT 540M - 1.5 GB + Intel HD Graphics 3000. / Sist. Oper. W7 de 64 bits.

(6) Storrer, William Allin. 1993. The Frank Lloyd Wright Companion. Chicago; London: The University of Chicago Press.

(7) Pfeiffer, Bruce Brooks, and Yukio Futagawa. 2002. Frank Lloyd Wright Usonian Houses. Tokyo, Japan: A.D.A Edita.

1.4. Estructura de la investigación.

La estructura de la tesis está dividida en cuatro partes: la primera, es sobre los antecedentes y el estado de la cuestión; una segunda referida específicamente a la técnica; la tercera tiene relación con las casas Usonianas de Frank Lloyd Wright y la cuarta, es la implementación de la técnica en el caso específico de las casas.

La primera parte, hace una revisión histórica y de carácter general respecto a la técnica del morphing. En ella se desarrollan las distintas influencias que ha tenido el tema de la transformación referida a objetos gráficos. Gran parte de este capítulo contiene información ordenada históricamente de las distintas implementaciones descritas en artículos de investigación y la situación respecto al estado del arte del morphing. Se exponen algunos casos implementados en el cine, publicidad y arquitectura, así como también el uso de algunos programas específicos para esta técnica.

La segunda parte, se centra en la definición específica de la técnica. Es la parte donde se aglutinan la mayoría de conceptos y definiciones del tema tratado. Básicamente, se empieza por definir los objetos gráficos que intervienen en una transformación y las diferentes aplicaciones que existen al respecto. Se define lo que es un morphing y los tipos de morphing que existen (2D y 3D). Luego, se realiza una división a partir de las diferentes metodologías de morphing según los objetos gráficos a transformar. En esta división, se hace una pequeña revisión de algunas implementaciones con el fin de especificar las diferencias metodológicas y ver sus posibles utilidades en arquitectura. Para finalizar, se revisan las aplicaciones generales de la técnica desde un aspecto más global y abierto a distintos ejemplos originales encontrados.

La tercera parte, es el complemento de la cuarta parte y tiene relación con las casas Usonianas. Trata sobre las lógicas en el diseño por parte de Wright, definiendo cuáles son sus antecedentes históricos y las principales características morfológicas de estas casas.

Al inicio de la cuarta parte, se muestran distintas situaciones a modo de ejemplo, donde se producen combinaciones entre diferentes entidades formales. En general, son casos bastante aislados y no existe mayor vínculo entre ellos. Sin embargo, de una u otra forma buscan determinar cuáles son las estrategias combinatorias para un ámbito arquitectónico. Por otra parte, también se realiza una analogía histórica para demostrar ciertas correspondencias que se han encontrado en el uso de la técnica con respecto a tendencias y pensamientos arquitectónicos del pasado.

En la continuación de la cuarta parte se expone el proceso global para realizar un morphing. Más que explicar la implementación de la técnica con las casas Usonianas, ilustra las diferentes lógicas que tiene el proceso de transformación desde dos ámbitos complementarios: la forma y los elementos gráficos.

Para comenzar a transformar la forma se deben realizar análisis respecto su conformación formal y programática (planimetría), junto con la determinación de las características topológicas de los diferentes elementos correspondientes. En este sentido, la topología no sólo es importante al inicio del proceso. Es relevante también en el momento en que se va a realizar la transformación, debido a que existen situaciones donde se

debe intervenir la forma para cambiar sus propiedades topológicas, provocando cambios que se denominan evolución topológica.

Desde un punto de vista gráfico, los programas de morphing permiten manipular los objetos gráficos de distintas maneras. Es así como en el resultado visible de una transformación (renders, videos y modelos de formas intermedias), los objetos parecen simular formas que tienen ciertas propiedades topológicas que en un nivel gráfico editable resultan ser otras. El proceso de transformación exige una serie de condicionantes y mecanismos de control, tanto para las formas gráficas como para la manipulación del usuario. Tras elaborar las relaciones combinatorias, viene la parte más experimental de todo el proceso y que tiene como finalidad elaborar secuencias de transformación las cuales terminan siendo animaciones en formato de video. Por otra parte, las interfaces de los programas para morphing permiten realizar modificaciones parciales en la temporalidad de la transformación de cada uno de los elementos que determinan la volumetría. Con esto se consiguen modelos híbridos mediante la manipulación de las características formales de uno u otra forma predecesora. Para finalizar el capítulo, se definen los requisitos que debe tener una transformación para que el morphing sea "óptimo" desde un punto de vista arquitectónico, gráfico, topológico, visual, etc.

Una vez terminadas las cuatro partes de esta tesis, se continúa con las conclusiones. Este capítulo comienza mediante un análisis histórico referido a la evolución de la técnica en general y su utilización para arquitectura. Además, se realiza una comparativa de los objetos gráficos utilizados en el morphing, sus principales características y especificaciones, junto con sus ventajas y desventajas en su utilización. Prosigue con unas breves reflexiones referidas a posibles problemáticas en el procedimiento y algunos comentarios en relación a las implementaciones revisadas a lo largo de la tesis y sus posibilidades en la utilización arquitectónica. Asimismo, se realizan una serie de consideraciones ligadas a la forma, su transformación y las lógicas que existen en un proceso combinatorio. De igual forma, se realizan algunos comentarios referidos a la elección de Wright y sus casa Usonianas para el uso de la técnica del morphing. Para finalizar, se realiza un breve descripción de las perspectivas, potencialidades y proyección a futuro.

1.5. Motivaciones.

El desarrollo de este trabajo responde a la motivación que el autor ha manifestado en el transcurso del presente doctorado referida a los procesos de transformación que intervienen en la forma. En un comienzo, la idea primeriza para la realización de la presente tesis trataba sobre los procesos de transformación geométrica en la forma. Esta idea surge en una exposición efectuada en el año 2002 en el Salón del Tinell del Museo de Historia de la Ciudad de Barcelona. El nombre de la exposición era: *“Gaudí. La recerca de la forma. Espai, geometria, estructura i construcció”*. Especial atención tuvieron aquellos videos donde se mostraba y explicaba el proceso a través del cual Gaudí combinaba las formas geométricas para conformar su obra.

Posteriormente y dentro del curso de Representación Gráfica Asistida por Ordenador⁽⁸⁾ del presente doctorado, se toma como referencia el video nombrado anteriormente y se aplica un paralelismo a la obra de otro arquitecto: Peter Eisenman. Para ello, se elige el anteproyecto de la Casa Guardiola, Cadiz, 1988 (sin construir). Siguiendo los dibujos planimétricos de la forma final que el propio Eisenman planteaba acerca del proyecto, se realiza un video del proceso formal con la interpretación propia de los esquemas secuenciales que el arquitecto dibujó.

Luego en posteriores cursos lectivos del doctorado y sobre todo en la elaboración de algunos trabajos finales, el tema del morphing siempre aparece como tema potencial para el desarrollo de una tesis. No es hasta después de la propuesta del proyecto de tesis, donde finalmente y luego de recibir recomendaciones muy bien intencionadas, que un pequeño capítulo de la propuesta se convierte en el tema central de la tesis. La motivación es aun mayor cuando se decide utilizar las casas Usonianas para implementar la técnica del morphing. Trabajar con un clásico como es Wright crea cierto respeto en un primer acercamiento. Sin embargo, a medida que se va profundizando en la obra, ésta se vuelve cada vez más didáctica e instructiva.

Para finalizar, una de las particularidades significativas de esta técnica es que para pasar de una forma a otra existen una infinidad de transformaciones posibles. Esto permite experimentar con los posibles desarrollos formales, a su vez que motiva para crear una mayor coherencia en la transformaciones de la forma.

(8) Curso de Representación gráfica asistida por ordenador (2004-2005). Profesores: Manuel J. Luque, María Isabel Ruiz, Joan Font. Video: Peter Eisenman - Casa Guardiola. Ver pagina web: <http://www.youtube.com/watch?v=JAH97LcQ2Cs>

2. EL ESTADO DE LA CUESTIÓN.

2.1. Antecedentes y presentación general.

Desde Ovidio hasta Kafka han sido mucho los que han escrito en relación al término **metamorfosis**. Fue Goethe quien desarrolló el concepto de metamorfosis en el campo de la morfología vegetal. Según él, todos los órganos florales de las plantas eran variaciones de una forma original provenientes de una metamorfosis. Denominó metamorfosis, al cambio paulatino en la apariencia de un solo órgano. En la actualidad el significado más común de este término es ***un cambio en la forma o en su naturaleza***.

Los objetos del mundo real están en constante transformación, ya lo dijo Lavoisier: *“La materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”*. Los mecanismos que inducen estos cambios son muy complejos, estando entre estos: los procesos de crecimiento, las fuerzas externas que modifican elementos, el paso del tiempo que cambia las propiedades de los objetos, etc. En general, todo está determinado por el tiempo y a modo de flujo todo está en un constante cambio.

Mediante transformaciones y variaciones de dibujos o pinturas los artistas del Renacimiento son los primeros que logran recrear la profundidad y la posición relativa de los objetos. Utilizando el estudio de proporciones

modulares y la exploración de una forma científica y reglada para representar el espacio tridimensional, dieron con los principios de la perspectiva.

Las primeras formas de captar o representar una acción en un determinado tiempo, tienen relación con lo **cinético**. Este concepto se desarrolla a través de los estudios de movimiento en los que el hombre se cuestiona la forma de representar una transformación. Son los avances en la fotografía los que permiten representar el mundo real a través de imágenes fijas. Los primeros estudios del movimiento mediante la fotografía permiten captar en diferentes secuencias de imágenes o en una sola imagen, distintos instantes de tiempo. Estos avances dan paso a la cinematografía, una técnica que consiste en proyectar fotogramas de forma rápida y sucesiva para crear la impresión de movimiento. Son los pioneros de la cinematografía los que crean los primeros **efectos fantásticos**, los primeros precursores de efectos que se realizan para dar la sensación de un cierto cambio o transformación de la imagen de un personaje o un objeto.

Con el correr de los años y con los avances en la tecnología informática, se crean en la industria del cine y la televisión nuevas técnicas para conseguir escenas que no se pueden realizar con los medios normales: son los llamados **efectos especiales**. Estos efectos al ser manipulados en videos de modo y formato digital pasan a llamarse **efectos digitales o visuales**. Además este tipo de artificio permite realizar cambios de forma para modificar la apariencia y transformar completamente las características de un objeto o personaje.

El termino **morphing** aparece a comienzo de la década de los ochenta propuesto por la tecnología informática para el tratamiento de imágenes. En un comienzo desarrollado para transformar imágenes fijas y luego para imágenes en movimiento (video), básicamente consiste en un efecto especial de una película o animación que cambia una imagen en otra mediante una **transición fluida**. Durante los noventa debido a la producción en serie y la competencia entre los fabricantes IBM, Apple y Microsoft; se produce un aumento en el uso de los ordenadores, debido a la disminución del tamaño y costo de los equipos. La técnica del morphing con imágenes fijas se masifica en una serie de programas para el hogar y para profesionales de distinto ámbitos. A finales de los noventa la técnica del morphing con modelos tridimensionales virtuales se consolida dentro de la gama de programas utilizados no sólo para los efectos especiales, sino también para la animación de objetos en general. Así, su utilización ya no es una exclusividad de las empresas relacionadas con los efectos especiales, sino para todo aquel que tenga acceso a programas de modelado y animación.

2.1.1. Primeros tratadistas y científicos.

Es **Nicolas Oresme** en 1350, quien crea la primera representación gráfica del movimiento en el tratado titulado «Sobre las intensidades»⁽¹⁾. Esta representación se organizó a través de un método gráfico donde los cambios característicos de un cuerpo son interpretados en base a intensidades de líneas dispuestas consecutivamente sobre una línea base. Las figuras geométricas están delimitadas por los vértices superiores de las líneas verticales y las intensidades ascienden unas con otras en forma de barras de tubos. Lo novedoso del sistema gráfico de Oresme era que individualizaba y reconocía el movimiento a partir de representar el mismo sujeto

(1) Tractatus de uniformitate et difformitate intensium. MS, Bibliothèque Nationale, París. Impreso en varias ediciones a finales del siglo XV.

en distinto momentos.

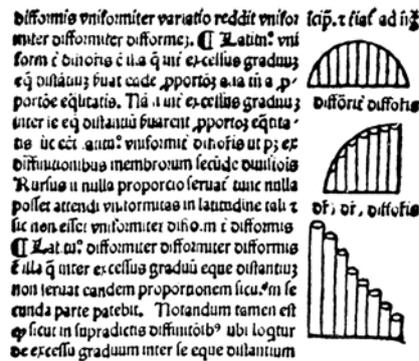


Fig 1. Nicolas Oresme. Representación gráfica del movimiento (año 1350).

Muy tempranamente a modo de bocetos y dibujos, una aplicación elemental del principio de las coordenadas aplicados al estudio de las proporciones, es utilizado en el trabajo de **Alberto Durero** (1471-1528). Durante el período del renacimiento, Durero emplea diversas operaciones de transformación: el estiramiento, fraccionamiento y ajuste proporcional; para generar un sin número de variantes en las formas de la cara humana basadas en cuadrículas de líneas (*De Symmetria Partium in Rectis Formis Humanorum Corporum*)⁽²⁾.

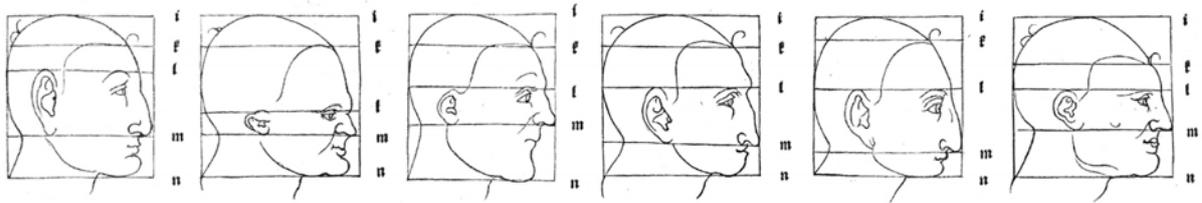


Fig 2. Alberto Durero. Aplicación elemental del principio de las coordenadas al estudio de la proporción. En este método a partir de sutiles variaciones en la magnitud relativa de las partes se transforma y modifica la figura humana, los rasgos y la expresión facial.

Otro método para deformar imágenes fue la práctica de la **anamorfosis**. El término en sí fue creado durante el siglo XVII, sin embargo sus alcances son conocidos desde el siglo XV en las anotaciones de Leonardo da Vinci. El ejemplo típico para esta técnica es el cuadro “Los embajadores” de **Hans Holbein** pintado en 1533. La anamorfosis fue una técnica pictórica que luego derivó en la arquitectura. Consistía en una correspondencia entre la representación plana y la posición espacial del espectador para anular la deformación proyectada, para lo que se valía del efecto de perspectiva forzando al observador a un determinado punto de vista preestablecido. Desde ese punto de vista el elemento deformado por la perspectiva cobraba una forma proporcionada y clara.

(2) Dürer, Albrecht, and Walter L. Strauss. 1972. The human figure; the complete “dresden sketchbook.”. New York: Dover Publications.



Fig 3. Hans Holbein - Los embajadores (1533). El verdadero nombre del cuadro es “Jean de Dinteville y Georges de Selve”. Holbein pinta una calavera en la parte inferior central de la pintura, que sólo puede ser reconocida a partir de una vista ubicada en un punto muy cercano a la superficie de la tela.

En 1779 **Griffon y Vincent** desarrollan un método de representación gráfica del trote de un caballo. Según el fisiólogo francés Étienne-Jules Marey (siglo XIX) lo particular de este estudio era que el método utilizado representaba el movimiento centrado en un punto estático.

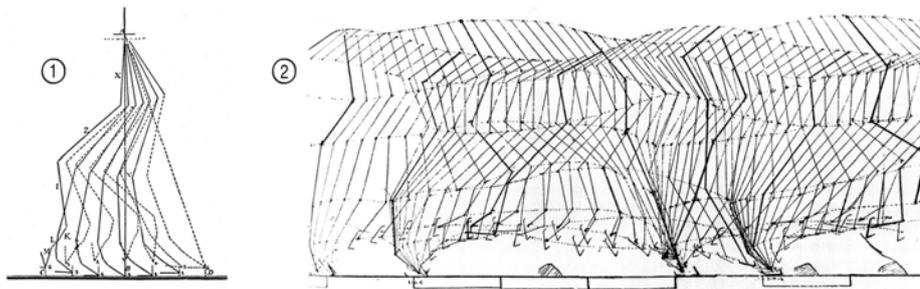


Fig 4. (1) Griffon y Vincent (1779). Representación gráfica del trote de un caballo. (2) Etienne-Jules Marey (1886). Diagrama de la pata derecha de un caballo con paso de caminante.

D’Arcy Thompson, con su obra “*On Growth and Form*”⁽³⁾ escrita en 1917, desarrolla una morfología basada en las correlaciones entre forma y crecimiento a partir de fenómenos físico-mecánicos. Thompson describe las transformaciones de la forma natural como réplica a las fuerzas del entorno. Así, pasa de una concepción estática de la forma (separada de las interacciones externas) a un entendimiento dinámico, donde la forma natural presenta una disposición continua a la transformación, a partir de la incorporación de las acciones exteriores (originarias).

(3) Thompson, D’Arcy Wentworth, John Tyler Bonner, and Ana María Rubio Díez. 2003. Sobre el crecimiento y la forma. Madrid: Cambridge University Press.

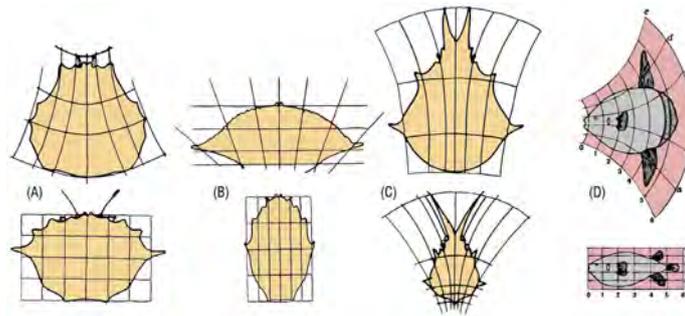


Fig 5. D'Arcy Thompson. **(A)(B)(C)** Caparazones de varios cangrejos, formas inscritas en coordenadas equidistantes rectangulares y transformación a formas más alargadas en una dirección transversal, en otros casos el caparazón se ajusta a un diagrama triangular con formas curvilíneas y un sistema de ordenadas ligeramente curvas y convergentes. **(D)** Análisis comparativo de dos peces: Transformando la red de coordenadas rectangulares donde se traza el primer pez, se logra una correspondiente red deformada de líneas curvas donde se encuadra el segundo pez de la comparativa.

El ejemplo clásico que ilustra su pensamiento sobre la forma, es la del alfarero que modela su obra a partir de una masa informe de arcilla. Para él la arcilla corresponde a un objeto o porción de materia con una forma afín y sobre ella actúan fuerzas externas que presionan y producen un cambio deformativo. Esta deformación puede llegar a ser una verdadera transformación correspondiendo al proceso natural de crecimiento o efectos de fuerzas que transforman una forma en otra. Para Thompson, la forma de un objeto o de una porción de materia (viva o no) es un “*diagrama de fuerzas*”. Estas fuerzas son responsables de la conformación del organismo y su permanencia formal resulta del equilibrio de las fuerzas actuantes.

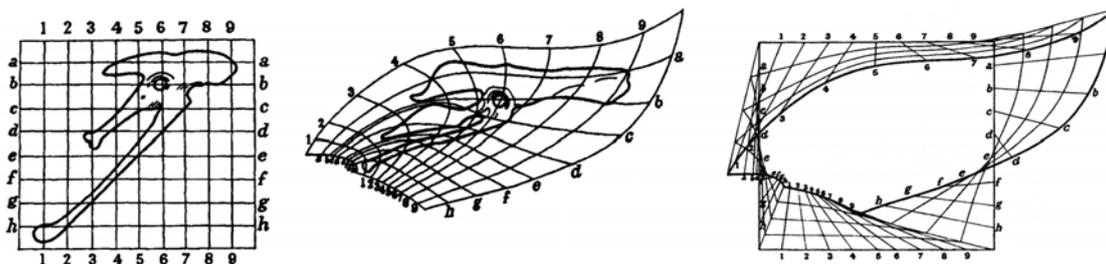


Fig 6. D'Arcy Thompson. **(Izq) (Cen)** Estudio comparativo de la pelvis de pájaros. **(Der)** Los sistemas de coordenadas del estudio comparativo con tres sistemas intermedios interpolados. En estos estudios dibuja estructuras hipotéticas, suponiendo que deben haber variado a partir de una forma conocida de un modo definido. Lo particular del estudio es representar estadios intermedios o reconstruir estadios de transición que el proceso de la evolución debe haber recorrido sucesivamente a partir de algún tipo ancestral a su presunto descendiente.

En el capítulo de su libro que habla **sobre la teoría de las transformaciones**, utiliza las transformaciones cartesianas mediante el método de las coordenadas. Proporciona una de las primeras descripciones geométricas de una deformación variable a modo de ejemplo para un desarrollo morfológico discontinuo. Sus deformaciones cartesianas y sus uso flexible de la geometría, sugieren una alternativa para las transformaciones morfológicas estáticas de tipologías arquitectónicas.

En una trama de coordenadas rectangulares inscribe el contorno de una figura animal, luego produce alteraciones o deformaciones del sistema de coordenadas con el fin de estudiar la correspondiente transformación de la curva o figura inscrita en el entramado. Al final del capítulo propone un sistema de coordenadas tridi-

mensionales y su utilización en la transformación de morfologías animales en un espacio tridimensional. Es interesante la explicación que da al coeficiente peso-longitud en los peces: en dos peces de aspecto muy diferente presentan casi el mismo volumen cuando tienen la misma longitud, es decir, la dimensión en la que un pez se ha ensanchado está precisamente compensada por la dimensión en la que el otro pez de la comparativa se ha aplanado o adelgazado (existe una compensación de las partes).

2.1.2. Fotografía y Cinematografía.

En 1851, el inglés **William Henry Fox Talbot** desarrolla un método admirable para la época, logrando las primeras y verdaderas fotografías de detención de movimiento. La luz del sol (la luz que disponían en ese entonces) no lograba detener el movimiento en la impresión fotográfica, provocando un desenfoque causado por la cinética de los objetos. Debido a que los obturadores más veloces no eran capaces de brindar la suficiente luz natural para que sus objetivos sensibilizaran la emulsión con una exposición breve, decidió utilizar otra fuente luminosa que se apagaba y encendía muy rápidamente. El método consistía en disponer en una sala oscura una cámara con el objetivo abierto, no utilizando el obturador sino un breve destello de luz que iluminaba el objeto a fotografiar por medio de una chispa. La duración del destello era muy breve (aproximadamente 1/100.000 seg.) pero con una cantidad suficiente de luz para iluminar intensamente una superficie próxima y lo suficientemente corta para frenar en la emulsión cualquier objeto en movimiento.

La mejora gradual de objetivos, obturadores y emulsiones produjo un avance en la obtención de fotos a objetos en movimiento en exteriores. Uno de los pioneros en esta temática fue el aventurero inglés **Eadweard Muybridge**.

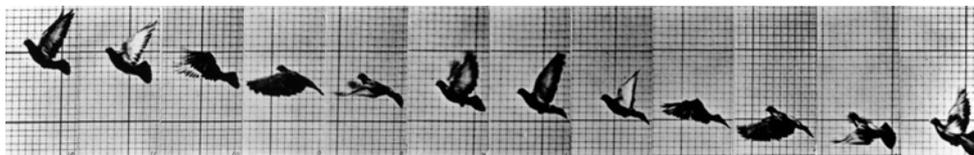


Fig 7. Eadweard Muybridge (1884-85). Placa N° 755: Animales Salvajes y Pájaros, Pichón volando, Animales, Locomoción animal.

En 1872 Muybridge, comenzó a trabajar para un adinerado llamado Leland Stanford. Éste era gran amante de los caballos y desafió a Frederik MacCrellich sobre si un caballo al trotar tendría todas sus patas en el aire en algún momento de su carrera. Muybridge implementó una pista de caucho con un fondo marcado por líneas horizontales para marcar las alturas sobre el suelo. Colocó primero doce y luego veinte y cuatro cámaras cada treinta centímetros enfocando a la pista, con el fin de lograr una secuencia de disparos activado por un sistema eléctrico que se iniciaba cuando el caballo rompía un hilo transversal a la pista. Muybridge en un comienzo utilizó un obturador que había mejorado logrando tiempos de exposición muy cortos para la época. La lentitud de las placas y objetivos, le permitieron obtener negativos muy subexpuestos. Finalmente, las fotos demostraron que el caballo en un momento de su trote mantenía las cuatro patas levantadas del suelo.

Con el tiempo mejoró su técnica, utilizó emulsiones y objetivos más rápidos consiguiendo fotos con una gran

variedad de animales en movimiento, además de hombres, mujeres y niños realizando diferentes actividades con su figura desnuda.

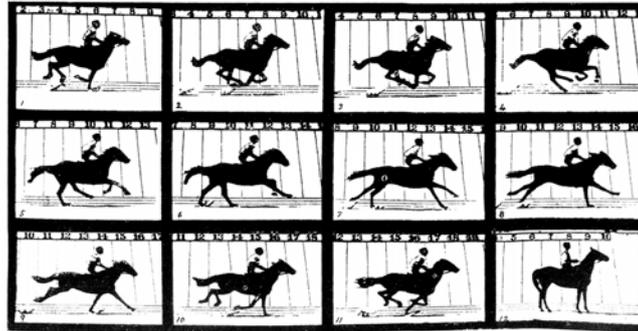


Fig 8. Eadweard Muybridge. Fotogramados hechos de sus secuencias fotográficas del galope del caballo. La Nature, Diciembre 1878. New York Public Library.

Étienne-Jules Marey (1830-1904), centró su pensamiento inagotable alrededor de un solo concepto: *el movimiento*⁽⁴⁾. Investigó este concepto en todas sus formas: desde el torrente sanguíneo, la estimulación de músculos, el trote de los caballos, el vuelo de los insectos y aves, hasta los remolinos en las corrientes de aire. Marey se interesó por la fotografía como medio de expresión de lo real no develado. Es así como crea un aparato a partir del homónimo invento ideado por su colega Janssen, el “**revolver astronómico**”, el cual servía para captar el paso de los planetas o estrellas en movimiento. Él por su parte crea el “**fusil fotográfico**” con el cual consigue seguir el vuelo de las aves y retratarlo.

Los estudios fotográficos de Muybridge también tuvieron su impronta sobre Marey, el cual lo invita a París para debatir sobre la problemática del movimiento junto a otros científicos de Europa. Marey difiere en relación al método de Muybridge, debido a que el americano utiliza una serie de cámaras fotográficas una al lado de la otra, donde cada una de ellas fotografía un momento aislado del movimiento. Marey por su parte, conocedor de la fisiología, capta el movimiento en una sola fotografía y con un solo punto de vista, registrando un movimiento continuo.

Con la temática de las aves enfatizó la percepción del carácter tridimensional del vuelo, enfocando tres cámaras en distintas posiciones (desde arriba, por el lado y el frente) con el fin de captar la acción simultáneamente. Luego realizó diagramas superpuestos a partir de las secuencias fotográficas, llegando a modelar la secuencia completa de la acción de volar. Continuando con sus investigaciones creó un procedimiento llamado “**cronofotografía**”. Este procedimiento permitía visualizar la evolución del movimiento en el espacio, colocando señales (en contraste con el fondo negro) que producían un trazo luminoso en la placa fotográfica y definían trayectorias, descubriendo “*movimientos que el ojo humano no percibe*”.

(4) Entre su bibliografía cabe destacar: La méthode graphique dans les sciences expérimentales, París, 1885. Le Mouvement, París, 1894.

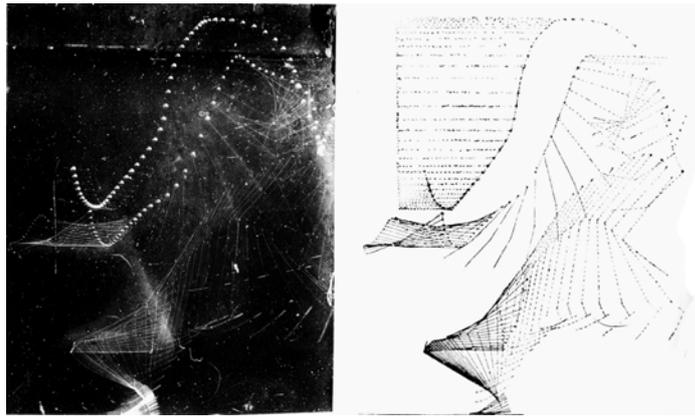


Fig 9. Etienne-Jules Marey - Analisis de un salto (1884). **(Izq)** Crono-fotografía de un salto desde altura con las rodillas flexionadas para amortiguar el impacto. **(Der)** Diagrama hecho a partir de la fotografía.

Marey fue uno de los primeros morfologistas que explora el estudio de la forma en el entonces inalterable espacio cartesiano, carente de fuerza y movimiento. El estudio de ritmos, movimientos, pulsos y flujos; junto a sus efectos en la forma son los distintos factores que activan el espacio, a los cuales denominó “*evidencia motora*”.

En su libro “**Animal Mechanism**” desvió su atención del estudio de pulsos internos y ritmos hacia los movimientos externos de los animales. A diferencia de Muybridge y otros que también utilizaron técnicas de cronofotografía, Marey provocó las exposiciones con sensores neumáticos y eléctricos localizados en los animales. Esto, junto con su método de atar discos ópticos reflectantes diminutos, permitió a Marey poner secuencialmente las exposiciones con ritmos de movimiento. Es por ello que **Dagognet**⁽⁵⁾ describe a Marey “*persiguiendo movimientos*”, no “*momentos*” en su continuo registro de datos.

Marey superponía las secuencias de imágenes en una sola lámina, describiendo las distintas fases de la acción mediante la asociación de puntos, los cuales trazaban líneas curvas. Representó el movimiento a través del tiempo, como un flujo curvilíneo continuo estampando rastros del movimiento vectorial. El modelo de Marey representa fragmentos de tiempo basados en la inflexión y la curvatura de los caminos del movimiento. Sus imágenes representan trayectorias y flujos, que son los elementos representativos en los procesos de edición de las actuales técnicas de animación por ordenador.

(5) Dagognet, François. 1992. Etienne-jules marey : A passion for the trace. New York; Cambridge, Mass.: Zone Books ; Distributed by the MIT Press.

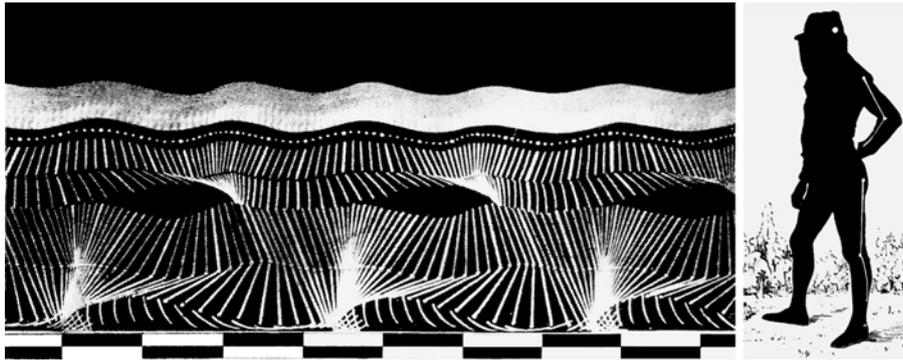


Fig 10. Etienne-Jules Marey. (Izq) Joinville soldier walking (1883), las medidas métricas del fondo de la imagen se han acentuado al invertir la imagen. (Der) Sujeto vistiendo traje negro con líneas blancas y puntos.

En 1900 el inglés **A. M. Worthington**, desarrolla con destellos de chispas diminutas escenas de instantes con formas de salpicaduras, al incidir pequeños objetos sobre la superficie de los líquidos.

En 1895 **los hermanos Lumière** proyectan públicamente una película con imágenes de obreros saliendo de una fábrica, dando inicio a la cinematografía. El éxito de este invento fue inmediato, pero con el pasar del tiempo los espectadores acabaron aburriéndose con la monotonía de las grabaciones. Los efectos fantásticos con la imagen en movimiento hacen su aparición a comienzos del mil novecientos por obra de **George Méliès**.



Fig 11. Georges Méliès - The Untamable Whikers, 1904.

Méliès por casualidad descubre una técnica que permitía transformar objetos durante la grabación. Filmando escenas de la vida callejera cerca de la Opera de París, de improviso un autobús se atravesó en frente de la cámara, volcándola. Tras reanudar la escena con el autobús alejado, coincidió que justo en ese instante una carroza fúnebre pasaba frente a la cámara. Al revelar la película y con gran asombro para él, resultó que en la secuencia filmada el autobús terminaba transformándose en un coche fúnebre. Después de este descubrimiento Méliès se dedicó a experimentar con esta nueva y primeriza técnica de efectos fantásticos.

Haciendo uso de su experiencia en el teatro, construyó uno de los primeros estudios de grabación y set de efectos especiales. Para él estas técnicas tenían el poder de trascender los conceptos normales de la realidad, facultándolo para crear un mundo completamente imaginario. Realizó un centenar de cortos con efectos especiales, controló cada elemento en la escena del cuadro y demostró las fantásticas capacidades técnicas que ofrecía el mundo de las imágenes en movimiento.

El español **Segundo de Chomón**, director, fotógrafo y creador de efectos especiales, fue contratado por **Pathé** para competir con **Georges Méliès** para realizar películas fantásticas. Chomón fue uno de los pioneros del morphing en «**La licuefacción de los cuerpos duros**» (1908). Deformó el cuerpo de una persona, sustituyendo

los actores por maniqués de alambre aplastados que reducían su tamaño y al final se convertían en una masa informe que se diluía. La técnica que inventó permitía segmentar la grabación, con el fin de ir modificando y animando un objeto fotograma por fotograma. Con esta técnica podía obtener pequeños tramos de filmación que al unirlos parecían una escena continua (actualmente esta técnica es la que se utiliza para hacer **stop motion**).

Cabe mencionar otra técnica utilizada en el cine y video, que fue usada poro décadas y que consistía en transformar imágenes con objetos similares mediante un fundido (**cross-dissolve**). La técnica lograba hacer una transición entre dos objetos con formas emparentadas, representadas por dos imágenes diferentes. Un ejemplo clásico de este efecto es la secuencia de transmutación de la versión del año 1941 del “**Dr. Jekyll and Mr. Hyde**” del director **Victor Fleming**.



Fig 12. “Dr. Jekyll and Mr. Hyde” del director Victor Fleming (1941). Escenas en que se transforma el Dr. Jekyll en Mr. Hyde.

En 1912 **Frank B. Gilbreth** es el primero en registrar en forma precisa el ciclo de un movimiento: obtiene imágenes con una exactitud absoluta de la conducta motora de la mano al ejecutar una tarea. Gilbreth, ingeniero de la productividad, desarrolló un método científico para el seguimiento de una trayectoria en un proceso productivo, evaluando variables como el espacio y el tiempo. Como científico impuso un cambio rotundo en el análisis del trabajo desarrollado por un hombre versus un proceso de mecanización, instaurando leyes exactas en la esfera humana del trabajo: “*El estudio del tiempo...es el arte de registrar, analizar y sintetizar el tiempo de los elementos de cualquier operación*”.⁽⁶⁾

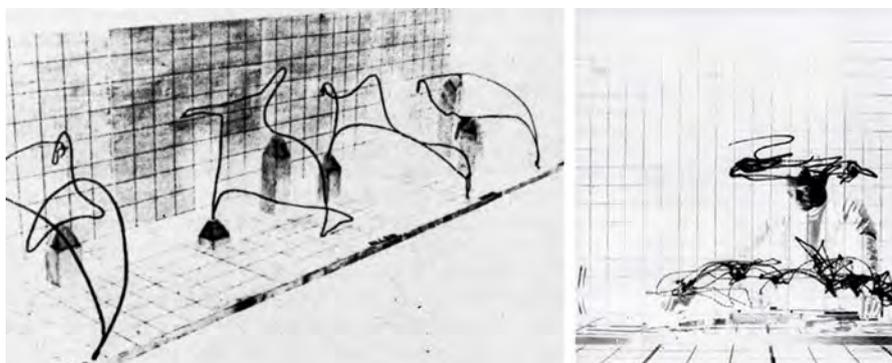


Fig 13. Frank B. Gilbreth. (Izq) Movimiento traducido en modelos de alambre (1912). (Der) Foto invertida de un estudio de movimiento. Gilbreth desarrolla un mecanismo llamado ciclógrafo o “registrador del movimiento”, el cual consistía en un espacio de prueba con un fondo negro que tenía una red de coordenadas para registrar la acciones dentro de

(6) F.B.Gilbreth, Primer of Scientific Managament, Nueva York, 1914, p. 7.

cuadrantes. La parte del cuerpo que realizaba la acción le sujetaban un elemento luminoso, estos dejaban impresa una trayectoria en la placa de una cámara fotográfica corriente. Los trazos luminosos dejaban ver cualquier movimiento anormal al automatismo de la acción realizada por el trabajador, evidenciando grados de error y la perfecta ejecución de la acción. Las imágenes captadas luego las transformaba en modelos construidos con alambres creando formas sinuosas y bucles, situaciones donde la trayectoria del movimiento presenta una plástica propia.

En 1931 **Harold Edgerton** realiza un gran avance para la fotografía de alta velocidad. En ese entonces estaba interesado en la observación del comportamiento de un motor eléctrico a gran velocidad. Sin embargo a simple vista no era posible captar el movimiento con que giraba el motor y los sistemas de iluminación que disponían no eran capaces de lograr la suficiente luz para detener el objeto en movimiento. Edgerton desarrolló un aparato que permitía dar la suficiente luminosidad para detener las acciones rápidas por unos instantes. Este artefacto era una fuente potente de iluminación momentánea: la luz de **flash electrónico**.

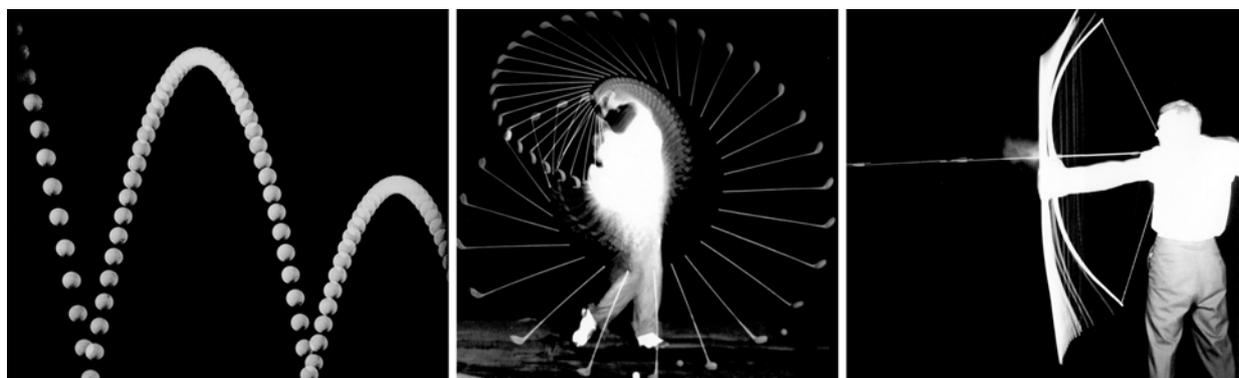


Fig 14. Fotografías de Harold Edgerton. **(Izq)** Esta secuencia registra exactamente la disminución de velocidad y de altura experimentada en el rebote de una pelota de golf. Para ello utilizó un flash electrónico que emitía destellos repetidos a velocidad constante para producir exposiciones múltiples de una duración inferior a $1/100.000$ de segundo. **(Cen)** Densmore Shute (1938). El golpe de Densmore Shute, que aparece en esta exposición múltiple con flash electrónico de $1/100.000$ de segundo cada $1/100$ de segundo, muestra que la pelota se aparta instantáneamente del palo de golf al ser golpeada. **(Der)** Arquero (1934). Una de las primeras fotografías del multiframe, el cuerpo del arquero aparenta estar desmaterializado. La intensa luz del estroboscopio, destellando 100 veces por segundo por casi la mitad de un segundo, borrando todo el detalle. El flash continuó iluminando el arco y la larga cuerda luego de la salida de la flecha.

2.1.3. Gráficos por Ordenador y efectos especiales.

A mediados de los sesenta con los avances de la informática, que abarca el estudio y aplicación del tratamiento automático de la información, acompañados de los avances en la carrera espacial, produjeron que las **Imágenes Generadas por ordenador**⁽⁷⁾ tuvieran un desarrollo que dura hasta la actualidad. La técnica actual del morphing deriva del desarrollo de los métodos gráficos por ordenador. Fue la **NASA** quien desarrolló técnicas de procesamiento de múltiples imágenes para poder captar las imágenes de la tierra desde el espacio. Las imágenes digitales captadas tenían múltiples puntos de vista de la misma región. Para superponerlas se realizaban transformaciones geométricas con el fin de alinear las imágenes entre sí. Para esto era necesario compensar las distorsiones, como las aberraciones de la lente y las diferencias en los ángulos de visión.

(7) Computer-generated imagery (CGI): Es el campo de la informática visual, donde se utilizan ordenadores para generar imágenes visuales en forma sintética.

Tom Brigham, un programador y animador en el New York Institute of Technology presentó una sucesión de cortometrajes en la conferencia del **SIGGRAPH 1982**. Brigham había creado una secuencia de video donde una mujer se distorsionaba y transformaba en la forma de un lince. Así nació una nueva técnica llamada “**morphing**”. Sin embargo y a pesar de la gran impresión sobre los espectadores de la conferencia, nadie parecía prestar mucha atención a la técnica implementada por Brigham.

“...La nariz de la mujer fue estirada a mitad de camino desde donde estaba el lince, y la nariz del lince fue empujada hasta encontrarse con la nariz de la mujer, junto a otras características de forma similar. Como la punta de la nariz se movió, el color de los alrededores se trasladó de forma proporcional. A continuación, un fundido hizo desaparecer a la mujer y apareció el lince simultáneamente con el cambio de topología”. (Sorensen, 1992)⁽⁸⁾

Pocos trabajos se realizaron con esta técnica hasta mediados y finales de los ochenta. En este periodo, dos compañías de efectos especiales ambas de California, **Industrial Light & Magic (ILM)** y **Pacific Data Images (PDI)** surgieron y se convirtieron en líderes de la industria del entretenimiento con la producción de efectos especiales con técnicas de morphing. **ILM** trabajó en películas como **Willow**, **El Abismo**, **Terminator 2**, y posteriormente, **La Máscara**, entre otras. **PDI** trabajó en proyectos comerciales publicitarios como el tigre de **Exxon** y el comercial de **Chrysler Plymouth Voyager** (1991), así como también la película **Batman Returns** y el vídeo musical de Michael Jackson “**Black or white**”.

En la película **Star Trek IV: The Voyage Home** (1986, **ILM**), se realiza uno de los primeros morphing comerciales. Se trataba del primer morphing tridimensional utilizando por primera vez el **Escáner 3D Cyberware**. La secuencia mostraba un imaginario viaje en el tiempo donde las caras de la tripulación de la Enterprise parecen mezclarse entre sí. Para esto se escaneó las cabezas de los personajes y fueron representadas como ciber-esculturas inmatriciales. Esta técnica fue revolucionaria para la época, incluso es anterior a los primeros morphing 2D que tienen menor dificultad técnica. Al tener un modelo tridimensional digitalizado, el modelo resultante estaba basado en las dimensiones auténticas del objeto real, transmitiendo las coordenadas de la forma y las distintos rasgos de los personajes. Una vez que se escaneaba el personaje, el modelo 3D podía ser modificado, distorsionado, sometido a un morphing o combinado con otros elementos de la imagen. Debido a que cada modelo de la cabeza tenía el mismo número de puntos claves como referencia, la transformación de un personaje a otro fue simple. Más difícil fue según los animadores, garantizar que la transformación se viera “agradable” y no “grotesca”. El resultado de treinta segundos de metraje tomó varias semanas de producción y se utilizaron todos los equipos que pudieron encontrar para ayudar en las tareas de cálculo.



Fig 15. Imágenes de la película *Star Trek IV - The Voyage Home* (1986), del director Leonard Nimoy.

(8) Sorensen, Peter. 1992. Morphing magic. *Computer Graphics World* 15 (1) (January): 37-42.

En el año 1987, **LucasFilm** utilizó la técnica de morphing 2D en la película “**Willow**”, siendo la primera en utilizar una técnica fotorrealista y un morphing con detalles. Los efectos en donde un animal se transformaba en otro, fueron hechos utilizando una técnica de deformación de mallas (retículas) creadas por **Tom Brigham y Douglas Smythe** de **Industrial Light & Magic**. Smythe desarrolló el programa informático “**Morf**”, cuya técnica consistía en interpolar entre los píxeles de la imagen inicial y final una correspondencia que se establecía mediante estas retículas o rejillas de control. Este sistema de control eran retículas cuadrangulares de puntos que permitían establecer una correspondencia entre puntos de una imagen y de otra. A partir de esa información el ordenador podía transformar ambas imágenes, era una tarea tediosa y para obtener buenos resultados había que identificar puntos similares en ambas imágenes y hacer la correspondencia. Esta película marcó la revolución en el mundo de las imágenes generadas por ordenador, al demostrar que una acción en vivo podía ser convertida a un formato manipulado por un sistema computarizado y luego re-introducida en el formato de la película.



Fig 16. Escenas de la película “Willow” (1988) del director Ron Howard. Una de las primeras películas que utiliza el morphing, en las imágenes una tortuga se transforma en un tigre y a continuación un tigre se transforma en una mujer.

Para la película “**El Abismo**” (The Abyss, 1989), **ILM** utilizó la técnica del morphing 3D junto con técnicas tradicionales de animación por ordenador para crear una criatura alienígena con forma serpenteante. Al estar compuesta de agua, la criatura podía reorganizarse en cualquier forma. Es así como en un momento de la secuencia, la criatura de agua adopta las facciones de los protagonistas. Para que resultara creíble se optó por construir un modelo tridimensional de las caras de ambos actores mediante un scanner láser cyberware 3D y para realizar la transición de formas se utilizó un morphing 3D.



Fig 17. Imágenes de la película “El Abismo” (1989) del director James Cameron. **(Izq)** Actriz con el scanner láser cyberware 3D. **(Cen)** La criatura de agua adopta las facciones de los protagonistas. **(Der)** Criatura compuesta de agua.

Otro ejemplo del uso de morfologías complejas y modelos 3D, fue los efectos especiales realizados por **ILM** en “**Terminator 2: Judgment Day**” (1991). Fue una de las primeras películas en las que se utilizaron imágenes generadas por ordenador (CGI)⁽⁹⁾ para recrear al antagonista, un policía cyborg con un cuerpo amorfo que podía experimentar una serie de transformaciones continuas y fluidas, con formas humanas y no humanas.

La mayoría de los efectos especiales de deformación y morphing de esta película fueron creados con **PowerAnimator**, también conocido como **Alias Wavefront** y que en la actualidad es **Autodesk Maya**. **PowerAnimator** corría con **IRIX**, un sistema operativo compatible con Unix, creado por **Silicon Graphics**. Era utilizado en las

(9) Computer-generated imagery.

estaciones de trabajo de **Silicon Graphics**, que a principios de los noventa tenían la capacidad de cálculo para realizar las complejas transformaciones en 3D.



Fig 18. Escenas de la película “Terminator 2: El juicio final” del director James Cameron. El antagonista (T-1000) formado de metal líquido automoldeable, se transforma desde una masa amorfa y adopta la forma de un policía.

El morphing 3D fue utilizado para animar la reconstitución del cuerpo del personaje formado por metal líquido automoldeable. Una de las escenas mas difíciles y que fue desarrollada con la técnica del morphing, es cuando el personaje T-1000 sale caminando de unos restos en llama de un camión y pasa de estar en un estado metálico a adoptar la apariencia del actor. Para definir los pasos en el diseño de la transformación del T-1000, se dividió en cuatro fases distintas la forma que adopta la criatura de metal. En la primera etapa, es una mancha amorfa de metal líquido. En la segunda, es aproximadamente una forma humana, pero sin rasgos distintivos. En la tercera fase, es un hombre claramente definido pero de apariencia metálica. Y en la etapa final, es en forma virtual una réplica de cromo del actor. El proceso se perfeccionó mediante la creación de pequeños modelos reales de la T-1000 en cada etapa. Esto facilitó a los animadores y los ingenieros de software tener algo real que pudieran estudiar y dar siempre un sentido de cómo el personaje finalmente debía solidificarse en un hombre.



Fig 19. Secuencia de la película “Terminator 2: El juicio final”. En esta escena, el antagonista sale caminando desde unos restos en llama de un camión y pasa de estar en un estado metálico a adoptar la apariencia del actor.

Uno de los ejemplos más renombrados en televisión que utilizaba una técnica de transformación 2D, fue el videoclip «**Black or White**» de **Michael Jackson** (1991, **PDI**) dirigido por John Landis. Al final del video una sucesión de rostros de distintas etnias y nacionalidades van transformándose progresivamente de uno en uno con gran fluidez.

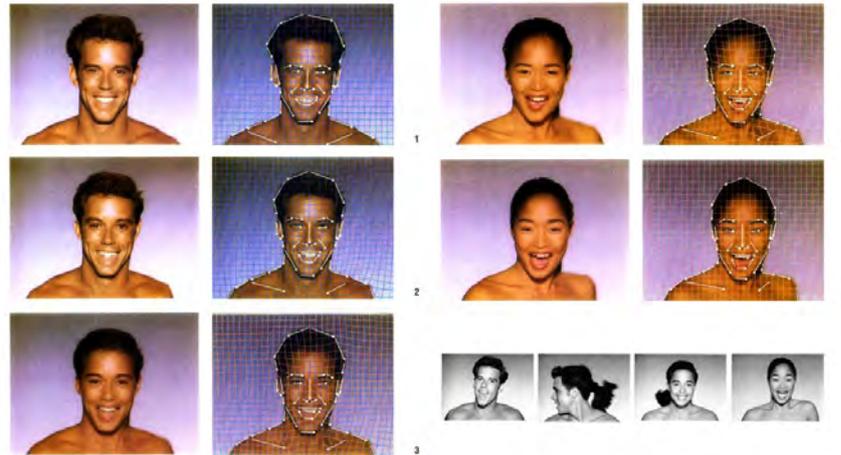


Fig 20. Secuencia del videoclip de Michael Jackson - "Black or White" (1991).

Otro video de la industria musical donde se utilizaron técnicas de morphing y deformación fue el video clip de **David Byrne** "She is mad" (1992, **PDI**). Los efectos especiales estuvieron a cargo de **Carlos Argüello** y **Michele Ferrone**. Durante el videoclip el cantante se transforma en diferentes formas elásticas y va deformando su cuerpo en movimiento.



Fig 21. Secuencia del videoclip de David Byrne - "She is mad" (1992).

En el anuncio publicitario de **Exxon** (1992, **PDI**), se veía como un automóvil en movimiento se transformaba en un tigre corriendo. La transición se llevó a cabo haciendo filmaciones independientes sobre un fondo azul con el tigre corriendo, el automóvil en movimiento y otra toma independiente con el fondo de la carretera. Se obtuvieron las grabaciones de una película limpia del tigre, el automóvil y el fondo real. Luego los infografistas tomaron estos elementos y fueron traspasados al ordenador. Con el proceso del morphing, se realizaron las mezclas de imágenes (en video), la transición se efectuó manteniendo el tamaño del tigre similar al del automóvil y se evaluó la rapidez con que la transformación se producía. Por último, tras realizar la transformación (tigre-vehículo), las imágenes se combinaron con el fondo real para obtener el video final.



Fig 22. Anuncio publicitario de Exxon (1992), transformación de un automóvil en un tigre.

2.1.4. Programas de morphing.

El primer software para ordenadores personales en ofrecer la técnica del morphing para imágenes fijas fue Gryphon Software con **Morph** para Macintosh. Posteriormente aparecieron otros sistemas que incluían la técnica del morphing como **ImageMaster** de Black Belt Systems, **MorphPlus** de ASDG y **CineMorph** de Great Valley Products (GVP), gestionados por el Commodore Amiga en 1992.

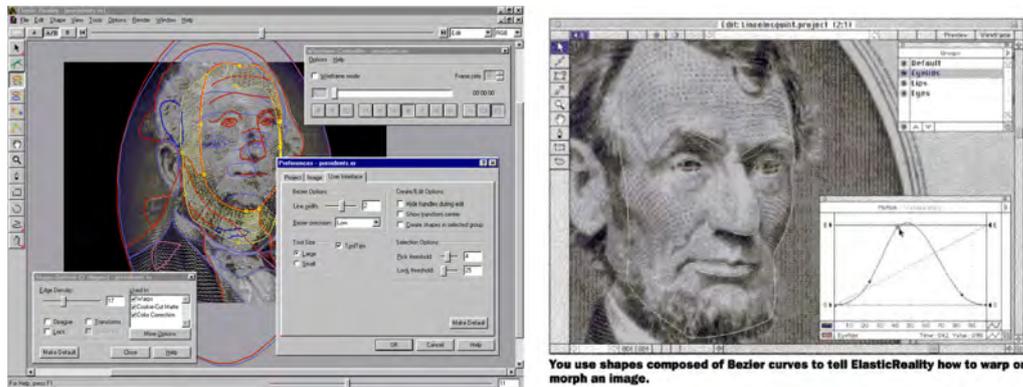


Fig 23. Imágenes de pantalla del programa de morphing Elastic Reality.

En la gama alta de programas para morphing 2D (edición de video - fotograma) estaba **Elastic Reality** (basado en MorphPlus), originalmente creado en 1994 por **Paul Miller** de **ASDG** en colaboración con **Ted Fay** de **VisionArt**. El éxito del producto hizo que la empresa fuera adquirida por **Avid Technology** en 1995, pasándose a llamar **Softimage Elastic Reality**. Se convirtió en el programa habitual para el uso del morphing en la industria cinematográfica y televisiva ("Star Trek: Deep Space Nine", "The Mask" y "Batman Forever"). En 1996, **Garth Dickie** y **Perry Kivolowitz** ganan dos premios de la Academia por el desarrollo de un efecto llamado "*spatially-warped cross-dissolve*". El último lanzamiento del programa fue en diciembre de 2006 como **Softimage XSI v6.0**, cuyas características ofrecía un módulo integrado de composición de imágenes en dos dimensiones que derivaba del **Avid Media Illusion 6.0**. En el 2008 **Autodesk** adquiere **Avid** y el producto pasa a llamarse **Autodesk Softimage**.

Después que esta técnica de transformación se volviera popular, se han creado un sin número de aplicaciones de morphing 2D, sobre todo las que realizan la transformación entre imágenes fijas (**FantaMorph**, **Morpheus Photo Morpher**, **Fun Morph**, **Morph Man**, **Magic Morph**, **FaceMorpher**, etc). Dentro de las aplicaciones gratuitas están **WinMorph** (Windows) y **MorphX** (Mac) entre otras. De los programas de aplicación para edición de videos, **Final Cut Studio** tiene un plug-in llamado **Morphing FX** de CHV-electronics y **After Effects** tiene variadas herramientas para hacer diferentes tipos de morfismos y filtros que reconfiguran o interpolan formas.



Fig 24. Imágenes de pantalla de los programas de morphing Magic Morph y WinMorph.

En la actualidad, los software para el desarrollo avanzado con técnicas de animación en 3D tienden a variar en complejidad y sofisticación. En términos generales todos tienen herramientas que permiten crear mezclas, transformaciones o morphing entre formas. Un programa gratuito de nivel intermedio es el programa **Blender**. En la gama alta dentro de los programas de aplicación con licencia, donde por lo general cada programa se caracteriza por su propio estilo de trabajo y un tipo de aplicación propio, se pueden encontrar: **LightWave 3D** de Newtek, **Autodesk Softimage**, **Autodesk Maya**, **Autodesk 3ds Max**, **Houdini** de Side Effects Software y **Cinema 4D** de Maxxon, entre otros. Otro tipo de programas pero con una aplicación mas definida hacia la caracterización y animación de personajes, tanto para animación facial como para el movimiento de personajes son entre otros: **FaceGen** de Singular Inversions, **Poser** de Smith Micro Software, **ZBrush** de Pixologix, **Blacksmith3D** y algunos otros programas de propiedad de Autodesk.

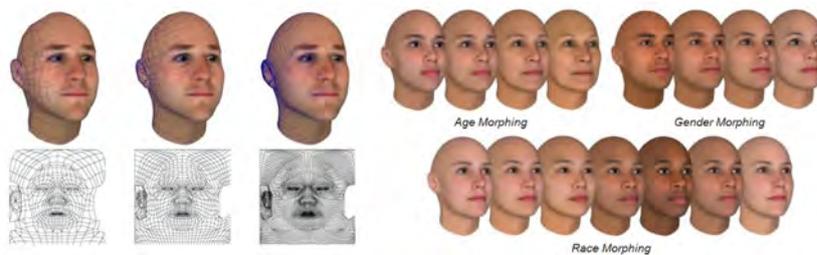


Fig 25. Programa de animación facial FaceGen. Este software permite el control paramétrico de los rasgos de la cara, puede realizar transformaciones tanto en edad, en sexo y en el tipo de raza, como también un morphing entre distintos tipos de rostros.

2.2. Utilización del morphing en arquitectura.

En los noventa y finales de los ochenta, la práctica arquitectónica proyectual de **Peter Eisenman** estuvo influenciada por la utilización de procedimientos y estrategias en el proceso compositivo. Estas estaban relacionadas con el accionar de diferentes herramientas establecidas por los programas CAD. Esta operatoria formativa servía como base instructiva (implementada como comando de software) en los nuevos rasgos compositivos para el diseño de la forma exterior e interior de sus edificios. Eisenman utiliza sistemáticamente toda la gama disponible de instrucciones u operatorias computacionales, las que él llama **herramientas formales**⁽¹⁰⁾ (*Formal Tools*): **extrusión**, **torsión** (*twisting*), **extensión**, **desplazamiento** (*displacement*), **morphing**, **deformación** (*warping*), **variación** (*shifting*), **escalado** (*scaling*), **rotación** (*rotation*) y otros mas.

La aplicación de estos conceptos y el uso de programas informáticos de transformación continua, produjeron composiciones volumétricas con características dinámicas, rasgos de movimiento por superposición, combinación de pliegues, variaciones en la masa y los espacios por torsión en horizontal y vertical, y un sin número de nuevas modificaciones. Cabe destacar los conceptos formales que menciona Eisenman, con el fin de definir la herramienta operatoria que utiliza en los proyectos: Haus Immendorff en Dusseldorf, Alemania (1993) - **Morphing Torsionado** (*Morphing Torquing*), Memorial de víctimas judías en Viena, Austria (1995-96) - **Morphing Mapeado** (*Mapping Morphing*), Iglesia del año 2000 en Roma, Italia (1996) - **Morphing de Superposición** (*Morphing Superposition*), La biblioteca de L'IHUEI en Ginebra, Suiza (1996-97) - **Morphing Anidado** (*Morphing Nesting*).

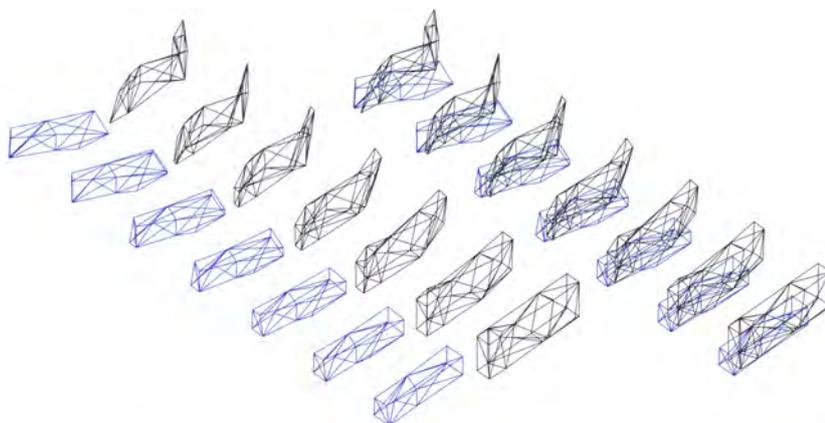


Fig 26. Peter Eisenman, diagramas conceptuales para la Biblioteca de L'IHUEI en Ginebra, Suiza (1996-97).

En estos proyectos la representación del proceso formal será mediante diagramas en 2D y 3D, acompañado de un gran número de secciones. Ante todo son secciones secuenciales en axonométrica, que buscan representar la temporalidad del proceso del morphing. En este sentido, no sólo es interesante los modelos tridimensionales donde va variando secuencialmente la forma (producto del morphing), sino también los modelos secuenciales donde se secciona la forma. Con ellos Eisenman investiga el espacio interior, en una forma de vectorizar el tiempo y el recorrido del espacio.

(10) Ver: Eisenman, Peter, and Robert E. Somol. 1999. *Diagram diaries*. London: Thames & Hudson.

Eisenman explica que en general, la producción de formas se realiza mediante la modificación de condiciones existentes de figura-fondo. Al igual que como ocurre con el morphing, existen dos figuras que interactúan y se entienden de forma diferente, estas figuras pueden producir algo entre ellas. Especialmente la forma se convertirá en un espectro de reflexiones, refracciones y difracciones; donde la interacción produce una **fragmentación del espacio** debido a la concatenación de figuras modificadas.⁽¹¹⁾

En el **Centro de arte y conservatorio de música en Tours - Francia** (1993-1994) mediante una estrategia de “**estriación**”, se establecen una serie de transformaciones en el desarrollo metodológico del proyecto, en los que Eisenman⁽¹²⁾ menciona dos tipos de operatorias: **Morphing de interferencia** (*Morphing Interference*) y **morphing de estriación** (*Striation Morphing*).

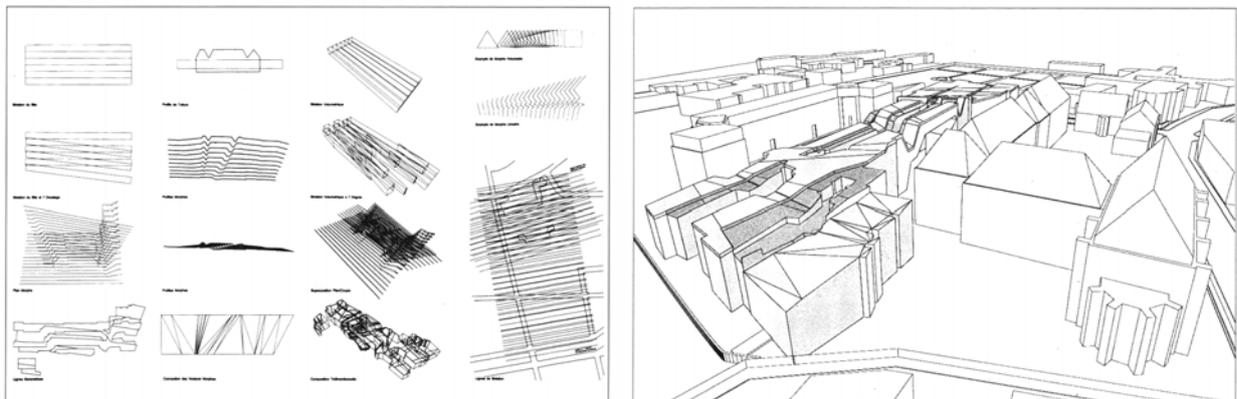


Fig 27. Peter Eisenman, Centro de arte y conservatorio de música en Tours - Francia (1993-1994). (Izq) Diagramas conceptuales (Der) Perspectiva aérea.

En el proceso de morphing se toman dos edificios existentes que enmarcan el sitio y se utilizan como condicionantes del contorno. Se presenta un nuevo tipo de espacio dinámico formado por una alteración y estudio entre las estructuras existentes, esta espacialidad se entreteteje con los edificios existentes, siguiendo las líneas y formas de las **estrias**. El Centro de arte se convierte en una figura intermedia, combinando las características de ambos edificios. El modelo se va componiendo en una serie de capas que marcan la transición de edificios de distinta época. El diagrama del proceso de morphing se convirtió en una secuencia seccionada de patrones que comenzaron a sugerir condiciones de intersticialidad. A los perfiles de la planta y los contornos de la cubierta se les aplica un **morphing**, así se consigue una nueva configuración de la planta y la sección. Los espacios generados son deliberados e incidentales, el exterior depende del interior y viceversa.

(11) Ver: Puebla, Joan. 2002. Neovanguardias y representación arquitectónica: La expresión innovadora del proyecto contemporáneo. Barcelona: Edicions UPC.

(12) Ver: Eisenman, Peter, Stan Allen, and Cynthia Davidson. 2006. Tras el rastro de Eisenman: Peter Eisenman, obra completa. Madrid: Akal.

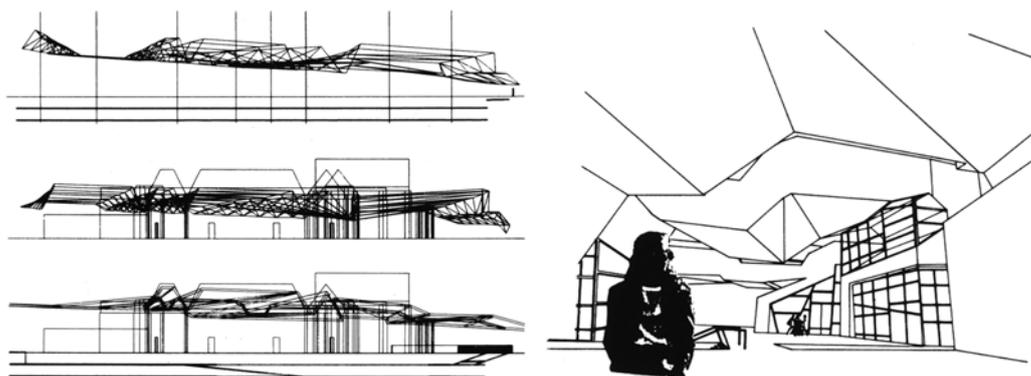


Fig 28. Peter Eisenman, Secciones y perspectiva del Centro de arte y conservatorio de música en Tours - Francia (1993-1994). La utilización del morphing (Striation morphing), permitió que el espacio entre los edificios existentes fuera el lugar de una serie de transformaciones, que fueron registradas sobre las líneas y las formas de la estricción.

Una referencia indirecta que hace mención a un morphing, es el caso de **UN Studio** (Ben van Berkel y Caroline Bos). Con el fin de caracterizar la forma de trabajo de su oficina, frecuentemente hacen referencia a una imagen transformada por el artista **Daniel Lee** de la serie **“Manimals”**. **“Manimals”**⁽¹³⁾ (1993), son varias series de retratos de personas retocadas con Photoshop, que mezclan partes de las imágenes de animales para formar el signo del animal del horóscopo chino. Al final logra obtener retratos híbridos de hombres bestias, Lee explica que sólo utilizó en este procedimiento herramientas de retoque para fotografía, por esto la metodología resulta ser larga y compleja, sin la utilización de algoritmos de software de mezcla. En cambio, en la serie llamada **“Origin”**⁽¹⁴⁾ (1998-99) adopta un punto de vista darwiniano, explorando el tema de la evolución del hombre con otros reinos de criaturas sobre la tierra. Lee transforma con éxito un cuerpo humano completo evolucionando la transformación desde un pez, un reptil y por último, un mamífero. Para este proyecto no sólo utilizó técnicas de retoque fotográfico con Photoshop, sino también un software para morphing como es Elastic Reality, con el que creó una secuencia animada de la serie, que editó con After Effects.



Fig 29. Daniel Lee. (Izq) Manimals (1993), (Der) Origin (1998-99).

Los arquitectos **Sulan Kolatan y William Mac Donald (KOL/MAC Studio)** utilizan otra categoría de procedi-

(13) Lee, Daniel. Manimals. “MANIMALS” 1993, [en línea]. New York, Tokio, Taipei: Daniel Lee, represented by O.K., 2006.[Consulta: 13 Octubre 2011]. Disponible en la Web: <<http://www.daniellee.com/Manimal.htm>>

(14) Lee, Daniel. Manimals. “ORIGIN”1999-2003, [en línea]. New York, Tokio, Taipei: Daniel Lee, represented by O.K., 2007.[Consulta: 13 Octubre 2011]. Disponible en la Web: <<http://www.daniellee.com/Origin.htm>>

mientos temporales para diseñar arquitectura. Su proyecto **“Housing”** (1999), es una propuesta que constituye una porción inicial de un proyecto a largo plazo, orientado al diseño experimental de **personalización masiva** (*mass customization*) y casas prefabricadas. Buscan desarrollar un prototipo de vivienda específico para todo el país y además, utilizar estos modelos como una serie de “casas normativas”.

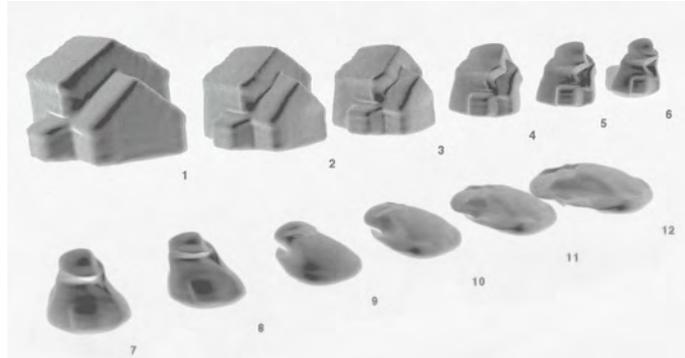


Fig 30. Kolatan y Mac Donald - “Housings” (1999). Operaciones de mezcla imaginarias en el proyecto de viviendas. Este es una de las variantes dentro de muchas posibles transformaciones, a través de la “casa colonial” (base) y los múltiples objetos “destino”, desarrollan una casa para el concepto de personalización masiva.

El proyecto consiste en una serie de seis casas, siendo elegidas desde una serie de variantes digitalmente diseñadas, provenientes de una simulada reserva genética. La información de este fondo genético se origina de la tipología de una casa de estilo colonial compuesta por tres habitaciones más dos baños y medio. Los arquitectos investigan cada casa como una mezcla entre lo experimental y la normativa, moviéndose en una lógica constructiva y buscando una lógica en la continuidad conceptual y estructural. Desde ahí parten y descubren las bases para un modelo transformativo basado en los cambios entre la normativa y unas condiciones más experimentales.

En una serie de estudios, toman una casa normada “casa colonial” (casa base) y luego establecen una serie de mezclas entre esta casa y una serie de objetos destinos (productos de consumo). Todas las casas y objetos tienen que estar definidos de acuerdo a una misma topología, sólo así pueden ser combinados en el ordenador. En la combinación empiezan a obtener efectos adicionales, efectos impredecibles en la mezcla. Si combinan una casa con un bote, obtienen algo intermedio nuevo, un “bonus” de un espacio imaginario, un volumen que existe en algún sitio de la casa que puede ser construido. Posteriormente este proyecto investiga la articulación y lo inhabitable de estos “bonus” espaciales, creados por la interacción de dobles cáscaras.



Fig 31. Kolatan y Mac Donald - “Housings” (1999): Ejemplos de estudio, del proyecto a largo plazo centrado en diseños experimentales para viviendas prefabricadas e “hibridación química” generada por ordenador.

Con la ayuda del programa de animación **Alias/Wavefront** (en la actualidad **Autodesk Maya**) investigan el

potencial para desarrollar personajes y su hibridación. Para esto inventan una técnica transformacional llamada **variación-formal** (*shape-shifting*). El proceso lo inician con “la casa base” como un **meta-objeto**⁽¹⁵⁾ (**blobs**), y le aplican una serie de **variaciones-formales** (*shape-shifting*) para fundirla con una variedad de otros meta-objetos, fundamentalmente objetos de diseño industrial. La casa base es el *objeto creador* y los objetos de diseño industrial son los *destinos*. Después de la primera serie de transformaciones, que se centran en el exterior del edificio, los arquitectos analizan los resultados según criterios específicos de funcionamiento: por ejemplo, la conveniencia para las variadas actividades humanas y correspondencia con el entorno.

Las transformaciones realizadas producen lo que Kolatan y Mac Donald llaman **monstruos** (*monsters*), **ruido** (*noise*) y **supremas** (*supremes*). Un **monstruo** es un aumento y una contorsión absurda de un área, el **ruido** se refiere a la intersección de superficies y las distorsiones irreconocibles de la forma, una **suprema** es cualquier transformación no incluida en las dos primeras categorías.

Una segunda serie de transformaciones se realiza centrándose en el espacio interior de la casa. Estas mezclas tienen como objetivo **variaciones-formales** de **supremas**, programando destinos específicos tales como bañeras, fregaderos, y bancos. Los arquitectos trabajan organizando el sistema desde abajo hacia arriba (*bottom-up*)⁽¹⁶⁾, comenzando con los componentes del diseño pero sin ninguna idea preconcebida del final. Trabajan en forma iterativa⁽¹⁷⁾, analizando el proceso en cada paso para determinar si los resultados de sus transformaciones resuelven las metas del proyecto y reajustando sus técnicas adecuadamente.

A modo de análisis, un mecanismo clave a mencionar es la lógica de la **re-combinación** y la **hibridación**. Cabe recordar que el resultado de la combinación rara vez buscaba un compromiso previsible. Las sinergias eran aprovechadas, pudiendo surgir efectos operativos impredecibles. En la búsqueda de la intencionalidad, los efectos se engendraban en una totalidad taxonómica⁽¹⁸⁾ de las diferencias viéndose forzadas a un reajuste impredecible. Las nuevas combinaciones re-contextualizan y reinterpretan sus componentes, así como sus entornos. La herramienta del morphing permite una operatividad con mayor sofisticación que la hibridación formal, dando lugar a híbridos que aparecen como totalidades fluidas, sin dejar rastro de alguna figura conflictiva en sus orígenes. Los arquitectos centran la atención en esta forma de hibridación e introducen el sugerente término de “*quimera*” para denotar el efecto resultante.

Las técnicas de transformación de Kolatan y Mac Donald produjeron casas híbridas con formas innovadoras, combinaciones de material y de los espacios de vida. Los efectos de estas innovaciones en las formas de vida, conceptos de domesticidad y la relación entre la arquitectura y el diseño del producto industrial pueden ser reconsiderados para otras revisiones de la vivienda.

(15) Un meta-objeto es una esfera con dos zonas de influencia, una zona interna y externa. Cuando dos meta-objetos se ponen al lado el uno del otro, sus zonas de influencia estiran y deforman mutuamente sus superficies. Si las influencias son bastante fuertes, pueden incluso fundirse en un único meta-objeto. Las relaciones entre los meta-objetos pueden ser manipuladas ajustando sus parámetros numéricos, tales como la fuerza y la atracción (tendencia) de sus zonas de influencia.

(16) Es una estrategia de procesamiento de información características de las ciencias de la información, especialmente en lo relativo al software. Por extensión se aplican también a otras ciencias sociales y exactas. En la estrategia de diseño Bottom-up las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes más grandes, estos a su vez se enlazan hasta que se forma el sistema completo.

(17) Que se repite.

(18) Taxonomía: Ciencia que trata de los principios, métodos y fines de la clasificación. Se aplica en particular, dentro de la biología, para la ordenación jerarquizada y sistemática, con sus nombres, de los grupos de animales y de vegetales.

En el proyecto del **City Hall** de Londres (1998-2002), de **Foster + Partners**, un elemento importante a considerar fue la forma de la superficie del acristalamiento interior del atrio que separa las oficinas del espacio público. La forma aproximada se asemejaba a un recipiente de vidrio para químicos. Con la cámara de debate en la parte inferior, la forma necesitaba tener una fuerte justificación para su definición, construcción y productividad.

Se creó un modelo digital con la forma propuesta para el interior del atrio, permitiendo que el equipo pudiera explorar las necesidades de espacio para la cámara, transformando la espacialidad y luego, reinsertando las formas extremas en una secuencia de morphing. Comenzando con un contenedor simétrico definido como una superficie de revolución, la forma del plano se transformó de un círculo en una elipse, el centro de gravedad se movió hacia la parte inferior, mientras que el cuello superior del contenedor se inclinó progresivamente para adaptarlo a la forma curva de la fachada norte.

La secuencia de morphing fue producida animando en paralelo los tres tipos diferentes de transformaciones y así, producir un amplio número de alternativas. Con la animación de dos alternativas extremas, se utilizaba la secuencia para generar versiones intermedias y poder encontrar la combinación que se adecuara más a las características deseadas. A modo de ejemplo, si se animaba la secuencia de morphing con 100 fotogramas, el diseñador podía elegir cualquier alternativa de las 100 formas producidas.

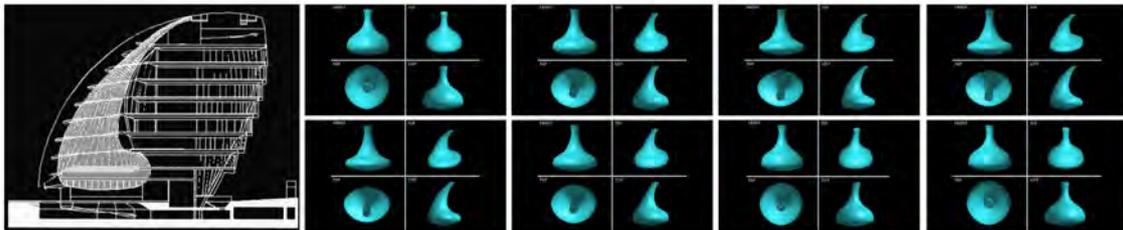


Fig 32. Foster + Partners, Proyecto del City Hall en Londres (1998-2002). Secuencia de morphing para la forma del atrio, conformada por la superficie acristalada del interior.

Es destacable las líneas de investigación que ha desarrollado el arquitecto **Kostas Terzidis**⁽¹⁹⁾, ya en 1989 publica un artículo relacionado con las transformaciones en el diseño. En ese artículo no menciona el término *morphing*, nombra el uso de transformaciones las que denomina **reformaciones** (*reformations*). Esta publicación señala la exploración de una herramienta de diseño donde la **reformación** de elementos arquitectónicos se ejecuta en tiempo real. El usuario controla el ritmo, la velocidad y manipula la evolución compositiva de la volumetría arquitectónica.

(19) Terzidis, Costas. 1989. Transformational Design. New ideas and directions for the 1990's [ACADIA conference proceedings] gainsville (florida - USA) 27-29 october 1989, pp. 87-101.

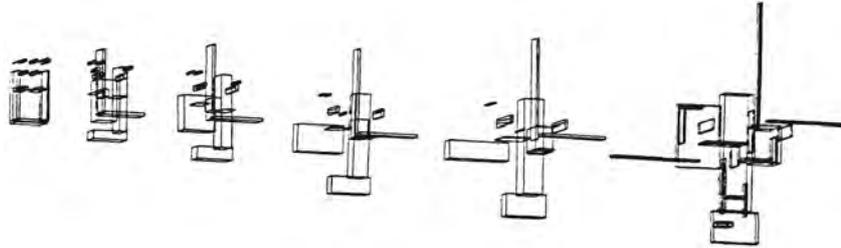


Fig 33. Kostas Terzidis (1989): Uso de reformaciones para mezclar la forma de un templo Dórico con la Brick house de Mies Van der Rohe, desarrollo en cinco pasos.

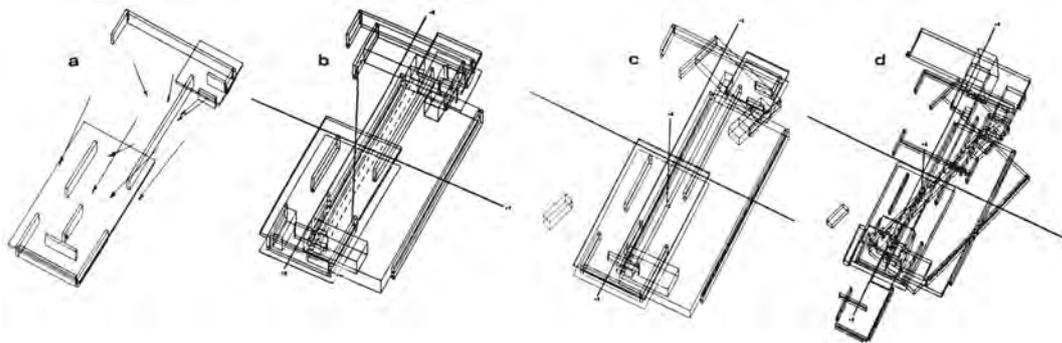


Fig 34. Kostas Terzidis (1989): Reformaciones aplicadas a componentes intermedios del Pabellón de Barcelona de Mies Van der Rohe. Reformaciones volumen-a-volumen con una restricción de conectividad aplicada, (a) Emparejamientos y las direcciones de las reformaciones. (b)(c) Selección de casos estacionarios en las reformaciones continuas.

En 1999 publica un artículo⁽²⁰⁾ donde presenta algunos experimentos con modelos arquitectónicos utilizando la técnica del morphing 3D. También señala la creación de un árbol genealógico en el que se muestra la descendencia al mezclar edificios, llegando hasta una cuarta generación. Estos edificios descendientes comparten características de las propiedades formales de sus edificios emparentados. Menciona dos metodologías utilizadas para el morphing de edificios: el mapeo cara-a-cara y el mapeo de objeto-a-objeto. Todos los edificios transformados son mostrados como una animación en tiempo real, presentando además una serie de experimentos, como por ejemplo, el morphing entre el monasterio de la Tourette de Le Corbusier con la residencia Hanselmann de Michael Graves.

(20) Terzidis, Kostas. 1999. Experiments on morphing systems. III Congreso Iberoamericano de Gráfica Digital [SIGRADI conference proceedings] Montevideo (Uruguay) September 29th - October 1st 1999, pp. 149-151.

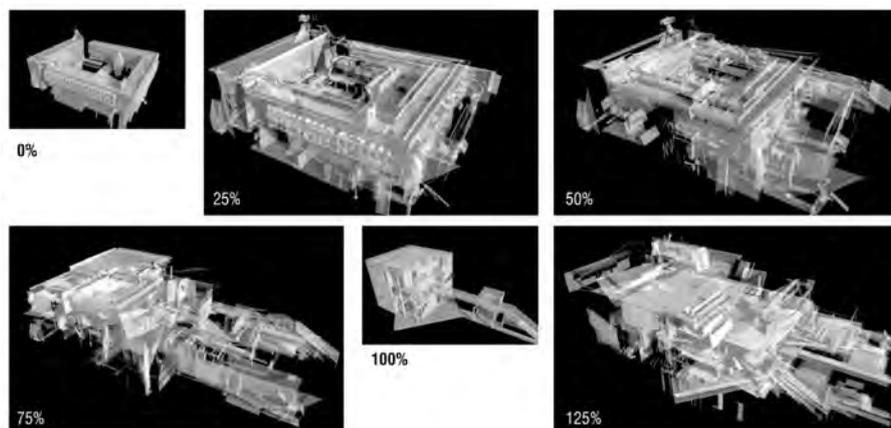


Fig 35. Kostas Terzidis (1999). Proceso de transformación entre dos edificios, partiendo desde el monasterio de la Tourette de Le Corbusier (Ascendiente inicial A del morphing en un 0%), pasando por tres estados intermedios (Objeto transformado en un 25, 50, y 75% alejado del ascendente A), llegando a la residencia Hanselmann de Michael Graves (Ascendiente final B del morphing en un 100%). Por último, se muestra una extrapolación más allá de la forma destino (125%), que con frecuencia desarrolla algunos resultados interesantes e inesperados.

En el 2003 publica un libro⁽²¹⁾ donde investiga conceptos relativos a la forma, como son la hibridación, la cinética, el pliegue-despliegue, la distorsión y los algoritmos formales. Cada concepto se analiza desde diferentes puntos de vista, como el histórico, el matemático o el filosófico. El libro ofrece un marco teórico accesible, que está enfocado al diseño arquitectónico formal, sobre todo a la experimentación y exploración con técnicas de gráficos por ordenador y al desarrollo de la forma. Respecto al morphing lo relaciona con la **forma híbrida**, argumenta que en el proceso de transformación sólo existe un único objeto, el cual es diferente de los objetos originarios. Este **objeto híbrido** combina características de ambos orígenes, es un objeto disfrazado que está compuesto por la topología de uno de los objetos y la geometría del otro. Además, explica el proceso de morphing con conceptos básicos de orden general. En resumen es un libro que ofrece una introducción simplificada al significado del morphing sin información técnica especializada.

Ursula Kirschner⁽²²⁾ en el 2008 publica un artículo referido al morphing, en el que explica experimentaciones con métodos de diseño formal para el desarrollo urbano. Asimismo, examina y compara el potencial de programas para morphing de 2D y 3D (gratuitos y comerciales) en la fase de elaboración preliminar de diseño, utilizando modelos digitales de la ciudad descritos por las líneas de planificación urbana.

Kirschner pone a prueba las herramientas de morphing bajo unas mismas condicionantes de planificación urbana. Con un grupo de estudiantes trabaja en un sitio del centro de una ciudad, consistiendo su tarea en manipular los edificios del lugar (tres construcciones) y diseñar una nueva morfología de edificio para el desarrollo del barrio. Utilizando el contorno de la planta general y el nivel de la cubierta, generan la estructura de un edificio de seis pisos mediante estos dos parámetros. Por último, Kirschner evalúa la facilidad de uso, la complejidad del software y también los métodos aplicados para crear una volumetría formal.

(21) Terzidis, Kostas. 2003. Expressive form: A conceptual approach to computational design. London [u.a.]: Spon Press.

(22) Kirschner, Ursula. 2008. Study of digital morphing tools during the design process - application of freeware software and of tools in commercial products as well as their integration in AutoCAD. SIGraDi 2008 - [proceedings of the 12th iberoamerican congress of digital graphics] La Habana - Cuba 1-5 december 2008.



Fig 36. Ursula Kirschner (2008). **(Izq)** Resultados de las transformaciones entre el contorno de la planta general y el nivel de la cubierta. **(Cen)** Modelo morfológico dentro de un entorno de ciudad digital. **(Der)** Resultado del ejercicio de diseño con los estudiantes, secuencias de imágenes morfológicas y concepción del edificio.

El objetivo de este estudio fue desarrollar un método para el diseño de la forma arquitectónica, el cual pudiera ser utilizado para el trabajo proyectual con un software estándar de CAD (AutoCAD). Diversos programas de morphing 2D y 3D se pusieron a prueba. De los programas de 2D, **Morphit** resultó ser el más eficaz. Las formas eran transformadas de manera diferente a los programas orientados a pixel, los cuales utilizaban el desvanecimiento cruzado (*cross-fading*). Respecto al tema de la forma, los estudiantes probaron un método de generación de la forma en la fase de pre-diseño, utilizando los programas de **Morphit** y **AutoCAD**. Los programas gratuitos de morphing 3D plantearon altas exigencias para los usuarios y presentaban lógicas complejas para la entrada de datos, no siendo estos programas comparables con los de CAD estándar. El programa comercial **Cinema 4D** presentaba objetos que podían ser creados de manera intuitiva y cumplía los criterios para la manipulación de datos previamente definidos. Los objetos generados eran relativamente fáciles de importar en **AutoCAD**, para luego continuar con su posterior manipulación. De las complejas funciones de **Cinema 4D**, sólo unos pocos comandos eran necesarios para el diseño morfológico. El proceso de diseño creativo podía ser el mejor apoyo con este software.

Como conclusión del artículo, señala que los procedimientos utilizados pueden convertirse en un componente para las instrucciones de un diseño básico. La finalidad sería enseñar y probar con los estudiantes distintos métodos para el proceso de diseño. Dentro de los objetivos de estos procedimientos estaría encontrar sus propios métodos, como la técnica multimedia CAD descrita en el artículo. Para finalizar, destaca que los procedimientos de diseño lúdico aplicados a medios informáticos son a menudo sorprendentemente productivos y tan indispensables como los bocetos dibujados a mano.

2.3. Visión General y estado del arte.

Ya en los inicios de los gráficos por computador, la transformación de objetos está presente en el trabajo de **Sutherland**⁽²³⁾ del año 1963.

La técnica del morphing está directamente relacionada con la técnica del **warping** (distorsión, deformación). La distorsión de imágenes (**Image Warping**) tiene su origen con los primeros pioneros en el procesamiento de imágenes. **Rosenfeld**⁽²⁴⁾ a finales de los sesenta desarrolló una técnica para corregir la distorsión fotográfica, al igual que **Markarian**⁽²⁵⁾ en 1971, en el área de la **teledetección**. Las aplicaciones de estos avances estaban relacionadas con la realización de distorsiones sobre las imágenes de la superficie de la tierra, para corregir la curvatura de la superficie y la distorsión de las lentes.

Otros estudios sobre distorsiones con imágenes tienen relación con **técnicas de mapeado de imagen**⁽²⁶⁾. Las primeras investigaciones fueron hechas por **Ed Catmull**⁽²⁷⁾ en el año 1974.

En 1976, un artículo de **Jim Blinn y Martin Newell**⁽²⁸⁾ describía el mapeado de texturas como una técnica de procesamiento de imágenes, que consistía en aplicar una imagen bidimensional a una superficie tridimensional de otra imagen. El mapeado de texturas que es una técnica anterior al morphing, era una técnica aproximativa que constituyó la base para el morphing en 2D.



Fig 37. Blinn y Newell (1976). **(Izq)** Diferentes patrones de textura. **(Der)** Teteras con el mapeado del patrón de textura sobre su superficie.

Otro trabajo que es predecesor de la técnica del morphing y que es el primer trabajo sobre warping y texturas, fue un artículo que trataba sobre el cálculo eficiente de las transformaciones geométricas, publicado en 1980 por **Ed Catmull y Alvy Ray Smith**⁽²⁹⁾. Este trabajo respaldaba un elemento crucial para el algoritmo de transformación de una malla.

(23) Sutherland, Ivan Edward. 1963. Sketchpad: A man-machine graphical communication system. Lexington, Mass.: M.I.T. Lincoln Laboratory.

(24) Rosenfeld, Azriel. 1969. Picture processing by computer. New York: Academic Press.

(25) Markarian, H., R. Bernstein, D. G. Ferneyhough, L. E. Gregg, and F. S. Sharp. 1971. Implementation of digital techniques for correcting high resolution images. Proc. Amer. Inst. Aeronautics and Astronautics, 8th Annual Meeting.: 285-304.

(26) Image mapping techniques.

(27) Catmull, Edwin. 1974. A Subdivision Algorithm for the Display of Curves and Surfaces. Ph.D. Thesis. University of Utah.

(28) Blinn, James F., and M. E. Newell. 1976. Texture and reflection in computer generated images. Comm. ACM 19 (10) (July): 362-7. .

(29) Catmull, Edwin, and Alvy Ray Smith. 1980. 3D-transformations of images in scanline order. Computer Graphics (SIGGRAPH '80 Proceedings) 14 (3) (July): 279-85.

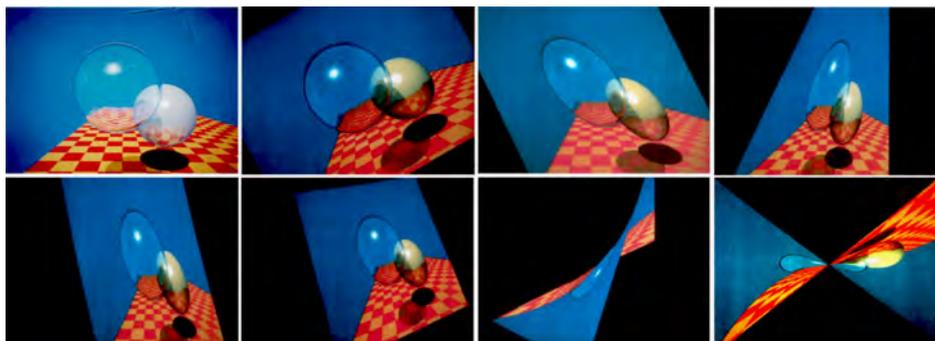


Fig 38. Catmull y Ray (1980). El gran avance de esta investigación fue que la transformación 2D puede ser descompuesta en dos simples transformaciones: una en horizontal y otra en vertical, según el orden de escaneo lineal (de arriba a abajo y de izquierda a derecha). La técnica permitía realizar operaciones sobre una imagen como es el caso de la simple rotación, un rectángulo simple en perspectiva, un ajuste bilineal planar torcido sobre el punto medio y algún ajuste bilineal no planar.

Paul Heckbert⁽³⁰⁾ en 1986 realiza un estudio general sobre los **fundamentos del mapeado de texturas**. Lo divide en dos campos: el mapeado geométrico que distorsiona una textura sobre una superficie y el filtrado que es necesario para evitar el aliasing⁽³¹⁾.

La tesis desarrollada por **Paul Heckbert**⁽³²⁾ en 1989, hace un informe sobre el tema de warping y mapeado de texturas, también incluye algunas aplicaciones de warping relacionadas con la **Representación Basada en Imagen**⁽³³⁾.

En la década de los noventa se desarrollan un sin número de técnicas para calcular la transformación entre dos modelos de forma. El interés estaba centrado en el desarrollo de algoritmos que se ocupaban de diversos tipos de objetos. La representación de objetos y su correspondiente estructura de datos, generalmente tenían un fuerte impacto en el tipo y la dificultad de los algoritmos que se utilizaban para transformar un objeto en otro. A finales de los noventa (1998) se presenta el primer artículo sobre **estudios generales**⁽³⁴⁾ (survey article) especializado en metamorfosis tridimensional (morphing 3D).

En 1990 el libro de **George Wolberg**⁽³⁵⁾ tiene una cobertura fundamental en el tema relacionado con morphing y warping de imágenes. Asimismo desarrolla una técnica de warping mediante una malla que utiliza el mapeado de spline⁽³⁶⁾ en 2D.

(30) Heckbert, Paul S. 1986. Survey of texture mapping. IEEE Computer Graphics and Applications 6 (11) (November): 56-67.

(31) En los gráficos por ordenador el aliasing es el artefacto gráfico característico que provoca en una pantalla o imagen, que ciertas curvas y líneas inclinadas sean representadas con un efecto visual en forma de escalones o de sierra. Esto se debe a que la resolución finita resulta incapaz de representar la curva e inclinación como tal y por tanto, estas formas se muestran dentadas al estar compuestas por pequeños cuadrados (los píxeles).

(32) Heckbert, Paul. 1989. Fundamentals of texture mapping and image warping. University of California, Berkeley, .

(33) Image Based Rendering: IBR

(34) En estos artículos el autor no presenta una investigación original sino una síntesis de un tema, realizando un resumen especializado sobre el campo específico y los distintos autores que han investigado sobre ese tema.

(35) Wolberg, George. 1990. Digital image warping. Wiley-IEEE Computer Society Press.

(36) Un spline es una curva definida por partes mediante polinomios, son utilizadas para el ajuste de curvas y para aproximar formas complicadas. Su simplicidad de representación y la facilidad de cálculo las hacen populares para la representación de curvas en informática, particularmente en el ámbito de los gráficos por ordenador.

Al comienzo de los noventa el trabajo pionero de morphing basado en vectores fue realizado por Pacific Data Images (PDI). La técnica fue descrita por **Beier y Neely**⁽³⁷⁾ en 1992, pero ya había sido utilizada dos años antes de la publicación para la producción de entornos digitales. Es una técnica nueva para la metamorfosis de una imagen digital en otra, produciendo animaciones de transformaciones entre secuencias de imágenes. Es un morphing 2D que permite al usuario especificar **características correspondientes** entre dos imágenes, utilizando líneas de segmentos dirigidas. Las regiones de la imagen no cubiertas por la líneas segmentadas, utilizan un promedio ponderado de sus rasgos. La escasa definición de los rasgos característicos hace que el usuario a la hora de realizar el proceso emplee un control más intuitivo.



Fig 39. Beier y Neely (1992). Dadas dos imágenes originarias, el usuario especifica un conjunto de líneas homólogas con el fin de establecer la correspondencia entre las “características” de una imagen y las “características” de la otra imagen. Estos “pares de líneas” homologas se utilizan para la deformación de las imágenes de entrada, de manera que los píxeles siguen las líneas alrededor de ellos. Para producir una imagen intermedia entre un fotograma y su antecesor, los pares de líneas son interpoladas para crear un intermedio de la posición de las líneas.

Kent, Carlson y Parent⁽³⁸⁾ en 1991 presentan un artículo con una técnica para calcular transformaciones entre dos modelos poliédricos. A diferencia de técnicas anteriores, el algoritmo descrito emplea los datos topológicos y geométricos de los modelos originales, estableciendo correspondencias de vértices, aristas y caras entre los objetos. El resultado de esta metodología permite obtener transformaciones que mantienen su conectividad en pasos intermedios de la transformación y además, manifiestan una menor distorsión que algoritmos anteriores. En 1992⁽³⁹⁾ investigan la generación automática de correspondencia entre formas, incluyendo un algoritmo para el empalme de mallas en objetos poliédricos similares en su topología a una esfera.

(37) Beier, Thaddeus, and Shawn Neely. 1992. Feature-based image metamorphosis. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings).

(38) Kent, James R., Richard E. Parent, and Wayne E. Carlson. 1991. Establishing correspondence by topological merging: A new approach to 3-D shape transformation. Paper presented at Proceedings of Graphics Interface '91, pp. .

(39) Kent, James R., Wayne E. Carlson, and Richard E. Parent. 1992. Shape transformation for polyhedral objects. SIGGRAPH Comput. Graph. 26 (2): 47-54.

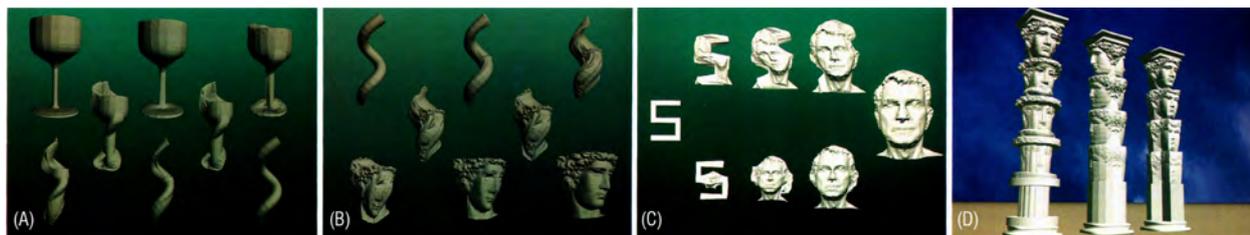


Fig 40. Kent, Carlson y Parent (1992). Algunos ejemplos de las transformaciones algorítmicas. **(A)** Transformación de un objeto utilizando la técnica de ajuste con una envolvente convexa para obtener un objeto tubular. **(B)** Transformación de un objeto tubular en una escultura 3D digitalizada. **(C)** Dos alternativas de transformación utilizando diferentes métodos de proyección para un objeto con forma de "S". **(D)** Tres columnas, cada una de ellas representa una transformación entre distintos objetos de revolución y formas estrelladas. Cada estado de avance en vertical ilustra el 0%, 25%, 50%, 75% y el 100% de la transformación.

En 1994 **Decaudin y Gagalowicz**⁽⁴⁰⁾ presentan un artículo con una técnica que ajustaba la interpenetración de dos formas (2D o 3D) mediante la creación de otra forma similar a ellas con un aspecto liso. Al mover y colisionar las formas, se componen objetos fusionados en forma fluida y natural. Para determinar la fusión, la técnica estaba basada en restricciones: la forma resultante tenía el mismo volumen (o área en 2D) que la suma de los componentes. Esta técnica era válida para formas que tenían una poligonal en 2D o una descripción poliédrica en 3D. También desarrollaron un modelador y algunas herramientas de animación. Estas eran: una herramienta de creación, una herramienta de deformación animada y una herramienta de morphing. Una de las ventajas de estas herramientas era que el usuario podía apreciar fácilmente cuál sería el resultado.

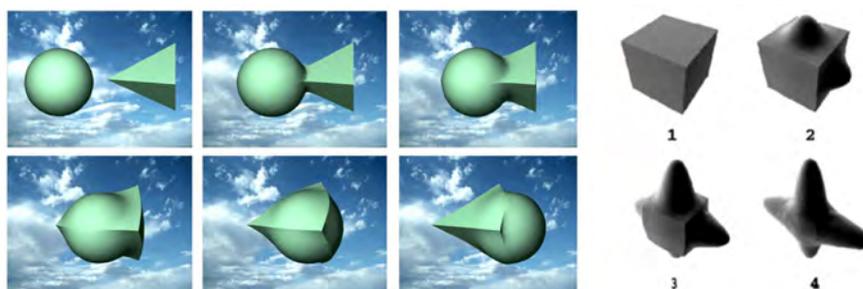


Fig 41. Decaudin y Gagalowicz (1994). **(Izq)** Fusión de una esfera moviéndose dentro de un tetraedro. **(Der)** Una cruz creada por la fusión de dos elipsoides, utilizando la herramienta de morphing para transformar los objetos.

Lerios et al.⁽⁴¹⁾ desarrollan en 1995 un técnica de morphing 3D, que es el equivalente espacial al proceso de morphing de imagen propuesto por **Beier y Neely**. El método de transformación que desarrollan tiene dos componentes: en primer lugar una descomposición (warping) de los dos volúmenes originarios y a continuación, son mezclados (blending) los volúmenes resultante de la descomposición. El componente de descomposición es una extensión de la técnica empleada por **Beier y Neely**, pero reutilizada para 3D. Esta se basa en rasgos característicos y permite al usuario un control detallado, lo que garantiza objetos intermedios con un aspecto

(40) Decaudin, Philippe, and Andre Gagalowicz. 1994. Fusion of 3D shapes. Paper presented at Fifth Eurographics Workshop on Animation and Simulation, .

(41) Lerios, Apostolos, Chase D. Garfinkle, and Marc Levoy. 1995. Feature based volume metamorphosis. Proceedings SIGGRAPH '95 29 (August): 449-56.

realista. El segundo componente del proceso de transformación, que es la mezcla combinatoria, también es controlada por el usuario, lo que garantiza una transición suave en las representaciones.



Fig 42. Leries et al. (1995). **(Izq)** Transformación de un león a un caballo leopardo. **(Der)** Transformación entre un dardo y un X-29.

Lazarus y Verroust⁽⁴²⁾ en 1995 proponen una nueva técnica para calcular transformaciones entre objetos poliédricos, considerando en conjunto la correspondencia y el problema de la interpolación. En esta técnica ofrecen al animador un alto control en la transformación de la forma, proporcionándole especificación e interacción natural. Además, clasifican los métodos de transformación 3D en dos familias: métodos volumétricos y de fronteras. Esta división depende del tipo de información utilizado para calcular las formas intermedias.

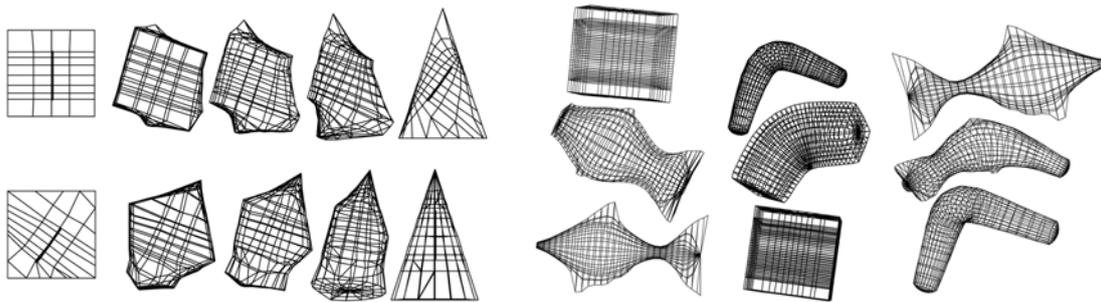


Fig 43. Lazarus y Verroust (1995). Influencia de los ejes para controlar la transformación de la forma. **(Izq)** En algunos casos el eje está girado en dirección contraria a las manecillas del reloj, obteniendo diferentes resultados según la inclinación. **(Der)** En otros casos la transformación de la forma se muestra en columnas verticales, la estructuración de la forma se realiza en base a cilindros, el eje de control varía y se curva, finalizando en posición horizontal o vertical.

En 1996 **DeCarlo y Gallier**⁽⁴³⁾ presentan un marco de trabajo para generar transformaciones paulatinas entre parejas de superficies que tienen diferente topología. La técnica que implementan utiliza una malla de control superpuesta sobre los objetos a transformar. Según la operación topológica a realizar, se marcan en la malla los cambios topológicos que deberían ocurrir, se identifican los puntos críticos de la operación topológica durante la transformación y se asocian una por una, cada cara del objeto inicial con una cara del objeto destino. El valor de este artículo reside en el tratamiento que ofrece sobre las transformaciones con cambios topológicos. La implementación que realizan permitía transformaciones fluidas entre diferentes modelos. Pese a ser una operación más compleja ofrecía al animador un control sobre la transformación, es por esto que, el usuario debía contar con buenas nociones y habilidades en topología.

(42) Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1995. Feature-based shape transformation for polyhedral objects. HAL - CCSD.

(43) DeCarlo, Douglas, and Jean Gallier. 1996. Topological evolution of surfaces. Paper presented at Proceedings of GI'96, .

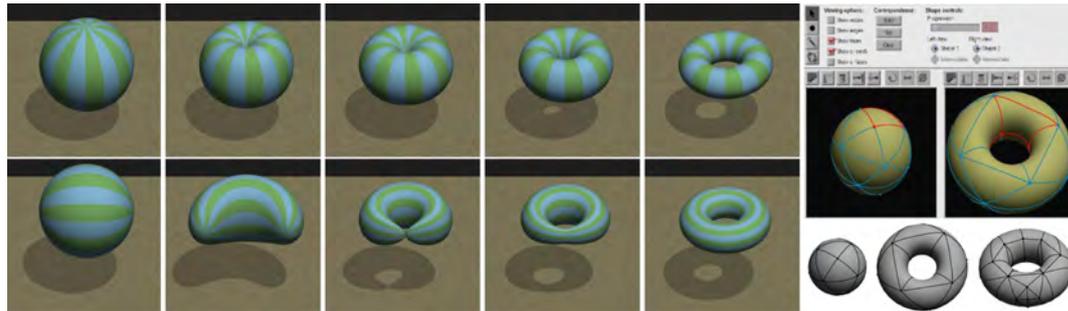


Fig 44. DeCarlo y Gallier (1996). Morphing entre una esfera y un toro. (Izq/Cen-Arriba) hendidura en la esfera, (Izq/Cen-Abajo) toro estrangulado. (Der) Malla de control superpuesta.

En 1997 **Gibson y Mirttich**⁽⁴⁴⁾ presentan un estudio general sobre modelado de objetos deformables. En este trabajo organizan variadas investigaciones dando énfasis a las técnicas sobre las aplicaciones. Además, en el artículo presentan exclusivamente propuestas geométricas para el modelado de objetos deformables, pero se centran en los enfoques basados en la física. En esta última categoría se encuentran los modelos de masa-resorte, los modelos de elementos finitos, modelos de aproximación continua y modelos con menor grado de libertad. Un énfasis especial dedican a los modelos de elementos finitos, los cuales ofrecen mayor precisión, pero han tenido un uso limitado en gráficos por ordenador. El documento también sugiere nuevas e importantes áreas de investigación.

Gregory et al.⁽⁴⁵⁾⁽⁴⁶⁾ Presentan en 1998-99 un enfoque similar a DeCarlo y Gallier, de forma que para establecer la correspondencia utilizan una **red de control** esparcida en los objetos a transformar. El método se aplica a objetos poliédricos con topologías equivalentes y la correspondencia se establece entre dos modelos poliédricos homeomórficos. Descomponiendo las formas en parcelas que forman una red de control, el usuario especifica las trayectorias usando curvas de Bézier para cada par de vértices correspondientes a las dos redes de control.

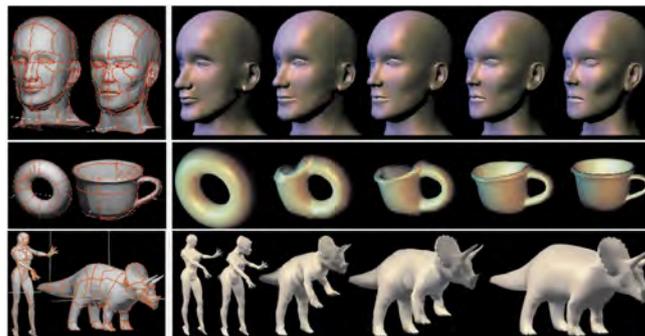


Fig 45. Gregory et al. (1998-99). Diferentes ejemplos de transformación.

(44) Gibson, Sarah F., and Brian Mirttich. 1997. A survey of deformable models in computer graphics.

(45) Gregory, A., A. State, M. Lin, D. Manocha, and M. Livingston. 1998. Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra. Paper presented at Proceedings of the Computer Animation, .

(46) Gregory, Arthur, Andrei State, Ming C. Lin, Dinesh Manocha, and Mark A. Livingston. 1999. Interactive surface decomposition for polyhedral morphing. *The Visual Computer*. 15 (9): 453.

Shapiro y Tal⁽⁴⁷⁾ en 1998 desarrollan un algoritmo que puede ser usado para encontrar una correspondencia automática en la metamorfosis de dos poliedros 3D.

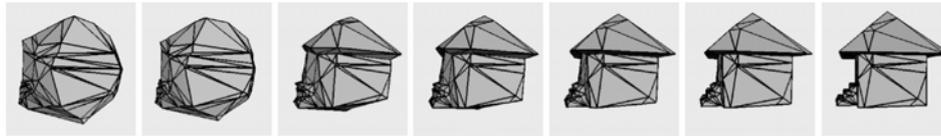


Fig 46. Shapiro y Tal. (1998). Transformación de forma entre un icosaedro y una casa con sombreado facetado.

Siguiendo en 1998, **George Wolberg**⁽⁴⁸⁾ aporta un estudio sobre los avances de las técnicas de **morphing con imágenes** en 2D en términos de especificación de características, métodos de generación de distorsiones (warp) y control de transiciones. Así, también **Lazarus y Verroust**⁽⁴⁹⁾ publican un **estudio general** sobre la **metamorfosis tridimensional**, realizando una clasificación básica de las distintas técnicas y dando especial atención a la interface de usuario. Demuestran cómo las propuestas están íntimamente ligadas a la representación del objeto y consideran tres tipos de representación de la forma: enfoques basados en volumen, enfoques basados en objetos definidos como mapas de elevación y enfoques basados en representaciones de fronteras. También mencionan como una características importante en la técnica del morphing, la capacidad del usuario para controlar la metamorfosis. Este debería ser intuitivo, no tan tedioso y adaptado al conocimiento del usuario, mientras que otros autores insisten en la automatización en la generación del morphing. Concluyen esbozando algunas estrategias de morphing para el futuro.

Jonas Gomes et al.⁽⁵⁰⁾ En 1999 publican un libro sobre warping y morphing de objetos gráficos. En este libro los autores tratan de unificar una visión de la técnica del morphing complementada con la técnica del warping. Hacen una revisión completa sobre el estado del arte de este tema, además incluyen temáticas sobre la deformación de múltiples objetos gráficos.

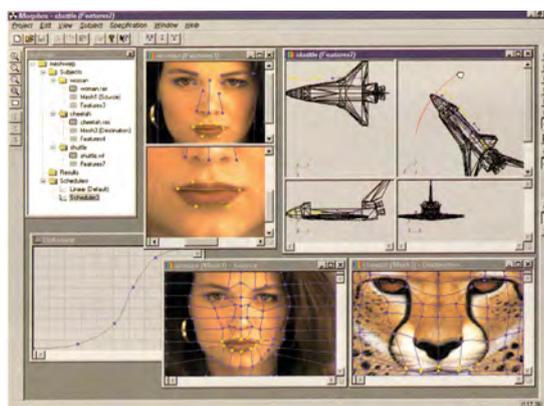


Fig 47. Gomes et al. (1999). Implementación de un sistema con todas las funciones para morphing y warping en 2D y 3D. Interface del programa Morphos.

(47) Shapiro, Avner, and Ayellet Tal. 1998. Polyhedron realization for shape transformation. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 429-44.

(48) Wolberg, George. 1998. Image morphing: A survey. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 360-72.

(49) Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1998. Three-dimensional metamorphosis: A survey. *The Visual Computer* 14 (8) (12/08): 373-89.

(50) Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, y Luiz Velho. 1999. *Warping and morphing of graphical objects*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

En el 2000, **Galín et al.**⁽⁵¹⁾ desarrollan una técnica para la metamorfosis de **superficies implícitas**⁽⁵²⁾, también conocidas como **blobs** u **objetos blandos**. Esta técnica está caracterizada por una estructura de datos morfológicos organizados en árbol llamado **BlobTree**. Con esta implementación proponen un modelo que resulta adecuado y efectivo para la animación y transformación de formas con topologías distintas. El modelo BlobTree se caracteriza por ser una combinación jerárquica de primitivas esqueléticas organizadas en un árbol de estructuras de datos de las formas iniciales y finales. Su propuesta resuelve el proceso de correspondencia y crea un modelo intermedio genérico BlobTree, cuyas instancias interpolan las formas inicial y final. Su método proporciona un buen control de la transformación y el animador puede controlar libremente un conjunto de primitivas de los modelos de origen y destino, incluso controlar la trayectoria de primitivas intermedias para evitar transiciones amorfas o sin rasgos distintivos. Además, puede manipular la correspondencia entre las características y especificar la velocidad de transformación, junto a la trayectoria de los nodos y las hojas del modelo genérico de BlobTree. Por otra parte, los nodos mantienen la mezcla de los operadores booleanos y de deformación, lo que permite el diseño de objetos complejos. Todo esto proporciona al usuario final un control estricto sobre la transformación, a fin de lograr unos efectos visuales satisfactorios.

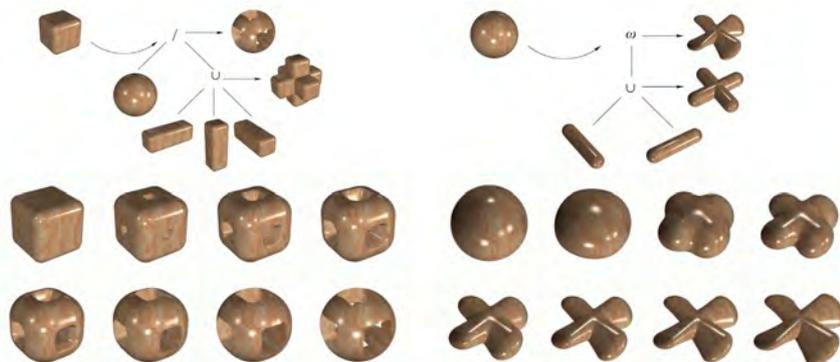


Fig 48. Galín et al. (2000). **(Izq-Abajo)** Metamorfosis entre una caja redondeada y una esfera perforada. **(Der-Abajo)** Metamorfosis entre una hélice y una esfera. **(Arriba)** Problemas de correspondencia entre dos BlobTrees de diferente estructura para cada una de las metamorfosis.

Marc Alexa en el 2000⁽⁵³⁾ publica un artículo donde presenta una técnica para fusionar dos poliedros con género topológico igual a cero. Su implementación establece una correspondencia entre los vértices de los modelos 3D. Esto se logra mediante una técnica que permite especificar las características dispersas dentro de los modelos, con el fin de alinearlas. En un primer paso, se calculan los poliedros contenidos en esferas unitarias. Luego los modelos inmersos se deforman con el fin de que los vértices definidos por el usuario (característica) coincidan en las esferas. Por último se calcula la superposición de las subdivisiones y los vértices alineados son fusionados en un modelo combinado.

Posteriormente, Alexa en el 2001⁽⁵⁴⁾ y 2002⁽⁵⁵⁾ resume los avances en el desarrollo del **morphing con mallas**.

(51) Galín, Eric, Antoine Leclercq, and Samir Akkouche. 2000. Morphing the BlobTree. Computer Graphics Forum 19 (4): 257-70.

(52) Las superficies implícitas son ampliamente utilizadas en gráficos por ordenador, se emplean para determinar si un punto está dentro o fuera de un objeto. También son llamadas funciones implícitas, isosuperficies, blobbies o metaballs.

(53) Alexa, Marc. 2000. Merging polyhedral shapes with scattered features. The Visual Computer 16 (1): 26-37.

(54) Alexa, Marc. 2001. Mesh morphing: STAR - state of the art report.

(55) Alexa, Marc. 2002. Recent advances in mesh morphing. Computer Graphics Forum 21 (2): 173-97.

Presenta un marco de trabajo para clasificar y comparar variadas técnicas de transformación de mallas, aproximando los mismos problemas que subyacen en ellas desde diferentes ángulos.

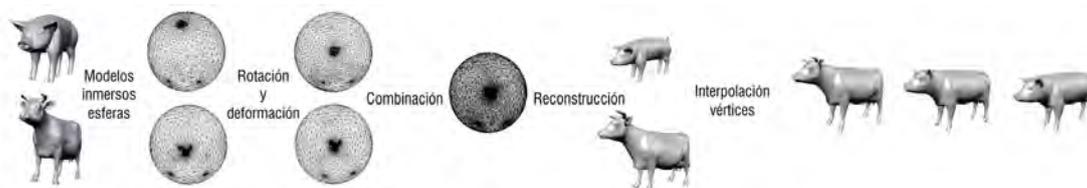


Fig 49. Marc Alexa (2000). La generación de un morphing: los modelos son contenidos en una esfera, los modelos inmersos se deforman para alinear los vértices característicos definidos por el usuario, las inmersiones deformadas se combinan, el gráfico arista-vértice resultante es mapeado hacia los modelos originales y por ultimo, una secuencia del morphing se obtiene mediante una interpolación de la posición de los vértices.

En el 2003 **Zhao et al.** ⁽⁵⁶⁾⁽⁵⁷⁾ presentan una estructura de trabajo interactiva para el morphing, con el fin de dotar al usuario de un control eficaz en todo el proceso de transformación. Señalan que aunque la investigación sobre morphing con mallas ha alcanzado un estado donde la mayoría de problemas de cálculo han sido resueltos, la novedad de su trabajo se centra en la integración de un control de usuario a nivel global y local a través de la utilización de **componentes**, sumado a la incorporación de la deducción y asistencia en la interacción del usuario. Dadas dos mallas poligonales, el usuario puede optar por especificar sus requerimientos, tanto a nivel global sobre los componentes, como a nivel local dentro de los componentes (más intuitivo). Basándose en las especificaciones del usuario, proponen un marco de trabajo con variadas técnicas para deducir las correspondencias respectivas y añadir las correspondencias supuestas en ambos niveles. Además, la técnica proporciona un control de la interpolación en multi-niveles, de forma que el usuario puede operar sobre un componente, tanto en su conjunto como en sus vértices individuales para especificar las trayectorias.

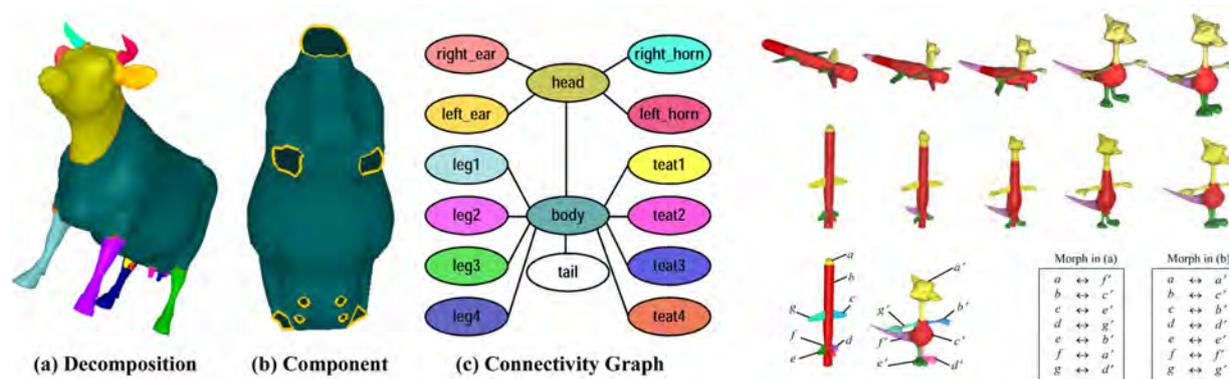


Fig 50. Zhao et al. (2003). **(Izq-Cen)** Manipulación de una malla poligonal de un conjunto mayor, con el fin de que estas puedan ser agrupadas como un componente. Su fácil utilización permite al usuario una alta especificación para los

(56) Zhao, Yonghong, Hong-Yang Ong, Tiow-Seng Tan, and Yongguan Xiao. 2003. Interactive control of component-based morphing. Paper presented at Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation, San Diego, California.

(57) Zhao, Yonghong, Hong-Yang Ong, Tiow-Seng Tan and Yongguan Xiao. Interactive Control of Component-based Morphing. National University of Singapore [En línea]. Last updated March 2004. Consulta 13 de Octubre de 2011. Disponible en la Web: <<http://www.comp.nus.edu.sg/~tants/morphing.html>>.

requerimientos de transformación en el proceso del morphing. En las imágenes se muestra la descomposición de los componentes del modelo de una vaca (a), donde el modelo contiene un conjunto de componentes (cabeza, orejas, cuernos, cuerpo y cola). Cada componente contiene una lista de límites, cada uno de los cuales representa una conexión con un componente adyacente. (b) El cuerpo de la vaca realzando sus límites con color amarillo. (c) Conectividad gráfica para el modelo de la vaca. (Der) Dos mallas poligonales con distinta conectividad.

En general, el marco de trabajo basado en componentes multi-nivel permite elegir al usuario, especificando un sin número de requisitos en cada nivel, pudiendo el sistema completar las otras tareas pendientes con el fin de producir un morphing resultante. Por lo tanto, el control del usuario se mejora, donde incluso un aficionado podría utilizarlo para diseñar un morphing con facilidad.

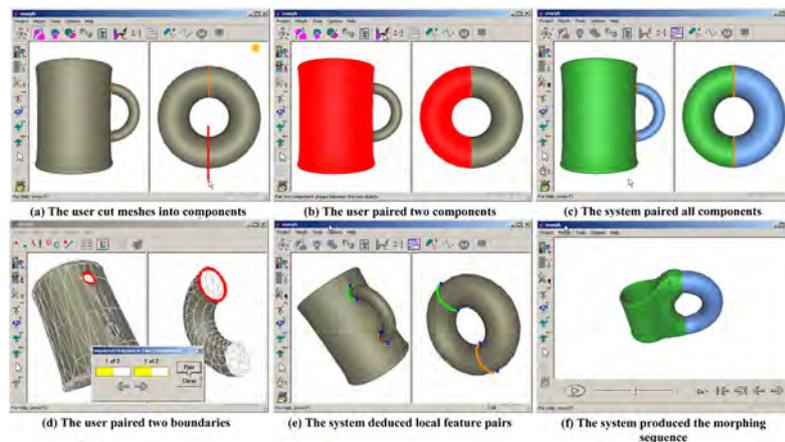


Fig 51. Zhao *et al.* (2003). Interface gráfica de un morphing entre una taza y un donut (toro). El usuario descompone la taza entre el cuerpo y su mango, por otra parte el donut lo separa entre su parte izquierda y derecha (a). En el paso de la correspondencia a nivel global, el usuario empareja el cuerpo de la taza con el trozo izquierdo del donut (b) y el sistema automáticamente empareja los otros dos componentes (c). En el paso de la correspondencia a nivel local, el usuario empareja un contorno del cuerpo con un límite del trozo izquierdo del donut (d). El sistema calcula un par de características locales, que se muestran en azul (e). Luego, el sistema automatiza todos los cálculos posteriores y produce la metamorfosis con éxito ((f) objeto intermedio).

En el 2003 **Cmolik y Uller**⁽⁵⁸⁾ presentan un artículo donde analizan y comparan diversos métodos para ser utilizados en el morphing de modelos 3D, los cuales estaban representados por **nubes de puntos**. Su metodología sólo considera la información geométrica local expresada por la ubicación de los puntos en el espacio 3D, sin la información topológica adicional.



Fig 52. Cmolik y Uller (2003). Ejemplo de morphing entre el modelo de una mascara africana y una estrella de Navidad, utilizando el método basado en la división del recuadro delimitador (ejes alineados) de la nube de puntos.

(58) Cmolik, Ladislav, and Miroslav Uller. 2003. Point cloud morphing. Faculty of Electrical Engineering - Czech Technical University: 1-8.

Xiao et al.⁽⁵⁹⁾ proponen en el 2004 un nuevo algoritmo de transformación para objetos representados por geometría de muestra⁽⁶⁰⁾ puntual. El problema fundamental para el morphing con **nube de puntos**⁽⁶¹⁾ era establecer la correspondencia entre los puntos de dos objetos que podían ser de distinto tamaño. Los dos objetos son primero parametrizados mediante la proyección de la muestra de puntos en un dominio paramétrico común. Como ambos objetos están densamente muestreados, presentan un algoritmo de parametrización acelerado empleando la técnica de niveles de detalles. El dominio paramétrico común es luego dividido en grupos de forma recursiva. La correspondencia entre puntos de muestreo de los dos objetos se establece mediante la realización de un mapeo local en cada grupo. Para las geometrías complejas, la correspondencia se ve facilitada por la descomposición de la geometría mediante parches que utilizan curvas de descomposición geodésicas. Con el fin de preservar las características durante la transformación, incorporan un proceso de asignación de características para las nubes de puntos. El re-muestreo de los objetos intermedios de forma dinámica y adaptativa, permite que las grietas que en ocasiones se producen durante la transformación sean eliminadas con éxito. Según los autores, los resultados mostraron que los algoritmos eran rápidos, estables y fáciles de implementar, produciendo transformaciones de alta calidad.

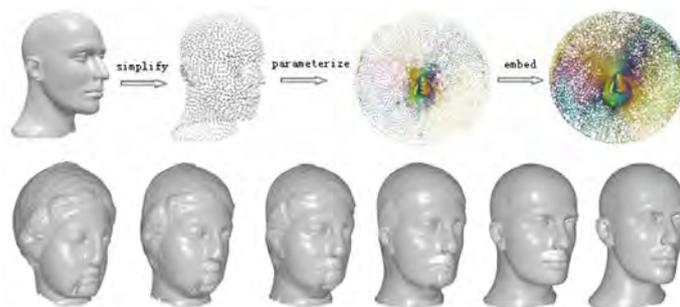


Fig 53. Xiao et al. (2004). **(Arr)** Rapidez de los algoritmos de parametrización: modelo original, simplificación del modelo (menor número de puntos), parametrización del modelo simple en parches homeomorfos a un disco, parametrización del modelo original. **(Ab)** Morphing desde la cabeza de Venus hacia la cabeza de un hombre con 5 características. La cabeza de Venus (40.818 puntos) y la cabeza del hombre (109.450 puntos).

En el 2005 un grupo de investigadores del **Institute for Data Analysis and Visualization (IDAV)**⁽⁶²⁾ y la **Universidad de California** desarrollan una técnica para visualizar cambios graduales en la evolución de las formas de los seres vivos, mediante un morphing con formas 3D.⁽⁶³⁾

Para esto desarrollan un programa propio de análisis y transformación 3D (Landmark), utilizando en el análisis formas de cráneos modeladas por un escáner 3D. Esta implementación les permite analizar variados cráneos

(59) Xiao, Chunxia, Wenting Zheng, Qunsheng Peng, and A. R. Forrest. 2004. Robust morphing of point-sampled geometry. *Comput. Animat. Virtual Worlds* 15 (3-4) (July): 201-10.

(60) Una muestra se refiere a un valor o un conjunto de valores en un punto en el tiempo y/o el espacio (pudiendo ser una figura tridimensional).

(61) Una nube de puntos es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional. Estos vértices se identifican habitualmente como coordenadas X, Y, y Z. Siendo representaciones de la superficie externa de un objeto.

(62) Institute for Data Analysis and Visualization. "Evolutionary Morphing", [En línea], consulta 13 de Octubre de 2011. Disponible en la Web: <<http://www.idav.ucdavis.edu/research/projects/EvoMorph>>.

(63) Wiley, David F., Nina Amenta, Dan A. Alcantara, Deboshmita Ghosh, Yong J. Kil, Eric Delson, Will Harcourt-Smith, F. James Rohlf, Katherine St.John, and Bernd Hamann. 2005. Evolutionary morphing. Paper presented at Proceedings of IEEE Visualization 2005, Minneapolis, Minnesota.

de distintas especies, creando un **árbol-formal** (*tree-morph*). Desde éste se interpolan las formas creando formas intermedias, siendo el morphing una combinación lineal de todas las superficies introducidas (craneos). Las formas intermedias se crean mediante una **deformación** (*warping*) de todas las formas originales en dirección de la forma elegida y luego se **mezclan** (*blending*) todas las formas a la vez. Para hacer la mezcla, se calcula una media ponderada de una función de distancia específica de cada forma original y luego se extrae una superficie de la función resultante, que será la forma intermedia.

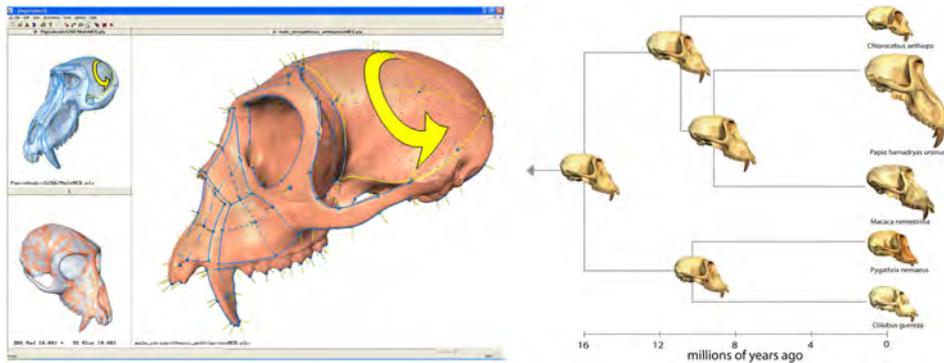


Fig 54. Programa **Landmark**. Herramienta para la edición y colocación de referencias en superficies geométricas, los modelos de superficie (craneos) se obtienen a través del láser scan. El objetivo principal de este programa es la colocación de puntos de referencia dentro de un modelo. El proceso se va repitiendo en los distintos modelos con correspondencias homólogas, de esta manera se puede registrar, alinear y realizar morphings; con el fin de obtener ancestros hipotéticos en árboles evolutivos.

En el 2009 **Parus et al.**⁽⁶⁴⁾ describen una generalización del morphing, que denominan **multimorphing**. Esta técnica consiste en asimilar la técnica tradicional del morphing, pero en vez de realizarla entre dos formas la realizan entre múltiples formas. La técnica clásica del morphing genera formas entre la forma inicial y la final, donde el morphing de transición es controlado por un parámetro de transición (que en animación se entiende que es el tiempo). Cambiando gradualmente el parámetro de transición se genera un espacio formal de una dimensión. En la configuración del multimorphing no es sencillo generar sistemáticamente las formas, proponen un enfoque en el que manipulan el espacio del morphing como una analogía de un espacio afín y un espacio vectorial. La técnica utiliza mallas triangulares y polígonos, la forma es representada a través de puntos y el método funciona en base a la posición de los vértices. Además, muestran cómo analizar un conjunto de formas existentes, encontrando formas base y la manera de expresar los elementos del conjunto con respecto a las formas base. Utilizan una técnica de proyección ortogonal para calcular la representación de formas con respecto a las formas base. Las formas base son proyectadas desde un espacio que, por lo general, es de una dimensión superior, por lo tanto, se reducen los datos necesarios para especificar la forma. También discuten algunos aspectos de la interacción del usuario en la generación de nuevas formas, lo que puede ayudar en la aplicación de un editor para la generación de la forma.

(64) Parus, Jindrich, Ivana Kolingerová, and Martina Málková. 2009. Multimorphing: A tool for shape synthesis and analysis. *Advances in Engineering Software* 40 (5) (5): 323-33.

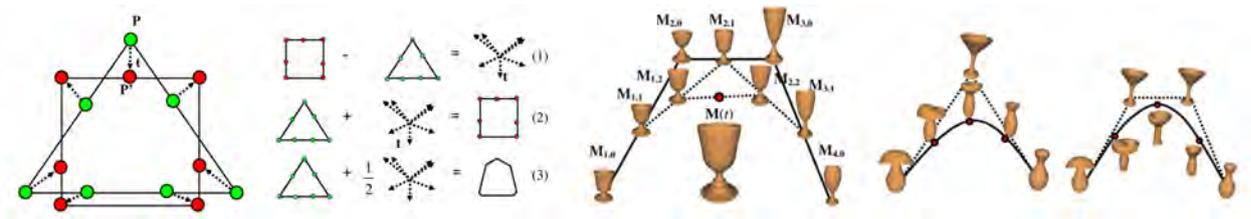


Fig 55. Parus *et al.* (2009). **(Izq)** Un ejemplo de morphing entre un cuadrado y un triángulo y una expresión simbólica de los cálculos con vectores de transformación. **(Der)** Una demostración del algoritmo de Casteljau en el entorno multimorphing, una curva de Bézier cuadrática en el espacio del morphing y una curva de Bezier cúbica en el espacio del morphing.

Xiaojun *et al.*⁽⁶⁵⁾ En el 2009 proponen una técnica que genera el efecto de sombras en tiempo real para el renderizado de un morphing de terreno. Explican como se representa los datos del terreno según el pre-proceso de la información con mapas de terreno o mallas triangulares. El algoritmo aprovecha la función de sombra de la unidad de procesamiento gráfico (hardware), logrando un motor de efectos de sombreados en tiempo real. Se utiliza el método de cálculo pixel por pixel para determinar la sombra en cada fotograma, manteniendo una velocidad de renderizado fluida en una mayor cantidad de datos sobre el terreno.

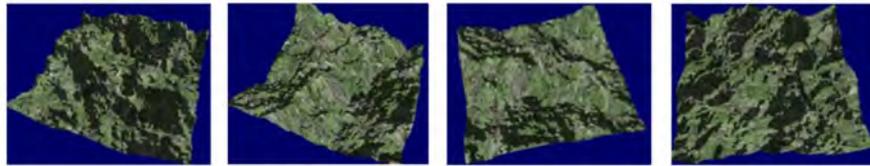


Fig 56. Xiaojun *et al.* (2009). El efecto de morphing de terreno desde diferentes ángulos e intervalos de tiempo.

(65) Xiaojun, Wang, Zhai Haitao, Xia Jie, and Cui Zhiming. 2009. GPU-based morphing terrain real-time shadow algorithm. Proceedings of the 2009 International Symposium on Web Information Systems and Applications: 198-201.

3. LA TÉCNICA DEL MORPHING.

Este tercer capítulo se centra en la definición específica de la técnica. En la parte preliminar, se establecen a modo general los objetos gráficos que intervienen en una transformación y las diferentes aplicaciones que existen al respecto. La particularidad que distingue a un objeto gráfico es su capacidad de ser modificado mediante operadores que transforman su forma y sus propiedades. No es fácil agrupar un repertorio de formas gráficas debido a la infinidad de criterios que existen. Lo mismo sucede con la técnica del morphing, donde la variedad de implementaciones termina creando una clasificación a partir de la estructura espacial del objeto (2D y 3D).

Una vez definido lo que es un morphing y la clasificación de los tipos de morphing existentes, se realiza una división a partir de las diferentes metodologías de morphing en dos y tres dimensiones, basadas en la bibliografía específica de algunos autores acreditados. En este sentido, la prioridad está centrada en las técnicas en tres dimensiones, sobre todo en la división que se realiza con los objetos gráficos tridimensionales a transformar: métodos basados en volumen y en representaciones de frontera. En esta parte es primordial la revisión de algunas implementaciones con el fin de especificar las diferencias metodológicas. Éste es un apartado extenso, en el cual se desarrollan las explicaciones de algunas técnicas, que según el criterio del autor son importantes. Las técnicas expuestas en este capítulo servirán de base para obtener conclusiones respecto a sus posibilidades de uso en arquitectura. Estas conclusiones ayudarán a diferenciar cuáles son las mejores técnicas para

trabajar con un tipo de arquitectura específico y cuáles sirven para un determinado propósito arquitectónico.

Para finalizar, se realiza un resumen general de todo el proceso de un morphing. Se especifican cada uno de los pasos y procedimientos que se siguen con esta técnica. Este resumen no identifica una técnica específica, sino que incorpora una gran parte de los procedimientos que atañen a la técnica. Al final del capítulo se revisan las aplicaciones generales de la técnica, incorporando algunos aspectos de tipo general que aunque no sean estrictamente ejemplos de morphing están cercanos a su ámbito y tienen características comunes.

3.1. Objetos gráficos y su transformación.

La metamorfosis es una característica fundamental de la evolución constante en la naturaleza. De la misma forma en los gráficos por ordenador, la presencia común de técnicas de **deformación** (warping) y de **transformación** como el caso del **morphing** son generalizadas. Estas operaciones abarcan una amplia gama de aplicaciones en diferentes áreas, incluyendo el diseño de la forma, la representación, la imagen y el registro de datos volumétricos. Así como también los efectos especiales en cine y televisión. De hecho, la **deformación** y **transformación** constituyen una parte intrínseca en un sistema de representación o animación.

Al tratar de establecer un criterio que sirva para crear un marco de acción unificado en torno a un repertorio general de formas gráficas en primer lugar se encuentran los **objetos gráficos** y en segundo lugar **el concepto de transformación**. Los **objetos gráficos** permiten establecer una entidad que abarca todos los tipos de entidades gráficas. **El concepto de transformación**, permite estudiar de una manera uniforme las diferentes clases de operadores que modifican la geometría y las propiedades del objeto gráfico.

Desde hace tres décadas las investigaciones sobre **deformación** y **transformación** han tomado un enfoque especializado que ha llevado a una clasificación desmedida de las técnicas utilizadas. Diversas metodologías para operativas formales son definidas según los diferentes tipos de objetos a transformar. Las diversas técnicas no están unificadas ni siquiera en diferentes elementos gráficos, utilizando las mismas técnicas de transformación. El problema que se genera en este tipo de situación tiene relación con compartir un concepto común que sea capaz de ampliarse a los objetos gráficos abstractos de n-dimensiones. Independientemente de las formas de representación, existen técnicas y soluciones para diversos planteamientos relacionados con la transformación, pudiendo ser extendidos un gran número de éstos entre diversidad de objetos.

Básicamente un **objeto gráfico** lo constituye cualquier entidad procesada en un sistema de gráficos por ordenador: puntos, líneas, curvas, polígonos, superficies, fractales, gráficos vectoriales, imágenes, volúmenes, etc. Un **objeto gráfico** se concibe a partir de su forma y sus atributos (tipo de material, color, textura, etc), estando inspirado por los objetos reales del mundo físico. Algunos objetos gráficos como el caso de una imagen, tienen una forma simple y atributos complejos; en cambio otros objetos como por ejemplo una superficie, pueden tener formas complejas y atributos simples. Por un lado la forma, describe la topología y la geometría del objeto gráfico, mientras que por otra parte, los atributos llevan la información sobre sus diferentes propiedades. Desde un punto de vista gráfico, la prioridad para configurar un objeto, viene determinada a partir de la forma sobre sus atributos (la excepción se produce cuando el objeto es una imagen).

En el libro "Warping and Morphing of Graphical Objects"⁽¹⁾ y en un artículo⁽²⁾, sus autores realizan una descripción de distintas transformaciones dando importancia a los diferentes tipos de objetos gráficos. Estos son:

- **Curvas planas:** estos objetos son ampliamente utilizados para ilustraciones y efectos de dibujos. Juegan un

(1) Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, and Luiz Velho. 1999. Warping and morphing of graphical objects. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.

(2) Gomes, Jonas, Lucia Darsa, Bruno Costa, and Luiz Velho. 1998. A system's architecture for warping and morphing of graphical objects. Graphics, Patterns and Images, SIBGRAPI Conference on 0 : 192.

importante rol en el área de la edición digital y en las técnicas de morphing han encontrado su aplicación en la industria de los dibujos animados. Cuando una curva está contenida en un plano es llamada una **curva plana**, de lo contrario es llamada una **curva espacial**.

- **Imágenes:** la forma de una imagen es el conjunto formado por un rectángulo de un plano, generalmente denominado el **sopORTE de la imagen**. El atributo más frecuente de una imagen es el color, sin embargo existen un sin número de atributos utilizados en algunas aplicaciones, como la opacidad, la profundidad de escena, entre otras.

En una imagen con escala de grises, el atributo de color representa sólo los valores de luminosidad de los píxeles (negro, blanco y valor de gris intermedio). Asimismo, esta información puede ser utilizada para representar la gráfica de su función de atributo, es decir, la información de luminosidad es utilizada para definir la información de relieve o la forma de un terreno. Este nuevo objeto gráfico es una superficie integrada en el espacio tridimensional, que pasa a ser otro tipo de objeto gráfico donde la información de atributos se convierte en información formal. Procedimientos parecidos son los que se utilizan para simular un relieve superficial en una textura, como es el caso de los **mapas de relieve**.

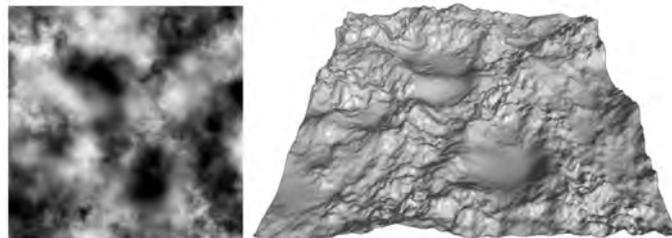


Fig 1. (Izq) Mapa de altura de una imagen en escalas de grises. (Der) El mismo mapa de altura convertido en una malla 3D y renderizado.

- **Superficies:** la deformación de superficies ha sido utilizada desde los comienzos del modelado geométrico en los años sesenta. Los puntos de control para las curvas de Bézier son una manera efectiva de controlar la deformación de una curva o superficie. La deformación de superficies tiene su utilidad como herramienta de modelado, así como en el ámbito de la animación gráfica tridimensional. Las técnicas de morphing para superficies son muy importantes porque permiten trabajar con el modelo tridimensional en lugar de utilizar la proyección bidimensional de ellos.

- **Sólidos (objetos volumétricos):** la relación que existe entre sólidos y superficies es la misma que entre curvas y regiones planas. Evidentemente los sólidos son objetos muy importantes en el área del CAD (*Computer-Aided Design*) y CAM (*Computer-Aided Manufacturing*).

Los sólidos con una función de densidad no constante (la analogía tridimensional de una imagen) son ampliamente utilizados en el área de las imágenes médicas, donde son llamados imágenes tridimensionales. El warping y morphing de estos objetos son una herramienta muy importante para los análisis en medicina.

Es muy común definir ciertas restricciones geométricas o topológicas cuando se define una forma. Desde un

punto de vista geométrico, los objetos pueden ser clasificados en concordancia a la dimensión de su forma y a la dimensión del espacio euclideo en el que se ajustan. Un buen ejemplo es el uso de formas llamadas **variedad**: una variedad de dimensión n se obtiene pegando en conjunto, piezas deformadas del espacio euclideo de n dimensiones. A nivel local es esencialmente una pieza estirada y aplastada de un espacio euclideo, pero globalmente la topología puede asumir tipos muy complicados. El proceso de pegado define diferentes geometrías de la variedad.

3.1.1. Transformación de un objeto gráfico.

Una transformación formal se define mediante una transformación espacial en un espacio euclideo, donde los objetos a transformar se calculan a partir de su forma y de sus atributos gráficos. Es decir:

$$\text{Objeto} = (\text{forma}, \text{función atributo})$$

Si se consideran dos objetos gráficos con una **función de atributos**, la transformación de los atributos merece especial atención debido a que existen dos maneras de calcular los atributos del objeto transformado. La primera forma es calcular los atributos desde la información que corresponde al objeto en transformación (información geométrica, topológica, etc); y la segunda es transformar los atributos desde el objeto original. Si la función de atributos del objeto transformado depende de la forma geométrica o topología, es posible recalcularla en cada punto del objeto en transformación. Como por ejemplo, los vectores normales del objeto son formas dependientes y pueden ser calculados desde la información geométrica (nótese que los vectores normales influyen el cálculo de los atributos de sombreado). Por otra parte, el tipo de material de un objeto o el color de cada punto, puede ser calculado aplicando la transformación sobre el material o color del punto desde el objeto original.

Cuando se usa la transformación para calcular los atributos en un punto cualquiera del objeto, los atributos en transformación son los mismos que los atributos desde el objeto original en ese mismo punto. Hay dos estrategias diferentes para calcular los valores de la función de atributos del objeto transformado:

- **Mapeado directo**: en esta técnica se buscan todos los puntos de la forma original y se calcula los valores de atributos en los puntos de la imagen correspondiente.

- **Mapeado Inverso**: en esta técnica se buscan todos los puntos sobre la forma transformada y se calculan sus atributos basados en los puntos de la forma original.

Los dos principales aspectos en el cálculo de una transformación son el cálculo de los atributos y la geometría transformada. Frecuentemente los métodos de cálculo utilizados en los gráficos por ordenador están estrechamente relacionados con los métodos de especificación de la forma. Esta relación se produce usualmente a través de la representación de la transformación. Por una parte, la transformación está representada a partir de una especificación y por otro lado, el cálculo de la transformación está relacionado con el método de representación utilizado. Estos conceptos serán desarrollados en páginas posteriores del capítulo.

3.1.2. Tipos de transformaciones simples.

La familiaridad con que un arquitecto realiza un plano, tiene relación con una serie de procedimientos proyectivos adoptados para representar un objeto. En el caso de un dibujo a escala de un edificio existente, el proyectista selecciona los puntos del edificio, como las líneas de techumbre o voladizos y luego los asigna en el dibujo según una proporción. En estos casos existe una correspondencia uno-a-uno entre los puntos de la realidad y su representación en el dibujo. Este tipo de relación no siempre se conserva y es debido a que un mapeado de puntos (asignación), no necesariamente mantiene las características espaciales como la longitud, los ángulos, el sentido (horizontal, vertical, izquierda, derecha) y la forma de un objeto.

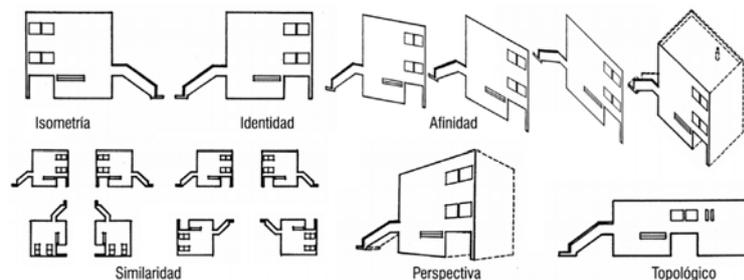


Fig 2. March y Steadman⁽³⁾ (1974). Mapeado del alzado de la casa mínima diseñada por Le Corbusier en 1925.

En general, una transformación cambia la relación entre los puntos del espacio. Estudiando la manera en que una transformación afecta a las distancias entre los puntos del espacio, se pueden elaborar tres tipos distintos de transformaciones: isometría, expansión y contracción. Una **isometría** mantiene la distancia entre los puntos, una **expansión** aumenta la distancia entre los puntos de un campo, mientras que por último, una **contracción** decrece la distancia entre puntos.

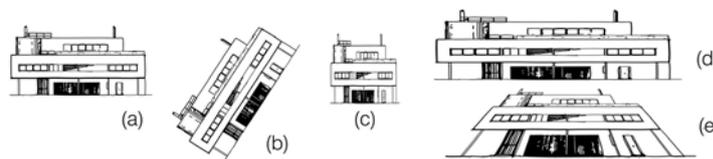


Fig 3. Transformaciones en una imagen: (a) Imagen original, (b) Isometría, (c) Contracción, (d) Expansión, (e) Contracción y expansión.

Para obtener una transformación de objetos gráficos arbitrarios, se necesita realizar una operatoria que consiste en definir transformaciones globales del espacio euclidiano. Las transformaciones globales son muy difíciles

(3) March, Lionel, and Philip Steadman. 1974. The geometry of environment: An introduction to spatial organization in design. Cambridge: M.I.T. Press. p.20.

de controlar si se intenta obtener transformaciones específicas de objetos gráficos. Una buena estrategia para realizar transformaciones locales es obtener una representación del objeto, subdividiéndolo en pequeñas “piezas”, definiendo la transformación en cada una de las piezas y pegándolas todas juntas para formar la totalidad. Esto último permite obtener conjuntamente la transformación global del objeto. El propósito de este método es que los elementos menores formen la totalidad (conjunto de pequeñas piezas), la transformación total de estas particiones sea mucho más simple (transformaciones lineales) y el cálculo por separado mucho más sencillo.

3.2. Las aplicaciones de las transformaciones de la forma.

La transformación es una progresión en el que los cambios de la forma deben llevarse a cabo dentro de los límites del objeto mismo. Es similar a la transición, pero específicamente es aquella progresión en la cual el atributo cambiado es la configuración. Este cambio de configuración puede tener un impacto en cualquier forma bidimensional o tridimensional. Por esta razón, para que este cambio de una forma a otra sea perceptible, es necesario obtener cada uno de los estados formales o fotogramas correspondientes para secuenciar la acción. Por lo tanto, la transformación no es una comparación entre dos formas, es una serie de cambios en la forma, donde cada una de las formas secuenciadas están jerárquicamente diferenciadas.

Las transformaciones de la forma tienen variadas aplicaciones con diversas utilidades en la animación, modelado y el análisis de formas.

3.2.1. Animación.

En general la palabra **animación** se asocia a una secuencia finita de imágenes. Cuando esta secuencia de imágenes se expone con una frecuencia de tiempo determinada, el ojo realiza una integración temporal entre ellas y se percibe el movimiento. Por otra parte, la animación puede ser interpretada como el cambio de un objeto gráfico conforme pasa el tiempo. La posibilidad de que las transformaciones de la forma sean continuas, hacen de ellas una situación ideal para las aplicaciones que tratan con el fenómeno de la variación en el tiempo.

Se puede definir una deformación continua de la forma y hacer que el parámetro de la transformación dependa de la variable de tiempo. Un ejemplo simple lo presenta **Lasseter**⁽⁴⁾ y consiste en una animación que está concentrada en una única imagen. Esta figura concentra la frecuencia de tiempo entre imágenes definiendo las distintas posiciones del objeto. Los fotogramas de la animación se superponen y en el caso del ejemplo (una pelota rebotando) se realiza el movimiento por un efecto de estiramiento y aplastamiento.



Fig 4. Lasseter (1987). **(Izq)** Estiramiento y aplastamiento de una pelota. **(Der)** Un objeto no necesita ser deformado con el fin de aplastarlo y estirarlo. Por ejemplo, un objeto con bisagras como Luxo Jr. (de la película Luxo Jr. de 1986), se aplasta al doblarse por sí mismo y se estira al extenderse completamente.

Otra manera de utilizar la transformación formal en la animación, es el uso de una técnica que consiste en interpolar la forma de dos objetos. Para esto es necesario especificar la forma inicial y final, además de una correspondencia entre las formas de los objetos. Una técnica común para la animación tradicional consiste en

(4) Lasseter, John. 1987. Principles of traditional animation applied to 3D computer animation. Proceedings of the 14th annual conference on computer graphics and interactive techniques.ACM.

comenzar por crear una secuencia de **fotogramas clave**. Esta es la base de un conjunto de fotogramas creados por el animador, los cuales representan las incidencias principales de una escena y contienen importantes elementos de transición del movimiento, transportando la acción que está ocurriendo en la escena.

La **animación de fotogramas clave** consiste en la generación automática de **fotogramas intermedios** (*inbetweens*) mediante **interpolación**. Esta técnica se llama “Animación de fotogramas clave basado en imágenes” desarrollado por **Steketee y Badler**⁽⁵⁾ en 1985 o “Interpolación de la forma” por **Zeltzer**⁽⁶⁾ el mismo año. La técnica se puede describir de la siguiente manera: al definir dos fotogramas clave con antelación, el método permite producir una serie de imágenes intermedias de tal manera que el grado de transformación está controlado por un parámetro real que varía de 0 a 1.

Un ejemplo de animación de personajes por interpolación fue desarrollado por **Sederberg et ál**⁽⁷⁾. La animación consistía en asimilar la secuencia de un caballo galopando, a partir de las fotografías para el estudio del movimiento en los animales de **Eadweard Muybridge**. Se utilizaron cuatro figuras digitalizadas y dos de ellas son mezcladas para ser utilizadas en la interpolación de una figura inicial y final. La correspondencia de vértices se determinó utilizando un algoritmo, así como también la trayectoria de los vértices. Las dos piernas del lado izquierdo del caballo fueron mezcladas como formas independientes, separadas del contorno que formaban el cuerpo y las dos patas derecha del animal.

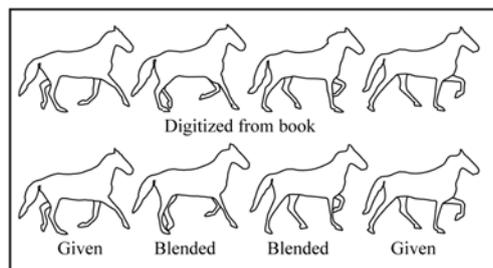


Fig 5. Sederberg et ál. (1993). Galope de caballo.

3.2.2. Modelado de la forma y deformadores.

Los ordenadores se han convertido en una herramienta indispensable en el modelado y la simulación. A medida que aumenta el poder de cálculo, los usuarios y las aplicaciones aumentan las exigencias respecto al nivel de realismo en estos ambientes gráficos. Esta tendencia es evidente en los gráficos por ordenador, donde las formas geométricas más sofisticadas y los objetos físicos están siendo modelados en el contexto de complejos entornos físicos. Específicamente la capacidad de modelar y manipular objetos deformables es esencial para

(5) Steketee, Scott N., and Norman I. Badler. 1985. Parametric keyframe interpolation incorporating kinetic adjustment and phrasing control. Paper presented at Proceedings of the 12th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

(6) Zeltzer, David. 1985. Towards an integrated view of 3-D computer animation. Paper presented at Proceedings of Graphics Interface '85 on Computer-generated images: the state of the art, Montreal, Quebec, Canada.

(7) Sederberg, Thomas W., P. Gao, G. Wang, and H. Mu. 1993. 2D shape blending: An intrinsic solution to the vertex path problem. Proceedings SIGGRAPH '93 27 : 15-8.

muchas aplicaciones. Además las transformaciones de la forma pueden ser utilizadas de variadas maneras para modelar efectos. Es así como las deformaciones constituyen la base de potentes operadores que alteran la forma de los objetos.

Los primeros ejemplos pioneros en el uso de deformadores como operadores de modelado de forma aparecieron en el año 1984. **Alan Barr**⁽⁸⁾ propone un algoritmo de deformación que define la matriz de transformación como una función de las posiciones de los puntos sobre los objetos y desarrolla un método que altera la forma mientras se está aplicando el operador al objeto. Utiliza un conjunto de transformaciones jerárquicas para deformar un objeto. Estos incluyen operadores de **estiramiento** (*stretch*), **flexión** (*bend*), **torsión** (*twist*) y **aguzado** (*taper*). Objetos complejos pueden ser creados a partir de otros más simples, ya que las deformaciones son fáciles de combinar en una estructura jerárquica.

Posteriormente en 1986, una técnica más general fue desarrollada por **Sederberg y Parry**⁽⁹⁾ a través de modelos basados en teorías de elasticidad. Esta técnica deformaba los objetos mediante la deformación del espacio en el que se insertaba el objeto y una red tridimensional utilizada como herramienta auxiliar cubría el espacio que definía su volumetría. Esta red tenía la capacidad de transmitir el desplazamiento de sus vértices hacia los puntos de los objetos volumétricos alojados. La idea básica de los **FFD**⁽¹⁰⁾ era deformar un objeto mediante la manipulación de un paralelepípedo reticulado que contenía al objeto, la figura se ajustaba manualmente por medio de puntos de control (individuales o grupales) junto con los parámetros de la forma. La retícula se ajustaba determinando una función de deformación que especificaba una nueva posición para cada punto del objeto.

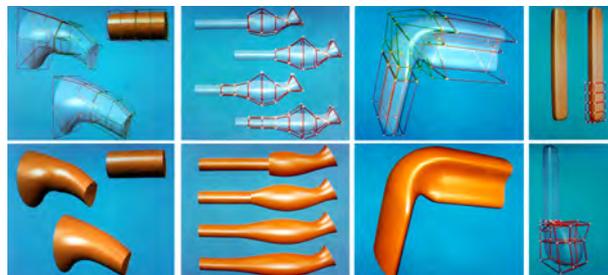


Fig 6. Sederberg y Parry (1986). Deformación de formas libres en modelos geométricos de sólidos.

Por otra parte, existían otras técnicas⁽¹¹⁾ que podían representar las formas y el movimiento de materiales deformables, particularmente cuando interactuaban con otros objetos físicos. Los modelos simulaban el comportamiento de curvas no-rígidas, superficies y sólidos a través de una función de tiempo. Además los modelos elásticamente deformables eran activos: respondían de una forma natural a las fuerzas aplicadas, a las restricciones, al entorno y a obstáculos dentro de la trayectoria del movimiento. Otros enfoques que utilizan la deformación mediante técnicas de modelado en objetos no físicos permiten diseñar métodos basados en la

(8) Barr, Alan H. 1984. Global and local deformations of solid primitives. SIGGRAPH84 18 (3) (jul): 21-30.

(9) Sederberg, T. W., and S. R. Parry. 1986. Free-form deformation of solid geometric models. Proceedings SIGGRAPH '86 20 : 151-60.

(10) FFD: Free-Form Deformation. Deformación de formas libres

(11) Terzopoulos, Demetri, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleischer. 1987. Elastically deformable models. Paper presented at Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

mecánica de medios continuos⁽¹²⁾ (MMC). Básicamente sirven para representar los efectos de las propiedades del material, las fuerzas externas y las limitaciones ambientales en la deformación de los objetos, permitiendo investigar las propiedades de sólidos deformables y fluidos con gran precisión.

Más tarde, **Chen y Parent⁽¹³⁾** en 1989 proponen una técnica con el uso de una forma promedio y su utilidad en el área del diseño. La forma promedio como herramienta de generación de la forma podía estimular la creación de conceptos de diseño originales.

Algunos ejemplos como es el caso de unas botellas, donde los elementos eran promediados en distinto rango de proporciones, estos eran extrapolados e interpolados desde un elemento original, pudiendo ser útiles en el diseño de un nuevo elemento. Además, la forma promedio podía ser utilizada para extraer **estereotipos (stereotypes)** desde un grupo de formas. Un conjunto de elementos (tazas de té) podían ser procesados para producir **la media, la mediana y la moda** de las formas. Los tres diferentes tipos de promedio podían ser utilizados para ver el grado de representatividad de los resultados. En las formas resultantes, los segmentos donde los promedios estaban más de acuerdo con la mayoría se suponía que eran los más representativos. Otro punto peculiar era que en algunos casos (como en las tazas de té), las formas no podían ser promediadas de forma simple en un nivel sintáctico (las relaciones entre los elementos que componen el objeto), si no que cada forma (taza de té) era manualmente descompuesta en tres partes, las cuales podían ser promediadas sintácticamente.

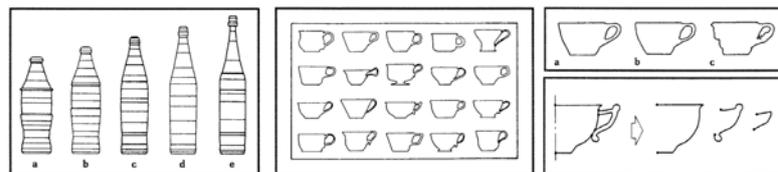
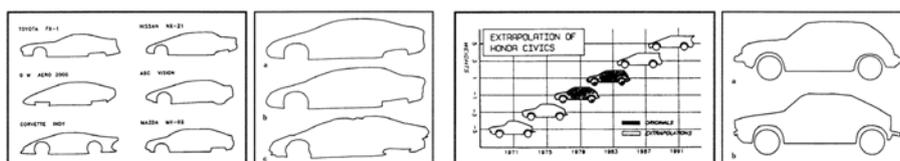


Fig 7. Chen y Parent (1989). **(Izq)** Promedio ponderado de una botella de Coca-Cola (b) y una de Pepsi (d) en proporción de 3/1 (a), 1/1 (c) y 1/3 (e). **(Cen)** Conjunto de tazas de té para extraer su estereotipo. **(Der-Ab)** La media (a), la mediana (b) y la moda (c) de una taza de té. **(Der-Ab)** Descomposición de una taza de té.

La forma promedio podía ser utilizada de dos maneras para predecir la tendencia de la forma. En un primer método, las formas entrantes por si mismas eran futuristas (prototipos conceptuales) y la forma promedio podía asumir que representaba los puntos de vista comunes de unas formas futuristas. Otra forma era extrapolar formas representando diferentes visiones en el tiempo. La extrapolación iba en los dos sentidos, hacia el futuro mostrando la tendencia y hacia el pasado para verificar la extrapolación



(12) Es una rama de la física (específicamente de la mecánica) que propone un modelo unificado para sólidos deformables, sólidos rígidos y fluidos.

(13) Chen, Shenchang E., and Richard E. Parent. 1989. Shape averaging and its applications to industrial design. IEEE Computer Graphics and Applications 9 (1) (January): 47-54.

Fig 8. Chen y Parent (1989). **(Izq)** Automóviles conceptuales. La media (a), la mediana (b) y la moda (c) de los automóviles conceptuales. **(Der)** Extrapolación en el tiempo (1979-1983) de un modelo de Honda Civic. Comparación de la forma del modelo de Honda Civic de 1975 (a), con otra forma extrapolada para representar ese año basándose en los modelos de 1979 y 1983 (b).

Aparte de la interpolación lineal, mostraban un ejemplo con 36 pares de gafas, donde el total de éstas habían sido generadas desde los cuatro pares de gafas ubicadas en las esquinas, a partir de una interpolación bi-lineal. Sólo la mitad de cada par de gafas era utilizado para determinar la correspondencia, de forma que la interacción del usuario se centraba sólo en adecuar las formas a partir de la mitad del puente que une las lentes, debido a que la forma era simétrica.

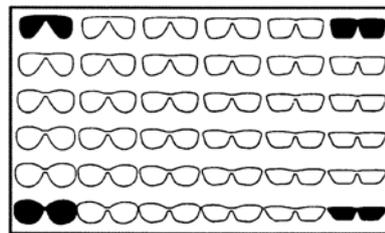


Fig 9. Chen y Parent (1989). Interpolación bi-lineal de modelos de gafas.

Coquillart⁽¹⁴⁾ en 1990 y **Coquillart y Jancene**⁽¹⁵⁾ en 1991, desarrollan un método que utilizaba una retícula inicial y puntos de control B-spline para aproximar la forma con la deformación deseada y luego, lo amplían como una técnica interactiva para animar objetos deformables. Esta técnica la definen como una forma alternativa a la metamorfosis, pudiendo ser utilizada para especificar el movimiento de una deformación local, como por ejemplo, una protuberancia arbitraria cuya forma puede cambiar con el tiempo, o también, el movimiento de un objeto dentro de una deformación global que también varía a través del tiempo. **Chang y Rockwood**⁽¹⁶⁾ en 1994 deforman un objeto en forma repetitiva aplicando transformaciones afines en el espacio. El usuario define la curva a lo largo de la cual el objeto se deformará, para esto utiliza una sola curva de Bézier y reduce los mapeos afines controlados por “tiradores”.

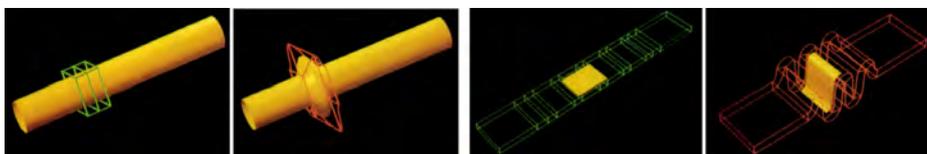


Fig 10. Coquillart y Jancene (1991). **(Izq)** Animación de la protuberancia de un cilindro. **(Der)** Animación de una hoja de papel.

(14) Coquillart, Sabine. 1990. Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3D geometric modeling. Computer Graphics (SIGGRAPH '90 Proceedings) 24 (August): 187-96.

(15) Coquillart, Sabine, and Pierre Jancene. 1991. Animated free-form deformation: An interactive animated technique. Proceedings SIGGRAPH '91 25 (July): 23-6.

(16) Chang, Yu-Kuang, and Alyn P. Rockwood. 1994. A generalized de casteljau approach to 3D free-form deformation. Paper presented at Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

Nuevos métodos en ambientes de realidad virtual inmersivo para el modelado interactivo de la forma, son los **pinces de deformación tridimensional**⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾ (*3D Warp Brush*). Estas herramientas permiten una gran eficacia en la representación en tiempo real y son potentes operadores de modelado. Funcionan de forma similar a como se modela en arcilla: los pinceles permiten agregar o reducir masa (vaciadores) y funciones de arrastre de material. A medida que el pincel se pone en contacto con el modelo, éste aplica a los vértices del modelo un operador de deformación. Este operador es modificado por las funciones de peso calculadas a partir de la distancia del campo de influencia del pincel. Otras características del pincel son las variaciones de formas para lograr distintas terminaciones de acabado. Por lo general, estas herramientas se utilizan para la animación de personajes y los diversos gestos faciales que son concadenados para una escena.

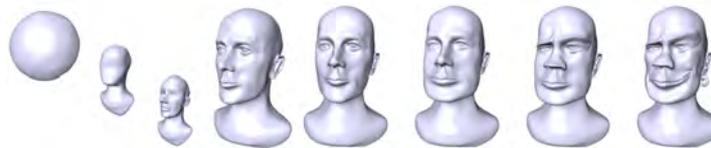


Fig 11. Kill et al. (2005). Secuencia de una sesión de modelado interactivo. Una superficie inicial (esfera) es deformada en un busto complejo utilizando una variedad de vaciadores y operaciones de deformación.

La utilización de estos modificadores o deformadores es muy variada, pasando por la animación de ropa (simulando la caída y los pliegues de las telas), la expresión facial e incluso la caracterización de personajes humanos o animales. Por otra parte, la simulación quirúrgica y los sistemas gráficos de formación y entrenamiento, son otro tipo de implementaciones los cuales requieren resultados en tiempo real y un modelado realista de la física compleja.

Variaciones de todas estas técnicas han sido publicadas en los últimos treinta años, mientras que un sin número de técnicas de deformación han sido propuestas para conformar objetos o realizar deformaciones de formas. En la animación por ordenador, los usuarios a menudo necesitan definir una transformación de transición entre dos objetos para que la forma de un objeto se deforme y gradualmente cambie a la del otro objeto. Esta transición formal es comúnmente conocida como **morphing o metamorfosis**.

3.2.3. Corrección geométrica y distorsiones.

Suponiendo que se tiene un dispositivo de captura de imagen como una cámara fotográfica, de vídeo o un scanner, se puede utilizar la transformación de una imagen para corregir la distorsión geométrica que pudiera ocurrir en el proceso de captura de la imagen. Partiendo de un patrón base cuadrículado como imagen, al obtener una captura de imagen que presenta un patrón distorsionado, es posible aplicar una deformación para distorsionar la imagen con el fin de obtener una imagen similar pero con un patrón de imagen corregido (similar

(17) Kil, Yong Joo, Pietro Renzulli, Oliver Kreylos, Bernd Hamann, Guiseppe Monno, and Oliver G. Staadt. 2006. 3D Warp Brush Modeling. *Computers & Graphics* 30 (4) (8): 610-8.

(18) Kil, Yong J., Pietro Renzulli, Oliver Kreylos, Bernd Hamann, Guiseppe Monno, and Oliver G. Staadt. 2005. 3D warp brush: Interactive free-form modeling on the responsive workbench. Paper presented at In Proceedings of IEEE Virtual Reality 2005, .

al patrón base cuadrículado). Esto a su vez, se puede realizar con un sin fin de imágenes para corregir su distorsión. Este proceso de calibración geométrica se usa para corregir imágenes capturadas con lentes ojo de pez, microscopios y muchos otros.

Las correcciones geométricas de capturas de imágenes son ampliamente utilizadas en gráficos por ordenador y visión computarizada. El método de **modelado y renderizado basado en imagen (IBMR)**⁽¹⁹⁾, se basa en una escena con un conjunto de imágenes en dos dimensiones, de forma que a partir de ellas se puede generar un modelo en tres dimensiones, obteniendo nuevas imágenes con nuevos puntos de vistas de la escena.

El enfoque tradicional de los gráficos por computador ha sido el de crear modelos geométricos en tres dimensiones y tratar de re-proyectarlos sobre una imagen bidimensional. La visión computarizada, por el contrario se centra en detectar, agrupar y extraer características (aristas, caras, etc) presentes en una imagen dada y luego interpretarlos como indicios tridimensionales. El modelado y renderizado basado en imagen permite el uso de múltiples imágenes en dos dimensiones, a fin de generar directamente nuevas imágenes en dos dimensiones, omitiendo la fase de modelado manual.

La técnica de **deformación o distorsión (warping)**⁽²⁰⁾ es una rama importante en el campo del procesamiento de imágenes digitales⁽²¹⁾. En general, la deformación de una imagen es una transformación geométrica que cambia la configuración espacial a una imagen digitalizada. Esta deformación se logra introduciendo elementos característicos o nodos en las imágenes. Los nodos vienen en pares y sirven para identificar características correspondientes en las imágenes inicial y final. Suponiendo que una imagen se dibuja en una superficie elástica que se puede estirar o comprimir, el procedimiento de **deformación** desplaza los nodos desde su posición inicial hacia la final, por lo tanto se deforma la superficie de la imagen “elástica” y se transforma la imagen. Ejemplos sencillos de deformación pueden ser la traslación, la rotación y el cambio de escala. Deformaciones más complejas pueden ser cualquier tipo de transformación geométrica arbitraria aplicada a una imagen.

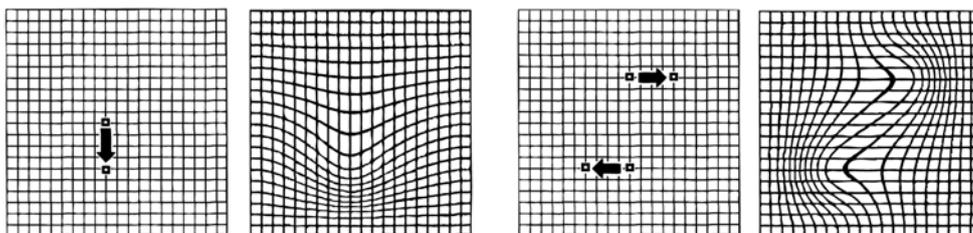


Fig 12. Demetrios J. Halazonetis (1999). Cuadrícula simple, la cual es ideal para demostrar cómo se deforma (warping) la superficie de la imagen. (Izq) Un único nodo se ha posicionado en el centro de la cuadrícula. Si se tira este nodo hacia abajo, como indica la flecha, la red completa se distorsiona según el área de influencia del nodo. (Der) Muestra una distorsión con dos nodos que se mueven en direcciones opuestas.

La deformación de imagen fue en sus principios ampliamente utilizada para la corrección geométrica en aplicaciones de tele-detección y en el último tiempo, el campo ha crecido hasta abarcar una amplia gama de

(19) Image-based modeling and rendering.

(20) Wolberg, George. 1990. Digital image warping. Wiley-IEEE Computer Society Press.

(21) Mardia, Kanti V., and Chris Glasbey. 1998. A review of image-warping methods. Journal of Applied Statistics 25 (2) (April): 155-71.

aplicaciones. Dentro de los campos de aplicación se encuentran la imagen médica, la estabilización de imagen, la visión artificial, la síntesis de imagen y la generación de efectos especiales. Cada aplicación tiene diferentes velocidades, precisión y requisitos de flexibilidad. Por ejemplo, la deformación para los efectos especiales del cine dan como resultado un video de alta calidad, en el que los fotogramas son procesados en forma independiente de la cinta de grabación y posteriormente, son reintroducidos en la secuencia de grabación. Por otro lado, en ciertas aplicaciones de visión artificial, la deformación debe ocurrir en tiempo real, pero la calidad de las imágenes deformadas resultante no es tan crítica (menor resolución).

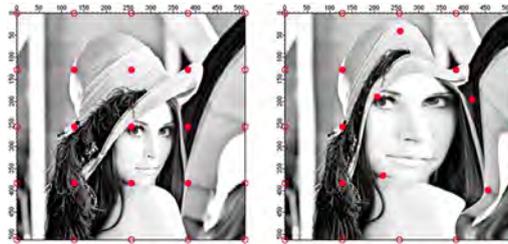


Fig 13. George Wolberg, libro “Digital Image Warping” (1990). **(Izq)** La imagen de Lena Soderberg con una retícula regular superpuesta mediante marcadores rojos. **(Der)** La imagen deformada, los marcadores rojos han sido desplazados desde la posición de la imagen original.

El funcionamiento de una transición fluida en la técnica del morphing 2D depende en gran medida de su **algoritmo de deformación**. La **deformación** (*warping*) es la que se encarga de la transformación geométrica de los píxeles entre la imagen inicial y de destino. En el transcurso de la transformación se generan un conjunto de **fotogramas intermedios**. Estos fotogramas son modificaciones que alteran la imagen original y en apariencia son una visión distorsionada de esta. Además se utilizan para representar y demarcar con facilidad los cambios en la imágenes de los fotogramas que se realizan en las secuencias con movimiento.

Hay dos componentes básicos para la deformación de una imagen: **la transformación espacial y el re-muestreo a través de interpolación**.

Una **transformación espacial** define una relación geométrica entre cada punto de la imagen de entrada y cada punto correspondiente de la imagen de salida. Hay una variedad de posibles modelos para esta relación geométrica, por lo general, la transformación espacial requerirá un valor en las zonas de la imagen de origen que no corresponden a las posiciones de los puntos (identificados y mapeados) de la muestra global. Aquí es donde el segundo componente de la deformación de imagen se vuelve importante, es el llamado **rango de muestreo mediante interpolación**. Un tipo de interpolación es necesario para estimar el valor que adquieren aquellas zonas influenciadas por los puntos de muestreo. Es el rango de influencia que adquieren las zonas que están más lejanas o cercanas de los puntos de muestreo. Estos dos componentes en conjunto determinan el tipo y la calidad de la deformación.

3.2.4. Encaje y correspondencia.

Las transformaciones pueden ser usadas para el análisis y corrección de formas. En particular, pueden ser

empleadas para solucionar el problema del reconocimiento de la forma. En este tipo de aplicación el objetivo es hacer coincidir una imagen dada a una plantilla. Una manera de hacer esto es calculando la cantidad de deformación necesaria para alinear algunas características de la forma con cada elemento desde un conjunto de plantillas. La mejor correspondencia es aquella que requiere la menor cantidad de deformación. La figura muestra una plantilla, un conjunto de formas y la correspondencia entre la plantilla y cada una de las formas bajo una deformación.

La interpolación de la forma se emplea para ajustar la forma de un objeto en otro. De esta manera, es posible establecer una conexión entre dos objetos relacionados, haciendo sus cualidades mutuas compatibles. Un ejemplo del ajuste de la forma es el registro de una fotografía satelital correspondiente a un conjunto de datos en altura. La imagen se debe distorsionar para estar en perfecta alineación con la superficie y pueda ser utilizada como mapa de textura para el modelo del terreno.

Otro ejemplos de correspondencia son la imagen de una cara y el modelo facial digitalizado mediante un scanner laser⁽²²⁾⁽²³⁾⁽²⁴⁾. La imagen facial se descompone para que los rasgos de la cara (ojos, boca, nariz, etc) se ajusten al modelo. A partir de una malla facial estructurada, se desarrollan algoritmos que automáticamente construyen un modelo de la cabeza de una persona mediante la información del scanner. Estos algoritmos insertan automáticamente los músculos contráctiles en las posiciones anatómicamente correctas dentro de un modelo dinámico de la piel y la enlazan a una estructura de cráneo estimativa junto a una mandíbula articulada. También se sintetizan los ojos, los párpados, los dientes, el cuello, etc; ajustándolos al modelo final. El rostro puede ser animado a través de acciones musculares, de esta manera se crean modelos faciales mas reales y funcionales.



Fig 14. Terzopoulos *et al.* (1995). Modelado facial basado en imágenes. **(Izq)** rango cilíndrico y textura de imagen de la cabeza de una persona capturada con un digitalizador Cyberware 3D. A partir de los dos modelos de la parte superior, el algoritmo “clona” un modelo funcional del sujeto, incorporando una textura que por medio de la biomecánica simula la piel facial deformable e incorpora los músculos de la expresión facial. La cara artificial de la parte inferior se representa con una postura neutral junto a diferentes expresiones, siendo generadas dinámicamente a través de la coordinación de contracciones musculares. **(Der)** Ajuste de la malla genérica a la textura RGB y al borde mejorado del ámbito de la imagen.

(22) Lee, Yuencheng, Demetri Terzopoulos, and Keith Waters. 1995. Realistic modeling for facial animation. Paper presented at Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

(23) Terzopoulos, Demetri, Yuencheng Lee, M. Alex, and O. Vasilescu. 2004. Model-based and image-based methods for facial image synthesis, analysis and recognition. Published in the Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition ed.

(24) Borshukov, George, Dan Pionni, Oystein Larsen, J. P. Lewis, and Christina Tempelaar-Lietz. 2005. Universal capture - image-based facial animation for the matrix reloaded. Paper presented at ACM SIGGRAPH 2005 Courses, Los Angeles, California.

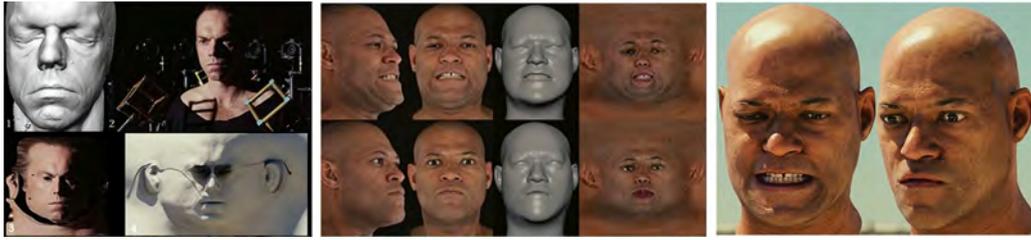


Fig 15. Borshukov et al. (2005). Efectos especiales para la película The Matrix Reloaded.

3.3. Metamorfosis y gráficos por ordenador (Morphing).

3.3.1. Definición.

El **morphing** es un término usado para describir un proceso en el cual un objeto cambia su forma gradualmente con el objetivo de obtener otra forma. Dadas dos formas, existen infinitas transformaciones para pasar de una forma a la otra. Uno de los objetivos principales del morphing es convencer al ojo humano que el objeto inicial es transformado paulatinamente en el objeto final.

Aunque el término en inglés **morphing** deriva de la palabra **metamorphosis**, el proceso de morphing es diferente del proceso biológico de la metamorfosis. El término **metamorfosis** hace referencia a la transformación de algo en otra cosa. Su significado (*meta*) indica alteración o cambio, (*morphè*) forma y (*osis*) proceso; se refiere a un proceso por el cual un objeto o entidad cambia de forma. Además, por lo general, luego de la etapa en estado embrionario de un animal, no sólo cambia la forma sino también la función durante el desarrollo normal.

Morphing es un proceso hecho por el hombre en forma artificial, que trata de lograr la correspondencia entre entidades que comúnmente están inconexas. Es la técnica que permite obtener una serie determinada de estados intermedios entre dos estados diferentes. La transformación de un gusano en una mosca adulta o un renacuajo en una rana sigue las leyes biológicas naturales. Por contraste, el morphing sigue reglas artificiales. Es la simulación de una interpolación matemática, por lo tanto, es una transición gradual que da como resultado un marcado cambio en la apariencia, calidad y condición de la forma.

En la literatura relacionada con gráficos por ordenador, la metamorfosis aparece señalada bajo distintos términos. Los más comunes son: **mezcla o combinación de forma** (*shape blending*), **forma promedio** (*shape averaging*), **interpolación formal** (*shape interpolation*), **evolución formal** (*shape evolution*) e **intermediación** (*tweening*) por la presencia de estados intermedios (*in-between*).

Desde un punto de vista gráfico matemático, el término morphing se refiere a cualquier transición fluida en la transformación de la forma. Otra definición se refiere únicamente a las transiciones que son biyectivas, continuas y tienen un proceso inverso continuo. En este último caso, el término morphing equivale a la noción de **homeomorfismo** en el área de la topología, mientras que el término metamorfosis se utiliza para referirse a una definición más amplia. La diferencia entre un homeomorfismo y metamorfosis es que el primero no permite operaciones de corte o pegado para la forma durante la transición (esto sería cambiar la topología).

3.3.2. Clasificación (Tipos de morphing).

En décadas recientes han habido muchos ejemplos fantásticos de morphing en la industria del entretenimiento. La mayoría de las veces, estos efectos visuales fueron generados usando técnicas de **morphing 2D**. No obstante, los investigadores comenzaron a tener interés en el morphing tridimensional a finales de los ochenta y principios de los noventa, desde que el **morphing 2D** presentaba desventajas en muchos aspectos frente al

morphing 3D. Esto derivó en una clasificación basada en dos categorías para las técnicas de transformación: morphing de dos y tres dimensiones.

El poder utilizar técnicas extendidas de 2D para 3D no era trivial, debido a la compleja conectividad que presentaba una malla deformable. Cuando se trataba con objetos tridimensionales los algoritmos para el morphing 2D no lograban interpolar la complejidad de los objetos 3D, debido a que carecían de información espacial. Estas técnicas no eran capaces de manipular modificaciones en los puntos de vistas o cambiar parámetros en la iluminación. Así el usuario perdía flexibilidad para modificar objetos tridimensionales y no podía modificar fotogramas intermedios de la secuencia con relación a estos parámetros. Por el contrario, el morphing 3D modelaba directamente los cambios geométricos de los objetos y por ende, existía un mayor interés en su investigación. Sin embargo, en casi todos los métodos de morphing 3D se podían encontrar restricciones en sus modelos de objetos y en cómo estos modelos estaban representados.

El morphing 3D implica la creación de una transición suave, en la cual un objeto fuente (inicio) se transforma en un objeto final (término). Son importantes las cualidades de las formas geométricas en cada uno de los objetos, tomando en consideración su posición espacial, normales al plano de trabajo y en algunos otros casos, los atributos como el color y las texturas.

Entre dos objetos tridimensionales hay un infinito número de caminos formales para transformar un objeto en otro. Por esto, los algoritmos que se aplican en la transformación son evaluados a partir de criterios relacionados con la facilidad de control por parte del usuario y la calidad estética de la secuencia de transformación. Las primeras técnicas implementadas para el morphing eran un proceso estético de coincidencia formal, donde los métodos automáticos de transformación (interpolación) descartaban la posibilidad por parte del usuario de controlar las etapas formales en el cambio de forma. Con el correr del tiempo y la mejora de las técnicas, la interacción del usuario se volvió una necesidad primordial e inevitable.

En general, el proceso de morphing ya sea en 2D o 3D, consta de dos pasos. El primero es establecer una **correspondencia**, es decir, evalúa la relación entre el objeto fuente y el objeto final. El segundo calcula la **interpolación** entre ellos, para producir los objetos intermedios de la secuencia:

- En el paso de la **correspondencia**, el proceso más común para que los usuarios especifiquen la correspondencia formal es asignar los pares de vértice. Generalmente, este proceso es bastante intuitivo en el caso de tener formas similares. El proceso se vuelve difícil cuando las formas no tienen una lógica de coincidencia. La interacción es compleja debido a que el sistema no provee de asistencia para identificar formas afines, por lo tanto, el usuario completa una gran carga de trabajo para posibilitar el cálculo computacional de las secuencias del morphing.

- En el paso de **interpolación**, los usuarios usualmente confrontan otra dificultad de especificar trayectorias del morphing, teniendo que encontrar grupos de vértices y ajustar trayectorias de morphing para vértices individuales. Este tipo de control de interpolación necesita habilidades mayores en el diseño.

3.4. Morphing de dos dimensiones.

La definición más habitual para un morphing en dos dimensiones consiste en una transformación fluida entre dos imágenes, con el fin de conseguir una transición gradual entre una imagen inicial y una final. La transición gradual se realiza mediante la construcción de una secuencia de imágenes, ya sea entre dos imágenes fijas o entre imágenes concadenadas entre sí (video). La esencia del proceso está determinada por la unidad básica, un **pixel base** el cual es transformado desde su fuente hasta su objetivo. El mecanismo por el que se realiza es una interpolación de valores de píxeles (secuencias algorítmicas) acompañada de instrucciones especificadas por el usuario. Por lo general, el cálculo gráfico consiste en combinar una técnica de **deformación** (*warping*) que mapea la posición de los píxeles de la imagen original a la posición de los mismos píxeles en la imagen final. Por otra parte, se realiza una **mezcla** que permite lograr una transición suave entre las intensidades de los píxeles de cada imagen.

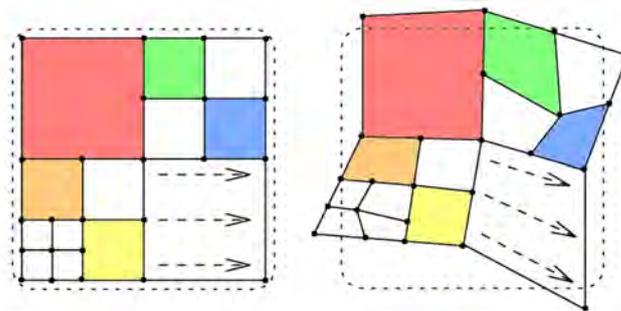


Fig 16. Larios et al. (1995). Analogía bidimensional de una distorsión lineal por celdas. Para distorsionar una imagen, se subdivide mediante la adaptación de una red cuadrangular marcada con líneas continuas. Luego, cada vértice es desplazado a su posición de destino. Finalmente, cada uno de los píxeles en el interior de las celdas son deformados con una interpolación bi-lineal según la nueva posición de los vértices. Las flechas punteadas muestran cómo el interior del cuadrado inferior derecho es deformado y el cuadrado punteado marca la frontera de la imagen original.

El procedimiento común consiste en tener digitalizadas una secuencia o sólo una imagen origen y destino con determinadas características. Esto permitirá calcular una imagen intermedia mediante la deformación geométrica de la imagen original, de manera que las características definidas por el usuario o seleccionadas en forma automática queden alineadas con aquellas de la imagen destino. En algunos casos, la imagen original es suavemente desvanecida y distorsionada en dirección a la imagen intermedia, al igual que desde la imagen intermedia hacia la imagen final. De esta manera, las primeras imágenes de la secuencia son más parecidas a la imagen original, mientras que las últimas son similares a la imagen destino. La imagen correspondiente a la mitad de la secuencia contiene un promedio de la imagen origen y destino, según un promedio de las características geométricas. Finalmente, las imágenes de la secuencia son procesadas en un formato de video, donde se puede apreciar el efecto de transformación gradual de un objeto en otro.



Fig 17. Morphing con porcentajes de mezcla entre la imagen de Margaret Thatcher y Marilyn Monroe.

Una imagen digital está representada por un sin número de valores de pixel. La parte más difícil del morphing de imagen es obtener las deformaciones que distorsionan los píxeles para alinear sus características. Para obtener correspondencias, el sistema de morphing para imagen a menudo requiere que su usuario identifique y relacione las características coincidentes en un conjunto de píxeles de dos imágenes originales (inicial y final). Estas características son especificadas mediante un conjunto de puntos o segmentos de líneas superpuestas en la imagen. Existen métodos donde el usuario define ciertos rasgos coincidentes en las imágenes a secuenciar (Boca de niña-Boca de gato), de forma que el usuario delimita los rasgos coincidentes en ambas imágenes y el programa actúa a partir del reconocimiento de los campos de influencia o puntos de control. A continuación, se calcula una deformación a partir de la correspondencia entre las características de las dos imágenes. Por lo tanto, una técnica para el morphing de imagen debe poder especificar convenientemente las características y mostrar una distorsión previsible que refleje la correspondencia de características.



Fig 18. Especificación y coincidencia apropiada de características (ojos-nariz-boca de niña con ojos-nariz-boca de gato).

A modo general, una técnica común presenta una **deformación** (*warping*) que distorsiona la imagen, mientras que el **fundido cruzado** (*cross-dissolve*) mezcla con fluidez cada cuadro de imagen con el siguiente. Durante el proceso cada parte específica de una imagen se transformará en otra parte específica de la imagen final. Esta correspondencia que se origina desde un rasgo específico a otro, es la base de la transformación y se llama **mapeado**.



Fig 19. Correspondencia entre imágenes. Definición de rasgos o características coincidentes mediante puntos de control.

Existen dos formas para calcular los valores de píxeles en una transformación: éstos son el **mapeado directo e inverso**. El primero de los casos se aplica a cada pixel del dominio de la imagen inicial, con el fin de encontrar sus coordenadas en el dominio de la imagen final asignada. Por el contrario, el mapeado inverso funciona al revés: para cada pixel con coordenadas en el dominio de la imagen final, se buscan los píxeles del dominio de la imagen inicial. Esta correlación se realiza de tal manera que en la transformación, la posición del contenido del pixel puede trasladarse y lograr la superposición con el área del pixel destino. El mapeado inverso es más efectivo, ya que asegura que cada pixel de salida es calculado y no se realizan cálculos con píxeles innecesarios.

3.4.1. Implementaciones con técnicas de morphing 2D.

Según George Wolberg⁽²⁵⁾, el estudio de la técnica del morphing 2D estaba directamente relacionado con la solución de tres problemas específicos que influían en la facilidad y eficacia para la generación de secuencias de transformaciones de alta calidad. Estos tres problemas eran: **la especificación de características, la generación de deformaciones o distorsiones y el control de la transición**. Existe una compensación entre la complejidad en la especificación de características y la generación de deformaciones. Es decir, si por una parte se especifican las características en forma más detallada, la generación de deformaciones se vuelve más difícil. La utilización de las curvas spline para especificar características planteó un desafío en el proceso de generación de deformaciones, que es la parte más crítica en una transformación. Por otra parte, su utilización ha significado una mejora en la suavidad (fluidez) de las transformaciones y en el coste del cálculo computacional del proceso de transformación.

El tratamiento de estas problemáticas asociadas con la calidad del morphing 2D están compartidas en las diversas técnicas de morphing 2D, donde se incluyen las técnicas basadas en **deformación de mallas, morphing por zonas, funciones de base radial, coberturas con spline, minimización de energía, deformaciones de formas libres multi-nivel, técnicas de multi-resolución**⁽²⁶⁾, entre otras.

Industrial Light & Magic (ILM) de Douglas Smythe fue pionera en la película Willow de 1988, utilizando las **deformaciones de mallas**. Este procedimiento utiliza una imagen fuente (inicial), con una malla asociada, con

(25) Wolberg, George. 1998. Image morphing: A survey. The Visual Computer 14 (8) (12/08): 360-72.

(26) Los términos en inglés de las técnicas 2D mencionadas son: mesh warping, field morphing, radial basis functions, thin plate splines, energy minimization, multilevel free-form deformations, multiresolution image morphing.

la que se especifican las coordenadas de los puntos de control o puntos de referencia según sus características de edición. Una segunda malla especifica las correspondientes posiciones en la imagen de destino (final). Especial importancia tienen los puntos de referencia relacionados con elementos representativos en el caso de utilizar rostros de personas, como son los ojos, la nariz y los labios; los cuales están por debajo de las líneas de la cuadrícula correspondiente a ambas mallas, con el fin de demarcar su transformación análoga en las dos imágenes de origen. En conjunto, la malla inicial y final son utilizadas para definir la transformación espacial que mapea todos los puntos de la imagen inicial hacia la imagen final. Por obligatoriedad, las mallas deben ser topológicamente equivalentes, es decir, no pueden haber pliegues o discontinuidades. Por lo tanto, los nodos pueden moverse tan lejos como sea necesario, siempre y cuando no causen auto-intersecciones. Además, para simplificar el proceso, las mallas están obligadas a tener bordes congelados (inmóviles).

El proceso de transformación se desarrolla desde la **malla inicial** deformada en dirección a la **malla final**, produciendo una **malla auxiliar** intermedia para cada fotograma. Estas mallas son utilizadas para deformar la **imagen inicial** en una imagen cada vez más deforme, de este modo se deforma desde su estado original hacia los estados definidos por las mallas intermedias. El proceso idéntico en orden inverso se realiza al deformar la **imagen final** desde su estado original. El propósito de este procedimiento es mantener la alineación de los puntos de referencia entre la imagen inicial y final, ya que ambas imágenes son deformadas hacia un estado intermedio, produciendo las parejas auxiliares de la imagen inicial y final. Sólo después de esta alineación, se mantiene la realización del fundido cruzado (cross-dissolve) entre sucesivas parejas de imágenes auxiliares inicial y final más significativas. El uso de mallas para la especificación de características facilita una solución sencilla para la generación de deformaciones, mediante una interpolación spline bicúbica.

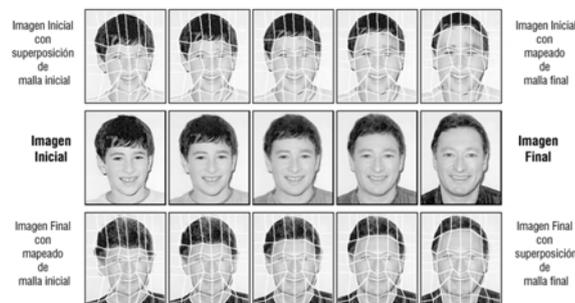


Fig 20. George Wolberg (1996). Imagen donde se muestra el algoritmo para la deformación de mallas mediante dos pasos. Las cinco imágenes en la fila del medio representan una metamorfosis (o morphing) entre la imagen correspondiente de dos caras, que se encuentran en los extremos de la secuencia. Las mallas correspondientes a la imagen inicial y final, respectivamente, se muestran superpuestas en la imágenes de la figura en el extremo superior izquierdo e inferior derecho. Esta secuencia fue producida por la aplicación de los pesos de (1, 0.75, 0.5, 0.25, 0 y 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) a las cinco imágenes de la fila superior e inferior, respectivamente, y la adición de los dos grupos en conjunto. Este proceso demuestra que la transformación es simplemente una muestra representativa del fundido cruzado aplicado a las imágenes deformadas.

Si bien las mallas parecen ser una manera conveniente de especificar parejas de puntos característicos, existen casos donde su utilización solía ser dificultosa. El algoritmo de **morphing por zonas** (campos de influencia) desarrollado por **Beier y Neely**⁽²⁷⁾ en Pacific Data Images surgió del deseo de simplificar la interface de usuario

(27) Beier, Thaddeus, and Shawn Neely. 1992. Feature-based image metamorphosis. Paper presented at Computer Graphics (SIG-GRAPH '92 Proceedings).

con el fin de manejar la correspondencia por medio de parejas de líneas. Este procedimiento consiste en utilizar parejas de líneas análogas, las cuales tienen una correspondencia en las imágenes de origen y de destino, mediante la cual definen un mapeado de coordenadas entre estas dos imágenes. Además de la correspondencia directa prevista para todos los puntos a lo largo de las líneas, la asignación de puntos en las proximidades de la línea se puede determinar según su distancia desde la línea. Si se especifican variadas parejas de líneas, el desplazamiento de un punto en la imagen de origen está dado por una suma ponderada de los mapeos de cada pareja de línea. Estas asignaciones a su vez, están determinadas según los atributos de peso referentes a la distancia y longitud de las líneas.

Este procedimiento tiene la ventaja de ser más expresivo que las deformaciones de malla. Por ejemplo, en lugar de requerir los puntos de correspondencia situados en toda la malla, los pares de línea pueden ser dibujados a lo largo de la boca, la nariz, los ojos y las mejillas de las imagen fuente y destino. Por lo tanto, es necesario especificar sólo los puntos claves característicos. Si bien este enfoque simplifica la especificación de la correlación de características, por otra parte la especificación dificulta la generación de la deformación. Esto se debe al hecho de que todas las parejas de líneas tenían que ser consideradas con sus líneas recíprocas, antes de mapear cada punto conocido de la imagen fuente.

Es importante destacar que este algoritmo global es más lento que el utilizado para la deformación de mallas, que utiliza la interpolación bicúbica para determinar la asignación de todos los puntos que no están en la malla. Sin embargo, una dificultad más grave es aquella en la cual se generan desplazamientos inesperados producidos por la acumulación de influencia de todas las parejas de líneas consideradas en un único punto. Es por esto que a veces se especifican (mapean) parejas adicionales de líneas para contrarrestar los defectos que provocan el mapeado de otras parejas preliminares.



Fig 21. Beier y Neely (1992). Imágenes de una secuencia de morphing por zonas, en estas se muestran las líneas dibujadas sobre los rostros y las cuadrículas distorsionadas por la posición de las líneas. Nótese que fuera del contorno de los rostros las cuadrículas son deformadas de forma diferente en las dos imágenes, esto se debe a que el fondo no tenía importancia, si hubieran habido elementos importantes en el fondo, estos deberían haberse dibujado con líneas para su distorsión.

La forma genérica para demarcar características a través de primitivas detalladas, pueden ser especificadas a través de puntos, líneas y curvas. Estas líneas y curvas son seleccionadas a través de puntos, lo que permite considerar que las características de una imagen puedan ser especificadas por medio de un conjunto de puntos. En algunos casos, los componentes (x) e (y) de una deformación pueden ser originados a partir de la construcción de superficies por interpolación de puntos dispersos. Si se consideran identificados una serie de puntos característicos en una imagen de origen y de destino, la obtención de las funciones de deformación que

mapean los puntos desde la imagen destino a la de origen son equivalentes a la determinación de dos superficies suavizadas. Es decir, dos superficies las cuales pasan a través de puntos combinatorios identificados de la imagen origen y destino. Esta formulación permite disminuir una gran cantidad de cálculo en la interpolación de datos dispersos para hacer frente al problema de la generación de deformación. Además, ofrecen una forma genérica para especificar características desde cualquier primitiva (por ejemplo, curvas spline) pudiendo ser seleccionadas desde un conjunto de puntos formando una **coberturas con curvas spline**. El programa computacional para morphing de la empresa **Avid Technology** llamado **Elastic Reality**, utilizaba curvas para mejorar la especificación de características y también la interpolación de datos dispersos.

Las técnicas de deformación basadas en principios variacionales han sido ampliamente utilizadas en los gráficos por ordenador para modelar objetos flexibles en tres dimensiones. En estas técnicas, los requisitos para una deformación como es la suavidad, son representados por las **energías funcionales**⁽²⁸⁾ y la forma deseada de un objeto se obtiene reduciendo al mínimo la sumatoria de las energías funcionales. Los problemas de **minimización de energía** son posteriormente transformados por las ecuaciones parciales diferenciales, que suelen ser resueltas con métodos numéricos.

Las técnicas de minimización de energía garantizan que las funciones para generar deformación tengan la propiedad uno-a-uno. Cuando una deformación es aplicada a una imagen, la propiedad uno-a-uno evita la deformación de la imagen, en especial el plegado sobre sí misma en su parte posterior. El método de minimización de energía se propuso para derivar uno a uno las funciones de la deformación. Esta implementación permite ampliar las primitivas para especificaciones tales como puntos, polilíneas y curvas. Internamente, todas las primitivas son identificadas y reducidas a un conjunto de puntos. Estos puntos son luego utilizados para generar una deformación, interpretado como una deformación 2D de un recubrimiento rectangular (placa reticulada). Los requisitos para una deformación son representados en términos de energía y son conformados minimizando sus sumatorias. La técnica genera deformaciones naturales, ya que se basa en términos de valores físicos de energía. El rendimiento de este método, sin embargo, se ve obstaculizado por su alto coste computacional.

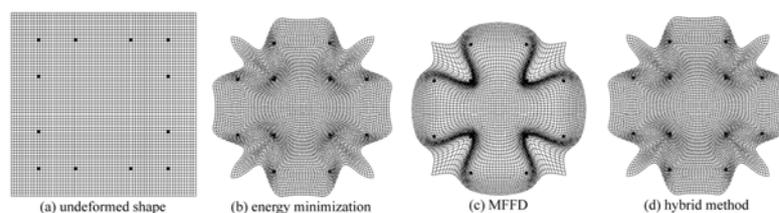


Fig 22. Lee, Chwa, Shin y Wolberg (1995). Comparación de la forma deformada de una placa reticulada. (a) Placa reticulada sin deformar (b) Utilización de minimización de energía (c) Utilización de deformación de formas libres multi-nivel (d) Método híbrido.

Existe otro método de generación de deformación que logra un gran rendimiento mediante la aplicación de

(28) La energía funcional es la energía total de un determinado sistema, como una función del estado del sistema. En los métodos de energía para la simulación de la dinámica de estructuras complejas, un estado del sistema es a menudo descrito como un elemento de una función espacial apropiada. Para estar en este estado, el sistema paga un determinado costo en términos de energía requerida por este estado.

deformación de formas libres multi-nivel (MFFD)⁽²⁹⁾, a través de una jerarquía de entramados de control que generan una función de deformación. En particular, las deformaciones se derivan de las limitaciones de posición mediante la introducción de las MFFD, como una extensión a la **deformación de formas libres**⁽³⁰⁾ (FFD)⁽³¹⁾. Para obtener superficies suavizadas para funciones de transición, se simplifican las MFFD obteniendo una interpolación multi-nivel de una B-spline. Este algoritmo de interpolación genera una superficie continua en forma eficiente a través de un conjunto de puntos dispersos.

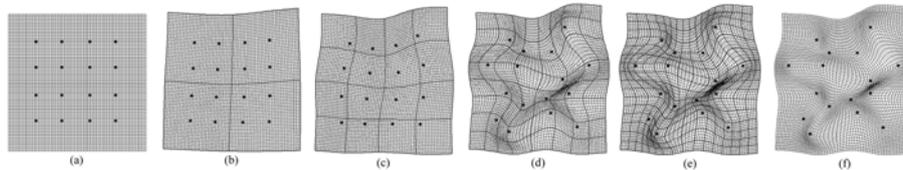


Fig 23. Lee, Chwa, Shin y Wolberg (1995). Ejemplo en el que una deformación de formas libres multi-nivel es aplicado para generar una deformación de una placa a partir de restrictores de posición. (a) Muestra los puntos seleccionados en la forma de la placa sin deformar. (b-e) Se muestra una secuencia de deformaciones en los cuales las posiciones deformadas de los puntos seleccionados se aproximan gradualmente a las posiciones especificadas. (f) Muestra la deformación resultante con las posiciones especificadas. En este ejemplo, la manipulación de la deformación de formas libres se realiza en lapsos no superiores a dos veces, en cada nivel de la retícula de control.

Con el fin de ayudar al usuario y en lugar de editar una malla, se pueden especificar un pequeño conjunto de primitivas características sobre la forma a transformar. Estas son las **snakes**⁽³²⁾ (culebras), las cuales son utilizadas para reducir la carga de especificación de características. Las **snakes**⁽³³⁾ son spline de energía minimizada que se mueven bajo la influencia de una imagen y de las fuerzas de restricción. Éstas fueron en sus comienzos asimiladas en el campo de la visión computarizada como un modelo de contorno activo⁽³⁴⁾. La especificación de características eran más eficientes con las snakes, ya que éstas sólo debían ser colocadas cerca de los rasgos distintivos. El usuario posicionaba, empujando las snakes hacia las aristas prominentes, de forma que perfeccionaban sus posiciones finales y posibilitaban de forma fácil y precisa la captura de la posición exacta de las características.

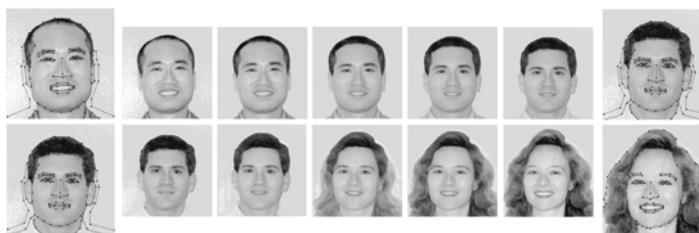


Fig 24. Lee, Chwa, Shin y Wolberg (1995). Metamorfosis de imagen con la utilización de snakes (culebras) y deformación

(29) Multilevel free-form deformation.

(30) Sederberg, T. W., and S. R. Parry. 1986. Free-form deformation of solid geometric models. Proceedings SIGGRAPH '86 20 : 151-60.

(31) Free-form deformation.

(32) Lee, Seung-Yong, Kyung-Yong Chwa, Sung Yong Shin, and George Wolberg. 1995. Image metamorphosis using snakes and free-form deformations. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), .

(33) Modelo de contornos activos, también llamados snakes (culebras), son unas estructuras de trabajo que sirven para delinear el contorno de los objetos de una imagen 2D, por ejemplo con mucho ruido.

(34) Kass, Michael, Andrew Witkin, and Demetri Terzopoulos. 1988. Snakes: Active contour models. International Journal of Computer Vision: 321-31.

de formas libres.

Existen además, técnicas de **multi-resolución**⁽³⁵⁾ para establecer correspondencia de rasgos y poder capturar eficazmente propiedades geométricas. Estas técnicas amplían el algoritmo convencional para morphing de imagen, ofreciendo un control adicional sobre el tratamiento individual de múltiples resoluciones que se utilizan en la representación wavelet⁽³⁶⁾ (óndula), cuando se pasa de la imagen fuente a la de destino. Esto posibilita al animador la capacidad de introducir una disparidad entre la transformación de las características globales y detalladas, lo que da lugar a nuevos e interesantes efectos⁽³⁷⁾ que no son posibles con los métodos tradicionales.

El cálculo de una imagen intermedia con los algoritmos para morphing de imagen convencional se realiza por lo general en tres pasos: en primer lugar, la determinación de la correspondencia de características y de unos rasgos geométricos intermedios; en segundo lugar, la deformación de las imágenes fuente y destino en dirección a las imágenes intermedias que coinciden con los rasgos geométricos; y por último, la mezcla de las dos imágenes deformadas. El algoritmo para multi-resolución altera el tercer paso, haciendo la mezcla dependiente de los niveles de multi-resolución con una nueva transformación especializada con wavelet⁽³⁸⁾ 2D.

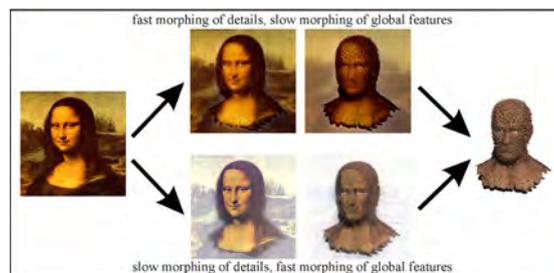


Fig 25. Kopp y Purgathofer (1992). Morphing con diferentes parámetros de multi-resolución

Las técnicas de morphing con imágenes pueden generar transiciones entre las imágenes 2D. Sin embargo, si existen diferencias en la postura (pose) de un objeto o en el punto de vista, estos parámetros causan distorsiones incómodas en las imágenes transformadas que son difícil de corregir manualmente. La técnica llamada **morphing de vista**⁽³⁹⁾ (*view morphing*) utiliza los principios básicos de la geometría proyectiva e introduce una simple extensión al morphing de imagen, lo que permite corregir y controlar correctamente la proyección de

(35) Kopp, Manfred, and Werner Purgathofer. 1992. Multiresolution image morphing. Viena, Austria: Vienna University of Technology, Institute of Computer Graphics, .

(36) El término original francés ondelette, introducido por Jean Morlet y Alex Grossmann, ha sido traducido al inglés como wavelet, y también al castellano como ondículas, ondeletas u onditas. La transformada de óndula (frecuentemente también transformada wavelet) es un tipo especial de transformada de Fourier que representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada óndula madre). La teoría de óndulas está relacionada con campos muy variados, como el procesamiento digital de imágenes. En cuanto a sus aplicaciones, la transformada de óndula discreta se utiliza para la codificación de señales, mientras la continua se utiliza en el análisis de señales. Por otra parte, la versión discreta de este tipo de transformada se utiliza fundamentalmente en ingeniería e informática.

(37) Hahmann, S., G. P. Bonneau, B. Caramiaux, and M. Cornillac. 2007. Multiresolution morphing for planar curves. Computing 79 (2) (April): 197-209.

(38) Stollnitz, Eric J., Tony D. DeRose, and David H. Salesin. 1996. Wavelets for computer graphics: Theory and applications. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

(39) Seitz, Steven M., and Charles R. Dyer. 1996. View morphing. Paper presented at Proceedings of SIGGRAPH '96 (New Orleans, LA, August 4-9, 1996), .

una cámara en 3D y las transformaciones de una escena.

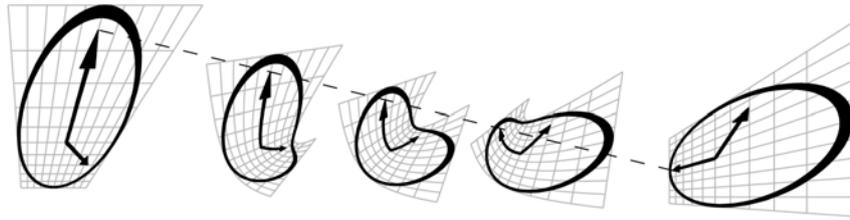


Fig 26. Seitz y Dyer (1996). Transformación de distorsión formal. Interpolación lineal de dos vistas de un reloj en perspectiva (extremo izquierdo y derecho), que provoca un efecto geométrico de flexión en las imágenes intermedias. La línea discontinua muestra la trayectoria lineal de una característica en el curso de la transformación. Este ejemplo es indicativo de los tipos de distorsiones que pueden plantearse con las técnicas de morphing de imágenes.

La técnica funciona pre-deformando dos imágenes antes de calcular una transformación y a continuación, post-deformando las imágenes interpoladas. Lo novedoso de esta técnica es que no se requiere ningún tipo de información respecto a la forma tridimensional y la técnica puede ser aplicada a fotografías y dibujos, como también a imágenes renderizadas. Esta técnica tiene la capacidad de sintetizar los cambios tanto en la estructura como en el punto de vista de la imagen, ofreciendo una gran variedad de interesantes efectos tridimensionales mediante simples transformaciones de la imagen.

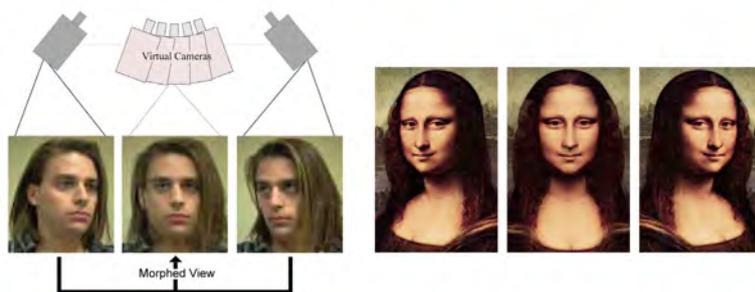


Fig 27. Seitz y Dyer (1996). **(Izq)** El morphing de vista entre dos imágenes de un objeto tomadas desde dos puntos de vista diferentes produce la ilusión de estar moviendo físicamente una cámara virtual. **(Der)** Morphing de vista de la Mona Lisa, la imagen del centro está a mitad de trayecto entre la imagen original de la izquierda y su reflejada de la derecha.

En el 2004 Xiao y Shah⁽⁴⁰⁾ desarrollan una técnica donde se puede navegar en una escena, elaborando una escena dinámica usando tres imágenes fijas. Tras la segmentación de tres fotogramas referenciados en diversas capas, los nuevos puntos de vista en la escena dinámica pueden ser generados aplicando el algoritmo que desarrollan. Diversos objetos rígidos (obtenidos de las imágenes estáticas) pueden moverse en cualquier orientación según la dirección.

(40) Xiao, Jiangjian, and Mubarak Shah. 2004. Tri-view morphing. *Computer Vision and Image Understanding* 96 (3) (12): 345-66.

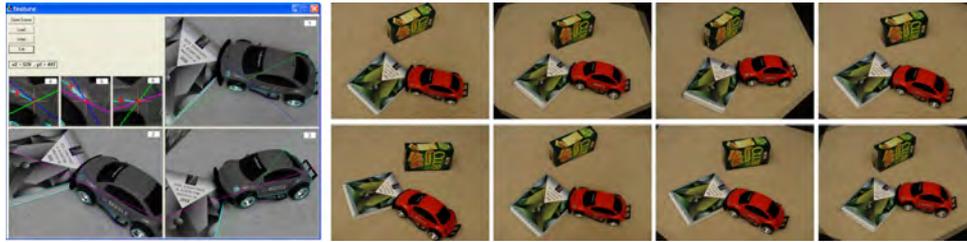


Fig 28. Xiao y Shah (2004). (Izq) Distintas ventanas ampliadas para alinear puntos característicos correspondientes. (Der) Fotogramas de la animación producida.

Esta cámara virtual puede ser utilizada para ver la escena dinámica desde nuevas vistas, en lugar de los puntos de vista originales (dados por la posición estática de la cámara). Además, permite obtener una multiplicidad de morphing de vistas, donde se puede volar sin problemas a través de la escena sobre un espacio 2D construido con más de tres cámaras. Por último, presentan una serie de vistas virtuales con calidad fotográfica, que pueden ser generadas para realizar un vuelo a través de un entorno virtual cubierto por varias cámaras estáticas.

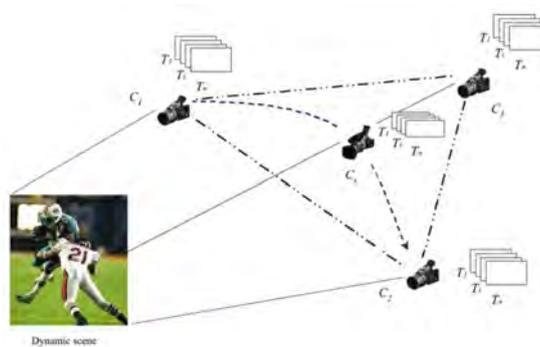


Fig 29. Xiao y Shah (2004). Síntesis de video 4D. Una escena dinámica es capturada por tres cámaras de video. Para cada intervalo de tiempo, el morphing Tri-view puede ser utilizado para generar una cámara de video virtual y navegar por la escena.

3.5. Morphing tridimensional: El objeto, su representación y transformación.

En años recientes, muchos algoritmos han sido propuestos para calcular una transformación entre dos modelos con forma tridimensional. El morphing tridimensional puede ser utilizado para mezclas formales (morphing entre objetos de formas diferentes), en la animación por ordenador (interpolando superficies intermedias del mismo objeto en dos posiciones distintas), sintetizando superficies (editando una forma existente, para luego realizar un morphing con la forma modificada) y muchos otros más.

Es destacable la relación que existe entre la técnica utilizada para el morphing y el tipo de representación del objeto elegido para la implementación del método. La capacidad de representación está directamente relacionada con su estructura de datos correspondiente, y a su vez, la estructura de datos posee una gran trascendencia en el grado de dificultad con que cada tipo de datos y sus respectivos algoritmos transforman un objeto en otro. Por otra parte, los principios que sustentan cada método y la habilidad de un usuario para controlar la secuencia del morphing son fuertemente dependientes con el procedimiento para especificar la forma.

Un objeto utilizado en las técnicas de morphing tridimensional, presenta una noción de la forma que es difícil de comprender. A modo de ejemplo, un tipo de forma como la **representación de fronteras**, contiene usualmente una estructura de datos con una doble información: topológica y geométrica. Mientras la información topológica tiene una naturaleza combinatoria y una relación de adyacencia entre caras poligonales o parches parametrizados. La información geométrica puede variar continuamente al describir las coordenadas exactas de los vértices o puntos de control que definen las caras o parches en transición. Cabe aclarar que el termino topología hace referencia a dos conceptos: el primero se refiere a una subdivisión específica (una red vértice/arista/cara) de un objeto descrito con un modelo poliédrico o de parches. Mientras que el segundo esta referido al espacio topológico global que afecta el conjunto de puntos de la superficie del objeto (la noción del espacio topológico no depende de una subdivisión particular, al igual que una subdivisión o una malla, las cuales determinan completamente las características de su propio espacio topológico subyacente)

Retomando esta noción de dualidad formal en la información gráfica con que se manipula un morphing 3D, resulta relativamente fácil extraer las características topológicas (espacio topológico global) de un objeto con sólo mirarlo, es decir, se puede contar el número de componentes conectados o el número de aberturas que presenta el objeto. Por otra parte, la geometría requiere mayor complejidad en su descripción. Esto se debe a que puede ser descrita en términos de características, tales como los abultamientos o concavidades, pero estos términos pueden no ser suficientes para caracterizar las formas sin entrar en ambigüedades. Además, esta doble información puede ser restrictiva entre sí. Por ejemplo, un objeto topológicamente equivalente a un toro (forma con una abertura) no puede ser convexo (la **convexidad**⁽⁴¹⁾ es una característica geométrica),

(41) La convexidad de una curva o una superficie es la zona que se asemeja al exterior de una circunferencia o una superficie esférica, siendo el concepto opuesto a la concavidad. Una superficie es convexa si para cada par de puntos que pertenecen a su superficie, el segmento que los une está totalmente incluido en el interior de ésta. En otras palabras, en un conjunto convexo se puede ir de cualquier punto a cualquier otro en vía recta, sin salir del mismo.

ya que una superficie convexa con todos sus límites cerrados es **homeomorfa**⁽⁴²⁾ a una esfera. Todos estos conceptos serán fundamentales para comprender el proceso del morphing y se desarrollaran extensamente en un capítulo posterior.

Según Lazarus y Verroust⁽⁴³⁾, quienes elaboraron un estudio general sobre los trabajos de investigación relacionados con el problema del morphing tridimensional, propusieron dos clases de técnicas⁽⁴⁴⁾ de morphing mayoritarias:

- Métodos basados en volumen.

- Métodos basados sobre representaciones de frontera.

En la clasificación que proponían, el primer método estaba relacionado con técnicas volumétricas y podía ser dividido en enfoques basados en voxel y técnicas de superficie implícita. La segunda técnica, la cual estaba condicionada por el contorno de la forma, tenía relación con el morphing de mallas o superficies poligonales.

Una de las mayores ventajas de las técnicas volumétricas es su capacidad para transformar fácilmente formas que tienen topologías diferentes. Sin embargo, carecen de un control detallado, siendo difícil determinar la correspondencia de características y las formas de control en la transición. Otra desventaja de estos enfoques es la pérdida de calidad, por ejemplo, la pérdida de rasgos angulados (definición de aristas) debido a la aproximación de las formas mediante las funciones de suavizado distante (*smooth distance functions*).

Una de las principales ventajas de las técnicas basadas en la representación de fronteras es la capacidad de control sobre el morphing. Esta capacidad de control tiene relación con la correspondencia de característica, la cual puede ser establecida a través de la correlación entre mallas o en una relación directa (vértice a vértice) entre formas análogas. Aunque existen implementaciones que lo logran, una desventaja de estos enfoques es su dificultad para transformar formas que tienen diferente topologías de superficie (es decir, diferentes géneros y/o conectividad), sobre todo con las técnicas que exigen una estricta correspondencia entre los vértices de las aristas en las formas de origen.

(42) En topología, un homeomorfismo (igual forma) es una biyección entre dos espacios topológicos por una aplicación biyectiva que es continua y cuya recíproco es continua.

(43) F. Lazarus and A. Verroust, "Three-Dimensional Metamorphosis: A Survey," *The Visual Computer*, vol. 14, nos. 8-9, pp. 373-389, 1998.

(44) Se entiende como técnica a un procedimiento o conjunto de reglas, normas o protocolos que tienen como objetivo obtener un resultado determinado. En este caso, la transformación de la forma.

3.6. Métodos basados en volumen.

Estas técnicas se definen a partir de un tipo específico de objeto gráfico. Estos objetos se describen como una función de un conjunto de niveles definidos en el total del espacio tridimensional. Están determinados por una **función específica**, la cual permite detectar en un conjunto de puntos el interior y el límite de dicho objeto. Un objeto con una representación volumétrica, es descrito con una función de densidad constante en el área del modelado de sólidos. Adicionalmente, una entidad proporciona un valor en cada punto del espacio, ya sea evaluando una función analíticamente expresada o recuperando (adquiriendo) el valor de muestras específicas almacenadas en una matriz 3D. Las superficies implícitas y objetos voxelizados son de esta categoría.

Para que no exista confusión en relación a otros métodos de superficie que serán explicados posteriormente. La utilización de la superficie límite en el objeto volumétrico tiene relación con la definición de lo que se encuentra en el interior y limitando la forma (volumen límite). El objeto se caracteriza por un conjunto de puntos definidos por una función. El interior y el límite del objeto se definen considerando todos los puntos que contiene la función, si no cumplen dicha función están fuera del objeto.

A modo de sumario y como primera clasificación, se describen los distintos objetos volumétricos, según su correspondiente representación y características gráficas:

a) Geometría constructiva de sólidos (CSG)⁽⁴⁵⁾

Ésta es la representación de objetos volumétricos más extendida en el área del modelado de sólidos y el CAD⁽⁴⁶⁾- CAM⁽⁴⁷⁾. Es la representación preferida para objetos volumétricos que posean una geometría y topología bien definida, abarcando tanto la descripción y la representación de un sólido. La descripción de los CSG es fácilmente ampliable para incluir un conjunto diferente de operaciones distintas a las operaciones booleanas. No obstante, es difícil describir objetos volumétricos no uniformes con la representación CSG. Los objetos de forma irregular son difícil de manipular, ya que por ejemplo, en este tipo de objetos volumétricos se incluye la representación de ciertas partes del cuerpo humano. Por el contrario, una característica favorable de las formas CSG es la fácil clasificación de puntos arbitrarios que se encuentren dentro o fuera de la forma creada. Un punto cualquiera es simplemente clasificado en relación a todas las primitivas base y luego, la expresión booleana resultante se evalúa como resultado. Ésta es una cualidad necesaria para algunas aplicaciones, como la detección de colisiones.

b) Descripción de funciones implícitas

Las funciones implícitas son un método efectivo para describir los objetos volumétricos. Consisten en una función donde su conjunto de elementos están delimitados conformando el objeto. La función puede ser interpretada como una **función de densidad**⁽⁴⁸⁾. De cierta forma, esta descripción puede ser usada para los

(45) CSG (Constructive Solid Geometry).

(46) CAD (Computer-Aided Design). Diseño asistido por ordenador

(47) CAM (Computer-Aided Manufacturing). Fabricación asistida por ordenador.

(48) Es una función, usualmente denominada $f(x)$ que describe la densidad de la probabilidad en cada punto del espacio de tal manera que la probabilidad de que la variable aleatoria tome un valor dentro de un determinado conjunto sea la integral de la función de densidad sobre dicho conjunto.

objetos volumétricos no homogéneos, donde la variación de la función de densidad esta encapsulada dentro de la función. Esto permite que las funciones implícitas constituyan una poderosa herramienta para sintetizar objetos volumétricos con formas geométricas complejas.

Los *objetos globulares*, como **blobs** (blobby objects) y **metabolos** (*Meta Balls*) o también **objetos blandos** (*soft objects*) fueron desarrollados en el trabajo de James Blinn de 1982⁽⁴⁹⁾. Este trabajo fue motivado por la necesidad de visualizar las estructuras moleculares con mayor precisión. Se trataba de una técnica de gráficos por ordenador para simular interacción orgánica entre diferentes objetos n-dimensionales. Se pueden utilizar diferentes objetos matemáticos para definir este tipo de geometrías. Existen tres métodos comunes para la creación de las “**superficies implícitas**”⁽⁵⁰⁾, es decir, superficies que son contornos (**isosuperficies**) a través de algún campo escalar en 3D. El principio es siempre el mismo y se basa en determinar en un espacio de cuatro dimensiones el sub-espacio tridimensional que posee una propiedad concreta, es decir, un tipo de **función implícita**.

Las tres técnicas se distinguen por sus funciones de campo y son: **moléculas de agua** (*Blobby Molecules*), **metabolos** (*Meta Balls*) y **objetos blandos** (*Soft Objects*). La función de campo determina el valor en cada punto del espacio debido a algunos objetos geométricos primitivos subyacentes (normalmente puntos), segmentos de líneas, planos y planos limitados por poligonales. A modo simple una **metabola** tiene un comportamiento muy parecido a una gota de agua en un medio sin gravedad. En estas condiciones, una gota presenta una forma totalmente esférica, dos gotas tocándose ligeramente compartirán un lazo de unión y dos gotas muy próximas estarán cerca de formar una gran gota deforme.



Fig 30. Bernhard Franken, The Bubble - Pabellón BMW (1999). Una simulación informática con la interacción de dos gotas de agua fue utilizada para crear esta forma.

Las técnicas de modelado de superficies implícitas acrecentaron su atención debido a la flexibilidad para construir superficies de topología compleja con continuidad de orden superior⁽⁵¹⁾. Blinn⁽⁵²⁾, Nishimura *et al.*⁽⁵³⁾ y Wyvill *et al.*⁽⁵⁴⁾⁽⁵⁵⁾⁽⁵⁶⁾ utilizan las funciones implícitas para describir superficies. Estas eran definidas por la

(49) Blinn, James F. 1982. A generalization of algebraic surface drawing. *ACM Trans.Graph.* 1 (3) (July): 235-56.

(50) Bloomenthal, Jules, Chandrajit Bajaj, Jim Blinn, Marie-Paule Cani-Gascuel, Alyn Rockwood, Brian Wyvill, and Geoff Wyvill. 1997. *Introduction to implicit surfaces*. San Francisco, C.A.: Morgan Kaufmann Publishers.

(51) Ibidem.

(52) Blinn, James F., art cit.

(53) Nishimura, H., A. Hirai, T. Kawai, T. Kawata, I. Shirakawa, and K. Omura. 1985. Object modeling by distribution function and a method of image generation. *Journal of Papers Given at the Electronics Communication Conference '85 J68 (D(4))*.

(54) Wyvill, Geoff, Craig McPheeters, and Brian Wyvill. 1986. Data structure for soft objects. *The Visual Computer* 2 (4) (August): 227-34.

(55) Wyvill, Brian. 1994. Building and animating implicit surface models in SIGGRAPH '93 Course Notes.

(56) Wyvill, Brian, Andrew Guy, and Eric Galin. 1999. Extending the CSG tree. warping, blending and boolean operations in an implicit surface modeling system. *Computer Graphics Forum* 18 (2): 149-58.

suma de los potenciales basados en puntos y en donde cada punto generaba un campo de potencial esférico.

Cuando dos puntos estaban lo suficientemente cerca, sus campos de potencial se fusionaban conjuntamente de forma natural. Básicamente, en estos métodos los puntos o esferas eran las primitivas para la construcción de superficies. Sin embargo, los puntos no solían ser lo suficientemente potentes. Es por esto que resultaba innecesario aproximar una superficie plana junto a pequeñas esferas, las cuales debían estar muy juntas para evitar convertirse en prominencias⁽⁵⁷⁾ sobre la superficie. Las **superficies implícitas** demostraron ser particularmente eficaces para el modelado de objetos suavizados con cualquier tipo de topología. Muchos investigadores ampliaron la tradicional meta balls o técnica de modelado de blobs, introduciendo primitivas más generales para crear superficies complejas. Para esto utilizaron un **esqueleto** (armazón), definido por líneas, curvas o zonas planas (polígonos).

La **hipertextura** (*hypertexture*) es un tipo de objeto gráfico desarrollado en forma simultánea por Perlin y Hoffert⁽⁵⁸⁾ y también por Kajiya y Kay⁽⁵⁹⁾, ambos en el año 1989. Una hipertextura se define por una modulación de una función implícita formal, las que a su vez varían según unas funciones de modulación de densidad. El proceso de modulación reiterativa, con funciones de modulación convenientemente elegidas, dan como resultado un método muy eficaz para describir los objetos con una “geometría difusa”, como la piel y el cabello.

c) Descripción por conjuntos de nivel

El método de conjuntos de nivel es una técnica numérica para el seguimiento de interfaces y formas, también se les llama **isosuperficies**⁽⁶⁰⁾ (*isosurfaces*) y están estrechamente relacionadas con la descripción implícita de los objetos volumétricos. La ventaja del método es que se pueden realizar cálculos numéricos incluyendo curvas y superficies en una cuadrícula cartesiana fija sin tener que parametrizar estos objetos. El método de conjuntos de nivel facilita el seguimiento de formas que cambian su topología, por ejemplo, cuando una forma se divide en dos, se agujerea, o el inverso de estas operaciones. Todo esto hace que constituya una herramienta muy útil como apoyo en la visualización, manipulación y análisis de objetos volumétricos, sobre todo para modelar objetos que varían en el tiempo, como por ejemplo un objeto que se infla o una gota de aceite flotando en el agua.

d) Descripción por secciones (rebanadas)

Suponiendo que hay un objeto volumétrico, una línea recta y una familia de planos ortogonales a la línea recta, el objeto volumétrico puede ser descrito por un conjunto de intersecciones entre cada uno de los planos ortogonales a la línea recta y el objeto original. La familia de planos rebanan (seccionan) el objeto en objetos volumétricos 2D. Estos objetos 2D pueden ser imágenes o sólidos 2D, es decir, regiones del plano definidas por sus curvas delimitadoras. En ambos casos, se necesitan técnicas de reconstrucción potentes para obtener los objetos volumétricos desde las formas seccionadas.

(57) Prominencia: Elevación de algo sobre lo que está alrededor o cerca de ello.

(58) Perlin, Ken, and Eric M. Hoffert. 1989. Hypertexture. Paper presented at Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

(59) Kajiya, James T., and Timothy L. Kay. 1989. Rendering fur with three dimensional textures. Paper presented at Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

(60) Una isosuperficie es un análogo tridimensional de una isolínea. Es una superficie que representa los puntos de un valor constante (por ejemplo, presión, temperatura, velocidad y densidad) dentro de un volumen del espacio, es decir, es un conjunto de nivel de una función continua cuyo dominio es el espacio 3D.

e) Descripción por muestreo de puntos

Este tipo de descripción es una opción utilizada por los dispositivos de adquisición (scanner). Una descripción muy común para objetos volumétricos se realiza definiendo claramente un muestreo de puntos de una función de densidad. Desde el muestreo de la función de densidad, se debe utilizar algún método de reconstrucción para calcular la función de densidad en cualquier punto del espacio. Un tipo de representación importante que está relacionada con el muestreo de puntos es la representación de matrices que se analiza a continuación.

f) Representación de matrices

Para sólidos de densidad variable, una representación ampliamente utilizada es la representación de matrices. Cada celda de la matriz (denominada **voxel**⁽⁶¹⁾) tiene información de densidad, además de otros atributos del objeto. Un objeto gráfico volumétrico simulado por una representación de matriz es el análogo en tres dimensiones de una imagen, donde los vóxeles desempeñan el papel de los píxeles. Por esta razón, los objetos volumétricos representados en forma de matrices también se les llama imágenes 3D o **representación de vóxeles**. Comúnmente, los objetos volumétricos se consideran un sólido por su representación de matriz (si es un modelo voxelizado).

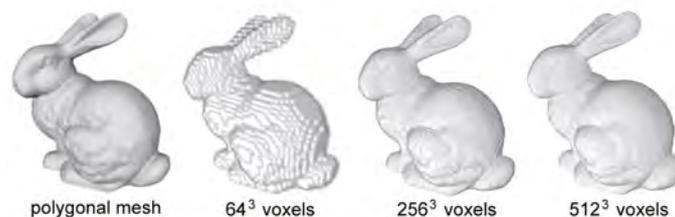


Fig 31. Resultado de la voxelización de una malla poligonal en un volumen de datos con resolución de 64^3 , 256^3 y 512^3 voxels.

g) Representaciones adaptativas no estructuradas.

Las representaciones de vóxeles para objetos volumétricos se utilizan principalmente por dos razones. En primer lugar, muchas técnicas provenientes del análisis y procesamiento de imágenes se pueden extender a estas (Kaufman⁽⁶²⁾ 1991). En segundo lugar, la visualización de la representación de voxel es fácil y poco exigente debido a su sencilla estructura. En particular, se pueden mencionar representaciones adaptativas mediante vóxeles de diferentes tamaños (utilizando la estructura de datos **octree**⁽⁶³⁾) o la descomposición no estructurada tales como la descomposición espacial simplificada. Otra elección es usar árboles de partición espacial binaria para representar el objeto volumétrico como una interesante jerarquía de semi-espacios. La representación no estructurada generalmente permite una mejor adaptación de los datos, pero presenta una mayor dificultad para

(61) El vóxel (del inglés volumetric pixel) es la unidad cúbica que compone un objeto tridimensional. Constituye la unidad mínima procesable de una matriz tridimensional y es el símil del pixel en un objeto 2D. Al igual que los píxeles, los vóxeles no contienen su posición (x,y,z) en el espacio 3D, sino que ésta se deduce por la posición del voxel dentro del archivo de datos. Para crear una imagen en tres dimensiones, los vóxeles tienen que sufrir una transformación de opacidad. Esta información da diferentes valores de opacidad a cada voxel. Esto es importante cuando se muestran detalles interiores de una imagen que quedaría tapada por la capa exterior más opaca de los vóxeles.

(62) Kaufman, Arie. 1991. Volume visualization (tutorial). Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press.

(63) El nombre octree está formado a partir de oct (octante) + tree (árbol). Una grilla octree es una estructura de datos en árbol, en la cual cada nodo interno tiene exactamente 8 "hijos". Las grillas octree se usan mayoritariamente para particionar un espacio tridimensional, dividiéndolo recursivamente en ocho octantes. Las grillas octree son las análogas tridimensionales de las grillas quadtree.

su manipulación. Para cada aplicación, el usuario debe buscar la descripción y la representación más adecuada del objeto volumétrico.

h) Representación de objetos definidos como mapas de elevación.

Esta última categoría es mucho más específica y restrictiva del número de objetos representados. **Lazarus y Verroust** lo clasificaron como un tercer tipo de representación de la forma dentro de las metodologías para el desarrollo de un morphing. Lo situaron como un subgrupo, pero no lo especificaron mayoritariamente. Este método particular, con algunas modificaciones de menor importancia, podía ser el mismo método aplicado a los objetos volumétricos. Sus principales aplicaciones estaban basadas en el modelado de terrenos y en el morphing de imagen.

En el caso del morphing de imagen, las técnicas de **Beier y Nelly**⁽⁶⁴⁾ y **Lee et al.**⁽⁶⁵⁾⁽⁶⁶⁾ incluían el uso de una deformación entre los dos campos del mapa para lograr combinar características notables tales como las cimas (rasgos mas marcados de la forma). La técnica de morphing 3D de **Lerios et al.**⁽⁶⁷⁾ era el equivalente a la de **Beier y Nelly** para transformaciones 2D. Su parecido estaba originado en el hecho de que un objeto expresado como mapa de elevación podía ser considerado como el conjunto de nivel cero de una función.

Para representar este tipo de objetos se utilizaba una **matriz de píxeles** con valores de color, la cual se denominaba normalmente **mapa de píxeles**. Una imagen bidimensional podía ser representada en tres dimensiones, al adoptar el **mapa de color** la características de un **mapa de elevación** (utilizando la codificación RGB) sobre la cuadrícula de píxeles. A partir de una cuadrícula rectangular con valores de color como una fotografía o imagen, cada valor y posición de la **matriz de imagen** se le asignaba una posición de altura según el color de cada pixel. Para realizar la transformación entre estos mapas de elevación, se utilizaba una interpolación que se obtenía promediando linealmente las alturas del mapa de elevación de inicio y término.

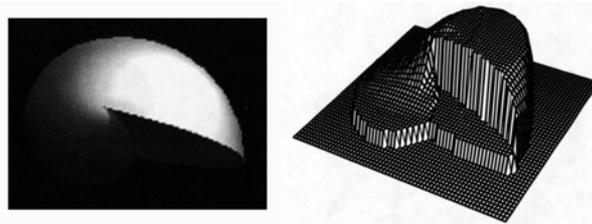


Fig 32. Imagen en escala de grises y el grafico de su función de atributos de altura.

Existen muchas formas de representar los datos de un terreno. Es el caso de los modelos de representación de superficies terrestres los que proporcionan estructuras fundamentales para el modelado de datos espaciales en

(64) Beier, Thaddeus, and Shawn Neely. 1992. Feature-based image metamorphosis. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings), .

(65) Lee, Seung-Yong, Kyung-Yong Chwa, James Hahn, and Sung Yong Shin. 1994. Image morphing using deformable surfaces. Paper presented at In Proc. of Computer Animation, .

(66) Lee, Seung-Yong, Kyung-Yong Chwa, Sung Yong Shin, and George Wolberg. 1995. Image metamorphosis using snakes and free-form deformations. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '95 Proceedings), .

(67) Lerios, Apostolos, Chase D. Garfinkle, and Marc Levoy. 1995. Feature based volume metamorphosis. Proceedings SIGGRAPH '95 29 (August): 449-56.

dos y media dimensiones (2.5 D). Estos modelos gráficos pueden ser globales, es decir, definidos a través de una única función de interpolación o por aproximación de datos, con métodos de kriging⁽⁶⁸⁾ o spline. También pueden ser modelos locales, los cuales se estructuran por fracciones (parches) que definen las particiones de la superficie. En los modelos locales, los datos distribuidos en forma regular generalmente corresponden a **Rejillas Regulares Cuadradas** (*Regular Square Grids - RSG*), mientras que los datos dispersos en general, llevan unas **Redes Irregulares Trianguladas** (*Triangulated Irregular Networks - TIN*).

Las **Rejillas Regulares Cuadradas** son un modelo con una matriz de dos dimensiones que indica los valores de altura de los vértices del terreno. Además, la posición del elemento en la matriz está sujeto a las coordenadas del eje X y Z del vértice correspondiente. Para cargar el mapa de altura en cada fotograma clave de un morphing se utiliza la información de las alturas, la cual está normalmente guardada en mapas de bits utilizando un formato con escala de grises (8-bit y 256 intensidades). Luego se lee el valor del pixel, ordenando pixel por pixel en la primera fila y a continuación, alineándolos por columnas. Después, se multiplica por un factor de escala y luego se pone en una matriz de dos dimensiones de forma secuencial. Este matriz de dos dimensiones es el mapa de altura del terreno. Posteriormente, se genera un mapa de altura correspondiente a cada fotograma clave.

Es un formato sencillo, que esta relacionado con los objetos definidos como mapas de elevación. Su principal desventaja es que no puede representar topografías complejas. Sin embargo, comparando con el formato de datos TIN tiene un tamaño de dato pequeño, un algoritmo simple y tiene a su favor que puede ser comprimido y descomprimido cuando se necesita representar un gran número de datos a gran escala. Es por esto que su utilización es para representar información de terrenos con una gran extensión, preferentemente en técnicas de **geomorphing** para las transiciones en la visualización de territorios con diferentes niveles de detalles.

El otro formato de **Redes Irregulares Trianguladas**, utiliza una serie de triángulos irregulares para representar los datos topográficos. El algoritmo de generación de datos es bastante complejo, pero puede representar todo tipo de terrenos irregulares (rugosidad). Este tipo de modelo en particular, permite la representación de un conjunto de componentes básicos (como aristas, caras y vértices) y sus relaciones espaciales. Estos modelos están asociados con los métodos basados en representaciones de frontera, específicamente con las mallas⁽⁶⁹⁾ y su utilización en transiciones con niveles de detalles en técnicas de **geomorphing**.

3.6.1. Implementaciones con técnicas de morphing basados en volumen.

Los algoritmos de transformación pertenecientes a esta categoría definen los objetos 3D como modelos volumétricos. Generalmente, hay enfoques basados en voxel que muestrean el espacio tridimensional mediante cuadrículas regulares y enfoques desarrollados con superficies implícitas que trabajan mediante funciones implícitas.

(68) Kriging es un conjunto de técnicas geoestadísticas para interpolar el valor de un campo al azar (por ejemplo, la elevación z de un paisaje en función de la localización geográfica) en un lugar no explorado a partir de la observaciones de su valor en otras regiones.

(69) Hoppe, Hugues. 1996. Progressive meshes. Paper presented at Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

John F. Hughes⁽⁷⁰⁾ en 1992, propuso un método que se puede clasificar como **morphing de Fourier programado**. Esta técnica trabajaba en el dominio de Fourier y trataba bandas individuales de frecuencia con funciones diferentes de tiempo. Esto permitía obtener una transición sin problemas desde un modelo volumétrico a otro. Básicamente era una transición entre **isosuperficies** de dos modelos. El procedimiento se basaba en la interpolación entre las **transformadas de Fourier**⁽⁷¹⁾ de dos modelos volumétricos y posteriormente, la transformación de los resultados de regreso. La idea era programar una mezcla de las frecuencias mediante una planificación donde se mezclaran primero las frecuencias bajas y se añadieran frecuencias altas en forma progresiva, a medida que los parámetros de animación del morphing cambiaban.

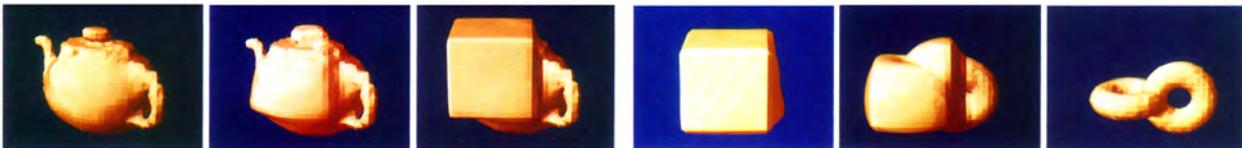


Fig 33. Hughes (1992). (Izq) morphing entre una tetera modelada y un cubo. (Der) Un cubo se transforma en un toro con dos aberturas.

Si bien este es un procedimiento ingenioso para obtener automáticamente una transformación, en el cual se mezclan las características de ambos objetos, presenta dos problemas significativos con respecto a las frecuencias. El primero es cómo obtener la partición de la frecuencia y el segundo es cómo obtener la mezcla correcta de las frecuencias, sobre todo cuáles son las restricciones (en el dominio de la frecuencia) necesarias para obtener una mezcla perceptivamente correcta.

De la misma forma que la anterior metodología, los objetos volumétricos que se utilizan para la transformación deben ser convertidos en una función. La **transformada de Fourier** es la que permite “traducir” estos objetos en una función. Es por esto que se divide en dos procesos: descomposición y reconstrucción. Sin embargo, no todas las funciones son continuas; pudiendo ocurrir que una función no sea continua en todo su dominio de definición. Si una función no es continua en un punto, se dice que la función tiene una discontinuidad. **Una discontinuidad por salto** es un problema difícil de solucionar al utilizar una mezcla de Fourier programado, debido a que la transformada de Fourier no tiene información sobre la localización de las frecuencias.

Una estrategia para superar el problema de la **discontinuidad por salto** cuando se combinan las funciones de atributos de objetos volumétricos, consiste en obtener una descripción **espacio x frecuencia** de las funciones de atributos, utilizando una adecuada transformación.

Los trabajos con superficies implícitas enfocan su atención en transformar objetos tridimensionales representados por funciones implícitas. Fueron **He et al.**⁽⁷²⁾ en 1994, los que desarrollaron una técnica de **morphing**

(70) Hughes, John F. 1992. Scheduled fourier volume morphing. Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings) 26 (2): 43-6.

(71) Propone que mediante la suma de señales sinusoidales de diferentes amplitudes, frecuencias y fases; es posible construir casi cualquier función arbitraria. La representación gráfica de la transformada de Fourier es un diagrama, denominado espectro de Fourier, donde se representa la frecuencia y amplitud de cada uno de los componentes sinusoidales determinados.

(72) He, Taosong, Sidney Wang, and Arie Kaufman. 1994. Wavelet-based volume morphing. Paper presented at Proceedings of Visualization '94, .

utilizando wavelet. Ésta tomaba en cuenta la localización de la frecuencia en la transformación, descomponiendo funciones de distancia con una pequeña **ondícula** (*wavelet*) transforme. En su artículo proporcionan una transformación programada entre las líneas de scaneo (*scanlines*) en los vóxeles de un objeto con los del otro objeto. Cada línea de scaneo del voxel es debidamente segmentada, lo que permite que sus límites con altas frecuencias sean correctamente mapeados con las respectivas líneas de scaneo del otro objeto.

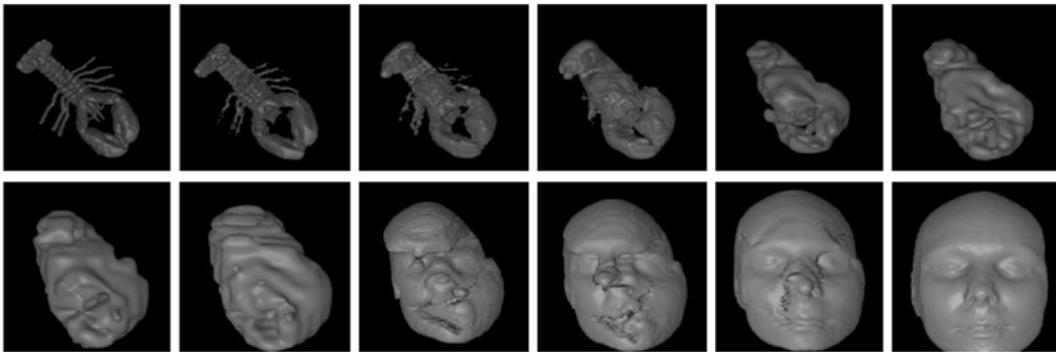


Fig 34. He *et al.* (1994). Morphing de volumen utilizando la ondícula (*wavelet*), entre un bogavante adquirido con una tomografía axial computarizada (CT) y una cabeza obtenida con tomografía por resonancia magnética (TRM).

Los métodos de **Hughes y He *et al.*** son técnicas de morphing semiautomáticas, puesto que la reducida intervención del usuario daba como resultado un menor control sobre la transformación. Se debe señalar que estas técnicas no requerían una deformación (*warping*) para realizar la alineación geométrica. Los mejores resultados se obtenían utilizando la ondícula, lo que permitía calcular una buena distribución espacial de las altas frecuencias y reconstruir el objeto antes de realizar la transformación.

Kaul y Rossignac en 1991⁽⁷³⁾ proporcionaron un algoritmo de interpolación para transformar poliedros genéricos basado en las sumas de Minkowski⁽⁷⁴⁾. El método utilizaba versiones a escala de los objetos de origen y de destino, era esencialmente volumétrico y no requería ninguna correspondencia entre los puntos de los objetos originarios. En 1994⁽⁷⁵⁾ amplían su técnica para una metamorfosis entre un conjunto de poliedros usando una formulación Bezier y una suma de Minkowski. El usuario no tenía ningún control sobre la transformación, sólo podía modificar la orientación relativa de los poliedros introducidos. El método era eficiente y ofrecía buenos resultados para poliedros convexos. La complejidad del algoritmo es mejorada por Galin y Akkouche en 1996.

(73) Kaul, Anil, and Jarek Rossignac. 1991. Solid-interpolating deformations: Construction and animation of PIPs. Paper presented at Proceedings of Eurographics '91, .

(74) La suma de Minkowski es una operación geométrica ampliamente utilizada en diversas áreas como la robótica, CAD, CAM, procesamiento de imágenes o sistemas de información geográfica. En geometría, la suma de Minkowski también conocida como dilatación de dos conjuntos A y B en el espacio euclidiano. Es el resultado de sumar todos los elementos de A a cada elemento de B, es decir, el conjunto: $A + B = \{a + b \mid a \in A, b \in B\}$.

(75) Rossignac, Jarek, and Anil Kaul. 1994. AGRELS and BIBs: Metamorphosis as a bézier curve in the space of polyhedra. Paper presented at In: Proc. Eurographics'94, .

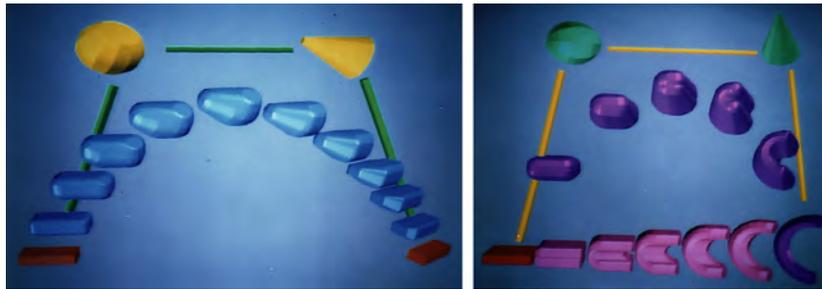


Fig 35. Kaul y Rossignac (1994). **(Izq)** La deformación del sólido azul se define como una curva Bézier controlado por cuatro poliedros. Los sólidos del inicio y final (en rojo) son interpolados. Las formas amarillas proporcionan un control adicional (las líneas verdes se han añadido manualmente para sugerir el orden del control). **(Der)** La metamorfosis lineal entre el bloque rojo (Inf. izq) y el medio toro (Inf. der) se muestra en color rosa. La metamorfosis cúbica Bezier entre estas dos formas, controlada por la esfera y el cono de color verde, se muestra con cinco formas clave en una trayectoria curva.

En 1996 **Chen et al.**⁽⁷⁶⁾ proponen un método para distorsión y morphing volumétrico utilizando campos de control con formas de discos. Un algoritmo de distorsión volumétrico permitía que un volumen fuera transformado en otro, bajo el control conjunto de dos o más campos de disco. El algoritmo también formaba un módulo primario (interpolación y distorsión) en un proceso de transformación volumétrica, que era una extensión de la técnica de morphing de imagen desarrollado por **Beier y Neely**.

La técnica era capaz de realizar transformaciones volumétricas complejas con un pequeño conjunto de campos de disco. La principal preocupación en el método de morphing de campo era que cada voxel tenía que estar calculado en relación a todos los campos, independientemente de la cantidad de influencia que recibía de cada campo. Asociando cada campo con la forma de un volumen apropiado para el proceso, por ejemplo un volumen cilíndrico o esférico en el caso de un campo de disco; la velocidad del proceso de transformación de campo podía mejorar, aunque había que asegurar que cada voxel estuviera incluido en al menos una delimitación del volumen.

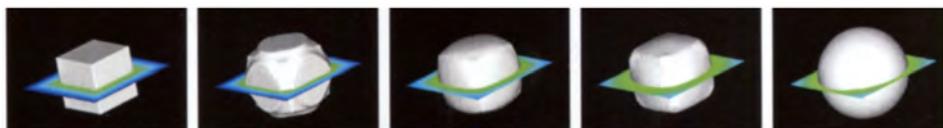


Fig 36. Chen et al. (1996). Morphing entre dos volúmenes.

Wyvill et al.⁽⁷⁷⁾⁽⁷⁸⁾ presentan una técnica de metamorfosis para **objetos blandos** (*soft objects*), donde los elementos del esqueleto compuestos de puntos, líneas, círculos y polígonos; son inicialmente puestos en correspondencia. La transformación es descompuesta en una transformación entre los esqueletos correspondientes y una interpolación de las funciones de campo asociadas. El usuario podía elegir la combinatoria automática o

(76) Chen, Min, Mark W. Jones, and Peter Townsend. 1996. Volume distortion and morphing using disk fields. *Computers and Graphics*(20): 567-75.

(77) Wyvill, Brian. 1994. Building and animating implicit surface models. SIGGRAPH '93 Course Notes ed.

(78) Bloomenthal, Jules, Chandrajit Bajaj, Jim Blinn, Marie-Paule Cani-Gascuel, Alyn Rockwood, Brian Wyvill, and Geoff Wyvill. 1997. *Introduction to implicit surfaces*. San Francisco, C.A.: Morgan Kaufmann Publishers.

seleccionar en forma interactiva la correspondencia de parejas de esqueletos. Este método era bastante simple e intuitivo, siempre y cuando los elementos del esqueleto no fueran muy numerosos. En 1999⁽⁷⁹⁾ presentan una técnica para transformar superficies implícitas construidas con elementos de un esqueleto convexo y mejoran el modelado de blobs tomando prestada la idea del árbol CSG, reforzando la deformación, la mezcla y las operaciones booleanas. Su trabajo está relacionado con las técnicas que proponen **Galin y Akkouche**.

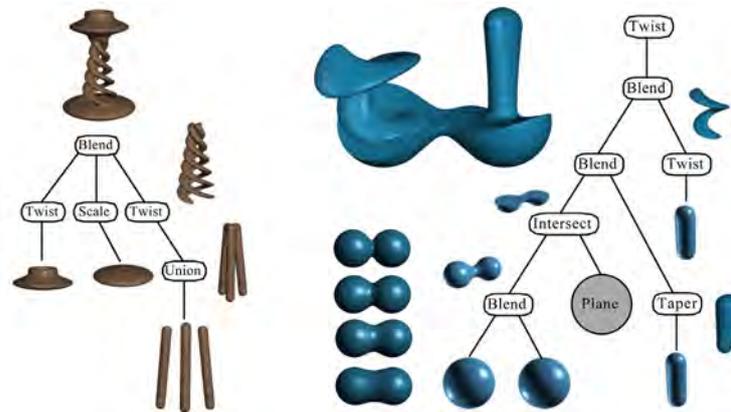


Fig 37. Wyvill *et al.* (1999). **(Izq)** BlobTree que representa el candelabro, además de la base y el apoya vela que también son BlobTrees. Ambos forman una unión de elementos basados en esqueletos poligonales. **(Der)** Modelo de superficie implícita, donde se incluyen operaciones booleanas y deformaciones, junto al BlobTree del procedimiento.

Galin *et al.*⁽⁸⁰⁾⁽⁸¹⁾ dirigieron el problema de la transformación de **objetos blandos** interpolando elementos de un esqueleto con la suma de Minkowski y luego extendieron dicha interpolación a la totalidad de los objetos. La característica principal del Blob-Tree era que los modelos complejos podían ser construidos con un pequeño número de primitivas de un esqueleto, utilizando combinaciones de forma arbitraria como la mezcla, la deformación y las operaciones booleanas. En esta implementación la interacción del usuario es crucial para la calidad de la transformación. Una vez creada la correspondencia gráfica, la complejidad radica en el cálculo de la suma de Minkowski de todos los componentes del esqueleto con sus correspondencias.



Fig 38. Galin *et al.* (1999). **(Izq)** Candelabro creado mediante la mezcla y torsión en la unión de tres cilindros formando

(79) Wyvill, Brian, Andrew Guy, and Eric Galin. 1999. Extending the CSG tree. Warping, blending and boolean operations in an implicit surface modeling system. *Computer Graphics Forum* 18 (2): 149-58.

(80) Galin, Eric, and Samir Akkouche. 1996. Blob metamorphosis based on minkowski sums. *Computer Graphics Forum (Eurographics '96 Proceedings)* 15 (3): 143-53.

(81) Galin, Eric, Antoine Leclercq, and Samir Akkouche. 1999. Blob-tree metamorphosis. *Proceedings of Implicit Surfaces* 9-16 .

una trenza y la sumatoria de dos esferas deformadas. Los nodos del árbol muestran los operadores booleanos de mezcla y deformación. Además, las hojas del árbol son caracterizadas por los elementos del esqueleto. **(Der)** Metamorfosis entre dos piezas de ajedrez: una torre y una reina.

Breen y Whitaker⁽⁸²⁾ utilizaron una superficie deformable para lograr una transformación fluida de un modelo de superficie implícita. Después de convertir la superficie deformable en un volumen de un conjunto de datos, una serie de procedimientos son aplicados para transformar los vóxeles y crear una secuencia de volúmenes. Este trabajo consideraba la interpolación de dos formas como un proceso donde una forma se deforma para maximizar su similitud con otra forma. El proceso optimiza una función objetivo, que va en incremento mientras se deforma un modelo de superficie implícita. La superficie deformable es representada como un **conjunto de nivel** (isosuperficie) de una función escalar densamente evaluativa en 3D.

Como los modelos de conjunto de nivel han demostrado imitar los modelos convencionales de superficie paramétricas deformables mediante la codificación de los movimientos de superficie como los cambios en los valores de escala de grises de un conjunto de datos de volumen. Los modelos de conjuntos de nivel deben tener una estructura matemática bien definida. Esta estructura conduce a un conjunto de procedimientos que describen cómo los valores del voxel pueden ser manipulados para crear deformaciones, que son representadas como una secuencia volumétrica. El resultado es un método de transformación tridimensional que ofrece variadas ventajas, incluidas las necesidades mínimas para la intervención del usuario sin parametrización del modelo, topología flexible y la precisión de sub-voxel.

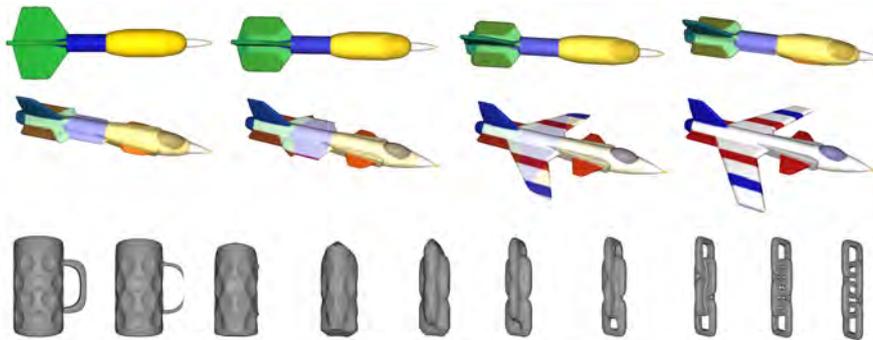


Fig 39. Breen y Whitaker (2001). **(Arr)** Un dardo transformado en un jet X-29 con la interpolación de la superficie coloreada. **(Ab)** Un tazón transformado en una cadena. Esto demuestra que los modelos de conjuntos de nivel pueden soportar fácilmente un cambio en su topología.

Las técnicas basadas **en campos de influencia y en características** utilizan la deformación en los objetos volumétricos de origen y destino con el fin de obtener una alineación de sus características. La transformación se realiza de tal forma que se calcula la deformación geométrica y la combinación de atributos simultáneamente.

En 1994 **Darsa**⁽⁸³⁾ elabora una técnica de morphing basada en **campos de influencia para imágenes**, donde el usuario especifica la transformación sobre las parejas de vectores de la imagen fuente y de destino. La implementación la extiende a los objetos volumétricos y eligiendo cuidadosamente los vectores consigue una

(82) Breen, David E., and Ross T. Whitaker. 2001. A level-set approach for the metamorphosis of solid models. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics 7 : 173-92.

(83) Darsa, Lucia. 1994. Graphical objects metamorphosis. master's thesis. Rio de Janeiro: Computer Science Department. PUC-Rio.

alineación geométrica favorable. **Lerios et al.**⁽⁸⁴⁾ en 1995 introducen una técnica para resolver el problema de la alineación, al proporcionar una fase de deformación utilizando la especificación basada en funciones. El trabajo que desarrollan utiliza **campos de influencias** de primitivas tridimensionales para distorsionar volúmenes, siendo la expansión tridimensional del trabajo desarrollado por Beier y Nelly. La correspondencia se especifica mediante parejas de elementos, que deben ser transformadas entre las formas destino durante el proceso del morphing. Las formas intermedias se obtienen mezclando los volúmenes deformados y el usuario especifica las características (rasgos) de correspondencia, utilizando puntos, segmentos, rectángulos o paralelepípedos.



Fig 40. Lerios et al. (1995). Morfing entre la cabeza de un humano y un orangután.

Las técnicas basadas en características también puede ser utilizadas como una herramienta de modelado. Esto se debe a que permiten la creación de nuevos objetos volumétricos al deformar un objeto volumétrico originario. El propósito de un **elemento característico** es identificar un rasgo significativo de ambos objetos que realizan la transformación. En el morphing basado en características, los elementos son manipulados en **parejas**. Estas se conforman con un elemento característico de la forma origen y su homólogo en la forma destino, es decir, una pareja de elementos conocidos y sus correspondientes rasgos en los dos volúmenes.

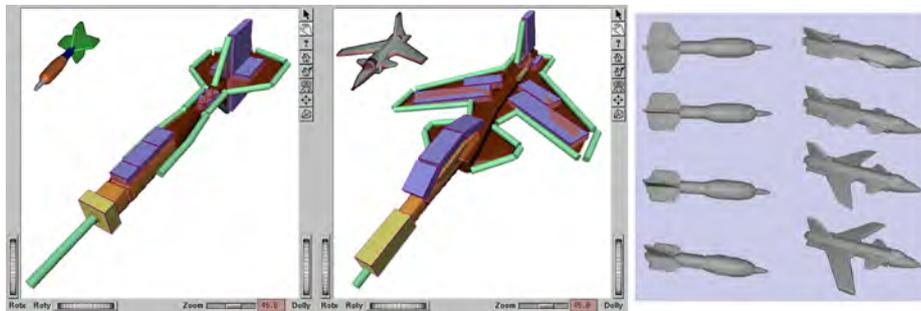


Fig 41. Lerios et al. (1995). Interface de usuario y los elementos característicos (atractores) utilizados para establecer la correspondencia entre modelos: puntos (no se muestran), segmentos, rectángulos y paralelepípedos. Los ejes X, Y y Z de cada elemento sólo aparecen cuando el usuario hace clic en un elemento con el fin de cambiar sus atributos. De lo contrario, siguen siendo invisibles para evitar que saturen el área de trabajo.

Para obtener un morphing se especifican un conjunto de elementos característicos emparejados, los cuales definen la correspondencia total de los dos objetos originarios. Estas parejas de elementos característicos interactúan como **atractor** (magneto), conformando una vestidura volumétrica anexa que se adapta a la volumetría de los modelos originarios. Aunque un único atractor puede mover, girar y estirar el volumen; múltiples

(84) Lerios, Apostolos, Chase D. Garfinkle, and Marc Levoy. 1995. Feature based volume metamorphosis. Proceedings SIGGRAPH '95 29 (August): 449-56.

atractores se combinan para formar una volumetría según diversas complejidades. Estas generan **zonas de interacción** llamadas **campos de influencia**. Cada atractor genera diferentes campos de influencia formal. El modelado con múltiples atractores se vuelve sencillo si se tienen atractores de variados tipos dentro de las herramientas. Cada elemento característico (atractor) debe ser diseñado de tal manera, que pueda delinear cualquier rasgo que posea un objeto. Sin embargo, la expresividad no sacrifica la sencillez, ya que los rasgos complejos pueden ir acompañando un grupo de elementos simples. Por lo tanto, la definición de los atributos en los atractores codifican sólo las particularidades esenciales de las características volumétricas.

Otra técnica de transformación que funciona con objetos volumétricos es la **metamorfosis por deformación guiada**, la cual fue desarrollada por **Carmel y Cohen-Or**⁽⁸⁵⁾ en 1997 y continuó con **Cohen-Or et al.**⁽⁸⁶⁾ en 1998. Esta metodología utilizaba deformaciones guiadas e interpolaba el campo distante del objeto gráfico desarrollado por **Payne et al.**⁽⁸⁷⁾ en 1992.

En el caso de tener dos o más objetos con una topología diversa, el uso de **campos distantes** fuerza al método a utilizar información volumétrica de los sólidos limitados por su superficie. Se podría considerar como una técnica de transformación volumétrica para superficies. El método de interpolación de campo distante se modifica para que la interpolación se realice en paralelo con la función de deformación. Los objetos se formulan como un conjunto de niveles de funciones distantes compuestas con alguna deformación espacial. La técnica implica dos pasos:

- Por un lado, se distorsiona el espacio tridimensional con el fin de que los objetos a transformar coincidan lo máximo posible. La interpolación del campo distante es guiado por una función de deformación controlada por un conjunto de **puntos de anclaje** correspondientes. Para reducir la distorsión de las formas intermedias, la función de deformación se descompone en una parte rígida rotatoria y una parte elástica.
- Por otra parte, se aminora la interpolación lineal de campos distantes deformados por la distorsión. Estos campos distantes son calculados desde los objetos voxelizados con una transformación distante tridimensional.

El método se aplica en un espacio tridimensional discreto, de forma que los objetos deben ser voxelizados. La ventaja de este método es la capacidad de transformación entre objetos que tienen diferente género topológico con muy buenos resultados. La interface de usuario permite seleccionar y anclar puntos característicos en cada objeto voxelizado (origen y destino), no siendo necesario establecer correspondencia entre las primitivas geométricas del modelo. Sin embargo, la correspondencia deseada (mapeado) la define el animador en términos de un número relativamente pequeño de puntos de anclaje.

(85) Carmel, Eyal, and Daniel Cohen-Or. 1997. Warp-guided object-space morphing. *The Visual Computer* 13 : 465-78.

(86) Cohen-Or, Daniel, David Levin, and Amira Solomovici. 1998. Three-dimensional distance field metamorphosis. *ACM Transactions on Graphics* 17 (No. 2): 116-41.

(87) Payne, Bradley A., and Arthur W. Toga. 1992. Distance field manipulation of surface models. *Computer Graphics and Applications*, IEEE 12 (1): 65-71.

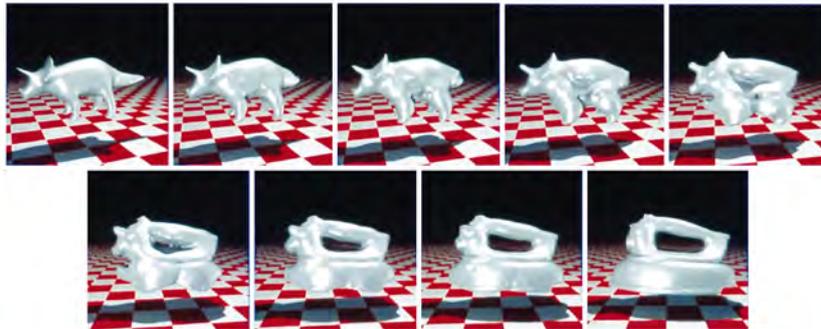


Fig 42. Cohen-Or y Levin (1998). 3d morphing entre un triceratops y una plancha. De los dos objetos a transformar solo la plancha tiene una abertura.

La técnica de **morphing basada en el esqueleto**⁽⁸⁸⁾ fue desarrollada en el 2000 por **Blanding et al.**⁽⁸⁹⁾ Predecesores de esta técnica fueron **Barrett et al.**⁽⁹⁰⁾, los cuales en 1994 describieron una técnica basada en un esqueleto que interpolaba contornos en dos dimensiones.

Según **Blanding et al.** el esqueleto de una forma tridimensional generalmente consiste en un conjunto de **láminas** intersectadas a lo largo de las **uniones** (juntas). Las **uniones** son curvas espaciales que para no degenerar las geometrías, representan la intersección de dos o tres láminas y se componen de los centros de las esferas con tres puntos de contacto distintos. Las **uniones** son los lugares en los que el esqueleto posee bifurcaciones. Los arcos de esqueleto o láminas que terminaban en puntos con un único contacto de esferas máximas eran denominados “alas”. El resto de elementos (sin alas) eran denominados elementos “cuerpo”.

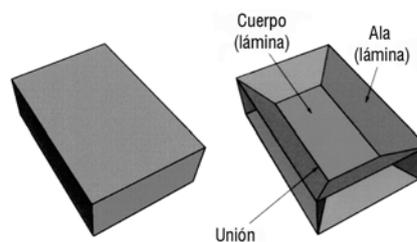


Fig 43. Blanding et al. (2000). **(Izq)** Bloque tridimensional. **(Der)** Forma esqueleto. La forma esqueleto tiene una lámina de cuerpo y 12 láminas de ala.

Cada lámina del esqueleto tiene asociada una función de radio que especifica el tamaño de la esfera máxima, es decir, la distancia mínima a la frontera. En un punto del esqueleto, el centro de una esfera con su radio correspondiente toca el límite del objeto en dos puntos de contacto, una en cada “lado” del esqueleto. El

(88) El esqueleto de una forma (también conocido como el eje medio en 2D o superficie en 3D) es el lugar geométrico de los puntos que están mínimamente equidistantes de por lo menos dos puntos limítrofes. En otras palabras, es el conjunto de los centros de discos o esferas máximas que se ajustan al objeto, tocando el límite de la forma en dos puntos de contacto. Se puede distinguir entre el endoesqueleto que consiste en aquellos puntos que están dentro del objeto, y el exoesqueleto que consiste en puntos exteriores. A menos que se haga una distinción específica, el esqueleto en general, se refiere al endoesqueleto.

(89) Blanding, Robert L., George M. Turkiyyah, Duane W. Storti, and Mark A. Ganter. 2000. Skeleton-based three-dimensional geometric morphing. *Comput. Geom. Theory Appl.* 15 (1-3) (February): 129-48.

(90) Barrett, William, Eric Mortensen, and David Taylor. 1994. An image space algorithm for morphological contour interpolation. Paper presented at In Proc. Graphics Interface, .

esqueleto y las funciones de radio asociadas son suficientes para describir completamente la frontera del objeto original.

Se calcula el esqueleto recortado a partir de la diferencia simétrica entre dos modelos de sólidos originarios y luego, se utilizan como formas intermedias. Este procedimiento de generación de la forma puede ser revertido, pudiendo ser utilizado para producir una secuencia de formas en un morphing final. Este procedimiento de morphing podía manipular objetos con un conjunto de características y topologías variadas.

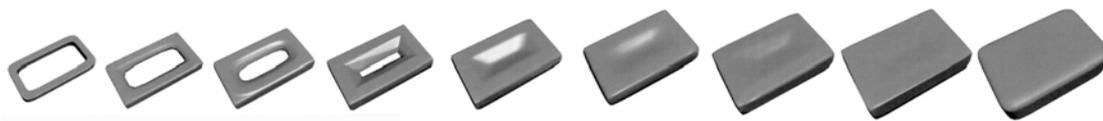


Fig 44. Blanding *et al.* (2000). Historia en nueve pasos de un morphing entre un toro rectangular y un bloque.

La técnica comenzaba especificando una definición particular de la **forma intermedia** deseada, que era utilizada para el cálculo de lo que pretendían formalmente. En concreto, se requería que cada punto que definía la frontera de la forma intermedia fuera equidistante a los puntos más próximos de las dos formas. El criterio de equidistancia para definir la forma intermedia sugería claramente el uso de esqueletos, los cuales consistían en puntos mínimamente equidistantes a dos puntos limítrofes de un objeto dado. El límite de la forma intermedia estaba definido por puntos mínimamente equidistantes a dos límites, por lo tanto se debía tener en cuenta el esqueleto de un objeto que incorporaba los límites de ambas formas. La incorporación de las fronteras se lograba mediante la construcción de la diferencia simétrica, cuyo esqueleto contenía el límite de la forma intermedia deseada. Recortando el esqueleto de la diferencia simétrica mediante la eliminación de los puntos que no fueran mínimamente equidistante a ambos límites de las formas se producía el límite de la forma intermedia.

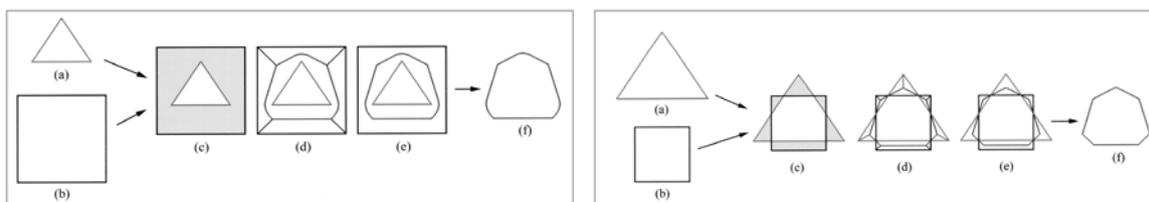


Fig 45. Blanding *et al.* (2000). Proceso para generar la forma intermedia entre un triángulo y un cuadrado. **(Izq)** (a) Triángulo. (b) Cuadrado. (c) Combinación utilizando sus diferencias simétricas. (d) El objeto resultante es “esqueletizado”. (e) Recorte. (f) Forma intermedia. **(Der)** Una de las formas está parcialmente encerrada sobre la otra (a) Triángulo. (b) Cuadrado. (c) Superposición. (d) Esqueleto del objeto resultante. (e) Recorte. (f) Forma intermedia.

En el 2001 **Xiang *et al.***⁽⁹¹⁾ describen un artículo sobre el modelado de **superficies de formas libres** y un algoritmo de **morphing basado en campos continuos**. El usuario en forma intuitiva podía diseñar superficies de formas libres con **esqueletos poliédricos** sin limitación en los tipos de esqueleto.

(91) Fang, Xiang, Hujun Bao, Pheng Ann Heng, TienTsin Wong, and Qunsheng Peng. 2001. Continuous field based free-form surface modeling and morphing. *Computers & Graphics* 25 (2) (4): 235-43.

Una de las prácticas extendida para modelar formas era construir un esqueleto que controlara la superficie resultante, la cual podía ser automáticamente refinada para producir una superficie final con forma compleja. Xiang *et al.* utilizaron un algoritmo que permitía a los poliedros ser utilizados como **esqueletos** de las superficies de formas libres. A diferencia de los métodos convencionales, comenzaban construyendo en cada esqueleto un campo continuo utilizando la interpolación variacional. Todos estos campos eran fusionados en un campo global continuo mediante la operación de mezcla, deformación o booleanas. En base a estos operadores básicos, el proceso de modelado podía ser representado por un árbol CSG (Geometría Constructiva de Sólidos) modificado, donde cada nodo de la hoja definía el campo de un esqueleto primitivo y cada nodo no hoja correspondía a una operación. La raíz era el campo compuesto por todos los sub-campos de las primitivas que creaban la isosuperficie deseada.

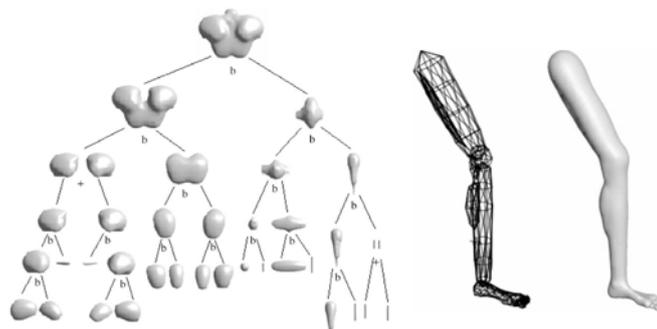


Fig 46. Xiang *et al.* (2001). **(Izq)** Un árbol CSG con la construcción de superficies complejas de formas libres con primitivas poliédricas simples. **(Der)** Un modelo de pierna construida con 19 esqueletos simples.

El esqueleto también establecía una correspondencia entre los puntos que determinaban las superficies en los objetos fuente y destino. La correspondencia de puntos sobre la superficie generada por el esqueleto, permitía realizar un morphing con los atributos de las superficie (por ejemplo, el color, la textura, la rugosidad superficial y la transparencia). El procedimiento basado en el esqueleto también admitía la transformación entre curvas abiertas o superficies. Una modificación del procedimiento básico permitía al usuario controlar el morphing especificando un conjunto de características correspondientes sobre los objetos iniciales y finales. El método era lo suficientemente sólido como para manejar cambios significativos en la geometría y la topología, tales como la creación y desaparición de protuberancias, hendiduras, orificios internos y salientes. El concepto esencial que permitía realizar el morphing era la utilización como forma intermedia del esqueleto recortado basado en la diferencia simétrica. La **forma intermedia** era un modelo de sólido válido, cuyo límite no se auto-intersectaba y era equidistante a las superficies de las formas originales.

En comparación con el método de superficie metabolas o blobs, la superficie final era aproximada por la **isosuperficie** del campo global. Es por esto que esta técnica relacionaba un menor número de esqueletos para construir una superficie compleja de forma libre y el usuario podía generar modelos complejos de forma más cómoda e intuitiva. Basados en la operación de mezcla de campo, el algoritmo de modelado podía realizar fácilmente el 3D morphing entre los dos poliedros arbitrarios. El usuario controlaba la totalidad del proceso de morphing al introducir adecuadamente ciertas restricciones correspondientes y formas de influencia. Al igual que en otros métodos implícitos de modelado de superficies, la utilización de este tipo de algoritmo ve dificultada la representación de aristas y esquinas anguladas, sin dejar de lado la utilización de operadores booleanos.

A pesar de su naturaleza global, el usuario podía utilizar esqueletos poliédricos con una alta complejidad, presentando una baja interactividad.



Fig 47. Xiang et al. (2001). **(Izq)** Dos secuencias de morphing eligiendo diferentes pesos. La formas de influencia controlan el resultado de la transformación, la secuencia inferior se genera sin formas de influencia mientras que la del medio tienes dos formas de influencia. **(Der)** Secuencia de transformación de la forma de un conejo hacia un cerdo. Las restricciones correspondientes se definen en los ojos, orejas, patas y colas de los dos modelos.

En el 2005 Jin et al.⁽⁹²⁾ proponen un método de morphing con efectos líquidos. Diseñan un algoritmo automático para representar superficies de mallas poligonales mediante blobs. Utilizando los blobs construyen la representación implícita a través de un procedimiento de optimización de energía, para que la distancia entre la isosuperficie de los blobs y la malla propuesta sea reducida al mínimo. Con la ayuda de la estructura jerárquica de los **árbol-esfera**, se establece la correspondencia entre los blobs de la forma origen y destino. La forma intermedia se obtiene interpolando linealmente los parámetros de los blobs.

Se utilizaron primitivas en el eje medio de los **árbol-esfera** de un determinado modelo poligonal para la estimación inicial de los blobs. Esto mejoraba en gran medida la solidez y la eficacia de la representación de la superficie basada en el modelo blobs. El **eje medio** (*medial axis*) de un objeto representaba su esqueleto y podía ser definido como los centros de un conjunto de esferas de tamaño máximo que llenaban el objeto. También podía ser considerado como el conjunto de puntos que estaban más apartados dentro del objeto, formando un esqueleto que daba la información sobre la topología del objeto y su geometría. En síntesis, estos puntos podían convertirse en el **esqueleto** de los **blobs** cuya isosuperficie representaba la forma del objeto.

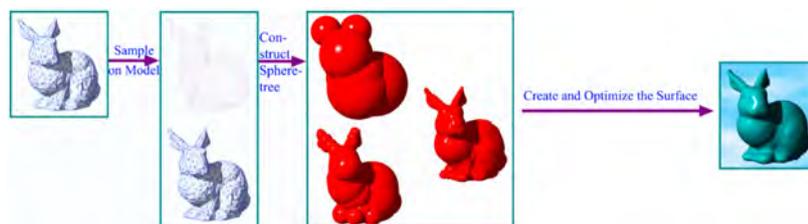


Fig 48. Jin et al. (2005). Proceso de reconstrucción de la superficie del blob. En rojo aparecen los ejemplos con esferas de eje medio en distintas jerarquías.

El eje medio del **árbol-esfera** era una estructura jerarquizada de esferas cuyos centros se localizaban en el eje medio. La jerarquía de eje medio en un **árbol-esfera** se completaba a través del proceso de actualización y adaptación del eje medio junto a la reducción de las esferas. En el método que proponían, la aproximación

(92) Jin, Xiaogang, Shengjun Liu, Charlie C. L. Wang, Jieqing Feng, and Hanqiu Sun. 2005. Blob-based liquid morphing: Natural phenomena and special effects. *Comput.Animat.Virtual Worlds* 16 (3-4) (July): 391-403.

(lineal) de los blobs hacia una malla poligonal eran generados desde las esferas en el eje medio de los **árbol-esfera** de la malla. Estas esferas eran denominadas **esferas de eje medio**.

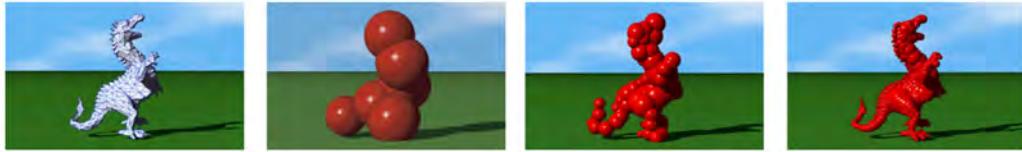


Fig 49. Jin et al. (2005). Modelo de dragón con tres niveles (jerarquías) de sus árbol-esferas de eje medio.

Con esta técnica, la aproximación de las superficies basadas en blobs estaba constituida por **superficies implícitas**. Estas superficies estaban definidas como una **isosuperficie** expresada por las funciones de campo de las primitivas (blobs). Es por esto que las superficies implícitas eran transformadas por la interpolación de las primitivas subyacentes (blobs) y las correspondencias debían ser establecidas entre blobs.

Para obtener las formas intermedias se utilizaban las dos categorías posibles para combinar e interpolar las isosuperficies. La primera estaba constituida por las técnicas denominadas **combinatoria celular** (*cellular matching*), las cuales combinaban los elementos según su posición espacial. La segunda se refería a los métodos que requerían información extra relacionada con los elementos, es decir, **combinatorias jerarquizadas** (*hierarchical matching*). En la práctica el funcionamiento de la combinatoria siempre se realizaba en dos fases. En primer lugar, entre las esferas de origen se establecían las correspondencias de características con menor nivel de detalle y en los objetos de destino se establecían automáticamente mediante la combinatoria celular. En segundo término, si era necesario el ajuste manual, éste era realizado y las esferas modificadas junto a sus parejas de características correspondientes eran combinadas nuevamente de forma automática. Por último, se interpolaban los parámetros de la representación implícita para obtener las formas intermedias.

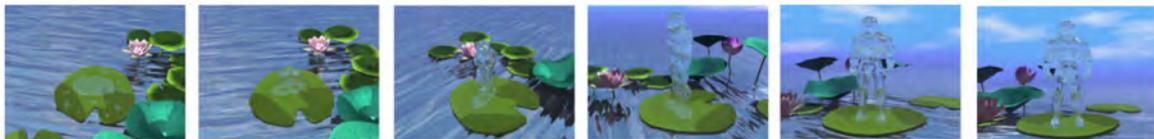


Fig 50. Jin et al. (2005). Seis fotogramas del morphing de un robot líquido.

3.7. Métodos basados sobre representaciones de frontera.

Las representaciones de frontera son muy populares para animar objetos y mundos virtuales tridimensionales. Un gran número de modelos y estructuras de datos han sido propuestos para representar objetos mediante su contorno o frontera. Las **superficies poligonales** y las **superficies parametrizadas**, tales como las superficies spline, son dos de los modelos principales utilizados por los modeladores gráficos.

La representación de la forma se realiza mediante un límite. En general, es una colección de elementos superficiales conectados, los cuales permiten delimitar y representar la frontera. Los enfoques de frontera para objetos tridimensionales son la extensión natural de los enfoques 2D⁽⁹³⁾⁽⁹⁴⁾⁽⁹⁵⁾⁽⁹⁶⁾ para contornos. El proceso del morphing en modelos de representación de fronteras se realiza a partir de dos superficies dadas, las que se llaman **formas fuente**. Se asume que las formas fuente son **superficies poligonales** triangulares, aunque muchas de las investigaciones se aplican a cualquier representación de superficie. En su mayoría, se centran en un tipo de forma topológicamente similar y donde la construcción de correspondencia entre las formas puede ser automática o manipulada por el usuario. También, se asume que las formas fuente son **superficies orientables**, es decir, el sentido del vector normal se conserva.

En una representación de frontera, la presencia combinada de la **topología** y de la **geometría** generalmente lleva a dividir el problema del morphing en dos pasos genéricos: un proceso de **correspondencia** y otro de **interpolación**.

El primer paso consiste en establecer una **correspondencia** entre el objeto fuente y destino (correspondencia uno a uno). Cada punto frontera del objeto fuente es mapeado hacia un punto frontera del objeto destino y viceversa. El segundo paso **interpola** las posiciones o “geometrías” de las correspondientes características, definiendo la disposición entre cada pareja de puntos correspondientes. Su función es encontrar la interpolación de la trayectoria para encontrar las formas intermedias.

La **correspondencia** entre los dos modelos a transformar se logra generando una conectividad común. Esta conexión asociada tiene un fin geométrico, pudiendo realizar combinaciones de mallas de control adicionales aplicadas sobre cada objeto (inicial y final) o bien, con una malla común intermedia para ambos objetos. Esto último implica que ambos objetos tienen la misma topología global.

A su vez para lograr la **conectividad asociada**, se realiza una agrupación común en ambos objetos: primero, se descomponen los modelos en diversos parches correspondientes; después, se engloban los parches de correspondencia en un campo paramétrico, y luego, se combinan los parches interrelacionados para formar

(93) Sederberg, Thomas W., and Eugene Greenwood. 1992. A physically based approach to 2-D shape blending. Paper presented at Computer Graphics (SIGGRAPH '92 Proceedings).

(94) Sederberg, Thomas W., P. Gao, G. Wang, and H. Mu. 1993. 2D shape blending: An intrinsic solution to the vertex path problem. Proceedings SIGGRAPH '93 27 : 15-8.

(95) Shapira, Michal, and Ari Rappoport. 1995. Shape blending using the star skeleton representation. IEEE Computer Graphics and Applications 15 (March): 44-50.

(96) Goldstein, Eli, and Craig Gotsman. 1995. Polygon morphing using a multiresolution representation. Proceedings of Graphics Interface: 247-54.

una malla común interpolada. Una malla común mediadora entre los dos objetos (inicio y destino), tendrá problemas restrictivos si se utiliza en la transformación de una esfera en un toro. Este tipo de transformación con topologías distintas será explicado en un pequeño inserto sobre topología que viene más adelante.

Volviendo con el tema de la **correspondencia**, una vez establecida, muchos autores utilizan una interpolación lineal o una spline Hermite entre los vértices correspondientes para calcular el “intermediado” de formas. Otros utilizan algoritmos basados en la física o un paradigma de propagación para interpolar parámetros geométricos específicos. Para un tipo restringido de formas, la interpolación y la correspondencia son resueltas conjuntamente.

En el caso de las mallas, sigue siendo un reto la transformación de un objeto inicial con una forma topológicamente distinta al objeto de destino (transformación de una esfera en un toro), en especial, con la interacción mínima o sin el usuario. DeCarlo y Gallier⁽⁹⁷⁾ fueron unos de los primeros en proponer el control de usuario para realizar un cambio topológico. La técnica consistía en esparcir una reducida malla de control en cada superficie originaria, mediante la asociación y correspondencia entre las caras análogas de la malla de control. Luego, otra técnica proponía utilizar gráficos Reeb⁽⁹⁸⁾ para detectar los puntos críticos donde ocurrirán los cambios en la topología. El gráfico Reeb (el cual define el esqueleto topológico de un objeto), junto con los contornos del objeto representaban la totalidad de los objetos 3D. Al utilizar este método, la metamorfosis podía ser vista como una secuencia de transiciones entre los diferentes tipos de topología. Además, existían algunas soluciones interactivas⁽⁹⁹⁾, que introducían fotogramas claves para conectar dos tipos de superficies topológicamente distintas durante una transición topológica. Sin embargo, las topologías complejas requerían mucho tiempo para ser transformadas, en particular si requerían constantemente la interacción del usuario.

3.7.1. Implementaciones con técnicas de morphing basados en fronteras.

Hong *et al.*⁽¹⁰⁰⁾ en 1988 proponen un método de interpolación entre dos objetos definidos por una representación de **facetas** (caras), reduciendo al mínimo la distancia entre los centroides correspondientes. Analizan el problema de la diferencia en el número total de vértices y caras, definiendo las caras de los objetos interpolados a partir del mayor número de ellas en los objetos origen. El método es completamente automático y entre sus aplicaciones estaban: la simulación de una evolución biológica, la animación y los retratos robots.

Bethel y Uselton⁽¹⁰¹⁾ en 1989 definen una técnica para un morphing entre **mallas de objetos**. A su vez,

(97) DeCarlo, Douglas, and Jean Gallier. 1996. Topological evolution of surfaces. Paper presented at Proceedings of GI'96, .

(98) Attene, Marco, Silvia Biasotti, and Michela Spagnuolo. 2001. Re-meshing techniques for topological analysis. Shape Modeling and Applications, International Conference on.

(99) Takahashi, Shigeo, Yoshiyuki Kokojima, and Ryutarou Ohbuchi. 2001. Explicit control of topological transitions in morphing shapes of 3D meshes. Paper presented at Proceedings of the ninth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PACIFIC GRAPHICS-01), IEEE Computer Society, .

(100) Hong, Tong M., N. Magnenat-Thalmann, and D. Thalmann. 1988. A general algorithm for 3D-shape interpolation in a facet-based representation. Proc Graphics Interface: 229-35.

(101) Bethel, Wes, and Sam Uselton. 1989. Shape distortion in computer-assisted keyframe animation. Paper presented at Computer Graphics International, .

construyen una **supermalla** que permitía la correspondencia entre los objetos originarios. El usuario iniciaba la construcción de la **supermalla** especificando dos caras correspondientes. Además, los vértices eran interpolados linealmente entre sus correspondientes localizaciones en las mallas de origen. La técnica era aplicada a poliedros orientados con topologías equivalentes y la complejidad del proceso de correspondencia era proporcional al mayor número de caras de los dos poliedros.

Chen y Parent⁽¹⁰²⁾ en 1989 desarrollan un técnica para definir una **forma promedio** (*shape averaging*) basada en interpolaciones de contornos planos. Este enfoque estaba destinado a resolver el problema de la forma promedio a nivel de modelo-objeto. La investigación inicial se limitaba a promediar polígonos planos 2D u objetos 3D representados por un conjunto de curvas planas alineadas (contornos). La representación de estas últimas tenía sus ventajas cuando se utilizaba en objetos digitalizados a partir de modelos reales, ya que estos objetos podían estar representados por curvas de contorno.

El proceso consistía en un promedio de dos tareas. En primer lugar, se establecía la correspondencia entre los vértices de un grupo de formas. A continuación, las formas eran llevadas a un promedio según estas correspondencias. La correspondencia establecía las coincidencias entre formas y por lo tanto, determinaba qué partes de las formas se promediaban entre sí. La correspondencia se podía establecer en dos niveles: un **nivel sintáctico** y un **nivel semántico**. En el nivel **sintáctico**, las formas eran tratadas como entidades geométricas y el promedio se refería únicamente a las propiedades geométricas de los elementos, tales como el tamaño o las distancias. En el plano **semántico**, las formas se promediaban de acuerdo a las propiedades metafóricas de los elementos. Por ejemplo, en un promedio semántico entre dos formas de la cabeza humana sin tener en cuenta su tamaño o ubicación, las partes de nariz son correspondientes y eran promediadas en conjunto.

La **forma promedio** era el proceso para extraer una representación particular entre un grupo de formas. Era especialmente útil para los diseñadores: tanto una herramienta de análisis de la forma, como también para su generación. El primer uso estaba basado en el supuesto de que el resultado generado por un promedio de formas mantendría las características de las formas originales. Esta suposición hacía posible la utilización de la forma promedio para predecir y analizar la tendencia de las formas. La generación de forma, podía ser utilizada para producir nuevos objetos con un promedio de formas muy diferentes entre sí. Este método, por ejemplo, permitía al diseñador combinar formas primitivas para obtener gradualmente soluciones más sofisticadas. Los resultados a menudo podían proporcionar al diseñador nuevas ideas sobre la forma que se estaba creando. Por ejemplo, la forma de una lágrima con la de un automóvil podían ser llevadas a un promedio con el fin de explorar los aspectos del diseño aerodinámico de una carrocería.

(102) Chen, Shenchang E., and Richard E. Parent. 1989. Shape averaging and its applications to industrial design. IEEE Computer Graphics and Applications 9 (1) (January): 47-54.

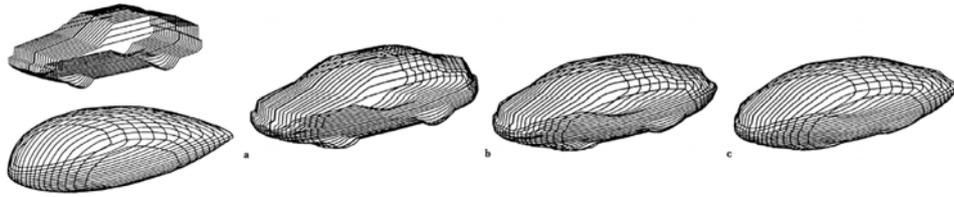


Fig 51. Chen y Parent (1989). (Izq) Un automóvil y una lágrima representados mediante contornos planos. (a, b y c) Promedio ponderado entre un automóvil y una lágrima de agua en la proporción de (a) 70/30, (b) 50/50, and (c) 30/70.

El trabajo de **Kent et al.**⁽¹⁰³⁾⁽¹⁰⁴⁾ en 1991-92 definen un morphing donde cada punto de un objeto se mueve en forma radial a través de un rayo emitido desde un punto central. Esto lo logran proyectando y combinando cada objeto mallado sobre una esfera. En un comienzo la técnica era aplicable a poliedros con forma estrelladas, pero luego fue ampliada a cualquier tipo de objetos que pudieran ser fácilmente proyectados sobre una esfera (Ver apartado: 2.3. Visión General y estado del arte).

Parent⁽¹⁰⁵⁾ en 1992 utiliza un algoritmo recursivo para encontrar una correspondencia ente dos formas topológicamente equivalentes (poliedros homeomorfos a una esfera). La técnica utilizaba un proceso recursivo con el fin de crear y disponer una subdivisión común al objeto mallado. El usuario subdividía el objeto poliédrico en dos partes, conservando en la superficie del poliedro un trazado cerrado de aristas. De esta manera, la forma estaba dividida pero compartía dos perfiles en común. Cada límite estaba subdividido por el mismo número de puntos para poder establecer la correspondencia de vértices. A su vez, cada fragmento era dividido repetidas veces en forma paralela, hasta que cada sub-fragmento estuviera compuesto por una única cara. Así, el poliedro subdividido tenía la misma red (vértice/arista/cara) y la interpolación entre vértices correspondientes era lineal. Este trabajo fue anterior al trabajo de **DeCarlo y Gallier** (1996), donde el usuario subdividía interactivamente cada poliedro en superficies correspondientes y el proceso de división de la superficie introducía cierta coherencia geométrica y topológica. Sin embargo, este vínculo no era lo suficientemente fuerte y sumado a la interpolación lineal, se obtenían transformaciones no del todo homogéneas.

Lazarus y Verroust en 1994⁽¹⁰⁶⁾ y 1997⁽¹⁰⁷⁾ extienden el método de **Kent et al.** para proyecciones en cilindros simulando objetos. En el interior de cada objeto originario, el usuario construye una curva 3D o selecciona un punto para calcular de forma automática un posible eje. Además, puede modificar los ejes de animación con simples parámetros angulares. Posteriormente, dos mallas cilíndricas son construidas para aproximar los dos objetos y sus características destacadas. Los dos objetos son transformados a partir de una interpolación en cada una de las curvas 3D, que a su vez están compuestas por la interpolación radial de cada punto muestreado de la malla. Ésta era una técnica que ofrecía un buen control sobre el eje de la animación para guiar

(103) Kent, James R., Richard E. Parent, and Wayne E. Carlson. 1991. Establishing correspondence by topological merging: A new approach to 3-D shape transformation. Paper presented at Proceedings of Graphics Interface '91, pp. .

(104) Kent, James R., Wayne E. Carlson, and Richard E. Parent. 1992. Shape transformation for polyhedral objects. Proceedings SIGGRAPH '92 26 (July): 47-54.

(105) Parent, Richard E. 1992. Shape transformation by boundary representation interpolation: A recursive approach to establishing face correspondences. The Journal of Visualization and Computer Animation 3 (4): 219-39.

(106) Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1994. Feature-based shape transformation for polyhedral objects. Paper presented at In The 5th Eurographics Workshop on Animation and Simulation, .

(107) Lazarus, Francis, and Anne Verroust. 1997. Metamorphosis of cylinder-like objects. Journal of Visualization and Computer Animation: 131-46.

la transformación, las mallas cilíndricas eran calculadas en pocos segundos y una vez que el objeto estuviera remallado, la interpolación era procesada en un tiempo muy corto.

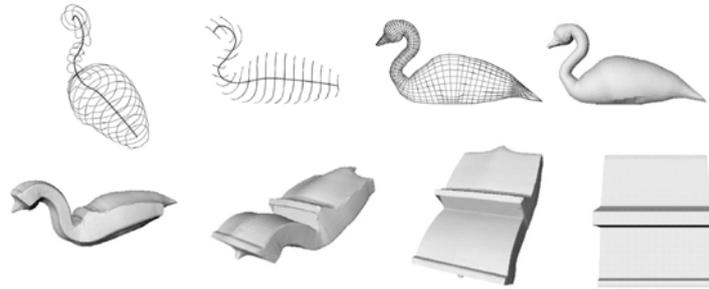


Fig 52. Lazarus y Verroust (1997). La metamorfosis de un cisne en un piano.

En 1996 **DeCarlo y Gallier**⁽¹⁰⁸⁾ abordan el problema del morphing de dos objetos poliédricos con diferente topología, aplicando el método a superficies poliédricas trianguladas. Para esto utilizaban una **malla de control** sobrepuesta, la cual se extendía en cada superficie de origen y servía para definir el mapeado entre los objetos a transformar. El usuario definía una malla de control irregular en ambos objetos y asociaba una a una, cada cara de ambos objetos. Esto implicaba que cada malla de control tuviera el mismo número de caras y la misma topología, a excepción de los cambios topológicos. También las aristas y vértices de las mallas de control debían ser mapeadas. De este modo, algunas aristas podían ser mapeadas a un vértice, pero estas dos aristas o vértices correspondientes debían pertenecer a por lo menos una pareja de caras correspondientes. Con esta técnica, el usuario debía tener nociones sobre topología, específicamente sobre cambios topológicos. El artículo anteriormente expuesto no aclara que transformando formas complejas se obtengan buenos resultados.



Fig 53. DeCarlo y Gallier (1996). Morphing entre un plátano y una superficie con un borde (abierto) y dos aberturas (cerradas).

El trabajo de **Sun et al.**⁽¹⁰⁹⁾ en 1997 era uno de los pocos métodos que abordaba el problema de la **interpolación** en un morphing con modelos poliédricos. Los parámetros intrínsecos de la forma, como los **ángulos diedros**⁽¹¹⁰⁾ y las **longitudes de borde** que interrelacionaban los vértices y las caras de los dos gráficos a transformar, eran utilizados para su interpolación. Los **parámetros intrínsecos** definidos a nivel local son invariantes en la traslación y rotación, por lo que eran candidatos ideales para la interpolación de la forma.

(108) DeCarlo, Douglas, and Jean Gallier. 1996. Topological evolution of surfaces. Paper presented at Proceedings of GI'96, .

(109) Sun, Yue Man, Wenping Wang, and Francis Y. Chin. 1997. Interpolating polyhedral models using intrinsic shape parameters. The Journal of Visualization and Computer Animation 8 (2): 81-96.

(110) Un ángulo diedro es cada una de las dos partes del espacio delimitadas por dos semiplanos que parten de una arista común, es decir una figura formada por dos planos que se cortan. El tamaño del ángulo diedro se define como el tamaño del ángulo formado entre dos líneas que se cortan (una en cada plano) que son ambas perpendiculares a la arista a lo largo de la cual se cortan los dos planos.

Sin embargo, el método para la interpolación de la forma intrínseca sólo funcionaba para los polígonos 2-D. La definición intrínseca de **polígonos** era simple: un **polígono** podía ser definido por una serie de parámetros intrínsecos, como la longitud de sus bordes y ángulos interiores enumerados en dirección contraria o en el sentido de las agujas del reloj. Por otra parte, no había una definición intrínseca válida para los **poliedros**, ya que aunque existían parámetros intrínsecos tridimensionales, eran altamente interdependientes.

La particularidad de esta técnica era que consideraban los objetos definidos mediante un gráfico plano. Este modelo representaba las interrelaciones entre los vértices o caras, en lugar de ser tratados como un conjunto de puntos o caras independientes entre sí. El método era aplicable a parejas de poliedros con **mallas isomorfas**, utilizando un modelo de propagación que interpolaba las caras normales. Estas normales eran utilizadas para interpolar la posición de los vértices con este mismo modelo. Para iniciar la propagación, el usuario seleccionaba dos caras adyacentes y dos vértices pertenecientes a la primera cara en cada poliedro originario, aunque la selección también podía ser automática.

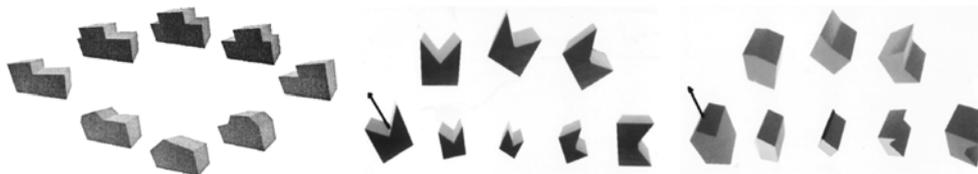


Fig 54. Sun et al. (1997). (Izq) Morphing de dos formas "L". (Cen-Der) Morphing con las normales aproximándose a un borde convexo y cóncavo, la interpolación evita la contracción y el despliegue en las caras de los objetos.

Kanai et al.⁽¹¹¹⁾ en 1998 presentan un algoritmo para una metamorfosis geométrica 3D entre dos objetos basados en **mapeados armónicos**. Los objetos estaban representados con una malla triangular y en el caso de los poliedros, mediante caras triangulares. La técnica definía una correspondencia automática y era aplicable a cualquier poliedro que fuera homeomorfo, a una esfera o a un disco plano. Cada uno de los objetos originarios eran primeramente embebidos en un disco plano circular. Estos modelos embebidos tenían la misma estructura gráfica que los objetos 3D originarios. Al superponer los dos modelos integrados a los discos, se podía establecer una correspondencia entre los dos objetos originarios, generando objetos intermedios de forma fácil. La interpolación era de tipo lineal, podía ser controlada especificando una curva y un vértice de la superficie y el control era mínimo sobre la transformación.

La idea básica consistía en definir las formas de referencia mediante el uso de correspondencias vértice a vértice entre las dos mallas. La forma de referencia definía una partición de la malla y cada una de las mallas fraccionada se incrustaba en una región poligonal plana, a través de un mapa armónico. Mediante la superposición de las dos mallas incrustadas, se establecía la correspondencia entre ellas. El número de particiones debían ser idénticas para que pudieran estar vinculadas y asignadas a un mismo plano.

(111) Kanai, Takashi, Hiromasa Suzuki, and Fumihiko Kimura. 1998. Three-dimensional geometric metamorphosis based on harmonic maps. *The Visual Computer* 14 (4): 166-76.



Fig 55. Kanai *et al.* (1998). (Izq) Visión general del método para establecer correspondencia entre dos objetos. (Der) Morphing entre un modelo de Volkswagen Golf y un Porsche 911.

Gregory *et al.*⁽¹¹²⁾ en 1998 presentan una técnica similar a **DeCarlo y Gallier**, haciendo uso de una **red de control** superpuesta en ambos objetos originarios para establecer la correspondencia. El método era aplicable a un par de objetos poliédricos con topología equivalente. El usuario especificaba las dos redes de control sobre ambos objetos. En el caso de especificar una curva dentro de una fracción de la superficie, el usuario seleccionaba un par de puntos de dicha parcela y una geodésica era calculada entre cada pareja para formar la curva dentro de la red. El usuario debía tener especial cuidado de crear **redes de control** equivalentes en ambos objetos, de forma que las caras o fracciones de la superficie pudieran ser puestas en correspondencia mientras se preservaban las adyacencias. Las trayectorias se especificaban utilizando curvas de Bézier para cada par de vértices correspondientes en las dos redes de control. La interacción del usuario era extremadamente pesada, según los autores, tardaban seis horas en crear un morphing entre un humano y un triceratops (ver apartado: Visión General y estado del arte).

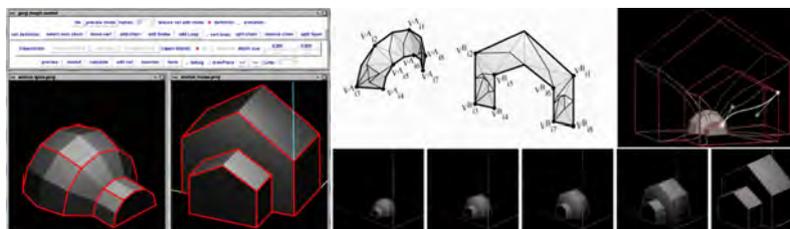


Fig 56. Gregory *et al.* (1998). Transformación entre la forma de un iglú y una casa, parcelas de selección, redes de control y trayectorias de vértices.

En 1999 **Lee *et al.***⁽¹¹³⁾ presentan un método para realizar un morphing entre mallas triangulares homeomorfas. Particularmente se centraban en el problema de establecer un mapeado de correspondencia entre las mallas de origen y destino. El método empleaba una **parametrización multi-resolución adaptativa de superficies**⁽¹¹⁴⁾, que permitía controlar la parametrización utilizando un gran número de características pertenecientes a las mallas originales, según definiera el usuario. Los cálculos del mapeado armónico se realizaban en un nivel más

(112) Gregory, Arthur, Andrei State, Ming C. Lin, Dinesh Manocha, and Mark A. Livingston. 1998. Feature-based surface decomposition for correspondence and morphing between polyhedra. Paper presented at Proceedings of the Computer Animation, .

(113) Lee, Aaron W. F., David Dobkin, Wim Sweldens, and Peter Schröder. 1999. Multiresolution mesh morphing. Paper presented at Proc. SIGGRAPH 99, .

(114) Lee, Aaron W. F., Wim Sweldens, Peter Schröder, Lawrence Cowsar, and David Dobkin. 1998. MAPS: Multiresolution adaptive parameterization of surfaces. Paper presented at Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

detallado, siendo utilizados como solución en los sectores más difíciles. Adicionalmente, sólo se requería emparejar un pequeño conjunto de características pertenecientes a ambas mallas. Aunque éstas fueran bastante diferentes, se adaptaban con bastante facilidad a la geometría, proporcionando una gran flexibilidad. La eficacia del método permitía realizar transformaciones con mallas de cierta envergadura y detalle, proporcionando representaciones con una alta calidad visual.

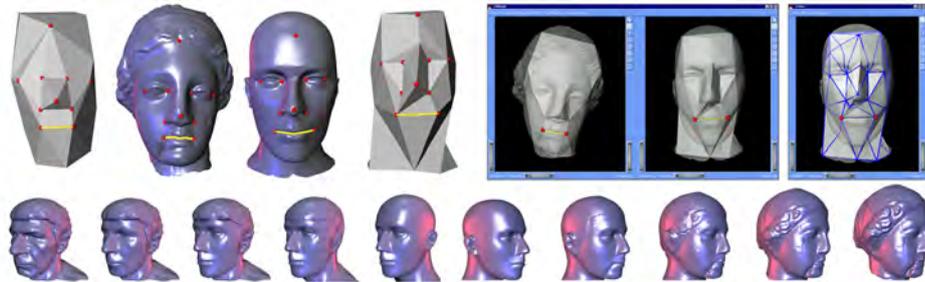


Fig 57. Lee et al. (1999). **(Sup-Izq)** Modelos de mallas (inicial y final), en las que el usuario especificaba los puntos característicos (rojo) y las líneas destacadas (amarillo). Todos los mapeados deben conservar las parejas de rasgos correspondientes. **(Arr-Izq)** Interface de usuario con la cabeza de Venus y un maniquí. Distribución de vértices y asociación de bordes característicos. **(Inf)** Dos secuencias de morphing entre dos mallas triangulares topológicamente equivalentes.

Zöckler et al.⁽¹¹⁵⁾ en el 2000 describen un método para transformar dos modelos de superficies trianguladas con topologías arbitrarias entre sí. La implementación asumía la transformación de topologías similares para ambos objetos, pero también presentaba una extensión para realizar cambios de **género topológico** durante la transformación.

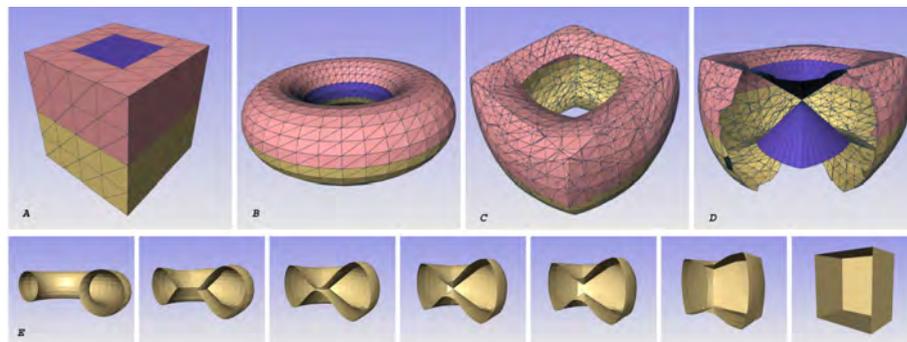


Fig 58. Zöckler et al. (2000). **(Sup)** Transición entre un cubo y un toro, con diferentes parches asociados para ser transformados y lograr la abertura en el toro. **(Inf)** Secuencia de morphing completa.

Este método de transformación basado en superficies, básicamente, se componía de los siguientes pasos:

- **Definición de correspondencias:** el usuario definía las regiones correspondientes en la superficie de los dos modelos. Esto se realizaba de forma interactiva trazando en las superficies originarias los **parches o parcelas (patches)** que fraccionaban el modelo. Durante este proceso, ambos modelos se descomponían en

(115) Zöckler, Malte, Detlev Stalling, and Hans-Christian Hege. 2000. Fast and intuitive generation of geometric shape transitions. The Visual Computer 16 (5): 241-53.

un conjunto de parches topológicamente equivalentes, los cuales era parametrizados de forma automática y lograban mantener una correspondencia uno a uno entre estos. Además, opcionalmente se debían especificar un conjunto de puntos característicos que auxiliaban los empalmes de borde.

- **Parametrización:** a continuación, se calculaba una parametrización global para cada uno de los dos modelos, parametrizando las regiones correspondientes de manera individual. Para mantener la continuidad en los bordes de cada parche se requería un cuidado especial.

- **Coincidencia de puntos característicos:** puntos característicos adicionales eran combinados según parámetros espaciales, modificando la parametrización con una técnica de deformación libre de pliegues.

- **Interpolación:** las mallas originales eran combinadas en el dominio de los parámetros para construir una **súper red** adecuada para la transformación. Los puntos correspondientes en los dos modelos de entrada eran calculados para cada vértice de esta red. Estas dos posiciones eran interpoladas para producir la metamorfosis final.

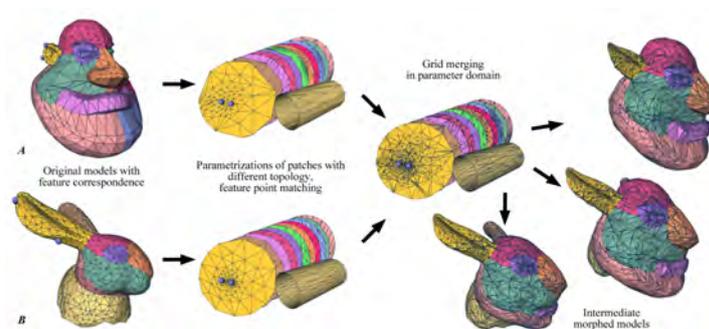


Fig 59. Zöckler *et al.* (2000). Diferentes etapas del método de transformación. En primer lugar, el usuario define la correspondencia entre los modelos determinando regiones y puntos característicos. En segundo lugar, el algoritmo calcula una parametrización para la generación de parches, teniendo en cuenta los puntos característicos en los bordes, como también dentro de las regiones. Por último, utilizando las mallas parametrizadas, se crea una super red, la cual se utiliza durante la interpolación.

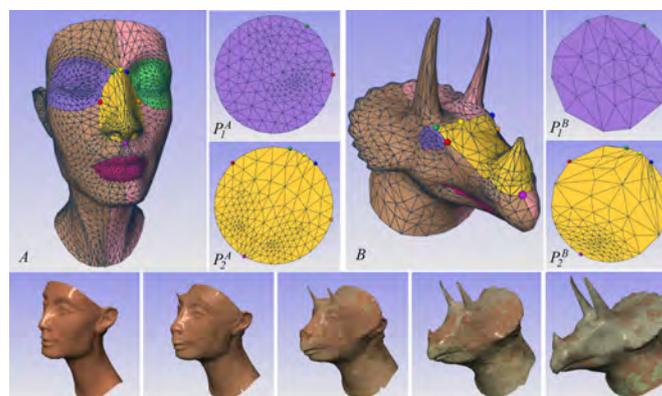


Fig 60. Zöckler *et al.* (2000). Descomposición por parches entre dos modelos y los puntos de ramificación de uno de los parches (nariz), siendo los diversos puntos correspondientes en los dos modelos del mismo color. La parametrización de dos de los seis parches se muestra en los discos para cada uno de los modelos: el color amarillo para la nariz y el morado

para el ojo derecho del modelo. Los puntos de correspondencia (marcados con color) pertenecientes a los bordes de los parches correspondientes, están obligados a tener las mismas coordenadas paramétricas. Un punto ramificado (sin marcar) no está obligado a tener las mismas coordenadas respecto al total de parches que pertenece en las parametrizaciones.

La aplicación de este método demostró que ofrecía un control sencillo e intuitivo sobre el proceso total de la transformación, permitiendo al animador crear secuencias de morphing en un tiempo sorprendentemente corto. Es decir, menos de veinte minutos para la correspondencia y representación del morphing, en un modelo con rasgos particularmente definidos.

Shlafman et al.⁽¹¹⁶⁾ en el 2002 también describen un algoritmo para la transformación de superficies poliédricas, en base a su descomposición en parches o parcelas. La descomposición de las superficies se realizaba fraccionándolas en componentes inherentes (parches), los cuales eran proyectados en formas de discos planos. Estos discos eran mezclados según las particiones análogas a cada superficie originaria (fuente y destino) para lograr la correspondencia. Se buscaba una correspondencia total en cada pareja de parches compatibles, teniendo cuidado de preservar la continuidad a través de sus bordes.

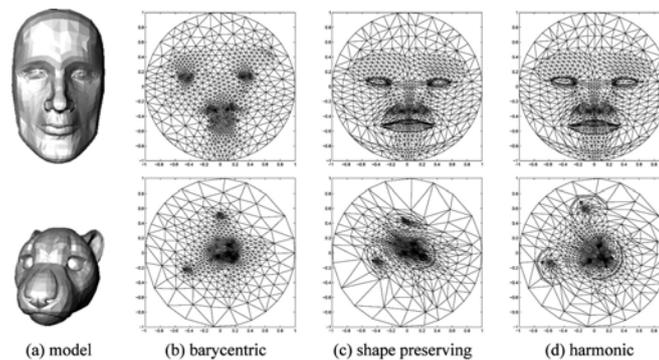


Fig 61. Shlafman et al. (2002). Descomposición de la superficie de los modelos en parches con forma de disco. Asignaciones de puntos (mapeado) utilizando diversas técnicas de parametrización: (a) Modelo, (b) Bariocéntrico, (c) Preservación de forma, (d) Armónico.

Ellos proponen un nuevo algoritmo para la proyección de parches con formas cilíndricas. De hecho, es frecuente que en algunos casos, los parches resultantes fueran topológicamente similares a cilindros abiertos o cerrados en una de sus bases. Éste es el caso de los modelos de barrido con rotación u objetos generales de revolución.



Fig 62. Shlafman et al. (2002). **(Izq)** Metamorfosis de un pato en una paloma. **(Der)** Morphing de un alfil y una esfera

(116) Shlafman, Shymon, Ayellet Tal, and Sagi Katz. 2002. Metamorphosis of polyhedral surfaces using decomposition. Computer Graphics Forum(21): 219-29.

abierta en sus polos.

En el 2000 **Marc Alexa**⁽¹¹⁷⁾ amplía la técnica de **Kent et al.** (1991) para la utilización de objetos cóncavos. Propone un algoritmo de transformación para poliedros con género topológico igual a cero. La técnica permitía especificar y alinear diversas características dispersas sobre los modelos. El usuario definía los rasgos característicos emparejando puntos correspondientes a los dos modelos. Estos puntos correspondientes junto a los vértices restantes del modelo, eran mapeados hacia la superficie de una esfera.

Como primer paso para una transformación 3D, una combinación establecía una correspondencia entre los vértices de los modelos originarios. Los vértices inmersos sobre las esferas eran trasladados sobre su superficie para alinear entre sí los puntos análogos y una de las esferas se deformaba haciendo coincidir los vértices característicos. Después de la deformación, todos los vértices debían volver a ser verificados por si había algún problema de pliegue. Una superposición de las subdivisiones era calculada y los vértices alineados eran fusionados en un modelo combinado.

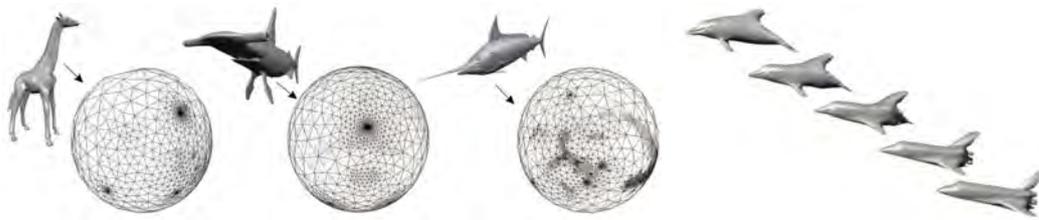


Fig 63. Marc Alexa (2000). (Izq) Inmersión en esferas de modelos poliédricos: jirafa, tiburón martillo y pez espada. (Der) Morping entre los modelos de un delfín y un transbordador espacial.

Christopher Zach⁽¹¹⁸⁾ en 2002 propone una técnica integrada de **geomorphing** para la representación de imágenes en tiempo real con niveles de detalle. Esta técnica permitía obtener animaciones fluidas, manteniendo garantizada la velocidad con que se generaban los fotogramas. Se representaban ciudades virtuales y paisajes circundantes, su visualización era con calidad fotográfica en tiempo real y los escenarios eran reconstruidos a partir de imágenes aéreas, fotografías y datos obtenidos con scan láser.

Las representación de escenas en tiempo real con **niveles de detalle discretos**⁽¹¹⁹⁾ (*discrete levels of detail*), frecuentemente carecían de cambios visuales perceptibles entre imágenes sucesivas. La técnica proponía un gestor de nivel de detalles, que calculaba un conjunto de representaciones, las cuales se adaptaban para un intervalo de tiempo futuro de acuerdo al movimiento previsto por el usuario. De esta forma, el sistema de representación tenía tiempo suficiente para cambiar sin problemas las representaciones con el nivel de detalle deseado. El método consistía en encontrar la correspondencia de vértices en representaciones con sucesivos

(117) Alexa, Marc. 2000. Merging polyhedral shapes with scattered features. *The Visual Computer* 16 (1): 26-37.

(118) Zach, Christopher. 2002. Integration of geomorphing into level of detail management for realtime rendering. Paper presented at Proc. 18th Spring Conf. Computer Graphics, .

(119) (DLOD) Nivel de detalle discreto se refiere a la construcción de un pequeño conjunto de modelos: uno de alta resolución y otro de muchas copias similares con menor resolución (número de triángulos). Según una cierta lógica, en el momento de la visualización uno de los modelos del conjunto era seleccionado para la representación. Estos diversos modelos se utilizaban a diferentes distancias de visualización. Cuanto menor fuera la distancia, mayor era el modelo de resolución utilizado. Por el contrario, cuanto mayor fuera la distancia, menor era el modelo de resolución seleccionado.

niveles de detalles. A los **vértices de la malla** obtenida con la mejor representación se les asignaba la posición más cercana en el encuadre de la imagen representada y en la medida que los objetos representados iban saliendo del encuadre del fotograma, los mejores niveles de detalles se distribuían nuevamente a los objetos más cercanos del encuadre.

Geomorphing era un término utilizado para describir un efecto particular que se relacionaba con el proceso fluido de interpolación entre modelos de diferentes niveles de detalle. Este procedimiento creaba un efecto visual continuo, para evitar los cambios repentinos en los niveles de detalle y fue inventado por la necesidad de disminuir el efecto conocido como **popping**⁽¹²⁰⁾. La técnica de **geomorphing** interpolaba los vértices de dos niveles de detalle en cada fotograma durante la transición, por lo que requería una asignación de vértices correspondientes en la representación de los fotogramas fuente y destino. La complejidad en el cálculo era similar a la complejidad utilizada con el mayor nivel de detalle.

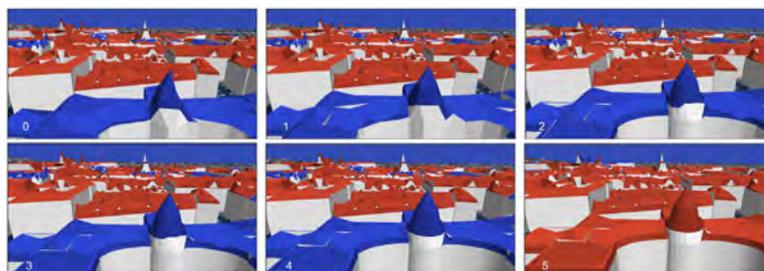


Fig 64. Christopher Zach (2002). Secuencia de fotogramas, donde los edificios que son geomorphs tienen techos azules.

En el 2008 **Kaneko y Okada**⁽¹²¹⁾ proponen un sistema de morphing 3D basado en el **esqueleto** de la forma, utilizando un **mapeado baricéntrico**. Según ellos, en un morphing la tarea más importante era la correspondencia de vértices entre dos modelos base. Cuando el número de vértices y topologías eran diferentes en los modelos originarios, la transformación se volvía dificultosa. Para superar este problema, propusieron un sistema que determinaba automáticamente la correspondencia de los vértices, basándose en los esqueletos de los modelos base.



Fig 65. Kaneko y Okada (2008). (Izq) Proceso de segmentación. (Cen) Modelo de un caballo y un humano junto a sus partes segmentadas. (Der) Huesos de las partes segmentadas del caballo y el humano.

(120) Popping: aparición repentina de elementos en pantalla, como por ejemplo en un juego de coches, cuando se ve en pantalla que van apareciendo los edificios en el horizonte. Es un efecto gráfico que hace que los objetos se vayan generando a la vista del usuario sin ninguna transición.

(121) Kaneko, Kosuke, and Yoshihiro Okada. 2008. Skeleton based 3D model morphing using barycentric map. Paper presented at Computer Graphics, Imaging and Visualisation, 2008. CGIV '08. Fifth International Conference on, .

La técnica consistía en realizar una serie de procesos. En primer lugar, el usuario segmentaba manualmente los dos modelos originarios. A continuación, el sistema generaba los huesos del modelo, basándose en la segmentación propuesta. Después, el sistema definía la jerarquía de los huesos generados para crear el esqueleto de cada uno de los modelos. Por último, se determinaba la correspondencia entre los dos huesos de los dos modelos según las estructuras jerárquicas de sus esqueletos.

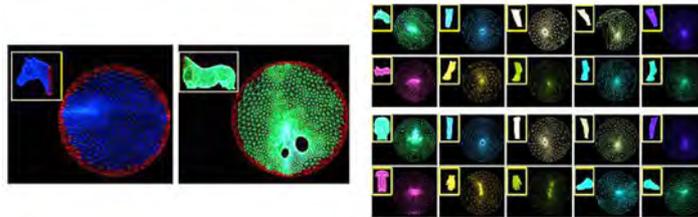


Fig 66. Kaneko y Okada (2008). **(Izq)** Mapas baricéntricos de las partes segmentadas (cabeza y cuerpo del modelo de un caballo). **(Der)** Resultado de la correspondencia de vértices. Mapas baricéntricos de la segmentación del modelo inicial y de destino.

Utilizaban un método de mapeado baricéntrico para reagrupar los vértices de las formas poligonales y proyectarlas en un plano. Estos polígonos estaban compuestos por los puntos fronterizos relacionados con un hueso de un modelo 3D. El sistema aplicaba el mapeado baricéntrico a los vértices de las partes segmentadas, donde determinados vértices en los bordes de las partes segmentadas eran seleccionados como los puntos que limitaban el borde del mapa baricéntrico. Para terminar, el sistema definía las correspondencias de vértices entre los dos modelos utilizando el mapa baricéntrico. Todos estos procesos, excepto la primera etapa de segmentación, eran automáticos.



Fig 67. Kaneko y Okada (2008). **(Arr)** Resultado de un morphing entre el modelo de un humano y un tiburón. **(Ab)** Movimiento del esqueleto del modelo.

3.8. Resumen Técnica de morphing.

3.8.1. Adquisición volumétrica y modelado de la forma.

Una de las primeras instancias para realizar un morphing es contar con dos modelos gráficos con los cuales trabajar el proceso de la transformación. En este punto, es importante la compatibilidad de formatos entre modelos gráficos para el uso de un programa específico de morphing. Los modelos compatibles con los programas de morphing tridimensional pueden ser descritos tanto por primitivas geométricas, como por volúmenes (conjunto de datos volumétricos). En cualquiera de los dos casos, sus representaciones requieren de diversos algoritmos para realizar el morphing.

En una primera categoría de elementos gráficos se encuentran los objetos volumétricos, los cuales pueden ser creados mediante adquisición o modelado:

- **Scanner Volumétricos:** algunas tecnologías de exploración, tales como la tomografía computarizada (CT) o la resonancia magnética de imagen (MRI) generan datos de volumetrías.
- **Scan de conversión para modelos geométricos:** un modelo geométrico puede ser voxelizado, preferentemente con un método anti-aliasing, generando una representación volumétrica básica del modelo.
- **El modelado interactivo:** el modelado interactivo o el esculpido tridimensional puede generar datos volumétricos directamente. Modelos sólidos utilizando CAD permiten utilizar modelos editables (modelos CAD paramétricos), donde por ejemplo, una esfera puede ser descrita con las características de sus parámetros, los cuales son fácilmente editables con el cambio de un valor (por ejemplo el radio y su centro).
- **Definición procesal:** los volúmenes de **hipertexturas** (*hypertexture*) pueden ser definidos por procedimientos con funciones sobre el espacio tridimensional. En este grupo se encuentran las formas L, fractales y formas gramaticales.
- **Mapas de elevación:** utilizados para el modelado de terrenos, se componen de una imagen en escala de grises que define las alturas de un terreno a partir de una red definida por sus píxeles.

De la misma forma, en una segunda categoría están las representaciones de frontera:

- **Scanner láser:** este método describe una superficie, explorando un elemento mediante la tecnología láser. Las nubes de puntos producida por el scanner tridimensional pueden ser directamente utilizadas, tanto para mediciones y visualización de la arquitectura, como para cualquier construcción o diseño del mundo real.
- **Modelos de mallas poligonales:** es un enfoque para el modelado de objetos, mediante la representación o la aproximación de sus superficies abiertas o cerradas con polígonos. Tal es el caso de una superficie curva que se modela mediante un sin número de pequeñas superficies planas facetadas. Los modelos poligonales son también llamados modelos de malla, son útiles en la visualización por su rapidez, pero en general los archivos de datos son bastante pesados.
- **Modelos de superficies:** un nivel de mejora en el modelado de superficies es la representación matemática para superficies de formas libres. Éstas pueden ser las NURBS (B-splines Racionales No Uniformes), TSplines u otra representación curva. Algunas aplicaciones permiten el ajuste de la distribución de la superficie

manualmente y en forma automática. Estos modelos de superficie son en parte modificables en un sentido escultórico-perceptivo, permitiendo empujar y tirar los puntos de control para deformar las superficies, o si se requiere mayor definición mediante control posicional preciso de distancias. Este tipo de representación es adecuado para las formas de modelado orgánico y artísticas.

3.8.2. Deformación y mezcla.

- Deformación (*warping*).

En cualquiera de los tipos de morphing, la primera operatoria consiste en descomponer los volúmenes fuente y destino. Éste es un proceso de deformación, el cual descompone los volúmenes con el fin de crear una **correspondencia** entre los objetos.

El proceso de **correspondencia** presenta dos técnicas definidas según el grado de destreza del usuario: una es automática y la otra manual. La primera técnica permite el mínimo control del usuario (automática). Los algoritmos determinan automáticamente las semejanzas entre los dos volúmenes y luego buscan la deformación que transforma los volúmenes (fuente y destino). En la segunda técnica, el usuario especifica manualmente un grupo de puntos en el volumen para su descomposición. El resto del volumen luego es descompuesto, interpolando la función de transformación. Este grupo de algoritmos incluye tanto deformaciones de forma libre, como también la alineación semiautomática de los datos.

El control del usuario sobre las deformaciones es crucial para realizar buenas transformaciones. El método de mapeado punto por punto, ya sea mediante tramados regulares o puntos dispersos, es difícil de especificar adecuadamente en cualquier tipo de forma, sobre todo cuando se deben especificar características importantes en los objetos. Otro tipo de correspondencia consiste en utilizar **elementos característicos** que sirven para definir o identificar rasgos específicos a ambos objetos. Estos elementos son cuerpos geométricos (cubos, paralelepípedos, esferas, cilindros, etc) y sirven para simplificar e igualar las partes de los objetos originarios que son comunes. Funcionan como elementos asociados a ambos objetos determinando la posición y características análogas a ambos objetos. En un morphing basado en características, los elementos vienen en parejas: un elemento fuente y su homólogo de destino. En los dos volúmenes existen parejas de elementos conocidos y sus correspondientes rasgos, es decir, características que pueden ser transformadas desde una forma a la otra durante el morphing.

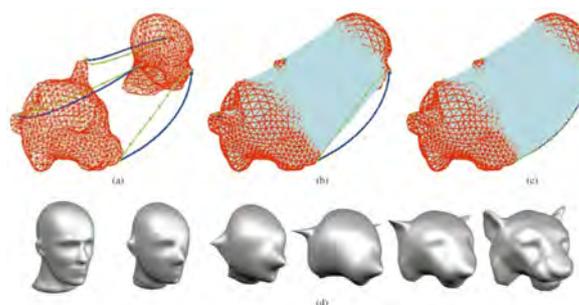


Fig 68. Ohbuchi et al. (2001). (Arr) Correspondencia de características entre las orejas y la nariz de las mallas originarias.

(Ab) Creación de una secuencia combinatoria con la forma de un maniquí y un tigre, en los que las orejas y la nariz son figuras relacionadas.

- Mezcla o Montaje (*Blending*).

El paso de la **deformación** (*warping*) produce dos volúmenes deformados provenientes de los volúmenes fuentes y destino. Para llevar a cabo una transformación en correlación con la preservación de características, es necesario el uso específico de transformaciones locales de la forma, con el fin de obtener una alineación de características. Es probable que cualquier deformación practicable altere algunas características de los volúmenes originales, posiblemente porque éstas no fueron delineadas específicamente con los elementos característicos.

El objetivo del **montaje o mezcla** es mantener la ilusión de una transformación paulatina. La estrategia general para calcular la mezcla es la siguiente:

- Como primer paso se realiza una **deformación directa**, que consiste en deformar el objeto origen (mapeado) tratando de igualar la forma del objeto destino.
- Como segundo paso se realiza el mapeado contrario, que consiste en una **deformación inversa** que deforma el objeto destino tratando de igualar la forma del objeto origen.
- Como último paso se realiza la mezcla promedio de los dos objetos deformados, creando un nuevo objeto intermedio que iguala la forma de los dos objetos originarios.

La deformación directa e inversa aproximan los objetos de origen y destino, con lo cual se facilita un mejor entendimiento para la mezcla. Éstas deben ser calculadas a fin de garantizar la apropiada preservación de características, con el fin de obtener una buena transformación del morphing.

Para lograr la secuencia de morphing, se obtiene un objeto gráfico alternativo con atributos y formas intermedias. Este objeto gráfico es una mezcla de los objetos gráficos de origen y destino. De hecho, se obtiene una mezcla promedio de tal manera que cuando el objeto intermedio se aproxima al punto inicial de la secuencia, se asemeja al objeto origen y cuando el objeto intermedio se aproxima al punto final de la secuencia, la forma del objeto y sus atributos se aproximan al objeto destino.

Por otra parte, volviendo con el análisis de la literatura especializada sobre las diferentes técnicas combinatorias para la **mezcla** (*blending*), la **interpolación lineal** es la que se utiliza con mayor frecuencia. También existen variaciones de ella, como adaptaciones de transiciones con **fundidos cruzados** (*cross-dissolve*) o interpolaciones lineales programadas. La razón del uso generalizado de la interpolación lineal para la combinatoria se debe a varios factores. Por un lado, la interpolación lineal produce buenos resultados si se utiliza el rango correcto para la interpolación. Por otra parte, la deformación directa e inversa alinea las características de los objetos de tal manera que el uso de la interpolación lineal para mezclarlos actúa correctamente. Finalmente, existe otra razón de rendimiento, que son su simplicidad y bajo costo informático para el cálculo.

Las diferentes técnicas para la deformación directa e inversa junto con las operaciones de mezcla, componen las variadas implementaciones que existen para elaborar un morphing. Se puede observar que la operación de

mezcla comprende tanto la geometría y los atributos. A veces, en lugar de mezclar los atributos se re-calcula la información desde la geometría mezclada.

Existen otro casos de técnicas entre curvas racionales B-Spline o superficies que cuentan con control local. En estos casos la interpolación de la trayectoria del vértice entre dos puntos se puede calcular mediante un **promedio lineal** o un **promedio ponderado**⁽¹²²⁾. Una forma fácil de transición entre dos puntos, es simplemente promediar sus posiciones geométricas usando un parámetro de tiempo, donde su representación es una transición lineal (interpolación) desde un punto a otro en un espacio afín.

Sin embargo, cuando se realiza un **promedio lineal** existen casos frecuentes donde los resultados no son los deseados. Esto sucede porque a diferencia de las curvas de destino, las curvas de transición presentan aplanamientos inesperados y ligeras sinuosidades en la mitad de la secuencia, debido a que se basan en la posición geométrica de los destinos. En cambio el **promedio ponderado** opera a partir de las posiciones geométricas de los objetivos (fuente y destino), la trayectoria del vértice entre dos puntos se calcula por sus localizaciones espaciales pero tienen asociada una masa⁽¹²³⁾ al punto de control más cercano. Con esto se consigue que la trayectoria (interpolación) de los vértices sea más suaves, uniformes y limitados entre los dos puntos finales. La relación de las masas entre los dos puntos objetivo afectan localmente el comportamiento del morphing. Por lo tanto, en cualquier momento durante el morphing el punto de transición interpolado por un promedio ponderado es siempre atraído al destino con mayor masa (si ambos objetivos poseen la misma masa el promedio ponderado opera como promedio lineal).

Para resumir, se demuestra que durante la operación de un morphing los objetos son sometidos a una alineación de la geometría, antes de calcular la geometría y atributos de los cálculos intermedios. Esto se puede simplificar en la siguiente ecuación:

$$\text{Morphing} = \text{Warping}^2 + \text{Blending}$$

Es necesario señalar que las técnicas de reconstrucción de la deformación (*warping*) son dominantes en el proceso de desarrollo de un morphing. De hecho, un morphing consiste en dos deformaciones (*warpings*) y una operación combinatoria (*blending*) para mezclar las deformaciones.

La idea fundamental es lograr que la deformación directa e inversa preparen una combinatoria del registro de características gráficas del objeto, para luego ser mezcladas (en este caso se refiere a una mezcla de ambas formas y atributos). La técnicas combinatorias de la mezcla están en directa relación con la interpolación, siendo el paso forzado para la descomposición de las formas y el cálculo de las deformaciones y del morphing. Por lo tanto, la ecuación anterior puede ser igualada a:

(122) El promedio ponderado o media ponderada de un conjunto de números es el resultado de multiplicar cada uno de los números por un valor particular (denominado peso) para cada uno de ellos y obteniendo a continuación la media aritmética del conjunto formado por los productos anteriores. Por lo general, se utiliza cuando no todos los elementos componentes de los que se pretende obtener la media tienen la misma importancia.

(123) El peso de la masa asociada a cada punto de control actúa como parámetro de tensión, controlando la forma de la curva o superficie cercana a ese punto de control. Una mayor masa tira de la curva o superficie cercana a ese punto de control, una menor masa empuja la curva o superficie alejándola del punto de control.

Morphing = (Interpolación)³

3.8.3. Visualización del resultado.

Una vez que los volúmenes están mezclados, el sistema crea un nuevo volumen que es capaz de adoptar la forma intermedia entre los elementos originarios. Según el programa de morphing utilizado, la visualización de la secuencia de transformación puede ser proporcionada con distintos parámetros. Dependiendo del programa y su motor de renderizado, se puede simular el cálculo de iluminación modificando la luz de la escena y las transformaciones de cámara (apertura de diafragma, velocidad de obturación, trayectorias de recorrido, etc) para modelos 3D. Además, la secuencia puede ser representada desde cualquier punto de vista con una trayectoria de cámara que puede variar en el transcurso del tiempo. Existen algunos casos donde tanto los parámetros de iluminación, como la perspectiva del objeto (habitualmente axonométrica) vienen definidos. Estas características son coincidentes con la interface del programa, donde se utiliza la última posición que se definió al manipular los volúmenes en la ventana de visualización del programa.

La modificación de los elementos originarios puede ser interactiva y realizada en tiempo real. Esto permite una cierta flexibilidad mientras se realiza el proceso de transformación, debido a que existen programas que permiten mezclar más de un objeto a la vez. Es por esto que las secuencias de transformación pueden ser fácilmente alteradas, utilizando otros **objetos destino** que determinarán rasgos o deformaciones que el objeto destino (originario) no tenía. La mayor demora en un morphing viene dado tanto por el proceso de renderización para generar los fotogramas intermedios, como también en la correspondencia manual entre objetos.

El poder modificar objetos tridimensionales a lo largo del tiempo, también permite extraer en cualquier momento de la secuencia, la forma tridimensional del objeto transformado. Por otra parte, los resultados visuales del morphing pueden ser imágenes (escenas estacionarias) que transcurren a lo largo del tiempo de la transformación y también, secuencias de videos donde se programa la diferencia de tiempo en la cual ocurrirá la transformación. Por lo general, se genera un video con una secuencia de fotogramas del orden de 25 escenas por segundo en un lapsus de tiempo que es programado.

La integración que existe entre **morphing** y **animación** es muy importante, ya que en cierto sentido el resultado que materializa un procedimiento de morphing es sinónimo de animación. De la misma forma y en el sentido inverso, una animación de una escena puede ser considerada como un morphing entre diferentes objetos gráficos de una acción.

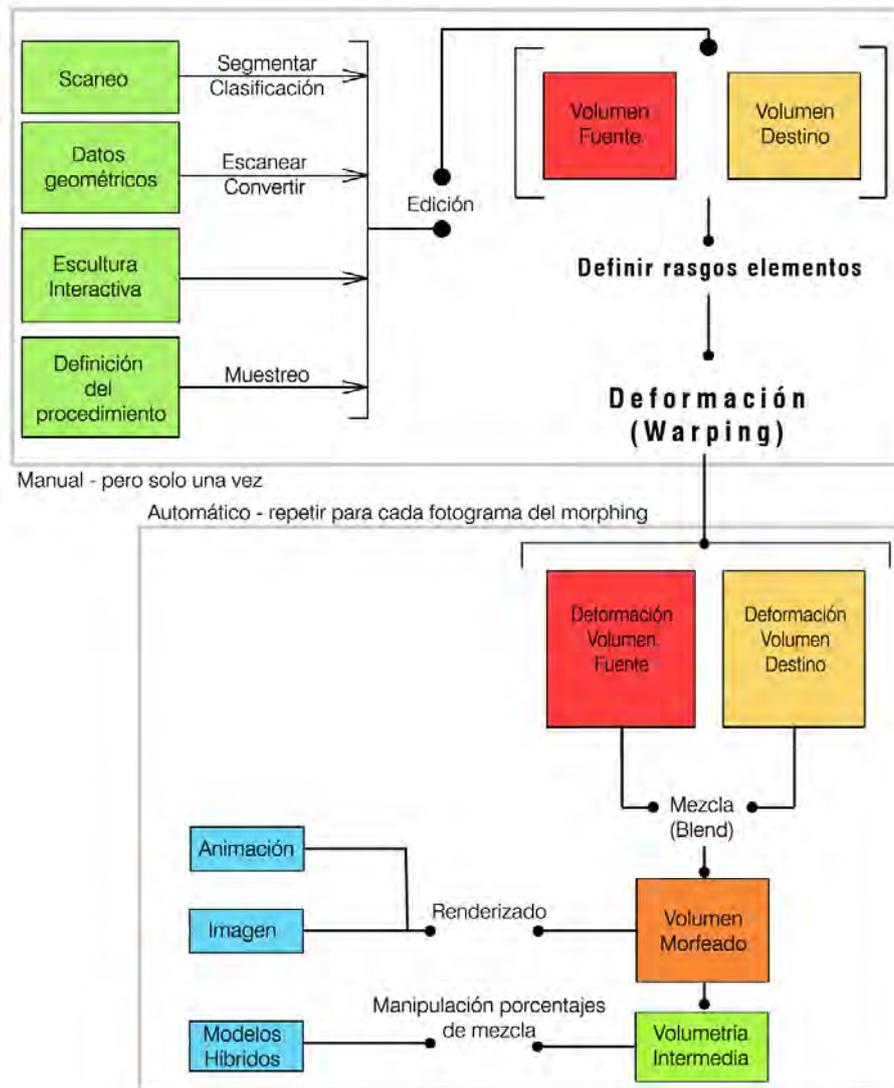


Fig 69. Lerios et al. (1995). Flujo de datos de un sistema de morphing tridimensional (traducción al español y actualización por parte del autor).

3.9. Aplicaciones generales del morphing.

El morphing con imágenes se ha asociado tradicionalmente a los efectos visuales para el entretenimiento en cine y televisión. El artificio del morphing es la obtención de imágenes intermedias transitorias, permitiendo visualmente convencer al ojo humano de que se está llevando a cabo una transformación. Lo elemental de este procedimiento es la alineación geométrica que se mantiene en toda la secuencia. Los comienzos de la técnica del morphing aplicada a la imagen en movimiento tiene más similitud con técnicas básicas de fabricación de películas tales, como el fundido cruzado (*cross-dissolve*) y el uso de cortes ingeniosos en la filmación. Otra técnica similar al morphing es la animación “cuadro por cuadro” (*stop-motion*), donde el tema (una figura maleable) se fotografía progresivamente (un fotograma por cada modificación de la figura) en el transcurso de varias transformaciones mediante modelado de la figura. Estos fotogramas se van montando en una secuencia para proporcionar una metamorfosis ilusoria o un desarrollo de movimiento.



Fig 70. Stop-motion. (Izq) Armadura del personaje deformable. (Der) Secuencia animada cuadro por cuadro.

Por otra parte, el morphing no solo se ha utilizado con éxito en la generación de efectos especiales en películas, anuncios de TV y juegos de ordenador; sino que existen otras aplicaciones menos visibles en los efectos especiales pero con funciones específicas que permiten la eliminación de cables o la sustitución de fotogramas. Este tipo de aplicación se utiliza para lograr fluidez en las uniones de largas secuencias con una amplia escala de variedad en los detalles, como por ejemplo, el vuelo de una persona que se acerca, viniendo desde muy lejos hasta un primer plano.

En el área de la visión por ordenador y el reconocimiento de patrones, la técnica del warping (técnica perteneciente al morphing) se utiliza como una ayuda para llevar a cabo diferentes tareas como la segmentación, la reconstrucción de la forma y el seguimiento de movimiento. En usos industriales (CAD, CAM), se usa en el modelado y visualización de experimentos científicos.

De esta misma forma, estos resultados son aplicados a otros campos donde la interpolación de la imagen puede beneficiarse de la correspondencia geométrica que se establece. Una de esas aplicaciones tiene relación con la visualización gráfica aplicada a la medicina, como en el caso de la visualización de imágenes tridimensionales (proyección de imágenes interpolando secciones paralelas). En otros casos, se utilizan atlas de imágenes de referencia o plantillas médicas para comparar la deformación de alguna parte del cuerpo y poder identificar dolencias según mediciones discordantes, o para ayudar en la planificación quirúrgica.



Fig 71. Secciones alineadas según el sistema de coordenadas local del objeto para conformar un modelo 3D.

En el campo de la imagen médica, los objetos volumétricos son utilizados de forma permanente en distintas áreas. Específicamente, en la manipulación y visualización de muestras volumétricas de datos provenientes de dispositivos de adquisición, como tomografías computarizadas (CT) o resonancias magnéticas (MR). Estas técnicas no invasivas, permiten explorar el cuerpo humano por medio de cortes seccionados a través de la anatomía interna de los órganos del paciente. Así, también pueden ser calculados cortes intermedios mediante funciones convencionales de interpolación. Estos procedimientos tradicionales recrean la representación sólo de la parte seccionada, sin considerar todas las estructuras de órganos que se encuentran por detrás de la sección.

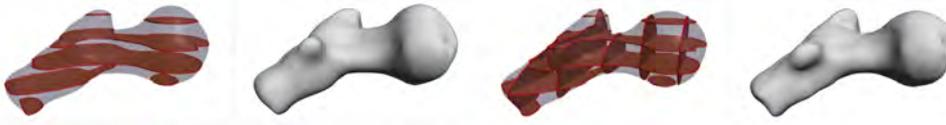


Fig 72. Turk y O'Brien (1999). Reconstrucción de un hueso de articulación. (Izq) Muestreo con 5 secciones (rebanadas). (Der) Modelo final, contornos de intersección verticales y horizontales (mayor número de muestras) y la superficie con mayor detalle.

Mejores resultados se logran al utilizar aplicaciones de contornos de interpolación que permiten reconstruir modelos tridimensionales. Estas técnicas establecen una correspondencia entre características geométricas por medio de parejas sucesivas de exploraciones. Los objetos tridimensionales se forman apilando un conjunto de secciones originales e interpoladas, donde el modelo tridimensional se crea a través de muestras "estratificadas", las cuales generan contornos de secciones según la resolución de la muestra. El **morphing de imágenes** computarizadas reconstruye las imágenes intermedias que cumplen con la correspondencia geométrica establecida por un usuario o un automatismo. De esta manera, se obtiene la forma tridimensional de un órgano o puntos de referencia de la anatomía interna del cuerpo de un paciente.⁽¹²⁴⁾⁽¹²⁵⁾

(124) Ruprecht, D., and H. Muller. 1994. A framework for generalized scattered data interpolation. Presented at the Fifth Eurographics Workshop on Visualization in Scientific Computing, .

(125) Ruprecht, Detlef, and Heinrich Muller. 1995. Image warping with scattered data interpolation. IEEE Computer Graphics & Applications (march): 37-43.

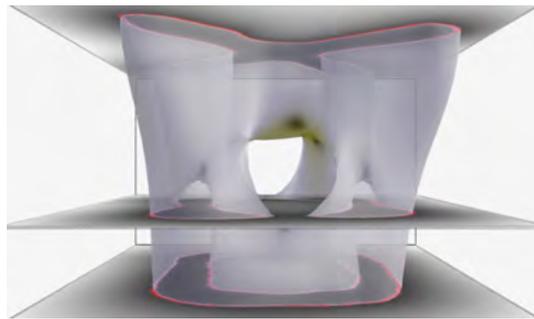


Fig 73. Turk y O'Brien (1999). Visualización de la transformación entre formas con una X y O: El plano superior e inferior contiene restricciones para las formas, la superficie traslúcida es la isosuperficie de la función de variación implícita tridimensional y las secciones (rebanadas) a través de ella son las que dan las formas intermedias.

La transformación de la forma también puede ser una herramienta útil en el diseño geométrico asistido por ordenador⁽¹²⁶⁾, como por ejemplo en el caso de la creación de una unión entre dos piezas de metal con diferentes secciones. Es importante para la superficie que se va a conectar estar suavizada, ya que los lugares con cantos o pliegues agudos son los lugares que son más susceptibles de formar grietas. La superficie intermedia que une las dos partes pueden ser creadas utilizando la forma de transformación, de la misma manera que con la interpolación de contorno de las imágenes médicas. Debido a las propiedades suavizadas de los métodos de interpolación variacional, se considera una herramienta natural para explorar la transformación de la forma en CAD.

Trabajos relacionados con el **reconocimiento facial**⁽¹²⁷⁾ también se basan en la técnica del morphing. Estos métodos sirven para generar un mapeado óptimo desde una imagen a otra. Su utilización se centra en la interpolación de diferentes puntos de vista de una sola cara y entre imágenes de diferentes personas. Estas técnicas han demostrado el reconocimiento facial bajo condiciones variables en el ángulo de visión y la iluminación. Existen otro tipo de estudios para el reconocimiento de retratos robot⁽¹²⁸⁾ (retratos hablados). La técnica del morphing permite obtener una imagen que se parece más a la cara del sujeto buscado, que la de un retrato robot individual. Esta condición es válida si los componentes del morphing no son demasiado numerosos.



Fig 74. Bichsel (1996). Morphing automático de dos caras diferentes.

(126) Turk, Greg, and James F. O'Brien. 1999. Shape transformation using variational implicit surfaces. Paper presented at in Proc. SIGGRAPH, .

(127) Bichsel, Martin. 1996. Automatic interpolation and recognition of face images by morphing. Paper presented at Proc. Second Intl. Conf. on Automatic Face and Gesture Recognition, Killington, VT, .

(128) Wells, Gary L., and Lisa E. Hasel. February 2007. Facial composite production by eyewitnesses. *Current Directions in Psychological Science* 16 : 6,10(5).

Algunas técnicas con **automatismos** para **recobrar rasgos faciales** por medio de morphing de imagen automatizada han sido exploradas con el fin de sintetizar caras con su propia sincronización de los labios⁽¹²⁹⁾. Otros sistemas de animación facial complementado con un audio, pueden ser utilizados para el doblaje de películas, teleconferencias y efectos especiales.⁽¹³⁰⁾

El análisis facial permite explorar técnicas de imagen basadas en el modelado facial, pudiendo recrear movimientos faciales de una persona utilizando imágenes de esta persona. La técnica explora la viabilidad para interpolar tanto la vista de una imagen, recreando posturas faciales y el movimiento de la boca y los ojos, como también traslaciones y rotaciones de la cabeza.⁽¹³¹⁾⁽¹³²⁾

Otra técnica similar permite crear la cara de una persona a partir de una o dos fotografías, o modelarla a partir de la interface propia del programa. Los usuarios son asistidos de forma que los modelos de las caras son reconocidos de forma automática por un modelo de cara interna. En principio utilizan un conjunto de ejemplos de modelos de cara 3D. A continuación, se obtiene un modelo transformable del rostro modificando la forma y las texturas de los ejemplos en una representación espacial de tipo vectorial. Las nuevas caras y expresiones pueden ser modeladas al formar combinaciones lineales de los prototipos.⁽¹³³⁾

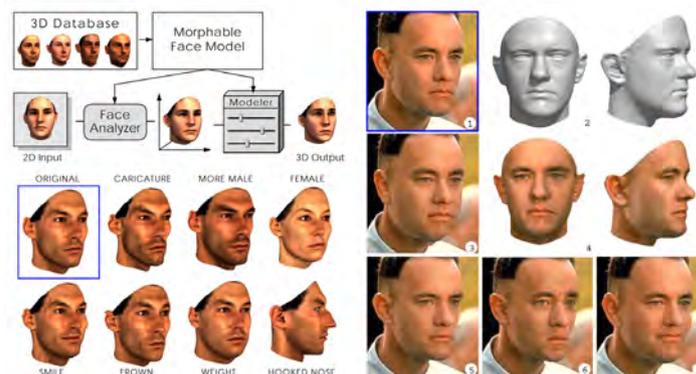


Fig 75. Blanz y Vetter (1999). Modelos transformables de rostros de personas a partir de fotografías.

El morphing también es utilizado en los avances para el reconocimiento automático de facciones del rostro en escenarios no controlados. Esto permite la asistencia de automatismos, los cuales utilizan técnicas de procesamiento avanzado en imágenes faciales y también descubrimientos psicológicos sobre la percepción del rostro humano. Específicamente, se utiliza el morphing 3D de modelos faciales, lo que permite caricaturizar el rostro. Esto proporciona mayor información que una simple fotografía del retrato robot; ya se pueden generar

(129) Slaney, M., M. Covell, and B. Lassiter. 1996. Automatic audio morphing. Paper presented at Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1996. ICASSP-96. Conference Proceedings., 1996 IEEE International Conference on, .

(130) Bregler, Christoph, Michele Covell, and Malcom Slaney. 1997. Video rewrite: Driving visual speech with audio. Paper presented at Proceedings of Computer Graphics (SIGGRAPH'97), .

(131) Ezzat, Tony, and Tomaso Poggio. 1997. Videorealistic talking faces: A morphing approach. Paper presented at In AVSP'97 workshop, Rhodos, .

(132) Ezzat, Tony, and Tomaso Poggio. 1999. Visual speech synthesis by morphing visemes. Paper presented at In MIT A.I Memo No. 1658, .

(133) Blanz, Volker, and Thomas Vetter. 1999. A morphable model for the synthesis of 3D faces. Paper presented at Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, .

nuevas posturas del rostro, variar la iluminación y resolución en la medida que la información este disponible en 3D.⁽¹³⁴⁾



Fig 76. Zou et al. (2008). Morphing 3D de rostro a lo largo de la línea que conecta la cara promedio y una cara específica.

Aplicaciones de morphing también son utilizadas en **estudios antropométricos**⁽¹³⁵⁾, donde se discutía la transición entre diferentes formas del cuerpo humano. La idea principal era crear una estructura única del cuerpo humano a partir de datos morfológicos utilizando fotografías, herramientas de diseño, escáner láser o escáner infrarrojos. Se trataba de una integración entre una forma 3D y la información de la piel en 2D. Mediante la interpolación y la transformación de imágenes basadas en triangulaciones, se compartía la estructura heredada de un humano genérico. Utilizando un sistema rápido de 3D morphing se creaban diferentes versiones de la forma del cuerpo. Este sistema permitía al usuario modificar de forma intuitiva un humano virtual junto al color de su piel. Además, métodos automáticos de texturas de ropas eran también presentados con variados ejemplos.

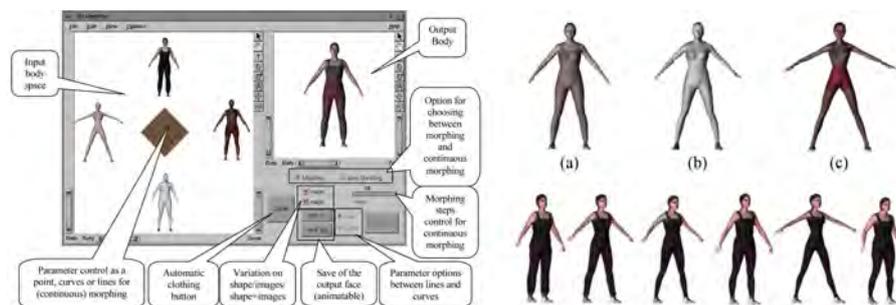


Fig 77. Lee y Magnetat-Thalmann (2001). **(Izq)** Interface gráfica para controlar los parámetros de morphing y los automatismos de la ropa. **(Der)(a-b-c)** Personas mezclada a partir de diversos humanos virtuales. **(Der-Ab)** Diversas formas humanas con la misma textura de ropa.

Se pueden encontrar ejemplos más concretos como la visualización progresiva de una cirugía craneo facial o de tipo dental, estudios antropológicos en la evolución de la forma de los cráneos en primates y seres humanos, estudios de cambios ambientales en el nivel del mar y en la cubierta vegetal (bosques), movimientos migratorios, erosión, estudios de procesos biológicos tales como el crecimiento vegetal y desarrollo fetal. Al relacionarlo con algoritmos evolutivos, se ha utilizado en la sintetización de sistemas de nervaduras, como en morfologías de criaturas virtuales para simular movimientos como nadar, caminar y saltar.

(134) Zou, Xuan, Josef Kittler, and Jose Tena. 2008. A morphing system for effective human face recognition. IET Conference Publications 2008 (CP543): 215-20.

(135) Lee, Won-Sook, and Nadia Magnetat-Thalmann. 2001. Virtual body morphing. Paper presented at Computer Animation, 2001. The Fourteenth Conference on Computer Animation. Proceedings, .

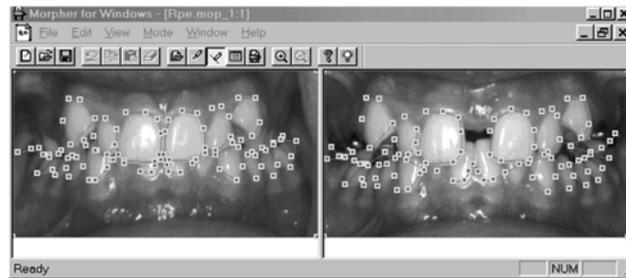


Fig 78. Halazonetis (1999). Morphing dental: preparación de una secuencia que muestra los cambios logrados por un tratamiento de ortodoncia.

En el 2001 la NASA desarrolla modelos computacionales de aeronaves, que podían predecir la fuerza, el movimiento y la energía necesaria para superar las cargas aerodinámicas al realizar maniobras con unas **alas metamorfas**⁽¹³⁶⁾ (*morphing wings*). El modelo general permitía introducir trayectorias de vuelo deseadas y algoritmos variables de control. Los cuatro módulos que componían el modelo se integraban para hacer una herramienta que permitiera el estudio de los requisitos para accionar las alas metamorfas.

En el 2008 la empresa automotriz BMW presentó un modelo conceptual denominado GINA, que presentaba un recubrimiento exterior (sin juntas) compuesto de un material textil. La cubierta del automóvil estaba compuesta por cuatro paneles: el capó, las dos puertas laterales y maletero. La membrana de cubierta se adaptaba perfectamente a su forma, pero tenía la cualidad de poder levantar y deformar el alerón trasero con el fin de ofrecer mayor estabilidad a altas velocidades. Además, sus puertas se abrían al estilo mariposa y estaban cubiertas por el material textil desde la nariz de la parte delantera hasta el borde fugado de la parte trasera, permitiendo que cuando estuviera cerrado dejará una superficie completamente lisa. El acceso al motor se realizaba a través de una abertura que se abría desde el centro del capó.

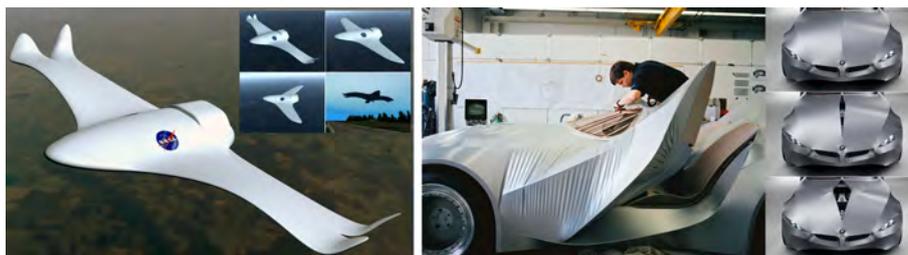


Fig 79. (Izq) Avión prototipo de la NASA con alas metamorfas (2001). **(Der)** Automóvil BMW GINA (2008), es un modelo que cuenta con una carrocería flexible compuesta por un textil. GINA es el acrónimo del término: Geometría y funciones en enésimas direcciones.

(136) Pettit, Greg W., Harry H. Robertshaw, and Dan J. Inman. 2001. Morphing wings for unmanned aircraft. *Smart Materials Bulletin* 2001 (11) (11): 7-12.

