

UNIVERSIDAD DE OVIEDO



Programa de Doctorado en Diseño, Construcción y
Fabricación en Ingeniería

INTEGRACIÓN EN MÁQUINAS CNC DE
SISTEMAS DE VERIFICACIÓN BASADOS EN
HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA

por

Pablo Zapico García

Director de Tesis Doctoral:

Dr. D José Carlos Rico Fernández

Gijón, septiembre de 2017

Índice

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1	CONTEXTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	5
2	ESTADO DEL ARTE.....	7
2.1	MEDICIÓN POR COORDENADAS EN MÁQUINAS CNC.....	7
2.1.1	Medición por coordenadas.....	7
2.1.2	Máquinas de Medición por Coordenadas.....	11
2.1.3	Medición en Máquinas-Herramienta CNC de producción.....	29
2.1.4	Tecnologías de digitalizado utilizadas en máquinas CNC.....	38
2.2	INTEGRACIÓN DE SENSORES DE DIGITALIZADO SIN CONTACTO EN MÁQUINAS CNC..	43
2.2.1	Instalación del sensor en máquina.....	46
2.2.2	Calibración del sistema.....	53
2.2.3	Automatización del proceso de medida.....	64
3	SENSORES PUNTUALES DE HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA.....	71
3.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA HOLOGRAFÍA CONOSCÓPICA PUNTUAL.....	71
3.2	CARACTERÍSTICAS DE LA HC FRENTE A OTRAS TÉCNICAS SIN CONTACTO.....	78
3.3	SENSOR DE HC UTILIZADO EN EL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....	79
3.3.1	Cálculo de la medida: Señal ROG.....	81
3.3.2	Interfaz y posibilidades de integración del sensor.....	83
3.3.3	Parámetros de ajuste del sensor y calidad de la medida.....	87
3.3.4	Modos de captura del sensor y función Auto-exposición.....	93
3.3.5	Especificaciones y lentes disponibles.....	96
3.3.6	Aplicación de sensores puntuales HC a tareas de medición por coordenadas.....	97
4	INTEGRACIÓN DE SENSORES HC EN MÁQUINAS CNC.....	101
4.1	METODOLOGÍA GENERAL DE INTEGRACIÓN.....	101
4.2	INTEGRACIÓN DE SENSOR HC EN MMC.....	103
4.2.1	Fase de instalación del sensor en máquina.....	107
4.2.2	Fase de calibración del sistema.....	116
4.2.3	Fase de automatización del proceso de medición.....	125
4.2.4	Ejemplos de integración en la MMC.....	149
4.3	INTEGRACIÓN DE SENSOR HC EN CM.....	159
4.3.1	Fase de instalación del sensor en máquina.....	162
4.3.2	Fase de calibración del sistema.....	167
4.3.3	Fase de automatización del proceso de medición.....	172
4.3.4	Ejemplos de integración en el CM.....	181

5	CARACTERIZACIÓN DE SENSORES HC INTEGRADOS EN MÁQUINAS CNC	191
5.1	INTRODUCCIÓN	191
5.2	ASPECTOS GENERALES DE LOS PARÁMETROS E INDICADORES DE CALIDAD	194
5.2.1	Comportamiento en función de parámetros internos del sensor	196
5.2.2	Comportamiento en función de factores externos al sensor	202
5.3	TRABAJOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SENSOR HC INTEGRADO	213
5.3.1	Influencia de la posición en el DOF	213
5.3.2	Influencia del proceso de fabricación y del acabado superficial	227
5.3.3	Influencia del ángulo de incidencia en la medida de ángulos de inclinación	237
5.3.4	Influencia del tipo de digitalizado	244
5.3.5	Influencia de diferentes procedimientos de filtrado	252
5.3.6	Influencia de la temperatura	257
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	265
6.1	CONCLUSIONES	265
6.2	TRABAJOS FUTUROS	278
6.3	DISEMINACIÓN DE RESULTADOS	282
7	REFERENCIAS	283

ANEXOS

A	MODELOS DE CORRECCIÓN DE ERRORES GEOMÉTRICOS	297
A.1	MODELO PARA MMC DE TIPO PUENTE MÓVIL	297
A.2	MODELO PARA FRESADORA DE TIPO XYFZC	304
B	MÉTODO DE MINIMIZACIÓN PARA CALIBRACIÓN	309
B.1	INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE GAUSS-NEWTON	309
B.2	APLICACIÓN A LA INTEGRACIÓN EN LA MMC	311
B.3	APLICACIÓN A LA INTEGRACIÓN EN EL CM	313
C	RESUMEN DE ESPECIFICACIONES SENSOR CONOPOINT-10	315
C.1	INFORMACIÓN GENERAL DEL SENSOR Y DE LENTES DISPONIBLES	315
D	CARRERAS DE ACELERACIÓN Y DECELERACIÓN MMC DEA SWIFT	319
E	CÓDIGO DE MACRO CN PARA SINCRONIZACIÓN CON APLICACIÓN	323

Notación

	Significado
AACMM	<i>Articulated Arm Coordinate Measuring Machine</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
CAA Matrix	<i>Computer-Aided Accuracy Matrix</i>
CAD	Diseño asistido por computador (<i>Computer-Aided Desing</i>)
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CNC	Control Numérico Computarizado
CM	Centro de Mecanizado
DCC	<i>Direct Computer Control</i>
DEA	<i>Digital Electronics Automation</i>
DMIS	<i>Dimensional Measurement Interface Specification</i>
GDL	Grado de Libertad
HC	Holografía Conoscópica
HMI	<i>Human Machine Interface</i>
MHCN	Máquina Herramienta de Control Numérico
MMC	Máquina de Medición por Coordenadas
OMM	Sistemas de medición en máquina (<i>On-Machine Measurement</i>)
TTL	<i>Transistor-Transistor Logic</i>
VB.NET	Lenguaje de programación <i>VisualBasic.Net</i>

Resumen

Esta Tesis Doctoral analiza la capacidad de integración de sensores sin contacto basados en la tecnología de Holografía Conoscópica (HC) en máquinas de producción CNC, así como su aplicabilidad a tareas de inspección y verificación.

Con este objetivo, se ha desarrollado una metodología práctica de aplicación en la que la integración de un sensor HC dentro de una máquina CNC se divide en tres niveles: la instalación física del sensor en la máquina, la calibración del sistema máquina-sensor y la automatización del proceso de medida. Como muestra de aplicación, se integró el sensor en dos máquinas CNC, un Centro de Mecanizado de 3 ejes (CM) y una Máquina de Medición por Coordenadas de 3 ejes (MMC).

La instalación del sensor en ambos casos se realizó permitiendo el mayor número posible de grados de libertad (GDL) y preservando la integridad tanto de la máquina como del sensor. En el caso de la integración en el CM se alcanzaron 3 GDL, instalando el sensor en el husillo. Para la MMC se consiguieron 2 GDL, instalando el sensor en el carro de la máquina. Además, en el caso de la MMC se pudieron conectar directamente las señales de los transductores de la máquina al hardware del sensor, lo que permitió realizar operaciones de digitalizado punto a punto y en modo continuo. Estas conexiones no se pudieron realizar para la integración en el CM, limitando en este caso el digitalizado al de tipo punto a punto.

Con el fin de expresar la información capturada por el sensor HC en el sistema de referencia de la máquina (segundo nivel de integración), se desarrolló un procedimiento de calibración extrínseco del sistema sensor-máquina basado en el modelo de sólidos-rígidos para ambos casos de integración. La gran ventaja de este modelo de calibración es que utiliza el modelo de compensación de errores de la máquina para conocer en el sistema de referencia de la máquina, tanto la posición del origen del sensor, como la del punto digitalizado (spot láser del sensor).

El último nivel de integración se refiere a la automatización del proceso de medida e incluye desde la planificación y realización del digitalizado hasta el procesado de la información capturada por el sensor. Para ello, se optó por desarrollar una aplicación informática específica con interfaz gráfica que permite al usuario interactuar y extraer información de la misma. Además de las herramientas citadas, la aplicación cuenta con herramientas de reglaje del sistema y de visualización de resultados.

Finalizada la integración, se realizaron diversos ensayos de caracterización con el fin de explorar el comportamiento del conjunto sensor-máquina y la calidad de los resultados obtenidos con el mismo bajo diferentes condiciones (parámetros de configuración del sensor, modo de utilización del sensor y características de las piezas a medir). Los resultados fueron contrastados con los obtenidos por técnicas convencionales de medición por contacto.

A partir de la integración y de los ensayos de caracterización del sensor, se puede concluir que es posible la aplicación de los sensores HC analizados a la inspección y digitalizado sobre máquinas CNC. En cualquier caso, esta integración está condicionada a las características de las máquinas, especialmente al tipo de transductores de medida de desplazamiento de la máquina y a la posibilidad de comunicación entre el hardware y software del sensor y el control de la máquina. En la calidad de la información capturada por el sensor HC, además de las características de la máquina en la que se ha integrado, influyen factores propios de los dispositivos de digitalizado de tipo óptico, tanto los relacionados con la pieza digitalizada (material, acabado, inclinación, etc.) como con el propio sensor (distancia focal, profundidad de campo, etc.). Es importante hacer notar que, aunque algunos de estos factores no pueden ser eliminados, un ajuste adecuado de los parámetros de proceso puede llevar a una importante reducción de su efecto.

Abstract

This Doctoral Thesis deals with the integration feasibility of non-contact sensors based on Conoscopic Holography (CH) technology in CNC production machines, as well as its applicability to inspection and verification tasks.

With this objective, a practical application methodology has been developed. This methodology divides the integration of a CH sensor into a CNC machine in three levels: physical installation of the sensor in the machine, calibration of the machine-sensor system and automation of the measurement process. As an application example, the sensor was integrated in two CNC machines, a 3-axis Machining Centre (MC) and a 3-axis Coordinate Measuring Machine (CMM).

The installation of the sensor in both cases was performed with as many degrees of freedom (DF) as possible and preserving the integrity of both machine and sensor. In the CM integration, 3 DF were possible by installing the sensor in the spindle. In the CMM, 2 DF were obtained by installing the sensor in the machine carriage. In addition, in the case of the CMM, the encoder signals of the machine were connected directly to the sensor hardware. In this case, this allowed for implementing both Discrete and Continuous digitizing modes. These connections were not possible in the case of CM so that digitizing was reduced to Discrete type.

In order to express the information captured by the CH sensor within the machine reference system (second level of integration), an extrinsic calibration procedure for the sensor-machine system was developed, based on the solid-rigid model in both integration cases. The great advantage of this calibration model is that it uses the error compensation map of the machine to express both the position of the sensor reference origin and the digitized point (laser spot), with respect to the machine reference system.

The last level of integration refers to the automation of the measurement process. It includes from the digitizing and planning process to the processing of the information captured by the sensor. For that, a specific software application was developed which includes a graphical interface for the user to interact and extract information from the application. In addition to the mentioned tools, the application also includes other utilities for adjustment of the system and visualization of results.

After the integration, several characterization tests were carried out in order to explore the behaviour of the sensor-machine system and the quality of results met by it under different conditions (sensor configuration parameters, mode of sensor use and different characteristics of the parts). Results were compared to those obtained using conventional contact techniques.

In view of the integration and characterization tests of the sensor, it can be stated that it is feasible to apply CH sensors for inspection and digitizing purposes in CNC machines.

In any case, integration is conditioned by the own characteristics of each machine, especially the type of transducers used for displacement measurement and the communication capability between the sensor and the machine controller. In addition to the characteristics of the machine in which the sensor has been integrated, other factors that have influence on the quality of the information captured by the CH sensor are related to the intrinsic characteristics of the optical digitizing device. Some of these factors have to do with the digitized part (material, roughness, tilt, etc.) whereas others are related to the sensor optics (focal length, depth of field, etc.). Although some of these factors can not be eliminated, it is important to highlight that an adequate adjustment of the process parameters can lead to a significant reduction of their effect.

Introducción y objetivos

1.1 Contexto de la investigación

El mercado actual exige una entrega rápida de productos de alta calidad, siendo la precisión en la fabricación un factor importante. Habitualmente, la inspección de componentes fabricados en los sistemas productivos flexibles se ha venido realizando en máquinas concebidas a tal efecto, como las máquinas de medición por coordenadas (Figura 1.1a). La utilización de este tipo de máquinas tiene como principal inconveniente, la necesidad de contar con un ambiente de trabajo controlado, lo que en muchos casos exige su ubicación en una zona separada de la planta de producción y de las máquinas en las que se fabricaron los componentes. Esta situación, conlleva un aumento del tiempo de producción, pérdidas de precisión por reposicionamiento de la pieza, la dificultad añadida para mover componentes en el caso de que sean pesados o de gran tamaño, etc.

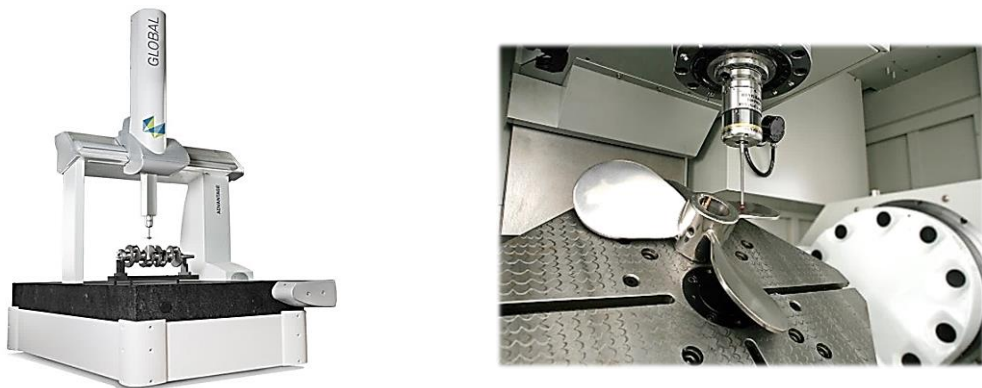


Figura 1.1. Sistemas de medición por coordenadas: (a) máquina de medición por coordenadas (cortesía Hexagon Metrology), (b) sonda de medición en centro de mecanizado (cortesía Renishaw).

Esto ha hecho que en los últimos años se hayan desarrollado sistemas de medición en máquina (*On-Machine Measurement*, OMM) que permiten realizar la inspección de componentes en la propia máquina en la que se fabrican (Figura 1.1b). Además de la ventaja en la reducción del tiempo de producción, estos sistemas también permiten un aumento de la calidad de los componentes fabricados, ya que se elimina el problema de reposicionamiento de la pieza por cambio de máquina. Asimismo, la detección de errores en la pieza fabricada con respecto a las especificaciones permite en algunos casos, realizar correcciones en máquina con el fin de reducir o eliminar dichas desviaciones.

Actualmente, existen numerosos ejemplos de sistemas comerciales OMM basados en su mayoría en sistemas convencionales de medición por contacto, tales como los palpadores de contacto, por lo general de medición punto a punto. Estos sistemas concebidos para