レーザ光を基準とした石定盤の
光学式真直度測定法の開発*谷 泰 弘^{*1}, 甲 木 賢 太 郎^{*2}
佐 藤 壽 芳^{*3}, 上 村 康 幸^{*1}Development of Optical Measurement for the Straightness of a Granite Bed
Using Laser Beam DatumYasuhiro TANI, Kentaro KATSUKI,
Hisayoshi SATO and Yasuyuki KAMIMURA

The flatness of a granite bed as a guide of the column in a CMM (coordinate measuring machine) has a great influence upon the accuracy of the movement, and the straightness measurement of the guide surface using an electric level is a laborious task. Therefore, a new optical straightness measurement of high speed and high accuracy has been proposed in this paper. "High speed" means that a measuring time of within 3 minutes for 50 points during a 400 mm traverse was accomplished by gliding the measurement head on a granite surface by the action of an aerostatic bearing. "High accuracy" means that a repeatability of less than $0.16\mu\text{m}$ was realized by measuring the position of a laser beam as a datum on a photosensor. The straightness was evaluated in terms of the vertical displacement and the integration of the inclination angle of the slider. As a result the integration value coincided well with the measured value using an electric level.

Key Words: Measurement, Straightness, Coordinate Measuring Machine, Optical Measurement, Aerostatic Bearing, Granite Bed

1. 結 言

三次元座標測定機に関しては、これまでおもに使用者の立場からその測定プローブの空間精度の検定等について多くの研究が行われてきた^{(1)~(4)}。しかし、案内面の真直度が測定プローブの空間位置精度にどのように影響を与えるかといった製造者の立場からの研究⁽⁵⁾はほとんど行われていないのが現状である。三次元座標測定機においては、測定の基準面として使用するために熱的に安定な花崗岩の定盤が多用されている⁽⁶⁾。この石定盤の平面度は、被測定物の空間座標に影響を与えるだけでなく、一般に定盤の表面がコラムの案内面として使用されているために前述のように測定プローブの空間精度に影響を与える。

石定盤の平面度あるいは案内面の真直度は、電気水準器やオートコロメータを使用した真直度測定法もしくは高精度の三次元座標測定機によるマスタ定盤との比較により、三次元座標測定機の製造現場で計測が行われている。しかし、これらの測定には1時間オーダ

の測定時間が必要であり、またその真直度データと測定プローブの空間精度との間には明確な関係が見い出されていないのが実状である。これは、測定プローブの空間精度に影響を与える要因には石定盤の平面度のほかに各移動軸の運動精度や三次元座標測定機の熱変形等種々の要因があるためである。またコラムは門形の構造体であるうえに、案内面に対向する空気軸受パッドは数箇所には設けられており石定盤の真直度誤差が測定プローブの空間精度に線形的な影響を与えないためであると思われる。また、その空気軸受パッドの運動挙動は、平均化効果により石定盤表面の真直度を直接反映したものになっていないためと思われる。

以上のことから、本論文では三次元座標測定機の測定プローブの空間精度により関連の深い形で石定盤の真直度を高速に計測するために、三次元座標測定機で実際に使用されている空気軸受パッド(以下、しゅう動体と呼ぶ)が石定盤上を移動した際の運動の真直度をレーザ光を基準として光学的に測定することにした。以下その詳細について報告する。

2. しゅう動体の運動特性に関する
シミュレーション

計測に先立ち、定盤の真直度としゅう動体の運動の

* 原稿受付 1994 年 12 月 1 日。

^{*1} 正員, 東京大学(●106 東京都港区六本木 7-22-1)。^{*2} 三菱銀行(株)(●104 東京都中央区銀座 8-9-1)。^{*3} 正員, 中央大学理工学部(●106 東京都文京区春日 1-13-27)。

真直度との関係を明確にするために、しゅう動体がある形状を有する定盤上をしゅう動した際のしゅう動体重心の挙動としゅう動体の傾きの変化についてシミュレーションを行った。シミュレーションにおいては、図1に示されるようにしゅう動体の重心を挟む2点でしゅう動体は常に定盤表面と接触しているものと仮定し、しゅう動体は z 軸方向の上下運動と y 軸回りの回転運動のみを行うものとする。定盤の形状 $f(x)$ としては、実際のJIS 0級の定盤の表面形状を触針式表面形状測定機で得た結果を参考に、

$$f(x) = \sum_{i=0}^6 A_i \sin(B_i \pi x / L)$$

と仮定した($i \geq 7$ では真直度に与える影響が小さいため無視)。ここで、 $A_i = 1/1.5^i$, $B_i = 2^{i+1}$, L : 定盤の全

長である。図2(a)および図3で点線で示されている形状は、上記のように仮定した定盤の表面形状である。この定盤に沿って50 mmの長さのしゅう動体が移動したとき、得られるしゅう動体の重心の軌跡は図2(a)で実線で示されるものになる。この定盤の表面形状およびしゅう動体重心の軌跡をフーリエ変換しその周波数特性を求めたものが、図2(b)である。これによれば、空間周波数が低い領域では重心位置は定盤の表面形状と同一の周波数でピークをもっているが、定盤のもつ固有の周波数成分の影響が高周波数成分ほどとらえにくくなっており、16 [1/m]以上の空間周波数ではまったくピークが現れていない。また、空間周波数の高い領域(しゅう動体の長さよりも短い波長成分)では定盤の表面形状と全く相関のない27 [1/m]の周波数

図1 しゅう動体の定盤表面への接触状態

(a) しゅう動体重心位置の軌跡

(b) 周波数特性

図2 しゅう動体重心位置の軌跡(シミュレーション)

(a) 測定点16点の場合

(b) 測定点64点の場合

(c) 測定点256点の場合

図3 しゅう動体傾きの積分値(シミュレーション)

でピークが現れている。このように、しゅう動体の重心の動きは空間波数の高い領域で定盤の表面形状に完全には倣わないものとなる。

図3は、定盤上を移動したしゅう動体の傾きを積分して得られる形状を表示したものである。測定点を16点、64点、256点と増加させていくことで、徐々に定盤の表面形状に近いものになることが判る。図4は図3の曲線の周波数特性である。ここで、測定点が少ない場合は補間したデータを用意し、いずれも256点のデータでフーリエ変換を行った。図4より測定点数が少ないときは、定盤にない周波数でピークが現れているが、測定点が十分多くなる(測定間隔がしゅう動体長さよりも短くなる)と、しゅう動体長さをカットオフ

値としたアナログ的なローパスフィルタが作用した周波数分布となっていることがわかる。このように、水準器やオートコリメータのように測定点の少ない角度測定を基準とした真直度測定では、空間周波数の高い領域で定盤の表面形状と相関のない成分が現れる⁽⁷⁾。

3. 石定盤の真直度測定

3.1 測定方法 真直度の計測を行うためにはデータムと呼ばれる基準が必要となる。この基準として、①すでにその精度が保証されている基準線(ハードウェアデータム)、あるいは②制御装置内で作られた仮想基準線^{(8)~(12)}(ソフトウェアデータム)が使用されている。本研究では電気水準器とのデータ比較の観点から測定点が一直線上にあることの保証を重視して①の方法を採用し、その基準線としてHe-Neレーザ光を用いた。

しゅう動体の重心位置の鉛直方向変位および傾きを同時に測定するために、図5(a)のようにしゅう動体の重心を挟むしゅう動体の上部2箇所に光点位置を測定する光センサを設置した。光センサとしては、半導体光点位置センサ(PSD)あるいは2分割フォトダイオードが考えられる。本研究では分解能が高くダイナミックレンジが広い⁽¹²⁾ことから2分割フォトダイオードを採用した。図5(b)に測定原理を示す。光センサ面と回転中心との距離を a とし、しゅう動体が z 軸方向に変位 c 、回転中心回りに θ 回転した場合、角度変化が微小であれば光センサ面における光点位置のずれ量 d は、

(a) 測定点16点の場合

(b) 測定点64点の場合

(c) 測定点256点の場合

図4 しゅう動体傾きの積分値の周波数特性
(シミュレーション)

(a) 光センサの配置

(b) 測定原理

図5 光センサによるしゅう動体運動挙動の計測

$$d \approx -a\theta - c$$

で表すことができる。そこで、図5(a)のように回転中心からの位置 a の異なる二つの光センサの出力があれば、角度変化 θ と z 軸方向変位 c とを同時に求めることができる。

しゅう動体を用いた真直度計測に先立ち、作製した測定系の性能評価を行った。図6に光センサの感度(d の単位量変化に対する出力電圧)とスリットからの距離との関係を示す。感度はスリットからの距離により変動しており、感度が最も高い点は低い点の1.16倍の感度をもっていた。これは、レーザ光が光ファイバ内を伝送される間に内部反射により光の強度分布が乱れ、その結果スリットからの距離によりビーム径が変化したためと考えられる。そこで、実際の測定では光センサの測定位置に応じて図6に従った異なる感度で光センサ上の光点位置を算出することで、この影響を除去した。

スリットからの0.5 mの位置に静置した状態で、計測時間に相当する200秒間の作製した測定系の出力変動を測定した結果、約0.5 mVであった。これはアンブにおける電氣的ノイズおよびレーザ光の揺らぎ等が原因であると考えられる。この出力変動の値と図6の

図6 スリットからの距離による感度変化

図7 測定系の傾きに対する感度

感度($\approx 1.1 \times 10^4$ V/m)から、センサ面における光点位置を45 nmの最小読取り精度で測定できることになる。また、図7はしゅう動体の傾きに対するキャリブレーションを行った結果である。これらの結果からしゅう動体重心の鉛直方向の変位およびしゅう動体傾きの角度の最小読取り精度はそれぞれ45 nm, 0.28 mradであることがわかる。

測定系の構成を図8に示す。2個の光センサを固定した測定装置を、定盤表面に倣って y 軸回りの回転ができるようにボールベアリングを介して三次元座標測定機の測定プローブの取付位置にねじで固定した。三次元座標測定機の鉛直軸(z 軸)はフリーの状態にし、定盤表面に倣って測定装置が自由に上下できるようにした。また、常に安定に浮上状態が維持できるように測定装置の x 軸回りの回転を許容するために、しゅう動体上面に x 軸に沿ったV溝を設け、測定装置本体底面のV形の突起が接触するようにした。本研究で用いたしゅう動体は実際の三次元座標測定機で使用されているもので、その底面は $\phi 48$ mmの円形で、絞りは表面絞りになっている。測定装置は三次元座標測定機の移動機構を用いて x 軸方向に移動させ、そのときの測定装置の挙動を測定した。しゅう動体に供給する空気はコンプレッサによる圧力変動を防ぐためにアキュムレータを介した。2個の光センサの出力および三次元座標測定機の機能で計測されるしゅう動体の三次元的位置をパーソナルコンピュータに転送し、感度補

図8 測定システム

図9 測定系の繰返し精度

(a) 重心位置の軌跡

(b) 周波数特性

図 10 しゅう動体重心位置の軌跡(実験)

(a) 傾きの積分値

(b) 周波数特性

図 11 しゅう動体傾きの積分値(実験)

正を行った光センサの出力からしゅう動体の重心位置および傾きを計算した。

図 9 に測定系の繰返し精度を示す。10 mm 離れた点の 5 往復の測定では、1.8 mV の出力誤差があり、これは $0.16 \mu\text{m}$ の誤差に相当する。繰返し精度を悪化させる原因としては、前述の光センサの出力変動のほか、 x 軸の水平方向真直度誤差による測定位置のずれや z 軸の上下運動による V 形突起と V 溝の接触状態の変化などの機械的要因が考えられる。それらの点を改善することでさらに高精度の測定が期待できる。

3・2 測定結果 上記のようにしゅう動体を石定盤表面に倣って移動させ、その運動挙動を測定した。参照データとしてランクテラーホブソン製タリベル 1 形電気水準器、および(株)ミットヨ製石定盤自動平面度測定機 ($0.1 \mu\text{m}$ の繰返し精度をもつ高精度三次元座標測定機で恒温室内でマスタ定盤との比較測定)で測定対象の定盤を測定したものをを用いた。図 10 に 0.4 m の範囲で測定したしゅう動体の重心位置の軌跡とその周波数特性を、図 11 にしゅう動体の傾きを積分した値とその周波数特性を示す。測定に用いたしゅう動体は三次元座標測定機で案内面から通常 $6 \mu\text{m}$ 浮上させて使用されているが、ここでは定盤に接地した状態、 $2 \mu\text{m}$ 浮上させた状態、 $6 \mu\text{m}$ 浮上させた状態の 3 とおりの測定を行った。測定は各測定位置でセンサ出力が安定するまで(約 0.5 s)測定装置を滞留させた後

行った。

いずれの状態もほぼ同じ傾向の測定結果を示しており、各状態の差異は軽微であった。このことから、測定はしゅう動体を浮上させた状態で行えることが明確になった。浮上させた状態では 400 mm の範囲に対して約 3 分で 50 点の計測が可能であり、電気水準器を用いた計測が同範囲の 5 点の測定で 30 分近く要しているのに対して高速化が期待できる。図 10 および 11 で今回提案した測定系での結果と従来方法による結果が完全に一致していないのは、それぞれの測定方法で測定に関与している面積(特に図 8 の Y 軸方向の大きさ)が異なるためと考えられる。

図 10 から重心位置のデータは、高精度三次元座標測定機の結果に、一度減少した後 0.3 m の位置で最大値をとる傾向がほぼ一致している。また、図 11 から傾きの積分値のデータは、電気水準器の結果に、0~0.1 m の位置で一定でその後 0.3 m の位置で最大値をとる傾向がほぼ一致していることがわかる。これらはそれぞれの測定のメカニズムが一致していることに起因するものと思われる。周波数特性は 2 章のシミュレーションの結果同様、重心位置の場合にはしゅう動体長さに相当する周波数 $8 [1/\text{m}]$ よりも空間周波数の大きい領域でピークが現れているが、傾きの積分値の場合には完全にローパスフィルタが作用した状態になっている。このように、しゅう動体の重心位置の軌跡ある

いは傾きの積分値を計測することにより、従来の真直度測定に対応した計測を行うことができる。また、そのデータの周波数特性から、傾きを積分したもののほうがより好ましいと考えられる。

4. 結 言

三次元座標測定機の測定精度を向上するためには、測定プローブの空間位置精度を支配する静圧軸受しゅう動部の運動精度と案内面形状との関係を把握することが必要である。そこで、本研究ではその第1ステップとして、しゅう動体の運動真直度と傾きを同時に測定できる測定系を試作し、石定盤の真直度計測を行い、以下のような結論を得た。

(1) しゅう動体の運動(石定盤上の間欠的な摺動)を模擬したシミュレーションから、しゅう動体重心の軌跡は高空間周波数領域で定盤の表面形状にない成分をもつことがわかった。また、しゅう動体傾きを積分することで求められる曲線は定盤表面形状のローパスフィルタリングされた形状となるが、測定点を十分に多くすることが重要であることがわかった。

(2) 試作した測定系の鉛直方向変位の最小読取精度は45 nm、角度の最小読取り精度は0.28 mradであり、繰返し精度は0.16 μm であった。

(3) しゅう動体の運動の測定結果は、電気水準器および高精度平面度測定機による定盤表面の真直度測定結果と良好な一を示すことを確認した。また、測定はしゅう動体を空気浮上させた状態で行えることがわかった。

(4) しゅう動体の動心位置の鉛直方向変位あるいは積分した傾きにより軸受案内面の真直度を測定する

という新しい真直度測定法を提案し、十分多い点で測定した傾きの積分値ではしゅう動体長さよりも大きな波長成分のみ抽出できることを示した。

最後に本研究に対して数々の御助言をたまわった東洋大学工学部神田雄一教授、本測定装置の精度検定を行った元東洋大学学生川淵昌平君および本研究を遂行するに際して多大の御協力をいただいた(株)ミツトヨの関係各位に深謝する。

文 献

- (1) 大矢・谷藤, 三次元座標測定機の測定精度に関する研究(測定プローブの影響), 機論, 57-535, C(1991) 1040.
- (2) 古谷・大崎・大園・加藤, 三次元測定機における測定精度改善のための測定値補正方法, 精密工学会誌, 57-8 (1991), 1449.
- (3) 大矢, 三次元座標測定機の経年変化に関する研究, 機論, 58-546, C(1992), 454.
- (4) 中村・後藤・豊田・高井・黒沢・中俣, 三次元トラッキングレーザ干渉計による座標測定機の精度評価, 精密工学会誌, 58-11 (1992), 1899.
- (5) 薛・大園・高増, 三次元座標測定機の案内精度の測定試験と精度検討, 精密機械, 50-3 (1984), 556.
- (6) 沢辺, 精密測定機器の動向と3次元測定機の進歩, 機械技術, 39-11 (1991-10), 17.
- (7) 長田・下河辺, 直線運動精度の測定法について, 精密機械, 51-6 (1985), 1257.
- (8) 田中・佐藤, 逐次2点真直度測定法の基本的な特性に関する研究, 機論, 48-436, C(1982), 1930.
- (9) 垣野・谷口・安井・上杉, 工作機械の直線運動誤差の測定法に関する研究, 精密機械, 48-2 (1982), 239.
- (10) 田村・平卯・坂本, 逐次多点法による表面プロフィール計測方法, 計測制御, 25-5 (1989), 509.
- (11) 清野・久米・浅川・鎌田, 差動レーザオートコリメーションに関する研究(第2報), 精密工学会誌, 57-4 (1991), 652.
- (12) 上村・谷・佐藤, 4分割フォトセンサを用いたオンマシン形状精度測定法, 機論 59-557, C(1993), 105.