防爆式空気圧ロボットの動特性解析と安定化法*

朝倉 俊行^{*1}, 国 慶 志^{*2}, 高野 宣也^{*2}

A Study on Dynamic Analyses of Explosion-Proof Pneumatic Robot and Its Stabilization

Tosiyuki ASAKURA, Qingzhi GUO and Yosinari TAKANO

This paper describes the development of an explosion-proof pneumatic robot for use in the chemical or oil industry. For such a robot, the electric part must be completely separated from the combustible gas. In our study, a pneumatic robot is designed in which the robot controller is linked with an actuator by a long pneumatic tube in order to prevent explosion. Then, the robot system is modeled as a nonlinear time-delay system as used in the aerodynamic analyses, and the validity of this model is confirmed through simulation and experimental studies. However, the robot manipulator will generate hunting due to the time lag of pneumatic pressure signals. Thus, a two-step PID controller is proposed, which not only prevents hunting but also reduces the steady-state error to zero. The effectiveness of this PID controller has been verified through simulation and experiments. Moreover, the stability margins for the pneumatic tube length are evaluated.

Key Words: Explosion-Proof, Pneumatic Robot, Two-Step PID Controller, Nonlinear System, Time Lag, Friction Disturbance, Hunting, Steady-State

1. 結 言

ロボットの防爆性は化学工業、塗装工業、石油工業等において可燃性、危険性がある場合、非常に重要な仕様の一つである。しかし現在の電動式ロボットにおいてまだ本質的に安全防爆構造(I3G6)の対応が完全には行われていない。一方、古くは空気圧による駆動は炭坑機械を防爆することなどが発端となっており、現在でもガスに対する防爆対策に空気圧を用いている例が多い⁽¹⁾⁽²⁾。空気圧ロボットは電気式に比べ防爆性に優れており、接触作業における衝突力の緩和や柔軟な動作が可能であるが、このことから従来の空気圧機器の欠点を緩和、克服し、安定な制御動作を維持することのできる空気圧制御機器の開発、実用化が望まれている。

本研究では防爆性に優れた空気圧ロボットの開発を目的とする。防爆対策としては、電気信号を処理する電空変換器とロボットアームのアクチュエータとの間を空気圧管路によって接続するのが一般的である。し

かし、管路が長くなると空気圧制御は一層難しくなるだけでなく、むだ時間によりアームに発振現象が生じ、安定な特性を得ることは困難となる⁽³⁾。また、一般に空気圧系が、摩擦力の影響を受けやすい等さまざまな問題を抱えており、高精度な制御性能を実現するためには制御手法に工夫が必要となる。

これまで、空気圧サーボ系の研究は多くなされているが⁽⁴⁾、このような防爆構造をもつ空気圧システムの開発は十分に行われていない。そこで、本研究では、まず防爆構造をもつ空気圧ロボットを試作し、制御対象の特性解析を行い、本システムの動特性が非線形むだ時間システムとして表現されることを明らかにする。これに基づいてこのような非線形むだ時間システムに生じる発振現象を防止するため、簡便な安定化のための2段階PID制御法を提案する。本制御法はむだ時間の同定誤差に対しても強いロバスト性をもち、また摩擦および負荷外乱に対しても定常偏差を限りなく零に近づけることができるという特徴ももっている。さらに実実験とシミュレーション実験により提案した制御方式の有効性を確認し、空気圧ロボット開発の基礎資料を得る。

* 1995年12月4日 第38回自動制御連合講演会において講演、原稿受付。1996年6月20日。

^{*1} 正員、福井大学工学部 (〒910 福井市文京3-9-1)。

^{*2} 学生員、福井大学大学院。

2. 防爆式空気圧ロボットの構成

防爆構造をもつ1リンク空気圧ロボットの概略図を図1に示す。ロボットアームの関節角度をリニアポテンショメータにより検出し、A/D変換ボードを通じてコントローラであるコンピュータへフィードバックする。これに基づいてコンピュータ内で構成されたソフトウェアサーボにより電空制御弁の操作量を決定し、D/A変換ボードを通じて電空変換器の空気圧を変化させ、制御された空気圧信号が長いビニール管路を経由してアクチュエータへ伝送され、アームの駆動部の空気圧モータに変位を与える。

図2は制御系の実験装置を示す。ここで、使用する管路の内径は $d=6.0$ mm、電空変換器はSMC(株)製のIT2031-32型である。入力圧力範囲は0.55~0.71 MPa、出力圧力は0~0.51 MPaである。本実験装置はレギュレータにより電空変換器への入力圧力はすべて0.6 MPaの恒圧動作で機能する。空気圧モータはSMC(株)製のペンタイプ CRBUW 30型で、内部容積は 20.2 cm^3 、揺動角度は $0\sim 270^\circ$ 、使用圧力範囲は $0.1\sim 0.99$ MPaである。

3. 防爆式空気圧ロボットのモデル化

防爆式空気圧ロボットの動特性を解析するため、空気圧ロボットを図3のようにモデル化し、各要素の伝達特性を求め、制御系の構造を決定する。

3.1 電空変換器 まずノズルフラップ形電空変換器の伝達関数 $G_n(s)$ は次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$G_n(s) = \frac{K_n \omega_n^2}{s^2 + 2\omega_n \rho_n s + \omega_n^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ω_n は電空変換器の固有振動数、 ρ_n は減衰係数、 K_n はゲインである。

式(1)の各パラメータは、コンピュータからの入力データと圧力センサにより測定した電空変換器の出力データを用い、最小二乗法により推定した。推定値は次のように得られた。

$$\begin{aligned} K_n &= 0.508 \text{ (kgf/cm}^2\text{)/v, } \omega_n = 8.63 \text{ rad/s,} \\ \rho_n &= 1.92 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

式(2)のパラメータをもつ式(1)の周波数応答とその実験値を比較した結果を図4(a)、(b)に示す。図4より実験値とシミュレーション結果はほぼ一致しており、得られた電空変換器のモデリングの有効性とパラメータ推定の妥当性を確認した。

3.2 空気圧管路 空気圧管路の信号伝達特性に関する研究は比較的多くなされているが⁽⁶⁾、ここでは、実用面から低次元化法⁽⁷⁾による空気圧管路のモデル化を考える。

(1) 空気圧管路が短い場合、低次元モデル $G_{L1}(s)$ は二次遅れ系とむだ時間によって表される。

$$G_{L1}(s) = \frac{\omega_L^2 e^{-Ls}}{s^2 + 2\omega_L \rho_L s + \omega_L^2} \dots\dots\dots (3)$$

(2) 空気圧管路が長い場合、低次元モデル $G_{L2}(s)$ は一次遅れ系とむだ時間によって表される。

$$G_{L2}(s) = \frac{e^{-Ls}}{T_L s + 1} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L は管路の長さによるむだ時間であり、 ω_L は固有周波数、 ρ_L は減衰係数、 T_L は時定数である。

Fig. 1 Structure of explosion-proof pneumatic robot

Fig. 2 Structure of experimental equipment

Fig. 3 Modelling of pneumatic robot

(a) Gain diagram (b) Phase diagram

Fig. 4 Frequency characteristics

Table 1 Estimated parameters of air tube

m	0.3	20	40	60	80	100
T_L [s]	-	0.13	0.40	0.73	1.12	1.72
ω_L	21.3	18.9	9.84	13.3	13.9	9.70
ρ_L	0.89	0.84	1.58	1.97	2.05	3.52
L [s]	0.01	0.06	0.12	0.23	0.38	0.56

各パラメータの推定結果を表1に示す。

3・3 空気圧モータとロボットアーム 空気圧モータによるアームの運動方程式は次式で与えられる。

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = (P_1 - P_2)A_m - (T_c + T_f) \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで θ はアームの角変位, J はアームの慣性モーメント, B は粘性摩擦係数, A_m は吐き出し容積, P_1, P_2 は各チャンバの空気圧力, T_c, T_f は運動摩擦損失トルクおよび負荷トルクである。

また, モータの始動条件式は

$$(P_1 - P_2)A_m \geq T_s + T_f \quad \cdots \cdots (6)$$

で与えられる。 T_s は静止摩擦トルクである。

次にチャンバ内の流量, 圧力, 変位の関係を調べる。チャンバ内の状態変化を断熱変化と仮定すると, 気体状態方程式とエネルギー平衡式は次のように表される。

$$W_1 = \frac{1}{\kappa RT} \left(V_1 \frac{dP_1}{dt} + \kappa P_1 \frac{dV_1}{dt} \right) \quad \cdots \cdots (7)$$

$$W_2 = \frac{1}{\kappa RT} \left(V_2 \frac{dP_2}{dt} + \kappa P_2 \frac{dV_2}{dt} \right) \quad \cdots \cdots (8)$$

ここで W_1, W_2 は各チャンバへの質量流量, κ は比熱比, R はガス定数, T はチャンバ内の絶対温度, V_1, V_2 は各チャンバの体積である。アームがロータリアクチュエータの中央に位置している状態を基準状態と考え, 式(7), (8)をこの状態の周りで線形化すると,

$$\begin{aligned} \Delta W_1 = & \frac{1}{\kappa RT} \left\{ \left(\frac{dP_1}{dt} \right)_0 \Delta V_1 + (V_1)_0 \frac{d(\Delta P_1)}{dt} \right\} \\ & + \frac{1}{\kappa RT} \left\{ \kappa (P_1)_0 \frac{d(\Delta V_1)}{dt} + \kappa \left(\frac{dV_1}{dt} \right)_0 \Delta P_1 \right\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_2 = & \frac{1}{\kappa RT} \left\{ \left(\frac{dP_2}{dt} \right)_0 \Delta V_2 + (V_2)_0 \frac{d(\Delta P_2)}{dt} \right\} \\ & + \frac{1}{\kappa RT} \left\{ \kappa (P_2)_0 \frac{d(\Delta V_2)}{dt} + \kappa \left(\frac{dV_2}{dt} \right)_0 \Delta P_2 \right\} \end{aligned} \quad \cdots \cdots (10)$$

となる。ここで, 初期値を

$$(V_1)_0 = (V_2)_0 = V_0, \quad (P_1)_0 = (P_2)_0 = P_0 \quad \cdots \cdots (11)$$

$$\left(\frac{dV_1}{dt} \right)_0 = \left(\frac{dV_2}{dt} \right)_0 = 0, \quad \left(\frac{dP_1}{dt} \right)_0 = \left(\frac{dP_2}{dt} \right)_0 = 0 \quad \cdots \cdots (12)$$

のように設定する。また, 体積の変化について

$$\frac{d(\Delta V_1)}{dt} = \left(- \frac{d(\Delta V_2)}{dt} \right) = A_m \frac{d(\Delta \theta)}{dt} \quad \cdots \cdots (13)$$

が得られる。各チャンバ内の圧力変化量は

$$\Delta P_1 = -\Delta P_2 = \Delta P_b \quad \cdots \cdots (14)$$

のように設定する。式(9)~(14)から

$$\Delta W_1 - \Delta W_2 = \frac{2}{\kappa RT} \left\{ V_0 \frac{d(\Delta P_b)}{dt} + \kappa P_0 A_m \frac{d(\Delta \theta)}{dt} \right\} \quad \cdots \cdots (15)$$

が得られる。また, モータの流量圧力特性は次のように設定する。

$$W_1 = W_1(P_{1a}), \quad W_2 = W_2(P_{2a}) \quad \cdots \cdots (16)$$

ただし, P_{1a}, P_{2a} はモータの出入口の圧力である。式(16)を線形化すると

$$\Delta W_1 = \left(\frac{dW_1}{dP_{1a}} \right) \Delta P_{1a}, \quad \Delta W_2 = \left(\frac{dW_2}{dP_{2a}} \right) \Delta P_{2a} \quad \cdots \cdots (17)$$

となる。ここで

$$\left(\frac{dW_1}{dP_{1a}} \right)_0 = \left(\frac{dW_2}{dP_{2a}} \right)_0 = W_{a0} \quad \cdots \cdots (18)$$

$$\Delta P_{1a} = -\Delta P_{2a} = \Delta P_a \quad \cdots \cdots (19)$$

のように設定する。式(17)~(19)から次の関係が得られる。

$$\Delta W_1 - \Delta W_2 = 2W_{a0}\Delta P_a \quad \cdots \cdots (20)$$

式(5), (15), (20)はラプラス変換により

$$Js^2\theta(s) + Bs\theta(s) = 2A_m\Delta P_b(s) + D(s) \quad \cdots \cdots (21)$$

$$\begin{aligned} \Delta W_1(s) - \Delta W_2(s) = & \frac{2}{\kappa RT} (V_0 s \Delta P_b(s) \\ & + \kappa P_0 A_m s \theta(s)) \end{aligned} \quad \cdots \cdots (22)$$

$$\Delta W_1(s) - \Delta W_2(s) = 2W_{a0}\Delta P_a(s) \quad \cdots \cdots (23)$$

のように変換される。ここで

$$D(s) = L[-(T_c + T_f)] \quad \cdots \cdots (24)$$

である。式(21)~(23)を整理して, 空気圧モータとロボットアームの入出力の圧力変化からアームの角変位までの伝達関数は次のように表される。

$$\theta(s) = G_m(s) [\Delta P_a(s) + d(s)] \quad \cdots \cdots (25)$$

ここで,

$$G_m(s) = \frac{K_m \omega_m^2}{s(s^2 + 2\omega_m \rho_m s + \omega_m^2)} \quad \cdots \cdots (26)$$

$$d(s) = \frac{sD(s)}{K_m J \omega_m^2} \quad \cdots \cdots (27)$$

である。各係数は

$$K_m = \frac{RTW_{a0}}{P_0 A_m}, \quad \omega_m = A_m \sqrt{\frac{2\kappa P_0}{V_0 J}},$$

$$\rho_m = \frac{B}{2A_m} \sqrt{\frac{V_0}{2\kappa P_0 J}} \quad \cdots \cdots (28)$$

で与えられる。ここで, P_0 および V_0 は基準状態でのチャンバ内での圧力と体積を表す。

(a) Ideal model (b) Real model

Fig. 5 Modelling of friction

Fig. 6 Block diagram of explosion-proof pneumatic robot

3・4 固体摩擦モデル 固体摩擦には一般に動き始めるときに生じる静摩擦と、速度が零より大きい場合にはほぼ速度に無関係な一定値をとる動摩擦があり、静摩擦は動摩擦よりも大きいことが知られている。摩擦外乱のある力学系の解析には、一定の動摩擦だけを扱ったものや、図 5 (a) のように理想化近似と呼ばれる静摩擦と動摩擦を不連続に近似したもの、図 5 (b) のように静摩擦から動摩擦までの負こう配を考慮してこれを指数関数や双曲線関数で表したものなどが用いられている⁽⁸⁾。ここで用いる固体摩擦の速度特性(固体摩擦と滑り速度の関係)を次のような指数関数を含む関数で表されるものとして考え⁽⁹⁾、実験結果より次式で表されるものとする。

$$T_{sc} = 0.06 \cdot \exp(-0.4 \cdot |\dot{\theta}|) + 0.04 \quad \& \quad T_{sc} \leq 0.09 \quad \dots\dots\dots (29)$$

3・5 シミュレーション実験 以上の解析から本システムのブロック線図は図 6 のように表現される。ただし、伝達関数 $G_0(s)$ は零次ホールドの連続関数で、次式で表される⁽¹⁰⁾。

$$G_0(s) = \frac{1 - e^{-hs}}{s} \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここで、図 6 のモデルを用いたシミュレーション実験と実実験との比較検討を行う。シミュレーション実験に用いるおもなパラメータは表 2 に示す。また、実実験で用いたコントローラ $D(z)$ は PI 制御とし、各

Table 2 System parameters

κ	1.4	K_v	0.05 (MPa/V)
T	289 (K)	ω_n	8.63 (rad/s)
B	1.3×10^{-3} (kg·m ² /s)	ρ_n	1.92
P_0	0.25 (MPa)	ω_L	21.3 (rad/s)
V_0	1.01×10^{-4} (mm ³)	ρ_L	0.89
J	4.67×10^{-3} (kg·m ²)	L_1	0.01 (s)
r	20 (mm)	T_L	0.40 (s)
W_v	3.0×10^{-3}	L_2	0.12 (s)
R	287 (J/kg·K)

Fig. 7 Simulation and experiment (1)

Fig. 8 Simulation and experiment (2)

パラメータは $K_p=0.5$, $T_i=10$, サンプル周期は 0.02 s とした。結果を図 7, 8 に示す。図 7 の場合、管路の長さは 0.3 m, 目標値は $\pm 10^\circ$ とし、図 8 の場合、管路の長さは 40 m, 目標値は 30° とした。結果より、シミュレーション実験と実験は定量的・定性的にほぼ一致することが確認され、システムモデルの妥当性が検証された。

4. 2 段階 PID 制御の構成

図 6 に示すシステムはむだ時間および摩擦外乱の影響を受け、安定な制御をするには、むだ時間補償および摩擦外乱補償をしなければならない。従来、PID 制御を適用したとき、定常特性の改善を基本的に積分動作によりおこなっている。しかし、非線形の影響が大きい空気圧制御系では、操作量が有限であるため制御

誤差が累積する。ロボットアームが目標近傍に達すると、動作は遅くなるので、制御入力と摩擦力が釣合う。その場合、非線形摩擦力は動作状態によって変化し、また、動摩擦は最大静止摩擦よりかなり小さいので、ロボットアームは目標値近傍で微小な振動を生じ、制御系の応答が遅くなる。ゲインを高めて応答速度を早めようとするむだ時間により発振現象が生じる。このような問題を解決するため、本論文ではゲインを制御誤差に応じて切り換える2段階PID制御方式を提案する。

4・1 2段階PID制御法 2段階PID制御方式とは、通常は制御系を安定させるように適当な制御ゲインで動作させ、高い制御感度が必要な位置、すなわち、静止直前後における摩擦力の変化や静止摩擦力の影響を受ける場所では、ゲインが高くなるよう切換えて強いブレーキ機構の機能を果たすような制御を行い、目標位置に一致させ、十分な応答精度を確保しようとするものである。

図6におけるPIDコントローラ $D(z)$ の入出力関係は次のように記述される。

$$\Delta u_n = K_{p1} \left\{ \Delta e_n + \frac{h}{T_i} e_n + \frac{T_d}{h} (\Delta e_n - \Delta e_{n-1}) \right\} \quad \dots\dots\dots (31)$$

ここで、 $\Delta u_n = u_n - u_{n-1}$ 、 $\Delta e_n = e_n - e_{n-1}$ とし、 h はサンプリング周期、 u_n は出力、 e_n は誤差信号であり、次式で定義される。

$$e_n(z) = R_n(z) - \theta_n(z) \quad \dots\dots\dots (32)$$

式(32)の誤差信号が大きいたときにはオーバーシュートおよび発振を避けるためゲインを小さくし、誤差信号が十分小さくなったときは制御精度を上げるためゲインを高くするように切り換える。切り換え制御則を式(33)に示す。ゲインを切り換えてからの誤差信号はほぼ零で、積分動作の影響が少なくなり、また、時間が十分経過すると微小な振動が生じ、このような悪影響を除去するため、D制御が付加される。

$$\Delta u_n = \begin{cases} K_{p1} \left\{ \Delta e_n + \frac{h}{T_i} e_n + \frac{T_d}{h} (\Delta e_n - \Delta e_{n-1}) \right\} & e_n e_{n-1} > 0 \quad \dots\dots\dots (a) \\ K_{p2} \left\{ \Delta e_n + \frac{T_d}{h} (\Delta e_n - \Delta e_{n-1}) \right\} & e_n e_{n-1} \leq 0 \quad \dots\dots\dots (b) \end{cases}$$

$$K_{p2} \gg K_{p1} \quad \dots\dots\dots (33)$$

ただし、 K_{p2} は K_{p1} よりかなり大きい、それぞれの値は実験により決定される。

4・2 制御器の特性 図6のモデルを用い、提案

Fig. 9 Input to controller

Fig. 10 Output from controller

した2段階PID制御器の特性についてシミュレーション実験を行い、制御器への入力と出力の関係を調べた。2段階PID制御器 $D(z)$ の各パラメータは、

$$K_{p1}=0.5, \quad K_{p2}=2.5, \quad T_i=10 \text{ s}, \quad T_d=0.2 \text{ s} \quad \dots\dots\dots (34)$$

のように設定した。また、制御対象の各パラメータは表2に示す。管路の長さは20 m、目標角度は20 degである。シミュレーション結果を図9および図10に示す。その結果より、ゲインを K_{p1} にしても、むだ時間および式(6)の始動条件より領域I ($0 \leq t \leq 1.1 \text{ s}$) では、ロボットアームの駆動力が静止摩擦力を越えない限り動かない。領域II ($1.1 \text{ s} \leq t \leq 13.3 \text{ s}$) では、ロボットアームが初期値からだんだん目標値に近付き、13.3秒経過した時刻で $e_n e_{n-1} \leq 0$ を満たしたとき、制御則が式(33)の(a)から(b)に切り換わる。領域III ($t > 13.3 \text{ s}$) では、制御ゲインが K_{p2} で、制御系が定常状態に保持されていることを示す。管路の長さおよび目標値を変えてもいずれも同様な結果が得られた。シミュレーション実験結果より目標値近傍で目標値と操作量との間の誤差信号はほぼ零であるので、ゲインを大きくしても安定性が崩れない特徴をもっている。また、この手法により、制御目標の追従特性を改善し、外乱の除去を図るとともに、定常偏差を限りなく零に近づけることができる。

5. 実験結果および考察

提案した2段階PID位置決め制御方式の有効性を検討するため、図2の装置を用いて実験を行い、安定性と過渡特性および定常偏差を考察する。さらに、本制御法の安定範囲を検討する。

5.1 応答特性 図11, 12は従来のPID制御でのステップ応答である。システムの発振現象を避けるために、制御器のゲインを小さくしなければならない。しかし、ゲインが小さくなると、図に示すように過渡特性の整定時間が長くなり、定常応答を得るのは困難となる。一方、提案した2段階PID制御法を用いた場合の応答実験の結果を図13に示す。ただし、制御器のパラメータは式(34)のように設定した。また管路の長さは20 m、目標値は $\pm 10, \pm 20, \pm 30, \pm 40, \pm 50^\circ$ に設定した。図11, 12に示すように従来のPID制御器では良好な定常応答を得るのは困難であるが、図13の結果より、本実験で用いた制御系については $\pm 0.246 \text{ deg}$ 程度の位置決め精度が実現でき、本制御法の有効性が確認された。しかし図13に示すように立ち上がり時間が長く過渡特性がよい、その原因は安定化のため制御ゲインを小さく抑えなければならないことと、実験装置に使用した空気圧モータの出力トルクも小さいことによる。これらの問題に対して、出力トルクの大きいモータを使用し、さらに摩擦外乱の補償をあらかじめ加えることにより実験装置を改良

Fig. 11 Dynamic characteristics by PID (1)

Fig. 12 Dynamic characteristics by PID (2)

し過渡特性を改善する研究を進めている。

5.2 2段階PID制御の安定範囲

むだ時間を含む防爆式空気圧ロボットシステムに対して従来のPID制御を適用した場合、ゲイン K_p を大きくしたり、空気圧管路が長くなるとシステムに発振現象が生じる。発振現象の一例を図14および15に示す。図中の縦軸はロボットアーム関節角度変位、横軸は時間である。図14は管路が20 mの場合、目標値を 50 deg としたときの発振現象を示す。 $K_p=0.50$ の場合安定であるが、 $K_p=0.55$ とわずかに変化しても発振現象が生じる。一方、管路が100 mに長くなると、ロボットアームは図15に示すように常時大きな周期の発振現象を生じる。

次に、管路の長さを変化させ、従来のPID制御と2段階PID制御をした場合のゲインによる安定限界を実験で調べる。パラメータは、 $T_i=10 \text{ s}$ 、 $T_d=0.2 \text{ s}$ 、サンプリング周期は 0.02 s で、目標値は 20 deg のス

Fig. 13 Step response by two-step PID

Fig. 14 Hunting due to control gain

Fig. 15 Hunting due to time delay

Fig. 16 Stability region by 2-step PID method

テップ入力とした。その結果を図 16 に示す。図 16 中の丸印点は実験値であり、安定限界を示す。実線は 2 段階 PID 制御における切り換えたゲイン K_{p2} 、破線は従来の PID ゲイン K_p を表す。その結果から、2 段階 PID 制御でゲインを切り換えた場合の安定領域が従来の PID 制御の場合と比較して拡大していることがわかる。また、目標値が変化した場合についても 2 段階 PID 制御の安定範囲に影響しないことがわかる。

6. 結 論

本研究では、防爆式空気圧ロボットの開発を目的とし、防爆のため、電気信号を処理する電空変換器とロボットアームのアクチュエータの間を長い空気圧管路によって接続する方法を用い、実システムを構成した。まず最初に、このようなシステムは非線形むだ時間システムとして表現されるので、この場合の動特性の解析を行った。特に、制御性能に及ぼす駆動部の摩擦特性を従来の理想モデルとは異なり、静摩擦力から動摩擦力までの負こう配を考慮して表現することにより、制御対象としての空気圧ロボットの動特性を表す

数学モデルを確立し、その妥当性をシミュレーション実験と実実験より確認した。次に、むだ時間による発振現象の防止と制御特性を改善するため、2 段階 PID 制御方式を提案し、シミュレーション実験と実実験の両面からその特性を検討した。本制御法は大きいむだ時間が存在しても安定性を確保し、かつ摩擦外乱を除去する効果が顕著であり、位置決め制御精度向上に極めて有効であることを確認した。

本論文では主に位置決め精度について考察したが、今後摩擦外乱の補償をあらかじめ加えた工夫を施せば、制御性能はさらに向上すると考える。

文 献

- (1) 段野勝・朝倉俊行・島田貢明・部谷尚道、電空弁ポジションの動特性の改善(第 2 報)、機論、55-512, B (1988), 1124-1128.
- (2) 長谷川健介、制御理論 II、(1987)、131、昭晃堂。
- (3) 朝倉俊行・徐彬・段野勝、電空弁ポジションにおける発振現象の防止とロバスト安定性、機論、57-541, C (1991)、82-88.
- (4) 山藤和男、空気圧アクチュエータのロボット制御への応用、日本ロボット学会誌、19-4(1991)、498-501.
- (5) 朝倉俊行・大嶽宏之・段野勝、電空弁ポジションの動特性の改善(第 3 報)、機論、57-533, C (1991)、88-93.
- (6) Schuder, C. B. and Binder, R. C., The Response of Transmission Lines to Step Input, *Trans. ASME, Series D*, 18(1959), 578-586.
- (7) 香川利治・北川能・真田一志・竹中俊夫、空気圧管路の動特性を表示する低次元モデルに関する研究、計測自動制御学会論文集、21-9(1985)、953-959.
- (8) Halling, J., トライボロジ、(1984)、15、近代化学社。
- (9) 清水友治・猪岡光、カルマンフィルタによる固体摩擦の推定(第 2 報)、機論、54-502, C (1988)、1345-1349.
- (10) 荒木光彦、ディジタル制御理論入門、(1991)、38、システム制御情報学会編。