高精度な直線運動に関する研究 (第2報)*

— 3 自由度制御直動システム —

青 山 尚 之** 下 河 辺 明**

Development of a High Precision Straight Motion System (2nd Report)
—Control of Three Degrees of Freedom of Straight Motion—

Hisayuki AOYAMA and Akira SHIMOKOHBE

A machine slide has five degrees of freedom, two of translation and three of rotation, when it moves along a guideway. Corresponding to these, there are five kinds of straight motion errors, those are the errors of the vertical and horizontal positions and those of the pitch, roll and yaw angles. In the system, a steel block is floated by some air pads. The block and pads are mounted on a conventional mechanical sliding table. The straight motion errors of the block are detected by some optical and electronic devices and then the block is controlled in its positions and angles by changing the supply pressure to the air pads. Thus only the block moves straightly. In this report, three degrees of freedom, i. e. the vertical position, pitch and roll angles, of the block are controlled. The working length of the system is 600 mm. The error of the vertical position against the straight edge is less than $0.05 \mu\text{m}$ and changes of the pitch and roll angles are less than 0.2 sec of arc .

Key words: straight motion, air pads, sliding table, pitch angle control, roll angle control, vertical position control

1. 緒 言

直線案内機構を有する精密測定機械や精密工作機械において、移動部の直線運動精度はその機械の測定精度や加工精度を決定する上できわめて重要である。例えば、xyz 型の三次元測定機では、その移動部の直線運動誤差が測定結果に大きく影響を及ぼし¹⁾、また超精密加工技術においてもこれを実現するための要件の一つに、直線移動部の高精度化があげられる。しかし従来の機械式の案内機構では、その案内面の幾何学的な形状誤差、摩擦、荷重による変形などのため、その直線運動精度を高めることは困難である。

そこで高精度な直線運動を実現する方法として、案内機構とは独立に高精度な基準直線を設け、この直線に沿って移動する物体の移動方向を除く 5 自由度 (移動方向に直交する平面内における 2 自由度の位置およびピッチ、ロール、ヨー方向の 3 自由度の角度姿勢) に関する直線運動誤差を検出、補正する方法が考えら

れる。

これらの誤差を高精度に補正する方法には、静圧²⁾やピエゾ素子³⁾を用いる方法があげられる。

本論では摩擦、清浄さなどの観点から、静圧空気によって物体を保持し、その静圧すきまを変化させて物体の動きを高精度に制御できる機構を開発し、これを従来の機械式すべり案内の案内テーブル上に取りつけた新しい形式の直動システムについて述べる。

前報⁴⁾では、この新しい形式の直動システムの構成と原理について述べ、物体の上下方向位置、ピッチ方向の角度姿勢の 2 自由度に関する誤差を検出、補正した結果を述べた。さらにこの直動システムの高精度化と 5 自由度制御を目標に、物体の 3 自由度 (上下方向位置、ピッチおよびロール方向の角度姿勢) に関する誤差を検出、補正するように拡張した。本報では、拡張したシステムの構成と計測、制御原理および制御特性、直線運動特性について述べる。

2. 直動システムの構成と計測、制御原理

2.1 直動システムの構成

図 1 に直動システムの構成図を示す。従来の機械式すべり案内のテーブル上で、直方体の鋼製ブロックを、

* 原稿受付 昭和 59 年 6 月 2 日。昭和 59 年度精機学会春季大会学術講演会 (昭和 59 年 3 月 25 日) にて発表

** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所 (横浜市緑区長津田町 4259)

Fig. 1 The straight motion system

まわりに配置したパッドの静圧すきまによって非接触に浮上、保持している。これらのパッドは、ブロックの周囲8か所と下側3か所に図1のように配置されている。周囲8か所に配置したパッドには一定圧（0.4 MPa）の空気を供給し、また下側3か所に配置したパッドには、それぞれサーボバルブを介して空気を供給している。これら下側3か所のパッドへの供給圧を変えてすきまを変化させると、ブロックの上下方向位置とピッチおよびロール方向の角度姿勢を制御することができる。

図1に示すようにすべり案内の上方に、全長600 mmの2本の直定規を案内テーブルの移動方向と平行になるように設置している。これらの直定規に対するブロック上の2点の上下方向変位を、ブロックに取りつけた静電容量形変位計で検出し、ブロックの上下方向の位置誤差とロール方向の角度姿勢変化を後述のように求めている。なおピッチ方向の角度姿勢変化は光電式オートコリメータで検出している。

案内テーブルを移動させると、案内テーブルとブロックは基準直線に対する位置と角度姿勢が変化しながら移動する。この位置と角度姿勢の変化を前述の測定器で検出し、それに応じてパッドへの供給圧を変化させ、ブロックのみの位置と角度姿勢を一定に保つことが本システムの原理である。

2.2 直線運動誤差の計測原理

図2にパッドとブロック機構の模式図を示す。ただし周囲に配置した8個のパッドは省略されている。ブロックは、一辺 $2L$ （本実験では $L=60$ mm）の正三角形形状に配置された3個のパッドによって浮上保持されている。ブロックのピッチ方向の角度姿勢変化 θ は前述したように光電式オートコリメータで検出している。上下方向の位置誤差 z とロール方向の角度姿勢変化 ϕ は次のように計測している。

図2に示すように2本の直定規に対するブロック上2点の上下方向変位を2個の静電容量形変位計で検出する。本実験では変位計（直定規）の間隔を $8/3 L$ とし、しかも測定点 P_m と P_n を結ぶ線分の中点 P_g がブロック重心の真上となるようにしている。測定点 P_m, P_n での上下方向変位 z_m, z_n からブロック重心の上下方向の位置誤差 z_g とロール方向の角度姿勢変化 ϕ を次のように計算する。

$$z_g = \frac{1}{2}(z_m + z_n) \quad (1)$$

$$\phi = \frac{3}{8L}(z_m - z_n) \quad (2)$$

厳密には重心と測定点が離れているため、 z_g, ϕ には角度姿勢変化 ϕ, θ の影響が含まれるが、 ϕ, θ は微小なため、その影響はないとする。

2.3 制御原理

図3にこの制御系ブロック線図を示し、表1に制御系各定数の値を示す。前報で述べたが、本実験では（サーボアンプ）-（サーボバルブ）-（パッド）-（ブロック）を一つの系として取り扱っている。またそれぞれのパッドでのすきまを単独に変化させても他のパッドでのすきまは変化しない、すなわち各パッドにおけるすきまの変化は互いに独立であるとしている。さらに、静電容量形変位計を、その応答が極めて速いために比例要素として扱い、光電式オートコリメータを、その特性を実験的に調べて2次遅れ要素として扱っている。

ブロックの位置と角度姿勢の制御方法は、次のようにできるだけ制御回路が簡単で、各成分の動きが干渉しないよう考慮している。図2に示すパッドとブロックすきまの変化 h_1, h_2, h_3 と、 z_m, z_n および θ との関係は次式で与えられる。

Fig. 2 Principle of the system

Fig. 3 Block diagram of the system

Table 1 Control constants

K_1	0.93 v/v
K_2	0.0048 v/v
K_3	0.43 v/v
K_b	12.5 $\mu\text{m/v}$
K_m	0.10 v/ μm
K_a	1.0 v/sec of arc
ω	31.4 rad/s
L	60 mm
ζ	0.3
T_1	0.02 s
T_2	0.15 s

$$\begin{bmatrix} z_m \\ z_n \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & 1 & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3}L} & -\frac{1}{2\sqrt{3}L} & -\frac{1}{2\sqrt{3}L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

さらに、 z_m, z_n と z_g, ϕ の関係は式 (1), (2) より次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} z_g \\ \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{3}{8L} & -\frac{3}{8L} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_m \\ z_n \\ \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

従って式 (3), (4) より h_1, h_2, h_3 と、 z_g, ϕ, θ との関

係は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} z_g \\ \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{2L} & -\frac{1}{2L} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{2\sqrt{3}L} & -\frac{1}{2\sqrt{3}L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

図 3 で各成分の偏差 E_z, E_ϕ, E_θ に対して変化させるべき量の h_1, h_2, h_3 を次式で表す。

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = D \begin{bmatrix} E_z \\ E_\phi \\ E_\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

各制御量の間の干渉をなくすためには、 $[K_1, K_2, K_3]$ を各制御量に関する比例ゲインとして、偏差 $[E_z, E_\phi, E_\theta]$ と制御量 $[z_g, \phi, \theta]$ の関係が次式のように表せなければならない。

$$\begin{bmatrix} z_g \\ \phi \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 & 0 \\ 0 & 0 & K_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_z \\ E_\phi \\ E_\theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

このためには式 (5), (6) より D は

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{2\sqrt{3}L}{3} \\ 1 & L & -\frac{\sqrt{3}L}{3} \\ 1 & -L & -\frac{\sqrt{3}L}{3} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fig. 4 Indicial responses of the system

となる。

なお図3では式(8)を式(9)のように変形して E_θ , E_ϕ に対する比例ゲイン L , $\sqrt{3}L/3$ を, それぞれの制御系の比例積分要素のゲイン K_2 , K_3 に含めた形で示している。

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 2 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sqrt{3}L}{3} \end{bmatrix} \quad (9)$$

また各成分の制御系には, 定常位置偏差をなくすため積分要素を付加している。

3. 制御特性

3.1 インディシャル応答

図4にこの制御系のインディシャル応答を示す。同図(a), (b)および(c)はそれぞれブロックの上下方向の位置, ピッチおよびロール方向の角度姿勢の目標値にステップ入力を与えた場合である。制御に要する時間は, 上下方向の位置は $0.2 \mu\text{m}$ のステップ量で約 0.2 s , ピッチおよびロール方向の角度姿勢は 1° のステップ量でそれぞれ約 0.4 s , 約 0.2 s である。また一つの成分の応答が他の成分の動きにわずかに干渉している。これは各パッドにおけるすきまの特性が完全に一致していないためと考えられる。また上下方向位置とロール方向の角度姿勢の記録に見られる微小な振動は, 前報で述べたように, ブロックの

質量と静圧すきまの剛性による固有振動である。

3.2 周波数特性

図5はこの制御系の各目標値にそれぞれ振幅 $0.2 \mu\text{m}$, 1° , 1° の正弦波状の信号(周波数 1 Hz)を与えた場合である。いずれも他の成分の動きに干渉していない。これはそれぞれの成分の制御系がこの程度の入力周波数には十分対応しているためだと考えられる。

図6にこの制御系各成分の閉ループ周波数特性を示す。上下方向位置とロール方向の角度姿勢のバンド幅は, それぞれ約 5 Hz , 約 7 Hz である。これらの成分の検出には静電容量変位計を用いているが, 制御系のループゲインが少し違うためこのようにそれぞれのバンド幅が異なっている。またピッチ方向の角度姿勢のバンド幅は約 3 Hz である。他の2成分と比べそのゲイン, 位相特性がかなり異なっているが, これはオートコリメータの応答周波数が数 Hz と低いためである。

3.3 外乱に対する応答

図7にこの制御系の外乱に対する応答を示す。ブロックの位置と角度姿勢を制御している状態で質量 1.5 kg のおもりによって約 15 N の外乱力を与えている。同図(a), (b)は図2のA点, B点に外乱力を与えた場合の結果である。いずれもこの程度の外乱に対して制御系が十分対応していることを示している。

Fig. 5 System responses to the sinusoidal input

Fig. 6 Frequency characteristics of the system

Fig. 7 Responses to load disturbances applied to the points A and B in Fig. 3

4. 直線運動特性

4.1 直線運動を制御しない場合

図8はブロックの3自由度の動きを制御しない場合の直線運動誤差を示している。2本の直定規に対する上下方向の位置誤差とロール方向の角度姿勢変化はそれぞれ約 $4\mu\text{m}$ 、約 $10''$ である。またピッチ方向の角度姿勢変化は約 $6''$ である。

4.2 直線運動を制御した場合

図9にブロックの3自由度の動きを制御した場合の直線運動誤差を示す。ブロックの移動速度は 100 mm/min で、移動距離は 600 mm である。また送りねじの振れ回りやナットの振動の影響をできるだけ除去するため、案内テーブルとナットを防振ゴムを介して連結

Fig. 8 Free straight motion of the system

している。

同図(a)はブロックが停止している場合で、同図(b), (c)はそれぞれ往路と復路である。ブロックが停止している場合に比べてブロックが移動している場合の方が直線運動精度が低下している。これは、案内テーブルを駆動する時に発生する送りねじの振れ回りやナットの振動によるためである。

図10にブロックの移動速度を変えた場合を示す。同図(a), (b)は移動速度が 50 mm/min と 250 mm/min である。この結果、できるだけ低速でブロックを移動させる方が駆動系で発生する振動が少なく、直線運動精度も向上していることがわかる。

4.3 直線運動の制御の限界

図11はブロックの移動速度が 50 mm/min の場合をさらに拡大した記録である。同図(a)はブロックが停止している場合で、浮上ブロックの振動や測定器の性能を含めこのシステムで制御できる限界を示している。各成分の精度をその記録紙上の振動の幅で評価すると、上下方向位置については、約 $0.05\mu\text{m}$ である。静電容量形変位計の高速応答性と分解能が $0.01\mu\text{m}$ 以下であることを考えると、前報で述べたようにこれはブロック質量と静圧剛性による固有振動である。 $0.05\mu\text{m}$ が機構の位置決め精度の限界と言える。またロール方向の角度姿勢に関する精度は、約 $0.2''$ である。ロール角の変化は2本の静電容量形変位計の測定値の差から求めているため、この値はブロックのロール方向の振動であると考えられ、この機構の精度限界であると言える。

またピッチ方向の角度姿勢に関する精度は約 $0.15''$ である。ピッチ角の変化はオートコリメータで検出し

Fig. 9 Controlled straight motion of the system with the improved nut
Block velocity : 100 mm/min

Fig. 10 Controlled straight motion of the system

Fig. 11 Enlarged records of the straight motion

ているが、その応答周波数が数 Hz と低いため、ブロックの振動などは検出されない。図 11 の振動はオートコリメータの電源ノイズおよび空気の流れによる出力変動であり、ピッチ方向の精度はオートコリメータの測定精度や空気の流れに支配されている。

同図 (b) はブロックを移動させた場合であるが、ほぼ上述の限界レベルまでブロックの直線運動が制御されていることがわかる。

4.4 レーザ真直度測定システムによる測定

図 12 はブロックの上下方向の位置誤差を HP 社製のレーザ真直度測定システムで測定した結果である。

同システムの干渉プリズムをブロック重心の真上で、2 本の静電容量形変位計の測定点の中央に設置している。従って上下方向に関して制御される点とレーザ測定システムで測定される点は一致している。

同図 (a) はブロックの直線運動を制御しない場合で、誤差が往路と復路で異なっている。これは往路と復路とで案内面上の油膜による動圧の効果が異なり、案内テーブルの位置と角度姿勢が違っているためだと考えられる。同図 (b) はブロックの直線運動を制御した場合で、図 (a) に比べて往路と復路の誤差の違いはほとんどない。このことはブロックが直度規に忠実に

Fig. 12 Straight motion error of the system (vertical position measured by a laser measurement system)

倣って移動していることを示している。しかし往路と復路とで誤差は完全には一致していないが、この理由は明らかではなく、今後の検討課題の一つである。この場合上下方向位置の直線運動精度は約 $2\ \mu\text{m}$ であり、これは2本の直定規の真直度誤差に由来する。従って、より高精度な基準直線を用いる必要があると言える。

5. 結 言

本論文で得られた結果を以下に要約する。

- (1) ブロックの3自由度に関する直線運動誤差(上下方向位置, ピッチおよびロール方向の角度姿勢)を検出, 補正できるように拡張した直動システムの構成と計測, 制御原理を示した。

- (2) 制御系の特性を調べ, 各成分相互間の動きの干渉, 各成分制御系のバンド幅, 外乱力に対する応答などを明らかにした。

- (3) 直動システムの直線運動特性を調べて次のことを明らかにした。

- (i) ブロックの移動距離が 600 mm, 移動速度が 50 mm/min の場合, その直線運動精度は基準に対し, 上下方向の位置が $0.05\ \mu\text{m}$, ピッチおよびロール方向の角度姿勢がそれぞれ $0.15''$, $0.2''$ である。

- (ii) レーザ真直度測定システムで測定した結果, 上下方向の位置の精度は約 $2\ \mu\text{m}$ である。

今後さらに5自由度すべてに関する誤差を検出, 補正できるようにこのシステムを拡張するとともに, より高精度な基準直線に対する直線運動誤差の検出方法を検討する。終わりに, 本装置の製作に御協力いただいた東京工業大学精密工学研究所機械工場の羽太芳朗助手を始めとする皆様に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 薛 軍, 大園成夫, 高増 潔: 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.
- 2) 金井 彰, 野村武彦, 宮下政和: 静圧空気軸受のすきま制御による微細位置決め機構, 昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1981) 1057.
- 3) 森山茂夫, 原田達男, 高梨明紘: 圧電素子アクチュエータ駆動機構を備えた超精密 X-Y 移動台, 精密機械, 50, 4 (1984) 718.
- 4) 下河辺 明, 青山尚之: 高精度な直線運動に関する研究, 精密機械, 50, 6 (1984) 986.

事務局便り

編集のスピードアップに ファクシミリを設置

「精密機械」の裏表紙を見るとおわりのとおり, この会誌の印刷所は長野市川中島にあります。この印刷所とのおつき合いは, かつて学会誌の印刷単価がぐんぐん値上がりし, 財政上困っていた昭和52年1月に始まります。東京営業所の担当の人が毎日ここに来て, 1日1回東京・長野間を往復する急行便を使って, やりとりするシステムになっています。

もともと私の仕事が遅いせいなのか, 今年1月号から

会誌の発行が大幅に遅れ, そのうえ無様なミスもおかしています。会誌本文の割付・校正を1人で手掛けるようになってから長年月経ちますが, この泥沼は初めてで, 皆様には誠に申し訳なく, また恥ずかしさの限り恥ずかしく存じております。ご海容をお願い申し上げます。なお, 今年に入ってから, 割付や校正を印刷所に手伝ってもらうことにしました。近い将来その効果が現れることを期待しています。

立て直しについて印刷所の協力を仰ぎ, 検討を進めております。方策の1つとして, 印刷所の好意もあり, ファクシミリを事務局に備えることになりました。

また, 編集に関する事務の方も, 幸い校閲委員会, 欧文誌編集委員会等担当の門野と, 忙しいときに来て手助けしてくれる方の協力もあり, 遅れの解消に努めています。

編集課・相米秀彦