

Capítulo 6:

Conclusiones

Como conclusión general, esta tesis cubre un conjunto de objetivos de investigación relacionados con la adquisición, la medida, la representación y el procesado de la información de color contenida en la imagen digital. La caracterización de los dispositivos de adquisición (cámaras) ha facilitado la determinación de las mejores condiciones de uso en aplicaciones colorimétricas. Se han desarrollado herramientas de análisis que permiten obtener, de forma automática o semiautomática, medidas sobre pequeñas diferencias de color, realce de contornos y segmentación, relacionándolas con la respuesta que en operaciones similares proporciona la visión humana. Se presentan resultados experimentales y numéricos en un conjunto de aplicaciones que abarcan operaciones seleccionadas en diversos campos. En el campo de la inspección industrial, se trata la evaluación de la uniformidad en el color de las muestras textiles. En el tratamiento de imágenes, se propone un nuevo método de realce de imágenes en color. En la interpretación de imágenes oftálmicas, se realiza la extracción de características en imágenes de dos tipos: imágenes de complicaciones derivadas del uso de lentes de contacto e imágenes del fondo del ojo sutiles para el diagnóstico y seguimiento del glaucoma. Esta tesis contribuye a aumentar las capacidades potenciales de los sistemas de visión artificial para ser utilizados en aplicaciones que requieren una evaluación e interpretación de la información del color, aplicaciones que tradicionalmente se llevan a

cabo mediante la visión humana entrenada de técnicos o especialistas y que están todavía lejos de la automatización y la objetivización.

Los objetivos específicos cubiertos por la tesis son:

- Análisis comparativo de dos tipos de cámara para la adquisición de imagen digital en color: videocámara de arquitectura 3CCD y cámara fotográfica con sensor CMOS multicapa. Caracterización del funcionamiento de la cámara con fines colorimétricos. Medida de la calidad a partir de la sensibilidad espectral y ruido producido en la imagen.
- Evaluación de la capacidad de la cámara para medir pequeñas diferencias de color entre pares de muestras. Comparación de la respuesta de la cámara con un instrumento de referencia de elevada precisión. Elaboración de tests de muestras que permiten realizar esta evaluación, afinando en la presentación de pequeñas diferencias de color, explorando la respuesta de la cámara en regiones del espacio de color que pueden implicar dificultad, o que presentan interés por su repercusión industrial, etc.
- Diseño de un método para el realce de la imagen en color inspirado en los modelos computacionales de la visión humana. Realce de los contornos de una imagen en color considerando las condiciones de observación y las características del dispositivo (monitor) que se utiliza para presentar la imagen. Combinación del operador de realce de derivada segunda con el suavizado mediante funciones gaussianas y todo ello, a su vez, con el espacio S-CIELAB, definido para medir distancias de color entre imágenes tal y como son percibidas en unas condiciones de observación determinadas. Análisis de las limitaciones del método que dan lugar a efectos no deseados, desviaciones de color, presencia de ruido, etc. Estudio de variantes y aproximaciones del método que pueden presentar ventajas por implicar algún tipo de simplificación en su aplicación o por rebajar los requerimientos de cómputo.
- Desarrollo de aplicaciones de visión artificial para la ejecución de tareas que habitualmente son exclusivas de técnicos y especialistas con visión entrenada en diversos campos: Inspección de la uniformidad del color en muestras textiles, análisis de imágenes estándar para la graduación de las complicaciones producidas por el uso lentes de contacto y análisis de imágenes del fondo de ojo para la ayuda al

diagnóstico precoz y seguimiento del glaucoma. Obtención de resultados experimentales, análisis y extracción de conclusiones.

Las conclusiones que se derivan del trabajo realizado se enumeran a continuación.

1. El método seguido para la caracterización colorimétrica de las cámaras ha consistido en:

- Obtener experimentalmente las funciones de sensibilidad espectral R,G,B de la cámara comparando la respuesta de la cámara con un instrumento de referencia (espectrorradiómetro). Dependencia con algunos parámetros que controlan la adquisición.
- Obtener una caracterización experimental del ruido producido en la imagen por la contribución del ruido de corriente oscura y del ruido de disparo (*shot noise*).
- Obtener dos medidas de la calidad para evaluar la cámara: el factor de Vora-Trussell, que sólo tiene en cuenta la sensibilidad espectral, y la medida unificada de bondad, que incorpora también la caracterización del ruido.
- Calcular los coeficientes de la matriz de conversión de los valores RGB dependientes del dispositivo a los valores tristímulo XYZ independientes del dispositivo. La transformación lineal se calcula considerando dos aproximaciones: una, basada únicamente en la sensibilidad espectral de la cámara (CSS), y otra, basada en la caracterización espectral y del ruido por la que se obtiene la medida unificada de bondad de la cámara (UMG).
- Establecer condiciones apropiadas de captación, fijando los parámetros de control y la configuración de iluminación-captación para un mejor rendimiento en las aplicaciones de medida del color mediante cámara.

Este método se ha aplicado a dos cámaras, una videocámara de arquitectura 3CCD (SONY DXC-9100P con tarjeta de adquisición Matrox Meteor II M/C) y una cámara fotográfica con sensor CMOS multicapa (SIGMA SD-9). Como instrumento de referencia se ha utilizado un espectrorradiómetro (PhotoResearch PR-715). El método se ha aplicado de forma completa a la cámara 3CCD, obteniéndose con ella más prestaciones y resultados más enriquecedores que con la cámara de sensor CMOS multicapa. Para afinar en la determinación de los parámetros de captación (*gain, offset*)

de la cámara 3CCD, se han utilizado series escaladas de muestras acromáticas (escala de grises) y se han comparado los valores de la luminancia (L^*) y los valores de cromaticidad (a^* , b^*) medidos por la cámara y por el espectrorradiómetro. Esta prueba de comparación ha proporcionado resultados relevantes para ajustar los valores de los parámetros de captación, siendo mucho mejor que el simple análisis de la respuesta de la cámara en los canales R, G, B por separado.

2. Se ha elaborado un test de 160 muestras de color de la colección estándar Munsell mate para la realización de pruebas de medida del color y de diferencias de color. El test se centra en la región de los colores poco saturados o casi neutros y se subdivide en el test de 90 colores pálidos (claros) y el test de 70 colores grisáceos (oscuros). Uno y otro consisten en diez grupos de muestras distribuidas uniformemente alrededor del círculo de tono. Cada grupo consta de una muestra central y sus vecinos inmediatos que representan variaciones elementales de *Value*, *Chroma* y *Hue Munsell*. Este test pone a prueba la capacidad discriminativa de la cámara ya que los colores casi neutros constituyen una estimulación muy similar de los tres canales de sensibilidad roja, verde y azul de la cámara y, por tanto, las pequeñas diferencias entre estos colores implican variaciones muy sutiles sobre una señal de fondo constante casi uniforme. Por otra parte, los colores poco saturados forman la mayor parte de las escenas naturales y urbanas y, en particular, en la cultura occidental, concentran buena parte del interés de la industria textil, pintura, decoración, etc. El test elaborado ha probado su utilidad a lo largo de todo el trabajo de investigación.

3. En la medida del color de las muestras, mediante la cámara 3CCD se observa una cierta distancia o error con respecto a las medidas efectuadas mediante el espectrorradiómetro. En promedio para el conjunto de muestras, las coordenadas CIELAB medidas por la cámara, tanto si se utiliza la transformación lineal basada en la caracterización CSS como la que se basa en la caracterización UMG, están a unas 7 unidades CIELAB de las coordenadas medidas por el espectrorradiómetro. Esta discrepancia en la medida absoluta del color es apreciable, aunque consideramos que no invalida el uso de la cámara con fines colorimétricos, en particular, como se ha probado en este trabajo, para medidas relativas o de diferencias de color.

4. Se ha estudiado la capacidad discriminativa de las dos cámaras (3CCD y de sensor multicapa) cuando se utilizan para medir pequeñas diferencias de color entre pares de muestras bajo iluminación de luz de día (simulador de D_{65}) y se ha comparado su respuesta con la del instrumento de referencia. Se han considerado dos fórmulas recomendadas por la CIE para el cálculo de las diferencias de color: CIELAB(ΔE_{ab}^*) y CIEDE2000 (ΔE_{00}). El método aplicado para la evaluación de la respuesta de la cámara se basa en el análisis de los resultados experimentales, el nivel de incertidumbre (expresada mediante el valor MCDM, *Mean Color Difference from the Mean*) y la tolerancia instrumental (normalmente se toma como diez veces el valor de la incertidumbre), las discrepancias absoluta y relativa con las diferencias de color medidas por el espectrorradiómetro. De las experiencias realizadas se concluye la fiabilidad de las cámaras para medir diferencias de color.

- Se ha obtenido una buena correspondencia entre las diferencias de color medidas por el espectrorradiómetro y las medidas por las cámaras, siendo la cámara 3CCD la que presenta los mejores resultados, tanto para el test de colores claros como para el test de colores oscuros. La cámara de sensor multicapa, con un factor de bondad (en sensibilidad espectral) inferior al de la cámara 3CCD, proporciona resultados buenos en el test de colores claros. El rango dinámico de la cámara de sensor multicapa no permitió obtener medidas aceptables para el test de colores oscuros. No obstante, podemos afirmar que el comportamiento de esta cámara representa una buena solución entre las prestaciones ofrecidas para la medida de diferencias de color en el rango aplicable y el precio de la cámara.
- La discrepancia entre la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro, en la medida de la diferencia de color, se ha calculado para cada par de muestras del test de colores claros y de colores oscuros. Se ha comparado el valor de la discrepancia absoluta con la incertidumbre y la tolerancia instrumental de la cámara. Aunque los valores medios de la discrepancia absoluta exceden la incertidumbre de la cámara, la mayoría de estas discrepancias absolutas se encontraron dentro de la tolerancia de la cámara para el caso de los colores muy pálidos. Este hecho, junto con el pequeño valor que de por sí tiene la tolerancia de la cámara (CIELAB $0.5 \Delta E_{ab}^*$ o CIEDE2000 $0.6 \Delta E_{00}$), se considera un buen logro, en precisión y exactitud, para la

respuesta de la cámara. Además las discrepancias absolutas son generalmente más bajas que el supraumbral para la discriminación visual de 0.887 unidades CIELAB.

- En la región de colores grisáceos (oscuros), las discrepancias absolutas son algo más altas debido, probablemente, a una mayor influencia del ruido de corriente oscura en este caso de muestras que estimulan pobremente el sensor. Sin embargo, estas discrepancias absolutas siguen inferiores al error mínimo calculado con la aproximación UMG para el conjunto de muestras Hardeberg ($\epsilon_{\min} = 1.423$ unidades de CIELAB). La repetición de todas las pruebas experimentales en dos condiciones de captación distintas ha permitido afinar en la idoneidad de seleccionar una de ellas.
- Los valores de la tolerancia instrumental (en unidades CIELAB y CIEDE2000) de los instrumentos utilizados se presentan en la siguiente tabla:

Instrumentos	Tolerancia Instrumental	
	CIELAB	CIEDE2000
Espectrorradiómetro	0,25	0,20
Cámara 3CCD ($gain, offset$) = (255, 32)	0,5	0,6
Cámara 3CCD ($gain, offset$) = (255, 0)	1,0	0,9
Cámara multicapa	1,0	0,8

- El análisis de la discrepancia relativa entre la cámara 3CCD y el espectrorradiómetro ha proporcionado información sobre la uniformidad de la respuesta de la cámara ante las diferencias de color que sólo se dan en tono, o en luminancia, o en croma. Las discrepancias relativas son bajas y casi uniformes alrededor del círculo de la tonalidad en las regiones muy pálidas y oscuras. Este hecho es también una buena característica de la respuesta de la cámara.
- El uso de las dos métricas CIELAB y CIEDE2000 en paralelo condujo a resultados similares en la expresión de las diferencias de color. Las dos aproximaciones (CSS y UMG) usadas para el cálculo de la transformación lineal de los valores RGB a XYZ condujeron también a resultados similares.
- En general, los resultados demuestran que el sistema de visión basado en la cámara 3CCD es un buen instrumento para efectuar medidas de la diferencia de color entre dos muestras de colores próximos. Esta característica puede ser utilizada

ventajosamente en diversas aplicaciones de inspección y evaluación de la uniformidad del color.

5. En otra experiencia se ha evaluado la repetitividad del color impreso en muestras con la misma especificación pero pertenecientes a dos ejemplares distintos de libros Munsell con muestras mate (*Nearly Neutral Munsell Collection* y *Munsell Book of Colors*). Para una amplia variedad de muestras se ha medido con el espectrorradiómetro la diferencia de color entre pares de muestras con la misma especificación pero procedentes de distinto libro Munsell. Como característica común, se observa que las diferencias de color más altas, en torno a 0.9 unidades CIELAB, se dan en la amplia región de los tonos pálidos (rojo, naranja, amarillo) mientras que las diferencias más pequeñas, en torno a 0.4 unidades CIELAB, se dan para los tonos fríos (púrpura, azul y verde). La variación de luminancia es la que tiene mayor peso en la diferencia de color medida entre las muestras con igual especificación en ambos libros, permaneciendo bastante estable la cromacidad dada por el tono y el croma de las muestras. Se han comparado estas diferencias de color, entre muestras de igual especificación y distinto libro, con las diferencias de color entre cada una de ellas por separado y sus muestras vecinas inmediatas en *Value*, *Chroma* y *Hue Munsell* en cada uno de los libros. A menudo, las diferencias de color que se presentan al cambiar de libro son mayores que las distancias a las vecinas inmediatas del mismo ejemplar. Este hecho constituye una fuente de incertidumbre que, por lo general, no suele ser evaluada por los usuarios de estos atlas y que puede ocasionar errores inaceptables en la especificación del color.

- De hecho, comparando la incertidumbre asociada al uso de un ejemplar distinto del mismo atlas estándar, con la incertidumbre MCDM asociada a la medida mediante cámara 3CCD y teniendo en cuenta las discrepancias de la cámara con el espectrorradiómetro en las diferencias de color, constatamos nuevamente que los resultados experimentales obtenidos con la cámara 3CCD son muy buenos, con unos niveles de incertidumbre que están englobados dentro de los que, en la práctica, vienen a aceptarse en numerosas tareas de inspección, basadas aún hoy en día, en el uso de colecciones estándar.
- Desconocemos en qué medida las conclusiones extraídas en esta experiencia son extensibles otros ejemplares del mismo o de diferente atlas. Tampoco conocemos las causas que pueden originar el fenómeno descrito: antigüedad ligeramente superior a dos años, defectos de impresión en la fabricación de las muestras, etc. Sin

profundizar en tales consideraciones, sí puede recomendarse a los usuarios de los atlas de color realizar regularmente una evaluación de la posible inconsistencia en el color de las muestras del libro concreto que utilizan, a fin de acotar el margen de ambigüedad introducido en la especificación del color, así como de hacer un seguimiento del estado del ejemplar que permita su uso correcto.

6. Aplicación en inspección textil: El sistema de visión basado en la cámara digital en color (3CCD) se ha aplicado a la evaluación de la uniformidad del color en textiles teñidos. Ocho pares de muestras de tela centro-orillo de colores oscuros se han evaluado siguiendo el método de comparar las diferencias de color medidas por la cámara y el instrumento de referencia. En este caso:

- Aunque la cámara es más sensible a la textura que el espectrorradiómetro, ambos instrumentos rindieron resultados constantes y satisfactorios en las pruebas de Pasa/No Pasa (*Pass/Fail*). Los efectos de la textura se aprecian sobre todo en la medida efectuada por la cámara. Si se prefiere obtener resultados más próximos a la respuesta del espectrorradiómetro (de carácter integrador en el ángulo de apertura) es conveniente aplicar alguna técnica de suavizado a las imágenes de las muestras captadas con la cámara 3CCD.
- Puesto que las muestras evaluadas eran casos reales de elevada dificultad (colores muy oscuros), los resultados probaron la alta calidad de la respuesta de la cámara 3CCD. Este hecho amplía la capacidad potencial de los sistemas de visión artificial para llevar a cabo tareas colorimétricas que han sido generalmente del dominio exclusivo de observadores entrenados.

7. En otra línea de desarrollo de esta tesis se ha propuesto un método para realzar imágenes digitales en color que considera los modelos de visión humana y las condiciones observación de las imágenes presentadas en un dispositivo como, por ejemplo, la pantalla de un monitor. Las condiciones de observación se expresan a través del número de píxeles por el grado del ángulo visual, valor que a su vez se calcula a partir de la resolución del dispositivo (píxeles por centímetro) y la distancia de observación. El método realza los contornos de los objetos y los elementos de la imagen de manera distinta en función de la distancia a la que se va a observar la imagen presentada en el monitor (suponiendo fija la resolución del dispositivo). Para ello se combina el operador Laplaciano de una Gaussiana (*LoG*) con los filtros espaciales que

aproximan las funciones de sensibilidad al contraste del sistema visual humano. Estos filtros se describen matemáticamente como combinaciones lineales de funciones gaussianas en el espacio de los colores oponentes.

- La operación de realce se realiza en el espacio de colores oponentes, siguiendo el esquema de la extensión denominada S-CIELAB (*spatial-CIELAB*), propuesto previamente para medir la diferencia de color entre imágenes digitales espacialmente variantes. El realce aplicado a la imagen original combina el operador Laplaciano con los filtros espaciales que simulan el efecto de suavizado que tiene lugar en la percepción de la imagen para unas condiciones de observación determinadas. Lo hemos llamado método de realce basado en el operador *LoG-Visión*.
- Así pues, el realce de contornos se adapta a las condiciones de observación. Cuando la imagen realzada se va a observar a corta distancia, el operador que se aplica utiliza gaussianas con menor anchura, llegándose a resaltar con un doble borde fino todos los contornos, tanto de los objetos grandes como de los detalles. Cuando la imagen realzada se va a observar a larga distancia, el operador que se aplica utiliza gaussianas con mayor anchura, de modo que solamente se llegan a resaltar con un doble borde grueso los contornos de objetos de mayor tamaño. En este último caso, los detalles no se resaltan ya que, a distancias de observación largas, no se llegan a distinguir, sino que aparecen suavizados.

8. Se han realizado una serie de cinco experimentos para profundizar en las características de este método de realce y explorar sus posibilidades. Las líneas de trabajo han sido:

- Comparación con otros dos métodos de realce ya existentes: el realce limitado al canal acromático manteniendo inalterados los canales cromáticos, y el realce basado en el operador laplaciano simple aplicado en el espacio de los canales oponentes.
- La posibilidad de aproximar el operador *LoG* por el operador Diferencia de Gaussianas (*DoG*), utilizado en los modelos que describen los campos receptivos del sistema visual humano, lo que permite simplificar notablemente el cálculo.
- Estudio de las limitaciones, efectos indeseados, ruido, etc. que pueden aparecer en la imagen realzada como consecuencia de la aplicación del método. Efectos

producidos por la variación del parámetro que controla la profundidad del realce para diferentes distancias de observación.

Los experimentos se han realizado y los resultados se han analizado principalmente mediante comparaciones de imágenes en la extensión S-CIELAB y mediante análisis estadístico de las variaciones experimentadas en un conjunto de zonas de color uniforme seleccionadas (regiones de interés). Las conclusiones que se extraen de los experimentos realizados son:

- Cuando la operación de realce se limita exclusivamente al canal acromático, los resultados obtenidos son buenos. Esto se debe a que el canal de luminancia es el más relevante en cuanto al contenido espacial. El realce no es completo si sólo se utiliza este canal, pero constituye una opción interesante cuando existan limitaciones, de tiempo de cálculo por ejemplo, que no faciliten aplicar el método de manera completa en los tres canales.
- Cuando el realce se basa en el operador de Laplaciano simple, en vez del operador *LoG*, la imagen realzada tiende a aumentar notablemente el ruido, distorsionar los colores, y el aspecto general de la imagen se deteriora más rápido con la profundidad del realce. En caso de aplicar el operador Laplaciano simple, la imagen realzada no se adapta a las condiciones de observación, sino que el realce es fijo.
- Los resultados obtenidos con el operador *DoG* son buenos y se asemejan mucho a los obtenidos con el operador *LoG*.
- Algunos efectos indeseados de poca importancia que implican distorsiones del color fueron observados al aplicar el realce basado en el operador *LoG-visión* a un test acromático diseñado a propósito, pero pasan inadvertidos en otros ejemplos de imágenes naturales. Estos efectos indeseados son consecuencia del hecho de que los tres canales de colores oponentes no son totalmente ortogonales.
- Debido al efecto de suavizado que realizan las funciones gaussianas implicadas en el operador *LoG-visión*, la imagen realzada resultante no tiende a aumentar ruido.
- La profundidad de operador de realce se debe aplicar cuidadosamente para evitar la sobre-actuación. Para ello debe tenerse en cuenta el parámetro de profundidad (k), introducido en la expresión matemática del operador *LoG-visión*, y la distancia de observación. Cuando la imagen realzada se ha de observar a corta distancia, el valor de k debe ser bajo para lograr un buen resultado. Sin embargo, si se considera una

distancia de observación larga, el valor de k debe aumentar considerablemente para lograr un efecto de realce similar al aplicado para distancias de observación cortas.

9. La extensión S-CIELAB se ha utilizado por el suavizado que introduce para simular la percepción del observador, en la determinación de las diferencias de color entre las imágenes de las muestras textiles centro-orillo. Los resultados son buenos, muestran que la cámara se hace menos sensible a la variabilidad de la textura y que integra mejor el color en el área de medida. De este modo, se acercan los resultados numéricos obtenidos con la cámara a los que se obtienen con el espectrorradiómetro.

10. Se ha aplicado el método de realce basado en el operador *LoG-Visión* al análisis de imágenes digitales que componen una serie estándar para la evaluación de las complicaciones derivadas del uso de lentes de contacto. En algunos casos de imágenes degradadas, este operador permite realzar y hacer más visible parte de la información que se requiere para caracterizar el estándar.

11. Dentro de las aplicaciones desarrolladas en esta tesis, se ha prestado especial atención al diseño de un algoritmo de mejora y segmentación de imágenes del fondo de ojo que pueda facilitar información de ayuda, siempre a criterio del especialista, para el diagnóstico precoz, el control y el seguimiento del glaucoma. Las imágenes analizadas corresponden a la zona de la papila, o cabeza del nervio óptico. La información cuantitativa a extraer son las dimensiones relativas del borde del anillo neuroretiniano en cuatro zonas características (comprobación de la regla ISNT) y la relación copa-disco.

- En esta aplicación se hace uso del método de realce de imagen en color inspirado en la visión humana (operador *LoG-Visión*) para realzar las imágenes que el especialista examina en el monitor. Tiene en cuenta las condiciones de observación (resolución del dispositivo y distancia de observación).
- Los algoritmos para la segmentación automática de la copa (excavación) y del anillo neuroretiniano en la cabeza del nervio óptico tienen algunas consideraciones como la suavización de la imagen inspirado en las condiciones de visión humana (simulando la distancia de observación del especialista) y la forma circular que presenta el disco óptico.

- El método muestra una manera factible para segmentar el disco óptico, el cual es complejo por las características que presenta al ser interceptado por las venas y las arterias y por las condiciones de registro de la imagen.
- Los algoritmos de segmentación elaborados se basan en el análisis de la información del color en las regiones de interés y en las diferencias del color entre los píxeles vecinos.
- Se han aplicado los algoritmos desarrollados a un conjunto de imágenes reales de ojos de una variedad de sujetos. Las imágenes han sido obtenidas usando una cámara retiniana no-midriática (retinógrafo). Los resultados de segmentación obtenidos son buenos y se han extraído las relaciones copa-disco y se ha comprobado el grado de cumplimiento de la reglas ISNT.

12. Los resultados obtenidos en la investigación llevada a cabo han permitido desarrollar algunas aplicaciones en los ámbitos de la industria textil y la salud visual. Consideramos que los resultados obtenidos en estas aplicaciones son alentadores pero todavía preliminares. La vía de trabajo que se abre en ellas, para realizar en un futuro próximo, ha de implicar un mayor número de pruebas, el análisis de más imágenes y la comparación de nuestros resultados con las valoraciones de expertos y especialistas.

Conclusions

As a general conclusion, the doctoral dissertation addresses a range of practically motivated research objectives related to the acquisition, measurement, representation and processing of colour information contained in digital images. The characterization of imaging devices (cameras) has allowed the author to determine their best working conditions for colorimetric applications. New tools of image analysis have been developed to automatically or partly automatically measure small colour differences, sharpen images and segment objects. All these operations have been related to similar operations of the human vision performance. The work includes both experimental and numerical elements in a variety of applications: industrial inspection (colour uniformity assessment of textile dyeing), colour image sharpening, and analysis of ophthalmic images (feature extraction in reference images of complications related to wearing contact lenses and characterization of retina fundus images for glaucoma diagnosis and monitoring). This doctoral dissertation contributes to increase the potential capabilities of artificial vision systems to be used in applications involving analysis of colour images which traditionally require the involvement of human specialists or technicians and that still remain far from objectiveness and automation.

The specific objectives achieved with the thesis are:

- Comparative analysis of two types of digital cameras: 3CCD camera and multilayer silicon sensor camera. Characterization of camera performance for colorimetric purposes. Calculation of measure of goodness that involve both the spectral sensitivities and imaging noise of the camera.
- Evaluation of the capabilities of digital cameras to measure small colour differences between sample pairs by comparing the camera performance with a reference instrument. Design of specific tests of colour samples. Particular attention is paid to the nearly neutral region of the colour space (very pale and the dark greyish colours) that entails certain degree of difficulty.
- Design of a method for image sharpening based on human colour vision models. The method combines second derivative operators with the spatial-CIELAB space defined to measure colour distances between images. A colour image is sharpened taking into account the viewing condition of the observer and the characteristics of the monitor used to display. The method has been demonstrated to yield better results than conventional methods. Possible artifacts are explored and evaluated.
- Several applications in different fields have been developed: Application to colour matching assessment by machine vision in textile industry; application to the analysis of standard images to grade the complications produced by contact lens wear in optometry, and application to the analysis of ophthalmic images related to glaucoma. Numerical and experimental results are obtained and discussed.

From the research work, the following conclusions can be derived.

1. The method applied for camera characterization had the following steps:

- Experimental measurement of the RGB spectral sensibility functions of the camera. Comparison of camera response with the response of a reference instrument (spectroradiometer). Study of their dependence on some control parameters of image acquisition.
- Experimental characterization of imaging noise, taking into account a camera model for which dark current noise and shot noise are the main contributors.

- Measurements of quality for camera evaluation: the Vora-Trussell factor, which considers the spectral sensibility, and the Unified Measurement of Goodness (UMG) that also consider the contribution of imaging noise.
- Calculation of the matrix coefficients of the linear transformation applied to the device dependent RGB values to obtain the device-independent representation of color with the CIE XYZ tristimulus values. The transformation has been calculated considering two different approaches: one, on the basis of the camera spectral sensitivity (CSS), and two, on the basis of the unified measure of goodness of the camera (UMG) that involves an imaging noise model.
- Selection of the working conditions of the acquisition system. Determination of the range of the control parameters and the illuminating-viewing condition for a better performance in colour measurement by camera.

The method was applied to two cameras: a 3CCD camera SONY DX-9100P, and a CMOS multilayer sensor camera (SIGMA SD-9). The camera was placed in an observation booth with controlled white light illumination of D65 real simulator. We used a spectroradiometer (PhotoResearch PR-715) as the reference instrument. The whole method was applied to the 3CCD camera, for which we obtained better results than for the multilayer sensor camera. The comparison between the 3CCD camera response and a reference instrument in the measure of luminance (L^*) of a grey scale led us to select the gain and the offset range of values in a more appropriate way than by considering the camera response in the separate RGB channels exclusively. In addition to this, our method took into account possible chromatic deviations in capturing achromatic samples and compared them with the response of the reference instrument.

2. To test the camera capability in a difficult case of discrimination, we have considered small colour differences in the nearly neutral colour region of the Munsell system. A test of 90 Munsell pale colour chips and 70 Munsell dark grey colour chips distributed in groups of neighbours around the circle of hue has been used to compare the responses of the camera and the reference instrument. Each group consists of a group centre chip and its closest neighbours, one step away from the group centre in Munsell Value, Chroma and Hue. Firstly, this test represents a challenge for the instrument discrimination capability, since the nearly neutral colours entail a similar stimulation of the three (red, green and blue) sensitive channels of the camera, and the difference

between these colours involve small variations on a high nearly constant background signal. Secondly, most of the colours contained in real and natural scenes, indoors and outdoors, have low chroma, and thirdly, the nearly neutral colour region draws industrial attention, particularly related to materials for painting, clothing, or decorating. The test has demonstrated to be very useful through the work.

3. We have evaluated the 3CCD camera's performance for the absolute measurement of colour under daylight illumination (D65 simulator). The discrepancies between the results obtained by the camera and by the reference instrument were used to test the reliability of the camera's performance. They reveal that the colour fidelity of the camera estimates is limited by an average error of 7 CIELAB units. This result is quite similar for the CSS and the UMG approaches considered. Although the lack of coincidence in the absolute measurements of colour is appreciable, we conclude that the camera is reliable to measure colour differences.

4. We have tested the reliability of both the 3CCD and the multilayer sensor cameras to measure the small colour differences of the test samples under daylight illumination (D65 simulator). Standard CIE formulas for colour difference measurement CIELAB(ΔE_{ab}^*) y CIEDE2000 (ΔE_{00}) have been considered. The reliability has been quantitatively estimated through the absolute discrepancy in the measurement of colour differences with respect to the reference instrument (spectroradiometer). Absolute and relative discrepancies have been addressed considering the (*Mean Colour Difference from the Mean*) MCDM metric to represent the uncertainty, and ten times this amount, to determine the instrumental colour tolerance. From the results, both cameras are reliable for colour difference measurements.

According to our experimental results, both cameras are in good agreement with the spectroradiometer in measuring small colour differences. In the very pale region of colour, the 3CCD camera has a better performance than the multilayer sensor camera because the average of the absolute discrepancies with the spectroradiometer has the lowest value. This result is consistent with the fact that the 3CCD camera has a Vora-Russel factor values higher than the multilayer sensor camera. In the dark greyish region of colours, results could not be obtained for the multilayer sensor SIGMA

camera because the level of sensor stimulation was poor. Nevertheless, when this camera is used within its range, we consider that it constitutes a good trade-off between costs and quality.

We have compared the absolute discrepancy between the 3CCD and the spectroradiometer with the uncertainty and the instrumental tolerance of the camera. Although the discrepancies exceed the uncertainty, they fall, in general, in the camera tolerance for the very pale colours and using a given (gain, offset) capturing condition. This fact, along with the small value of the camera tolerance (CIELAB $0.5 \Delta E_{ab}^*$ o CIEDE2000 $0.6 \Delta E_{00}$), is considered a good achievement, in precision and accuracy, for the camera performance. Moreover, taking another reference, the absolute discrepancies are generally lower than the suprathreshold for visual discrimination of 0.887 CIELAB unit.

In the dark grayish region, probably caused by a greater influence of dark current, the absolute discrepancies are somewhat higher. Nevertheless, nearly all of them are still lower than the minimal color error calculated with the UMG approach ($\epsilon_{\min} = 1.423$ CIELAB units). The repetition of all the experiments for two different capturing conditions of the 3CCD camera has allowed a fine selection of them.

The instrumental tolerances (in CIELAB and CIEDE2000 units) measured for all the instruments used in our experiments are contained in next table:

Instruments	Instrumental Tolerance	
	CIELAB	CIEDE2000
Spectroradiometer	0.25	0.20
3CCD Camera (<i>gain,offset</i>)=(255,32)	0.5	0.6
3CCD Camera (<i>gain,offset</i>)=(255,0)	1.0	0.9
Multi-layer Camera	1.0	0.8

The analysis of the relative discrepancy shows that the 3CCD camera behaves quite uniformly around the circle of hue in both the very pale and the dark grayish regions; it is highly accurate when it measures chroma and value variations, but somewhat less

accurate for hue variations. This fact is also a good property of the camera performance. We also conclude that the selection (gain, offset) = (255, 32) is suitable but not critical. Moreover, the camera's performance is robust to variations of these values. The use of the two CIELAB and CIEDE2000 metrics in parallel led to similar results. The two approaches (CSS and UMG) used in the linear transformation of the RGB values to the camera estimate XYZ values led also to similar results in the measurement of the color differences between sample pairs.

These results show that the 3CCD camera based vision system is a very good instrument to measure colour differences between samples. This property can be advantageously used in a number of applications involving inspection and evaluation of colour uniformity.

5. In another experiment, we evaluated the repetition of printed colour. By using a spectroradiometer, we measured the CIELAB and CIEDE2000 colour differences of pairs of matte patches of equal specification but from different individual collections of the Munsell chart (*Nearly Neutral Munsell Collection y Munsell Book of Colours*). The results evidenced that biggest errors (about 0.9 CIELAB units) occur in the warm colour region (yellow, orange and red), whereas the smallest errors (about 0.4 CIELAB units) occur in the region of cold colours (purple, blue, green). Such errors are mainly produced by a change in luminance. Sample chromaticity, however, remains nearly constant. The inter-distance associated to two samples with the same specification but belonging to different collections can be larger than the inner-distances associated to the colour variation existing between neighbour patches of the same collection. This sort of uncertainty is often forgotten by the users of standard charts. In fact, it can be also larger than the average absolute discrepancy between the 3CCD camera and the spectroradiometer. As a good practice, it can be recommended to check regularly the possible colour inconstancy or degradation of the patches of a given collection of a standard chart, in order to avoid errors such as those evidenced in this work.

6. Application to textile inspection: The camera system has been applied to the evaluation of colour uniformity in textile dyeing. Eight pairs of extreme-centre fabric samples have been analysed by both the camera and the reference instrument. In this case, the effects of the texture are noticed. Although the camera is more sensitive to

texture than the spectroradiometer, both instruments have yielded consistent and satisfactory Pass/Fail results. To make the results obtained by both instruments get closer some smoothing of the images captured by the camera must be applied prior to measure colour differences. Since the samples assessed were real cases of high difficulty (most of them were very dark colours), the results showed the high quality of the camera performance and, hereby, the potential of this sort of machine vision systems for colorimetric tasks that usually have been exclusive matter of trained observers.

7. In a different line of development of the research, we have proposed a method for colour digital image sharpening that is inspired in human vision model and takes into account the viewing conditions under which the sharpened image is going to be observed. We consider CRT monitor as an example of device for image display. The viewing conditions are expressed in pixels per degree of visual angle, and they are estimated from both the pixels-per-cm displaying capability and the viewing distance. The method enhances object contours in a different way depending on the viewing distance from the monitor (a fixed display resolution is assumed). The method combines the Laplacian of Gaussian (*LoG*) operator with the spatial filters that approximate the contrast sensitivity functions of human visual system. The sharpening operation is introduced in the opponent colour space, following the scheme proposed in S-CIELAB. We deduce the sharpening to introduce in the original image in order to have the spatially filtered image (that approaches the perceived image) *LoG*-sharpened for a given viewing condition. Consequently, at short viewing distances, for which the spatial blurring is small, most fine edges and object contours are sharpened by adding narrow double edges. On the other hand, at long distances, for which the spatial blurring is greater, just the large figures are sharpened by adding thick double edges. Due to the smoothing effect of the Gaussian functions involved in the *LoG* operator, the proposed image sharpening does not tend to increase noise. We have called it the sharpening image method based on the *LoG-vision* operator.

8. A series of five experiments have been designed and carried out for a better knowledge of the method characteristics and to explore its possibilities. We have worked along the following lines:

- When the sharpening operation is exclusively limited to the achromatic channel, the results obtained are good. This is consistent with the high importance of the luminance channel in the spatial content of colour images.
- When the sharpening is based on the simple Laplacian operator, instead of on the *LoG* operator, the image sharpening tends to severely increase noise, to distort colours, and the general appearance of the image deteriorates rather fast with the depth of the sharpening operation. In this case, the image sharpening does not adapt to the viewing conditions.
- *LoG* operator has been approached by a *DoG* operator and the results obtained in sharpening colour images are good.
- Some artifacts involving colour distortions of little relevance were observed when rendering sharpened achromatic tests designed on purpose, but they were not appreciated in other examples of more natural images. These artifacts are consequence of the fact that the three opponent color channels are not completely orthogonal. Thus, should such a case ever appear when rendering images, it will be convenient to limit the sharpening operation to the achromatic channel exclusively.
- The depth of the sharpening operation must be carefully applied to avoid overacting or producing artificial appearances. The viewing distance is important. When the sharpened image is to be seen at a short distance, a low k value can lead to the desired result, whereas when the sharpened image is to be seen at a longer distance, we must considerably increase the k value to have a similar result.

9. Since the S-CIELAB extension introduces some smoothing of an image related to the perception from a distance, we have used it to measure the colour differences involved in the assessment of the extreme-centre textile sample pairs. The results are good. They show that the camera becomes less sensitive to texture and that some integration of colour within the area of measurement is achieved. This image smoothing makes the results obtained by the camera get closer to those obtained by the spectroradiometer.

10. We have applied the sharpening method based on the *LoG-vision* operator to the analysis of a reference image series used to grade the complications caused by contact lens wearing. In some cases, this method allowed us to enhance and make some part of relevant information more visible. This information is being used to improve the image

feature extraction in order to quantitatively characterize the standard series. Some preliminary and promising results have been obtained. This work is still in progress.

11. In the case of medical images, the sharpening method based on the *LoG*-vision operator has been used as a part of the algorithm developed to give assistance to the specialists in early detection of glaucoma risk, diagnosis and monitoring. The colour digital image obtained with a retinal camera is analysed in the area of the optical nerve head. An algorithm of segmentation that combines colour differences between pixels and image sharpening is designed to segment the optical disc, the cup and therefore, to compute the cup to disc ratio, which is an important parameter for the estimation of glaucoma. Also we evaluated whether the rule ISNT is fulfilled.

The algorithms for the automatic segmentation of both cup and disc in the optic nerve head have been developed and applied to a set of real images obtained by using a non-mydratic retinal camera. The algorithms are based on the analysis of the colour content of the region and the colour differences between neighbour pixels. Some considerations about smoothness and round shape of the optic disc boundary have been taken. The method shows a feasible way for complex optic disc image analysis and feature extraction that can be useful in the assistance to glaucoma diagnosis.

