



Universitat de Lleida

DetECCIÓN de Marcas mediante Técnicas de Medida de Distancia basadas en Láser y de Imagen basadas en Intensidades de Color

Autora

Mercè Teixidó Cairol

Departamento de Informática e Ingeniería Industrial

Universitat de Lleida

mteixido@diei.udl.cat

Directores de Tesis

Dr. Jorge Palacín Roca i Dr. Miquel Nogués Aymamí

Lleida, 16 noviembre de 2012

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

TESIS DOCTORAL

Detección de Marcas mediante Técnicas de Medida de Distancia basadas en Láser y de Imagen basadas en Intensidades de Color

Autora

Mercè Teixidó Cairol

Departamento de Informàtica e Ingenieria Industrial

Universitat de Lleida

mteixido@diei.udl.cat

Directores de Tesis

Dr. Jorge Palacín Roca i Dr. Miquel Nogués Aymamí

Lleida, 16 noviembre de 2012

Departamento de Informática e Ingeniería Industrial
Escuela Politécnica Superior
Universitat de Lleida

Detección de Marcas mediante Técnicas de Medida de Distancia basadas en Láser y de Imagen basadas en Intensidades de Color

Memoria presentada para optar al grado de Doctor por la Universitat de Lleida redactada según los criterios establecidos en el Acuerdo núm. 19/2002 de la Junta de Gobierno de 26 de febrero de 2002 para la presentación de la tesis doctoral en formato de artículos.

Programa de doctorado: Ingeniería y Tecnologías de la Información

Directores de la Tesis: Dr. Jorge Palacín Roca i Dr. Miquel Nogués Aymamí

Dr. Jorge Palacín Roca, Profesor Titular de la Escuela Politécnica Superior de la Universitat de Lleida,

Dr. Miquel Nogués Aymamí, Profesor Titular de la Escuela Politécnica Superior de la Universitat de Lleida

CERTIFICAN:

Que la memoria “**Detección de Marcas mediante Técnicas de Medida de Distancia basadas en Láser y de Imagen basadas en Intensidades de Color**” presentada por Mercè Teixidó Cairol para optar al grado de doctor se ha realizado bajo su supervisión.

Lleida, 16 de noviembre de 2012.

Amb tu, la vida té un altre color

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Jordi Palacín y a Miquel Nogués su tarea como directores de esta tesis. Sus conocimientos, sus orientaciones, su manera de trabajar, su persistencia, su paciencia y su motivación, han sido fundamentales para mi formación como investigadora.

A la persona a la que me gustaría agradecer y dedicar la ejecución de esta tesis es a mi marido, Xavier, por su paciencia, y comprensión. Gracias a su empeño y confianza depositada en mi, he encontrado las fuerzas y el tiempo necesario para la realización de esta tesis.

A mi hija Jana, su nacimiento ha coincidido con el final de la tesis. Ella es lo mejor que nos ha pasado. Es sin duda mi referencia para el presente y para el futuro.

A mis padres Ramon y Rosa Mari, por su comprensión y ayuda incalculable. Me han enseñado a encarar las adversidades sin temor, me han transmitido grandes valores, principios, perseverancia y empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.

A mis hermanos Anna y Ramon, ellos han sido grandes puntales en momentos de mi vida transmitiéndome siempre el valor del esfuerzo y la recompensa.

Me gustaría plasmar un especial agradecimiento a mis amigos y compañeros de doctorado: Tomàs, Marcel, Davinia y Javier, por el apoyo y grandes momentos que hemos pasado juntos.

A todos ellos y a todas las personas que directa o indirectamente han participado en la realización de esta tesis, ¡Muchas gracias a todos y todas!

Resumen

En esta memoria se presentan diversos trabajos de investigación para la detección de marcas de referencia mediante el análisis de la información del entorno obtenida con imágenes en color y con sistemas de medida de distancia láser.

El uso de sensores LIDAR y cámaras permite definir estrategias para detectar marcas de referencia que pueden ser utilizadas en multitud de aplicaciones. En esta memoria se presentan los resultados obtenidos. En primer lugar se propone una aplicación en la que se utiliza un LIDAR externo para detectar un marcador cilíndrico. La detección del marcador se ha utilizado para estimar externamente la posición del robot móvil, registrar su trayectoria y posteriormente comparar la trayectoria planificada por el robot móvil con la trayectoria real ejecutada. En la misma línea de trabajo se propone una segunda aplicación en la que las marcas a detectar son las piernas de una persona caminando. En este caso la marca es móvil y con una forma que se aproxima a la forma de un cilindro. La detección del marcador permite medir la forma de andar de una persona lo que en un futuro puede permitir evaluar la influencia de factores externos como enfermedades y la ingesta de alcohol en la forma de andar. En tercer lugar se propone una aplicación en la que se utiliza una cámara externa para detectar marcadores de un color determinado. De forma específica se ha propuesto un nuevo sistema de descripción lineal de las relaciones que se establecen en los colores que identifican a un objeto. Este sistema se ha denominado "Linear Color Modeling" y ha sido aplicado para detectar melocotones rojos (paraguayos) durante su etapa de crecimiento en el árbol. En esta aplicación cada pieza de fruta se trata como un marcador que debe ser localizado. En cuarto lugar se ha propuesto el desarrollo de un nuevo sistema compacto con capacidades de adquisición y procesado de imágenes con el objetivo de facilitar la detección visual de marcas. Los resultados obtenidos en las diversas aplicaciones propuestas han demostrado la utilidad y versatilidad de los sistemas de medida utilizados.

Summary

This memory introduces several research works developed to detect reference marks by analyzing environmental information obtained with colour images and laser distance measurement systems.

LIDAR sensors and cameras are used to detect reference marks by defining different strategies in a wide range of applications. This memory presents the results obtained. Firstly, an application is proposed to detect external LIDAR cylindrical markers. This procedure can be used to estimate the position of a mobile robot, and register its trajectory in order to compare the planned path with the actual path executed by the mobile robot. The second application proposed is focused on detecting the legs of a person while walking. In this case, the legs are mobile marks with a shape that can be approximated as a cylinder. The relative position of the marker can be used to estimate gait and trajectory parameters and to evaluate the influence of illness and moderate alcohol ingestion on gait parameters. Thirdly, an application using an external camera is proposed to detect markers of specific colours. The classification method is based on the estimate of the distance to some linear colour models (or lines), which are defined in the RGB vector colour space. This linear colour modelling has been used to identify red peaches in orchard images. In this application, each piece of fruit is treated as an individual marker to be found. The last application involves the development of an embedded real-time system with image acquisition and image processing capabilities to facilitate the visual detection of marks. The results obtained in the proposed applications have proved the suitability and versatility of the new proposed measurement systems.

Resum

En aquesta memòria es presenten diversos treballs d'investigació per a la detecció de marques de referència mitjançant l'anàlisi de la informació de l'entorn obtinguda amb imatges en color i amb sistemes de mesura de distància làser.

L'ús de sensors LIDAR i càmeres permet definir estratègies per detectar marques de referència que poden ser utilitzades en multitud d'aplicacions. En aquesta memòria es presenten els resultats obtinguts. En primer lloc es proposa una aplicació en què s'utilitza un LIDAR extern per detectar un marcador cilíndric. La detecció del marcador s'ha utilitzat per estimar externament la posició del robot mòbil, registrar la seva trajectòria i posteriorment comparar la trajectòria planificada pel robot mòbil amb la trajectòria real executada. En la mateixa línia de treball es proposa una segona aplicació en què les marques a detectar són les cames d'una persona caminant. En aquest cas la marca és mòbil i amb una forma que s'aproxima a la forma d'un cilindre. La detecció del marcador permet mesurar la forma de caminar d'una persona el que en un futur pot permetre avaluar la influència de factors externs com malalties i la ingesta d'alcohol en la forma de caminar. En tercer lloc es proposa una aplicació en què s'utilitza una càmera externa per detectar marcadors d'un color determinat. De forma específica, s'ha proposat un nou sistema de descripció lineal de les relacions que s'estableixen en els colors que identifiquen un objecte. Aquest sistema s'ha denominat "Linear Color Modeling" i ha estat aplicat per detectar préssecs vermells (préssec pla) durant la seva etapa de creixement en l'arbre. En aquesta aplicació cada peça de fruita es tracta com un marcador que ha de ser localitzat. En quart lloc s'ha proposat el desenvolupament d'un nou sistema compacte amb capacitats d'adquisició i processat d'imatges amb l'objectiu de facilitar la detecció visual de marques. Els resultats obtinguts en les diverses aplicacions proposades han demostrat la utilitat i versatilitat dels sistemes de mesura utilitzats.

Índice de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Sistema de visión.....	3
1.2.1. Sensores de imagen.....	4
1.2.2. El ojo humano y la cámara fotográfica.....	5
1.2.2.1. El sistema con prisma y tres sensores.....	6
1.2.2.2. El filtro Bayer y su funcionamiento.....	7
1.2.3. Imagen digital RGB.....	8
1.3. Sistema digital de medida de distancias.....	9
1.3.1. Funcionamiento de un sistema LIDAR.....	11
1.3.2. Componentes internos de un sistema LIDAR.....	13
1.3.3. Captación de datos 3D con un sistema LIDAR.....	13
1.4. Referencias.....	14
2. Objetivos	17
2.1. Objetivo de la tesis.....	17
3. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medidas láser 2D: aplicación para la localización y seguimiento de un robot móvil	19
3.1. Introducción.....	19
3.2. Aportación al estado del arte.....	20
3.3. Referencias.....	21
3.4. <i>Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and Mobile Robot Tracking.</i> M. Teixidó et al. / <i>Sensors</i> 2012, 12(12), 16482-16497.....	22
1. Introduction.....	23
2. Materials and Methods.....	24
2.1. Hokuyo UTM-30LX.....	24
2.2. Rotating and cooling measurement structure.....	24
2.3. Cylindrical targets.....	26
2.4. Method for circle detection in the scan data.....	27
3. Experiments.....	29

3.1. Evaluation of the positioning error relative to the distance for $\theta = 0^\circ$	29
3.2. Evaluation of the positioning error relative to the orientation for $r_d = 1,000$ mm.....	30
3.3. Evaluation of the positioning error for different distances and orientations	31
4. Mobile robot tracking.....	33
5. Conclusions	35
Acknowledgements	36
Referentes and Notes.....	36

4. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medida láser 2D: aplicación para la medición de la forma de caminar 39

4.1. Introducción.....	39
4.2. Aportación al estado del arte	42
4.3. Referencias	44
4.4. <i>Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR.</i> M. Teixidó et al. / <i>Sensors</i> 2011, 11(5), 5071-5086.....	46
1. Introduction	46
1.2. Contributions of this work	47
1.3. Related work	48
2. Materials and methods.....	48
2.1. Subjects	48
2.2. Apparatus	49
2.2.1. Terrestrial LIDAR	49
2.2.2. Alcoholmeter	50
2.3. Experimental	51
2.4. Parameters	51
3. Results and Discussion.....	53
4. Conclusions and future work.....	60
References	60

5. Detección de marcas mediante el procesado de imágenes RGB: aplicación a la detección de fruta fresca 63

5.1. Introducción.....	63
5.2. Aportación al estado del arte	64

5.3. Referencias	65
5.4. <i>Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images under natural illumination.</i>	
M. Teixidó et al. / <i>Sensors</i> 2012, 12(10), 7701-7718.....	68
1. Introduction	69
2. Area of application	70
3. Approach	71
3.1. Classification method.....	71
3.2. Empirical determination of the Linear Color Models.....	73
3.3. Fruit segmentation	75
3.4. Detecting individual fruit pieces.....	75
3.5. Peach Size Estimate	76
4. Results	78
4.1. Bright Illumination.....	79
4.2. Low Illumination	80
4.3. Peaches with occlusion ratio lower than 33%.....	81
4.4. Peaches with occlusion ratio from 33% to 66%	81
4.5. Peaches with occlusion ratio higher than 66%	82
5. Conclusions	83
Acknowledgements	83
References and Notes	83
6. Detección de marcas mediante el procesado de imágenes RGB: desarrollo de un sistema compacto	87
6.1. Introducción.....	87
6.2. Aportación al estado del arte	89
6.3. Referencias	90
6.4. <i>Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-up Tables.</i>	
M. Teixidó et al. / <i>Sensors</i> 2012, 12(6), 14129-14143.....	91
1. Introduction	92
2. Background.....	92
2.1. Embedded Vision Systems.....	92
2.2. Look-Up Tables for fruit segmentation	93
3. Embedded vision system	94

3.1. Camera Module.....	94
3.2. Processor Board	95
4. Creation of a 3D Look-Up Table for red peach detection.....	96
4.1. LUT created from linear color models defined in the RGB vector color space	97
4.2. LUT created from the histogram defined in the RGB vector color space	98
5. Results	99
5.1. Evaluation of the time performances	100
5.2. Evaluation of fruit detection performances.....	101
6. Conclusions	103
Acknowledgements	104
References	104
7. Discusión general de los resultados	107
8. Conclusiones finales	111
8.1. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medidas láser 2D: aplicación para la localización y seguimiento de un robot móvil.....	111
8.2. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medida láser 2D: aplicación para la medición de la forma de caminar	112
8.3. Detección de marcas mediante el procesado de imágenes RGB: aplicación a la detección de fruta fresca.....	114
8.4. Detección de marcas mediante el procesado de imágenes RGB: desarrollo de un sistema compacto.....	115
Lista de símbolos y abreviaciones	117

Índice de figuras

Fig. 1.1.	Elementos de una cámara fotográfica digital	3
Fig. 1.2.	Sensor CCD (izquierda) y sensor CMOS (derecha)	4
Fig. 1.3.	El ojo humano y la cámara de fotográfica	5
Fig. 1.4.	Espectro visible por el hombre.....	6
Fig. 1.5.	El sistema con prisma y tres sensores	6
Fig. 1.6.	Filtro Bayer	7
Fig. 1.7.	Bloqueo selectivo de colores.....	7
Fig. 1.8.	Elementos del proceso de captura de la imagen.....	8
Fig. 1.9.	Imagen digital RGB	9
Fig. 1.10.	Funcionamiento básico de los sensores ultrasónicos	10
Fig. 1.11.	Localización de un objeto con un sensor ultrasónico.....	11
Fig. 1.12.	Sensor láser basado en triangulación	11
Fig. 1.13.	Sistema basado en el análisis del Tiempo de Vuelo.....	12
Fig. 1.14.	Onda emitida y desfase recibido con el sistema de diferencia de fases	12
Fig. 1.15.	Láser LMS y sus componentes principales interiores.....	13
Fig. 1.16.	Reconstrucción 3D de datos capturados con un LIDAR 2D.....	14
Fig. 4.1.	Parámetros que definen la forma de andar de las personas.....	40
Fig. 4.2.	Persona andando hacia el sensor láser, vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha).....	43
Fig. 4.3.	Ejemplo de puntos del escaneo y el contorno de dos círculos que representan las piernas.	43
Fig. 5.1.	Ejemplos de diferentes condiciones de iluminación en el campo	65
Fig. 6.1.	El módulo de la cámara, el procesador y la placa auxiliar LCD color.....	89

Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and Mobile Robot Tracking

Fig. 1.	Sensor scanning.....	24
Fig. 2.	Laser sensor and additional cooler on a rotating structure.....	25
Fig. 3.	Dynamic evolution of the error in one distance measured with and without cooler.....	25
Fig. 4.	Schematic image of the rotating structure that holds the sensor	26
Fig. 5.	Set of PVC cylinders used as targets.....	26
Fig. 6.	Sample circle fitting with (a) and without outliers (b).....	28

Fig. 7.	Maximum error in the measurement of the distance depending on λ	28
Fig. 8.	Example of circular target location.....	29
Fig. 9.	Average error (a) and standard deviation (b) for different target diameters....	30
Fig. 10.	Circular target location for three different orientations.....	30
Fig. 11.	Average error (a) and standard deviation (b) for different target diameters....	31
Fig. 12.	Shape of the laser beam at different scanning angles.....	31
Fig. 13.	Average distance error map expressed in mm relative to the target.....	32
Fig. 14.	Standard deviation error map expressed in mm relative to the target diameter.....	33
Fig. 15.	Images of the mobile robot with a circular marker attached (a) and the laser scanner (b).....	33
Fig. 16.	Comparison between the real and measured robot trajectory.....	34
Fig. 17.	Placement error for different radial distances.....	35

Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR

Fig. 1.	Hokuyo UTM-30LX.....	49
Fig. 2.	Representation of a typical measurement set with a representation of the scan plane.....	50
Fig. 3.	Example of LIDAR raw data points showing two legs.....	50
Fig. 4.	Alcotest 7110 Evidential.....	51
Fig. 5.	Gait parameters.....	52
Fig. 6.	Graphic definition of the A and AA parameters.....	52
Fig. 7.	Graphic example of the procedure used to estimate the straight path.....	53
Fig. 8.	Example of trajectories registered: half period case.....	55
Fig. 9.	Example of trajectories registered: one period case.....	56
Fig. 10.	Individual values of the AA parameter: half period case.....	56
Fig. 11.	Individual values of the AA parameter: one period case.....	57
Fig. 12.	Detail of two walking trajectories for different breath alcohol concentration: woman case.....	59

Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images under natural illumination

Fig. 1.	Different lighting conditions in the images from the orchard.....	70
Fig. 2.	Location of Lleida within Spain (courtesy of Google).....	70
Fig. 3.	Illustrative image of the orchard with several areas selected (left) and representation of the RGB color intensity distribution of the pixels selected in the RGB vector color space (right).....	72

Fig. 4.	Two additional views of the PEACH A & B areas (Figure 3) plotted with a regression line and an auxiliary plane plotted to illustrate the relationship of both regression lines.....	72
Fig. 5.	Linear color models proposed to detect red paraguayo peaches.....	73
Fig. 6.	Sample original and segmented images of one (left) and two pieces of fruit (right)	76
Fig. 7.	Peach size estimate analysis: I) original sample image, L) manually labeled image, LS) complete fruit segmentation, IS) automatic fruit segmentation (with occlusion), and LSf) and ISf) results of the diameter estimate.....	77
Fig. 8.	Example peach image results with bright illumination: I) original image, L) manually-labeled fruit, IS) automatic segmentation, and X) pixel differences between LS) and IS) images.....	79
Fig. 9.	Worst bright illumination image case analyzed.....	79
Fig. 10.	Sample image with low illumination	80
Fig. 11.	Worst low illumination case	80
Fig. 12.	Sample image with bright illumination and occlusion of 9.5%	81
Fig. 13.	Sample image with an occlusion of 34.5%	81
Fig. 14.	Sample bright illumination image with occlusion of 77.9%.....	82

Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables

Fig. 1.	The camera module, the board processor and the auxiliary color LCD.....	94
Fig. 2.	The camera module with the FIFO memory at the back.....	95
Fig. 3.	The processor used in the embedded system	96
Fig. 4.	Red peach segmentation LUT obtained from linear color models.....	97
Fig. 5.	Red peach segmentation LUT obtained from a 3-dimensional histogram	98
Fig. 6.	Orchard image (320x240 pixels, RGB565) obtained in normal (a) and zoom mode (b)	99

Índice de tablas

Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR

Table 1.	Gait parameters of three women	53
Table 2.	Gait parameters of three men	54
Table 3.	Gait parameters obtained following a sinusoidal path (half period)	57
Table 4.	Gait parameters obtained following a sinusoidal path (one period).....	57
Table 5.	Gait parameters relative to alcohol intake: woman case	58
Table 6.	Gait parameters relative to alcohol intake: man case	59

Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images under natural illumination

Table 1.	Description of the linear color models used (plotted also in Figure 5).	74
Table 2.	Peach size estimate in the case shown in Figure 7	78
Table 3.	Relative error in the diameter estimate: bright illumination case	79
Table 4.	Relative error in the estimate of fruit diameter: low illumination case.....	80
Table 5.	Relative error in the estimate of fruit diameter: occlusion ratio lower than 33%.	81
Table 6.	Relative error in the estimate of fruit diameter: occlusion ratio from 33% to 66%.....	82
Table 7.	Relative error in the estimate of fruit diameter: occlusion ratio higher than 66%.....	82

Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables

Table 1.	Segmentation algorithm, time required to perform the operations and the real frame rate achieved.	100
Table 2.	Average relative error in the area estimate of red peaches for different illuminations	102
Table 3.	Average relative error in the area estimate of red peaches for different occlusions.....	102
Table 4.	Average noisy pixels in the segmented image for different illuminations.....	102
Table 5.	Average noisy pixels in the segmented image for different occlusions.....	103

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

Este trabajo propone la utilización de distintos sensores para obtener información del entorno y, contribuir así, en el desarrollo de nuevas tecnologías y aplicaciones tecnológicas que contribuyan a mejorar el estado de bienestar de nuestra sociedad.

El desarrollo del trabajo se ha realizado dentro de la línea de investigación en posicionamiento absoluto y relativo del subgrupo de Investigación en Robótica del GREA. En este trabajo se han analizado las posibilidades de detección de marcas de referencia que ofrecen dispositivos láser de medida de distancias y cámaras de adquisición de imágenes. A partir de la información obtenida con dispositivos láser se han propuesto dos aplicaciones: la estimación de la trayectoria de robots móviles y la estimación de los parámetros que definen la forma de andar de una persona. El desarrollo de este trabajo de investigación centrada en el uso de sistemas láser ha generado dos publicaciones en revistas científicas indexadas dentro del primer cuartil:

- Teixidó, M.; Pallejà, T.; Font, D.; Tresanchez, M.; Moreno, J.; Palacín, J. Laser Scanning for Circular Marker Detection and Mobile Robot Tracking. *Sensors* **2012**, *12*, 16482-16497.

- Teixidó, M.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J. Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR. *Sensors* **2011**, *11*, 5071-5086.

A partir de la información obtenida con cámaras se ha propuesto una nueva aplicación que plantea la detección de melocotones rojos como marcas visuales implícitas del entorno y una nueva propuesta de sistema compacto con capacidad de adquisición y procesado de imágenes. El desarrollo de este trabajo de investigación centrada en la adquisición y procesado de imágenes ha generado dos publicaciones en revistas científicas indexadas dentro del primer cuartil:

- Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J. Definition of Linear Color Models in the RGB Vector Color Space to Detect Red Peaches in Orchard Images Taken under Natural Illumination. *Sensors* **2012**, *12*, 7701-7718.
- Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J. Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables. *Sensors* **2012**, *12*, 14129-14143.

Estos cuatro artículos científicos han sido la base utilizada para articular el desarrollo de esta memoria. Los trabajos realizados han permitido también la participación en diversos congresos científicos:

- Teixido, M.; Palleja, T.; Tresanchez, M.; Nogues, M.; Palacin, J. Utilización de un sensor laser 2D para la medición de la forma de caminar, *Actas del Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI'10)*, 610-615, Bilbao, España, Julio 2010.
- Teixido, M.; Font, D.; Tresanchez, M.; Palleja, T.; Nogues, M.; Palacin, J. La telepresencia robotizada como herramienta de integración emocional de equipos de trabajo dispersos, *I Congreso de Inteligencia Emocional en las Organizaciones*, ref. AOE-7, Lleida, España, 24-25 Marzo 2011.
- Teixido, M.; Font, D.; Palleja, T.; Tresanchez, M.; Palacin, J. Ejemplo de caso practico de aprendizaje combinando vision artificial y un brazo robot,

Seminario Anual de Automatica, Electronica Industrial e Instrumentacion (SAAEI 2012), 835-839, Guimaraes, Portugal, 11-13 Julio 2012.

- Tresanchez, M.; Teixido, M.; Font, D.; Palleja, T.; Palacin, J. Embedded Vision System for Real-Time Fruit Detection and Tracking, *First International Conference on Robotics and Associated High-Technologies and Equipment for Agriculture (RHEA 2012)*, 331-336, Pisa, Italy, September 19-21, 2012.

1.2. Sistema de visión

En este apartado se describe el concepto de sistema de visión y el funcionamiento de los sistemas digitales de adquisición de imagen. Haciendo hincapié en la analogía entre el ojo humano y la cámara fotográfica. La figura 1.1 muestra una cámara fotográfica y los elementos más relevantes que incorpora el sistema de visión presentado.

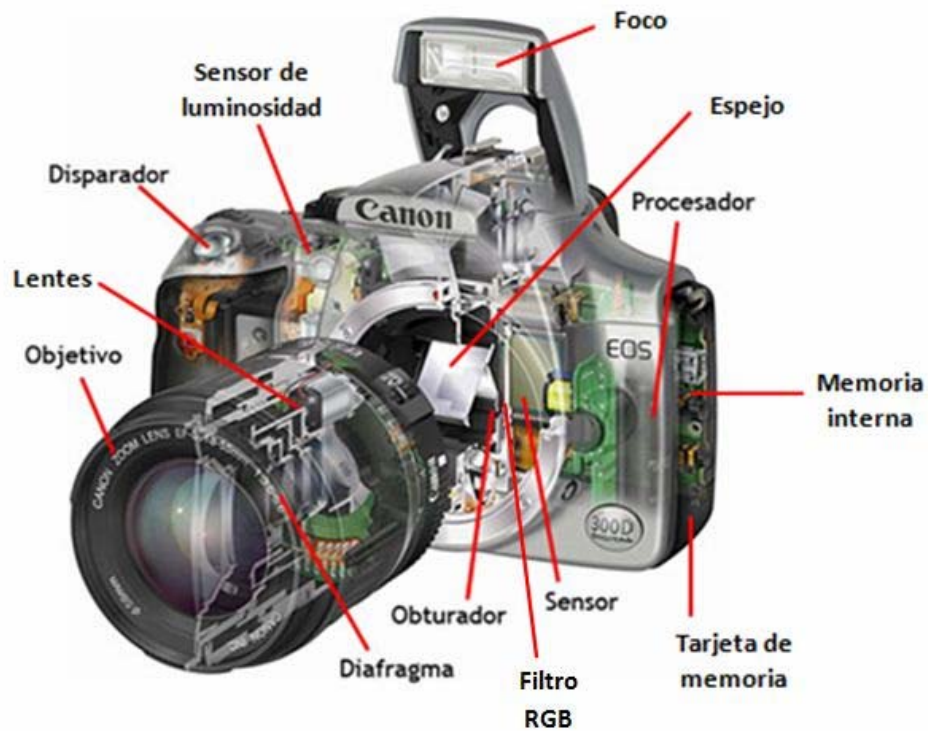


Fig. 1.1. Elementos de una cámara fotográfica digital [1].

1.2.1. Sensores de imagen

Un sistema de visión está formado por un conjunto de elementos que permiten obtener imágenes del entorno, procesarlas y tomar ciertas decisiones basadas en la evaluación de la imagen adquirida.

Actualmente, existen dos tipos de sensores ópticos usados en las cámaras digitales: los CCD (Fig. 1.2, izquierda) y los CMOS (Fig. 1.2, derecha). Las diferencias más significativas entre ambos son: la transmisión de datos, la dificultad de fabricación, la realización de cálculos matemáticos y de ajuste, y la autonomía [2, 3, 4].



Fig. 1.2. Sensor CCD (izquierda) y sensor CMOS (derecha) [4].

El sensor CCD transmite la información a través de las celdas vecinas hacia los bordes, donde la información es recolectada. El sensor CMOS tiene la capacidad de transmisión en cada una de las celdas. Esto evita el efecto de “blooming” o de contaminación entre píxeles vecinos en situaciones donde hay sobre exposición y, además, permite mejores opciones de interpolación de la imagen.

La fabricación del sensor CCD se realiza en plantas especializadas a partir de materias primas no comunes, por el contrario el sensor CMOS se fabrica en líneas de producción normales de semiconductores a partir de materias primas muy baratas y de uso generalizado. De este modo, dadas las características de fabricación, los sensores CMOS son también más fáciles de interconectar a nuevos sistemas.

Los sensores CMOS realizan las operaciones matemáticas de conversión análogo-digital y de ajuste en el mismo chip, a diferencia de los sensores CCD que requieren de un circuito adicional para el cálculo, permitiendo tener un coste más reducido y un diseño más compacto.

Los sensores CMOS, consumen entre 30 y 50 mW, a diferencia de los sensores CCD que consumen entre 2 y 5 W. Con lo que, los sensores CMOS necesitan de baterías más costosas y pesadas, generando problemas de autonomía.

1.2.2. El ojo humano y la cámara fotográfica

El ojo humano funciona de forma similar al proceso de captura de datos en una cámara fotográfica (Fig. 1.3). En la cámara el sensor es el encargado de recibir la imagen tras pasar por el diafragma; de manera homóloga en el ojo esa función la realiza la retina, donde las células receptoras son estimuladas para después conducir los estímulos que generan hacia el cerebro. La luz que entra en la cámara se regula mediante un diafragma mecánico, en el ojo humano lo realiza el iris, contrayendo y relajando los músculos. En los dos casos, la imagen que se forma tanto en la retina como en la cámara se proyecta invertida. En el caso del ojo humano, la imagen es interpretada correctamente después de enviarse por el nervio óptico hasta el lóbulo de la corteza cerebral correspondiente.

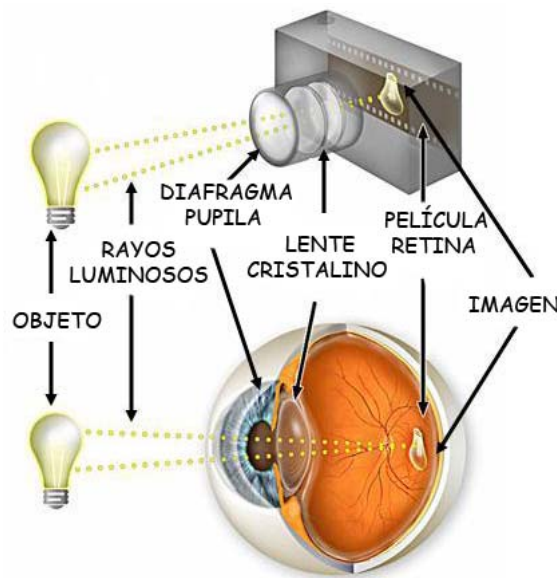


Fig. 1.3. El ojo humano y la cámara de fotográfica [5].

La región del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir se entiende como espectro visible (Fig. 1.4). El ojo humano puede captar longitudes de onda entre 300 y 1100 nm [6]. Las imágenes en niveles de gris se obtienen cuando cada celda fotosensible recibe todas longitudes de onda de luz visible. Por el contrario, si se especializa en un rango como los tres colores primarios (RGB) se obtienen imágenes en color. Para conseguir esta división del espectro de longitudes de onda se utilizan básicamente dos técnicas: los sistemas con prisma y tres sensores o los sistemas con filtro Bayer.

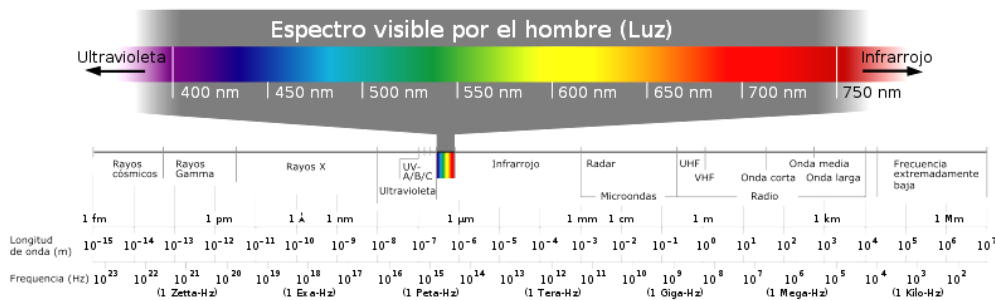


Fig. 1.4. Espectro visible por el hombre [7].

1.2.2.1. El sistema con prisma y tres sensores

En el sistema con prisma y tres sensores (Fig. 1.5), la luz pasa a través de la óptica y el filtro IR bloquea las longitudes de onda IR. Entonces, la luz filtrada se divide en tres direcciones al llegar al prisma. En cada una de los tres extremos del prisma se encuentra un filtro de color (R, G y B). Cada sensor recibe la misma imagen, con la diferencia que dependiendo del filtro, recibirá solamente uno de los tres colores primarios. Posteriormente, la cámara, de forma interna y totalmente transparente para el usuario, combina los colores y genera una señal RGB.

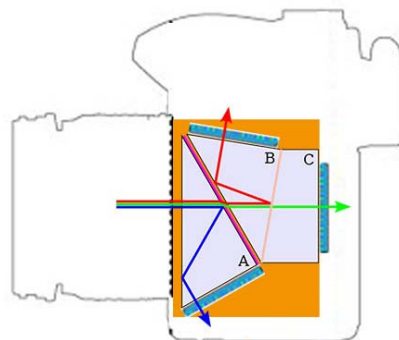


Fig. 1.5: El sistema con prisma y tres sensores [8].

1.2.2.2. El filtro Bayer y su funcionamiento

El filtro Bayer (Fig. 1.6) es una malla cuadrículada de filtros rojos, verdes y azules situada directamente sobre el sensor óptico de la cámara para dejar pasar a cada fotodiodo del sensor uno de los colores primarios: R,G,B (Fig. 1.7). Los píxeles no están repartidos de manera equitativa puesto que el ojo humano es más sensible al color verde. En consecuencia, el porcentaje de filtros verdes es superior al rojo y al azul (R 25%, G 50%, B 25%). A través de la medición de distintos niveles de brillo de los tres colores primarios, cada grupo de cuatro píxeles aportará los datos de color de 1 píxel de la imagen, obteniendo así una imagen de dimensiones en píxeles de M filas x N columnas /4. La técnica utilizada para no perder resolución de la imagen se llama interpolación, donde se analizan los píxeles de alrededor para obtener el supuesto color del píxel central que falta.

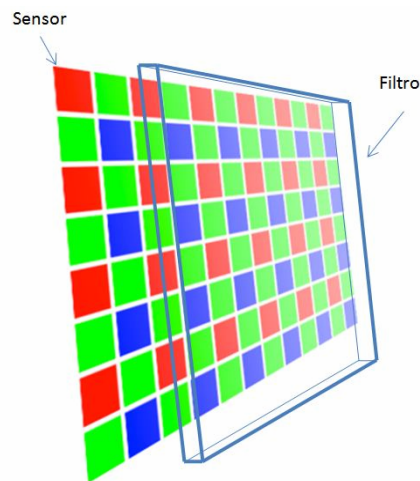


Fig. 1.6. Filtro Bayer [9].

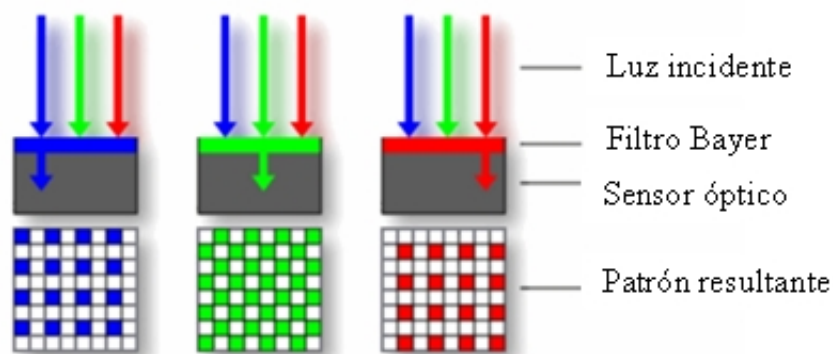


Fig. 1.7. Bloqueo selectivo de colores [10].

La figura 1.8 muestra los elementos que intervienen en el proceso de captura de la imagen en el caso del filtro Bayer. La luz incide sobre la lente y el filtro IR se encarga de bloquear las longitudes de onda IR. La luz filtrada llega al sensor óptico pasando por el filtro Bayer donde en cada uno de los fotodiodos se realiza un bloqueo selectivo de las longitudes de onda a pasar. Tras el sensor óptico disponemos de un mosaico de píxeles rojos, verdes y azules de diferentes intensidades (RAW). La energía luminosa filtrada se convierte en cargas eléctricas, que se amplifican y envían a un conversor A/D, que las transforma en información binaria de color, para posteriormente, ser mostrada en pantalla.

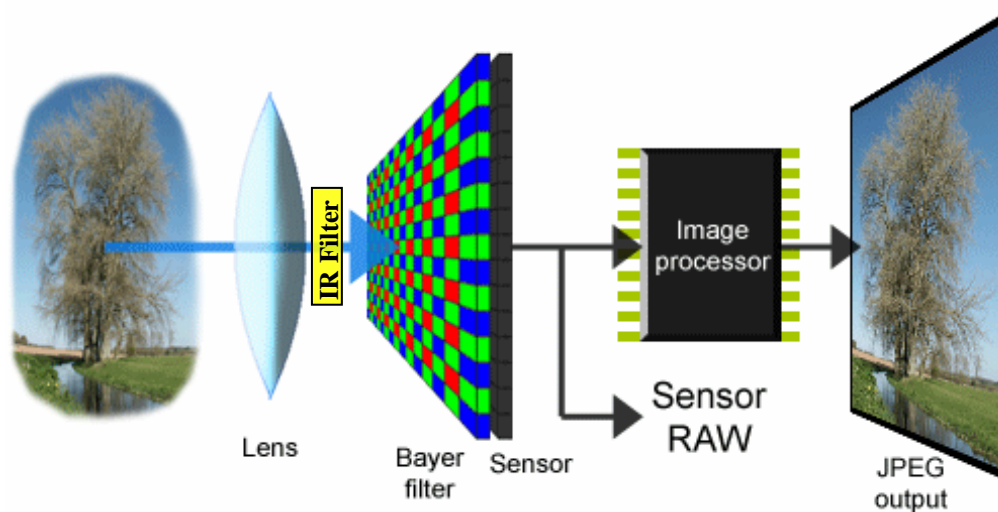


Fig. 1.8. Elementos del proceso de captura de la imagen [11].

1.2.3. Imagen digital RGB

La imagen digital RGB está representada en una matriz numérica de M filas, N columnas y 3 capas de color que contienen información de los tres colores primarios: rojo, verde y azul. La intensidad de la luz determina el color percibido. Cada intersección entre filas y columnas de la imagen se denomina píxel y el color de éste se define combinando los valores de las tres capas en dicha intersección. Si el valor en los tres canales de color es cero, se percibe el color negro. Por el contrario, si su valor es igual a 1, se obtiene el color blanco. La diferencia entre una mayor o menor intensidad radica en el que el color es más o menos saturado.

La figura 1.9 (superior izquierda) muestra un ejemplo de una imagen RGB y su descomposición en los canales RGB. Para cada valor de la paleta de colores RGB se muestra la composición de R, G y B donde a mayor saturación de color mayor intensidad es requerida; el color negro (valor igual a 0 en los tres canales) indica la ausencia de color R, G y B.

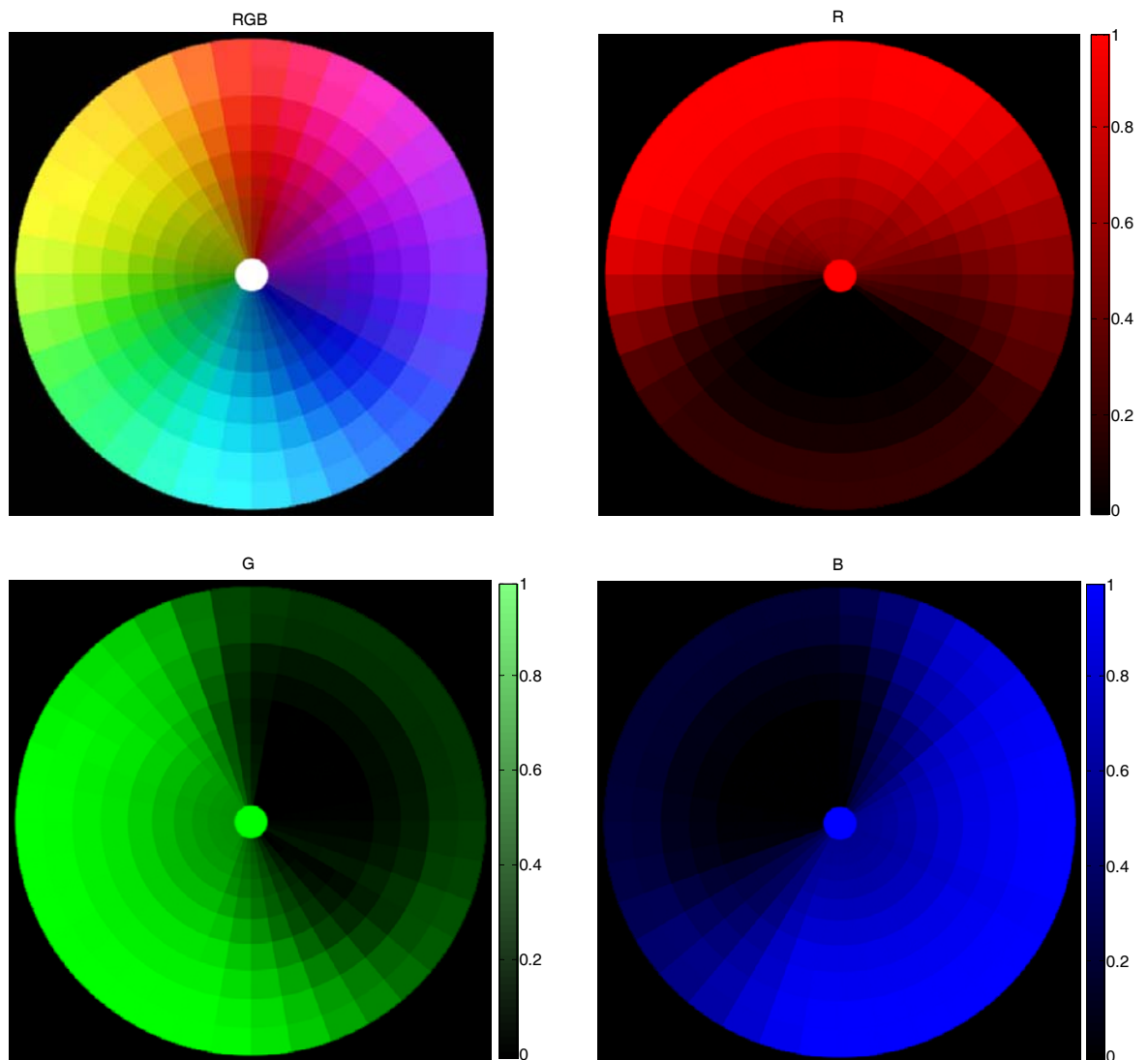


Fig. 1.9. Imagen digital RGB.

1.3. Sistema digital de medida de distancias

En este apartado se define un sistema digital de medida de distancias y se expone cuál es su funcionamiento.

Se entiende como láser (acrónimo del inglés, “LASER - light amplification by stimulated emission of radiation”) al dispositivo que utiliza un efecto de la mecánica cuántica (emisión inducida o estimulada) para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza controlados. Existen diferentes sistemas de medición y cada uno utiliza una tecnología diferente. Se diferencia entre los sistemas: capacitivos [12, 13], inductivos [14], ultrasónicos [15, 16], de triangulación [17] y los sistemas LIDAR [18, 19].

Los sensores capacitivos están diseñados para detectar materiales aislantes como: plástico, papel, madera, metales, etc. Dichos sensores funcionan de forma inversa a los inductivos, es decir que a medida que el objetivo se va a acercar al sensor las oscilaciones del mismo aumentan hasta que activa el circuito que emite la alarma. El cálculo de la distancia al objeto muestra dificultades puesto que depende de la constante dieléctrica del material al que se desea estimar la distancia.

Los sensores ultrasónicos (Fig. 1.10, derecha) se basan en la emisión de un pulso de ultrasonido por parte del emisor que rebota sobre el objeto al que se quiere estimar la distancia y la reflexión es detectada por el receptor. Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión del sonido y la percepción del eco se puede calcular la distancia a la que se encuentra el obstáculo que ha producido la reflexión de la onda sonora, mediante la siguiente fórmula (Fig. 1.10, derecha):

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (1)$$

donde v es la velocidad del sonido en el aire y t es el tiempo transcurrido entre la emisión y recepción del pulso.

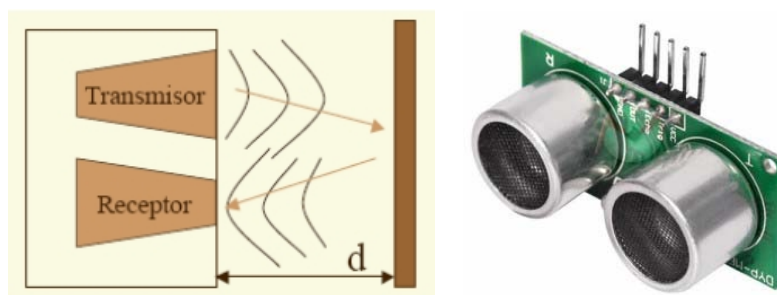


Fig. 1.10. Funcionamiento básico [20] de los sensores ultrasónicos [21].

El principal problema de este sensor radica en el hecho de que la onda que emita para el cálculo de la distancia se propaga de forma cónica, con lo que al recibir el eco se sabe la distancia al objeto pero no la localización angular (α) del objeto (Fig 1.11).

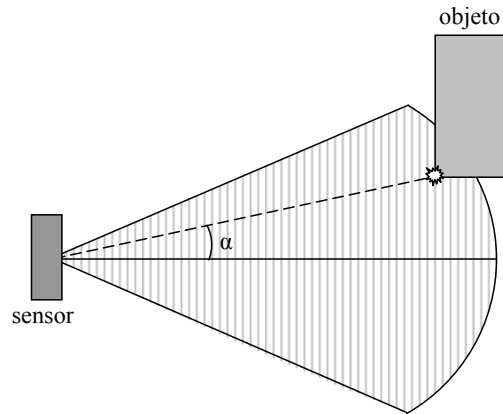


Fig. 1.11. Localización de un objeto con un sensor ultrasónico [22].

Los sensores de triangulación (Fig. 1.12) proyectan un haz de luz sobre la superficie a medir, que será reflejado en el fotodetector del aparato con un ángulo de inclinación, que varía según la distancia medida.

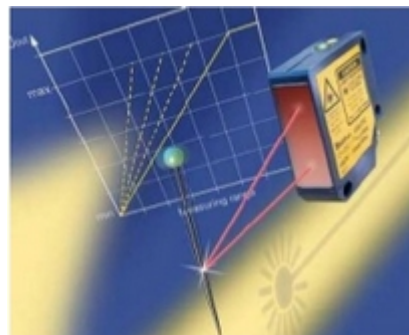


Fig. 1.12. Sensor láser basado en triangulación [23].

Y por último, los sensores LIDAR se basan en un sistema de medida de distancias láser. A continuación se muestra la descripción y funcionamiento de dicho sensor.

1.3.1. Funcionamiento de un sistema LIDAR

Los sensores LIDAR se pueden basar en dos sistemas para estimar la distancia entre el láser y el objeto. El primero, llamado tiempo de vuelo (o TOF), es la medición del tiempo transcurrido entre la transmisión de un haz de láser

pulsado y la recepción de su eco de un objeto reflectante. El segundo, se basa en la comparación de la diferencia de fase entre la onda emitida y la onda recibida. La ventaja que proyecta el uso de la luz láser con respecto a los sensores ultrasónicos es que el haz de medición es más delgado puesto que no tiene forma cónica y puede ser combinado con un mecanismo de exploración para obtener un patrón de exploración bidimensional [24] para obtener información de una gran área. La figura 1.13 muestra el funcionamiento del sistema basado en el análisis del tiempo de vuelo asumiendo una velocidad constante de la luz en el aire de 300000 Km/s. Se muestra el envío de un pulso láser hacia el objeto a detectar. Al rebotar una parte del haz de luz emitido es reflejado hacia el sistema, donde un sensor CCD o CMOS lo detecta y detiene el cronómetro que determina el tiempo entre la salida y llegada de dicho pulso.

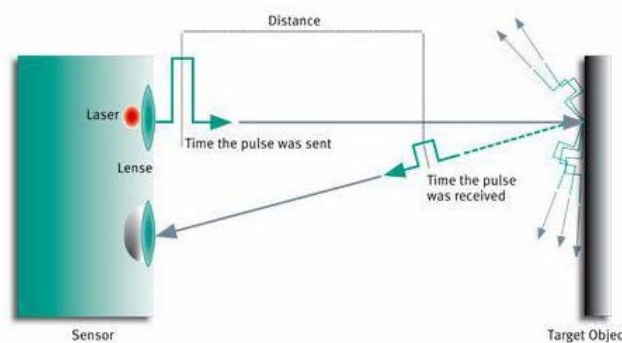


Fig. 1.13. Sistema basado en el análisis del Tiempo de Vuelo [25].

La figura 1.14 muestra el funcionamiento del sistema basado en la diferencia de fase entre la onda emitida (línea roja) y la onda recibida (línea azul). En este caso no se envía una onda en forma de pulso, es una señal continua y de potencia modulada. El principal problema de este sistema de medición es la pérdida de recepción, lo que conlleva una pérdida de ciclos (cycle slip).

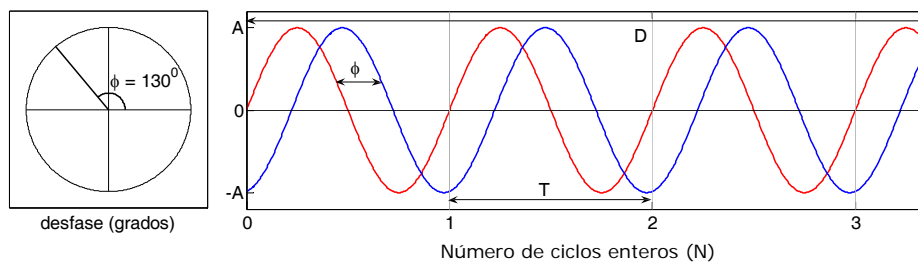


Fig. 1.14. Onda emitida y desfase recibido con el sistema de diferencia de fases [22].

1.3.2. Componentes internos de un sistema LIDAR

Interiormente, un sistema LIDAR unidimensional, está basado principalmente por un espejo giratorio y un codificador digital. La inclinación del espejo giratorio es de 45° , para que todos los haces de luz que emite formen parte del mismo plano. Un motor hace girar el espejo a velocidad constante y, posteriormente, el codificador digital es el encargado de calcular su orientación continuamente. Para cada orientación, se devuelve un barrido completo con el valor de los ángulos y las respectivas distancias al objeto del entorno detectado.

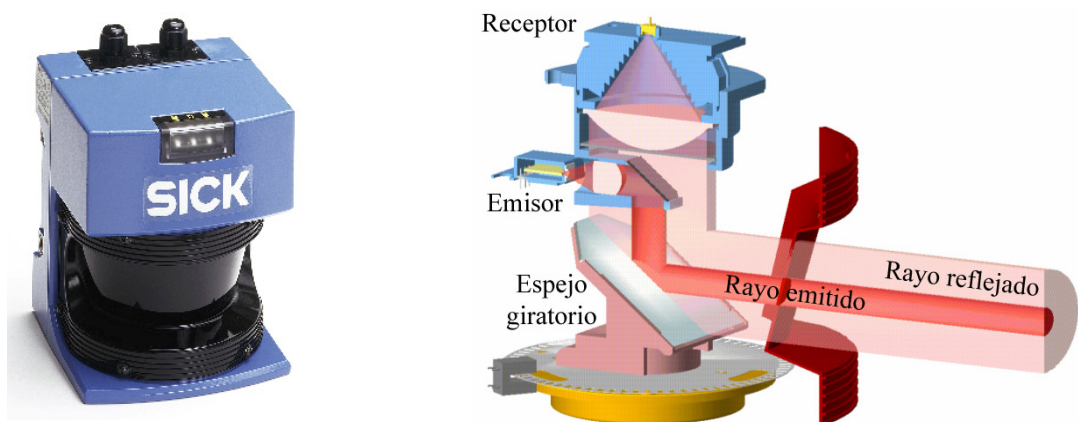


Fig. 1.15. Láser LMS [26] y sus componentes principales interiores [22].

En el mercado existen numerosos sistemas LIDAR 2D y la elección del láser idóneo debe basarse en función de: el rango de distancias disponibles que sea capaz de capturar, la precisión de la medida que se desea, el número de scans/s, la resolución angular y el intervalo de ángulo muerto donde el láser no es capaz de capturar ningún dato.

1.3.3. Captación de datos 3D con un sistema LIDAR

La figura 1.16 muestra un ejemplo de aplicación donde el sistema LIDAR está unido a un tractor (Fig. 1.16, izquierda) y atraviesa un campo de cultivo en línea recta y paralela a una hilera de árboles. El LIDAR proporciona barridos verticales (Fig. 1.16, derecha) obteniendo los valores correspondientes a las distancias capturadas en cada momento mientras el tractor avanza. Si los datos son almacenados, se puede reconstruir en 3D los datos obtenidos para un análisis posterior de parámetros.

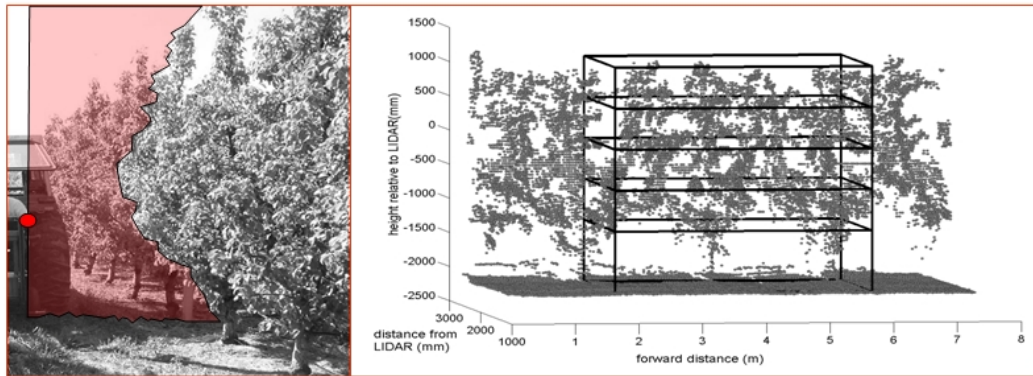


Fig. 1.16. Reconstrucción 3D de datos capturados con un LIDAR 2D [27].

1.4. Referencias

- [1] Revista Geek Life. Cámaras digitales: Como funciona una cámara fotográfica. Disponible online: <http://geeklife.com.mx/> (16 Novembre 2012).
- [2] Magnan, P. Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 2003, 504(1-3), 199-212.
- [3] Gottardi, M.; Yang, W., A CCD/CMOS image motion sensor, Solid-State Circuits Conference, 1993. Digest of Technical Papers. 40th ISSCC., 1993 IEEE International, 24-26 Feb 1993; 289, pp.194-195.
- [4] D. Litwiller, CCD vs. CMOS: Facts and Fiction: Laurin Publishing, 2001.
- [5] Bitácora de Yocoyani. Memorias de un curso de Fotografía Digital Básico. Disponible online: <http://yocoyani.wordpress.com/2012/09/06/partes-del-ojo/> (16 Novembre 2012).
- [6] Vietze, O. Active pixel image sensors with application specific performance based on standard silicon CMOS processes. Ph.D. Dissertation. ETH-Zurich, 1997.
- [7] Enciclopedia Wikipedia. Espectro electromagnético. Disponible online: es.wikipedia.org (16 Novembre 2012).
- [8] Rodriguez, S. Qué hay dentro de una cámara digital: el Sensor de Imagen. Disponible online: <http://www.madboxpc.com/> (16 Novembre 2012).
- [9] Sólo Fotografía. Porqué es necesario dar un punto de enfoque a las fotografías. Disponible online: <http://www.solofotography.blogspot.com> (16 Novembre 2012).
- [10] Caborian. Más allá de la matriz Bayer. Disponible online: <http://www.caborian.com> (16 Novembre 2012).
- [11] Smith, C. IPC Media; Trusted Reviews; What is Sensor RAW? Disponible online: <http://www.trustedreviews.com> (16 Novembre 2012).
- [12] Vietze, O. Active pixel image sensors with application specific performance based on standard silicon CMOS processes. Ph.D. Dissertation. ETH-Zurich, 1997. Steele, J.J.; Fitzpatrick, G.A.; Brett, M.J. Capacitive Humidity Sensors With High Sensitivity and Subsecond Response Times, IEEE Sensors Journal 2007, 7(6), 955-956.
- [13] Kummer, A.M.; Hierlemann, A. Configurable electrodes for capacitive-type sensors and chemical sensors, IEEE Sensors Journal 2006, 6(1), 3- 10.
- [14] Rahal, M.; Demosthenous, A.; Dai Jiang; Pal, D. A signal conditioner for high-frequency inductive position sensors, ICM 2008. International Conference on Microelectronics 2008, pp.118-122, 14-17 Dec. 2008.

- [15] Hauptmann, P.; Lucklum, R.; Püttmer, a.; Henning, B. Ultrasonic sensors for process monitoring and chemical analysis: state-of-the-art and trends, *Sensors and Actuators A: Physical* 1998, 67(1–3), 32-48.
- [16] Kleinschmidt, P.; Hanrieder, W. The future of sensors, materials science or software engineering. *Sensor. Actuat A-Phys.*1992, 33, 5–17.
- [17] Luo, F.; Yin, C.; Liu, C.; Xiao, K. An intelligent vehicle based on “follow-up” infrared sensors, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2009*, 436-440.
- [18] Lescure, M.; Ganibal, C.; Prajoux, R.; Briot, M. Compact robotics perception system based on a laser range finder coupled with silicon micromirrors, *Optical Engineering* 2003, 42(9), 2653-2658.
- [19] Schmackers, J.; Velten, J.; Glasmachers, A. Laser phase shift distance meter for vision based driver assistance systems, *IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)*, pp.220-224, 1-2 July 2010.
- [20] Peraza, R. Sensor ultrasónico: Diseño de un sistema de medición basado en un Sensor Ultrasónico. Disponible online: <http://www.sensorultrasonico.blogspot.com> (16 Novembre 2012).
- [21] MiniRobot. Sensores: Sensor ultrasónico. Disponible online: <http://www.minirobot.com.mx> (16 Novembre 2012).
- [22] Palleja, T. Propuesta de nuevas aplicaciones instrumentales basadas en el análisis de la información proporcionada por cámaras y sistemas láser. Tesis para optar al grado de Doctor por la Universitat de Lleida, 2011.
- [23] RoboTécnicos. Robótica Aplicada. Sensores de distancia. Disponible online: <http://www.slideshare.net/diego5wh/sensores-de-distancia> (16 Novembre 2012).
- [24] Wehr, A.; Lohr, U. Airbornes laser scanning: an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54(2), 68-82.
- [25] Pepperl+Fuchs GmbH. Detección mediante tecnología de medición de distancias; Functional Principles. Pulse Ranging Technology (PRT). Disponible online: <http://www.pepperl-fuchs.es> (16 Novembre 2012).
- [26] Drexel University. Interfacing with the Sick LMS-200. Disponible online: <http://www.pages.drexel.edu> (16 Novembre 2012).
- [27] Palleja, T.; Tresanchez, M.; Teixido, M.; Sanz, R.; Rosell, J.R. and Palacin, J. Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(11), 1420-1427.

Capítulo 2

Objetivos

2.1. Objetivo de la tesis

El objetivo principal de esta tesis consiste en el desarrollo de nuevos sistemas de análisis del entorno a partir de la información obtenida mediante técnicas de distancia láser y de imagen basadas en intensidades de color.

Se pretende que los sistemas desarrollados puedan ser utilizados posteriormente tanto en robots móviles como en diversos sistemas automatizados de recolección de fruta, formando parte de aplicaciones más complejas que tengan interés industrial y puedan contribuir, finalmente, a la mejora del estado del bienestar de nuestra sociedad.

Los objetivos específicos de los trabajos realizados a partir del análisis de la información proporcionada por sistemas láser de medida de distancias han sido:

- Crear un sistema de análisis que permita obtener una estimación de la localización de un robot móvil con marcas circulares y un sistema láser bidimensional.
- Crear un sistema de análisis que permita estimar los valores de los parámetros que definen la forma de caminar en trayectorias oscilantes de una persona y la relación existente entre algunas enfermedades y la ingesta moderada de alcohol con esta a partir de los datos obtenidos con un sensor láser bidimensional.

Los objetivos específicos de los trabajos realizados a partir del análisis de la información proporcionada por técnicas de imagen basadas en intensidades de colores han sido:

- Crear un sistema de análisis que permita utilizar la información de color para detectar marcas u objetos. Como ejemplo de aplicación se propone realizar la detección de fruta dulce durante su etapa de crecimiento en el árbol.
- Crear un sistema compacto con capacidad de adquisición y procesado de imagen para la detección de marcas u objetos mediante la información de color. Como ejemplo de aplicación se propone la detección y localización de fruta dulce durante su etapa de crecimiento en el árbol. La propuesta es que este sistema forme parte de un futuro diseño de pinza robotizada diseñada para la recolección automática de fruta.

Capítulo 3

Detección de marcas circulares mediante un sensor de medida láser 2D: aplicación para la localización y seguimiento de un robot móvil

3.1. Introducción

En este capítulo se propone el uso de un láser bidimensional fijo para estimar la localización de un robot móvil con marcadores cilíndricos fijados a este. El principal problema que presenta esta propuesta es la discriminación de los datos que pertenezcan al marcador circular entre los proporcionados por el sensor láser.

La versatilidad y precisión del estado de arte de los láseres bidimensionales ha permitido el desarrollo de una gran variedad de aplicaciones de medición. Un ejemplo de ello, se muestra en [1] donde se utilizó un láser 2D para registrar una persona andando y medir los parámetros de la marcha durante su desplazamiento en una trayectoria recta y en [2], durante un desplazamiento de trayectoria oscilante para aplicaciones como: la detección precoz de diferentes enfermedades que producen alteraciones en el modo de andar (osteoporosis [3], diabetes [4], Parkinson [5, 6], etc). Un enfoque similar se utiliza en la agricultura. Por ejemplo, en [7, 8] se utiliza un sensor láser para localizar árboles, en [9] para

la estimación de su altura, en [10] para la estimación del diámetro del tronco de los árboles, y en [11] para el cálculo del follaje.

Además, el uso de láseres puede simplificar la localización y seguimiento de robots móviles. En [12], se segmentaron y modelaron los datos de exploración láser para extraer las características invariables del medio ambiente. En [13, 14], se combina la odometría interna del robot con los datos capturados por el sensor láser. En [15], se combinó la información obtenida de un láser con la información extraída de una cámara monocular para eliminar la información correspondiente a objetos en movimiento en el entorno. Existen varias aplicaciones de robots exploratorios donde se precisa del conocimiento de la ubicación de dicho robot móvil, tales como los llamados robots olfativos utilizados para la estimación de concentración de olores [16, 17, 18].

3.2. Aportaciones al estado del arte

En este capítulo se propone la utilización de un láser fijo y externo para localizar y rastrear el desplazamiento de un marcador circular en un plano de dos dimensiones, y la determinación de la distribución de los errores de localización obtenidos. Esta propuesta se centró en la colocación de un marcador cilíndrico en la estructura de un robot móvil para realizar un seguimiento de su trayectoria externamente, aunque también puede ser aplicado a un seguimiento de cualquier objeto en movimiento que requiera de la validación externa de su posición o trayectoria. Esta aplicación puede ser mejorada, en un futuro, con la combinación de los datos de exploración obtenidos con diferentes láseres fijos colocados estratégicamente en un entorno determinado. Una ventaja adicional del uso de marcadores circulares es que la descripción de su perímetro circular es robusta a cambios de altura originados por las irregularidades del terreno, permitiendo así, el desarrollo de mediciones de seguimiento de trayectoria en aplicaciones al aire libre. La sección 3.4. incluye el artículo científico en el que se han realizado estas nuevas aportaciones.

3.3. Referencias

- [1] Palleja, T.; Teixidó, M.; Tresanchez, M.; Palacin, J. Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor. *Sensors* 2009, 9, 9133-9146.
- [2] Teixidó, M.; Palleja, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacin, J. Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR. *Sensors* 2011, 11, 5071-5086.
- [3] Peterson, M.G.E.; Kovar-Toledano, P.A.; Otis, J.C.; Allegrante, J.P.; Mackenzie, C.R.; Gutin, B.; Kroll, M.A. Effect of a Walking Program on Gait Characteristics In Patients With Osteoarthritis. *Arthritis Care and Research* 1993, 6(1), 11-16.
- [4] Petrofsky, J.; Lee, S.; Bweir, S. Gait characteristics in people with type 2 diabetes mellitus. *Eur J Appl Physiol* 2005, 93, 640-647.
- [5] Morris, M.E. Movement disorders in people with Parkinson disease: a model for physical therapy. *Phys. Ther.* 2000, 80, 578-597.
- [6] Lim, I.; Wegen, E.; Goede, C.; Deutekom, M.; Nieuwboer, A.; Willems, A.; Jones, D.; Rochester, L.; Kwakkel, G. Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: a systematic review. *Clin. Rehabil.* 2005, 19, 695-713.
- [7] Miettinen, M.; Ohman, M.; Visala, A.; Forsman, P. Simultaneous Localization and Mapping for Forest Harvesters. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 10-14, 2007; pp. 517-522.
- [8] Zheng, Y.; Liu, J.; Wang, D.; Yang, R. Laser Scanning Measurements on Trees for Logging Harvesting Operations. *Sensors* 2012, 12, 9273-9285.
- [9] Lin, Y.; Hyyppä, J.; Kukko, A.; Jaakkola, A.; Kaartinen, H. Tree Height Growth Measurement with Single-Scan Airborne, Static Terrestrial and Mobile Laser Scanning. *Sensors* 2012, 12, 12798-12813.
- [10] Jutila, J.; Kannas, K.; Visala, A. Tree Measurement in Forest by 2D Laser Scanning. *International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA 2007)*, June 20-23 June, 2007; pp. 491-496.
- [11] Palacín, J.; Palleja, T.; Tresanchez, M.; Sanz, R.; Llorens, J.; Ribes-Dasi, M.; Masip, J.; Arnó, J.; Escola, A.; Rosell, J.R. Real-Time Tree-Foliage Surface Estimation Using a Ground Laser Scanner. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, August, 2007; 56(4), pp. 1377-1383.
- [12] Vázquez-Martín, R.; Núñez, P.; Bandera, A.; Sandoval, F. Curvature-Based Environment Description for Robot Navigation Using Laser Range Sensors. *Sensors* 2009, 9, 5894-5918.
- [13] Pizarro, D.; Mazo, M.; Santiso, E.; Marron, M.; Jimenez, D.; Cobrecas, S.; Losada, C. Localization of mobile robots using odometry and an external vision sensor. *Sensors* 2010, 10, 3655-3680.
- [14] Espinosa, F.; Santos, C.; Marrón-Romera, M.; Pizarro, D.; Valdés, F.; Dongil, J. Odometry and Laser Scanner Fusion Based on a Discrete Extended Kalman Filter for Robotic Platooning Guidance. *Sensors* 2011, 11, 8339-8357.
- [15] Zhang, X.; Rad, A.B.; Wong, Y.-K. Sensor Fusion of Monocular Cameras and Laser Rangefinders for Line-Based Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) Tasks in Autonomous Mobile Robots. *Sensors* 2012, 12, 429-452.
- [16] Lilienthal, A. and Duckett, T. Building gas concentration gridmaps with a mobile robot. *Robotics and Autonomous Systems* 2004, 48, 3-16.
- [17] Song, K.; Liu, Q.; Wang, Q. Olfaction and Hearing Based Mobile Robot Navigation for Odor/Sound Source Search. *Sensors* 2011, 11, 2129-2154.
- [18] Meng, Q.H.; Yang, W.X.; Wang, Y.; Zeng, M. Collective odor source estimation and search in time-variant airflow environments using mobile robots. *Sensors* 2011, 11, 10415-10443.

3.4. Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking

Sensors **2012**, 12(12), 16482-16497; doi:10.3390/s121216482

OPEN ACCESS

sensors

ISSN 1424-8220

www.mdpi.com/journal/sensors

Two-Dimensional Radial Laser Scanning for Circular Marker Detection and External Mobile Robot Tracking

Mercè Teixidó, Tomàs Pallejà, Marcel Tresanchez, Davinia Font,
Javier Moreno, and Jordi Palacín *

Department of Computer Science and Industrial Engineering, University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain; E-Mails: mteixido@diei.udl.cat (M.T.); tpalleja@diei.udl.cat (T.P.); mtresanchez@diei.udl.cat (M.T.); dfont@diei.udl.cat (D.F.); javier.moreno.blanc@gmail.com (J.M.)

** Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: palacin@diei.udl.cat;
Tel.: +34-973-702724; Fax: +34-973-702702.*

Received: 19 October 2012/ in revised form: 22 November 2012/ Accepted: 23 November 2012/ Published: 28 November 2012

Abstract –This paper presents the use of an external fixed two-dimensional laser scanner to detect cylindrical targets attached to moving devices, such as a mobile robot. This proposal is based on the detection of circular markers in the raw data provided by the laser scanner by applying an algorithm for outlier avoidance and a least-squares circular fitting. Some experiments have been developed to empirically validate the proposal with different cylindrical targets in order to estimate the location and tracking errors achieved, which are generally less than 20 mm in the area covered by the laser sensor. As a result of the validation experiments, several error maps have been obtained in order to give an estimate of the uncertainty of any location computed. This proposal has been validated with a medium-sized mobile robot with an attached cylindrical target (diameter 200 mm). The trajectory of the mobile robot was estimated with an average location error of less than 15 mm, and the real location error in each individual circular fitting was similar to the error estimated with the obtained error maps. The radial area covered in this validation experiment was up to 10 m, a value that depends on the radius of the cylindrical target and the radial density of the distance range points provided by the laser scanner but this area can be increased by combining the information of additional external laser scanners.

Keywords – laser scanning; laser; circle fitting; mobile robots localization

Las páginas de la 22 a la 38 contienen el artículo:

Teixidó, M.; Pallejà, T.; Font, D.; Tresanchez, M.; Moreno, J.; Palacín, J. Laser Scanning for Circular Marker Detection and Mobile Robot Tracking. *Sensors* **2012**, *12*, 16482-16497.

Capítulo 4

Detección de marcas circulares mediante un sensor de medida láser 2D: aplicación para la medición de la forma de caminar

4.1. Introducción

En este capítulo se propone un sistema de análisis que permita estimar los valores de los parámetros que definen la forma de caminar en trayectorias oscilantes de una persona y la relación existente entre algunas enfermedades y la ingesta moderada de alcohol con esta a partir de los datos obtenidos con un sensor láser bidimensional (Fig. 4.1).

Existen distintas técnicas que permiten estudiar la forma de caminar de una persona. Las técnicas más utilizadas se basan en la captura de una secuencia de imágenes de una persona caminando para extraer la información de interés de cada fotograma mediante algoritmos de visión artificial. Las dos técnicas más usadas son: la detección de marcas de referencia [1] y la sustracción del fondo [2], dependiendo de si se dispone de un fondo estático o dinámico. La primera se basa en la detección de marcas de referencia colocadas en el cuerpo del sujeto para la posterior estimación de posición de las marcas en cada fotograma. La segunda se basa en la aplicación de técnicas de sustracción del fondo para descartar la información no relativa al posicionamiento del objeto. Existen otras técnicas basadas en: la utilización de superficies sensibles a la presión [3], colocación de

acelerómetros y giroscopios sobre el cuerpo [4] o sensores piezoeléctricos al calzado para la obtención de perfiles de presión [5].

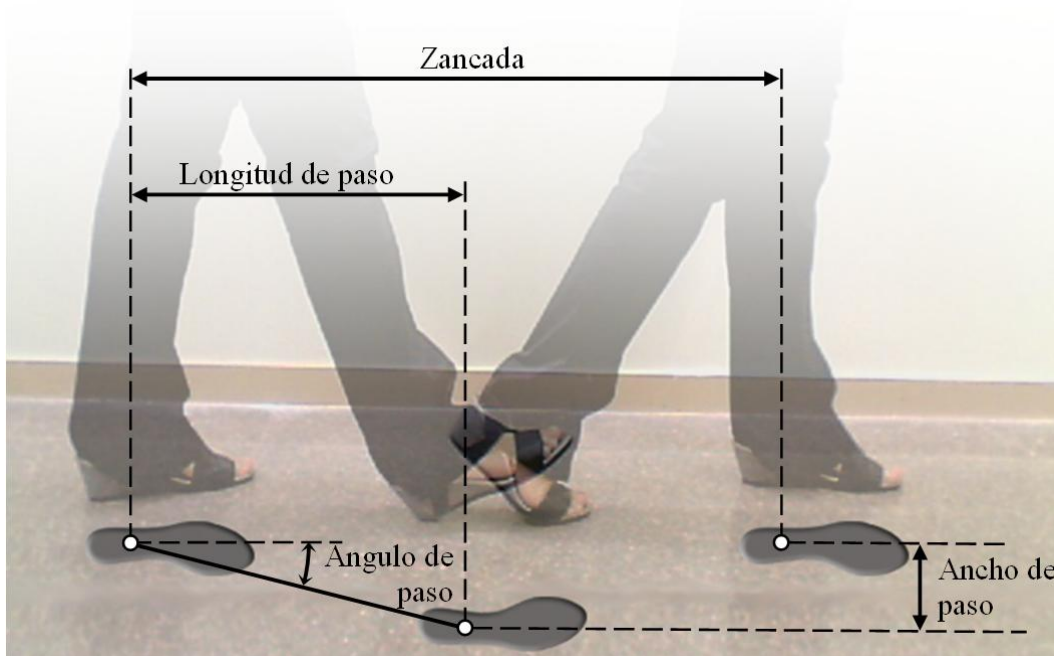


Fig. 4.1: Parámetros que definen la forma de andar de las personas.

El estudio de los parámetros que definen o caracterizan la forma de andar de cada individuo se ha convertido en un tema de investigación de alto interés puesto que nos aporta información del funcionamiento del cuerpo humano [6-8]. Dicha medición se puede utilizar para aplicaciones específicas tales como la identificación de personas [1,9], la clasificación de género [10], la reconstrucción de la escena del crimen [11], etc. La detección de anomalías en los diferentes parámetros de la forma de caminar se puede utilizar como un indicador temprano de algunas enfermedades relacionadas con la diabetes [12], la osteoartritis [13], Parkinson [14-17], o como una herramienta para evaluar y prevenir las caídas en personas de edad avanzada [18,19].

En la literatura científica se presentan algunos estudios para la detección de anomalías en la marcha. Entre ellos destacar el estudio realizado en [20], donde se registra la forma de caminar de hombres, y posteriormente, se analizan las imágenes con el fin de proporcionar un patrón de la pelvis y la rotación torácica, y así detectar anomalías de la marcha. La conclusión alcanzada es que la desviación

de los parámetros seleccionados en una marcha normal es demasiado alta para la detección de anomalías.

La ingestión de alcohol es otra fuente de anomalías en el modo de andar. En [21], se observaron los parámetros de la forma de caminar antes y después de la ingestión de alcohol generados con una cadencia específica marcada. Concluyeron que incluso los jóvenes con una ingesta de alcohol moderada mostraron una disminución de la capacidad de equilibrio estático, zancada, velocidad de la marcha y cadencia. En [22], se estudió el efecto de la ingesta de alcohol con la estabilidad al caminar. Se muestra que una concentración de alcohol en sangre de menos de 0,4 mg/ml induce a la inestabilidad en la marcha y que a medida que la concentración en sangre de alcohol aumenta, también lo hace la longitud de zancada. En [23] y [24], se ha realizado un estudio para calcular el equilibrio al caminar antes y después de la ingestión de alcohol en las condiciones de ensayo de Romberg con ojos abiertos y cerrados. Observaron que el balanceo es mayor después de la ingesta de alcohol en ambas situaciones.

En este capítulo se propone un sistema para evaluar los parámetros que definen la forma de caminar de las personas en trayectorias oscilantes a partir de las mediciones realizadas con un sensor láser bidimensional de medida de distancias. Recientemente, se ha propuesto el uso de sensores LIDAR para la medición sin marcadores externos de la locomoción humana [25-28] pero esta tecnología está todavía en desarrollo y no se incluyen en algunos estudios recientes [29]. En la actualidad, los sensores LIDAR se utilizan principalmente para detectar obstáculos e identificar a gente caminando. En [26] se propone implantar en los vehículos un sistema láser para la detección de peatones. Los contornos reales de cada objetivo se calculan de forma recursiva para obtener una clasificación precisa. En [27], se presenta un robot móvil dotado con un LIDAR que utiliza un módulo de segmentación para localizar patrones en entornos dinámicos y detectar así, objetos en movimiento que puedan ser clasificados como peatones. En [28] se ha propuesto el análisis específico de los parámetros de la marcha utilizando un LIDAR, donde se define un procedimiento de medición completo y se enumeran las ventajas y desventajas de este uso. La principal desventaja es que solo se puede obtener la información plana de la posición de la

pierna a una altura fija. Para solventar este inconveniente, se podrían colocar múltiples sensores de rango láser a diferentes alturas para obtener los parámetros de movimiento completo del cuerpo [25].

La medición de las trayectorias oscilantes o arbitrarias se puede realizar principalmente mediante sistemas complejos de visión basados en [30, 31]. Los sistemas alternativos basados en alfombras de presión tienen una anchura limitada en las áreas de medición y proporciona información sólo cuando el pie está en contacto con el suelo [32]. Otros sistemas basados en el uso de sensores colocados encima de la ropa del sujeto proporcionan información de las articulaciones, pero no en la ruta de caminar [33, 34].

4.2. Aportación al estado del arte

En este capítulo se propone el uso de un LIDAR terrestre de tamaño pequeño para medir las trayectorias oscilantes en un área de experimentación de gran tamaño. Se propone la evaluación de dos parámetros específicos de la trayectoria oscilante como indicadores de discrepancias y anomalías con respecto a los parámetros de una trayectoria recta ideal. El sistema completo consta únicamente de un sensor láser bidimensional y un ordenador para capturar y analizar los datos del sensor. Para realizar la estimación de la posición de las piernas se colocó el láser UTM Hokuyo-30 LX a una altura de 100 mm con el plano de escaneo paralelo al suelo (aproximadamente a la altura del tobillo) para obtener la máxima información de las piernas sin detectar los zapatos/pies al caminar. (Fig. 4.2). Se realizan dos experimentos para la validación del sistema de medición y obtención de la información de dichos parámetros en trayectorias rectas y oscilantes donde el sujeto debe caminar en la trayectoria marcada con identificadores. Un tercer experimento ha sido realizado para obtener información de los parámetros de la marcha de un sujeto bajo el efecto de la ingesta de alcohol moderada para la detección de las anomalías.

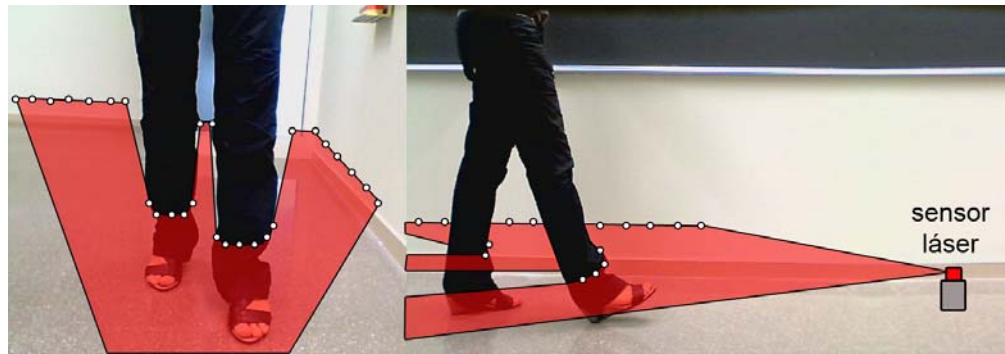


Fig. 4.2: Persona andando hacia el sensor láser, vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha).

Al finalizar la captura de datos, se dispone de una nube de puntos donde se ajusta el contorno de dos círculos de diámetro conocido para la localización de las piernas del sujeto (Fig. 4.3). El centro de cada círculo (x_i, y_i) describe la posición instantánea i de las piernas en cada instante de tiempo t_i de la exploración permitiendo realizar una estimación de los distintos parámetros que definen la forma de caminar.

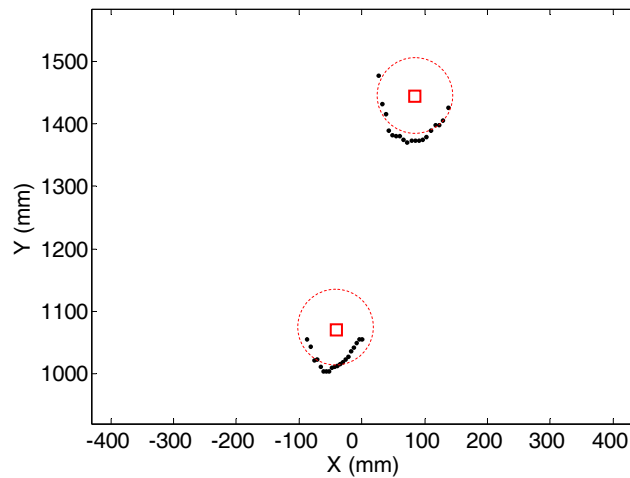


Fig. 4.3: Ejemplo de puntos del escaneo y el contorno de dos círculos que representan las piernas.

La detección precoz de anomalías en la marcha tiene muchas aplicaciones en medicina como indicador de enfermedades que afectan el sistema motor y la forma de caminar. El uso de un LIDAR terrestre portátil permite el desarrollo de nuevos sistemas de medición preparados para ser transportados fácilmente. Otra de las aplicaciones potenciales recae en la correlación de algunos parámetros de la trayectoria con la ingestión de alcohol [35]. En este caso, el uso de un LIDAR como principal sensor puede representar un incremento sustancial en el número de

sujetos que pueden ser analizados por hora en relación con las herramientas actuales de medición [36]. La sección 4.4. incluye el artículo científico en el que se han realizado estas nuevas aportaciones

4.3. Referencias

- [1] Cutting, J.; Kozlowski, L. Recognising friends by their walk: gait perception without familiarity cues. *Bull. Psychonomic Soc.* 1977, 9, 353-356.
- [2] Wang, L. Abnormal walking gait analysis using silhouette-masked flow histograms. In *Proceedings of the 18th International Conference on Pattern Recognition*, Hong Kong, August 20-24, 2006; pp. 473-476.
- [3] Qian, G.; Zhang, J.; Kidane, A. People identification using gait via floor pressure sensing and analysis, *Lect. Note. Comput. Sci.* 2008, 5279, 83-98.
- [4] Mayagoitia, R. E.; Nene, A.V.; Veltink, P.H. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems, *J. Biomech.* 2002, 35, 537-542.
- [5] Bamberg, S.; Benbasat, A. Y.; Scarborough, D. M.; Krebs, D. E.; Paradiso, J. A.. Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system. *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.* 2008, 12, 413-423.
- [6] Brooks, P. *Body Work*; Harvard University Press: Cambridge, MA, USA, 1993.
- [7] Guyton, A. *Function of the human body*, 4th ed.; Saunders: Philadelphia, PA, USA, 1974.
- [8] Martorell, R. Body size, adaptation and function. *Hum. Organ.* 1989, 48, 15-20.
- [9] Little, J.; Boyd, J. Recognizing people by their gait: the shape of motion. *Videre* 1998; 1, 2-32.
- [10] Kozlowski, L; Cutting, J. Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display. *Percept. Psychophys.* 1977, 21, 575-580.
- [11] Agosto, E.; Ajmar, A.; Boccardo, P.; Tonolo, F. G.; Lingua, A. Crime Scene Reconstruction Using a Fully Geomatic Approach. *Sensors* 2008, 8(10), 6280-6302.
- [12] Petrofsky, J.; Lee, S.; Bweir, S. Gait characteristics in people with type 2 diabetes mellitus. *Eur J Appl Physiol* 2005, 93, 640-647.
- [13] Peterson, M.G.E.; Kovar-Toledano, P.A.; Otis, J.C.; Allegrante, J.P.; Mackenzie, C.R.; Gutin, B.; Kroll, M.A. Effect of a Walking Program on Gait Characteristics In Patients With Osteoarthritis. *Arthritis Care and Research* 1993, 6(1), 11-16.
- [14] Lim, I.; Wegen, E.; Goede, C.; Deutekom, M.; Nieuwboer, A.; Willems, A.; Jones, D.; Rochester, L.; Kwakkel, G. Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: a systematic review. *Clin. Rehabil.* 2005, 19, 695-713.
- [15] Morris, M.E. Movement disorders in people with Parkinson disease: a model for physical therapy. *Phys. Ther.* 2000, 80, 578-597.
- [16] Morris, M.E.; Ianssek, R.; Matyas, T.A.; Summers, J.J. The pathogenesis of gait hypokinesia in Parkinson's disease. *Brain.* 1994, 117, 1169-1181.
- [17] Morris, M.E.; Ianssek, R.; Matyas, T.A.; Summers, J. Abnormalities in the Stride Length-Cadence relation in Parkinsonian Gait. *Movement Disorders.* 1998, 13(1), 61-69.
- [18] Barak, Y.; Wagenaar, R.; Holt, K. Gait Characteristics of Elderly People With a History of Falls: A Dynamic Approach. *Physical Therapy* 2006, 86(11), 1501-1510.

- [19] Hausdorff, J.M.; Rios, D.A.; Edelberg, H.K. Gait variability and fall risk in community-living older adults: a 1-year prospective study. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2001, 82, 1050–1056.
- [20] Dräger. Measuring alcohol in the body. Evidential breath-alcohol analysis with the Alcotest® 7110 and Alcotest® 7110 Evidential.
- [21] Farjas, M.; Sillero-Quintana, M.; Merino, P.A. Applying topographic techniques to modeling the human shape in motion. In *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages*, Chongqing, China, December 10-12, 2007; pp. 169-172.
- [22] Gate, G.; Nashashibi, F. Using targets appearance to improve pedestrian classification with a laser scanner. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Eindhoven, The Netherlands, June 4-6, 2008; pp. 571-576.
- [23] Noda, M.; Demura, S.; Yamaji, S.; Kitabayashi, T. Influence of alcohol intake on the parameters evaluating the body center of foot pressure in a static upright posture. *Percept. Mot. Skills* 2004, 98, 873–888.
- [24] Vázquez-Martín, R.; Núñez, P.; Bandera, A.; Sandoval, F. Curvature-based environment description for robot navigation using laser range sensors. *Sensors* 2009, 9, 5894-5918.
- [25] Farjas, M.; Sillero-Quintana, M.; Merino, P.A. Applying topographic techniques to modeling the human shape in motion. In *Second Workshop on Digital Media and its Application in Museum & Heritages*, Chongqing, China, December 10-12, 2007; pp. 169-172.
- [26] Gate, G.; Nashashibi, F. Using targets appearance to improve pedestrian classification with a laser scanner. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Eindhoven, The Netherlands, June 4-6, 2008; pp. 571-576.
- [27] Vázquez-Martín, R.; Núñez, P.; Bandera, A.; Sandoval, F. Curvature-based environment description for robot navigation using laser range sensors. *Sensors* 2009, 9, 5894-5918.
- [28] Palleja T.; Teixido M.; Tresanchez M. and Palacin J. Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor. *Sensors* 2009, 9, 9133-9146.
- [29] Kyriazis, V. Gait analysis techniques. *J. Orthopaed Traumatol.* 2001, 1, 1–6.
- [30] Windolf, M.; Götzen, N.; Morlock, M. Systematic accuracy and precision analysis of video motion capturing systems – exemplified on the Vicon-460 system. *Gait analysis for recognition and classification. Journal of Biomechanics* 2008, 41, 537–542.
- [31] Webster K.; Wittwer J. and Feller J. Validity of the GAITRite® walkway system for the measurement of averaged and individual step parameters of gait. *Gait & Posture* 2005, 4, 317-321.
- [32] Menz, H.B.; Latt, M.D.; Tiedemann, A.; Mun San Kwan, M.; Lord, S.R. Reliability of the GAITRite® walkway system for the quantification of temporo-spatial parameters of gait in young and older people. *Gait and Posture* 2004, 20, 20-25.
- [33] Mayagoitia, R.E.; Nene, A.V.; Veltink, P.H. Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *J. Biomech.* 2002, 35, 537-542.
- [34] Catalfamo, P.; Ghousayni, S.;Ewins, D. Gait Event Detection on Level Ground and Incline Walking Using a Rate Gyroscope. *Sensors* 2010, 10(6), 5683-5702.
- [35] Demura, S. and Uchiyama, M. Influence of moderate alcohol ingestion on gait. *Sport. Sci. Health* 2008, 4, 21-26.
- [36] Dräger. Measuring alcohol in the body. Evidential breath-alcohol analysis with the Alcotest® 7110 and Alcotest® 7110 Evidential.

4.4. Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR.

Sensors **2011**, 11(5), 5071-5086; doi:10.3390/s110505071

OPEN ACCESS

sensors

ISSN 1424-8220

www.mdpi.com/journal/sensors

Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR

Mercè Teixidó, Tomàs Pallejà, Marcel Tresanchez, Miquel Nogués, and Jordi Palacín *

Department of Computer Science and Industrial Engineering, University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain; E-Mails: mteixido@diei.udl.cat (M.T.); tpalleja@diei.udl.cat (T.P.); mtresanchez@diei.udl.cat (M.T.); mnogues@diei.udl.cat (M.N.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: palacin@diei.udl.cat;
Tel.: +34-973-702724; Fax: +34-973-702702.

Received: 19 April 2012; in revised form: 28 May 2012 / Accepted: 1 June 2012 / Published: 7 June 2012

Abstract – This work describes the analysis of different walking paths registered using a Light Detection And Ranging (LIDAR) laser range sensor in order to measure oscillating trajectories during an unsupervised walking. The estimate of the gait and trajectory parameters were obtained with a terrestrial LIDAR placed 100 mm above the ground with the scanning plane parallel to the floor to measure the trajectory of the legs without attaching any markers or modifying the floor. Three different large walking experiments were performed to test the proposed measurement system with straight and oscillating trajectories. The main advantages of the proposed system are the possibility to measure several steps and get average gait parameters and the minimum infrastructure required. This measurement system enables the development of new ambulatory applications based on the analysis of the gait and the trajectory during a walk.

Keywords – gait trajectory; gait measurement; laser range sensor; LIDAR; oscillatory path; alcohol intake.

1. Introduction

Human movement has become an interesting research topic for understanding how the human body works [1-3]. The measurement of the walking and gait patterns has many applications. It can be used for specific applications such as identification [4, 5], gender classification [6], crime scene reconstruction

Las páginas de la 46 a la 62 contienen el artículo:

Teixidó, M.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J. Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR. *Sensors* **2011**, *11*, 5071-5086.

Capítulo 5

Detección de marcas mediante el procesamiento de imágenes RGB: aplicación a la detección de fruta fresca

5.1. Introducción

En este capítulo se propone el uso de un sistema de adquisición y procesamiento de imágenes para la medición de marcas con un perfil de color determinado. Como ejemplo de aplicación se propone la detección automática de fruta dulce durante su etapa de crecimiento en el árbol. Los resultados que puedan obtenerse tienen diversas aplicaciones, entre las que destacan: la estimación de la cosecha, la optimización de la aplicación de productos fitosanitarios, la estimación del tiempo necesario para la recolección de la cosecha, la área de almacenamiento después de la cosecha y la recolección automática de fruta. En todos los casos una estimación precisa del tamaño y número de fruta es muy interesante para los agricultores. Actualmente, todas estas estimaciones se basan en la experiencia o en un análisis manual de una pequeña área limitada del campo.

En este capítulo se propone una metodología para la detección automática de fruta dulce en imágenes en color de frutales en el campo. El caso desarrollado se basa en el caso de melocotones tipo paraguayos. En futuros trabajos, la información obtenida se utilizará para guiar dispositivos robotizados para recolectar piezas de fruta individuales de forma automática. La recolección automática de fruta tiene muchas ventajas prácticas como: la reducción de la

presión que el agricultor ejerce sobre la fruta al recolectarla, el tiempo necesario y el coste de la recolección (actualmente, el 45-50% del coste total de producción en los países desarrollados [1]). Además, se podría optimizar el número de pasos para su recolección con el fin de maximizar el valor de mercado de la producción de frutas en general.

Hoy en día, las técnicas de procesamiento de imágenes se utilizan principalmente como una técnica no intrusiva [2,3] para estimar la calidad de la fruta [4-6]. Por ejemplo, en [7-9] se definen diferentes categorías de frutas a partir de los defectos superficiales detectados y en [10,11] a partir de los parámetros característicos de cada fruta tales como el tamaño y el color de los cítricos [10]. En [12], se presenta un resumen de las metodologías utilizadas para localizar la fruta en el árbol para: la correcta estimación de la cosecha [13] y la recolección automatizada de: cítricos [14,15], manzanas [16-18], cerezas [19], naranjas [20,21], melocotones [22], etc. Las estrategias resumidas en [12] se basan en el análisis de imágenes en diversas longitudes de onda que permiten detectar fácilmente frutas con colores de piel diferentes al entorno y fondo de la imagen, aunque pueden ser fuertemente afectadas por sombras y regiones con oclusión.

5.2. Aportación al estado del arte

En este capítulo se propone una nueva metodología para detectar piezas de fruta individuales en imágenes capturadas directamente en el campo bajo iluminación natural. La metodología se basa en la definición manual de modelos RGB lineales mediante un vector RGB espacial [23]. La clasificación y segmentación de los píxeles de la imagen se realiza mediante la comparación de la distancia de intensidad de color de cada píxel con los modelos de color lineales definidos previamente. En [24] se propuso una metodología similar aunque la división espacial de color RGB se definía en forma de cilindros en lugar de líneas para la clasificación RGB de una paleta de colores. En [25] y [26] se define una relación de color lineal para la detección de la piel. En [27] se propone la detección del fondo verde de un sistema de billar mediante la definición de 20 pequeñas regiones de color en el espacio.

Para estimar el error inducido en el proceso de segmentación, los resultados de la segmentación se comparan con el etiquetado manual de fruta. La definición de los modelos RGB lineales utilizados para clasificar los píxeles de la imagen se basan en la experiencia humana, aunque la simplicidad de los modelos de color lineales utilizados en este capítulo sugiere una futura determinación automática de dichos modelos basados en el análisis de algunas imágenes de muestra representativas [28].

El objetivo de este capítulo es la localización y detección de piezas de fruta individuales de imágenes obtenidas directamente en el campo bajo iluminación natural. La clasificación no es un problema trivial puesto que la fruta puede ser parcialmente ocultada por hojas o ramas en las imágenes y puede variar la cantidad de iluminación. Además, puede variar su intensidad de color según el sombreado y la incidencia directa de la luz solar. La Figura 1 ilustra estos efectos con dos imágenes con diferentes condiciones de iluminación en el campo. La sección 5.4. incluye el artículo científico en el que se han realizado estas nuevas aportaciones



Fig. 5.1. Ejemplos de diferentes condiciones de iluminación en el campo

5.3. Referencias

- [1] Technical report 1/2011. Departamento de Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya (DAAM), Spain. Available online: <http://www20.gencat.cat/> (2012)
- [2] Lee, W.S.; Alchanatis, V.; Yang, C.; Hirafuji, M.; Moshou, D.; C. Li. Sensing technologies for precision specialty crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 2010, 74, 2-33.

- [3] Ruiz, M.; Ruiz, L.; Moreda, G. P.; Lu, R.; Hernandez, N.; Correa, E.C.; Diezma, B.; Nicolai, B.; García, J. Sensors for product characterization and quality of specialty crops-A review. *Computers and Electronics in Agriculture* 2010, 74, 176-194.
- [4] Chen, Y. R.; Chao, K. L.; Kim, M.S. Machine vision technology for agricultural applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 2002, 36 (2-3), 173-191.
- [5] Brosnan, T.; Sun, D.W. Improving quality inspection of food products by computer vision – a review. *Journal of Food Engineering* 2004, 61(1), 3-16.
- [6] Aguilera, J. M.; Briones, V. Computer vision and food quality. *Food Australia* 2005, 57 (3), 79-87.
- [7] Miller, B. K.; Delwiche M. J. Peach defect detection with machine vision. *Transactions of the ASAE* 1991, 34 (6), 2588-2597.
- [8] Miller, B. K.; Delwiche, M. J. Spectral analysis of peach surface defects. *Transactions of the ASAE* 1991, 34 (6), 2509-2515.
- [9] Guzmán, H.; Nápoles, J.; Patiño, A.; Mateos, R.; Matías, M.; Amador, J.; Tombs, J.; Aguirre, M.A.; Pérez, J. Realization of a Flexible Platform for Fruit Inspection and Classification Applications with Emphasis in Rapid Prototyping and Development. In 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, Porto, November 3-5, 2009, pp. 2874-2879.
- [10] Aleixos, N.; Blasco, J.; Navarrón, F.; Moltó, E. Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. *Computers and Electronics in Agriculture* 2002, 33, 121-137.
- [11] Blasco, J.; Aleixos, N.; Moltó, E. Machine Vision System for Automatic Quality Grading of Fruit. *Biosystems Engineering* 2003, 85 (4), 415-423.
- [12] Jimenez, A.R.; Ceres, R.; Pons, J.L. A survey of computer vision methods for locating fruit on trees. *Transactions of the ASAE* 2000, 43, 1911-1920.
- [13] Linker, R.; Cohen, O.; Naor, A. Determination of the number of green apples in RGB images recorded in orchards. *Computers and Electronics in Agriculture* 2012, 81, 45-57.
- [14] Plá, F.; Juste, F.; Ferri, F. Feature extraction of spherical objects in image analysis: an application to robotic citrus harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture* 1993, 8 (1), 57-72.
- [15] Plá, F.; Juste, F.; Ferri, F.; Vicens, M. Colour segmentation based on a light reflection model to locate citrus fruits for robotic harvesting. *Computers and Electronics in Agriculture* 1993, 9, 53-70.
- [16] Stajanko, D.; Lakota, K.; Hocevar, M. Estimation of number and diameter of apple fruits in an orchard during the growing season by thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 2004, 42, 31-42.
- [17] Wachs, J.P.; Stern, H.I.; Burks, T.; Alchanatis, V. Low and high-level visual feature-based apple detection from multi-modal images. *Precision Agriculture* 2010, 11, 717-735.
- [18] Zhao, D.; Lv, J.; Ji, W.; Zhang, Y.; Chen, Y. Design and control of an apple harvesting robot. *Biosystems Engineering* 2011, 110 (2), 112-122.
- [19] Tanigaki, K.; Fujiura, T.; Akase, A.; Imagawa, J. Cherry-harvesting robot. *Computers and Electronics in Agriculture* 2008, 63, 65-72.
- [20] Jimenez, A.R.; Jain, A.K.; Ceres, R.; Pons, J.L. Automatic fruit recognition: A survey and new using Range/Attenuation images. *Pattern Recognition* 1999, 32(10), 1719-1736.
- [21] Plebe, A.; Grasso, G. Localization of spherical fruits for robotic harvesting. *Machine Vision and Applications* 2001, 13, 70-79.
- [22] Liu, Y.; Chen, B.; Qiao, J. Development of a Machine Vision Algorithm for Recognition of Peach Fruit in a Natural Scene. *Transactions of the ASABE* 2011, 54(2), 695-702.
- [23] Onyango, C.M.; Marchant, J.A. Segmentation of row crop plants from weeds using colour and morphology. *Computers and Electronics in Agriculture* 2003, 39(3), 141-155.

- [24] Kim, K.; Chalidabhongse, T.H.; Harwood, D.; Davis, L. Real-Time foreground-background segmentation using codebook model. *Real-Time Imaging* 2005, 11 (3), 172-185.
- [25] Yasukochi, N.; Mitome, A.; Ishii, R. A recognition method of restricted hand shapes in still image and moving image as a man-machine interface. *Conference on Human System Interactions, Krakow, 25-27 May, 2008*; pp. 306-310.
- [26] Seow, M.J.; Asari, V.K. Recurrent neural network as a linear attractor for pattern association. *IEEE Transactions on Neural Networks* 2006, 17(1), 246-250.
- [27] Jebara, T.; Eyster, C.; Weaver, J.; Starner, T.; Pentland, A. Stochasticks: augmenting the billiards experience with probabilistic vision and wearable computers. *First International Symposium on Wearable Computers, Cambridge, 13-14 October, 1997*; pp. 138-145.
- [28] Steward, B.; Tian, L.; Nettleton, D.; Tang, L. Reduced-dimension clustering for vegetation segmentation. *Transactions of the ASABE* 2004, 47(2), 609–616.

5.4. Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images under natural illumination.

Sensors **2012**, 12(6), 7701-7718; doi:10.3390/s120607701

OPEN ACCESS

sensors

ISSN 1424-8220

www.mdpi.com/journal/sensors

Article

Definition of linear color models in the RGB vector color space to detect red peaches in orchard images under natural illumination

Mercè Teixidó, Davinia Font, Tomàs Pallejà, Marcel Tresanchez,
Miquel Nogués and Jordi Palacín*

Department of Computer Science and Industrial Engineering, University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain; E-Mails: mteixido@diei.udl.cat (M.T.); dfont@diei.udl.cat (D.F.); tpalleja@diei.udl.cat (T.P.); mtresanchez@diei.udl.cat (M.T.); mnogues@diei.udl.cat (M.N.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: palacin@diei.udl.cat; Tel.: +34-973-702724; Fax: +34-973-702702.

Received: 19 April 2012; in revised form: 28 May 2012 / Accepted: 1 June 2012 / Published: 7 June 2012

Abstract – This work proposes the detection of red peaches in orchard images based on the definition of different linear color models in the RGB vector color space. The classification and segmentation of the pixels of the image is then performed by comparing the color distance from each pixel to the different linear color models previously defined. The methodology proposed has been tested with images obtained in a real orchard under natural light. The peach variety in the orchard was the paraguayano (*Prunus persica* var. *platycarpa*) peach with red skin. The segmentation results showed that the area of the red peaches in the images was detected with an average error of 11.6%; 19.7% in the case of brightly illuminated; 8.2% in the case of low illumination; 8.6% for occlusion up to 33%; 12.2% in the case of occlusion between 34 and 66%; and 23% for occlusion above 66%. Finally, a methodology was proposed to estimate the diameter of the fruits based on an ellipsoidal fitting. A first diameter was obtained by using all the contour pixels and a second diameter was obtained by rejecting some pixels of the contour. This approach enables a rough estimate of the fruit occlusion percentage range by comparing the two diameter estimates.

Keywords – Red-peach harvesting; fruit detection; RGB color space.

Las páginas de la 68 a la 86 contienen el artículo:

Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J.
Definition of Linear Color Models in the RGB Vector Color Space to Detect
Red Peaches in Orchard Images Taken under Natural Illumination. *Sensors*
2012, *12*, 7701-7718.

Capítulo 6

Detección de marcas mediante el procesamiento de imágenes RGB: desarrollo de un sistema compacto

6.1. Introducción

En este capítulo se propone el desarrollo de un sistema compacto con capacidad de adquisición y procesamiento de imágenes. Este sistema se aplicará en la adquisición y procesamiento de imágenes para la medición de marcas con un perfil de color determinado. Como ejemplo futuro de aplicación se propone la detección automática de fruta dulce durante su etapa de crecimiento en el árbol con el objetivo de desarrollar máquinas de recolección automática ya que el coste de la recolección manual realizada actualmente representa más del 45-50% del coste total de producción en los países desarrollados [1]. Un ejemplo de ello, se puede apreciar en la ciudad de Lleida, comunidad autónoma de Cataluña dentro de España, donde la producción de paraguayos asciende a 47.000 toneladas en 2011 y las previsiones para el 2012 son de 66.300 toneladas (representando un 41% de incremento anual [1]). En estos casos, el diseño y desarrollo de máquinas automáticas para la recolección de fruta fresca se espera que tenga un gran impacto en la economía local y nacional, contribuyendo a reducir los costes de producción de fruta y también aumentar la calidad de la cosecha. El desarrollo de dichas máquinas requiere de la combinación de máquinas altamente robotizadas y

de sistemas de visión portátiles para orientar así, la selección automática y recolección óptima de la fruta fresca [2].

Los continuos avances en informática y la mejora de la tecnología en la micro-fabricación han impulsado el diseño de pequeños sistemas compactos con electrónica y sensores que incorporan capacidades de procesamiento de imágenes. Un ejemplo de ello es [3], donde se presenta una plataforma de visión empotrada y de bajo costo para la localización de un color en una imagen. Además permite realizar la compresión JPEG, detección de bordes, convolución de la imagen, detección de rostros, y el cómputo de histograma de color. Dicho sistema se basa en una cámara color CMOS de bajo coste, un chip de memoria intermedia, y un microcontrolador de bajo coste que procesa todas las imágenes adquiridas. Además, en [7] se propone un sistema inteligente de visión compacto para aplicar diferentes filtros de imagen, realizar la correlación de la imagen y transformación de hasta 667 frames por segundo. En el estudio realizado en [8], se presenta un sistema de visión compacto de bajo consumo de energía y diseñado específicamente para la navegación de un robot móvil. Este sistema compacto acelera los algoritmos básicos de procesamiento de imágenes necesarios para una aplicación de un robot móvil, tales como el procesamiento de imágenes de bajo nivel, el filtrado espacial, la extracción de características, y las operaciones de correspondencia de bloques. En [9], se propone un FPGA para procesar las imágenes de una cámara CMOS y crear un sistema de procesamiento de imagen compacto y autónomo. En [10], se presenta también un FPGA, para la navegación mediante la combinación de GPS, giroscopios, y la odometría del vehículo. En [11] se propone un sistema de reconociendo de la palma de la mano compacto y tiempo real basado en la plataforma de doble núcleo OMAP 3530. En [12] se presenta un sistema de visión compacto para asistencia a la conducción nocturna y vigilancia inteligente. El sistema integra diferentes dispositivos con el fin de analizar la detección de vehículos durante la noche, la determinación de aviso de colisión y de grabación de tráfico.

6.2. Aportación al estado del arte

En este capítulo se propone la creación de un nuevo sistema de visión integrado para la detección y seguimiento en tiempo real de paraguayos en imágenes RGB capturadas directamente en el campo. El diseño y desarrollo del sistema integrado se inspira en [3] y está basado en el trabajo preliminar realizado en [4]. En el futuro, este sistema integrado se desea colocar directamente en la herramienta de agarre de un brazo robotizado diseñado para la recolección automática. Además, este capítulo propone el uso de una LUT de tres dimensiones definida en el espacio de color RGB para la detección y seguimiento de la fruta. Se han propuesto y probado dos metodologías para crear y optimizar la tabla de búsqueda (LUT). La primera metodología propuesta está basada en modelos 3D de color lineal [5] y la segunda en un histograma 3D [6]. Actualmente, ambas metodologías requieren de una selección manual de los puntos más característicos de las imágenes, tales como algún ejemplo de fruta individual y hojas. Esta tarea debe ser automatizada en un futuro. Sin embargo, una vez creada, una LUT 3D la segmentación de la fruta se realiza de forma muy rápida utilizando las intensidades de los píxeles de color RGB como índice a la tabla de búsqueda, dado que el valor leído de la tabla es el resultado directo de segmentación.

La figura 1 muestra el sistema completo formado por el módulo de procesador, la cámara, y una pantalla de color LCD auxiliar para ser conectada y, obtener así, una retroalimentación rápida desde el sistema integrado.

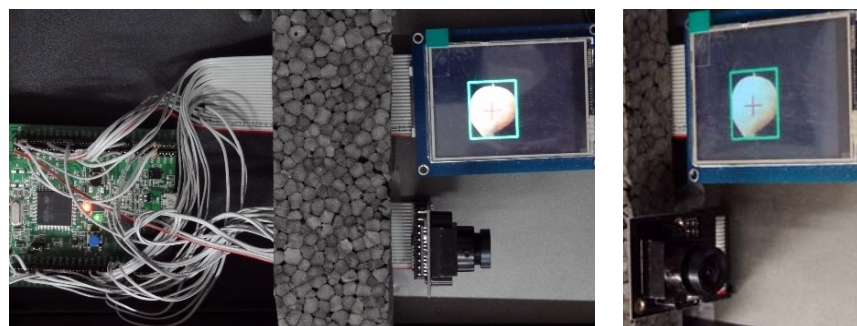


Fig. 6.1. El módulo de la cámara, el procesador y la placa auxiliar LCD color

El trabajo futuro se centrará en la evaluación de la resolución de los megapíxel en miniatura de las cámaras de color para la definición de las diferentes

operaciones de zoom de la imagen, manteniendo el tamaño QVGA de las imágenes adquiridas y la velocidad de funcionamiento del sistema compacto. El trabajo futuro se centrará también en la miniaturización del sistema compacto con el fin de incorporar el sistema directamente sobre la herramienta de agarre de un brazo robotizado diseñado para la recolección de fruta. La sección 6.4. incluye el artículo científico en el que se han realizado estas nuevas aportaciones

6.3. Referencias

- [1] Technical report 1/2011. Departamento de Agricultura, Ramadería, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente de la Generalitat de Catalunya (DAAM), Spain. Available online: <http://www20.gencat.cat/> (2012)
- [2] Slaughter, D.; Harrell, R. Color vision in robotic fruit harvesting. *American Society of Agricultural Engineers* 1987, 30(4), 1144-1148.
- [3] Rowe, A.; Goode, A. G.; Goel, D.; Nourbakhsh, I. CMUcam3: An Open Programmable Embedded Vision Sensor, Tech. Rep. CMU-RI-TR-07-13, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, May 2007.
- [4] Tresanchez, M.; Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Palacín, J. Embedded Vision System for Real-Time Fruit Detection and Tracking. In 1st RHEA International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for Agriculture, Pisa, Italy, 19-21 September, 2012.
- [5] Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J. Definition of Linear Color Models in the RGB Vector Color Space to Detect Red Peaches in Orchard Images Taken under Natural Illumination. *Sensors* 2012, 12, 7701-7718.
- [6] Swain, M.; Ballard, D. Color indexing. *International Journal of Computer Vision* 1991, 7(1), 11-32.
- [7] McBader, S.; Lee, P. An FPGA implementation of a flexible, parallel image processing architecture suitable for embedded vision systems. In *Proceedings of Parallel and Distributed Processing Symposium*, April, 2003, pp. 22-26.
- [8] Sawasaki, N.; Nakao, M.; Yamamoto, Y.; Okabayashi, K. Embedded Vision System for Mobile Robot Navigation. In *Proc. of Int. Conference on Robotics and Automation ICRA 2006*, Orlando, USA, May 2006, pp. 2693-2698.
- [9] Bravo, I.; Baliñas, J.; Gardel, A.; Lázaro, J.L.; Espinosa, F.; García, J. Efficient Smart CMOS Camera Based on FPGAs Oriented to Embedded Image Processing. *Sensors* 2011, 11, 2282-2303.
- [10] Abdelfatah, W.F.; Georgy, J.; Iqbal, U.; Noureldin, A. FPGA-Based Real-Time Embedded System for RISS/GPS Integrated Navigation. *Sensors* 2012, 12, 115-147.
- [11] Shen, L.; Wu, S.; Zheng, S.; Ji, Z. Embedded Palmprint Recognition System Using OMAP 3530. *Sensors* 2012, 12, 1482-1493.
- [12] Chen, Y.-L.; Chiang, H.-H.; Chiang, C.-Y.; Liu, C.-M.; Yuan, S.-M.; Wang, J.-H. A Vision-Based Driver Nighttime Assistance and Surveillance System Based on Intelligent Image Sensing Techniques and a Heterogeneous Dual-Core Embedded System Architecture. *Sensors* 2012, 12, 2373-2399.

6.4. Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables

Sensors **2012**, 12(10), 14129-14143; doi:10.3390/s121014129

OPEN ACCESS

sensors

ISSN 1424-8220

www.mdpi.com/journal/sensors

Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera, ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables

Mercè Teixidó, Davinia Font, Tomàs Pallejà, Marcel Tresanchez,
Miquel Nogués and Jordi Palacín*

Department of Computer Science and Industrial Engineering, University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain; E-Mails: mteixido@diei.udl.cat (M.T.); dfont@diei.udl.cat (D.F.); tpalleja@diei.udl.cat (T.P.); mtresanchez@diei.udl.cat (M.T.); mnogues@diei.udl.cat (M.N.)

* *Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: palacin@diei.udl.cat; Tel.: +34-973-702724; Fax: +34-973-702702.*

Received: X; in revised form: X / Accepted: X / Published: X

Abstract – This work proposes the development of an embedded real-time fruit detection system for future automatic fruit harvesting. The proposed embedded system is based on a ARM Cortex-M4 (STM32F407VGT6) processor and an Omnivision OV7670 color camera. The future goal of this embedded vision system will be to control a robotized arm to automatically select and pick some fruit directly from the tree. The complete embedded system has been designed to be placed directly in the gripper tool of the future robotized harvesting arm. The embedded system will be able to perform real-time fruit detection and tracking by using a three-dimensional look-up-table (LUT) defined in the RGB color space and optimized for fruit picking. Additionally, two different methodologies for creating optimized 3D LUTs based on existing linear color models and fruit histograms were implemented in this work and compared for the case of red peaches. The resulting system is able to acquire general and zoomed orchard images and to update the relative tracking information of a red peach in the tree ten times per second.

Keywords – real-time embedded system; autonomous system; fruit detection; LUT models.

Las páginas de la 91 a la 106 contienen el artículo:

Teixidó, M.; Font, D.; Pallejà, T.; Tresanchez, M.; Nogués, M.; Palacín, J.
Embedded real-time red peach detection system based on OV7670 camera,
ARM Cortex-M4 processor and 3D Look-Up Tables. *Sensors* **2012**, *12*, 14129-
14143

Capítulo 7

Discusión general de los resultados

En este capítulo se presenta la discusión general de los resultados obtenidos en cada uno de los capítulos presentados en esta memoria.

En el capítulo 3, se propone el análisis de trayectoria de un robot móvil mediante la detección de marcas circulares fijados en este. La discriminación entre los puntos pertenecientes al perímetro del cilindro y los puntos del entorno se realizó mediante la aplicación de un algoritmo de eliminación de puntos atípico en la forma de un círculo y un algoritmo de ajuste de mínimos cuadrados. Para validar el sistema, estimar la localización del robot y obtener los errores de seguimiento se realizaron algunos experimentos con diferentes marcadores cilíndricos. Los resultados obtenidos muestran que el error de seguimiento es menor a 20 mm. Como resultado de los experimentos de validación, se crearon unos mapas de error con el fin de dar una estimación de la incertidumbre en cualquier posición dentro del rango de visión del sistema láser. Para la validación del sistema se estimó la trayectoria de un robot móvil de tamaño medio con un marcador cilíndrico adherido de diámetro 200 mm. El error de posición promedio obtenido es de menos de 15 mm, siendo la ubicación de error real en cada situación similar al error estimado en los mapas de error. La zona radial cubierta por el sistema de medición depende del láser utilizado y la densidad de los puntos de medición. En el caso del sistema láser UTM-30LX, es de hasta 10 m, aunque esta área se puede aumentar mediante el uso de láseres adicionales.

En el capítulo 4, se propone el análisis de los parámetros de la forma de caminar de una persona en trayectorias oscilantes y sin supervisión. La estimación

de dichos parámetros se obtuvo con un LIDAR colocado con el plano de medición paralelo al suelo y a una altura de 100 mm para captar la posición de las piernas (el tronco de las piernas es el marcador). Se realizaron tres experimentos diferentes con trayectorias rectas y oscilantes para testear el sistema de medición propuesto. La principal ventaja del sistema propuesto es que requiere de una mínima infraestructura para medir la forma de caminar de una persona, y obtener así, los parámetros promedios de la forma de caminar. Este sistema de medida permite el desarrollo de nuevas aplicaciones ambulatorias basadas en el análisis de la forma de caminar de las personas y su posible uso como indicador precoz de algunas enfermedades que afectan directamente al sistema locomotor y a la forma de caminar.

En el capítulo 5, se propone la definición de modelos lineales RGB para la detección de marcadores con una determinada textura de color. Se propone como aplicación la detección de melocotones rojos en imágenes obtenidas directamente en una plantación de melocotones paraguayos. La clasificación y segmentación de los píxeles de la imagen se realiza mediante la comparación de la distancia del color con los diferentes modelos lineales de color definidos previamente. Se ha probado la metodología propuesta con imágenes capturadas bajo iluminación natural. Los resultados de segmentación y del cálculo del área de los marcadores indican un error promedio de 11,6%; un 19,7% en el caso de iluminación alta, un 8,2% en el caso de iluminación baja, un 8,6% para situaciones de oclusión hasta un 33%, un 12,2% en el caso de oclusión entre 34 y 66%, y un 23% para situaciones de oclusión de más del 66%. Por último, dada la forma achatada de los melocotones paraguayos se propone también un método para estimar el diámetro de cada uno de los marcadores basado en un ajuste elipsoidal. Para ello se realiza una primera estimación del tamaño del marcador a partir de todos los píxeles que pueden formar parte del contorno, y una segunda estimación a partir de una selección con los píxeles que se considera que forman parte del contorno del marcador. Se ha observado que estos métodos permiten realizar una estimación aproximada del porcentaje de oclusión del marcador mediante la comparación de las dos estimaciones de diámetro.

En el capítulo 6, se propone el desarrollo de un sistema compacto con capacidad de adquisición y procesado de imagen para detectar marcadores de un color determinado en una aplicación de tiempo real como es la detección de melocotones directamente en el árbol como parte de un sistema de recolección de fruta automática. El sistema propuesto se basa en un procesador ARM Cortex-M4 (STM32F407VGT6) y una cámara en color Omnivision OV7670. En el futuro, el objetivo de este sistema de visión compacto será controlar un brazo robotizado para detectar, seleccionar y recoger automáticamente el fruto directamente del árbol. El sistema completo está diseñado para ser colocado directamente en la herramienta de agarre de un sistema de recolección de fruta robotizado. El sistema compacto es capaz de detectar y seguir un fruto en tiempo real mediante la definición de tablas de clasificación (en inglés LUTs) definidas en el espacio de color RGB y optimizadas para un marcador determinado. Además, se han implementado y comparado dos metodologías diferentes para la creación de LUTs optimizadas a partir de la definición de modelos de color RGB y de histogramas de color RGB tridimensionales. En cualquier caso, el sistema es capaz de actualizar la información de seguimiento de un paraguayo diez veces por segundo.

Capítulo 8

Conclusiones finales

Este trabajo propone la utilización de distintos sistema sensores para obtener información del entorno con el objetivo de detectar marcas mediante técnicas de medida de distancias basadas en láser y de imagen basadas en intensidades de color. Concretamente, las aplicaciones propuestas están diseñadas: para el análisis de trayectorias de robots móviles, para medir la forma de caminar de un individuo y para la detección de marcas visuales en aplicaciones que requieran una elevada velocidad de actualización de los resultados. A continuación, se indican las conclusiones obtenidas en cada una de las aplicaciones.

8.1. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medidas láser 2D: aplicación para la localización y seguimiento de un robot móvil

En este trabajo se propone la utilización de un láser 2D para detectar y localizar objetivos cilíndricos. Esta propuesta tiene muchas aplicaciones, entre las que se destaca el rastreo externo de robots móviles. Como material para la realización de este trabajo, se ha utilizado un sensor láser UTM-30LX y unos cilindros de PVC como marcadores. UTM-30LX proporciona una nube de 1.081 puntos que oscilan en un rango de medición de -135° a 135° y de 0,1 a 60 metros. Para minimizar las posibles alteraciones en el comportamiento del láser durante los experimentos de medición, se le ha añadido una estructura de refrigeración adicional. El procedimiento de ajuste de marcas circulares se basa en la

combinación del método de mínimos cuadrados y un procedimiento adicional para eliminar valores atípicos en la forma de un círculo.

Para evaluar el error obtenido en el posicionamiento, se desarrollaron diferentes experimentos. El primero se centró en la determinación del error en la estimación del centro de un marcador circular a diferentes distancias y una orientación fija. La conclusión obtenida mostraba que el error promedio es inferior a 20 mm, excepto a una distancia de 1 m donde el error promedio tiene un pico de 30-40 mm. El segundo experimento se centró en medir el error en la estimación del centro de un marcador circular en una distancia fija (1 m) pero orientación diferente. Como conclusión se obtuvo que el error máximo promedio a esta distancia está en un intervalo limitado en frente del sensor. El objetivo del tercer experimento era la obtención de la distribución bidimensional de la ubicación de error. Para ello, se realizó una evaluación general del error en la estimación del centro de un marcador circular en diferentes distancias y orientaciones. La conclusión general es que los mejores resultados se obtienen cuando el análisis se realiza con el marcador circular con el diámetro más grande.

Finalmente, se realizó un último experimento de validación con un robot móvil en un área de medición de 3x4.5 m para demostrar las capacidades de seguimiento de esta propuesta. En promedio, el error de ubicación obtenido fue inferior a 15 mm.

Esta propuesta será utilizada en un futuro para verificar la trayectoria de exploración seguida por diferentes robots móviles equipados con sensores especializados para la detección de fuentes de gas y sustancias peligrosas.

8.2. Detección de marcas circulares mediante un sensor de medida láser 2D: aplicación para la medición de la forma de caminar

En este trabajo se propone un nuevo sistema basado en un sensor LIDAR bidimensional para estimar los distintos parámetros que definen la forma de caminar de las personas en trayectorias oscilantes. El láser es colocado a unos 100

mm por encima del suelo con el plano de exploración paralelo al suelo. Los datos obtenidos con el LIDAR permiten detectar el contorno de las piernas y estimar su centro ajustando un círculo por el método de mínimos cuadrados LMS.

Para medir la oscilación de las trayectorias se propone la estimación de dos parámetros específicos de la trayectoria: la amplitud máxima de la trayectoria y el área acumulativa normalizada con respecto a una trayectoria recta acotada. Se realizaron tres experimentos para testear el sistema de medición propuesto. En el primer experimento, se registró la forma de caminar de algunos voluntarios sin supervisión obteniendo pequeñas desviaciones en los parámetros de la marcha y la trayectoria. En el segundo experimento, se registró la forma de caminar de algunos voluntarios, sin supervisión, siguiendo trayectorias oscilantes marcadas en el suelo. Se obtuvo una pequeña desviación en los parámetros de marcha y la correcta estimación de la amplitud de la oscilación de la marcha. En el tercer experimento, se registró la forma de caminar sin supervisión de dos voluntarios en línea recta (1 hombre y la mujer 1) bajo el efecto de la ingesta moderada de alcohol como una propuesta preliminar de una aplicación práctica del sistema de medición. Estos resultados preliminares mostraron que algunos parámetros de la marcha tuvo una fuerte correlación con la concentración de alcohol en el cuerpo. Por ejemplo, la desviación estándar entre la fase de apoyo y balanceo tuvo una fuerte correlación (0,95) en el caso de una mujer, pero esta correlación es muy débil (0,05) en el caso de un hombre. La desviación estándar de la anchura de paso tenía una fuerte correlación (0,92) en el caso de un hombre pero débil y negativa (-0,33) en caso de una mujer. Por lo tanto, se requiere de la realización de más experimentos y análisis para extraer las conclusiones generales.

La conclusión principal es que se puede medir una trayectoria amplia y oscilante usando un LIDAR terrestre y una infraestructura mínima, sin ningún contacto previo con el tema. Esta conclusión puede fomentar el desarrollo de una nueva gama de aplicaciones no invasivas y ambulatorias basadas en el análisis de los parámetros de la forma de caminar. Como trabajo futuro, se analizará la cinemática completa de la forma de caminar y se comparará el sistema de medición propuesto con otros sistemas de medición alternativos.

8.3. Detección de marcas mediante el procesado de imágenes RGB: aplicación a la detección de fruta fresca

Este trabajo propone la aplicación de modelos de color RGB lineales para detectar paraguayos en imágenes capturadas directamente en el campo con iluminación natural. El criterio utilizado para clasificar individualmente los píxeles de las imágenes es la proximidad a los diferentes modelos de color lineales, sin necesidad de definir ningún umbral adicional o distancias radiales de proximidad a los modelos de color lineales. El error promedio obtenido al medir el área de los frutos individuales comparando el etiquetado manual y el procedimiento de segmentación automática era del 11,6%. Específicamente, en el caso de alta iluminación, el error medio en la estimación de la superficie (en comparación con una segmentación manual) fue del 19,7%, 8,2% en el caso de iluminación baja, 8,6% en el caso de oclusión de menos de 33%, 12,2% para la oclusión de entre 34 y 66%, y 23% en el caso de oclusión mayor que 66%. Los resultados obtenidos muestran que existe una correlación entre el porcentaje de oclusión y la precisión de la segmentación realizada.

Se ha propuesto un procedimiento para estimar el diámetro de la fruta. La conclusión general es que el diámetro de la fruta calculado midiendo la distancia mayor entre los píxeles que definen el contorno de una fruta entera en una imagen, es en general, muy similar a la longitud del eje mayor de la acotación de una elipse sobre los puntos. Sin embargo, mediante la aplicación de un nivel a los residuos obtenidos en el ajuste no lineal, algunos píxeles del contorno pueden descartarse en un segundo ajuste para obtener una nueva estimación del diámetro. Si ambas longitudes de los ejes mayores son similares, la fruta no tiene oclusión y ambos valores se pueden utilizar como una estimación de diámetro; si la longitud del eje mayor es mayor cuando se descartan algunos píxeles del contorno, entonces la oclusión será de hasta 33% y el resultado del segundo ajuste debe ser desechado; y si la longitud del eje mayor es menor cuando se descartan algunos píxeles del contorno, entonces la oclusión será mayor que un 66% y no se puede realizar ninguna estimación del diámetro.

En el futuro, los esfuerzos se centrarán en la definición automática de los modelos de color lineales y el análisis de dicha aplicación en otras frutas frescas.

8.4. Detección de marcas mediante el procesamiento de imágenes RGB: desarrollo de un sistema compacto

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema compacto de detección de fruta en tiempo real para ser utilizado en futuras máquinas robotizadas optimizadas para la recolección de fruta. El procesador seleccionado requiere de muy poca energía, opera con un rendimiento muy alto y se basa en una propuesta de núcleo ARM en constante evolución inicialmente diseñado para el mercado de los SmartPhones. La cámara de color seleccionada también requiere de muy poca energía y genera imágenes de gran calidad con alta iluminación natural. La cámara tiene una matriz de imagen interna de 640x480 píxeles y puede ser configurada para generar las imágenes de 320x240 píxeles requeridas por el sistema en modo normal o zoom. Además, el uso de formatos de imagen específicos, tales como RGB565, limita la ocupación de la memoria a 150 KB y también reduce la ocupación de la memoria de las LUTs de segmentación utilizadas para detectar paraguayos en las imágenes.

Los experimentos de validación realizados con el sistema compacto propuesto han demostrado que la localización de un paraguayo puede actualizarse 10 veces por segundo, y que el uso de las diferentes tablas de búsqueda optimizadas para el formato de imagen RGB565 genera muy pocos píxeles de ruido en la imagen segmentada (menos del 11%). Además, el error promedio de la estimación del tamaño del paraguayo es menor al 10% cuando la fruta analizada no presenta oclusión.

El trabajo futuro se centrará en la evaluación de cámaras de color de alta resolución para explorar la definición de diferentes operaciones de zoom, manteniendo el tamaño QVGA de las imágenes adquiridas y la velocidad de funcionamiento del sistema compacto. El trabajo futuro también se centrará en la miniaturización del sistema compacto con el fin de incorporar el sistema

directamente sobre la pinza de un brazo robotizado diseñado especialmente para la recolección de fruta.

Lista de símbolos y abreviaciones

A/D	Analog to Digital
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
FPGA	Field Programmable Gate Array
IR	Infrared
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	Light Detection and Ranging
LMS	Least Mean Squares
PIXEL	Picture Element
QVGA	Quarter Video Graphics Array
RGB	Red, Green, Blue
TOF	Time of flight
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolet
VGA	Video Graphics Array