



Universitat de Lleida

# Aplicación de sensores de flujo óptico para el desarrollo de nuevos sistemas de medida de bajo coste

**Marcel Tresanchez Ribes**

---

**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.

---

TESIS DOCTORAL

# Aplicación de sensores de flujo óptico para el desarrollo de nuevos sistemas de medida de bajo coste

Autor

**Marcel Tresanchez Ribes**

Departamento de Informática e Ingeniería Industrial

Universitat de Lleida

mtresanchez@diei.udl.cat

Director de Tesis

**Dr. Jorge Palacín Roca**

Lleida, octubre de 2011



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

## **Aplicación de sensores de flujo óptico para el desarrollo de nuevos sistemas de medida de bajo coste**

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

**Programa de doctorado:** Ingeniería y Tecnologías de la Información

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

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

CERTIFICO:

Que la memoria “**Aplicación de sensores de flujo óptico para el desarrollo de nuevos sistemas de medida de bajo coste**” presentada por Marcel Tresanchez Ribes para optar al grado de doctor se ha realizado bajo mi supervisión.

Lleida, 4 de octubre de 2011



*Amb tu mai em sentiré sol*



# Resumen

En esta memoria se presentan diversos trabajos de investigación relacionados con la utilización de sensores de flujo óptico de bajo coste para el desarrollo de nuevos sistemas de medida compactos y de muy bajo coste. Las aplicaciones planteadas permiten aprovechar todo el potencial industrial de este tipo de sensores.

Los sensores de flujo óptico tienen la particularidad de incorporar dentro de un único encapsulado un sistema de adquisición de imágenes y un procesador digital preprogramado para realizar el cómputo de flujo óptico (*optical flow*) de la imagen. De esta manera, este tipo de sensores no requieren ningún sistema procesador adicional y, en algunos casos, pueden funcionar sin ningún otro elemento adicional de control.

Actualmente, el éxito comercial de los sensores de flujo óptico ha facilitado su producción industrial masiva con costes de fabricación muy bajos lo que ha incentivado el desarrollo de nuevas aplicaciones en campos tan diversos como la robótica donde el coste es un elemento fundamental en las aplicaciones destinadas a un mercado de consumo.

En esta memoria se presenta, por un lado, el análisis del estado del arte de los sensores de flujo óptico y sus aplicaciones, y por el otro, el trabajo de investigación realizado sobre la utilización del sensor para el desarrollo de un codificador rotativo incremental, un codificador absoluto, un sistema de detección de monedas falsas de 2 euros y para realizar el seguimiento de la pupila del ojo de una persona con el fin de desarrollar un dispositivo apuntador que pueda ser de utilidad para una persona con discapacidad. Los resultados obtenidos en las pruebas experimentales realizadas con los diferentes sensores de flujo óptico utilizados en los dispositivos propuestos han permitido validar las propuestas realizadas y la versatilidad del diseño del sensor.



# Summary

This work presents the research performed with optical flow sensors and the proposal of several new compact and low cost applications developed to take full advantage of the industrial potential of these sensors.

Optical flow sensors include into the same chip an image acquisition system and a digital signal processor programmed to compute the optical flow of the image acquired. These sensors do not require additional post-processing and can operate without any other additional external control or processing device.

Currently, the commercial success of the optical flow sensors has fostered its massive industrial production and has reduced its final cost. This characteristic, combined with the versatility of the design of the sensor, has also fostered the development of a huge range of new applications in different areas, such as robotics, where the cost is a fundamental factor that prone the development and commercialization of new consumer applications.

This works presents, in one hand, a review of the state of the art of the research and development related with optical flow sensors and, in the other hand, a set of new applications proposed to take full advantage of the characteristics of the sensor. The new applications proposed are: a relative encoder, an absolute encoder, a counterfeit system for the 2€ case, and an accessibility device that tracks the pupil of the user to control pointer displacement in a computer screen. This device has been designed specifically to help people with mobility impairments in the upper extremities that cannot use the computer mouse. In all cases, the experimental results achieved with the different optical flow sensors used in the new applications proposed have validated the utility and versatility of each proposal and the utility and versatility of the design of this optical sensor.



# Resum

En aquesta memòria es presenten diversos treballs relacionats amb la utilització dels sensor de flux òptic de baix cost pel desenvolupament de nous sistemes de mesura compactes i de molt baix cost. Les aplicacions plantejades permeten aprofitar tot el potencial industrial d'aquest tipus de sensors.

Els sensors de flux òptic tenen la peculiaritat d'incorporar dins d'un únic encapsulat un sistema d'adquisició d'imatges i un processador digital preprogramat per a realitzar el còmput de flux òptic (*optical flow*) de la imatge. D'aquesta manera, aquest tipus de sensors no requereixen cap sistema processador addicional i, en alguns casos, poden funcionar sense cap altre element addicional de control.

Actualment, l'èxit dels sensors de flux òptic ha facilitat la seva producció industrial massiva amb costos de fabricació molt baixos el que ha incentivat el desenvolupament de noves aplicacions en camps tan diversos com la robòtica on el cost és un element fonamental en les aplicacions destinades a un mercat de consum.

En aquesta memòria es presenta, per una banda, l'anàlisi de l'estat de l'art dels sensors de flux òptic i les seves aplicacions, i per l'altra, el treball de recerca realitzat sobre l'ús d'aquest sensor per a desenvolupar un codificador rotatiu incremental, un codificador absolut, un sistema de detecció de monedes falses de 2 euros, i per a realitzar el seguiment de la pupila de l'ull d'una persona amb discapacitat. Els resultats obtinguts a partir de les proves experimentals realitzades amb els diferents sensors de flux òptics utilitzats als dispositius proposats han permès validar les propostes realitzades i la versatilitat del disseny del sensor.



# Índice de contenidos

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Descripción del sensor de flujo óptico .....	5
1.2.1. Principio de funcionamiento.....	6
1.2.2. Medición del flujo óptico .....	8
1.2.3. Comunicación y datos .....	10
1.3. Caracterización del sensor de flujo óptico.....	13
1.3.1. Como sensor de medida de desplazamiento.....	13
1.3.2. Como una matriz de sensores de desplazamiento .....	16
1.3.3. Influencias en el funcionamiento.....	17
1.3.3.1. Altura de trabajo.....	17
1.3.3.2. Tipos de superficie.....	19
1.3.3.3. Iluminación .....	20
1.3.3.4. Ubicación del sensor.....	21
1.3.3.5. Trayectorias de desplazamiento curvadas.....	22
1.3.3.6. Velocidad de movimiento .....	23
1.4. Aplicaciones actuales del sensor de flujo óptico .....	26
1.4.1. Medir desplazamiento .....	26
1.4.2. Información adicional del sensor.....	31
1.4.3. El sensor como dispositivo de visión .....	31
1.5. Referencias .....	33
<b>2. Objetivos</b>	<b>39</b>
2.1. Objetivo de la tesis .....	39
<b>3. Desarrollo de un codificador rotativo incremental a partir de un sensor de flujo óptico</b>	<b>41</b>
3.1. Introducción.....	41
3.2. Aportación al estado del arte .....	44
3.3. Referencias .....	45

3.4. <i>The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder.</i> M. Tresanchez et al. / <i>Sensors and Actuators A</i> 155 (1) (2009) 73–81.....	47
1. Introduction .....	47
2. Sensor description .....	49
3. Detecting reference marks .....	50
3.1. Detecting marks using SQUAL .....	50
3.2. Detecting marks using SHUTTER.....	52
3.3. Detecting marks using PIXELSUM.....	53
4. The incremental rotary encoder.....	55
5. Use and validation of the rotary encoder.....	62
6. Conclusions .....	64
Acknowledgements .....	65
References .....	65
<b>4. Desarrollo de un codificador rotativo absoluto a partir de un sensor de flujo óptico</b>	<b>67</b>
4.1. Introducción.....	67
4.2. Aportación al estado del arte .....	71
4.3. Referencias .....	71
4.4. <i>Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder.</i> M. Tresanchez et al. / <i>Sensors and Actuators A</i> 157 (2010) 161–167 .....	74
1. Introduction .....	74
2. Optical sensor capabilities.....	76
3. Visual positioning code .....	78
3.1. Complete code .....	80
3.2. Radial code.....	82
3.3. Radial enhanced code .....	83
4. Encoder validation.....	85
4.1. Combined.....	86
4.2. Visual .....	87
5. Conclusions .....	88
Acknowledgements .....	88
References .....	89

<b>5. Uso de un sensor de flujo óptico para detectar monedas de 2 euros falsas</b>	<b>91</b>
5.1. Introducción.....	91
5.2. Aportación al estado del arte .....	95
5.3. Referencias .....	95
5.4. <i>Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector</i> . M. Tresanchez et al. / <i>Sensors</i> , 9 (2009) 7083–7096 .....	97
1. Introduction .....	97
2. Background.....	99
3. The Optical Mouse Sensor .....	101
4. Two-Euro Counterfeit Coin Detection.....	102
A. SQUAL based identification.....	103
B. Template matching.....	105
5. System Validation .....	107
6. Conclusions .....	109
Acknowledgements .....	110
References and Notes .....	110
<b>6. El sensor de flujo óptico como base de un dispositivo apuntador controlado mediante el desplazamiento del ojo</b>	<b>113</b>
6.1. Introducción.....	113
6.2. Aportación al estado del arte .....	117
6.3. Referencias .....	118
6.4. <i>Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor</i> . Submitted to <i>Sensors and Actuators A</i> . .....	120
1. Introduction .....	120
1.1. Related works.....	121
A. Eye-gaze interface devices .....	121
B. Iris or pupil detection.....	122
C. Optical mouse sensor as imaging device .....	122
1.2. Contributions of this work .....	122
2. Optical sensor .....	122
2.1. Optical sensor selection .....	123
2.2. Additional illumination.....	125
2.3. Lens selection.....	126
3. Pupil detection.....	128

3.1. Algorithm for pupil detection .....	128
3.2. Evaluating the operational angular range .....	131
4. Computer mouse emulation.....	133
4.1. Starting the interface device.....	133
4.2. Pointer control and click events.....	133
4.3. Disabling and enabling mouse emulation.....	134
5. Validation of the interface device .....	134
6. Conclusions .....	135
Acknowledgements .....	137
References .....	138
<b>7. Discusión general de los resultados</b>	<b>141</b>
<b>8. Conclusiones finales</b>	<b>145</b>
8.1. Codificador rotativo incremental.....	145
8.2. Codificador rotativo absoluto .....	146
8.3. Detector de monedas de 2 euros falsas.....	148
8.4. Dispositivo apuntador controlado con el ojo.....	149
<b>Lista de símbolos y abreviaciones</b>	<b>153</b>

# Índice de figuras

Fig. 1.1.	Publicaciones en revistas y congresos internacionales relacionadas con el uso o aplicación de sensores de flujo óptico .....	2
Fig. 1.2.	Ejemplo de sensor de flujo óptico fabricado por Avago Technologies (modelo ADNS-3080 [7]), diseñado originariamente para ser utilizado como sensor óptico de desplazamiento de un ratón informático .....	5
Fig. 1.3.	Vista de perfil de las partes involucradas en el sistema de medición de un sensor de flujo óptico .....	6
Fig. 1.4.	Esquema básico de funcionamiento del sensor de flujo óptico.....	7
Fig. 1.5.	Ejemplo gráfico de un algoritmo de navegación del sensor de flujo óptico ....	10
Fig. 3.1.	Ejemplos de aplicaciones de codificadores rotativos incrementales: a) Hokuyo URG-04LX-UG01 Laser Rangefinder; b) Rueda de desplazamiento de un ratón informático; c) Codificador rotativo magnético aplicado en el eje de un motor DC .....	42
Fig. 4.1.	Ejemplo de un codificador rotativo absoluto basado la detección óptica con una codificación de Gray de 13 pistas.....	68
Fig. 4.2.	Partes principales de un codificador rotativo absoluto basado en fotodiodos y codificación de Gray .....	69
Fig. 5.1.	Ejemplo esquemático de las principales partes y funcionamiento de un discriminador de monedas .....	92
Fig. 5.2.	Número de monedas falsificadas de 1, 2 euros y 50 céntimos detectadas en circulación de año en año hasta el 2010.....	93
Fig. 5.3.	Ejemplos de monedas de otros países muy parecidas a las de 2 euros pero con menor valor y que no son de curso legal en Europa.....	94
Fig. 6.1.	Ejemplo de un software que permite controlar el cursor informático con movimientos de la cabeza, HeadMouse [3][12].....	114
Fig. 6.2.	Diferentes sistemas comerciales que permiten controlar el cursor informático con el movimiento de los ojos: a) IG-30 de Alea Technologies, b) Eyegaze Edge de LC Technologies, c) Quick Glance de EyeTech Digital Systems, d) PCEye de Tobii Technology .....	115

## **The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder**

Fig. 1.	Example of images obtained with two optical mouse sensors: LED-based ADNS-3088 LED (left), laser-based ADNS-6010 (right) .....	48
Fig. 2.	Sectional view of typical assembly of an optical mouse sensor (courtesy of Avago).....	49
Fig. 3.	Image of the experiment performed to evaluate the effect of one transversal black line in some internal registers of the optical mouse sensor .....	51

Fig. 4.	Dynamic evolution of the SQUAL register when moving the optical mouse sensor over white paper with three transversal black lines of width: 1.2, 3.2 and 5.2 mm, elapsed 25.4 mm .....	51
Fig. 5.	Dynamic evolution of the SHUTTER register when moving the optical mouse sensor over white paper with three transversal black lines of width: 1.2, 3.2 and 5.2 mm, elapsed 25.4 mm .....	52
Fig. 6.	Maximum and minimum values of the SHUTTER register for different line widths .....	53
Fig. 7.	Dynamic evolution of the PIXELSUM register when moving the optical mouse sensor over white paper with three transversal black lines of width: 1.2, 3.2 and 5.2 mm, elapsed 25.4 mm .....	54
Fig. 8.	Maximum, average and minimum value of the PIXELSUM register for different line widths.....	54
Fig. 9.	Image (right) and drawing (left) of the parameters and parts of the rotary encoder .....	55
Fig. 10.	Dynamic evolution of the SHUTTER, PIXELSUM and SQUAL registers when moving the optical sensor linearly over white paper with three black lines of width: 1.2, 3.2 and 5.2 mm, elapsed 25.4 mm .....	56
Fig. 11.	Images from the ADNS-3088 used to locate the center of rotation of the wheel of the rotary encoder; the line has a width of 0.2 mm.....	56
Fig. 12.	Average counts of both measurement axes in the allowed resolutions depending on the placement radius of the sensor .....	57
Fig. 13.	Standard deviation of the counts measured in one complete turn over the y-axis depending on the placement radius of the sensor.....	57
Fig. 14.	Relative error of the counts measured in one complete turn over the y-axis depending on the placement radius of the sensor .....	58
Fig. 15.	Histograms of the absolute error obtained in the counts measured in one turn at a fixed angular speed of 15 rpm and the optical sensor placed at a radius of 10 mm for resolutions of 400 and 800 cpi.....	58
Fig. 16.	Maximum, average and minimum counts measured in one complete turn with the optical sensor placed at a radius of 10 mm.....	59
Fig. 17.	Standard deviation of the counts measured in one complete turn with the optical sensor placed at a radius of 10 mm.....	59
Fig. 18.	Maximum, average and minimum value of the PIXELSUM register for different angular speeds with the optical sensor placed at a radius of 10 mm .....	60
Fig. 19.	Maximum, average and minimum counts measured in one complete turn for different angular speeds with the optical sensor placed at a radius of 10 mm.....	60
Fig. 20.	Lines of 0.2 (left), 1.2 (center) and 2 mm (right) viewed by the ADNS-3088.....	61
Fig. 21.	Average relative error in the counts measured in one complete turn for different angles of orientation with the optical sensor placed at a radius of 10 mm .....	61

Fig. 22.	Average relative error in the counts measured in one complete turn for different relative height offsets with the optical sensor placed at a radius of 10 mm .....	62
Fig. 23.	Lines of 0.2 mm viewed by the ADNS-3088 at the nominal height (left) and with a relative offset of 1.2mm (right) .....	62
Fig. 24.	Cumulative relative error in the counts measured by the rotary encoder when compared with the expected value .....	64

### **Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder**

Fig. 1.	Image of a prototype of the absolute rotary encoder.....	78
Fig. 2.	Maximum angular resolution of the rotary encoder depending on the placement radius of the optical sensor .....	79
Fig. 3.	Graphic representation of the complete code. The arrows depict different coded position values and the dotted square the area visible to the optical sensor .....	80
Fig. 4.	Sample images of the complete code obtained with the optical sensor (bit size is $0.20 \times 0.20$ mm).....	81
Fig. 5.	Image of the complete code acquired by the optical sensor (left) (at a radius of 15 mm) with the value of the cumulative distance vector, D (right) for all rows.....	81
Fig. 6.	Intensity values at the row 16 of the image of Fig. 5 (corresponding to $b_0$ ): $d_i$ is the absolute distance from peak-to-valley and valley-to-peak .....	81
Fig. 7.	Graphic representation of the radial code. The arrows depict different coded position values and the dotted square the area visible by the optical sensor .....	82
Fig. 8.	Sample images of the radial code obtained with the optical sensor (bit size is $0.26 \text{ mm} \times 0.26 \text{ mm}$ ).....	83
Fig. 9.	Segmented image of the radial code, the profile of the column of the reference bit (right) and vector sum of the columns (down) of the segmented image.....	83
Fig. 10.	Graphic representation of the radial enhanced code. The arrows depict different coded position values and the dotted square, a representation of the area visible to the optical sensor .....	84
Fig. 11.	Sample images of the radial enhanced code obtained with the optical sensor (bit size is $0.20\text{mm} \times 0.20 \text{ mm}$ ) .....	84
Fig. 12.	Segmented image of the radial enhanced code, the vector sum of rows (right) and profile of the row of the reference bit (down) of the segmented image.....	85
Fig. 13.	Absolute angular displacement measured by the rotary encoder in the combined mode. The circle depicts the initial and final readings and the points, the motion measured by the internal DSP .....	87
Fig. 14.	Numerical values decoded by the rotary encoder in the visual mode.....	87

**Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector**

Fig. 1. Common side of all two-Euro coins minted before 2007 (left) and minted from 2007 onwards (right)..... 99

Fig. 2. Counterfeit Euro coins detected in circulation up to 2007 ..... 100

Fig. 3. Number of newly two-Euro counterfeit common classes..... 100

Fig. 4. Sectional view of assembly components for the ADNS-3088 sensor (courtesy of Avago)..... 101

Fig. 5. Dynamic evolution obtained from the SQUAL register when the optical mouse sensor is moving over a white paper with a transversal black line of 1.2 mm width..... 102

Fig. 6. Some images captured by the ADNS-3088 optical mouse sensor when moving over a black line of 1.2 mm width..... 102

Fig. 7. Schematic view of the proposed two-Euro counterfeit coin detector. The square is a representation of the area of the image acquired by one optical sensor..... 103

Fig. 8. Dynamic evolutions of the values of the SQUAL register in a complete revolution of three different two-Euro coins ..... 104

Fig. 9. Average, maximum and minimum value of the SQUAL register obtained in one rotation of a two-Euro coin with the optical sensor placed at different radius ..... 104

Fig. 10. Typical histogram of an image of the common side of the two-Euro coin.... 105

Fig. 11. Number of white pixels found in the images of the common side of the two-Euro coin. The angular displacement was measured with a second optical sensor in the other side ..... 106

Fig. 12. A (left), B (middle), and C (right) reference images selected as templates... 106

Fig. 13. Number of reference images automatically selected depending on the placement radius of the optical sensor..... 107

Fig. 14. Evolution of the matching results in one rotation of three template images for a valid two-Euro coin. The solid squares depict the angular position of the best matching..... 108

Fig. 15. Evolution of the matching results in one rotation of three template images for an invalid two-Euro coin. The solid squares depict the angular position of the best matching..... 108

**Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor**

Fig. 1. CAD representation of the interface device proposed..... 121

Fig. 2. Image of the different parts of an optical mouse ..... 123

Fig. 3. Image acquired reading the ADNS-2620 Pixel\_Grab register: static object (left) and object in movement (right)..... 124

---

Fig. 4.	Image acquired reading the Pixel_Burst register of an ADNS-3060 (left) and an ADNS-6010 (right) under the same operational conditions and the same object.....	124
Fig. 5.	ADNS-3060 optical sensor wavelength responsivity .....	125
Fig. 6.	Typical images acquired with the optical sensor .....	126
Fig. 7.	Graphic description of the lens selection experiment .....	126
Fig. 8.	Pupil diameter relative to the eye distance for the different lenses tested .....	127
Fig. 9.	Right-eye images acquired with the ADNS-3060 and the CAY46 lens when one static user is looking at the center and four extreme relative orientations in front of a TFT monitor .....	127
Fig. 10.	Valid distance range for the different lenses tested.....	128
Fig. 11.	Profile of the 15 <sup>th</sup> row of the image shown in Table 2.....	129
Fig. 12.	Tracking of the center of the pupil on a diagonal trajectory .....	130
Fig. 13.	Some eye-gaze image results from the integro-differential algorithm.....	130
Fig. 14.	Representation of the optical sensor placement used in the measurement of the operational angular range.....	131
Fig. 15.	Intensity representation of the distance in pixels between the extreme left and right (horizontal) pupil orientations when placing the optical sensor at different elevation and azimuth.....	132
Fig. 16.	Intensity representation of the distance in pixels between the extreme top and bottom (vertical) pupil orientations when placing the optical sensor at different elevation and azimuth.....	132
Fig. 17.	Representation of the different image motion areas defined to control the motion of the pointer with the displacement of the eye.....	134
Fig. 18.	Image of a user interacting with the prototype interface device .....	135



# Índice de tablas

## **The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder**

Table 1. Paper types analyzed.....	52
------------------------------------	----

## **Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder**

Table 1. Smallest information pattern extracted correctly from the optical sensor.....	75
Table 2. Optical sensor radial dependences .....	78
Table 3. Decoding error rate .....	85

## **Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector**

Table 1. Decision categories for valid and invalid coins .....	109
Table 2. Validation comparative results.....	109

## **Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor**

Table 1. Optical sensors with Pixel_Burst register .....	124
Table 2. Flow chart of the proposed pupil detection algorithm .....	128
Table 3. Algorithms performances.....	130
Table 4. Images acquired with the optical sensor during the experiment .....	135
Table 5. Average validation results obtained.....	136



# Capítulo 1

## Introducción

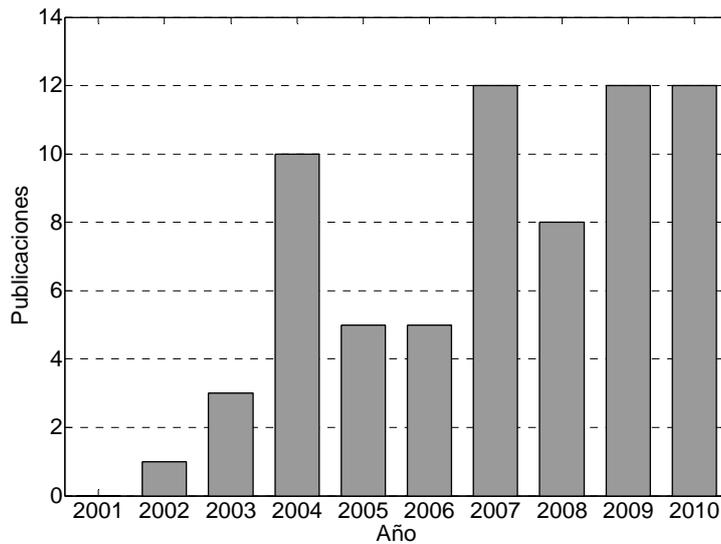
---

### 1.1. Introducción

En este trabajo se proponen nuevas aplicaciones del sensor de flujo óptico de bajo coste con el objetivo de facilitar el desarrollo de nuevas tecnologías en sectores donde el coste económico es un factor determinante. Las aplicaciones que se presentan pretenden contribuir en el desarrollo de nuevos dispositivos tecnológicos que ayuden a mejorar el estado de bienestar de nuestra sociedad.

El primer sensor de flujo óptico se propuso en 1999 [1] para ser utilizado en el ratón informático. La versatilidad de este tipo de sensores combinada con su fabricación industrial masiva fue un estímulo para poder tener al alcance esta tecnología con un precio muy reducido.

En 2002 se empezaron a publicar trabajos científicos con aplicaciones alternativas de este tipo de sensores (Fig. 1.1) que actualmente mantienen su interés científico. Concretamente, en 2010 el número acumulado de publicaciones relacionadas con este tipo de sensores ascendía a 68 entre revistas y congresos internacionales (Fig. 1.1).



**Fig. 1.1.** Publicaciones en revistas y congresos internacionales relacionadas con el uso o aplicación de sensores de flujo óptico.

El primer trabajo de este campo desarrollado en el laboratorio de robótica de la Universidad de Lleida se realizó en el año 2006 y consistió en la caracterización del sensor de flujo óptico y su aplicación en la estimación de la trayectoria de un robot móvil [2]. Los resultados obtenidos en este primer trabajo han permitido desarrollar un trabajo de investigación que ha generado las siguientes publicaciones científicas:

- M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder, *Sensors and Actuators A*, 155 (2009), 73–81.
- M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector, *Sensors*, 9 (2009), 7083-7096.
- M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder, *Sensors and Actuators A*, 157 (2010), 161-167.

- M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, Measuring yarn diameter using inexpensive optical sensors, *Procedia Engineering*, (5) 2010, 236-239.

Las siguientes publicaciones pendientes de aceptación:

- M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor, *Sensors and Actuators A*, Submitted.
- M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, Measuring yarn diameter using fast and inexpensive optical sensors, *International Journal of Sensors*, Submitted.
- D. Font, M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, Characterization of a low-cost optical flow sensor when using an external laser as a direct illumination source, *Sensors and Actuators A*, Submitted.
- M. Tresanchez, D. Font, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, “Experimental Characterization of the Twin-Eye Laser Mouse Sensor,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Submitted.

Y las siguientes participaciones en congresos:

- M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacin, Implementación de un codificador rotativo incremental mediante el sensor óptico del ratón informático, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'09). Leganés, España, Julio 2009.
- M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacin, Diseño de un codificador rotativo absoluto mediante el sensor óptico del ratón informático, Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación (SAAEI'10). Bilbao, España, Julio 2010.

- M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacin, Measuring Yarn Diameter Using Inexpensive Optical Sensor, Eurosensors XXIV. Linz, Austria, September 2010.

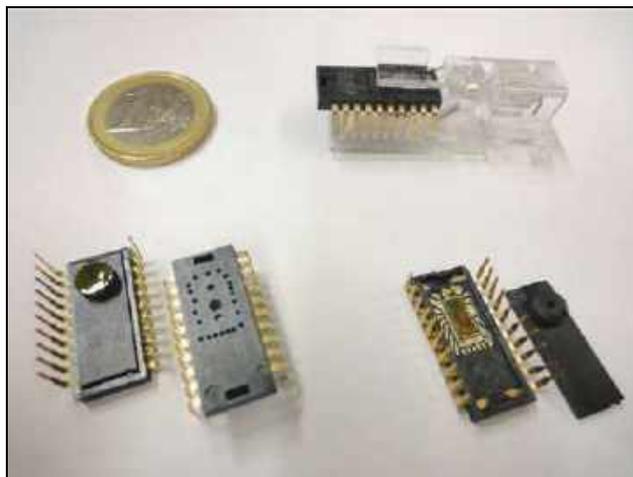
Para la realización del cuerpo principal de esta memoria se han seleccionado cuatro aplicaciones diferentes del sensor de flujo óptico que han sido publicadas o están pendientes de publicación en forma de artículo científico. En primer lugar, en el capítulo 3 se presenta el desarrollo e implementación de un codificador rotativo incremental con las medidas obtenidas por el sensor de flujo óptico. La mejora de este dispositivo se presenta en el capítulo 4, donde se propone implementar un codificador rotativo absoluto mediante el procesado de una serie de códigos visuales obtenidos con el sensor óptico. La siguiente aplicación que se presenta en el capítulo 5 tiene como objetivo detectar falsificaciones de monedas de 2 euros. El trabajo se basa en analizar la superficie de una moneda y compararla con los patrones obtenidos de una muestra válida mediante inspección visual. Posteriormente, en el capítulo 6, el sensor de flujo óptico se utiliza como de adquisición de imágenes de bajo coste para capturar los movimientos del ojo y desarrollar un dispositivo apuntador controlado con dichos movimientos. Finalmente, en los capítulos 7 y 8 se detallan los resultados finales obtenidos y las conclusiones de cada aplicación respectivamente.

A continuación, se presenta una breve introducción del funcionamiento de los sensores de flujo óptico y un análisis del estado del arte donde se enumeran todas las aplicaciones que se han propuesto desde la aparición de este versátil sensor hasta la actualidad.

## 1.2. Descripción del sensor de flujo óptico

La finalidad principal de un sensor de flujo óptico es medir la cantidad de movimiento o desplazamiento en un plano bidimensional mediante técnicas de medida basadas en procesado de imágenes. El sensor de flujo óptico de bajo coste utilizado en los ratones informáticos (Fig. 1.2) está formado por un sistema de adquisición de imágenes con un procesador digital preprogramado en el mismo encapsulado que permite estimar el flujo óptico producido mientras se desplaza.

Desde 1999 los ratones informáticos optaron por la tecnología óptica siendo el principal fabricante Avago Technologies [1] que hoy en día proporciona sensores a la gran mayoría de los productores de ratones informáticos (Fig. 1.2). Además de Avago, se pueden destacar los fabricantes ST Microelectronics [3], ATLab Inc. [4], ELAN Microelectronics Corp. [5] o PixArt Imaging Inc. [6] entre otros.



**Fig. 1.2.** Ejemplo de sensor de flujo óptico fabricado por Avago Technologies (modelo ADNS-3080 [7]), diseñado originariamente para ser utilizado como sensor óptico de desplazamiento de un ratón informático.

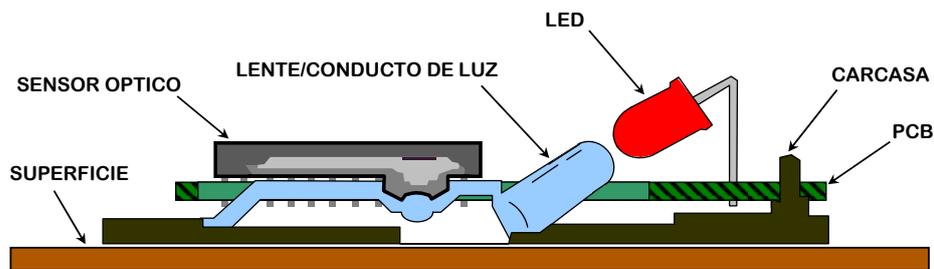
Los trabajos presentados en la tesis se han focalizado en este tipo de sensores de bajo coste debido, por un lado, a que son muy accesibles y económicos y, por otro lado, por su tamaño reducido y su velocidad de trabajo.

Concretamente en las aplicaciones presentadas en esta tesis se han utilizado los modelos, ADNS-3060, ADNS-3080 y ADNS-3088 de Avago

Technologies [7] que, a parte de tener características excelentes como sensores de desplazamiento también permiten el acceso a las imágenes capturadas posibilitando el desarrollo de nuevas aplicaciones.

### 1.2.1. Principio de funcionamiento

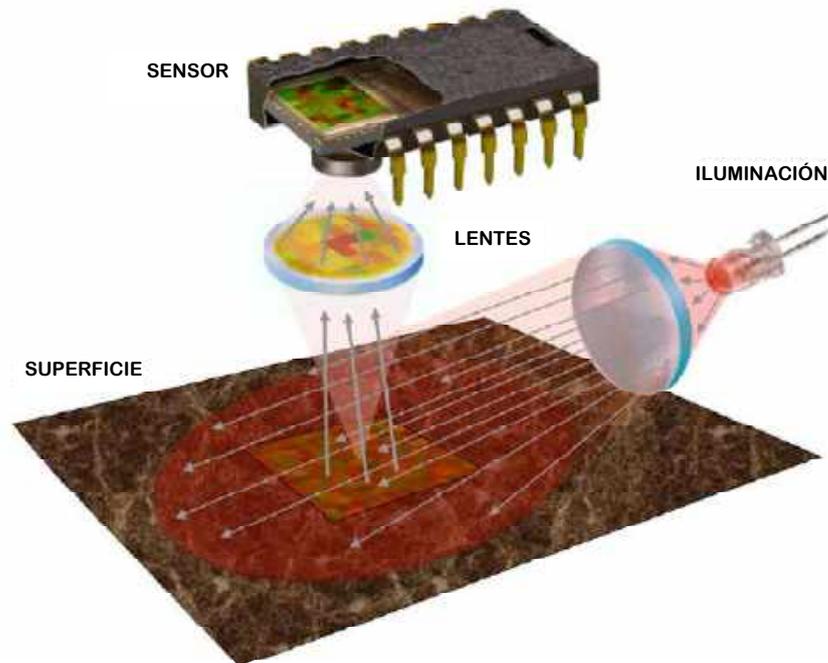
Un sensor de flujo óptico estándar está formado por un chip o sensor principal que incorpora integrada una cámara CMOS y un microprocesador de señal digital (DSP), una fuente de luz (normalmente luz infrarroja o láser) que ilumina la superficie, y un conductor de luz con un par de lentes de plástico esféricas, una para focalizar la imagen capturada en una determinada distancia y la otra para concentrar la iluminación producida por la fuente de luz en la zona visible por la cámara (Fig. 1.3).



**Fig. 1.3.** Vista de perfil de las partes involucradas en el sistema de medición de un sensor de flujo óptico.

En la Fig. 1.4 se muestra esquemáticamente el funcionamiento básico del sensor de flujo óptico. En primer lugar, el DSP lee la imagen mediante la matriz de fotodiodos que forman la CMOS acumulando una carga eléctrica en cada celda proporcional a la intensidad de la luz que incide sobre ella, a mayor intensidad luminosa, mayor carga acumulada. La incorporación de una fuente de luz, por un lado, ayuda a obtener una iluminación constante para cada celda, y por otro, como está situada en posición diagonal provoca sombras en las pequeñas imperfecciones de la superficie lo que facilita el correcto funcionamiento del algoritmo de flujo óptico (Fig. 1.4) [8]. La intensidad de la fuente de luz es controlada por el algoritmo de autoexposición ejecutado en el DSP interno del sensor [7]. Una vez los valores de la CMOS (imagen) son almacenados en un buffer, el DSP se encarga también de ejecutar un algoritmo de flujo óptico para

calcular el desplazamiento relativo entre la imagen capturada y la anterior. Finalmente, estos datos de desplazamiento son guardados en dos registros de valores enteros que pueden ser leídos mediante un puerto de comunicaciones serie y expresan el número de pulsos (data counts) que corresponden al incremento de desplazamiento desde la última lectura realizada.



**Fig. 1.4.** Esquema básico de funcionamiento del sensor de flujo óptico.

Con este principio de funcionamiento, un sensor de flujo óptico puede llegar a generar resoluciones de desplazamiento muy elevadas (hasta 5670 cpi con el sensor ADNS-9500 [9]) debido a la capacidad de detectar detalles microscópicos de la superficie. Sin embargo, la resolución del sensor es altamente dependiente de la configuración del sistema de visión (campo de visión) y del tamaño de la CMOS del sensor. Cuantos más píxeles se disponga y menor sea el campo de visión, más resolución se dispondrá. Otros factores que influyen en el funcionamiento del sensor de flujo óptico son la altura de trabajo (distancia entre sensor y superficie) y la velocidad del desplazamiento que se desea medir.

Si se analiza la velocidad máxima de desplazamiento, o velocidad en que el algoritmo de flujo óptico deja de funcionar, éste depende principalmente de la resolución del sensor y del tiempo en leer y procesar una imagen (tasa de

muestreo). Según el principal fabricante, Avago Technologies, el sensor de flujo óptico puede llegar a procesar hasta 11750 imágenes por segundo (fps) [9] con el modelo ADNS-9500.

### 1.2.2. Medición del flujo óptico

La medición del flujo óptico en este tipo de sensores se realiza mediante el análisis comparativo de una secuencia de imágenes capturadas por el sistema de visión. Este análisis pretende calcular la dirección y cantidad de movimiento producido (flujo óptico), y traducirlo en desplazamiento relativo bidimensional (ejes X e Y). Existen diferentes métodos para determinar el flujo óptico [10], sin embargo, debido a su aplicación y sus limitaciones, estos sensores de bajo coste poseen algoritmos de procesado de imagen optimizados y adaptados con una aritmética computacional menor.

Principalmente, un algoritmo de flujo óptico pretende detectar el movimiento producido en diferentes partes de la imagen. En el caso del método basado en regiones [10], la imagen actual  $I^F$  es dividida en diferentes regiones de  $m \times n$  píxeles:

$$I_{i,j}^F(x,y) = I^F(i \cdot m + x, j \cdot n + y) \quad (1.1)$$

donde  $(i, j)$  son los índices de las columnas y filas de una región y  $(x,y)$  la posición relativa del píxel en la región. Cada región es comparada con la región de la imagen anterior  $I^{F-1}$  aplicando diferentes offsets de píxel en píxel. La posición donde se encuentra la mejor similitud indica el desplazamiento producido entre dos imágenes consecutivas dando un vector de movimiento para cada región (campo de flujo óptico). Para realizar la comparación entre dos regiones existen varios métodos [10] de los cuales se destacan la suma absoluta de diferencias (SAD), la suma de la diferencia cuadrática (SSD), y correlación en cruz normalizada (NCC) [11]:

$$\begin{aligned}
 SAD(x, y) &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} |I(x+i, y+j) - T(i, j)| \\
 SSD(x, y) &= \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} (I(x+i, y+j) - T(i, j))^2 \\
 NCC(x, y) &= \frac{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(x+i, y+j) \cdot T(i, j)}{\sqrt{\sum_{i=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} I(+i, y+j)^2} \cdot \sqrt{\sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} T(i, j)^2}}
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

donde  $(x,y)$  es la posición donde se calcula y  $T$  es la imagen plantilla obtenida de la imagen anterior ( $I^{F-1}$ ) de tamaño  $M \times N$ .

El principal fabricante de sensores de flujo óptico de bajo coste, Avago Technologies [1], ha realizado diferentes patentes relacionadas con los métodos que utiliza para estimar el movimiento de una superficie plana [12, 13]. Entre ellos se puede destacar el uso de algoritmos específicos para simplificar el cálculo del flujo óptico como por ejemplo el uso de una correlación en cruz para cada uno de los ejes o el método de expansión de Taylor de la derivada parcial de primer orden con precisión subpíxel [13].

A diferencia de la mayoría de las aplicaciones de medida de flujo óptico, en este caso todos los píxeles captan el mismo objeto (superficie) que se desplaza. Estos sensores solamente están programados para calcular una sola dirección de flujo óptico (toda la imagen se considera como una única región). La Fig. 1.5 muestra un ejemplo de funcionamiento del algoritmo de medición de desplazamiento de un sensor de flujo óptico con este aspecto. La parte central de la imagen anterior  $I^{F-1}$  es comparada (mediante correlación en cruz) con la actual  $I^F$  en diferentes posiciones de píxel en píxel y considerando toda la imagen como una única región. El offset entre el centro de la plantilla en la imagen anterior y el punto con mejor coeficiente de correlación,  $p$ , indican el desplazamiento producido ( $\delta x$  e  $\delta y$ ).

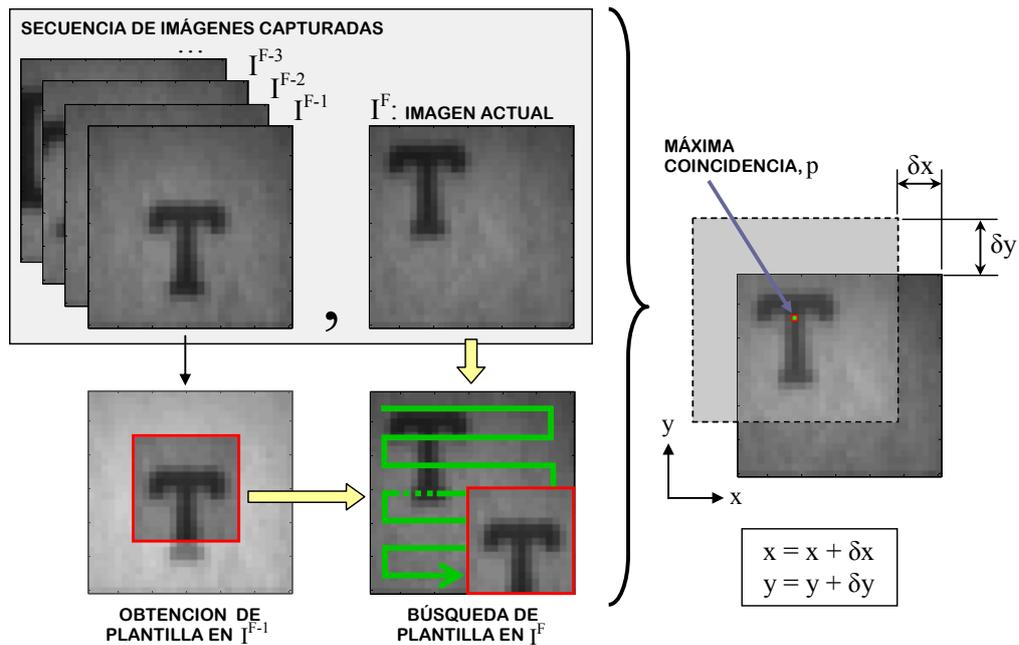


Fig. 1.5. Ejemplo gráfico de un algoritmo de navegación del sensor de flujo óptico.

### 1.2.3. Comunicación y datos

El procesado interno del sensor se realiza mediante un procesador digital de señal (DSP) que posee un puerto de comunicación que permite acceder desde el exterior a los diferentes registros de control del sensor. La mayoría de los sensores de flujo óptico poseen una interfaz de comunicación de datos en serie donde se destaca el uso de los protocolos SPI con 4 pines para la comunicación (MISO, MOSI, CLK, CS) [7, 9] y el protocolo I<sup>2</sup>C que en este caso las líneas de datos comparten el mismo canal requiriendo más tiempo en realizar las comunicaciones [14, 15].

Todos los sensores de flujo óptico poseen registros que permiten acceder a la estimación de desplazamiento realizado. Normalmente existe un registro para cada eje, llamados DELTA\_X y DELTA\_Y para los modelos de Avago Technologies. Estos registros devuelven un número entero que indican el número de counts que se ha desplazado el sensor respecto a la última lectura. En algunos casos la lectura del desplazamiento se realiza conjuntamente con una lectura previa de un registro de estado donde se indica si hay movimiento o si se produce overflow en alguno de los registros. También se puede destacar la presencia de registros que configuran la resolución del sensor, encontrados sobretodo en

sensores de flujo óptico para ratones informáticos ya que en este caso es importante poder adaptar su respuesta con las necesidades del usuario.

Con más detalle, las diferentes configuraciones que se pueden realizar en un sensor de flujo óptico como el modelo ADNS-3080 [7] son:

- Lectura de los registros de de la estimación del desplazamiento y del control de overflow.
- Obtención de la suma de los niveles de intensidad de los píxeles y su valor máximo.
- Selección de la exposición manual o automática de la cámara y lectura del tiempo de exposición en un instante.
- Obtención de la cantidad de características (features) visibles por el sensor en la última imagen capturada.
- Configuración de la resolución del sensor (cpi). En algunos sensores se puede configurar la resolución de forma independiente para cada eje de desplazamiento.
- Configurar el control de tasa de muestreo (imágenes por segundo) para que sea automático o manual especificando los límites mínimo y máximo.
- Acceso a la última imagen (frame) capturada por el sensor con un protocolo específico que permita leer secuencialmente los valores de cada uno de los píxeles.
- Acceso a los registros de desplazamiento de forma más rápida en modo de ráfaga, sin interrupción (burst mode).

La velocidad de acceso a los registros es un factor a tener en cuenta si se pretende capturar movimientos a gran velocidad. Dependiendo de cada modelo el sensor tiene unas especificaciones eléctricas y rangos de tiempos de acceso distintos [16]. En los sensores de Avago Technologies, teniendo en cuenta los datos teóricos del fabricante [7] sin adversidades externas como en [17], la

velocidad mínima teórica de lectura y escritura a un registro es de  $54.2 \mu\text{s}$  y  $50 \mu\text{s}$  respectivamente.

Otro aspecto importante relacionado con la comunicación es el tiempo requerido para poder leer externamente la última imagen capturada por el sensor. No todos los sensores poseen esta característica, los modelos como el VD5376 de ST Microelectronics [14] o la mayoría de los sensores de flujo óptico de Avago Technologies sí que lo permiten. En el caso de Avago Technologies se pueden diferenciar dos tipos acceso dependiendo si llevan o no un buffer interno auxiliar para almacenar la imagen. En los que no tienen buffer interno, debido a que la velocidad de lectura es mucho más lenta que la velocidad de captura del sensor, la imagen leída externamente está formada por trozos de imágenes diferentes y puede resultar distorsionada [18]. En estos modelos el acceso a la imagen es secuencial leyendo píxel a píxel con una operación de lectura y escritura para cada uno lo que hace su lectura muy lenta [15]. Por otro lado, los modelos más completos de Avago Technologies poseen un buffer auxiliar y un acceso a la imagen en modo de ráfaga (Pixel Burst Mode) [7] que permite leer la imagen de forma masiva sin interrupción por el canal de lectura MISO del SPI. Con este modo, el tiempo mínimo teórico requerido para leer una imagen de 900 píxeles (matriz de  $30 \times 30$ ), teniendo en cuenta los rangos de tiempo teóricos del fabricante [7], es de 9 ms.

### **1.3. Caracterización del sensor de flujo óptico**

Uno de los primeros autores que introduzco la versatilidad e idoneidad del sensor de flujo óptico como alternativa económica para medir desplazamientos fue T.W. Ng [19]. Para poder realizar dispositivos y aplicaciones basadas en este tipo de sensor es necesario hacer una caracterización estudiando sus características principales como, por ejemplo, el error de desplazamiento, la sensibilidad en variaciones de la altura entre el sensor y la superficie a medir, la influencia de la iluminación y el tipo de suelo, la importancia de la ubicación del sensor en una plataforma robótica para conocer la trayectoria seguida, y la sensibilidad a los cambios de velocidad y aceleración del sensor.

#### **1.3.1. Como sensor de medida de desplazamiento**

El peor inconveniente que tiene el sensor de flujo óptico al ser considerado como un sensor de medida de desplazamiento es la acumulación de errores producidos durante las medidas. En el caso de aplicaciones con robots móviles la estimación del desplazamiento esta sujeta tanto a errores sistemáticos como no sistemáticos [20, 21]. Los errores sistemáticos son relacionados con las propiedades físicas del robot. Los más significantes han sido estudiados por J. Borenstein, Y. Koren y L. Banta en [22, 23] donde los clasifica en dos principales fuentes de errores: la desigualdad de los diámetros de las ruedas y la incertidumbre en la distancia efectiva entre los diferentes ejes. Adicionalmente, en [24] se añaden como parte de errores sistemáticos las medidas inexactas de ubicación y orientación del sensor y la variación de las resoluciones. Por otro lado, los errores no sistemáticos son dependientes con las alteraciones en el entorno de trabajo debido a los cambios de la naturaleza o al comportamiento del ser humano, y también por algunos defectos del propio sensor como la incapacidad de reconocer movimiento en una superficie homogénea o cuando la distancia entre sensor y superficie es demasiado alta. También se pueden producir errores por el mal estado o el deterioro de la superficie de trabajo como grietas, golpes o suciedad acumulada, o incluso por un deslizamiento excesivo e incontrolado de las ruedas

producido por la presencia de líquido o una colisión [25]. Las medidas originales de la cantidad desplazamiento en función del tiempo son basadas en el contacto con la superficie del suelo, la cual genera un deslizamiento diferente dependiendo del tipo de superficie produciendo errores acumulativos [26]. Utilizando el algoritmo realizado en [27] los robots móviles son capaces de desplazarse sin orientación GPS para distancias relativamente largas con un pequeño error de posicionamiento. Varios científicos están investigando el uso del sensor de flujo óptico para conocer la trayectoria de un robot móvil en función del tiempo mirando de identificar diferentes fuentes de error como cambios en la altura respecto el suelo, tipos de superficies, condiciones de iluminación, todo esto juntamente con la velocidad y la aceleración de desplazamiento [2, 28, 29]. En [30] se hace referencia al error de orientación el cual provoca errores considerables en el posicionamiento que se incrementan de forma proporcional con la distancia recorrida. En [25] se concluye que el error de orientación es el más significativo ya que provoca un error lateral ilimitado que crece también de forma proporcional con la distancia.

Sin embargo, los errores sistemáticos no pueden ser eliminados completamente ya que existen dependencias con factores dinámicos como por ejemplo la distribución de carga [25]. En los robots móviles estos tipos de errores pueden ser reducidos con el diseño mecánico y mediante diferentes sistemas de calibración [20, 29, 31-33]. En [34] se ha diseñado un método de calibración para eliminar los errores sistemáticos y en el mismo tiempo ha sido posible optimizar la precisión de los errores no sistemáticos. En [29] se hace referencia al uso adecuado del sensor de flujo óptico como sensor de desplazamiento bidimensional después de realizar una calibración. En [31] se ha presentado la importancia de la calibración de los errores de medición con un modelo matemático basado en un par de sensores de flujo óptico fijados en la parte inferior de la estructura del robot. Las principales conclusiones han sido que el error de medición de posición fue reducido debido a que éste es independiente al deslizamiento y la cinemática. En [32] se ha diseñado un método para estimar la posición de un robot móvil que es capaz de detectar tanto errores sistemáticos como no sistemáticos alcanzando buenas estimaciones para la localización y la orientación del robot. En [2] los

posibles errores del sensor de flujo óptico, una vez calibrados para detección de trayectorias de robots móviles en interiores, se han analizado en detalle validando el trabajo realizado en [19]. En ambos casos se ha alcanzado una buena linealidad con un coeficiente de determinación de hasta  $R^2=0.9998$  y verifican que la desviación estándar aumenta con relación a la distancia. Igual que en cualquier plataforma de sensores, la calibración y validación de la salida del sensor es fundamental durante el proceso de desarrollo [35]. Por otro lado, si el sensor de flujo óptico se utiliza dentro del rango recomendado por el fabricante como se ha realizado en [19] entonces los resultados presentan menos errores en la medición (el error medio cuadrático esta por debajo de  $0.018 \text{ mm}^2$ ) y mejor linealidad ( $R^2=0.9914$ ).

Los sensores de flujo óptico han sido tradicionalmente usados como sensores de movimiento bidimensional no obstante la necesidad de movimientos más complejos como el de múltiples grados de libertad (MDOF) pueden encontrarse interesantes en una cantidad de aplicaciones robóticas. En [36] se ha presentado un sistema formado por un sensor dual sin contacto para medir movimientos planos y esféricos con tres grados de libertad (3-DOF). Este sistema es capaz de detectar cambios microscópicos en una secuencia de imágenes, y estimar el desplazamiento angular y el centro instantáneo de rotación de superficie en movimiento.

En [37] se ha implementado un nuevo sistema sensor con el fin de detectar variaciones en la altura y la translación de la superficie al mismo tiempo. Sin embargo, se ha encontrado que la sensibilidad del sensor de flujo óptico cambia para diferentes direcciones de translación. En [38] se ha utilizado un dispositivo compuesto por múltiples sensores de flujo óptico para estimar mediciones de movimientos planos y esféricos con tres grados de libertad (3-DOF) con los métodos de mínimos cuadrados lineales (LLS) y mínimos cuadrados no lineales (NLS) alrededor de dos trayectorias circulares (no-orientada y auto-orientada). El dispositivo ha permitido evaluar la posición y la orientación de la estructura principal del sistema. Los resultados conseguidos muestran que cuando el movimiento es no-orientado se ha de utilizar el método LLS mientras que cuando se trata de una trayectoria auto-orientada el método LLS produce un error de

trayectoria sinusoidal. El método NLS ha proporcionado mejores resultados en la precisión de la posición estimada, en una orden de magnitud. En los casos que ha habido variaciones en un desplazamiento incremental se ha visto que existen errores acumulativos.

### **1.3.2. Como una matriz de sensores de desplazamiento**

El uso de una matriz de sensores de flujo óptico ha sido sugerido para proporcionar más fiabilidad del control del desplazamiento en función del tiempo reduciendo errores de medición y de lectura del sensor óptico [2, 21, 26, 30, 34, 39]. Aunque con un único sensor de flujo óptico se tiene resolución suficiente para controlar un desplazamiento bidimensional como el de un apuntador informático, esto no es suficiente para aplicaciones que requieran una precisión submilimétrica [31]. En [28] se ha propuesto el uso de una matriz de sensores organizada en diferentes orientaciones para solucionar los problemas de sensibilidad en la orientación y la influencia de la textura de la superficie. Asimismo, las medidas tanto del desplazamiento como la rotación también se han obtenido. Otra alternativa ha estado la combinación de dos sensores ópticos para sustituir la función que realiza una brújula [40]. En [2] se ha propuesto una matriz de varios sensores de flujo óptico como un trabajo futuro para reducir el error de desplazamiento aunque esta propuesta no se evaluó. Existen varios trabajos que diseñan nuevas aplicaciones utilizando un par de sensores ópticos donde la situación relativa entre ellos se ha fijado obedeciendo las limitaciones de un cuerpo rígido tal y como se explica en [21, 30]. Sin embargo, en [24, 34] se concluye que utilizando el promedio de la mediciones de desplazamiento obtenidas no se tiene en cuenta las diferencias entre ambos sensores en el caso que trabajen en diferentes condiciones físicas. La redundancia de los datos de entrada de ambos sensores puede ayudar a reducir errores no sistemáticos. No obstante, a diferencia del los trabajos [24, 34] donde se ha considerado que ambos sensores tienen la misma orientación, en el trabajo de Jwu-Sheng Hu [34] se ha tenido en cuenta que no es necesario que las coordenadas de cada sensor estén alineadas unas con el resto de sensores. La propuesta de un sistema con múltiples sensores ópticos se ha basado en ubicar los sensores en cada una de las esquinas de una

estructura octogonal con una orientación relativa entre ellos de  $45^\circ$  siguiendo el círculo con diferentes radios para hacer varios experimentos. Con este sistema se ha conseguido una precisión en la medida de desplazamiento de 0.65% cuando se mueve de forma circular siguiendo la trayectoria que forman los sensores. En [41] se ha diseñado un modelo que combina dos sensores ópticos para una localización en un plano y detección de desplazamiento. Las principales contribuciones de [42] han sido el análisis de la sensibilidad en la instalación de la matriz de sensores de flujo óptico y la calibración de la posición de dicha matriz. Adicionalmente, en [43] se ha utilizado una distribución de sensores poligonal para estimar la velocidad de un robot móvil omnidireccional en diferentes condiciones físicas del suelo. Se ha podido comprobar que el uso de un conjunto redundante de sensores de flujo óptico para estimar desplazamiento proporciona una mayor robustez en las medidas obtenidas.

### **1.3.3. Influencias en el funcionamiento**

#### **1.3.3.1. Altura de trabajo**

Cuando se quiere estimar los cambios de posicionamiento respecto el tiempo mediante el uso de sensores de flujo óptico, las variaciones de altura es uno de los factores más importantes a considerar. La altura de trabajo del sensor de flujo óptico, que se define como la distancia entre el sensor y la superficie que analiza, es altamente sensible a la estimación de la medida de desplazamiento y sus pequeñas variaciones influyen drásticamente al correcto funcionamiento del sensor [24, 26, 34]. Hay que destacar que la altura óptima depende del diseño del sensor, el tamaño de la imagen, el tipo de lentes y su ubicación, y la potencia y la orientación de la fuente de luz. Cada modelo de sensor de flujo óptico tiene su altura óptima recomendada por el fabricante.

En [44] se concluye que la altura de trabajo del sensor juega un papel muy decisivo en la precisión de la estimación del desplazamiento de un vehículo móvil. Se ha realizado una prueba que consiste en desplazar un vehículo móvil hacia delante y hacia atrás por el mismo camino para evaluar si los errores producidos por la variación de la altura se cancelaban. Con este experimento,

después de moverse 30.5 m, se ha obtenido una precisión de 12.7 mm. En [28] se ha comprobado que la sensibilidad en la medida de desplazamiento va disminuyendo hasta 1.18 pulsos/mm (6.9% de error) para un incremento de 0.8 mm respecto la altura recomendada por el fabricante. Con alturas mayores el error en el desplazamiento crece drásticamente hasta que el sensor deja de funcionar. En [19] el sensor de flujo óptico utilizado pudo llegar a funcionar a una distancia máxima entre el sensor y la superficie de 1.25 mm sin considerar su influencia en la resolución. Sin embargo, en [32, 33] se utilizó el sensor ADNS-2051 donde su altura de trabajo óptima es de 2.5 mm. En [45] se ha deducido que el error relativo fue menor cuando la distancia del sensor a la superficie se encuentra entre 2.25 y 3 mm (utilizando el sensor ADNS-2620). En [37] se han llevado a cabo un conjunto de experimentos modificando la altura de trabajo del sensor, desde 1.4 hasta 2.8 mm, con diferentes orientaciones. Los resultados muestran que para un movimiento uniforme el desplazamiento es siempre proporcional a la resolución del sensor óptico independientemente de la altura de trabajo. Por otro lado, en [46] se ha propuesto un sensor óptico de navegación diferencial que tiene consistencia incluso en variaciones de altura. Este sistema ha sido probado con desplazamientos lineales encima de un papel blanco con una plantilla impresa. Se deduce que el error generado por variaciones en la altura puede ser reducido considerablemente a diferencia de los resultados obtenidos con un único sensor.

En [35] un nuevo módulo sensorial para la estimación de la trayectoria de un robot móvil fue presentado y probado concluyendo que para una efectiva implementación la altura límite de trabajo debería ser de una altura de 5/8" mientras que la distancia óptima para la configuración diseñada en este trabajo está entre 1/2" y 3/8". Los resultados obtenidos en [2] revelan que cuando se incrementa la altura el área que cubre la cámara también se incrementa provocando de esta forma que el ratio de píxel por milímetro descienda. También se ha visto que para una variación de 0.1 mm en la altura se produce un error en la medida del 1% mientras que la linealidad sigue constante con un offset de hasta +0.6 mm. En [40] se han modificado las lentes del sensor de flujo óptico para aumentar la altura de trabajo respecto al suelo hasta cinco veces, aumentando al mismo tiempo el campo de visión de las imágenes. El trabajo realizado en [30] va

un paso más adelante relacionando el comportamiento de la distancia entre el sensor y la superficie con las diferentes características del suelo. De la misma manera, en [2] se relacionan los cambios de altura del sensor con las discontinuidades de la superficie como por ejemplo las separaciones entre las baldosas. Estas relaciones y otros inconvenientes causados por la dependencia del sensor de flujo óptico con el tipo de la superficie son explicadas en el siguiente apartado.

### **1.3.3.2. Tipos de superficie**

El principio básico de funcionamiento del sensor de flujo óptico es detectar movimiento mediante la captura de la rugosidad o diferencias en la superficie externa por donde se desplaza. Para un correcto funcionamiento y una buena estimación del desplazamiento cuantas más diferencias haya en la superficie más fácil va a ser su detección, no obstante existen tipos de superficie que son lisas o que no presentan micro deformaciones en el material y por tanto no son validas para detectar movimiento. Hay diferentes trabajos [2, 28, 45] que han tenido en cuenta las características de las superficies para medir un desplazamiento con el sensor de flujo óptico. De los cuatro grupos de superficies analizados en [45] (metales de aluminio, acero inoxidable y latón, papeles de lija y papel con impresión láser de un o dos colores) los mejores resultados se han obtenido con el latón, el papel de lija, y la impresión con dos colores mientras que para superficies homogéneas ha sido imposible seguir el movimiento. En [19] se ha estudiado el desplazamiento sobre superficies opacas, transparentes y reflexivas. Se ha comprobado que el sensor solamente es capaz de trabajar en superficies opacas.

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes aplicaciones del sensor de flujo óptico que funcionan sobre una amplia variedad de tipos de superficies. Por ejemplo, en [47] se han realizado experimentos sobre pavimento de asfalto; en [26] sobre asfalto de carreteras; en [33] sobre una superficie de hormigón plana; en [37] sobre una superficie de goma, y en [40] se ha probado en material de un pupitre, papel de impresión blanco, alfombras, baldosas y también linóleo. Los resultados de este último trabajo muestran que el sensor de flujo

óptico, modificado con una lente para trabajar en alturas de hasta 5 cm, no funciona con materiales lisos como el de un pupitre, el papel de impresión blanco o plásticos, mientras que si que es apto para alfombras y baldosas. En [2] se ha analizado con más detalle las principales características de los suelos más comunes (gres, cerámica, parquet, y alfombra) localizando las medidas tanto en el centro como entre la transición de las piezas o baldosas que forman el suelo. Los mejores resultados en superficies interiores se han obtenido con suelos muy planos (no ondulados) como el parquet (con un error relativo en la medida de 0.8%) mientras que la superficie con alfombra genera confusión y el algoritmo interno se pierde provocando un error en la estimación del 5.8%. En el caso del suelo cerámico, se ha obtenido la máxima diferencia entre los datos esperados y estimados, 6.3% de error, y la promedio del error relativo obtenido con gres ha sido del 1.2%. En [48] se ha propuesto un algoritmo para reducir el error en la trayectoria de un robot. El algoritmo ha sido probado con madera, mármol encerado y también con una superficie inclinada 9 grados. Se ha concluido que el error producido con una superficie de mármol encerado es mayor que con el suelo de madera y los resultados obtenidos con la superficie inclinada son muy similares a los obtenidos con una superficie horizontal. Los resultados obtenidos en [28] afirman que la superficie de referencia del sensor debe ser adecuada y que la orientación de la textura interfiere considerablemente con la detección de desplazamiento del sensor.

### **1.3.3.3. Iluminación**

Otro aspecto muy importante a tener en cuenta para obtener un correcto funcionamiento del sensor de flujo óptico es la iluminación adicional externa que se le aplica a la superficie capturada. Tanto si la luz aplicada no es proporcional en toda el área visible por el sensor como la ubicación e inclinación de la fuente de luz puede llegar a interferir en el error de la estimación de la medida.

En [29] la conclusión fue que la configuración convencional del sensor de flujo óptico basado en una iluminación no difusa procedente de un único eje genera un error de sensibilidad (pulsos/mm) entre los dos ejes de 2.89% y de -0.97% cuando la fuente luz está posicionada en el eje X e Y respectivamente, lo

que significa que existen diferentes sensibilidades entre los dos ejes afectados entre otras cosas por la ubicación de la fuente de luz. Un resultado muy similar se ha obtenido con los experimentos realizados en [2, 19, 37]. En [29, 49] se ha propuesto una mejora basada en utilizar dos fuentes de luz, una para cada eje de desplazamiento. En [29] se ha visto que la diferencia entre las sensibilidades de cada uno de los ejes con dos fuentes de luz se reduce a 0.5%, mientras que en [49] se deduce que la mayor sensibilidad del sensor es alcanzada cuando la fuente de luz de los dos ejes se posiciona en ángulo recto a la dirección del desplazamiento. En [2] se concluye que el uso del sensor con la iluminación convencional (desde sólo un eje) es únicamente fiable con desplazamientos rectos en una dirección.

Según [40] existe una dependencia entre la altura de trabajo y la iluminación externa aplicada. Si se utilizan lentes con un enfoque diferente que el estándar, se puede ampliar la distancia entre el sensor y la superficie lo que provoca que el área visible del sensor sea también mayor. Para mantener constante la iluminación, se tendrá reajustar la iluminación a esta nueva configuración variando la intensidad y dispersión de la luz [26]. En [35] se han estudiado diferentes alternativas a la fuente de iluminación estándar de un LED en un único eje. La primera aproximación ha sido utilizar tres láseres localizados triangularmente de forma que maximicen el ángulo de incidencia en la superficie con el fin de conseguir una iluminación adecuada en casos con obstáculos que provocan sombras o incluso con variaciones de altura. La otra alternativa ha consistido en ubicar varios LEDs alrededor de la CMOS del sensor proporcionando luz uniforme en un área superior a la visible por el sensor para obtener más robustez. Los resultados han mostrado que con ambas alternativas se puede mejorar la precisión del sensor.

#### **1.3.3.4. Ubicación del sensor**

Según el tipo de función o aplicación que va a desarrollar el sensor de flujo óptico la ubicación escogida puede ser un factor clave para obtener resultados óptimos en la estimación del desplazamiento. Hay diferentes trabajos [2, 33, 50-52] que analizan cual es el mejor emplazamiento del sensor de flujo óptico para poder estimar la posición en función del tiempo de un robot móvil. En [33] se

destacó la importancia de la posición de los sensores de un robot con el objetivo de aumentar la precisión en las mediciones. En [51] se ha resuelto la dificultad de ubicar  $N$  sensores de flujo óptico en una única plataforma de un robot móvil parametrizando dos restricciones cinemáticas. En un trabajo similar se ha validado un sistema de sensores múltiples ubicando los sensores de flujo óptico en cada una de las caras de la estructura del robot [52]. En [2] se han analizado dos tipos de emplazamiento diferentes en un robot móvil circular. La mejor alternativa ha sido utilizar dos sensores de flujo óptico posicionados en el eje de las ruedas motrices con un radio de separación muy grande, ya que cuando se probó de posicionar un único sensor en el centro de la estructura el sensor no fue capaz de medir desplazamiento rotatorio. Por lo que se deduce que la ubicación del sensor en un robot móvil afecta directamente a las mediciones de las trayectorias estimadas por el sensor. Asimismo, hay más trabajos [32, 33, 53] que también enfocan parte de su investigación en estudiar la ubicación de este tipo de sensores.

#### **1.3.3.5. Trayectorias de desplazamiento curvadas**

La precisión en las medidas de desplazamiento depende de la trayectoria que recorre el sensor de flujo óptico. El sensor de flujo óptico está pensado para ser utilizado en trayectorias rectas o diagonales, es decir, movimientos entre uno de los dos ejes o combinaciones de ellos. Por el contrario, si el sensor se mueve por una trayectoria curvada resiguiendo la dirección con uno de los dos ejes, como por ejemplo para estimar la trayectoria de un robot móvil (siempre hay una cara del sensor que va hacia adelante), el sensor no es capaz de dar correctamente los resultados generando un error muy considerable.

Varios trabajos se han centrado en las influencias que tienen las trayectorias curvadas recorridas por el sensor de flujo óptico [21, 30, 31]. La conclusión que se deduce es que cuando el robot realiza movimientos no rectos tales como un desplazamiento en arco, el ángulo entre el eje  $X$  del sensor y la tangente a su trayectoria es independiente al radio del arco. En [2] se ha estimado el error generado en diferentes tipos de trayectorias obteniendo un error relativo máximo de 2% para una trayectoria diagonal de  $45^\circ$ , y una diferencia muy grande en la sensibilidad de 15.87 a 5.70 pulsos/mm para una trayectoria en forma de

arco con radios de 50 a 100 mm respectivamente. El peor caso se produce cuando el sensor de flujo óptico es rotado sobre su propio centro generando continuos desplazamientos no validos. Por lo tanto, el sensor solamente es capaz de medir con precisión movimientos rectos. Asimismo, se ha visto que la sensibilidad del sensor depende de la dirección de movimiento o del radio de desplazamiento en arco. Sin embargo, en [34] no se ha tenido en cuenta este aspecto al realizar su trabajo.

#### **1.3.3.6. Velocidad de movimiento**

El flujo óptico se define como la velocidad de movimiento de los objetos, superficies o partes de una escena visual causada por el movimiento relativo entre un observador (cámara del sensor) y la escena. Este fenómeno es experimentado por los seres humanos y también por algunos animales tales como las abejas, las cuales regulan su velocidad de vuelo manteniendo constante la velocidad en que se mueve la imagen percibida del entorno a través del ojo (flujo óptico) [54]. La velocidad de desplazamiento del sensor de flujo óptico depende de las características de las lentes utilizadas (concretamente del campo de visión), ubicando las lentes a más distancia respecto el suelo la velocidad que se puede percibir también aumenta [35, 55, 56]. Por lo tanto, para estimar el desplazamiento se tendrá que calibrar el sensor de flujo óptico seleccionando una altura de trabajo y una configuración de lentes concreta lo que va a limitar la velocidad máxima de desplazamiento. Visto desde otro punto de vista, dada una única medida de flujo óptico, la altura de trabajo y la velocidad no pueden calcularse de forma separada. Los trabajos [55, 56] afrontan este problema introduciendo un segundo sensor óptico para diseñar un sistema dual que mejora su funcionamiento cuando hay variaciones de altura y velocidad, lo que permite aplicar estos sensores en los sistemas de navegación inercial de robots voladores. En [42] se ha trabajado con la calibración de la posición de un robot móvil para mejorar su estimación de velocidad mediante el método de mínimos cuadrados. En [28] se ha probado un sistema de medición que consiste en fijar el sensor de flujo óptico en contacto con una superficie en movimiento de color blanca con el eje X paralelo con la dirección de movimiento. Los resultados muestran que la

sensibilidad de movimiento del sensor no cambia significativamente con velocidades de hasta 380 mm/s, mientras que con velocidades mayores el sensor empieza a perder sensibilidad hasta dejar de funcionar.

El sensor de flujo óptico configurado con el sistema óptico de fabrica ofrece una área de visión muy pequeña, de  $1.82 \text{ mm}^2$  [57], lo que ayuda a aumentar la resolución en el desplazamiento, mientras que de lo contrario la velocidad máxima de funcionamiento se reduce considerablemente [30, 40]. Aunque, en [46] se ha conseguido alcanzar una velocidad máxima de 10 m/s con el sensor ADNS-6010 que tiene relativamente menos resolución. En [45] la conclusión fue que el error en la medición de distancia respecto variaciones de velocidad es inferior al 1%. En [58] se ha utilizado el sensor ADNS-6090 para medir el error de translación en condiciones de velocidades elevadas, de aceleración y desaceleración. Los resultados muestran que la precisión se mantiene con velocidades de hasta 300 mm/s. Con la velocidad máxima analizada de 400 mm/s se ha obteniendo un error en la medición del 3%. Adicionalmente, también se ha calculado la velocidad máxima soportada por el dispositivo que ha sido de 2,300 mm/s. En [34] se han utilizado un conjunto de sensores ADNS-2051, ubicados en las esquinas de una plataforma octogonal, equipados con las lentes recomendadas por el fabricante [59], ADNB-6011-EV y ADNB-6012-EV [60], que están optimizadas para poder trabajar en distancias muy pequeñas. Con esta configuración, el sensor ADNS-2051 puede alcanzar una velocidad máxima de 355.6 mm/s (14 pulgadas/s) mientras que con el sensor ADNS-3088 puede llegar a 1016 mm/s (40 pulgadas/s) [7]. Cambiando las lentes que llevan de serie se pueden obtener velocidades máximas más elevadas, como se ha realizado en [26, 44].

Los efectos de aceleración y desaceleración también interfieren directamente a la precisión del sensor. En [29] se ha llegado a la conclusión que el sensor de flujo óptico puede ser utilizado como un sensor de desplazamiento bajo condiciones de aceleración y desaceleración. Según los resultados, la sensibilidad del sensor fue más alta en condiciones de aceleración/desaceleración (57-58 pulsos/mm) que para velocidades constantes (53-54 pulsos/mm) obteniendo menor sensibilidad al acelerar que al desacelerar, aunque a partir de  $355.6 \text{ mm/s}^2$

la sensibilidad empieza a disminuir. El promedio del error de la sensibilidad durante aceleraciones y desaceleraciones ha sido de -0.39% y 0.39% respectivamente. En [26] se ha investigado como afectan los cambios de velocidad a las mediciones del sensor para estimar el desplazamiento de un robot móvil en exteriores. Los resultados muestran que para velocidades lentas (20 mm/s) las distancias medidas son el 8% más grandes que cuando el robot se mueve a velocidades altas (alrededor de 250 mm/s). Estudiando de forma separada los efectos de la aceleración y desaceleración, la desviación estándar de los pulsos obtenidos con el sensor se reduce hasta el 44% pero con la misma tendencia de obtener más desplazamiento en velocidades lentas.

## 1.4. Aplicaciones actuales del sensor de flujo óptico

### 1.4.1. Medir desplazamiento

Los sensores de flujo óptico se han diseñado específicamente para trabajar de forma autónoma como sensores de desplazamiento bidimensionales [2, 19] con la lectura de los registros internos DELTA\_X y DELTA\_Y que proporcionan el incremento de desplazamiento de sus dos ejes. En [35] esta característica se ha desarrollado en un módulo sensorial como medidor de distancia en robots móviles para usos educativos. En [61] también se ha implementado en un robot móvil para estimar su desplazamiento en ambas direcciones laterales. En [62] el sensor de flujo óptico como sensor de desplazamiento ha sido usado en un vehículo aéreo no tripulado (UAV) para estabilizar su velocidad y posición con la captura de imágenes de una plantilla de aterrizaje posicionada en el suelo. En esta aplicación se han modificado las lentes convencionales para poder detectar la superficie en distancias muy elevadas. De la misma manera, en [63] se ha utilizado el sensor de flujo óptico para obtener el control de desplazamiento en el tiempo de un vehículo lunar. Los resultados muestran que con una unidad de medición inercial (IMU) en condiciones los errores pueden ser muy pequeños para distancias largas.

Por otro lado, en [64] se han usado cuatro sensores de flujo óptico para conocer la posición de la hoja de papel mientras avanza por el carril de una impresora. En [49] se ha propuesto el sensor de flujo óptico en un microscopio para identificar e almacenar de forma automática regiones de interés en una muestra de partículas. En [65] el sensor de flujo óptico ha sido usado para estimar cambios de posición provocados por un sujeto atado (mosca parasitaria *Ormia ochracea*) ubicado en una superficie esférica (una bola de ping-pong) que se encuentra flotando encima de el sensor de flujo óptico y gira mediante la inyección de aire presión. La predicción del experimento fue alta tanto para el movimiento espacial como el temporal, sin embargo en el movimiento temporal presenta un offset de 30 a 50 ms en las medidas. En [19] se ha estimado la deformación viscoelástica del polietileno con el objetivo de probar la eficiencia del sensor de flujo óptico como sensor de desplazamiento bidimensional. Durante

el experimento, el sensor de flujo óptico se ha analizado a diferentes distancias respecto la superficie de trabajo (eje z) donde en cada experimento esta altura se ha mantenido y se han modificado los ejes X e Y para estimar el desplazamiento. De forma distinta, en [66] se ha utilizado la medida de la deformación viscoelástica con propósito educacional utilizando tres componentes de polietileno de diferentes fabricantes. Los estudiantes habían de observar las diferencias y comentar que significaban los resultados. En [45] se ha diseñado un instrumento quirúrgico mínimamente invasivo (MIS) como un mecanismo de suspensión cardán para permitir realizar pequeños movimientos en el punto de incisión. El rastreo de los movimientos del instrumento quirúrgico se ha llevado a cabo mediante tres sensores de flujo óptico alcanzando una precisión superior al 95%.

Una nueva aplicación del sensor de flujo óptico fue desarrollada en [37], en este caso se ha utilizado el sensor como un detector de superficie esférica. En [67] se ha llevado a cabo una serie de experimentos para demostrar que el experimento propuesto en [37], limitado por el tamaño de la esfera de contacto y la resolución del sensor, permite obtener la forma de la superficie analizada e estimar su rugosidad. En [68] se ha propuesto una metodología innovadora de detección instantánea de orientación para actuadores esféricos con múltiples grados de libertad (MDOF). Mediante la detección del movimiento plano normal de una superficie esférica con el sensor de flujo óptico se pueden conseguir ángulos polares para la estimación de la orientación instantánea del rotor. En [56] se ha implementado un sistema de navegación integrado para plataformas voladoras en interiores basado, además de los sensores inerciales, con dos sensores de flujo óptico que fusionando su información 2D proporcionan una estimación de movimiento en hasta 6 grados de libertad (6-DOF).

Además de estas propuestas, en [69] el sensor de flujo óptico también ha sido utilizado para poder capturar los datos en función del tiempo de un movimiento harmónico oscilatorio. Asimismo, en [70] se ha investigado su eficiencia como sensor de desplazamiento vibratorio siendo apropiado para frecuencias bajas y amplitudes pequeñas. En el caso de [71] el sensor de flujo óptico se ha aplicado para investigar el movimiento de un péndulo en torsión.

Por otro lado, en [72] se ha desarrollado un método basado en el sensor de flujo óptico de bajo coste para medir la tasa de circulación de sólidos en un lecho fluido circulante (CFB) de hasta 0.3 m/s. En [73] se utiliza el mismo tipo de sensor para medir el movimiento del nivel de un líquido en un manómetro formado por un tubo en forma de U con el objetivo de generar lecturas digitales de la presión y así poder realizar un sistema de adquisición de datos automático de bajo coste. Esta herramienta propuesta genera medidas muy lineales y repetitivas con una sensibilidad de 1.94 Pa. En [74] se presenta un novedoso sistema no destructivo, basado en el sensor de flujo óptico y una sonda de exploración, para determinar propiedades elásticas, rugosidad y el tipo de material de una superficie con una precisión superior al 92%. Una aplicación similar ha sido desarrollada en [75] con el fin de medir el espesor de la superficie a analizar con un error inferior a 1  $\mu\text{m}$ . En [76] el sensor óptico se ha incorporado en un guante para proporcionar las mismas sensaciones táctiles que se tiene con los dedos sin ningún elemento físico protector (contacto directo con el objeto). El sensor de flujo óptico mide el deslizamiento externo y con un pequeño motor colocado entre el guante y la piel de la mano se produce el feedback táctil. En [77] el sensor de flujo óptico ha sido utilizado para detectar deslizamiento en una herramienta formada por un brazo robótico que tiene la finalidad de realizar acabados en superficies (limpieza, pulido, desbarbado, rectificado, etc.). En [78] se ha integrado el sensor óptico en un dispositivo háptico para obtener el desplazamiento cuando el dispositivo está en contacto con la superficie (rígida o deformable) del objeto a analizar. En [79] se ha utilizado el sensor de flujo óptico para medir flexión e extensión lumbar. El sensor, ubicado en la parte posterior del paciente, mide en tiempo real inclinación lateral de la columna lumbar con el fin de facilitar el seguimiento al asistente médico.

Existen algunas aplicaciones en que estos sensores de flujo óptico de bajo coste pueden no ser suficientemente precisos o fiables para realizar algún tipo de cálculo. En algunos trabajos se combinan diferentes tipos de sensores con funciones complementarias para poder obtener un mejor resultado. En [33] se ha desarrollado un método para estimar la posición de desplazamiento de un robot móvil mediante el uso de un codificador, un sensor de flujo óptico y un filtro

Kalman, el cual ha estado diseñado a partir del modelo teórico de la cinemática. En [47] se ha diseñado un sistema de la estimación de la trayectoria (dead-reckoning) y un algoritmo de rastreo para mapas 3D de tuberías formado por la combinación de un micro sistema electromecánico de unidad de medida inercial de bajo coste (MEMS IMU) y un sensor de navegación de flujo óptico. En [80] se ha desarrollado un sistema de posicionamiento combinado con dos sensores ópticos y un receptor GPS para realizar el seguimiento de las mediciones geofísicas de campo. En [81] se ha diseñado un sistema económico formado por una brújula analógica y un sensor de flujo óptico para estimar la localización de un robot. La combinación de las distancias lineales obtenidas gracias al sensor óptico y la orientación dada por la brújula permite estimar la posición alcanzada con un error máximo marcado principalmente por la precisión de la brújula utilizada.

Dentro las investigaciones que utilizan el sensor de flujo óptico para estimar la trayectoria de un robot móvil también se encuentra el trabajo [31] donde se ha implementado un sistema de estimación de la trayectoria (dead-reckoning), diseñado en [21, 30], para un robot omnidireccional llamado Robocup que soporta un control del desplazamiento en función del tiempo (odometry). También, en [48] se presenta un método de control de desplazamiento de un robot móvil con ruedas omnidireccionales basado en dos sensores de flujo óptico instalados en el chasis con el fin de conocer la trayectoria realizada por el robot. En este diseño el robot sufre un deslizamiento en las ruedas lo que ha requerido definir un algoritmo concreto para compensarlo. En [82, 83] el sensor de flujo óptico se ha combinado con un sensor de distancia ultrasónico en el que se ha estimado su configuración en un robot móvil para su localización en un entorno conocido con superficies planas.

La implementación original del sensor de flujo óptico proporciona imágenes enfocadas correctamente a distancias muy pequeñas (1.24 mm) [19]. Sin embargo, en [84] se ha probado que cambiando la iluminación interna del sensor por una luz láser que ilumine la superficie a medir, la distancia de trabajo del sensor de flujo óptico puede ser ampliada hasta 300 mm. En [85] esta propuesta ha sido aplicada para desarrollar cuatro aplicaciones diferentes: para monitorear el

proceso de secado en el pintado de una moneda, para medir la variación del diámetro de la arteria debido a los latidos del corazón, para estimar desplazamiento angular durante la rotación de una esfera de acero, y para estimar el desplazamiento del punto medio en la torsión de una barra de madera a consecuencia de la carga aplicada. En [86] se ha visto que el uso del sensor de flujo óptico no es apropiado como velocímetro óptico sin contacto para un robot de exploración en Marte si éste es sensible al tipo de superficie. Sin embargo, en [58] se ha propuesto el sensor de flujo óptico combinado con dos fuentes de luz láser permitiendo a capturar con más detalle el suelo y de esta forma poder estimar la trayectoria de un robot móvil en terrenos complicados tales como son los resbaladizos.

Además de estas aplicaciones el sensor de flujo óptico también ha estado aplicado en un automóvil de pasajeros. En [55] las capacidades de visión del sensor han sido aplicadas para realizar un sistema diferencial de flujo óptico formado por dos sensores para poder detectar la altura y la velocidad del suelo de un automóvil con 6 grados de libertad (6-DOF). Debido a las condiciones físicas del entorno (terreno irregular, iluminación) y el tipo de vehículo, se ha definido un algoritmo específico de procesamiento de flujo óptico para compensar movimientos rotacionales, la altura respecto al suelo y rango de la superficie visible. Se ha visto que este sistema de medición funciona mejor al aire libre que en entornos interiores por haber más cantidad de texturas y mejor iluminación. Con la misma idea, en [87] se pretende calcular la velocidad de un automóvil de pasajeros con dos sensores de flujo óptico acoplados en la parte delantera derecha y trasera izquierda respectivamente. Cada sensor posee una lente macroscópica para incrementar el límite de velocidad a 30 m/s y la altura máxima de trabajo a 1 m. Con los dos sensores se pretende calcular la relación de giro angular entre ellos e averiguar la posible inclinación del vehículo en el eje de guiñada (yaw). De esta forma se pretende minimizar los errores en la estimación de la velocidad de traslación.

### 1.4.2. Información adicional del sensor

En el caso de utilizar sensores de flujo óptico de Avago Technologies los registros DELTA\_X y DELTA\_Y proporcionan la información de medida de desplazamiento con algunos errores acumulativos. A parte de estos dos registros, el sensor de flujo óptico tiene otros registros internos que proporcionan información específica sobre el estado del bucle de control de la iluminación, el tiempo de exposición y algunos cálculos con los píxeles de la imagen, como el promedio de los píxeles, el valor máximo o el mínimo. Estos registros pueden leerse simultáneamente con los registros de desplazamiento sin interrumpir el funcionamiento básico del sensor.

En [88] los registros SHUTTER, PIXELSUM y SQUAL se han utilizado para analizar una superficie rotatoria de color blanca con una línea de referencia muy delgada. Cuando la línea llega al sensor, el promedio de intensidad de los píxeles de la imagen cambia de repente, el bucle de control incrementa la potencia aplicada a la iluminación del LED y se adapta el tiempo de exposición. Estos cambios se producen muy rápidamente y su detección (con los registros SHUTTER y PIXELSUM) permite corregir el error acumulado en los registros de desplazamiento. Por otro lado, en [89] se ha propuesto utilizar estos registros alternativos para detectar monedas de 2 euros falsas. Se ha visto que la evolución dinámica de los registros alternativos en una rotación completa de la moneda no es suficiente para detectar monedas falsas, sin embargo esta información puede ser usada para una identificación individual de cada una de las monedas.

### 1.4.3. El sensor como dispositivo de visión

Algunos sensores de flujo óptico proporcionan acceso a las imágenes de baja resolución adquiridas por la cámara CMOS interna. En el caso de los sensores de Agilent Technologies, la imagen capturada puede ser obtenida secuencialmente leyendo el registro interno PIXEL\_BURST con el bus de comunicación SPI. Los datos de la imagen tendrán que ser analizados y procesados por otro microprocesador externo e adicional al que lleva el sensor óptico. Su configuración dependerá del tipo de aplicación y del resultado que se desee obtener, normalmente se utilizan microprocesadores de bajo coste y de

tamaño pequeño para realizar dispositivos de visión compactos e económicos. Sin embargo existen las limitaciones en la capacidad de cómputo aritmético y velocidad de muestreo de los datos.

En [57] el sensor de flujo óptico como sistema de visión microscópica de bajo coste para desarrollar un codificador rotativo absoluto basado en la lectura de códigos binarios en la superficie del disco rotatorio. En [89] una propuesta parecida se ha llevado a cabo para detectar monedas de 2-euros falsas con la adquisición y análisis de imágenes parciales de su superficie. Las imágenes son procesadas y comparadas con un patrón de imágenes de referencia obtenidas de una moneda válida. De forma similar, en [90] el sensor de flujo óptico se ha utilizado para identificar huellas dactilares. En [91] el sensor de flujo óptico se ha usado para medir el diámetro de un hilo, obteniendo resoluciones de hasta 60  $\mu\text{m}$ , con el propósito de mejorar el control de la calidad de los hilos textiles durante su proceso de fabricación. En [18] el sensor de flujo óptico ha sido aplicado en un dispositivo informático apuntador para estimar la orientación del ojo del usuario con el fin de controlar las acciones básicas que tiene el puntero informático. Este dispositivo está enfocado a personas que sufren problemas de movilidad en las extremidades superiores. Los primeros resultados muestran que el dispositivo propuesto ha sido apto para controlar el desplazamiento del puntero y generar eventos de clic en diferentes usuarios voluntarios.

Finalmente, en [92] se ha implementado un sensor de navegación óptico llamado SICONs (Single Chip Optical Navigation Sensor) para estimar el desplazamiento producido en vehículos voladores muy pequeños. Su funcionamiento se basa en proyecciones esféricas para obtener un campo de visión muy ancho. Sin embargo, el SICONs utiliza una técnica de imágenes en forma de pirámide (pyramid-like imaging element) que tiene que ser implementada con cinco sensores ópticos posicionados en diferentes ángulos de visión.

## 1.5. Referencias

- [1] Avago Technologies, <http://www.avagotech.com> (2011).
- [2] J.Palacin, I. Valgañon and R. Pernia, “The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement,” *Sensors and Actuators A* 126 (2006) 141-147.
- [3] ST Microelectronics, <http://www.st.com/> (2011).
- [4] ATLab Inc., <http://www.atlab.co.kr/> (2011).
- [5] ELAN Microelectronics Corp., <http://www.emc.com.tw/> (2011).
- [6] PixArt Imaging Inc., <http://www.pixart.com.tw/> (2011).
- [7] Avago Technologies, ADNS-3060, ADNS-3080 and ADNS-3088 High Performance Optical Mouse Sensor, <http://www.avagotech.com> (2011).
- [8] Agilent Technologies, “Optical mice and how they work”, White Paper 5988-4554EN, Nov. 2001.
- [9] Avago Technologies, ADNS-9500 LaserStream Gaming Sensor, <http://www.avagotech.com> (2011).
- [10] J.L. Barron, D.J. Fleet, S.S. Beauchemin, T.A. Burkitt, “Performance of optical flow techniques,” *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, (1992) 236-242.
- [11] L. Di Stefano, S. Mattoccia, “Fast template matching using bounded partial correlation,” *Journal of Machine Vision Applications*, 13 (4) (2003) 213-221.
- [12] Patent: US7315013, Jan. 2008.
- [13] Patent: US7502515, Mar. 2009.
- [14] ST Microelectronics, VD5376 Ultra-low power motion sensor for optical finger navigation and optical/laser mice, <http://www.st.com> (2011).
- [15] Avago Technologies, ADNS-2620 Optical Mouse Sensor, <http://www.avagotech.com> (2011).
- [16] M.K. Md Arshad, U. Hashim and C. M. Choo, “Characteristics of Serial Peripheral Interfaces (SPI) Timing Parameters for Optical Mouse Sensor,” *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics*, Julio 2006, pp. 576 – 582.
- [17] M.K. Md Arshad, U. Hashim and C. M. Choo, “The Characterization of Power Supply Noise for Optical Mouse Sensor,” *31st International Conference on Electronics Manufacturing and Technology*, November 2007, pp. 514 - 517.
- [18] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, “Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor,” *Sensors and Actuators A*, Submitted.
- [19] T.W. Ng, “The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor,” *Sensors and Actuators A* 107 (2003) 21-25.
- [20] J. Borenstein and L. Feng, “Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots,” *IEEE Transactions on robotics and automation* 6 (12) (1996) 869 – 880.
- [21] A. Bonarini, M. Matteucci and M. Restelli, “Automatic Error Detection and Reduction for an Odometric Sensor based on Two Optical Mice,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, April 2005, pp. 1675 - 1680.
- [22] J. Borenstein and Y. Koren, “A mobile platform for nursing robots,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2 (32) (1985) 158-165.
- [23] L. Banta, “A Self Tuning Navigation Algorithm,” *International Conference on Robotics and Automation*, vol.2 pp.1313-1314 , April 1988.

- [24] J-S Hu, Y-J Chang and Y-L Hsu, "Calibration and data integration of multiple optical flow sensors for mobile robot localization," International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, pp.464-469, June 2008.
- [25] J. Borenstein, "Internal Correction of Dead-reckoning Errors With the Smart Encoder Trailer," Journal of Robotic System, 12(4) 257-273, April 1995.
- [26] R. Ross and J.Devlin, "Analysis of Real-Time Velocity Compensation for Outdoor Optical Mouse Sensor Odometry," 11th International Conference Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore, pp. 839-843, December 2010.
- [27] H. R. Park, D. J. Hyun, H. S. Yang and H. S. Park, "A dead reckoning sensor system and a tracking algorithm for mobile robot," ICROS-SICE International Joint Conference, August 2009, pp. 18-21.
- [28] U. Minoni and A. Signorini, "Low-cost optical motion sensors: An experimental characterization," Sensors and Actuators A 128 (2006) 402-408.
- [29] N. Tunwattana, A.P. Roskilly and R. Norman, "Investigations into the effects of illumination and acceleration on optical mouse sensors as contact-free 2D measurement devices," Sensors and Actuators A 149 (1): 87-92, 2009.
- [30] A. Bonarini, M. Matteucci and M. Restelli, "Dead reckoning for mobile robots using two optical mice," In Proceedings of ICINCO (2) (2004) pp. 87-94.
- [31] A. Bonarini and M. Matteucci and M. Restelli, "A Kinematic-independent Dead-reckoning Sensor for Indoor Mobile Robotics," Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan, September (4) 2004, pp. 3750 - 3755.
- [32] D. K. Sorensen, V. Smukala, M. Ovinis and S. Lee, "On-Line Optical Flow Feedback for Mobile Robot Localization/Navigation," Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2) pp. 1246 – 1251, October 2003.
- [33] S. Lee and J-B Song, "Robust Mobile Robot Localization using Optical Flow Sensors and Encoders," Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, (1) pp. 1039 – 1044, April 2004.
- [34] J-S Hu, Y-J Chang and Y-L Hsu, "Calibration and on-line data selection of multiple optical flow sensors for odometry applications," Sensors and Actuators A 149 (2009) 74-80.
- [35] J. Bradshaw, C. Lollini and B. E. Bishop, "On the Development of an Enhanced Optical Mouse Sensor for Odometry and Mobile Robotics Education," 39th Southeastern Symposium on System Theory MA1.2, pp. 4-6, March 2007.
- [36] K-M Lee and D Zhou, "A Real-Time Optical Sensor for Simultaneous Measurement of Three-DOF Motions," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 3 (9) (2004) 499 – 507.
- [37] W. Xin and K. Shida, "Optical Mouse Sensor for Detecting Height Variation and Translation of a Surface," IEEE International Conference on Industrial Technology, April 2008, pp. 1-6.
- [38] P-L Wu, S-L Jeng and W-H Chieng, "Least Squares Approach to Odometry based on Multiple Optical Mouse Sensors," The 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1573 - 1578 , June 2010.
- [39] D. Sekimori and F. Miyazaki, "Precise dead-reckoning for mobile robots using multiple optical mouse sensors," Informatics in Control, Automation and Robotics II, pp145-151, 2007.
- [40] O. Maye, J. Schaeffner and M. Maaser, "An optical indoor positioning system for the mass market," Proceedings of the 3rd Workshop on positioning, navigation and communication, pp. 111-115, 2006.
- [41] S. Singh and K. Waldron, "Design and evaluation of an integrated planar localization method for desktop robotics," IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol.2, pp. 1109-1114, May 2004.

- [42] S. Kim and S. Lee, "Optical Mouse Array Position Calibration for Mobile Robot Velocity Estimation," IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Chengdu, pp. 1167 – 1172, September 2008.
- [43] S. Kim and S. Lee, "Robust Mobile Robot Velocity Estimation Using Redundant Number of Optical Mice," International Conference on Information and Automation, China, pp. 107-112, June 2008.
- [44] J. D. Jackson, D. W. Callahan, and J. Marstrander, "A Rationale for the use of Optical Mice Chips for Economic and Accurate Vehicle Tracking," Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering, pp. 22-25, September 2007.
- [45] M.K. Chmarra, N. H. Bakker, C.A. Grimbergen and J. Dankelman, "TrEndo, a device for Trucking minimally invasive surgical instruments in training setups," Sensors and Actuators A 126 (2006) 328–334.
- [46] D. Hyun, H. S. Yanga, H. R. Park and H-S Park, "Differential optical navigation sensor for mobile robots," Sensors and Actuators A 156 (2009) 296–301.
- [47] D. Hyun, H. S. Yang, H-S Park and, H-J Kim, "Dead-reckoning sensor system and tracking algorithm for 3-D pipeline mapping," Mechatronics 20 (2010) 213–223.
- [48] J-S Hu, J-H Cheng and Y-JChang, "Spatial Trajectory Tracking Control of Omni-directional Wheeled Robot Using Optical Flow Sensors," 16th IEEE International Conference on Control Applications, Singapore, pp. 1462 – 1467, October 2007.
- [49] T.W. Ng and T. L. Cheong, "The optical mouse as an inexpensive region of-interest position recorder in optical microscopy", Microsc. Res. Tech.63, 203–205 (2004).
- [50] B. Silva, D. Pasadas, O. Postolache, H. G. Ramos, A. L. Ribeiro and F. C. Alegria, "2D magnetic field mobile sensing system for eddy current testing," IEEE Sensors, pp. 1339-1344, October 2009.
- [51] M. Cimino and P. R. Pagilla, "Location of optical mouse sensors on mobile robots for odometry," IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 2010, pp. 5429 - 5434.
- [52] J.A. Cooney, W.L. Xu and G. Bright, "Visual dead-reckoning for motion control of a mecanum-wheeled mobile robot," Mechatronics 14 (6) (2004) 623-637.
- [53] S. Lee, "Mobile Robot Localization using Optical Mice," IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Singapore, pp. 1192-1197, December 2004.
- [54] A. Barron and M.V. Srinivasan, "Visual regulation of ground speed and headwind compensation in freely flying honey bees," The Journal of experimental biology, pp. 978-984, 2006.
- [55] R. Kathage and J. Kim, "Experimental results of a differential optic-flow system," Australian Conference on Robotics and Automation, Australia, 2008.
- [56] J. Kim and G. Brambley, "Dual Optic-flow Integrated Navigation for Small-scale Flying Robots," In Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, Brisbane, Australia, December 2007.
- [57] M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, "Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder," Sensors and Actuators A 157 (2010) 161-167.
- [58] I. Nagai, K. Watanabe, K. Nagatani, and K. Yoshida, "Noncontact Position Estimation Device with Optical Sensor and Laser Sources for Mobile Robots Traversing Slippery Terrains," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, October 2010, pp. 3422-3427.
- [59] Avago Technologies, ADNS-2051 Optical Mouse Sensor, <http://www.avagotech.com> (2011).
- [60] Avago Technologies, ADNB-6011-EV and ADNB-6012-EV High Performance Laser Mouse Bundles, <http://www.avagotech.com> (2011).

- [61] P. Robinette, R. Meuth, R. Dolan and D. Wunsch, "LabRatTM: Miniature Robot for Students, Researchers, and Hobbyists," IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, October 2009, pp. 1007-1012.
- [62] S. Lange, N. Sünderhauf and P. Protzel, "A Vision Based Onboard Approach for Landing and Position Control of an Autonomous Multirotor UAV in GPS-Denied Environments," Int. Conf. on Advanced Robotics, June 2009.
- [63] M. Dille, B. Grocholsky and S. Singh, "Outdoor Downward-facing Optical Flow Odometry with Commodity Sensors," In Proceedings Field & Service Robotics, July 2009.
- [64] J.J.T.H. de Best, B.H.M. Bukkems, M.J.G. van de Molengraft, W.P.M.H. Heemels and M. Steinbuch, "Robust control of piecewise linear systems: A case study in sheet flow control," Control Engineering Practice 16 (2008) 991–1003.
- [65] G.K. Lott, M.J. Rosen and R.R. Hoy, "An inexpensive sub-millisecond system for walking measurements of small animals based on optical computer mouse technology," Journal of Neuroscience Methods 161 (2007) 55–61.
- [66] T.W. Ng, "Measuring viscoelastic deformation with an optical mouse," Journal of Chemical Education 81 (2004) 1628-1629.
- [67] W. Xin and K. Shida, "Surface shape analyzing device using optical mouse sensor," IEEE Youth Conference on Information, Computing and Telecommunication, September 2009, pp. 255 - 258.
- [68] C. K. Lim, I-M Chen, L. Yan and Z. Luo, "A novel approach for positional sensing of a spherical geometry," Sensors and Actuators A 168 (2011) 328–334.
- [69] T. W. Ng and K. T. Ang, "The optical mouse for harmonic oscillator experimentation," American Journal of Physics 73 (2005) 793-795.
- [70] T.W. Ng and K.T. Ang, "The optical Mouse for vibratory motion sensing," Sensors and Actuators A 116 (2004) 205-208.
- [71] D. Jiang, J. Xiao, H. Li and Q. Dai, "New approaches to data acquisitions in a torsion pendulum experiment," Eur. J. Phys. 28 (2007) 977–982.
- [72] S. Matsuda, "Measurement of solid circulation rate in a circulating fluidized bed," Powder Technology 187 (2008) 200–204.
- [73] T. W. Ng, T L Cheong and J Sheridan, "Digital readout manometer using an optical Mouse," Eur. J. Phys. 28 (2007) N11–N16.
- [74] N. N. Ali Charniya and S. Vasant Dudul, "Sensor for Classification of Material Type and Its Surface Properties Using Radial Basis Networks," IEEE Sensors Journal, 12 (8) (2008) 1981-1991.
- [75] N. Nizar, A. Charniya and S.V. Dudul, "Simple low-cost system for thickness measurement of metallic plates using laser mouse navigation sensor," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 10 (59) (2010) 2700-2705.
- [76] J.M. Romano, S.R. Gray, N.T. Jacobs and K.J. Kuchenbecker, "Toward Tactilely Transparent Gloves: Collocated Slip Sensing and Vibrotactile Actuation," Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp. 18-20, March 2009.
- [77] G. Milighetti, S. Buerger and H.-G. Kuntze, "On the robot based surface finishing of moving unknown parts by means of a new slip and force control concept," International Conference on Robotics and Automation, Italy, pp. 4752-4757, April 2007.
- [78] R. Höver and M. Harders, "Measuring and incorporating slip in data-driven haptic rendering," IEEE Haptics Symposium, USA, pp.175-182, March 2010.
- [79] G.J. Donatell, D.W. Meister, J.R. O'Brien, J.S. Thurlow, J.G. Webster and F.J. Salvi, "A Simple Device to Monitor Flexion and Lateral Bending of the Lumbar Spine," IEEE Trans. on neural systems and rehabilitation engineering 1 (13) (2005) 18-23.
- [80] R. Klose and J. Schmalzl, "Using an optical mouse sensor to track geophysical field measurements," Journal of Geophysics and Engineering 7 (2010) 404–409.

- [81] F. M. Santos, V. F. Silva, and L. M. Almeida, “A robust self-localization system for a small mobile autonomous robot,” In Proceedings of ISRA, 2002.
- [82] S. Baek, H. Park and S. Lee, “Mobile Robot Localization based on Consecutive Range Sensor Scanning and Optical Flow Measurements,” 12th International Conference on Advanced Robotics, Seattle, pp.17-22, July 2005.
- [83] S. Baek, H. Park and S. Lee, “Range sensor data filtering for mobile robot localization,” International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Monterey, pp.516-521, July 2005.
- [84] T.W. Ng and M. Carnea, “Optical mouse digital speckle correlation,” Optics Communications 280 (2007) 435–437.
- [85] M. Melo da Silva, J.R. de Almeida, M.J. Chaves, R.A. Braga and H.J. Rabal, “Optical mouse acting as biospeckle sensor,” Optics Communications 284 (2011) 1798–1802.
- [86] T. O. H. Charrett, L. Waugh and R. P. Tatam, “Speckle velocimetry for high accuracy odometry for a Mars exploration rover,” Meas. Sci. Technol. 21 (2010) 025301 1-12.
- [87] M. Joos, J. Ziegler and C. Stiller, “Low-cost sensors for image based measurement of 2D velocity and yaw rate,” IEEE Intelligent Vehicles Symposium, USA, pp. 658-662, June 2010.
- [88] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó and J. Palacín. “The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder,” Sensors and Actuators A 155 (2009) 73–81.
- [89] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó and J. Palacín, “Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector,” Sensors 9 (2009) 7083-7096.
- [90] F.S. Rovati, P. Gardella, P. Zambotti and D. Pau. “Spatial-Temporal Motion Estimation for Image Reconstruction and Mouse Functionality with Optical or Capacitive Sensors,” IEEE Trans. on Consumer Electronics 711 (49) (2003) 711-718.
- [91] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó and J. Palacín, “Measuring yarn diameter using inexpensive optical sensors,” Procedia Engineering 5 (2010) 236-239.
- [92] C-L Tisse, H. Durrant-Whyte and R. A. Hicks, “An optical navigation sensor for micro aerial vehicles,” Computer Vision and Image Understanding 105 (2007) 21–29.



## Capítulo 2

### Objetivos

---

#### 2.1. Objetivo de la tesis

El objetivo principal de esta tesis consiste en la búsqueda de nuevas aplicaciones del sensor de flujo óptico para desarrollar sistemas de medición de bajo coste que aprovechen la versatilidad de este tipo de sensor.

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



## Capítulo 3

# Desarrollo de un codificador rotativo incremental a partir de un sensor de flujo óptico

---

### 3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el trabajo que ha permitido implementar un codificador rotativo incremental utilizando como base un sensor de flujo óptico de bajo coste. Un codificador rotativo incremental es un sistema sensor que convierte una rotación angular en una serie de pulsos digitales. La implementación que se ha realizado está formada por una superficie circular que contiene una marca radial en forma de línea. La medida de la rotación se ha realizado utilizando el sensor de flujo óptico para medir el desplazamiento de la superficie mientras que las funciones internas de control de iluminación se han utilizado para detectar la marca radial, lo que ha permitido corregir los errores de medida de desplazamiento generados durante la medición del flujo óptico.

La medida del ángulo de rotación o de la velocidad de rotación es un elemento fundamental en cualquier aplicación que contenga motores y elementos móviles [1-4]. Un codificador de posicionamiento rotatorio permite poder averiguar exactamente la posición o incremento angular de rotación de un elemento móvil y a consecuencia su la velocidad o aceleración en el tiempo [5, 6]. Aunque hay muchos campos de aplicación su principal uso radica en el campo de la robótica [7-11], para controlar sobre todo la posición o ángulo de determinadas

articulaciones [7, 8] y posicionamiento en robots móviles [9, 10, 11], también son muy usados en plataformas de radar o sensores de distancia 2D con una base rotatoria (Fig. 3.1-a), o incluso en dispositivos apuntadores informáticos (Fig. 3.1-b).

Actualmente en el mercado se encuentran dos tipos de codificadores rotativos: el incremental [1-4] (Fig. 3.1) y el absoluto [12, 13]. El codificador absoluto permite estimar la posición absoluta angular en la que se encuentra mientras que el sensor incremental no permite conocer la posición angular sino el incremento de la rotación realizada.

a)



b)



c)



**Fig. 3.1.** Ejemplos de aplicaciones de codificadores rotativos incrementales: a) Hokuyo URG-04LX-UG01 Laser Rangefinder; b) Rueda de desplazamiento de un ratón informático; c) Codificador rotativo magnético aplicado en el eje de un motor DC.

En la Fig. 3.1 se muestran varios ejemplos de aplicaciones donde se utilizan codificadores rotativos incrementales. En la parte superior (Fig 3.1-a) se muestra un codificador rotativo incremental implementado en el sensor de medida de distancia bidimensional URG-04LX-UG01 de Hokuyo; en la parte inferior izquierda (Fig. 3.1-b) se muestra el codificador rotativo incremental utilizado en la rueda de desplazamiento del ratón informático. Estos dos codificadores utilizan tecnología óptica con fotodiodos que generan un impulso eléctrico cada vez que una de las ranuras o líneas se interponga en su campo visual. Por el contrario, en la Fig. 3.1-c se muestra un codificador rotativo incremental para un motor DC que en este caso funciona con cambios de campo magnético [14, 15] que se generan cuando el motor gira y son detectados por dos sensores de efecto hall.

Principalmente la elección de un codificador para una determinada aplicación depende de la velocidad de rotación, resolución requerida y cantidad de repetitividad y precisión en la medida. Los codificadores rotatorios con sensores ópticos a menudo se utilizan en aplicaciones que requieren altas velocidades de funcionamiento y mucha resolución [13, 16] sin embargo no son adecuados para la producción a pequeña escala debido a la dificultad de fabricación del disco con las marcas o códigos. Por el contrario, un codificador rotatorio con detección magnética es más resistente a los factores ambientales como el polvo, humedad y vibración. El hecho de no llevar un disco con marcas y tener una estructura más simple y compacta hace disminuir su coste de fabricación.

Existen algunas otras propuestas de diseños de codificadores rotativos basados en otras tecnologías o en el uso combinado de diversas tecnologías como por ejemplo en [17] donde se aplican métodos magnético-ópticos similares al funcionamiento de los dispositivos de almacenamiento informáticos, o en [18] que proponen el uso de elementos capacitivos definiendo el nuevo concepto de codificador capacitativo que combina la robustez de los codificadores magnéticos con la resolución que tienen los ópticos. Otro ejemplo es el uso de acelerómetros lineales para medir el movimiento angular de un cuerpo [19-21].

El uso de sensores ópticos más complejos y especializados para la detección de desplazamiento como los sensores de flujo óptico, es una alternativa

para la construcción de codificadores más simples y compactos con altas prestaciones debido a que no hay tanta complejidad mecánica y no requieren códigos o agujeros en el disco rotatorio [22]. Sin embargo, por otro lado es necesario disponer de un procesador digital de señal (DSP) más potente para que soporte un algoritmo de análisis y procesado de imagen [23, 24], lo que hace que igualmente sea costoso.

Por este motivo, en este trabajo se ha propuesto el uso del sensor de flujo óptico de un ratón informático que ya está configurado y fabricado con el fin de detectar desplazamiento [25, 26, 27], y con un precio muy reducido debido a su magnitud de fabricación masiva como interfaz informática. Además, las principales características de este sensor de flujo óptico, como el tamaño reducido y compacto, y la altura de trabajo para la detección de movimiento muy pequeña, hacen que este sensor sea idóneo como sensor principal en el diseño de un codificador rotativo incremental de bajo coste.

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

En este capítulo se presenta el trabajo que ha permitido implementar un codificador rotativo incremental utilizando como base un sensor de flujo óptico de bajo coste. Las aportaciones más importantes al estado del arte han sido:

- La propuesta de utilizar un sensor de flujo óptico de bajo coste como elemento base del codificador.
- La propuesta de utilización de las funciones internas de control de iluminación para detectar marcas de posicionamiento sin que esto afecte el funcionamiento general del sensor.

Entre otras posibilidades, estas nuevas aportaciones permiten la creación de codificadores rotativos de precisión con un coste de fabricación muy bajo. Este aspecto puede permitir la incorporación de sistemas de medida de rotación en segmentos de mercado en los que el coste es un factor que actualmente limita su aplicación.

### 3.3. Referencias

- [1] R.M. Kennel, "Why Do Incremental Encoders Do a Reasonably Good Job in Electrical Drives with Digital Control?," Industry Applications Conference, vol. 2, pp. 925-930, Oct. 2006.
- [2] R.M. Kennel, "Encoders for Simultaneous Sensing of Position and Speed in Electrical Drives with Digital Control," IEEE Transactions on Industry Applications 43 (6) (2007) 1572-1577.
- [3] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, M. Tachikawa, "A Microprocessor-Controlled High-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives," IEEE Transactions on Industrial Electronics IE-29 (3) (1982) 207-211.
- [4] G. Bartolini, A. Damiano, G. Gatto, I. Marongiu, A. Pisano, E. Usai, "Robust Speed and Torque Estimation in Electrical Drives by Second-Order Sliding Modes," IEEE Transactions on Control Systems Technology 11 (1) (2003) 84-90.
- [5] H. Nagatomi, K. Ohnishi, "Acceleration Estimation Method for Motion Control System with Optical Encoder," IEEE. International Conference on Industrial Technology, pp. 1480-1485, Dec. 2006.
- [6] R.J.E. Merry, M.J.G. van de Molengraft, M. Steinbuch, "Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders," Mechatronics 20 (1) (2010) 20-26.
- [7] Y. Wei-Yun, W. Han, "Coordinating the eyes, head and arm of an autonomous robot," Engineering Applications of Artificial Intelligence 11 (1998) 163-174.
- [8] S. Goto, T. Usui, N. Kyura, M. Nakamura, "Forcefree control with independent compensation for industrial articulated robot arms," Control Engineering Practice 15 (2007) 627-638.
- [9] S. Han, B. Choi, J. Lee, "A precise curved motion planning for a differential driving mobile robot," Mechatronics 18 (2008) 486-494.
- [10] H. Lang; Y. Wang; C.W. de Silva, "Mobile Robot Localization and Object Pose Estimation Using Optical Encoder, Vision and Laser Sensors," IEEE International Conference on Automation and Logistics, pp.617-622, Sept. 2008.
- [11] H. Rajaie, O. Zweigle, K. Häussermann, U.-P. Käppeler, A. Tamke, P. Levi, "Hardware design and distributed embedded control architecture of a mobile soccer robot," Mechatronics 21 (2011) 455-468.
- [12] J.J. Blakley, "Two-dimensional position sensing using absolute-type encoder scheme employing pseudorandom binary arrays," Electronics Letters 36 (15) (2000) 1277-1278.
- [13] Y. Sugiyama, Y. Matsui, H. Toyoda, N. Mukozaka, A. Ichori, T. Abe, M. Takabe, S. Mizuno, "A 3.2 kHz, 14-Bit Optical Absolute Rotary Encoder with a CMOS Profile Sensor," IEEE Sensors Journal 8 (8) (2008) 1430-1436.
- [14] K. Miyashita, T. Takahashi, M. Yamanaka, "Features of a magnetic rotary encoder," IEEE Transactions on Magnetics 23 (5) (1987) 2182-2184.
- [15] B. Lequesne, T. Schroeder, "High-accuracy magnetic position encoder concept," IEEE Transactions on Industry Applications 35 (3) (1999) 568-576.
- [16] H.G. Follingstad, J.N. Shive, R.E. Yaeger, "An Optical Position Encoder and Digit Register," Proceedings of the IRE, vol. 40, no. 11, pp. 1573-1583, Nov. 1952.
- [17] K. Tobita, T. Ohira, M. Kajitani, C. Kanamori, M. Shimojo, A. Ming, "A rotary encoder based on magneto-optical storage," IEEE Transactions on Mechatronics 10 (1) (2005) 87-97.
- [18] R. M. Kennel, St. Basler, "New Developments in Capacitive Encoders for Servo Drives," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2008, pp. 190-195, Jun. 2008.

- [19] L.D. DiNapoli, "The Measurement of Angular Velocities without the Use of Gyros," The Moore School of Electrical Engineering, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1965, pp. 34-41.
- [20] A.R. Schuler, "Measuring rotational motion with linear accelerometers," IEE Transactions on AES 3 (1967) 465-472.
- [21] W.T. Latt, U. Tan, C.N. Riviere, W.T. Ang, "Placement of accelerometers for high sensing resolution in micromanipulation," Sensors and Actuators A 167 (2) (2011) 304-316.
- [22] S. Merino, A. Retolaza, A. Juarros, S. Landis, "A new way of manufacturing high resolution optical encoders by nanoimprint lithography," Microelectronic Engineering 84 (5-8) (2007) 848-852.
- [23] J.L. Barron, D.J. Fleet, S.S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques," International Journal of Computer Vision 12 (1) (1994) 43-77.
- [24] A. Beghdadi, M. Mesbah, J. Monteil, "A fast incremental approach for accurate measurement of the displacement field," Image and Vision Computing 21 (4) (2003) 383-399.
- [25] T.W. Ng, "The optical mouse as a two-dimensional displacement sensor," Sensors and Actuators A SA-107 (2003) 21-25.
- [26] U. Minoni, A. Signorini, "Low-cost optical motion sensor: an experimental characterization," Sensors and Actuators A SA-128 (2006) 402-408.
- [27] J. Palacin, I. Valganon, R. Pernia, "The optical mouse for indoor mobile robot odometry measurement," Sensors and Actuators A SA-126 (2006) 141-147.

Las páginas de la 47 a la 66 contienen el artículo:

M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin. “The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder,” *Sensors and Actuators A*, 155 (2009), 73–81.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2009.08.003>

ISSN: 0924-4247



## Capítulo 4

# Desarrollo de un codificador rotativo absoluto a partir de un sensor de flujo óptico

---

### 4.1. Introducción

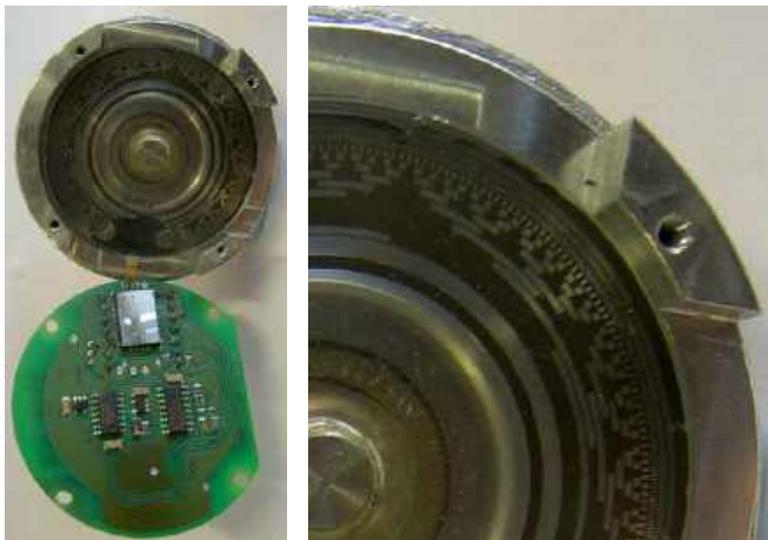
En este capítulo se presenta el trabajo realizado para implementar un codificador rotativo absoluto utilizando como base un sensor de flujo óptico de bajo coste para leer códigos binarios impresos en un disco rotatorio y estimar la posición absoluta. Este trabajo es una continuación del trabajo presentado en el capítulo anterior sobre el desarrollo de un codificador rotativo incremental [1] y afronta los principales inconvenientes asociados al primer trabajo realizado:

- El sistema de medida rotatorio incremental propuesto no permite estimar la posición en la que se encuentra el encoder en el momento de inicio o arranque del sensor.
- El error de desplazamiento solamente se puede corregir una vez por vuelta al detectar la línea impresa en el disco rotatorio.

Para afrontar dichos problemas el nuevo sistema de medida de desplazamiento angular absoluto está basado en la lectura y análisis de imágenes capturadas por el sensor de flujo óptico. De esta forma el sensor ha sido utilizado exclusivamente como un sistema de adquisición de imágenes de bajo coste. El codificador propuesto consiste en el sensor de flujo óptico situado encima de una

superficie o disco rotatorio que contiene impresos códigos binarios de posicionamiento. Estos códigos serán posteriormente interpretados a partir de las imágenes capturadas del sensor, lo que permitirá conocer con exactitud la posición angular absoluta del sistema.

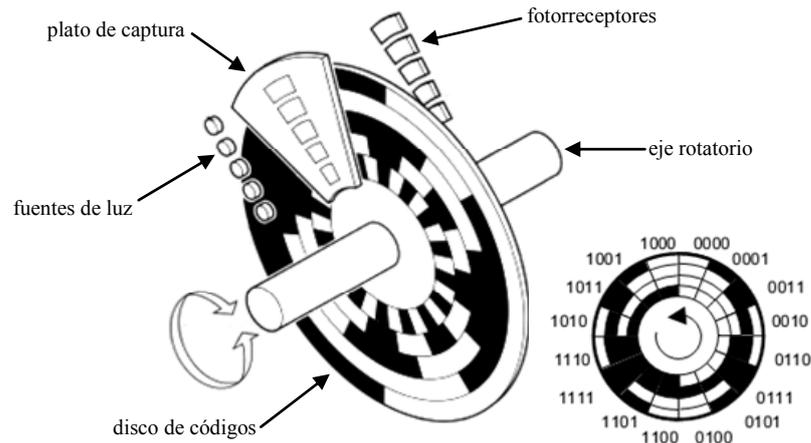
Como se ha comentado en el capítulo anterior existen dos tipos de codificadores rotativos, el incremental o relativo [1-3] y el absoluto [4-6] (Fig. 4.1). La principal ventaja que tiene un codificador rotativo absoluto es que no pierde la referencia de la posición angular real tras un corte de alimentación o desconexión. Los codificadores rotativos absolutos se suelen emplear en articulaciones robóticas [7], grúas [8], plotters [9], radares [10], orientación de telescopios y maquinaria en general que contenga partes móviles que requieran un control de posicionamiento angular absoluto [11].



**Fig. 4.1.** Ejemplo de un codificador rotativo absoluto basado la detección óptica con una codificación de Gray de 13 pistas.

Actualmente existen diferentes técnicas para convertir la posición angular física en una señal digital de salida, la más común es el uso de receptores ópticos o fotorreceptores [3, 4, 12] (Fig. 4.1). Otras técnicas son mediante medición de la orientación de un campo magnético asociado al eje de giro [13, 14], el uso de elementos capacitivos [15], o también los codificadores llamados resolvers que detectan variaciones en una señal inducida por unas bobinas [16, 17].

Los codificadores rotativos absolutos basados en sensores ópticos están formados por un disco giratorio que posee un código binario distribuido por anillos concéntricos (Fig. 4.1). Mediante una fuente de luz y un fotorreceptor para cada uno de estos anillos se llega a detectar el número codificado que revela su posición angular absoluta. En número de anillos de un codificador equivale al número bits de la codificación, que a su vez indica su resolución.



**Fig. 4.2.** Partes principales de un codificador rotativo absoluto basado en fotodiodos y codificación de Gray.

Para facilitar su implementación y mejorar su fiabilidad, existen diferentes métodos de codificación con el objetivo de hacer más eficiente el dispositivo reduciendo espacio o bits de código con la misma resolución y mejorando su eficacia evitando las posibles ambigüedades generadas en leer códigos conjuntos [18-27]. El método de codificación Vee-Scan [19, 20] se basa en utilizar más sensores ópticos posicionados en forma de “V” para evitar ambigüedades en la codificación binaria directa (binario ordenado) y tener más tolerancia entre puntos de transición. La codificación de Gray [21-24] (Fig. 4.1 y Fig. 4.2) se usa para conseguir evitar que dos o más valores cambien de valor simultáneamente mientras se mueve, como pasa con una codificación directa, por ejemplo al pasar de 7 (0111) a 8 (1000). Otro método muy utilizado actualmente es la codificación pseudoaleatoria (pseudorandom binary sequences PRBS) [5, 25-27] que permite emplear solamente una pista con un bit de ancho para obtener la posición absoluta angular. Este método ofrece una buena solución comercial para fabricar codificadores absolutos de altas resoluciones de un tamaño compacto. Sin

embargo, el hecho de que solamente se disponga de una pista con un bit de ancho dificulta su funcionamiento debido a los problemas en lectura, sincronización y conversión de los códigos [27].

El uso de un sensor óptico con una matriz de píxeles que proporciona más de un bit de código permite evitar todos estos problemas que surgen al determinar la posición angular absoluta con la codificación pseudoaleatoria [4]. Por este motivo, en este trabajo se ha propuesto el uso del sensor de flujo óptico del ratón informático [28] como sensor principal del codificador rotativo. Además, el sensor propuesto tiene un conjunto de características que lo hacen muy interesante para este tipo de aplicaciones, como son:

- Trabaja a una distancia muy pequeña entre el sensor y la superficie rotatoria (2.4 mm) facilitando un diseño compacto.
- Es un sensor de tamaño compacto con las lentes y la fuente de luz incorporada.
- Tiene un dispositivo de adquisición de imágenes CMOS con una matriz de 30 x 30 píxeles que cubre un área de 1.82 mm<sup>2</sup>, suficiente para abastecer una codificación binaria impresa en una superficie que ofrezca una resolución elevada con un diseño compacto.
- Su dispositivo de adquisición permite capturar imágenes hasta 6400 fps con un shutter muy rápido, lo que permite capturar imágenes nítidas de una superficie en movimiento.
- Facilita el acceso rápido a la lectura de las imágenes mediante un protocolo de comunicación específico que permite leer secuencialmente la imagen capturada por el sensor.

La utilización de un sensor de flujo óptico permitirá definir un codificador absoluto con una resolución elevada, fácil de implementar y con un coste muy bajo ya que el sensor óptico utilizado se produce industrialmente y con un coste muy reducido.

## **4.2. Aportación al estado del arte**

En este capítulo se presenta el trabajo que ha permitido implementar un codificador rotativo absoluto utilizando como base un sensor de flujo óptico de bajo coste. Las aportaciones más importantes al estado del arte han sido:

- El uso del sensor de flujo óptico de bajo coste como elemento base del codificador rotativo absoluto para detectar códigos impresos en un disco rotatorio.
- La propuesta de tres alternativas diferentes de codificación visual para codificar el posicionamiento angular absoluto con una matriz de píxeles, y la definición del algoritmo de análisis y procesado para su decodificación.
- La implementación de un codificador rotativo mezclando las dos propuestas para detectar el movimiento angular: el modo incremental con el algoritmo interno de desplazamiento del sensor y el modo absoluto con la detección de los códigos impresos en el disco giratorio. De esta manera se consigue obtener más resolución y a su vez poder corregir el error acumulado en un desplazamiento leyendo el código de posicionamiento en el inicio y el final.

Todas estas nuevas aportaciones van a ayudar en la creación de codificadores rotativos absolutos de altas prestaciones y elevada resolución.

## **4.3. Referencias**

- [1] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacin, "The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder," *Sensors and Actuators A* 155 (1) (2009) 73–81.
- [2] R.J.E. Merry, M.J.G. van de Molengraft, M. Steinbuch, "Velocity and acceleration estimation for optical incremental encoders," *Mechatronics* 20 (1) (2010) 20-26.
- [3] N. V. Dumbravescu, S. Schiaua, "Possibilities to increase the resolution of photoelectric incremental rotary encoders," *Materials Science Semiconductor Processing* 3 (2000) 557-561.
- [4] Y. Sugiyama, Y. Matsui, H. Toyoda, N. Mukozaka, A. Ihori, T. Abe, M. Takabe, S. Mizuno, "A 3.2 kHz, 14-Bit Optical Absolute Rotary Encoder with a CMOS Profile Sensor," *IEEE Sensors Journal* 8 (8) (2008) 1430-1436.

- [5] E.M. Petriu, "Absolute Position Measurement Using Pseudo-Random Binary Encoding," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 1 (3) (1998) 19-23.
- [6] S. Wekhande, V. Agarwal, "High-Resolution Absolute Position Vernier Shaft Encoder Suitable for High-Performance PMSM Servo Drives," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 55 (1) (2006) 357-64.
- [7] S. Goto, T. Usui, N. Kyura, M. Nakamura, "Forcefree control with independent compensation for industrial articulated robot arms," *Control Engineering Practice* 15 (2007) 627-638. *Conference on Automation and Logistics*, pp.617-622, Sept. 2008.
- [8] Y. Rosenfeld, "Automation of existing cranes: from concept to prototype," *Automation in Construction* 4 (2) (1995) 125-138.
- [9] J.S. Bethel, "Geometric alignment and calibration of a photogrammetric image scanner," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 50 (2) (1995) 37-42.
- [10] V. Subramanian, T.F. Burks, A.A. Arroyo "Development of machine vision and laser radar based autonomous vehicle guidance systems for citrus grove navigation," *Computers and Electronics in Agriculture* 53 (2) (2006) 130-143.
- [11] P. Sente, H. Buyse, "From smart sensors to smart actuators: Application of digital encoders for position and speed measurements in numerical control systems," *Measurement* 15 (1) (1995) 25-32.
- [12] J. Carr, M.Y.P. Desmulliez, N. Weston, D. McKendrick, G. Cunningham, G. McFarland, W. Meredith, A. McKee, C. Langton, "Miniaturised optical encoder for ultra precision metrology systems," *Precision Engineering* 33 (3) (2009) 263-267.
- [13] K. Miyashita, T. Takahashi, M. Yamanaka, "Features of a magnetic rotary encoder," *IEEE Transactions on Magnetics* 23 (5) (1987) 2182-2184.
- [14] B. Lequesne, T. Schroeder, "High-accuracy magnetic position encoder concept," *IEEE Transactions on Industry Applications* 35 (3) (1999) 568-576.
- [15] R. M. Kennel, St. Basler, "New Developments in Capacitive Encoders for Servo Drives," *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2008*, pp. 190-195, Jun. 2008.
- [16] A. Bellini, S. Bifaretti, "A digital filter for speed noise reduction in drives using an electromagnetic resolver," *Mathematics and Computers in Simulation* 71 (2006) 476-486.
- [17] S.K. Kaul, A.K. Tickoo, R. Koul, N. Kumar, "Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 586 (2008) 345-355.
- [18] P.R. Milner "Optimised Digital Positional Encoder Patterns," *Mechatronics* 5 (1) (1995) 87-90.
- [19] P. E. Stephens and G. G. Davies, "New Developments in Optical Shaft-Angle Encoder Design," *The Marconi Review*, vol. 46, pp. 26-42, 1983.
- [20] J.G. Webster, "The measurement, instrumentation and sensor handbook," Springer: IEEE Press, 1999.
- [21] F. Gray, "Pulse code communication," March 17, 1953 (filed Nov. 1947). U.S. Patent 2,632,058.
- [22] K.W. Cattermole, "Principles of Pulse Code Modulation," American Elsevier Publishing Company, Inc., 1969.
- [23] J.Sawada, D.Wong, "A Fast Algorithm to generate Beckett-Gray codes," *Electronic notes in Discrete Mathematics*, vol. 29, pp. 571-577, Apr. 2007.
- [24] G.S. Bhat, C.D. Savage, "Balanced Gray Codes," *The Electronic Journal of Combinatorics* 3 (1996).
- [25] S. Engelberg, H. Benjamin, "Pseudorandom sequences and the measurement of the frequency response," *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 8 (1) (2005) 54-59.

- [26] B. Balle, E. Ventura, J.M. Fuertes, “An algorithm to design prescribed length codes for single-tracked shaft encoders,” IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 1-6, Apr. 2009.
- [27] D.B. Denic, G.S. Miljkovic, “Code reading synchronization method for pseudorandom position encoders,” Sensors and Actuators A 150 (2) (2009) 188–191.
- [28] Avago Technologies, High Performance Optical Mouse Sensors, [www.avagotech.com](http://www.avagotech.com), 2011.

Las páginas de la 74 a la 90 contienen el artículo:

M. Tresanchez, T. Palleja, M. Teixido, J. Palacin, "Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder," *Sensors and Actuators A*, 157 (2010), 161-167.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2009.11.002>

ISSN: 0924-4247

## Capítulo 5

# Uso de un sensor de flujo óptico para detectar monedas de 2 euros falsas

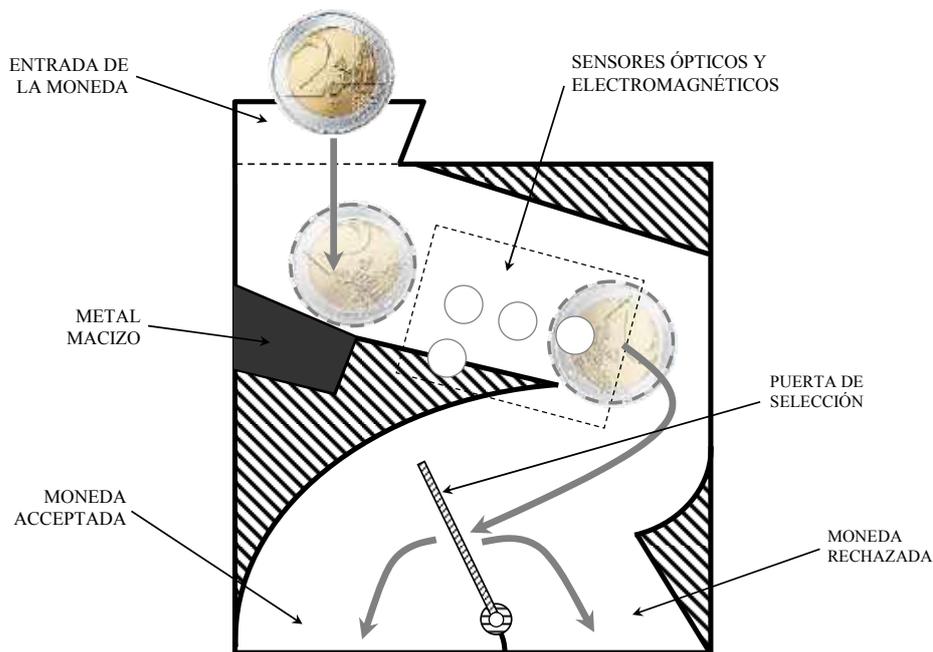
---

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presenta el trabajo realizado relacionado con el uso de un sensor de flujo óptico de bajo coste del ratón informático para detectar monedas de 2 euros que sean falsificadas o monedas parecidas a las de 2 euros que no sean de curso legal en Europa. El sistema propuesto se basa en analizar la superficie de la cara común de las monedas de 2 euros comparando los datos obtenidos de una moneda legal con el resto de monedas. Este sistema solamente analiza las propiedades ópticas en la superficie y por tanto se presenta como complementario a otros sistemas de detección que detectan otras propiedades de las monedas tanto físicas como magnéticas.

En la actualidad, muchas de las operaciones de pago se realizan mediante máquinas automáticas, como por ejemplo cajas de ventas, teléfonos públicos, máquinas expendedoras, etc., que obliga a disponer de sistemas de detección y validación de monedas automáticos, llamados discriminadores (Fig. 5.1) [1-3]. En un discriminador cuando se introduce una moneda ésta pasa por un carril en forma de rampa que contiene un conjunto de sensores ópticos y electromagnéticos. Los datos de estos sensores permiten decidir si la moneda tiene que ser aceptada o rechazada (Fig. 5.1). Para poder identificar y clasificar las monedas dichos discriminadores utilizan básicamente la detección de propiedades físicas de la

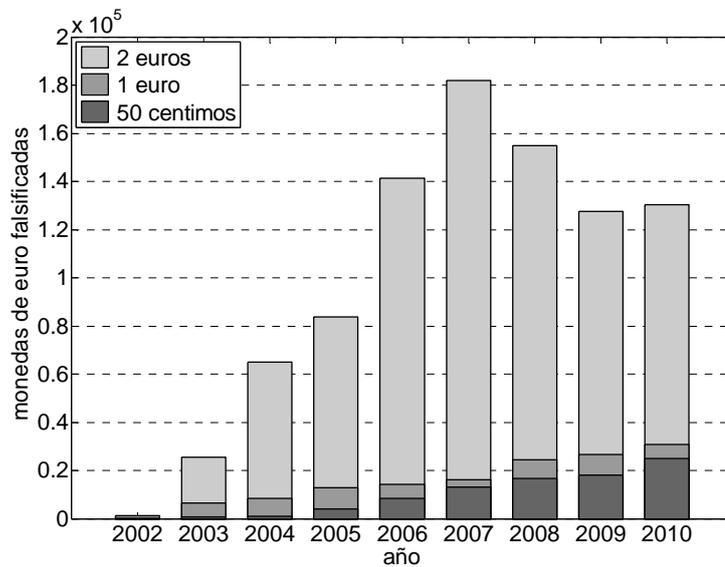
moneda [1] como el peso, tamaño, espesor, su conductividad [4], también su campo magnético [5] o sus propiedades acústicas al impactar con un objeto [6-8]. Sin embargo, existen monedas realizadas con un proceso de acuñamiento de alto acabado o monedas de otros países que tienen las mismas propiedades físicas (Fig. 5.3). Por este motivo, para tener un alto grado de satisfacción en la identificación y clasificación de monedas es necesario complementar todos estos sistemas con un procesamiento de imagen que identifique las propiedades ópticas de la moneda [9-11].



**Fig. 5.1.** Ejemplo esquemático de las principales partes y funcionamiento de un discriminador de monedas.

A diferencia de otros sensores ópticos, el sensor de flujo óptico del ratón informático tiene un conjunto de características que hacen que sea muy interesante para ser aplicado en un discriminador de monedas. Entre otras, las más destacadas son la poca distancia de trabajo requerida, el tamaño pequeño y compacto que permite un acoplamiento sencillo en estos sistemas, y sobre todo su bajo coste. Además, en este trabajo también se estudia la viabilidad de identificar las monedas con los ajustes de iluminación que realiza el algoritmo interno de este sensor cuando opera de forma normal como sensor de desplazamiento y se producen cambios en la superficie [12, 13].

El sistema de detección de monedas falsas propuesto está enfocado únicamente en la identificación de monedas de 2 euros ya que, además de ser la moneda de la unión europea con más valor, los resultados publicados en 2010 [14] por la Oficina Europea de Lucha Contra el Fraude (OLAF) [15] muestran que también es la moneda europea más falsificada. La Fig. 5.2 presenta el número de monedas falsas de 1, 2 euros y 50 céntimos detectadas en circulación en cada año hasta el 2010. Se observa claramente que hasta el 2007 cada año se han ido detectando más monedas, aunque a partir del 2007 ha habido un pequeño descenso. Sin embargo, siguen apareciendo muchas monedas falsificadas y sobre todo de 2 euros con un 70% del total de monedas falsas detectadas en circulación en el 2010 [14].



**Fig. 5.2.** Número de monedas falsificadas de 1, 2 euros y 50 céntimos detectadas en circulación de año en año hasta el 2010.

Según la OLAF se ha adoptado dos tipos de clasificaciones de monedas falsas dependiendo del tipo de falsificación, las comunes y las locales [16]. Las comunes son monedas falsificadas con un proceso de acuñación profesional similar al oficial y normalmente son generadas en grandes cantidades. Las locales son copias burdas de menor calidad y por tanto menos importantes. Conforme la OLAF cada año se detecta nuevas clases comunes en circulación. Desde los inicios del euro hasta el 2009 se han encontrado 123 clases comunes diferentes

(sin contar sus variantes) y solamente 3366 monedas reconocidas como clases locales [16].

A parte de la falsificación de monedas mediante fabricación de copias ilegales, actualmente también existe otro tipo de fraude muy practicado que consiste en “engañar” a los sistemas discriminadores de monedas utilizando monedas de curso legal en otros países pero que no son válidas en la unión europea. Estas monedas tienen las mismas propiedades físicas y magnéticas, y un valor mucho menor que sus correspondientes en euros. La principal diferencia que se puede contrastar a simple vista es el dibujo que tiene impreso, que pocos discriminadores actuales lo pueden detectar. La Fig. 5.3 muestra dos ejemplos de monedas de otros países muy parecidas a la moneda de 2 euros, la de 10 bath tailandeses y la lira turca.



**Fig. 5.3.** Ejemplos de monedas de otros países muy parecidas a las de 2 euros pero con menor valor y que no son de curso legal en Europa.

El uso de sensores ópticos en los discriminadores va a permitir detectar las falsificaciones de monedas, especialmente las monedas que presenten diferencias visuales considerables en la superficie. El sensor de flujo óptico propuesto es una buena alternativa de sensor para ser aplicado a un discriminador que requiera este tipo de detecciones. De forma práctica, el objetivo de este tipo de sensor es que el resultado aplicativo que pueda tener sea muy parecido a la capacidad que tiene una persona entrenada para identificar la validez de una moneda solamente con una inspección visual.

## 5.2. Aportación al estado del arte

El sistema de detección de monedas propuesto en este capítulo es una alternativa de bajo coste que permite detectar propiedades ópticas de las monedas de 2 euros de forma complementaria a otros sensores. Entre otras, las aportaciones más destacadas que se han conseguido en este trabajo han sido:

- El uso del sensor de un flujo óptico de bajo coste, principalmente usado para el ratón informático, como sensor de identificación y detección de monedas falsas de 2 euros.
- La propuesta de dos técnicas diferentes para la detección de la moneda: utilizando los valores de rugosidad que calcula el sensor automáticamente y procesando las capturas de imágenes de la superficie de la moneda con una plantilla previa.
- La definición de un método para detectar las partes de la superficie de una moneda con más relevancia para ser utilizadas en un procesado basado en la comparación de patrones.
- El radio óptimo de ubicación del sensor respecto el centro de la moneda de 2 euros para obtener el mejor resultado en el análisis de su superficie.

Con todas estas nuevas aportaciones se pretende facilitar el desarrollo de nuevos sensores ópticos para discriminadores que ayuden a mejorar la identificación y detección de monedas con el objetivo de reducir este tipo de fraudes monetarios.

## 5.3. Referencias

- [1] A. Carlosena, A.J. López-Martin, F. Arizti, A. Martínez-de-Guerenu, J.L. Pina-Insausti, J.L. García-Sayés, "Sensing in coin discriminators," Proceedings of IEEE Sensors Applications Symposium, pp. 1-6, San Diego, CA, USA, Feb. 2007.
- [2] J. Echapore, "A coin handling apparatus", European Patent EP0246993, Azkoyen Industrial, S.A., Priority: 21.05.1986; Filing: 19.05.1987; Publication: 16.12.1992.

- [3] I. Cerro, A. Martínez-de-Guerenu, F. Arizti, J.M. García, “Device and method for discriminating coins”, European Patent EP1445739A1, Azkoyen Medios de Pago, S.A., Filing: 31.01.2003; Publication: 11.08.2004.
- [4] P. Davidsson, “Coin classification using a novel technique for learning characteristic decision trees by controlling the degree of generalization,” Proceedings of International Conference on Industrial & Engineering Applications of Artificial Intelligence & Expert Systems, Fukuoka, pp. 403-412, Japan, Jun. 1996.
- [5] P.A. Passeraub, P.A. Besse, C. de Raad, O. Dezuari, F. Quinet, R.S. Popovic, “Metallic profile and coin imaging using an inductive proximity sensor microsystem,” Sensors and Actuators A 66 (1) (1998) 225-230.
- [6] Pina, J.L.; Echavarri, L.S.; Carlosena, A.; López-Martin, A.J. Device and procedure for verification of coins. Eur. Pat. Appl. 1378866, July 10, 2002.
- [7] H.D. Wu, M. Siegel, “Correlation of accelerometer and microphone data in the cointap test,” IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 49 (2000) 493-497.
- [8] M. Suzuki, “Development of a simple and non-destructive examination for counterfeit coins using acoustic characteristics,” Forensic Science International 177 (2008) e5-e8.
- [9] R. Huber, H. Ramoser, K. Mayer, H. Penz, M. Rubik, “Classification of coins using an eigenspace approach,” Pattern Recognition Letters 26 (2005) 61-75.
- [10] M. Zaharieva, M. Kampel, S. Zambanini, “Image Based Recognition of Ancient Coins,” Proceedings of International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns, pp. 547-554, Vienna, Austria, Aug. 2007.
- [11] A. Chalechale, “Coin recognition using image abstraction and spiral decomposition,” IEEE Int. Symposium on Signal Processing and Its Applications, pp. 1-4, Sharjah, United Arab Emirates, Feb. 2007.
- [12] Avago Technologies. high performance optical mouse sensors. <http://www.avagotech.com>
- [13] M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacin, The optical mouse sensor as an incremental rotary encoder, Sensors and Actuators A 155 (1) (2009) 73-81.
- [14] European Commission, Euro coin counterfeiting in 2010, IP/11/47. European Anti-Fraud Office (OLAF). Brussels, Belgium, 2011.
- [15] European Anti-Fraud Office (OLAF). [http://ec.europa.eu/anti\\_fraud](http://ec.europa.eu/anti_fraud).
- [16] European Commission, The protection of the euro coins in 2009, European Anti-Fraud Office (OLAF). Brussels, Belgium, 2010.

Las páginas de la 97 a la 112 contienen el artículo:

M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó and J. Palacín, “Using the Optical Mouse Sensor as a Two-Euro Counterfeit Coin Detector,” *Sensors*, 9 (2009), 7083-7096.

<http://dx.doi.org/10.3390/s90907083>

ISSN: 1424-8220



## Capítulo 6

# El sensor de flujo óptico como base de un dispositivo apuntador controlado mediante el desplazamiento del ojo

---

### 6.1. Introducción

En este capítulo se presenta el trabajo realizado para diseñar e implementar un dispositivo apuntador que permita controlar el cursor informático solamente con el movimiento de los ojos del usuario a partir de un sensor de flujo óptico de bajo coste. Este dispositivo se presenta como un ratón informático económico para las personas con un grado alto de discapacidad que no puedan optar en usar el ratón convencional o derivados de él que requieran movimientos motrices. Este trabajo ha sido posible gracias a la colaboración y financiación de Indra Sistemas y de la Fundación Adecco.

La mayoría de los dispositivos de interacción entre persona y ordenador están pensados para ser usados con las extremidades superiores del cuerpo. Los más comunes como el teclado, el ratón, el touchpad o el joystick exigen poseer un alto grado de precisión en el movimiento de la mano y de las articulaciones de los dedos. Todos estos dispositivos no están pensados para ser usados por personas con discapacidades motrices lo que dificulta el acceso de este colectivo a estas tecnologías. Debido a este aspecto y que el número de personas que sufren discapacidad es considerable y va ascendiendo (8.5% de la población en España según la encuesta realizada por el Instituto Nacional de Estadística de España [1]),

se han ido propuesto diferentes alternativas de dispositivos. Sin embargo, muchas de ellas no se han desarrollado como producto comercial debido a su limitado nicho de mercado y el elevado coste. Las diferentes alternativas propuestas para el manejo de un ordenador se basan en la detección y medición del desplazamiento de algunas otras partes físicas del cuerpo (Fig. 6.1) como gestos faciales [2, 3], movimientos de la boca [4], movimientos de cabeza [2, 3, 5, 6], seguimiento del ojo [7-10] o desplazamientos de la lengua [11].



**Fig. 6.1.** Ejemplo de un software que permite controlar el cursor informático con movimientos de la cabeza, HeadMouse [3][12].

Cada una de estas alternativas puede ser útil para un determinado colectivo de discapacitados, dependiendo de su grado o tipo de discapacidad. En el caso del método del imán situado en la lengua del usuario para captar su desplazamiento mediante sensores magnéticos [11] o la detección del movimiento de la pupila mediante reflexión de luz infrarroja con una cámara [9, 10] se focalizan en ayudar al colectivo de personas que poseen una discapacidad motriz grave sin poder mover ninguna de sus extremidades ni cuello o cabeza, donde otros métodos alternativos no sirven. El dispositivo propuesto en este trabajo también pretende ayudar a este colectivo de personas, por este motivo se pretende controlar el puntero informático solamente con el movimiento de los ojos y el parpadeo.

Actualmente existen gran variedad de dispositivos comerciales para controlar el puntero informático con el movimiento y parpadeo del ojo [13] (Fig. 6.2). Entre otros, se pueden destacar el IG-30 de Alea Technologies [14], el

Eyegaze Edge de LC Technologies [15], el Quick Glance de EyeTech Digital Systems [16] o el nuevo PCEye de Tobii Technology [17].



**Fig. 6.2.** Diferentes sistemas comerciales que permiten controlar el cursor informático con el movimiento de los ojos: a) IG-30 de Alea Technologies, b) Eyegaze Edge de LC Technologies, c) Quick Glance de EyeTech Digital Systems, d) PCEye de Tobii Technology.

Todos estos sistemas están formados por una cámara, normalmente externa o desacoplada del ordenador, un sistema de iluminación que asegure unas condiciones óptimas de captura de imágenes, y un hardware que se encargue de procesar los movimientos del ojo del usuario y traducirlos en acciones interactivas igual que las que tiene un ratón informático convencional. En general todos ellos permiten un buen control del puntero con una buena interacción y usabilidad sin perder las principales funcionalidades que ofrecen los sistemas operativos más comunes. Sin embargo, estos sistemas tienen un coste muy elevado (entre 4,000 y 15,000€) que no está al alcance de muchas personas. Además, al tratarse de dispositivos que se acoplan al ordenador y que requieren una instalación

compleja, impiden que el usuario pueda utilizar un mismo dispositivo en más de un ordenador o en ordenadores portátiles. Otro aspecto que dificulta su fiabilidad y su desarrollo más económico es que requieren el uso de un software concreto para traducir los movimientos del ojo en acciones del ratón. Esto obliga a tener que dar soporte para cada uno de los diferentes sistemas operativos dificultando su compatibilidad y funcionalidad.

Para poder diseñar un dispositivo pequeño, portátil y de bajo coste, en este trabajo se ha propuesto utilizar como elemento base de visión para la detección de la pupila el sensor de flujo óptico que llevan los ratones ópticos informáticos. Este sensor de tamaño reducido se ha fijado a un soporte diseñado para ser sostenido en la cabeza del usuario y así conseguir fácilmente las capturas de su ojo. Todo esto, mediante el uso de componentes electrónicos, incluyendo el sensor, de bajo coste y con un diseño de sujeción simplificado va a permitir diseñar un dispositivo muy económico y asequible para la mayoría de los usuarios.

En un principio se propuso utilizar el algoritmo interno de desplazamiento que tiene este sensor de flujo óptico para detectar los movimientos del ojo del usuario. Sin embargo, debido a su pésimo funcionamiento, ya que la superficie del ojo no es plana y la imagen capturada no se desplaza uniforme en su totalidad, se decidió utilizar el sensor de flujo óptico como sistema de adquisición de imágenes para detectar directamente la posición de la pupila y conocer con más exactitud sus incrementos de desplazamiento.

A diferencia de los diferentes dispositivos apuntadores para personas con discapacidad basados en el desplazamiento del ojo, el dispositivo propuesto ofrece un conjunto de ventajas tales como:

- Diseño ligero y agronómico fácil de sujetar en la cabeza, gracias al tamaño compacto y reducido de sus componentes (incluyendo el sensor).
- No requiere instalación de software, el hardware es compatible con la clase de dispositivos de interfaz humana (HID) del USB.

- La fuente de luz integrada en el dispositivo ilumina el ojo a corta distancia y permite su uso en cualquier tipo de luz ambiental incluso en la oscuridad.
- Precio muy reducido en comparación a productos con finalidades similares disponibles actualmente en el mercado.

Asimismo, cabe destacar que todas estas ventajas o mejoras se consiguen gracias a la optimización máxima de su funcionamiento, que a su vez dificultan su desarrollo por tener recursos limitados tanto de capacidad de cálculo como de captura y tratamiento de las imágenes derivadas en desplazamiento. Por eso, un objetivo fundamental del diseño de este dispositivo es la consecución de sensación de fluidez y respuesta del puntero a través del movimiento del ojo para obtener un grado elevado de usabilidad.

## 6.2. Aportación al estado del arte

Gracias a la capacidad que tiene el sensor de flujo óptico para detectar el movimiento de la pupila y los parpadeos se ha podido diseñar un nuevo dispositivo apuntador de bajo coste alternativo a los que existen actualmente, con un precio muy reducido y orientado a personas con discapacidad motriz grave. Las aportaciones más importantes que se han alcanzado en este trabajo son las siguientes:

- El uso del sensor de un flujo óptico de bajo coste, principalmente usado para el ratón informático, como sensor base de un dispositivo apuntador para detectar el movimiento del ojo y el parpadeo.
- El estudio y análisis de los diferentes sensores ópticos del ratón informático para este tipo de aplicación.
- El análisis del funcionamiento del sensor óptico de flujo óptico con diversas lentes de características distintas.

- El estudio de la mejor ubicación del sensor óptico para la aplicación propuesta donde se detecte más variación de desplazamiento en el movimiento del ojo.
- La definición de un método alternativo para la detección de la posición de la pupila que no requiera muchas operaciones y memoria.
- La propuesta sencilla de emulación del ratón informático con solamente las acciones básicas capturadas por el sensor: posición de la pupila (5 zonas), si existe o no, y detección del parpadeo (tiempo en que desaparece).

Con el desarrollo de este nuevo dispositivo apuntador de bajo coste se pretende contribuir a la mejora de la calidad de vida de las personas que poseen una discapacidad motriz grave, sin poder mover cuello ni cabeza, facilitando el acceso a las tecnologías actuales a un coste muy reducido y al alcance de cualquier persona independientemente de su nivel económico.

### 6.3. Referencias

- [1] Instituto Nacional de Estadística de España (INE). <http://www.ine.es>.
- [2] T. Pallejà, E. Rubión, M. Teixidó, M. Tresanchez, A. Fernández del Viso, C. Rebate, J. Palacín, "Using the Optical Flow to Implement a Relative Virtual Mouse Controlled by Head Movements," *Journal of Universal Computer Science*, 14 (19) (2008) 3127-3141.
- [3] T. Pallejà, A. Guillamet, M. Tresanchez, M. Teixidó, 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," *Behaviour & Information Technology*. Submitted.
- [4] W. Nutt, C. Arlanch, S. Nigg, G. Staufert, "Tongue-mouse for quadriplegics," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 8 (2) (1998) 155-157.
- [5] G.-M. Eom, K.-S. Kim, C.-S. Kim, J. Lee, S.-C. Chung, B. Lee, H. Higa, N. Furuse, R. Futami, T. Watanabe, "Gyro-Mouse for the Disabled: Click and Position Control of the Mouse Cursor," *Int. Journal of Control Automation and Systems*, 5 (2) (2007) 147-154.
- [6] Y. Kim and J. Cho, "A novel development of head-set type computer mouse using gyro sensors for the handicapped," *Micro technologies in Medicine & Biology 2nd Annual International IEEE*, pp 356-360, May 2002.
- [7] D. Hyun, M. Jin, "Eye-mouse under large head movement for human-computer interface," *Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1 (2004) 237-242.
- [8] L. Chern-Sheng, H. Chien-Wa, C. Chao-Nin, C. Chi-Re, W. Yieng-Chiang, Y. Mau-Shiun, "An eye-tracking and head-control system using movement increment-coordinate method," *Optics & Laser Technology*, 39 (6) (2007) 1218-1225.

- [9] A. De Santis, D. Iacoviello, "Robust real time eye tracking for computer interface for disabled people," *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 96 (1) (2009) 1-11.
- [10] N. Ali, N.Y. Khan, A.S. Imran, "Controlling Mouse through Eyes," *Int. Conf. on Emerging Technologies*, vol. 1, pp.179-183, Nov. 2007.
- [11] X. Huo, J. Wang, M. Ghovanloo, "A Magneto-Inductive Sensor Based Wireless Tongue-Computer Interface," *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 16 (5) (2008) 497-504.
- [12] Grupo de Robótica de la Universitat de Lleida. <http://robotica.udl.cat>.
- [13] COGAIN: Communication by Gaze Interaction. Catalogue of currently available eye trackers. [http://www.cogain.org/wiki/Eye\\_Trackers](http://www.cogain.org/wiki/Eye_Trackers).
- [14] Alea Technologies. IG-30. <http://www.alea-technologies.de>.
- [15] LC Technologies, Inc. Eyegaze Edge. <http://www.eyegaze.com>.
- [16] EyeTech Digital Systems. Quick Glance. <http://www.eyetechds.com>.
- [17] Tobii Technology. Tobii PCEye. <http://www.tobii.com>.

Las páginas de la 120 a la 140 contienen el artículo:

M. Tresanchez, T. Pallejà, M. Teixidó, J. Palacín, “Low cost head-mounted pupil-gaze tracking device based on the optical mouse sensor,” *Submitted to Sensors and Actuators A*.

Artículo enviado a la revista “Sensors and Actuators A” en junio de 2011.

## Capítulo 7

### Discusión general de los resultados

---

La discusión general de los resultados se centra en el trabajo realizado en cada uno de los trabajos científicos presentados en esta memoria.

En el trabajo presentado en el capítulo 3, los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas con el codificador incremental de bajo coste propuesto indican que la aplicación de sensores de flujo óptico en codificadores relativos puede permitir su utilización en sistemas complejos cuyo requerimiento sea tener un bajo coste final. Se ha destacado que el problema de estos sensores es el error acumulado de desplazamiento. Para corregir este error, con el sensor de flujo óptico se ha detectado el paso de una marca de referencia impresa en la superficie rotatoria sin perder la lectura del desplazamiento.

Se ha observado experimentalmente que el sensor de flujo óptico es muy sensible a cambios de altura o a trayectorias arbitrarias, sin embargo en esta aplicación como codificador la altura de trabajo es constante y la trayectoria de desplazamiento siempre es la misma. En estas condiciones el coeficiente de determinación del desplazamiento medido con el sensor es de  $R^2=0.99991$ , obteniendo en velocidad constante un incremento del error muy bajo de 0.3% en 200 revoluciones. Este error acumulativo puede ser eliminado cada vez que el sensor de flujo óptico detecta la marca de referencia del codificador. El único problema que persiste es la determinación de la posición inicial al conectar el codificador, que no puede estimarse con precisión hasta haber iniciado un proceso de rotación y haber detectado la marca de referencia.

En el trabajo presentado en el capítulo 4, los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas con el codificador incremental de bajo coste propuesto indican que mediante la lectura de códigos binarios impresos en la superficie rotatoria se puede determinar con precisión la posición angular del codificador. Por este motivo, no existen problemas de estimación de la posición inicial al conectar el codificador y se eliminan los errores de desplazamiento acumulado. En este tipo de codificador la resolución angular depende del radio de posicionamiento del sensor (cuanto más grande más espacio existe para la codificación binaria), del tipo de codificación (se han propuesto tres codificaciones diferentes) y del tamaño de píxel que tiene un bit del código (como más pequeño más bits por código pero más difícil de decodificar visualmente con el sensor). Las codificaciones propuestas tanto la Completa (*Complete Code*) como la Radial Mejorada (*Radial Enhanced Code*) tienen un tamaño de bit de 0.20 x 0.20 mm y una tasa de error en la codificación de 2.2% y 1.3% respectivamente. En la codificación Radial (*Radial Code*) el tamaño de un bit es menor (0.26 x 0.26 mm) y no se han producido errores en la decodificación en un análisis de 10,000 imágenes. Este código es el seleccionado como el más adecuado para esta aplicación, teniendo en cuenta que el radio de posicionamiento máximo del sensor es de 130 mm (con una resolución de 0.026°). En una aplicación normal con un tamaño de codificador medio y considerando el sensor a un radio de 15 mm la resolución obtenida es de 0.231° o 1,553 cpr.

Uno de los puntos negativos del codificador rotativo absoluto es que si se requiere una lectura de la posición angular continua, su tasa de muestreo es de 38 Hz, contando el tiempo que se tarda en transferir la imagen y decodificarla. Por este motivo se ha propuesto una alternativa que consiste en combinar la capacidad de detección de desplazamiento del sensor de flujo óptico con la decodificación de los códigos binarios en el inicio y fin de un recorrido concreto para corregir el error acumulado. En este modo de funcionamiento la tasa de muestreo del codificador se incrementa hasta 6.6 kHz.

En el trabajo presentado en el capítulo 5, los resultados experimentales obtenidos en las pruebas realizadas con el sensor de flujo óptico de bajo coste para conseguir detectar monedas falsas o defectuosas de 2 euros se propone la

utilización de estos sensores como sistema de adquisición de imágenes de bajo coste combinado con un post-procesado basado en técnicas de comparación de patrones. Mediante el sistema propuesto se han detectado el 76% de las monedas falsas clasificadas como clases comunes (falsificaciones muy bien hechas), el 100% tanto de las clases locales (copias burdas) como de las monedas parecidas de otros países pero no válidas en la unión europea y se ha obtenido un error del 3% de monedas válidas que se han confundido con falsificaciones. Estos resultados de validación se han comparado con la capacidad que tiene una persona para detectar la falsificación con una inspección visual. El error que se produce con el sistema implementado es mucho menor comparado con una persona sin experiencia en falsificaciones, y muy parecido a la capacidad de detección que tiene una persona con experiencia y entrenada para tal fin.

A parte de esta técnica, se ha considerado otra forma de detección o identificación de monedas de 2 euros mediante la información de la rugosidad de la superficie que el sensor de flujo óptico calcula y devuelve automáticamente. En este caso, se ha visto que esta información puede interpretarse como una huella representativa o código para identificar una moneda en concreto, sin embargo no sirve como patrón general de las monedas válidas y por tanto esta técnica no puede ser aplicada para detectar monedas falsas.

En el trabajo presentado en el capítulo 6, se ha propuesto utilizar las capacidades de adquisición de imágenes que ofrece el sensor de flujo óptico para diseñar un dispositivo apuntador controlado con el ojo del usuario. Los resultados experimentales indican que el mejor ángulo relativo de posicionamiento del sensor (respecto al eje del ojo) para detectar mayor desplazamiento de la pupila está comprendido entre  $-20^\circ$  y  $-40^\circ$  de elevación y  $-20^\circ$  y  $-40^\circ$  de azimut. Se ha propuesto un algoritmo de detección de la pupila que ha sido comparado con el algoritmo integro-diferencial, que ha sido utilizado como referencia. Se ha observado que una lectura de fila por fila de la imagen permite realizar menos operaciones y necesita un 10% de la memoria requerida por el algoritmo integro-diferencial, gracias a todo ello es posible implementar el post-procesado de la imagen en un microcontrolador de bajo coste.

En las pruebas experimentales realizadas con el dispositivo apuntador propuesto se ha detectado la pupila de forma correcta en el 91% de los movimientos realizados. En el peor de los casos, la pupila ha sido detectada correctamente el 85% de movimientos del ojo hacia abajo debido a la oclusión de las pestañas en las imágenes de la pupila. En el caso de los movimientos hacia la izquierda también ha habido algún problema obteniendo el 89% de movimientos correctos, en este caso la causa probable es una insuficiente iluminación en la parte izquierda del ojo al tener el dispositivo mal colocado. Por otra parte el tiempo medio requerido en el ajuste y posicionamiento manual del dispositivo es de 33 segundos, un tiempo que depende en gran medida de la experiencia de la persona que realiza el posicionamiento.

## Capítulo 8

### Conclusiones finales

---

En este trabajo se han propuesto cuatro aplicaciones del sensor de flujo óptico de bajo coste para implementar distintos sistemas de medida económicamente asequibles. Concretamente, las aplicaciones del sensor propuestas son: para realizar un codificador rotativo incremental y absoluto de bajo coste, para detectar falsificaciones de monedas de 2 euros, y como elemento base en un dispositivo apuntador controlado con la estimación de la orientación del ojo del usuario. A continuación, se indican las conclusiones obtenidas en cada una de las aplicaciones.

#### 8.1. Codificador rotativo incremental

En esta aplicación el sensor de flujo óptico de bajo coste ha sido utilizado para desarrollar un codificador rotativo incremental. Los principales problemas de este tipo de sensores son la sensibilidad en las variaciones de altura de trabajo y la acumulación de errores de desplazamientos. En este caso los errores por variaciones de altura son minimizados debido a que el sensor óptico está fijado a una distancia constante respecto la superficie (disco rotatorio) que se desplaza de forma circular.

La información obtenida por los registros internos adicionales como SHUTER, SQUAL y PIXELSUM permite detectar marcas de posicionamiento impresas en la superficie de rotación y se pueden utilizar para corregir el error acumulativo de desplazamiento. Se ha llegado a detectar una marca formada por

una línea radial de 0.2 mm con velocidades angulares de hasta 100 rpm mediante la lectura y el análisis de los valores obtenidos por el registro PIXELSUM sin que esto afecte al algoritmo interno de medición de desplazamiento.

La sensibilidad de la ubicación del sensor de flujo óptico dentro del encoder rotatorio ha sido analizada. Los mejores resultados se han obtenido con el sensor posicionado entre 10 y 12 mm respecto al centro del disco rotatorio y con el eje de medición tangente a la rotación. Con estas condiciones, el coeficiente de determinación en el desplazamiento medido con el sensor es de  $R^2=0.099991$ . El error producido por la orientación se incrementa considerablemente fuera del rango entre  $-2.5^\circ$  y  $1^\circ$ . Con respecto al error en la altura, a partir de 0.3 mm de offset se produce un incremento substancial. Todos estos errores acumulativos pueden resetearse cuando se detecta el paso de la marca de referencia impresa en la superficie rotatoria.

El codificador rotativo propuesto en este trabajo se ha desarrollado utilizando una superficie circular cubierta de un papel adhesivo de color blanco y un sensor de flujo óptico (ADNS-3088 configurado a 800 cpi) posicionado a un radio de 10 mm, con un eje tangente a la dirección de rotación, y con una altura de trabajo fija de 2.4 mm que permite por un lado la medición el desplazamiento angular con una resolución cercana a 1900 cpr, y por el otro la implementación de un procedimiento para corregir el error acumulativo originado (0.3% en 200 revoluciones). El codificador relativo puede ser utilizado en aplicaciones en las que el coste sea un elemento determinante y que se requiera medir giros o rotaciones de un eje.

## 8.2. Codificador rotativo absoluto

En esta propuesta de aplicación se aprovecha la característica de que el sensor de flujo óptico está optimizado para capturar imágenes a una distancia muy pequeña del sensor (valor típico 2.4 mm) y se propone la implementación de un codificador rotativo absoluto. El sensor óptico se ha utilizado para adquirir imágenes de la superficie rotatoria donde se han impreso códigos binarios que indican la posición angular absoluta.

Se han propuesto tres codificaciones binarias diferentes para poder obtener la posición angular: la Completa (*Complete Code*), la Radial (*Radial Code*), y la Radial Mejorada (*Radial Enhanced Code*). La resolución del codificador depende solamente del radio de ubicación del sensor óptico respecto el centro de la superficie circular de rotación. La codificación Completa permite poder tener radios de posicionamiento del sensor de hasta 16.4 mm con una resolución de hasta 0.210°; la codificación Radial puede llegar a una resolución de 0.0026° con un radio máximo de 130.0 mm; y 0.0000085° con la codificación Radial Mejorada si se sitúa el sensor al máximo radio teórico posible de 470.0 m. En la construcción de los códigos se ha propuesto un tamaño de bit de 0.20 x 0.20 mm provocando una tasa de error en la decodificación del 3%, sin embargo, para los casos que se han utilizado un tamaño de bit más grande (0.26 x 0.26 mm) no hay error.

Se ha visto que la codificación Radial es la mejor opción para diseños con el sensor a un radio menor que 130.0 mm, mientras la codificación Radial Mejorada es la única opción para diseños con radios más grandes. En este caso se pueden alcanzar mejores resoluciones pero con la desventaja de tener una tasa de error más elevada y un codificador con un tamaño considerable.

El codificador rotativo absoluto se ha implementado utilizando dos alternativas diferentes: modo combinado y modo visual. El modo combinado utiliza el algoritmo interno de flujo óptico para detectar desplazamiento mezclado con la lectura de la imagen inicial y de la imagen final de un movimiento para poder corregir el error acumulado. El modo visual se basa en una lectura de imágenes y decodificación de códigos continua. Con este método se ha obtenido una tasa de muestreo de 38 Hz, mientras que con el método combinado se ha llegado a 6.6 kHz.

Los resultados de validación obtenidos para ambos métodos reflejan que el sensor de flujo óptico de bajo coste puede utilizarse para implementar un codificador rotativo absoluto de bajo coste.

### 8.3. Detector de monedas de 2 euros falsas

El sensor de flujo óptico ofrece muchas ventajas en cuanto a su aplicación para detectar monedas falsas de 2 euros, entre ellas se pueden destacar: el bajo coste de estos sensores como sistema de adquisición de imágenes; la integración del sistema de iluminación con las demás partes del sensor; el tamaño compacto que puede llegar a ser el detector de monedas falsas. Sin embargo, un aspecto negativo es que requiere rotar la moneda entera para poder incrementar el área capturada de la moneda aunque este proceso puede estar acelerado utilizando múltiples sensores.

Se han propuesto y estudiado dos métodos diferentes de detección de monedas de 2 euros falsas. El primer procedimiento está basado en la información obtenida mediante la lectura del registro interno SQUAL que contiene información de la cantidad de rugosidad de la moneda. Esta opción puede ser útil para obtener una única huella o código para identificar una moneda en concreto pero no para detectar cualquier moneda falsa en general. El segundo procedimiento se basa en la adquisición de imágenes del sensor de flujo óptico para implementar un detector de monedas falsas utilizando la técnica de comparación de patrones. La plantilla que se compara es obtenida previamente de las imágenes extraídas de la cara común de una moneda válida.

Los resultados de validación obtenidos con este segundo procedimiento muestran que un 3% de las monedas válidas han sido rechazadas debido a su desgaste o erosión del relieve por su tiempo de uso. En el caso de las monedas falsas clasificadas como clases locales o monedas de otros países se han detectado el 100% debido a que visualmente tienen muchas diferencias. Las monedas clasificadas como clases comunes han sido muy difíciles de detectar, 76% de las monedas analizadas, ya que son falsificaciones con un proceso de acuñación muy parecido al real.

Los resultados obtenidos en la detección han sido comparados con la inspección visual realizada por una persona. Se ha visto que los resultados obtenidos en el sistema implementado son muy parecidos a la capacidad que

puede tener una persona con experiencia y entrenada para tal fin, superando la capacidad de detección de una persona sin experiencia.

Por tanto, este tipo de sensores pueden ayudar a complementar los sistemas actuales de detección automática de monedas falsas sin que ello implique un gran cambio en los diseños actuales de los discriminadores de monedas y además, sin representar un coste adicional excesivo en el sistema compacto final.

## **8.4. Dispositivo apuntador controlado con el ojo**

En esta aplicación se ha propuesto el uso de un sensor de flujo óptico como sistema de adquisición de imágenes para desarrollar un dispositivo apuntador de bajo coste controlado con la orientación del ojo.

El dispositivo ha sido completamente implementado tanto en el diseño compacto y manejable de la estructura para ser sujetado en la cabeza como en el estudio y análisis de la selección del sensor óptico, la selección de la lente, la fuente de iluminación idónea y la ubicación adecuada del dispositivo en frente del usuario. El sensor que se ha escogido para esta aplicación es el ADNS-3060 de Avago Technologies, habitualmente utilizado como sensor de desplazamiento del ratón informático, permite la lectura externa de las imágenes capturadas y utiliza un buffer secundario para evitar un posible desenfoque o pérdida de información. Este sensor se ha complementado con la lente de plástico esférica CAY46 ya que da un buen enfoque en el rango de distancias de trabajo deseado, y con un LED infrarrojo cercano (de 850nm) para iluminar el ojo del usuario de forma controlada sin que sea molesto y ayude a detectar la pupila.

El algoritmo propuesto para detectar la pupila está basado en la detección de cambios bruscos de niveles de intensidad de los píxeles donde se encuentra la pupila ya que es la parte más oscura de la imagen. Este algoritmo se ha desarrollado pensando en esta aplicación concreta y se ha optimizado para poderse ejecutar de forma rápida, con pocas operaciones y utilizando muy poca memoria, ya que esto ha permitido que se pueda implementar en un microcontrolador de bajo coste.

La emulación de los movimientos principales del puntero informático se han realizado mediante definición de cinco zonas básicas de posicionamiento de la pupila: arriba, abajo, izquierda, derecha, y el centro. Los movimientos del puntero son relativos dependiendo del área donde se encuentre la pupila mientras que el evento de clic se realiza en la zona central realizando un parpadeo forzado. Esta propuesta de emulación relativa permite aprovechar al máximo la poca resolución que tiene el sensor y mejora la robustez contra los posibles pequeños movimientos involuntarios de la cabeza.

El dispositivo apuntador se ha probado con ocho usuarios diferentes que no tienen impedimentos físicos en la movilidad. El peor resultado en la detección de la pupila se produce cuando el usuario mira hacia abajo debido a la oclusión de la pupila por las pestañas. También se han dado algunos problemas de detección de la pupila cuando el usuario mira hacia la izquierda o al realizar un evento de clic con un parpadeo forzado. En estos casos se ha visto un enfoque incorrecto de la iluminación debido a un mal ajuste y posicionamiento inicial del sensor. Los movimientos hacia la izquierda y hacia la derecha han sido todos exitosos en cada uno de los diferentes usuarios.

El inconveniente más comentado por los diferentes usuarios y también reflejado en los resultados es la dificultad en posicionar y ajustar el sensor correctamente en el proceso inicial. Como se ve en los resultados, el tiempo medio requerido para el posicionamiento inicial es bastante considerable, lo que indica que no es una tarea instantánea y por tanto se necesita un poco de paciencia. Además, se ha podido ver que un ajuste de posicionamiento incorrecto del dispositivo provoca problemas sobretodo en detecciones de la pupila hacia la izquierda y en los parpadeos forzados. Este ajuste de posicionamiento manual del dispositivo podría ser mejorado mostrando en la pantalla del ordenador la imagen capturada del ojo en tiempo real. No obstante, para facilitar la instalación, portabilidad y su compatibilidad en diferentes sistemas operativos, la comunicación entre el dispositivo apuntador y el ordenador se realiza mediante la especificación de dispositivos de interfaz humana (HID) del USB y por tanto esta opción no puede ser contemplada.

Los resultados obtenidos confirman que el dispositivo apuntador diseñado cumple con el propósito inicial de tener acceso a las funciones simples de un apuntador para poder controlar un ordenador solamente con movimientos del ojo del usuario a un coste insignificante respecto al resto de sistemas que existen actualmente. Aunque el sensor de flujo esté limitado por su pequeña resolución se ha visto que es totalmente válido para ser usado en esta aplicación cuyo bajo coste puede permitir que pueda ser utilizado de una manera mucho más extensa que los sistemas alternativos disponibles actualmente.



## Lista de símbolos y abreviaciones

<b>CAD</b>	Computer-aided Design
<b>CFB</b>	Circulating Fluidized Bed
<b>CLK</b>	Serial Clock
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
<b>cpi</b>	Counts per inch
<b>cpr</b>	Counts per revolution
<b>CS</b>	Cable Select
<b>DC</b>	Direct Current
<b>DOF</b>	Degree of Freedom
<b>DSP</b>	Digital Signal Processor
<b>ETSC</b>	European Technical and Scientific Centre
<b>fps</b>	Frames per second
<b>HID</b>	Human Interface Device
<b>I<sup>2</sup>C</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>ips</b>	Inch per second
<b>IR</b>	Infrared
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>LLS</b>	Linear Least Squares
<b>MDOF</b>	Multi Degree of Freedom
<b>MEMS</b>	Micro Electromechanical System
<b>MIS</b>	Minimally Invasive Surgical Instruments
<b>MISO</b>	Master In Slave Out
<b>MOSI</b>	Master Out Slave In
<b>NIR</b>	Near-Infrared
<b>NLS</b>	Nonlinear Least Squares
<b>OLAF</b>	Oficina Europea de la Lucha Antifraude
<b>ppi</b>	Points per inch
<b>PWM</b>	Pulse Width Modulation
<b>rpm</b>	Revolutions per minute

<b>RS232</b>	Recommended Standard 232
<b>SICONS</b>	Single Chip Optical Navigation Sensor
<b>SPI</b>	Serial peripheral interface
<b>TFT</b>	Thin-film Transistor
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>USB</b>	Universal Serial Bus