研究論文

電気・空気圧複合駆動システムとその制御法に関する研究*

中 田 毅**, 桜 井 康 雄***, 田 中 和 博****

A Study of an Electric-Pneumatic Hybrid Drive System and its Control Methods

Takeshi NAKADA, Yasuo SAKURAI, Kazuhiro TANAKA

This paper deals with the proposal of an electric-pneumatic hybrid drive system composed of an AC servomotor and a pneumatic cylinder type actuator, and its control methods. The rotational movement of the AC servomotor is transformed into the linear movement through a ball screw that is placed in the piston, and this hybrid drive system can be operated in the direction of gravitational force. Three control methods such as a pressure compensated control, a torque control and a hybrid control that combines both control methods are proposed from the view point of the reduction of the driving torque of the AC servomotor. The basic characteristics of the hybrid drive system are investigated by the experiment relating to the three control methods when the inertial mass moves vertically upwards and downwards during one cycle. Each control method is effective in reducing the driving torque of the AC servomotor and the views on the reduction of the driving torque of the AC servomotor in each control method are described.

Key Words : Actuator, Pressure control, Torque control, Feedback control, Control method, Electro-pneumatic hybrid drive system, Hybrid control

1. 緒 言

電気アクチュエータは応答性が高く、高精度な制御が容易であり、また空気圧アクチュエータは安価で、出力重量比が大きく、高速駆動が可能であるなどの利点があり、一般産業分野や科学技術分野における様々な駆動システムのアクチュエータとしてそれぞれ広く利用されている。しかし、電気アクチュエータは保持力が小さく、高出力を求めると重量が大きくなりがちであり、垂直方向駆動システムに用いると負荷を保持するためには多くの電力を消費するという問題が指摘¹⁾されている。一方、空気圧アクチュエータは空気の圧縮性により高精度制御が難しいなどの欠点がある。近年、省エネルギーで小形・高性能な駆動システムの実現が強く求められており、その実現に向けて電気アクチュエータと空気圧アクチュエータの利点を生かし、それぞれの欠点を補完する電気・空気圧複合駆動システムの研究・開発が進められている。

伊藤²⁾は、空気圧シリンダのピストンをボールねじ駆動する電動方式の垂直駆動装置の概念を提示し、それに基づき具体的提案と試作を行っている。武村ら³⁾は、空気圧モータと電動モータを組み合わせたハイブリッドモータを提案し、出力重量比と停止位置精度の観点から、その設計法と制御方法を論じている。田中ら⁴⁾は、直動型空気圧アクチュエータとワイヤ・プーリにより直線運動が可能な変換機構を備えた電動モータから構成される垂直方向直線駆動型アクチュエータの試作と周波数応答実験による性能評価を行っている。

このような背景の下本研究では、空気圧シリンダと、ピストン内に設置されたボールねじにより直線運動が可能な変換機構を備えた同期型ACサーボモータ(以下、ACモータ)を組み合わせた垂直方向の直線駆動型電気・空気圧複合駆動システム(以下、複合駆動システム)を提案・試作し、ACモータのトルクを低減してACモータの小型化を図るという観点から、当該複合駆動システムの制御法として圧力補償制御、トルク制御およびそれらを併用した複合制御を提案し、実験により各制御法の有効性と特長を明らかにする。

主な記号

k_p : 圧力-電-空レギュレータ入力電圧換算係数
 k_t : トルク-電-空レギュレータ入力電圧換算係数
 $P_h(t)$: 保持圧力
 t : 時間
 t_u : 負荷質量加算時刻

* 平成19年6月4日 原稿受付

** 東京電機大学情報環境学部情報環境学科

(所在地 〒270-1382 千葉県印西市武西学園台2-1200)

(E-mail: nakada@sie.dendai.ac.jp)

*** 足利工業大学工学部機械工学科

(所在地 〒326-8558 栃木県足利市大前町268-1)

(E-mail: ysakurai@ashitech.ac.jp)

**** 九州工業大学情報工学部機械情報工学科

(所在地 〒820-8502 福岡県飯塚市川津680-4)

(E-mail: kazuhiro@vortex.mse.kyutech.ac.jp)

Fig. 1 Electric-pneumatic hybrid drive system

t_d : 負荷質量除去時刻

V_p : 保持圧力による電-空レギュレータ入力電圧

V_T : トルク制御系による電-空レギュレータ入力電圧

$\tau_{AC}(t)$: AC モータの出力トルク

$\tau_c(t)$: トルク制御系の目標値

2. 複合駆動システムの構成と実験装置

提案・試作した複合駆動システムは速度指令同期型 AC モータ駆動系と空気圧駆動系を複合化した駆動システムであり、工業的によく使用される垂直方向（重力方向）に負荷質量を駆動するシステムを対象としている。図 1 に試作した実験装置の概略を示す。AC モータ駆動系は速度ループゲイン、速度ループ積分時定数および位置ループゲインを指定できるフィードバック制御系で構成されており、専用のサーボパックによって駆動制御が行われる。AC モータの回転数はロータリーエンコーダにより、またトルクは AC モータを流れる電流から換算して求められる。AC モータの回転運動はピストン内に設置されたボールねじにより直線運動に変換される。空気圧駆動系は片ロッドシリンダを用い、ロッド側に設置された電-空レギュレータによってロッド側圧力が制御される。また、シリンダヘッド側は常に大気圧に開放されている。従って、複合駆動システムは AC モータ駆動系および空気圧駆動系によって、それぞれ単独あるいは両者を協調的に複合して駆動できるようになっている。両駆動系の主な仕様は以下のとおりである。

① AC モータ駆動系

- 定格電力 100 (W)
- 定格トルク 0.32 (Nm)
- 瞬時最大トルク 0.96 (Nm)
- 定格回転速度 3000 (rpm)

② 空気圧駆動系

- 供給圧力 0.5 (MPa)
- シリンダ内径 63 (mm)
- ピストンロッド径 25 (mm)

Fig. 2 Basic piston travel

- ピストン最大ストローク 400 (mm)

- ボールねじリード 10 (mm)

本研究で用いた基本的なピストン行程は図 2 のようである。初期負荷質量はピストン自体の質量を含めて 14.2kg であり、ピストン上昇行程においては初期位置から 100mm 上昇した位置で一旦停止し、つぎに 30kg の負荷質量が加算されて、さらに 100mm 上昇した位置で停止する。下降行程においてはこの停止位置から 100mm 下降した位置で一旦停止し、つぎに上昇行程で加算された 30kg の負荷質量が除去され、初期負荷質量のみとなってさらに 100mm 下降し、もとの初期位置で停止する。シリンダのロッド側には、図 1 中の電-空レギュレータを用いて初期負荷質量の重力とピストン・シリンダ間の静止摩擦力に釣り合うような圧力（保持圧力：0.05MPa）を予め与えている。また、以下の実験における AC モータの設定回転速度は 1500rpm であり、250mm/s のピストン速度に相当する。

3. 複合駆動システムの制御駆動実験

AC モータのトルクを低減して AC モータの小型化を図るという観点から、はじめに当該システムの基本的な制御特性を把握するため AC モータ駆動系単体の基本的な制御駆動実験を行った。その実験結果に基づき、あらかじめ既知である負荷質量変動による重力変動を補償するためロッド側圧力を制御する圧力補償制御駆動実験、負荷質量変動が未知の場合について、駆動時の AC モータの発生するトルクをゼロにするようにロッド側圧力を制御するトルク制御駆動実験および、それら両者を複合化した複合制御駆動実験を行った結果について述べる⁵⁾。これらの制御系の擬似的なブロック線図を図 3 に示す。図中の破線部は後述のトルク制御部を示す。

3.1 AC モータ駆動系単体制御駆動実験

複合駆動システムの基本的な制御特性を把握するため、図 3 のブロック線図中の破線で示したトルク制御部を除去し、前述した初期負荷質量を保持する保持圧力指令を与えて電-空レギュレータによりロッド側圧力（保持圧力：0.05MPa）をほぼ一定に保ち、図 2 で示したピストン行程で駆動制御実験を行った。このときのブロック線図を図 4

Fig. 6 Time responses of piston displacement, driving torque and pressure in rod side (hybrid drive in pressure compensation control)

慮し、ピストン上昇行程においては負荷質量加算時の0.13s前に、また下降行程においては負荷質量除去時の0.45s前に前述した保持圧力指令を与えた。このときのブロック線図は3.1のACモータ駆動系単体制御駆動実験で述べたブロック線図(図4参照)と同様であるが、ACモータ駆動系単体制御駆動実験では保持圧力が一定で、 $P_h(t)=0.05$ (MPa)であるのに対し、圧力補償制御では以下のように変動負荷質量に応じて保持圧力 $P_h(t)$ を調整している点異なる。

$$0 \leq t < t_u - 0.13 \quad P_h(t) = 0.05 \text{ (MPa)} \\ \text{従って, } V_p = 0.05k_p \quad (1)$$

$$t_u - 0.13 \leq t < t_d - 0.45 \quad P_h(t) = 0.22 \text{ (MPa)} \\ \text{従って, } V_p = 0.22k_p \quad (2)$$

$$t \geq t_d - 0.45 \quad P_h(t) = 0.05 \text{ (MPa)} \\ \text{従って, } V_p = 0.05k_p \quad (3)$$

その実験結果を図6に示すが、前述のACモータ駆動系単体制御駆動の場合に比較して全体的にACモータのトルクは大幅に低減され、また良好なピストン行程が実現されており、大きな制御効果が認められた。しかし、ピストン始動時および停止時には短時間ではあるが瞬時最大トルクに達しており、またピストン移動時および停止状態においても0.4~0.2Nm程度のトルクが発生している。これは、負荷質量の慣性力、動摩擦力の影響を考慮していないこと、および図6中のシリンダロッド側圧力応答からわかるように電-空レギュレータとシリンダ系の正確な動特性の補償が行われていないことによるものと考えられる。本圧力補償制御法は、図2に示したように負荷質量変動の大きさと変動時刻が予め既知の場合には有効な制御法であり、負荷変動の大きさについておおよその大きさが既知であれば制御性能の良好なACモータでその誤差分は制御可能であるが、負荷変動時の急激なトルクの上昇の抑制とピストン移動時および停止状態におけるトルクの低減には、正確な変動時刻が予め既知であることおよび上述の慣性力、動摩擦力および電-空レギュレータとシリンダ系の動特性の影

Fig. 7 Time responses of piston displacement, driving torque and pressure in rod side (hybrid drive in torque control)

響に対する正確な考慮が必要である。

3.3 トルク制御駆動実験

3.2で述べた圧力補償制御では、基本的には予め負荷質量変動の大きさと変動時刻が既知であることが要求される。そこで、これらが未知の場合に対応するため図3中の破線部で示すように、ACモータのトルクを検出し、そのトルクが τ_c Nm(目標値)となるようにシリンダロッド側圧力を電-空レギュレータで制御する内部フィードバック制御を検討した。具体的な制御方式は以下のとおりである。

$$V_r = k_r(\tau_c - \tau_{AC}) \quad (4)$$

本研究では、できる限りACモータのトルクの値を小さくするため、 $\tau_c = 0$ とした。

$$\text{従って, } V_r = -k_r \cdot \tau_{AC} \quad (5)$$

その実験結果を図7に示すが、全体的には前述の圧力補償制御の場合と同様な制御効果が認められた。ACモータの停止状態時に注目すると、そのトルクはほぼ0Nmであり、圧力補償制御の場合より良好な制御特性を示す一方、負荷質量加算・除去時に注目するとトルクが瞬時最大トルクとなる時間が増大する欠点が認められた。これはACモータのトルクを検出して制御が行われるフィードバック制御を採用していることに起因する。

3.4 複合制御駆動実験

3.2および3.3で述べたように、圧力補償制御およびトルク制御にはそれぞれ長所・短所が認められたが、両者の欠点を補完するため圧力補償制御とトルク制御を同時に併用した複合制御を検討した。具体的には、式(1)~式(3)および式(5)を用いて圧力補償制御及びトルク制御における電-空レギュレータへの入力電圧を求め、それらを加え合わせた電圧を電-空レギュレータへの入力信号とした。すなわち、

$$V = V_p + V_r \quad (6)$$

その実験結果を図8に示すが、圧力補償制御とトルク制御に比べて以下のような効果が認められた。

(a)圧力補償制御駆動実験結果(図6)のピストン上昇行

Fig. 8 Time responses of piston displacement, driving torque and pressure in rod side (hybrid drive in hybrid control)

程 (0s ~ 3s) におけるピストン上昇時および停止時の定常駆動トルクに注目すると、複合駆動制御ではいずれも約 0.2N·m の駆動トルクの低減が認められる。

(b)トルク制御駆動実験結果 (図7) において、負荷質量加算後のピストン上昇直後 (約 1.5s 直後) の最大トルクの持続時間に注目すると、トルク制御では約 0.12s であるのに対し複合制御では約 0.04s であり、持続時間が約 1/3 に短縮されている。

4. 負荷質量衝突実験

これまでは図2で示したように、負荷質量加算・除去時に 0.6s 間ピストンを一旦停止させたが、図9に示すようにピストンを停止せず、加算される負荷質量と初期負荷質量を衝突および分離させて駆動することにより複合駆動システムのサイクルタイムを短縮することが実用上要求されることも多い。そこで、図9のピストン行程に関し、これまでと同様の制御駆動実験を行った。これまでの実験結果から明らかなように、負荷質量変動が AC モータのトルクに与える影響はピストン下降行程よりもピストン上昇行程のほうが著しいので、ピストン上昇行程におけるピストン変位 (複合制御の場合のみ) と AC モータのトルクの

Fig. 9 Piston travel under mutual load mass collision

実験結果を図10に示した。衝突して負荷質量が加算された以降のトルクに注目すると、負荷衝突時 (1.0s) 近傍ではいずれの制御法でも負荷質量および負荷質量の加速トルクの増大により瞬時最大トルクに達しているが、圧力補償制御および複合制御における瞬時最大トルク持続時間はトルク制御のそれに比べて半減している。また、瞬時最大トルク持続時間以降はいずれの制御法でも急速にトルクが減少しているが、特に複合制御でその傾向が著しく、ほぼ定格トルク以下で整定しており、最もトルクの軽減に有効であると考えられる。図11はこのときのピストン上昇行程におけるピストン変位の時間経過を示したものであるが、負荷衝突時以降の AC モータ駆動系単体制御駆動のピストン変位は指定されたピストン行程 (図9参照) から大きくずれている。一方、提案した3種類の制御法ではいずれも衝突直後やや振動的であるが、ほぼ良好な変位応答を示している。

5. 1行程平均トルクの比較

図2および図9に示したピストンの1行程について、各制御法における AC モータの1行程あたりの平均トルク τ_{av} を求め、比較した。この平均トルクは1行程の始まる時刻を T_s 、終了時刻を T_e 、前述の各実験で得られたこの間のトルクを $\tau(t)$ として、以下のように求めた。

Fig. 10 Time responses of piston displacement, driving torque and pressure in rod side (hybrid drive in climbing piston travel under mutual load mass collision)

Fig. 11 Responses of climbing piston displacement under mutual load mass collision

$$J_1(C) = \frac{\partial h(C)}{\partial C} \quad (7)$$

その結果を図 12 に示す。この図で黒棒および斜線棒はそれぞれ図 2 および図 9 で示したピストン行程の場合の結果を示している。いずれの制御法においても AC モータ駆動系単体制御駆動における時間平均トルクの 50% 以下で、特に複合制御では 30% 程度に軽減されており、AC モータの小型化に極めて有効であることが明らかにされた。

6. 結 言

AC モータと空気圧アクチュエータを組み合わせた垂直方向の直線駆動型電気・空気圧複合駆動システムを提案・試作した。また、AC モータのトルクを低減して AC モータの小型化を図るという観点から圧力補償制御、トルク制御およびそれらを併用した複合制御を提案し、各制御法とも良好な変位応答を示すとともに、AC モータのトルクの軽減に有効であることを実験的に明らかにした。AC モータのトルクの軽減に対する主要な成果は以下のとおりである。

(1) 負荷質量変動の大きさと変動時刻が既知の場合を対象とした圧力補償制御は、負荷変動時に発生するトルクの低減に大きな効果が認められた。

(2) 負荷質量変動の大きさと変動時刻が未知の場合を対象

Fig. 12 Comparison of average torque of AC servomotor

としたトルク制御は、ピストン移動時および停止状態におけるトルクの低減には有効であるが、負荷変動直後に発生するトルクの低減効果は期待できない。

(3) 圧力補償制御とトルク制御を併用した複合制御は負荷変動時に発生するトルクの低減およびピストン移動・停止状態のトルクの低減の両者に有効である。

本研究を実施するに当たり、SMC 株式会社より種々ご支援を賜ったことを記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 藤田壽憲, 蔡茂林, 香川利春: 空気圧シリンダの消費エネルギーと電動アクチュエータとの比較, 日本フルードパワーシステム学会誌, 34-2, 49/53 (2003)
- 2) 伊藤勝治郎: 空気の圧縮性に対する空圧駆動器のアプローチ, 日本油空圧学会ウインターセミナー「空気圧の新たな可能性を求めて」, 29/33 (1994)
- 3) 武村史朗, S.R.PANDIAN, 早川恭弘, 川村貞夫: ハイブリッド型空気圧・電気駆動モータの設計と制御, 日本機械学会論文集 (C 編), 68-665, 117124 (2002)
- 4) 田中豊, 久隼人, 橋本玲子: 空気圧電動ハイブリッドアクチュエータに関する研究, 平成 18 年春季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 94/96 (2006)
- 5) 田中翔, 中田毅, 桜井康雄, 田中和博: 電気・空気圧複合駆動システムにおける負荷変動制御方式に関する研究, 平成 18 年秋季フルードパワーシステム講演会講演論文集, 106/108 (2006)