



Universitat de Lleida

# Propuesta de nuevas aplicaciones instrumentales basadas en el análisis de la información proporcionada por cámaras y sistemas láser

Tomàs Pallejà Cabré

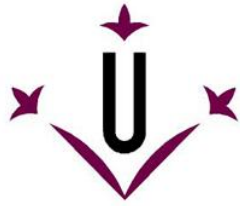
---

**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](http://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](http://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](http://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.

---



Universitat de Lleida

# Propuesta de nuevas aplicaciones instrumentales basadas en el análisis de la información proporcionada por cámaras y sistemas láser

Memoria presentada por Tomàs Pallejà Cabré para optar al grado de Doctor por la Universitat de Lleida

Trabajo realizado en el Departamento de Informática e Ingeniería Industrial de la Universitat de Lleida, bajo la dirección del Dr. Jorge Palacín Roca.

Lleida, 4 de Mayo de 2011

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

## Propuesta de nuevas aplicaciones instrumentales basadas en el análisis de la información proporcionada por cámaras y sistemas láser

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

**Director de la Tesis:** Jorge Palacín Roca

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

**CERTIFICA:**

Que la memoria “Propuesta de nuevas aplicaciones instrumentales basadas en el análisis de la información proporcionada por cámaras y sistemas láser” presentada por Tomàs Pallejà Cabré para optar al grado de doctor se ha realizado bajo su supervisión.

Lleida, 4 de Mayo de 2011

*Un experto es aquel que ya ha  
cometido todos los errores  
posibles en una materia muy concreta*

**Niels Bohr**

*Y que harías si Dios hablara  
directamente a la cara y os dijera:  
Os ordeno que sean felices en el  
mundo mientras vivan  
¿Que harías entonces?*

**Richard Bach**

# Agradecimientos

---

En primer lugar agradecer a Jordi Palacín todo lo que ha hecho por mí, no tan solo como director de la tesis, sino como persona que ha confiado en mí y me ha respaldado durante toda mi vida universitaria. Así pues, gracias Jordi, por ser mi maestro, tutor, director y amigo.

En segundo lugar, agradecer el apoyo de mis compañeros de doctorado, Marcel, Mercè, y Davinia, con los que he compartido muchas publicaciones, charlas, almuerzos y risas.

Durante el doctorado han pasado por el laboratorio de Robótica muchos compañeros, a todos ellos me gustaría agradecer el buen ambiente de trabajo que hemos formado y el apoyo mutuo que nos ha permitido llevar a cabo todos nuestros objetivos.

Me gustaría dar las gracias a toda la gente que he hecho posible el proyecto HeadMouse, y muy concretamente dos personas que han pasado muchas horas entre sus líneas de código, gracias por vuestra paciencia y esfuerzo, Edgar y Albert.

Este agradecimiento también incluye a mis amigos, que han hecho de estos años una experiencia inolvidable.

Y para finalizar mi familia, que han confiado en mí más que yo y sin saber muy bien cómo me han conducido hasta aquí.

---



## **Resumen**

En esta memoria se presentan diversos trabajos de investigación relacionados con la robótica móvil y con diversas técnicas de medición que permiten obtener información de un entorno no estructurado mediante el uso de cámaras y sistemas láser de medida de distancias.

El uso de sensores permite que un robot móvil pueda obtener información de su entorno y realizar una planificación de trayectoria con el objetivo de conseguir un fin preestablecido. En esta memoria se presenta un trabajo que ha permitido crear un sistema de medición externa de la trayectoria de un robot móvil. Este sistema puede utilizarse como elemento externo de verificación de la trayectoria planificada por el propio robot y, aplicado al caso de robots de limpieza del suelo, permite estimar el grado de cobertura del suelo y obtener modelos de la eficacia del robot de limpieza.

Actualmente, la captura de información del entorno de un robot se basa principalmente en la utilización de sistemas de medida láser que actúan como elementos palpadores en un plano (láser bidimensional) o en un volumen (láser tridimensional). En esta memoria se presentan diversos trabajos basados en el análisis de la información aportada por un láser bidimensional para obtener información del entorno. Dichos trabajos han derivado en aplicaciones específicas como la medida del volumen de la biomasa de un conjunto de árboles, la medida y determinación de diversos parámetros originados por el andar de una persona y en la detección simplificada de obstáculos y objetos presentes en una determinada trayectoria. En éste último caso, el estado actual de la tecnología láser ha permitido proponer una nueva aplicación del sistema de detección de obstáculos y objetos como sistema de ayuda para personas ciegas o con visión reducida. Los resultados obtenidos en las diversas aplicaciones propuestas han demostrado la utilidad y versatilidad de los sistemas de medida basados la información obtenida de cámaras y de sistemas láser de medida de distancias.



## Summary

This memory introduces several research works related with robotic mobile and some measurement techniques that obtain information from an unstructured environment using cameras and laser range systems.

The use of sensors in a mobile robot allows the acquisition of information of the environment in order to plan a path to execute a specific task. This memory introduces a work that introduces a system to externally estimate the path of a mobile robot. This system can be used to verify the internal path planed by the mobile robot and, in the specific case of floor cleaning mobile robots, to estimate the coverage of the surface and the efficiency of the cleaning robot.

Currently, the information of the environment acquired by a mobile robot is based on the usage of laser measurement systems that operates as tactile elements in a plane (laser bidimensional) or in a volume (laser tridimensional). In this memory, several research works based on the analysis of the data provided by a bidimensional laser are presented. These works have evolved into specific applications as the estimate of tree volume biomass, gait parameters registration and analysis, and obstacle and objects detection as an aid system for blind or visual impairment people. The results obtained in the proposed applications have proved the utility and versatility of the new proposed applications based on the analysis of the information provided by cameras and laser distance sensors.



## Resum

En aquesta memòria es presenten diversos treballs d'investigació relacionats amb la robòtica mòbil i diverses tècniques de mesura que permeten obtenir informació d'un entorn no estructurat mitjançant l'ús de càmeres i sistemes làser de mesura de distàncies.

L'ús de sensors permet que un robot mòbil pugui obtenir informació del seu entorn i realitzar una planificació de trajectòria amb l'objectiu d'aconseguir un fi preestablert. En aquesta memòria es presenta un treball que ha permès crear un sistema de mesura extern de la trajectòria d'un robot mòbil. Aquest sistema es pot usar com element extern de verificació de la trajectòria planificada pel propi robot i, aplicada en el cas de robots de neteja del terra, permet estimar el grau de cobertura del terra i obtenir models de la eficàcia del robot de neteja.

Actualment, la captura d'informació de l'entorn d'un robot es basa principalment en la utilització de sistemes de mesura làser que actuen com elements palpadors en un pla (làser bidimensional) i en un volum (làser tridimensional). En aquesta memòria es presenten diversos treballs basats en l'anàlisi de la informació aportada per un làser bidimensional per obtenir informació del entorn. Aquest treballs han derivat en aplicacions específiques com la mesura del volum de biomassa d'un conjunt d'arbres, la mesura i determinació de diversos paràmetres originats pel caminar d'una persona i en la detecció simplificada d'obstacles i objectes en una determinada trajectòria. En aquest últim cas, l'estat actual de la tecnologia làser ha permès proposar una nova aplicació del sistema de detecció d'obstacles i objectes com un sistema d'ajuda per persones cegues o amb visió reduïda. Els resultats obtinguts amb les diverses aplicacions proposades han demostrat la utilitat i versatilitat dels sistemes de mesura basats en visió artificial i en mesura de distàncies mitjançant sensors làser.





**A/D** Analog to Digital

**BRF** Brush Relative Factor

**CCD** Charge Coupled Device

**CMOS** Complementary Metal Oxide Semiconductor

**CS** Cylindrical surface method

**IR** Infrared

**LASER** Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

**LB** Laser beam model method

**LED** Light-Emitting Diode

**LIDAR** Light Detection and Ranging

**LMS** Least Mean Squares

**LU** Laser beam with unitary amplitude method

**PIXEL** Picture Element

**QVGA** Quarter Video Graphics Array

**RFID** Radio Frequency IDentification

**RGB** Red, Green, Blue

**ROF** Radial Occlusion Factor

**TOF** Time of flight

**USB** Universal Serial Bus

**UV** Ultraviolet

**VGA** Video Graphics Array

**XYP** Cartesian projection method

**XYS** Cartesian surface method

## Capítulo I: Objetivos

1.1. Objetivo general .....	1
1.2. Objetivos complementarios .....	1
1.2.1. Trabajos basados en sistemas de visión artificial.....	1
1.2.2. Trabajos basados en sistemas de medida láser.....	2

## Capítulo II: Introducción

2.1. Introducción .....	3
2.2. Sistemas de visión .....	8
2.2.1. Sistema digital de adquisición de imágenes.....	8
2.2.2. Sensores de imagen de estado sólido .....	10
2.2.3. Captura del color .....	12
2.2.3.1 Sistemas con prismas y tres sensores.....	13
2.2.3.2 Sistemas con filtro Bayer.....	14
2.2.4. Imagen digital.....	15
2.3. Sistema digital de medida de distancias.....	16
2.3.1 Sistema de medida láser .....	18
2.3.1.1 Características físicas de la emisión láser.....	19
2.3.1.2 Generación de radiación láser.....	20
2.3.1.3 Sistema LIDAR .....	21
2.3.1.4 Sistema LIDAR bidimensional.....	22
2.4. Referencias .....	25

## Capítulo III: Medición de la Trayectoria de Robots Móviles

3.1. Introducción .....	27
3.2. Aportaciones al estado del arte.....	27
3.3. Referencias .....	29
3.4 Artículo: <i>Modeling floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots in a reduced scenario</i> .....	30
1. Introduction .....	30
2. Measurement system.....	32
3. Modeling floor-cleaning coverage .....	35
4. Conclusions .....	48
Acknowledgment .....	49

References .....	49
 <b>Capítulo IV: Error en el Cálculo del Volumen de la Biomasa</b>	
4.1. Introducción .....	51
4.2. Aportaciones al estado del arte.....	53
4.3. Referencias .....	55
4.4 Artículo: <i>Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner</i> .....	56
1. Introduction .....	56
2. Tree volume estimate .....	60
2.1. Cartesian surface.....	64
2.2. Cylindrical surface.....	64
2.3. Laser beam model.....	64
2.4. Laser beam with unitary amplitude .....	65
2.5. Simple Cartesian projection.....	65
2.6. Results and discussion .....	65
3. Sensitivity to trajectory error sources .....	66
3.1. Error in the speed.....	68
3.2. Error in the height of the LIDAR .....	69
3.3. Error in the relative distance to the tree-row .....	70
3.4. Error in the angle of orientation of the LIDAR .....	71
3.5. Discussion.....	72
4. Conclusions .....	72
Acknowledgements .....	73
References .....	73
 <b>Capítulo V: Medición de la Forma de Caminar</b>	
5.1. Introducción .....	75
5.2. Aportaciones al estado del arte.....	78
5.3. Referencias .....	80
5.4 Artículo: <i>Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor</i> .....	82
1. Introduction .....	82
2. Measurement System .....	83
2.1. Laser Range Sensor .....	83

2.2. Range measurement.....	85
2.3. Estimating the Position of the Legs.....	86
2.4. Step-Line Model of the Gait.....	91
3. Results.....	92
4. Conclusions and Future Work.....	94
References and Notes.....	94

## Capítulo VI: Sensor Láser como alternativa al Bastón Blanco

6.1. Introducción.....	96
6.2. Aportaciones al estado del arte.....	98
6.3. Referencias.....	101
6.4 Artículo: <i>Bioinspired Electronic White Cane Implementation Based on a LIDAR, a Tri-axial Accelerometer and a Tactile Belt</i> .....	102
1. Introduction.....	102
1.1. Related work.....	103
1.2. Contribution of this work.....	103
2. Materials and Methods.....	104
2.1. Test subjects.....	104
2.2. Instrumentation.....	104
2.2.1. LIDAR.....	104
2.2.2. Accelerometer.....	105
2.2.3. Electromechanical device.....	105
3. Electronic White Cane Proposal.....	105
3.1. Estimating forearm orientation.....	107
3.2. Floor mode operation.....	110
3.3. Frontal mode operation.....	117
3.4. Tactile Belt.....	117
4. First Validation Results.....	118
5. Conclusions.....	119
References and Notes.....	120

**Capítulo VII: Discusión Global de los Resultados .....121**

**Capítulo VIII: Conclusiones Finales**

8.1 Medición de la Trayectoria de Robots Móviles .....	124
8.2 Error en el Cálculo del Volumen de la Biomasa .....	125
8.3 Medición de la Forma de Caminar .....	126
8.4 Sensor Láser como alternativa al Bastón Blanco .....	127

### Tablas

4.1	Diferentes fuentes de error implicadas en el cálculo del volumen de la biomasa .....	54
-----	--	----

### Figuras

2.1	Diagrama de los trabajos realizados durante la realización de la tesis .....	4
2.2	Esquema de un sistema de visión, donde la cámara transforma la luz en un conjunto de bytes interpretables por el sistema de procesado. ....	8
2.3	Esquema de una cámara fotográfica digital con filtro Bayer. ....	9
2.4	Imagen en color (a), imagen en escala de grises (b) e imagen infrarroja (c).....	9
2.5	Izquierda, sensor CCD y derecha, sensor CMOS.....	10
2.6	Frecuencia y longitud de onda de la radiación electromagnética. El silicio es sensible entre 300 nm y 1100 nm, cubriendo completamente el rango de luz visible (de 380 nm a 750nm). ....	12
2.7	Los diagramas muestran de forma esquematizada la trayectoria de la luz desde la lente de la cámara hasta los tres sensores. ....	13
2.8	El diagrama muestra de forma esquematizada la trayectoria de la luz desde la lente de la cámara hasta el sensor óptico pasando por el filtro Bayer.....	14
2.9	El filtro Bayer, situado delante del sensor óptico, asigna a cada fotodiodo la información relativa a un color primario. Interpolando la información de cada celda con las celdas vecinas se estima el valor de los dos otros colores primarios. ....	15
2.10	Imagen en color de 144 píxeles (12x12). La fila inferior muestra los niveles de intensidad de cada capa RGB por separado, codificando los valores numéricos (0-255) con una escala de grises, donde el 0 equivale al negro y el 255 al blanco .....	16
2.11	Ejemplo de sensor de distancia ultrasónico (a) y propagación de una onda sónica en el medio (b) .....	17
2.12	Sensor infrarrojo de distancias (a) y su esquema de funcionamiento (b).....	18
2.13	1) Medio activo para la formación del láser, 2) energía bombeada, 3) espejo reflectante al 100%, 4) espejo parcialmente reflectante y 5) emisión del rayo láser .....	20
2.14	La onda roja simboliza el haz láser emitido y la onda azul el retorno hasta el sensor. El ejemplo muestra 3 ciclos enteros (ambigüedad) y el desfase ( $\varphi$ ) entre la emisión y la recepción. Conociendo N, T y $\varphi$ se puede calcular con precisión la distancia (D).....	22

2.15	Láser SIK LMS200 (izquierda) y el esquema interno de sus componentes (derecha).	23
2.16	Imagen interior del láser 2D Hokuyo URG. El rayo emitido se refleja en un espejo giratorio y el reflejado incide sobre la lente del receptor que lo redirige hacia el sensor situado en el interior del rotor del motor	23
2.17	a) Plano de exploración de un láser 2D en un pasadizo y b) representación cartesiana de los datos obtenidos tras realizar un barrido en a).	24
3.1	Robots móviles analizados: a) Roomba, b) RC 3000, c) Trilobite y d) RoboNet.	28
3.2	Modelo de la evolución del área limpiada.	29
4.1	Láser bidimensional (punto rojo) y representación del plano de medición (izquierda). Representación tridimensional de los datos obtenidos en el caso de 3 perales (derecha).	52
4.2	Izquierda: distancia ( $\Delta W$ ) entre dos escaneos consecutivos a partir de una velocidad de avance $v$ . Derecha: distancia real ( $\Delta W'$ ) entre escaneos consecutivos a partir de una velocidad de avance $v + error$	53
4.3	Reconstrucción tridimensional de una exploración realizada en condiciones ideales (izquierda) y con un error de inclinación simulado (derecha).	55
5.1	Parámetros que definen la forma de andar de las personas	75
5.2	Segmentar referencias (columna izquierda). Segmentar cuerpo entero (columna derecha).	76
5.3	Sensor láser bidimensional acoplado a un vehículo móvil como sistema de seguridad activa.	77
5.4	Persona caminando hacia el sensor láser. Escaneo vertical ligeramente desplazado del centro de la persona.	78
5.5	Persona andando hacia el sensor láser, vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha).	79
5.6	Ejemplo de ajuste por mínimos cuadrados entre los puntos del escaneo y el contorno de dos círculos que representan las piernas	79
6.1	Bastón blanco (izquierda) y perro guía (derecha).	96
6.2	Sistema operando en modo detección de obstáculos, el brazo del usuario está inclinado respecto al horizonte unos $45^\circ$	99
6.3	Conjunto de puntos obtenidos en un barrido. La línea roja representa la intersección entre el plano del láser y el suelo. Las dos líneas discontinuas marcan los límites seguridad para la detección de obstáculos.	100

**Modeling floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots in a reduced scenario**

*Tablas*

1	Structural parameters of the selected mobile robots.....	32
2	Image and Area of the different case-configuration of the cleaning scenario.....	44
3	Mono-exponential cleaning model obtained by LMS.....	44
4	Model parameters of the mobile robots analyzed.....	48

*Figuras*

1	Mesh representation of the gray-level values in one corner of one reference (or ground) frame: the white walls corresponds to he highest intensity and the dark floor to the lowest. ....	34
2	Typical QVGA image of RoboNet (left) and absolute intensity image after ground subtraction (right: the gray-levels are inverted for easy printing). ....	34
3	Illustration example of the polygonal structure (dark filled) used to estimate the area covered by the cleaning device form the mobile robot coordinates $(x,y,\alpha)$ obtained in frames $\{n, n+1, n+2\}$ . ....	35
4	RC 3000: snapshots of the trajectory at $\{0.2\ 2\ 5\ 10\}$ minutes (left) and corresponding cleaning path and coverage (right).....	36
5	Trilobite: snapshots of the trajectory at $\{0.2\ 2\ 5\ 10\}$ minutes (left) and corresponding cleaning path and coverage (right).....	37
6	RoboNet: snapshots of the trajectory at $\{0.2\ 2\ 5\ 10\}$ minutes (left) and corresponding cleaning path and coverage (right).....	38
7	Roomba: snapshots of the trajectory at $\{0.2\ 2\ 5\ 10\}$ minutes (left) and corresponding cleaning path and coverage with the additional frontal cleaning brush (center) and without (right). ....	39
8	Evolution of the distance ran by the selected mobile robots .....	40
9	Dynamic evolution of the total ground-area cleaned with the selected mobile robots .....	40
10	Dynamic evolution of the total ground-area cleaned with the selected mobile robots .....	41
11	Additional lateral rotating brush included in Roomba to increase floor-cleaning coverage .....	42





# ÍNDICE ARTÍCULOS

## *Tablas y Figuras*

---

12	Representation of the radial distance, $rb$ , and the external radius, $r$ , for RoboNet.....	42
13	Figures of merit of the selected cleaning mobile robots. Solid markers where computed considering only the effect of the main cleaning device while empty markers includes the effect of additional rotating brushes.....	43
14	Measured cleaning evolution and estimated using the exponential model obtained for RoboNet and Case A.....	45
15	Measured evolution of the cleaned area for Roomba <sup>1</sup> in the different scenario cases considered.....	45
16	Spectra of all exponentials shown in table III.....	46
17	Dependence between the distance constant of the exponential evolution, $Td$ , and the scenario size (dotted line depicts regression data) for the RC 3000.....	47
18	Dependence between the amplitude of the exponential evolution, AMAX, and the scenario size (dotted line depicts regression data) for the RC 3000.....	47

**Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner**

*Tablas*

1	Angular resolution modes of the LMS-200 .....	61
2	Case examples of the methods used to calculate the area $S_{ij}$ inside a predefined measurement box (solid line) .....	63
3	Representation of a correct (reference) scan procedure and different trajectory error sources .....	67

*Figuras*

1	LIDAR placed on the back of a tractor.....	59
2	Front view representation of a scanning procedure.....	60
3	Typical three-dimensional representation of the raw data obtained by a LIDAR after scanning pear trees with: $HS = 2100$ mm, $D = 1470$ m, $F = 0.322$ m/s, $\Delta t = 13.33$ ms, $\Delta W = 31$ mm .....	62
4	Relationship between the volume estimates obtained with the XYP method and the foliage surface. The linear fitting of the data is also shown.....	66
5	Sensitivity between volume estimate and speed of the LIDAR .....	68
6	Sensitivity between volume estimate and height of the LIDAR .....	69
7	Sensitivity between volume estimate and distance from the LIDAR to the tree-row.....	70
8	Sensitivity between volume estimate and angle of orientation of the LIDAR.....	71

## Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor

### *Tablas*

1	Hokuyo UTM-30LX Specifications .....	84
---	--------------------------------------	----

### *Figuras*

1	Hokuyo UTM-30LX.....	83
2	Histogram of the error in the distance measured: target at 8m, angle 0° .....	85
3	Left: evolution of the standard deviation relative to the distance (at angle 0°). Right: relationship between the standard deviation relative to the speed (at 5 m, angle 0°) .....	86
4	Example of the set of a typical gait measurement .....	86
5	Left: typical scan data showing two legs of a walking volunteer. Right: estimation of the number of measurement points available in one leg relative to the distance .....	87
6	Example of fitting results for two legs at 2.4 (left), and 4.4 m (right) .....	89
7	Example of an outlier point originated by the detection of the shoe .....	89
8	Evolution of the systematic absolute error of the averaged estimated position of the centre of the legs relative to the distance.....	90
9	Evolution of the standard deviation of the estimated position of the centre of the legs relative to the distance.....	90
10	Example of trajectory of the legs estimated from the raw data .....	91
11	Left: leg displacement while walking. Right: detail of the step-line model .....	92
12	Left: Speed of the leg in the swing phase relative to the step. Right: Average swing phase speed relative to the average body speed .....	93
13	A) Average step width, B) average body speed in steps per second, C) average swing phase time, and D) average stance phase time relative to the average body speed.....	93

**Bioinspired Electronic White Cane Implementation Based on a LIDAR, a Tri-axial Accelerometer and a Tactile Belt**

*Tablas*

1	Detail of different vertical inclinations measured with the accelerometer when raising the user's forearm. ....	109
2	Images of four events and its detection (right) through the analysis of the frontal line.....	116
3	Detection results of the electronic white cane operating in floor mode .....	118

*Figuras*

1	Laser URG-04LX (left) and measurable range (right) .....	104
2	Miniature push solenoid with the stroke released (scale in cm).....	105
3	Image of the element that carries the LIDAR and the accelerometer of the electronic white cane and a representation of the scan of an obstacle in the walking path of the user.....	106
4	Representation of the electronic white cane operating in floor mode: (a) vertical inclination angle $\alpha$ , (b) horizontal orientation angle $\beta$ , and (c) distance, $d$ , to the line defined by the intersection of the scan plane and the floor.....	106
5	Representation of the electronic white cane operating in frontal mode: (a) general representation and (b) distance to the main obstacle .....	107
6	Absolute error in the estimation of the vertical and horizontal inclination .....	108
7	Acceleration data obtained when raising the forearm. Table 1 show positions A, B, C & D.....	108
8	Raw sensor data for each axis and sensor inclination estimate during operation with the electronic white cane .....	110
9	Example of LIDAR scan obtained in floor mode with an obstacle in the walking path.....	111
10	Representation of the procedure used to estimate the frontal line: (a) line obtained with all scan points, (b) final line obtained with the outliers removed .....	111
11	Three-dimensional representation example of the LIDAR scan plane in a forward walking.....	112
12	Distance user-frontal line obtained in the experiment of Figure 11 .....	113
13	Inclination of the frontal line $\gamma$ corresponding to the experiment of Figure 11.....	113



---

14	Maximum incremental values of the distance (up) and relative angular orientation (down) of the frontal line for different distance ranges .....	114
15	Up (left) and down (right) stairs detected with the electronic white cane.....	114
16	Distance to the frontal line obtained in one down stairs experiment (Figure 14-right).....	115
17	Distance to the frontal line obtained in one up stairs experiment (Figure 14-left) .....	115
18	Example of partial scans analyzed in frontal mode. The closest obstacle (left at 4,188 mm, right at 1,795 mm) is located and labeled with a red circle .....	117
19	Representation of the tactile belt with seven miniature actuators and the control box .....	118

### 1.1 Objetivo general

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de nuevos sistemas de análisis del entorno a partir de la información obtenida mediante sistemas de visión y sistemas digitales de medida de distancias.

A partir de los sistemas de análisis desarrollados se pretende implementar aplicaciones que contribuyan a mejorar el estado del bienestar de la sociedad.

### 1.2 Objetivos complementarios

Para llevar a cabo el objetivo general se han desarrollado trabajos con los siguientes objetivos complementarios.

#### *1.2.1 Trabajos basados en sistemas de visión artificial*

Los objetivos complementarios en los trabajos realizados a partir del análisis de la información proporcionada por cámaras han sido:

- Crear un sistema de visión artificial que permita obtener una estimación de la evolución de la superficie del suelo cubierta por el movimiento de un pequeño robot móvil de limpieza.
- Crear un sistema de visión artificial que estime la orientación y los gestos faciales de un usuario con el fin de implementar un dispositivo de accesibilidad que permita a una persona con problemas de movilidad controlar el cursor de un ordenador.

#### *1.2.2 Trabajos basados en sistemas de medida láser*

Los objetivos complementarios en 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 sensibilidad de la medición del volumen de un árbol realizada con un sistema láser bidimensional frente a diversas fuentes de error relacionadas con el desplazamiento del láser.
- Crear un sistema de análisis que permita estimar los valores de los parámetros que definen la forma de caminar de una persona a partir de los datos obtenidos con un sensor láser bidimensional.
- Crear un sistema de análisis que permita analizar la información suministrada por un sensor láser bidimensional para implementar un sistema de guía y ayuda para personas con problemas de visión.

## 2.1 Introducción

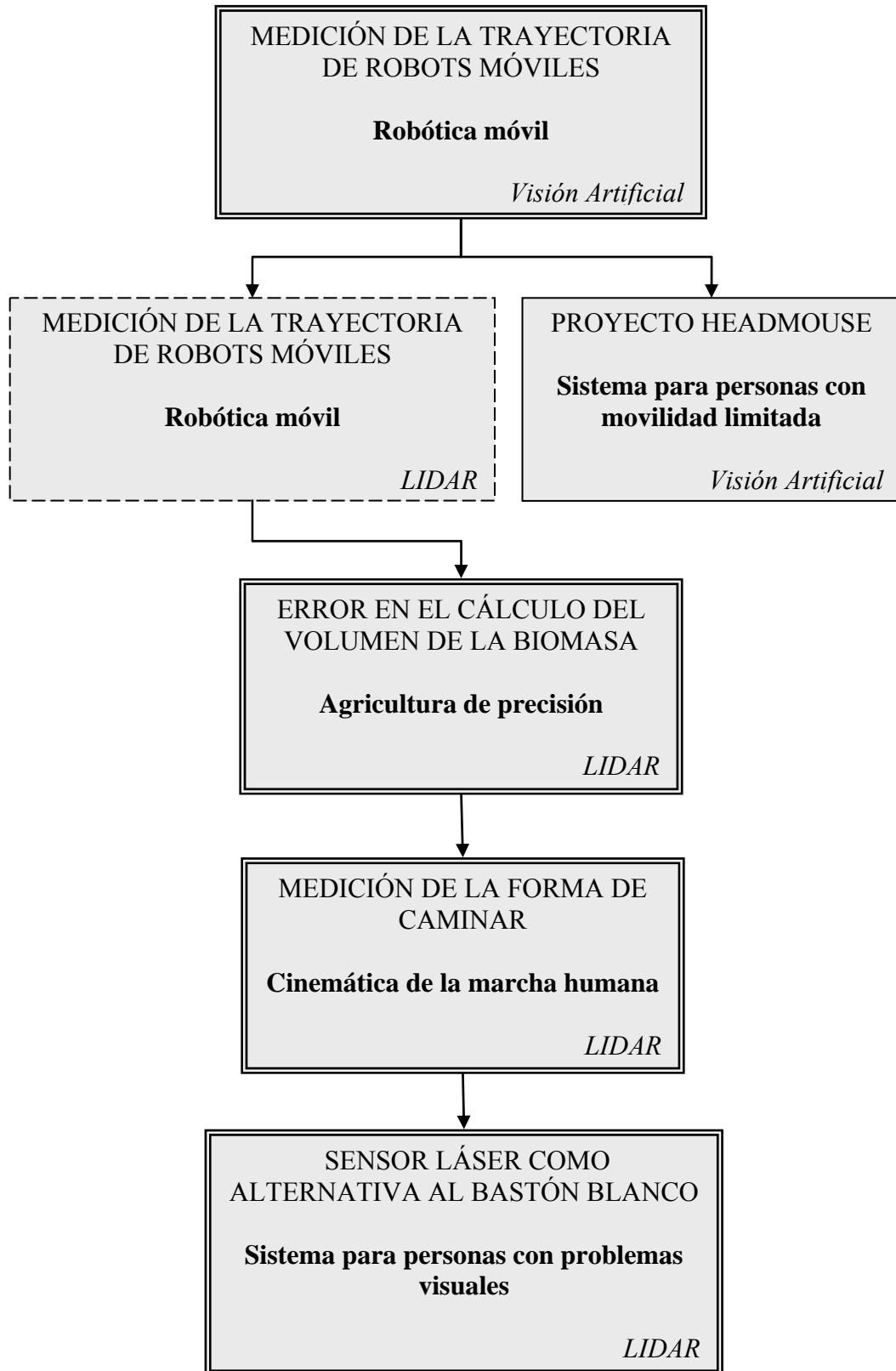
Este trabajo propone la utilización de distintos sensores para obtener información del entorno con el objetivo de desarrollar nuevos sistemas y aplicaciones cuyo fin es aportar soluciones que contribuyan a mejorar el bienestar general de individuos y sociedades.

El diagrama de la figura 2.1 muestra la línea de trabajo de esta tesis doctoral. Se ha utilizado un recuadro discontinuo para indicar un trabajo previsto que o bien no han sido culminado o bien no ha producido publicaciones; se ha utilizado un recuadro continuo para indicar un trabajo realizado que ha producido publicaciones que no se encuentran descritas en esta tesis; se ha utilizado un recuadro doble para indicar un trabajo realizado que ha producido publicaciones que se encuentran descritas en esta tesis.

Inicialmente, y siguiendo una de las principales líneas de investigación del Laboratorio de Robótica de la UdL, se realizó la estimación de la medida de la superficie explorada por un robot autónomo mediante un sistema de visión para evaluar la eficiencia de diversos robots de limpieza del suelo. El desarrollo de este trabajo ha generado las siguientes publicaciones.

- T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, J. Palacin, “Modeling floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots in a reduced scenario”, *Robotics and Autonomous Systems*, 58 (2010), 37-45.
- M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, “Estimating a room size using encoders and collision detectors: application to a cleaning mobile robot”, *Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP'2007)*, pp. 771-776, Alcalá de Henares, Spain, October 2007
- J. Palacin, T. Palleja, I. Valgañón, R. Pernia, J. Roca, “Measuring Coverage Performances of a Floor Cleaning Mobile Robot Using a Vision System”, in *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pp. 4247-4252, Barcelona, Spain, April 2005.





**Fig. 2.1:** Diagrama de los trabajos realizados durante la realización de la tesis.

A partir de este trabajo inicial se propusieron dos líneas de investigación diferentes, por un lado, se planteo repetir la estimación de la medida de la superficie explorada por un robot autónomo utilizando un sistema de medida diferente basado en el uso de sensores láser y, por otro lado, se propuso aplicar algunos algoritmos de visión artificial para crear un software de accesibilidad para que una persona con problemas de movilidad pueda controlar el desplazamiento del cursor del ordenador mediante movimientos de la cabeza y gestos faciales. El trabajo relacionado con el desarrollo de un sistema de medida basado en la utilización de sensores láser no pudo ser completado mientras que el trabajo de creación del software de accesibilidad ha generado las siguientes publicaciones:

- T. Palleja, E. Rubion, M. Teixido, M. Tresanchez, A. Fernandez del Viso, C. Rebate, J. Palacin, “Simple and Robust Implementation of a Relative Virtual Mouse Controlled by Head Movements”, *Proceedings of the 2008 IEEE Conference on Human System Interaction (HSI 2008)*, pp. 1124-1127, Krakow, Poland, May 2008.
- T. Palleja, E. Rubion, M. Teixido, M. Tresanchez, A. Fernandez del Viso, C. Rebate, J. Palacin, “Using the Optical Flow to Implement a Relative Virtual Mouse controlled by Head Movements”, *Journal of Universal Computer Science*, 14 (2008), 3127-3141.
- T. Palleja, E. Rubion, M. Teixido, M. Tresanchez, A. Fernandez del Viso, C. Rebate, J. Palacin, “Ratón Virtual Relativo Controlado con los Movimientos de la Cabeza”, *Actas del IX Congreso Internacional de Interacción Persona-Ordenador (INTERACCION 2008)*, pp. 305-314, Albacete, España, Junio 2008.
- T. Palleja, E. Rubion, M. Teixido, M. Tresanchez, A. Fernandez del Viso, C. Rebate y J. Palacin, “Implementación de un ratón virtual relativo a partir de la obtención del flujo óptico de la cabeza del usuario”, *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'09)*, 4B-1, Leganés, España, Julio 2009.

- T. Palleja, A. Guillamet, M. Tresanchez, M. Teixido, A.F. del Viso, C.Rebate, J. Palacín, “Implementation of a robust absolute virtual head mouse combining face detection, template matching and optical flow algorithms”, *Telecommunication Systems Journal*, Accepted, 2011.

Como consecuencia de los trabajos de medición basados en la utilización de sensores láser se propuso utilizar dichos sistemas para obtener una estimación del volumen y masa foliar de árboles frutales. El desarrollo de este trabajo ha generado las siguientes publicaciones:

- J. Palacin, T. Palleja, M. Tresanchez, R. Sanz, J. Llorens, M. Ribes-Dasi, J. Masip, J. Arno, A. Escola, J.R. Rosell, “Real-Time Tree-Foliage Surface Estimation Using a Ground Laser Scanner”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56 (2007), 1377-1383.
- J. Palacin, T. Palleja, M.Tresanchez, M. Teixido, R. Sanz, J. Llorens, J. Arno, J.R. Rosell, “Difficulties on Tree Volume Measurement from a Ground Laser Scanner”, *Proceedings of the 25th IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2008)*, pp. 1997-2002, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12–15, 2008.
- J.R. Rosell, R. Sanz, J. Llorens, J. Arno, A. Escola, M. Ribes-Dasi, J. Masip, F. Camp, F. Gracia, F. Solanelles, T. Palleja, Luis Val, S. Planas, E. Gil, J. Palacin, “A tractor mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements”, *Biosystems Engineering*, 102 (2009), 128-134.
- T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, R.Sanz, J.R. Rosell, J.Palacin, “Sensitivity of Tree Volume Measurement to Trajectory Errors from a Terrestrial LIDAR Scanner”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (2010), 1420-1427.

El trabajo realizado con sensores láser permitió abrir nuevas líneas de trabajo basadas en la propuesta de nuevas aplicaciones creadas a partir de dichos sensores. Se propuso aprovechar las posibilidades de los sensores láser para realizar la medida de los parámetros que definen la forma de andar de un individuo. El desarrollo de este trabajo ha generado las siguientes publicaciones:

- T. Palleja, M. Teixido, M. Tresanchez, J. Palacin, “Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor”, *Sensors*, 9 (2009), 9133-9146.
- M. Teixido, T. Palleja, M. Tresanchez, M. Nogues, J. Palacin, “Utilización de un sensor laser 2D para la medición de la forma de caminar”, *Actas del Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'10)*. pp. 610–615, Bilbao, España, Julio 2010.
- M. Teixido, T. Palleja, M. Tresanchez, M. Nogués, J. Palacin, “Measuring Oscillating Walking Paths with a LIDAR”, *Sensors*, 11(2011), 5071-5086.

Finalmente se propuso utilizar un sensor láser como alternativa al bastón blanco utilizado por las personas con problemas de visibilidad y utilizarlo para detectar el suelo, obstáculos que se encuentren en el camino, escaleras, etc., transmitiendo la información necesaria al usuario mediante un cinturón vibratorio. El desarrollo de este trabajo ha generado la siguiente publicación:

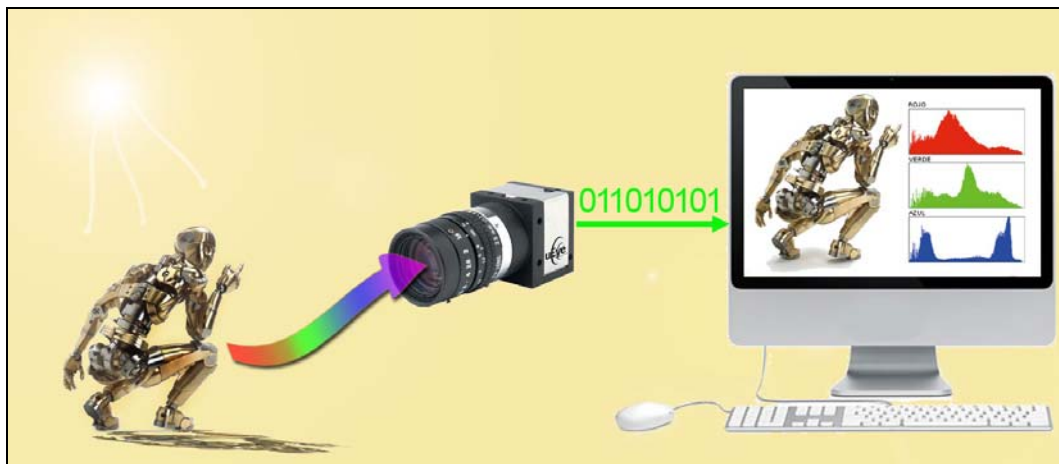
- T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, J. Palacin, “Bioinspired Electronic White Cane Implementation Based on a LIDAR, a Tri-Axial Accelerometer and a Tactile Belt”, *Sensors*, 10 (2010), 11322-11339.

El desarrollo de los trabajos realizados en esta tesis se ha basado en la utilización de sistemas de visión y sistemas medida de distancias. La información generada por estos sensores ha sido procesada mediante diversos algoritmos específicos para poder cumplir con los diversos objetivos de cada trabajo realizado. A continuación se presenta una breve introducción a dichos sistemas de medida.

## 2.2. Sistemas de visión

En este apartado se expone el concepto de sistema de visión y se describe el funcionamiento de los sistemas digitales de adquisición de imagen.

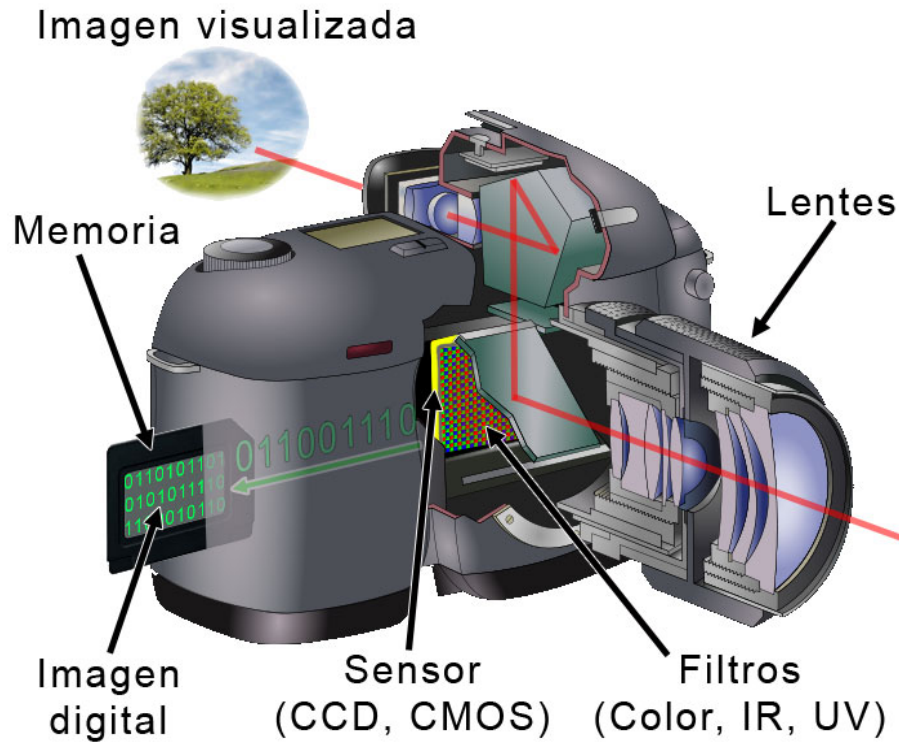
Un sistema de visión es un conjunto de elementos que permiten obtener imágenes del entorno, procesarlas y tomar ciertas decisiones basadas en la evaluación de la imagen adquirida. Está formado por un sistema digital de adquisición de imágenes y un sistema de procesado (fig. 2.2). La cámara se encarga de transformar la información luminosa del entorno en información eléctrica y el sistema de procesado se encarga de interpretar dicha información.



**Fig. 2.2:** Esquema de un sistema de visión, donde la cámara transforma la luz en un conjunto de bytes interpretables por el sistema de procesado.

### 2.2.1. Sistema digital de adquisición de imágenes

Los sistemas de digitalización de imagen son comunes en todos los dispositivos utilizados para transformar la información luminosa del entorno en información eléctrica, la cual puede ser almacenada en forma de bytes o enviada directamente a un sistema de procesado. Los dispositivos más utilizados que incorporan este sistema son las cámaras fotográficas (fig. 2.3), las videocámaras, los teléfonos móviles y las webcams.



**Fig. 2.3:** Esquema de una cámara fotográfica digital con filtro Bayer.

De forma general la luz blanca procedente del sol (o generada de forma artificial) ilumina una escena y la luz reflejada es captada y digitalizada con un sistema de adquisición de imágenes. La luz reflejada incide sobre la lente de la cámara y es dirigida hacia distintos filtros que pueden estar presentes o no en función del tipo de imagen que se desea obtener (fig. 2.4).



**Fig. 2.4:** Imagen en color (a), imagen en escala de grises (b) e imagen infrarroja (c).

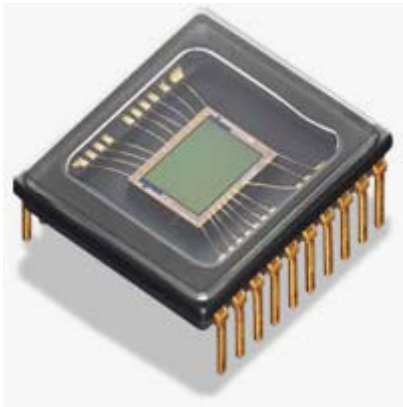
Seguidamente la luz incide sobre el sensor óptico que transforma la intensidad de luz en carga eléctrica. Finalmente, el convertor A/D traduce esta carga eléctrica en una cadena de bytes, los cuales pueden ser almacenados en una memoria digital o enviados directamente al sistema de procesado.

### 2.2.2. Sensores de imagen de estado sólido

Actualmente existen dos tipos de sensores ópticos destinados a las cámaras digitales: los CCD, que fueron los primeros en aparecer en el mercado, y los más recientes CMOS. Tanto los sensores CCD (fig. 2.5, a) como los CMOS (fig. 2.5, b) están fabricados con materiales semiconductores y están estructurados en forma de matriz de celdas, con filas y columnas. Ambos sensores funcionan acumulando una carga eléctrica en cada celda (fotodiodo [1]) de la matriz que es proporcional a la intensidad de la luz que incide sobre ella. A mayor intensidad luminosa, mayor carga acumulada.

No obstante, existen diferencias notables entre ambas tecnologías; la CCD convierte las cargas de cada celda en voltajes que deben leerse de forma secuencial mediante el uso de una circuitería adicional externa. De esta manera, la estructura del sensor es simple a costa de la necesidad de una circuitería adicional importante que se encargue del tratamiento de los datos recogidos por el sensor.

a)



b)



**Fig. 2.5:** Izquierda, sensor CCD y derecha, sensor CMOS.

Por el contrario, las celdas de la matriz CMOS pueden accederse de forma aleatoria y la lectura del voltaje puede hacerse con un convertor integrado en el propio chip por lo que las necesidades de circuitería exterior se minimizan.

Para realizar la comparación de las imágenes obtenidas con un sensor CMOS y otro CCD se deben tener en cuenta los siguientes factores:



- **Responsividad:** Se define con este término al nivel de señal que es capaz de ofrecer el sensor por cada unidad de energía óptica incidente. Dado que interesa que el sensor tenga una responsividad elevada, se necesita que poca cantidad de luz ofrezca una señal aceptable.
- **Rango Dinámico:** Es el cociente entre el nivel de saturación de los píxeles y el umbral por debajo del cual no se capta señal. En este aspecto la tecnología CCD supera a la CMOS en un factor de dos.
- **Ruido:** Los sensores CCD aventajan a los de tecnología CMOS en este apartado ya que, debido a su construcción, todo el procesado de señal se realiza fuera del CCD, lo que permite aprovechar la mejor tecnología disponible en convertidores A/D. Por otra parte, a igual tamaño de chip el área de la superficie sensible es inferior en los sensores CMOS ya que incorporan la gran mayoría de las funciones auxiliares dentro del sensor (amplificación, conversión A/D, etc.) por lo que se produce más ruido en la lectura.
- **Respuesta Uniforme:** Idealmente se espera que un píxel sometido al mismo nivel de excitación de luz que sus vecinos no presente cambios apreciables respecto de ellos. En este aspecto la individualidad de cada píxel de un sensor CMOS los hace más sensibles a sufrir fallos, siendo mayor la uniformidad en CCD.
- **Velocidad:** La velocidad con la que un CMOS captura la imagen es bastante superior a la velocidad de los CCD, debido a que muchas funciones, como la conversión A/D, se realizan en el propio sensor.
- **Blooming:** Esta palabra define el fenómeno por el cual un píxel que ha alcanzado la saturación empieza a saturar a sus vecinos, creando efectos y patrones no deseados. Debido a la interconexión de las celdas este problema se da principalmente en sensores CCD mientras que los sensores CMOS no sufren tal efecto.

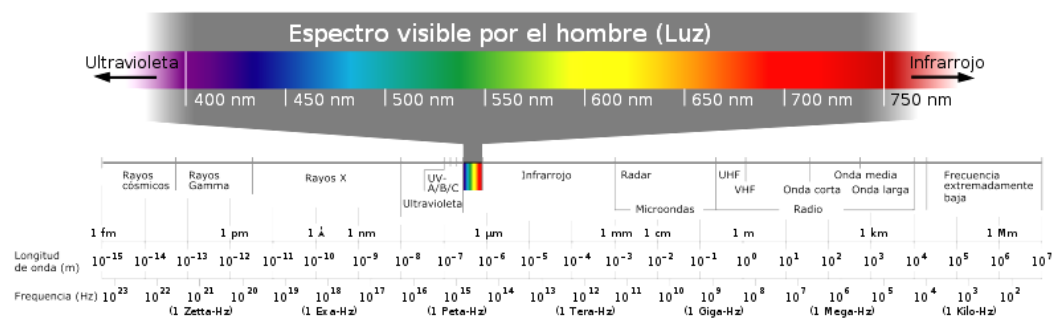
Los sensores CCD llevan mucho más tiempo en el mercado y son un producto más maduro con mayor calidad y más píxeles de resolución. Por todo



esto, los sensores CCD son más usados en cámaras cuyo objetivo es ofrecer una mejor calidad con muchos pixeles y una gran sensibilidad a la luz.

### 2.2.3. Captura del color

Los sensores de imagen de estado sólido, fabricados con silicio, son sensibles a la radiación electromagnética con una longitud de onda comprendida entre 300 nm y 1100 nm [1], cubriendo completamente el espectro de luz visible (fig. 2.6).



**Fig. 2.6:** Frecuencia y longitud de onda de la radiación electromagnética. El silicio es sensible entre 300 nm y 1100 nm, cubriendo completamente el rango de luz visible (de 380 nm a 750nm).

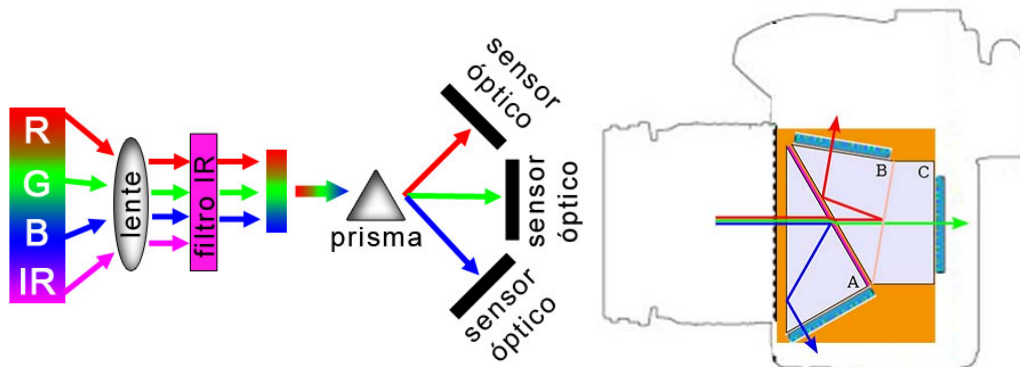
La excitación directa de un sensor óptico genera una imagen distinta a la obtenida por el ojo humano ya que contiene información de longitudes de onda que el ojo humano no puede ver, como la luz UV y la luz IR. Las longitudes de onda UV que capta un sensor óptico es pequeña (de 300 nm a 380 nm) y la repercusión en la imagen final no es muy relevante, por este motivo existen cámaras que incorporan un filtro de UV y otras no. Por el contrario, las longitudes de onda IR captadas por el sensor óptico son considerables (de 750 nm a 1100 nm) y su repercusión en la imagen final muy elevada. Por este motivo todas las cámaras estándar incorporan un filtro de IR que bloquea dichas longitudes de onda. Las cámaras de IR son un caso especial, ya que su función es capturar específicamente la luz infrarroja (fig. 2.4, c), pudiendo incorporar filtros de UV y de luz visible.

Cuando cada celda fotosensible recibe todas longitudes de onda correspondientes a la luz visible se obtienen imágenes en niveles de gris (nivel de

intensidad proporcional a la cantidad de luz recibida) (fig. 2.4, b). Cuando cada celda fotosensible se especializa en un rango de longitudes de onda como los tres colores primarios (RGB) se obtienen imágenes en color (fig. 2.4, a). Para conseguir esta división del espectro de longitudes de onda se utilizan principalmente dos técnicas: los sistemas con prisma y tres sensores y los sistemas con filtro Bayer.

### 2.2.3.1 Sistemas con prismas y tres sensores

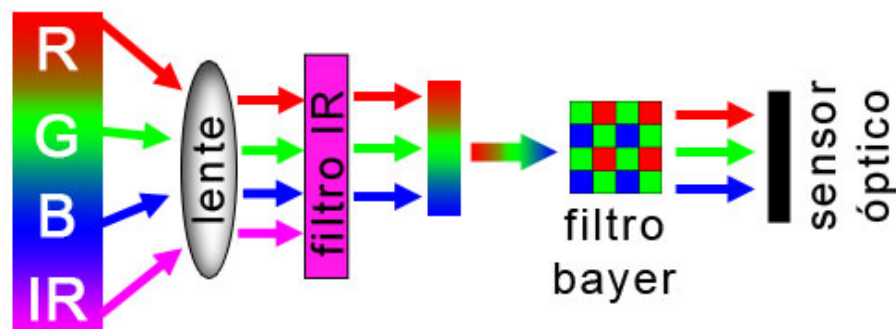
La figura 2.7 muestra el funcionamiento del sistema basado en prisma y tres sensores. La luz incidente sobre la lente de la cámara es dirigida hacia el filtro de IR para bloquear dichas longitudes de onda. La luz filtrada pasa por un conjunto de prismas [2] que separan y envían las distintas longitudes de onda, R, G, B hacia un sensor predeterminado. De esta forma cada uno de los tres sensores capta únicamente la información relativa a un color primario. Unificando la información proporcionada por los tres sensores se genera la matriz tridimensional que da lugar a la imagen en color. De esta forma, la imagen final tendrá tantos píxeles como fotodiodos tenga el mallado del sensor óptico.



**Fig. 2.7:** Los diagramas muestran de forma esquematizada la trayectoria de la luz desde la lente de la cámara hasta los tres sensores.

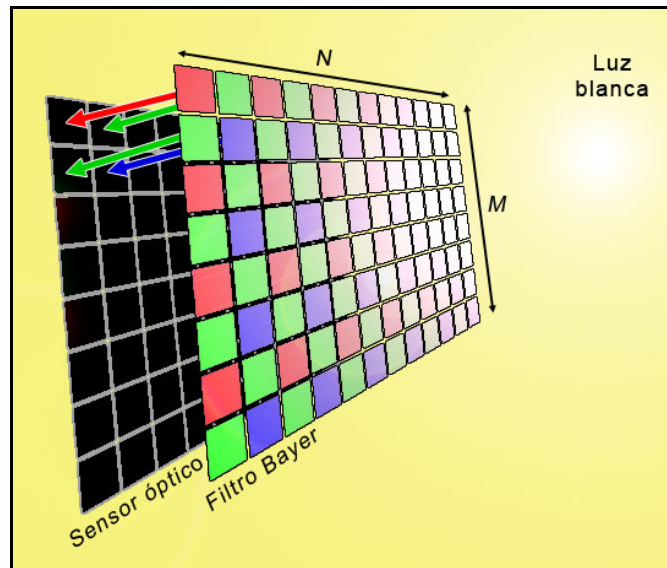
### 2.2.3.2 Sistemas con filtro Bayer

La figura 2.8 muestra el funcionamiento del sistema basado en el uso de un filtro Bayer. La luz incidente sobre la lente de la cámara es dirigida hacia el filtro de IR para bloquear dichas longitudes de onda. La luz filtrada llega al sensor óptico atravesando el filtro Bayer que realiza un bloqueo selectivo y espacial de longitudes de onda. El filtro Bayer fue inventado por Bryce Bayer durante su etapa laboral en Eastman Kodak. El filtro fue patentado 1975 y actualmente está presente en la mayoría de las cámaras digitales ya que es más barato que el sistema de prismas.



**Fig. 2.8:** El diagrama muestra de forma esquematizada la trayectoria de la luz desde la lente de la cámara hasta el sensor óptico pasando por el filtro Bayer.

El filtro Bayer (fig. 2.9) es una malla cuadrículada de filtros rojos, verdes y azules situada directamente sobre el sensor óptico de la cámara para hacer llegar a cada fotodiodo del sensor únicamente uno de los colores primarios (R, G, B). El número de filtros de cada color se adapta a la sensibilidad del ojo humano (más sensible al color verde), así pues, el porcentaje de filtros verdes es superior al rojo y al azul (R 25%, G 50%, B 25%). Como se observa en la figura 2.9, a partir de la información obtenida de cuatro fotodiodos (2x2) se obtiene la información relativa a un píxel en color. Este hecho implica que un sensor de  $M \times N$  celdas genera una imagen de  $M \times N / 4$  píxeles. En la mayoría de los casos no se desea dividir la resolución de la imagen, con lo cual cada píxel contiene únicamente información relativa a un color primario y no se puede reconstruir la imagen en color; este problema se puede eludir utilizando técnicas de interpolación para estimar los valores que faltan a partir de la información de las celdas vecinas.

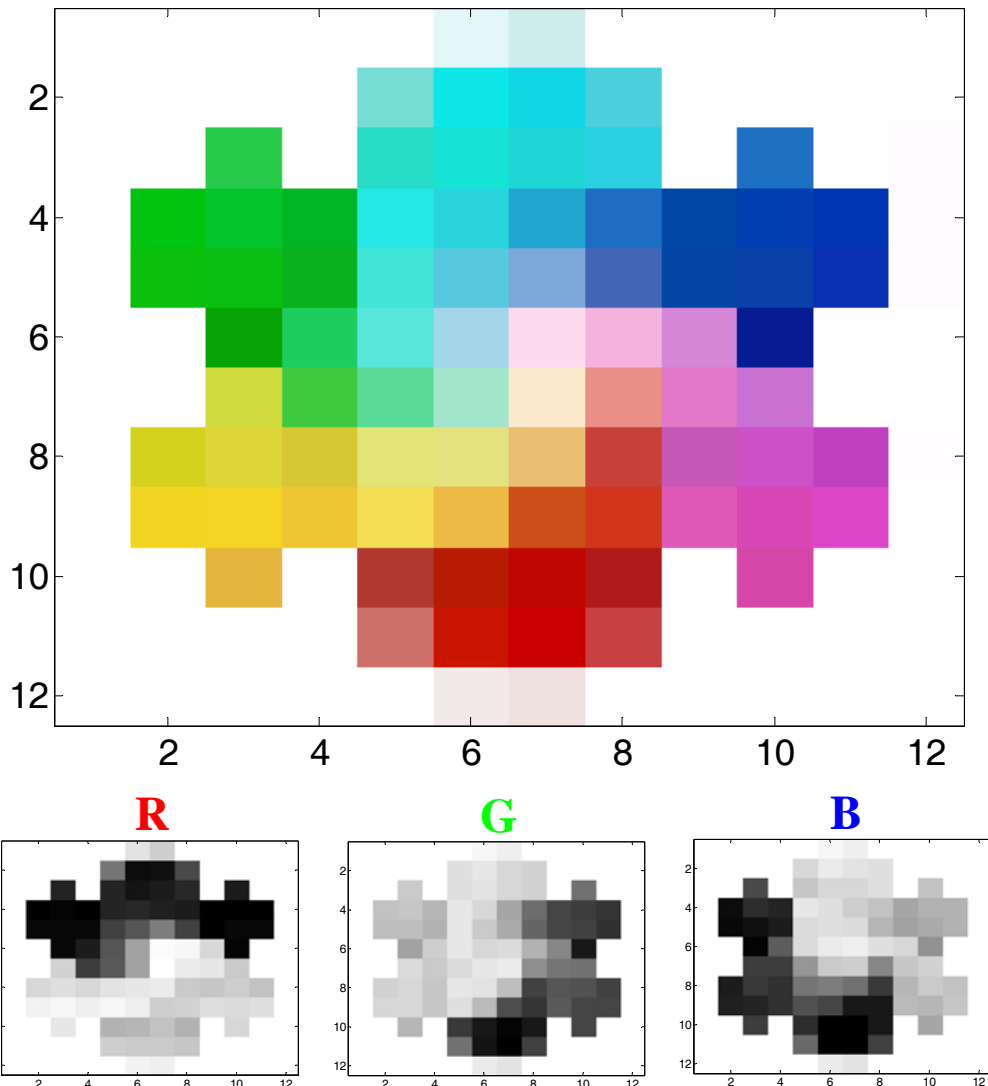


**Fig. 2.9:** El filtro Bayer, situado delante del sensor óptico, asigna a cada fotodiodo la información relativa a un color primario. Interpolando la información de cada celda con las celdas vecinas se estima el valor de los dos otros colores primarios.

#### 2.2.4. *Imagen digital*

Una imagen digital es una secuencia de datos numéricos almacenados en un sistema de memoria, como un disco duro, un disco compacto, una memoria flash, etc. En el caso de imágenes en color, se interpreta esta secuencia de datos numéricos como una matriz tridimensional de  $M$  filas,  $N$  columnas y 3 capas, donde cada capa contiene información relativa a un color primario R, G, B. 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. El número de colores que pueden representarse (profundidad de color) depende del número de bits usados para codificar cada elemento de la matriz; en el caso de usar 8 bits, la matriz contendrá valores entre 0 y  $2^8-1$  (255) y combinando los valores de las tres capas se obtiene un total de  $256^3$  (16.777.216) colores representables.

La figura 2.10 muestra un ejemplo de imagen en color de 12 filas por 12 columnas (144 píxeles) y su descomposición en colores primarios (R, G, B). El valor de cada elemento de la matriz está representado con un byte (8 bits) obteniendo 256 valores numéricos codificados visualmente en una escala grises, donde el 0 equivale al color negro y el 256 al color blanco.



**Fig. 2.10:** Imagen en color de 144 píxeles (12x12). La fila inferior muestra los niveles de intensidad de cada capa RGB por separado, codificando los valores numéricos (0-255) con una escala de grises, donde el 0 equivale al negro y el 255 al blanco.

### 2.3 Sistema digital de medida de distancias

En este apartado se describe el funcionamiento de un sistema digital de medida de distancias. Existe un gran número de sistemas diseñados para estimar distancias que pueden utilizarse en aplicaciones como elementos de precisión [3], mecanismos de seguridad [4], sistemas de navegación [5], etc.

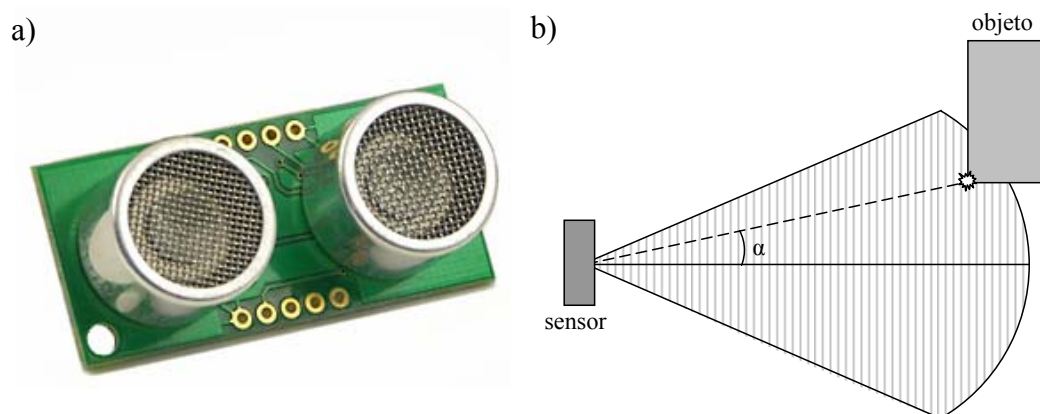
Cada sistema de medición utiliza una tecnología determinada, básicamente se pueden distinguir los sistemas: capacitivos [6], inductivos [7], ultrasónicos [8], de triangulación [9] y LIDAR [10].

Los sensores inductivos y capacitivos se usan principalmente para informar de la presencia o no de un objeto. La estimación de la distancia presenta muchas dificultades ya que depende de la constante dieléctrica del material del cual se desea estimar la distancia.

Los sensores de ultrasonidos (fig. 2.11, a) se basan en la emisión de un tren de pulsos ultrasónicos (entre 38 y 50 KHz) y la detección del rebote. Midiendo el tiempo ( $t$ ) entre la emisión y la recepción, y suponiendo que la velocidad del sonido en el aire ( $v$ ) es constante, se puede calcular la distancia ( $d$ ) entre el emisor y el objeto donde se produjo el rebote (eq. 2.1). Esta técnica para el cálculo de distancias se denomina TOF.

$$d = \frac{v \cdot t}{2} \quad (2.1)$$

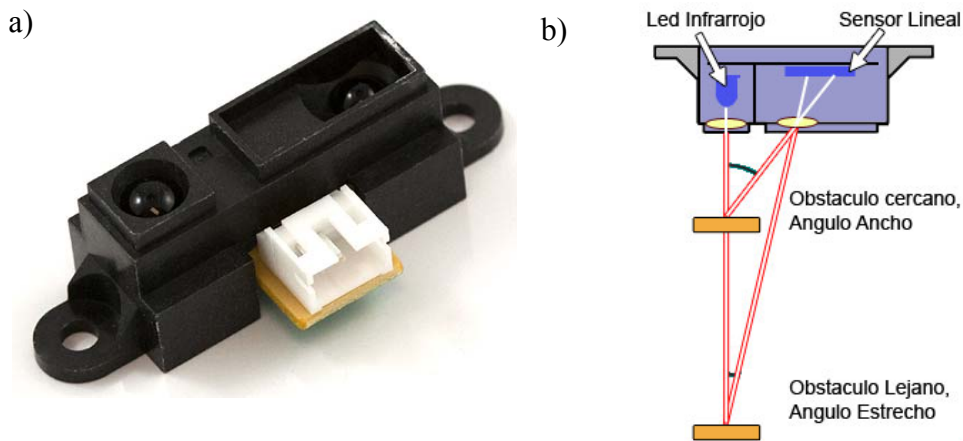
En el mercado se pueden encontrar sensores de ultrasonidos con distintos rangos mesurables, con distancias mínimas de pocos cm ( $\approx 6$ ) y distancias máximas de algunos metros ( $\approx 8$ ). El principal problema de este tipo de sensor es que la onda emitida se propaga de forma cónica, con lo cual el eco que se recibe como respuesta indica la distancia al objeto más cercano pero no especifica la localización angular ( $\alpha$ ) del mismo (fig 2.11, b).



**Fig. 2.11:** Ejemplo de sensor de distancia ultrasónico (a) y propagación de una onda sónica en el medio (b).

Los sistemas basados en triangulación (fig. 2.12, a) se basan en la utilización de un LED, normalmente de infrarrojos, que genera un haz de luz concentrado y con poca divergencia mediante el uso de una lente (fig. 2.12, b).

Cuando este haz se refleja se concentra y se envía sobre un punto del sensor CDD lineal, a partir del punto de contacto y de la geometría del dispositivo se puede realizar una estimación de la distancia a la que se encuentra el obstáculo causante del rebote. Normalmente este tipo de dispositivos requieren una calibración previa para poder realizar una estimación precisa de la distancia. El rango de distancias oscila normalmente entre los 10 cm y los 150 cm.



**Fig. 2.12:** Sensor infrarrojo de distancias (a) y su esquema de funcionamiento (b).

Los sensores tipo LIDAR se basan en un sistema de medida de distancias láser. Los siguientes apartados se han destinado específicamente a la descripción de su principio de funcionamiento.

### 2.3.1 Sistema de medida láser

El láser es una radiación luminosa de características particulares. Es monocromática, posee una gran direccionalidad y puede concentrar un elevado número de fotones en fase.

Los sistemas LIDAR son una de las muchas aplicaciones que tiene la tecnología láser. En general son sistemas que miden distancias a alta velocidad, de forma puntual, en barridos bidimensionales o en barridos tridimensionales.

En los últimos años los sistemas LIDAR se han utilizado para la caracterización geométrica de todo tipo de objetos, como la superficie terrestre, objetos industriales, material vegetal, etc.

### 2.3.1.1 Características físicas de la emisión láser

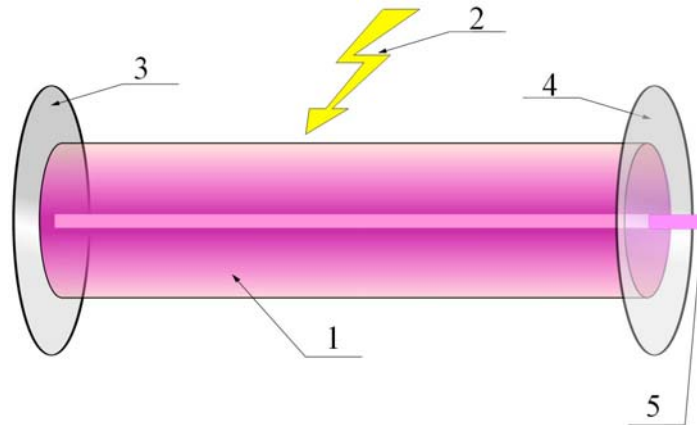
La radiación láser tiene todas las propiedades de la luz, sin embargo se caracteriza por ser monocromática (todos los fotones tienen igual longitud de onda) y coherente (todos los fotones se encunaran en fase temporal y espacial). A causa de las dos características anteriores tiene una alta direccionalidad (el haz de radiación presenta escasa divergencia). La principal utilidad práctica de la radiación láser reside en que concentra un gran número de fotones por unidad de superficie [11].

- **Monocromaticidad:** A diferencia de la luz blanca, que está formada por muchos componentes, la luz monocromática es aquella que está formada por componentes de un solo color, es decir, que tiene una sola longitud de onda. Actualmente existen láseres que emiten con longitudes de onda visible, infrarroja, ultravioleta y en rayos X. La longitud de onda de la luz láser varía algunas milésimas de nanómetro pero cabe señalar que la monocromaticidad pura no existe como tal, así que se trata de una característica ideal.
- **Coherencia:** A diferencia de la radiación luminosa convencional, de componentes desorganizados o incoherentes, la radiación coherente es aquella en que todos sus fotones están en fase. Al coincidir en una misma dirección de propagación los estados vibracionales se suman y como resultado se amplifica la intensidad luminosa emitida.
- **Direccionalidad:** Se denomina direccionalidad a la capacidad del láser para no dispersarse como los demás haces de luz, tiene una dispersión mínima, es decir, no hay apenas divergencia. La divergencia de un haz láser es proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro del haz en su punto más angosto. Por ejemplo, un láser ultravioleta que emite a una longitud de onda de 308 nm tendrá una divergencia más baja que un láser infrarrojo a 808 nm, si ambos tienen el mismo diámetro mínimo de haz.



### 2.2.1.2 Generación de radiación láser

Un sistema de emisión láser (fig. 2.13) debe constar, necesariamente, de un medio activo, un sistema de bombeo y una cavidad resonante.



**Fig. 2.13:** 1) Medio activo para la formación del láser, 2) energía bombeada, 3) espejo reflectante al 100%, 4) espejo parcialmente reflectante y 5) emisión del rayo láser.

- **Medio activo:** Toda unidad productora de radiación láser está constituida por un medio activo, en cuyo seno tiene lugar la emisión estimulada. El resultado de la emisión estimulada es una serie de fotones, todos con la misma frecuencia. Desde la construcción del primer láser de rubí, se han desarrollado un gran número de sistemas láser utilizando medios sólidos, incluidos los semiconductores, líquidos y gaseosos. El material que constituye el medio activo determina principalmente la longitud de onda de la emisión. Hay que tener en cuenta que para obtener un proceso de emisión láser es necesario alcanzar las condiciones umbrales de funcionamiento que permitan la reacción en cadena de fotones estimulados.
- **Sistema de bombeo:** El sistema de bombeo debe aportar la energía necesaria para producir la excitación del átomo. Existen diversos sistemas de bombeo que pueden dividirse de forma simplificada en: a) bombeo óptico, en el que se emplea una fuente luminosa, como una lámpara de flash xenón u otro láser generalmente de menor frecuencia. b) bombeo eléctrico, cuyo fundamento consiste en hacer

circular corriente eléctrica a traves del material activo, habitualmente un gas o un semiconductor y c) bombeo químico, basado en la energía liberada en la creación y ruptura de enlaces químicos.

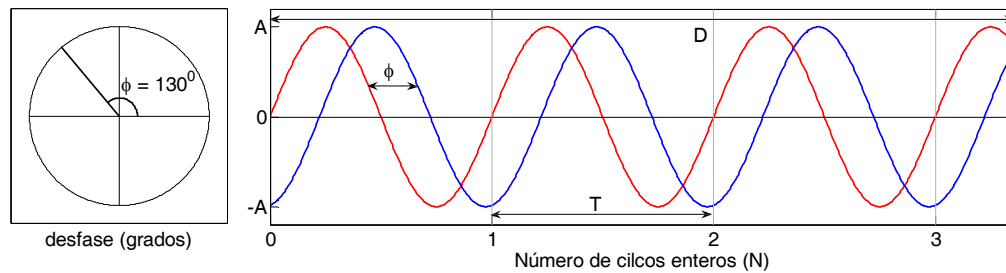
- **Cavidad resonante:** Está compuesto por dos espejos perfectamente paralelos, uno en cada extremo del material activo. El láser está construido de forma que el haz de radiación, al reflejarse, pase sucesivas veces por el medio activo, de este modo el número de fotones emitidos se amplifica en cada paso. Uno de los dos espejos es parcialmente reflectante y permite que parte de la luz salga fuera de la cavidad en una única dirección.

### 2.2.1.3 Sistema LIDAR

Los sensores LIDAR aplican tecnología láser para determinar la distancia entre el sensor y los objetos que se encuentran visibles alrededor del mismo. Existen dos sistemas para calcular dicha distancia, a partir del tiempo que tarda un haz de luz láser en ir y volver de un objeto y a partir de la diferencia de fase entre la onda emitida y la onda recibida [12, 13].

- **Tiempo de vuelo:** Este sistema, conocido como TOF, envía un pulso láser hacia el objeto del cual se quiere estimar la distancia. Una parte del haz de luz es reflejado de nuevo hacia el sistema, donde un sensor (CCD/CMOS) lo detecta y detiene el cronómetro de alta precisión para determinar el tiempo transcurrido entre la salida y la llegada del pulso. A partir del tiempo de vuelo y sabiendo que la velocidad del pulso es la velocidad de la luz en el aire, se calcula la distancia entre el sensor y el objeto impactado (eq. 2.1).
- **Diferencia de fase:** Este sistema también consta de un emisor y un receptor láser pero emite de forma continua y no en forma de pulsos (fig. 2.14). Cuando el haz láser reflejado llega al receptor, la onda habrá recorrido una distancia  $D$ , correspondiente a un cierto número entero ( $N$ ) de sus longitudes de onda, llamado ambigüedad, más una cierta parte de longitud de onda (desfase). Lo observable es esta parte

de la longitud de onda que puede valer entre 0 y 360 grados sexagesimales. Cuando se incrementa la distancia al objeto, el desfase va creciendo, al llegar a 360° el valor de N aumenta en una unidad y el desfase pasa a valer 0°. Contrariamente, cuando se reduce la distancia al objeto, el desfase disminuye y al llegar a los 0° el valor de N decrece una unidad y el desfase pasa a valer 360°. Es fundamental que el sistema siga el desplazamiento de la fase para no perder la ambigüedad inicial. Si hay una pérdida de recepción por cualquier causa la cuenta de ciclos se rompe y tenemos una pérdida de ciclos (*cycle slip*) que es el principal problema del sistema de medición.



**Fig. 2.14:** La onda roja simboliza el haz láser emitido y la onda azul el retorno hasta el sensor. El ejemplo muestra 3 ciclos enteros (ambigüedad) y el desfase ( $\phi$ ) entre la emisión y la recepción. Conociendo N, T y  $\phi$  se puede calcular con precisión la distancia (D).

#### 2.2.1.4 Sistema LIDAR bidimensional

El sistema LIDAR unidimensional, comentado en el punto anterior, estima la distancia entre el sistema y un determinado punto del espacio. Añadiendo un espejo giratorio y un codificador digital (fig. 2.15 y 2.16) se puede estimar la distancia desde el sistema hasta un conjunto de puntos coplanarios que definen el entorno del sistema LIDAR 2D. (fig. 2.17).

La inclinación del espejo giratorio es fija y suele ser de 45°, de esta forma todos los haces de luz emitidos son coplanarios (forman parte del mismo plano).

El espejo giratorio se acopla a un motor que gira a velocidad constante y el codificador digital estima su orientación en todo momento. Para cada orientación discreta se calcula la distancia del sistema a un punto del entorno, devolviendo después de cada barrido (vuelta completa), un conjunto de ángulos con sus respectivas distancias.

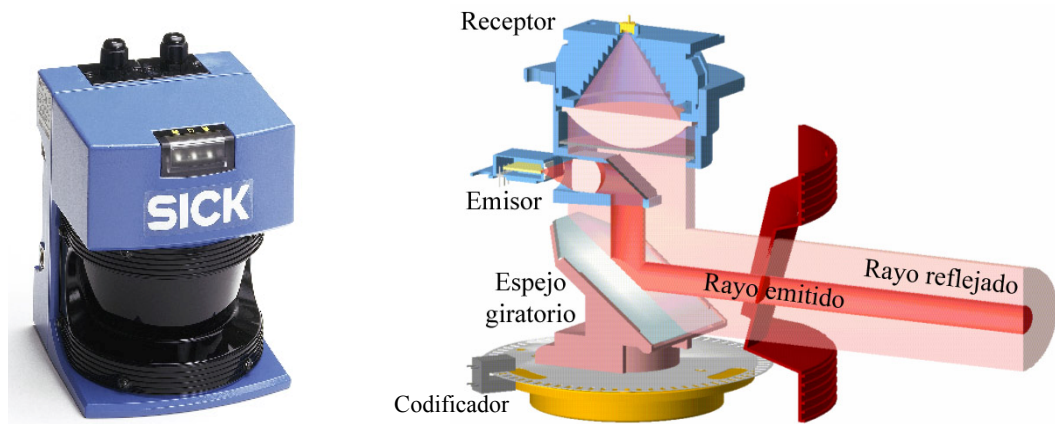


Fig. 2.15: Láser SICK LMS200 (izquierda) y el esquema interno de sus componentes (derecha).

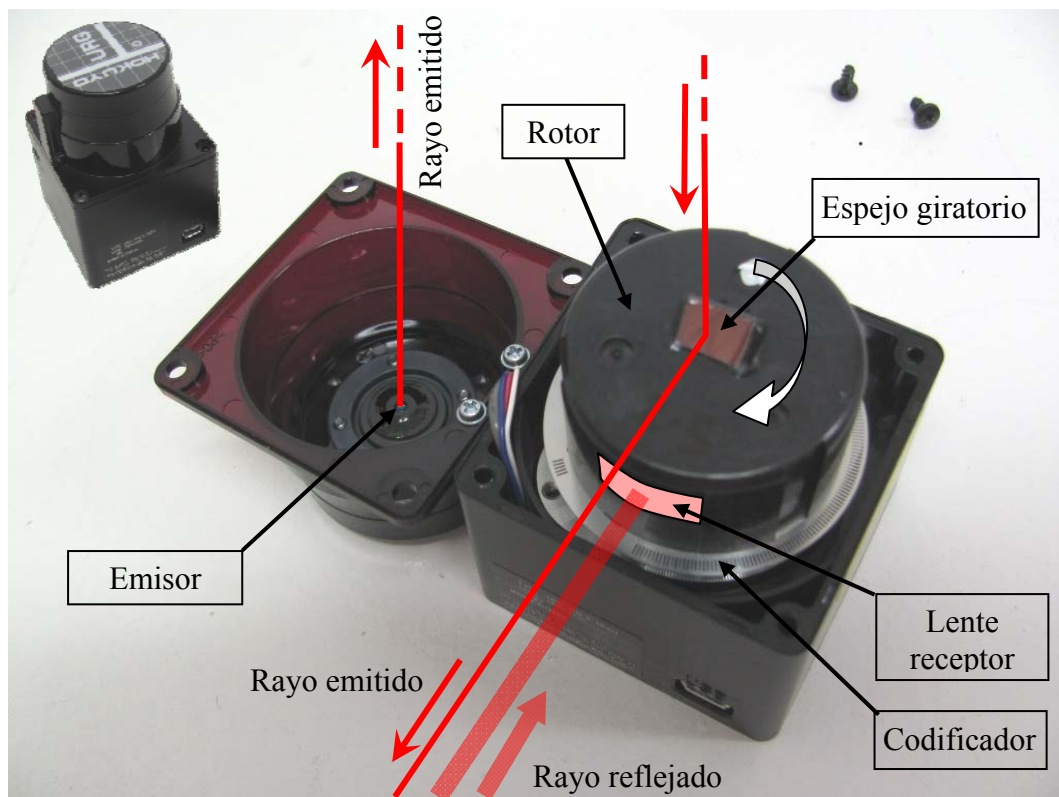
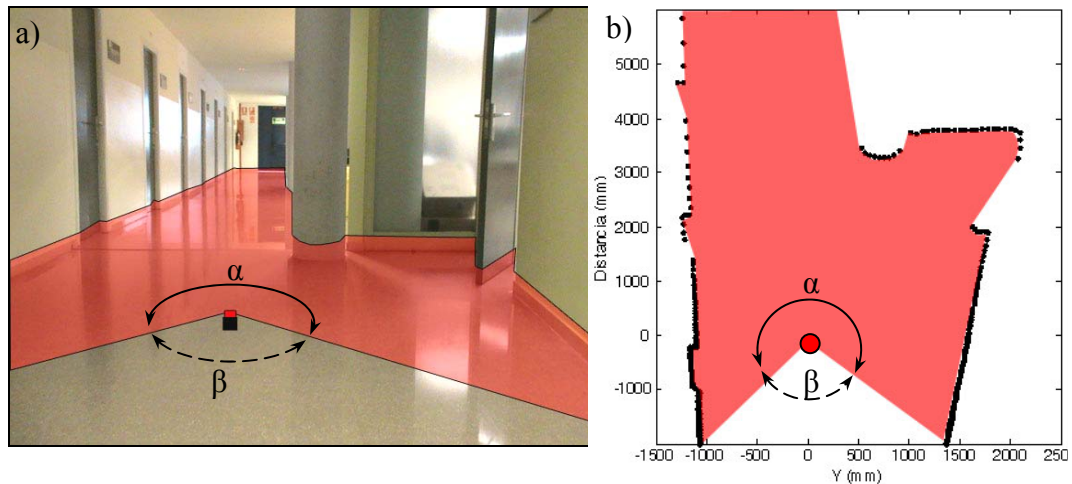


Fig. 2.16: Imagen interior del láser 2D Hokuyo URG. El rayo emitido se refleja en un espejo giratorio y el reflejado incide sobre la lente del receptor que lo dirige hacia el sensor situado en el interior del rotor del motor.



**Fig. 2.17:** a) Plano de exploración de un láser 2D en un pasillo y b) representación cartesiana de los datos obtenidos tras realizar un barrido en a).

En el mercado existen distintos sistemas LIDAR 2D y sus características fundamentales pueden dividirse en función del rango de distancias disponibles, la precisión de la medida, el número de barridos por segundo, la resolución angular y el intervalo de ángulos hábiles.

- **Rango de distancias:** El rango de distancias que un sensor es capaz de medir, depende de varios factores: el tipo y la potencia del pulso láser emitido, la reflectividad del objeto sobre el que impacta, las condiciones atmosféricas y otras radiaciones que pueden cegar parcial o totalmente el receptor del sensor.
- **Precisión de la medición:** La mayor o menor precisión depende de la electrónica y de la precisión del cronómetro del sistema. En general la tecnología basada en TOF es más robusta y estable que la tecnología basada en diferencia de fases, que, a pesar de ofrecer mayor precisión es más sensible a las condiciones atmosféricas y a las interferencias por radiaciones.
- **Rotaciones por segundo:** En función de la velocidad de rotación del espejo giratorio y la electrónica del sistema se podrán obtener mayor o menor número de barridos (vueltas enteras) por segundo. Después de cada barrido el sistema envía el conjunto de distancias estimadas al

ordenador que las almacena o procesa. Cabe destacar que para mejorar la comunicación entre el ordenador y el sistema LIDAR únicamente se envían las distancias ya que los ángulos son constantes y se fijan antes de iniciar el escaneo.

- **Resolución angular:** La resolución angular es el número de medidas realizadas por unidad angular. Este valor depende del codificador utilizado para conocer la orientación del haz de luz emitido.
- **Ángulos hábiles:** Normalmente los sistemas LIDAR 2D no pueden proporcionar información de todo su entorno. La figura 2.17 muestra el sensor láser (punto rojo) y la superficie escaneada, se observan los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$  correspondientes a la zona hábil y a la zona muerta respectivamente. Este parámetro normalmente es configurable.

En función de estos parámetros se puede determinar número de mediciones por barrido, el ángulo de cada medición y el número máximo de barridos por unidad de tiempo.

### 2.3 Referencias

- [1] O. Vietze, "Active pixel image sensors with application specific performance based on standard silicon CMOS processes". *Ph.D. Dissertation*. ETH-Zurich, 1997.
- [2] Hao Du, Xin Tong, Xun Cao, Stephen Lin, "A prism-based system for multispectral video acquisition", *Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on*, vol., no., pp.175-182, Sept. 29 2009-Oct. 2 2009
- [3] Xiao Wang, Xin Hao, Qihua Zhu, Ying Zhang, Kainan Zhou, Xiaodong Wang, Xiaofeng Wei, "Accurate measurement and control of delay variation between two ultra-short laser pulses based on cross-correlation", *Lasers & Electro Optics & The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, 2009. CLEO/PACIFIC RIM '09. Conference on*, vol., no., pp.1-2, 30-3 Aug. 2009.
- [4] Jae Hoon Lee, Yong-Shik Kim, Bong Keun Kim, k. Ohba, H. Kawata, A. Ohya, S. Yuta, "Security Door System Using Human Tracking Method with Laser Range Finders", *Mechatronics and Automation, 2007. ICMA 2007. International Conference on*, vol., no., pp.2060-2065, 5-8 Aug. 2007.
- [5] Chan Wei Hsu, Tsung Hua Hsu, Chun Hsiung Chen, Yung Yuan Kuo, "A path planning achievement of car following in motion control via LiDAR sensing", *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010 the 5th IEEE Conference on*, vol., no., pp.1411-1416, 15-17 June 2010.
- [6] A.M. Kummer, A. Hierlemann, "Configurable electrodes for capacitive-type sensors and chemical sensors" *Sensors Journal, IEEE*, vol.6, no.1, pp. 3- 10, Feb. 2006.
- [7] S. Fericean, R. Droxler, "New Noncontacting Inductive Analog Proximity and Inductive Linear Displacement Sensors for Industrial Automation", *Sensors Journal, IEEE*, vol.7, no.11, pp.1538-1545, Nov. 2007.
- [8] V. Magori, "Signal processing for smart ultrasonic sensors" *CompEuro '89., 'VLSI and Computer Peripherals. VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and their Interconnection Networks', Proceedings.*, vol., no., pp.3/21-3/26, 8-12 May 1989
- [9] Feng Luo, Chenjia Yin, Chu Liu; Kai Xiao, "An intelligent vehicle based on "follow-up" infrared sensors" *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*, vol., no., pp.436-440, 3-5 June 2009



## CAPÍTULO II

### *Introducción*

- 
- [10] G. Perchet, M. Lescure, T. Bosch, “Magnification of the phase-shift for laser distance measurement”, *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1997. IMTC/97. Proceedings. 'Sensing, Processing, Networking, IEEE*, vol.1, no., pp.617-621 vol.1, 19-21 May 1997
  - [11] M. Martínez, F. Sendra, “Láser, concepto e introducción”. [en línea, consultado: 22 de marzo de 2011] [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/laser\\_morrillo.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-fis/laser_morrillo.pdf)
  - [12] W. Boehler A. Marbs, “3D scanning instruments”. *CIPA-ISPRS Workshop. Proceedings of the CIPA WG 6 international workshop on: Scanning for Cultural Heritage Recording*. Corfu, Greece, 1-2 September 2002.
  - [13] K. Thiel, A. Wehr. “Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis-”. *Proceedings of the ISPRS working group VIII/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. Freiburg, Germany, 3-6 vol. XXXVI, 8/W2October 2004.



### **3.1 Introducción**

En este capítulo se presenta el trabajo realizado para estimar y modelar de la superficie barrida por pequeños robots móviles de limpieza. La estimación del área cubierta por el desplazamiento de un robot móvil es un problema clásico de la robótica. La determinación y análisis de la superficie explorada o cubierta por un sistema automático de exploración tiene aplicaciones en campos como la detección de minas antipersona, pintado de superficies, limpieza del suelo, etc.

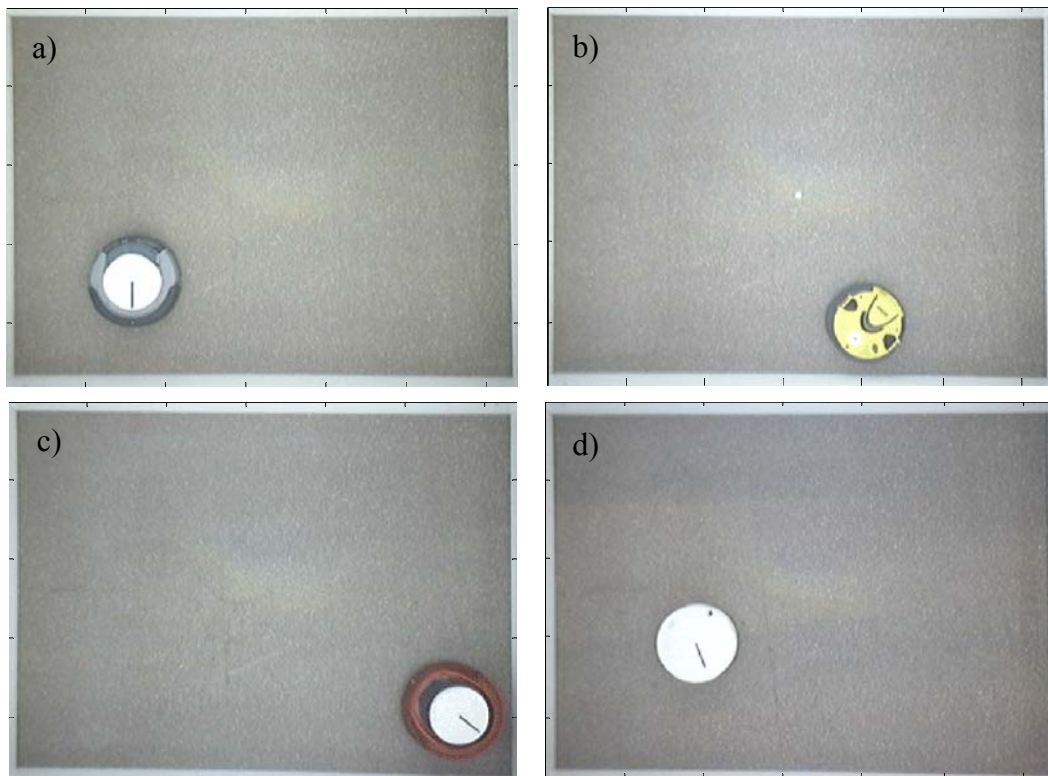
La mayoría de los trabajos científicos existentes en la literatura se han centrado en la optimización de los algoritmos que definen la trayectoria de un robot móvil con el objetivo final de minimizar el desplazamiento realizado, maximizar la superficie explorada y reducir el solapamiento. No obstante, la mayoría de algoritmos de planificación de trayectorias disponibles en la literatura requieren un conocimiento preciso de la posición instantánea del robot que debe obtenerse complementando la odometría interna con el uso de sensores adicionales que permitan obtener información del entorno del robot. El elevado coste de dichos sensores adicionales dificulta el desarrollo de nuevas aplicaciones basadas en robots móviles orientadas hacia un mercado de consumo doméstico. De esta forma, los primeros robots de limpieza destinados al consumo doméstico se han caracterizado por utilizar sistemas de planificación de trayectorias muy simples basados en la reacción aleatoria: avanzar recto hasta chocar, retroceder levemente y girar un ángulo aleatorio para volver a empezar.

### **3.2 Aportaciones al estado del arte**

En este capítulo se presenta el trabajo realizado para estimar la superficie cubierta por pequeños robots móviles de limpieza basados en un algoritmo de planificación de trayectorias aleatorio [1, 2]. Este trabajo representa una nueva aportación de conocimiento en el área de estimación de la superficie cubierta por un robot móvil que, en el caso de trayectorias aleatorias, hasta el momento había despertado poco interés científico.

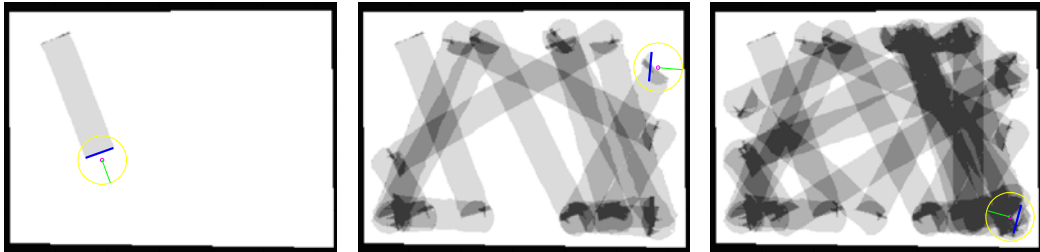


El objetivo final es obtener la evolución dinámica de la superficie cubierta por el movimiento de un robot móvil basado en un algoritmo de control aleatorio que permita una futura comparación con las evoluciones obtenidas a partir de algoritmos de control más elaborados. Para ello se ha desarrollado una plataforma de experimentación específica basado en la definición de un área de exploración limitada y el uso de un sistema de visión artificial para estimar la posición del robot móvil en dicha área de exploración. La figura 3.1 muestra imágenes cenitales de diversos modelos comerciales de robots de limpieza del suelo analizados en la plataforma de experimentación.



**Fig. 3.1:** Robots móviles analizados: a) Roomba, b) RC 3000, c) Trilobite y d) RoboNet.

El sistema de visión artificial se ha utilizado para detectar la posición y orientación del robot móvil en la secuencia de imágenes definidas por el movimiento del robot para posteriormente generar un mapa de exploración con el área cubierta por el robot móvil. La figura 3.2 muestra tres imágenes del mapa de exploración con la evolución instantánea del área limpiada por el robot *RoboNet*.



**Fig. 3.2:** Modelo de la evolución del área limpiada.

Los resultados obtenidos en la plataforma de experimentación muestran que los robots seleccionados terminan explorando (o limpiando) toda la superficie disponible. Los resultados obtenidos tanto en este trabajo como en el realizado por otros autores [3] muestran que la evolución del área explorada tiene una típica evolución exponencial por lo que se ha propuesto su modelado utilizando una aproximación exponencial simple. Los resultados obtenidos indican que el modelo exponencial puede ser estimado a partir de los parámetros físicos del robot y del tamaño del área que se pretende explorar.

El desarrollo de futuros trabajos se centrará en la propuesta e implementación de un nuevo sistema de medición de la posición del robot móvil basado en el uso de sensores láser que permitan aumentar las dimensiones del área de experimentación y en el estudio de la relación existente entre el modelo exponencial y los parámetros del robot móvil.

### 3.3 Referencias

- [1] J. Palacín, T. Palleja, I. Valgañón, R. Pernia, J. Roca, "Measuring Coverage Performances of a Floor Cleaning Mobile Robot Using a Vision System", in *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA'05)*, pp. 4247-4252, Barcelona, Spain, April 2005.
- [2] Yu Liu, Xiaoyong Lin, Shiqiang Zhu, "Combined coverage path planning for autonomous cleaning robots in unstructured environments," *Intelligent Control and Automation, 2008. WCICA 2008. 7th World Congress on*, vol., no., pp.8271-8276, 25-27 June 2008
- [3] Sungsoo Rhim, Jae-Chang Ryu, Kwang-Ho Park, Soon-Geul Lee, "Performance Evaluation Criteria for Autonomous Cleaning Robots". *Int. Symp. on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, 2007, pp. 167-172.



Contents lists available at ScienceDirect

Robotics and Autonomous Systems

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/robot](http://www.elsevier.com/locate/robot)



## Modeling floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots in a reduced scenario

T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, J. Palacin  
*Department of Computer Science and Industrial Engineering,  
Universitat de Lleida, Jaume II, 69. 25001 Lleida, Spain*

*Corresponding author. Tel.: +34 973702724; fax: +34 973702702.  
E-mail address: [palacin@diei.udl.cat](mailto:palacin@diei.udl.cat) (J. Palacin).*

---

*Abstract:* In this paper, floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots are measured, analyzed and modeled. Results obtained in a reduced scenario show that floor-cleaning coverage is complete in all cases if the path-planning exploration algorithm has some random dependence. Additionally, the evolution of the area cleaned by the mobile robot expressed in a distance domain has an exponential shape that can be modeled with a single exponential where the amplitude defines the maximum cleaning-coverage achieved and the time-constant defines the dynamic evolution of the coverage. Both parameters are robot dependent and can be estimated if the area of the room is known and then floor-cleaning coverage can be predicted and over-cleaning minimized.

---

2009 Elsevier B.V. All rights reserved.

Las páginas de la 30 a la 50 contienen el artículo:

T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, J. Palacin, “Modeling floor-cleaning coverage performances of some domestic mobile robots in a reduced scenario”, *Robotics and Autonomous Systems*, 58 (2010), 37-45.

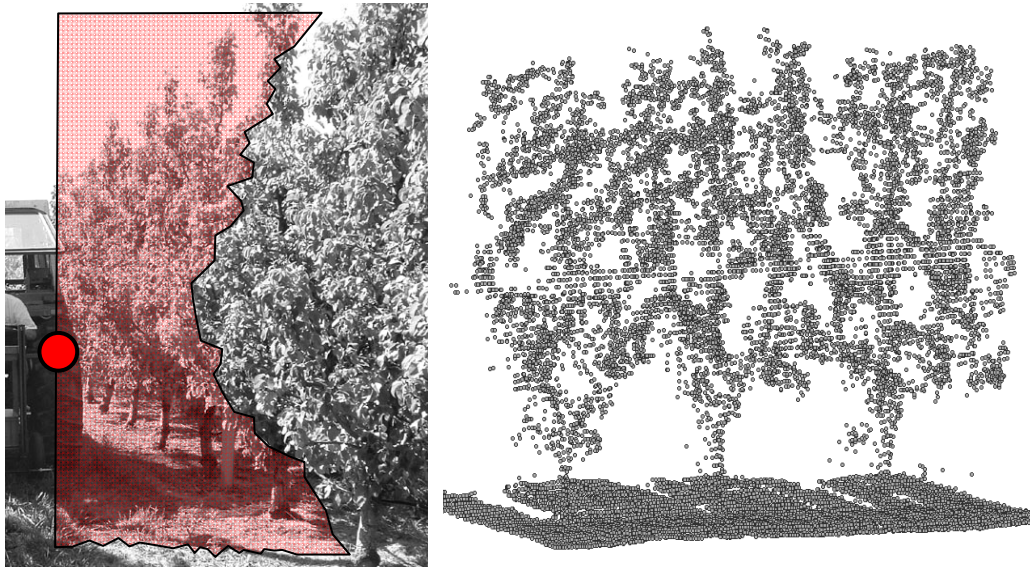
<http://dx.doi.org/10.1016/j.robot.2009.07.030>

## 4.1 Introducción

En este trabajo se realiza una estimación del efecto que diversas fuentes de error ejercen sobre la estimación del volumen de biomasa de un conjunto de árboles frutales plantados en línea mediante un sensor láser bidimensional de medida de distancias. La estimación de dicho volumen permite realizar una optimización posterior de la dosis a aplicar de productos fitosanitarios (fertilizantes, insecticidas, sulfatos, etc.), reduciendo la contaminación química y, a su vez, aumentando el rendimiento económico de la explotación agrícola.

En la literatura científica existen un gran número de trabajos que proponen el uso de sensores láser para realizar la medida de distintos parámetros arbóreos: volumen, densidad, superficie foliar, etc. [1-3]. Los sensores láser más utilizados para este fin son los que realizan la estimación de distancias a partir de la medición del tiempo de vuelo entre la emisión de un pulso de luz y su recepción. Para realizar una medida de distancias el haz de emisión se desvía mediante un espejo rotatorio para poder realizar la medida de distancias sobre un determinado plano.

La utilización de un sensor láser bidimensional para medir diversos parámetros de un conjunto de árboles requiere el desplazamiento del plano de medición. Por ejemplo, para realizar una estimación del volumen arbóreo el sensor láser puede acoplarse a la parte trasera de un tractor (fig. 4.1, izquierda) que avance a una velocidad conocida y con una trayectoria también conocida definida por los márgenes de las hileras de árboles que conforman las plantaciones agrícolas. La nube de puntos obtenida por el láser puede entonces interpretarse para obtener una descripción tridimensional de la zona analizada (fig. 4.1, derecha) y realizar diversas estimaciones correlacionadas como el volumen, masa foliar, etc.



**Fig. 4.1.** Láser bidimensional (punto rojo) y representación del plano de medición (izquierda). Representación tridimensional de los datos obtenidos en el caso de 3 perales (derecha).

La mayoría de los trabajos científicos relacionados la reconstrucción tridimensional del entorno se realizan asumiendo alguna o varias de las hipótesis siguientes:

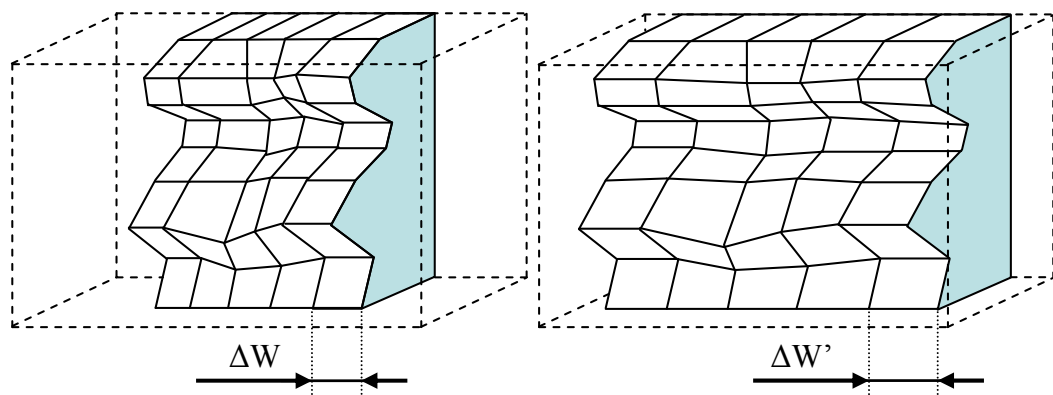
- La velocidad de avance del láser es constante y conocida.
- La velocidad de avance del láser es arbitraria pero conocida con precisión en todo el intervalo de medición.
- La trayectoria definida por el desplazamiento del láser es paralela y se mantiene a una distancia constante al plano definido por la hilera de árboles que se está analizando.
- La trayectoria definida por el desplazamiento del láser es arbitraria pero conocida con precisión en todo el intervalo de medición.
- La orientación del sensor es constante durante todo el intervalo de medición.
- La orientación del sensor es arbitraria pero conocida con precisión durante todo el intervalo de medición.

No obstante la asunción de alguna de las hipótesis anteriores se contradice con la naturaleza no estructurada del medio en el que se realizan las exploraciones y la no existencia de sensores adicionales que permitan verificar dichas hipótesis. El hecho de transitar por una superficie irregular con una máquina industrial pesada que a su vez está equipada normalmente con un motor de explosión hace presuponer que la trayectoria espacial definida por el láser estará afectada por diversas perturbaciones como:

- Oscilaciones que impliquen translaciones horizontales y verticales.
- Oscilaciones que impliquen la rotación del plano de medición del sensor.
- Oscilaciones que impliquen la modificación de la orientación del eje del plano de medición del sensor.

## 4.2 Aportaciones al estado del arte

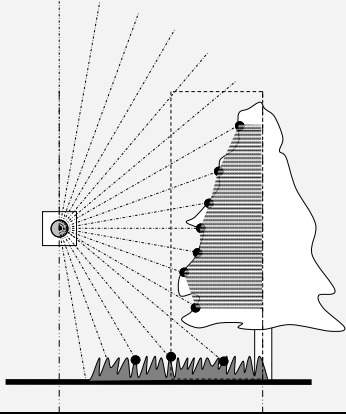
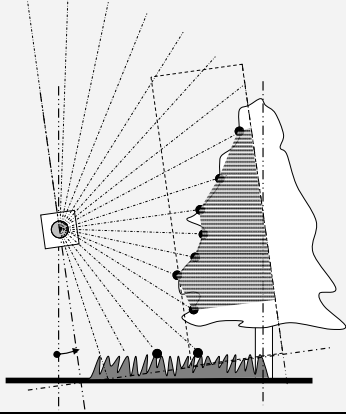
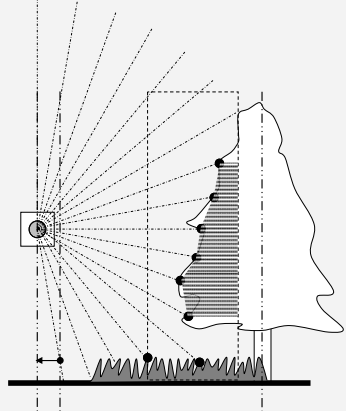
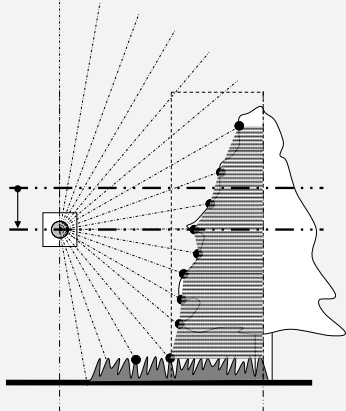
En este trabajo se realiza una estimación del efecto que un error en la velocidad de avance (fig. 4.2) y en el posicionamiento angular, de altura y de distancia (ver tabla 4.1) ejerce sobre la estimación del volumen de biomasa de un conjunto de árboles frutales realizada mediante un sensor láser bidimensional de medida de distancias. En futuros trabajos se analizará el efecto de la modificación de la orientación del eje del plano de medición del sensor sobre la estimación del volumen.



**Fig. 4.2:** Izquierda: distancia ( $\Delta W$ ) entre dos escaneos consecutivos a partir de una velocidad de avance  $v$ . Derecha: distancia real ( $\Delta W'$ ) entre escaneos consecutivos a partir de una velocidad de avance  $v + error$ .



**Tabla 4.1:** Diferentes fuentes de error implicadas en el cálculo del volumen de la biomasa

Referencia	Error angular
	
Error de distancia	Error de altura
	

Este trabajo representa una nueva aportación al estado del arte al identificar y evaluar cuantitativamente la sensibilidad de la estimación del volumen arbóreo con respecto a las diferentes fuentes de error seleccionadas.

Para estimar dichas sensibilidades se ha tomado como referencia un conjunto de mediciones obtenidas con un láser bidimensional sobre tres árboles perales (fig. 4.3, izquierda). En este caso se asume que el desplazamiento del láser ha sido a velocidad constante y que la trayectoria seguida ha sido completamente recta. A partir de la nube de puntos de referencia se ha realizado la estimación del volumen que será utilizada como volumen de referencia. Los diferentes errores analizados se han simulado analíticamente modificando la nube de puntos de referencia (fig. 4.3, derecha) para estimar de nuevo el volumen y comparándolo con el volumen de referencia.



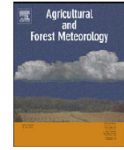


**Fig. 4.3:** Reconstrucción tridimensional de una exploración realizada en condiciones ideales (izquierda) y con un error de inclinación simulado (derecha).

Los resultados obtenidos al comparar las diversas estimaciones muestran que un error constante en la velocidad de avance induce un error lineal en la estimación del volumen; un 1% de error en la velocidad genera un 1% de error en el volumen. Un error constante en la altura asumida para el sensor tiene una influencia limitada en la estimación del volumen; 100 mm genera menos de un 3% de error. Por otro lado, errores constantes de distancia e inclinación tienen un efecto muy importante en la estimación del volumen; 50 mm de distancia generan un 30% de error y 2° de inclinación inducen un error del 30% en el volumen estimado. En trabajos futuros el trabajo realizado se ampliará analizando la influencia dinámica de los diversos errores considerados.

### 4.3 Referencias

- [1] J. Palacin, T. Palleja, M. Tresanchez, R. Sanz, J. Llorens, M. Ribes-Dasi, J. Masip, J. Arno, A. Escola, J.R. Rosell, “Real-Time Tree-Foliage Surface Estimation Using a Ground Laser Scanner”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56 (2007), 1377-1383.
- [2] J. Palacin, T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, R. Sanz, J. Llorens, J. Arno, J.R. Rosell, “Difficulties on Tree Volume Measurement from a Ground Laser Scanner”, *Proceedings of the 25th IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2008)*, pp. 1997-2002, Victoria, Vancouver Island, Canada, May 12–15, 2008.
- [3] J.R. Rosell, R. Sanz, J. Llorens, J. Arno, A. Escola, M. Ribes-Dasi, J. Masip, F. Camp, F. Gracia, F. Solanelles, T. Palleja, Luis Val, S. Planas, E. Gil, J. Palacin, “A tractor mounted scanning LIDAR for the non-destructive measurement of vegetative volume and surface area of tree-row plantations: A comparison with conventional destructive measurements”, *Biosystems Engineering*, 102 (2009), 128-134.



## Sensitivity of tree volume measurement to trajectory errors from a terrestrial LIDAR scanner

T. Palleja<sup>a</sup>, M. Tresanchez<sup>a</sup>, M. Teixido<sup>a</sup>, R. Sanz<sup>b</sup>, J.R. Rosell<sup>b</sup>, J. Palacin<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>*Department of Computer Science and Industrial Engineering,  
University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain*

<sup>b</sup>*Department of Agro-forestry Engineering,  
University of Lleida, Jaume II, 69, 25001, Lleida, Spain*

*Corresponding author. Tel.: +34 973 702700; fax: +34 973 702702.  
E-mail address: [palacin@diei.udl.cat](mailto:palacin@diei.udl.cat) (J. Palacin).*

*Abstract:* The use of terrestrial LIDARs in agriculture enables the measurement of structural parameters of the orchards such as the volume of the trees. The sequence of two-dimensional scans performed with a LIDAR attached to a tractor can be interpreted as the three-dimensional silhouette of the trees of the grove and used to estimate their volume. In this work, the sensitivity of the tree volume estimates relative to different error sources in the estimated spatial trajectory of the LIDAR is analyzed. Tests with pear trees have demonstrated that the estimation of the volume is very sensitive to errors in the determination of the distance from the LIDAR to the center of the trees (with errors up to 30% for an error of 50 mm) and in the determination of the angle of orientation of the LIDAR (with errors up to 30% for misalignments of 2°). Therefore, any experimental procedure for tree volume estimate based on a motorized terrestrial LIDAR scanner must include additional devices or procedures to control or estimate and correct these error sources.

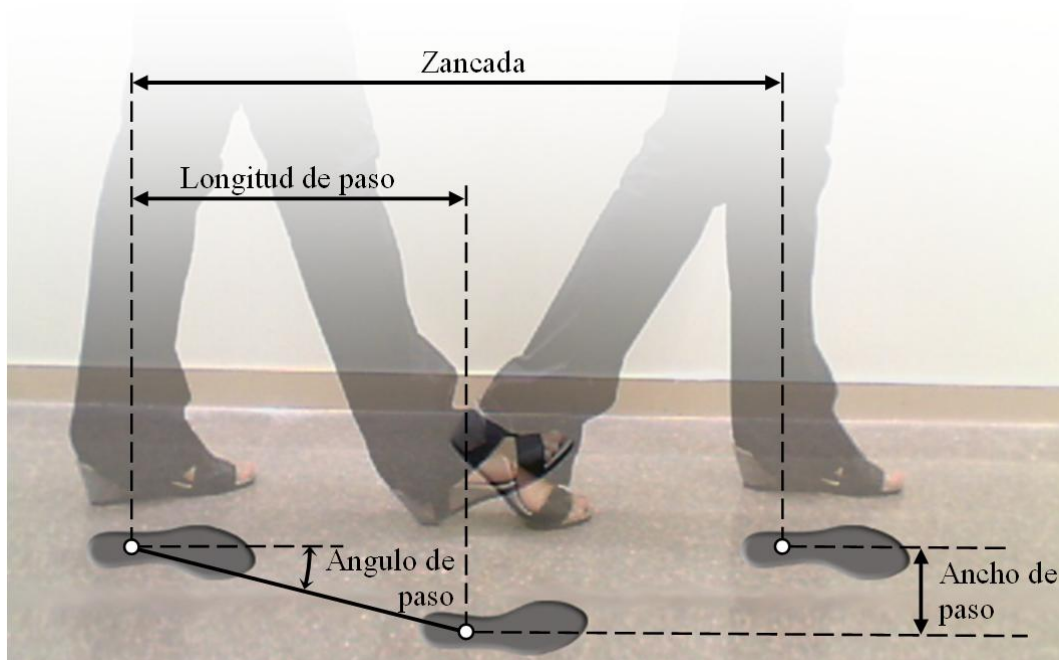
Las páginas de la 56 a la 74 contienen el artículo:

T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, R.Sanz, J.R. Rosell, J.Palacin, “Sensitivity of Tree Volume Measurement to Trajectory Errors from a Terrestrial LIDAR Scanner”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 150 (2010), 1420-1427.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.07.005>

## 5.1 Introducción

El siguiente trabajo propone la utilización de un sensor láser para evaluar cuantitativamente los parámetros que definen la forma de caminar de una persona (fig. 5.1).

En la literatura científica existen un gran número de trabajos centrados en estudiar los parámetros que definen o caracterizan la forma de andar de cada individuo. Estos parámetros pueden utilizarse para realizar análisis clínicos [1, 2], identificación de personas [3, 4], clasificación del género [5], videojuegos, etc. En temas de salud, estimar con precisión la forma de andar tiene especial interés ya que, existen un conjunto de enfermedades, físicas o mentales, cuyos síntomas se reflejan en la forma de andar. De esta forma, disponer de nuevas herramientas que permitan detectar posibles cambios en la forma de andar puede contribuir a facilitar una detección precoz de dichas enfermedades mediante revisiones ordinarias.



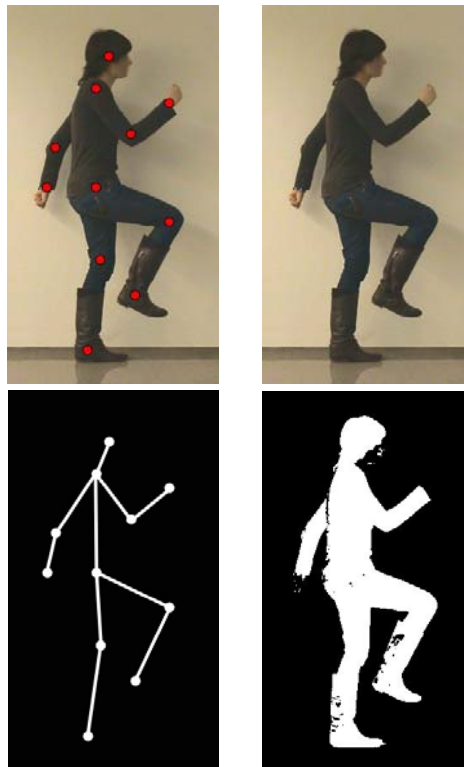
**Fig. 5.1:** Parámetros que definen la forma de andar de las personas.

Existen distintas técnicas que permiten estudiar la forma de andar de una persona. Actualmente, las técnicas más utilizadas se basan en la captura de una secuencia de imágenes de una persona caminando para posteriormente analizar

cada fotograma y extraer información de interés mediante la aplicación de algoritmos de visión artificial; para ello se utilizan básicamente 2 técnicas [3, 6].

- **Utilizando marcas de referencia:** se colocan marcas de un color especial en distintas partes predefinidas del cuerpo de la persona. La localización de dichas marcas permite realizar una estimación de la posición instantánea de sus articulaciones en cada fotograma (fig. 5.2, columna izquierda).
- **Aplicando técnicas de eliminación de fondo:** se aísla la imagen del usuario para obtener su silueta o su representación esquelética para realizar una estimación de la posición instantánea de sus articulaciones en cada fotograma. (fig. 5.2 columna derecha).

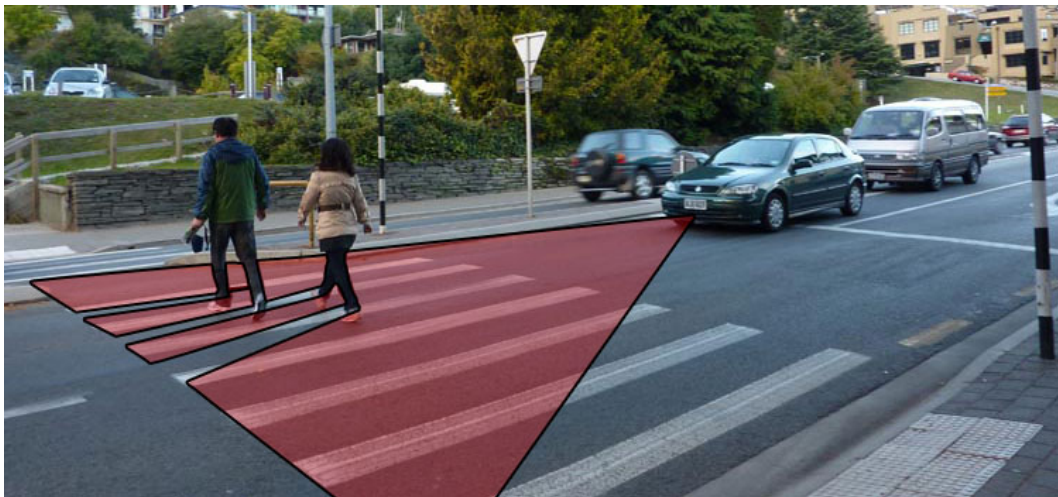
Otras técnicas existentes se basan en la utilización de una superficie sensible a la presión [7], en la sujeción de acelerómetros y giroscopios sobre diversas articulaciones [8] o la colocación de sensores piezoeléctricos en el calzado para obtener perfiles de presión [9].



**Fig. 5.2:** Segmentar referencias (columna izquierda). Segmentar cuerpo entero (columna derecha).

La tecnología láser también se ha propuesto para mejorar la seguridad activa de los vehículos, entendiendo por seguridad activa el conjunto de elementos que contribuyen a proporcionar una mayor eficacia y estabilidad al vehículo en marcha, y en la medida de lo posible, evitar un accidente. Concretamente, en [10, 11] se propone acoplar un sensor láser bidimensional a un vehículo móvil con el fin de detectar peatones cruzando la calzada y evitar posibles atropellos. En este caso, el sensor láser se sitúa barriendo un plano paralelo al suelo (fig. 5.3). A partir de los datos obtenidos en cada barrido se realiza una discriminación entre los puntos estáticos (obstáculos) y los puntos dinámicos (peatones) presentes en la trayectoria del vehículo.

En [12], y con el mismo objetivo, se utiliza un sensor láser tridimensional para analizar el volumen situado enfrente del vehículo y proceder a realizar una detección de personas a partir de la nube de puntos obtenida por el sensor láser. En este caso se seleccionan los subconjuntos de puntos candidatos a ser personas y se comparan con un conjunto de patrones preestablecidos.

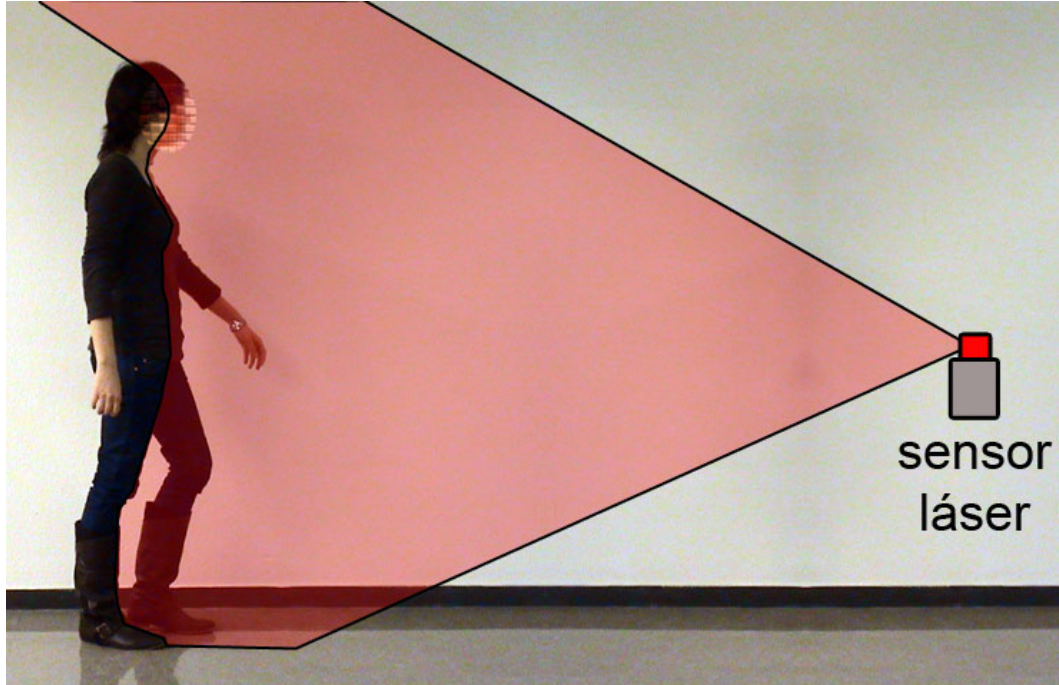


**Fig. 5.3:** Sensor láser bidimensional acoplado a un vehículo móvil como sistema de seguridad activa.

En [13] se propone la utilización de un sensor láser bidimensional para capturar los movimientos que realiza una persona al andar. El sistema (fig. 5.4) realiza un barrido en un plano vertical que debe situarse ligeramente desplazado



respecto al plano central de la persona para obtener información longitudinal de la posición del cuerpo y de una de las piernas.

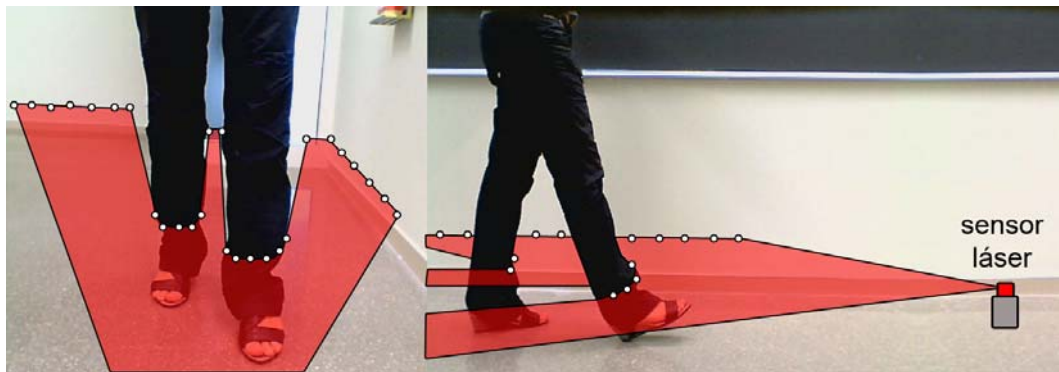


**Fig. 5.4:** Persona caminando hacia el sensor láser. Escaneo vertical ligeramente desplazado del centro de la persona.

## 5.2 Aportaciones al estado del arte

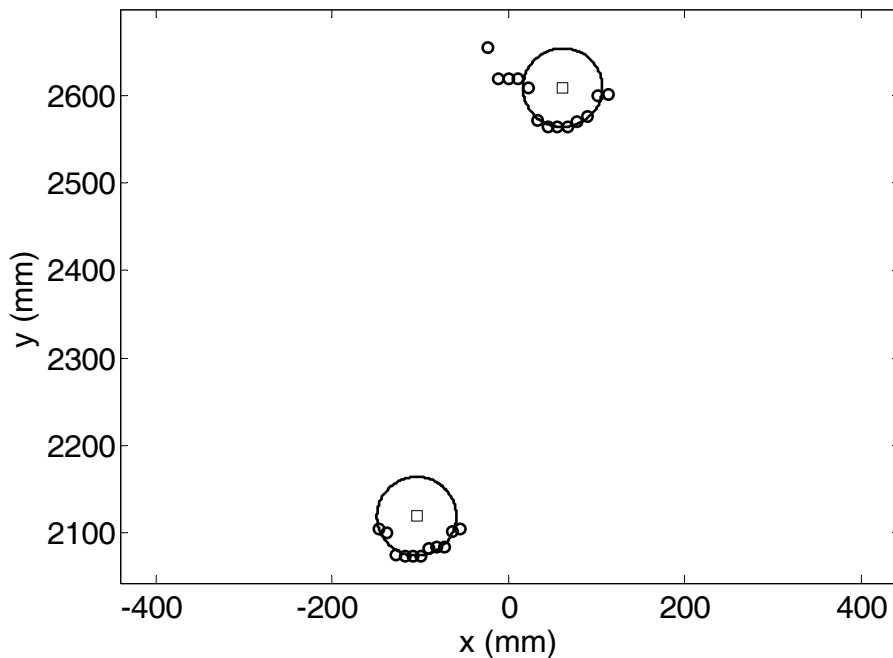
El siguiente trabajo propone un sistema para evaluar cuantitativamente los parámetros que definen la forma de caminar de las personas a partir de las mediciones realizadas con un sensor láser bidimensional de medida de distancias.

El sistema completo consta únicamente de un sensor láser bidimensional y un ordenador para capturar y analizar los datos del sensor. Para realizar el registro de la forma de caminar el láser se sitúa a una altura de 20 cm del suelo y con el plano de medición paralelo a éste. (fig. 5.5). La persona debe caminar en línea recta hacia el láser para evitar que el movimiento de las piernas genere problemas de oclusión. El estado de la técnica permite que un pequeño láser pueda cubrir un rango de medición de unos 10 metros lo que permite analizar hasta 8 pasos que pueden ser analizados de forma estadística.



**Fig. 5.5:** Persona andando hacia el sensor láser, vista frontal (izquierda) y vista lateral (derecha).

Para localización de las coordenadas de las piernas se ha propuesto ajustar el contorno de dos círculos de diámetro conocido (piernas del sujeto) a partir de la nube de puntos que probablemente formaran parte de cada pierna (fig. 5.6). 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. El análisis de la secuencia de datos obtenida permite realizar una estimación de los distintos parámetros que definen la forma de andar de cada persona.



**Fig. 5.6:** Ejemplo de ajuste por mínimos cuadrados entre los puntos del escaneo y el contorno de dos círculos que representan las piernas.



Las principales ventajas que comporta la utilización de un sensor láser como elemento de medición de la forma de caminar son las siguientes:

- El equipo de medida está formado únicamente por un sensor láser conectado a un ordenador personal o unidad de procesado equivalente.
- El sistema es capaz de analizar varios pasos en cada medición.
- No es necesario utilizar marcas ni escalas de referencia, tampoco es necesaria la calibración inicial.
- El sistema puede ser utilizado en interiores o exteriores, dependiendo de las necesidades y del sensor láser utilizado
- El sistema puede montarse en cualquier lugar en pocos minutos para ser utilizado de forma ambulatoria.

La principal desventaja del sistema propuesto es que sólo proporciona información de la posición de las piernas a una determina altura. Para obtener mayor información de la posición del cuerpo de la persona analizada sería necesaria la utilización de varios sensores láser colocados en distintas alturas [2].

### 5.3 Referencias

- [1] I. Lim, E. Wegen, C. Goede, M. Deutekom, A. Nieuwboer, A. Willems, D. Jones, L. Rochester, G. Kwakkel. "Effects of external rhythmical cueing on gait in patients with Parkinson's disease: a systematic review", *Clin. Rehabil.* 2005, 19, 695-713
- [2] M. E. Morris, "Movement disorders in people with Parkinson disease: a model for physical therapy", *Phys. Ther.* 2000, 80, 578-597.
- [3] J. Cutting, L. Kozlowski, "Recognising friends by their walk: gait perception without familiarity cues", *Bull. Psychonomic Soc.* 1977, 9, 353-356.
- [4] J. Little, J. Boyd, "Recognizing people by their gait: the shape of motion", *Videre* 1998; 1, 2-32.
- [5] L. Kozlowski, J. Cutting, "Recognizing the sex of a walker from a dynamic point-light display", *Percept. Psychophys.* 1977, 21, 575-580.
- [6] 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.
- [7] G. Qian, J. Zhang, A. Kidane, "People identification using gait via floor pressure sensing and analysis", *Lect. Note. Comput. Sci.* 2008, 5279, 83-98.
- [8] R. E. Mayagoitia, A.V. Nene, P.H. Veltink, "Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: an inexpensive alternative to optical motion analysis systems", *J. Biomech.* 2002, 35, 537-542.
- [9] S. Bamberg, A. Y. Benbasat, D. M. Scarborough, D. E. Krebs, J. A. Paradiso. "Gait analysis using a shoe-integrated wireless sensor system". *IEEE Trans. Inform. Technol. Biomed.* 2008, 12, 413-423.
- [10] G. Gate, F. Nashashibi, "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.



## CAPÍTULO V

### *Medición de la Forma de Caminar*

---

- [11] S. Gidel, C. Blanc, T. Chateau, P. Checchin, L. Trassoudaine, “A method based on multilayer laserscanner to detect and track pedestrians in urban environment”, *In IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Xi’an, Shaanxi, China, June 3-5, 2009; pp. 157-162.
- [12] L.E Navarro-Serment, C. Mertz, H. Hebert, “Pedestrian detection and tracking using three-dimensional ladar data”. *In Proceedings of the 7th International Conference on Field and Service Robotics*, Cambridge, MA, USA, July 14-16, 2009.
- [13] L Kornienko and L Kleeman, “An Autonomous Human Body Parts Detector Using A Laser Range-Finder”, *ACRA 2007*, Brisbane.

## Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor

Tomàs Pallejà, Mercè Teixidó, Marcel Tresanchez and Jordi Palacín  
*Department of Computer Science and Industrial Engineering,  
University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain.*

*Corresponding author. Tel.: +34 973702724; fax: +34 973702702.  
E-mail address: palacin@diei.udl.cat (J. Palacin).*

---

*Abstract:* This paper describes a measurement system designed to register the displacement of the legs using a two-dimensional laser range sensor with a scanning plane parallel to the ground and extract gait parameters. In the proposed methodology, the position of the legs is estimated by fitting two circles with the laser points that define their contour and the gait parameters are extracted applying a step-line model to the estimated displacement of the legs to reduce uncertainty in the determination of the stand and swing phase of the gait. Results obtained in a range up to 8 m shows that the systematic error in the location of one static leg is lower than 10 mm with and standard deviation lower than 8 mm; this deviation increases to 11 mm in the case of a moving leg. The proposed measurement system has been applied to estimate the gait parameters of six volunteers in a preliminary walking experiment.

Keywords: gait measurement; laser range sensor; LIDAR

---

Las páginas de la 82 a la 95 contienen el artículo:

T. Palleja, M. Teixido, M. Tresanchez, J. Palacin, “Measuring Gait Using a Ground Laser Range Sensor”, *Sensors*, 9 (2009), 9133-9146.  
<http://dx.doi.org/10.3390/s91109133>

## 6.1 Introducción

En este trabajo se propone la utilización de un sensor láser para implementar un sistema de ayuda para personas con problemas de visibilidad, sustituyendo el bastón blanco por un nuevo sistema tecnológico que permita obtener información del entorno y guiar el desplazamiento. El sistema propuesto se basa en un sistema láser bidimensional que permite escanear el entorno, un inclinómetro que estima la orientación del brazo del usuario y determina el modo de funcionamiento del sistema, y un cinturón táctil que transmite la información al usuario.

La acción de realizar un desplazamiento por la calle puede suponer un gran reto para una persona ciega o con severos problemas de visión. Actualmente, los sistemas de ayuda más utilizados por las personas con problemas de visión son el bastón blanco y el perro asistencial (fig. 6.1).



**Fig. 6.1:** Bastón blanco (izquierda) y perro guía (derecha).

El bastón blanco es una herramienta táctil, fabricada con materiales ligeros, como fibras sintéticas o aluminio. Su estructura puede ser rígida o plegable y existen distintos tamaños para adaptarse a la estatura y edad de los usuarios. El sonido que emite el bastón al contactar contra el suelo y su típico color blanco (con el extremo inferior de color rojo) permiten alertar al resto de transeúntes de la presencia de una persona con problemas de visión y estos, por cortesía, pueden facilitar su paso sin obstaculizar su trayectoria. En algunos países el bastón incorpora una codificación de colores para indicar el grado de

discapacidad de la persona, por ejemplo, en el Reino Unido dos líneas rojas indican que el usuario es sordo-ciego. Su principal fin es guiar al invidente, haciéndole notar sobre qué tipo de superficie está caminando y proporcionándole asimismo información acerca de su ubicación. El contacto del puntero con el suelo genera vibraciones, que son más intensas cuanto más dura es la superficie con la que se contacta. En el mercado existen distintos modelos de bastones con diferentes sistemas de agarre y diseñados para diferentes grados de ceguera: ciegos totales, personas que distinguen levemente luces y sombras, y personas con algún resto de visión.

Un perro asistencial es un perro que ha sido adiestrado y que ha adquirido las aptitudes necesarias para el acompañamiento, guiado y auxilio de personas con discapacidad. Existen seis categorías de perros de asistencia, la mayor parte estarán entrenados para realizar una tarea, aunque existen algunos con conocimientos combinados.

- **Perros guía:** Adiestrado para guiar a una persona con discapacidad visual o sordo-ciega. Aunque los perros pueden ser entrenados para esquivar diversos obstáculos, no distinguen colores como el verde y el rojo por lo que no pueden interpretar un semáforo.
- **Perros de señalización de sonidos:** Adiestrados para avisar a las personas con discapacidad auditiva de distintos sonidos e indicarles su fuente de procedencia.
- **Perros de servicio:** Adiestrados para prestar ayuda a personas con alguna discapacidad física en las actividades de su vida diaria, tanto en su entorno privado como en el entorno externo.
- **Perros de aviso:** Adiestrados para dar una alerta médica específica a personas que padecen epilepsia, diabetes, etc.
- **Perros para personas con trastornos del espectro autista:** Adiestrados para cuidar de la integridad física de una persona con trastornos del espectro autista, guiarla y controlar las situaciones de emergencia que pueda sufrir.

- **Perros incluidos en proyectos de terapia asistida con animales de compañía:** Adiestrados como animales de compañía destinados a visitas a hospitales, centros geriátricos, pisos tutelados, centros personas con discapacidad, viviendas particulares, etc.

Los sistemas tecnológicos de ayuda a las personas con problemas de visión se basan en la utilización de diversos sensores para obtener información del entorno de la persona y detectar obstáculos. Hasta el momento se ha propuesto sustituir el bastón blanco por sistemas basados en la utilización de sensores de ultrasonidos [1, 2], sensores de infrarrojos [3], sensores láser unidimensionales [4] y sistemas de visión artificial [5]; para sustituir al perro guía se ha propuesto también la utilización de robots móviles [6, 7].

Para mejorar y facilitar el funcionamiento de estos sistemas tecnológicos se puede optar por aprovechar elementos disponibles en el entorno o añadir nuevas marcas artificiales. Por ejemplo, colocando pequeños dispositivos magnéticos en el suelo para que puedan ser detectados mediante un sensor magnético [8]; colocando marcas que puedan ser detectadas por un sistema de visión artificial [9]; e incluso utilizando tarjetas RFID para identificar elementos del medio: una puerta de autobús [10], productos de un supermercado [11] o marcas en las aceras [12].

## 6.2 Aportaciones al estado del arte

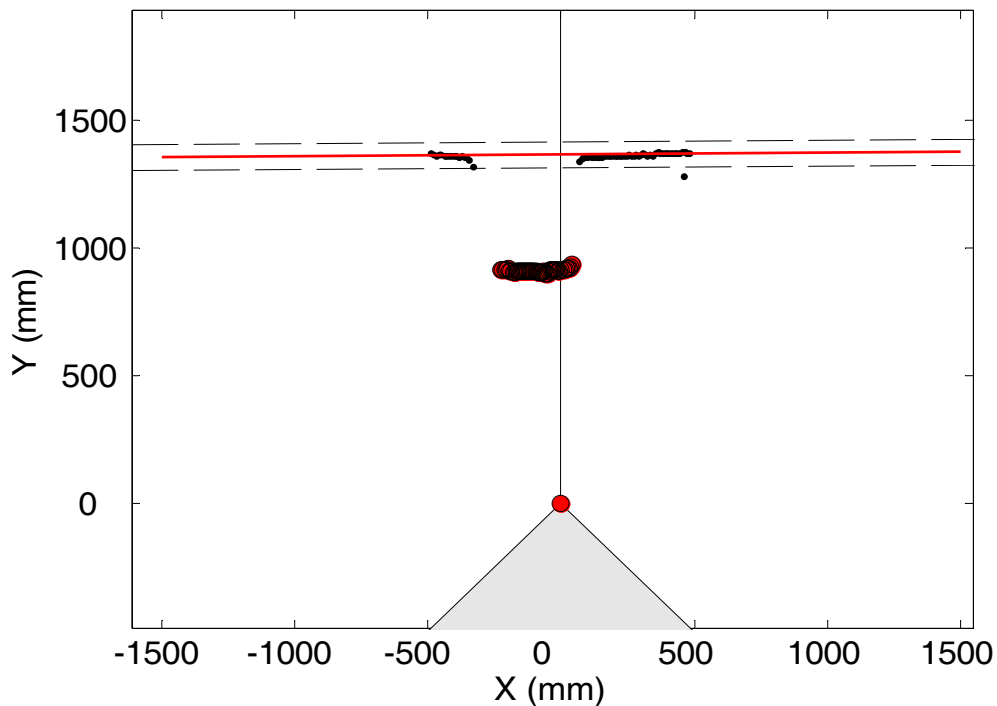
En este trabajo se propone la implementación de un sistema tecnológico de ayuda para personas con severos problemas de visión que permita obtener información del entorno y servir como alternativa al bastón blanco convencional. El sistema consta de dos elementos básicos: un sistema de medición sujeto a la muñeca del usuario y un cinturón táctil. El sistema de medición contiene un acelerómetro que permite conocer la orientación angular del brazo y el sensor láser bidimensional encargado de analizar y detectar el suelo y los obstáculos situados delante del usuario. El cinturón táctil contiene la unidad de procesado, las baterías del sistema y un conjunto de actuadores electromecánicos encargados de hacer llegar la información del sistema al usuario.

Se ha propuesto que el sistema opere en dos modos de trabajo: detección de obstáculos y exploración del entorno. Para trabajar en el modo de detección de obstáculos el usuario debe colocar el brazo apuntando hacia el suelo con una inclinación respecto a la horizontal de unos  $45^\circ$  (fig. 6.2). En este modo el sistema debe detectar el suelo, objetos, agujeros y escaleras que se encuentren en el camino del usuario. Para ello se realiza la detección del suelo (fig. 6.3, línea roja) y se definen unos márgenes auxiliares (fig. 6.3, líneas discontinuas) para detectar alteraciones que se interpretarán como un objeto o un agujero. Esta búsqueda puede refinarse para la detección de escaleras ascendentes o descendentes.



**Fig. 6.2:** Sistema operando en modo detección de obstáculos, el brazo del usuario está inclinado respecto al horizonte unos  $45^\circ$ .





**Fig. 6.3:** Conjunto de puntos obtenidos en un barrido. La línea roja representa la intersección entre el plano del láser y el suelo. Las dos líneas discontinuas marcan los límites seguridad para la detección de obstáculos.

Para operar en modo exploración del entorno el usuario debe colocar el brazo paralelo al suelo. En este caso, el sistema indica al usuario la distancia y la orientación del objeto más cercano. La distancia se codifica de forma táctil mediante la frecuencia de activación de los actuadores electromagnéticos: a menor distancia mayor frecuencia. La orientación relativa se codifica de forma proporcional mediante la posición del actuador activado.

Las principales ventajas que aporta el sistema propuesto para ayudar a las personas con problemas de visión son las siguientes:

- El sensor láser y el acelerómetro se encuentran fijados a la muñeca del usuario con un brazalete especial, de esta forma ambas manos se mantienen libres.
- El sistema no genera estímulos sonoros y, por tanto, no interfiere la percepción auditiva del usuario.
- El sistema es portátil y compacto.

Los primeros experimentos realizados en el laboratorio son prometedores en términos de usabilidad y descripción del entorno. Los buenos resultados obtenidos y la continua reducción del peso y el coste de los sensores láser auguran una posible futura comercialización de este sistema de ayuda electrónico basado en el uso de un sensor láser bidimensional.

### 6.3 Referencias

- [1] C. Kim, B. Song, “Design of a wearable walking-guide system for the blind”, *In Proceedings of the 1st International Convention on Rehabilitation Engineering & Assistive Technology: In Conjunction with 1st Tan Tock Seng Hospital Neurorehabilitation Meeting*, Singapore, April, 2007.
- [2] D. T. Batarseh, T.N Burcham, G.M. McFadyen, “An ultrasonic ranging system for the blind”, *In Proceedings of the Biomedical Engineering Conference*, Biloxi, MS, USA, April 1997; pp. 411-413.
- [3] S. Innet, N. Ritnoom, “An application of infrared sensors for electronic white stick”, *In Proceedings of the Intelligent Signal Processing and Communications Systems*, Bangkok, Thailand, December 2008.
- [4] R. Farcy, R.M Damaschini, “Guidance-assist system for the blind”, *In Proceedings of the Biomonitoring and Endoscopy Technologies*, Amsterdam, The Netherlands, 2001; pp. 209-214.
- [5] T. Pun, P. Roth, G. Bologna, K. Moustakas, D. Tzovaras, “Image and video processing for visually handicapped people”, *J. Image Video Process.* 2007, 5, 1-12.
- [6] K. Sung-Jae, H. Young, M. In Hyuk, “Development of an intelligent guide-stick for the blind”, *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, vol.4, no., pp. 3208- 3213 vol.4, 2001
- [7] J. Borenstein, I. Ulrich, “The GuideCane - A computerized travel aid for the active guidance of blind pedestrians” *Robot. Autom.* 1997, 2, 1283-1288
- [8] L. Hu, W.Z Lou, R.L. Song, C. Gao, X. Li, “A novel design of micro-magnetic sensor guidance system for the blind”, *In Proceedings of 4th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2009*. Shenzhen, China, January 2009; pp. 235-237.
- [9] M.S. Uddin, T. Shioyama, “Detection of pedestrian crossing and measurement of crossing length—An image-based navigational aid for blind people”, *Intell. Transp. Syst.* 2005, 86, 331- 336.
- [10] M. Z. H. Noor, I. Ismail, M.F. Saaid, “Bus detection device for the blind using RFID application”, *In Proceedings of 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, CSPA 2009, Kuala Lumpur, Malaysia, March 2009; pp. 247-249.
- [11] P. Lanigan, A. Paulos, A. Williams, D. Rossi, P. Narasimhan, “Trinetra: Assistive technologies for grocery shopping for the blind”, *In Proceedings of 2006 10th IEEE International Symposium on Wearable Computers*, Montreux, Switzerland, October 2006; pp. 147-148.
- [12] M. F. Saaid, I. Ismail, M.Z.H Noor, “ Radio Frequency Identification Walking Stick (RFIWS): A device for the blind”. *In Proceedings of 5th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications*, CSPA 2009, Kuala Lumpur, Malaysia, March 2009; pp. 250-253.

## Bioinspired Electronic White Cane Implementation Based on a LIDAR, a Tri-axial Accelerometer and a Tactile Belt

Tomàs Pallejà, Mercè Teixidó, Marcel Tresanchez and Jordi Palacín  
*Department of Computer Science and Industrial Engineering,  
University of Lleida, Jaume II, 69, 25001 Lleida, Spain.*

*Corresponding author. Tel.: +34 973702724; fax: +34 973702702.  
E-mail address: palacin@diei.udl.cat (J. Palacin).*

---

*Abstract:* This work proposes the creation of a bioinspired electronic white cane for blind people using the whiskers principle for short-range navigation and exploration. Whiskers are coarse hairs of an animal's face that tells the animal that it has touched something using the nerves of the skin. In this work the raw data acquired from a low-size terrestrial LIDAR and a tri-axial accelerometer is converted into tactile information using several electromagnetic devices configured as a tactile belt. The LIDAR and the accelerometer are attached to the user's forearm and connected with a wire to the control unit placed on the belt. Early validation experiments carried out in the laboratory are promising in terms of usability and description of the environment.

*Keywords:* blind; white cane; white stick; LIDAR; accelerometer; tactile

---

Las páginas de la 102 a la 120 contienen el artículo:

T. Palleja, M. Tresanchez, M. Teixido, J. Palacin, “Bioinspired Electronic White Cane Implementation Based on a LIDAR, a Tri-Axial Accelerometer and a Tactile Belt”, *Sensors*, 10 (2010), 11322-11339.  
<http://dx.doi.org/10.3390/s101211322>

Este trabajo propone la utilización de distintos sensores para obtener información del entorno con el objetivo de desarrollar nuevos sistemas y aplicaciones que aporten soluciones que contribuyan a mejorar el bienestar general de individuos y sociedades. En este capítulo se discuten los resultados más relevantes de los trabajos realizados durante la tesis.

Se ha realizado un trabajo de análisis de la trayectoria seguida por 4 robots móviles de limpieza (3 comerciales y 1 prototipo) que permite obtener una estimación del área explorada mediante el uso de un sistema de visión artificial que localiza y almacena la posición y la orientación del robot mientras realiza su tarea. A partir de estos datos, los parámetros físicos del robot y el área total de la superficie a limpiar, el sistema puede realizar una estimación del área explorada en función de la distancia recorrida por el robot, de este modo se propone un método de análisis que en un futuro pueda estimar el tiempo de exploración necesario para que un robot cubra el 99% de la superficie a limpiar, optimizando el proceso de limpieza y ahorrando energía.

A partir de los algoritmos implementados en el sistema de visión artificial utilizado en el trabajo anterior para localizar la posición de un robot móvil se ha diseñado una aplicación que permite a personas con problemas de movilidad utilizar un ordenador. Gracias a la colaboración de Indra y de la Fundación Adecco esta investigación se ha podido materializar en una aplicación software que permite controlar el cursor del ordenador con pequeños movimientos de la cabeza y realizar acciones de clic con gestos faciales, como abrir la boca o cerrar los ojos. Esta aplicación se ha denominado *HeadMouse*, se ofrece de forma gratuita en la web <http://robotica.udl.cat> y <http://tecnologiasaccesibles.com> y sólo requiere una cámara web de bajo coste para poder ser utilizada. Actualmente esta aplicación se utiliza ampliamente en diversos centros sanitarios donde tratan enfermos con distintos problemas de movilidad.

El desarrollo de un sistema alternativo para localizar la posición de un robot móvil basado en el uso de sensores láser derivó posteriormente en la realización de un trabajo que concluyó con la realización de un sistema que permitía estimar el volumen de biomasa de un conjunto de árboles frutales. La

estimación de volumen se correlacionó con mediciones manuales del área foliar para obtener una relación que pudiese ser utilizada de forma general. Durante el trabajo de análisis se experimentó con 5 métodos de cálculo del volumen a partir de la información aportada por el sensor láser, siendo la proyección cartesiana (XYP) la que ofreció una mayor correlación (0,90) y una menor complejidad de cálculo. A partir de este trabajo inicial se realizó un estudio sobre el error en la estimación del volumen en función de un conjunto de parámetros que intervienen en el cálculo: la altura del láser respecto el suelo, la distancia entre el sensor y el centro de los árboles, la inclinación del sensor y la velocidad de avance. Los resultados muestran que pequeños errores en la distancia hasta el centro de los árboles o en la inclinación del sensor afectan muy negativamente en la medida produciendo errores de hasta 30%, con lo que se considera muy necesaria la inclusión de sensores adicionales que permitan estimar dichos parámetros para corregir las estimaciones realizadas.

A partir de la experiencia obtenida con el uso de sensores láser se ha propuesto la utilización de dichos sensores para desarrollar otras aplicaciones. En primer lugar se ha propuesto utilizar sensores láser para obtener los parámetros típicos que definen la forma de andar de un individuo. La utilización de un sensor láser ha permitido ampliar el área de medición hasta los 10 metros sin requerir la utilización de marcadores externos. El sistema se ha verificado con un conjunto de voluntarios estimando parámetros como el ancho del paso, el tiempo de vuelo de cada pierna, el tiempo de reposo, la frecuencia del paso, la velocidad media del individuo, etc. Este sistema tiene aplicaciones futuras como elemento de medida que permita evaluar la evolución o influencia de los parámetros que definen la forma de andar en algunas enfermedades que afectan al sistema locomotor y también para estudiar la cinemática de los movimientos registrados.

En segundo lugar, se ha utilizado un sensor láser combinado con un acelerómetro triaxial y un cinturón vibratorio para implementar un sistema de medición del entorno que pueda ser utilizado por personas con graves problemas de visibilidad. Dicho sistema se inspira en el funcionamiento de algunos pelos de los bigotes de los animales para crear un sistema de palpación virtual alternativo

al bastón blanco convencional. El acelerómetro se utiliza para detectar la inclinación del antebrazo del usuario y seleccionar el modo de funcionamiento: exploración del entorno o modo detección de obstáculos. En cada modo se aplican algoritmos distintos para analizar la información procedente del sensor láser, estimar el entorno e informar al usuario mediante los elementos vibratorios del cinturón.

Los primeros ensayos con usuarios sin problemas de visión muestran que el sistema detecta el suelo correctamente el 93% de los casos. La detección de escaleras ascendentes y descendentes es correcta el 95% y 98% de los casos respectivamente. Pequeños obstáculos de 100 a 300 mm de lado se detectan sin error, a partir de estas dimensiones el sistema confunde el obstáculo con escaleras ascendentes.

En trabajos futuros se pretende validar el sistema con personas ciegas con el fin de identificar problemas, realizar mejoras y equipar el sistema con descripciones auditivas de alto nivel.

## 8.1 Medición de la Trayectoria de Robots Móviles

En este trabajo se ha medido, analizado y modelado la evolución de la superficie limpiada por distintos robots móviles de limpieza disponibles en el mercado.

El radio externo del robot, así como las dimensiones y la colocación del cepillo, determinan el proceso de limpieza. Se han definido dos figuras de mérito ROF y BRF para comparar el diseño mecánico de los robots analizados. Cuando ambos valores son el 100% la superficie barrida por el robot es máxima ya que el tamaño efectivo del cepillo es igual al diámetro del robot.

Un algoritmo de exploración basado total o parcialmente en trayectorias aleatorias asegura un cubrimiento total de la superficie a limpiar pero el robot cubre repetidamente zonas ya exploradas.

La evolución dinámica del área total limpiada por un robot móvil con un algoritmo de exploración aleatorio tiene una forma exponencial incluso si el robot dispone de un cepillo giratorio adicional.

La evolución de la superficie limpiada en función de la distancia recorrida puede ser estimada con un único modelo exponencial donde la amplitud corresponde al área máxima que el robot puede cubrir y la constante de distancia determina la evolución dinámica del área a limpiar.

Utilizar un robot móvil con un planificador de caminos aleatorio sobre una superficie con pequeños obstáculos a nivel de suelo, como patas de sillas, tiene un efecto muy pequeño en la constante de distancia del modelo evolutivo propuesto.

Los resultados indican que la amplitud y la constante de distancia del modelo exponencial dependen del robot por lo que si el área de la habitación es conocida se podrá llegar a estimar la evolución de la superficie cubierta por el robot y estimar el momento en que debería detenerse (5 veces la constante de distancia), evitando cubrir demasiadas veces la misma zona y minimizando el consumo energético del robot.



## 8.2 Error en el Cálculo del Volumen de la Biomasa

En este trabajo se analiza la sensibilidad de distintos errores presentes en la estimación del volumen de biomasa a partir de los datos proporcionados por un sistema LIDAR.

El sensor láser se usó para adquirir una secuencia de escaneos verticales sobre un conjunto de perales para luego estimar el volumen de biomasa. Se han propuesto cinco métodos para estimar el volumen a partir de los datos obtenidos con el LIDAR y el volumen calculado con cada método ha sido correlacionado con la estimación manual del volumen. La mejor correlación se obtuvo con el método basado en la proyección cartesiana de los puntos escaneados. En este trabajo se proponen algoritmos que simulen distintas fuentes de error para evaluar el efecto de cada una de ellas en la estimación del volumen de biomasa.

Para analizar la sensibilidad se comparó el volumen obtenido a partir de un conjunto de trayectorias con errores simulados analíticamente frente al volumen obtenido a partir de un conjunto de trayectorias de referencia (asumiendo ausencia de error). Las fuentes de error consideradas en este trabajo han sido: error en la velocidad de avance, error de altura, error de distancia hasta el centro de los árboles y error de inclinación.

Los resultados muestran que el error de velocidad en el sensor LIDAR se propaga de forma lineal en el cálculo del volumen de la biomasa; un error del 1% en la velocidad del láser causa un error de 1% en la estimación del volumen. El error de altura del sistema LIDAR tiene poca repercusión en el cálculo del volumen; un error en la altura del láser de 100 mm causa un error en la estimación del volumen menor al 3.5%. El error de distancia entre el LIDAR y el centro de los árboles tiene un efecto muy importante en la estimación del volumen; un error de 50 mm causa un error del 30% en la estimación del volumen. El error de inclinación del sensor también tiene un efecto muy negativo en la estimación del volumen; un error de inclinación de 2° induce un error del 30% en la estimación del volumen.

El interés y el uso de sistemas LIDAR en la agricultura van aumentando a medida que su precio decrece, pero para realizar una estimación precisa del volumen se requieren dispositivos adicionales o procedimientos para estimar la inclinación del sensor y la distancia del mismo hasta la línea imaginaria que define el centro de la tira de árboles. Si estos errores no se controlan y se corrigen se obtendrán grandes errores al estimar el volumen de la biomasa.

### **8.3 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.

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. Hasta los ocho metros la localización estática de las piernas se detecta con un error sistemático menor a 10 mm y una desviación estándar menor a 8 mm. En el caso de que las piernas estén en movimiento y debido a la exploración radial del sistema LIDAR la desviación estándar incrementa hasta los 11 mm.

El desplazamiento de las piernas se ha aproximado con una línea en forma de escalón para reducir la incertidumbre entre la fase de balanceo y la fase de apoyo, permitiendo la estimación precisa de algunos parámetros como por ejemplo: la trayectoria relativa, el desplazamiento de las piernas, la distancia y el tiempo invertidos en la fase de balanceo y la fase de apoyo, etc.

Como trabajo futuro, los resultados obtenidos con el sistema propuesto serán comparados con otros sistemas de medida usados en aplicaciones donde el análisis de la forma de andar ofrece información médica o biomecánica. Adicionalmente, el sistema de medida puede ser usado para estudiar la cinemática de los movimientos registrados.

## **8.4 Sensor Láser como alternativa al Bastón Blanco**

Este trabajo propone una nueva implementación de un bastón blanco electrónico inspirado en los bigotes de los animales y muestra los primeros resultados obtenidos con usuarios sin problemas visuales. Esta propuesta se basa en el uso combinado de un LIDAR, un acelerómetro triaxial y un cinturón táctil. Los experimentos realizados muestran que la información obtenida con el acelerómetro puede ser usada para alternar entre el modo detección de obstáculos, si el brazo (y el láser) apuntan hacia el suelo ( $\alpha \approx 45^\circ$ ), y el modo exploración del entorno, si el brazo está paralelo al suelo ( $\alpha \approx 90^\circ$ ). El objetivo principal del modo detección de obstáculos es la exploración del suelo que se encuentra justo delante del usuario, con el fin de garantizar su seguridad informando de cualquier obstáculo o discontinuidad presentes en el camino. El objetivo principal del modo exploración del entorno consiste en obtener información de la zona apuntada por el brazo del usuario cuando este se encuentra en una posición estática. Cuando se trabaja en modo detección de obstáculos, la intersección entre el plano del barrido láser y el suelo define una línea frontal. La presencia de puntos alejados de esta línea revela la existencia de pequeños objetos en mientras que una variación repentina de la distancia hasta la línea frontal indica la presencia de grandes obstáculos, como paredes o escaleras. Cuando se trabaja en modo exploración del entorno, los resultados muestran que el usuario puede obtener una idea clara del espacio que le rodea hasta una distancia de 6 metros, para ello debe mover el brazo realizando una exploración tridimensional. En ambos casos el cinturón vibratorio se usa para mostrar la informar al usuario simulando el efecto de unos bigotes con un número reducido de pelos.

Como trabajo futuro el sistema propuesto tendrá que ser testado con usuarios ciegos para obtener realimentación funcional específica, a partir de esta información se desea evaluar y mejorar la efectividad de los algoritmos y del sistema mecánico. Futuras investigaciones en esta área se centrarán en la incorporación de sensores adicionales y el desarrollo de algoritmos específicos para mejorar la descripción del entorno y generar advertencias de alto nivel.