

# Interfaz Visual Electrónica para Autocolimador Nikon 6B/6D

**Resumen:** En este artículo presentamos una interfaz electrónica desarrollada para el autocolimador analógico visual Nikon 6B / 6D que permite digitalizar el instrumento original para mejorar su exactitud y resolución. La interfaz electrónica está constituida por una cámara Basler de alta definición, un dispositivo de posicionamiento y un ordenador integrado con un software para el procesamiento digital de las imágenes. El algoritmo del software desarrollado incluye dos rutinas principales: una para calibración de escala y otra para determinar la posición de las líneas de la cruz de medición. Ambas rutinas funcionan a nivel de subpíxel, permitiendo una notable mejora en la exactitud del nuevo instrumento autocolimador + interfaz (A&I). Por otro lado, la resolución obtenida con A&I es 40 veces mejor que la registrada por el sistema óptico original.

**Palabras Claves:** Autocolimador, Interfaz visual, Procesamiento de imágenes.

**Abstract:** In this paper we present an electronic interface developed for the commercial visual analogue autocollimator -Nikon 6B/6D model- that allows the original instrument to be digitized to improve accuracy and increase resolution. The electronic interface consists of a high-definition Basler camera, a positioning device and an integrated computer with a software for the digital processing of images. The algorithm of the developed software includes two main routines: one for scale calibration and another for determining the position of the measuring cross. Both routines work at the sub-pixel level, allowing for a marked improvement in the accuracy of the new autocollimator + interface instrument (A&I). On the other hand, the resolution obtained with A&I is 40 times better than that registered by the original optical system.

**Keywords:** VAutocolimador, Visual interface, image processing .

**Guillermo J. BERGUES<sup>(1)</sup>, Clemar SCHÜRRER<sup>(1)</sup>, Nancy BRAMBILLA<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Centro de investigación y transferencia en Metrología CEMETRO - Universidad Tecnológica Nacional,

Facultad Regional Córdoba

E-mail de contacto: gjbergues@gmail.com

## INTRODUCCIÓN

En las industrias de manufacturación, automovilística y aeroespacial hay una necesidad cada vez mayor de medir con exactitud los parámetros geométricos de las superficies utilizadas en los montajes opto mecánicos y en el ajuste de los instrumentos ópticos. Los autocolimadores se utilizan en este tipo de entornos industriales para la detección de movimientos angulares y para garantizar el cumplimiento de las especificaciones de ángulo, (Soufli et al.; Kirsanov et al.). También son instrumentos importantes en los laboratorios de metrología dimensional, los cuales dan la trazabilidad a la estructura productiva tecnológica de un país (Quinn et al.).

Un autocolimador es un instrumento óptico de alta exactitud que mide pequeños ángulos sin necesidad de contacto con el objeto medido. Debido a su robustez, es uno de los más adoptados en metrología, desde hace largo tiempo. Los autocolimadores operan, ya sea mediante la detección visual, cuando un operario mide a través del sistema óptico del instrumento, o mediante una detección digital, usando un fotodetector y un programa de detección, (Yuan, 2003). El primer grupo de autocolimadores puede medir ángulos tan pequeños como 0.5 segundos de arco, mientras que un autocolimador digital puede tener una resolución hasta 100 veces mayor, (Alcock et al.). Los autocolimadores digitales poseen un fotodetector que permite obtener la medición en una grilla de gran resolución espacial. De esta manera, se obtienen mayores resoluciones con solo incrementar la resolución espacial del detector; o mejorando el procesamiento de imágenes del sistema, (Tan et al.; Yuan 2005).

Este trabajo explica, siguiendo el curso de la literatura actual, el diseño e implementación de una interfaz electrónica externa para un autocolimador visual estándar Nikon 6B/6D perteneciente al Centro de investigación y transferencia en Metrología de la UTN regional Córdoba, (CEMETRO, 2017). El desarrollo presentado

permite obtener mejores prestaciones a través de un “up grade” de un instrumento ya existente en el laboratorio y además provee importantes conclusiones para el área de detección de líneas a nivel sub-píxel.

La potencialidad de la metodología de up grade del instrumento comercial cerrado mediante interfaz externa es conceptualmente aplicable a otros instrumentos similares. Las condiciones afines de partida son: la limitación propia del instrumento para aumentar su sensibilidad, la imposibilidad de renovación del detector y el sistema óptico encapsulado. La interfaz visual propuesta resuelve estas limitaciones y se puede utilizar para el seguimiento de las desviaciones angulares en tiempo real. Además, evita los errores en las observaciones analógicas: la medición en un autocolimador del tipo Nikon 6B/6D es realizada por un operario, que mide al recorrer con la vista la retícula graduada para así ubicar la cruz de medición. Este tipo de medición introduce errores del tipo aleatorio y sistemático debido a la presencia de paralaje que surge al observar la cruz de diferentes maneras según la perspectiva que se elija, situación que puede agravarse por defectos en el ojo del operador (Schurrer et al., 2014).

A continuación se indican las componentes principales del desarrollo, empezando con el instrumento y su forma de medición. En base a esta medición se procede a explicar la construcción del algoritmo de detección de líneas a nivel sub-píxel.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Autocolimador

Un autocolimador (Figura 1) es un instrumento óptico utilizado para medir pequeños desplazamientos angulares (del orden del segundo de arco).

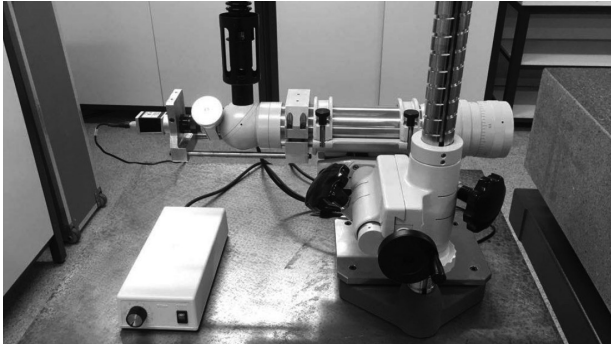


Figura 1. Autocolimador Nikon 6D y cámara Basler, ubicada en frente del ocular.

Tiene la capacidad de realizar mediciones sin hacer contacto con el objeto medido. Sus características de medición están expresadas en (Bergues et al.) y su relación de calibración está dada por:

$$tg(2. \alpha) = \frac{d}{f} \tag{1}$$

### Medición con la interfaz

En la Figura 2, se puede observar la imagen de la retícula de un autocolimador, capturada con la cámara de la interfaz. Allí se pueden distinguir, la escala de la retícula y la cruz de medición, que indica los ángulos de guiñada  $B_x$  y cabeceo  $B_y$ . A la derecha se representan las variables principales de la medición (incluyendo el paso de escala  $XY = \Delta XY$ ).

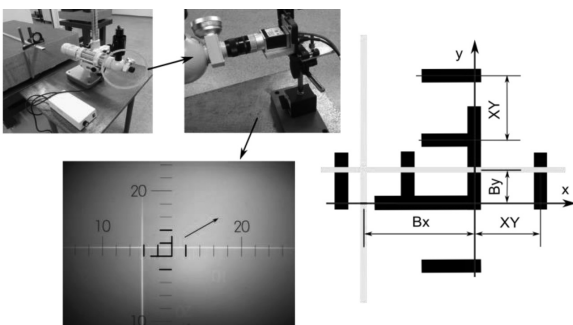


Figura 2. Correspondencia entre la imagen de la retícula y la medición. Se remarca el centro de la retícula para definir las variables ( $XY = \Delta XY$ ).

Para obtener la medición con la interfaz se siguieron los mismos pasos que realiza el operador humano cuando posiciona uno de sus ojos en el ocular del instrumento (Curtis, 2010). El problema principal que presenta esta implementación está relacionado al procesamiento de imágenes. Cuando el operario humano realiza la medición, las diferentes combinaciones entre los segmentos de la escala y la cruz se realizan instintivamente, pero para proceder de la misma manera con la interfaz visual es necesario construir un algoritmo de segmentación de imágenes. Este algoritmo debe localizar las líneas a nivel sub-píxel (en base a sus centros). Pero esto no es lo que se utiliza usualmente. Se suele trabajar con la intensidad de los píxeles de la imagen. Estas intensidades son proporcionales a la radiación de la escena capturada, por lo cual se pueden distinguir los bordes físicos como los cambios en la función intensidad de la imagen, (Ziou, 1998). Para detectar estos cambios se utilizan filtros basados en el método de los gradientes. No obstante, si se trabaja con los bordes de las líneas de la escala, no se pueden obtener los centros de dichas líneas. Por esto, no es correcto utilizar la estructura del borde como la literatura usual propone en trabajos como (Canny, 1986), ya que un borde es la parte de la imagen que delimita una región de otra, y nuestro algoritmo debe distinguir una línea de otra a partir de su centro (Schürer et al, 2014). En la sección siguiente se detallan los resultados para la implementación de este método de identificación de líneas a nivel sub-píxel.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Desarrollo del algoritmo

El objetivo de esta sección es analizar cinco diferentes algoritmos de detección de centros de líneas

a nivel sub-píxel, con el fin de obtener el detector óptimo que será utilizado para el programa de la interfaz visual. Este estudio está basado en una simulación, que examina el comportamiento de los siguientes algoritmos en un entorno controlado: Detector Hough, Detector Gaussiano, Detector Probabilístico, Detector Mínimos Cuadrados pesados y, Detector Valor Máximo.

### Simulación de línea

En la Figura 5 se puede ver la imagen de la cruz de medición (sin la escala); a una de sus líneas se le realiza un corte así puede observarse su perfil gaussiano. La simulación construye una línea similar a la capturada mediante una cámara Basler HD. Para lograr el objetivo se programó en Matlab un código que genera un conjunto de 100 imágenes de una recta definida de acuerdo a un crecimiento de intensidades dado por este perfil gaussiano, con el objetivo de estudiar la detección de las mismas y generar así un algoritmo óptimo.

Cada imagen simulada describe una sola línea desplazada paralelamente, con paso centesimal (valor sub-píxel elegido), de la anterior. El paso  $(k/100)$  se define, siendo  $j_0 = 50$ , como:

$$y_0(k) = j_0 + k/100, 1 \leq k \leq 100, \quad (2)$$

Este conjunto de imágenes de rectas permite analizar y depurar, al trabajar en un entorno conocido, el comportamiento del algoritmo en sus diferentes etapas de formación. Como se conocen las posiciones exactas de las rectas simuladas, se puede medir que tan bien detecta el algoritmo estudiado.

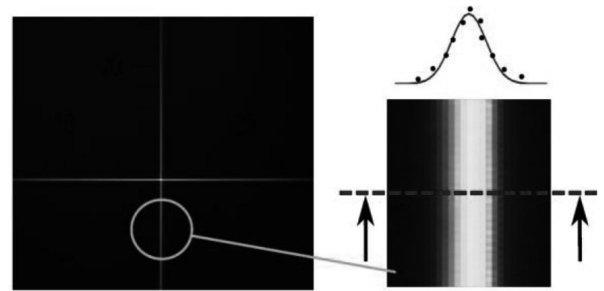


Figura 5. Perfil gaussiano de la línea capturada obtenida del segmento vertical de la cruz de medición.

### Coefficiente de Pearson.

En la simulación propuesta se tienen dos conjuntos de datos por medición. El primer conjunto es un vector con todas las posiciones de las líneas simuladas. El otro conjunto es un vector con las posiciones obtenidas a través del detector que se esté estudiando.

Es necesario averiguar que tan bien son detectadas las posiciones respecto al primer conjunto de datos. La relación entre los datos primarios y secundarios se cuantifican usando coeficientes de correlación, siendo Pearson, uno de los más usados, (Niven et al.). Este coeficiente es ampliamente utilizado en ciencia como una medida del grado de dependencia lineal entre dos variables.

### Elección del Detector.

Los detectores fueron expuestos, para asegurar su desempeño en la medición con la interfaz, a los mismos niveles de S/N (relación señal ruido) de las imágenes capturadas, que es igual a 13dB cuando son capturadas (en el peor de los casos estudiados) y luego de aplicar el filtro Satvizky-Golay, se llega a una S/N=23dB final (Bergues et al.). Para cada nivel de ruido entre estos valores de S/N se crearon 100 imágenes de una línea recta, separadas una de otra a

nivel subpíxel con un paso  $1/100$ . Teniendo en cuenta el valor sub-píxel de los centroides detectados  $c'$  con cada uno de los detectores como una función lineal de los centroides simulados  $c$ , se utiliza el coeficiente de Pearson ( $r$ ) para medir la calidad de la detección.

El detector probabilístico ( $r_p$ ) y el detector de valor máximo ( $r_m$ ) están muy influenciados por el nivel de ruido, muestran una dispersión muy grande con respecto a la recta de detección óptima. Esto limita directamente el uso de los mismos ya que las imágenes, por el momento, no pueden tener una  $S/N$  mayor. El detector de mínimos cuadrados ( $r_{WLS}$ ) no está tan influenciada por el nivel de ruido como los mencionados, sin embargo, no supera al detector Gaussiano ni al detector Hough en las detecciones que nos interesan en este análisis (sin ruido y con  $S/N = 23dB$ ). En caso de que se lograra una mejora en la  $S/N$  este detector puede ser una opción aceptable, ya que cuando trabaja a niveles altos de  $S/N$  se obtienen excelentes resultados.

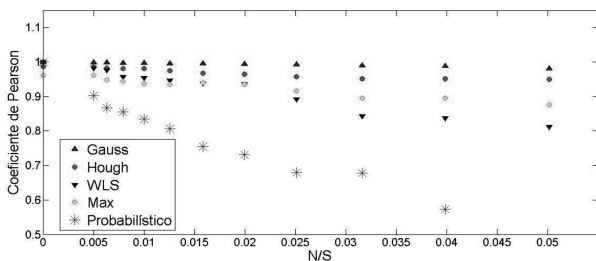


Figura 6. Características de detección de todos los algoritmos de acuerdo al nivel de ruido ( $N/S$ ) presente.

El detector de Hough ( $r_H$ ) obtiene buenos valores para los puntos pertinentes y su dispersión está cercana a la recta de regresión. Además, los valores del coeficiente de Pearson son superiores a 0.95 a partir de una  $S/N=14dB$ . Sin embargo, el detector de Gaussiano ( $r_G$ ) es el que tiene más éxito en obtener el centro de la línea recta a nivel sub-píxel, introduciendo una

incertidumbre mucho menor a la medición debido a la baja dispersión de las posiciones obtenidas.

Los resultados resumidos de este estudio se pueden observar en la Figura 6 donde tanto el Detector Gaussiano como el Hough son los mejores a medida que aumenta el ruido, determinado por la relación escalar ( $N/S$ ), la inversa de la  $S/N$ ; siendo el Gaussiano el mejor de todos.

De esta manera, se llega a la conclusión, con datos concretos, que el modelo de línea presentado como gaussiano, y el detector creado de acuerdo a este modelo, son los óptimos para cuando se trabajan con imágenes de la retícula del autocolimador.

## Resultados sobre imágenes capturadas

### Experimento controlado.

Para validar el algoritmo propuesto se diseñó un experimento de medición y se capturaron imágenes de la retícula con la interfaz visual: se generaron diferentes ángulos y se midieron con el sistema (autocolimador + cámara + software) y con un nivel electrónico (referencia de medición). El nivel es un Mahr Federal EMD-832P-



Figura 5. Experiencia de medición con el nivel electrónico y autocolimador.

48-W2; Serial Number 2095-06293. Este instrumento es trazable a niveles estándares aceptados internacionalmente y está disponible en el Laboratorio de Metrología CEMETRO-UTN situado en Córdoba (Argentina).

El procedimiento es el siguiente: en primer lugar se calibró el sistema de acuerdo al método propuesto en

(Bergues, 2014). Luego se tomaron 200 imágenes de la escala para determinar el paso de la misma a nivel sub-píxel ( $\Delta XY$ ). Ahora bien, la barra generadora de ángulos de la Figura 5 está regulada por un tornillo micrométrico (T) que regula la altura de la misma. De esta manera, el nivel electrónico (N), para la posición “k” del tornillo, genera una medición angular de referencia, por lo cual el experimento obtiene pares ordenados ( $X_k, \alpha_k$ ), siendo  $X_k$ , la lectura del nivel y  $\alpha_k$ , la del autocolimador con la interfaz (utilizando el algoritmo de la Figura 7<sub>b</sub>). Los pasos angulares fueron de aproximadamente 8 segundos de arco.

Estadísticamente el conjunto de datos ( $X_k, \alpha_k$ ), fue ajustado con modelo de regresión lineal simple:

$$\alpha_k = a \cdot X_k + b + \epsilon, \quad \epsilon \sim N(0, \sigma) \tag{3}$$

$$D_k = \alpha_k - (a \cdot X_k + b) \tag{4}$$

En la Figura 6 observamos el gráfico de las discrepancias de acuerdo a cada ángulo medido de los mejores detectores de línea. Podemos observar que todas las discrepancias están por debajo de la resolución original del instrumento sin la interfaz visual (0.5 segundos de arco).

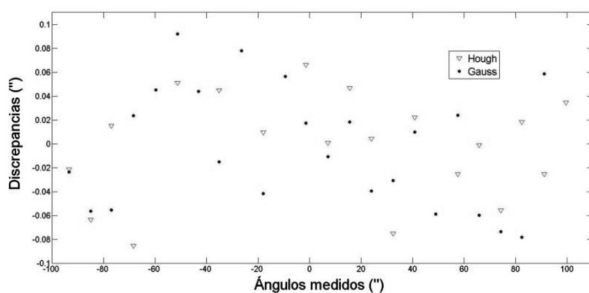


Figura 6. Características de detección de todos los algoritmos de acuerdo al nivel de ruido (N/S) presente.

El estudio de los rangos de las discrepancias va a dar la información de la ganancia en la resolución que se

busca. Se analizará solamente el detector Gaussiano, el cuál es el elegido para el algoritmo de la interfaz visual.

### Ganancia de Resolución del detector Gaussiano

En un análisis inicial, utilizando los datos de la simulación, se procede a determinar cuál es el paso mínimo que resuelve el software cuando se utiliza el detector Gaussiano para cada nivel de ruido y de acuerdo a la resolución en intensidad de la cámara (8 bits). Dados los valores del coeficiente de Pearson  $r_G$  en función de la relación  $X=N/S$ , inversa de la relación señal ruido, que se utiliza como medida de ruido en la imagen, se arma la curva de regresión que se muestra en la Figura 8.

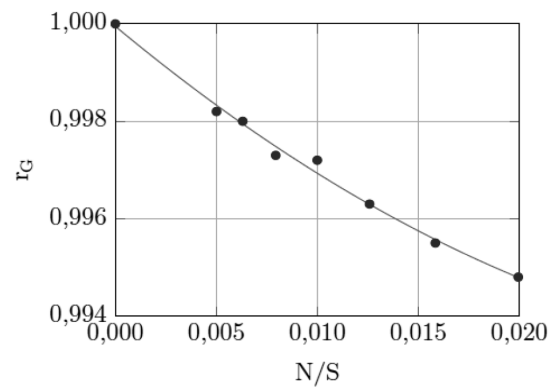


Figura 8. Gráfica del coeficiente de Pearson  $r_G$  vs.  $S/N$ .

Cada  $r_G$  de acuerdo a esta recta de ajuste posee una desviación cuadrática media (s) dada por:

$$s = L \cdot \frac{1}{\sqrt{12}} \cdot \sqrt{\frac{Np}{Np-2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{r_G^2} - 1} \tag{7}$$

Donde L es el ancho de intervalo de simulación y Np el número de puntos utilizados.

El criterio de Rayleigh (en óptica) dice que dos líneas se pueden distinguir si están separadas al menos por

la suma de sus semianchos (Figura 9). Haciendo uso de este criterio (universalmente aceptado) y extendiéndolo para nuestro caso, podemos definir la resolución mínima esperada como:  $R_n = s$ . Esta distancia está dada por la dispersión cuadrática media ( $s$ ). Esta cantidad incluye las propiedades del algoritmo, la resolución espacial de la cámara, el ancho relativo de la línea, y la resolución en intensidad de la cámara; o sea, todas las propiedades de la imagen y del procesamiento. Para nuestro caso tenemos una  $R_n = 0.012''$  (cámara 8bits).

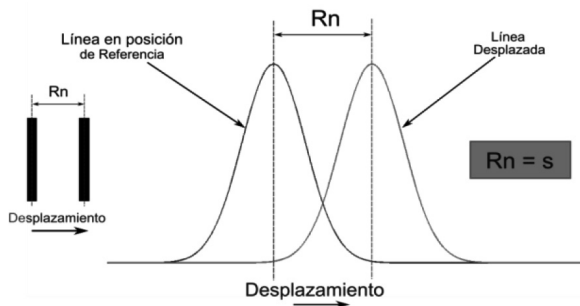


Figura 9. Resolución definida por Rayleigh. Dos líneas se distinguen si están distanciadas una de otra por la suma de sus semianchos (en este caso  $s$ ).

Por otro lado, el valor cuadrático medio ( $D_{rms}$ ) de las discrepancias que fue calculado para esta experiencia:

$$D_{rmsG} = \sqrt{\frac{\sum_k D_k^2}{25}} = 0.04'' \quad (8)$$

es la estimación de la exactitud del instrumento (auto-colimador + interfaz) como así es definido en el Vocabulario Internacional de Metrología VIM-2008, ítem 2.3 Note 3 (GUM 2008).

La definición previa de la resolución ( $R_n$ ) satisface  $R_n < D_{rms}$ , por lo tanto  $R_n$  puede ser usada para estimar la ganancia de resolución ( $G$ ) del sistema de visión propuesto con respecto a la resolución del instrumento ( $R = 0,5''$ ):

$$G = \frac{R}{R_n} = \frac{0.5}{0.012} \approx 41 \quad (9)$$

Los resultados indican un incremento notable en la resolución del instrumento cuando el operario es reemplazado por un proceso automático mediante la interfaz visual y el algoritmo propuesto.

## CONCLUSIONES

- La clave para la medición del ángulo digitalmente, a través de un procesamiento de imágenes, es el uso de secciones transversales de la imagen, correspondiente a los datos de la matriz que incluyen la información de las líneas que componen la retícula de medición. Estas secciones se modelaron a través de un ajuste con funciones gaussianas continuas.

- La creación de este algoritmo de detección de líneas a nivel sub-píxel se llevó a cabo mediante un riguroso proceso de análisis, utilizando una simulación general. En ésta se estudió detalladamente el comportamiento de varios detectores de líneas a nivel sub-píxel y se crearon un conjunto de líneas simuladas con un corrimiento a la centésima de píxel con diferentes niveles de ruido (emulando así el comportamiento de las líneas de la retícula de medición del instrumento). La elección, utilizando toda la información recopilada, permitió la definición del algoritmo. Por lo cual, este estudio no solo es importante para la comunidad metrológica, sino también que añade conclusiones valiosas para el área de detección de líneas a nivel sub-píxel. En particular porque el algoritmo está validado por una medición con instrumentos de alta resolución:

- Para corroborar todos los desarrollos introducidos en la simulación, se desarrolló una experiencia

controlada utilizando instrumentos trazables a estándares internacionales. De esta manera, mediante el uso de un nivel electrónico se validaron los resultados del conjunto autocolimador-interfaz visual y se pudo comparar la eficiencia del nuevo instrumento.

- La interfaz se creó para aumentar la resolución de las mediciones realizadas con un Autocolimador

Nikon 6B/6D de campo oscuro así como también para eliminar los errores de paralaje y sistemáticos introducidos por el operario humano. Los resultados obtenidos, sostenidos por las validaciones teórico prácticas, demuestran que el incremento en la resolución es de hasta 40 veces más que la del instrumento sin interfaz visual.



## REFERENCIAS

- R. Soufli, M. Fernández-Perea, S. L. Baker, J. C. Robinson, E. M. Gullikson, P. Heimann, V. V. Yashchuk, W. R. McKinney, W. F. Schlotter, and M. Rowen, "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*, vol. 51, no. 12, pp. 2118-2128, Apr 2012.
- A. Kirsanov, T. Barmashova, V. Zelenogorskii, and A. Potemkin, "Computer-aided two-coordinate autocollimator for measuring small angular deviations," *Instruments and Experimental Techniques*, vol. 52, no. 1, pp. 141-143, 2009.
- T. Quinn and J. Kovalevsky, "The development of modern metrology and its role today," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 363, no. 1834, pp. 2307-2327, 2005.
- J. Yuan and X. Long, "CCD-area-based autocollimator for precision small-angle measurement," *Review of Scientific Instruments*, vol. 74, no. 3, pp. 1362-1365, 2003.
- S. G. Alcock, K. J. Sawhney, S. Scott, U. Pedersen, R. Walton, F. Siewert, T. Zeschke, F. Senf, T. Noll, and H. Lammert, "The diamondnom: A non-contact pro\_ler capable of characterizing optical figure error with sub-nanometre repeatability," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 616, no. 2-3, pp. 224 -228, 2010.
- J. Tan, L. Ao, J. Cui, and W. Kang, "Further improvement of edge location accuracy of charge-coupled-device laser autocollimators using orthogonal fourier-mellin moments," *Optical Engineering*, vol. 46, no. 5, pp. 057 007-057 007-12, 2007.
- J. Yuan, X. Long, and K. Yang, "Temperature-controlled autocollimator with ultrahigh angular measuring precision," *Review of Scientific Instruments*, vol. 76, no. 12, 2005.
- CEMETRO. [Online]. <http://www.investigacion.frc.utn.edu.ar/cemetro/laboratorio.html>
- C. Schurrer, A.G. Flesia, G. Bergues, G. Ames, L. Canali, "Interfaz visual para un Autocollimador Nikon 6D mediante procesamiento de imagenes con precisión sub-píxel: un caso de estudio", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 11, pp. 327-36, 2014.
- G. J. Bergues, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, "Electronic interface with vignetting effect reduction for a Nikon 6b/6d autocollimator," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, no. 99, 2015.
- Mark Curtis, "Dimensional Measurement (5 Edition)". Industrial Press, 2010.
- Zioui, Djemel and Tabbone, Salvatore and others, "Edge detection techniques-an overview", *Pattern Recognition and Image Analysis C/C of Raspoznavaniye Obrazov I Analiz Izobrazhenii*, vol. 8, pp. 537-559, 1998.
- Canny, John, "A Computational Approach to Edge Detection", *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679-698, Nov. 1986.
- E. B. Niven and C. V. Deutsch, "Calculating a robust correlation coefficient and quantifying its uncertainty," *Computers and Geosciences*, vol. 40, no. 0, pp. 1-9, 2012.
- G. Bergues, G. Ames, L. Canali, C. Schurrer, and A. Flesia, "External visual interface for a nikon 6d autocollimator," in *Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2014 IEEE International*, pp. 35-39, May 2014.
- JCGM, 100: Evaluation of measurement data - guide to the expression of uncertainty in measurement," *JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology)*, Tech. Rep., 2008.