



Universidad de  
Oviedo



**ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

**GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**ÁREA DE INGENIERIA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**TRABAJO FIN DE GRADO Nº 1501\_223**

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA EN EL  
DIGITALIZADO DE SUPERFICIES MEDIANTE SENSORES DE  
HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA**

**D. POZO GUTIERREZ, Deva  
TUTOR: D. Pedro Fernández Álvarez**

**FECHA: Julio 2015**

## ACRÓNIMOS EMPLEADOS

- MMC:** Máquina de Medir por Coordenadas
- IPF:** Ingeniería de los Procesos de Fabricación
- HC:** Holografía Conoscópica
- CAD:** Computer-Aided Design
- TC:** Tomografía Computarizada
- TOF:** Time Of Flight (Tiempo de vuelo)
- GZL:** Gabor Zone Light
- CNC:** Control Numérico Computarizado
- LAN:** Red de área local
- CMOS:** Complementary Metal-Oxide Semiconductor
- ROG:** Read Out Gate
- CCD:** Charge-Coupled Device
- SNR:** Signal to Noise Ratio
- FFT:** Fast Fourier Transform
- API:** Application Programming Interface
- P:** Potencia
- F:** Frecuencia de trabajo
- $\gamma$  (Gamma): Distancia sensor-superficie
- $\sigma$ : Desviación típica
- MPEE:** Maximum Permissible Error for length measurement

## Índice

1.-	Introducción.....	9
2.-	Objetivos.....	11
3.-	Antecedentes.....	13
3.1	Sistemas de Digitalizado de Superficies .....	13
3.1.1	Sistemas de digitalizado con contacto .....	14
3.1.2	Sistemas de digitalizado sin contacto .....	16
3.2	La Holografía Conoscópica .....	17
3.2.1	Principio de Funcionamiento.....	17
3.2.2	Ventajas e Inconvenientes .....	20
3.3	Estado del Arte.....	23
4.-	Medios Materiales. ....	26
4.1	Descripción de la MMC.....	26
4.1.1	Especificaciones .....	27
4.2	Descripción del Sensor Conoscópico.....	32
4.2.1	Especificaciones .....	32
4.2.2	Configuración del Equipo.....	37
4.3	Integración del sensor conoscópico en la máquina MMC .....	45
4.3.1	Integración física del sensor .....	45
4.3.2	Integración electrónica del sensor .....	47
4.4	Software de Control .....	48
4.4.1	Procedimiento de calibración del sensor .....	50
4.4.2	Adquisición de medidas.....	55
4.5	Uillaje para el soporte e inclinación de las superficies .....	57
4.6	Superficies de estudio .....	59
5.-	Metodología de Trabajo.....	60
5.1	Fase I: Obtención de los parámetros óptimos de configuración .....	60
5.2	Fase II: Medición por contacto .....	61
5.3	Fase III: Medición en Discreto con HC .....	64
5.3.1	Factores de Ensayo .....	64
5.3.2	Desarrollo de los Ensayos.....	68
5.3.3	Parámetros de Análisis .....	70

5.4	Fase IV: Medición en continuo con HC.....	71
5.4.1	Factores de Ensayo .....	71
5.4.2	Desarrollo de los Ensayos.....	72
5.4.3	Parámetros de Análisis.....	74
6.-	Resultados obtenidos. ....	79
6.1	Fase I: Obtención de los parámetros P y F del sensor.....	79
6.2	Fase II: Medición por contacto.....	81
6.3	Fase III: Medición en Discreto.....	83
6.3.1	Análisis y representación gráfica de los resultados .....	83
6.3.2	Análisis estadístico mediante Minitab .....	88
6.4	Fase IV: Medición en Continuo .....	95
6.4.1	Discrepancia entre los ángulos medidos en continuo y por contacto .....	96
6.4.2	Análisis de la planitud.....	103
7.-	Conclusiones y trabajos futuros .....	111
7.1	Conclusiones .....	111
7.2	Trabajos futuros.....	112
8.-	Bibliografía .....	114

# 1.- Introducción

El presente trabajo fin de grado está desarrollado como un trabajo de investigación acerca de las tecnologías de digitalizado sin contacto, en concreto sobre la holografía conoscópica. Este sistema es uno de los métodos de medición y verificación que se están desarrollando y utilizando actualmente en el mercado y, en este caso, se encuentra integrada en una máquina de medir por coordenadas (MMC). Esta investigación está siendo llevada a cabo por el área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación (IPF) de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón.



*Figura 1.1: Máquina de medir por coordenadas con ambos sistemas de digitalizado.*

La máquina de medir por coordenadas puede incorporar un palpador, o bien un sensor de holografía conoscópica (HC). Ambos permiten el digitalizado de la superficie mediante la obtención de una serie de puntos discretos, conociendo las coordenadas de cada punto en el espacio respecto del sistema de referencia de la máquina MMC.

En este proyecto se trata de analizar el comportamiento del sensor conoscópico. Este sistema tiene importantes aplicaciones como la medición y verificación de piezas, para la inspección o su uso en la ingeniería inversa. A parte de la integración en la MMC, lo cual se va a explicar con más detalle posteriormente, también puede integrarse en otras máquinas de medición como puede ser el brazo de medir por coordenadas, o bien en máquinas-herramienta.

La medición mediante sensor conoscópico se lleva a cabo sin contacto, lo cual presenta algunas ventajas respecto a los métodos de medición por contacto. Algunos de ellos son la rapidez del método, la cantidad de puntos obtenidos, o el hecho de que, al no entrar en contacto con la superficie de la pieza a digitalizar, se evitan deformaciones o daños en esta. Además, los sensores conoscópicos pueden incorporar distintos tipos de lentes que permiten variar el campo de trabajo así como la precisión de las medidas.

Por otro lado, a pesar de todas las ventajas, aplicaciones y utilidades que presentan los sistemas de digitalizado sin contacto, los resultados obtenidos están fuertemente influidos por el comportamiento óptico de la superficie a digitalizar, de manera que los resultados serán afectados por la rugosidad de la superficie, la luz ambiental que hay en la sala, el material del que está compuesto la superficie o la inclinación relativa entre la pieza a digitalizar y el sensor. También ejercerá influencia sobre los resultados la configuración de los parámetros del sensor, como se verá más adelante.

Este trabajo fin de grado se centrará en el análisis de la influencia que tiene la inclinación relativa entre el sensor y la pieza en la precisión de las medidas realizadas con el sensor conoscópico. Para ello, se utilizará un utillaje que permite materializar los distintos ángulos dentro de un rango de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  con un intervalo de  $5^\circ$ , y que incorpora una plaquita que será la superficie a digitalizar. Dicho sensor se encuentra integrado en una máquina de medir por coordenadas y de esta manera se compararán las medidas realizadas utilizando el palpador por contacto y las realizadas mediante el sensor conoscópico, comparando la repetibilidad y precisión que presentan ambos métodos de digitalizado.

## 2.- Objetivos

Como ya se ha adelantado en la introducción, el principal objetivo de este proyecto se centra en el análisis y estudio de la influencia que presenta la inclinación de una pieza a digitalizar con respecto del sensor conoscópico, y su posterior comparación con la medición con palpador por contacto. Para ello hay que desarrollar una serie de tareas previas, que se describen a continuación.

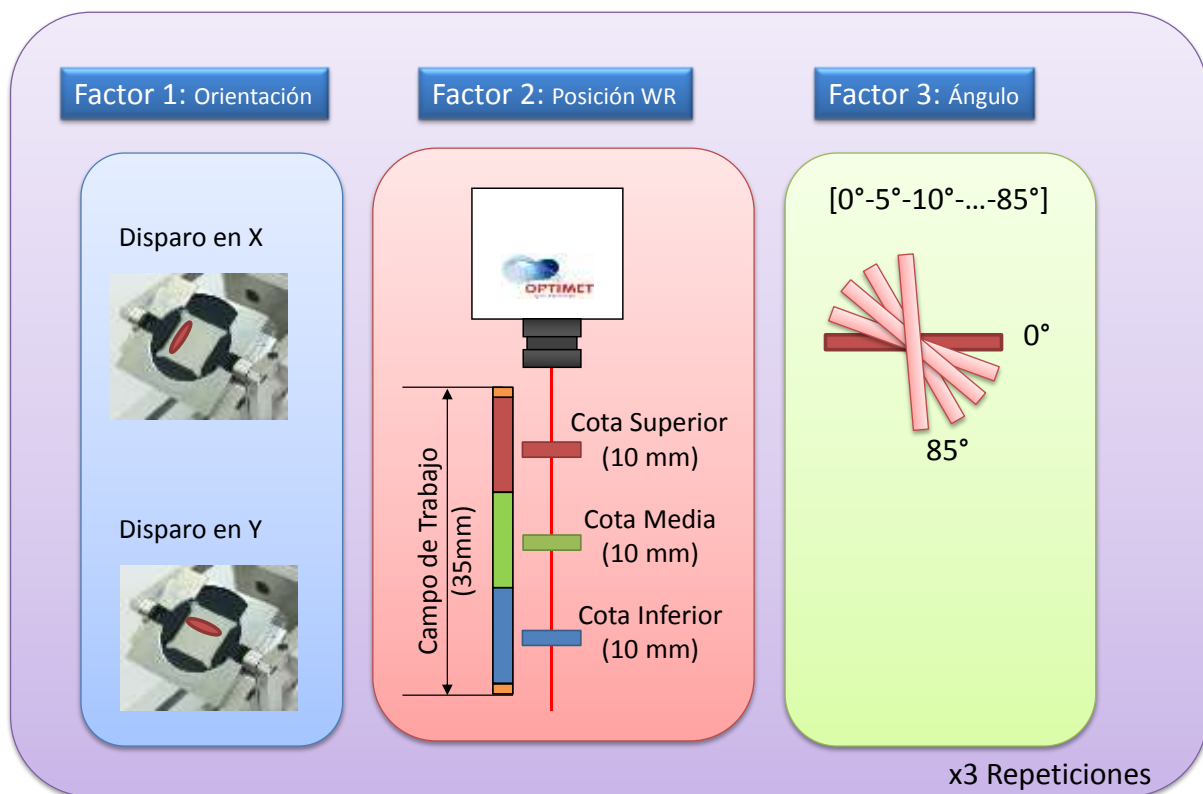
Los resultados del digitalizado mediante HC dependen de los parámetros de configuración del equipo, por lo que una de las tareas necesarias es la de obtener unos parámetros de configuración adecuados.

Una vez obtenidos los parámetros óptimos, se procederá a realizar los ensayos de digitalizado mediante holografía conoscópica. Para ello, se utilizará un utillaje en el que se montan dos probetas a digitalizar, una probeta va montada sobre una charnela que permitirá girarla (superficie angular) y fijarla con una determinada inclinación en un intervalo de cinco grados, mientras que la otra probeta (superficie de referencia) se mantiene en posición totalmente horizontal ( $0^\circ$ ). En la probeta inclinada se observará el efecto de la inclinación sobre la captura de puntos por parte del sensor HC, y también se podrá determinar el ángulo entre la superficie Angular y la de Referencia.

El utillaje empleado no es perfecto, y siempre existirá una diferencia entre los valores nominales con los que se diseñó y los valores reales de los ángulos que se materializan. Por lo que otro de los objetivos del trabajo es obtener los valores teóricos de los ángulos materializados por el utillaje. Para ello se medirán todas las posiciones del utillaje empleando el palpador de contacto de la MMC, y después estos valores se tomarán como referencia para las comparaciones.

Una vez realizadas estas tareas previas ya se procederá a realizar los ensayos de digitalizado mediante el sistema conoscópico. Aunque el objetivo principal es analizar el efecto de la inclinación, el sensor también se ve afectado por otros parámetros que se van a incluir en el estudio como son la posición de la pieza dentro del campo de trabajo del sensor y el procedimiento de captura de puntos del sistema.

Con el sensor conoscópico se pueden realizar mediciones de dos formas diferentes, o bien con el sensor estático (sin desplazamiento relativo entre la superficie y el sensor), o bien con el sensor desplazándose durante la captura de los puntos (medición en continuo). En este proyecto se realizarán ensayos con ambos métodos de captura de puntos. El sensor también tiene una particularidad en cuanto al haz laser que se emplea para digitalizar. Este haz no es simétrico y el punto que genera sobre la superficie (spot) no es circular sino que tiene forma de elipse, por lo que es de esperar un comportamiento distinto según la dirección en la que se realicen los digitalizados (dirección X o Y). Este efecto también se analizará en los ensayos comparando las dos orientaciones (X o Y) posibles. Para analizar cómo influye la distancia entre la superficie a digitalizar y el sensor, se establecerán tres zonas dentro del campo de visión del sensor, donde se realizarán los ensayos. El resumen de los factores a analizar se muestra en la figura 2.1.



*Figura 2.1: Factores a analizar.*

Finalmente, para el análisis de los resultados se emplearán herramientas de Diseño de Experimentos (DOE) integradas en Minitab.



## 7.- Conclusiones y trabajos futuros

En este último epígrafe del trabajo se desarrollarán una serie de conclusiones a las que se ha llegado mediante el conjunto de ensayos realizados y sus respectivos análisis. También se darán ideas acerca de posibles trabajos futuros susceptibles de realizar en relación con las conclusiones alcanzadas, con el fin de proseguir con las investigaciones de algunos de los aspectos de la holografía conoscópica.

### 7.1 CONCLUSIONES

- Basándonos en los resultados derivados de los ensayos en los que se han llevado a cabo las mediciones de los ángulos que materializa la plaquita mediante el palpador por contacto, se puede deducir que el utillaje tiene una elevada repetibilidad. Los datos mostrados en la tabla 6.2 indican una diferencia entre el promedio de los ángulos medidos en las tres repeticiones y los ángulos teóricos bastante pequeña, así como una desviación típica de las medidas correspondientes a las tres repeticiones pequeña también. Además, como se puede observar en la figura 6.3, la diferencia entre el valor de cada repetición y el promedio de estas para cada ángulo, no supera en ningún caso el valor de  $0,015^\circ$ , lo que muestra otra señal de que el utillaje tiene una gran repetibilidad.
- En cuanto a las mediciones efectuadas en discreto, se puede observar que la representación de la desviación típica de la  $\gamma$  en función de la inclinación presenta la forma de “curva en bañera” para ambos disparos. Además, representando las medidas correspondientes a cada posición del utillaje, se observa que para la posición inferior se obtienen resultados un poco peores, aumentando la desviación típica. Por otra parte, el fabricante del sensor conoscópico asegura que este permite medir hasta inclinaciones de  $85^\circ$ . Se ha comprobado que para el caso de disparo en el eje X no es posible obtener puntos válidos, mientras que para el disparo en el eje Y sí es posible la obtención de puntos, pero no pueden considerarse muy fiables ni de buena calidad.
- De las mediciones en continuo se puede concluir, en lo referente a las planitudes del plano angular, que estas disminuyen a medida que va aumentando la inclinación para todas las posiciones del utillaje y para ambos tipos de disparo.

Por lo tanto, se puede deducir que la inclinación de la plaquita tiene un efecto positivo en la planitud, ya que esta disminuye a mayor ángulo.

- Teniendo en cuenta el análisis estadístico de la validez (especialmente los *Interaction Plots*) de los resultados tanto para las mediciones en discreto como en continuo, se puede asumir razonablemente que se obtienen mejores resultados para el disparo en Y, obteniéndose discrepancias y desviaciones típicas menores para este tipo de disparo, con la excepción de la planitud que parece tener un comportamiento un poco mejor para el disparo en X. Asimismo, se han logrado resultados peores para la posición inferior del utillaje, siendo estos mejores para las posiciones media y superior sin diferencias reseñables entre ellas.

## 7.2 TRABAJOS FUTUROS

En función de las conclusiones deducidas de este trabajo, se pueden plantear posibles trabajos que podrían ser realizados en un futuro con el fin de profundizar en la investigación de la holografía conoscópica y así aumentar el conocimiento que se tiene de la misma, dado que al tratarse de una técnica novedosa, aún es escaso.

- En relación con los resultados y gráficos obtenidos en la parte de las mediciones en discreto, cabe destacar la forma del gráfico de la desviación típica de la  $\gamma$ . Era de esperar que para ángulos pequeños la desviación típica fuese pequeña y que esta aumentase a medida que se aumenta la inclinación. Sin embargo, se observa que para ángulos pequeños se da una desviación mayor, disminuyendo para ángulos intermedios y volviendo a aumentar para ángulos mayores. Por lo tanto, este sería un aspecto cuyas causas son susceptibles de investigar.
- La planitud observada por el sistema conoscópico no tiene nada que ver con la obtenida en las mediciones en contacto. Estas discrepancias también indican que sería adecuado analizar el origen de las mismas y, si son puntos espúreos, incluir filtros que eliminen estos puntos de manera que los valores para la planitud coincidan más con los observados en la medida por contacto.
- En el proyecto realizado las superficies de digitalizado que se han utilizado han sido unas plaquitas erosionadas. Podría plantearse como trabajo futuro realizar esta serie de ensayos y su correspondiente estudio y análisis en superficies

diferentes de digitalizado, como pueden ser las plaquitas mecanizadas o pintadas de blanco.

## 8.- Bibliografía

P. Fernández, D. Blanco, C. Rico, G. Valiño y S. Mateos, «Influence of Surface Position along the Working Range of Conoscopic Holography Sensors on Dimensional Verification AISI 316 Wire EDM Machined Surfaces», *Sensors*, vol. 14, pp. 4495-4512, 2014.

Vukašinović, N., Bračun, D., Možina, J., & Duhovnik, J. (2010). The influence of incident angle, object colour and distance on CNC laser scanning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 50(1-4), 265-274.

Álvarez, I.; Enguita, J.M.; Frade, M.; Marina, J.; Ojea, G., «On-Line Metrology with Conoscopic Holography: Beyond Triangulation», *Sensors* 2009, 9, 7021-7037.

Fernández P., Blanco D., Valiño G., Hoang H., Suárez L., Mateos S., «Integration of a Conoscopic Holography Sensor on a CMM.» *Proceedings of the 4th Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC); Cádiz, Spain. 21–23 September 2012; pp. 225–232.*

Zaimovic-Uzunovic, N., & Lemes, S. (2010). Influences of surface parameters on laser 3d scanning. In *10th International Symposium on Measurement and Quality Control* (pp. 5-9).

G. Sirat y D. Psaltis, «Conoscopic holography», *Optic Letters*, 1984.

L. Bin, L. Feng, L. Hongqi, C. Hui, M. Xinyong y P. Fangyu, «A measurement strategy and an error-compensation model for the on-machine laser measurement of large-scale free-form surfaces,» *Measurement Science and Technology*, 2014.

Optimet, «OEM Manual for OPTIMET'S Mark 10 Ver. 1».

Vukašinović, N., Bračun, D., Možina, J., & Duhovnik, J. (2012). A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(9-12), 1097-1104.

Vukašinović, N., 2010, «The Influence of Surface Topology on the Accuracy of Laser Triangulation Scanning Results», *Journal of Mechanical Engineering* 56(2010)1, 23-30.

Vukašinović, N., Možina, J., & Duhovnik, J. (2012). Correlation between incident angle, measurement distance, object colour and the number of acquired points at CNC laser scanning. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 58(1), 23-28.

Isheil, A., Gonnet, J. P., Joannic, D., & Fontaine, J. F. (2011). Systematic error correction of a 3D laser scanning measurement device. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(1), 16-24.

A. Paviotti, S. Carmignato, A. Voltan, N. Laurenti y G. Cortelazzo, «Estimating angle-dependent systematic error and measurement uncertainty for a conoscopic holography measurement system,» *Three-Dimensional Imaging Metrology*, 2009.

<http://www.mitutoyo.com.mx/Newsletter/Articulo10.html>

<http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/8697-Digitalizacion-3D.html>

<http://www.renishaw.es/es/cabezales-orientables-motorizados-ph10-plus--6684>

[http://www.hexagonmetrology.es/PC-DMIS-CMM\\_388.htm](http://www.hexagonmetrology.es/PC-DMIS-CMM_388.htm)