

Interfaz visual para un Autocolimador Nikon 6D mediante procesamiento de imágenes con precisión sub-píxel: un caso de estudio.

C. Schurrer^a, A.G. Flesia^{c,*}, G. Bergues^b, G. Ames^b, L. Canali^b

^aCEMETRO, Universidad Tecnológica Nacional Regional Córdoba, Armada Argentina 4050, Campus UTN, Córdoba, Argentina y FaMAF, Universidad Nacional de Córdoba, Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

^bCIII, Universidad Tecnológica Nacional Regional Córdoba, Maestro M. Lopez esq. Cruz Roja Argentina, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

^cCIEM-Conicet y FaMAF, Universidad Nacional de Córdoba, Medina Allende s/n, Ciudad Universitaria, Córdoba, Argentina.

Resumen

Este documento tiene el objetivo de describir el potencial de una interfaz visual básica en un Autocolimador del tipo Nikon 6B/6D, para reemplazar al operario en una medición de calidad metrológica. La interfaz visual implementada consta de una cámara con sensor CMOS adosada al ocular del autocolimador, partes posicionales, y un sistema de procesamiento digital de imágenes propio, escrito en lenguaje Matlab®, que analiza la imagen de la retícula para detectar la escala y la cruz de medición a nivel sub-píxel. Mediante un experimento controlado, realizado con un nivel electrónico trazable internacionalmente, se obtuvieron, con este sistema, ángulos de cabeceo (α_y) con una resolución tres veces mejor que la del instrumento sin interfaz. Este ejemplo sugiere que el valor de 0.06 píxeles para la incertidumbre asociada con la posición sub-píxel de las diferentes líneas que conforman la retícula de medición es realista, y permite seguir trabajando en una interfaz robusta para todos los parámetros angulares posibles de ser medidos por el autocolimador. Copyright © 2014 CEA. Publicado por Elsevier España, S.L. Todos los derechos reservados.

Palabras Clave:

Autocolimador, sensor CMOS, Interfaz visual, precisión subpíxel.

1. Introducción

Un autocolimador es un instrumento óptico para medir ángulos pequeños sin contacto y con alta exactitud. Es un instrumento de gran utilidad para la medición de paralelismo, perpendicularidad, rectitud y ángulos de guiñada y cabeceo, (Martinelli et al., 1994). Los parámetros enumerados son de vital importancia en la evaluación metrológica de las máquinas de medir coordenadas y máquinas herramienta, ya sea en plantas industriales como en laboratorios de metrología, (Brucas et al., 2009). También son una herramienta imprescindible para la caracterización de la topografía de superficies en espejos ultra precisos para óptica de rayos X, (Soufi et al., 2012, Siewert et al., 2012a, Siewert et al., 2012b, Alcock et al., 2010).

La medición en un autocolimador del tipo Nikon 6D es realizada por un operario ubicando uno de sus ojos en el ocular del instrumento, cuyo sistema óptico le permite observar la retícula

graduada y la cruz desplazada (ver Figura 4). Este tipo de medición introduce errores de tipo aleatorio y sistemático debido a la presencia de paralaje, que surge de observar la cruz de diferentes maneras según la perspectiva que se elija, situación que puede agravarse por defectos en el ojo del operador.

Existen modelos comerciales de autocolimadores electrónicos de alta precisión que presentan sistemas de visión por computador, acoplados al sistema tradicional, que disminuyen los errores anteriormente nombrados. Estos sistemas son internos al diseño del autocolimador, y se complementan con un software específico, usualmente sistemas cerrados, que no permiten al usuario manipular la medición digital realizada, (Tan et al. 2007). También existen interfaces externas que pueden adquirirse para transformar modelos analógicos en digitales, como el Davidson Optronics D-652 upgrade kit, que permite al autocolimador analógico Davidson Optronics D-652 alcanzar la funcionalidad del modelo digital Davidson Optronics D-790, autocolimador de doble eje. Pero este no es el caso de la firma Nikon, que no provee ningún modelo digital ni tampoco interfaces.

En este trabajo se presenta la implementación de una interfaz visual externa a un autocolimador Nikon 6B/6D, que se compone de una cámara digital, un sistema de posicionamiento

*Autor en correspondencia

Correos electrónicos: cschurrer@cbasicas.frc.utn.edu.ar (C. Schurrer), flesia@famaf.unc.edu.ar (A.G. Flesia), gbergues@cbasicas.frc.utn.edu.ar (G. Bergues), lames@scdt.frc.utn.edu.ar (G. Ames), lcanali@scdt.frc.utn.edu.ar (L. Canali)

to, y de una computadora conectada a la misma que recibe las imágenes para ser procesadas, junto con el sistema de procesamiento, programado en el entorno Matlab ®.

La interfaz realizada permite extender la resolución del autocolimador, dado que la imagen tomada por la cámara posee más información de la que puede resolver el operario leyendo la retícula del autocolimador. Dicha información se procesa mediante la inferencia de la posición del centro de una línea a nivel sub-píxel.

Dada su aplicación a diversos problemas industriales, como la determinación de grosor de vidrio, (Park et al., 2011), el contorno de especímenes a alta temperatura, (Fabijanska et al., 2009a), dimensión de cajas, (Fernandes et al., 2006), posición de líneas en video de canchas de deportes, (Nguyen et al., 2012), (Reid et al., 1996), entre otros, la obtención de la información de posición de curvas en una imagen a nivel sub-píxel resulta de gran interés en sí misma.

En la Sección 2 se describe el principio de funcionamiento del autocolimador y se introducen los conceptos básicos utilizados en las mediciones con estos instrumentos. En la Sección 3, se discuten las características del sistema construido, y de las imágenes captadas. La Sección 4 incluye todos los experimentos que se construyeron para obtener la imagen de la retícula de medición juntamente con la adecuación del entorno que permitió la creación de los mismos. Y en la Sección 5, se analizan los programas de segmentación y detección creados para reproducir la medición realizada por el operario mediante la interfaz. Las conclusiones y futuros trabajos están en la Sección final.

2. Autocolimador

Un autocolimador (Figura 1), es un instrumento óptico utilizado para la medición de pequeños desplazamientos angulares (del orden de los segundos de arco).

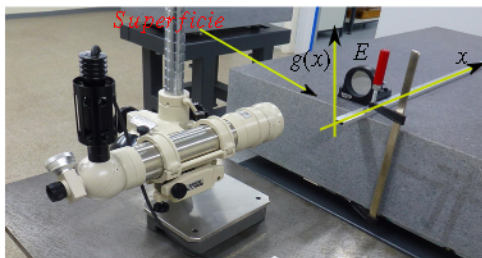


Figura 1: Autocolimador Nikon 6D

Tiene la capacidad de realizar la medición sin hacer contacto directo con la pieza a medir, característica muy útil, por ejemplo, en una línea de ensamble o en laboratorios de alta precisión, en donde los instrumentos y elementos deben ser manipulados con delicadeza.

2.1. Principio de Funcionamiento

Para la medición, el autocolimador trabaja en conjunto con una superficie de reflexión o espejo E (ver Figura 2), cuya distancia al autocolimador no influye en la medición.

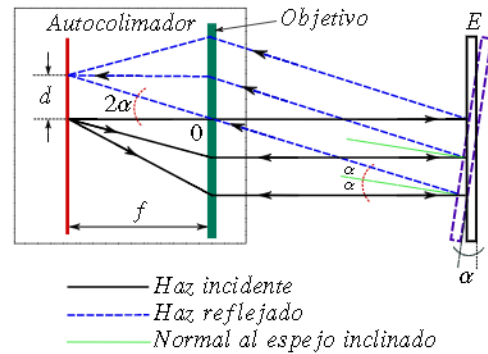


Figura 2: Esquema de funcionamiento del Autocolimador, donde f es la distancia focal, d es el desplazamiento, y α el ángulo medido.

El autocolimador proyecta un haz de luz colimado (haz de luz paralelo a su eje óptico) a través de su objetivo. Este se refleja sobre el espejo E volviendo a su fuente de origen, donde se mide la desviación angular (α) del mismo con respecto al eje óptico del instrumento. Si E está perpendicular a la luz proyectada, el haz emitido desde el autocolimador (esquemático en la Figura 2 por las líneas de color negro continuas) es reflejado por el espejo de vuelta a su punto de origen y en la retícula interna del autocolimador (observada a través del ocular), no se distingue ningún desplazamiento d del haz. Sin embargo, si E está inclinado, el haz reflejado por él (líneas azules punteadas en la Figura 2) se desplaza respecto a la escala de medición de la retícula interna, la cual está calibrada para que los desplazamientos d sobre su escala sean los ángulos de la inclinación α del espejo. La relación de la calibración está dada por (1),

$$\tan(2 \cdot \alpha) = \frac{d}{f} \quad (1)$$

donde f es la distancia focal. Esta relación se puede apreciar claramente a partir del rayo reflejado, que no se desvía, porque pasa por el centro óptico O del objetivo.

2.1.1. Ejemplo: Medición de la topología de una superficie

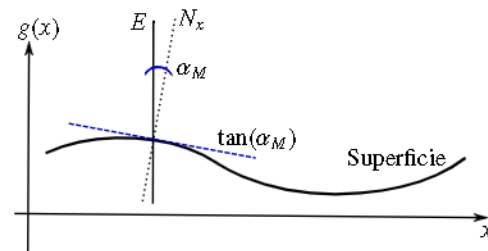


Figura 3: Gráfica de la Topología de una superficie determinada por la $\tan(\alpha)$

Una de las mediciones usualmente realizadas con autocolimadores es la obtención de la topología de una superficie, experiencia implementada y visible en la Figura 1 donde se ve sobre la mesa de referencia (superficie) la barra de aluminio que le sirve de guía al espejo E para poder desplazarlo en línea recta

y así generar, al tomar varias mediciones, la curva correspondiente a la topología de la superficie en esa dirección.

La Figura 3 muestra la gráfica sencilla, utilizada a modo de explicación, de la medición implementada en la Figura 1. La función $g(x)$ representa la forma de la superficie en la dirección de desplazamiento del espejo sobre la superficie a medir, llamada x . Para cada posición del espejo E definimos como N_x a la normal a la superficie, en el punto x . Si llamamos N_0 a la recta inicial de referencia (en $x = 0$) entonces

$$\frac{dg(x)}{dx} = \tan(\alpha_M). \quad (2)$$

La topología de la superficie se obtiene a partir de los ángulos (α_M) medidos en radianes

$$g(x) = g(0) + \int_0^x \tan(\alpha_M) dx. \quad (3)$$

2.2. Medición mediante la Interfaz Visual

En la Figura 4 podemos ver un esquema de la retícula interna del autocolimador, en donde se distinguen los elementos con los cuales se discierne una medición, la escala marcada en minutos y el haz de luz en forma de cruz reflejada por el espejo. Observando la posición de la cruz con respecto al centro de la retícula se obtiene la medición de los ángulos de cabeceo α_y y guiñada α_x entre la superficie y el espejo E .

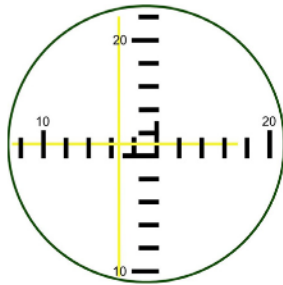


Figura 4: Esquema de la retícula, donde se observa la escala interna del autocolimador y el haz de luz en forma de cruz.

Para realizar la medición en forma automática de los valores esquematizados en la Figura 5 se deben seguir los pasos que se especifican a continuación

1. Establecer la distancia Δ_{XY} entre las divisiones de la escala de la retícula a nivel sub-píxel con estimación de incertidumbre. En la Figura 5 se identifica este valor tanto para los segmentos horizontales como verticales, marcando su medición desde los centros de los segmentos. Los segmentos horizontales superiores se dejaron ex profeso sin relleno para recalcar desde donde se toma la medición.
2. Identificar las líneas que forman la cruz, también a nivel sub-píxel.
3. Establecer la distancia B_x y B_y en píxeles entre el cero de la retícula (el valor central de la misma donde los segmentos forman el ángulo recto, ver Figura 5), y el corte de las líneas que forman la cruz con cada eje.

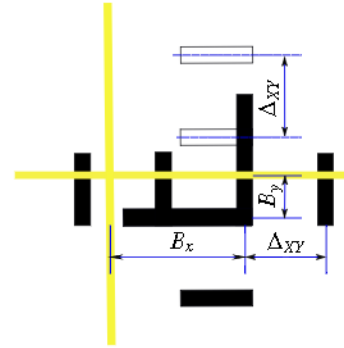


Figura 5: Esquema de la zona del cero de la retícula junto con la cruz de la Figura 4, y los puntos de medición B_x , B_y y Δ_{XY} a analizar. Los segmentos dejados sin relleno permiten observar que la medición se toma desde sus centros.

En el autocolimador Nikon 6B/6D, la distancia entre divisiones de la retícula (Δ_{XY}) representa 60 segundos de arco, ($1 \text{ div} = 1 \text{ min}$). Por lo cual para obtener la medición del ángulo de cabeceo α_y en segundos de arco, se calculan primero los valores Δ_{XY} en píxeles/división y B_y en píxeles, y se reemplazan dichos valores en la fórmula (4)

$$\alpha_y = 60 \cdot \frac{B_y}{\Delta_{XY}}. \quad (4)$$

Lo mismo se puede hacer para el ángulo de guiñada, α_x , en segundos de arco.

3. Descripción de los componentes de la Interfaz de Medición

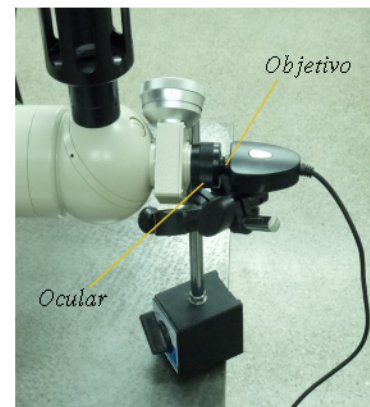


Figura 6: Cámara con sensor CMOS, ubicada frente al autocolimador, de tal forma que el objetivo se introduce en el ocular del autocolimador.

La interfaz visual de medición consta de tres elementos fundamentales, una cámara adosada al ocular del autocolimador Nikon 6D, un sistema de ubicación que permite alinear los ejes ópticos de la cámara y el autocolimador, y una computadora para almacenar las imágenes y procesarlas. En la Figura 6 vemos el sistema montado para los experimentos realizados en este trabajo.

El sistema de ubicación de la cámara frente al ocular consta de tornillos micrométricos que permiten alinear la cámara al eje óptico del autocolimador. Tal como se puede ver en la Figura 6, el objetivo de la cámara se aproxima al ocular de tal manera que la imagen virtual generada por el autocolimador (la que observa el operario al ubicar el ojo sobre el ocular, (Born et al., 1998)) pueda captarse a través de la adquisición de una imagen.

Experimentos previos con varias cámaras permitieron deducir que para que todo el rango de medición que posee el autocolimador pueda verse en una imagen adquirida a través del ocular, se necesita tener una apertura angular mínima de $\theta_{camara} = 40^\circ$.

La cámara utilizada en este trabajo es una cámara web con sensor CMOS, de resolución 480x640 píxeles, la cual fue elegida por cumplir estos requisitos mínimos.

4. Procedimiento para la medición con el autocolimador y la cámara

4.1. Procedimiento de alineación de la cámara

Para poder avanzar hacia la adquisición de imágenes es necesario alinear la cámara con respecto al objetivo del autocolimador. Para este fin, se debe alinear en primer lugar, el eje óptico del instrumento con la normal al espejo E , apuntando el objetivo del autocolimador a este hasta que aparezca la cruz en la retícula. Una vez que la cruz está visible se procede, mediante los elementos de posicionamiento propios del autocolimador, a ubicar la cruz en el centro de la escala para hacer la primera medición (la referencia o cero). Luego, se desarrolla sistemáticamente el siguiente procedimiento:

1. **Posicionamiento y puesta en foco de la cámara de tal manera que la luz que incide sobre el telescopio esté centrada en la imagen:** Determinar cuándo la cámara está en foco es un punto delicado (Goldsmith et al. 2011), existe un compromiso de equilibrio entre la nitidez de la imagen y el número de píxeles para poder determinar la posición de la línea a nivel sub-píxel, y además, el telescopio del autocolimador está formado por un conjunto de lentes que proyectan la luz exterior hacia el área del ocular (dónde se forma la imagen final) generando zonas de luz saturadas en el centro de la imagen y zonas oscuras en los bordes (ver Figura 7 y 9). Si esta luz incidente posee un corrimiento con respecto al centro de la retícula, la imagen tendrá una estructura incorrecta de píxeles, que produce un error en el procesamiento de imágenes posterior. Entonces el proceso de calibración consiste en determinar, mediante una iteración entre posicionamiento de la luz incidente (utilizando los tornillos micrométricos nombrados) y datos entregados por el software con respecto a la matriz de intensidades de la imagen de calibración, la posición óptima del halo lumínico.
2. **Alineamiento de las líneas con la matriz de píxeles de la cámara:** El programa de detección fue creado de tal manera, que es necesario, que las líneas de las imágenes

INCORRECTO = CORRIDO CORRECTO = CENTRADO

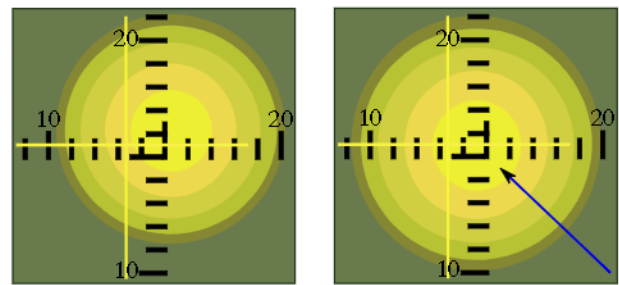


Figura 7: Esquema de como se observa la luz incidente en el telescopio sobre la imagen de la retícula (ver imagen real 9). La flecha azul indica la dirección del gradiente de iluminación.

adquiridas estén posicionadas sobre los píxeles cuadrados del CMOS (paralela a la grilla creada por los mismos). Para satisfacer esta premisa se realiza una calibración espacial utilizando sólo la cruz lumínica (ver la Figura 8); se debe lograr que las alturas, medidas en píxeles, sean iguales $h_1 = h_2$.

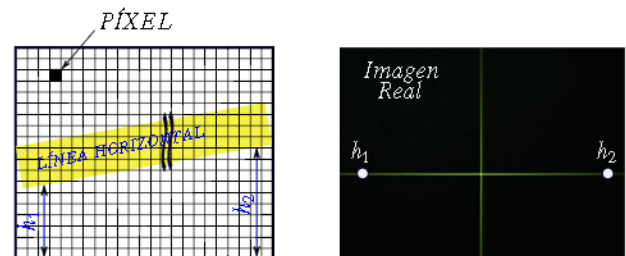


Figura 8: Esquema de cómo se debe corregir el alineamiento de las líneas respecto a la matriz de píxeles.

4.2. Adquisición de imágenes

La retícula del autocolimador en condiciones de operación normales tiene dos figuras principales formadas por líneas, una escala, (un conjunto de líneas cortas equiespaciadas en dirección vertical y horizontal) y, una cruz (dos líneas amarillas cruzadas perpendicularmente). Esta cruz es la imagen del haz colimado que se refleja en el espejo E , como fue explicado en la Sección 2. Para el procesamiento hay que capturar imágenes, de estas dos figuras, por separado.

El autocolimador Nikon 6D es un autocolimador de campo oscuro, optimizado para que el operador ubique la cruz en el centro de la retícula mirando por el ocular en un entorno con poca iluminación, por lo cual, cuanto más oscura es la habitación, mayor será la precisión obtenida en la ubicación de la cruz. Sin embargo esta situación contrasta con la que es adecuada para obtener una imagen de la escala. Una imagen, dónde se observen al mismo tiempo, la escala y la cruz, introduce errores en la determinación de la posición de las líneas que son inaceptables en el contexto de este tipo de mediciones. Sin embargo, se puede separar la observación de la escala y de la cruz, sin producir ningún movimiento en el sistema de ubicación de la cámara,

solo cambiando la iluminación del ambiente. Las figuras, formadas por líneas, presentes en las imágenes no se desplazan, una de otra, al agregar o quitar iluminación, por lo cual la segmentación de las imágenes obtiene la posición de la cruz y de la escala por separado para cada posición del espejo, estimando la medición con un error mucho menor que el error producido al segmentar una sola imagen, con ambas figuras.

Luego de la alineación del espejo y la ubicación de la cámara con respecto al objetivo, se tomaron imágenes de la retícula con la habitación iluminada, de modo de maximizar el contraste de fondo claro y líneas oscuras de la escala, como puede verse en la Figura 9. Es importante recalcar que las imágenes de la escala se capturan una sola vez, al comienzo de la experiencia, para estimar la relación píxel/segundo de arco correspondiente a la cámara utilizada, y puede considerarse parte de la calibración necesaria de la interfaz, antes de realizar mediciones.

Finalmente, para realizar una medición, se disminuye la luz ambiente del laboratorio; como el fondo es oscuro y la cruz es clara, el sensor de la cámara posicionada en el ocular sólo registra la cruz, como puede verse en la figura Figura 10.

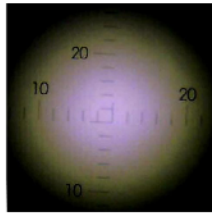


Figura 9: Imagen de la retícula, donde se observa la escala interna del autocolimador. Esta imagen fue capturada incrementando la iluminación ambiente para realzar el contraste de los segmentos que conforman la escala con respecto al fondo oscuro de la retícula.



Figura 10: Imagen de la retícula, donde se observa sólo el haz de luz en forma de cruz. La misma fue obtenida reduciendo la iluminación ambiente para impedir la visualización de los segmentos que conforman la escala.

4.3. Experimento de medición

Para validar nuestro procedimiento de medición con la interfaz, diseñamos una experiencia controlada que consiste en apoyar el espejo E y un nivel electrónico Nv sobre una barra que puede rotar en torno a un eje. La rotación de la barra se regula mediante un tornillo micrométrico T ubicado en uno de sus extremos (ver Figura 11). El nivel electrónico usado es de marca Mahr Federal EMD-832P-48-W2 Número de Serie 2095-06293 disponible en el laboratorio CEMETRO, trazable a patrones internacionales, con resolución 0.1 de segundo de arco.

Consideramos entonces que el Nv , para la posición k -ésima del tornillo T genera una medición de referencia de un ángulo de cabeceo, por lo cual los resultados de nuestra experiencia serán pares ordenados (X_k, α_k) donde X_k es la lectura obtenida en el nivel y α_k el valor obtenido con el autocolimador por medio del procesamiento digital realizado a las imágenes capturadas con la cámara.

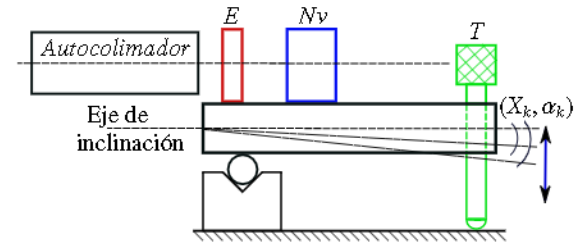


Figura 11: Experiencia con nivel electrónico

En la Sección siguiente vamos a desarrollar el modelo estadístico del método de procesamiento digital que permite establecer el valor del ángulo medido, y su comparación con el valor generado por el nivel electrónico.

5. Reconocimiento de patrones en las imágenes tomadas

La interfaz digital genera dos grupos de imágenes color, un grupo corresponde a la escala de la retícula del autocolimador, y otro al del haz de luz en forma de cruz. Ambos grupos de imágenes digitales contienen figuras conformadas por conjuntos de líneas rectas cuya posición tiene que ser determinada en forma muy precisa para inferir el ángulo medido.

Se aplicó un procesamiento de sustracción de fondo y recortado a todas las imágenes (tanto de la escala como de la cruz), tomadas durante la experiencia descrita en la Sección 2. Las imágenes capturadas presentan estructuras con ancho mayor a un píxel, por lo cual, para llegar a una medición con la misma resolución que el autocolimador (o mejor), es necesario modelar la imagen a nivel sub-píxel.

5.1. Procesamiento general de las imágenes

El primer procesamiento de las imágenes a trabajar es la sustracción del fondo de la imagen, para resaltar las estructuras lineales de estas. La distribución de intensidad de luz captada por los detectores CMOS varía a lo largo de la imagen de diferente manera para cada uno de los colores RGB, por lo cual el “fondo” sobre el que se encuentra la señal es distinto para cada color. Luego de un estudio previo de la incidencia de cada canal en la localización de la línea se decidió usar el canal verde (canal G del triple RGB) de la imagen bmp devuelta por la cámara. Dicha señal, denotada I_V , fue modelada como una imagen C_V más una función fondo F (Ecuación 5), ajustado como un polinomio de grado dos completo, usando una regresión robusta (Ecuación 6).

$$I_V = C_V + F, \quad C_V = I_V - F \quad (5)$$

$$F(f, c) = p_{00} + p_{10} * f + p_{01} * f + p_{20} * c^2 + p_{11} * c * f + p_{02} * f^2 \quad (6)$$

donde c y f (columna y fila), representan la posición del píxel en las direcciones X e Y respectivamente. Este procesamiento puede verse como un método de sustracción de fondo similar a un filtro de Savitzky-Golay global, (Schafer, 2011). El polinomio F se estimó aplicando a la imagen I_V una regresión robusta con la función *bisquare*, (Maronna et al., 2006), usando las rutinas del Curve Fitting Toolbox de Matlab®. La señal resta C_V , canal verde sin el fondo, se recortó dejando solo su parte central, una imagen de 128 por 128 píxeles, para minimizar errores introducidos por aberraciones ópticas de las lentes.

5.2. Métodos generales de detección sub-píxel

La mayoría de los detectores de borde de nivel sub-píxel puede clasificarse como parte de alguno de los siguientes grupos: de ajuste, de interpolación o de momentos.

Métodos de ajuste: Estos métodos usan funciones continuas para ajustar las muestras de la curva que genera el borde. Luego, la posición del borde sub-píxel se encuentra como el punto de inflexión o de centro de la función continua ajustada. Otros métodos de ajuste usan funciones de energía locales o wavelets para determinar los parámetros del borde, (Hagara et al., 2011, Fabijanska et al., 2009a, Ma et al. 2012, Zhao et al., 2012, Sui et. al, 2009).

Métodos de interpolación: Estos métodos alcanzan la resolución sub-píxel interpolando la imagen hasta obtener una grilla más fina de píxeles. Luego se aplican a la función imagen obtenida detectores usuales de gradiente, como Canny o LoG, (Hermosilla et al., 2008).

Métodos de momentos: Estos métodos consisten en aplicar momentos estadísticos para determinar los parámetros del modelo de borde supuesto. Algunos de los métodos más comunes son los basados en momentos espaciales, Fourier-Mellin o Zernike, (Tabatai et al., 1989, Hu et al., 2008, Qu et al., 2005, Tan et al., 2007).

Los métodos de momentos e interpolación son muy usados cuando no se tiene conocimiento previo sobre la forma de los bordes a detectar. Los métodos de ajuste requieren un modelo paramétrico de línea para ser aplicados. Usualmente, se calcula una imagen de bordes gruesos con métodos convencionales que calculan líneas de máximo en aproximaciones al campo gradiente de la imagen (vista como una superficie). Para cada punto de borde grueso, en la dirección dada por el gradiente, se realiza un corte en la superficie y se ajusta un modelo de línea en ese corte con parámetros que representen la posición sub-píxel del borde, (Canabal et al., 2001, Hagara et al., 2011).

5.3. Procesamiento sub-píxel por ajuste

Los métodos de ajuste convencionales modelan bordes unidimensionales como un plateau al cual se accede mediante un escalón, una rampa o una curva suave como la función error *erf*. En nuestro caso, las líneas que conforman la figura observada son rectas equiespaciadas muy finas, por lo cual un corte ortogonal a la línea no corresponde a un plateau, sino que puede ser modelado con una curva infinitamente diferenciable con un único máximo local en la posición ideal de la línea, como una campana o una parábola, ver Figura 12.

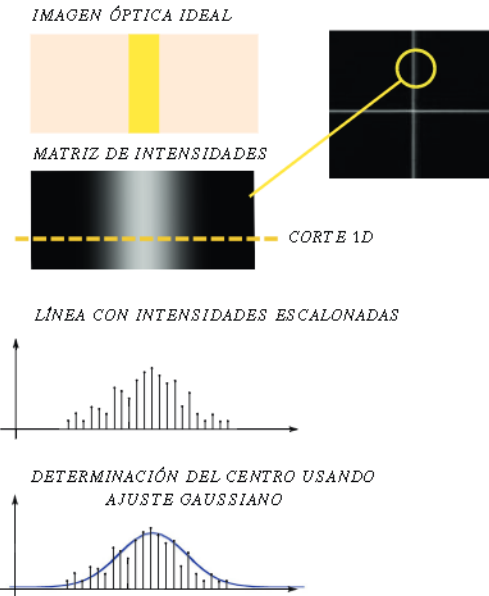


Figura 12: Diagrama de flujo que detalla la detección sub-píxel.

El modelo Facet considera el ajuste de polinomios de segundo grado alrededor del máximo valor de luminancia en el corte ortogonal a la línea, estimando el centro de ésta a nivel sub-píxel con una función de dos parámetros del modelo, (Zhao et al., 2012, Sui et al., 2009). En nuestras imágenes, el error en el ajuste de polinomios de segundo orden resulta muy dependiente del entorno seleccionado alrededor del centro grueso de la línea, lo cual puede provocar un error muy grosero, como puede verse en la Figura 13.

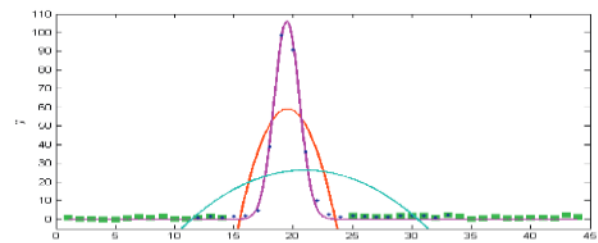


Figura 13: Aproximaciones con polinomios de segundo orden a la sección transversal de la línea. En rojo, la aproximación se realiza sobre un entorno simétrico alrededor de la moda (valores no utilizados en verde). En turquesa, aproximación hecha sobre un entorno sesgado (puntos utilizados en azul). El ajuste gaussiano está dibujado en púrpura, hecho con todos los datos.

La función Gaussiana unidimensional no padece de los problemas de definición del entorno alrededor de la moda que tienen los polinomios de segundo grado. La curva

$$S_V = a * \exp(-((x - b)/c)^2) \quad (7)$$

con tres parámetros: a y c que moderan el alto y ancho de la campana, y el centroide b , ha sido utilizada como modelo de línea en varios trabajos previos. En dichos trabajos, la línea a

detectar a nivel sub-píxel es el contorno de un objeto regular, un espécimen de metal calentado (Fabijanska et al. (2009b)), el contorno de la cavidad de encastre de un giróscopo laser (Ma et al. (2012)), entre otros. En dichos trabajos el ajuste gaussiano fue realizado sobre cortes unidimensionales localmente ortogonales a la curva contorno, usando la dirección del gradiente de la imagen en la posición de un borde "grueso", calculado previamente mediante un método estándar de detección de bordes.

En nuestro caso, las estructuras presentes en las imágenes están compuestas de líneas que corresponden a la escala y a la cruz del autocolimador, no es necesario usar la imagen gradiente para localizar los segmentos, seleccionando cortes horizontales y verticales bastan para detectar los puntos centrales de las líneas.

5.4. Procesamiento de la imagen de la escala: cálculo del valor medio estimado para la relación píxel/división

Comenzaremos estudiando la imagen de la escala del autocolimador para realizar el cálculo del valor medio estimado Δ_{XY} para la relación píxel/división.

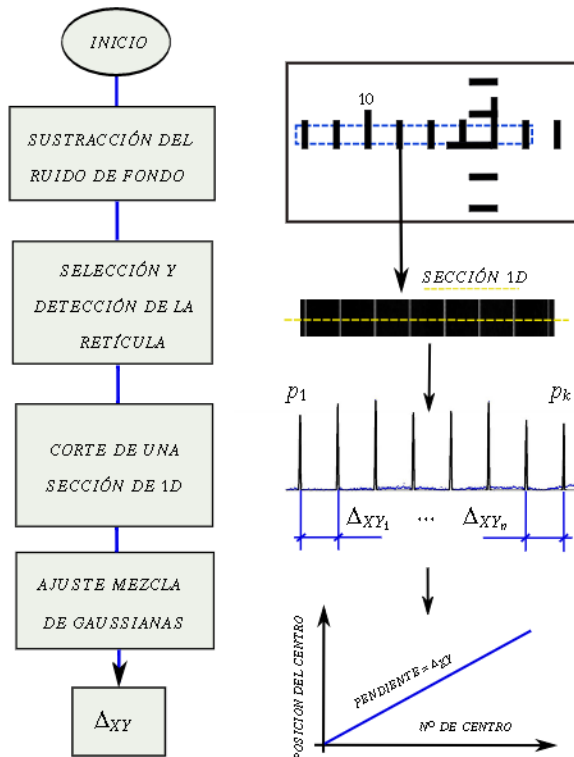


Figura 14: Diagrama de flujo que detalla el módulo de procesamiento de imágenes.

Este procesamiento se hace una sola vez, como parte de la calibración de la cámara que es parte de la interfaz. Se promediaron un total de 200 imágenes de la retícula, se le sustrajo el fondo y se recortó la zona central de la escala en dirección horizontal y vertical. En la Figura 14 mostramos un esquema del método para detectar la posición central de los segmentos que conforman la escala y su paso medio Δ_{XY} .

5.4.1. Corte horizontal

El corte horizontal ($c, f = f_0$) es una curva S_V con N modas. Podemos modelar cada Gaussiana independientemente, estimando primero el entorno de la moda, y ajustando en dicho entorno una curva. Como es necesario calcular la diferencia entre las N modas, es más eficiente parametrizar toda la curva como una suma de N gaussianas:

$$S_V = a_1 * \exp(-((x-b_1)/c_1)^2) + \dots + a_N * \exp(-((x-b_N)/c_N)^2) + \epsilon \quad (8)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma_x) \quad (9)$$

y estimar los parámetros a_i, b_i, c_i con $i = 1, \dots, N$ por medio de una regresión robusta con la función *bisquare*, (Maronna et al., 2006), usando las rutinas del Curve Fitting Toolbox de Matlab®. En la Figura 15, primer panel, mostramos el ajuste realizado sobre las muestras del corte ($c, f = 57$) de la imagen, que presenta $N = 7$ modas.

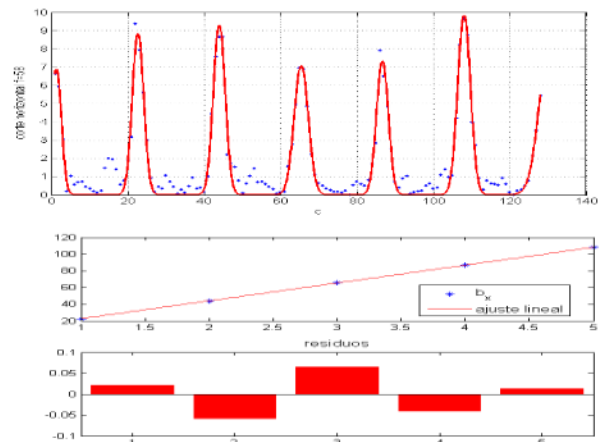


Figura 15: Corte de la imagen en ($c, f = 57$) y recta de regresión calculada sobre los centroides del ajuste de suma de Gaussianas.

La fórmula de ajuste infiere valores para los centroides b_k , $k = 1, \dots, N$, los cuales son, teóricamente, valores equiespaciados con diferencia (paso de la escala) Δ_{XY} . Dicha diferencia es estimada en este trabajo como la pendiente Δ_x de un modelo de regresión simple entre los valores b_k y las posiciones de dichos valores k ,

$$b_k = \Delta_x k + \epsilon \quad k : 1, \dots, N \quad \epsilon \sim N(0, \sigma_r). \quad (10)$$

La incertidumbre asociada a dicha estimación, redondeada a la primera cifra significativa, está dada por el intervalo de confianza normal del 95%. Para estas imágenes, el valor inferido fue de:

$$\Delta_x = (21,36 \pm 0,06) \text{ píxeles/división (95 \% de confianza)}. \quad (11)$$

5.4.2. Corte vertical

El corte vertical ($c = c_0, f$), se modela de forma similar al corte horizontal. En la Figura 16, mostramos la curva S_V

correspondiente a los valores ($c = 57, f$), modelada con una suma de 6 gaussianas ajustadas mediante una regresión robusta:

$$S_V = a_1 * \exp(-((x-b_1)/c_1)^2) + \dots + a_N * \exp(-((x-b_N)/c_N)^2) + \epsilon \quad (12)$$

$$\epsilon \sim N(0, \sigma_y). \quad (13)$$

La fórmula de ajuste infiere valores para los centroides b_k con los cuales vamos a estimar el centro de cada línea de la escala.

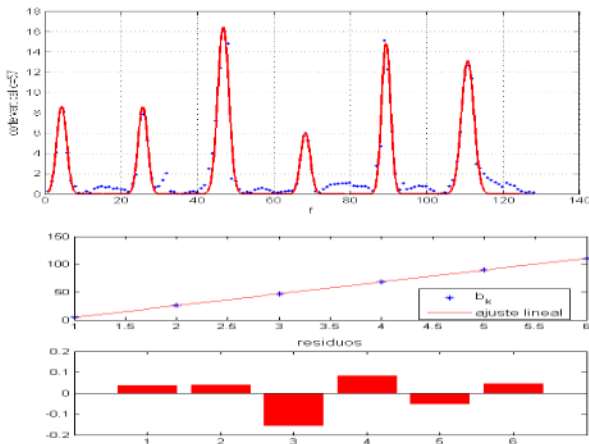


Figura 16: Corte de la imagen en ($c = 57, f$) y recta de regresión calculada sobre los centroides del ajuste de suma de Gaussianas.

El ajuste lineal por mínimos cuadrados (regresión simple) de los centroides b_k contra sus posiciones k :

$$b_k = \Delta_y k + \epsilon \quad k : 1, \dots, N \quad \epsilon \sim N(0, \sigma_\epsilon) \quad (14)$$

estima el paso de la escala de la retícula con la pendiente Δ_y del ajuste, siendo su incertidumbre el semi-intervalo de confianza normal del 95 % asociado a dicha estimación, redondeado a la primera cifra significativa. Para estas imágenes el valor obtenido fue de:

$$\Delta_y = (21, 26 \pm 0, 06) \text{píxeles/división (95 \% de confianza)}. \quad (15)$$

5.4.3. Valor medio estimado para la relación píxel/segundo de arco

Los valores sub-píxel estimados para cada eje para el paso de la escala del autocolimador coinciden dentro del intervalo de confianza del 95 %, razón por la cual podemos concluir que las escalas son lineales dentro de una incertidumbre de 0,06 píxeles/div para ambos ejes, y podemos fijar un valor medio para la calibración de la escala de

$$\Delta_{XY} = (21, 31 \pm 0, 06) \text{píxeles/división (95 \% de confianza)}. \quad (16)$$

5.5. Estimación de mediciones: Procesamiento de la imagen de la cruz.

El procesamiento de la sección anterior nos permitió conocer cuantos píxeles tiene el paso de la escala del autocolimador. El procesamiento de la cruz va a estimar la medición realizada con el autocolimador en cada ángulo generado en la experiencia.

En la Figura 17 mostramos un diagrama de flujo del procedimiento de medición que consiste en la captura de 20 imágenes independientes, su promedio y sustracción de fondo, selección de n cortes independientes, y promedio de la posición de la línea calculada como centroide de una curva gaussiana para cada corte.

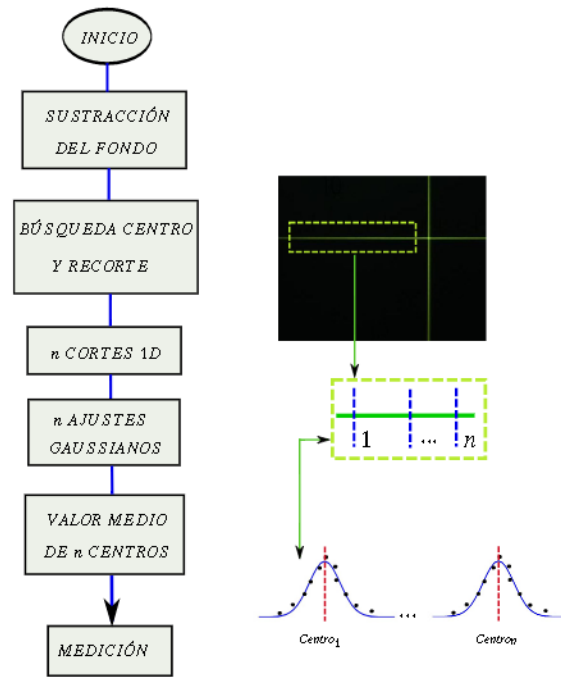


Figura 17: Diagrama de flujo del método de cálculo en unidades sub-píxel, de la posición de la cruz que genera la medición.

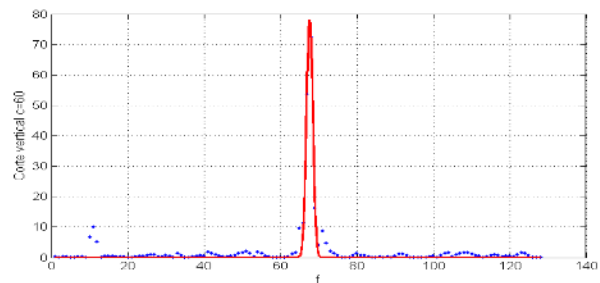


Figura 18: Corte de la imagen de la cruz en ($f, c = 60$). La posición de la moda del ajuste gaussiano (parámetro centroide B), señala la medición del ángulo de cabeceo del autocolimador en unidades sub-píxel.

En la Figura 18 mostramos el ajuste realizado al corte de la imagen en la dirección vertical, ($f, c = 60$). La posición de línea

unidimensional se estima con el centroide de una Gaussiana, como en el caso de la escala, al cual denotaremos como B . El centroide B_1 corresponde al valor 0 del nivel.

La posición relativa α_k respecto al centroide B_1 es convertida a segundos de arco mediante la fórmula:

$$\alpha_k = \frac{(B_k - (B_1)) * 60}{\Delta_{XY}} = \frac{(B_k - (B_1)) * 60}{21,31}. \quad (17)$$

La incertidumbre I en la posición de las líneas, transformado en segundos resulta aproximadamente:

$$I = \frac{0,06 * 60}{21,31} = 0,17'' \quad (18)$$

5.6. Comparación de mediciones entre sistema óptico adosado al autocolimador y nivel electrónico.

Utilizando el sistema descrito en la Sección 4.3, se realizaron 10 experiencias moviendo el tornillo micrométrico, generando ángulos medidos simultáneamente por el nivel electrónico y el sistema (cámara + autocolimador). Para realizar estas estimaciones se procesaron un total de 200 imágenes de la cruz, 20 por ángulo, y 100 de la escala en la etapa de calibración de la cámara. En la tabla 1 se muestran los valores de las mediciones tomadas, X_k para el nivel y α_k para el sistema de visión, promediando $n = 20$ valores, y la discrepancia $D = \alpha_k - X_k$ calculada.

El error cuadrático medio de dicha discrepancia para este ejemplo controlado es de

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_k D_k^2}{10}} = 0,2'' \quad (19)$$

Como este valor es muy próximo al valor de la incertidumbre I , es razonable estimar el incremento de la ganancia G en resolución del uso del sistema de visión con respecto a la resolución original del autocolimador, ($R = 0,5''$), como

$$G = \frac{R}{I} = \frac{0,5}{0,17} = 2,94 \sim 3 \quad (20)$$

Esto permite decir que mejoramos 3 veces la resolución de medición de un autocolimador Nikon 6D, reemplazando el operario por una medición automática.

Estudiando la correlación entre la discrepancia D y los valores de nivel electrónico X_k (ver Figura 19), se observa que existe una recta de pendiente no nula que ajusta a los datos con un $R^2 = 0,72$. El valor de dicha pendiente y su incertidumbre es de $0,07 \pm 0,034$, con nivel 95 % de confianza. Este comportamiento implica que los errores en las mediciones con la interfaz no son aleatorios, sino que dependen de la amplitud de los ángulos a medir, aunque todos estas discrepancias se encuentran dentro del rango de resolución $\pm 0,5$ segundo del autocolimador Nikon 6D original. Estos errores provienen de defectos de alinealidad en las lentes internas del autocolimador, errores que se acentúan en ángulos cercanos a los límites de su rango de medición.

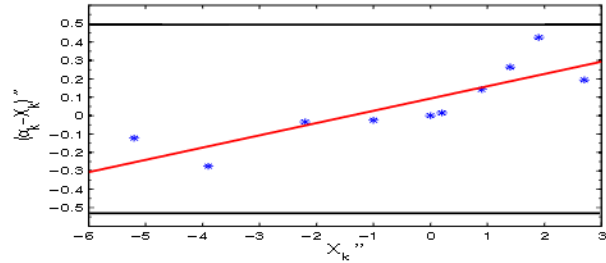


Figura 19: Gráfico de correlación entre mediciones del nivel electrónico X_k contra la discrepancia $D = (\alpha_k - X_k)$ entre dichas mediciones y las realizadas por el autocolimador con cámara, α_k . Tanto X_k como D se muestran en segundos de arco. Los ángulos medidos fueron generados por diez posiciones diferentes de la barra generadora.

Tabla 1: Mediciones de la inclinación con Nivel, cámara y discrepancia obtenida.

Nivel X_k (")	Cámara α_k (")	$(\alpha_k - X_k)$ (")
0	0	0
0.9000	1.0423	0.1423
0.2000	0.2151	0.0151
1.4000	1.6637	0.2637
1.9000	2.3245	0.4245
2.7000	2.8941	0.1941
-1.0000	-1.0249	-0.0249
-2.2000	-2.2342	-0.0342
-3.9000	-4.1747	-0.2747
-5.2000	-5.3223	-0.1223

6. Conclusiones y trabajo a futuro

En este trabajo se describen las características de una interfaz visual de medición que consta de una cámara web con sensor CMOS, y procesamiento sub-píxel en entorno Matlab®. Dicha medición se realizó procesando dos grupos de imágenes obtenidas independientemente, imágenes de la escala de la retícula e imágenes de la cruz producida durante la medición de un ángulo. El procesamiento de la escala se realiza una sola vez, pues depende solo de la resolución del sensor de la cámara y no de las mediciones a realizarse. El punto clave del cálculo de los ángulos es el modelado de cortes transversales de las líneas de la imagen como funciones gaussianas, cuya posición central infiere la posición de la línea a nivel sub-píxel.

Los resultados obtenidos con una cámara web con sensor CMOS son muy alentadores. Con una cámara de muy bajo costo se logró implementar un sistema que permite mejorar 3 veces la resolución de medición de un autocolimador Nikon 6D, reemplazando el operario por una medición automática. Sin embargo, el proceso de toma de imágenes queda limitado por el software de la cámara web. El próximo paso en el diseño de la interfaz es el reemplazo de la cámara web por una cámara con sensor CCD, objetivo intercambiable y software abierto, de modo de incorporar la calibración de la cámara totalmente al entorno Matlab®. El objetivo de la nueva cámara deberá poseer una calidad óptica que permita abarcar los cuarenta grados de apertura angular que posee la imagen del ocular del auto-

colimador con la menor aberración posible. Las alinealidades remanentes serán calibradas generando corrimientos angulares exactos. Esta calibración se realizará con el conocido método de la barra de senos, (Brucas et al., 2009). Con respecto al modelo sub-píxel, en este trabajo solo reportamos resolución, en próximos trabajos estudiaremos la incertidumbre en el cálculo del ángulo, utilizando un protocolo basado en la ISO-GUM.

English Summary

Visual interface for a Nikon 6D autocollimator through sub-pixel image processing: a case study.

Abstract

The goal of this paper is to describe the potential of a basic visual interface applied to a Nikon 6B/6D autocollimator in order to replace human operator within a “laboratory grade” measurement. The implemented optical interface consists of a CMOS sensor-based camera attached to the autocollimator ocular, camera positioning devices and a proprietary digital image processing package, built around Matlab® environment, used to analyze the reticle’s image to detect both the scale and the measuring cross at sub-pixel level. In a controlled experiment the system performance was compared against an electronic level with internationally traceable certification. Pitch angles were obtained with a resolution three times better than the original of the instrument. This example shows that the value of 0,06 pixels for the uncertainty associated with sub-pixel position of the reticle lines is realistic, allowing to continue working on a robust interface for all angle parameters that can be measured using an autocollimator.

Keywords:

Autocollimator, CMOS sensor, image processing, subpixel accuracy

Agradecimientos

Este trabajo ha sido subsidiado parcialmente por las agencias Foncyt, Secyt-UNC y Secyt-UTN, mediante los instrumentos PICT 2008-00291, PID UTN 2012- 25/E170, PID UTN 1406, PID 2012 05/B504.

Referencias

Aggarwal, N., Karl, W. C. 2006. Line detection in images through regularized Hough transform, *IEEE Transactions on Image Processing*, 15: 3, 582 – 591.

Alcock, S.G., Sawhney, K.J.S., Scott, S., Pedersen, U., Walton, R., Siewert, F., Zeschke, T., Noll, T. and Lammert, H. 2010. The Diamond-NOM: A noncontact profiler capable of characterizing optical figure error with sub-nm repeatability. *Nuclear Instruments Methods A*, 616, 224–228.

Goldsmith, N. T. (2011). Deep Focus: A digital image processing technique to produce improve focal depth in light microscopy. *Image Analysis and Stereology*, [S.l.], v. 19, n. 3, p. 163-167, may. 2011

Born, M., Wolf, W. 1998. Principles of optics, 6th edition. Cambridge University Press. Chapter IV, Image forming instrument, 233–255.

Brucas, D. and Giniotis, V. 2009. Creation of a multi-reference-angle comparator, *Optical Engineering* 48:3, 0336020–0336024.

Canabal, H., Alonso, J., Bernabeu, E. 2001. Laser beam deflectometry based on a subpixel resolution algorithm. *Optical Engineering*, 40:11 2517–2523.

Fabijanska, A., Sankowski, D. 2009a. Computer vision system for high temperature measurements of surface properties. *Machine Vision and Applications*, 20:6, 411–421.

Fabijanska, A., Sankowski, D. 2009b. Improvement of the image quality of a high-temperature vision system. *Measurement Science and Technology*, 20:104018, 1–9.

Fernandes, L., Oliveira, M., Silva, R., Crespo, G.J. 2006. A fast and accurate approach for computing the dimensions of boxes from single perspective images. *Journal of the Brazilian Computer Society*, 12:2, 19–30.

Hagara, M., Kulla, P. 2011. Edge detection with sub-pixel accuracy based on approximation of with ERF function. *Radioengineering*, 20:2, 516–524.

Hermosilla, T., Bermejo, E., Balaguer, A., Ruiz, L.A. 2008. Non-linear fourth-order image interpolation for subpixel edge detection and localization. *Image and Vision Computing*, 26:9, 1240–1248.

Hu, Z., Dang H., Li, X. A. 2008. Novel Fast Subpixel Edge Location Method Based on Sobel-OFMM. *Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics Qingdao, China*.

Ma, L., Zhou, S., Ouyang, H., He, Z., Rong, W., Sun, L. 2012. Image Sub-pixel Recognition Method for Optical Precise Adjustment. *Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation August 5 - 8, Chengdu, China, 1439–1444*.

Maronna, R., Douglas Martin, R., Yohai, V. 2006. Robust Statistics: Theory and Methods. Book Series: Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley & Sons, Ltd.

Martinelli, P., Musazzi, S., Perin, U. 1994. An autocollimator based optical system for precise angular alignment control over large exploring areas. *Review of Scientific Instruments* 65:4, 1012–1014.

Nguyen, N., Hoang, K., Jedrzejowicz, P. 2012. Detection of Tennis Court Lines for Sport Video Categorization. *Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 7654, 304–314.

Park, J.B., Lee, J.G., Lee, M.K., Lee, S. E. 2011. A glass thickness measuring system using the machine vision method. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 12:5, 769–774.

Zhao, P., Zhao, W., Duan, Z., Zhao, W. 2012. Subpixel precise Edge Extraction Algorithm Based on Facet Model. *Proceedings of the Fourth International Conference on Computational and Information Sciences (ICCCIS)*, 86– 89.

Qu, Y., Cui, C., Chen, S., Li, J. 2005. A fast subpixel edge detection method using SobelZernike moments operator, *Image and Vision Computing*, 23, 11–17.

Reid, I., Zissermann, A. 1996. Goal-directed video metrology. *Proceedings of European Conference on Computer Vision*, 647–658.

Schafer, R. 2011. What Is a Savitzky-Golay Filter?. *IEEE Signal Processing Magazine*, 111–116, July 2011.

Siewert, F., Buchheim, J., Hoft, T., Fiedler, S. Bourenkov, G., Cianci, M., Signorato, R. 2011. High resolution slope measuring deflectometry for the characterization of ultra-precise reflective X-ray optics. *Proceedings of 56th International Scientific Colloquium, Ilmenau University of Technology*, 12-16 September 2011, 1–9.

Siewert, F., Noll, T., Schlegel, T., Zeschke, T. and Lammert, H. 2004. The Nanometer Optical Component Measuring Machine: a new Sub-nm Topography Measuring Device for X-Ray Optics at BESSY, *AIP Conference Proceedings*, 705, 847–850, Melville, NY, 2004.

Soufli, R., Fernandez-Perea, M., Baker S. L., Robinson, J. C., Gullikson, E. M., Heimann, P., Yashchuk, V.V., McKinney, W.R., Schlotter, W.F., Rowen, M. 2012. Development and calibration of mirrors and gratings for the soft X-ray materials science beamline at the Linac Coherent Light Source free-electron laser. *Applied Optics*, 20:51(12), 2118–2128.

Sui, L., Sheng, W. 2009. Edge Detection Algorithm Based on Facet Model. *Computer Engineering*, 35, 187–189.

Tabatabai, A. J., Mitchel, O. R. 1989. Edge location to subpixel values in digital imagery. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 11:12, 1293–1309.

Tan, J., Ao, L., Cui, J., Kang, W. 2007. Further improvement of edge location accuracy of charge-coupled-device laser autocollimators using orthogonal Fourier-Mellin moments. *Optical Engineering*, 46:5, May 2007.