

## 研究の課題名

# 超高速・高精度サーボ弁の開発とこれを用いた 静圧軸受形空気圧x-yテーブルの駆動

東京電機大学工学部 助教授

報告者 藤田 壽 憲

報告日 2005年(平成17年)11月3日

## 1. 本研究の意義、特色

これまで精密位置決めには電動モータが使用されてきたが発熱や推力不足などにより限界に近づいている。このような背景から、静圧軸受を利用することにより低摩擦を実現し精度を向上させ、発熱もない新しいタイプの空気圧サーボテーブルを先に提案した。しかしながら、ナノ・マイクロテクノロジーの進展により、提案したアクチュエータでは精度の面で十分ではない。そこで本研究では、精度向上のためにサーボ弁をデジタル制御化することにより高性能化し、これによりサーボテーブルの制御性能向上させることを目的とする。

## 2. 実施した研究の具体的内容、結果

### 1) デジタル化した空気圧サーボ弁の試作

本研究で提案・試作したデジタル制御形サーボ弁の構造を図1に示す。スプール弁を電流一力の線形特性がよいボイスコイルモータで駆動するタイプのものである。このサーボ弁を高性能化するために①マイコンによる制御、②高精度変位センサ、③静圧軸受構造を採用した。

一般にサーボ弁のフィードバック制御は、電流ループ、速度ループ、位置ループから構成されている。市販されているサーボ弁では、これらを全て電子的アナログ回路により実現している。これに対して本研究では速度および位置ループの制御をマイコンによりデジタル制御化した。電流ループについては、サンプリング時間の観点からオペアンプを用いたり

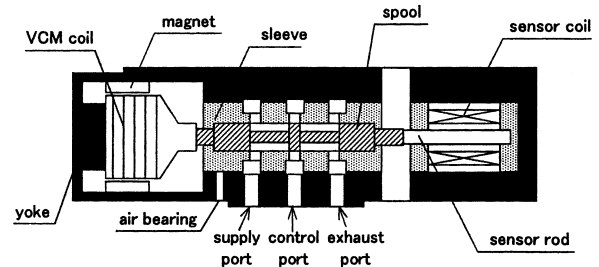


図1 提案・試作した高性能サーボ弁の構造

ニアンプを製作しアナログ制御のままとした。電流ループは10[kHz]において位相遅れが10度以下とし可能な限り高速にした。デジタル制御化のもうひとつのメリットとして、デジタル出力の高分解能な位置センサを使用できることがある。本サーボ弁では分解能0.128[ $\mu\text{m}$ ]の磁気誘導式センサを使用した。この分解能は、従来、スプールの検知に用いられてきた作動トランスに比べ10倍以上もあり、検出能力を飛躍的に向上させることが出来た。さらにスプールには表面絞りタイプの静圧軸受を構成し、動作時に非接触状態で駆動可能とした。

制御器であるマイコンには高速なDA、IOボードを備えたDOS/Vパーソナルコンピュータを使用した。またリアルタイム性を確保するためにOSにはRT-Linuxを採用し、制御アルゴリズムはC言語を用いて実現した。

### 2) 高速・高精度化のためのサーボ弁制御手法の検討

サーボ弁をマイコン制御する場合、アルゴリズムを計算するために必要な時間があり、こ

のむだ時間が問題となる。これを離散時間制御系の状態方程式に表すと、状態量は位置と速度のほかに、1サンプリング遅れた制御入力加わる。そこで、計算遅れによるむだ時間を補償するために、この制御入力に対してもフィードバックを行う制御アルゴリズムを適用することとした。フィードバックゲインは得られた状態方程式に基づき極配置により決定した。

流体力に関しては、最大で $20\mu\text{m}$ 程度、精度にして2%の定常偏差を発生することがわかった。この補償には外乱オブザーバを用いた。外乱オブザーバの設計も基本的に離散時間系として取り扱い、速度のオブザーバと併合した形で構成した。このとき外乱オブザーバの効果を定めるフィルタは極で指定することが可能である。速度オブザーバの極は変位センサの分解能により決まる。これらはサーボ弁の過渡応答を観測しながら実験により試行錯誤で決定した。以上の制御アルゴリズム実現したとき、コントローラのサンプリング周波数は10 [kHz]

となった。安定性が保たれる中で最も高速な場合のサーボ弁の応答周波数を図2に示す。ひとつの極は十分、速く設定し、残りの極は適当なダンピングを持たせ300Hzに設定した。ほぼ理論設計通りの応答を示していることがわかる。応答帯域は300 [Hz] であり、先に、使用した市販サーボ弁のそれが約100 [Hz] であったことを考えると、かなり高速であると言える。応答が300 [Hz] に制限される理由を調べたところ、変位センサの遅れにあることがわかった。またデータとしては示さないが、計算機むだ時間の補償効果も補償しない場合との比較によって確認できた。サーボ弁の精度を示す静特性を図3に示す。流体力を受けているにもかかわらず、ヒステリシスは見られず精度もセンサ分解能の範囲内となり、精度0.01%を実現できた。精度面では約100倍の向上が見られた。またセンサ分解能と同程度の微小操作が可能であることも明らかになった。変位センサが改善されれば、まだまだ高速化が可能で、目標とする高性能サーボ弁がほぼ実現することができた。

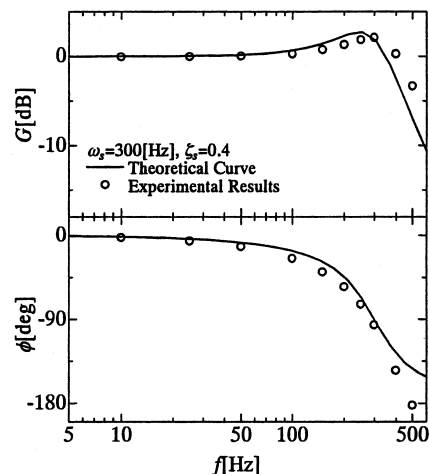


図2 サーボ弁の周波数特定

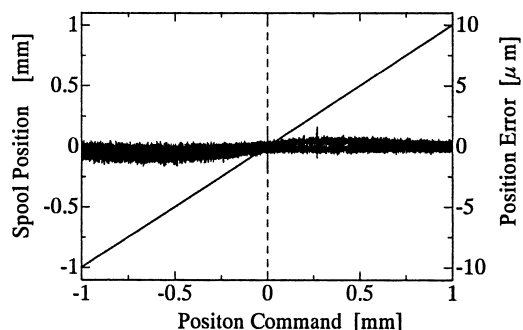


図3 サーボ弁の静特性

### 3) コンパクト化を目指したテーブルの設計・試作

本研究で製作したテーブルの構造を図4に示す。当初、X-Yテーブルを製作する予定であったが、製作費の問題からX軸のみのシリンダ構造とした。一軸であるためコンパクト化の検討は行わず、ほぼ以前のアクチュエータの構造と同じとなったが、静圧軸受の支持力や、ピストンの位置センサにおける分解能の向上を図った。以下に、その概要を記す。シリンダはピストンとチューブ本体から構成されており、ピストンにより駆動室、排気室、定圧室とに仕切られている。定圧室は供給圧力と同じ圧力に保た

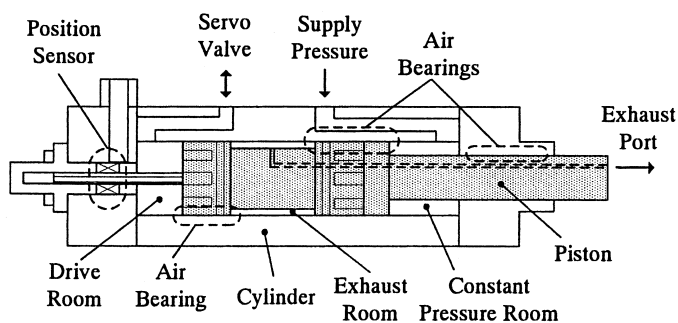


図4 試作した静圧軸受形テーブルの構造

れ、排気室の空気はピストンに開けられた孔を通して外に排気されるので大気圧となる。したがって駆動室および定圧室の圧力は排気室より高く、駆動室から排気室に微小の空気が流れることになる。このときピistonには表面絞り形の静圧軸受が設けられているので、静圧軸受によりピistonが浮上する。ピistonに取り付けられているフィードバック用のピiston変位センサは、非接触な取り付けが可能である磁気誘導を利用したデジタルセンサを使用した。その分解能は $0.25[\mu\text{m}]$ である。

この状態において駆動室の空気をサーボ弁により流し入れさせることにより、駆動室と定圧室の間に圧力差を摩擦のない完全に非接触なサーボアクチュエータが実現できる。図5に本研究で製作したサーボ弁を含むアクチュエータの概観の写真を示す。アルミ合金製であり、全体の大きさは $213 \times 48 \times 88[\text{mm}]$ である。またシリンダボア径は $20[\text{mm}]$ 、ストロークは $20[\text{mm}]$ でありピistonロッド径は $14[\text{mm}]$ の角型、質量は約 $100[\text{g}]$ である。供給圧力は $0.4[\text{MPa}]$ とした。

#### 4) 空気圧サーボテーブルのための制御法の確立

このシリンダを高性能化したサーボ弁を用いてシリンダを駆動した結果を図6に示す。制御方法は従来と同じ位置、速度、加速度をフィードバックするアルゴリズムとした。シリンダの制御マイコンはサーボ弁と同一のパソコンで行っている。 $\pm 5[\mu\text{m}]$ の微小なステップ指令に対し、正確に responding していることがわかる。この位置精度はどの位置においても実現できた。分解能はサーボ弁の特性は $\pm 2[\mu\text{m}]$ と、従来の5倍程度の位置決め精度向上が認められた。図7にステージの周波数応答を示す。入力振幅はサーボ弁が飽和しない範囲で、振幅 $1.5[\text{mm}]$ の正弦波で駆動した。 $50[\text{Hz}]$ で位相遅れが $30$ 度であり、動特性についても従来の2倍以上も向上していることが明らかになった。

この制御系設計においては、従来と同様にサーボ弁の動特性は十分速いと仮定しステージの伝達関数は3次系として扱っているが、厳密にサーボ弁の特性を含めると5次系となり、本シリンダのような高速応答するものに対しては仮定が成立しなくなると考えられる。そこで、もうひとつの本研究の目的としているサーボ弁特性を含めたテーブルの制御手法について検討している。サーボ弁制御マイコン化したメリットとして、制御マイコンが同一となる、と同時にサーボ弁変位と指令値という制御情報が活用することにより、サーボ系全体の制御性が向上できることにある。そこでサーボ弁の限界応答周波数があると仮定して、サーボ弁特性を含めた制御系設計を行う方法を提案した。シミュレーションではあるがその妥当性を確認した。今後、ステージの制御に適用し、その効果について検証する予定である。

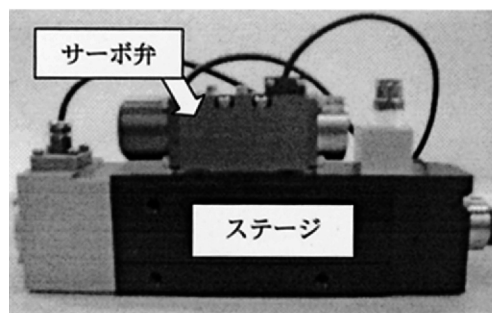


図5 試作した静圧軸受形テーブルの概観

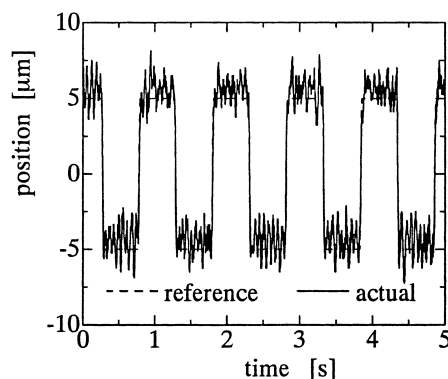


図6 ステージのステップ応答

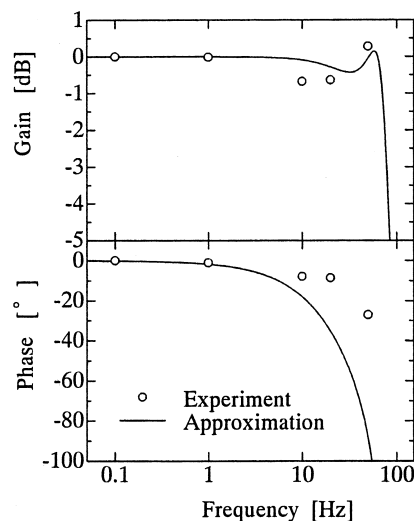


図7 ステージの周波数応答

以上、得られた結果をまとめると、サーボ弁をマイコンによるデジタル制御化により高性能化した。このサーボ弁により駆動し、テーブルの高速・高精度化も確認できたことから、第一研究目的は達成できた。第二の目的である二軸化は実現できなかったが、一軸を基本とするため、本研究で得られたデータから二軸化したときの性能も保証される。したがって、研究の目的の大部分が達成できたと言える。

### 3. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

榊 和敏 住友重機械工業株式会社 主席技師  
佐々木勝美 ピー・エス・シー株式会社 代表取締役

### 4. 研究実施時期

平成15年4月から17年10月まで

### 5. 本研究に関連して発表した主な論文等

- (1) Improvement of Pneumatic Servo Table Characteristics Using Pneumatic Precise Position Controllable Servo Valve, Proc. of IFPE2005, 459/464 (2005)
- (2) Development of Pneumatic High Precision Position Controllable Servo Valve, Proc. of IEEE/CCA, 1159/1164 (2004)
- (3) Development of Pneumatic Digital Controlled Servo Valve With High Precision and Speed, Trans. ASME (投稿準備中)
- (4) 静圧軸受を用いた空気圧サーボテーブルの消費流量に関する考察、産業応用論文集 (掲載予定)

### 6. 内外における関連研究の状況

サーボ弁に関する研究も、Xiang(浙江大)らなどにより行われているが、新しい駆動原理・構造を狙ったものが中心である。したがって、性能面では現状のサーボ弁以下である。一方、空気圧アクチュエータの位置決め的高速・高精度化は、フィードバック制御に高度なアルゴリズムを導入する方法が引き続き中心である。近年では、例えば木村(長岡)は $H^\infty$ 制御を、田中(山口大)はニューラルネットワークを用いて高精度化を試みているが、結果として精密位置決めには至っていない。またサーボ弁特性に着目して、空気圧サーボ制御を考える研究は全く皆無である。

### 7. 今後の発展に対する希望

本研究により、10～100ナノ程度の位置決めが実現できる目処ができたが、本研究を進める過程において、それ以上の精度はサーボ弁のラップ領域の特性が位置決めに重要であることがわかってきた。したがって本研究で提案したサーボ弁の高性能化と制御手法の改善だけでは数ナノ単位の位置決めは困難であると予想される。そこで今後は、ラップ特性と位置決め精度の観点から研究を行うと同時に、ナノ・サブナノ位置決めの実現に向けて、電動モータで見られるような粗微動のアクチュエータを備えた空気圧シリンダの開発を考えている。