



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2018/116635**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜG)

(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2017 006 465.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/JP2017/038842**

(86) PCT-Anmeldetag: **27.10.2017**

(87) PCT-Veröffentlichungstag: **28.06.2018**

(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **05.09.2019**

(51) Int Cl.: **G05B 19/404 (2006.01)**
B23Q 17/00 (2006.01)

(30) Unionspriorität:
2016-249163 22.12.2016 JP

(71) Anmelder:
**DMG MORI CO., LTD., Yamatokoriyama-shi, Nara,
JP**

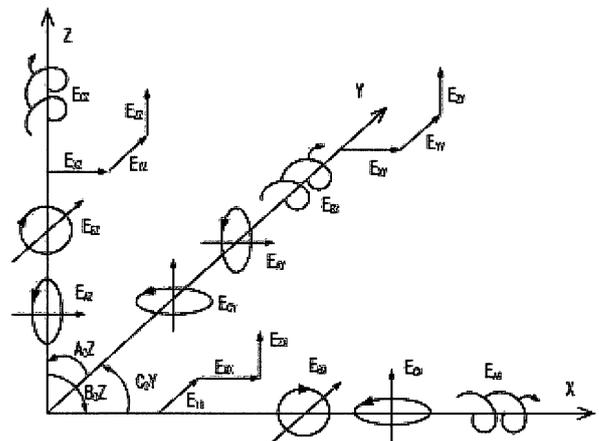
(74) Vertreter:
**isarpatent - Patent- und Rechtsanwälte Behnisch
Barth Charles Hassa Peckmann & Partner mbB,
80801 München, DE**

(72) Erfinder:
**Ido, Yutaka, Yamatokoriyama-shi, Nara, JP;
Shimoike, Masahiro, Yamatokoriyama-shi, Nara,
JP**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Identifizierung von Bewegungsfehlern für Werkzeugmaschinen**

(57) Zusammenfassung: Ein Bewegungsfehler einer Werkzeugmaschine in einem Koordinatensystem, dessen Ursprung an einer beliebigen Position liegt, wird anhand von Fehlerdaten identifiziert, die mit einem üblicherweise verwendeten Verfahren gemessen werden. Ein X-Achsen-Vorschubmechanismus, ein Y-Achsen-Vorschubmechanismus und ein Z-Achsen-Vorschubmechanismus werden in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems betrieben, um Translationsfehler, Winkelfehler und Rechtwinkligkeitsfehler davon zu messen, und Fehlerdaten für Translationsfehlerparameter, Winkelfehlerparameter und Rechtwinkligkeitsfehlerparameter in einem dreidimensionalen Raum eines festgelegten Koordinatensystems, dessen Ursprung an einer vorgegebenen Referenzposition X_a , Y_a , Z_a liegt, werden basierend auf den gemessenen tatsächlichen Fehlerdaten abgeleitet. Anschließend wird aus den abgeleiteten Fehlerdaten ein relativer Bewegungsfehler zwischen einer Spindel und einem Tisch im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems abgeleitet.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Identifizieren eines relativen Bewegungsfehlers zwischen einer Spindel zum Halten eines Werkzeugs und einem Tisch zum Befestigen eines Werkstücks darauf in einer Werkzeugmaschine, die konfiguriert ist, um die Spindel und den Tisch relativ zueinander in Richtungen von drei orthogonalen Achsen, einer X-Achse, einer Y-Achse und einer Z-Achse, zu bewegen.

Hintergrund der Erfindung

[0002] Herkömmlicherweise werden Positionierfehler in den X-Achse, Y-Achse und Z-Achse Vorschubachsen (d.h. ein Vorschubmechanismus der X-Achse, ein Vorschubmechanismus der Y-Achse und ein Vorschubmechanismus der Z-Achse) und Geradheit in den Vorschubachsen als Faktoren berücksichtigt, die zu einem Bewegungsfehler in einer Werkzeugmaschine beitragen. Um einen solchen Bewegungsfehler auszugleichen, wurde eine numerische Steuerung vorgeschlagen, wie sie in der Veröffentlichung der japanischen ungeprüften Patentanmeldung Nr. H8-152909 (Patentliteratur 1 unten aufgeführt) offenbart ist.

[0003] Diese numerische Steuerung, wie in der Patentliteratur 1 offenbart, beinhaltet Gitterpunkt-Kompensationsvektor-Speichermittel, die Gitterpunkt-Kompensationsvektoren speichern, die im Voraus an Gitterpunkten eines Rastergebiets oder Gittergebiets gemessen werden, das durch Unterteilen eines Koordinatensystems in bestimmten Intervallen in jeder Koordinatenachsenrichtung definiert ist, Interpolationsmittel, die einen Interpolationsimpuls für jede Vorschubachse gemäß einem Bewegungsbefehl ausgeben, Mittel zur Erkennung der aktuellen Position, die eine aktuelle Position in jeder Vorschubachse durch Hinzufügen des Interpolationsimpulses erkennen, Kompensationsvektor-Berechnungsmittel für die aktuelle Position, die einen Kompensationsvektor für die aktuelle Position an der aktuellen Position basierend auf den Rasterpunkt-Kompensationsvektoren berechnen, Kompensationsimpuls-Ausgabemittel, die den Kompensationsvektor der aktuellen Position mit einem Startpunkt-Kompensationsvektor an der vorherigen aktuellen Position vor der Interpolation vergleichen und einen Änderungsbetrag als Kompensationspuls ausgeben, und Addiermittel, die den Kompensationspuls zum Interpolationsimpuls hinzufügen.

[0004] Mit dieser numerischen Steuerung wird bei jeder Ausgabe eines Interpolationsimpulses ein dreidimensionaler Kompensationsvektor an einer aktuellen Position berechnet und der berechnete dreidimensionale Kompensationsvektor als Kompensationspuls zum Interpolationsimpuls hinzugefügt. Daher kann ein Positionierfehler, der durch ein mechanisches System in einem dreidimensionalen Raum verursacht wird, durch eine einzige Fehlerkompensationsfunktion des Interpolationstyps kompensiert werden.

[0005] Es sei darauf hingewiesen, dass der Gitterpunkt-Kompensationsvektor an jedem Rasterpunkt des Rasterbereichs durch Messen eines Positionierfehlers eines Referenzpunkts in einem dreidimensionalen Raum erhalten wird, der bei der Steuerung der Positionierung in den Vorschubachsen mit einem bestimmten Intervall auftritt, wobei der Referenzpunkt als geeignet auf der Achse der Spindel eingestellt wird. Weiterhin wird die Messung typischerweise mit einem Laserinterferometer, einem Laserlängenmessgerät, einem Auto-Kollimator oder dergleichen durchgeführt. Darüber hinaus wird der Referenzpunkt typischerweise beispielsweise auf eine Position festgelegt, an der sich die Achse der Spindel mit einer Stirnseitenfläche der Spindel schneidet, oder auf eine Position, die um einen vorgegebenen Abstand auf der Achse der Spindel von der Stirnseitenfläche der Spindel nach vorne weg liegt; der Referenzpunkt wird je nach Messverfahren geeignet bestimmt.

[0006] In jüngster Zeit wird davon ausgegangen, dass ein Bewegungsfehler (Positionierfehler) in einem dreidimensionalen Raum in einer Werkzeugmaschine auftritt mit Fehlern in translatorischen Bewegungen in den Vorschubachsen, Winkelfehlern in den Vorschubachsen und Fehlern in Bezug auf Rechtwinkligkeiten zwischen den Vorschubachsen, die sich gegenseitig beeinflussen, wie in **Fig. 4** dargestellt. Daher kann durch die Berechnung dieser Fehler ein genauer Bewegungsfehler identifiziert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die Definitionen der in **Fig. 4** dargestellten Fehler wie folgt sind:

E_{xx} ist ein Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{yy} ist ein Positionierungsfehler in Richtung der Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{zz} ist ein Positionierungsfehler in Z-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{yx} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Y-Achse) in einer durch die X-Achse und die Y-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse definierten Ebene;

E_{ZX} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Z-Achse) in einer Ebene, die durch die X-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse definiert ist;

E_{XY} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der X-Achse) in einer Ebene, die durch die Y-Achse und die X-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse definiert ist;

E_{ZY} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Z-Achse) in einer Ebene, die durch die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse definiert ist;

E_{XZ} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der X-Achse) in einer Ebene, die durch die Z-Achse und die X-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse definiert ist;

E_{YZ} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Y-Achse) in einer Ebene, die durch die Z-Achse und die Y-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse definiert ist;

E_{AX} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{AY} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{AZ} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{BX} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{BY} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{BZ} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{CX} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{CY} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{CZ} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

A_0Z ist ein Winkelfehler um die X-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Z-Achse und einer idealen Z-Achse;

B_0Z ist ein Winkelfehler um die Y-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Z-Achse und der idealen Z-Achse; und

C_0Y ist ein Winkelfehler um die Z-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und einer idealen Y-Achse.

[0007] Es sei darauf hingewiesen, dass andere denkbare Fehlerfaktoren ein Winkelfehler A_0Y um die X-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen Y-Achse, ein Winkelfehler B_0X um die Y-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und einer idealen X-Achse und ein Winkelfehler C_0X um die Z-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und der idealen X-Achse sind.

[0008] Was ein Verfahren zum Messen dieser Fehler betrifft, so wurde ein Messverfahren mit einer Messvorrichtung, wie in **Fig. 5** dargestellt, vorgeschlagen. Es sei darauf hingewiesen, dass die in **Fig. 5** dargestellte Werkzeugmaschine **50**, die nur beispielhaft dargestellt ist, aus einem Bett **51** mit einer Werkstückauflagefläche (d.h. einem Tisch) auf der Oberseite, einem Portalrahmen **52** und einem Sattel **53** besteht. Der Rahmen **52** ist so angeordnet, dass ein horizontaler Abschnitt davon über dem Bett **51** positioniert ist, und zwei vertikale Abschnitte davon sind mit den Seiten des Bettes **51** in Eingriff, so dass sich der Rahmen **52** insgesamt in Richtung der Y-Achse bewegen kann. Der Sattel **53** ist mit dem horizontalen Abschnitt des Rahmens **52** in Eingriff gebracht und konfiguriert, um in X-Achsenrichtung entlang des horizontalen Abschnitts des Rahmens **52** beweglich zu sein. Weiterhin wird eine Spindel **54** vom Sattel **53** in einer Weise gehalten, die in Richtung der Z-Achse beweglich und um eine Achse parallel zur Z-Achse drehbar ist. Die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse sind Referenzachsen, die orthogonal zueinander sind, und die Vorschubachsen, die den Referenzachsen entsprechen, bestehen jeweils aus einem Vorschubmechanismus der X-Achse (nicht dargestellt), einem Vorschubmechanismus der Y-Achse (nicht dargestellt) und einem Vorschubmechanismus der Z-Achse (nicht dargestellt).

[0009] Die oben genannten Fehler werden mit einem auf dem Bett **51** angeordneten Laserlängenmessgerät **101** sowie einem an der Spindel **54** angebrachten Spiegel **102** gemessen. Insbesondere wird zunächst die Laserlängenmessvorrichtung **101** an einer vorgegebenen Position angeordnet, z.B. an der mit der durchgezogene Linie in **Fig. 5** angegebenen Position, und der Spiegel **102** wird an der Spindel **54** befestigt. Danach werden die Positionierung im X-Achsen-Vorschubmechanismus, die Positionierung im Y-Achsen-Vorschubmechanismus und die Positionierung im Z-Achsen-Vorschubmechanismus mit einem bestimmten Intervall ge-

steuert, um den Spiegel **102** an jedem Rasterpunkt (auch als Gitterpunkt bezeichnet) eines dreidimensionalen Raumes, der in einem rasterartigen Muster mit dem bestimmten Intervall unterteilt ist, sequentiell zu positionieren, und an jedem Rasterpunkt wird ein Laserstrahl von der Laserlängenmessvorrichtung **101** zum Spiegel **102** gestrahlt und ein reflektiertes Licht des Laserstrahls wird von der Laserlängenmessvorrichtung **101** empfangen, wodurch der Abstand zwischen der Laserlängenmessvorrichtung **101** und dem Spiegel **102** von der Laserlängenmessvorrichtung **101** gemessen wird.

[0010] Anschließend wird die Laserlängenmessvorrichtung **101** sequentiell an drei weiteren verschiedenen Positionen angeordnet (z.B. an den durch die gestrichelten Linien in **Fig. 5** angegebenen Positionen), und an jeder der drei verschiedenen Positionen wird der Spiegel **102** ähnlich wie bei der Erstmessung sequentiell an jedem Rasterpunkt des dreidimensionalen Raumes positioniert und an jedem Rasterpunkt wird der Abstand zwischen der Laserlängenmessvorrichtung **101** und dem Spiegel **102** durch die Laserlängenmessvorrichtung **101** gemessen. Dabei wird der Spiegel **102** an einer anderen Höhenposition als bei der Erstmessung in Bezug auf das Laserlängenmessgerät **101** an mindestens einer der drei verschiedenen Positionen angeordnet.

[0011] Basierend auf den oben beschriebenen Messdaten wird die Position des Spiegels **102** an jedem Rasterpunkt des dreidimensionalen Raumes nach dem Prinzip der Triangulation berechnet. Weiterhin werden auf der Grundlage der berechneten Positionsdaten und der Analyse der Positionsdaten die oben genannten Fehler ermittelt.

[0012] Das Messverfahren mit dem Laserlängenmessgerät **101** hat jedoch das Problem, dass das Laserlängenmessgerät **101** an sich teuer ist, und hat ferner das Problem, dass die Messung lange Zeit in Anspruch nimmt und kompliziert und störend im Betrieb ist, weil es notwendig ist, das Laserlängenmessgerät **101** nacheinander an vier Positionen anzuordnen, und an jeder der vier Positionen den Spiegel **102** nacheinander an jedem Rasterpunkt des dreidimensionalen Raumes zu positionieren, um die Messung durchzuführen.

[0013] Gleichzeitig können die translatorischen Bewegungsfehler in den Vorschubachsen und die Winkelfehler in den Vorschubachsen nach einem bereits etablierten Messverfahren gemessen werden, wie in JIS B 6190-2, JIS B 6336-1 und JIS B 6336-2 vorgesehen. Weiterhin wurde für die Fehler A_0Z , B_0Z , C_0Y , etc. bezüglich der Rechtwinkligkeiten zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse ein Messverfahren mit einer Doppelkugelstange vorgeschlagen, wie in der unten aufgeführten Nicht-Patentliteratur **1** offenbart.

[0014] Dementsprechend können die oben genannten Fehler mit diesen Verfahren ohne Abhängigkeit von der oben beschriebenen Messmethode mit dem Laserlängenmessgerät **101** und dem Spiegel **102** gemessen werden.

Literaturverzeichnis

Patentliteratur

[0015] Patentliteratur 1: Japanische ungeprüfte Patentanmeldung Veröffentlichung Nr. H8-152909

Nicht-Patentliteratur

[0016] Nicht-Patentliteratur 1: Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara und Yoshio Nakatsu: „A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (2nd Report)“, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52/10/1986 pp. 73-79

Zusammenfassung der Erfindung

Technisches Problem

[0017] Der oben beschriebene Bewegungsfehler der Spindel (insbesondere des Referenzpunktes) in einem dreidimensionalen Raum muss hinsichtlich eines Auftretts kompensiert werden. Daher muss typischerweise aus Steuerungsgründen ein Bewegungsfehler in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems, das in Bezug auf den sogenannten Maschinennullpunkt definiert ist, identifiziert werden.

[0018] Werden jedoch die Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse mit einer Doppelkugelstange gemessen, wie oben erwähnt, besteht das Problem, dass es nicht möglich ist, die Fehler in Bezug auf den Maschinennullpunkt zu messen. Das heißt, um die Rechtwinkligkeitsfehler in Bezug

auf den Maschinennullpunkt mit einer Doppelkugelstange zu messen, ist es notwendig, die Spindel, an der die Doppelkugelstange befestigt ist, um den Maschinennullpunkt mit der Länge der Stange als Wenderadius zu drehen. Die Vorschubachsen erlauben jedoch keine Bewegung in negativer Richtung über den Maschinennullpunkt hinaus; daher kann ein solcher Drehvorgang nicht realisiert werden.

[0019] Die oben genannten Fehler E_{XX} , E_{YY} , E_{ZZ} , E_{YX} , E_{ZX} , E_{XY} , E_{ZY} , E_{XZ} , E_{YZ} , E_{AX} , E_{AY} , E_{AZ} , E_{BX} , E_{BY} , E_{BZ} , E_{CX} , E_{CY} , and E_{CZ} werden theoretisch als von den Rechtwinkligkeitsfehlern A_0Z , B_0Z , C_0Y , etc. betroffen angesehen. Daher ist es denkbar, dass diese Fehler auch in Bezug auf den Maschinennullpunkt nicht identifiziert werden können.

[0020] Bei Verwendung der im JIS vorgesehenen Messverfahren und des in der Nicht-Patentliteratur **1** offenbarten Verfahrens kann daher der Bewegungsfehler im dreidimensionalen Raum des Maschinenkoordinatensystems nicht sofort anhand der Messwerte der Verfahren identifiziert werden. Ist es jedoch möglich, die Bewegungsfehler im dreidimensionalen Raum des Maschinenkoordinatensystems anhand der mit diesen Verfahren gemessenen Messwerte zu identifizieren, besteht ein Kostenvorteil, da das in **Fig. 5** gezeigte und teure Laserlängenmessgerät **101** nicht benötigt wird. Weiterhin ist es von Vorteil, dass es nicht notwendig ist, an jedem im dreidimensionalen Raum des mechanischen Koordinatensystems eingestellten Rasterpunkt einen Positionsfehler zu messen; daher kann die Messung einfacher durchgeführt werden als die Messung mit dem Laserlängenmessgerät **101**.

[0021] Wenn es ferner möglich ist, den Bewegungsfehler in einem dreidimensionalen Raum eines Koordinatensystems zu identifizieren, dessen Ursprung an einer beliebigen Referenzposition liegt, basierend auf Messwerten, die mit den im JIS bereitgestellten Messverfahren und dem in der Nicht-Patentliteratur **1** offenbarten Verfahren gemessen wurden, wird der Freiheitsgrad der Daten erhöht, was praktisch ist.

[0022] Die vorliegende Erfindung wurde unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Umstände erreicht, und eine Aufgabe ist es, ein Verfahren zum Identifizieren eines Bewegungsfehlers einer Werkzeugmaschine in einem Koordinatensystem bereitzustellen, dessen Ursprung an einer beliebigen Position in der Werkzeugmaschine liegt, basierend auf Fehlerdaten, die mit einem herkömmlichen, häufig verwendeten Messverfahren gemessen wurden.

Lösung des Problems

[0023] Die vorliegende Erfindung zur Lösung der oben beschriebenen Probleme bezieht sich auf ein Verfahren zum Identifizieren eines relativen Bewegungsfehlers zwischen einer ein Werkzeug haltenden Spindel und einem Tisch zur Befestigung eines Werkstücks darauf in einem dreidimensionalen Raum in einer Werkzeugmaschine,

wobei die Werkzeugmaschine die Spindel und den Tisch beinhaltet und einen Z-Achsenvorschubmechanismus, einen X-Achsenvorschubmechanismus und einen Y-Achsenvorschubmechanismus beinhaltet, der jeweils einer Z-Achse, einer X-Achse und einer Y-Achse als Referenzachsen entspricht, wobei sich die Z-Achse entlang einer Achse der Spindel erstreckt, wobei die X-Achse und die Y-Achse orthogonal zur Z-Achse und orthogonal zueinander sind,

wobei die Werkzeugmaschine so konfiguriert ist, dass die Spindel und der Tisch im dreidimensionalen Raum durch den X-Achsenvorschubmechanismus, den Y-Achsenvorschubmechanismus und den Z-Achsenvorschubmechanismus relativ zueinander bewegt werden,

wobei das Verfahren Folgendes beinhaltet:

Betreiben des X-Achsenvorschubmechanismus, des Y-Achsenvorschubmechanismus und des Z-Achsenvorschubmechanismus in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems, das in Bezug auf einen Maschinennullpunkt X_0 , Y_0 , Z_0 definiert ist, der jeweils für den X-Achsenvorschubmechanismus, den Y-Achsenvorschubmechanismus und den Z-Achsenvorschubmechanismus festgelegt ist, und Messen der folgenden Fehler in Bezug auf eine beliebige Koordinatenposition in dem Maschinenkoordinatensystem :

einen Positionierfehler in Richtung der X-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Y-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Z-Achse;

Geradheitsfehler in der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der X-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Y-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Z-Achse; und

Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse;

Ableiten der folgenden Fehler in einem dreidimensionalen Raum eines eingestellten Koordinatensystems, dessen Ursprung an einer im Maschinenkoordinatensystem voreingestellten Referenzposition X_a , Y_a , Z_a liegt, basierend auf den gemessenen tatsächlichen Fehlerdaten:

einen Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der X-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

Geradheitsfehler im Vorschubmechanismus der X-Achse, im Vorschubmechanismus der Y-Achse und im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse; und

Rechtwinkligkeitsfehler zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse, dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und dem Vorschubmechanismus der Z-Achse; und

Ableiten des relativen Bewegungsfehlers zwischen der Spindel und dem Tisch im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems basierend auf den abgeleiteten Fehlerdaten.

[0024] In der vorliegenden Erfindung werden der X-Achsen-Vorschubmechanismus, der Y-Achsen-Vorschubmechanismus und der Z-Achsen-Vorschubmechanismus in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems betrieben, das in Bezug auf einen Maschinennullpunkt X_0 , Y_0 , Z_0 bzw. für den X-Achsen-Vorschubmechanismus, den Y-Achsen-Vorschubmechanismus und den Z-Achsen-Vorschubmechanismus festgelegt ist, und ein Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung, ein Positionierungsfehler in Y-Achsenrichtung, ein Positionierungsfehler in Z-Achsenrichtung, Geradheitsfehler in der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse, Winkelfehler um die X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse in der X-Achse, Winkelfehler um die X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse in der Y-Achse, Winkelfehler um die X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse in der Z-Achse und Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse werden in Bezug auf eine beliebige Koordinatenposition im Maschinenkoordinatensystem gemessen.

[0025] Der Positionierfehler in X-Achsenrichtung, der Positionierfehler in Y-Achsenrichtung, der Positionierfehler in Z-Achsenrichtung, die Geradheitsfehler in der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse, die Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der X-Achse, die Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Y-Achse sowie die Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Z-Achse können beispielsweise gemäß den Vorschriften von JIS B 6190-2, JIS B 6336-1 und JIS B 6336-2 gemessen werden. Die Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse können beispielsweise mit Hilfe dem in der oben aufgeführten Nicht-Patentliteratur 1 offenbarten Doppelkugelstangen-Verfahren gemessen werden.

[0026] Basierend auf den gemessenen aktuellen Fehlerdaten, einem Positionierfehler in X-Achsenrichtung in dem X-Achsen-Vorschubmechanismus, einem Positionierfehler in Y-Achsenrichtung in dem Y-Achsen-Vorschubmechanismus, einem Positionierfehler in Z-Achsenrichtung in dem Z-Achsen-Vorschubmechanismus, Geradheitsfehlern in dem X-Achsen-Vorschubmechanismus, dem Y-Achsen-Vorschubmechanismus und dem Z-Achsen-Vorschubmechanismus, Winkelfehlern um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in dem X-Achsen-Vorschubmechanismus, Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in dem Y-Achsen-Vorschubmechanismus, Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in dem Z-Achsen-Vorschubmechanismus und Rechtwinkligkeitsfehler zwischen dem X-Achsen-Vorschubmechanismus, dem Y-Achsen-Vorschubmechanismus und dem Z-Achsen-Vorschubmechanismus in einem dreidimensionalen Raum eines festgelegten Koordinatensystems, dessen Ursprung an einer im Maschinenkoordinatensystem voreingestellten Referenzposition X_a , Y_a , Z_a liegt, werden abgeleitet.

[0027] Anschließend wird basierend auf den abgeleiteten Fehlerdaten ein relativer Bewegungsfehler zwischen der Spindel und dem Tisch, d.h. ein Positionierungsfehler der Spindel gegenüber dem Tisch, im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems abgeleitet.

[0028] Wie vorstehend beschrieben, werden in der vorliegenden Erfindung Fehlerdaten, die sich auf den X-Achsen-Vorschubmechanismus, den Y-Achsen-Vorschubmechanismus und den Z-Achsen-Vorschubmechanismus im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems beziehen, das seinen Ursprung an der im Maschinenkoordinatensystem voreingestellten Referenzposition X_a , Y_a , Z_a hat, basierend auf gemessenen tatsächlichen Fehlerdaten abgeleitet, die mit einem vorhandenen, häufig verwendeten Messverfahren gemessen werden, und ein Bewegungsfehler der Werkzeugmaschine im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems wird basierend auf den abgeleiteten Fehlerdaten abgeleitet. Es sei darauf hingewiesen, dass die Referenzposition X_a , Y_a , Z_a an jeder beliebigen Position eingestellt werden kann, z.B. am Maschinennullpunkt X_0 , Y_0 , Z_0 .

[0029] Dementsprechend kann mit der vorliegenden Erfindung ein Bewegungsfehler einer Werkzeugmaschine in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems anhand von tatsächlichen Fehlerdaten identifiziert werden, die mit einem bestehenden, gebräuchlichen Messverfahren gemessen werden, das kein teures Laserlängenmessgerät verwendet, wie vorstehend erwähnt, und das im Betrieb einfacher durchgeführt werden kann als eine Messung mit einem solchen Laserlängenmessgerät. Dementsprechend kann die Identifizierung des Bewegungsfehlers kostengünstig und einfach im Betrieb durchgeführt werden.

[0030] Weiterhin kann die Identifizierung des Bewegungsfehlers in einem vorgegebenen Koordinatensystem, dessen Referenzposition X_a , Y_a , Z_a an einer beliebigen Position eingestellt ist, den Freiheitsgrad der Verwendung der Fehlerdaten erhöhen.

[0031] ES sei darauf hingewiesen, dass sich die abgeleiteten Fehlerdaten auf eine Spindelmittelposition an einem vorderen Ende der Spindel beziehen können. Mit dieser Konfiguration kann ein variables Element, wie z.B. das Vorstehen einer Messvorrichtung, bei der Messung der tatsächlichen Fehler aufgehoben werden.

[0032] Weiterhin kann sich der relative Bewegungsfehler zwischen der Spindel und dem Tisch im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems auf eine Spitze eines Werkzeugs beziehen, das an der Spindel befestigt werden soll. Die Verwendung eines mit dieser Konfiguration erhaltenen Bewegungsfehlers ermöglicht eine geeignete Bewegungsfehlerkompensation, die mit der tatsächlichen Bearbeitung mit dem Werkzeug übereinstimmt.

Vorteilhafte Effekte der Erfindung

[0033] Wie vorstehend beschrieben, kann mit der vorliegenden Erfindung ein Bewegungsfehler einer Werkzeugmaschine in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems anhand gemessener tatsächlicher Fehlerdaten identifiziert werden, die mit einem bestehenden, gebräuchlichen Messverfahren gemessen werden, das kein teures Laserlängenmessgerät verwendet, wie vorstehend erwähnt, und das im Betrieb einfacher durchgeführt werden kann als eine Messung mit einem solchen Laserlängenmessgerät. Dementsprechend kann die Identifizierung des Bewegungsfehlers kostengünstig und einfach im Betrieb durchgeführt werden.

Figurenliste

Fig. 1 ist eine Darstellung zur Beschreibung eines Bewegungsfehler-Identifikationsverfahrens gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 ist eine Darstellung zur Beschreibung des Bewegungsfehler-Identifikationsverfahrens gemäß der Ausführungsform;

Fig. 3 ist eine Darstellung der Ergebnisse der Messung einer Rechtwinkligkeit zwischen einem X-Achsen-Vorschubmechanismus und einem Y-Achsen-Vorschubmechanismus in einer **X-Y**-Ebene unter Verwendung einer Doppelkugelstange;

Fig. 4 ist eine Darstellung, die Fehlerparameter zeigt, die einen Bewegungsfehler verursachen; und

Fig. 5 ist eine Darstellung zur Beschreibung eines herkömmlichen Verfahrens zur Identifizierung eines Bewegungsfehlers.

Beschreibung der Ausführungsformen

[0034] Nachstehend wird eine spezifische Ausführungsform der vorliegenden Erfindung unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben.

[0035] In dieser Ausführungsform wird ein Verfahren zum Identifizieren eines Bewegungsfehlers eines horizontalen Bearbeitungszentrums **1**, wie in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellt, beschrieben. ES sei darauf hingewiesen, dass das Bearbeitungszentrum **1** ein Bett **2** mit einer T-Form in der Draufsicht, eine auf dem Bett **2** angeordnete Säule **3**, die in Richtung einer X-Achse beweglich ist, einen von der Säule **3** gehaltenen Spindelkopf **4**, der in Richtung einer Y-Achse beweglich ist, eine vom Spindelkopf **4** drehbar gelagerte Spindel **5** und einen auf dem Bett **2** angeordneten Tisch **6**, so dass er entlang einer Z-Achse beweglich ist, beinhaltet.

[0036] Die Säule **3** wird durch einen X-Achsenvorschubmechanismus (nicht dargestellt) in X-Achsenrichtung bewegt, der Spindelkopf **4** wird durch einen Y-Achsenvorschubmechanismus (nicht dargestellt) in Y-Achsenrichtung bewegt, und der Tisch **6** wird durch einen Z-Achsenvorschubmechanismus (nicht dargestellt) in Z-Achsenrichtung bewegt. Somit bewirken der X-Achsen-Vorschubmechanismus, der Y-Achsen-Vorschubmechanismus und der Z-Achsen-Vorschubmechanismus, dass sich die Spindel **5** und der Tisch **6** relativ zueinander in einem dreidimensionalen Raum bewegen, der durch die drei orthogonalen Achsen, d.h. die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse, gebildet wird.

Gleichungen zur Berechnung von Bewegungsfehlern

[0037] Hinsichtlich des so konfigurierten Bearbeitungszentrum **1** ist bekannt, dass ein Bewegungsfehler (Positionierfehler) einer Frontend-Mittelposition (Referenzpunkt) der Spindel **5** in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems durch die folgenden Gleichungen berechnet werden kann. Es sei darauf hingewiesen, dass α , β , and γ jeweils Befehlswerte für die X-Koordinate, die Y-Koordinate und die Z-Koordinate sind, $E_X(\alpha, \beta, \gamma)$ ein Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung ist, $E_Y(\alpha, \beta, \gamma)$ ein Positionierungsfehler in Y-Achsenrichtung ist und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma)$ ein Positionierungsfehler in Z-Achsenrichtung ist.

$$E_X(\alpha, \beta, \gamma) = E_{XX}(\alpha) + E_{XY}(\beta) + E_{XZ}(\gamma) - (E_{CX}(\alpha) + E_{CZ}(\gamma) + C_0 Y) \times \beta \quad (\text{Gleichung 1})$$

$$E_Y(\alpha, \beta, \gamma) = E_{YX}(\alpha) + E_{YY}(\beta) + E_{YZ}(\gamma) + E_{CZ}(\gamma) \times \alpha \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$E_Z(\alpha, \beta, \gamma) = E_{ZX}(\alpha) + E_{ZY}(\beta) + E_{ZZ}(\gamma) + (E_{AX}(\alpha) + E_{AZ}(\gamma) + A_0 Y) \times \beta - (E_{BZ}(\gamma) + B_0 X) \times \alpha \quad (\text{Gleichung 3})$$

[0038] Es sei darauf hingewiesen, dass die Fehlerparameter in den obigen Gleichungen wie folgt definiert sind:

E_{XX} ist ein Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{YY} ist ein Positionierungsfehler in Richtung der Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{ZZ} ist ein Positionierungsfehler in Z-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{YX} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Y-Achse) in einer **X-Y**-Ebene im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{ZX} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Z-Achse) in einer **X-Z**-Ebene im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{XY} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der X-Achse) in einer **Y-X**-Ebene im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{ZY} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Z-Achse) in einer **Y-Z**-Ebene im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{XZ} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der X-Achse) in einer **Z-X**-Ebene im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{YZ} ist ein Geradheitsfehler (in Richtung der Y-Achse) in einer **Z-Y**-Ebene im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{AX} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{AY} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{AZ} ist ein Winkelfehler um die X-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{BX} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{BY} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{BZ} ist ein Winkelfehler um die Y-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

E_{CX} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

E_{CY} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

E_{CZ} ist ein Winkelfehler um die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

A_0Y ist ein Winkelfehler um die X-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und einer idealen Y-Achse;

B_0X ist ein Winkelfehler um die Y-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und einer idealen X-Achse; und

C_0Y ist ein Winkelfehler um die Z-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen Y-Achse.

[0039] Es sei darauf hingewiesen, dass andere denkbare Fehlerparameter wie folgt sind:

ein Winkelfehler A_0Z um die X-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Z-Achse und einer idealen Z-Achse;

ein Winkelfehler B_0Z um die Y-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Z-Achse und der idealen Z-Achse; und

ein Winkelfehler C_0X um die Z-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und der idealen X-Achse.

[0040] Weiterhin kann ein Positionierfehler eines an der Spindel **5** angebrachten Werkzeugs durch die folgenden Gleichungen berechnet werden. Es sei darauf hingewiesen, dass TX , TY , TZ eine Abweichung in X-Achsenrichtung, eine Abweichung in Y-Achsenrichtung und eine Abweichung in Z-Achsenrichtung einer Werkzeugspitze in Bezug auf die Frontend-Mittenposition (Referenzpunkt) der Spindel **5** sind.

$$E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{XX}(\alpha) + E_{XY}(\beta) + E_{XZ}(\gamma) - (E_{CX}(\alpha) + E_{CZ}(\gamma) + C_0Y) \times \beta + (E_{BX}(\alpha) + E_{BY}(\beta) + E_{BZ}(\gamma)) \times T_Z - (E_{CX}(\alpha) + E_{CY}(\beta) + E_{CZ}(\gamma)) \times T_Y \quad (\text{Gleichung 4})$$

$$E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{YX}(\alpha) + E_{YY}(\beta) + E_{YZ}(\gamma) + E_{CZ}(\gamma) \times \alpha + (E_{CX}(\alpha) + E_{CY}(\beta) + E_{CZ}(\gamma)) \times T_X - (E_{AX}(\alpha) + E_{AY}(\beta) + E_{AZ}(\gamma)) \times T_Z \quad (\text{Gleichung 5})$$

$$E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{ZX}(\alpha) + E_{ZY}(\beta) + E_{ZZ}(\gamma) + (E_{AX}(\alpha) + E_{AZ}(\gamma) + A_0Y) \times \beta - (E_{BZ}(\gamma) + B_0X) \times \alpha + (E_{AX}(\alpha) + E_{AY}(\beta) + E_{AZ}(\gamma)) \times T_Y - (E_{BX}(\alpha) + E_{BY}(\beta) + E_{BZ}(\gamma)) \times T_X \quad (\text{Gleichung 6})$$

[0041] Weiterhin können die folgenden Gleichungen die Positionierungsfehler in einem festgelegten Koordinatensystem berechnen, dessen Ursprung an einer Position X_a , Y_a , Z_a liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist.

$$E_X(\alpha, \beta, \gamma) = E_{XX}(\alpha) + E_{XY}(\beta) + E_{XZ}(\gamma) - (E_{CX}(\alpha) + E_{CZ}(\gamma) + C_0Y) \times (\beta - Y_a) \quad (\text{Gleichung 7})$$

$$E_Y(\alpha, \beta, \gamma) = E_{YX}(\alpha) + E_{YY}(\beta) + E_{YZ}(\gamma) + (E_{CZ}(\gamma) \times (\alpha - X_a)) \quad (\text{Gleichung 8})$$

$$E_Z(\alpha, \beta, \gamma) = E_{ZX}(\alpha) + E_{ZY}(\beta) + E_{ZZ}(\gamma) + (E_{AX}(\alpha) + E_{AZ}(\gamma) + A_0 Y) \times (\beta - Y_a) - (E_{BZ}(\gamma) + B_0 X) \times (\alpha - X_a)$$

(Gleichung 9)

$$E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{XX}(\alpha) + E_{XY}(\beta) + E_{XZ}(\gamma) - (E_{CX}(\alpha) + E_{CZ}(\gamma) + C_0 Y) \times \beta + (E_{BX}(\alpha) + E_{BY}(\beta) + E_{BZ}(\gamma)) \times T_Z - (E_{CX}(\alpha) + E_{CY}(\beta) + E_{CZ}(\gamma)) \times T_Y$$

(Gleichung 10)

$$E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{YX}(\alpha) + E_{YY}(\beta) + E_{YZ}(\gamma) + E_{CZ}(\gamma) \times (\alpha - X_a) + (E_{CX}(\alpha) + E_{CY}(\beta) + E_{CZ}(\gamma)) \times T_X - (E_{AX}(\alpha) + E_{AY}(\beta) + E_{AZ}(\gamma)) \times T_Z$$

(Gleichung 11)

$$E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z) = E_{ZX}(\alpha) + E_{ZY}(\beta) + E_{ZZ}(\gamma) + (E_{AX}(\alpha) + E_{AZ}(\gamma) + A_0 Y) \times (\beta - Y_a) - (E_{BZ}(\gamma) + B_0 X) \times (\alpha - X_a) + (E_{AX}(\alpha) + E_{AY}(\beta) + E_{AZ}(\gamma)) \times T_Y - (E_{BX}(\alpha) + E_{BY}(\beta) + E_{BZ}(\gamma)) \times T_X$$

(Gleichung 12)

Bewegungsfehlermessung

[0042] In dieser Ausführungsform werden zunächst Fehler für die folgenden Positionen gemäß JIS B 6190-2 und JIS B 6336-1 gemessen. Es sei darauf hingewiesen, dass in der folgenden Beschreibung **X**, **Y** und **Z**, die eine Position darstellen, die Position der Front-End-Mitte (Referenzpunkt) der Spindel **5** im Maschinenkoordinatensystem darstellen, wobei **X**, **Y** und **Z** die Position des Referenzpunktes in Bezug auf einen Maschinennullpunkt im X-Achsenvorschubmechanismus, im Y-Achsenvorschubmechanismus und im Z-Achsenvorschubmechanismus darstellen.

[X-Achse]

[0043] Der Vorschubmechanismus der X-Achse (nicht dargestellt) wird betätigt und der Referenzpunkt in vorgegebenen Neigungsintervallen sequentiell auf die Befehlspositionen **X**₁, **X**₂,... und **X**_n gefahren, wobei Fehler **M**¹(**X**_k) bis **M**⁶(**X**_k) für die untenstehenden Messpunkte **I**₁ bis **I**₆ gemessen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass k eine ganze Zahl von 1 bis n ist. Es sei weiter darauf hingewiesen, dass die Befehlspositionen im Vorschubmechanismus der Y-Achse (nicht dargestellt) und im Vorschubmechanismus der Z-Achse (nicht dargestellt) während der Messung jedes Messelements jeweils beliebige Positionen **Y**^m und **Z**^m sind, m entsprechend dem Suffix des Messelements.

I₁: es wird ein Positionierungsfehler der X-Achse **M**¹(**X**_k) gemessen (JIS B 6190-2).

I₂: ein Geradheitsfehler der X-Achse **M**²(**X**_k) wird gemessen (in Richtung der Y-Achse) (JIS B 6336-1).

I₃: ein Geradheitsfehler der X-Achse **M**³(**X**_k) wird gemessen (in Richtung der Z-Achse) (JIS B 6336-1).

I₄: es wird ein Winkelfehler der X-Achse **M**⁴(**X**_k) gemessen (um die X-Achse) (JIS B 6336-1).

I₅: Es wird ein Winkelfehler der X-Achse **M**⁵(**X**_k) gemessen (um die Y-Achse) (JIS B 6336-1).

I₆: es wird ein Winkelfehler der X-Achse **M**⁶(**X**_k) gemessen (um die Z-Achse) (JIS B 6336-1).

[Y -Achse]

[0044] Der Vorschubmechanismus der Y-Achse (nicht dargestellt) wird betätigt und der Referenzpunkt wird anschließend in vorgegebenen Neigungsintervallen auf die Befehlspositionen **Y**₁, **Y**₂,... und **Y**_n verfahren, wobei Fehler **M**⁷(**Y**_k) bis **M**¹²(**Y**_k) für die folgenden Messpunkte **I**₇ bis **I**₁₂ gemessen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass k eine ganze Zahl von 1 bis n ist. Es sei weiter darauf hingewiesen, dass die Befehlspositionen im Vorschubmechanismus der X-Achse (nicht dargestellt) und im Vorschubmechanismus der Z-Achse (nicht dargestellt) während der Messung jedes Messelements jeweils beliebige Positionen **X**^m und **Z**^m sind, m entsprechend dem Suffix des Messelements.

I_7 : Es wird ein Positionierungsfehler der Y-Achse $M^{17}(\mathbf{Y}_k)$ gemessen (JIS B 6190-2).

I_8 : Es wird ein Geradheitsfehler der Y-Achse $M^{18}(\mathbf{Y}_k)$ gemessen (in Richtung der X-Achse) (JIS B 6336-1).

I_9 : ein Geradheitsfehler der Y-Achse $M^{19}(\mathbf{Y}_k)$ wird gemessen (in Richtung der Z-Achse) (JIS B 6336-1).

I_{10} : Es wird ein Winkelfehler der Y-Achse $M^{110}(\mathbf{Y}_k)$ gemessen (um die X-Achse) (JIS B 6336-1).

I_{11} : Es wird ein Winkelfehler der Y-Achse $M^{111}(\mathbf{Y}_k)$ gemessen (um die Y-Achse) (JIS B 6336-1).

I_{12} : Es wird ein Winkelfehler der Y-Achse $M^{112}(\mathbf{Y}_k)$ gemessen (um die Z-Achse) (JIS B 6336-1).

[Z-Achse]

[0045] Der Vorschubmechanismus der Z-Achse (nicht dargestellt) wird betätigt und der Referenzpunkt wird in vorgegebenen Neigungsintervallen sequentiell auf die Befehlspositionen $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2, \dots$ und \mathbf{Z}_n verfahren, wobei Fehler $M^{113}(\mathbf{Z}_k)$ bis $M^{118}(\mathbf{Z}_k)$ für die untenstehenden Messgrößen I_{13} bis I_{18} gemessen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass k eine ganze Zahl von 1 bis n ist. Es sei weiter darauf hingewiesen, dass die Befehlspositionen im Vorschubmechanismus der X-Achse (nicht dargestellt) und im Vorschubmechanismus der Y-Achse (nicht dargestellt) während der Messung jedes Messobjekts jeweils beliebige Positionen \mathbf{X}^{lm} und \mathbf{Y}^{lm} sind, m entsprechend dem Suffix des Messobjekts.

I_{13} : Es wird ein Positionierungsfehler der Z-Achse $M^{113}(\mathbf{Z}_k)$ gemessen (JIS B 6190-2);

I_{14} : Es wird ein Geradheitsfehler der Z-Achse $M^{114}(\mathbf{Z}_k)$ gemessen (in X-Achsenrichtung) (JIS B 6336-1);

I_{15} : Es wird ein Geradheitsfehler der Z-Achse $M^{115}(\mathbf{Z}_k)$ gemessen (in Richtung der Y-Achse) (JIS B 6336-1);

I_{16} : Es wird ein Winkelfehler der Z-Achse $M^{116}(\mathbf{Z}_k)$ gemessen (um die X-Achse) (JIS B 6336-1);

I_{17} : ein Winkelfehler der Z-Achse $M^{117}(\mathbf{Z}_k)$ wird gemessen (um die Y-Achse) (JIS B 6336-1); und

I_{18} : Es wird ein Winkelfehler der Z-Achse $M^{118}(\mathbf{Z}_k)$ gemessen (um die Z-Achse) (JIS B 6336-1).

[Rechtwinkligkeit]

[0046] Die Messung erfolgt mit einer Doppelkugelstange gemäß der Nicht-Patentliteratur **1**, wobei die Mittel- lage der tischseitigen Kugel auf eine beliebige Position $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ eingestellt ist, der Referenzpunkt der Spindel **5** mit der Länge der Stange als Drehradius in einer X-Y-Ebene kreisförmig bewegt wird, in einer X-Z-Ebene und in einer Y-Z-Ebene, und die Längen M_{Aij} (in der Y-Z-Ebene), M_{Bij} (in der X-Z-Ebene) und M_{Cij} (in der X-Y-Ebene) der Stange werden basierend auf dem Betrag der Expansion/Kontraktion der Stange gemessen. M_{Aij} ist eine Länge der Stange an einer Position Y_{Aij}, Z_{Aij} in der Kreisbewegung des Referenzpunktes der Spindel **5** in der Y-Z-Ebene, die mit \mathbf{X}_i fest definiert ist, M_{Bij} ist eine Länge der Stange an einer Position X_{Bij}, Z_{Bij} in der Kreisbewegung des Referenzpunktes der Spindel **5** in der X-Z-Ebene, die mit \mathbf{Y}_i fest definiert ist, und M_{Cij} ist eine Länge der Stange an einer Position X_{Cij}, Y_{Cij} in der Kreisbewegung des Referenzpunktes der Spindel **5** in der X-Y-Ebene, die mit \mathbf{Z}_i fest definiert ist. ES sei darauf hingewiesen, dass i eine ganze Zahl von 1 bis g ist und die Anzahl der Messungen der Rechtwinkligkeit bedeutet, und j eine ganze Zahl von 1 bis h ist und eine Abtastnummer der Position der Spindel **5** bedeutet.

[0047] Fig. 3 zeigt ein Beispiel für Messdaten (Betrag der Ausdehnung/Kontraktion der Stange), die durch Messung der Rechtwinkligkeit zwischen dem X-Achsen-Vorschubmechanismus und dem Y-Achsen-Vorschubmechanismus in der X-Y-Ebene mit einer Doppelkugelstange erhalten wurden. In Fig. 3 stellt eine der beiden Darstellungen der durchgezogenen Linie Messdaten für die normale Drehung des Referenzpunktes der Spindel **5** und die andere Messdaten für die Rückwärtsdrehung des Referenzpunktes der Spindel **5** dar. Weiterhin stellt der fettgedruckte, gestrichelte und gestrichelte Linienkreis einen Referenzkreis und die dünnen, gestrichelten und gestrichelten Linienkreise Teilungen d.h. Abstufungen dar.

[0048] Basierend auf den erhaltenen Messwerten M_{Aij}, M_{Bij} und M_{Cij} werden die Rechtwinkligkeiten $\mathbf{P}_{Ai}, \mathbf{P}_{Bi}$ und \mathbf{P}_{Ci} sowie die Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y_i, B_0X_i und C_0Y_i für den X-Achsenvorschubmechanismus, den Y-Achsenvorschubmechanismus und den Z-Achsenvorschubmechanismus berechnet, wenn die Mittelstellung der tischseitigen Kugel an der Position $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_i$ positioniert ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass:

P_{Ai} ist eine Rechtwinkligkeit zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen Z-Achse;

P_{Bi} ist eine Rechtwinkligkeit zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und der idealen Z-Achse;

P_{Ci} ist eine Rechtwinkligkeit zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen X-Achse;

A_0Y_i ist ein Winkelfehler um die X-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen Y-Achse;

B_0X_i ist ein Winkelfehler um die Y-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der X-Achse und der idealen X-Achse; und

C_0Y_i ist ein Winkelfehler um die Z-Achse zwischen dem Vorschubmechanismus der Y-Achse und der idealen Y-Achse.

[0049] Es sei darauf hingewiesen, dass die Rechtwinkligkeiten P_{Ai} , P_{Bi} und P_{Ci} jeweils als Funktionen der Messwerte M_{Aij} , M_{Bij} und M_{Cij} wie folgt dargestellt werden:

$$f_A(M_{Ai}) = P_{Ai};$$

$$f_B(M_{Bi}) = P_{Bi};$$

und

$$f_C(M_{Ci}) = P_{Ci};$$

wobei M_{Ai} Gesamtdaten des Messwertes M_{Aij} von $j=1$ bis $j=h$, M_{Bi} Gesamtdaten des Messwertes M_{Bij} von $j=1$ bis $j=h$ und M_{Ci} Gesamtdaten des Messwertes M_{Cij} von $j=1$ bis $j=h$ sind.

Identifizierung von Fehlerparametern des X-Achsenvorschubsmechanismus, des
Y-Achsenvorschubsmechanismus und des Z-Achsenvorschubsmechanismus

[0050] Anschließend werden die oben genannten Fehlerparameter E_{XX} , E_{YY} , E_{ZZ} , E_{YX} , E_{ZX} , E_{XY} , E_{ZY} , E_{XZ} , E_{YZ} , E_{AX} , E_{AY} , E_{AZ} , E_{BX} , E_{BY} , E_{BZ} , E_{CX} , E_{CY} , and E_{CZ} in dem Vorschubmechanismus der X-Achse, dem Vorschubmechanismus der Y-Achse, verwendet, und dem Vorschubmechanismus der Z-Achse basierend auf den Fehlerdaten $M^{11}(X_k)$ bis $M^{16}(X_k)$, $M^{17}(Y_k)$ bis $M^{112}(Y_k)$ und $M^{113}(Z_k)$ bis $M^{118}(Z_k)$, gemessen in der oben beschriebenen Weise, identifiziert.

[0051] Als Beispiel wird der Geradheitsfehler der X-Achse $M^{13}(X_k)$ (in Richtung der Z-Achse) untersucht. Wie in den **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellt, wird der Geradheitsfehler $M^{13}(X_k)$ mit einer Anzeige (z.B. einer Messuhr) gemessen, die aus den Befehlspositionen in der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse herausragt; daher wird der Vorsprung als ein Fehlerfaktor betrachtet. Da die Soll- bzw. Befehlswerte Y^{13} und Z^{13} in der Y-Achse und der Z-Achse, die von der X-Achse als Messziel verschieden sind, sowie die Vorsprungsgrößen L^{13X} , L^{13Y} und L^{13Z} des Indikators in den drei Richtungen fest sind, kann der Geradheitsfehler $M^{13}(X_k)$ durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$M^{13}(X_k) = E_Z \left(X_k, Y^{13}, Z^{13}, L^{13X}, L^{13Y}, L^{13Z} \right) + \text{Const}^{13}.$$

ES sei darauf hingewiesen, dass Const^{13} ein konstanter Term ist.

[0052] Wenn $E_Z(X_k, Y^{13}, Z^{13}, L_X, L_Y, L_Z)$ in der obigen Gleichung als Fehler im eingestellten Koordinatensystem erweitert wird, dessen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, wird die folgende Gleichung gemäß Gleichung 12 erhalten.

$$M^3(X_k) = E_{ZX}(X_k) + E_{ZY}(Y^{13}) + E_{ZZ}(Z^{13}) + (E_{AX}(X_k) + E_{AZ}(Z^{13}) + A_0 Y) \times (Y^{13} - Y_a) - \\ (E_{BZ}(Z^{13}) + B_0 X) \times (X_k - X_a) + (E_{AX}(X_k) + E_{AY}(Y^{13}) + E_{AZ}(Z^{13})) \times L^3_Y - \\ (E_{BX}(X_k) + E_{BY}(Y^{13}) + E_{BZ}(Z^{13})) \times L^3_X + \text{Const}^3$$

Weiterhin wird bei der Konsolidierung der konstanten Terme in Const^3 die folgende Gleichung erhalten.

$$M^3(X_k) = E_{ZX}(X_k) + E_{AX}(X_k) \times (Y^{13} - Y_a) + (E_{BZ}(Z^{13}) + B_0 X) \times X_k + E_{AX}(X_k) \times L^3_Y - E_{BX}(X_k) \times L^3_X \\ + \text{Const}^3$$

Wenn weiter

$$E'_{ZX}(X_k) = E_{ZX}(X_k) + (E_{BZ}(Z^{13}) + B_0 X) \times X_k$$

eingeführt wird, erhält man außerdem die folgende Gleichung:

$$M^3(X_k) = E'_{ZX}(X_k) + E_{AX}(X_k) \times (Y^{13} - Y_a) + E_{AX}(X_k) \times L^3_Y - E_{BX}(X_k) \times L^3_X + \text{Const}^3$$

Da $E'_{ZX}(X_k)$ als gleichwertig mit $E_{ZX}(X_k)$ angesehen werden kann, ergibt sich schließlich die folgende Gleichung:

$$M^3(X_k) = E_{ZX}(X_k) + E_{AX}(X_k) \times (Y^{13} - Y_a) + E_{AX}(X_k) \times L^3_Y - E_{BX}(X_k) \times L^3_X + \text{Const}^3$$

[0053] Somit kann der Geradheitsfehler der X-Achse $M^3(X_k)$ durch eine Gleichung dargestellt werden, die nicht die Rechtwinkligkeit ($B_0 X$) im Vorschubmechanismus der X-Achse und die Rechtwinkligkeit ($A_0 Y$) im Vorschubmechanismus der Y-Achse verwendet.

[0054] Weiterhin wird der Winkelfehler der X-Achse $M^6(X_k)$ um die Z-Achse untersucht. Da die Winkelfehler keine weiteren Fehlerfaktoren beinhalten, kann der Winkelfehler $M_{i6}(X_k)$ durch die folgende Gleichung dargestellt werden:

$$M^6(X_k) = E_{CX}(X_k) + \text{Const}^6.$$

Es sei darauf hingewiesen, dass Const^6 ein konstanter Term ist.

[0055] Auf der Grundlage der obigen Untersuchung können die oben genannten Fehler durch Gleichungen dargestellt werden, die die Rechtwinkligkeit ($B_0 X$) im Vorschubmechanismus der X-Achse, die Rechtwinkligkeit ($A_0 Y$) im Vorschubmechanismus der Y-Achse und die Rechtwinkligkeit ($C_0 Y$) im Vorschubmechanismus der Z-Achse nicht verwenden, wie folgt:

$$M^1(X_k) = E_{XX}(X_k) - E_{CX}(X_k) \times (Y^{11} - Y_a) + E_{BX}(X_k) \times L^1_Z - E_{CX}(X_k) \times L^1_Y + \text{Const}^1;$$

$$M^2(X_k) = E_{YX}(X_k) + E_{CX}(X_k) \times L^2_X - E_{AX}(X_k) \times L^2_Z + \text{Const}^2;$$

$$M^3(X_k) = E_{ZX}(X_k) + E_{AX}(X_k) \times (Y^{13} - Y_a) + E_{AX}(X_k) \times L^3_Y - E_{BX}(X_k) \times L^3_X + \text{Const}^3;$$

$$M^{14}(X_k) = E_{AX}(X_k) + \text{Const}^{14};$$

$$M^{15}(X_k) = E_{BX}(X_k) + \text{Const}^{15};$$

$$M^{16}(X_k) = E_{CX}(X_k) + \text{Const}^{16};$$

$$M^{17}(Y_k) = E_{YY}(Y_k) + E_{CY}(Y_k) \times L^17_X - E_{AY}(Y_k) \times L^17_Z + \text{Const}^{17};$$

$$M^{18}(Y_k) = E_{XY}(Y_k) + E_{BY}(Y_k) \times L^18_X - E_{CY}(Y_k) \times L^18_Y + \text{Const}^{18};$$

$$M^{19}(Y_k) = E_{ZY}(Y_k) + E_{AY}(Y_k) \times L^19_Y - E_{BYX}(Y_k) \times L^19_X + \text{Const}^{19};$$

$$M^{10}(Y_k) = E_{AY}(Y_k) + \text{Const}^{10};$$

$$M^{11}(Y_k) = E_{BY}(Y_k) + \text{Const}^{11};$$

$$M^{12}(Y_k) = E_{CY}(Y_k) + \text{Const}^{12};$$

$$M^{13}(Z_k) = E_{ZZ}(Z_k) + E_{AZ}(Z_k) \times (Y^{13} - Y_a) - E_{BZ}(Z_k) \times (X^{13} - X_a) + E_{AZ}(Z_k) \times L^{13}_Y - E_{BZ}(Z_k) \times L^{13}_X + \text{Const}^{13};$$

$$M^{14}(Z_k) = E_{XZ}(Z_k) - E_{CZ}(Z_k) \times (Y^{14} - Y_a) + E_{BZ}(Z_k) \times L^{14}_Z - E_{CZ}(Z_k) \times L^{14}_Y + \text{Const}^{14};$$

$$M^{15}(Z_k) = E_{YZ}(Z_k) + E_{CZ}(Z_k) \times (X^{15} - X_a) + E_{CZ}(Z_k) \times L^{15}_X - E_{AZ}(Z_k) \times L^{15}_Z + \text{Const}^{15};$$

$$M^{16}(Z_k) = E_{AZ}(Z_k) + \text{Const}^{16};$$

$$M^{17}(Z_k) = E_{BY}(Z_k) + \text{Const}^{17};$$

$$M^{18}(Z_k) = E_{CY}(Z_k) + \text{Const}^{18}.$$

[0056] Basierend auf diesen Gleichungen stellen sich die Fehlerparameter wie folgt dar:

$$E_{XX}(X_k) = M^{11}(X_k) + E_{CX}(X_k) \times (Y^{11} - Y_a) - E_{BX}(X_k) \times L^{11}_Z + E_{CX}(X_k) \times L^{11}_Y - \text{Const}^{11};$$

$$E_{YX}(X_k) = M^{12}(X_k) - E_{CX}(X_k) \times L^{12}_X + E_{AX}(X_k) \times L^{12}_Z - \text{Const}^{12};$$

$$E_{ZX}(X_k) = M^{13}(X_k) - E_{AX}(X_k) \times (Y^{13} - Y_a) - E_{AX}(X_k) \times L^{13}_Y + E_{BX}(X_k) \times L^{13}_X - \text{Const}^{13};$$

$$E_{AX}(X_k) = M^{l4}(X_k) - \text{Const}^{l4};$$

$$E_{BX}(X_k) = M^{l5}(X_k) - \text{Const}^{l5};$$

$$E_{CX}(X_k) = M^{l6}(X_k) - \text{Const}^{l6};$$

$$E_{YY}(Y_k) = M^{l7}(Y_k) - E_{CY}(Y_k) \times L^{l7}_X + E_{AY}(Y_k) \times L^{l7}_Z - \text{Const}^{l7};$$

$$E_{XY}(Y_k) = M^{l8}(Y_k) - E_{BY}(Y_k) \times L^{l8}_X + E_{CY}(Y_k) \times L^{l8}_Y - \text{Const}^{l8};$$

$$E_{ZY}(Y_k) = M^{l9}(Y_k) - E_{AY}(Y_k) \times L^{l9}_Y + E_{BY}(Y_k) \times L^{l9}_X - \text{Const}^{l9};$$

$$E_{AY}(Y_k) = M^{l10}(Y_k) - \text{Const}^{l10};$$

$$E_{BY}(Y_k) = M^{l11}(Y_k) - \text{Const}^{l11};$$

$$E_{CY}(Y_k) = M^{l12}(Y_k) - \text{Const}^{l12};$$

$$E_{ZZ}(Z_k) = M^{l13}(Z_k) - E_{AZ}(Z_k) \times (Y^{l13} - Y_a) + E_{BZ}(Z_k) \times (X^{l13} - X_a) - E_{AZ}(Z_k) \times L^{l13}_Y + E_{BZ}(Z_k) \times L^{l13}_X - \text{Const}^{l13};$$

$$E_{XZ}(Z_k) = M^{l14}(Z_k) + E_{CZ}(Z_k) \times (Y^{l14} - Y_a) - E_{BZ}(Z_k) \times L^{l14}_Z + E_{CZ}(Z_k) \times L^{l14}_Y - \text{Const}^{l12};$$

$$E_{YZ}(Z_k) = M^{l15}(Z_k) + E_{CZ}(Z_k) \times (X^{l15} - X_a) - E_{CZ}(Z_k) \times L^{l15}_X + E_{AZ}(Z_k) \times L^{l15}_Z - \text{Const}^{l15};$$

$$E_{AZ}(Z_k) = M^{l16}(Z_k) - \text{Const}^{l16};$$

$$E_{BY}(Z_k) = M^{l17}(Z_k) - \text{Const}^{l17};$$

$$E_{CY}(Z_k) = M^{l18}(Z_k) - \text{Const}^{l18}.$$

[0057] Somit können die Fehlerparameter in dem eingerichteten Koordinatensystem, das seinen Ursprung an der Position \mathbf{X}_a , \mathbf{Y}_a , \mathbf{Z}_a hat, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, durch die obigen Gleichungen identifiziert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass die konstanten Terme Const11 bis Const18 jeweils als Freiheitsgrad für die Änderung der Einstellung des Nullpunktes für den jeweiligen Fehler betrachtet werden können.

Identifizierung von Rechtwinkligkeitsfehlerparametern

[0058] Anschließend werden auf der Grundlage der oben beschriebenen Rechtwinkligkeitsmesswerte M_{Aij} , M_{Bij} und M_{Cij} die unten berechneten Rechtwinkligkeiten \mathbf{P}_{Ai} , \mathbf{P}_{Bi} und \mathbf{P}_{Ci} sowie die Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y_i , B_0X_i und C_0Y_i , die Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{A}_0\mathbf{Y}$, $\mathbf{B}_0\mathbf{X}$ und $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}$ im eingerichteten Koordinatensystem, deren Ursprung an der Position \mathbf{X}_a , \mathbf{Y}_a , \mathbf{Z}_a , die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, liegt, identifiziert.

[0059] Vor der Identifizierung der Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{A}_0\mathbf{Y}$, $\mathbf{B}_0\mathbf{X}$ und $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}$ wird die Berechnungsgrundlage für die Identifizierung beschrieben. Wie vorstehend beschrieben, werden die Rechtwinkligkeiten \mathbf{P}_{Ai} , \mathbf{P}_{Bi} und \mathbf{P}_{Ci} jeweils als Funktionen der Messwerte M_{Aij} , M_{Bij} und M_{Cij} wie folgt dargestellt:

$$f_A(E_{Aij}) = P_{Ai}; \quad (\text{Gleichung 13})$$

$$f_B(R_{Bij}) = P_{Bi}; \quad (\text{Gleichung 14})$$

und

$$f_C(R_{Cij}) = P_{Ci}; \quad (\text{Gleichung 15})$$

wobei \mathbf{M}_{Ai} die Gesamtdaten des Messwertes M_{Aij} , \mathbf{M}_{Bi} die Gesamtdaten des Messwertes M_{Bij} und \mathbf{M}_{Ci} die Gesamtdaten des Messwertes M_{Cij} sind.

[0060] Andererseits, wenn die Spindel **5** mit einer Doppelkugelstange kreisförmig bewegt wird, können die Positionierungsfehler der Spindel **5** in Bezug auf die Befehlswerte im eingestellten Koordinatensystem, das seinen Ursprung an der Position \mathbf{X}_a , \mathbf{Y}_a , \mathbf{Z}_a hat, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, durch die obigen Gleichungen 10 bis 12 berechnet werden. Wenn also die Position der tischseitigen Kugel im Maschinenkoordinatensystem durch X_i , Y_i , Z_i und die Position des Referenzpunkts der Spindel **5**, die kreisförmig in der X-Y-Ebene in Bezug auf die Position X_i , Y_i , Z_i bewegt wird, mit X_{ik} , Y_{ik} , Z_i dargestellt wird, kann die Länge S_{Cik} der Stange durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$S_{Cik} = \left((X_{ik} + E_{Xik} - X_i)^2 + (Y_{ik} + E_{Yik} - Y_i)^2 + (Z_i - E_{Zik} - Z_i)^2 \right)^{1/2}. \quad (\text{Gleichung 16})$$

Es sei darauf hingewiesen, dass E_{Xik} , E_{Yik} und E_{Zik} die Positionierungsfehler der Spindel **5** sind, die durch die obigen Gleichungen 10 bis 12 berechnet wurden. Die Berechnung der Positionierfehler der Spindel **5** erfolgt, wobei $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}$ in Gleichung 10 und $\mathbf{A}_0\mathbf{Y}$ und $\mathbf{B}_0\mathbf{X}$ in Gleichung 12 jeweils durch beliebige Werte $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}'$, $\mathbf{A}_0\mathbf{Y}'$ und $\mathbf{B}_0\mathbf{X}'$ ersetzt werden, die temporäre Werte sind.

$$E_{Xik} = E_X(X_{ik}, Y_{ik}, Z_i, t_X, t_Y, t_Z)$$

$$E_{Yik} = E_Y(X_{ik}, Y_{ik}, Z_i, t_X, t_Y, t_Z)$$

$$E_{Zik} = E_Z(X_{ik}, Y_{ik}, Z_i, t_X, t_Y, t_Z)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass t_X , t_Y und t_Z Abstände der Abweichung der spindelförmigen Kugel vom Referenzpunkt der Spindel **5** in X-Achsrichtung, Y-Achsrichtung und Z-Achsrichtung sind.

[0061] In Gleichung 16 oben sind E_{Xik} , E_{Yik} und E_{Zik} infinitesimale Werte; daher kann S_{Cik} durch die folgende Gleichung dargestellt werden, wenn die quadrierten Terme davon mit Null approximiert werden:

$$S_{Cik} = \left((X_{ik} - X_i)^2 + (Y_{ik} - Y_i)^2 + 2E_{Xik}(X_{ik} - X_i) + 2E_{Yik}(Y_{ik} - Y_i) \right)^{1/2}. \quad (\text{Gleichung 17})$$

[0062] Weiterhin, wenn die Gesamtdaten der Länge S_{Cik} des Stabs, die berechnet werden, mit \mathbf{S}_{Ci} dargestellt werden, kann eine aus \mathbf{S}_{Ci} berechnete Rechtwinkligkeit \mathbf{P}'_{Ci} durch die folgende relationale Gleichung dargestellt werden:

$$f(S_{Ci}) = P'_{Ci}. \quad (\text{Gleichung 18})$$

Wenn hier der temporäre Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}'$ gleich dem wahren Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}$ im eingestellten Koordinatensystem ist, dessen Ursprung an der Position $\mathbf{X}_a, \mathbf{Y}_a, \mathbf{Z}_a$ liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, gilt die folgende relationale Gleichung:

$$\mathbf{C}_0\mathbf{Y} - \mathbf{P}_{Ci} = \mathbf{C}_0\mathbf{Y}' - \mathbf{P}_{Ci}.$$

Wenn diese Gleichung transformiert wird, erhält man die folgende Gleichung:

$$\mathbf{C}_0\mathbf{Y} = \mathbf{C}_0\mathbf{Y}' - \mathbf{P}'_{Ci} + \mathbf{P}_{Ci}. \quad (\text{Gleichung 19})$$

[0063] Dementsprechend kann unter Verwendung der obigen Gleichung 19 der wahre Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}$ im eingestellten Koordinatensystem, dessen Ursprung an der Position $\mathbf{X}_a, \mathbf{Y}_a, \mathbf{Z}_a$, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, liegt, anhand des temporären Rechtwinkligkeitsfehlers $\mathbf{C}_0\mathbf{Y}'$, der durch Gleichung 15 berechneten Rechtwinkligkeit \mathbf{P}_{Ci} , und der durch Gleichung 18 berechneten Rechtwinkligkeit \mathbf{P}'_{Ci} identifiziert werden.

[0064] Hinsichtlich des Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{B}_0\mathbf{X}$, bei dem der Bezugspunkt der in der X-Z-Ebene kreisförmig bewegten Spindel **5** durch $\mathbf{X}_{ik}, \mathbf{Y}_i, \mathbf{Z}_{ik}$ dargestellt wird, ist in ähnlicher Weise die Länge S_{Bik} der Stange wie folgt:

$$S_{Bik} = \left((X_{ik} + E_{Xik} - X_i)^2 + (Y_i + E_{Yik} - Y_i)^2 + (Z_{ik} + E_{Zik} - Z_i)^2 \right)^{1/2}.$$

Wenn die quadratischen Terme von E_{Xik}, E_{Yik} und E_{Zik} , die infinitesimale Werte sind, mit Null approximiert werden, ist S_{Bik} wie folgt:

$$S_{Bik} = \left((X_{ik} - X_i)^2 + (Z_{ik} - Z_i)^2 + 2E_{Xik}(X_{ik} - X_i) + 2E_{Zik}(Z_{ik} - Z_i) \right)^{1/2}. \quad (\text{Gleichung 20})$$

[0065] Wenn die Gesamtdaten der Länge S_{Bik} der berechneten Stange durch \mathbf{S}_{Bi} dargestellt werden, kann eine aus \mathbf{S}_{Bi} berechnete Rechtwinkligkeit \mathbf{P}'_{Bi} durch die folgende relationale Gleichung dargestellt werden:

$$f(S_{Bi}) = \mathbf{P}'_{Bi}. \quad (\text{Gleichung 21})$$

[0066] Dementsprechend kann der wahre d.h. echte Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{B}_0\mathbf{X}$ im Koordinatensystem, das seinen Ursprung an der Position $\mathbf{X}_a, \mathbf{Y}_a, \mathbf{Z}_a$ hat, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, durch die folgende Gleichung 22 basierend auf dem temporären Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{B}_0\mathbf{X}'$, der durch die vorstehende Gleichung 14 berechneten Rechtwinkligkeit \mathbf{P}_{Bi} und der durch die vorstehende Gleichung 21 berechneten Rechtwinkligkeit \mathbf{P}'_{Bi} identifiziert werden.

$$\mathbf{B}_0\mathbf{X} = \mathbf{B}_0\mathbf{X}' - \mathbf{P}'_{Bi} + \mathbf{P}_{Bi} \quad (\text{Gleichung 22})$$

[0067] Weiterhin, was den Rechtwinkligkeitsfehler $\mathbf{A}_0\mathbf{Y}$ betrifft, wobei die Position der Spindel **5**, die kreisförmig in der Y-Z-Ebene bewegt wird, durch $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_{ik}, \mathbf{Z}_{ik}$ dargestellt wird, ist die Länge S_{Aik} der Stange wie folgt:

$$S_{Aik} = \left((X_i + E_{Xik} - X_i)^2 + (Y_{ik} + E_{Yik} - Y_i)^2 + (Z_{ik} + E_{Zik} - Z_i)^2 \right)^{1/2}.$$

wenn die quadratischen Terme von E_{Xik}, E_{Yik} und E_{Zik} , die infinitesimale Werte sind, mit Null approximiert werden, ist S_{Aik} wie folgt:

$$S_{Aik} = \left((Y_{ik} - Y_i)^2 + (Z_{ik} - Z_i)^2 + 2E_{Yik}(Y_{ik} - Y_i) + 2E_{Zik}(Z_{ik} - Z_i) \right)^{1/2}. \quad (\text{Gleichung 23})$$

[0068] Wenn Gesamtdaten der Länge S_{Aik} des berechneten Balkens durch S_{Ai} dargestellt werden, kann eine aus S_{Ai} berechnete Rechtwinkligkeit P'_{Ai} durch die folgende relationale Gleichung dargestellt werden:

$$f(S_{Ai}) = P'_{Ai} \quad (\text{Gleichung 24})$$

[0069] Dementsprechend kann der wahre Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y im Koordinatensystem, das seinen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a hat, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, durch die folgende Gleichung 25 basierend auf dem temporären Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y' , der durch die vorstehende Gleichung 13 berechneten Rechtwinkligkeit P_{Ai} und der durch die vorstehende Gleichung 24 berechneten Rechtwinkligkeit P'_{Ai} identifiziert werden.

$$A_0Y = A_0Y' - P'_{Ai} + P_{Ai} \quad (\text{Gleichung 25})$$

[0070] In der vorstehend beschriebenen Weise werden die Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y, B_0X und C_0Y im eingestellten Koordinatensystem identifiziert, das seinen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a hat, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist. Es sei darauf hingewiesen, dass für den Fall, dass die Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y, B_0X und C_0Y in dem in Bezug auf den Maschinennullpunkt definierten Maschinenkoordinatensystem identifiziert werden, die Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y, B_0X und C_0Y mit Werten von E_{Xik}, E_{Yik} und E_{Zik} identifiziert werden, die unter den folgenden Bedingungen berechnet werden: $X_a=0, Y_a=0$ und $Z_a=0$.

Identifizierung von Bewegungsfehlern

[0071] Basierend auf den in den oben beschriebenen Vorgehensweisen identifizierten Fehlerparametern werden die Positionierungsfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma), E_Y(\alpha, \beta, \gamma)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma)$ des Referenzpunktes der Spindel **5** im dreidimensionalen Raum des Maschinenkoordinatensystems durch die obigen Gleichungen 1 bis 3 identifiziert, und die Positionierfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z), E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ der Spitze des an der Spindel **5** im dreidimensionalen Raum des Maschinenkoordinatensystems befestigten Werkzeugs werden durch die obigen Gleichungen 4 bis 6 identifiziert.

[0072] Weiterhin werden die Positionierungsfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma), E_Y(\alpha, \beta, \gamma)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma)$ des Referenzpunktes der Spindel **5** im eingestellten Koordinatensystem, dessen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, durch die obigen Gleichungen 7 bis 9 identifiziert, und die Positionierungsfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z), E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ der Spitze des an der Spindel **5** befestigten Werkzeugs im eingestellten Koordinatensystem, dessen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, werden durch die obigen Gleichungen 10 bis 12 identifiziert.

[0073] Somit können in dieser Ausführungsform der Bewegungsfehler (Positionierfehler) $E_X(\alpha, \beta, \gamma), E_Y(\alpha, \beta, \gamma), E_Z(\alpha, \beta, \gamma)$ des Referenzpunktes der Spindel **5** und die Positionierfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z), E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ der Werkzeugspitze im eingestellten Koordinatensystem, dessen Ursprung an der Position X_a, Y_a, Z_a liegt, die eine beliebige Position im Maschinenkoordinatensystem ist, auf die oben beschriebene Weise berechnet werden. Weiterhin können die Bewegungsfehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma), E_Y(\alpha, \beta, \gamma), E_Z(\alpha, \beta, \gamma)$ und Fehler $E_X(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z), E_Y(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ und $E_Z(\alpha, \beta, \gamma, T_X, T_Y, T_Z)$ im Maschinenkoordinatensystem unter Verwendung der folgenden Bedingungen berechnet werden: $X_a=0, Y_a=0$ und $Z_a=0$.

[0074] Wie vorstehend beschrieben, können in dieser Ausführungsform die Bewegungsfehler des Referenzpunktes und die Bewegungsfehler der Werkzeugspitze im dreidimensionalen Raum des Maschinenkoordinatensystems und im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems, das seinen Ursprung an der beliebigen Referenzposition X_a, Y_a, Z_a hat, anhand von tatsächlichen Fehlerdaten identifiziert werden, die mit Hilfe der gebräuchlichen Messverfahren nach den Vorschriften des JIS gemessen werden. Somit kann die Identifikation der Bewegungsfehler kostengünstig und einfach im Betrieb durchgeführt werden.

[0075] Da außerdem die Bewegungsfehler im eingestellten Koordinatensystem, das seinen Ursprung an der beliebigen Referenzposition X_a, Y_a, Z_a haben, identifiziert werden können, wird der Freiheitsgrad der Verwendung der Fehlerdaten erhöht.

[0076] Hier wurde zuvor eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung beschrieben. Die vorliegende Erfindung ist jedoch nicht darauf beschränkt und kann in anderen Moden eingesetzt werden.

[0077] So entspricht beispielsweise die Messung der Fehler in der obigen Ausführungsform den Vorschriften des JIS; die Fehler können jedoch mit jedem anderen Verfahren gemessen werden, das in der Lage ist, die Fehler so genau und einfach wie oder genauer und einfacher als die Vorschriften des JIS zu messen.

[0078] Die obigen Gleichungen zur Berechnung der Fehlerparameter E_{XX} , E_{YY} , E_{ZZ} , E_{YX} , E_{ZX} , E_{XY} , E_{ZY} , E_{XZ} , E_{YZ} , E_{AX} , E_{AY} , E_{AZ} , E_{BX} , E_{BY} , E_{BZ} , E_{CX} , E_{CY} , and E_{CZ} sind nur als Beispiel dargestellt; die vorliegende Erfindung ist darauf nicht beschränkt und diese Fehlerparameter können durch andere Gleichungen berechnet werden. Die Identifizierung der Rechtwinkligkeitsfehler A_0Y , B_0X und C_0Y beschränkt sich auch nicht auf das vorstehende Beispiel, und diese Rechtwinkligkeitsfehler können mit Hilfe eines anderen Verfahrens identifiziert werden.

Bezugszeichenliste

- 1 Werkzeugmaschine 2 Bett
- 3 Säule
- 4 Spindelkopf
- 5 Spindel
- 6 Tisch

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- JP H8152909 [0002]

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- Yoshiaki Kakino, Yukitoshi Ihara und Yoshio Nakatsu: „A Study on the Motion Accuracy of NC Machine Tools (2nd Report)“, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 52/10/1986 pp. 73-79 [0016]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Identifizieren eines relativen Bewegungsfehlers zwischen einer Spindel zum Halten eines Werkzeugs und einem Tisch zum Befestigen eines Werkstücks darauf in einem dreidimensionalen Raum in einer Werkzeugmaschine,

wobei die Werkzeugmaschine die Spindel und den Tisch beinhaltet und einen Z-Achsenvorschubmechanismus, einen X-Achsenvorschubmechanismus und einen Y-Achsenvorschubmechanismus beinhaltet, die jeweils einer Z-Achse, einer X-Achse und einer Y-Achse als Referenzachsen entsprechen, wobei sich die Z-Achse entlang einer Achse der Spindel erstreckt, und wobei die X-Achse und die Y-Achse orthogonal zur Z-Achse und orthogonal zueinander sind,

wobei die Werkzeugmaschine so konfiguriert ist, dass die Spindel und der Tisch im dreidimensionalen Raum durch den X-Achsenvorschubmechanismus, den Y-Achsenvorschubmechanismus und den Z-Achsenvorschubmechanismus relativ zueinander bewegt werden, **dadurch gekennzeichnet**, dass:

das Verfahren umfasst:

Betreiben des X-Achsenvorschubmechanismus, des Y-Achsenvorschubmechanismus und des Z-Achsenvorschubmechanismus in einem dreidimensionalen Raum eines Maschinenkoordinatensystems, das in Bezug auf einen Maschinennullpunkt X_0 , Y_0 , Z_0 definiert ist, der jeweils für den X-Achsenvorschubmechanismus, den Y-Achsenvorschubmechanismus und den Z-Achsenvorschubmechanismus festgelegt ist, und Messen der folgenden Fehler in Bezug auf eine beliebige Koordinatenposition im Maschinenkoordinatensystem :

einen Positionierfehler in Richtung der X-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Y-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Z-Achse;

Geradheitsfehler in der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der X-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Y-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse in der Z-Achse; und

Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse; Ableiten der folgenden Fehler in einem dreidimensionalen Raum eines eingestellten Koordinatensystems, dessen Ursprung an einer im Maschinenkoordinatensystem voreingestellten Referenzposition X_a , Y_a , Z_a liegt, basierend auf den gemessenen tatsächlichen Fehlerdaten:

einen Positionierungsfehler in X-Achsenrichtung im Vorschubmechanismus der X-Achse;

einen Positionierungsfehler in Richtung der Y-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

einen Positionierfehler in Richtung der Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

Geradheitsfehler im Vorschubmechanismus der X-Achse, im Vorschubmechanismus der Y-Achse und im Vorschubmechanismus der Z-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der X-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Y-Achse;

Winkelfehler um die X-Achse, die Y-Achse und die Z-Achse im Vorschubmechanismus der Z-Achse; und

Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse; und

Ableiten des relativen Bewegungsfehlers zwischen der Spindel und dem Tisch im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems basierend auf den abgeleiteten Fehlerdaten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Messung der Rechtwinkligkeitsfehler zwischen der X-Achse, der Y-Achse und der Z-Achse mit einer Doppelkugelstange durchgeführt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei sich die abgeleiteten Fehlerdaten auf eine Spindelmittelposition an einem vorderen Ende der Spindel beziehen.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei sich der relative Bewegungsfehler zwischen der Spindel und dem Tisch im dreidimensionalen Raum des eingestellten Koordinatensystems auf eine Spitze eines an der Spindel zu befestigenden Werkzeugs bezieht.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

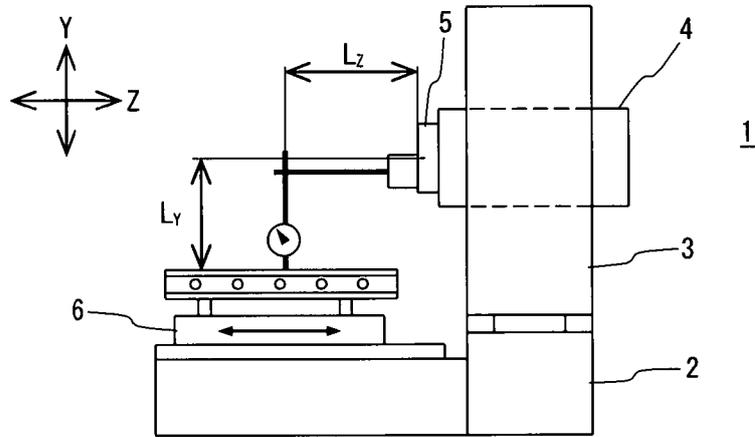


FIG. 1

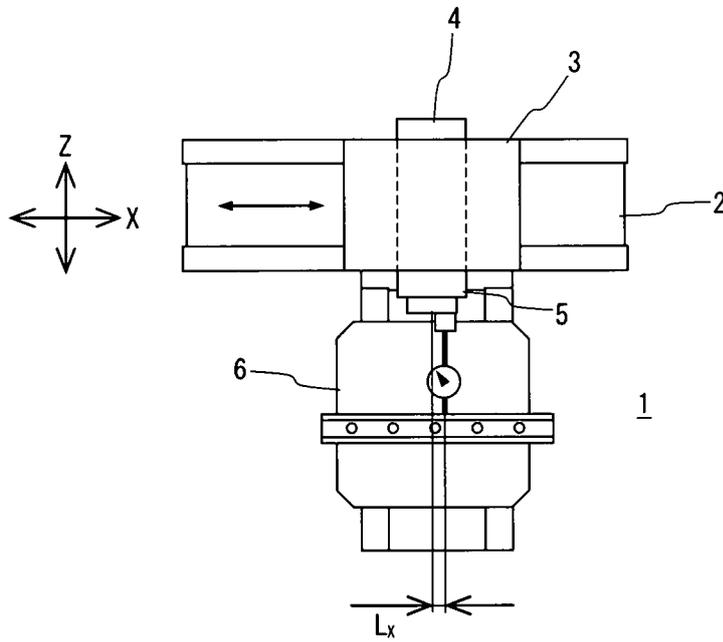


FIG. 2

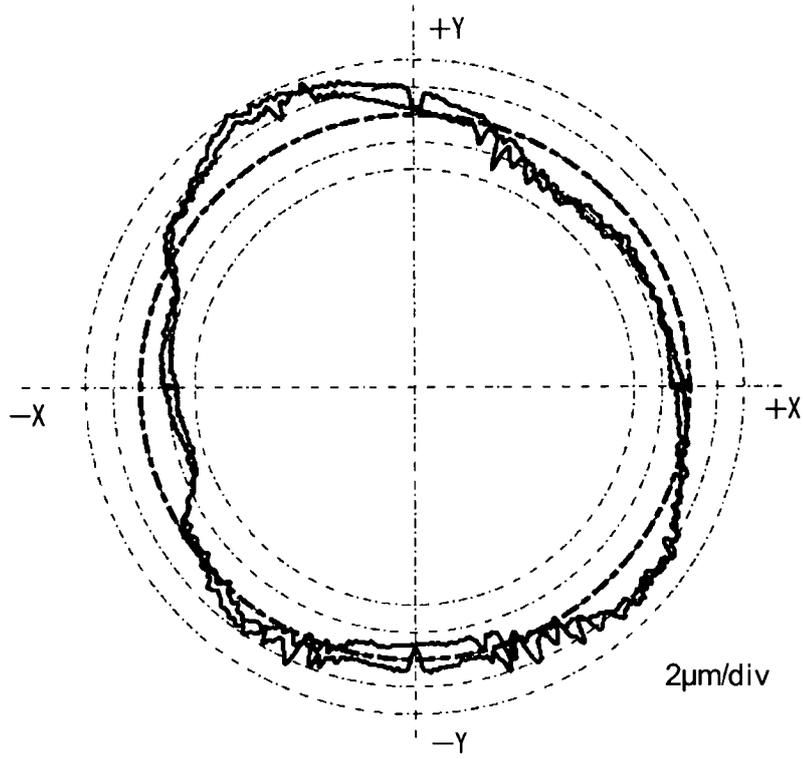


FIG. 3

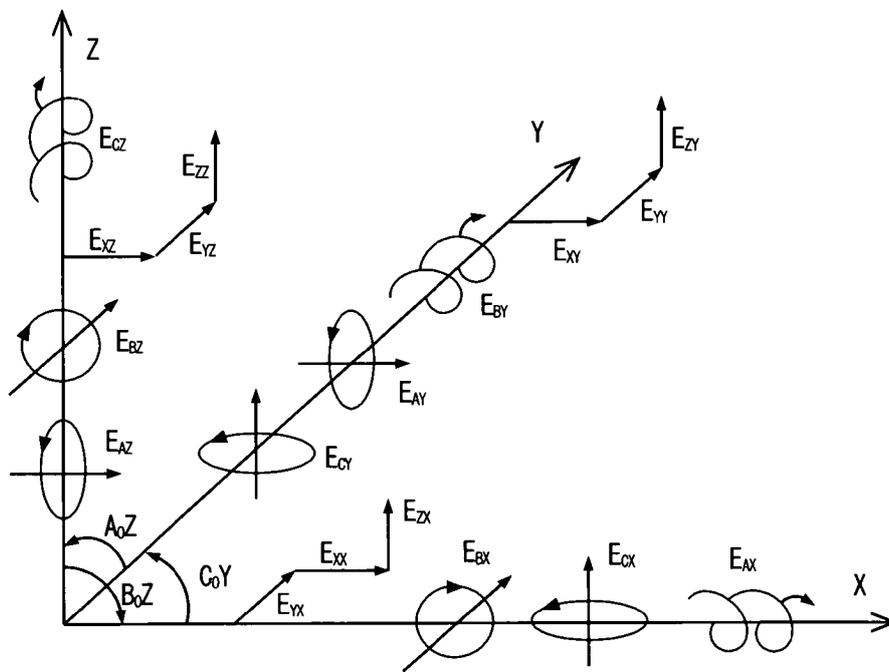


FIG. 4

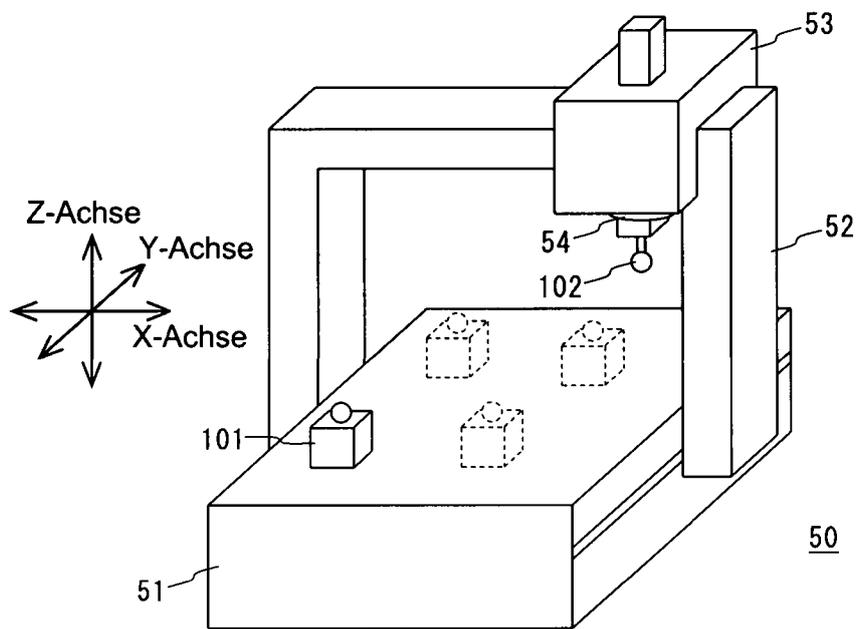


FIG. 5