

三次元座標測定機用石定盤の高速・高精度真直度計測法の開発

Development of High-Speed and High-Accuracy Straightness Measurement of a Granite Base for a CMM

谷 泰 弘*・甲 木 賢太郎**・佐 藤 壽 芳***・上 村 康 幸*

Yasuhiro TANI, Kentaro KATSUKI, Hisayoshi SATO and Yasuyuki KAMIMURA

1. 緒 言

三次元座標測定機（以下 CMM と表記）に関しては、これまで主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。CMM においては、測定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リメータを使用した真直度測定法もしくは高精度の CMM によるマスター定盤との比較により、CMM 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。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 CMM の熱変形等種々の要因があるためである。またコラムは門型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ヶ所に設けられており、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。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。

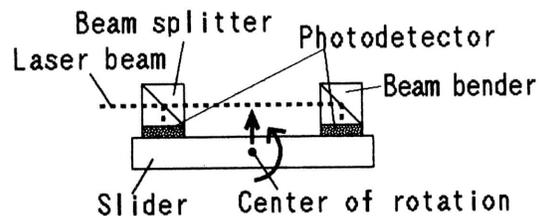
以上のことから、本論文では CMM の測定プローブの空間精度に従来より関連の深い形で石定盤の真直度を高速

に計測するために、CMM で実際に使用されている空気軸受パッド（以下摺動体と呼ぶ）が石定盤上を移動した際の運動の真直度をレーザー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。

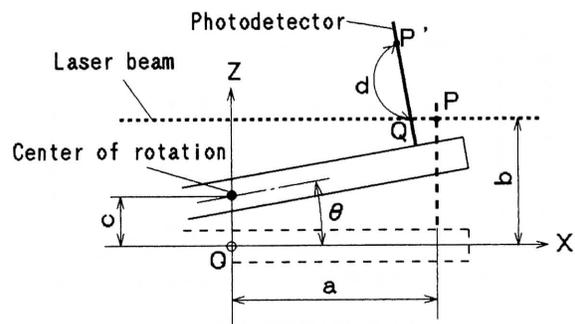
2. 石定盤の真直度測定

2.1 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既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^{7)~11)}（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。



(a) 光センサの配置



(b) 測定原理

図 1 光センサによる摺動体運動挙動の計測

*東京大学生産技術研究所 第2部

**三菱銀行(株)

***中央大学教授

研 究 速 報

摺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 1 (a)のように摺動体の重心を挟む摺動体の上部の 2ヶ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¹¹⁾ことから 2分割フォトダイオードを採用した。図 1 (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、摺動体が 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、

$$d \doteq -a\theta - c$$

で表せる。そこで、図 1 (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。

摺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 2 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最も低い点の 1.16 倍の感度を持っていた。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 2 にしたか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 0.5m 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 0.5mV であった。これはアンプにおける電気的ノイズおよびレーザ光のゆらぎ等が原因と考えられる。この出力変動の値と図 2 の感度 ($\doteq 1.1 \times 10^4 \text{V/m}$) から、センサ面における光点位置を 45nm の最小読み取り精度で測定できることになる。また、図 3 は摺動体の傾きに対する較正を行った結果である。これらの結果から摺動体重心の鉛直方向の変位および摺動体傾きの角度の最小読み取り

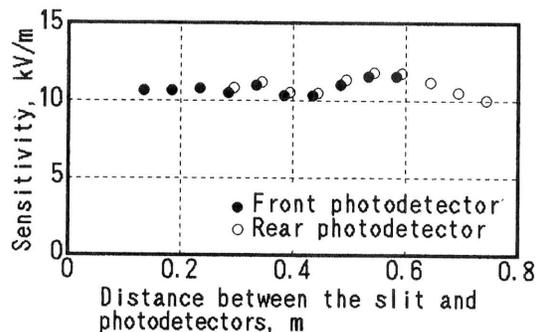


図 2 スリットからの距離による感度変化

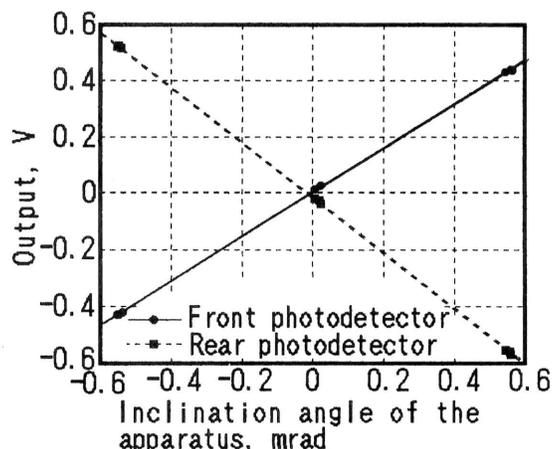


図 3 測定系の傾きに対する感度

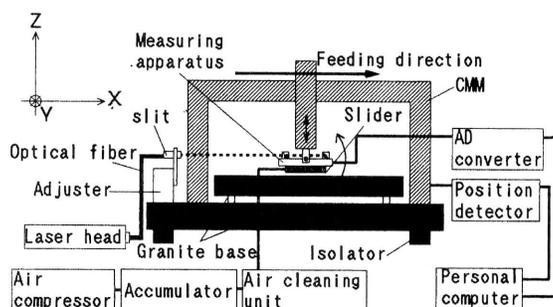


図 4 測定システム

精度はそれぞれ 45nm、0.28mrad であることが判る。

測定系の構成を図 4 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 CMM の測定プローブの取り付け位置にねじで固定した。CMM 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、摺動体上面に x 軸に沿った V 溝を設け、測定装置本体底面の V 型の突起が接触することで、測定装置の x 軸回りの回転を許容した。本研究で用いた摺動体は実際の CMM で使用されているもので、その底面は $\phi 48\text{mm}$ の円形で、絞りは表面絞りである。測定装置は CMM の移動機構を用いて x 軸方向に移動させ、その時の測定装置の挙動を測定した。2 個の光センサの出力および CMM の機能で計測される摺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、感度補正を行った光センサの出力から摺動体の重心位置および傾きを計算した。

図 5 に測定系の繰り返し精度を示す。10mm 離れた点の 5 往復の測定では、1.8mV の出力誤差があり、これは $0.16 \mu\text{m}$ の誤差に相当する。繰り返し精度を悪化させる原

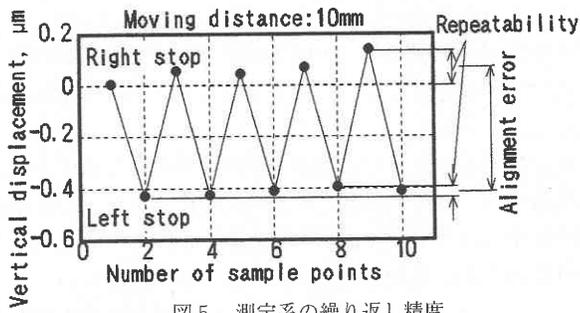


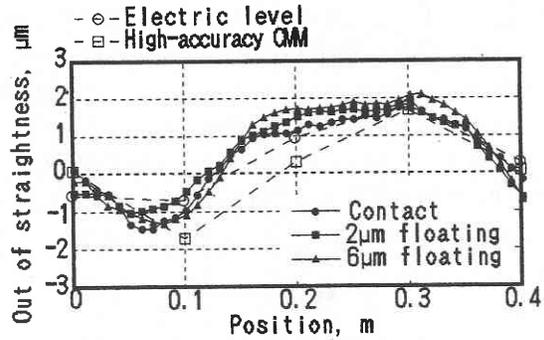
図5 測定系の繰り返し精度

因として、光センサの出力変動のほかに、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型突起と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れば、さらに高精度の測定が期待できる。

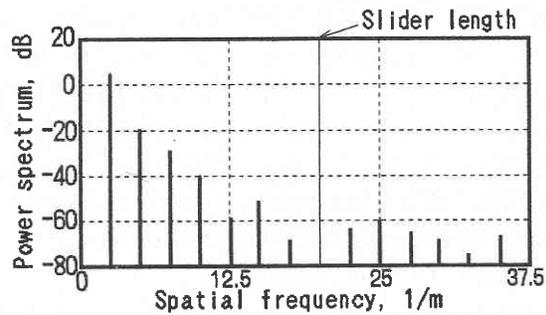
2.2 測定結果

摺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。参照データはランクテラーホブソン製タリベル1型電気水準器、および(株)ミットヨ製石定盤自動平面度測定機(0.1 μm の繰り返し精度を持つ高精度CMMで恒温室内でマスター定盤との比較測定)で測定対象の定盤を測定した。図6に0.4mの範囲で測定した摺動体の重心位置の軌跡とその周波数特性を、図7に摺動体の傾きを積分した値とその周波数特性を示す。測定に用いた摺動体はCMMで案内面から通常6 μm 浮上させて使用されているが、ここでは定盤に接置した状態、2 μm 浮上させた状態、6 μm 浮上させた状態の3通りの測定を行った。測定は各測定位置でセンサ出力が安定するまで(約0.5s)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、測定は摺動体を浮上させた状態でできることが明確になった。浮上させた状態では400mm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6や図7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参与している面積が異なるためと考えられる。図6から重心位置の結果は、一度減少した後0.3mの位置で最大値をとる高精度CMMの結果の傾向とほぼ一致している。また、図7から傾きの積分値の結果は、0~0.1mの位置で一定でその後0.3mの位置で最大値をとる電気水準器の結果の傾向とほぼ一致している。これらはそれぞれの測定メカニズムが一致しているためと思われる。周波数特性は、重心位置の場合には摺動体長さに相当する周波

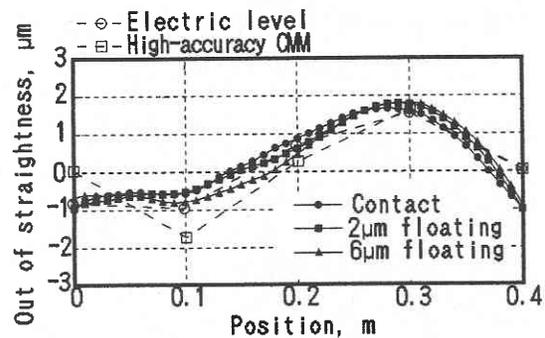


(a) 重心位置の軌跡

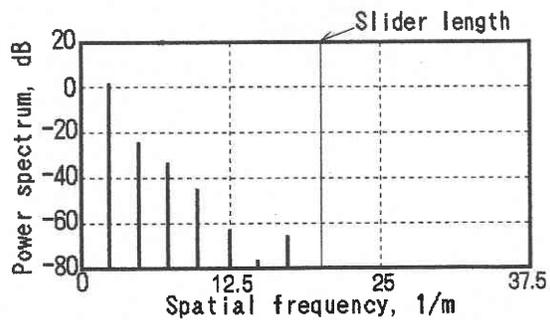


(b) 周波数特性

図6 摺動体重心位置の軌跡



(a) 傾きの積分値



(b) 周波数特性

図7 摺動体傾きの積分値

研究速報

数8 [1/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、摺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える。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。

3. 結 言

CMM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摺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、本研究ではその第一ステップとして、摺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) 試作した測定系の鉛直方向変位の最小読み取り精度は45nm、角度の最小読み取り精度は0.28mradであり、繰り返し精度は0.16 μm であった。
- (2) 摺動体の運動の測定結果は、電気水準器および高精度CMMによる定盤表面の真直度測定結果と良好な一致を示すことを確認した。また、測定は摺動体を空気浮上させた状態で行えることが判った。
- (3) 摺動体の重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摺動体長さよりも大きな波長成分のみを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賜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湖昌平君および本研究を遂行するに際して多大な御協力を頂いた(株)ミットヨの関係各位に深謝する。

(1995年12月26日受理)

参 考 文 献

- 1) 大矢・谷藤, 日本機械学会論文集 (C編), 57-535 (1991-3) 1040.
- 2) 古谷他, 精密工学会誌, 57-8 (1991) 1449.
- 3) 大矢, 日本機械学会論文集 (C編), 58-546 (1992-2) 454.
- 4) 中村他, 精密工学会誌, 58-11 (1992) 1899.
- 5) 薛他, 精密機械, 50-3 (1984) 556.
- 6) 沢辺, 機械技術, 39-11 (1991-10) 17.
- 7) 田中・佐藤, 日本機械学会論文集 (C編), 48-436 (1982) 1930.
- 8) 垣野他, 精密機械, 48-2 (1982) 239.
- 9) 田村他, 計測制御, 25-5 (1989) 509.
- 10) 清野他, 精密工学会誌, 57-4 (1991) 652.
- 11) 上村他, 日本機械学会論文集 (C編), 59-557 (1993-1) 105.