

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 381 519**

51 Int. Cl.:  
**G01B 11/30** (2006.01)  
**G01B 11/27** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 96 Número de solicitud europea: **07723569 .5**  
96 Fecha de presentación: **24.03.2007**  
97 Número de publicación de la solicitud: **2002204**  
97 Fecha de publicación de la solicitud: **17.12.2008**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la determinación y medición de desviaciones en la forma y ondulaciones en piezas rotacionalmente simétricas**

30 Prioridad:  
**31.03.2006 DE 102006015627**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**29.05.2012**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**29.05.2012**

73 Titular/es:  
**INNOVENT E.V.  
PRUSSINGSTRASSE 27B  
07745 JENA, DE**

72 Inventor/es:  
**HERTZSCH, Albrecht y  
KRÖGER. Knut**

74 Agente/Representante:  
**Tomas Gil, Tesifonte Enrique**

ES 2 381 519 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento y dispositivo para la determinación y medición de desviaciones en la forma y ondulaciones en piezas rotacionalmente simétricas.

5

[0001] La invención se refiere a un procedimiento y un dispositivo para la determinación y medición de desviaciones en la forma y ondulaciones en superficies técnicas rotacionalmente simétricas en dirección perimetral, que con poco esfuerzo de medición y gran estabilidad frente a molestas influencias medioambientales, registran y evalúan rápidamente de forma cuantitativa desviaciones en la forma y ondulaciones.

10

[0002] Superficies rotacionalmente simétricas (p.ej. en el caso del cilindro o de la esfera) se utilizan técnicamente en su mayoría como superficies de obturación estáticas o dinámicas o como superficies deslizantes o de rodadura. Las desviaciones de configuración de orden 1. y 2. (desviaciones en la forma y ondulaciones) tienen por consiguiente una influencia especialmente negativa sobre el comportamiento funcional de estas superficies. En consecuencia, para piezas de trabajo rotacionalmente simétricas regirán criterios de calidad especialmente elevados en lo que se refiere a desviaciones en la forma y ondulaciones.

15

[0003] Las desviaciones en la forma durante procedimientos de trabajo mecanizados resultan por lo general de la deformación elástica de la unidad de trabajo (herramienta, portaherramientas etc.), de la deformación elástica de la pieza de trabajo o errores en la pista de rodadura de la herramienta o de la pieza de trabajo durante el procedimiento. Las ondulaciones son producidas por oscilaciones de la herramienta o pieza de trabajo en el desalajo de viruta. La influencia de estas magnitudes perturbadoras sobre las desviaciones de configuración de orden 1. y 2. depende de manera compleja de una serie de parámetros tecnológicos del procedimiento de trabajo (p.ej. las condiciones de corte en el desalajo de viruta, del material de la pieza de trabajo, etc.). Para evaluar la función de la superficie de la pieza de trabajo elaborada y para permitir un análisis del proceso de elaboración, es deseable una rápida medición de estas desviaciones de configuración.

20

25

[0004] Las desviaciones en la forma, así como las ondulaciones de superficies rotacionalmente simétricas se miden según el estado de la técnica de manera prioritaria con ayuda de aparatos de control de forma táctiles. En condiciones de laboratorio estos procedimientos de medición de rugosidad permiten registrar desviaciones de configuración con alta precisión. Estos dispositivos de medición requieren sin embargo, un ajuste costoso del objeto de prueba así como extensos tiempos de medición.

30

[0005] Como procedimientos de medición ópticos rápidos para el registro de perfiles de superficies de objetos de prueba rotacionalmente simétricos se conocen además procedimientos de autofocus y procedimientos de triangulación.

35

[0006] Los procedimientos de autofocus y los procedimientos de triangulación miden punto por punto las diferencias de altura en referencia a una pista de palpación ideal. En el procedimiento de triangulación se determina el poder de resolución vertical principalmente por el ángulo de incidencia del haz de luz de medición y la escala de reproducción del objetivo de medición. En caso de que en el proceso de triangulación se emplee como señal de medición únicamente la luz dispersa del objeto de prueba (p.ej. documento US 4,373,804), se puede alcanzar un poder de resolución vertical de como máximo 0,1  $\mu\text{m}$  o 0.005% del área de medición, el cual es suficiente para la medición de la forma, pero que sin embargo, no permite un análisis preciso de las ondulaciones. Del mismo modo, el método no se puede aplicar en superficies reflejantes. Si el proceso de triangulación se basa en la medición del reflejo directo (p.ej. documento US 2002/0145740), es realizable un poder de resolución vertical en el área de los nanómetros, sin embargo, delimitado el procedimiento sobre superficies reflejantes cuando se trata de una zona de medición vertical pequeña.

40

45

[0007] Los sensores de autofocus miden la altura de un punto de la superficie iluminado con respecto a una pista de referencia con alta resolución vertical con al mismo tiempo amplia zona de medición (compárese p.ej. documento EP 0271646 B1), sin embargo, con superficies ásperas precisan tiempos de medición largos, puesto que la posición del punto de foco varía notablemente debido a la rugosidad de la superficie del objeto de prueba y es necesario regular el objetivo para cada punto de medición. La principal desventaja del proceso de triangulación y de autofocus es sin embargo, que los errores de la pista de rodadura influyen directamente en el resultado de medición y los procedimientos necesitan por consiguiente mesas giratorias de precisión para la rotación del objeto de prueba y un ajuste preciso del objeto de prueba. Deben evitarse además oscilaciones del sistema de medida y/o del objeto de prueba y de este modo, lograr resultados de medición precisos sólo en condiciones de laboratorio. De este modo, las desviaciones de la vía de medición provocadas por excentricidad e inclinación, p.ej. en mediciones de redondez de objetos de prueba cilíndricos,

50

55

se minimizan con instrucciones de ajuste costosas (compárese documento US 4,731,934 ). Este tipo de procedimientos no son adecuados para una rápida medición cercana al proceso y en proceso de las ondulaciones y desviaciones de forma. En el documento US 5,926,781 se presenta un algoritmo para la corrección de la excentricidad posterior de los datos de medición de alturas de perfil por procedimiento de aproximación. Aunque según este proceso el desplazamiento del punto central de la sección transversal respecto al centro de rotación se puede determinar bien, la posterior aproximación del perfil de alturas en dirección perimetral con palpación angular equidistante al punto central de la sección transversal únicamente puede aproximar el perfil de altura real, cuando la excentricidad y todos los errores de medición y de la pista de rodadura son pequeños. Por consiguiente, el procedimiento no se adecua igualmente para una aplicación en proceso.

[0008] Procedimientos en los cuales los errores de la pista de rodadura apenas influyen en los resultados de medición durante la palpación del perfil, son procedimientos de medición de ángulo. Un haz de luz de medición ilumina la superficie del objeto de prueba con un ángulo de incidencia definido  $\Theta_i$  (compárese fig. 1). El haz de luz reflejado por la superficie del objeto de prueba es registrable en un nivel S y la desviación X del haz de luz reflejado respecto a una posición calibrada cero  $S_0$  puede ser registrada y valorada. La posición cero de un receptor que se encuentra en el nivel S caracteriza el ángulo de reflexión  $\Theta_r$  de una superficie plana ideal  $F_0$ , que se encuentra en posición horizontal en la pista de palpación y cuyos  $\bar{n}_0$  normales de superficie corresponden a los gradientes de la pista de palpación. Un desplazamiento lateral X respecto de la posición cero en el receptor de posición resulta siempre que el gradiente local  $\bar{n}_r$  del perfil de superficie real iluminado de  $F_r$  difiere del gradiente de la pista de palpación. Este desplazamiento es proporcional a la tangente del ángulo de diferencia  $\Delta\Theta_{r,n}$ , a partir de la cual se puede calcular según la ley de reflexión el ángulo de inclinación local  $d\phi_n$ . Para determinar el perfil de alturas de un objeto de prueba con ayuda de una medición de ángulos, se palpa la superficie del objeto de prueba  $F_r$  con una amplitud de intervalo de palpación dx y con integración de las inclinaciones de las superficies locales  $d\phi_n$  se calcula el perfil del objeto de prueba. Con aprovechamiento lógico de la ley de palanca, se puede reforzar en el caso de un largo recorrido luminoso del haz de luz reflectado, el ángulo de inclinación local de la superficie iluminada múltiples veces frente a errores en la pista de rodadura (p.ej. desplazamiento de altura respecto a la pista de palpación). De este modo, el procedimiento es también insensible frente a oscilaciones verticales del objeto prueba (véanse p.ej. los documentos DE 3503858 A1, DE 202004009727 U1) y permite, además, la determinación de la rugosidad, cuando el comportamiento de dispersión del haz de luz reflectado se mide p.ej. con una línea CCD resuelta en ángulo (documento US 4,859,062).

[0009] En la medición de la redondez por medio de una mesa giratoria para la determinación del perfil de la superficie de un objeto de prueba cilíndrico en dirección perimetral, la influencia de la excentricidad así como de oscilaciones verticales en la determinación de la altura del perfil según el procedimiento de medición de ángulo citado anteriormente es poco crítica. Con ayuda de un filtrado de paso alto (documento JP 57-161610 A) el primer componente de Fourier introducido por la excentricidad puede ser filtrado del perfil de alturas, mientras que componentes de oscilación verticales de onda corta, pasan prácticamente desapercibidos en el resultado de medición debido a los cortos intervalos de integración. Sin embargo, la excentricidad del objeto de prueba también conduce a una distorsión de los puntos de palpación en sentido perimetral. La influencia resultante de la excentricidad sobre el comportamiento de reflexión del rayo de medición en una rotación completa del objeto de prueba se ilustra a modo de ejemplo en la figura 2. Un segmento de cilindro a examinar, por ejemplo, de una onda, se presenta como círculo en varias fases de rotación, donde con el punto central del círculo M se gira alrededor del eje de rotación P. La amplitud de la excentricidad resulta de la distancia entre P y M. Dependiendo de la orientación del ángulo de la excentricidad, el lugar de iluminación A oscila alrededor del punto perpendicular B del objeto de prueba. Con una amplitud de intervalo angular de rotación fija  $\Delta\Phi$  la palpación real del ángulo sobre la superficie del objeto de prueba varía con excentricidad. Las alturas de perfil del objeto de prueba determinadas con la ayuda de la medición de diferencia de ángulo no resultan por consiguiente, de una palpación equidistante del perímetro del cilindro, sino de distancias de palpación, que según la posición acimutal de la excentricidad oscilan de forma senoidal alrededor de un valor medio, lo cual está representado en la figura 3. Particularmente, para el análisis de ondulaciones de alta frecuencia, esta deformación es crítica, puesto que conduce a un ampliación de la banda de frecuencia que evita una detección de la frecuencia principal real existente del espectro Fourier del perfil circunferencial.

[0010] Con ayuda de multisensores (compárese p.ej. W. Gao, S. Kiyono, T. Sugawara: *High-accuracy roundness measurement by new error separation method*; Prec. Eng. 21, 123-133 (1997)) se pueden registrar y corregir excentricidades en la rotación del objeto de prueba, sin embargo, los sensores se deben sintonizar correctamente uno con otro y el perímetro del objeto de prueba debe ser accesible de manera libre para los sensores a través de un campo angular grande, para poder disponer varios sensores dispuestos de manera radial, lo cual no sólo requiere un esfuerzo considerable, sino que a menudo también fracasa a causa de circunstancias técnicas reales existentes.

[0011] Del estado de la técnica se conocen además dispositivos, que usan otros procedimientos de medición, estos son:

5 [0012] En el documento US 4,596,460 se presenta un dispositivo compacto para la determinación de la distancia con ayuda de un procedimiento de triangulación. En éste se desacopla y acopla con ayuda de un concepto de óptica sencillo, tanto la trayectoria del rayo de iluminación como de observación a través de los mismos componentes ópticos. Una lente de enfoque proyecta el haz de rayos axial externo de la fuente de iluminación sobre una superficie de objeto de prueba. Para ello se utiliza un prisma pentagonal dirigido hacia la lente para la desviación del rayo. Un lado del prisma dirige la trayectoria del rayo de iluminación de tal manera, que el haz de iluminación convergente cae bajo un ángulo de incidencia definido sobre la superficie del objeto de prueba. El haz de luz reflejado en la superficie del objeto de prueba se recibe a través del mismo prisma y se redirige por el otro lado del prisma pentagonal. La trayectoria del rayo de observación se recoge sobre la lente y se reproduce sobre una unidad de recepción al otro lado del eje óptico como haz externo en el lado opuesto al eje para la trayectoria del rayo de iluminación. El concepto óptico compacto exige un ajuste muy preciso de todos los componentes ópticos unos respecto de otros, lo cual es especialmente costoso y propenso a fallos a causa de la conducción de haz axial externa. Una simplificación del ajuste se daría, cuando los componentes ópticos se agrupan con ayuda de espaciadores mecánicos precisos. Sin embargo, la fabricación de este tipo de componentes es costosa y dispendiosa.

20 [0013] En el documento EP 0 628 787 A2 se presenta un sencillo sensor compacto para el control óptico del estado de una superficie. Desde la superficie del objeto de prueba se refleja y dispersa un haz de luz incidente. Con ayuda de dos sensores se registran p.ej. las intensidades de la luz polarizada vertical y paralela del haz de luz reflejado directamente y se correlacionan entre sí. Para ello, tal como se describe en él, también se puede usar entre otros, un prisma, donde un separador de radiación de polarización escinde los dos componentes de polarización y con una superficie de espejo los dirige a otra superficie de prisma. El desplazamiento de rayos de los dos componentes de polarización, introducido por la placa de separación de rayos de polarización y la superficie de espejo, se puede utilizar, para disponer directamente dos receptores en la superficie del prisma, que miden las intensidades por separado. El prisma sirve como cuerpo de referencia para la desviación y captación del rayo. Sin embargo, los ángulos de los prismas, como allí se ha propuesto, no son adecuados para provocar una supresión de luz de parásita precisa.

30 [0014] En otra aplicación (compárese documento DE 44 34 822 C1) se utilizan dos prismas exclusivamente para la conducción del rayo. Por ello se debe realizar una óptica económica, que requiera un esfuerzo de ajuste escaso. Tras un único ajuste vertical de las fuentes de iluminación hacia las bases de los prismas, los ángulos de los prismas indican las coordenadas de referencia del sistema de medida. De este modo, se utiliza por ejemplo una superficie de prisma como superficie de contacto para una unidad de recepción. Además, por optimización de los ángulos de los prismas se pueden minimizar o excluir reflejos parasitarios. Sin embargo, esta disposición se refiere a la medición de una diferencia de recorrido por medio de dos rayos reflejados para la determinación del espesor de materiales ópticamente transparentes.

40 [0015] Para poder poner en práctica un procedimiento para la determinación de la ondulación y la desviación de forma cercano a la línea de producción, debe estar concebido y construido como dispositivo robusto.

[0016] La presente invención se basa por lo tanto en la tarea de indicar un procedimiento y un dispositivo adecuado para la realización del procedimiento, que no presenten las desventajas del estado de la técnica descritas anteriormente, en el que las desviaciones en la forma y las ondulaciones deben poder registrarse y valorarse rápidamente de manera cuantitativa con un escaso esfuerzo de medición y alta estabilidad frente a influencias ambientales molestas, el estado óptico de las superficies a examinar (superficies altamente reflectantes o más rugosas) no ejerce ninguna influencia en el procedimiento y por consiguiente, la solución propuesta se puede aplicar de manera ventajosa cerca del proceso o durante el proceso.

50 [0017] Partiendo de procedimientos conocidos para la determinación de desviaciones en la forma y ondulaciones de piezas rotacionalmente simétricas, en los que un rayo de luz de medición se irradia con un ángulo prefijable en dirección perimetral de la pieza de muestra y el rayo de luz de medición reflejado se detecta al girar la pieza de muestra alrededor de un eje vertical al sentido perimetral, la tarea de la presente invención se soluciona con el objeto de la reivindicación 1.

55 [0018] La siguiente descripción general debe servir para una comprensión facilitada de la invención:

[0019] Un dispositivo de iluminación ilumina la superficie rotacionalmente simétrica a analizar en un ángulo de incidencia definido  $\Theta_i$  en dirección perimetral. El centro de gravedad del haz de luz reflejado por la superficie se detecta con ayuda de un sensor sensible a la posición optoelectrónico. Al rotar el objeto de prueba alrededor de un eje P, cuyo centro se encuentra próximo al punto central de la sección transversal M y que se extiende casi paralelo al eje del objeto de prueba, el haz de luz de medición reflejado bajo el ángulo  $\Theta_{r,n}$  se desvía en dependencia del gradiente de superficie local de la zona de superficie iluminada  $\bar{n}_n$ . La diferencia de ángulo entre el ángulo de reflexión real e ideal  $\Theta_{r,n}-\Theta_r$  (en el caso ideal el gradiente de superficie  $\bar{n}_0$  se encuentra en posición vertical respecto a la pista de palpación) se mide en la superficie S sensible a la posición del receptor optoelectrónico como diferencia de recorrido X (compárese fig.1). Esta desviación se registra por ejemplo en al menos dos rotaciones cerradas del objeto de prueba con amplitud de intervalo angular equidistante alrededor del eje de rotación P. Con distancia conocida entre sensor y superficie del objeto prueba, las señales de posición X medidas pueden convertirse en ángulos de reflexión  $\Theta_{r,n}$ . Según la ley de reflexión

$$\Theta^{L'U} = \Theta^I + \int (q\phi^U - \Theta^I)'$$

donde  $\Theta_{r,n}$  es el ángulo de reflexión local y  $\Theta_i$  el ángulo de incidencia del haz de luz de medición, pueden determinarse los ángulos de inclinación de superficie locales  $d\phi_n$  del objeto de prueba en dirección perimetral. Errores locales de la pista de rodadura (p.ej. errores en el desplazamiento por rotación del dispositivo de tensión del objeto de prueba), ondulaciones por holgura en el cojinete del dispositivo de tensión, así como oscilaciones de alta frecuencia entre superficie del objeto de prueba y sensor, dificultan sólo ligeramente la precisión de los valores de medición, puesto que como consecuencia del largo "brazo de palanca" del haz de luz de medición reflejado, la señal de medición registra principalmente modificaciones de ángulo del reflejo directo. Sin embargo, desviaciones de conducción de onda larga, como p.ej. las causadas por la excentricidad, conducen a desplazamientos de onda larga del punto de iluminación A y con ello a una palpación irregular del perímetro del objeto de prueba. En caso de que el punto central de la sección transversal M del objeto de prueba no se encuentre en el eje giratorio P, la curvatura de la superficie cilíndrica del objeto de prueba provocará una rotación  $d\phi_e$  del gradiente de la superficie  $\bar{n}_c$  del punto de superficie iluminado A en dependencia de la amplitud de la excentricidad PM, de la posición angular de la excentricidad, del radio R del objeto de prueba y del ángulo de incidencia  $\Theta_i$ . El reflejo directo cambia su dirección en la diferencia de ángulo  $d\Theta_e$  con rotación excéntrica del objeto de prueba. Una desviación de ángulo medida a partir de un perfil de superficie cilíndrico real con rotación excéntrica resulta como sigue:

$$q\Theta^L(\Phi) = \Theta^L - \nabla\Theta^{L'U}(\Phi) - q\Theta^S(\Phi)$$

[0020] La señal de medición  $d\Theta_r(\Phi)$  se compone de una desviación local de onda corta del gradiente de superficie  $\bar{n}_n$  a la vertical ideal de la normal de la pista de palpación  $\bar{n}_0$ , que causa la ondulación o desviación en la forma del perfil de superficie real, y una desviación de onda larga de las normales  $\bar{n}_c$  a  $\bar{n}_0$ , que es introducida por la excentricidad (compárese con anterior fig. 2).

[0021] Para minimizar las influencias de errores de la excentricidad en la determinación de la inclinación del perfil local, los componentes de onda larga de la señal de medición  $d\Theta_e(\Phi)$  se usan directamente para la corrección. Según la Ley de reflexión, se calculan para cada valor de ángulo de rotación  $\Phi$  los valores de inclinación  $d\phi_e$  de onda larga con ayuda de la señal de medición filtrada con filtro de paso bajo. El desplazamiento de ángulo  $d\phi_e$  corresponde exactamente a la distorsión de la palpación equidistante del ángulo con rotación excéntrica del objeto de prueba. Las diferencias de ángulo medidas son por lo tanto una función  $d\Theta_r(\Phi+d\phi_e)$ . Con ayuda de una interpolación de los valores de medición con una división de ángulos equidistante, se puede compensar por lo tanto la influencia de la excentricidad sin información adicional según la invención. La fig. 4 muestra la influencia de la excentricidad sobre una señal no corregida y una señal corregida. Se parte por ejemplo de un cilindro que presenta una ondulación de 200 ondas por perímetro con una amplitud de 500nm y una desviación en la forma de tres ondas por perímetro con una amplitud de 5µm, el cual se gira de manera excéntrica, donde el desplazamiento entre el eje de rotación P y el punto central del círculo M debe ser un décimo del radio del cilindro. La fig. 4a muestra la desviación de perfil del cilindro de la forma circular ideal en representación revestida. En la Figura 4b se representa la desviación de ángulo resultante de un rayo de medición para la palpación de ángulos equidistante alrededor de P. Junto a la proporción de señal de alta frecuencia, que es una medida para la diferencia local de ángulo de la ondulación, se acentúa claramente el desplazamiento de onda larga, que es introducida por la excentricidad. Un análisis de Fourier de estos valores de ángulo medidos, tal como se ha llevado a cabo aquí según el estado de la técnica, no da sin embargo, ninguna señal unívoca con el número de ondas dominante 200, como se presenta a modo de ejemplo en las representaciones anteriores de la fig. 4c. Sin embargo, si la señal

conseguida se reelabora con la corrección según la invención, se forma de manera clara la ondulación dominante en el espectro de Fourier (compárese fig.4d). Con ayuda del procedimiento según la invención se pueden corregir de manera sencilla incluso las excentricidades altas (hasta aproximadamente una décima parte del diámetro de la muestra) en el desarrollo de la señal. La única condición es que la superficie de recepción S sea lo bastante grande como para registrar todos los valores de ángulo en la rotación.

[0022] Puesto que la medición de ángulos óptica sin contacto posibilita velocidades de medición altas en muestras cilíndricas, es ventajoso llevar a cabo la medición para varias rotaciones. En caso de que se pueda suponer un movimiento rotatorio con la misma forma, es posible una palpación de ángulo equidistante sin mesas de ajuste de señales precisas. Con la ayuda de un sistema de temporización externo (p.ej. un generador de impulsos de ondas cuadradas) el valor de ángulo del objeto de prueba en rotación se palpa con una frecuencia fija. Si como detector sensible a la posición se utiliza p.ej. un fotodiodo sensible a la posición PSD, tal como ocurre ventajosamente en el marco de esta invención, se obtienen dos señales típicas de lugar. La señal de suma del PSD mide la intensidad total de la luz reflejada por el objeto de prueba y por consiguiente los coeficientes de reflexión local. La señal de diferencia del PSD caracteriza la desviación de ángulo local del reflejo directo y con ello el ángulo de inclinación local del perfil real. Ambas señales sirven para el análisis de correlación, para determinar el número de puntos de palpación de una rotación completa y con ello la amplitud del intervalo angular de la medición. Con la ayuda de ambas señales es posible tanto para superficies rugosas como también para superficies altamente reflectantes, efectuar determinaciones de perfil precisas en rotaciones múltiples en dirección perimetral con sistema de temporización externo. Incluso en el caso prácticamente excluido, de cilindros reflectantes ideales, éstos se pueden medir, según el procedimiento propuesto, por la introducción de una excentricidad artificial según el procedimiento propuesto, donde la excentricidad se puede corregir en el análisis de datos según la norma según la invención. Por consiguiente, el procedimiento se adecua bien a la medición en proceso con procedimiento mecanizado de piezas rotacionalmente simétricas. Como consecuencia de la rápida medición de varias rotaciones del objeto de prueba, las señales dependientes del ángulo de rotación que aparecen sistemáticamente son identificables como funciones periódicas y son separables de todos los posibles errores de medición por medio de una filtración de señal.

[0023] La invención se explica a continuación con más detalle por medio de ejemplos de realización y dibujos esquemáticos. Muestran:

- Fig. 1 esquemáticamente el principio de mediciones de diferencia de ángulos,
- Fig. 2 una representación esquemática de la influencia de una rotación excéntrica de una pieza de prueba cilíndrica en una medición de diferencia de ángulo,
- Fig. 3 una curva obtenida como ejemplo de una palpación del perímetro de una pieza de prueba cilíndrica con rotación excéntrica,
- Fig. 4a una función de perfil microgeométrica de un cilindro,
- Fig. 4b una señal de reflexión normalizada (curva de diferencia de ángulo) con rotación excéntrica,
- Fig. 4c como ejemplo los componentes de Fourier de una curva de diferencia de ángulo no corregida,
- Fig. 4d los componentes de Fourier de una curva de diferencia de ángulo corregida según la invención,
- Fig. 5 esquemáticamente una estructura básica de un dispositivo según la invención,
- Fig. 6 señales de medición de una PSD ejemplares para un árbol de transmisión en rotación uniforme, donde la curva superior representa la señal suma y la curva inferior la diferencia de la señal del PSD,
- Fig. 7 muestra las funciones de autocorrelación de los cursos de las señales de la figura 6,
- Fig. 8 muestra en el diagrama superior la señal del ángulo de inclinación calculada con ayuda de los datos de calibración de la medición según las fig. 6 y 7 y en el diagrama inferior el desplazamiento de ángulo de inclinación excéntrico según un filtrado de paso bajo con un filtro gaussiano,
- Fig. 9 muestra la influencia del ángulo de incidencia del haz de luz de medición en la fase y la amplitud del desplazamiento del ángulo de inclinación excéntrico y
- Fig. 10 curvas para el perfil primario, la desviación en la forma y un perfil de ondulación dominante a través de un ejemplo.

[0024] Para una comprensión facilitada del procedimiento según la invención y de la obtención de señal necesaria para ello se ilustrará en primer lugar a través de la figura 5, la cual ilustra de manera esquemática la estructura básica de un dispositivo concebido para este fin.

[0025] Un diodo láser 1 emite un haz de luz 3, que con ayuda de una óptica 2 se enfoca sobre una superficie de objeto de prueba 5 que se puede poner en movimientos de rotación. Para la óptica de enfoque se elige de forma ventajosa

para la medición de superficies rugosas una lente cilíndrica, dado que como consecuencia de la iluminación lineal se puede mediar en el caso de pequeños anchos de línea en dirección perimetral a través de la estructura de speckle del haz de luz reflectado 6 con ayuda de la superficie de recepción de un receptor optoelectrónico sensible a la posición 7. Esto conduce a una determinación mejorada del centro de gravedad del haz de luz 6 reflectado con ruido coherente del haz y permite de esta manera una medición de diferencia de ángulos en superficies de objeto de prueba ásperas cilíndricas. El componente óptico central del dispositivo reivindicado es un prisma 4 dispuesto en la trayectoria del rayo, que redirige tanto el haz de luz 3 incidente como también el haz de luz 6 reflectado por la superficie del objeto de prueba. Como consecuencia de esta transformación de ángulo se puede lograr una forma de construcción compacta del cabezal del sensor con al mismo tiempo una gran zona de medición de un ángulo de diferencia a determinar en el marco del procedimiento. El procedimiento de ajuste de la óptica se simplifica, puesto que el prisma 4 puede servir como sistema de referencia de ángulo. Las superficies del prisma, que incluyen ángulos de prisma precisos, son superficies de referencia para un receptor optoelectrónico 7 y la óptica de iluminación con diodo láser 1 y óptica de enfoque 2. La superficie de prisma sobre la que incide el haz de luz 6 reflectado, se elige en el marco de la invención como superficie de contacto directa para el receptor 7. En el caso de la óptica de iluminación se puede utilizar el reflejo directo en la primera superficie de prisma refractada en la trayectoria del rayo incidente para el ajuste y la correcta alineación del eje óptico del sistema de iluminación. De esta forma resultan posibilidades de ajuste precisas de los ángulos para el haz de luz incidente y reflectado que están asociadas a través del prisma a un sistema de referencia fijo. Con el aprovechamiento de la reflexión total en la superficie de apoyo entre el prisma 4 y el receptor 7, el ángulo visual del receptor queda delimitado, lo que influye de manera ventajosa en la supresión adicional de luz parásita del entorno. En el registro de valores de medición la pieza de prueba 5 rota con una amplitud de intervalo angular conocida o de forma uniforme, como descrito más detalladamente en el proceso, alrededor de un eje de rotación P que debería estar próximo al punto central M de la sección transversal de la pieza de prueba 5 y está orientado de forma paralela al eje de la pieza de prueba. Con cada valor de ángulo de rotación se realiza la lectura del receptor optoelectrónico 7 a través de una unidad de captación de datos de medición 8, que intensifica, digitaliza y almacena los valores de medición. La unidad de captación de datos de medición 8 realiza además la sincronización de la recepción de valores de medición con la rotación del objeto de prueba. La sincronización puede ocurrir con movimiento de rotación uniforme del objeto de prueba a través de un temporizador externo o interno o con posición de desplazamiento de ángulo del objeto de prueba a través de un accionamiento directo de la unidad de captación de datos 8 a través de señales de un controlador de motor habitual del motor de rotación del alojamiento del objeto de prueba. Para la evaluación de la medición, se transmiten los datos de medición a una unidad de evaluación 9 que efectúa el cálculo de los parámetros de ondulación y desviación de tal forma, como se describe más adelante, muestra estos parámetros, los protocoliza y, dado el caso, los compara con tolerancias predeterminadas y los transmite a una unidad de mando para el control de un proceso de control de calidad automático. A continuación, se realiza la asignación de los valores de medición a amplitudes de intervalo angular equidistantes con rotación uniforme del objeto de prueba a través del análisis de correlación de las señales de medición según la invención descrito, con al menos dos rotaciones del objeto de prueba. Las excentricidades que aparecen en la rotación del objeto de prueba son compensadas por el procedimiento según la invención y en la última fase, los ángulos de diferencia medidos se convierten en alturas de perfil, a partir de las cuales la unidad de evaluación 9 calcula los parámetros necesarios de ondulación y de desviación en la forma.

[0026] El procedimiento se detalla a continuación más detalladamente mediante un ejemplo de realización concreto. En el ejemplo se sujeta un árbol de transmisión con un diámetro de 44,7mm con ayuda de un mandril de tres mordazas casi centrado y mediante la rotación del mandril de tres mordazas mediante una mesa giratoria se pone en movimiento de rotación uniforme. El cabezal de medición óptico según la invención se introduce de manera radial respecto a la onda giratoria, hasta que el cabezal de medición alcanza el punto de trabajo óptimo. Esta posición se puede poner en marcha automáticamente mediante la captación de las señales de la unidad de recepción, puesto que con la distancia de trabajo óptima del cabezal de medición, la luz reflectada en la onda del objeto de prueba ilumina el receptor 7 en la posición cero. De esta forma, la intensidad total de la luz que incide sobre el receptor (en lo sucesivo designada como señal de suma) es alta y el centro de gravedad del haz de luz 6 reflectado ilumina la superficie del receptor en el centro, de modo que la señal dependiente de la posición del PSD es cero (en el sucesivo designada como señal de diferencia). Una vez que la distancia de trabajo óptima del cabezal de medición respecto a la superficie del objeto de prueba está ajustada, se lleva a cabo el registro de valores de medición. Se activa un temporizador de medición que registra las señales de medición con frecuencia fija y las transmite a una unidad de almacenamiento 8. El temporizador de medición es p.ej. un generador de ondas cuadradas externo, que controla el registro de valores de medición a través de la entrada de control de una tarjeta de medición de PC. Para cada punto de medición se registra la intensidad del haz de luz reflectado, así como la desviación hacia la posición cero, se digitaliza con ayuda de un convertidor AD y se almacena en el tampón para datos de entrada de un PC 9. La figura 6 muestra las señales de medición del PSD recogidas de esta forma para un árbol de transmisión en rotación uniforme con un diámetro de 44,7mm. La frecuencia de palpación fue de 50kHz. En

la figura 6 se reconoce en el caso de ambas señales claramente un transcurso de función que se repite de manera periódica (la curva superior es la señal de suma y la curva inferior la señal de diferencia), que resulta de la rotación múltiple de la onda del objeto de prueba. Si se crea la respectiva,

5 [0027] función de autocorrelación de ambas señales, se puede determinar el número de los puntos de medición por rotación del objeto de prueba. La figura 7 muestra las funciones de autocorrelación de los transcurros de señal de la figura 6. El coeficiente de autocorrelación es una medida de la auto-similitud de una función en su desplazamiento lateral. El coeficiente alcanza un máximo, cuando los transcurros de la función desplazada y no desplazada son casi coincidentes, lo cual se alcanza con el desplazamiento de una rotación. Este máximo se repite periódicamente con cada posición adicional de rotación terminada. Para el ejemplo representado resulta de esta forma un número de puntos de palpación por rotación del objeto de prueba de 10691. Puesto que el árbol de transmisión posee una ondulación, la función de autocorrelación de la señal de diferencia está solapada por una función periódica de onda corta, sin embargo, en las posiciones de las rotaciones terminadas, presenta también máximos evidentes. Con ayuda de una búsqueda de valor extremo, se determinan los máximos de las funciones de autocorrelación y a partir de sus posiciones se calcula el número de puntos de palpación por rotación del objeto de prueba. En un paso posterior es posible por lo tanto, separar las señales de medición de señales de perturbación que pueden aparecer eventualmente con ayuda de un análisis de Fourier. La frecuencia límite inferior de la señal de medición está definida por el número de rotaciones. Si se midieron varias rotaciones, todos los componentes de onda larga en la señal se deben a errores de medición. Con ayuda de un filtrado de paso alto estandarizado con un filtro gaussiano, pueden eliminarse estas señales de perturbación tanto de la señal de suma como de la señal de diferencia. Para suprimir errores de medición, cuyos componentes de frecuencia se encuentran en la banda de frecuencia de las señales de medición, se lleva a cabo después del filtrado de paso alto de la otra filtración. Para ello se descomponen en fragmentos de señal la señal de suma y de diferencia, cuyas respectivas longitudes corresponden exactamente a una rotación del objeto de prueba. Estos fragmentos de señal se transforman mediante el análisis de Fourier y se calculan los componentes absolutos de los componentes de Fourier. Tanto para la señal de suma como también para la señal de diferencia se pueden producir de esta forma tantas funciones Fourier como rotaciones se han medido. Los componentes de Fourier de la señal de medición original deben estar contenidos en todas las funciones de Fourier de las rotaciones individuales. Para la reconstrucción de la señal de medición, se agrupan entonces todos los componentes de Fourier contenidos en todas las funciones parciales con la suma de amplitudes respectivamente más pequeña en cada caso para dar lugar a una serie de Fourier y a partir de ésta se genera por retransformación el transcurso de señal filtrado. Por normalización (e.d. formación de cocientes de señal de diferencia/señal de suma) de las señales de diferencia filtradas a las señales de suma filtradas se obtienen las señales de desvío independientes de la intensidad, que son proporcionales a la desviación de ángulo local del haz de luz reflectado. Con los datos de calibración para el cabezal del prisma, se pueden convertir, la señal de desvío independiente de la intensidad directamente en una señal de ángulo de reflexión  $d\Theta_r(\Phi)$  y determinarse los ángulos de inclinación de las superficies locales  $d\phi_n$  según la conocida ecuación de reflexión. La figura 8 muestra en el diagrama superior la señal de ángulo de inclinación de la medición calculada a partir de los datos de calibración según las fig. 6 y 7. La excentricidad de la medición está contenida en el transcurso de la señal. Con ayuda de un filtrado de paso bajo con un filtro gaussiano de longitud de onda límite 1 se puede determinar el desplazamiento de ángulo de inclinación excéntrico (compárese fig. 8 imagen inferior). Este se corresponde exactamente con la distorsión del punto de palpación según la invención con rotación excéntrica de un objeto de prueba. Para asegurar una palpación equidistante del perfil de la superficie, la señal de medición  $d\phi_n$  debe ser interpolada. La palpación de la superficie del objeto de prueba realizada durante la medición se llevó a cabo con los valores de ángulo  $\Phi + d\phi_e(\Phi)$ , donde los valores de ángulo de rotación para  $\Phi$  se encuentran en el intervalo  $0^\circ$  hasta  $360^\circ$  con desplazamientos de ángulo de  $360^\circ / (\text{número de puntos de medición por rotación})$  (en el ejemplo mostrado la amplitud del intervalo angular teórico es de  $0.0337^\circ$ ). Con ayuda de una interpolación lineal sencilla se determinan los valores de medición para una palpación equidistante con la amplitud del intervalo angular fija,  $360^\circ / (\text{Número de puntos de medición por rotación})$ . Para el ejemplo representado, la influencia de la excentricidad sobre la señal de medición es pequeña. El desplazamiento de ángulo excéntrico máximo  $d\phi_e$  es algo superior a la amplitud de paso de la medición y conduce por consiguiente a distorsiones de incremento máximas de aproximadamente un incremento angular. La equalización de los valores de señal modifica por lo tanto sólo de manera imperceptible el comportamiento de señal. Sin embargo, si existe un error de concentricidad mayor entre el cilindro de prueba medido y el cilindro de prueba fijado en el mandril de tres mordazas, así como una excentricidad general del dispositivo de fijación con respecto al eje de rotación, la corrección según la invención de la palpación de ángulo conduce a una mejora decisiva en el análisis de ondulación (compárese fig. 4). A partir de las funciones según la fig. 8 se calcularán en lo sucesivo los parámetros de forma y ondulación. El error de concentricidad o la excentricidad se determina a partir de  $d\phi_e$ . Si se ilumina la superficie del objeto de prueba en la medición de la diferencia de ángulo con un ángulo de incidencia mayor de  $0^\circ$ , el máximo se desplaza de fase de  $d\phi_e$  a



la amplitud de la desviación de pista máxima (compárese Fig. 2). Además, la señal de medición con ángulo de incidencia creciente se compone de la diferencia de ángulo de inclinación local (el tamaño de medición real) y del desplazamiento de lugar creciente por la desviación de la pista. De esta forma se puede utilizar un cálculo de curva local, que se basa exclusivamente en la integración de valores de ángulo de inclinación, no sólo para la determinación del error de concentricidad. Para poder determinar el error de concentricidad de la señal de medición, debería realizarse una simulación de avance del comportamiento de deflexión del objeto de prueba con diámetro del objeto de prueba y ángulo de incidencia del haz de luz de medición dado.

[0028] Una buena aproximación, mucho más practicable para la detección del error en la concentricidad es sin embargo, la que se describe a continuación. La figura 9 muestra la influencia del ángulo de incidencia del haz de luz de medición sobre la fase y la amplitud del desplazamiento de ángulo de inclinación excéntrico. Si la superficie del objeto de prueba se ilumina de manera vertical (recorrido de la curva trazado a rayas)  $d\phi_e$  resulta únicamente en el desplazamiento de ángulo de inclinación de la zona de iluminación. El desplazamiento adicional de la pista de palpación conduce únicamente a una prolongación de la duración de la señal de medición, que sin embargo, no provoca ninguna desviación del haz de luz reflejado en el detector sensible a la posición. Con diámetro del objeto de prueba  $D$  conocido y con un número conocido de incrementos angulares por rotación  $N$ , que se obtuvieron a partir de la función de autocorrelación o que son conocidos en un ajuste de incremento de ángulo, con la ecuación

$$z_{e,n} = \sum_{i=1}^{i=N} \sin(\eta \phi^{e,i}) \cdot \pi \cdot D / N \quad u = J'S' \dots N-J' N$$

se pueden determinar las alturas de perfil  $z_{e,n}$ , que describen la distancia en la pista de palpación para cada punto de palpación. El máximo de  $z_{e,n}$  indica el error de concentricidad, que en el ejemplo elegido según la fig. 9 corresponde a  $17.4\mu\text{m}$ . Si el mismo objeto de prueba se ilumina con un ángulo de incidencia de  $40^\circ$ , la medición de diferencia de ángulo produce una señal de medición aumentada (compárese fig. 9, línea completa). Además, el máximo está desplazado frente a la medición iluminada de forma vertical exactamente en el ángulo de incidencia. La figura 9 muestra que la curva medida con un ángulo de incidencia de  $40^\circ$  corta la otra curva exactamente en el máximo y este punto de intersección se adelanta al propio máximo en el ángulo de incidencia. Este hecho se utiliza para la aproximación del error de concentricidad. Si la medición se realiza con cualquier ángulo de incidencia  $\Theta_i > 0^\circ$ , se determina en primer lugar la posición del máximo del desplazamiento de ángulo excéntrico  $\Phi(d\phi_e = \text{max}) = \Phi_{\text{max}}$ , a continuación se determina el valor  $d\phi_e(\Phi_{\text{max}} - \Theta_i)$ , que se adelanta al máximo en el ángulo de incidencia de la medición. La curva medida se normaliza a la relación  $d\phi_e(\Phi_{\text{max}} - \Theta_i) / d\phi_e(\Phi_{\text{max}})$ , de manera que se obtiene una curva suave, cuyo máximo presenta ahora el valor  $d\phi_e(\Phi_{\text{max}} - \Theta_i)$ . A partir de esta curva se pueden calcular, como se ha descrito anteriormente, las alturas de perfil  $z_{e,n}$ , a partir de las cuales se puede determinar como se ha mostrado, el error de concentricidad. Esta aproximación conduce a resultados positivos en la determinación de errores de concentricidad. Con excentricidades inferiores a 10% referido al radio del objeto de prueba, las desviaciones máximas para la determinación del error de concentricidad según el procedimiento de aproximación descrito anteriormente son inferiores al 2%.

[0029] El análisis de la desviación de la forma y de la ondulación se rige en gran parte por el procedimiento estandarizado para mediciones de rugosidad. El desplazamiento del ángulo  $d\phi_e$  introducido por la excentricidad se añade e interpola a la señal de medición  $d\phi_n$ . Los valores de medición  $d\phi_n$  corregidos de esta manera se refieren ahora exclusivamente a las diferencias de ángulo de inclinación locales de la superficie del objeto de prueba. El perfil del perímetro se calcula de la siguiente forma por la adición de las inclinaciones

$$z_{e,i} = \sum_{j=1}^n \tan(d\phi_j) \cdot \pi \cdot D / N,$$

donde  $d\phi_j$  representa el valor de inclinación de perfil corregido (liberado de la influencia de la excentricidad).

[0030] En relación a la VDA 2007, tanto la desviación de la forma como los perfiles de ondulación dominantes se pueden determinar a partir del perfil  $z_n$  según procedimientos de filtro conocidos. Según la definición, el recorrido de la forma de  $z_n$  corresponde al perfil primario (compárese fig. 10, imagen superior). Con ayuda de un filtro de paso bajo estandarizado, aquí p.ej. un filtro de paso bajo tipo gaussiano con longitud de onda límite 50 ondas por perímetro, se puede desviar la desviación en la forma, según VDA2007 el perfil  $W$ , (compárese fig.10, imagen intermedia). El filtro

5 pasa banda cero descrito en VDA2007 se utiliza para la generación de perfiles de ondulación dominantes. Para el ejemplo elegido, el perfil de ondulación dominante está dado por un número de 107 ondas por rotación y representado en la imagen inferior de la fig. 10. Gracias a estos perfiles es posible desviar todos los parámetros de perfil necesarios para el análisis de la desviación de forma y la ondulación. El procedimiento y el dispositivo se pueden utilizar para una zona de diámetro grande de aprox. 1 mm hasta 2m de objetos de prueba rotacionalmente simétricos. La única condición es que las inclinaciones de superficies locales del objeto de prueba sean lo suficientemente pequeñas, para poder registrar el haz de luz de medición reflejado en el campo angular de medición prefijado del dispositivo de medición. En el ejemplo fue suficiente un prisma con una longitud de canto de 25mm y un detector sensible a la posición (PSD) dispuesto y elegido según las medidas anteriores. Todos los cálculos descritos anteriormente se realizan en la unidad de evaluación 9 por correspondientes previstos algoritmos numéricos mediante correspondientes programas de PC.

10 [0031] Todas las características reconocibles en la descripción, los ejemplos de realización y los siguientes dibujos pueden ser ellos solos o en combinación arbitraria esenciales según la invención.

15 Lista de referencias

- [0032]
- 1 - fuente luminosa
  - 2 - óptica reproductora
  - 20 3 - haz de luz incidente
  - 4 - prisma
  - 5 - superficie del objeto de prueba
  - 6 - haz de luz reflejado
  - 7 - detector sensible a la posición
  - 25 8 - unidad de captación de datos de medición
  - 9 - unidad de evaluación

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento para la determinación de desviaciones en la forma y/o ondulaciones de piezas de prueba rotacionalmente simétricas, en el que

- 5 - la pieza de prueba se gira sobre su eje de simetría,
- un rayo de luz de medición se irradia desde una dirección prefijable sobre el perímetro de la pieza de prueba en un plano vertical al eje de rotación,
- 10 - las posiciones de incidencia del rayo de luz de medición reflejado en un detector sensible a la posición se registran y almacenan en respectiva correlación a una secuencia de posiciones de ángulos de rotación teóricamente equidistantes  $\Phi_i$  de la pieza de prueba al menos durante una rotación completa de la pieza de prueba,
- 15 - a continuación, se efectúa un filtrado de paso bajo de la curva de medición obtenida de esta forma para determinar las desviaciones del rayo de luz de medición reflejado debidas sólo a la excentricidad de la pieza de prueba en relación al eje de rotación.
- para la secuencia de posiciones de ángulos de rotación teóricamente equidistantes  $\Phi_i$  se determinan respectivamente los desplazamientos de ángulo  $d\phi_e$  dependientes de la excentricidad y se añaden a las posiciones de ángulos de rotación teóricamente equidistantes  $\Phi_i$ ,
- 20 - los valores de medición de las posiciones de ángulos de rotación teóricamente equidistantes  $\Phi_i$  se correlacionan con las posiciones de ángulos de rotación corregidas  $(\Phi_i + d\phi_{e,i})$ ,
- los valores de interpolación de la curva de medición corregida de tal manera se determinan en una trama de ángulos de rotación realmente equidistante,
- 25 - se lleva a cabo un análisis de Fourier de la curva de valores de interpolación, que indica directamente la ondulación dominante, y/o se lleva a cabo una filtración de paso alto de la curva de valores de interpolación, que indica la desviación en la forma de la pieza de prueba subsanada la excentricidad.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por el hecho de que** el rayo de luz de medición se detecta en una rotación uniforme de la pieza de prueba durante al menos dos rotaciones completas y antes del filtrado de paso bajo se lleva a cabo un análisis de autocorrelación de las señales del detector sensible a la posición con el objetivo de la asignación del número de los puntos de medición a una zona perimetral definida de la pieza de prueba.

3. Procedimiento según la reivindicación 1, **caracterizado por el hecho de que** el rayo de luz de medición es detectado por un PSD como detector sensible a la posición con rotación uniforme de la pieza de prueba durante al menos dos rotaciones completas, para cada zona de la superficie de la pieza de prueba se registran y almacenan en relación a la posición, respectivamente la señal de suma como también la señal de diferencia del PSD y, antes del filtrado de paso bajo se lleva a cabo un análisis de autocorrelación de las señales del detector sensible a la posición con el objetivo de la asignación del número de puntos de medición a una zona perimetral definida de la pieza de prueba, así como una normalización de las señales por formación de cocientes a partir de señal de diferencia/señal de suma.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 hasta 3, **caracterizado por el hecho de que** la rotación de la pieza de prueba se lleva a cabo en intervalos de ángulo preseleccionables equidistantes.

5. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 hasta 4, **caracterizado por el hecho de que** mediante un programa de ordenador se lleva a cabo una determinación cuantitativa de las alturas de perfil  $z_n$  según

$$z^u = \sum_{\lambda=1}^{\lambda=N} \{ \cos(\varphi\phi^{\lambda}) \cdot x \cdot D \setminus N \}$$

con D, como diámetro de la pieza de prueba en la zona perimetral de medición y N como el número de los intervalos angulares por rotación y  $d\phi_j$  como el valor de inclinación de perfil  $\phi_j$  subsanada la influencia de la excentricidad en el punto j.

6. Dispositivo para la realización del procedimiento según la reivindicación 1, consistente en una fuente luminosa (1), que enfoca un rayo de luz de medición (3) con ayuda de una óptica (2) sobre una superficie de pieza de prueba rotacionalmente simétrica (5) que puede ser puesta en movimiento de rotación, perpendicular al eje de rotación (P) y en

- un ángulo a la normal ideal de superficie ( $\bar{n}_0$ ), **caracterizado por el hecho de que** antes de la superficie de prueba (5), se utiliza un prisma (4) para registrar las posiciones de incidencia del haz de luz de medición reflejado (6) sobre un detector sensible a la posición (7) en correspondiente asignación a una secuencia de posiciones de ángulos de rotación teóricamente equidistantes  $\Phi_i$ , de la pieza de prueba, al menos durante una rotación completa de la pieza de prueba, el cual está situado de forma desplazable en la trayectoria del rayo de luz de tal forma, que el rayo de luz de medición incidente (3), así como también el rayo de luz de medición reflejado (6) por la superficie de la pieza de prueba (5) es captado por el prisma y el rayo de luz de medición reflejado (6) es dirigido a un detector sensible a la posición (7) situado frente a la tercera superficie de prisma (43), cuyas señales de salida registra una unidad de captación de datos de medición (8), que refuerza, digitaliza y almacena los valores de medición, y que los transmite a una unidad de evaluación (9), la cual determina por filtrado de paso bajo desviaciones del rayo de luz reflejado codicionadas sólo por la excentricidad de la pieza de prueba en relación con el eje de rotación y por interpolación valores de ángulo de rotación corregidos.
- 5
- 10
7. Dispositivo según la reivindicación 6, **caracterizado por el hecho de que** el detector sensible a la posición (7) está dispuesto directamente sobre la superficie del prisma, sobre la cual incide el rayo de luz de medición reflejado (6).
- 15
8. Dispositivo según la reivindicación 7, **caracterizado por el hecho de que** la expansión lateral del detector sensible a la posición (7) está fijada como mucho a una expansión igual, preferiblemente más pequeña que la lateral de la superficie del prisma, sobre la que se encuentra.
- 20
9. Dispositivo según la reivindicación 6, **caracterizado por el hecho de que** como detector sensible a la posición (7) se utiliza un PSD, cuya señal de suma y también de diferencia para cada zona de la superficie de la pieza de prueba se dirige a la unidad de captación de datos de medición subsiguiente (8) y se almacena allí de forma separada.

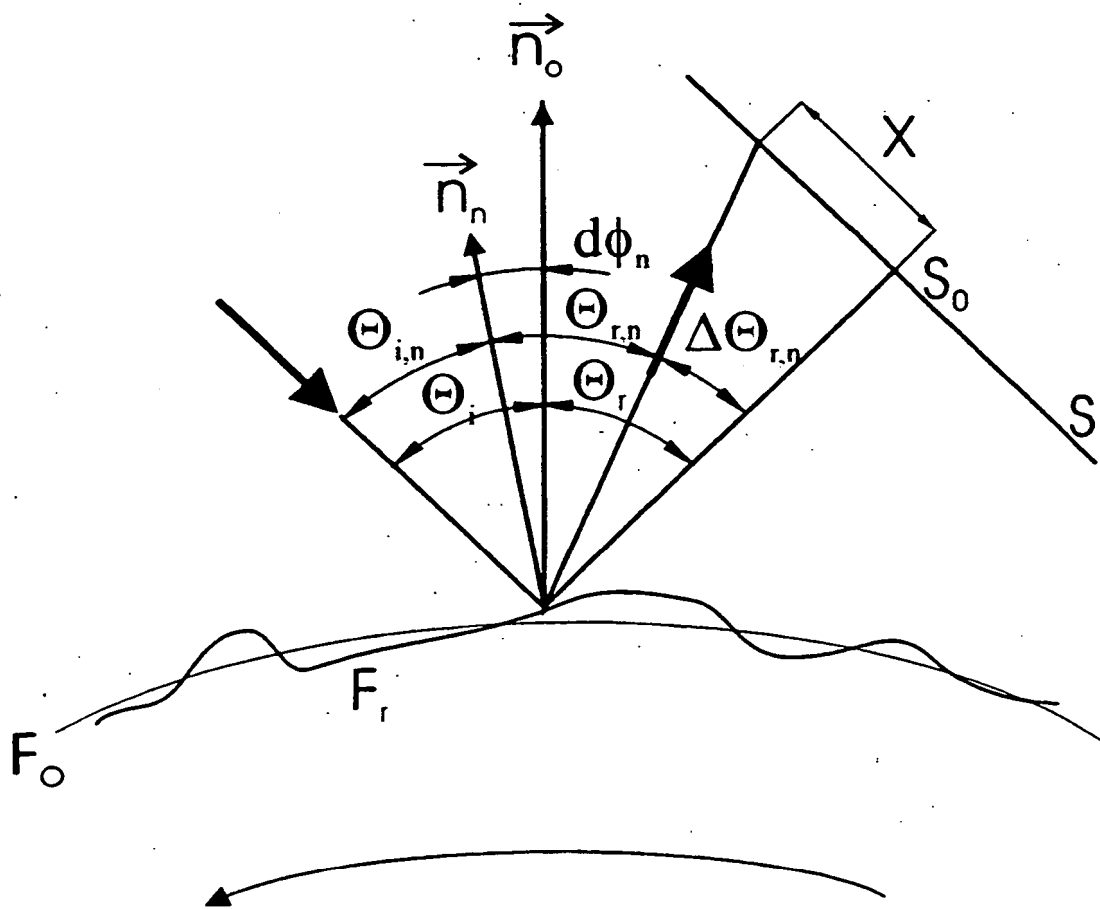


Fig. 1

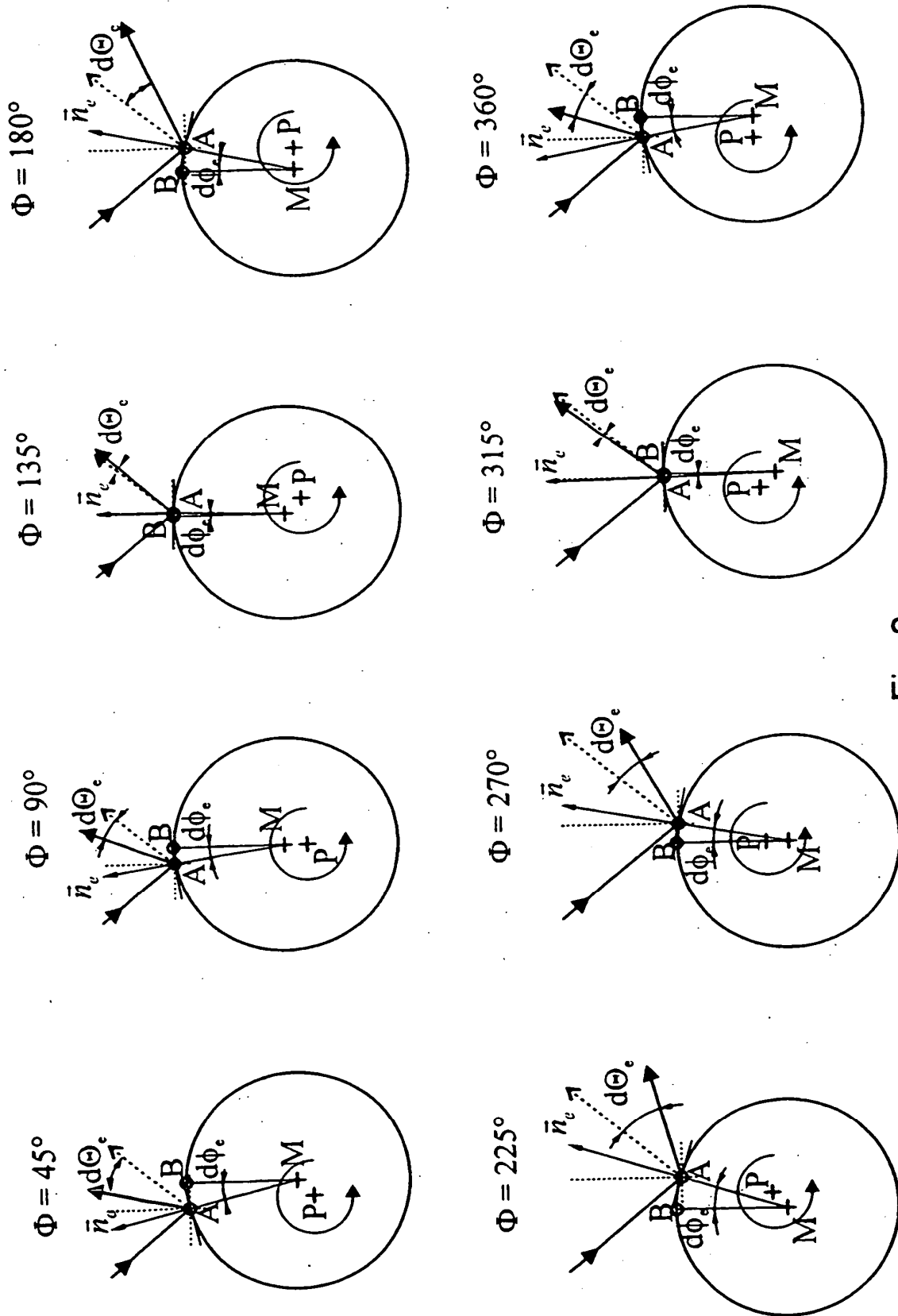


Fig. 2

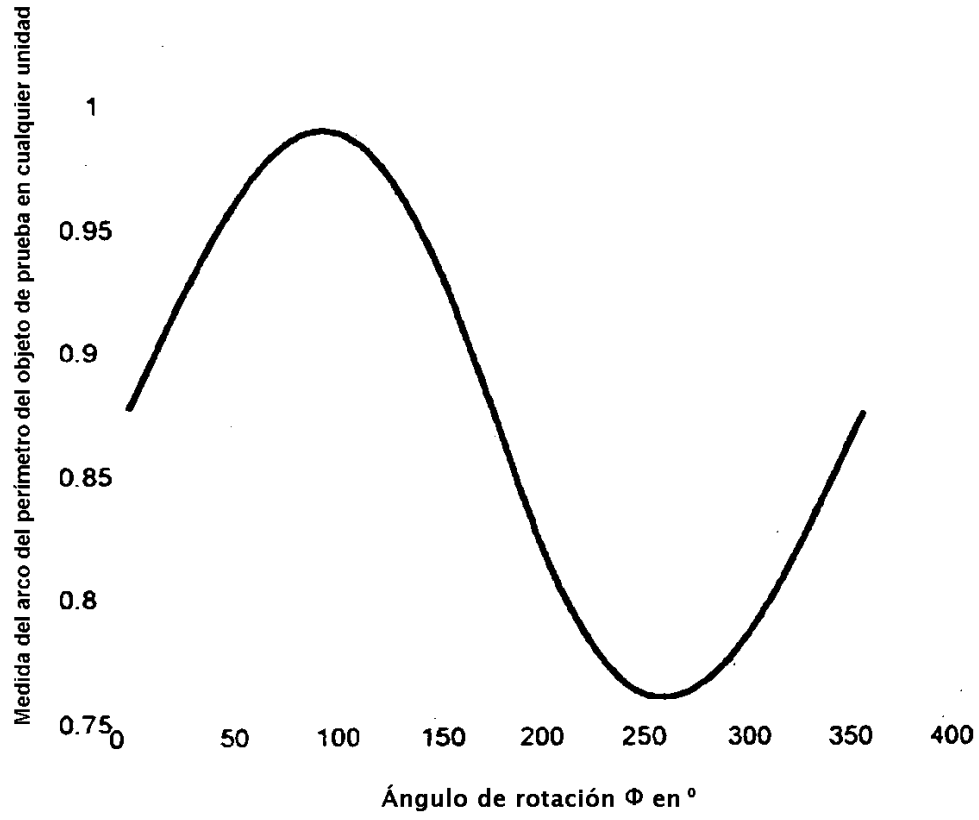


Fig. 3

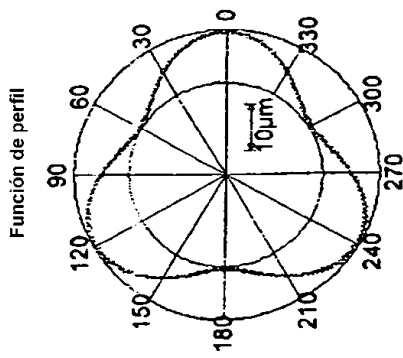


Fig. 4a

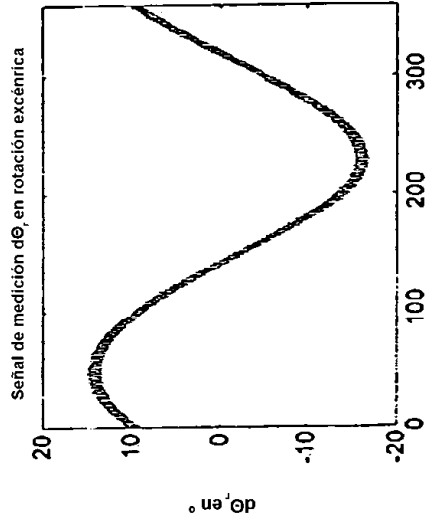


Fig. 4b

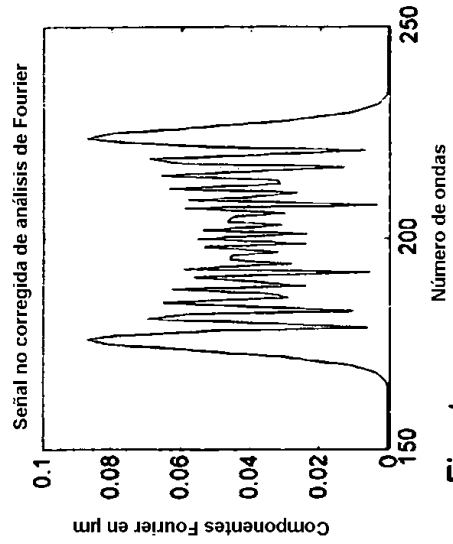


Fig. 4c

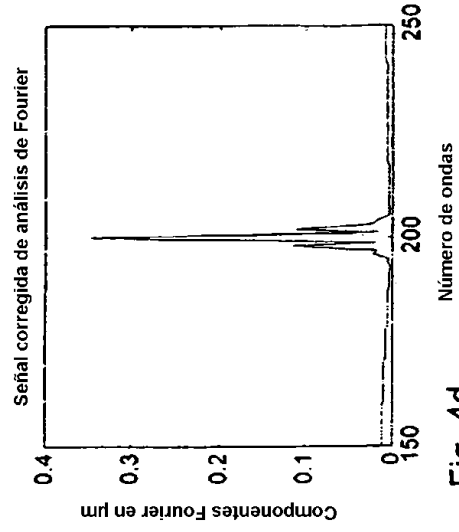


Fig. 4d



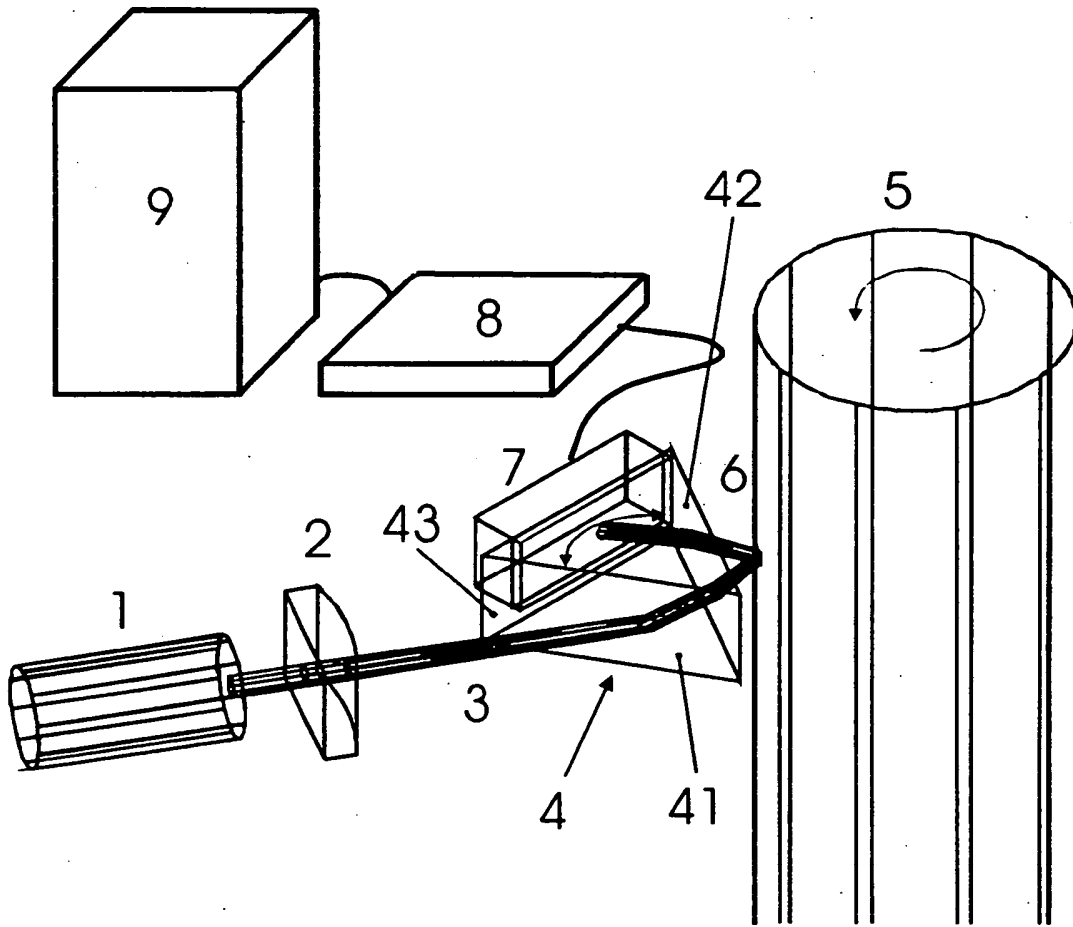


Fig. 5

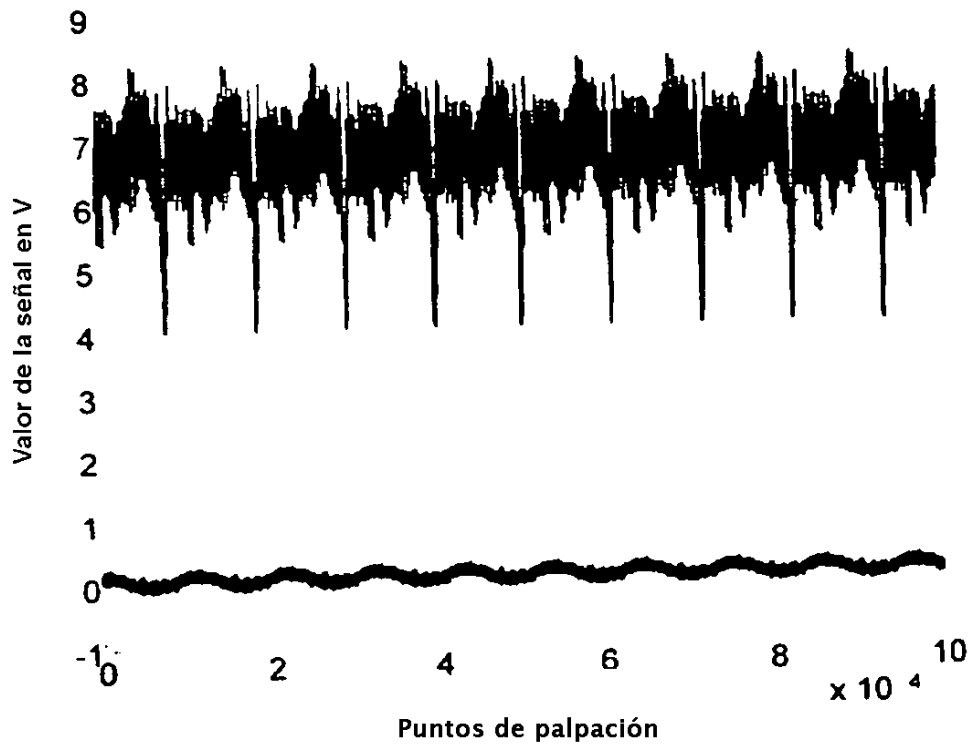


Fig. 6

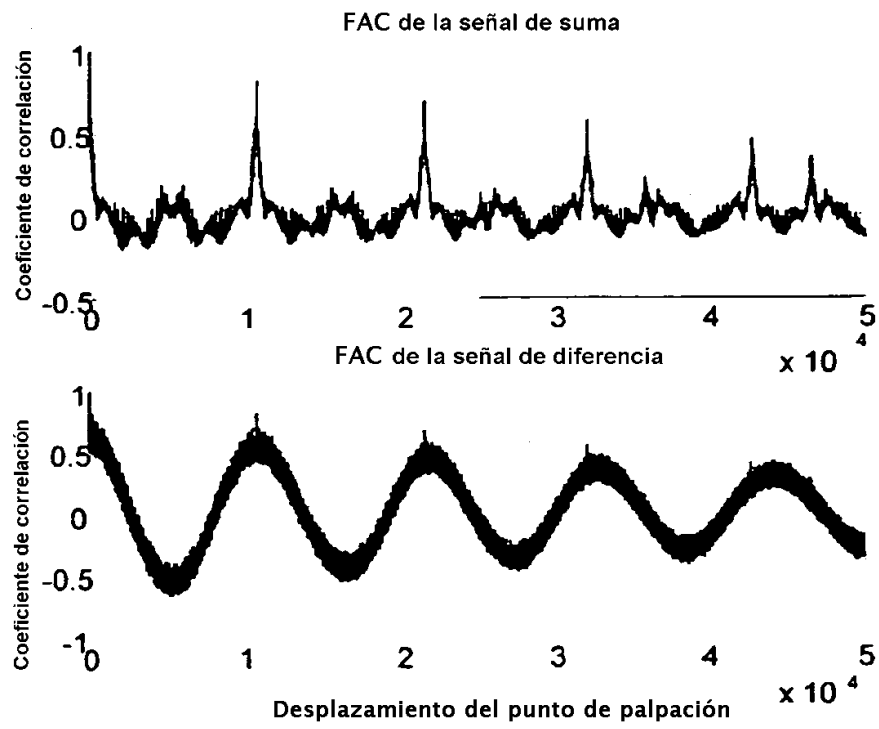


Fig. 7

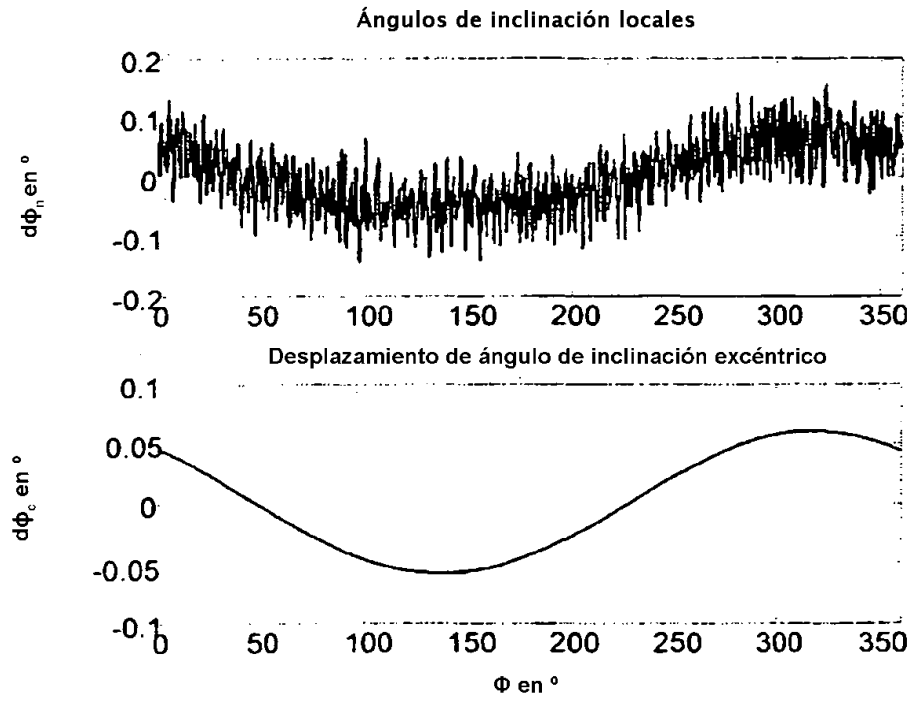


Fig. 8

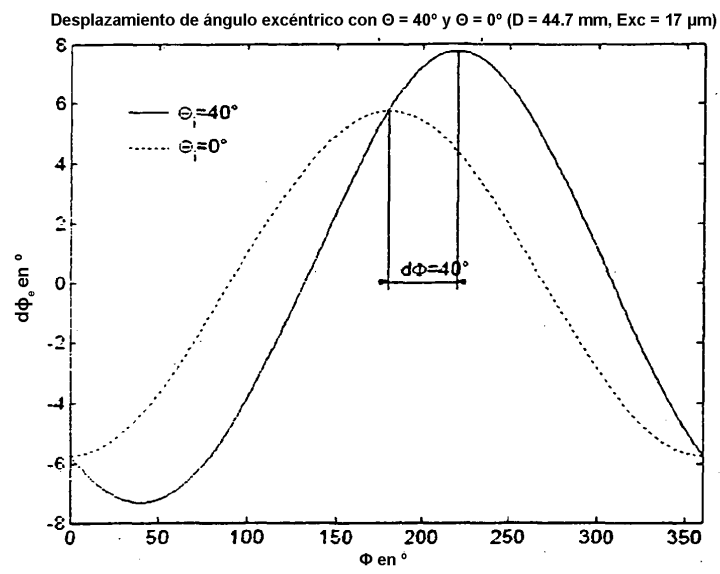


Fig. 9

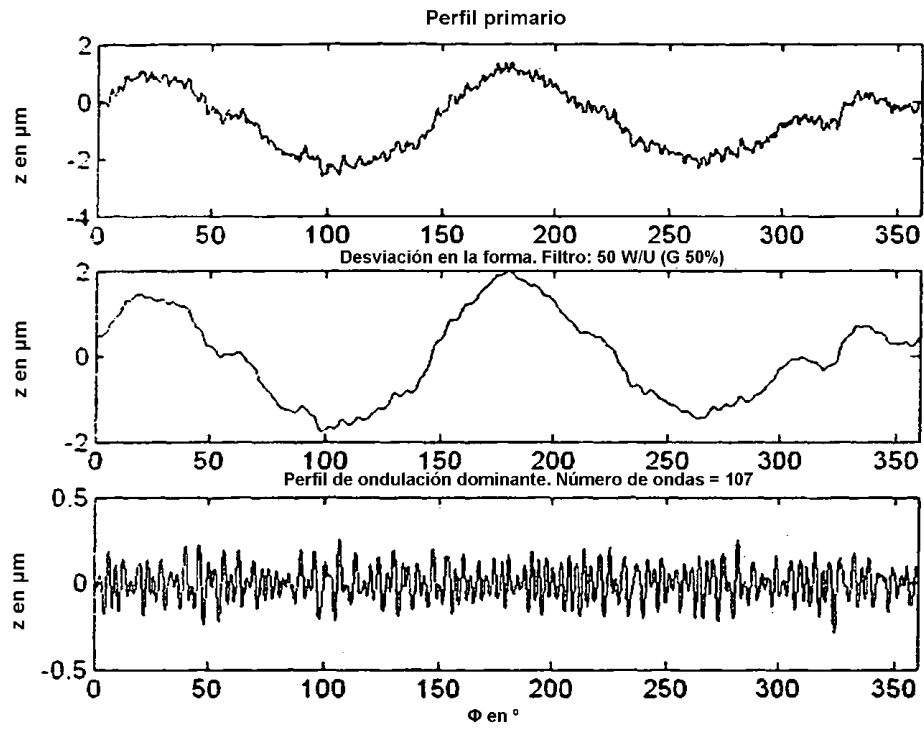


Fig. 10