

Resumen Tesis Doctoral

Perfilometría Láser Submicrométrica de Superficies Ópticamente Pulidas Iyad Al-Khatib

La metrología de superficies es uno de los campos científicos y tecnológicos en los que se registra una notable actividad en estos últimos años. Los rápidos avances, tanto en las aplicaciones de nuevos materiales como en la mejora de los procesos de producción, han provocado una mayor exigencia del mercado en relación con las especificaciones de los instrumentos de inspección de superficies y con la automatización de los procesos de verificación y control de calidad.

Los dispositivos de contacto mecánico han sido los principales sistemas perfilométricos que se han estado utilizando durante más de cincuenta años. De hecho, son los únicos instrumentos para los que existen actualmente normas estándar aprobadas por los comités internacionales de normalización. Sin embargo, estos instrumentos producen una elevada presión sobre la superficie que, en muchos casos, provoca la deformación mecánica o la destrucción de la misma. Además, los perfilómetros de contacto obtienen la información de un perfil de manera secuencial, punto a punto, por lo que el tiempo de medida suele ser muy elevado. Por estos motivos, la evolución natural de la metrología de superficies se orienta hacia los sistemas sin contacto mecánico.

Además, todos los sistemas que en la actualidad son operativos requieren una gran accesibilidad a la superficie cuyo perfil debe obtenerse y, por consiguiente, no son aplicables para la obtención de perfiles de superficies con geometría complicada, de difícil acceso, con grandes pendientes locales y de reducidas dimensiones como son, por ejemplo, las de las boquillas, los inyectores de combustible o las hileras de diamante. De hecho, uno de los retos que se planteó en el año 1994 al equipo en el que se ha desarrollado este trabajo y que dio lugar al proyecto de esta Tesis, fue la obtención de un sistema con el que fuese posible medir el perfil interior de las mencionadas hileras de diamante.

Para tratar de dar respuesta a este reto, pero también para superar otras de las limitaciones que plantean las distintas técnicas perfilométricas existentes en la actualidad, el trabajo que se ha realizado en el proyecto puede resumirse de manera esquemática de la siguiente manera:

1. Estudio de nuevos métodos de perfilometría sin contacto para obtener perfiles y texturas de superficies ópticamente pulidas con resolución submicrométrica. Los métodos propuestos han demostrado ser también aplicables en situaciones de superficies con geometría complicada y de difícil acceso.
2. Estudio, diseño, construcción y análisis de prestaciones de los correspondientes instrumentos – prototipos basados en los nuevos métodos propuestos.
3. Aplicación de estos prototipos a la:
 - Perfilometría de superficies ópticas
 - Perfilometría de hileras de diamante natural y policristalino

Los nuevos sistemas perfilométricos que se han desarrollado en este trabajo se derivan del concepto clásico de triangulación y del esquema de la microscopia confocal y se basan en la observación del comportamiento óptico de la imagen de un punto iluminado de la superficie.

El trabajo contenido en la presente memoria se ha estructurado en seis capítulos y un anexo. Los tres primeros capítulos son una introducción al tema y una revisión del estado del arte de los sistemas perfilométricos conocidos, mientras que el trabajo propiamente dicho se desarrolla en los dos capítulos siguientes, dejando el sexto para las conclusiones y propuestas de trabajos futuros.

Iyad Al-Khatib

En este tipo de sistemas una punta fabricada en un material duro (“stylus”) se pone en contacto mecánico con la superficie y se produce un barrido a lo largo de la línea sobre la que quiere obtenerse la medida del perfil o la rugosidad. Un sistema inductivo de medida convierte el desplazamiento vertical experimentado por el stylus en una señal eléctrica que se procesa y se visualiza en forma de perfil.

El trabajo que aquí se presenta se ha realizado en el marco de un equipo de investigación del Departamento de Óptica y Optometría de la Universitat Politècnica de Catalunya. A lo largo de los últimos diez años, este equipo ha desarrollado varios proyectos de I+D relacionados con la obtención de superficies de precisión mediante procesos de fabricación que implican la utilización de tecnología láser.

En dichos proyectos se han utilizado prácticamente todos los métodos, técnicas e instrumentos comerciales disponibles para determinar los perfiles y topografías de las superficies obtenidas. Esto incluye desde los sistemas convencionales de perfilometría mecánica por contacto hasta las modernas técnicas de microscopia interferencial por corrimiento de fase y de barrido de coherencia con luz blanca [Creath, 1988; Lupon, 1992; Laguarda, 1992].

La mayor parte de los instrumentos sin contacto que pueden encontrarse actualmente en el mercado se basan en sensores ópticos que funcionan de acuerdo con alguno de los siguientes principios: triangulación, focalización dinámica, interferometría o proyección de franjas. Existen también técnicas deflectométricas basadas en la medida de la aberración de un frente de onda, pero sólo son aplicables a superficies cóncavas ópticamente pulidas y, en cualquier caso, su utilización cuantitativa en el caso de superficies con topografías complicadas entraña todavía una gran dificultad.

Para comprender la dificultad que comporta la observación y la medida de este tipo de componentes basta decir que la observación con un microscopio metalográfico de la parte interior del núcleo de una hilera no aporta ningún tipo de señal observable,

puesto que la geometría cilíndrico-cónica de su superficie y la calidad óptica de su nivel de pulido hacen que toda la luz que introducimos por el cono de entrada del núcleo acaba saliendo, después de reflejarse parcialmente en la superficie interior, por el cono de salida. Así pues, el orificio de una hilera se comporta como un verdadero “agujero negro” frente a la observación microscópica convencional.

En la primera etapa del plan de trabajo se propuso un nuevo método de medida basado en el esquema de la microscopia confocal. El objetivo a alcanzar con este sistema era la obtención de perfiles de superficies ópticamente pulidas, con resolución submicrométrica para cualquier dimensión de las mismas, de elevadas pendientes locales y también para condiciones de geometrías complicadas y de difícil acceso. Para ello se estudiaron los parámetros óptimos de los sistemas de iluminación y de observación, las características del sistema de desplazamiento de las muestras, la estrategia óptima de formación de imágenes a partir de la reflexión y/o difusión del haz focalizado sobre la superficie, el estudio y optimización de los correspondientes algoritmos perfilométricos y las especificaciones de los equipos necesarios para la captación, digitalización y procesado de las imágenes obtenidas. Al finalizar esta etapa, el prototipo desarrollado demostró que era capaz de satisfacer los objetivos propuestos y, en particular, permitió la medida de superficies ópticamente pulidas en componentes ópticos y oftálmicos, y también de los perfiles interiores de hileras de diamante policristalino, lo cual nunca había sido logrado mediante un sistema sin contacto mecánico hasta entonces.

El principal problema detectado al final de esta etapa fue la imposibilidad de medir con el primer prototipo los perfiles de las hileras de diamante natural monocristalino, para las que no había sido posible observar ningún tipo de señal reflejada que pudiera ser utilizada para la obtención de la información perfilométrica. Para resolver este problema tuvimos que comenzar la segunda fase de nuestro trabajo donde se diseñó y construyó un segundo prototipo de sistema perfilométrico basado en un esquema absolutamente innovador al que denominamos “confocal desdoblado”. También se desarrollaron nuevos algoritmos perfilométricos y se implementaron las técnicas para medir un perfil completo en este tipo de muestras. La característica más destacable de este nuevo sistema, además de su originalidad, es su intercambio de elementos con el primero, pues la mayoría de las características y parámetros óptimos establecidos en el primer prototipo son aprovechables en el segundo.

Cabe destacar que, en el momento de iniciar este trabajo no existía en el mercado ningún instrumento sin contacto para obtener la medida de los perfiles interiores de hileras de diamante, ni tampoco se encontró ninguna referencia bibliográfica relacionada con algún trabajo científico en esta dirección. Sin embargo, en el año 1996, en pleno desarrollo de este trabajo, apareció un instrumento denominado “Die Profiler” fabricado por una pequeña empresa noruega denominada Conóptica, el cual estaba orientado exclusivamente a la medida de este tipo de muestras. Este sistema se basa en la proyección de las sombras producidas por los perfiles interiores de las hileras, lo cual introduce una serie de limitaciones en sus especificaciones. En todo caso, tuvimos acceso a uno de estos instrumentos con lo que fue posible establecer las comparaciones con los resultados obtenidos con nuestros prototipos.

Por otra parte, a lo largo del desarrollo de este trabajo han ido apareciendo también algunas publicaciones sobre las posibilidades de aplicación del concepto de la microscopia confocal a la perfilometría de superficies. Por ello, se ha considerado oportuno hacer una recopilación exhaustiva de estos trabajos para situar nuestra aportación en el contexto de los avances que ha experimentado recientemente esta tecnología.

El primer capítulo es este mismo y contiene una introducción general al trabajo.

El capítulo 2 contiene una revisión exhaustiva de los sistemas perfilométricos sin contacto, con contacto y los de microscopia de barrido con sonda. Se analizan con especial interés sus especificaciones técnicas, los rangos accesibles y las limitaciones de estos sistemas.

En el capítulo 3 se hace un breve repaso de los fundamentos teóricos de la microscopia confocal, con el doble objetivo de establecer los fundamentos teóricos en los que se basan nuestros sistemas y de lograr que la presente memoria sea autocontenida en la medida de lo posible.

En el capítulo 4 se plantea el diseño conceptual de los dos nuevos sistemas perfilométricos que se proponen en este trabajo. También se definen y analizan los algoritmos perfilométricos que se aplican para obtener un punto perfilométrico y para medir un perfil completo sobre una superficie. Finalmente, se analizan las incertidumbres asociadas a las medidas obtenidas, así como las limitaciones de los

prototipos desarrollados relacionadas con las especificaciones de los componentes utilizados.

En el capítulo 5 se describe el desarrollo de los dos prototipos experimentales propuestos en el capítulo anterior. Dicho desarrollo incluye la construcción de los dos prototipos, su puesta a punto, su calibración y la verificación experimental del correcto funcionamiento de los algoritmos. También se presentan en este capítulo los resultados experimentales obtenidos en la medida de distintas muestras representativas, así como la verificación de las especificaciones esperadas a partir de la medida de algunos patrones estándar. El capítulo se completa estableciendo una comparación con los resultados obtenidos mediante otras técnicas e instrumentos de medida.

Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones obtenidas tras el presente estudio, donde se resaltan las aportaciones originales que el desarrollo de esta Tesis ha significado y se proponen líneas de trabajo futuro.

La presentación de esta memoria culmina un proceso de formación en el Programa de Doctorado en Ingeniería Óptica del Departamento de Óptica y Optometría de la Universitat Politècnica de Catalunya. La transferencia de los principales resultados obtenidos en este proyecto de investigación, por lo que respecta a la medida de los perfiles interiores de hileras de diamante natural y policristalino, se realizó en 1998 a la empresa Esteves-PDT, la cual ha financiado parcialmente este trabajo.