



UNIVERSITAT D'ALACANT

Facultat de Ciències
Facultad de Ciencias

FACULTAD DE CIENCIAS
GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA
TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO ACADÉMICO [2018-2019]

TÍTULO:

**USO DE PANTALLAS DIGITALES COMO DIANAS
DE LOCALIZACIÓN Y POSICIONAMIENTO**

AUTOR:

IRINA OSUNA ROMERA

TUTOR:

DAVID MAS CANDELA

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar la posibilidad de usar objetos móviles en pantallas digitales como objetivos de precisión para estudiar el movimiento de dianas con precisión por debajo del píxel. Con ello, se pretende sustituir un elemento mecánico móvil, con las dificultades de manejo que puedan tener por un elemento fijo con una animación que permite controlar los parámetros de forma de la diana y de movimiento de manera rápida, precisa y en tiempo real. Se detectarán movimientos subpíxeles a través de un centroide porque ofrece resultados favorables en imágenes binarias, que las utilizaremos en este trabajo. Antes de realizar las pruebas experimentales es necesario calibrar los métodos y el instrumental. Emplearemos un test USAF para la calibración de la cámara. Utilizaremos también dianas impresas (un papel con un círculo negro) acopladas a un desplazador lineal y compararemos con el movimiento obtenido en pantalla. Mediante el análisis de las secuencias de vídeo capturadas durante el movimiento, obteniéndose la trayectoria de la diana con una precisión de centésimas de píxel.

El resultado del trabajo demuestra que, pese a la diferente resolución de la diana y precisión del movimiento, los resultados para las distancias manejadas son completamente equivalentes, presentando los dos métodos un error del mismo orden, con lo cual es factible la sustitución de una diana impresa por otra digital.

Las ventajas de esta sustitución son varias: en primer lugar, se evitan partes móviles con la dificultad de manejo asociada. Asimismo, dado que las pantallas son luminosas, se evita el problema de una iluminación desigual. Finalmente, es mientras que con el desplazador lineal sólo es posible el movimiento en una dimensión, en la pantalla es posible generar movimientos en todo el plano de esta lo que aumenta las posibilidades de uso del método.

PALABRAS CLAVE: Seguimiento de objetos, Resolución Subpíxel, Procesado de Imagen, Dianas Digitales.

ABSTRACT

The aim of this work is to study the possibility of using moving objects on digital screens as precision targets to study the movement of targets accurately below the pixel. This is intended to replace a mobile mechanical element, with the difficulties of handling that it may have by a fixed element with an animation that allows to control the parameters of target shape and movement quickly, accurately and in real time. Subpixel movements will be detected through a centroid because it offers favorable results in binary images, which we will use in this work. Methods and instruments need to be calibrated before to do experimental testing. We will use a USAF test to calibrate the camera. We will also use printed targets (a paper with a black circle) coupled to a linear shifter and we compare with the movement obtained on screen. By the analysis of the video sequences captured during the movement, obtaining the trajectory of the target with a precision of hundredths of a pixel.

The result of the work shows that, in spite of the different resolution of the target and precision of the movement, the results for the distances managed are completely equivalent, presenting both methods an error of the same order, with which it is feasible to replace a printed target by another digital one.

The advantages of this substitution are several: firstly, moving parts are avoided with the associated handling difficulty. Also, the screens are luminous, the problem of uneven lighting is avoided. Finally, while with the linear shifter only a dimensional movement is possible, with the screen it is possible to generate movements in all plane of the screen, which increases the possibilities of using the method.

KEYWORDS: Object Tracking, Subpixel Resolution, Image Processing, Digital Targets

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	5
2. OBJETIVO	7
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA	8
4. PROCEDIMIENTO	17
4.1. CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA	17
4.2. CALIBRRACIÓN DEL TAMAÑO DEL PÍXEL DEL IPAD	19
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIÓN	31
7. CONCLUSIONES	33
8. REFERENCIAS	35

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de objetos en movimiento mediante el análisis de imagen es de gran importancia en muchas áreas de la ciencia, como la física, la ingeniería e incluso la óptica y está presente en muchas actividades como vigilancia, seguridad, ingeniería civil, medicina, entre otras^[1,2]. El seguimiento de movimientos de gran amplitud no suele suponer graves dificultades porque son fáciles de detectar y existen múltiples técnicas para ello^[3]. El seguimiento de movimientos de pequeña amplitud, por el contrario, tiene más dificultad ya que muchas veces produce cambios tan sutiles en la imagen que son indetectables a simple vista.

Los pequeños movimientos que producen desplazamientos en el sensor de la cámara inferiores a un píxel se llaman movimientos subpíxel^[4] y su detección es un caso particular de superresolución^[5].

Las técnicas más comunes para detectar movimientos con precisión subpíxel son el centroide^[6] de una imagen y la correlación interpolada^[7]. En este trabajo usaremos el cálculo del centroide, ya que resulta sencillo de calcular y proporciona buenos resultados en imágenes binarias, que son las que utilizaremos aquí.

Como hemos dicho antes, los movimientos subpíxel son difíciles de percibir a simple vista y muchas veces están por debajo del umbral de detección de otros sistemas. Asimismo, en muchas ocasiones, resulta complicado distinguirlo de ruido o cambios en la imagen que no son debidos a movimientos, con lo que, antes de llevar a cabo las pruebas experimentales es necesario calibrar los métodos y el instrumental.

Tradicionalmente para realizar pruebas de calibración se utilizan dianas móviles acopladas a un sistema mecánico. En nuestro caso, como diana utilizaremos un papel con un círculo negro que lo acoplaremos a un desplazador lineal. Estos sistemas tienen la dificultad de que hay que programarlos introduciendo una aceleración, velocidad máxima del movimiento y un desplazamiento. Además, si usamos un desplazador lineal de alta precisión tendremos el inconveniente del precio, ya que estos son muy caros, aparte de que solo se puede mover en una dirección.

Aparte del carril de desplazamiento, el uso de dianas impresas también presenta dificultad. Aunque la calidad de impresión de las impresoras actuales es más que suficiente para los requerimientos de este trabajo (600 ppp a 1200 ppp) debe asegurarse también la homogeneidad tanto de la diana como del fondo y debe garantizarse una buena iluminación de ésta para asegurar que no haya sombras que provoquen falsos resultados de movimiento.

Actualmente, la introducción de la tecnología a nuestro mundo ha hecho que podamos usar pantallas digitales que permiten un manejo más inmediato y cómodo de objetos en movimiento, ya que basta con generar un vídeo y mostrarlo en pantalla. En el momento actual, las pantallas siguen lejos de resoluciones como las de la impresora (entre 100 ppp y 250 ppp en el caso de pantallas 4k) y presentan ciertos problemas de no uniformidad para posiciones de visión oblicuas. No obstante, la tecnología mejora a gran velocidad y el uso de animaciones en pantalla como dianas en movimiento tiene grandes ventajas, como son, una implementación y manejo más simple, la posibilidad de imponer movimientos en dos dimensiones además de rotaciones en el plano de la pantalla. Adicionalmente, dado que las pantallas son auto luminosas, evitamos el problema de las sombras.

En cuanto a las herramientas de análisis usaremos el ImageJ. Este programa es un procesador de imágenes digitales gratuito. Este software permite analizar, editar, mostrar, procesar, guardar e imprimir imágenes de 8, 16 y 32 bits y puede leer varios formatos de imagen (TIFF, PNG...). ImageJ puede calcular el área y la intensidad de objetos umbralizados (*thresholded objects*), puede medir distancias y ángulos^[17], entre muchas otras características. En nuestro trabajo hemos empleado este programa con los fotogramas, para medir píxeles, binarizar y medir distancias.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar la viabilidad del uso de objetos móviles en pantallas digitales como objetivos de precisión para estudiar el movimiento de dianas con precisión por debajo del píxel. Con ello, se pretende sustituir un elemento móvil, con las dificultades de manejo que puedan tener por un elemento fijo con una animación que permite controlar los parámetros de forma de la diana y de movimiento de manera rápida, precisa y en tiempo real.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Durante el trabajo hemos empleado los siguientes materiales (Figura 1):

- Test USAF-1951
- Objetivos telecéntricos y normales
- Cámara
- Pantalla digital (iPad 2)
- Diana circular binaria sobre papel
- Desplazador lineal micrométrico motorizado

De estos elementos, el test USAF y el objetivo telecéntrico se usarán solamente en la fase de calibración del sistema.

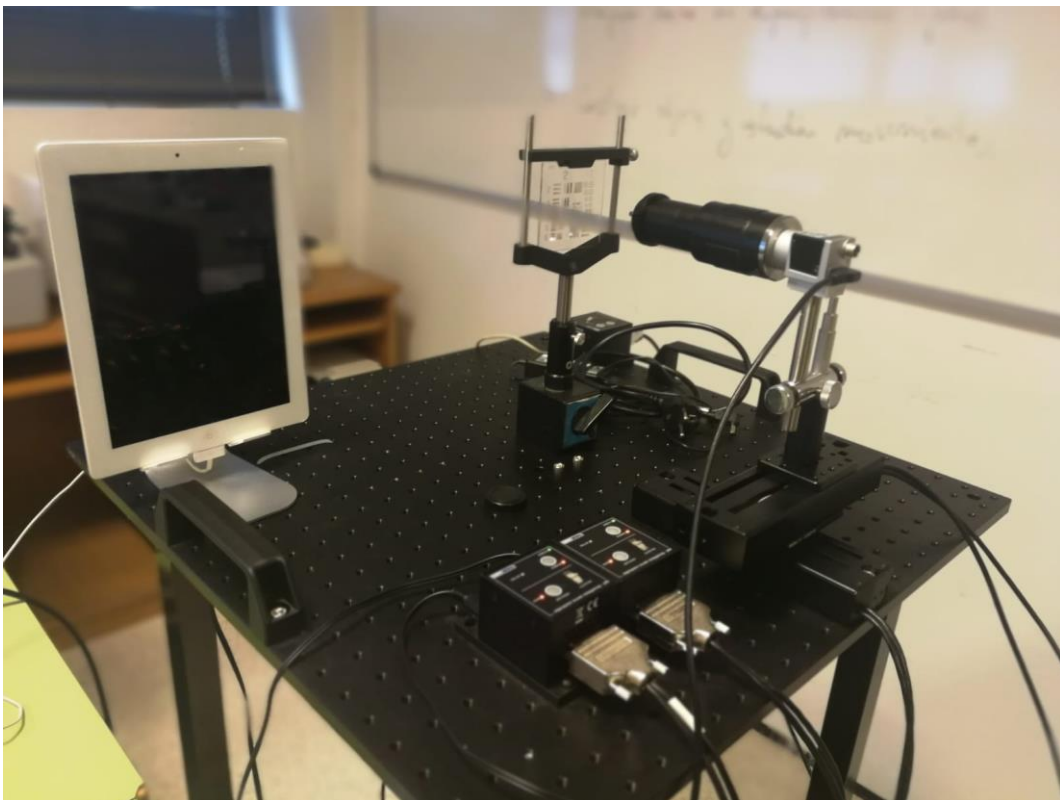


Figura 1. Montaje para la calibración del sistema (iPad, Test USAF, Objetivo telecéntrico, Desplazador lineal).

En primer lugar, hicimos una calibración de la cámara y de la pantalla digital usando un test USAF 1951. El test USAF-1951 que debe su nombre a sus diseñadores y año de diseño: “Fuerzas Aéreas de Estados Unidos, 1951” es una

placa de vidrio transparente con unas líneas de líneas a modo de test^[8]. Dichos tests consisten en una pareja de tres barras verticales y tres horizontales de un grosor y separación determinados. Cada una de estas parejas viene identificada por un número superior (grupo) y uno lateral (elemento), tal y como se muestra en la Figura 2.

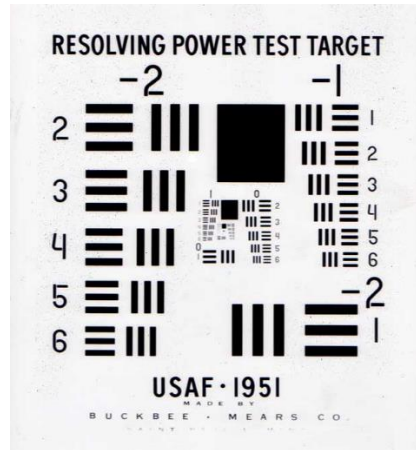


Figura 2. Test USAF.

El test USAF está calibrado de modo que cada grupo tiene un ancho de barras de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{ancho barras} = \frac{32000}{2^{(6+G)}} \frac{1}{2^{\frac{1}{6}(E-1)}} (\mu\text{m}) \quad (1)$$

donde G es el Grupo y E el Elemento.

Junto con estos tests viene una tabla de resoluciones según el grupo y elemento (ver Figura 3):

RESOLUTION VALUES FOR STANDARD USAF 1951 RESOLUTION TEST PATTERN (All Values in Cycles Per Millimeter)										
ELEMENTS	GROUPS									
	-2	-1	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7
1	.250	.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.0	32.0	64.0	128
2	.281	.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.9	35.9	71.8	143
3	.315	.629	1.26	2.52	5.04	10.1	20.1	40.3	80.6	161
4	.354	.707	1.41	2.83	5.66	11.3	22.6	45.3	90.5	181
5	.397	.794	1.59	3.17	6.35	12.7	25.4	50.8	101	203
6	.445	.891	1.78	3.56	7.13	14.3	28.5	57.0	114	228

Figura 3. Valores de resolución test USAF^[9].

A continuación, usaremos el test USAF para poder calibrar la resolución espacial del iPad y observar cómo se produce el encendido y apagado secuencial de los píxeles en una imagen en movimiento. Dado que las imágenes son para calibrado, es muy importante no introducir distorsión en las mismas, con lo que usaremos objetivos telecéntricos. Estos objetivos^[10] se usan para mediciones de alta precisión porque reducen en gran medida los problemas que tienen los objetivos convencionales como la exactitud y repetividad de la medida (distorsión de la imagen, errores de perspectiva, baja resolución de la imagen, duda en la posición exacta de los bordes del objeto por la geometría de iluminación...).

La principal ventaja de los objetivos telecéntricos^[11,13], aunque en este trabajo no la hemos empleado, es que su aumento no cambia con respecto a la profundidad (Figura 4), los objetivos telecéntricos eliminan el error de paralaje que hace que los objetivos lejanos se vean más pequeños que los objetos cercanos al objetivo, esto hace que mejore la calidad de imagen en comparación con los objetivos convencionales.

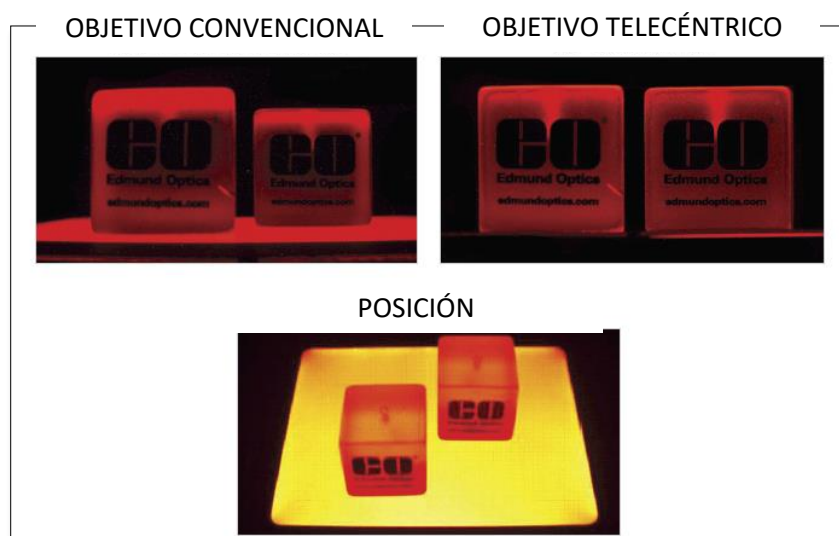


Figura 4. Diferencia entre la visión con un objetivo telecéntrico y un objetivo convencional^[11].

Una ventaja de los objetivos telecéntricos que se utilizará aquí es que tienen niveles más bajos de distorsión^[12] (Figura 5) que los objetivos convencionales (con distancia focal fija). La distorsión hace que parezca que el objeto está en

otra posición y esto hace que las medidas tengan menos exactitud. Los objetivos telecéntricos de alta calidad pueden tener un 0.1% de grado de distorsión.

Debido a la ausencia de distorsión, los objetivos telecéntricos tienen simetría de borrosidad a cualquier lado del enfoque^[10]. Con los objetivos convencionales, cuando movemos un objeto fuera del enfoque la imagen se vuelve borrosa de manera asimétrica por el paralaje y cambio de aumento asociado con su campo de visión angular. Desafortunadamente, para aprovechar esta ventaja, el objetivo telecéntrico debe usarse en posición afocal, cosa que no haremos en este trabajo.

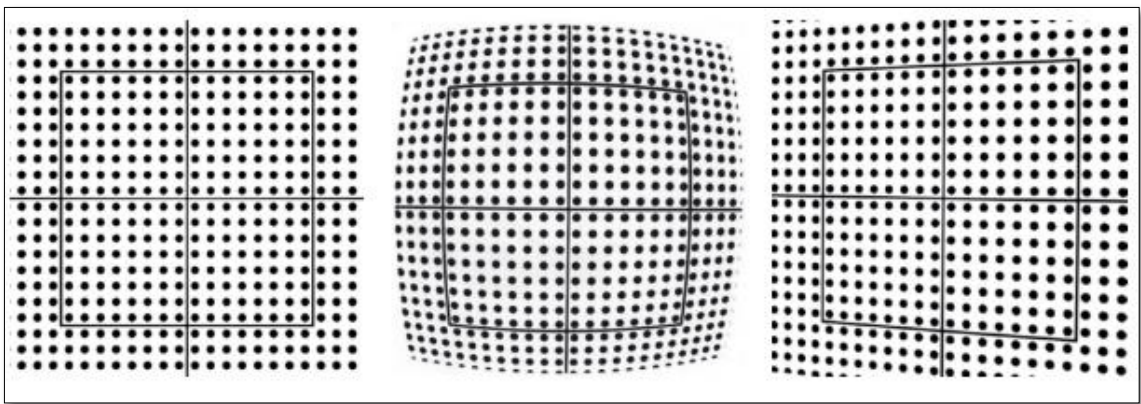


Figura 5. La figura de la izquierda muestra un patrón de distorsión tomado con un objetivo telecéntrico. La imagen del centro es el mismo patrón, pero con una distorsión radial. Y la imagen de la derecha, es un ejemplo de distorsión trapezoidal^[9].

En nuestro trabajo utilizaremos dos objetivos. Para la calibración inicial que se realizará sobre objetos cercanos utilizaremos el objetivo telecéntrico (Figura 6) con más aumentos^[14] puesto que vamos a observar los píxeles de una pantalla. Para estudiar el movimiento de las dianas usaremos un objetivo estándar CCTV, con un menor aumento (Figura 7).

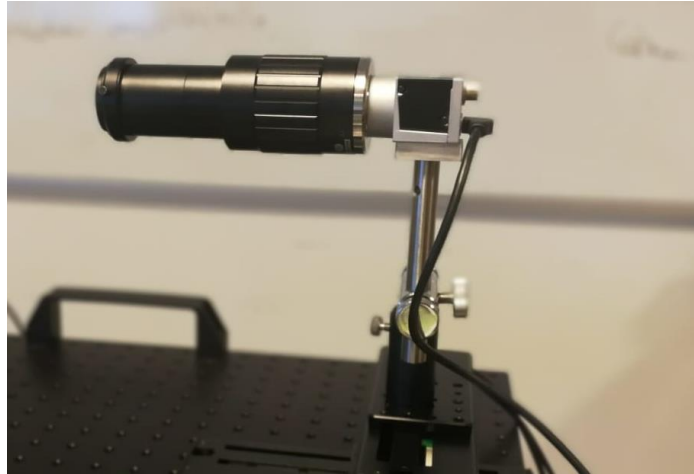


Figura 6. Objetivo telecéntrico.



Figura 7. Segundo objetivo.

Para poder realizar nuestras medidas, junto con el objetivo utilizaremos una cámara Basler ACE (Figura 8) de las siguientes características^[15] (tabla 1):

Tabla 1. Características cámara.

TAMAÑO DEL SENSOR	3.8 x 2.9 mm
RESOLUCIÓN	800 x 600 px
TAMAÑO DEL PÍXEL	4.8 x 4.8 μ m



Figura 8. Cámara. Modelo: Basler acA800-510ud.

La cámara se controla con el programa informático *Pylon Viewer* (Figura 9). Este software es un programa que funciona junto con las cámaras de Basler^[16] y lo utilizaremos para grabar fotogramas durante el trabajo. Tomará imágenes de tamaño 800x600px.

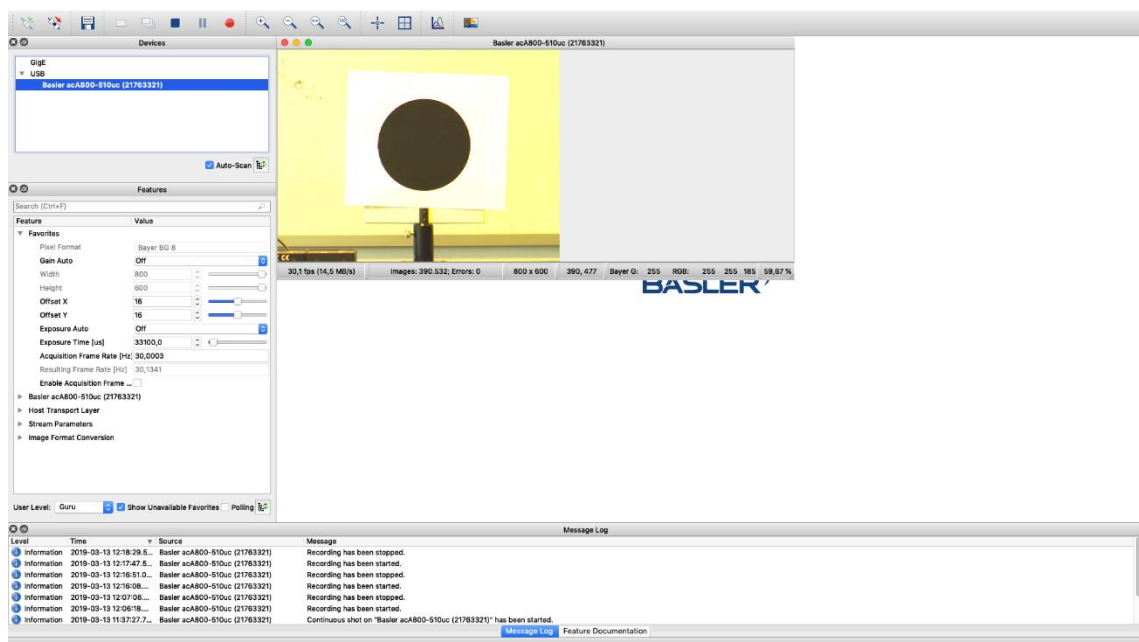


Figura 9. Pylon Viewer.

Otro de los programas que usaremos es *ImageJ*, que se trata de una herramienta que se utiliza para el procesamiento de imágenes, en nuestro caso lo utilizaremos con los fotogramas, para medir píxeles, binarizar y medir distancias^[17].

Como dianas de movimiento usaremos una imagen sobre la pantalla de un iPad2 y una diana impresa. En cuanto al iPad2, su pantalla presenta las características^[18] que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características del iPad.

TAMAÑO DE PANTALLA	9.7 PULGADAS = 24.638 cm
RESOLUCIÓN DE ASPECTO	4:3
RESOLUCIÓN	1024 x 768 px 132 ppp

En el iPad incluiremos unos vídeos donde aparece un círculo moviéndose en dirección vertical y horizontal (Figura 10). Observaremos el movimiento en cerca donde usaremos un objetivo telecéntrico con el fin de determinar el tamaño de cada píxel y cómo se produce el movimiento a nivel puntual. Para el experimento en sí, usaremos el objetivo normal en media y larga distancia, de modo que podremos apreciar toda la diana.

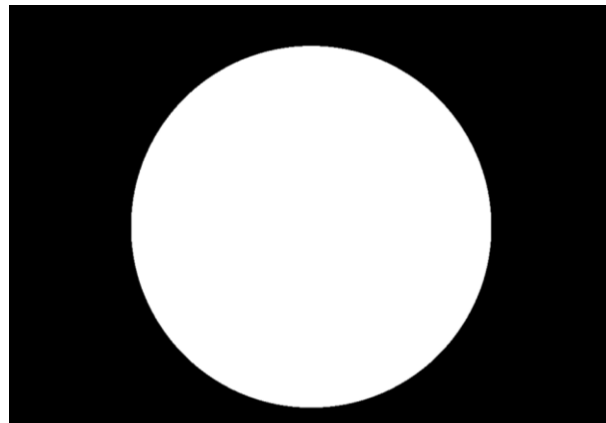


Figura 10. Círculo de los vídeos del iPad.

También utilizamos como diana un papel con un círculo junto con un desplazador lineal (Figura 11). Para conseguir el mismo movimiento, utilizaremos un programa informático: *Apt User*. Este software nos permite modificar la velocidad, aceleración, y desplazamiento y duración del movimiento para simular el movimiento del papel como en el iPad.

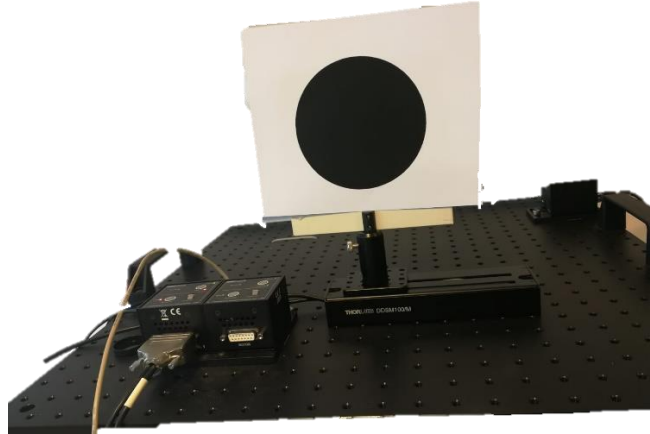


Figura 11. Círculo de papel y desplazador lineal.

Para mover el objetivo telecéntrico, para la calibración de la cámara, y para la diana impresa usaremos un desplazador lineal de Thorlabs, modelo DDSM100/M que permite 100 mm de recorrido con resolución de 500 nm y una velocidad máxima de 500 mm/s. El desplazador tiene una alta precisión de posicionamiento ideal para aplicaciones de caracterización y mapeo de superficies donde se necesita mover una cámara a una velocidad constante y al mismo tiempo capturar datos. Está compuesto por un motor y un controlador que nos permite manualmente realizar movimientos en el eje x e y (Figura 12) en la primera parte del trabajo (calibración de la cámara) y en el eje x para el movimiento de la diana de papel^[19]. Utilizamos esta configuración xy para la calibración de la cámara porque así conseguiremos mayor precisión y facilita el enfoque ya que la profundidad de campo del objetivo telecéntrico es muy poca. La profundidad de campo es el desplazamiento máximo aceptable de un objeto respecto a su posición de enfoque óptimo. La resolución de la imagen es peor cuando se supera dicha posición límite y esto produce un efecto de desenfoque porque la información geométrica que proporcionan los rayos ópticos se dispersa sobre muchos píxeles de la imagen^[10].



Figura 12. Desplazador lineal (configuración xy).

4. PROCEDIMIENTO

4.1. CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

Para calibrar los objetivos usaremos como referencia *una imagen del test USAF.

En primer lugar, comprobaremos que el procedimiento de calibrado es correcto, simplemente midiendo sobre la imagen el tamaño de un elemento del test y comparando con las especificaciones teóricas. La imagen capturada con la cámara se trasladará a ImageJ donde mediremos los ciclos de un grupo y elemento. Cada ciclo es una franja negra con un blanca, por tanto, solo la franja negra sería 0.5 ciclos. En nuestro caso elegimos el Grupo 0 y el Elemento 4 (Figura 2).

$$472.011\text{px} \rightarrow 2.5 \text{ ciclos}$$

$$472.011\text{px} \rightarrow 2.5 \text{ ciclos} \rightarrow 1.74 \text{ mm}$$

$$x \rightarrow 1 \text{ mm}$$

$$x = 1.437 \text{ ciclos/mm}$$

Dado que sabemos que el valor teórico es 1.41 ciclos/mm (Figura 3), podemos decir que es correcta la resolución para ese grupo y elemento.

De un modo similar podemos calibrar el aumento del objetivo. En este caso hemos elegido el Grupo -2 y el Elemento 3 donde la resolución teórica es 0.315 ciclos/mm. Calculamos el ancho de las barras (y):

$$y = \frac{32000}{\frac{2^{(-2-2)}}{2^{\frac{1}{2}(3-1)}}} = 1587.4\mu\text{m}$$

Tomaremos un fotograma de la franja vertical (Figura 13) con *Pylon Viewer* y con ImageJ mediremos el ancho de la franja.

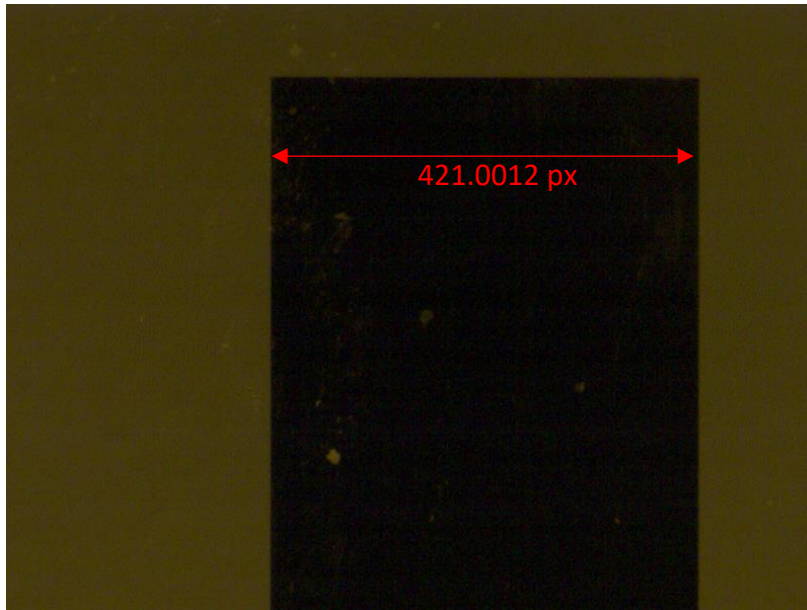


Figura 13. Fotograma de la franja vertical del Grupo -2 y Elemento 3.

Conocido el ancho de las franjas medido con *ImageJ* y el tamaño del píxel en micras que nos da el fabricante, podemos calcular y' :

$$y' = 421.0012 \cdot 4.8\mu\text{m} = 2020.806\mu\text{m}$$

Y ahora calculamos el aumento de objetivo (Ecuación 2):

$$\beta' = \frac{y'}{y} \tag{2}$$
$$\beta' = \frac{2020.806}{1587.4} = 1.273X$$

4.2. CALIBRACIÓN DEL TAMAÑO DEL PÍXEL DEL IPAD

Un píxel es “es la menor unidad homogénea en color que forma parte de una imagen digital”^[20]. Para poder visualizarlo debemos ampliar bastante una imagen digital. Las imágenes digitales están formadas por diferentes matrices cuadrangulares de rectángulos de diferentes colores. A cada agrupación de estos rectángulos se le llama píxel. Cada píxel está formado por tres colores, uno de los modelos más populares es el RGB, Red-Green-Blue (Rojo-Verde-Azul), tres colores básicos que facilitan la formación de diferentes colores ^[21] (Figura 14).

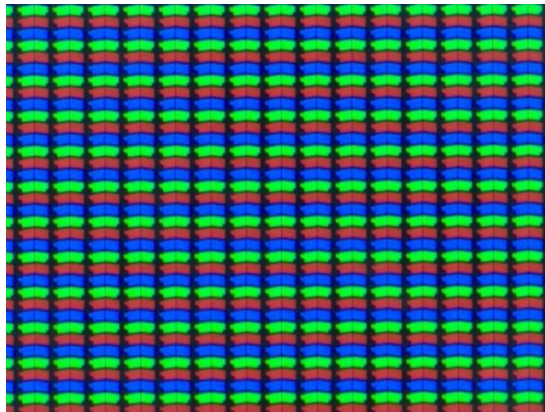


Figura 14. Conjunto de píxeles

Una vez tomada la imagen donde se aprecian los píxeles de la pantalla del iPad (Figura 15) habiendo ajustado previamente *Pylon Viewer* a un tiempo de exposición de 70477 μ s, podemos medir con *ImageJ* las dimensiones de un píxel en cámara, tanto en vertical como horizontal, aunque la medida debe ser la misma. Consideramos un píxel, como he dicho anteriormente la agrupación de 3 colores. Obtenemos que un píxel de la pantalla del iPad2 ocupa un cuadrado de 51 px en la imagen capturada.

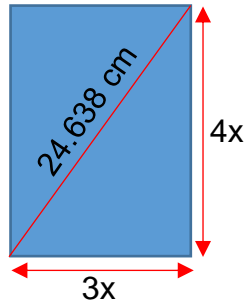


Figura 15. Esquema con las dimensiones de pantalla del iPad2.

Conociendo algunos de los parámetros del iPad (tabla 2 y figura 15) podemos calcular las dimensiones de la pantalla:

$$(3x)^2 + (4x)^2 = 24.638^2 \rightarrow x = 4.9276\text{cm}$$

$$v = 4x = 4 \cdot 4.9276 = 19.71\text{cm}$$

$$h = 3x = 3 \cdot 4.9276 = 14.78\text{cm}$$

Y una vez sabemos el valor real de cada lado de la pantalla del iPad y conociendo la resolución de la pantalla, podemos calcular el tamaño, en unidades de longitud, de un píxel real:

$$147.8\text{ mm} \rightarrow 768\text{ px}$$

$$x \rightarrow 1\text{px}$$

$$x = 0.1924\text{mm} = 192.4\mu\text{m}$$

Otra manera de calcular el tamaño real del píxel de la pantalla del iPad es conociendo la relación real/digital, 265.21px/mm:

$$265.21\text{px} \rightarrow 1\text{mm}$$

$$51\text{ px} \rightarrow x$$

$$x = 0.1923\text{mm}$$

La discrepancia en tamaño, probablemente se deba a redondeos en los cálculos, con lo que daremos por válido el valor 192,4 μm .

Al tratarse de un vídeo donde vemos un círculo en movimiento, de izquierda a derecha, y otro de abajo a arriba, al capturar el vídeo en una secuencia de imágenes donde se observen los píxeles podemos ver cómo según el movimiento se encienden o apagan unos píxeles u otros. A continuación (Figura 16), se muestra una secuencia de imágenes donde se puede ver cómo se van encendiendo los píxeles hacia arriba porque estamos grabando en el borde superior del círculo, si grabáramos abajo se vería como se van apagando ya que el círculo se mueve hacia arriba. Esta secuencia muestra que los tres leds actúan como un único píxel y no se realiza un movimiento interpolado usando leds de diferentes bloques para suavizar el movimiento.

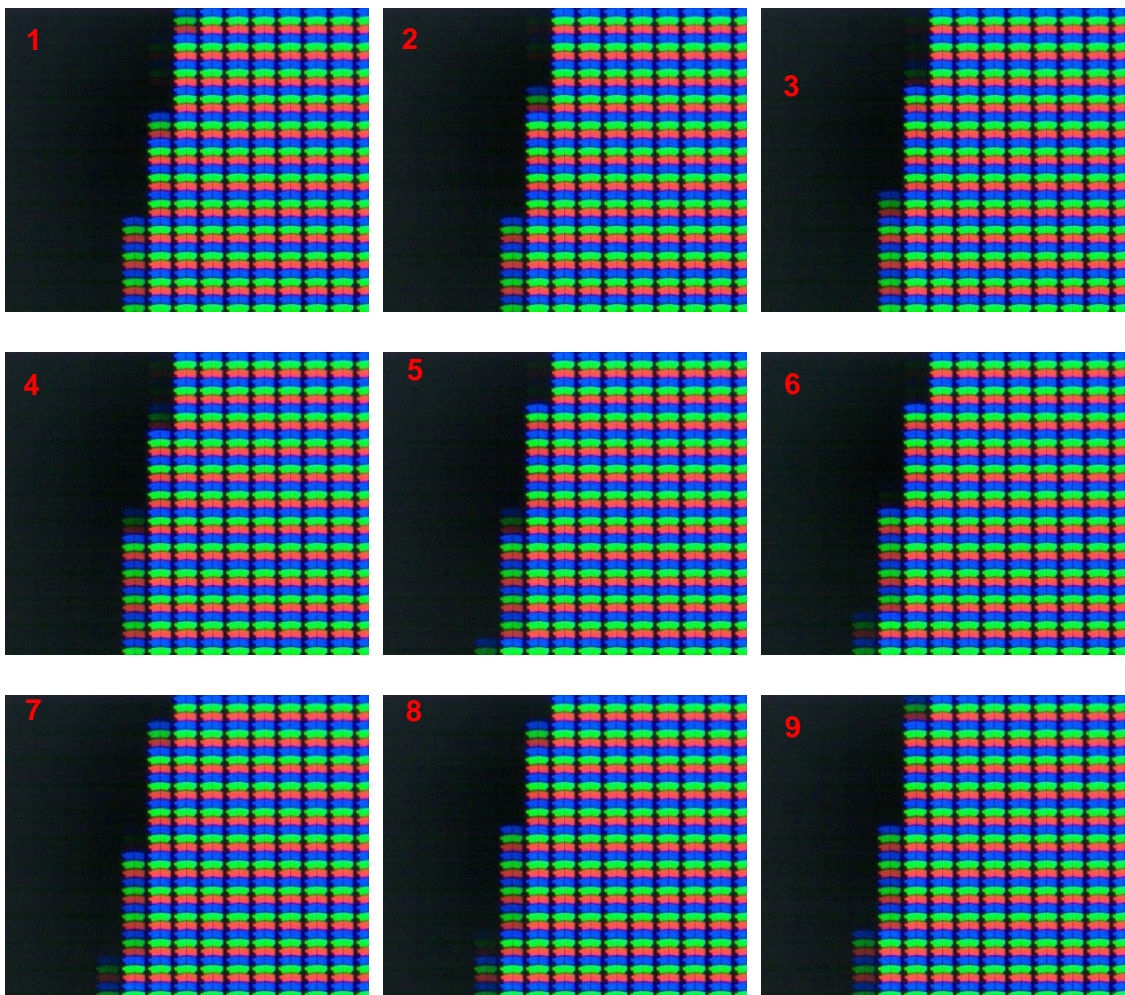


Figura 16. Secuencia fotogramas movimiento de la bola en el lado vertical del iPad.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta parte procederemos a medir el desplazamiento de dianas con un sistema móvil y con una animación en pantalla. Como se comentó en el objetivo del trabajo, se pretende comparar la viabilidad de usar una diana sobre pantalla en lugar de un dispositivo físico móvil. Emplearemos el segundo objetivo para tomar una serie de fotogramas a media distancia de los vídeos del círculo en movimiento del iPad y de la diana en desplazamiento. Tanto la pantalla como la diana se situarán a una distancia de 210 cm.

Para el primer test, empleamos un vídeo de un círculo blanco sobre fondo negro que se moverá una distancia total de 2 px en pantalla (total desplazamiento 384,8 μm). Tomaremos fotogramas del vídeo completo (40 segundos) ajustando *Pylon Viewer* a un tiempo de exposición de 33100 μs y una velocidad de adquisición de fotogramas de 30fps. El tiempo se ajustó de modo que el fondo apareciera, visualmente, lo más negro posible. Dado que la estructura de la pantalla no es igual en las dos direcciones Se realizarán dos pruebas: una con el círculo moviéndose en la dirección del lado más largo de la pantalla y otro en la dirección más corta.

Para evaluar la calidad de los resultados del seguimiento en pantalla compararemos los resultados con el movimiento de una diana en papel sobre un carril de desplazamiento micrométrico.

En ambos casos (diana en papel y en pantalla) el movimiento se determinará mediante el cálculo del centro de masas. Utilizaremos este parámetro porque en vez de una diana compacta podemos considerar que tenemos un círculo formado por varias partículas (píxeles) con diferentes masas (intensidades). Así, en procesado de imagen, se define el centro de masas como (Ecuación 3):

$$X_{CM} = \frac{\sum x_i \times I_i}{\sum I_i}; \quad Y_{CM} = \frac{\sum y_i \times I_i}{\sum I_i} \quad (3)$$

donde el sumatorio se extiende a todos los píxeles de la imagen. Para objetos rígidos sencillos con densidad uniforme y completamente rodeados de píxeles

con intensidad nula, el centro de masa se ubica en el centroide o centro geométrico^[22,23].

Los resultados del centroide se obtendrán automáticamente por ImageJ mediante análisis de partículas. Este análisis considera la diana (círculo) como un bloque compacto con lo que programa es capaz de obtener ciertas propiedades a partir de él, entre ellas, su centroide. Estos resultados los pasaremos a Excel para estudiar el movimiento y más adelante compararlo con el movimiento de la simulación en papel.

En primer lugar, aunque no es estrictamente necesario, calcularemos el aumento del objetivo que hemos empleado a media distancia, cargando un fotograma en *ImageJ* y midiendo con el programa la pantalla del iPad (Figura 17). De este modo tendremos calibrado el sistema óptico por si en el futuro hiciera falta este dato.

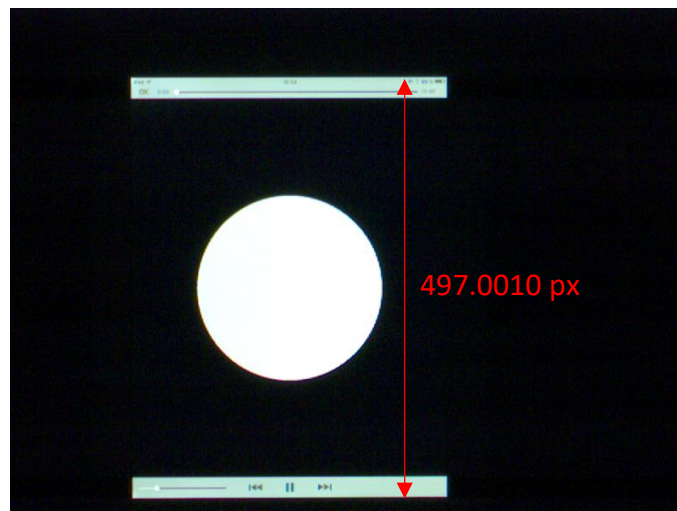


Figura 17. Fotograma de uno de los vídeos con círculo

$$497.001 \cdot 4.8\mu m = 2385.6\mu m = 0.2386mm$$

$$\text{Aumento} = \frac{0.2386}{197.1} = 0.012X$$

En el caso del **círculo moviéndose en el lado largo del iPad (eje y)** podemos ver como en el eje y (Figura 18) hay un movimiento lineal, tal y como se esperaba. De acuerdo con el aumento que estamos manejando, podemos calcular que el desplazamiento total registrado debe ser de 0,9703 px en la cámara, cantidad que coincide con lo obtenido en el experimento. El movimiento

sigue una tendencia lineal muy buena, con un valor de $r^2=0.9957$ y un error cuadrático medio $RMSE=0.01361$ px. En el eje x (Figura 19) no hay apenas movimiento, lo que es esperable ya que la diana no se mueve en esa dirección. No obstante, se aprecia una ligera tendencia al alza, que puede deberse a un fallo en la alineación horizontal del iPad. Si eliminamos esta tendencia, se obtiene que el valor medio de posición es de $7.83 \cdot 10^{-14}$ px y una desviación estándar de 0.010 px. Dado que sabemos que movimiento en esa dimensión es nulo, este error puede considerarse como un error del método.

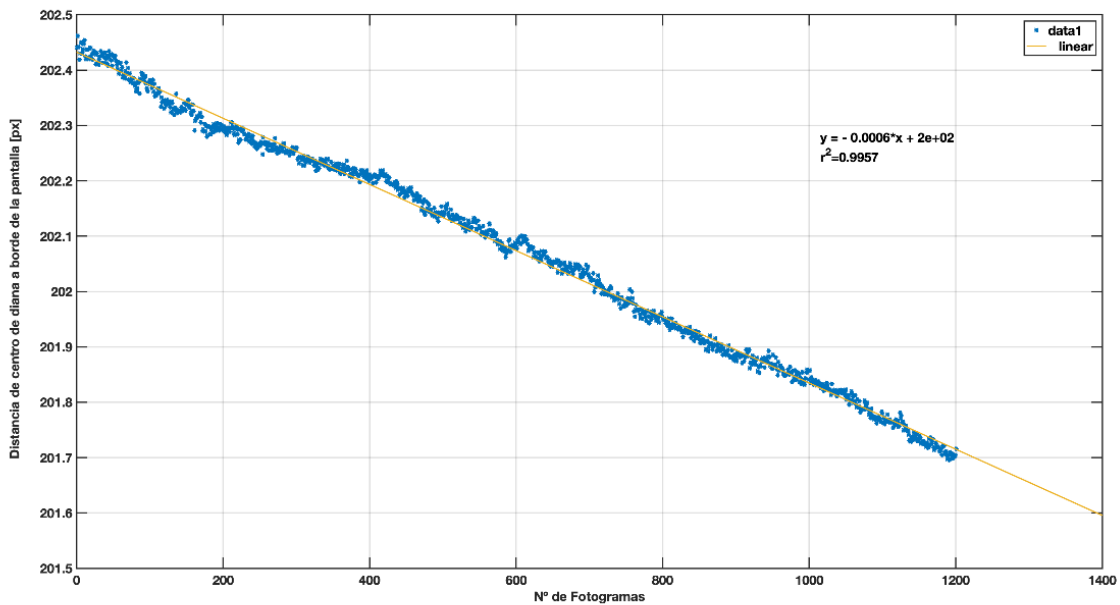


Figura 18. Movimiento en el eje y del círculo que se mueve en el lado largo de la pantalla del iPad.

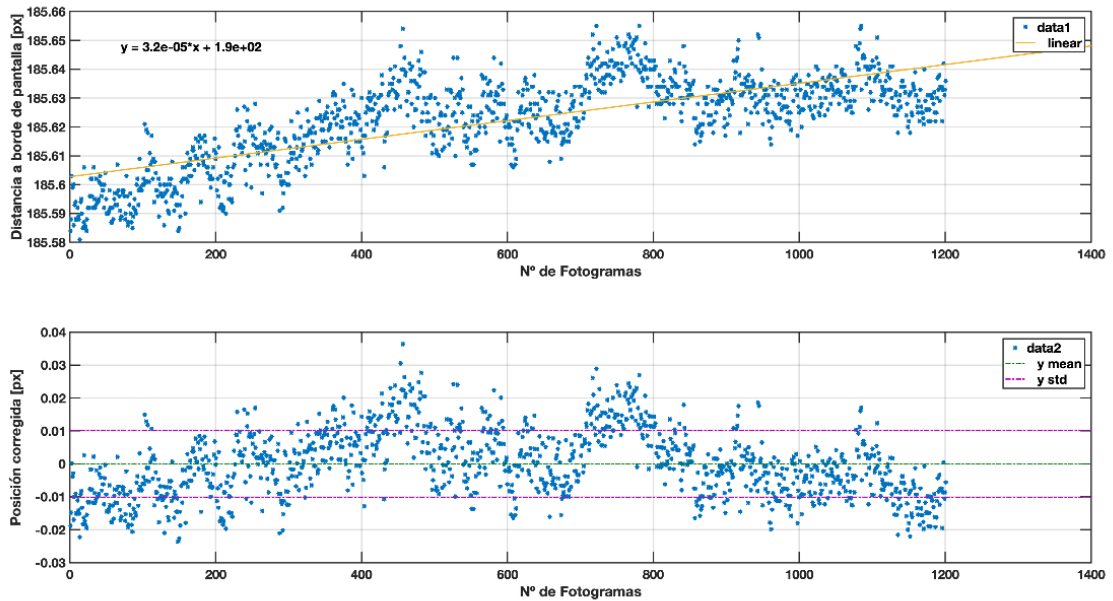


Figura 19. Movimiento en eje x del círculo que se mueve en el lado largo de la pantalla del iPad. En la primera gráfica se observan los valores obtenidos, mientras que en la segunda gráfica la posición corregida.

En el caso del **círculo moviéndose en el lado corto de la pantalla del iPad (eje x)** podemos ver como en el eje x (Figura 20) hay un movimiento lineal de la diana, aunque, comparado con el caso anterior el seguimiento es peor, con pequeños picos a lo largo de la trayectoria que pensamos que se deben a la asimetría en la configuración del píxel de la pantalla, aunque serían necesarias más pruebas para comprobar esto. En cualquier caso, el seguimiento sigue siendo bueno ($r^2=0.9917$ y $RMSE=0.02037$ px). En el caso del eje y (Figura 21) no hay apenas movimiento obteniendo una media para la posición corregida de $1.17 \cdot 10^{-14}$ px y una desviación estándar de 0.015 px.

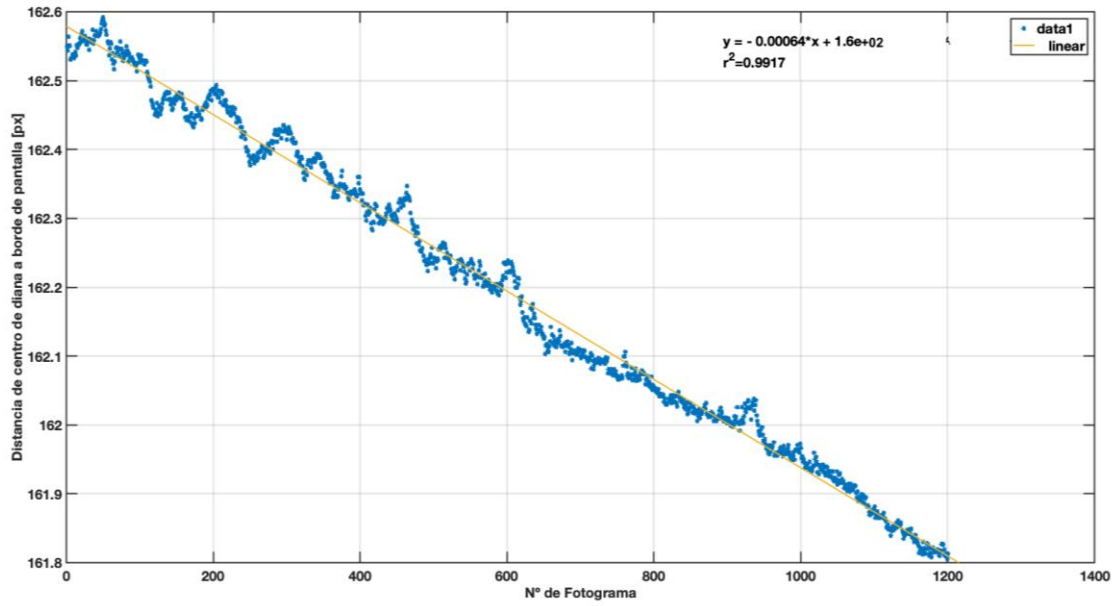


Figura 20. Movimiento en el eje x del círculo que se mueve en el lado corto de la pantalla del iPad.

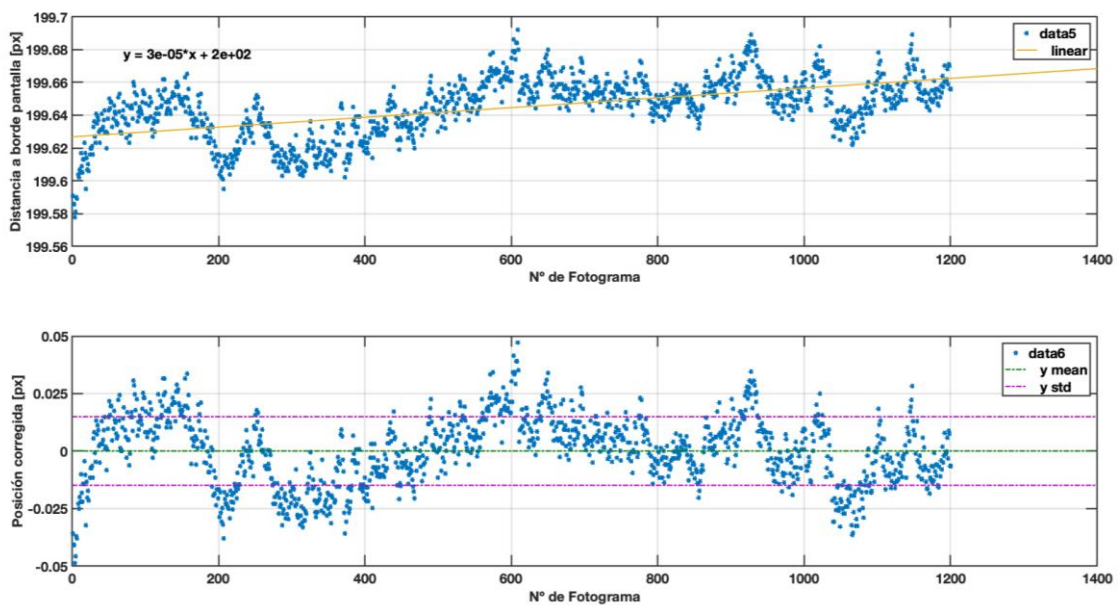


Figura 21. Movimiento en eje y del círculo que se mueve en el lado corto de la pantalla del iPad. En la primera gráfica se observan los valores obtenidos, mientras que en la segunda gráfica la posición corregida.

Para comparar la calidad de los resultados de seguimiento, grabaremos el movimiento de una diana en papel sobre el carril de desplazamiento y compararemos los resultados del seguimiento en papel con los obtenidos para la pantalla.

Para generar el movimiento de la diana ajustaremos el programa *Apt User* (Figura 22) con una distancia (Dist) de 2 mm en 40 segundos y podemos saber la velocidad máxima:

$$2\text{px} \rightarrow 40\text{s}$$

$$v_{max} \rightarrow 1\text{s}$$

$$v_{max} = 0.05\text{mm/s}$$

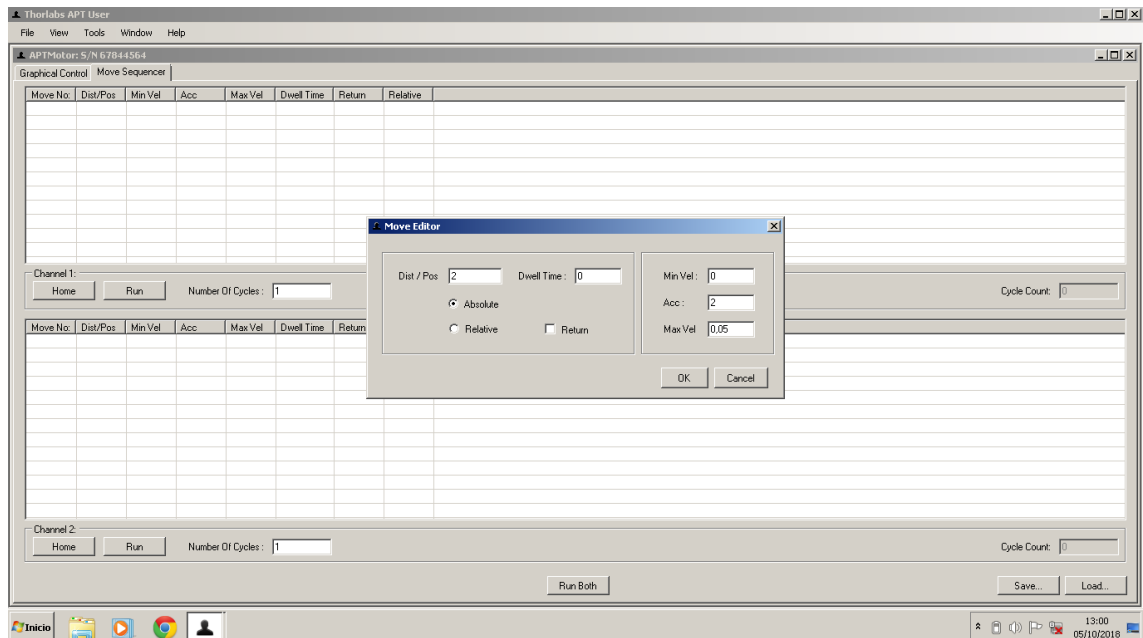


Figura 22. Editor datos APT User

Este programa va conectado al desplazador lineal que hace que se mueva el papel con el círculo negro y grabamos fotografías con *Pylon Viewer* (Figura 23):

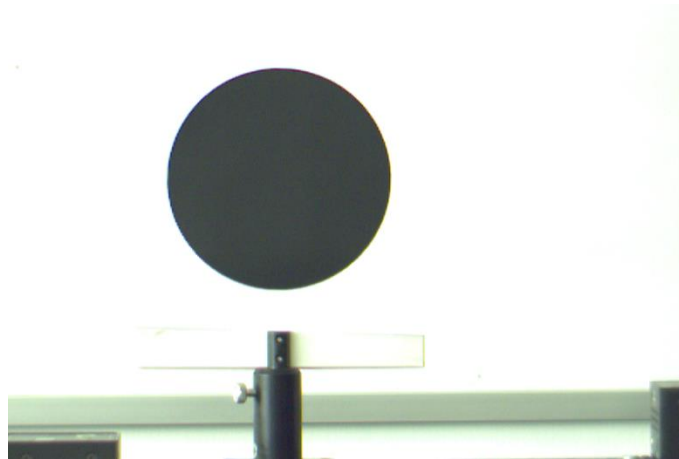


Figura 23. Círculo de papel

Una vez tenemos los fotogramas, los trasladamos a *ImageJ* y repetimos los pasos que hicimos en el punto anterior, y al pasar los datos a Excel obtenemos un movimiento lineal en el eje x (Figura 24), y uno estático en y. En este caso, aunque los fotogramas totales sean los mismos la velocidad de la diana es diferente y por tanto también lo serán los parámetros del ajuste lineal. Aun así, la comparativa es válida ya que realmente estamos mirando errores de ajuste y no los valores exactos de los ajustes en sí.

En el eje x encontramos un movimiento lineal opuesta a las anteriores ya que el movimiento en vez de ser de izquierda a derecha como en la pantalla del iPad, el movimiento de la diana sobre el desplazador lineal se ha hecho de derecha a izquierda. El movimiento resulta bastante preciso ($r^2=0.9996$ y $RMSE=0.02492$ px), aunque se observa una oscilación al principio. Esta oscilación ha aparecido en otros experimentos del laboratorio parece ser debida a inestabilidades en el motor de desplazamiento.

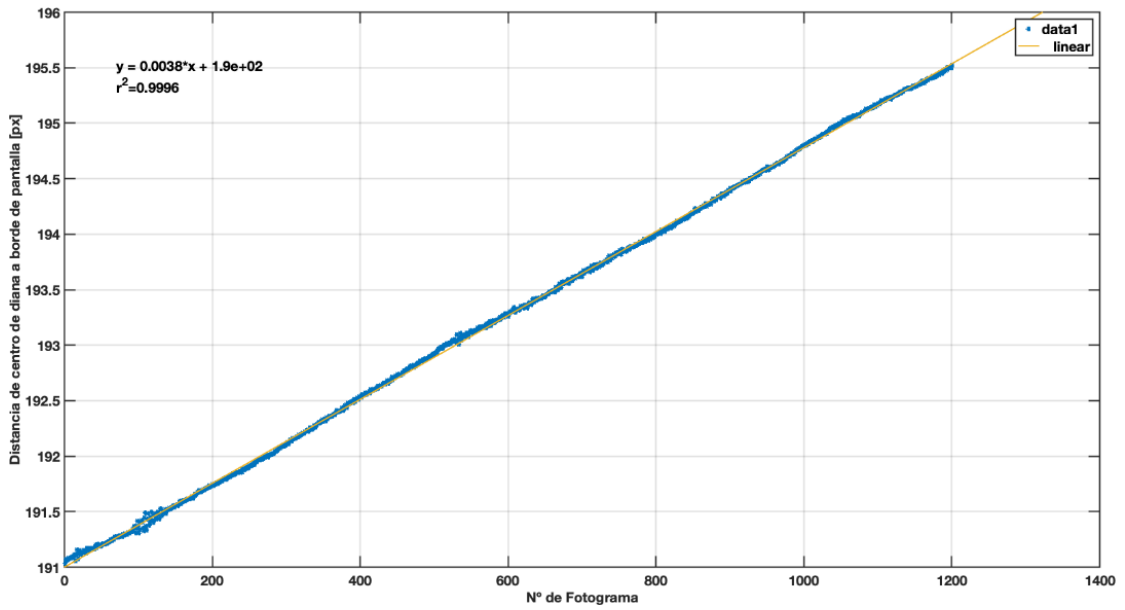


Figura 24. Movimiento en el eje x del círculo de papel que se mueve en el desplazador lineal.

En el eje y no se aprecia apenas movimiento (Figura 25), obtenemos una media de $-1.07 \cdot 10^{-14}$ px y desviación estándar 0.014px. Las ondulaciones que aparecen persisten al repetir el experimento y desconocemos el origen de estas. Es posible que, al igual que en la gráfica de la Figura 21, se deban a inestabilidades en el motor.

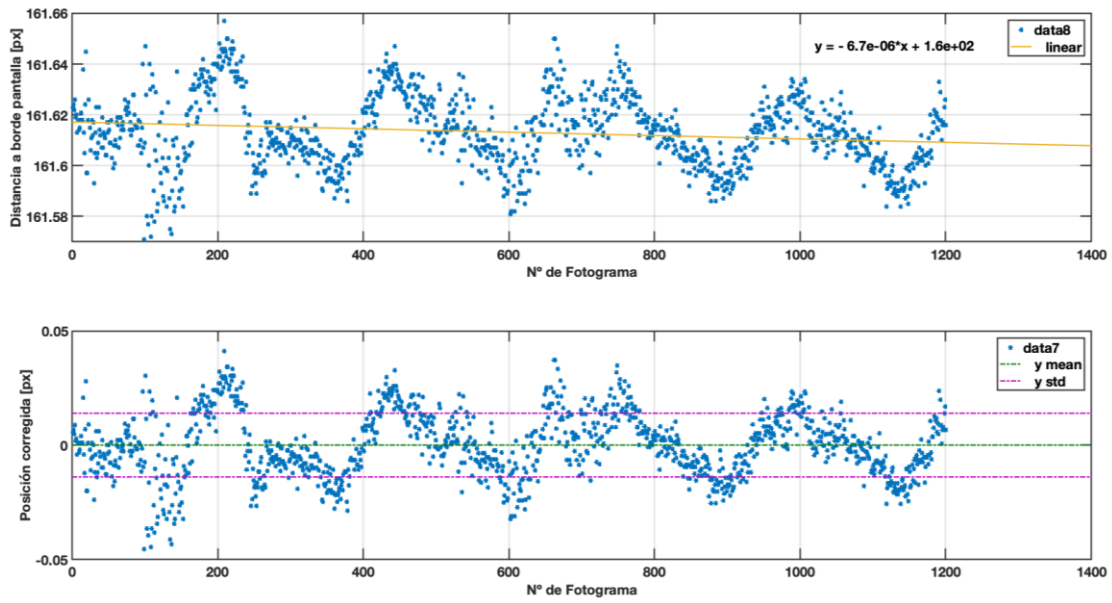


Figura 25. Movimiento en eje y del círculo de papel a media distancia. En la primera gráfica se observan los valores obtenidos, mientras que en la segunda gráfica la posición corregida.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIÓN

A la vista de las gráficas anteriores podemos ver que, tanto en pantalla como con diana impresa, el método propuesto de seguimiento es capaz de registrar el movimiento con precisión. En la Tabla 3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos.

En primer lugar, vemos que la resolución de la diana impresa es mucho más alta que la de la diana digital. Esto afecta a que los bordes estén más definidos, aunque el efecto difícilmente será apreciable por la cámara.

También llama la atención el hecho de que el movimiento por fotograma sea mayor en el caso del carril que en el caso de la pantalla. En este caso, el problema viene provocado por que el carril necesita una distancia mínima para acelerar y decelerar y de un rango bastante amplio en el que mantener la velocidad constante. En cualquier caso, el movimiento del carril es prácticamente continuo, con una repetibilidad de 500 nm, mientras que para la pantalla el movimiento es discreto (a saltos). En cualquier caso, como hemos dicho antes, no estamos interesados en el movimiento absoluto, sino en los errores de posición y en este caso, este parámetro no es muy relevante.

En cuanto a resultados concretos, podemos ver que, aunque la calidad de la diana y la precisión de movimiento para el experimento con pantalla y con diana impresa son muy diferentes, los resultados en la linealidad de la trayectoria y su error son similares.

Los datos referidos al eje estático, en el que no se produce movimiento, son interesantes ya que informan acerca del error del método. Dado que el valor registrado debe ser de media 0, las oscilaciones que se observan deben producirse problemas de iluminación cambiante, ruido en la cámara, inexactitudes en el cálculo, etc. El valor de oscilación, medido aquí como la desviación estándar de los valores rectificadas nos proporcionan un valor de error absoluto para la detección del movimiento, ya que para poder afirmar que la diana se ha movido el desplazamiento observado deberá ser de 3 veces la desviación estándar.

Según estos datos, vemos que la desviación estándar para los tres métodos es equivalente, lo que significa que la precisión del método depende tanto de la

diana y el movimiento como de todo el método en su conjunto o, más concretamente, de la resolución de la cámara utilizada.

Es interesante destacar que, considerando la desviación estándar como medida de la precisión, los resultados de los experimentos muestran que es posible medir la posición de la diana con una precisión de centésimas de píxel, dos órdenes de magnitud por encima de lo que en teoría permite la cámara.

Así, podemos concluir que simular el movimiento de objetos sobre pantallas digitales proporciona resultados tan precisos como hacerlo con objetos reales y con carriles de desplazamiento micrométrico, con la ventaja de tener un precio mucho menor y ser mucho más fáciles de manejar.

Tabla 3. Resumen de resultados.

	Resolución	Desplazamiento	Error Dirección movimiento	Error Dirección estática
IPad lado largo	132 ppp	0.32 $\mu\text{m}/\text{foto}$	$r^2=0.9957$ RMSD=0.014	STD=0.010
IPad lado corto	132 ppp	0.32 $\mu\text{m}/\text{foto}$	$r^2=0.9917$ RMSD=0.020	STD=0.015
Diana papel	1200 ppp	1,66 $\mu\text{m}/\text{foto}$	$r^2=0.9996$ RMSD=0.025	STD=0.014

7. CONCLUSIONES

Durante el trabajo hemos aprendido a manejar diferentes programas como *ImageJ* para analizar los fotogramas de la diana. Y hemos comprobado que con una diana bien diseñada y con ayuda de este software libre es relativamente fácil detectar movimientos de hasta centésimas de píxel. Otro programa es *Pylon Viewer* para tomar los fotogramas del círculo en movimiento y variar algunos parámetros de la cámara, y *Apt User* para el movimiento automático del desplazador lineal.

El uso conjunto de dianas en pantallas digitales y cálculo de centroide permite el uso de animaciones digitales como tests para métodos de seguimiento precisos. Y aunque el uso de desplazadores proporcione muy buenos resultados, estos también tienen un par de aspectos negativos a destacar, además de su alto precio, y es que aparte de tener una única dirección de movimiento, son muy sensibles y muchas veces se paran, se atascan y vuelven a su posición inicial con lo que nos lleva a repetir la medida, o en nuestro caso volver a configurar *Pylon Viewer* para volver a capturar las imágenes, y *Apt User* para que se vuelva a iniciar el movimiento en el caso de tenerlo programado. En cambio, el uso de pantallas permite desplazamientos y rotaciones en el plano, el manejo es mucho más sencillo y el precio mucho más reducido.

Muchos de las secuencias de fotogramas que hemos realizado durante el trabajo han tenido que ser descartados y repetidos porque varios factores como la iluminación, que producía sombras y algún que otro reflejo en la pantalla junto con la inclinación del iPad, al binarizar el conjunto de imágenes en *ImageJ* no nos detectaba el círculo y obteníamos un fotograma completamente blanco o negro y por tanto no podíamos medir el movimiento del círculo porque teníamos un salto. Otro de los factores, es el que hemos comentado anteriormente: fallos en el desplazador lineal, muchas veces, simplemente con el cable del mismo aparato, hacía contrapeso y sin llegar al final del recorrido del desplazador se detenía volviendo a su posición inicial.

En este trabajo hemos probado que el uso de dianas en movimiento sobre pantallas digitales generadas mediante una animación proporciona resultados

equivalentes que el mismo experimento realizado con dianas impresas, incluso aunque estas tengan mucha más definición y el movimiento sea más preciso.

Aunque probablemente los resultados estén limitados por la cámara utilizada, estamos convencidos de que el uso de mejores monitores y mejores cámaras proporcionará resultados equivalentes. Además, un experimento en condiciones más controladas y con dianas más complejas es posible que permita aumentar la resolución del método hasta las milésimas de píxel.

8. REFERENCIAS

1. Ferrer B, Mas D. *Parametric Evaluation of Errors Using Isolated Dots for Movement Measurement by Image Cross-Correlation*. Sensors (Basel) 2018; 1–14.
2. Mas D, Pérez J, Ferrer B, Espinosa J. *Realistic limits for subpixel movement detection*. 2016; 55(19): 4974–4979.
3. *Seguimiento de objetos*. Disponiblen en: https://es.wikipedia.org/wiki/Seguimiento_de_objetos (Acceso:15 junio 2019)
4. *Sub-pixel resolution*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Sub-pixel_resolution (Acceso: 15 junio 2019)
5. *Super-resolution imaging*. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Super-resolution_imaging (Acceso: 15 junio 2019)
6. Rafael C Gonzalez; Richard E Woods; Fernando Davue Rodríguez; Luis Rosso. *Tratamiento Digital de Imágenes*. U.S.A: Addison Wesley Iberoamericana, 1996.
7. Lei, X.; Jin, Y.; Guo, J.; Zhu, C. Vibration extraction based on fast NCC algorithm and high-speed camera. *Appl. Opt.* 2015; 54: 8198.
8. *How to read an USAF1951 target?* Disponible en: <https://www.optowiki.info/faq/how-to-read-an-usaf1951-target/> (Acceso: 20 abril 2019).
9. *1951 USAF Resolution Calculator*. Disponible en: <https://www.edmundoptics.com/resources/tech-tools/1951-usaf-resolution/> (Acceso: 09 julio 2019)
10. *Introducción a la óptica telecéntrica*. Disponible en: <https://www.opto-e.es/resources/telecentric-lenses-tutorial> (Acceso: 20 abril 2019).
11. *The Advantages of Telecentricity*. Disponible en: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/advantages-of-telecentricity/> (Acceso: 20 abril 2019).
12. *Distortion and the Telecentricity Specification*. Disponible en: <https://www.edmundoptics.com/resources/application->

- [notes/imaging/distortion-and-the-telecentricity-specification/](#) (Acceso: 20 abril 2019).
13. *Telecentric Lenses*. Disponible en: <https://www.edmundoptics.com/c/telecentric-lenses/1003/> (Acceso: 20 abril 2019).
14. *Lens series. Machine Vision Lens & Accessory*. Maxxvision
15. *cA4600-7gc - as de Basler*. Disponible en: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/area-scan-cameras/ace/aca4600-7gc/> (Acceso: 20 abril 2019).
16. *Basler - Pylon Windows*. Disponible en: <https://www.baslerweb.com/en/products/software/pylon-windows/> (Acceso: 26 abril 2019).
17. *ImageJ*. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/ImageJ> (Acceso: 1 mayo 2019).
18. *iPad 2*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/IPad_2 (Acceso: 1 mayo 2019).
19. *DDSM100 Direct Drive Translation Stage. User Guide*. Descargado en: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DDSM100/M>
20. *¿Qué son los píxeles? El pixelado. Pixel Art*. Disponible en: <https://tecnologia-informatica.com/que-son-pixeles-pixelado-pixel-art/> (Acceso: 2 mayo 2019).
21. *Píxel*. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Píxel> (Acceso: 2 mayo 2019).
22. *Centro de masas*. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Centro_de_masas (Acceso: 11 junio 2019)
23. *¿Qué es el centro de masas?* Disponible en: <https://es.khanacademy.org/science/physics/linear-momentum/center-of-mass/a/what-is-center-of-mass> (Acceso: 11 junio 2019)