

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4660779号  
(P4660779)

(45) 発行日 平成23年3月30日(2011.3.30)

(24) 登録日 平成23年1月14日(2011.1.14)

(51) Int.Cl.		F I	
<b>B 2 3 Q 17/00</b>	<b>(2006.01)</b>	B 2 3 Q 17/00	A
<b>B 2 3 Q 15/06</b>	<b>(2006.01)</b>	B 2 3 Q 15/06	
<b>B 2 3 Q 15/24</b>	<b>(2006.01)</b>	B 2 3 Q 15/24	
<b>G O 1 B 21/00</b>	<b>(2006.01)</b>	G O 1 B 21/00	Z

請求項の数 5 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2000-248784 (P2000-248784)	(73) 特許権者	599011687
(22) 出願日	平成12年8月18日 (2000.8.18)		学校法人 中央大学
(65) 公開番号	特開2002-59340 (P2002-59340A)		東京都八王子市東中野7-4-2-1
(43) 公開日	平成14年2月26日 (2002.2.26)	(74) 代理人	100147485
審査請求日	平成19年8月17日 (2007.8.17)		弁理士 杉村 憲司
		(74) 代理人	100107227
			弁理士 藤谷 史朗
		(74) 代理人	100072051
			弁理士 杉村 興作
		(72) 発明者	佐藤 壽芳
			東京都世田谷区成城2-2-4-7
		(72) 発明者	梅田 和昇
			東京都足立区加平3-3-17 ライオン ズステーションプラザ北綾瀬201

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 移動装置の位置誤差評価方法およびその評価結果に基づく移動精度向上方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

互いに直交する2軸方向または3軸方向へ移動体を移動させる移動装置における前記2軸方向または3軸方向のうちの所定2軸方向と直交する方向に関する前記移動体の位置誤差の、前記所定2軸方向のうちの1軸方向に沿う変化状態を表す真直誤差曲線を逐次2点法により求めることを、前記2軸方向のうちの他の1軸方向に繰り返し、前記所定2軸方向と直交する方向に関する前記移動体の位置誤差の、前記他の1軸方向に沿う変化状態を表す真直誤差曲線を、既に求めた前記真直誤差曲線群の両端の座標位置で求めて、それら両端の座標位置での真直誤差曲線を境界真直誤差曲線とし、前記境界真直誤差曲線に基づき前記真直誤差曲線群の配置を修正して誤差曲面を求め、前記誤差曲面によって、前記所定2軸を含む平面上でのその平面と直交する方向に関する前記移動体の2次元位置誤差を評価することを特徴とする、移動装置の位置誤差評価方法。

10

【請求項2】

前記誤差曲面を請求項1記載の方法により前記所定2軸を含む平面と直交する1軸方向に対して求めることを、前記3軸方向の各々の所定座標範囲内について繰り返すことにより誤差空間を求め、前記誤差空間によって、前記所定座標範囲内の空間における前記移動体の3次元位置誤差を評価することを特徴とする、移動装置の位置誤差評価方法。

【請求項3】

20

前記逐次 2 点法により位置誤差を求めている点の間では、位置誤差の特性に基づき一次または多次元補間により位置誤差を求めることを特徴とする、請求項 1 または 2 記載の移動装置の位置誤差評価方法。

【請求項 4】

請求項 2 または 3 記載の方法で求めた前記誤差空間を表すデータを、前記移動装置の作動を制御する制御装置内に保持し、

この誤差空間データにおける誤差分を補償する補正関係式を用いることにより、前記移動装置による前記移動体の移動位置を補正することを特徴とする、移動装置の 3 次元位置精度向上方法。

【請求項 5】

前記誤差空間データを、前記移動装置の周囲環境の変化に応じてあらかじめ求めておき、前記移動装置の使用の際にその使用時の周囲環境に対応した前記誤差空間データにおける誤差分を補償する補正関係式を用いることにより、前記移動装置による前記移動体の移動位置を補正することを特徴とする、請求項 4 記載の移動装置の 3 次元位置精度向上方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

この発明は、互いに直交する 3 軸方向へ測定子を移動させる 3 次元測定装置や互いに直交する 2 軸方向または 3 軸方向へ工具を移動させる工作機械の如き移動装置の、それら測定子や工具の如き移動体の位置誤差を評価する方法および、その評価方法を用いて位置精度を向上させる方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術および発明が解決しようとする課題】

3 次元測定装置は、機械加工の自動化、高精度化が進む中、生産ラインや生産システムに欠かせない寸法、形状精度を評価する機能を負っている。一方、3 次元測定装置がハードウェアとして現在以上に測定精度を上げることは、製造技術に困難が伴う上に、製造経費も上昇する結果を招く。このため近年、装置の精度を出荷時に把握して測定子の動きを補正することにより、装置としての基本性能である測定精度を向上させることが行われるようになっている。

【0003】

しかしながらこれまでの補正は、測定子のある区間送ったときに得られる累積誤差を求め、その区間に比例的に誤差を割り当てるものであり、区間内の測定子の運動誤差を把握して補正するものとはなっていない。このことは、運動誤差の評価方法自体について現状では、標準的方法を探索するため精度標準となる図 1 2 に示す如きボールプレートを世界の主要機関が持ち回りして、所持する 3 次元測定装置で図 1 3 に示すようにそのボールプレートを測定することによって測定装置の誤差を評価、比較している段階であることに象徴されている。

【0004】

ちなみに、ボールプレートの価格は非常に高いものとされ、また、相当の重量であるため、取り扱いも容易とはなっていない。しかも持ち回り試験の結果は、3 次元測定装置の誤差特性を規定できるほどに系統的な結果を得るには至っていない。なお、図 1 4 は、ボールプレートによる誤差測定結果表示の例であり、(a) は誤差の方向と大きさを棒で示し、(b) は測定平面内の誤差を網目の変形で示している。かかるボールプレートを空間内の特定位置において測定子の 3 軸方向の位置誤差を求めるためには、取り扱いが容易とは言えないボールプレートを高精度に位置決めする調整を繰り返し行うことが必要となる。これは現実的とは言えず、これによって誤差空間を求めることは極めて難しい。

【0005】

空間的な誤差を求めることまではしないが、実用に供されている誤差較正法としては、図 1 5 に示す如き標準ブロックを用いたステップゲージによる方法、通常のブロックゲージによる方法、図 1 6 に示す如きテストバーによる方法、図 1 7 に示す如きオートコリメー

10

20

30

40

50

タによる方法、そして図18に示す如きレーザ測定装置による方法等が標準的である。しかしながら、上述したテストバーによる方法、オートコリメータ、レーザ測定装置、ボールプレート、標準ブロックを用いたステップゲージによる方法、或いは、図19(a)、(b)に示す如き逆転法等の従来法は、調整に時間がかかり、自動的な評価を行うことが困難であり、測定装置の精度維持が困難であるといった問題がある。

#### 【0006】

一方、工作機械の場合を考慮すると、工具先端の運動精度の評価には、オートコリメータや、真直定規に加え、レーザ測定装置が用いられている。しかしながら、これらによって誤差空間を求めることは、装置の配置、調整に時間を要すること、加工物の精度評価には適していても工具運動の評価には用いられないこと、空間内の所定位置の3軸方向誤差を同定するには作業と時間を要しすぎること等により、実際的には難しいと言える。

10

#### 【0007】

これまでに用いられてきた各種の方法は、精度を評価する上ではよく考えられたものではあっても、測定の作業性、生産性、価格性等の観点からすると、これを多用し、あるいは標準的なものとするには、必ずしも適切とは言い難かった。従って、従来の方法によって誤差空間を評価して補正の対象とする基本の誤差特性とし、ハードウェアの機能を一定のところで確保して、測定子運動の補正により装置の精度向上を図ることは、實際上難しかった。

#### 【0008】

ところで、本願発明者は、先に東京大学生産技術研究所1982年6月発行の「生産研究」第34巻第6号中第25～34頁に発表した論文「真直度測定法の動向と逐次2点法の展開」にて、逐次2点法による真直誤差の測定方法を提案しており、この逐次2点法は、互いに間隔を空けて工具台に配置した二つの変位計をその間隔に等しいピッチでその間隔を空けた方向へ移動させながら測定対象の表面に対する変位計の変位量を測定して、二つの変位計の変位量のデータ列から工具台の運動の真直誤差と測定対象の表面の真直誤差とを同時にかつ独立して求めるものである。本願発明者は、この逐次2点法を上述の如き誤差の評価に適用することで、テストバーによる方法、オートコリメータ、レーザ測定装置、ボールプレート、標準ブロックを用いたステップゲージによる方法、或いは、図19(a)、(b)に示す如き逆転法等の従来法に比べて、調整に時間をとらず、自動的な評価を容易に行うことができ、測定装置の精度維持が容易となる、という点に想到した。

20

30

#### 【0009】

##### 【課題を解決するための手段】

この発明は、上述した逐次2点法の特性に鑑みて前記従来の方法の課題を有利に解決した誤差測定方法を提供せんとするものであり、この発明の移動装置の位置誤差評価方法は、請求項1記載のものでは、互いに直交する2軸方向または3軸方向へ移動体を移動させる移動装置における前記2軸方向または3軸方向のうちの所定2軸方向と直交する方向に関する前記移動体の位置誤差の、前記所定2軸方向のうちの1軸方向に沿う変化状態を表す真直誤差曲線を逐次2点法により求めることを、前記2軸方向のうちの他の1軸方向に繰り返し、前記所定2軸方向と直交する方向に関する前記移動体の位置誤差の、前記他の1軸方向に沿う変化状態を表す真直誤差曲線を、既に求めた前記真直誤差曲線群の両端の座標位置で求めて、それら両端の座標位置での真直誤差曲線を境界真直誤差曲線とし、前記境界真直誤差曲線に基づき前記真直誤差曲線群の配置を修正して誤差曲面を求め、前記誤差曲面によって、前記所定2軸を含む平面上でのその平面と直交する方向に関する前記移動体の2次元位置誤差を評価することを特徴としている。

40

#### 【0010】

かかるこの発明の移動装置の位置誤差評価方法によれば、3次元測定装置および、それと同様の構造による半導体基板や液晶表示装置用ガラス基板等の測定装置の誤差評価のために、測定子の運動の真直誤差曲線および平面誤差曲面を測定することができる。また、これに止まらず、逐次2点法の特徴として、同時に測定対象の基板等の誤差形状を測定することができる。そしてこの発明の方法によれば、工作機械等の、測定装置以外の移動装置

50

についても、工具台等の移動体の運動の誤差評価のために、真直誤差曲線および平面誤差曲面を測定することができる。

【 0 0 1 1 】

なお、この発明の移動装置の位置誤差評価方法においては、請求項 2 に記載したように、前記誤差曲面を請求項 1 記載の方法により前記所定 2 軸を含む平面と直交する 1 軸方向に対して求めることを、前記 3 軸方向の各々の所定座標範囲内について繰り返すことにより誤差空間を求め、前記誤差空間によって、前記所定座標範囲内の空間における前記移動体の 3 次元位置誤差を評価することとしても良い。

【 0 0 1 2 】

この発明の移動装置の位置誤差評価方法によれば、逐次 2 点法により、上記のように移動体としての測定子の真直運動誤差曲線を基本として誤差空間を求めるので、測定誤差に関する性能をより詳細に評価することができる。そしてこの発明の方法による、逐次 2 点法による真直誤差曲線を基本とする誤差空間の同定は、空間として包括的であること、測定を実施するための器具等の調整に時間を要しないこと、座標軸に対応して系統的な誤差が求められること等の点で優れている。

【 0 0 1 3 】

またこの発明の移動装置の位置誤差評価方法においては、請求項 3 に記載したように、前記逐次 2 点法により位置誤差を求めている点の間で、位置誤差の特性に基づき一次または多次元補間により位置誤差を求めることとしても良い。

【 0 0 1 4 】

このようにすれば、逐次 2 点法により位置誤差を求めている点の間では補間によって位置誤差を求めるので、逐次 2 点法により位置誤差を求める点の間隔をある程度空けても、それらの点間の位置でも位置誤差を求め得ることから、逐次 2 点法による測定の速度を速め得て、真直誤差曲線や誤差曲面をより短時間で求めることができる。

【 0 0 1 5 】

そして、請求項 4 記載のこの発明の移動装置の 3 次元位置精度向上方法は、請求項 2 または 3 記載の方法で求めた前記誤差空間を表すデータを、前記移動装置の作動を制御する制御装置内に保持し、この誤差空間データにおける誤差分を補償する補正関係式を用いることにより、前記移動装置による前記移動体の移動位置を補正することを特徴としている。

【 0 0 1 6 】

かかるこの発明の移動装置の 3 次元位置精度向上方法によれば、上述の如くして逐次 2 点法で求めた誤差空間を表すデータを制御装置内に保持し、これを基とした、誤差空間データにおける誤差分を補償する補正関係式を用いて誤差を補正する動きを、例えば制御装置の CNC ( コンピュータ式数値制御 ) 機能によって与えることで、装置の機能そのものである測定精度や工具移動精度の向上を果たすことができ、これにより、装置のハードウェア構成によって精度向上を図る場合には価格の上昇が避けられない段階に達している中にあって、価格を抑制しつつ装置の性能向上を期することができる。

【 0 0 1 7 】

半導体基板、大型画像表示装置用ガラス基板等では、nm 台の平面形状の評価が求められており、これらの精度評価には、定盤をテーブルとする通常の直角座標系の 3 次元測定装置や、テーブルを回転させる極座標系の 3 次元測定装置の利用が考慮されている。そしてこれらの装置では、ハードウェアの改善によって極限精度を高め、所要の測定精度や分解能の達成を目指している。従って、これに逐次 2 点測定法を導入し、本発明の方法を適用すれば、従来法の発想による測定装置に、より一段と高精度の機能を付加することが可能となり、これによって、生産技術における加工精度向上に寄与することができる。

【 0 0 1 8 】

なお、極座標系の 3 次元測定装置に本発明の位置誤差評価方法を適用する際には、互いに直交する 3 軸の代わりに、互いに直交する 2 軸とそれらのうちの 1 軸周りの回転角とを用いれば良い。そしてその際、直交座標系に沿って変位計を移動させて測定した位置誤差データを極座標系に変換しても良く、また直接、極座標系に沿って半径方向および周方向へ

10

20

30

40

50

変位計を移動させて位置誤差データを求めるようにしても良い。

【0019】

さらに、この発明の移動装置の3次元位置精度向上方法においては、請求項5に記載したように、前記誤差空間データを、前記移動装置の周囲環境の変化に応じてあらかじめ求めておき、前記移動装置の使用の際にその使用時の周囲環境に対応した前記誤差空間データにおける誤差分を補償する補正関係式を用いることにより、前記移動装置による前記移動体の移動位置を補正することとしても良い。

【0020】

誤差空間のマトリックス構成は、周辺環境、使用条件等によって変化する場合も想定されるが、これに対しては逐次2点法により誤差空間を求めることがこれまでの方法に比べて自動的に、容易に可能であることにより、これら条件の変化に対して、誤差空間構成マトリックスを与えることによって、容易に補正を実施することが可能となる。

10

【0021】

すなわち、請求項5に記載のように、周辺環境、代表的には装置の周囲温度、集中繰り返し使用による構造代表点の温度上昇等に対して、誤差空間データを求めて記憶しておくことで、実環境下における環境の監視により、それぞれの誤差空間に対する補正を行うことが可能となり、測定装置や工作機械の周囲環境の変化に対して測定精度や工具移動精度を維持することができる。

【0022】

従って、この発明は、機械部品をはじめとする加工部品形状の測定技術、誤差空間をマトリックスにより表現し、これを基本として補正関係式を構成することによる測定性能向上を可能とする情報処理技術や、精度向上に伴い、これを満足する高精度機械部品の製造を可能とする生産加工技術、そして工作機械の工具運動に適用が可能であることによる生産加工技術等の諸技術分野に利点をもたらすことができる。

20

【0023】

【発明の実施の形態】

以下に、この発明の実施の形態を実施例により、図面に基づき詳細に説明する。ここに、図1は、この発明の移動装置の位置誤差評価方法の一実施例としての3次元測定装置の位置誤差評価方法における処理の流れを示すフローチャート、図2(a)~(g)は、図1に示す処理を示す説明図、そして図3は、上記実施例の方法を適用する3次元測定装置の一例を示す斜視図である。

30

【0024】

この実施例の方法では、先ず、図3に示す如き3次元測定装置について、図示のように門型フレームの延在方向をX軸とする、X、Y、Zの3軸方向の座標空間を設定する。そしてここでは、図4に示すように、逐次2点法による誤差測定のために上記3次元測定装置にプローブの代わりに測定子Pを取り付け、その測定子Pの先端部に二つのレーザ式非接触型変位計を取り付けるとともに、逐次2点法を行って誤差空間を算出するための通常のコンピュータを設置して、そのコンピュータに上記二つの変位計の出力信号をアナログ/デジタル・コンバータを介して入力する。そしてそれら二つの変位計を、極力平坦にした対象板OBに対向させて、二つの変位計の離間方向に測定子Pをそれらの変位計の間隔に等しいピッチで移動させながら測定を繰り返す。図5は、その測定原理を示す概念図であり、図中Mは変位計を示す。

40

なお、逐次2点法に使用する変位計の種類は、上述のものには限られない。また、逐次2点法自体の詳細は、前述した「真直度測定法の動向と逐次2点法の展開」を参照されたい。

【0025】

次に、図3に示すX、Y、Z軸を持つ直角座標系である(X、Y、Z)系に対し、 $(X_i, Y_j, Z_k)$ が構成する平面を考える。ここで、 $i = 0, 1, \dots, l$  (エル)、 $j = 0, 1, \dots, m$ 、 $k = 0, 1, \dots, n$ とする。 $(X_i, Y_0, Z_0)$ を取り、X軸に沿って逐次2点法を適用すると、測定子のX軸沿いの真直誤差曲線が以下によって求められる。

50

測定子上の二つの変位計をA、B、測定子および対象板表面の真直誤差をX、Z、変位計による測定値をDとすると、 $X_k, Z_k$ は以下に示す簡潔な関係で求められる。この時、測定子が移動する際にはこれが回転するヨー運動はないものとする。

【数1】

$$X_k = X_{k-1} - D_{kA} + D_{(k-1)B} \quad (1)$$

$$Z_k = X_k + D_{kA} - D_{0A} \quad (2)$$

$$X_0 = 0, X_1 = 0, Y_0 = 0 \quad (3)$$

10

これを  $(X_j, Y_j, Z_0)$ 、すなわち  $j$  を整数として  $Y_j$  について繰り返せば、X 軸方向に求めた真直誤差曲線群を  $Z=0$  面に対して求めることができる。

【0026】

二つの変位計の先端面は、基礎理論では揃ったものとしている。しかし実務的には、必ず僅かの不揃い（図6参照）が残る。測定された真直誤差曲線には、2点の送り回数を1（エル）として、測定終段で1が蓄積され、重なって求められる。従って、 $Y_0$  に対する測定子運動の真直誤差曲線では、この分を補正することで、X軸上の測定範囲の両端で誤差  $z$  を0として誤差曲線を与えることができる。一方、 $Y_j$ 、 $j=1, \dots, m$  に対して求められた  $X_j$  に関する真直誤差曲線については、始端は0とし、終端を1で補正し

20

【0027】

これらの真直誤差曲線群から、平面誤差曲面を構成する手段として、 $(X_0, Y_j, Z_0)$ 、 $(X_1, Y_j, Z_0)$  において、 $j=0, 1, \dots, m$  として、Y軸方向の真直誤差曲線を求める。すなわち、X軸方向の真直誤差曲線群の始端、終端において、これらと直交する方向の真直誤差曲線を求める。このとき、X軸方向に誤差曲線を求めるのに用いた二つの変位計を垂直軸線周りに回転させてそのまま用いれば、先端不揃いは保持されて、Y軸方向の真直誤差曲線の評価に直ちに考慮することができる。これを当初からY軸方向に配置した二つの変位計で測定する場合には、X軸方向で考慮した先端不揃い評価と同じ方法を別に行い、Y軸方向の真直誤差曲線を求めることが可能である。しかし、各真直誤差曲線の終段で、 $z$  の評価を可能としていたことを考慮すると、X軸方向の測定に用いた変位計を上記のように回転させてそのまま用いることが、測定精度、作業能率の維持には有効である。

30

【0028】

X軸方向に求めた真直誤差曲線群を、その始端および終端で求めたY軸方向真直誤差曲線の当該位置で重ねることによって、相互に独立に求められたX軸方向真直誤差曲線群を要素として結合して平面誤差曲面を構成することが可能となる。

上述した、誤差曲線群から誤差曲面を構成する処理は、図1にフローチャートで示す手順によって行うことができ、この手順を模式化した状況を図2に示す。すなわち、図1に示す手順では、まず、ステップS1で、図2(a)に示すように、 $y=0, \dots, m$ の各々に対してx軸方向に真直誤差曲線を求め、続くステップS2で、図2(b)に示すように、 $x=1$ （エル）、 $y=0$ での誤差から補正量  $z$  を算出する。

40

続くステップS3では、図2(c)に示すように、x軸方向の各真直誤差曲線を上記分補正し、続くステップS4では、図2(d)に示すように、 $x=0$ および $x=1$ （エル）の各々について、y軸方向の各真直誤差曲線を求める。

そして続くステップS5では、図2(e)に示すように、y軸方向の各真直誤差曲線を上記分補正し、続くステップS6では、図2(f)に示すように、各x軸方向の各真直誤差曲線をそれぞれ、それらの曲線の両端が $x=0$ および $x=1$ （エル）の各々について求めたy軸方向の各真直誤差曲線上に位置するように補正する。

最後のステップS7では、図2(g)に示すように、 $x=1$ （エル）での、x軸方向とy軸方向との真直誤差を比較する。この比較による計測の妥当性の検討のステップは、3次元

50

測定装置の通常の精度程度の誤差か否かをチェックして、誤差が過大な場合に再計測を行うためのものである。図7は、上述した処理によって求められた誤差曲面の測定例である。

【0029】

以上に示した方法を繰り返し、所要座標位置で $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 軸方向の誤差成分を与えるよう平面誤差曲面群を求めることにより、当該3次元測定装置の誤差空間を求めることができ、かかる誤差空間は、各座標位置に関する誤差成分を要素成分とするマトリックスによって表示することができる。

それゆえ、この発明の3次元位置精度向上方法では、上記マトリックスから各座標位置における誤差成分を0とする補正関係式を構成し、これに基づき、3次元測定装置のCNC機能による指令で上記誤差分を補償するようにプローブを移動させる。これにより、3次元測定装置の測定機能の高精度化を図ることができる。

また、上記方法は、工作機械等の、3次元測定装置以外の移動装置にも適用し得て、そこでの移動体の移動精度の高精度化を図ることができる。

【0030】

ところで、上記誤差空間は、3次元測定装置等の移動装置が配置されている環境、或いは、時間の経過に伴う装置の状態変化等によって影響を受けると考えられる。

通常、3次元測定装置等の高精度の移動装置が設置される環境は恒温調整されている。しかしながらこれが満足されない状況下の使用も考えられ、そのような場合には移動装置は環境温度の影響を受けることになる。また、移動装置の連続稼働によって装置が部分的に発熱する可能性もある。さらに、移動装置の長期間に亘る使用で磨耗や微小変形等により誤差空間が変化する可能性もある。

このような誤差空間の変化に対しては、誤差空間の測定時の環境や装置の状態と、装置の実際の使用時の環境や装置の状態との相互の関係を明らかにするとともに、あらかじめ環境や装置の状態変化に応じて誤差空間を測定して補正関係式を求めておき、装置の実際の使用の際にその時の環境や装置の状態に応じて補正関係式を変更することで、精度維持を図ることが可能となる。

【0031】

また、測定位置相互の中間位置に関しては、測定位置における誤差を基に直線や曲線、或いは曲面補間による推定を行うことができる。

すなわち、逐次2点法で誤差が得られる計測点は離散的であるが、以下の如き補間・内挿手法を用いれば任意計測点における補正量を算出することができる。

誤差が得られている点を $(x_i, y_i, z_i)$ 、その点における $z$ 成分の誤差を $e_z(i, i, i)$ とおく。なお、 $x$ 成分、 $y$ 成分に関しても全く同様である。このとき、ある計測点 $(x, y, z)$ における誤差 $e_z$ を推定し、計測結果から $e_z$ を減ずることによって空間誤差を補正することができる。これは、図8に示すような流れとなる。

なお、厳密には点 $(x, y, z - e_z)$ における誤差を求めなければならないが、 $e_z$ が十分に小さいので、上記のように点 $(x, y, z)$ での誤差の推定で問題ない。

【0032】

誤差 $e_z$ を推定するための主な方法としては、以下の3つの方法が考えられる。

- (1) 線形の補間(双一次補間)
- (2) 高次の補間
- (3) 最小2乗法

【0033】

- (1) 線形の補間(双一次補間)

図9に示すように、点 $(x, y, z)$ の近傍で、逐次2点法により空間誤差が得られている計測点8点に着目する。

【数2】

10

20

30

40

$$r_x = \frac{(x - x_i)}{(x_{i+1} - x_i)}, r_y = \frac{(y - y_i)}{(y_{i+1} - y_i)}, r_z = \frac{(z - z_i)}{(z_{i+1} - z_i)}$$

とおくと、空間誤差 $e_z(x, y, z)$ は、図10に示す線形内挿の概念図から明らかなように、

【数3】

$$\begin{aligned} e_z(x, y, z) &= (1-r_x)(1-r_y)(1-r_z) \cdot e_z(i, i, i) + r_x(1-r_y)(1-r_z) \cdot e_z(i+1, i, i) \\ &+ (1-r_x)r_y(1-r_z) \cdot e_z(i, i+1, i) + r_x r_y(1-r_z) \cdot e_z(i+1, i+1, i) \\ &+ (1-r_x)(1-r_y)r_z \cdot e_z(i, i, i+1) + r_x(1-r_y)r_z \cdot e_z(i+1, i, i+1) \\ &+ (1-r_x)r_y r_z \cdot e_z(i, i+1, i+1) + r_x r_y r_z \cdot e_z(i+1, i+1, i+1) \end{aligned}$$

10

となる。

この方法の特徴としては、以下の点が挙げられる。

- ・計算が楽である。
- ・空間誤差 $e_z(x, y, z)$ が境界線上(図10の立方体の辺)で連続となり、 $e_z(x, y, z)$ の微分は不連続となる。
- ・8個の計測点が直方体の頂点になっていなければならない。

【0034】

(2) 高次の補間

(1)の一次の補間の発展形として、補間精度の向上、なめらかさの実現のために、より高次の補間を行うことが考えられる。B-spline曲面の当てはめなどが相当する。

30

$z$ が一定の面に対してB-Spline曲面などを当てはめる。はさまれている2つの曲面上で得られる空間補正量に対し、線形補間を行って点 $(x, y, z)$ における補正量を算出する手法、 $x, y, z$ 軸の3軸方向に対し逐次的にB-Spline補間を適用する手法などが利用しうる。

この方法の特徴としては、以下の点が挙げられる。

- ・空間誤差 $e_z(x, y, z)$ が境界線上(図10の立方体の辺)で連続となり、 $e_z(x, y, z)$ の微分・2次微分も連続となる。
- ・多数の計測点が必要(3次の当てはめの場合で $4 \times 4 \times 4$ 点の計測点が必要)である。
- ・得られる解の妥当性が明確でない。

【0035】

(3) 最小2乗法

40

空間誤差 $e_z(x, y, z)$ があるモデルに従うと仮定し、そのモデルへの当てはめを行う。ここでは最も単純なモデルとして、 $x, y, z$ に対する一次のモデルを考える。すなわち、

【数4】

$$e_z = ax + by + cz + d$$

とおけるとする。

最小2乗法を適用する。逐次2点法により空間誤差が得られている計測点を $(x_i, y_i, z_i)$ 、計測点 $(x_i, y_i, z_i)$ における空間誤差の計測値を $e_{z_i}$  ( $i=1 \dots m$ )とおく。空間誤差の計測値と未知パラメータ $(a, b, c, d)$ との間に次の関係式が成り立つ。

50



【数 5】

$$\begin{bmatrix} e_{z1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ e_{zm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ & & \cdot & \\ & & \cdot & \\ & & \cdot & \\ x_m & y_m & z_m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}$$

10

【0036】

上記の式を、

【数 6】

$$y = Ax$$

と置く。yの各成分 $e_{z_i}$ の不確かさが未知の等しい値であり、また成分間で相関がないと仮定する。不確かさの分散を $\sigma^2$ と置く。

20

このとき、最小 2 乗解は、

【数 7】

$$\hat{x} = (A^T A)^{-1} A^T y$$

で与えられる。これを計算すると、

【数 8】

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \\ \hat{c} \\ \hat{d} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum x_i^2 & \sum x_i y_i & \sum x_i z_i & \sum x_i \\ \sum x_i y_i & \sum y_i^2 & \sum y_i z_i & \sum y_i \\ \sum x_i z_i & \sum y_i z_i & \sum z_i^2 & \sum z_i \\ \sum x_i & \sum y_i & \sum z_i & m \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum x_i e_{z_i} \\ \sum y_i e_{z_i} \\ \sum z_i e_{z_i} \\ \sum e_{z_i} \end{bmatrix}$$

30

となる。

【0037】

また、 $\sigma^2$ の推定値は、

40

【数 9】

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{m-4} |y - A\hat{x}|^2 = \frac{1}{m-4} \sum \{e_{z_i} - (\hat{a}x_i + \hat{b}y_i + \hat{c}z_i + \hat{d})\}^2$$

となり、この推定値を用いて、上記最小 2 乗解の不確かさの共分散行列Cxが、

【数 10】

$$C_x = \hat{\sigma}^2 (A^T A)^{-1}$$

によって算出される。

点(x, y, z)における空間誤差およびその不確かさは、

【数 1 1】

$$\begin{aligned} \hat{e}_z(x, y, z) &= \hat{a}x + \hat{b}y + \hat{c}z + \hat{d} \\ \hat{\sigma}_{e_z}^2 &= [x \ y \ z \ 1] C_x [x \ y \ z \ 1]^T \end{aligned}$$

10

によって算出される。

特徴としては、以下の点が挙げられる。

- ・空間誤差 $e_z(x, y, z)$ が境界線上(上図の立方体の辺)で不連続となる(よって工作機械への展開など軌跡の連続性が問われる場合には使用できない可能性がある)。
- ・計測点の配置、点数などに制約がない(実質的には(1)と同様に近傍8点が妥当である)。
- ・得られる解の妥当性が高い(ただしモデルが妥当であることが前提である)。
- ・空間誤差の不確かさの見積もり・当てはめの妥当性の検討が可能である。
- ・モデルの妥当性の検討が必要である。

20

【0 0 3 8】

以上の3手法の何れが適当であるかは、対象とする三次元測定装置の特性・用途などによって考えられる。一般論としては、計算が単純でかつ連続な双一次補間か、あるいは、不連続性が生じるものの空間誤差の不確かさの見積もり・当てはめの妥当性の評価が可能で最小2乗法か、のいずれかを用いるのが実用的ではないかと考える。

【0 0 3 9】

上述した誤差補正手法が、与えられた環境において妥当に適用できるかどうかを検証する一方法を、以下に提案する。

30

逐次2点法により誤差が得られている計測点を一点おきに用いて当てはめを行い、残りの計測点における誤差を計算する。計算で得られた誤差と逐次2点法により得られた誤差とを比較し、2つの値が十分近ければ、誤差補正手法が妥当であると見なすことができる。また同時に、その時の2つの値の差から、誤差補正手法により補正された後の値の誤差の大きさを見積もることが可能であると考えられる。

【0 0 4 0】

さらに、逐次2点法を用いた空間誤差の計測における冗長な計測データの融合方法の一例を、以下に提案する。

この方法では、図11に示すように、例えば同図(a)に示すデータ1、データ2の如き二つのデータを融合する場合に、先ず同図(b)に示すように、互いに冗長な部分を持つデータ1, 2のうち一方のデータ2全体をオフセット補正する(データ1, 2の各々で、冗長な部分の平均値を求め、平均値間の差をオフセットとする)。

40

次いで同図(c)に示すように、データ1, 2の互いに冗長な部分の各点で平均値を求め、求められた平均値を新たな計測値とする。

そして同図(d)に示すように、必要に応じて0点の補正を行う

【0 0 4 1】

この融合方法は、例えばx軸方向の計測結果とy軸方向の計測結果や、正方向の計測結果と負方向の計測結果、そして同一手法による複数の計測結果の融合等に用いることができる。

50

但し、前提として、各データ群の絶対的な値に意味はなく、相対的な計測値のみ意味を持つこと、またオフセット（偏差）分を除けばデータ群内の計測値間に相関はないこと（すなわち白色誤差）が必要である。

なお、データの融合は、様々なデータ補正（0点合わせなど）の前に行うことが望ましい。

【0042】

既に述べたように、この発明の方法の特徴として、使用する装置が簡便であることならびに処理が容易であることから、測定装置の時間変動などに対応して誤差空間の再評価を行うことが簡便であることが挙げられる。

誤差空間算出用の被測定物として、この発明の方法では、ボールプレートのように精度の高いものを使用する必要は全くなく、一般に市販されているアルミ平板等を使用すれば十分である。

【図面の簡単な説明】

【図1】 この発明の移動装置の位置誤差評価方法の一実施例における誤差曲線群から誤差曲面を構成する処理を示すフローチャートである。

【図2】 上記フローチャートでの処理の内容を示す説明図である。

【図3】 上記実施例の方法の実施に用いる3次元測定装置を例示する斜視図である。

【図4】 上記3次元測定装置での測定状態を示す説明図である。

【図5】 上記実施例の方法で行う逐次2点法の測定原理を示す概念図である。

【図6】 上記実施例の方法における測定子での変位計の不ぞろいを示す説明図である。

【図7】 上記実施例の方法で求めた誤差曲面の一例である。

【図8】 上記実施例の方法における誤差空間の任意位置での誤差を求める補正手順を示すフローチャートである。

【図9】 上記実施例の方法で用い得る線形補間での座標設定を示す説明図である。

【図10】 上記線形補間での内挿方法を示す概念図である。

【図11】 上記実施例の方法で用い得る冗長データの融合方法を示す説明図である。

【図12】 従来の誤差測定方法で使用するボールプレートを示す斜視図である。

【図13】 上記ボールプレートによる誤差測定方法を示す説明図である。

【図14】 上記ボールプレートによる誤差測定結果を示す説明図である。

【図15】 ステップゲージによる従来の誤差測定方法を示す説明図である。

【図16】 テストバーによる従来の誤差測定方法を示す説明図である。

【図17】 オートコロメータによる従来の誤差測定方法を示す説明図である。

【図18】 レーザによる従来の誤差測定方法を示す説明図および光路構成図である。

【図19】 逆転法による従来の誤差測定方法を示す説明図である。

【符号の説明】

P 測定子

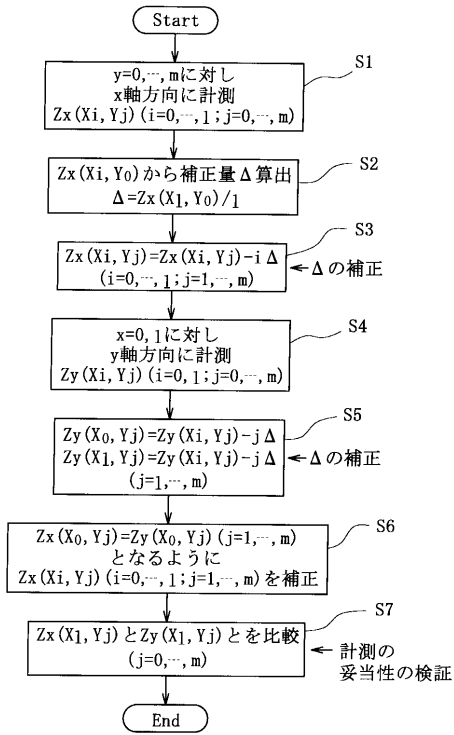
O B 対象板

10

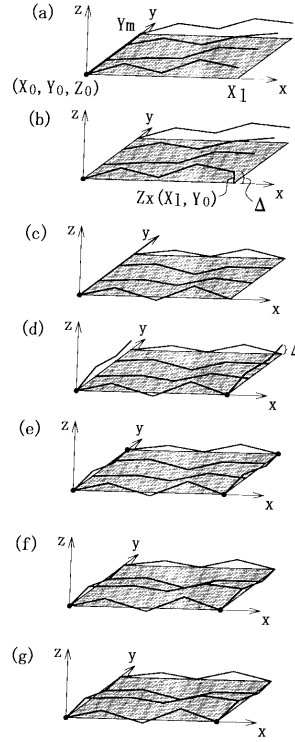
20

30

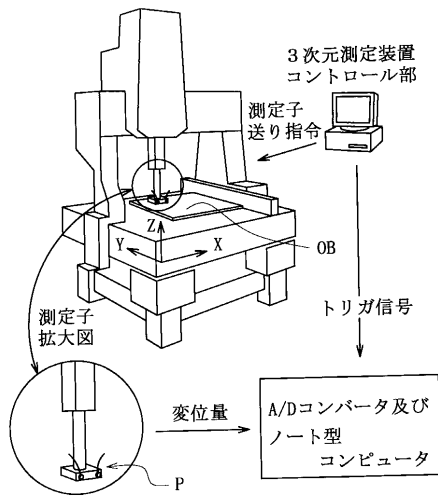
【図1】



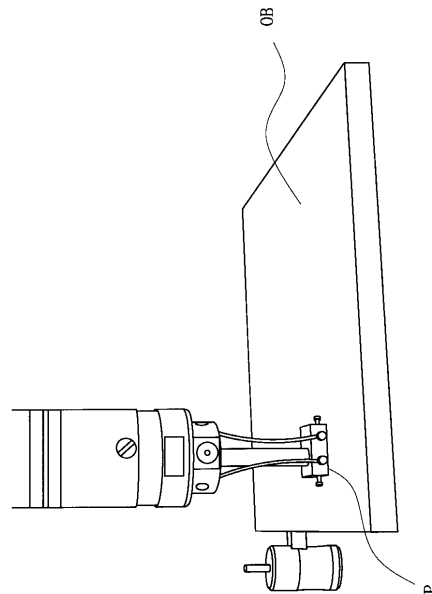
【図2】



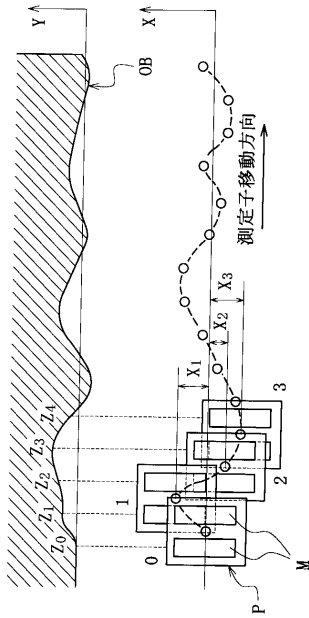
【図3】



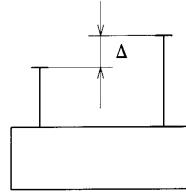
【図4】



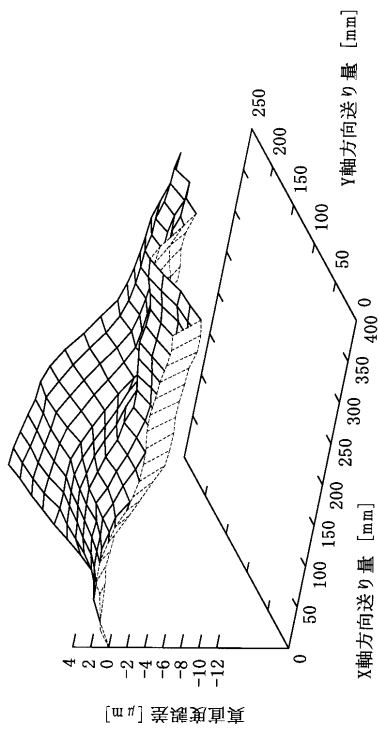
【図5】



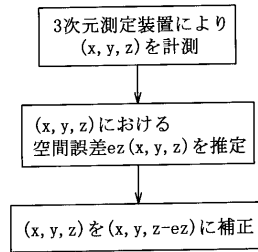
【図6】



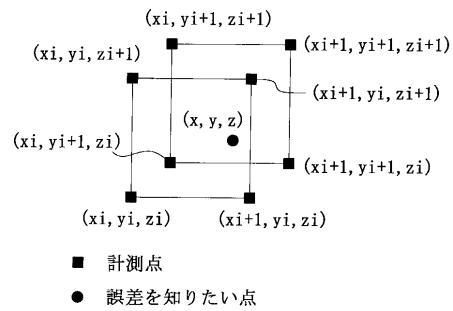
【図7】



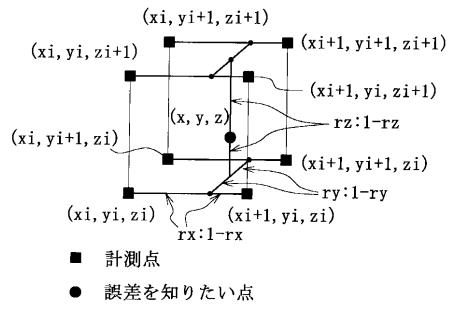
【図8】



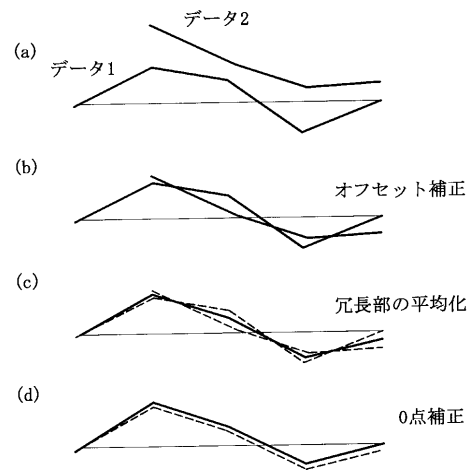
【図9】



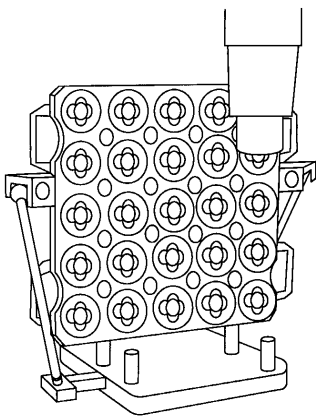
【図10】



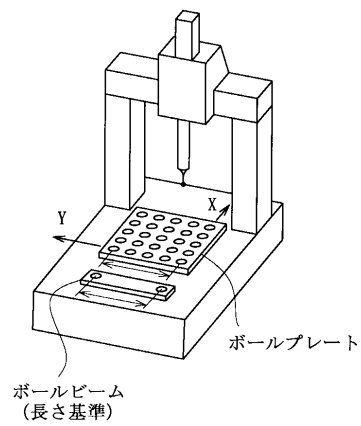
【図11】



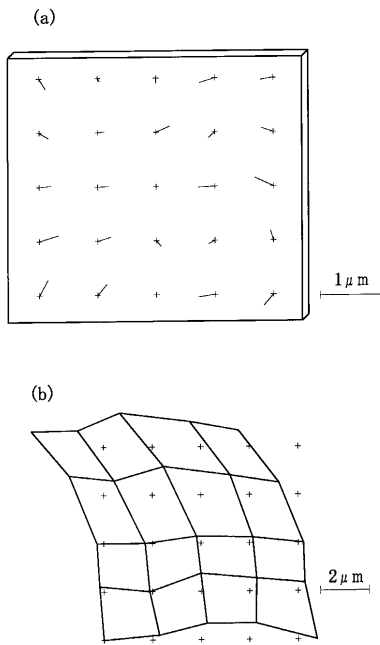
【図12】



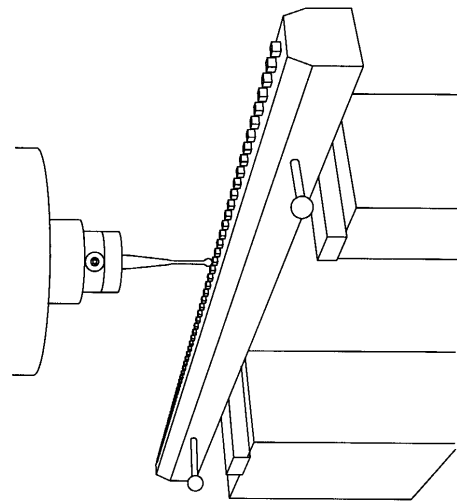
【図13】



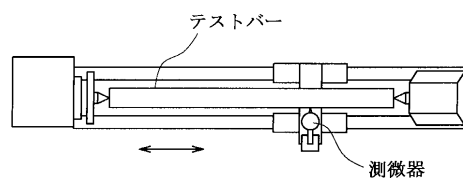
【図14】



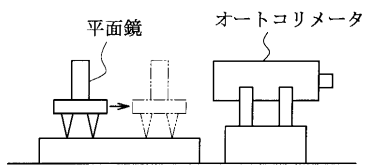
【図15】



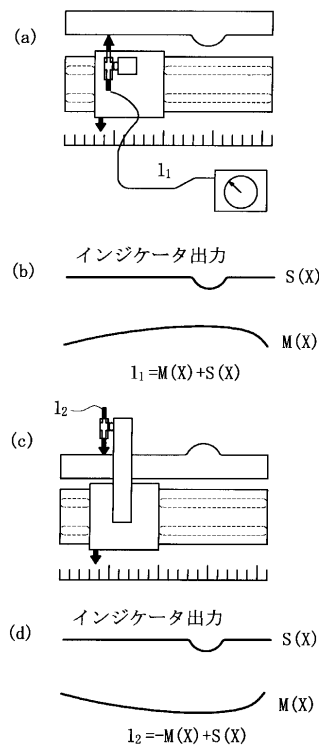
【図16】



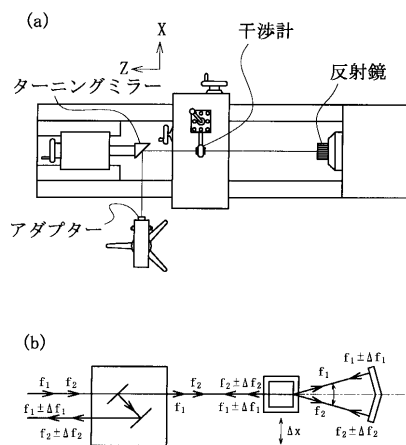
【図17】



【図19】



【図18】



---

フロントページの続き

審査官 大川 登志男

- (56)参考文献 特開平07-146125(JP,A)  
特開2001-041733(JP,A)  
特開平11-142139(JP,A)  
特開平07-334245(JP,A)  
特開平11-333670(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

B23Q 17/00  
B23Q 15/06  
B23Q 15/24  
G01B 21/00