

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 427 794**

51 Int. Cl.:

G05B 19/401 (2006.01)

G05B 19/404 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.02.2001** **E 01200625 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.07.2013** **EP 1139189**

54 Título: **Procedimiento para calificar la precisión de un sistema con control numérico**

30 Prioridad:

29.03.2000 US 537364

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

04.11.2013

73 Titular/es:

**THE BOEING COMPANY (100.0%)
100 North Riverside Plaza
Chicago, IL 60606-2016, US**

72 Inventor/es:

**COLEMAN, RICHARD M. y
MCCRUM, RUSSELL C.**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 427 794 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 para calificar la precisión de un sistema con control numérico

5 CAMPO DE LA INVENCION

La invención se refiere a máquinas con control numérico usadas para el mecanizado de piezas de trabajo y, particularmente, a procedimientos para la calificación de la precisión de dichas máquinas para asegurar que las piezas serán producidas dentro de tolerancias aceptables. Más particularmente, la invención se refiere a un procedimiento para la calificación de la precisión de un sistema de mecanizado que tiene una máquina con control numérico y un accesorio de sujeción de piezas de trabajo, y para el diagnóstico de las fuentes de errores y la corrección de dichas fuentes de errores.

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Las máquinas herramienta con control numérico se usan ampliamente para el mecanizado de muchos tipos de piezas. En la industria de la aviación, se usan máquinas de tipo pórtico y fresadoras de columna que tienen capacidades de movimiento multi-eje para mecanizar las alas y los paneles del fuselaje para formar orificios en los que serán instalados los remaches, pernos o elementos de sujeción similares para la fijación de diversas estructuras y componentes a los paneles. En muchos casos, los paneles son bastante grandes, y son sujetados para realizar el mecanizado mediante un accesorio flexible de sujeción de piezas de trabajo cuya configuración puede ser variada para adaptarse a una pieza de trabajo determinada de manera que puedan fijarse paneles de diversas configuraciones. Una máquina herramienta, tal como una herramienta de cinco ejes que es trasladable a lo largo de tres ejes mutuamente ortogonales y que puede girar alrededor de dos ejes ortogonales, es posicionada frente al accesorio de sujeción y es trasladada y girada para posicionar una herramienta soportada en un husillo de la máquina en las ubicaciones apropiadas para perforar orificios a través de la pieza de trabajo o realizar otras operaciones de mecanizado.

El documento US 5.691.909 describe un procedimiento para la simulación por ordenador de una operación de máquina herramienta (mecanizado virtual) que ayuda a predecir la precisión de las piezas a mecanizar, asigna errores de diseño y diagnostica la fuente de los errores.

El documento US 5.949.685 describe un procedimiento para mejorar las máquinas durante una operación de mecanizado de una pieza o un conjunto usando una máquina herramienta que tiene un extremo efector y un sistema de medición para medir la posición del extremo efector.

El documento EP 0963816 describe un procedimiento para realizar una valoración de los cambios cinéticos de un robot, inducidos por factores internos o externos, y compensar estos cambios. El procedimiento usa un modelo de la geometría del robot que es comparado con la geometría real.

El documento US-A-5.649.888 describe un sistema para montar piezas sobre una lámina para formar un panel que incluye un accesorio para sostener la lámina y presentar la parte ancha de la lámina a un robot.

El documento US-A-4.932.131 describe un aparato de determinación de posición que comprende una máquina de medición de coordenadas que tiene una escala, que puede ser calibrado in situ en la máquina.

El documento US-A-4.636.960 describe un procedimiento de funcionamiento de una máquina herramienta con una sonda de detección con el fin de recopilar datos de posición para el cálculo de los parámetros de desplazamiento de la herramienta.

El documento EP-A2-0545658 describe un sistema para alinear automáticamente los componentes móviles de la máquina CNC con respecto a sus respectivos grados de libertad de movimiento.

En un sistema de mecanizado con control numérico, se apreciará que hay muchos grados de libertad entre la máquina herramienta y el accesorio de sujeción. Solo pueden producirse piezas precisas si existe un alto grado de confianza de que la precisión en el posicionamiento de la máquina herramienta y el accesorio de sujeción están dentro de límites aceptables. Sin embargo, hay muchas potenciales fuentes de error que pueden producirse, tanto dentro de la máquina herramienta como dentro del accesorio de sujeción. Las potenciales fuentes de error en la máquina incluyen desajustes mecánicos de y entre guías lineales de la máquina a lo largo de las cuales se desplaza la máquina, y desajustes mecánicos de y entre los ejes de rotación de la máquina. Además, cuando el accesorio de sujeción de piezas de trabajo incluye elementos de sujeción que pueden ser posicionados, de manera variable, a lo largo de uno o más ejes, el accesorio puede introducir desajustes adicionales a lo largo de y entre dichos ejes.

Los procedimientos tradicionales de comprobación y corrección de los errores de posicionamiento en dichos sistemas de máquina se han basado en gran medida en el recalibrado y el realineamiento de la máquina a las especificaciones originales de fábrica cuando los errores se vuelven inaceptablemente grandes. Esto puede implicar la sustitución de partes de la máquina que ya no pueden ofrecer un rendimiento a la altura de las especificaciones originales. Muchas veces, los errores en el posicionamiento son juzgados mediante una inspección de la calidad de la pieza acabada y observando cuando las piezas no están dentro de la tolerancia. Este es un procedimiento inherentemente reactivo en lugar de proactivo e, inevitablemente, se producirán piezas inaceptables en algún momento cuando la precisión de la máquina disminuye como consecuencia del desgaste, cambios entre las partes de la máquina u otras causas. Un inconveniente adicional de este enfoque tradicional es que podría ser posible producir piezas dentro de las tolerancias aceptables aunque la máquina no cumpla las especificaciones originales de fábrica. Por consiguiente, el reajuste de la máquina a las especificaciones originales puede resultar en tiempos de inactividad y gastos innecesarios. Con el fin de corregir eficientemente las inexactitudes, sin reconstruir la máquina, a las especificaciones originales, sin embargo, deben conocerse las causas fundamentales de los errores. En el enfoque tradicional de la calificación de la precisión de la máquina, los errores se observan por primera vez al comprobar la calidad de la pieza terminada, pero esto proporciona poca o ninguna información acerca de qué está causando que las piezas se produzcan fuera de la tolerancia. Por lo tanto, el enfoque tradicional implica un procedimiento largo y engorroso de medición de la linealidad y la rectitud de cada eje de la máquina, la perpendicularidad entre cada par de ejes ortogonales, la alineación del eje de rotación y otros parámetros, y la corrección de cualquier inexactitud inaceptablemente grande realineando los ejes y sustituyendo las piezas necesarias para restablecer las especificaciones originales de fábrica. En este procedimiento, es posible que nunca se descubran las causas fundamentales de los errores; simplemente se espera que reajustando la máquina a las especificaciones originales, la calidad de la pieza terminada será restaurada a un nivel aceptable.

Un inconveniente adicional de muchos procedimientos anteriores de calificación de precisión de la máquina es que el error final en la precisión de la pieza producida nunca está vinculado matemáticamente a los diversos factores que contribuyen en la máquina y/o el accesorio de sujeción a la fabricación de la pieza y, por lo tanto, no hay una manera sistemática para comprobar la precisión de la máquina y del accesorio que asegurará que las piezas se producirán dentro de las tolerancias aceptables. Por consiguiente, en general, es necesario inspeccionar las piezas acabadas para determinar si el sistema de máquina está funcionando aceptablemente. Sería deseable proporcionar un procedimiento de calificación de precisión de la máquina en el que la precisión de la pieza producida esté vinculada matemáticamente con las diversas potenciales fuentes de error en la máquina y el accesorio de sujeción, permitiendo un alto grado de confianza en que se consiga la precisión de la pieza producida sin tener que inspeccionar regularmente las piezas. En resumen, muchos intentos anteriores de mantener un alto nivel de confianza en la precisión de las máquinas y los accesorios han fracasado debido a una mala interpretación de lo que debe ser comprobado, debido a que el tiempo entre las comprobaciones de precisión era demasiado largo, y debido a que los procedimientos de recopilación, análisis y presentación de datos de medición eran incompletos y los resultados eran difíciles de interpretar.

SUMARIO DE LA INVENCION

La presente invención pretende superar los inconvenientes de los enfoques anteriores, indicados anteriormente. Según la presente invención, se proporciona un procedimiento jerárquico para la comprobación de la precisión de la máquina y el accesorio que conduce a la identificación de las probables causas de error de manera que, si es necesario, puede realizarse una intervención física para corregirlas. En muchos casos, sin embargo, los errores pueden ser corregidos sin intervención física, realizando correcciones dentro del software. Los errores de posicionamiento de la máquina y el accesorio están relacionados a través de un modelo matemático con el error estadístico total en la posición de la máquina herramienta (por ejemplo, una broca de taladro para la perforación de orificios), y se asignan cantidades máximas permitidas para cada uno de los factores contribuyentes individuales al error total. El modelo matemático permite que todos los errores o tolerancias de la máquina y el accesorio de sujeción sean distribuidos de una manera realista con el fin de mantener la precisión resultante en la producción de piezas dentro de los límites aceptables. Se realizan comprobaciones periódicas de la precisión de la máquina y el accesorio para evaluar si cada una de las causas contribuyentes al error total estadístico de la máquina herramienta está dentro de su banda de tolerancia asignada. La invención proporciona un procedimiento sistemático de calificación de precisión para realizar las comprobaciones periódicas de manera que las causas fundamentales de los errores de la máquina y el accesorio puedan ser rastreadas y corregidas fácilmente. De esta manera, la invención pretende permitir los niveles más altos posibles de inexactitudes de hardware que todavía permitan que las piezas sean producidas dentro de las tolerancias aceptables. De esta manera, se minimiza la frecuencia de las intervenciones físicas, y cuando la intervención física es necesaria, la probable causa fundamental del error está identificada de manera que el extenso tiempo de inactividad para identificar y corregir la causa es innecesario.

El procedimiento de la invención permite también la determinación de la precisión de la máquina y el accesorio sin necesidad de ningún sistema de referencia basado en la base o ningún otro sistema de referencia externo a la máquina. En su lugar, se define una relación maestro-esclavo entre la máquina y el accesorio de sujeción, y la precisión de la máquina y el accesorio se comprueba dentro de un marco de referencia maestro que es relativo a los ejes a lo largo de los cuales se mueve la máquina. Por consiguiente, en la mayoría de los casos, no es necesario calibrar la máquina con respecto al suelo y la gravedad, tal como se requiere en muchos procedimientos de la técnica anterior, con el fin de asegurar que las piezas producidas se producirán dentro de la tolerancia.

Para estos fines, el procedimiento según al menos algunas realizaciones de la invención implica la realización de comprobaciones periódicas regulares de la precisión del posicionamiento de la máquina y la relación entre la máquina y el accesorio de sujeción de piezas de trabajo usando una sonda de medición que está montada en el husillo del portaherramientas de la máquina donde normalmente estaría sujeta la máquina herramienta (por ejemplo, una broca o similar). Las comprobaciones se realizan en un orden particular, de manera que en cada comprobación, los errores pueden ser atribuidos a una causa o múltiples causas que sean sustancialmente independientes de cualquier otra inexactitud que todavía no ha sido identificada y corregida en las etapas anteriores del procedimiento. El procedimiento es adecuado para su uso con cualquier máquina herramienta de múltiples ejes. Las realizaciones de la invención descritas en la presente memoria se centran particularmente en una máquina del tipo que se desplaza a lo largo de guías lineales que definen los ejes de traslación de la máquina; típicamente, hay al menos dos ejes de traslación ortogonales y, frecuentemente, hay tres ejes mutuamente ortogonales a lo largo de los cuales la máquina puede ser movida para posicionar la herramienta en cualquier punto en un volumen tridimensional. Por ejemplo, la máquina puede incluir un pórtico, poste u otro impulsor principal que se desplaza a lo largo de guías sobre un suelo a lo largo de una dirección del eje X, y un cilindro de la máquina puede desplazarse verticalmente a lo largo del impulsor principal a lo largo de un eje Y y hacia adelante y hacia atrás sobre el impulsor principal a lo largo de un eje Z. Frecuentemente, la máquina será capaz además de girar la herramienta alrededor de uno o más ejes de manera que la orientación del eje de la herramienta puede ser variada. Por ejemplo, el husillo puede estar montado sobre una articulación de tipo muñeca que está montada en el cilindro, en la que la muñeca tiene un cabezal que gira en el cilindro alrededor de un eje de rotación y un cuerpo montado de manera giratoria en el cabezal alrededor de otro eje de rotación. En base a la presente descripción, las personas con conocimientos ordinarios en la materia reconocerán, sin embargo, que los procedimientos de la presente invención pueden aplicarse a cualquier máquina multi-eje con control numérico.

De esta manera, en una realización, la sonda de medición está montada en el husillo de la máquina, e inicialmente se comprueba la alineación de la sonda con el eje de rotación del cabezal de la muñeca de la máquina. Más particularmente, la precisión de la alineación de la sonda con relación al eje de rotación del cabezal es medida haciendo girar el cabezal alrededor de su eje y moviendo la máquina para hacer que la sonda contacte con un elemento de referencia fijo o superficie de referencia. Si la sonda mide una posición diferente para el elemento de referencia en dos posiciones de giro diferentes del cabezal, esto es una indicación de falta de alineación de la sonda u otra anomalía. Las causas probables del desplazamiento de la posición medida del elemento de referencia se rastrean y se corrigen.

La precisión con la que la máquina puede ser posicionada de manera repetible a lo largo de cada uno de sus ejes de traslación es comprobada moviendo la máquina, de manera independiente, a lo largo de cada eje para hacer que la sonda contacte con el elemento de referencia, y detectando los errores en base a las posiciones del elemento de referencia medidas por la sonda. Si esta comprobación falla, entonces la longitud de la sonda puede ser diferente de lo que se supone que es, o el elemento de referencia puede haberse desplazado, o la máquina puede haberse desplazado. Cada potencial causa de error en la precisión del posicionamiento de rotación y de traslación y el alineamiento del eje es investigada, y es corregida si es necesario, antes de seguir adelante con el procedimiento de calificación de la precisión, o antes de proceder al mecanizado de piezas.

Las comprobaciones con la sonda contra el elemento de referencia son útiles para detectar ciertos errores causados por la sonda y errores causados por la máquina que puedan resultar en la producción de piezas fuera de la tolerancia. Sin embargo, hay muchas otras posibles fuentes de error que las comprobaciones del elemento de referencia no pueden detectar. Por ejemplo, las comprobaciones del elemento de referencia no proporcionan ninguna información relacionada con los posibles errores que pueden ser introducidos en el accesorio de sujeción de piezas de trabajo y el posicionamiento relativo del accesorio y la máquina. Además, las comprobaciones del elemento de referencia no están diseñadas para comprobar la linealidad y la ortogonalidad de los ejes de la máquina a lo largo de toda la zona de trabajo de la máquina, ni están diseñadas para comprobar la precisión del posicionamiento de traslación y de rotación de la máquina a lo largo de la totalidad de los rangos de movimientos de la máquina que se emplean durante la producción.

Por consiguiente, una vez realizadas satisfactoriamente las comprobaciones del elemento de referencia, y

localizadas y corregidas las inexactitudes detectadas en el mismo, la sonda de medición se usa para realizar un sondeo del accesorio de sujeción de piezas de trabajo. En una realización, el accesorio incluye una pluralidad de elementos de sujeción que son móviles a lo largo de al menos un eje, de manera que el accesorio puede ser adaptado a la configuración de la pieza de trabajo que se está mecanizando. Más preferentemente, los elementos de sujeción del accesorio pueden ser movidos, de manera independiente, a lo largo de dos o tres ejes mutuamente ortogonales. El accesorio es controlado numéricamente por una unidad de control del accesorio, que realiza su propia determinación interna de donde están posicionados los elementos de sujeción, por ejemplo, según las señales de posición de retroalimentación desde los actuadores que mueven los elementos de sujeción y responden a las señales de control que indican a los actuadores donde posicionar los elementos de sujeción. Se apreciará que si los elementos de sujeción no están posicionados donde la máquina "piensa" que están posicionados, entonces, se introducirán inexactitudes en las piezas acabadas. De esta manera, el accesorio está configurado con los elementos de sujeción colocados en posiciones predeterminadas, y la máquina es movida para hacer que la sonda se ponga en contacto con los elementos de sujeción a lo largo de cada eje a lo largo del cual pueden moverse los elementos de sujeción. Las posiciones medidas por la sonda de los elementos de sujeción se comparan con las posiciones deseadas, y los valores delta que representan las discrepancias entre las posiciones reales y las deseadas se determinan a lo largo de cada eje para cada elemento de sujeción. A continuación, los valores delta se tienen en cuenta en el software de la unidad de control del accesorio de sujeción con el fin de "ajustar a cero" las discrepancias. Idealmente, a continuación, el accesorio de sujeción puede ser colocado en la configuración sondeada y los elementos de sujeción estarán donde se supone que deben estar.

Para comprobar el accesorio de sujeción sobre toda la zona de trabajo en la que puede ser usado, preferiblemente, se realiza una comprobación posterior a la calibración colocando el accesorio en diversas configuraciones diferentes con los elementos de sujeción en posiciones diferentes a las usadas en la comprobación inicial de la sonda. Las posiciones reales de los elementos de sujeción, según se determinan por la máquina y la sonda, se comparan con las posiciones deseadas (es decir, las ordenadas), y se calculan de nuevo los valores delta para cada configuración. Si los valores delta en cualquier configuración para cualquiera de los elementos de sujeción exceden un límite de umbral, entonces las correcciones de software del accesorio de sujeción no son adecuadas para corregir el problema, y se realiza una intervención física para llevar el accesorio de nuevo a una precisión aceptable de manera que pueda pasar las comprobaciones de la sonda. Es ventajoso realizar las comprobaciones de la sonda del accesorio de sujeción de manera regular y periódica, pero puede mantenerse un control satisfactorio de la relación máquina-accesorio aunque las comprobaciones de la sonda del accesorio se realicen menos frecuentemente que las comprobaciones del elemento de referencia de la precisión de la máquina. Por ejemplo, las comprobaciones del elemento de referencia de la máquina pueden realizarse de manera diaria antes del comienzo de o entre las operaciones de producción, mientras que las comprobaciones de la sonda del accesorio pueden ser realizadas semanalmente. Por supuesto, estos períodos son meramente ejemplares.

Tal como se ha indicado anteriormente, el orden en el que se realizan las diversas comprobaciones de precisión forma una parte de al menos algunas realizaciones de la invención. Es preferible realizar las comprobaciones en un orden que excluya las posibles causas de error en un orden lógico. Por ejemplo, no debería realizarse una comprobación del accesorio de sujeción con la sonda hasta que se sepa si la precisión del posicionamiento de la máquina es aceptable. Por consiguiente, un procedimiento para la calificación de la precisión de la máquina en una realización incluye las etapas de:

(1) montar una sonda de medición de contacto en un husillo de la máquina donde normalmente se montaría una máquina herramienta para realizar el mecanizado, y comprobar la precisión del posicionamiento de la máquina moviendo la máquina para causar que la sonda contacte con un elemento de referencia fija en una posición conocida, de manera que la sonda mide una posición del elemento de referencia, y pasar a la etapa siguiente sólo si la posición medida por la sonda del elemento de referencia está dentro de una tolerancia predeterminada de la posición conocida;

(2) posteriormente, comprobar la precisión del posicionamiento del accesorio de sujeción moviendo la máquina para hacer que la sonda contacte con cada uno de uno de entre una pluralidad de elementos de sujeción del accesorio que han sido colocados en posiciones determinadas dentro de una unidad de control numérico del accesorio de sujeción que controla el posicionamiento de los elementos de sujeción, de manera que la sonda mide una posición de cada elemento de sujeción; y

(3) pasar a las operaciones de mecanizado sólo si la posición medida por la sonda de cada elemento de sujeción que ha sido comprobado está dentro de una tolerancia predeterminada con respecto a la posición determinada dentro de la unidad de control numérico del accesorio de sujeción.

En una realización adicional, la longitud y la alineación de la sonda y la precisión y la alineación de los ejes de rotación de la máquina se califican, en primer lugar, moviendo la máquina para sondear el elemento de referencia fijo, a continuación, se comprueba la precisión de la máquina a lo largo de sus ejes de traslación usando la sonda

contra el elemento de referencia. Una vez pasadas estas comprobaciones, se realiza la comprobación de la sonda del accesorio de sujeción.

5 En una realización particular de la invención, descrita en la presente memoria, el accesorio de sujeción tiene una pluralidad de columnas paralelas, separadas entre sí, cada una de las cuales soporta una pluralidad de pogos extensibles y retráctiles con conjuntos de vacío para succionar una pieza de trabajo en el accesorio de sujeción y asegurarla para el mecanizado. Los pogos pueden ser desplazados a lo largo de la columna en la que están montados, en una dirección nominalmente paralela a un eje Y de la máquina. Las columnas pueden ser desplazadas en una dirección nominalmente paralela a un eje X de la máquina. Los pogos se extienden y se
10 retraen a lo largo de una dirección nominalmente paralela a un eje Z de la máquina. La máquina se desplaza en la dirección X a lo largo de guías en un suelo. Un cilindro de la máquina se desplaza a lo largo de los ejes Y y Z sobre guías montadas en la máquina. Una muñeca está montada, de manera giratoria, en el cilindro. Un cabezal de la muñeca gira sobre el cilindro alrededor de un eje C que es nominalmente paralelo al eje Z. Un cuerpo de sujeción de husillo de la muñeca está montado, de manera giratoria, en el cabezal de manera que gire alrededor de un eje A que es nominalmente perpendicular al eje C. El husillo de la máquina está montado sobre el cuerpo. El husillo puede ser trasladado a lo largo de un eje W hacia y lejos del eje A.

La sonda de medición se monta en el husillo de manera que el eje longitudinal de la sonda esté alineado a lo largo del eje W. La longitud de la sonda desde el eje A a una punta de la sonda se fija a una longitud predeterminada. La longitud y la alineación de la sonda se comprueban moviendo la máquina para hacer que la sonda contacte con un elemento de referencia fijo montado en el suelo próximo a la máquina. Preferiblemente, una primera etapa implica la colocación del cuerpo de sujeción de husillo de la máquina en una posición inicial en la que se supone que el eje W es colineal con el eje C de rotación de la muñeca. Con todos los otros ejes de la máquina fijos, la máquina es movida a lo largo de la dirección X para hacer que la sonda contacte con dos puntos diametralmente opuestos en el borde interior de un orificio circular formado en un elemento de referencia fijo. El plano del borde circular del orificio se encuentra en el plano XY nominal de la máquina; de esta manera, el eje de la sonda es nominalmente paralelo al eje del orificio. A continuación, la máquina es movida para posicionar la sonda en el punto medio entre los dos puntos X y es movida a lo largo de la dirección Y para hacer que la sonda toque dos puntos diametralmente opuestos en el borde circular. A partir de estos puntos X e Y, se calculan las coordenadas X e Y del centro del orificio circular. A continuación, la muñeca de la máquina se hace girar 180 grados alrededor del eje C y los puntos X e Y del borde del orificio se miden con la sonda. Si las coordenadas X e Y del centro del orificio calculadas después del giro alrededor del eje C no están dentro de las tolerancias predeterminadas de las coordenadas calculadas antes del giro, entonces, esto significa que hay un posible desajuste del eje de la sonda con respecto al eje C. Diversas causas pueden ser responsables de la diferencia en los centros calculados del orificio, incluyendo microinterruptores doblados en el mecanismo de la sonda, flexión del eje de la sonda, inexactitud en la posición inicial del cuerpo de sujeción de husillo alrededor del eje A, y/o no ortogonalidad del eje A con respecto al eje C. Cada causa potencial es investigada y es corregida si es necesario, antes de proceder a etapas posteriores del procedimiento.

40 La longitud de la sonda desde el eje A a la punta de la sonda es comprobada posicionando la muñeca de manera que la sonda se extienda paralela a uno de los ejes de traslación de la máquina, tal como el eje X, y moviendo la máquina a lo largo de este eje para hacer que la punta de la sonda contacte con un lado de un elemento de referencia fijo, y se mide la posición del lado del elemento de referencia. A continuación, el cuerpo de la sujeción de husillo es girado 180 grados de manera que la sonda se extienda en una dirección opuesta pero todavía paralela con el eje de traslación de la máquina, y la máquina es movida a lo largo de este eje para hacer que la punta de la sonda contacte con y mida la posición de un lado opuesto del elemento de referencia. La distancia entre los lados opuestos del elemento de referencia en la dirección del eje de traslación es conocida. En base a esta distancia conocida y las posiciones medidas de los lados opuestos del elemento de referencia, se calcula la longitud de la sonda desde el eje A a la punta. Si la longitud calculada no está dentro de una tolerancia predeterminada de un valor deseado, las posibles causas de la discrepancia son investigadas y corregidas.

Una vez que las comprobaciones del elemento de referencia han asegurado que la longitud de la sonda es correcta y que la ortogonalidad del eje A con relación al eje C es aceptable, la precisión del posicionamiento de traslación de la máquina a lo largo de los ejes X, Y y Z es comprobada moviendo la máquina a lo largo de cada eje, uno cada vez, para sondear un elemento de referencia fijo que tiene superficies cuyas posiciones a lo largo de cada eje se presume que son conocidas. De manera ventajosa, el elemento de referencia puede ser el mismo elemento de referencia usado en las comprobaciones anteriores; más específicamente, la precisión del posicionamiento de la máquina a lo largo de los ejes X e Y es comprobada sondeando el borde interior del orificio circular en el elemento de referencia. Las coordenadas de posición X e Y se miden para al menos tres puntos separados entre sí cerca del
60 borde del orificio y, a partir de estos puntos, se calculan las coordenadas X e Y del centro del orificio. Si el centro calculado no está dentro de una tolerancia predeterminada de un centro previamente enseñado, las posibles

causas son investigadas y corregidas. De manera similar, la precisión de la máquina a lo largo del eje Z es comprobada moviendo la máquina en la dirección Z para sondear una superficie del elemento de referencia, y comparando la posición medida de la superficie con una posición conocida, y las posibles causas de cualquier discrepancia inaceptablemente grande son investigadas y corregidas. Las principales causas de las discrepancias en las posiciones X, Y y Z medidas para el elemento de referencia incluyen un desplazamiento de la máquina a lo largo de sus ejes de traslación, o un desplazamiento del elemento de referencia.

Una vez comprobada la precisión de la traslación de la máquina con la sonda, preferiblemente, se comprueba la precisión del posicionamiento de rotación de la muñeca alrededor del eje C. La muñeca se hace girar alrededor del eje C a una posición en la que la sonda debería extenderse nominalmente paralela al eje X. La máquina es movida a lo largo del eje Y para hacer que la sonda toque una superficie de un elemento de referencia fijo, y la posición Y de esta superficie es medida por la sonda. A continuación, la muñeca se hace girar 180 grados alrededor del eje C, y la máquina es movida de nuevo para hacer que la sonda mida la posición Y de la misma superficie. Si las dos posiciones Y medidas no concuerdan entre sí dentro de una tolerancia predeterminada, las posibles causas de la discrepancia son investigadas y corregidas. La causa principal es una imprecisión en el posicionamiento de rotación de la muñeca alrededor del eje C, es decir, la rotación era menor o mayor de 180 grados, en una cantidad determinada.

Preferiblemente, la comprobación de la precisión del accesorio de sujeción se realiza sólo una vez completadas con éxito todas las comprobaciones del elemento de referencia. En una comprobación previa a la calibración del accesorio, se hace que la unidad de control del accesorio extienda o retraiga determinados pogos a una posición Z predeterminada, por ejemplo, de manera que todos los pogos seleccionados están a $Z = 30,5$ cm (12 pulgadas). Estos pogos están separados entre sí en las direcciones X e Y preferiblemente sobre toda la zona de trabajo de la máquina. Las columnas móviles sobre las que se montan estos pogos se colocan en posiciones X predeterminadas, y los pogos se colocan en posiciones Y predeterminadas a lo largo de cada columna. A continuación, la máquina es movida a lo largo de cada eje X, Y y Z para hacer que la sonda contacte con las superficies de los conjuntos de vacío que están montados en los extremos de los pogos. Las posiciones X, Y y Z de estas superficies son medidas por la sonda de la máquina y son comparadas con las posiciones determinadas por la unidad de control del accesorio. Se calculan los valores delta entre las posiciones X, Y y Z medidas por la sonda y determinadas por el accesorio, y se usan en la unidad de control del accesorio como valores de desplazamiento para "ajustar a cero" las discrepancias.

Puede realizarse una comprobación posterior a la calibración una vez aplicados los valores delta en la unidad de control del accesorio. Preferiblemente, los pogos se colocan en una pluralidad de posiciones X, Y y Z diferentes, separadas a lo largo de un volumen de trabajo de la máquina y son sondeados por la máquina para determinar los valores delta X, Y y Z. Si los valores delta superan las tolerancias predeterminadas, entonces, el ajuste a cero de las discrepancias dentro de la unidad de control del accesorio no es adecuado para corregir las imprecisiones de posicionamiento del accesorio, y no se necesita una intervención física para corregir el problema.

Se apreciará que las comprobaciones de la sonda, por sí solas, no son adecuadas para detectar y diagnosticar ciertas fuentes de errores en la precisión de la máquina. Típicamente, las comprobaciones del elemento de referencia se realizan con la máquina moviéndose sobre sólo un volumen de espacio relativamente pequeño, mientras que en la producción la máquina debe moverse sobre un volumen de espacio mucho más grande. De esta manera, las comprobaciones del elemento de referencia no están diseñadas para detectar errores, por ejemplo, en la rectitud de las guías de la máquina o la ortogonalidad de los ejes de traslación. Por consiguiente, el procedimiento según realizaciones preferidas de la invención incluye una comprobación adicional de la precisión de la máquina para determinar la precisión global general del posicionamiento de la máquina a lo largo de sus ejes de traslación y alrededor de sus ejes de rotación. De manera ventajosa, la comprobación del posicionamiento global emplea un dispositivo de medición de posición tri-dimensional, idealmente, un seguidor de láser u otro instrumento de medición por láser, que es capaz de medir las coordenadas tridimensionales de una diana montada en la máquina contigua al husillo en el que normalmente se sostendría una herramienta. Preferiblemente, el instrumento de medición se usa, en primer lugar, para crear un marco de referencia maestro en relación a las guías de la máquina. Esto se consigue moviendo la máquina a lo largo de un solo eje, por ejemplo el eje X definido por las guías que se extienden a lo largo del suelo, y usando el instrumento de medición para medir las posiciones de la diana en cada uno de entre una pluralidad de puntos separados a lo largo de la dirección del eje X. El mismo procedimiento se realiza a lo largo del eje Y, que es nominalmente perpendicular al eje X. Se realiza un cálculo de la línea de mejor ajuste para los puntos medidos por el instrumento de medición para determinar un conjunto de ejes de coordenadas mutuamente ortogonales que define un marco de referencia maestro basado en los propios ejes de traslación de la máquina. Este procedimiento de ajuste óptimo distribuye errores en la linealidad y la ortogonalidad de los ejes de traslación de la máquina sobre la zona de trabajo de la máquina. Con la creación del marco de referencia maestro con relación a las guías de la máquina, la invención elimina la necesidad de

establecer un sistema de referencia basado en la base o cualquier otro sistema de referencia exterior a la máquina.

Una vez determinado el marco de referencia maestro, la precisión de la máquina es comprobada moviendo la máquina con el fin de posicionar el husillo en cada una de entre una pluralidad de ubicaciones que están preferiblemente separadas a lo largo de cada eje de traslación a lo largo de la zona de trabajo de la máquina, midiendo las coordenadas de la diana con el instrumento de medición para cada ubicación, y determinando los errores en el posicionamiento de la máquina comparando las coordenadas medidas con las coordenadas determinadas por la máquina determinadas dentro de la unidad de control numérico de la máquina. Si cualquier discrepancia entre la posición medida por el instrumento de medición y la posición determinada por la máquina excede un límite de umbral (o, como alternativa, si una suma estadística de todos los errores excede un límite de umbral), entonces se emplea la intervención física para corregir la máquina para que pueda pasar la comprobación de la precisión del posicionamiento global. De manera ventajosa, la precisión de la máquina sólo se comprueba dentro de la zona de trabajo (es decir, el espacio 3-D dentro del cual es necesario que la máquina se mueva durante las operaciones de mecanizado), en lugar de comprobar la precisión de la máquina en todo el rango de capacidad de movimiento de la máquina. Esto minimiza el tiempo necesario para recopilar los datos de precisión.

Una comprobación similar de precisión de posicionamiento es realizada para los ejes A y C de rotación y el eje W del husillo de la máquina, fijando los ejes de traslación y colocando la máquina en diversas posiciones mediante movimientos alrededor de los ejes A y C y a lo largo del eje W. Las posiciones de la diana son medidas por el instrumento de medición y son comparadas con las posiciones determinadas dentro de la máquina. Las diferencias entre las posiciones medidas de la diana y las posiciones determinadas por la máquina se comparan con valores límite de umbral para determinar si es necesaria una intervención física para llevar a la máquina dentro de una precisión aceptable.

Las comprobaciones de la precisión del posicionamiento de la máquina pueden incluir también comprobaciones dinámicas de la precisión en las que se ordena a la máquina moverse a lo largo de una curva predeterminada (por ejemplo, un círculo) en cada uno de los planos XY, YZ y XZ, y la posición de la diana es medida en cada uno de entre una pluralidad de puntos a lo largo de la curva. Las discrepancias entre las posiciones medidas y las posiciones deseadas pueden ser debidas a diversas causas potenciales, incluyendo la falta de ortogonalidad entre los ejes de la máquina o la imprecisión en el posicionamiento de traslación a lo largo de los ejes de la máquina. Las comprobaciones dinámicas permiten que los datos de los planos perpendiculares sean relacionados directamente en rectitud, perpendicularidad y precisión.

Preferiblemente, las comprobaciones de la precisión del posicionamiento global usando el instrumento de medición se realizan de manera periódica regular, pero pueden ser menos frecuentes que las comprobaciones de la sonda del accesorio. Por ejemplo, de manera ventajosa, la comprobación de la precisión del posicionamiento global puede realizarse mensualmente.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Los objetos, características y ventajas anteriores y otros de la invención serán más evidentes a partir de la descripción siguiente de ciertas realizaciones preferidas de la misma, tomadas en conjunción con los dibujos adjuntos, en los que:

La Figura 1 es una vista en perspectiva de un tipo de sistema de mecanizado al cual es aplicable el procedimiento de la presente invención;

La Figura 2 es una vista en perspectiva de una parte de la máquina, que ilustra los ejes de traslación y de rotación de la máquina, y que muestra también un seguidor de láser usado para realizar un seguimiento de la precisión del posicionamiento de la máquina;

La Figura 3 es una vista en perspectiva de la máquina durante una comprobación de la sonda contra un elemento de referencia fijo para comprobar la alineación de la sonda con el eje C de rotación de la máquina;

La Figura 4 es un alzado lateral del elemento de referencia que representa las mediciones que se realizan con la sonda para la evaluación de la alineación de la sonda con el eje C;

La Figura 5 es una vista en perspectiva de la máquina durante una comprobación de la sonda contra el elemento de referencia fijo para comprobar la longitud de la sonda;

La Figura 6 es una vista superior del elemento de referencia que representa la medición que se realiza con la sonda para determinar la longitud de la sonda;

La Figura 7 es una vista en perspectiva de la máquina durante una comprobación de la sonda contra el elemento de referencia fijo para evaluar la precisión del posicionamiento repetible de la máquina a lo largo de sus ejes de traslación;

La Figura 8 es un alzado lateral del elemento de referencia que representa la medición que se realiza con la sonda para evaluar la precisión del posicionamiento de la máquina;

La Figura 9 es una vista en perspectiva de la máquina durante una comprobación de la sonda contra el elemento de referencia fijo para comprobar la precisión del posicionamiento de rotación de la máquina alrededor del eje C;

La Figura 10 es un alzado lateral del elemento de referencia que representa las mediciones que se realizan con la sonda para comprobar la precisión del posicionamiento de rotación de la máquina alrededor del eje C;

La Figura 11 es una vista en perspectiva que representa una comprobación de la sonda del accesorio de sujeción;

La Figura 12 es una vista en perspectiva que representa un seguidor de láser usado para comprobar la precisión del posicionamiento global de la máquina a lo largo de sus ejes de traslación;

La Figura 13A es una vista superior esquemática de la configuración de ensayo de seguimiento láser;

La Figura 13B es una vista esquemática en alzado lateral de la configuración de ensayo de seguimiento láser;

La Figura 14 es una ilustración esquemática de los diversos puntos separados a lo largo de la zona de trabajo tridimensional de la máquina en los que la posición de la máquina es medida por el seguidor de láser durante la comprobación de la precisión del posicionamiento global;

La Figura 15 es una ilustración esquemática de una comprobación dinámica de la precisión del posicionamiento de la máquina en el plano XY de la máquina;

La Figura 16 es un ejemplo ilustrativo de un gráfico para mostrar los resultados de la comprobación de la precisión del posicionamiento global de la máquina;

La Figura 17 es un ejemplo ilustrativo de otro gráfico para mostrar los resultados de la comprobación de la precisión del posicionamiento global de la máquina;

La Figura 18 es un diagrama de flujo que representa una realización de un procedimiento según la presente invención para calificar la precisión del sistema de la máquina;

La Figura 19 representa esquemáticamente un panel montado en el accesorio de sujeción y muestra la relación entre los errores de los ejes Y y Z y el error resultante en el posicionamiento a lo largo del panel; y

La Figura 20 es una tabla que muestra un ejemplo numérico de las fuentes de errores significativos en la máquina y el accesorio de sujeción representado en los dibujos, y que muestra el error total estadístico resultante en la posición de la máquina herramienta.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LOS DIBUJOS

Ahora, la presente invención se describirá más detalladamente, a continuación, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que se muestran realizaciones preferidas de la invención.

La Figura 1 representa un tipo de sistema de mecanizado al que es aplicable la presente invención. El sistema de mecanizado se usa para el mecanizado de piezas de trabajo **W** con forma de panel, de gran tamaño, tal como paneles de un fuselaje para una aeronave. En el montaje de fuselajes de aeronaves, una diversidad de elementos son fijados a los paneles del fuselaje, incluyendo nervios de refuerzo, soportes, componentes de sistemas, entre otros. Los paneles deben ser perforados con orificios para permitir que elementos de fijación, tales como remaches, pernos, o similares, sean insertados para fijar las diversas estructuras a los paneles. Es importante que los orificios sean mecanizados de manera precisa, en términos de posición y orientación. Las piezas de trabajo **W** se fijan en la posición de mecanizado mediante un accesorio **30** de sujeción flexible. El accesorio de sujeción se describe más detalladamente, más adelante, pero para los propósitos presentes es suficiente señalar que el accesorio incluye una pluralidad de varillas o pogos **32** extensibles y retráctiles, cada una de los cuales tiene un conjunto **34** de vacío montado en su extremo orientado hacia la pieza de trabajo. El conjunto **34** de vacío incluye una ventosa que está conectada a una fuente de vacío (no mostrada) de manera que la pieza **W** de trabajo puede ser succionada contra el pogo **32**. Cada uno de los pogos **32** se extiende en la medida apropiada de manera que se adaptan colectivamente al contorno de la pieza de trabajo y de manera que la pieza de trabajo se fije contra el accesorio de sujeción en una orientación predeterminada. El posicionamiento de los pogos **32** es controlado por una unidad **36** de control numérico del accesorio de sujeción, que está en comunicación con los actuadores (no mostrados) que extienden y retraen los pogos.

El sistema de mecanizado incluye también una máquina **40** con control numérico que puede ser trasladada y girada alrededor de una pluralidad de ejes y lleva un husillo portaherramientas (descrito más adelante) en el que puede montarse una herramienta, tal como cortador rotativo. La máquina **40** en la realización ilustrada es una fresadora de columna de cinco ejes, pero la invención no se limita a una fresadora de columna, tal como reconocerán las personas con conocimientos en la materia. La máquina incluye un impulsor **42** principal que se desplaza a lo largo de los carriles o guías **44** instalados a lo largo de un suelo horizontal. El impulsor **42** principal de la fresadora de columna comprende la columna; para una máquina de tipo pórtico, el impulsor sería la viga pórtico o travesaño. Las guías **44** son lineales y paralelas, definiendo una dirección del eje X a lo largo de la cual puede ser trasladada la máquina. La máquina incluye un actuador adecuado (no mostrado) para mover la máquina

a lo largo del eje X.

5 El impulsor **42** principal incluye un poste o columna **46** vertical que se extiende hacia arriba desde el mismo. Un par de carriles o guías **48** lineales paralelos están montados en la columna **46** vertical y definen un eje Y que es perpendicular al eje X. Una corredera **50** está montada, de manera deslizante, en las guías **48** del eje Y. La corredera **50** es desplazada verticalmente hacia arriba y hacia abajo a lo largo del impulsor **42** principal por un actuador adecuado (no mostrado).

10 La corredera **50** incluye carriles o guías **52** lineales que se extienden a lo largo de la dirección de un eje Z perpendicular a los ejes X e Y. Un cilindro **54** está montado, de manera deslizante, en las guías **52** de la corredera de manera que sea móvil en la dirección del eje Z hacia y desde el accesorio **30** de sujeción. Una muñeca **56** articulada está montada en el cilindro **54**.

15 La muñeca **56** se observa mejor en la Figura 2. La muñeca **56** incluye un cabezal **58** que está montado en el cilindro **54**, de manera que pueda girar con relación al cilindro alrededor de un eje C. El cabezal **58** incluye un par de elementos de horquilla paralelos separados, entre los cuales está montado, de manera giratoria, un cuerpo **60** de manera que pueda girar con relación al cabezal **58** alrededor de un eje A. Unos actuadores adecuados (no mostrados) proporcionan la fuerza motriz para hacer girar el cabezal **58** alrededor del eje C y para hacer girar el cuerpo **60** alrededor del eje A. El cuerpo **60** soporta un husillo **62** de portaherramientas, extensible y retráctil, que es operable para sostener una máquina herramienta, tal como una broca de taladro u otra herramienta de corte rotativo (no mostrada) y para hacer girar la herramienta alrededor del eje del husillo, el cual está alineado nominalmente con el eje C de la máquina cuando el cuerpo **60** está en una posición inicial. El husillo **62** es operable además para extender y retraer la máquina herramienta a lo largo de un eje **W** que coincide nominalmente con el eje de rotación del husillo. El movimiento del husillo **62** a lo largo del eje **W** es proporcionado por un actuador adecuado (no mostrado). Este movimiento del husillo se usa para introducir un cortador giratorio en y a través de una pieza de trabajo, tal como cuando se perfora un orificio. Todos los actuadores que proporcionan movimientos de la máquina a lo largo de los ejes X, Y, Z, W, A y C están en comunicación con una unidad **64** de control numérico (Figura 13A) que controla el movimiento y el posicionamiento de la máquina.

30 La precisión de las operaciones de mecanizado realizadas sobre una pieza de trabajo soportada en el accesorio **30** de sujeción depende de que la máquina **40** sea posicionada de manera precisa conforme la máquina realiza diversos movimientos a lo largo y alrededor de sus ejes de traslación y rotación. Estos movimientos son controlados mediante la programación de un conjunto de instrucciones de control numérico en la unidad **64** de control de la máquina. Las instrucciones se definen con relación a un sistema de coordenadas ortogonales basadas en los ejes XYZ de la máquina. Por consiguiente, un factor que puede afectar negativamente a la precisión de las operaciones de mecanizado es la no linealidad de cualquiera de los ejes X, Y y Z y/o la no ortogonalidad de estos ejes. Las instrucciones de control de la máquina suponen también que el eje C es paralelo al eje Z, que el eje A es perpendicular al eje C, que el eje W es perpendicular al eje A, y que el husillo está ubicado a lo largo de la dirección del eje W a una distancia conocida del eje A. Por consiguiente, en la medida en que cualquiera de estos supuestos es incorrecto debido a errores en la alineación y las relaciones entre los ejes W, A y C, la precisión del posicionamiento de la máquina herramienta sujeta en el husillo se verá comprometida. Las personas con conocimientos en el campo de las máquinas de múltiples ejes, con control numérico, reconocerán que la máquina **40** ilustrada en la presente memoria corresponde a una fresadora de columna de cinco ejes fabricada por Aeroflex, Inc. de Rockford, Illinois.

45 La precisión de las operaciones de mecanizado depende también de la precisión del accesorio **30** de sujeción. Tal como se ha indicado anteriormente, el posicionamiento de los pogos **32** del accesorio de sujeción es controlado por la unidad **36** de control numérico para el accesorio. La unidad **36** de control está programada con instrucciones de control numérico que definen las posiciones en las que los pogos deben ser posicionados para fijar la pieza de trabajo en la posición y la orientación deseadas con respecto a la máquina **40**. Las instrucciones de control suponen una relación de posición conocida entre el accesorio **30** de sujeción y la máquina **40**. Si la relación entre el accesorio de sujeción y la máquina es diferente de la supuesta, la precisión de las operaciones de mecanizado se verá afectada negativamente. Esto puede ser causado, por ejemplo, por un desajuste de los ejes de los pogos **32** con relación al eje Z de la máquina. En el sistema de mecanizado ilustrado, los ejes de los pogos a lo largo de los cuales los pogos se extienden y retraen están destinados a ser paralelos con respecto al eje Z. Una inexactitud puede surgir también debido a un posicionamiento inexacto de los pogos a lo largo de sus ejes. De esta manera, es evidente que hay un número bastante grande de potenciales problemas que pueden conducir a inexactitudes en las piezas acabadas producidas en el sistema de mecanizado. La presente invención pretende proporcionar un procedimiento metódico mediante el cual puede cuantificarse el grado de inexactitud y las causas fundamentales de las imprecisiones pueden ser rastreadas y corregidas. La invención pretende además minimizar la cantidad de intervención física necesaria para corregir las inexactitudes.

Comprobaciones de la máquina y la sonda con relación al elemento de referencia fijo

Para evaluar la precisión con la que la máquina puede ser posicionada a lo largo de sus ejes X, Y y Z de traslación, el posicionamiento de la máquina con relación a un elemento de referencia fijo es comprobado con una sonda de medición de contacto. Las Figuras 3 a 10 ilustran una serie de comprobaciones que se realizan en este sentido. Para las comprobaciones de la sonda, una sonda **70** de medición de contacto está montada en el husillo **62** portaherramientas donde normalmente se sostendría la máquina herramienta. De manera ventajosa, la sonda **70** de medición de contacto puede ser una sonda de activación por contacto fabricada por Renishaw PLC de Gloucestershire, Reino Unido, tal como la sonda de activación por contacto modelo MP-3 fabricada por Renishaw. Dicha sonda incluye un buril **72** que está montado en un cabezal **74** de la sonda. Dentro del cabezal **74** de la sonda hay una pluralidad de sensores de contacto (no mostrado) que pueden detectar desviaciones muy ligeras del buril en cualquier dirección, tales como las causadas cuando la sonda contacta con un objeto conforme la sonda es movida. La sonda **70** está en comunicación con la unidad **64** de control numérico (Figura 13A) de la máquina **40**, de manera que cuando la punta del buril **72** contacta con un objeto conforme la máquina es movida, la sonda hace que la unidad de control de la máquina determine la posición de la máquina a lo largo de sus ejes; de esta manera, la posición del objeto contactado por la sonda puede ser determinada con relación al sistema de ejes XYZ de la máquina. En algunos sistemas de sonda de medición, la sonda se comunica directamente con la unidad de control de la máquina; y en otros sistemas de sonda, hay una interfaz de sonda interpuesta entre la sonda y la unidad de control de la máquina. En cualquier caso, dentro de la unidad de control de la máquina o en la interfaz de la sonda, hay un software adecuado para convertir las señales recibidas desde los sensores de contacto dentro de la sonda a coordenadas de posición del objeto contactado por la sonda.

La sonda **70** está montada en el husillo **62** de la máquina de manera que, nominalmente, el eje longitudinal del buril **72** es colineal con el eje del husillo, que corresponde al eje W de la máquina. Sin embargo, diversas anomalías podrían causar que el buril de la sonda no sea colineal con el eje del husillo. Por ejemplo, el buril **72** puede estar doblado. Además, incluso si el buril es colineal con el eje del husillo, si los sensores de contacto en el cabezal **74** de la sonda no están dispuestos de manera que detectan inmediatamente la deflexión del buril (por ejemplo, si los contactos están doblados), entonces la posición medida por la sonda será inexacta.

La sonda **70** debe estar montada también de manera que la punta de la sonda esté a una distancia conocida desde el eje A de rotación de la máquina cuando el husillo **62** es colocado en una posición inicial o de referencia a lo largo del eje W (por ejemplo, completamente retraído o completamente extendido). Esta distancia conocida es usada en el software programado en la interfaz de la sonda-máquina o en la unidad de control de la máquina para calcular la posición de un objeto contactado por la sonda. Si la punta de la sonda no está a esta distancia conocida desde el eje A, entonces la posición calculada del objeto será inexacta.

Comprobación de sonda número 1: Alineación del eje C

Por consiguiente, antes de que pueda comprobarse la precisión de la máquina, debe asegurarse, en primer lugar, de que la sonda esté montada correctamente y funcione apropiadamente. Esto se consigue mediante sondeando un elemento de referencia **M** fijo con la sonda. Inicialmente, tal como se muestra en las Figuras 3 y 4, la sonda **70** es comprobada para asegurarse de que esté alineada con el eje C de la máquina cuando el cuerpo **60** es colocado en su posición inicial que tiene nominalmente el eje del husillo colineal con el eje C. De manera ventajosa, el elemento de referencia **M** comprende un anillo **G** de calibración o similar, que comprende una placa plana de metal que define un orificio **H** circular de diámetro conocido a través de la misma. El anillo **G** de calibración está montado sobre un pedestal **P** fijo que está atornillado o si no fijado rígidamente a una estructura inmóvil, tal como la base o el suelo sobre el que está instalada la máquina. El anillo de calibración está montado de manera que el plano del orificio **H** se encuentra en el plano XY de los ejes X, Y, Z de la máquina (es decir, los ejes definidos por las guías lineales tal como se construyeron originalmente según las especificaciones de fábrica para la máquina), y de manera que el centro del orificio **H** está en una posición X conocida y una posición Y conocida con respecto a estos ejes nominales. Estas posiciones X e Y conocidas pueden determinarse, por ejemplo, sondeando el anillo de calibración (con la sonda montada correctamente y funcionando correctamente) cuando se sabe que la máquina tiene las especificaciones originales de fábrica y produce piezas dentro de la tolerancia aceptable. A continuación, se compara el posicionamiento de la máquina con respecto a la posición conocida del anillo de calibración. Cualquier discrepancia entre las posiciones medidas y conocidas del anillo de calibración puede ser debida a una serie de factores.

Uno de dichos factores es la falta de la relación colineal deseada entre el eje de la sonda y el eje C de la máquina cuando el cuerpo **60** está en su posición inicial. Para verificar la alineación apropiada del eje C de la sonda, tal como se muestra en las Figuras 3 y 4, el cuerpo **60** se hace girar a su posición inicial. El cabezal **58** se hace girar a una posición de referencia con respecto al cilindro **54**, tal como la posición ilustrada en la Figura 3 en la que el eje A es paralelo al eje X de la máquina. Esta puede definirse como una posición de cero grados del cabezal **58**.

Con el cabezal en la posición de cero grados, la máquina es movida de manera que la punta del buril de la sonda esté dentro del orificio **H** del anillo de calibración, y la unidad de control de la máquina ordena a la máquina que posicione el buril en una posición **Y** correspondiente a la posición **Y** conocida del centro del orificio **H**. A continuación, la máquina es movida a lo largo de la dirección **X** hasta que la punta del buril contacta con el borde interior del orificio **H** en una primera ubicación y se mide la posición **X** de este punto, indicada como **X1** en la Figura 4. Después de esto, la máquina es movida en la dirección opuesta a lo largo del eje **X** hasta que la punta del buril contacta con el borde del orificio en el punto diametralmente opuesto y se mide la ubicación **X** de este punto, indicada por **X2**. A continuación, el cabezal **58** de la máquina se hace girar 180 grados alrededor del eje **C**, y la máquina es movida a lo largo del eje **X** para hacer que la sonda contacte con el borde del orificio **H** en la ubicación correspondiente a **X1**, y se mide la ubicación de este punto, indicada mediante **X3**. A continuación, la máquina es movida para colocar el buril en una posición **X** a medio camino entre **X1** y **X2**, y la máquina es movida en la dirección **Y** para hacer que la punta de la sonda contacte con dos puntos diametralmente opuestos en el borde del orificio **H** y se miden las posiciones **Y** de estos puntos, indicadas como **Y1** e **Y2**. A partir de las posiciones **X1**, **X2**, **Y1** e **Y2**, se calculan las coordenadas **X** e **Y** del centro del orificio. Este centro se indica como "centro aproximado" en la Figura 4. Se reconocerá que sólo se necesitan tres de los cuatro puntos para realizar el cálculo del centro; el cuarto punto puede servir como una comprobación, o puede ser descartado.

A continuación, el cabezal **58** de la máquina se hace girar 180 grados alrededor del eje **C** (es decir, de vuelta a la posición en la que estaba el cabezal para medir **X1** y **X2**), y la máquina es movida a la posición medida para el punto **Y1** hasta que el buril contacta con el borde del orificio, y se mide la posición **Y** indicada como **Y3**. Usando **X3**, **Y3**, y uno de los puntos **X2** o **Y2** medidos previamente, las coordenadas **X** e **Y** del centro del orificio **H** se calculan de nuevo; este centro se indica como el "centro preciso" en la Figura 4. Cualquier discrepancia entre las posiciones **X** y/o **Y** de los centros aproximado y preciso indica que hay un cierto desajuste entre el eje de la sonda y el eje **C**. Si las discrepancias superan las cantidades máximas aceptables, entonces la causa de las discrepancias es rastreada y corregida. Una posible causa, tal como se ha indicado anteriormente, es un buril **72** doblado. Otra posible causa son microinterruptores doblados en el cabezal **74** de la sonda, que hacen que el "cerebro" de la sonda piense que el buril está en otra posición diferente a su posición real cuando contacta con el elemento de referencia. Todavía otra posible causa es la no perpendicularidad del eje **A** de la máquina con respecto al eje **C**. Cada una de las posibles causas es investigada, y cualquier problema encontrado es corregido antes de pasar a la siguiente fase del procedimiento.

Comprobación de sonda número 2: Longitud de herramienta compuesta

Una vez comprobada satisfactoriamente la alineación del eje **C** de la sonda **70**, la siguiente etapa es verificar que la longitud de la sonda desde la punta del buril **72** al eje **A** de la máquina se encuentre dentro de una tolerancia predeterminada de una longitud deseada. Para esta comprobación, ilustrada en las Figuras 5 y 6, el husillo **62** se traslada en la dirección del eje **W** a una posición de referencia conocida o inicial (por ejemplo, completamente retraído, totalmente extendido, o alguna otra posición de referencia). La muñeca **56** de la máquina es colocada en una posición tal que el eje **A** sea paralelo al eje **Y** de la máquina y el eje **W** con el que la sonda **70** está alineada es paralelo al eje **X** de la máquina, tal como se observa en la Figura 5. Más específicamente, el cabezal **58** se hace girar alrededor del eje **C** 90 grados desde su posición inicial o de cero grados, y el cuerpo **60** se hace girar alrededor del eje **A** 90 grados desde su posición inicial o de cero grados. La máquina es movida sólo a lo largo de la dirección del eje **X** hasta que la punta del buril **72** de la sonda contacta con un borde vertical del anillo **G** de calibración del elemento de referencia. El anillo **G** de calibración está formado por una placa rectangular o cuadrada que tiene una anchura **w** conocida entre sus bordes verticales opuestos. Las superficies planas de los bordes verticales de la galga son paralelas al plano **YZ** definido por los ejes de la máquina. La sonda mide la posición **X** de un borde de la galga **G**. A continuación, el cuerpo **60** es girado 180 grados alrededor del eje **A** de manera que la sonda **70** esté apuntando en la dirección opuesta a lo largo del eje **X**, la máquina es movida a lo largo del eje **X** hasta que la punta del buril contacta con el borde vertical opuesto de la galga, y la posición **X** de este borde es medida por la sonda. En base a estas dos mediciones de las posiciones **X** de los bordes opuestos de la galga y la anchura **w** conocida de la galga, se calcula la longitud **L** de la herramienta compuesta entre la punta del buril y el eje **A**.

Si la longitud **L** calculada de la herramienta compuesta no está dentro de una tolerancia predeterminada del valor deseado, entonces la causa de la discrepancia es rastreada y corregida. La longitud **L** de la herramienta compuesta puede ser inexacta por varias razones. Tres componentes, cualquiera de los cuales puede contribuir a la inexactitud en la longitud de la herramienta, incluyen el cuerpo **60**, el servo-accionamiento (no mostrado) para el movimiento en el eje **W** del husillo, y la sonda **70**. Cualquier desplazamiento en cualquiera de estas partes es corregido de manera que la longitud **L** de la herramienta compuesta sea el valor deseado antes de pasar a la siguiente fase del procedimiento.

Comprobación de sonda número 3: Posicionamiento repetible de la máquina

Una vez comprobada de manera satisfactoria la longitud de la herramienta compuesta, la siguiente etapa es comprobar la precisión con la que la máquina 40 puede ser posicionada a lo largo de cada uno de sus ejes X, Y y Z de traslación. Tal como se representa en las Figuras 7 y 8, la máquina es movida en las direcciones X e Y para hacer que la punta del buril contacte con tres puntos X1, X2 e Y separados circunferencialmente en el borde del orificio H en el anillo G de calibración. A partir de estos tres puntos se calculan las coordenadas X e Y del centro del orificio; este punto central se indica como el centro medido en la Figura 8. El centro medido es comparado con un centro enseñado previamente del orificio. Las causas de cualquier discrepancia en las posiciones X y/o Y del centro se rastrean y se corrigen. Para comprobar la precisión del posicionamiento Z de la máquina, la máquina es movida en la dirección Z para hacer que la punta del buril contacte con una cara del anillo de calibración que es paralela al plano XY. La posición Z de la cara del anillo de calibración es comparada con una posición Z enseñada previamente para la cara. Las causas de cualquier discrepancia entre las posiciones Z medidas y enseñadas son rastreadas y corregidas antes de pasar a la siguiente fase del procedimiento.

Comprobación de sonda número 4: Precisión de giro en el eje C

La comprobación final de la sonda contra el elemento de referencia se ilustra en las Figuras 9 y 10. Esta comprobación determina si el posicionamiento de rotación de la máquina alrededor del eje C es preciso o no. El cabezal 58 de la muñeca 56 de la máquina se hace girar 90 grados desde su posición inicial o de cero grados de manera que el eje A debería estar nominalmente paralelo al eje Y. El cuerpo 60 se hace girar de manera que el eje W sea perpendicular al eje A. De esta manera, si la máquina está configurada correctamente, el eje W debería ser paralelo al eje X. La máquina es movida para hacer que la punta del buril contacte con el borde superior del anillo G de calibración. El borde superior plano del anillo de calibración es paralelo al plano XZ. La sonda mide la posición Y de este borde superior de la galga. A continuación, el cuerpo 60 se hace girar 180 grados alrededor del eje A, y la máquina es movida de nuevo para hacer que la punta del buril contacte con el borde superior de la galga para medir un segundo valor para la posición Y del borde superior. Si el eje A de la máquina es, de hecho, paralelo al eje Y de la máquina, entonces las dos posiciones Y del borde superior serán iguales. Cualquier discrepancia entre las dos posiciones Y indica cierto desplazamiento angular del eje A con respecto a la dirección del eje Y, lo que significa que el cabezal 58 de la máquina no está realmente en la posición de 90 grados. En base a la longitud de la herramienta compuesta y la diferencia entre las dos posiciones Y medidas, se calcula el desplazamiento angular del eje A con relación al eje Y. Si este desplazamiento angular no está dentro de una tolerancia predeterminada de cero, entonces la causa del desplazamiento es rastreada y corregida antes de pasar a las operaciones de mecanizado o antes de pasar a realizar comprobaciones adicionales del procedimiento de la invención. De manera ventajosa, las comprobaciones de la sonda contra el elemento de referencia M representadas en las Figuras 3 al 10 se realizan de manera regular y periódica. Por ejemplo, las comprobaciones de la sonda pueden realizarse diariamente antes o entre las operaciones de mecanizado. Es preferible realizar las comprobaciones 1 a 4 de la sonda en el orden descrito anteriormente, de manera que puedan determinarse y corregirse las causas fundamentales de los errores en una progresión lógica. De esta manera, la alineación del eje C y la longitud de la herramienta compuesta se verifican antes de pasar a las comprobaciones de repetibilidad de la máquina y de rotación eje C, ya que estas comprobaciones solo pueden realizarse con precisión verificando, en primer lugar, la precisión de la alineación del eje C y la sonda y la longitud de la sonda. Con la realización de las cuatro comprobaciones de la sonda de manera regular y periódica, las inexactitudes de la máquina son detectadas y corregidas antes de que puedan causar que se produzcan piezas fuera de tolerancia.

Comprobaciones de la sonda del accesorio

Por supuesto, las comprobaciones de la sonda contra el elemento de referencia no son capaces de determinar si el accesorio 30 de sujeción está posicionando las piezas de manera precisa. Por consiguiente, se realiza una comprobación por separado de la precisión del accesorio según la invención. La precisión del accesorio es comprobada usando la misma sonda 70 montada en el husillo de la máquina. Con referencia a la Figura 11, el accesorio 30 tiene los pogos 32 extensibles y retráctiles dispuestos en una matriz rectangular de filas que se extienden paralelas al eje X de la máquina y columnas que se extienden paralelas al eje Y de la máquina. Los pogos 32 en cada columna están montados en un elemento 80 de columna que puede ser trasladado por un actuador adecuado (no mostrado) hacia atrás y adelante en la dirección del eje X. El accesorio incluye también actuadores (no mostrados) para trasladar pogos 32 individuales, arriba y abajo a lo largo de su elemento 80 de columna en la dirección del eje Y. Cada pogo 32 es también extensible y retráctil a lo largo de la dirección del eje Z, tal como se ha indicado anteriormente. De esta manera, cualquier pogo 32 determinado puede ser sometido de manera independiente a tres traslaciones mutuamente ortogonales en la dirección X, Y y/o Z.

Para mecanizar paneles de fuselaje de aeronaves o piezas de gran tamaño de tipos similares, el accesorio 30 de sujeción puede comprender, de manera adecuada, un accesorio de sujeción universal (Universal Holding Fixture, UHF) de la empresa MTorres de Pamplona, España y comercializado bajo la marca TORRESTOOL®. Cada pogo 32 tiene un conjunto 34 de vacío montado en su extremo orientado hacia la máquina 40. Aunque no es visible en los dibujos, se comprenderá que el conjunto 34 de vacío incluye una ventosa con orificios conectados a una fuente

de vacío adecuada. La ventosa está montada de manera que cuando la pieza de trabajo es succionada en la ventosa, la pieza de trabajo es empujada contra una superficie de referencia rígida del pogo con el fin de que sea posicionada con precisión en la dirección Z con relación al pogo. Los pogos **32** tienen un rango de desplazamiento sustancial en la dirección Z, de manera ventajosa, de al menos aproximadamente 60,96 cm (24 pulgadas) en la realización particular del sistema de mecanizado descrita e ilustrada en la presente memoria.

Si las piezas deben ser mecanizadas con precisión, las posiciones de los pogos **32** con respecto a la máquina deben ser repetibles de manera precisa. La precisión del posicionamiento de los pogos es comprobada sondeando los pogos con la sonda **70** montada en el husillo de la máquina. La Figura 11 representa este procedimiento. Para los propósitos de la comprobación del accesorio, se definen una serie de planos con la coordenada Z constante dentro del rango Z de desplazamiento de los pogos; por ejemplo, pueden definirse cinco planos en $Z = 0,0$ cm, 15,24 cm, 30,48 cm, 45,72 cm, 60,96 cm ($Z = 0,0$ pulgadas, 6,0 pulgadas, 12,0 pulgadas, 18,0 pulgadas y 24,0 pulgadas). La comprobación del accesorio comienza con una comprobación previa a la calibración en la que los pogos son colocados en sus posiciones iniciales en las direcciones X e Y y en una posición Z constante correspondiente a uno de los planos definidos. Las posiciones X, Y y Z deseadas de los pogos usados por la unidad **36** de control numérico del accesorio pueden concordar o no con las posiciones reales de los pogos con relación a los ejes de la máquina. Para determinar si existe alguna discrepancia entre las posiciones deseadas y las posiciones reales de los pogos, la máquina es movida a cada uno de entre una pluralidad de pogos y es movida a lo largo de la dirección Z para hacer que la punta del buril contacte con una superficie de referencia del pogo que debería estar nominalmente en la posición Z deseada. La máquina sondea también las superficies de referencia del pogo a lo largo de las direcciones X e Y, que deberían estar nominalmente en las posiciones X e Y deseadas. De esta manera, se miden las coordenadas X, Y y Z para cada uno de los pogos sondeados. Tal como se indica en la Figura 11, pueden sondearse filas alternas de pogos en lugar de todas las filas. Se calculan las diferencias entre las coordenadas X, Y y Z medidas y las coordenadas deseadas para cada pogo sondeado. Si las diferencias están dentro de límites aceptables de cero, entonces la pre-calibración se ha completado satisfactoriamente. Si las diferencias no están dentro de los límites aceptables de cero, entonces, se aplica una corrección mediante software dentro de la unidad 36 de control numérico del accesorio.

Más particularmente, las diferencias entre las posiciones X, Y y Z medidas y deseadas de los pogos son aplicadas como desplazamientos cero dentro de la unidad de control numérico. Por ejemplo, si la unidad de control del aparato ha ordenado a un pogo que se coloque en $z = 60,96$ cm (24.0 pulgadas), pero la sonda de la máquina ha medido la posición Z como 60,985 cm (24,01 pulgadas), la diferencia de 0,0254 cm (0,01 pulgadas) es aplicada como un desplazamiento cero de manera que la posición de referencia cero del actuador del accesorio es ajustada en 0,0254 cm (0,01 pulgadas).

De manera ventajosa, la comprobación previa a la calibración del accesorio se realiza de manera programada, por ejemplo, semanalmente. Cada semana, el accesorio puede ser colocado en una configuración diferente a la de la semana anterior. Por ejemplo, pueden definirse un total de diez configuraciones de accesorio en base a cinco posiciones Z diferentes para las filas impares de pogos y cinco posiciones Z diferentes para las filas pares de pogos. Cada semana durante diez semanas puede usarse una configuración diferente de entre las diez configuraciones, a continuación, la secuencia de configuraciones puede repetirse en las próximas diez semanas y así sucesivamente. Este enfoque minimiza el tiempo necesario para la comprobación previa a la calibración (en comparación con la ejecución de más de una configuración cada semana, por ejemplo), pero todavía detecta inexactitudes que pueden ser limitadas a sólo ciertos rangos de la zona de trabajo de manera oportuna, de manera que puedan ser corregidas.

Aquí, cabe señalar también que el accesorio de sujeción incluye además un par de dispositivos **38** de fijación que incluyen pernos de localización (no mostrados) que encajan en los orificios de localización formados en lugares predeterminados en los extremos opuestos de la pieza **W** de trabajo para alinear la pieza de trabajo con relación al accesorio de sujeción y para soportar la pieza de trabajo cuando no se está aplicando el vacío a los conjuntos de vacío. Uno de los dispositivos **38** de fijación tiene un bloque de punto de ajuste (no mostrado) montado en el mismo para servir como una referencia para la máquina **40** de manera que la máquina pueda ser calibrada a la pieza de trabajo antes de iniciar una operación de mecanizado. La calibración se realiza moviendo la máquina para sondear el bloque de punto de ajuste en las direcciones X, Y y Z, y la unidad de control de la máquina establece las posiciones medidas del bloque de punto de ajuste como valores de referencia cero para los efectos de su programa de control numérico para la pieza de trabajo. De manera ventajosa, el bloque de punto de ajuste está localizado aproximadamente en el punto medio vertical de la pieza **W** de trabajo.

Si el accesorio no pasa la comprobación previa a la calibración, entonces, una vez aplicadas las correcciones de software, se realiza una comprobación posterior a la calibración del accesorio. En la comprobación posterior a la calibración, el accesorio es sondeado en cada una de entre una pluralidad de configuraciones diferentes, por

ejemplo, con los pogos en dos posiciones Z diferentes, dos posiciones Y, diferentes y tres posiciones X diferentes. Las diferencias entre las posiciones deseadas y las posiciones medidas se calculan de nuevo. Si las diferencias no están dentro de los límites aceptables de cero, entonces las correcciones de software realizadas en el accesorio no son adecuadas para resolver el problema con el accesorio. Esto puede ser debido a alguna no linealidad en el comportamiento del accesorio, un desajuste de los ejes del accesorio con relación a los ejes de la máquina, un desgaste de los componentes del accesorio, y otras causas potenciales. Se realiza una intervención física para localizar y corregir la fuente o fuentes de los errores de posicionamiento del accesorio. La comprobación posterior a la calibración asegura que la precisión del accesorio es aceptable a lo largo de toda la zona de trabajo de la máquina. Una vez pasadas con éxito las comprobaciones de la sonda de la máquina del accesorio, existe un alto grado de confianza de que exista una relación posicional maestro-esclavo deseada entre la máquina **40** y el accesorio **30**.

Comprobación global de la precisión de la máquina

La siguiente fase del procedimiento para la calificación de la precisión del sistema de mecanizado según la invención es realizar una comprobación de la precisión del posicionamiento global de la máquina **40**. Esto se representa en las Figuras 2 y 12. Con referencia en primer lugar a la Figura 12, la precisión del posicionamiento de la máquina a lo largo de sus ejes X, Y y Z de traslación es comprobada usando un sistema de medición de posición independiente que comprende, de manera ventajosa, una unidad **90** de seguimiento láser y una diana **92** reflectante (se observa mejor en la Figura 2) que se monta en el husillo **62** de la máquina en la que normalmente se soportaría una máquina herramienta durante el mecanizado. La diana **92** reflectante comprende un reflector semiesférico de tipo ojo de gato. La unidad **90** de seguimiento láser es operable para emitir un haz **94** láser y dirigir el haz sobre el reflector **92** de manera que el haz sea reflejado de nuevo a la unidad **90** de seguimiento láser, donde es detectado por un detector (no mostrado). El cabezal de la unidad de seguimiento láser gira de manera independiente alrededor de ejes horizontales y verticales perpendiculares de manera que el haz **94** láser puede ser dirigido en cualquier dirección en un espacio esférico que rodea la unidad de seguimiento láser. La unidad de seguimiento láser es operable para hacer girar automáticamente el cabezal de la unidad mediante actuadores adecuados (no mostrados) de manera que el haz reflejado golpea siempre el detector en la misma ubicación. En base a las posiciones angulares del cabezal alrededor de sus dos ejes de rotación, se calcula la relación de la unidad **90** de seguimiento láser a la diana **92**. En base al tiempo transcurrido entre el envío del haz **94** incidente a la diana **92** y la detección del haz reflejado en la unidad de seguimiento láser, se calcula la distancia a la diana desde la unidad de seguimiento láser. La relación y la distancia se usan para calcular las coordenadas de la diana **92** en un sistema de ejes X, Y, Z ortogonales usado por la unidad de seguimiento láser. Un sistema de seguimiento adecuado del tipo descrito es el sistema de seguimiento láser SMART 310, disponible en Leica de Heerbrugg, Suiza. Debería entenderse que un seguidor láser no es el único tipo de dispositivo que puede usarse para los presentes objetivos. Pueden usarse otros instrumentos de medición tridimensionales de alta precisión, tales como los instrumentos de medición láser de 3-D del tipo "apunta y dispara" que no rastrean automáticamente la diana, pero que miden su posición cuando el haz láser choca con la diana. Un ejemplo de un instrumento de medición láser de tipo apunta y dispara es el instrumento modelo LTD500 fabricado por Zeiss.

Con referencia a las Figuras 13A y 13B, la unidad **90** de seguimiento láser está montada en una posición fija cerca de la máquina **40** a una distancia D conocida desde el cabezal de la unidad de seguimiento a una superficie de referencia de la máquina **40** en la dirección del eje Z de la máquina. Con respecto al eje X de la máquina, la unidad de seguimiento láser es posicionada en una posición X conocida.

Como una primera etapa hacia la comprobación de la precisión del posicionamiento global de la máquina a lo largo de sus ejes X, Y y Z, se crea un marco de referencia maestro en la unidad de seguimiento láser. De manera significativa, el marco de referencia maestro es con respecto a las guías de la máquina **40** en lugar de con respecto a un sistema de referencia basado en la base, tal como respecto al suelo y la gravedad. En primer lugar, la máquina es posicionada en el centro de su zona de trabajo a lo largo de las direcciones de los ejes Y y Z, y los ejes Y, Z, W, A y C de la máquina están fijos. La máquina es desplazada a lo largo de la dirección del eje X desde un extremo de la zona de trabajo hasta el otro extremo. En una pluralidad (por ejemplo, once) de puntos separados a lo largo del recorrido de la máquina, la unidad **90** de seguimiento láser mide las coordenadas XYZ de la diana **92** y estos puntos se almacenan en un ordenador personal o una estación de trabajo **100** en comunicación con la unidad de seguimiento láser. A continuación, la máquina es posicionada en el centro de la zona de trabajo a lo largo de las direcciones X y Z y los ejes X, Z, W, A y C están fijos. La corredera **50** es desplazada a lo largo de la dirección del eje Y desde la parte inferior a la parte superior de la zona de trabajo. En una pluralidad (por ejemplo, diez) de puntos separados a lo largo del recorrido de la corredera, la unidad de seguimiento láser mide las coordenadas XYZ de la diana **92** y estos puntos se almacenan en la estación de trabajo **100**. Usando los puntos adquiridos a lo largo de los ejes X y Y de la máquina, un programa de ajuste de curva residente en la estación de trabajo **100** calcula una línea de mejor ajuste de los puntos para determinar un conjunto ortogonal de ejes de coordenadas que define un marco de referencia maestro.

A continuación, este marco de referencia maestro se usa en la comprobación de la precisión del posicionamiento de la máquina a lo largo de sus diversos ejes. Tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura 14, la máquina es movida a lo largo de sus ejes X, Y y Z para posicionar la diana **92** en cada una de entre una pluralidad de puntos (por ejemplo, 216 puntos) separados a lo largo de la zona **E** de trabajo tridimensional de la máquina. De manera ventajosa, los puntos están dispuestos en cuatro planos con Z constante separados en la dirección Z, por ejemplo, los planos Z pueden estar en Z = 50,8 cm, 71,12 cm, 91,44 cm y 111,76 (Z = 20,0 pulgadas, 28,0 pulgadas, 36,0 pulgadas y 44,0 pulgadas). En cada plano Z, se define una matriz rectangular de puntos X, Y (por ejemplo, nueve puntos separados 101,6 cm (40 pulgadas) a lo largo de la dirección X y seis puntos separados 50,8 cm (20 pulgadas) a lo largo de la dirección Y). En cada punto, las coordenadas de la diana **92** en el sistema de coordenadas maestro son medidas por la unidad **90** de seguimiento láser. Las coordenadas de los puntos se almacenan en la estación de trabajo **100**. Las posiciones X, Y y Z medidas para cada punto se comparan con los valores deseados, es decir, los valores a los que la unidad de control numérico de la máquina condujo la máquina al posicionar la máquina. Las discrepancias entre los valores de la posición medida y la posición deseada que superan las cantidades máximas aceptables indican una necesidad de una intervención física para corregir la causa o las causas de las discrepancias.

Pueden crearse diversos tipos de gráficos para mostrar gráficamente las posiciones medidas con respecto a las posiciones deseadas de la máquina. La Figura 16 representa uno de dichos gráficos para visualizar simultáneamente ambas discrepancias de posición X e Y con relación a las tolerancias máximas permitidas para uno de los planos Z constante. Este gráfico facilita la identificación de aquellas regiones de la zona de trabajo de la máquina en las que los errores exceden la cantidad permitida. La Figura 17 representa un gráfico para visualizar las discrepancias en las posiciones Z de los puntos en uno de los planos de Z constante. La diferencia entre la posición Z medida y la deseada es trazada en el eje vertical con relación al número de puntos en el eje horizontal; el sistema de numeración de los puntos se muestra en la Figura 14 y, en general, va de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha de la zona de trabajo. Los límites de tolerancia superior e inferior se muestran en líneas discontinuas. Con gráficos tales como los de las Figuras 16 y 17, el operario puede ver inmediatamente si hay problemas que es preciso abordar. Las tendencias mostradas por los datos dan también una idea acerca de cual puede ser la fuente probable del problema.

Tras la comprobación de la precisión de los ejes X, Y y Z de la máquina, se realiza una comprobación de los ejes W, A y C con la unidad de seguimiento láser. Tal como se representa en la Figura 2, los ejes X, Y y Z de la máquina son fijos y la muñeca **56** de la máquina es movida mediante una serie de giros alrededor de los ejes A y C y traslaciones del husillo a lo largo del W. La máquina es detenida en cada uno de entre una pluralidad de puntos y las coordenadas de posición de la diana **92** son medidas por la unidad **90** de seguimiento láser para cada punto. Las coordenadas de los puntos se almacenan en la estación de trabajo **100**. De una manera similar a la descrita anteriormente, las discrepancias entre las posiciones medidas y las posiciones deseadas de la diana **92** se muestran gráficamente en gráficos (no mostrados) de manera que el operario puede detectar fácilmente cuando hay un problema que requiere la intervención física para su corrección.

La Figura 15 representa una comprobación dinámica de la precisión de la máquina que puede realizarse con el sistema de seguimiento láser. La máquina recibe una consigna para mover la diana a lo largo de una trayectoria predeterminada, tal como una trayectoria circular correspondiente a la trayectoria indicada como "nominal" en la Figura 15. Por supuesto, podrían usarse otras trayectorias diferentes a la circular, tales como rectangulares, elípticas, ovaladas o similares. La trayectoria nominal se encuentra en un plano que es paralelo al plano XY de la máquina. Conforme la máquina se mueve en la trayectoria circular, la posición real de la diana es medida por la unidad de seguimiento láser en una serie de puntos separados alrededor de la circunferencia de la trayectoria. Por diversas razones, la trayectoria real de la diana se desviará de la trayectoria nominal. Las desviaciones entre las trayectorias reales y nominales se calculan y se comparan con las cantidades máximas admisibles indicadas por los círculos indicados como "tolerancia externa" y "tolerancia interna" en la Figura 15. Si las desviaciones superan las cantidades máximas permisibles, entonces se realiza una intervención física para corregir la causa o las causas de las desviaciones excesivas. Se realizan comprobaciones dinámicas de precisión similares para los planos XZ e YZ moviendo la máquina alrededor de trayectorias circulares en estos planos y comprobando las desviaciones excesivas entre las trayectorias deseadas y reales de la diana.

De manera ventajosa, las comprobaciones de la precisión del posicionamiento global con el sistema de seguimiento láser se realizan de manera periódica programada, tal como mensualmente. De esta manera, el procedimiento según una realización preferida de la invención implica comprobaciones programadas regularmente, diarias, semanales y mensuales diseñadas para la identificación temprana de las inexactitudes de la máquina y/o el accesorio y para corregir los problemas antes de que se produzcan piezas fuera de tolerancia. El procedimiento está diseñado también para minimizar la cantidad de intervención física (es decir, ajustes de hardware) necesaria

para mantener un nivel deseado de confianza de que las piezas serán producidas dentro de las tolerancias aceptables.

La Figura 18 representa, en forma de diagrama de flujo, un procedimiento según una realización preferida de la invención para la calificación de la precisión del sistema de mecanizado. Con la máquina **40** y el accesorio **30** encendidos, el procedimiento comienza en **200** con una comprobación para determinar si la máquina se ha calentado adecuadamente de manera que sea térmicamente estable. Si la máquina no ha alcanzado la estabilidad térmica, la máquina es calentada tal como se indica en **202**. Una vez calentada la máquina, se realiza una comprobación tal como se indica en **204** para determinar si debe realizarse o no la próxima comprobación de la precisión del posicionamiento global de la máquina, programada regularmente, (indicada como comprobación de calificación de la máquina en la Figura 18). Tal como se ha indicado anteriormente, la comprobación de la precisión global se realiza mensualmente. Si la comprobación global está pendiente, entonces, se realiza tal como se indica en **206**. Se realiza una comprobación en **208** para determinar si la máquina ha pasado o no la comprobación de la calificación de la máquina; si no, entonces, la máquina se vuelve a calibrar con respecto al suelo y la gravedad en **210**. Una vez que la máquina pasa la comprobación de calificación, entonces, se realiza una comprobación en **212** para determinar si el accesorio de sujeción requiere o no una comprobación previa a la calibración con la sonda. Por ejemplo, generalmente, la pre-calibración se realizará si la máquina requiere un ajuste físico con el fin de pasar su comprobación de precisión en **206**. Si el accesorio requiere una comprobación previa a la calibración, entonces, se realiza esta comprobación y las correcciones de software se aplican en la unidad de control del accesorio para calibrar el accesorio tal como se indica en **214**. A continuación, se realiza una comprobación posterior a la calibración del accesorio, tal como se indica en **216**. En **218**, si la comprobación posterior a la calibración falla, entonces se realizan los ajustes de hardware y quizás también los ajustes de software para el accesorio, tal como se indica en **220**. A continuación, se repiten las comprobaciones de calibración y posterior a la calibración del accesorio hasta que se pasan con éxito.

Volviendo a la etapa **204** del procedimiento, si la comprobación de calificación de la máquina no está pendiente, entonces, se realiza una comprobación en **222** para determinar si la siguiente comprobación de calibración del accesorio programada regularmente está pendiente. Si está pendiente, entonces se realiza la comprobación previa a la calibración, tal como se indica en **224**. En **226**, si la comprobación previa a la calibración ha fallado, entonces el procedimiento pasa a las etapas **206** a **220**, tal como se ha descrito anteriormente. Si se pasa la comprobación previa a la calibración, entonces el procedimiento pasa a la etapa **228** donde se realiza una determinación de si las próximas comprobaciones de sonda programadas regularmente contra el elemento de referencia están pendientes. Si están pendientes, entonces, estas comprobaciones de la sonda se realizan tal como se indica en **230**. En **232**, si alguna de las comprobaciones de la sonda falla, entonces se realiza una calibración de la sonda u otros ajustes físicos a la sonda y/o a la máquina **234**. Una vez pasadas las comprobaciones de la sonda, la pieza a mecanizar es cargada en el accesorio de sujeción, tal como se indica en **236**. En **238**, con la sonda instalada en el husillo de la máquina, una serie de puntos de ajuste, primarios y secundarios, sobre la pieza de trabajo son sondeados para verificar que la pieza de trabajo se encuentra en la ubicación apropiada con relación a la máquina. En **240**, las posiciones medidas de los puntos de ajuste, primarios y secundarios, de la pieza de trabajo se comparan con los valores deseados, y si las diferencias entre las posiciones medidas y deseadas están dentro de límites aceptables, entonces, el mecanizado y la descarga de la pieza de trabajo pasa a las etapas **242** a **246**. En **248**, si no es el final del turno, entonces, el procedimiento comienza de nuevo en la etapa **200**.

Modelo matemático que relaciona la precisión de la pieza producida con los parámetros del sistema de mecanizado

A continuación, se describe la manera en la que los errores o tolerancias de la máquina y el accesorio de sujeción se distribuyen con el fin de mantener la precisión resultante en el mecanizado de piezas dentro de los límites aceptables. Preferiblemente, el modelo matemático emplea una suma estadística de todas las fuentes de error. Se establece un valor máximo permitido para el error total estadístico. A continuación, se usa el modelo matemático para determinar el error máximo permitido en cada parámetro de la máquina que puede ser tolerado y todavía mantiene una confianza aceptable de que el error total no será superior a su valor máximo admisible.

El modelo matemático y la distribución de las tolerancias del sistema de la máquina se explican con referencia a un ejemplo específico ilustrado esquemáticamente en la Figura 19. Un panel **W**, tal como un panel de fuselaje, se muestra en una vista lateral (es decir, visto a lo largo de una dirección paralela al eje X de la máquina) montado en los pogos **32** equipados con ventosas del accesorio de sujeción. El panel tiene un radio R de curvatura en el plano YZ. El punto B representa un punto en el que se desea perforar un orificio a través del panel. El punto B se encuentra a una distancia S a lo largo del panel curvado en el plano YZ desde el plano XZ horizontal P que divide el panel en las mitades superior e inferior (es decir, la distancia S se mide a lo largo del panel desde el punto A al punto B). El punto B está situado en un ángulo de inclinación Θ desde el plano P. Un ejemplo de $\Theta \approx 25^\circ$ se muestra como el ángulo máximo de inclinación en el borde superior del panel.

Es ideal, desde un punto de vista de la precisión de producción, que la distancia S se mantenga dentro de una cierta tolerancia. Si la máquina **40** y/o el accesorio de sujeción es inexacto en su posicionamiento Y y/o Z , el orificio perforado por la herramienta T de la máquina no estará ubicada, de manera precisa, en el punto B , si no que estará desplazado desde el punto B en una cantidad ΔS , tal como se indica en la Figura 19. Cabe señalar que los errores en la dirección X pueden contribuir también a una ubicación incorrecta del orificio, pero puede demostrarse que para un panel que tiene una pequeña curvatura en la dirección X , tal como por ejemplo paneles de fuselaje de aeronaves, las contribuciones al error debidas a los errores de posicionamiento X son muy pequeñas y pueden ser ignoradas.

Los errores en el posicionamiento Y y Z pueden surgir a partir de diversas fuentes, tal como debería ser evidente a partir de la descripción anterior del sistema de la máquina y sus diversos componentes. De esta manera, los pogos del accesorio de sujeción pueden estar fuera de posición en la dirección la Y y/o Z ; además, los conjuntos de ventosas en los extremos de los pogos pueden estar ligeramente fuera de posición. El error de posición asociado con los pogos y las ventosas se indica como ΔS_{pogos} en la presente memoria.

Otra fuente de potenciales errores relacionada con el accesorio puede surgir si el bloque de punto de ajuste montado sobre el dispositivo **38** de fijación (Figura 1) está fuera de posición en la dirección Z ; este error de posición se indica como ΔS_{sp} .

Una fuente de error adicional es la inexactitud en la alineación del eje C que provoca un desplazamiento ΔY_c en la posición de la punta de la máquina herramienta. Este error de posición se indica como ΔS_c en la presente memoria.

Otra fuente de error es la inexactitud ΔL en la longitud L de la herramienta compuesta (Figura 6) de la máquina herramienta. Este error de posición se indica como ΔS_{CTL} en la presente memoria.

Los ejes W , A y C de la máquina pueden contribuir también a errores en el posicionamiento Y y Z . Estos errores se indican como $\Delta S_{\text{WAC,Y}}$ y $\Delta S_{\text{WAC,Z}}$ en la presente memoria.

El posicionamiento Y y Z de la máquina, en su conjunto, puede contribuir también a una inexactitud en la ubicación del orificio mecanizado a través de la pieza de trabajo. Estos errores se indican como $\Delta S_{\text{M,Y}}$ y $\Delta S_{\text{M,Z}}$ en la presente memoria.

De manera similar, diversas otras fuentes de error pueden contribuir a una inexactitud en la ubicación del orificio mecanizado en la pieza de trabajo, incluyendo un error en el posicionamiento Y en el perno de guía usado para alinear la pieza de trabajo en el accesorio de sujeción, tal como se ha descrito anteriormente, desplazado del eje de la broca con relación al eje C de la máquina, desplazamiento de la broca en la entrada, arqueamiento de la pieza de trabajo entre los pogos, etc. Cada fuente de error se determina en términos de su contribución al error ΔS_i en una manera análoga a las otras fuentes de error descritas anteriormente.

El error total sumado estadísticamente ΔS_{Total} , se determina, en una realización, suponiendo que cada variable causante de errores se distribuye normalmente alrededor de su media y es independiente de todas las demás variables. Por consiguiente, el error total puede ser determinado por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados.

Esto supone que es estadísticamente improbable que todos los errores se produzcan en una dirección de manera que haga que el error total exceda el valor determinado por la ecuación.

Un valor máximo permitido para el error total ΔS_{Total} se determina, en primer lugar, en base a consideraciones de tolerancia de producción. Por ejemplo, para una pieza de trabajo de panel, tal como se muestra en la Figura 19, que tiene un radio de curvatura de 187,96 cm (74 pulgadas), se especifica un error total máximo permisible ΔS_{Total} de 0,076 cm (0,03 pulgadas). Esta es la cantidad máxima permitida en la que la posición del orificio puede estar mal situada y todavía sigue siendo aceptable. En base a este error total, se determina el valor máximo admisible para cada uno de los componentes de error ΔS_i . Se apreciará que hay muchas combinaciones diferentes de valores para estos componentes de error que satisfarán la restricción de $\Delta S_{\text{Total}} \leq 0,0762$ cm (0,03 pulgadas). Sin embargo, una restricción adicional en cada componente es que el error máximo permisible debe ser alcanzable, de manera realista, por la máquina. Por ejemplo, sería poco realista establecer el error máximo permitido en el posicionamiento Y de la máquina **40** a 0,000254 cm (0,0001 pulgadas), ya que sería difícil o imposible mantener la máquina dentro de esta banda de precisión. Por consiguiente, la experiencia empírica con la máquina y las capacidades de precisión del accesorio, en general, ayudarán a la hora de decidir acerca de qué máximo error debe asignarse a cada fuente de error.

La Figura 20 representa una tabla que muestra una posible solución para la distribución de las diversas tolerancias de la máquina, que permite conseguir el objetivo de error total. Eligiendo valores de tolerancia para cada fuente de error que son alcanzables, de manera realista, es posible mantener el sistema de la máquina en una condición que permite que las piezas producidas sean producidas dentro de la tolerancia aceptable con un mínimo de intervención física necesaria para reajustar la máquina y/o el accesorio. Una característica única del modelo matemático es que relaciona directamente la precisión de la pieza de producción con los ejes y parámetros de la máquina y el accesorio cuya precisión se comprueba durante el procedimiento de calificación de la precisión de la máquina, descrito anteriormente. De esta manera, el modelo matemático permite que la precisión del sistema de la máquina sea calificada de una manera que proporciona un alto grado de confianza de que las piezas de producción se producirán dentro de la tolerancia. De esta manera, la invención permite la eliminación de muchas de las inspecciones necesarias.

En un sentido más general, se proporciona un procedimiento para relacionar las magnitudes de todos los errores ϵ potenciales, (por ejemplo, ΔY , ΔZ y otras fuentes de error descritas anteriormente) con el error ΔS resultante en la máquina herramienta (por ejemplo, la broca para perforar un orificio). Por ejemplo, la función F de la geometría de la pieza de trabajo puede ser una función del radio de curvatura y/o la orientación de la superficie de la pieza a través de la cual debe ser perforado el orificio. En el ejemplo de la pieza de trabajo de panel descrita anteriormente, la función F depende del ángulo Θ de inclinación de la ubicación del orificio deseado. De esta manera, la idea básica es derivar una ecuación que tenga en cuenta la geometría de la configuración de la pieza de trabajo y determine el error en la posición de la máquina herramienta que se crearía si la máquina y/o el accesorio de sujeción son imprecisos, en una cantidad, en su posicionamiento de algún componente de los mismos. Dicha ecuación es derivada para cada uno de los componentes o los movimientos de la máquina que pueden causar un error en la posición de la máquina herramienta.

A continuación, se determina un procedimiento estadístico para sumar todos los componentes de error de posición de la máquina herramienta. En el ejemplo proporcionado anteriormente, el procedimiento elegido se basaba en la suposición de que todas las fuentes de error presentaban distribuciones normales y eran independientes unas de las otras y, por lo tanto, se usó una suma de raíz cuadrada de suma de cuadrados sencilla. Por supuesto, se reconocerá que este es sólo un posible procedimiento de suma estadística entre muchos posibles y, por lo tanto, podrían usarse otros procedimientos (por ejemplo, un procedimiento Weibull). Una vez determinado el procedimiento de suma estadística, entonces es posible relacionar el error máximo admisible de la posición de la máquina herramienta con todos los componentes de error individuales. Se establecen los valores máximos admisibles para cada uno de los errores ϵ del sistema de la máquina que permitirán que el sistema produzca piezas con una alta probabilidad estadística de que el error de posición de la máquina sea menor que el error de posición máximo permisible. Tal como se ha indicado anteriormente, estos errores ϵ máximos permisibles deberían ser establecidos de manera que puedan conseguirse de manera realista y puedan mantenerse con una cantidad mínima de intervención física necesaria. La precisión del sistema de mecanizado es comprobada midiendo los errores de la máquina y el accesorio para determinar si cada uno de los errores está o no dentro de su cantidad máxima permitida. Si algún error excede la cantidad permitida, entonces la causa del error es rastreada y corregida. En el caso del accesorio de sujeción, en muchos casos, pueden aplicarse correcciones de software para ajustar a cero los errores.

REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento de calificación de la precisión de un sistema de mecanizado que tiene una máquina (40) multi-eje con control numérico y un accesorio (30) de sujeción flexible para sujetar las piezas de trabajo (W) a mecanizar, y que pasa a realizar la operaciones de mecanizado tras la calificación, en el que el procedimiento comprende:

montar una sonda (70) de medición de contacto en un husillo (62) de la máquina donde una máquina herramienta estaría montada normalmente para el mecanizado,

comprobar la precisión del posicionamiento de la máquina (40) moviendo la máquina (40) para hacer que la sonda (70) contacte con un elemento de referencia (M) fijo montado en una posición conocida, de manera que la sonda (70) mide una posición del elemento de referencia (M), y pasar a la siguiente etapa solo si la posición medida por la sonda del elemento de referencia (M) está dentro de una primera tolerancia predeterminada de la posición conocida, y

comprobar la precisión del posicionamiento del accesorio (30) de sujeción moviendo la máquina (40) para hacer que la sonda contacte cada uno de entre una pluralidad de elementos (32) de sujeción del accesorio (30) que han sido colocados en posiciones determinadas dentro de una unidad (36) de control numérico del accesorio (30) de sujeción que controla el posicionamiento de los elementos (32) de sujeción, de manera que la sonda (70) mide una posición de cada elemento (32) de sujeción;

pasar a las operaciones de mecanizado solo si la posición medida por la sonda de cada elemento (32) de sujeción que ha sido comprobado está dentro de una segunda tolerancia predeterminada con respecto a la posición determinada dentro de la unidad (36) de control numérico del accesorio (30) de sujeción;

caracterizado por que:

la precisión del accesorio de sujeción es comprobada después de comprobar la precisión del posicionamiento de la máquina;

en el que la comprobación de la precisión del posicionamiento del accesorio de sujeción comprende comparar las posiciones medidas por la sonda de cada uno de los elementos de sujeción con las posiciones deseadas, determinar los valores delta que representan las discrepancias entre las posiciones reales y deseadas y tener en cuenta los valores delta en el software de la unidad de control numérico y, después, realizar una comprobación posterior a la calibración colocando el accesorio en diversas configuraciones diferentes con los elementos de sujeción en posiciones diferentes a las usadas en la comprobación inicial de la precisión del posicionamiento del accesorio de sujeción, y calcular los segundos valores delta para cada configuración, en el que la intervención física se lleva a cabo si los segundos valores delta exceden un límite de umbral; en el que el procedimiento comprende además:

cargar una pieza a mecanizar en el accesorio de sujeción una vez pasadas las comprobaciones y sondear una serie de puntos de ajuste, primarios y secundarios, sobre la pieza de trabajo para verificar que la pieza de trabajo está ubicada en la ubicación apropiada con relación a la máquina.

2. Procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además comprobar globalmente la precisión del posicionamiento de la máquina (40) a lo largo de una zona de trabajo de la misma:

montando una diana (92) reflectora sobre la máquina contigua al husillo (62);

montando un instrumento (90) de medición por láser en una ubicación fija cercana a la máquina (40);

moviendo la máquina (40) de manera que la diana (92) es colocada en cada posición de entre una pluralidad de posiciones separadas a lo largo de la zona de trabajo;

dirigiendo un haz (94) láser desde el instrumento (90) de medición por láser para que se refleje desde la diana (92) de nuevo al instrumento (90) de medición por láser, en el que el instrumento (90) de medición por láser es operable para calcular las coordenadas de posición de la diana (92) en base a las características derivadas a partir del haz reflejado, de manera que las coordenadas de posición de la diana (92) son determinadas para cada posición en la zona de trabajo; y

pasando a las operaciones siguientes solo si las coordenadas de posición de la diana (92) determinadas en el instrumento (90) de medición por láser para cada posición de la diana (92) están dentro de tolerancias predeterminadas con respecto a las coordenadas de posición dentro de una unidad (64) de control numérico de la máquina.

3. Procedimiento según la reivindicación 2, en el que la máquina (40) es móvil a lo largo de cada uno de entre un primer eje de traslación y un segundo eje de traslación que son perpendiculares, y en el que se crea un marco de referencia maestro basado en los ejes de traslación de la máquina en el instrumento (90) de medición por láser previamente a la comprobación de la precisión global de la máquina:

moviendo la máquina (40) a lo largo del primer eje de traslación y usando el instrumento (90) de medición

para determinar las coordenadas de la diana (92) en cada punto de entre una pluralidad de puntos separados a lo largo del primer eje de traslación;
 moviendo la máquina (40) a lo largo del segundo eje de traslación y usando el instrumento (90) de medición para determinar las coordenadas de la diana (92) en cada punto de entre una pluralidad de puntos separados a lo largo del segundo eje de traslación; y
 calculando un ajuste lineal de las coordenadas determinadas para crear un conjunto de ejes mutuamente ortogonales que definen el marco maestro de referencia;
 y en el que las coordenadas de la diana (92) se determinan en el marco maestro de referencia durante la comprobación de la precisión global de la máquina (40).

4. Procedimiento según la reivindicación 3, en el que la máquina (40) incluye una muñeca (56) formada por un cabezal (58) y un cuerpo (60) de sujeción de husillo, en el que el cabezal (58) está montado, de manera giratoria, en un cilindro (54) que puede ser trasladado, de manera independiente, a lo largo de cada uno de los tres ejes X, Y y Z mutuamente ortogonales, en el que el cabezal (58) puede girar en el cilindro (54) alrededor de un primer eje (C) de rotación que es nominalmente paralelo al eje Z, en el que el cuerpo (60) de sujeción de husillo puede girar en el cabezal (58) alrededor de un segundo eje (A) de rotación perpendicular al primer eje (C) de rotación, en el que el husillo (62) está montado en el cuerpo (60) de sujeción de husillo de manera que cuando cada uno de entre el cabezal (58) y el cuerpo (60) se hace girar a sus posiciones iniciales un eje del husillo (62) está alineado nominalmente a lo largo del primer eje (C) de rotación, y en el que la etapa de montaje de la sonda (70) de medición de contacto comprende montar la sonda (70) en el husillo (62) de manera que la sonda (70) se extiende longitudinalmente a lo largo de, y está alineada con, el eje del husillo (62).

5. Procedimiento según la reivindicación 4, que comprende además comprobar la precisión y la alineación del segundo eje (A) de rotación, colocando el cuerpo (60) de sujeción de husillo en su posición inicial y girando el cabezal (58) alrededor del primer eje (C) de rotación a cada una de dos posiciones separadas angularmente, y detectar si la sonda se mueve de su posición en el espacio como resultado de la rotación del cabezal (58).

6. Procedimiento según la reivindicación 4 ó 5, en el que el montaje de la sonda (70) en el husillo (62) se realiza de manera que la sonda (70) tiene una longitud predeterminada medida a lo largo del eje del husillo (62) desde una punta de la sonda (70) al segundo eje (A) de rotación.

7. Procedimiento según la reivindicación 6, en el que la longitud desde la punta de la sonda (70) al segundo eje (A) de rotación es comprobada para asegurar que está dentro de una tolerancia predeterminada de la longitud predeterminada antes de comprobar la precisión del posicionamiento de la máquina (40) y el accesorio de sujeción con la sonda (70).

8. Procedimiento según la reivindicación 7, en el que el husillo (62) puede ser trasladado a lo largo de su eje con respecto al cuerpo (60) de sujeción de husillo hacia y desde el segundo eje (A) de rotación alrededor del cual gira el cuerpo (60) de sujeción de husillo, y en el que el husillo (62) es trasladado a una posición inicial del mismo antes de comprobar la longitud de la sonda (70).

9. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que la máquina es del tipo que tiene un husillo portaherramientas montado en un cuerpo de sujeción de husillo, en el que el cuerpo está montado, de manera giratoria, en un cabezal que está montado, de manera giratoria, en un cilindro que puede moverse a lo largo de tres ejes de traslación, mutuamente ortogonales, en el que el procedimiento comprende:

(a) montar la sonda de medición en el husillo de manera que, cuando el cuerpo está en una posición inicial del mismo, un eje longitudinal de la sonda está alineado colinealmente con un primer eje de rotación de la máquina alrededor del cual gira el cabezal con respecto al cilindro, y de manera que la sonda tiene una longitud predeterminada entre una punta de la sonda y un segundo eje de rotación alrededor del cual gira el cuerpo con respecto al cabezal;

(b) comprobar la precisión de la máquina a lo largo de cada uno de los tres ejes de traslación mediante la colocación del cuerpo y el cabezal en posiciones de giro fijas, haciendo que la máquina mueva el cilindro a lo largo de cada uno de los tres ejes de traslación de manera que la punta de la sonda contacte con un elemento de referencia fijo, comparando las posiciones del elemento de referencia medidas por la sonda con las posiciones previamente enseñadas con el fin de determinar si hay un desplazamiento de la máquina o el elemento de referencia a lo largo de cualquiera de los tres ejes de traslación, y corrigiendo cualquier desplazamiento que supere un desplazamiento máximo permitido; y

(c) comprobar la precisión del posicionamiento de rotación del cuerpo de la máquina mediante el posicionamiento del cabezal en una posición en la que el segundo eje de rotación es paralelo a uno de los ejes de traslación, girando el cuerpo alrededor del segundo eje de rotación y detectando si la punta de la

sonda se mueve a lo largo de dicho un eje de traslación, en el que dicho movimiento indica una imprecisión en el posicionamiento rotacional del cabezal, y corrigiendo cualquier imprecisión en el posicionamiento rotacional que supere un imprecisión máxima permitida.

5 10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que el montaje de la sonda (70) de medición comprende:

montar la sonda (70) de medición en el husillo (62) portaherramientas de la máquina (40) de manera que el eje longitudinal de la sonda (70) está alineado generalmente a lo largo de un eje del husillo (62), y asegurar la precisión de la alineación y la longitud de la sonda (70) realizando las etapas de:

- 10 (1) comprobar la alineación de la sonda (70) con el primer eje (C) de rotación de la máquina (40) alrededor del que puede girar el cabezal (58) posicionando el cuerpo (60) en una posición en la que se supone que el eje de la sonda (70) está alineado con el primer eje (C) de rotación, haciendo girar el cabezal alrededor del primer eje (C) de rotación y detectando si la punta (72) de la sonda (70) se desvía de una posición fija en el espacio como resultado de la rotación, en el que dicha desviación indica una falta de alineación de la sonda (70) con el primer eje (C) de rotación, y corrigiendo cualquier desajuste que supere un desajuste máximo permisible; y
- 15 (2) determinar una longitud desde la punta (72) de la sonda (70) en el segundo eje (A) de rotación alrededor del cual gira el cuerpo (60) en el cabezal (58), y ajustar la longitud dentro de una tolerancia de una longitud deseada.
- 20

11. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que la etapa (1) comprende hacer girar el cabezal (58) alrededor del primer eje (C) de rotación a una primera posición y mover la máquina (40) para hacer que la punta (72) de la sonda contacte con un elemento de referencia (M) fijo de manera que un primer conjunto de coordenadas de posición para el elemento de referencia (M) son medidas por la máquina (40), a continuación, hacer girar el cabezal (58) alrededor del primer eje (C) de rotación a una segunda posición y mover de nuevo la máquina (40) para hacer que la punta (72) de la sonda contacte con el elemento de referencia (M) de manera que un segundo conjunto de coordenadas de posición para el elemento de referencia (M) son medidas por la máquina, y comparar el primer conjunto de coordenadas de posición y el segundo conjunto de coordenadas de posición para determinar si hay falta de alineación de la sonda (70) con relación al primer eje (C) de rotación.

25

30

12. Procedimiento según la reivindicación 10, en el que la etapa (2) comprende posicionar la máquina (40) de manera que la sonda esté paralela con respecto un primer eje de traslación de la máquina (40), mover la máquina (40) a lo largo del primer eje (X) de traslación hasta que la punta (72) de la sonda (70) contacte con un lado de un elemento de referencia (M) fijo de manera que la máquina (40) mide una posición de dicho un lado a lo largo del primer eje (X) de traslación, a continuación, hacer girar el cuerpo (60) 180 grados alrededor del segundo eje (A) de rotación y mover la máquina (40) a lo largo del primer eje (X) de traslación hasta que la punta (72) de la sonda (70) contacta un lado opuesto del elemento de referencia (M) fijo de manera que la máquina (40) mide una posición de dicho lado opuesto a lo largo del primer eje (X) de traslación, y calcular la longitud desde la punta (72) de la sonda al segundo eje (A) de rotación en base a las posiciones medidas de los dos lados del elemento de referencia (M) y una distancia conocida entre los dos lados.

35

40

13. Procedimiento según la reivindicación 9, que comprende además el uso de un sistema de detección de posición independiente para comprobar la precisión del posicionamiento de la máquina en una pluralidad de ubicaciones separadas en una zona de trabajo de la máquina (40), en el que el sistema de detección de posición comprende una diana (92) montada contigua al husillo (62) y un instrumento (90) de medición operable para medir las coordenadas de la diana (92), en el que la máquina (40) es movida para posicionar el husillo (62) en cada una de dicha pluralidad de ubicaciones y las coordenadas de la diana (92) son medidas por el sistema de detección de posición para cada ubicación y los errores en el posicionamiento de la máquina (40) se determinan comparando las coordenadas medidas con los valores esperados.

45

50

14. Procedimiento según la reivindicación 13, que comprende además crear un marco de referencia maestro con respecto a los ejes (X, Y, Z) de traslación de la máquina (40) antes de comprobar la precisión de la máquina (40) en cada uno de las ubicaciones en la zona de trabajo, en el que el marco de referencia maestro es creado:

55

- moviendo la máquina (40) a lo largo de un primer eje de entre los ejes (X) de traslación y usando el instrumento (90) de medición para determinar las coordenadas de la diana (92) en cada punto de entre una pluralidad de puntos separados a lo largo del primer eje (X) de traslación;
- 60 moviendo la máquina a lo largo de un segundo eje de entre los ejes (Y) de traslación ortogonales al primer eje (X) de traslación y usando el instrumento (90) de medición para determinar las coordenadas de la diana (92) en cada punto de entre una pluralidad de puntos separados a lo largo del segundo eje (Y) de traslación;

y
calculando un ajuste lineal de las coordenadas determinadas para crear un conjunto de ejes mutuamente ortogonales que definen el marco de referencia maestro, y en el que el marco de referencia maestro es usado durante la comprobación de la precisión del posicionamiento de la máquina (40).

5
15. Procedimiento según la reivindicación 14, que comprende además comprobar la precisión del posicionamiento de rotación de la máquina (40) alrededor del primer eje (C) y el segundo eje (A) de rotación colocando el cilindro (54) en una posición fija y girando el cuerpo (60) y el cabezal (58) para posicionar la diana (92) en una pluralidad de puntos separados, y usar el instrumento (90) de medición para determinar las coordenadas de la diana (92) en
10 cada uno de los puntos en base al marco de referencia maestro, y comparar las coordenadas determinadas con los valores esperados.

16. Procedimiento según la reivindicación 15, en el que el procedimiento está adaptado para comprobar la precisión del posicionamiento de un accesorio (30) de sujeción de pieza de trabajo, con control numérico, usado en
15 conjunción con la máquina (40) para sujetar una pieza de trabajo (W) a mecanizar, en el que el accesorio (30) tiene una pluralidad de elementos (32) de sujeción móviles, con control numérico, operables para acoplarse a la pieza de trabajo (W), en el que el procedimiento comprende además:

colocar los elementos (32) de sujeción del accesorio (30) en posiciones fijas;
20 mover la máquina (40) a cada uno de entre una pluralidad de elementos (32) de sujeción de manera que la sonda (70) contacte con cada elemento (32) de sujeción y la máquina (40) determina una posición del elemento (32) de sujeción a lo largo de al menos un eje del marco de referencia maestro; y
comparar la posición determinada por la máquina de cada elemento (32) de sujeción con una posición del
elemento (32) de sujeción determinada dentro del accesorio (30) de sujeción.

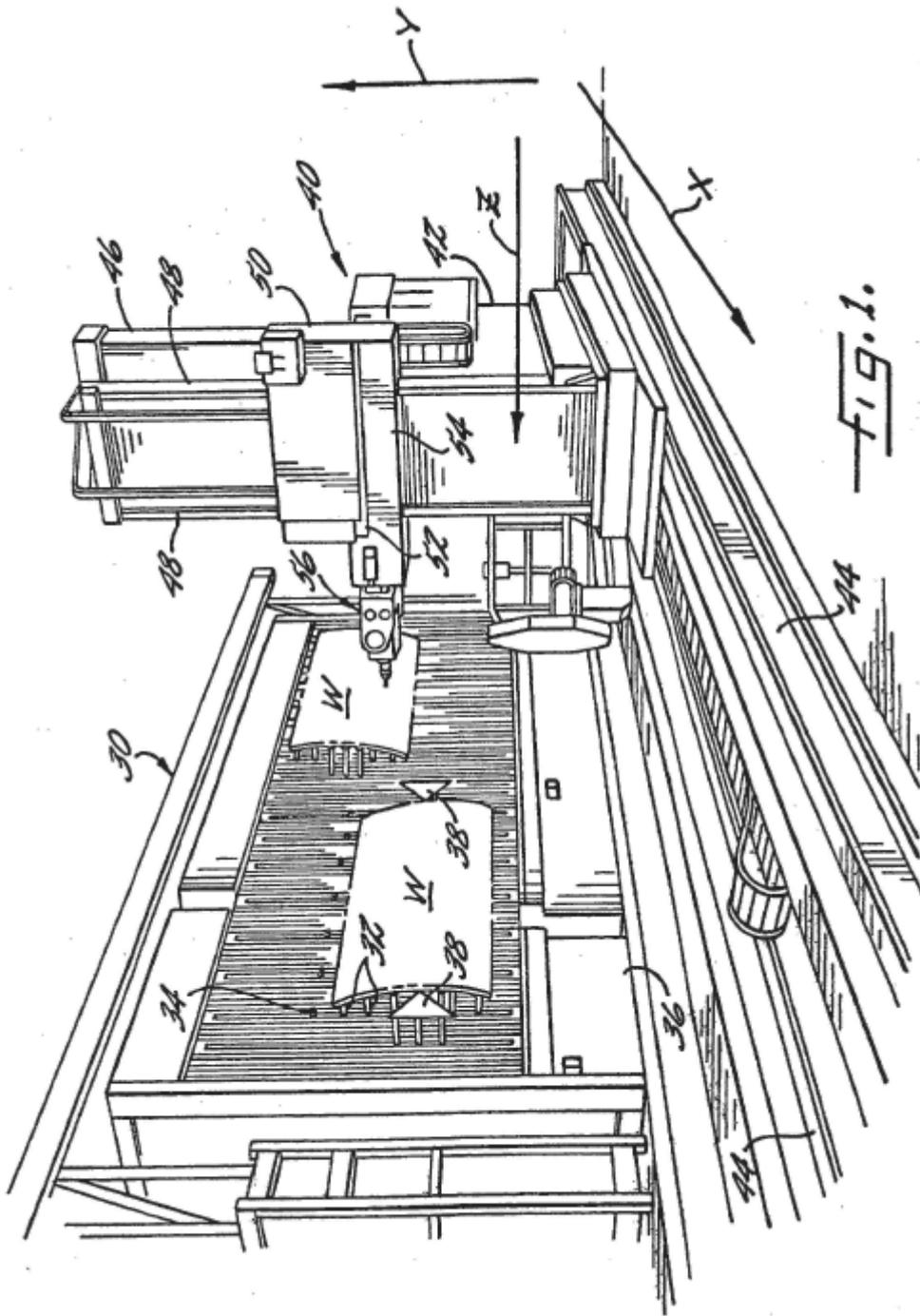
25
17. Procedimiento según la reivindicación 16, que comprende además:

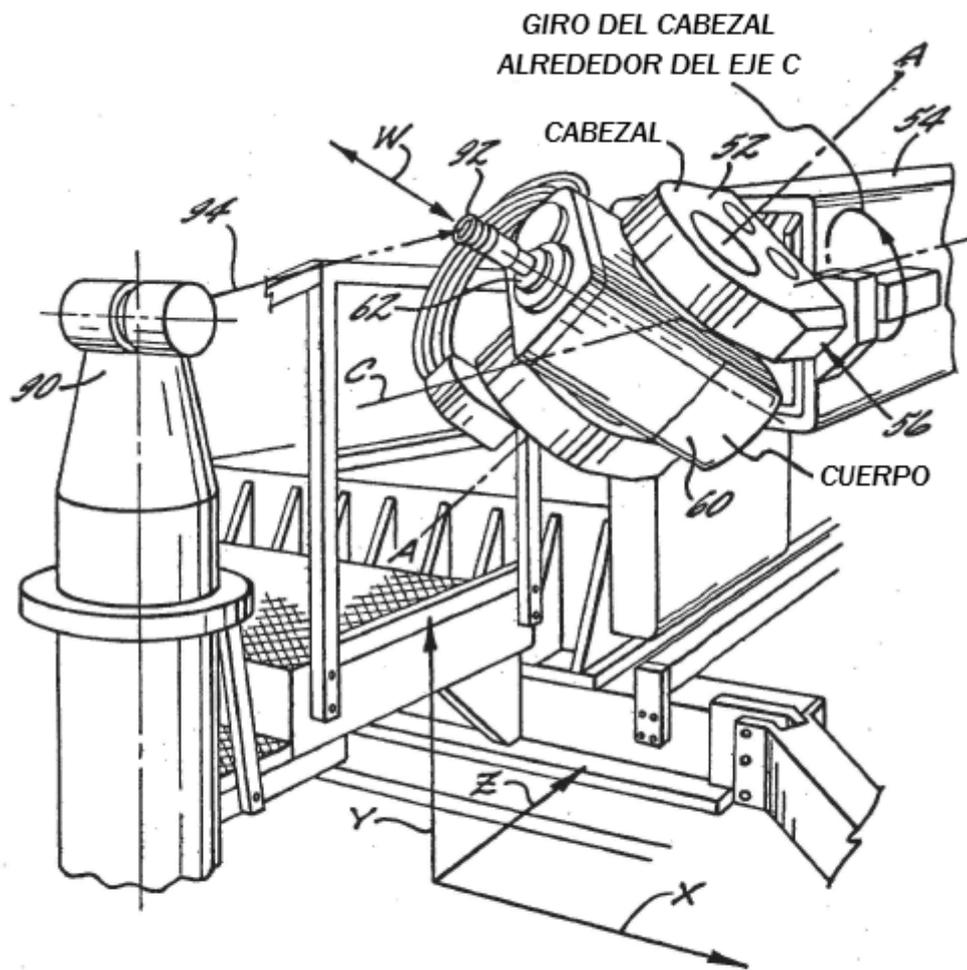
aplicar medidas correctivas al accesorio (30) de sujeción cuando una diferencia entre la posición
30 determinada por la máquina y la posición determinada por el accesorio de uno o más de los elementos (32) de sujeción supera una diferencia máxima permisible.

18. Procedimiento según la reivindicación 17, en el que la aplicación de las medidas correctivas comprende aplicar uno o más factores de corrección dentro de una unidad (36) de control numérico del accesorio (30) de sujeción en
35 base a dicha diferencia entre la posición determinada por la máquina y la posición determinada por el accesorio de cada elemento (32) de sujeción.

19. Procedimiento según la reivindicación 18, en el que los elementos (32) de sujeción son móviles a lo largo de cada uno de entre al menos el primer eje y el segundo eje del accesorio (30) alineado generalmente con el primer eje y el segundo eje del marco de referencia maestro, en el que la sonda (70) contacta con cada elemento (32) de
40 sujeción en dos o más superficies de manera que la máquina (40) determina la posición del elemento (32) de sujeción a lo largo de cada uno de entre el primer eje y el segundo eje del marco de referencia maestro y el accesorio (30) determina la posición del elemento (32) de sujeción a lo largo de cada uno de entre el primer eje y el segundo eje del accesorio (30), y en el que los factores de corrección son aplicados dentro de la unidad (36) de control numérico del accesorio (30) para corregir el posicionamiento de los elementos (32) de sujeción a lo largo
45 de cada uno de los ejes del accesorio (30).

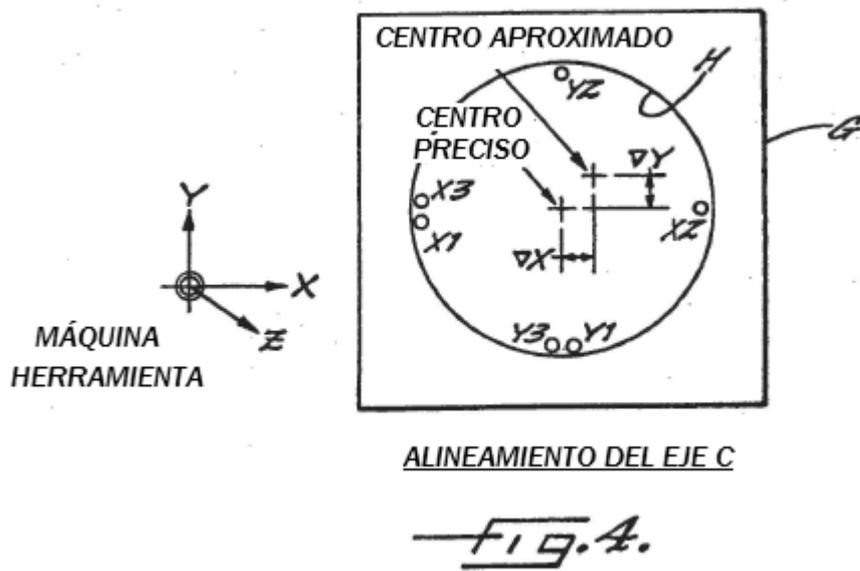
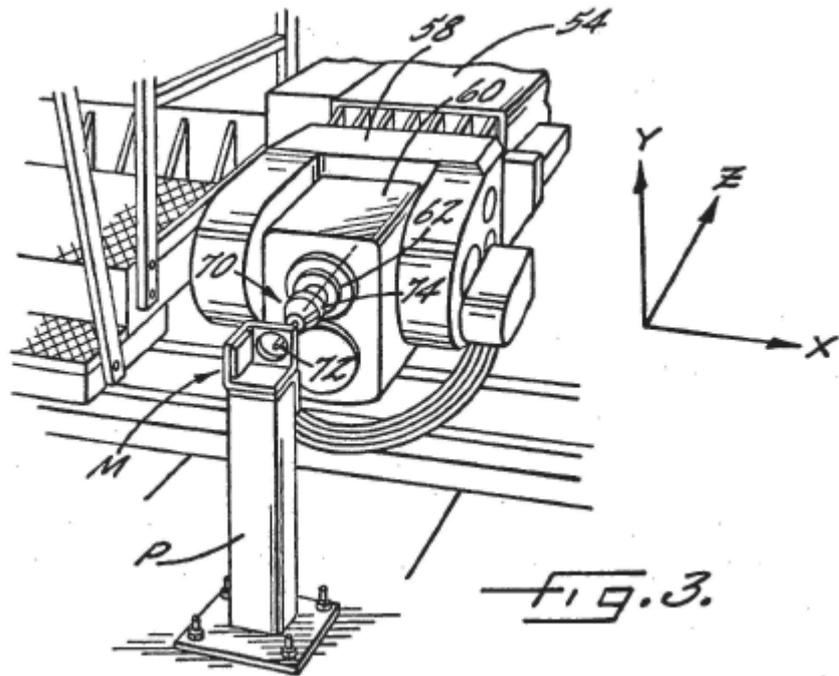
20. Procedimiento según la reivindicación 16, en el que la máquina (40) incluye un impulsor (42) principal montado en guías (44) lineales que definen el primer eje (X) de traslación de la máquina (40), el cilindro (54) es deslizable sobre el impulsor (42) principal a lo largo de guías (48) lineales que definen el segundo eje (Y) de traslación de la
50 máquina y a lo largo de guías (52) lineales que definen un tercer eje (Z) de traslación de la máquina (40), y los elementos (32) de sujeción del accesorio (30) comprenden ventosas (34) montadas en varillas (32), en el que cada varilla (32) es extensible y retráctil a lo largo de una dirección generalmente paralela con respecto al tercer eje (Z) de traslación de la máquina, y en el que una pluralidad de las varillas (32) están colocadas en una posición constante determinada por el accesorio a lo largo del tercer eje (Z) de traslación, mientras que la sonda (70) es
55 usada para determinar una posición determinada por la máquina a lo largo del tercer eje (Z) de traslación para dicha pluralidad de las varillas (32), y se aplican acciones correctivas al accesorio (30) si las posiciones determinadas por la máquina posiciones de las varillas a lo largo del tercer eje (Z) de traslación difieren en más de una cantidad máxima permitida de las posiciones determinadas por el accesorio.

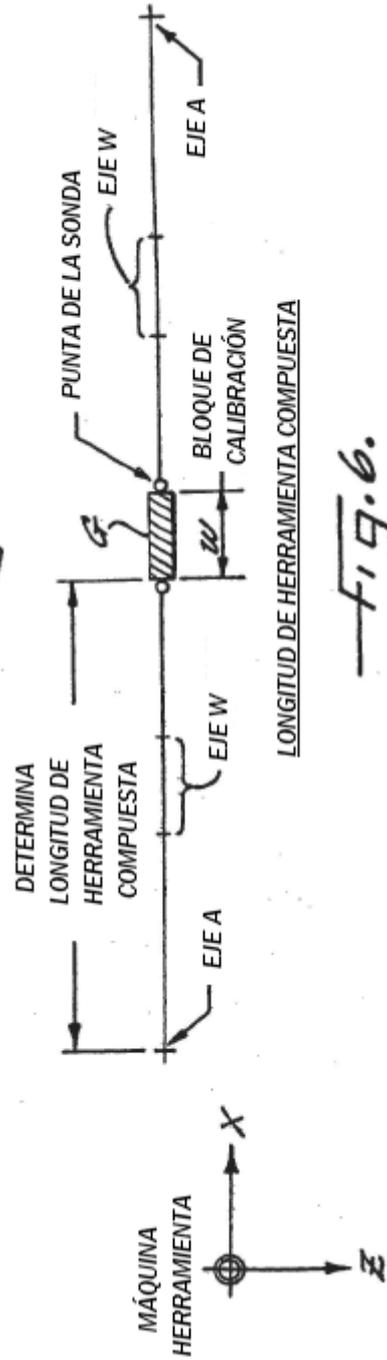
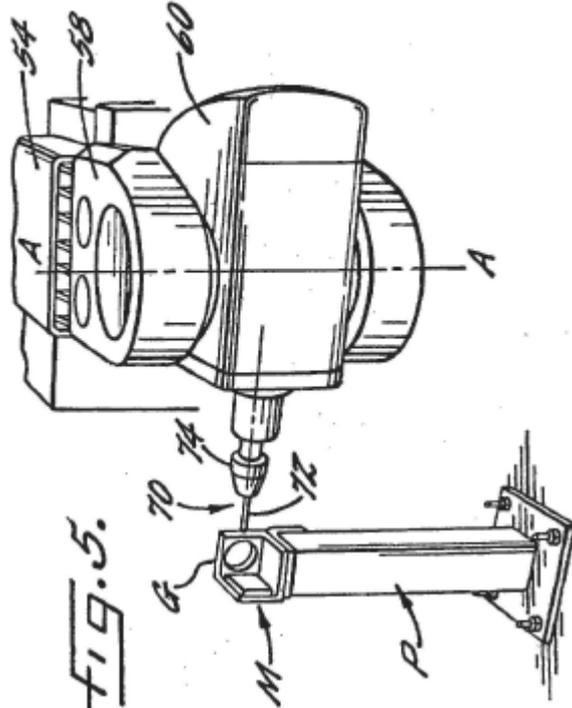


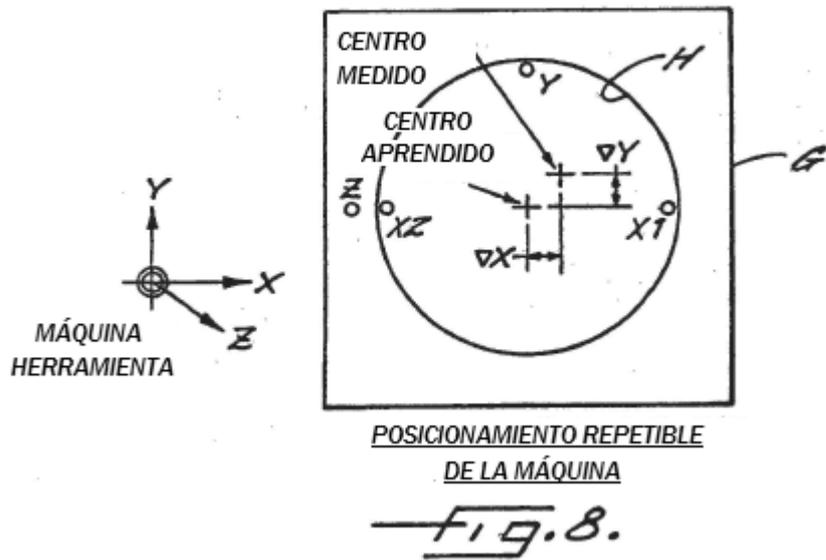
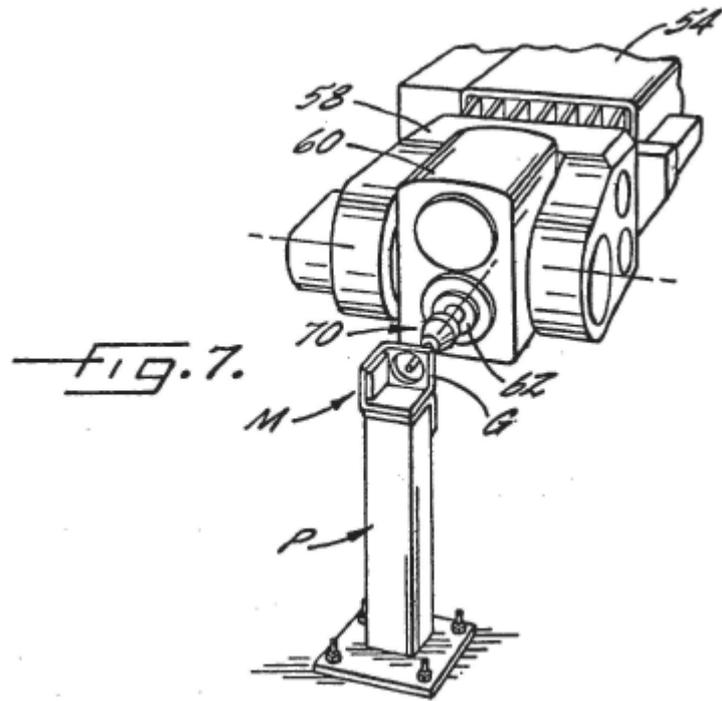


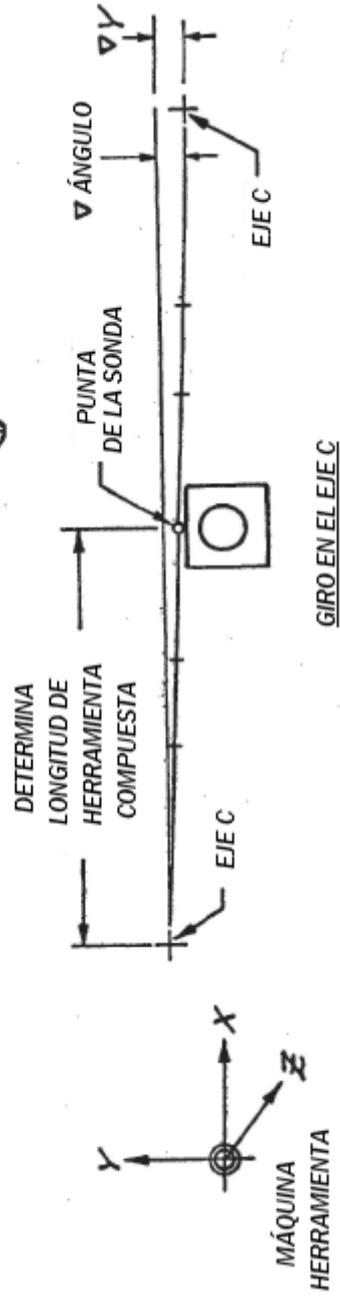
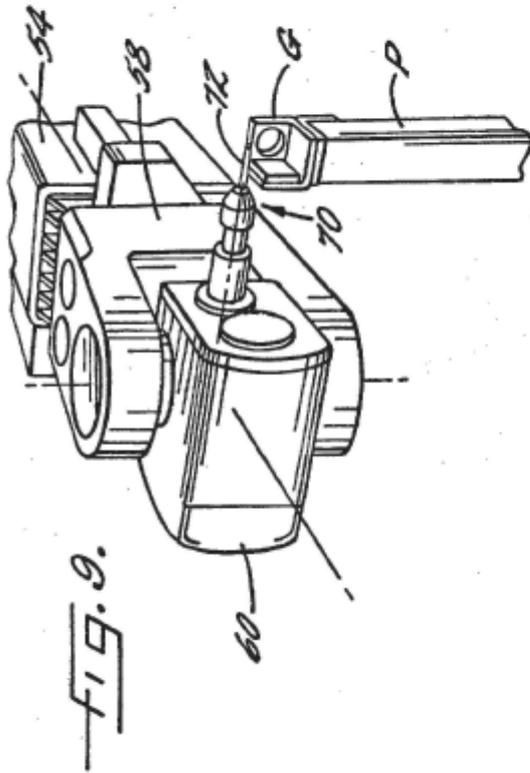
EL CUERPO GIRA CON RESPECTO
AL CABEZAL ALREDEDOR DEL EJE A

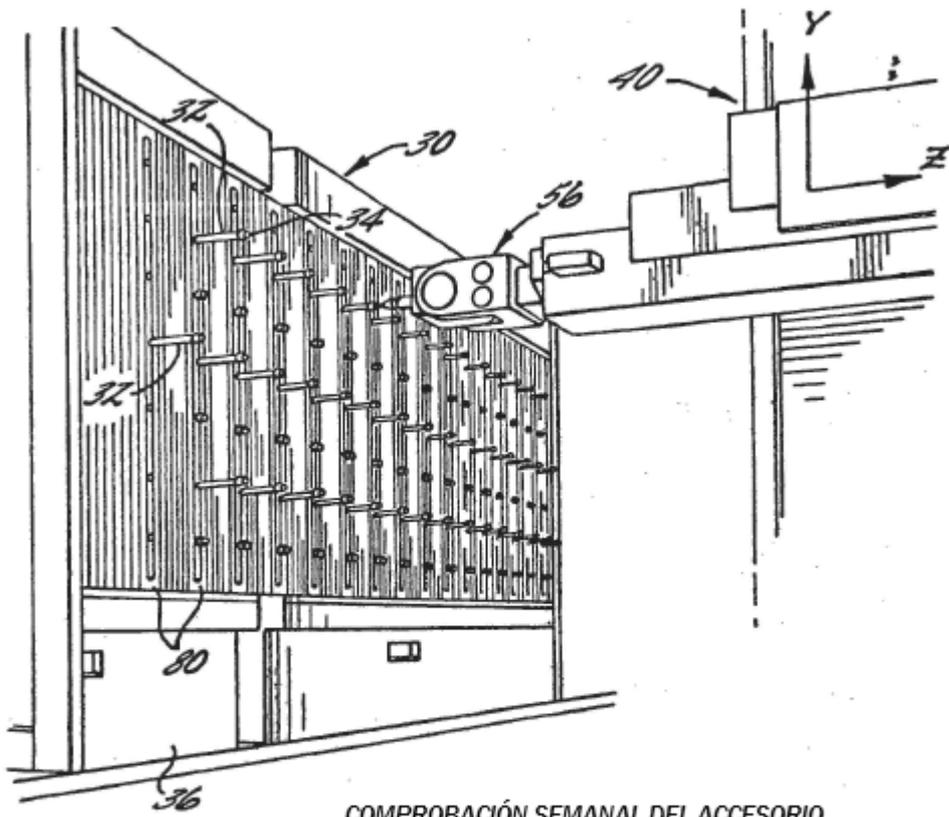
Fig. 2.





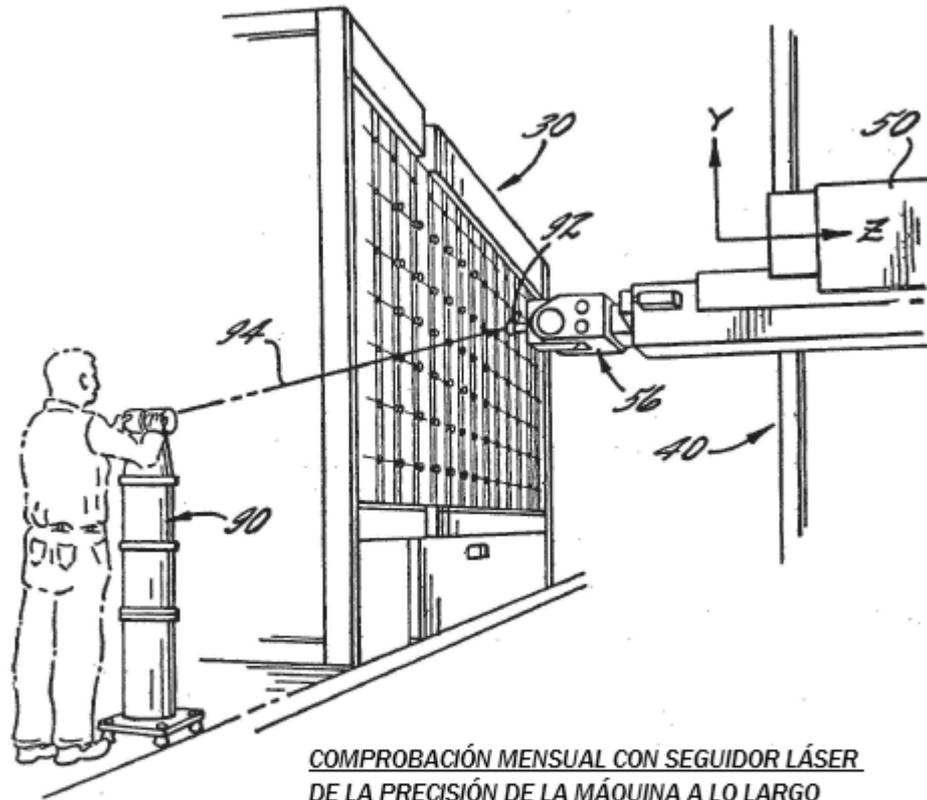






COMPROBACIÓN SEMANAL DEL ACCESORIO
DE SUJECIÓN CON RELACIÓN A LA MÁQUINA

Fig. 11.



COMPROBACIÓN MENSUAL CON SEGUIDOR LÁSER
DE LA PRECISIÓN DE LA MÁQUINA A LO LARGO
DE LOS EJES X, Y, Z

Fig. 12.

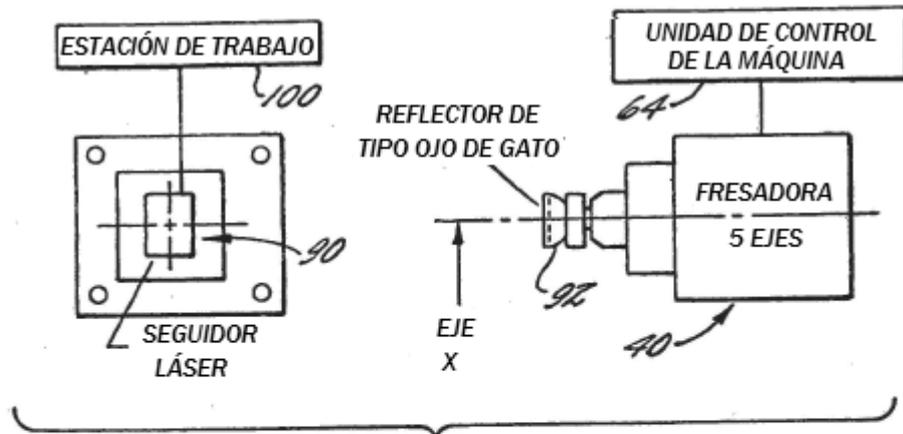


Fig. 13A.

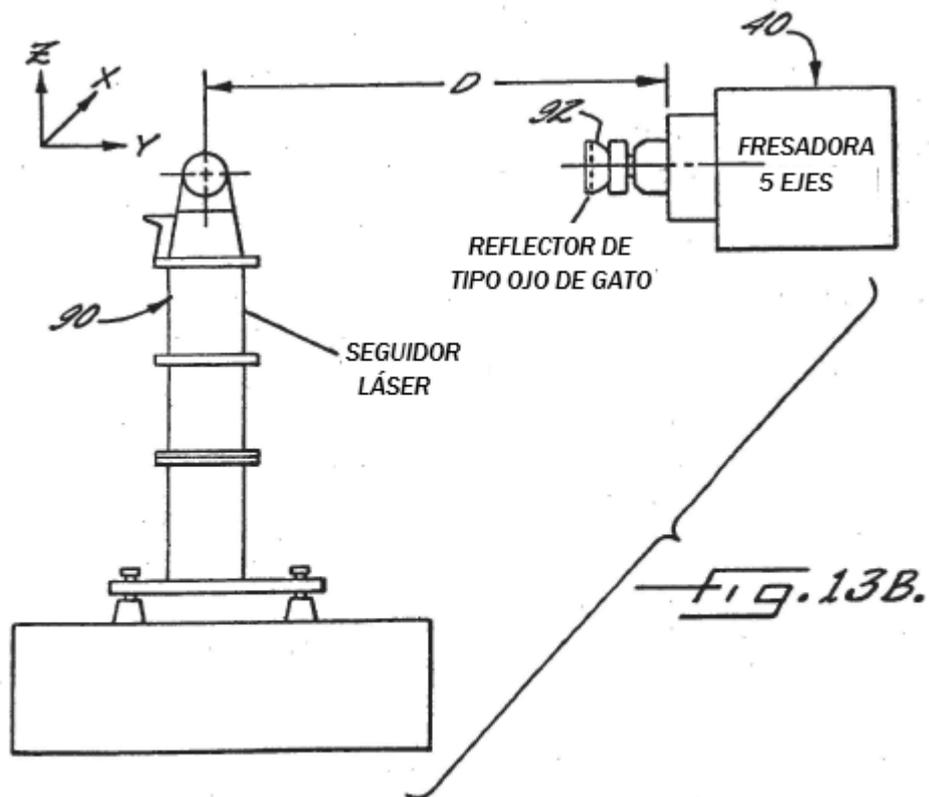


Fig. 13B.

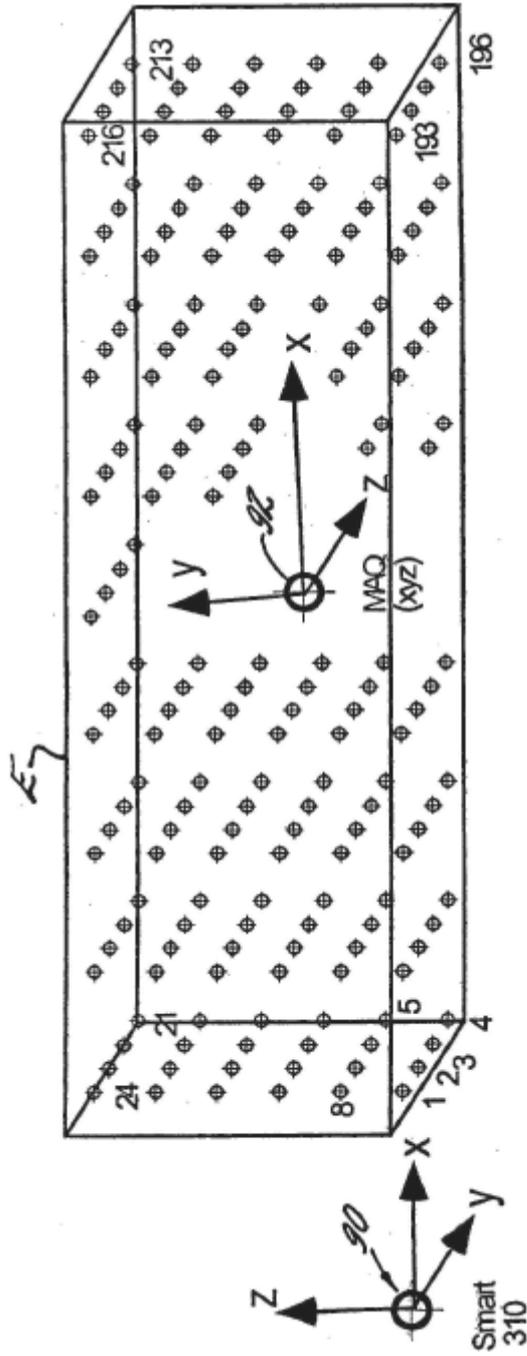
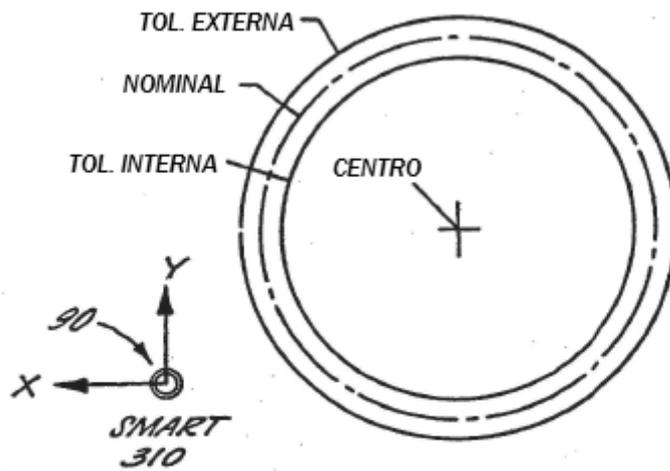


FIG. 14.



PRECISIÓN DINÁMICA DE LA MÁQUINA
EN EL PLANO XY

Fig. 15.

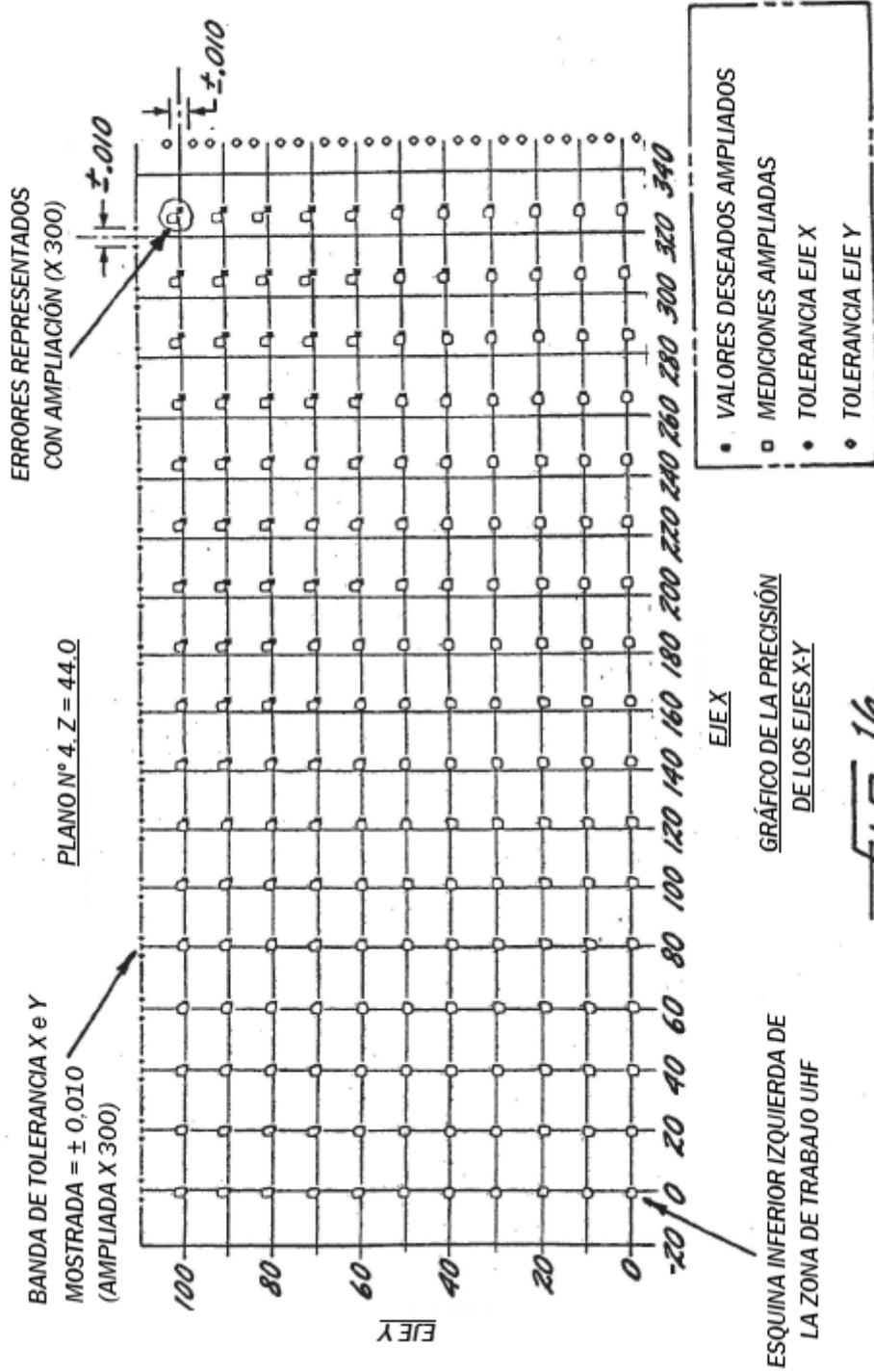


FIG. 16.

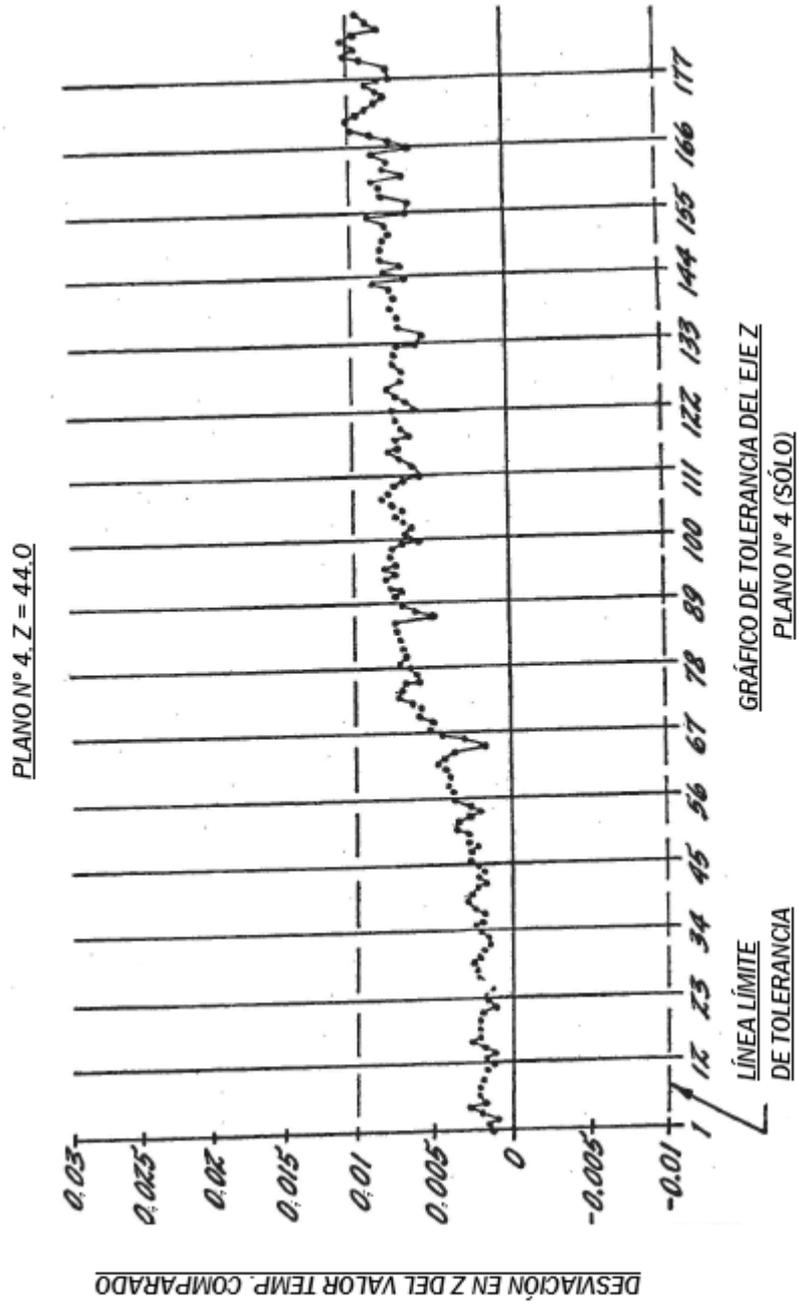


FIG. 17.

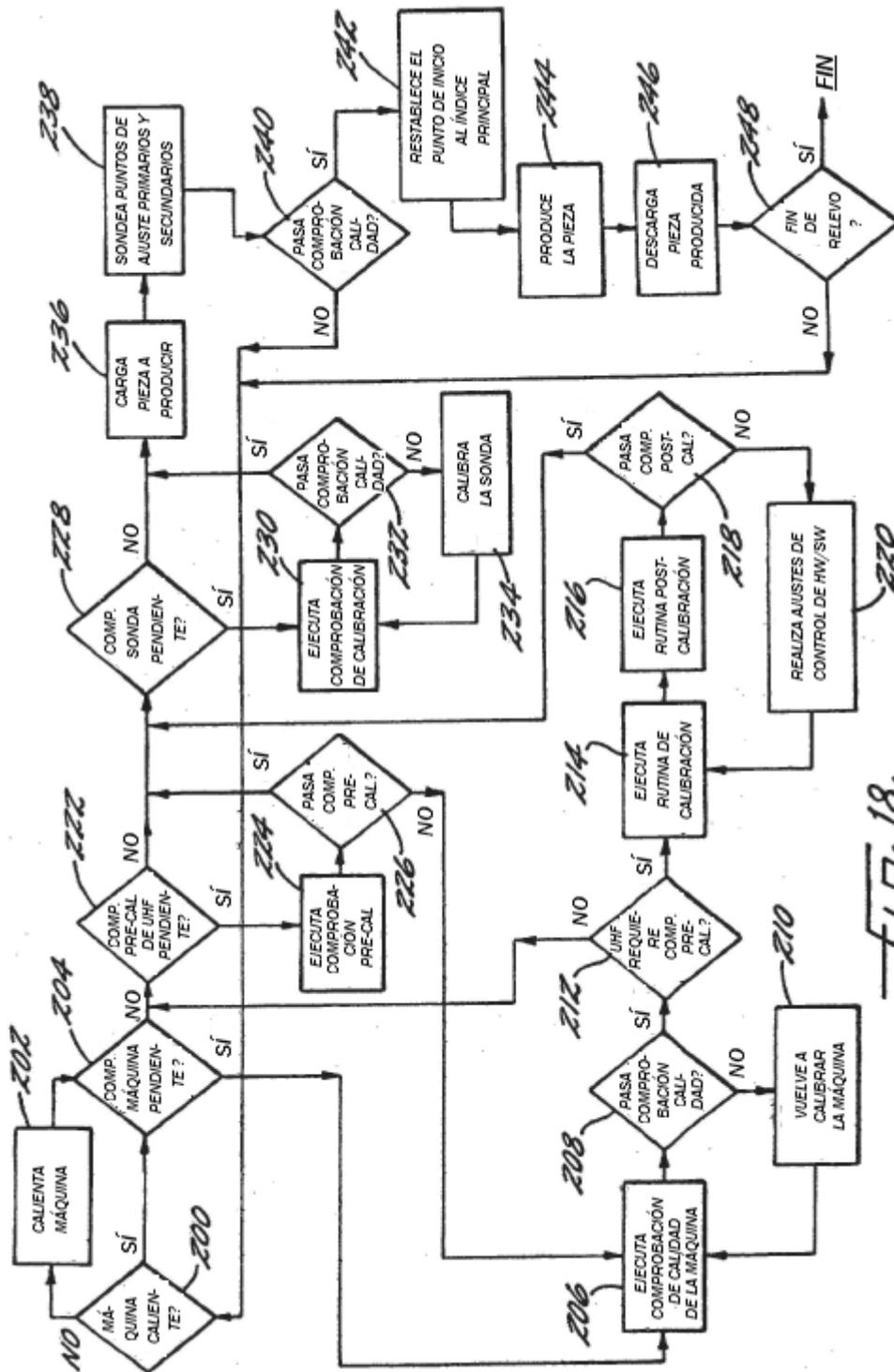


FIG. 18.

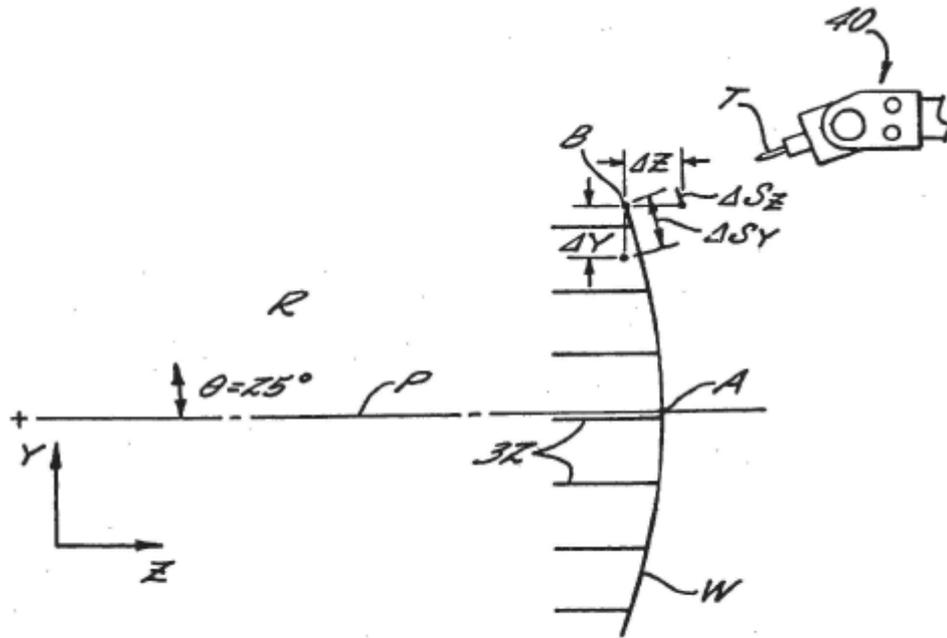


FIG. 19.

PARÁMETROS QUE AFECTAN A LA MALA UBICACIÓN DEL ORIFICIO	TOLERANCIA PARAMETRO (CM)	CONTRIBUCIÓN AL ERROR ΔS_i (CM)
UBICACIÓN Y y Z DEL POGO	0,03048	0,018034
ERROR Z DEL BLOQUE DE PUNTO DE AJUSTE DEL ACCESORIO	0,0254	0,010668
DESPLAZAMIENTO EN Y DEL EJE C	0,0762	0,006858
LONGITUD DE HERRAMIENTA COMPUESTA	0,0127	0,005334
ERROR Z DE LA MÁQUINA	0,03048	0,025654
ERROR Y DE LA MÁQUINA	0,03048	0,055372
ERROR Z DE EJE WAC	0,03048	0,012954
ERROR Y DE EJE WAC	0,0127	0,01143
R DELTA ENTRE POGOS	0,127	0,03048
EFFECTO DE CAMBIO DE ÁNGULO DE PANEL	1 GRADO EN 7,62 CM	0,00127
ERROR PERNO LOCALIZADOR	0,0762	0,006858
DESPLAZAMIENTO EJE C DE BROCA	0,00508	0,00508
DESPLAZAMIENTO DE LA BROCA EN LA ENTRADA	0,00508	0,00508
	ERROR TOTAL ΔS	0,074676

Fig. 20.