PID および適応形外乱補償を付加した単純適応制御による ゴム人工筋アクチュエータの制御*

大友 篤^{*1}, 岩井 善太^{*2}, 永田 正伸^{*1}
内田 博也^{*3}, 小米良 豊^{*4}

SAC (Simple Adaptive Control) with PID and Adaptive Disturbance Compensation for Actuator Composed of Artificial Rubber Muscles

Atushi OHTOMO, Zenta IWAI, Masanobu NAGATA,
Hiroya UCHIDA and Yutaka KOMERA

Robot for use in welfare or agriculture should be light in weight and have redundancy of freedoms. A rubber artificial muscle (Rubbertuator) is an actuator with the above properties. We propose a two-degree-of-freedom artificial rubber actuator. The proposed actuator is composed of two types of actuator: two Rubbertuators (R-R type) which move a joint antagonistically, and a combination of a Rubbertuator and a spring (R-S type) which also moves antagonistically. The effectiveness of the control algorithm is examined using on R-R type or R-S type actuator. To determine the basic characteristics of the above state actuators, experiments were executed (for R-R type and R-S type). SAC with a PID compensated algorithm and that with an adaptive disturbance compensated algorithm were applied to the state actuators and several evaluations were made based on the experiment results.

Key Words: Mechatronics and Robotics, Actuator, Positioning, Servo Mechanism, Adaptive Control, Simple Adaptive Control, Rubber Artificial Muscle

1. 緒言

医療や福祉あるいは農業といった、工場外での環境のもとで作業するロボットの開発が期待されている。この場合、ロボットに要求される作業は複雑になるため、軽量で柔軟性があり、冗長性のあるものが望まれる。このようなロボットを実現するためのアクチュエータとして、空気圧ゴム人工筋が多方面から注目されている^{(1),(2)}。しかし、現在まで使用されている駆動方式は、拮抗駆動関節として、一つのアームに1自由度を有するものであり、冗長性をもたせるには適しているとは言いがたい。コンパクトで冗長性をもたせるには、一つのアームに2自由度を有するアクチュエータが有利である。

この点から、2自由度アクチュエータとして、回転と曲げの自由度をもつ、ゴム人工筋-ゴム人工筋形式およびゴム人工筋-スプリング形式の2種の拮抗駆動方

式を組み合わせた構造の2自由度アクチュエータを開発した。

ゴム人工筋の制御に関しては、構造上の非線形性、空気の圧縮性のために負荷の影響を受けやすい等の問題があり、制御しにくい対象と考えられている。位置制御に関するものとして現在まで種々の方式^{(3)~(6)}が検討されているが、構造的に複雑であり、十分に満足 of いく結果が得られているとはいえない。

一方、適応制御は、線形時変系システムに対する有効な制御方式としてこれまで多くの報告がなされており、ある程度の非線形特性に対してもロバストであることが知られている。最近では、このロバスト性を利用して、空気圧制御に対する適応制御の適用に関する報告もなされている⁽⁷⁾。しかし、従来の適応制御は構造が複雑であり適応則の演算時間が問題となる。また、適応制御は基本的に線形系に対する制御手法であるため、空気圧のように非線形性が大きい系に対する適用に関しては理論的な検討が必要である。

適応制御の構造の複雑さの観点から、単純適応制御 (Simple Adaptive Control: SAC) が、コントローラの構造が簡単で、外乱および寄生要素に対してロバスト

* 原稿受付 1996年6月17日。

^{*1} 正員, (財)熊本テクノポリス財団 (〒861-22 熊本県上益城郡益城町田原 2081-10)。

^{*2} 正員, 熊本大学工学部 (〒860 熊本市黒髪 2-39-1)。

^{*3} 学生員, 熊本大学大学院。

^{*4} 日造有明設計 (〒869-01 熊本県玉名郡長洲町有明 1)。

Fig.1 Schematic Diagram of 2 degree Rubber Actuator

であることにより、最近注目を集めているが^{(8),(9),(10)}、空気圧等に対する応用はまだなされていない。

本論文は、開発した2自由度アクチュエータの構成方式を述べ、さらにその制御に関して、SACを適用した結果について述べる。SACは本来線形系に対するものであり、非線形系にそのまま適用しても十分な性能を得ることができない。そこで、ゴム人工筋を含むアクチュエータの動特性方程式に着目して、ゴム人工筋の非線形特性が、変動パラメータを含む状態依存性外乱とみなせることを示し、この状態依存性外乱に対しPID補償および適応形外乱補償を付加してSACを構成することにより大幅な制御性能の改善がはかれることを、開発した2自由度アクチュエータを用いた実験により示す。

以下、第2章で開発した2自由度アクチュエータの構造について簡単に説明し、第3章で実験システムの構成、第4章でそのモデル化、第5章でPID補償および適応形外乱補償を付加したSACの構成を示し、第6章で実験の結果について示す。

2. 2自由度アクチュエータの構成

図1に開発した2自由度アクチュエータの構成を示す。曲げの自由度に対しては、(b)に示すように左側2本のゴム人工筋(ブリヂストン製 #18)とスプリングによって拮抗させている。一方、中心軸に対する回転は、(c)に示すように2本のゴム人工筋(ブリヂストン製 #14)の拮抗駆動をかさ歯車により回転駆動に変換する方式を採用している。この構成は、人間の腕の場

Fig.2 Schematic Diagram of Experimental System

合、持ち上げる方の力が強く、また、軸方向に回転させる力は、持ち上げ力に対しそれほど強くないという点を考慮したものである。2本のゴム人工筋によって持ち上げ力を大きくし、おろすときは、荷物の自重が作用しており、引き下げるというよりもゴム人工筋で持ち上げながら徐々におろすということから、スプリングも力の弱いものでも十分に機能をはたすことになる。一方、軸方向の回転は、人間の場合でも方向によって大きな差はないことから従来の方式を取り、スプロケットの回転を傘歯車によって軸方向の回転に変換している。ゴム人工筋-スプリングの場合、片側だけの空気圧の制御で十分なことから、もう一つのメリットとしてサーボバルブユニット(ブリヂストン製 SVO)が、従来の2個の対し1個で済むという点があげられる。また、このアクチュエータは同一形式のものを順に結合することで、任意の自由度を編成することができる。

3. 実験システムの構成

図2に実験システムの構成を示す。

2自由度アクチュエータは、上端をフランジで固定し、垂直に下げて、下端のフランジに重りを付加できるようにしてある。

各軸の位置は、エンコーダによって検出され、パソコンの拡張スロット内のカウンタボードでカウントされ、パソコンに取り込まれる。取り込まれた位置情報によって計算された制御信号は、拡張スロット内のD/A変換器によって0~5Vの信号に変換され、電圧-電流変換器を通しSVOに入力される。入力された信号によってSVOはSVOの後側の圧力を制御するように構成されている。したがって、回転のゴム人工筋に対して2

チャンネル, 曲げに対し1チャンネルの合計3種の圧力が制御され, それによって各軸が駆動されることになる。

4. 制御系設計用モデルの導出

制御対象の数式モデルは, 制御則の構成の根拠を与えるものであり, その導出は非常に重要となる。一般に, ゴム人工筋を用いたシステムは非線形となり, 厳密な動特性を求めることは困難であるが, ある程度の式の構造を知ることは, 適応制御系を設計する上で重要である。

ゴム人工筋に対するモデルの研究としては, 香川ら⁽¹¹⁾, 加藤ら⁽¹²⁾によるものがあるが, ここで, あらためてゴム人工筋を用いた回転および曲げ機構に対する動力学方程式を検討する。図3に回転と曲げの構成を示す。まず, 負荷に関して, 一般に次の方程式が得られる。

$$J(\theta)\ddot{\theta} + \nu\dot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau \quad (1)$$

ただし,

$J(\theta) > 0$: 負荷の慣性モーメント

$\nu \geq 0$: 粘性摩擦係数

$h(\theta, \dot{\theta})$: 摩擦, 遠心力, コリオリ力

τ : 軸トルク

また, ゴム人工筋の内圧 P と収縮力 T は,

$$T = \frac{\pi}{4} D_0^2 a \{ b(1 - \varepsilon)^2 - 1 \} P \quad (2)$$

ε : 収縮率

D_0^2 : 変形前の有効径

a, b : 定数

と表すことができる⁽¹³⁾。さて, 図3では, $\theta = 2\Delta l/r(\Delta l$: 変位長さ) より 1 のゴム人工筋の収縮率 ε と軸角度 θ には,

$$\varepsilon = \frac{1}{l_0} \left\{ \frac{r\theta}{2} + \Delta l_0 \right\} \quad (3)$$

r : 軸半径

Δl_0 : 初期収縮長さ

l_0 : 自然長

なる関係があるので, 式(2)に代入して変形すれば,

$$T = b_1 P - b_2 P \theta + b_3 P \theta^2 \quad (4)$$

$$b_1 = \frac{\pi}{4} D_0^2 a \left\{ b \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 1 \right\}, b_2 = \frac{\pi r l}{4 l_0^2} D_0^2 a b$$

$$b_3 = \frac{\pi r^2}{16 l_0^2} D_0^2 a b$$

(a) Rotation

(b) Bending

Fig.3 Schematic Diagram of Rubber-Rubber and Rubber-Spring actuator

l : 初期長さ

となる。ゴム人工筋-ゴム人工筋拮抗モデルでは2つのゴム人工筋の特性が完全に一致しないため, 1, 2のゴム人工筋に発生する力は, それぞれの内圧を P_1, P_2 とすれば,

$$\begin{aligned} T_1 &= b_1 P_1 - b_2 P_1 \theta + b_3 P_1 \theta^2 \\ T_2 &= (b_1 + \Delta b_1) P_2 + (b_2 + \Delta b_2) P_2 \theta \\ &\quad + (b_3 + \Delta b_3) P_2 \theta^2 \end{aligned} \quad (5)$$

と表される。よって, 軸にかかるトルクは,

$$\begin{aligned} \tau &= r(T_1 - T_2) \\ &= r \{ b_1(P_1 - P_2) + b_3(P_1 - P_2)\theta^2 \} \\ &\quad - r b_2(P_1 + P_2)\theta \\ &\quad - r(\Delta b_1 P_2 + \Delta b_2 P_2 \theta + \Delta b_3 P_2 \theta^2) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで, $P_1 \Rightarrow P_0 + \Delta P$, $P_2 \Rightarrow P_0 + \Delta P_0 - \Delta P$, (P_0 : 初期内圧, ΔP_0 : 初期内圧差, ΔP : 内圧変化量), と与えれば,

$$\begin{aligned} \tau &= r(2b_1 + \Delta b_1)\Delta P \\ &\quad - r \{ (b_1 + \Delta b_1)\Delta P_0 + \Delta b_1 P_0 \} \\ &\quad - r \{ (2b_2 + \Delta b_2)P_0 + (b_2 + \Delta b_2)\Delta P_0 \} \theta \\ &\quad - r \{ (b_3 + \Delta b_3)\Delta P_0 + \Delta b_3 P_0 \} \theta^2 \\ &\quad + r \Delta b_2 \Delta P \theta + r(2b_3 + \Delta b_3)\Delta P \theta^2 \end{aligned} \quad (7)$$

となる。上式右辺第2項以降を $g_1(\theta, \Delta P)$ とおくと, 上式と式(1)よりゴム人工筋-ゴム人工筋拮抗モデルは,

$$J(\theta)\ddot{\theta} + \nu\dot{\theta} = c_1 \Delta P + g_1(\theta, \Delta P) \quad (8)$$

$$g_1(\theta, \Delta P) = \rho_{10} + \rho_{11}\theta + \rho_{12}\theta^2 + \rho_{13}\Delta P\theta \\ + \rho_{14}\Delta P\theta^2 - h(\theta, \dot{\theta}) \quad (\rho_{**}: \text{定数})$$

と表わされる。

一方、ゴム人工筋-スプリング拮抗モデルに対しては、バネ定数を K 、バネで生じる力を T_S 、ゴム人工筋で生じる力を T_R とすれば、式 (4) より、

$$\tau = r(T_R - T_S) \quad (9) \\ = rb_1\Delta P - \frac{r^2K}{2}\theta + rb_2\Delta P\theta + rb_3\Delta P\theta^2$$

となり、負荷を含めたモデルは、

$$J(\theta)\ddot{\theta} + \nu\dot{\theta} = c_2\Delta P + g_2(\theta, \Delta P) \quad (10)$$

となる。ここで、 $g_1(\theta, \Delta P)$ 、 $g_2(\theta, \Delta P)$ についてみると、まず、式 (4) より l_0 が r よりある程度大きいとすれば b_3 は b_1 に比べて微小とみなせる。また、実際上 Δb_1 、 Δb_2 、 Δb_3 は微小であり θ は 1 よりあまり大きくない。さらに、式 (9) で、 $rb_2\Delta P\theta$ 項の変化の影響および式 (8)、(10) で $h(\theta, \dot{\theta})$ の変化が大きくないと仮定すれば、

$$g_*(\theta, \Delta P) \simeq d_1(t)\theta + d_2(t) = g(\theta, t) \quad (11)$$

$d_1(t), d_2(t)$; 有界

$$d_1(t) = \rho_{*1} + \rho_{*3}\Delta P$$

$$d_2(t) = \rho_{*0} + \rho_{*2}\theta^2 \\ + \rho_{*4}\Delta P\theta^2 - h(\theta, \dot{\theta}) \quad *, 1, 2$$

とみなせる。従って、ゴム人工筋-ゴム人工筋およびゴム人工筋-スプリングを用いたモデルは、

$$J(\theta)\ddot{\theta} + \nu\dot{\theta} = c\Delta P + g(\theta, t), \quad c > 0 \quad (12)$$

と表わすことができる。すなわち、ゴム人工筋の非線形特性を変動パラメータをもつ単純な状態依存性外乱 $d_1(t)\theta + d_2(t)$ とみなして取り扱うことを考える。なお、 ΔP を実現する SVO の応答に関しては、制御指令値よりも十分速いものとして無視している。

ここで導出した式 (12) は、ゴムの弾性がない、コード間の摩擦、コードとチューブ間の摩擦がないなどの理想状態における理論式を基礎におき、更に近似的な取扱いを行なっているため、実際の制御対象を厳密に表わしていることにはならないが、制御対象のある程度の構造を示すものと言える。

式 (12) は、外乱を含む単純な 2 次系であり、PID 制御によっても良好な制御を実現することが可能である。しかし、この場合では、正確なパラメータを得ること

が困難であるばかりでなくパラメータの変動を伴う系となっている。そこで、式 (12) に対する有効な制御方式として適応制御が考えられる。

5. PID 補償および適応形外乱補償を付加した SAC の構成

式 (12) に対する適応制御手法として、適応則の構造が簡単な SAC を考える。式 (12) を変形すれば、 $J(\theta) > 0$ より

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A_P \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_P u(t) + \mathbf{g}(t) \quad (13) \\ y(t) = \mathbf{c}_P^T \mathbf{x}(t)$$

ただし、

$$\mathbf{x}(t)^T = [\theta \quad \dot{\theta}], \mathbf{c}_P^T = [1 \quad 0],$$

$$A_P = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{\nu}{J(\theta)} \end{bmatrix}, \mathbf{b}_P^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{c}{J(\theta)} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{g}(t)^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{g(\theta, t)}{J(\theta)} \end{bmatrix}, u(t) = \Delta P \quad (14)$$

となる。

まず、外乱とみなした $g(\theta, t)$ を無視して、SAC の適用を考える。SAC を適用するためには、制御対象が次の条件を満たす必要がある⁽⁹⁾。

[条件 1]

(1) 制御対象は ASPR.

(2) $\begin{bmatrix} A_P & \mathbf{b}_P \\ \mathbf{c}_P^T & 0 \end{bmatrix}$ は正則。

式 (13) は [条件 1](2) を満たす。しかし、式 (13) は [条件 1](1) を満たしていない。そこで、制御対象を ASPR 化するための一般的な手法である PFC⁽⁹⁾ を付加すれば、外乱 $\mathbf{g}(t)$ を無視した場合、 $c > 0$ 、 $\nu \geq 0$ 、 $J(\theta) > 0$ より式 (13) は ASPR となる。いま、制御対象が追従すべき漸近安定な m 次規範モデルを、

$$\dot{\mathbf{x}}_m(t) = A_m \mathbf{x}_m(t) + \mathbf{b}_m u_m \quad (15) \\ y_m(t) = \mathbf{c}_m^T \mathbf{x}_m(t)$$

とするとき、PFC を付加した式 (13) に対する一般的な SAC の制御入力は、

$$u_{SAC}(t) = \mathbf{k}(t)^T \mathbf{z}(t) \quad (16)$$

$$\mathbf{z}(t) = [e_y(t), \mathbf{x}_m(t)^T, u_m(t)]^T$$

$$\mathbf{k}(t) = [k_e(t), \mathbf{k}_x(t)^T, k_u(t)]^T$$

$$e_y = y(t) - y_m(t)$$

で与えられる⁽⁹⁾。ただし、 $\mathbf{k}(t)$ は、

$$\mathbf{k}(t) = \mathbf{k}_P(t) + \mathbf{k}_I(t)$$

Fig.4 SAC control Diagram

Fig.5 SAC with PID compensated control Diagram

Fig.6 SAC with PID and Adaptive Disturbance compensated control Diagram

$$\dot{k}_P(t) = -\Gamma_P z(t) e_y(t) \quad (17)$$

$$\dot{k}_I(t) = -\Gamma_I z(t) e_y(t) - \sigma k_I(t)$$

$$\Gamma_P = \Gamma_P^T > 0, \Gamma_I = \Gamma_I^T > 0, \sigma > 0$$

なる適応則で調整される可調整パラメータである。この制御系の構成を図4に示す。なお、PFC補償器 $F(s)$ は、

$$F(s) = \frac{\beta}{s + \alpha} \quad (\alpha > 0, \beta > 0) \quad (18)$$

としている。ここで、式(16)、(17)より得られる制御入力では、外乱とみなした $g(\theta, t)$ が積極的に考慮されていないために、追従誤差が小さくならない可能性がある。そこで、このSACの制御入力に対して何らかの外乱補償を付加することを考える。

まず、一つの方法として、式(16)において出力誤差に関する制御入力 $k_e(t)e_y(t)$ に対して、並列にPIDを構成する。図4よりわかるように、SACでは $k_e(t)e_y(t)$ がP制御に相当する制御入力となっている。そこで、

Fig.7 Model Input

PID制御のP分はあまり大きくせず、I分によって定常的な誤差を減じることを指向するものである。また、D分は文献(14)に示されているように適応制御過程の過渡時の応答を改善するためである。今一つは、さらに外乱 $g(\theta, t)$ を適応的に推定し、 $\hat{g}(\theta, t)$ を積極的に打ち消すように制御入力を構成する方法である。すなわち、式(14)の $g(t)$ は

$$g(t) = b_P \frac{1}{c} g(\theta, t) \quad (19)$$

と変形できるから、上式および式(11)よりSACと同様の適応則によって $d_1(t)/c$ 、 $d_2(t)/c$ を同定するように可調整パラメータを調整し、これと出力 θ から $g(\theta, t)$ を打ち消す適応形外乱補償制御入力として構成する。

このとき、それぞれの制御入力は次のようになる。

[PID補償時]

$$u(t) = u_{SAC}(t) + u_{PID}(t) \quad (20)$$

$$u_{PID}(t) = -K_P e_y(t) - K_I \int_0^t e_y(\tau) d\tau - K_V \dot{e}_y(t)$$

K_P, K_I, K_V : PIDゲイン

[PID+適応形外乱補償時]

$$u(t) = u_{SAC}(t) + u_{PID}(t) + u_S(t) \quad (21)$$

$$u_S(t) = k_S(t)^T z_S(t)$$

$$z_S(t)^T = [1 \quad \theta], k_S(t) = k_{SP}(t) + k_{SI}(t)$$

$$k_{SP}(t) = -\Gamma_{SP} z_S(t) e_y(t)$$

$$\dot{k}_{SI}(t) = -\Gamma_{SI} z_S(t) e_y(t) - \sigma_S k_{SI}(t)$$

$$\Gamma_{SP} = \Gamma_{SP}^T > 0, \Gamma_{SI} = \Gamma_{SI}^T > 0, \sigma_S > 0$$

(a) SAC

(b) SAC with PID compensation

(c) SAC with PID and Adaptive Disturbance compensation

Fig.8 Experiment results of Rotation(Rubber-Rubber)

なお、式(13)に対し、適応形外乱補償入力 $u_S(t)$ を構成した場合の適応則の安定性は、[条件1] および式(11)の条件のもと文献(9)と同様にして簡単に示すことができる。

また、各補償入力を付加した制御系の構成を図5、図6に示す。

6. 実験結果

実験で使用した規範モデルは、

$$\ddot{\theta}_m = -20\dot{\theta}_m - 100\theta_m - 100u_m$$

なる2次モデルを採用し、モデルへの入力波形 $u_m(t)$ は図7に対し、

$$u_m(t) = \ddot{y}_R + 20\dot{y}_R + 100y_R$$

(a) SAC

(b) SAC with PID compensation

(c) SAC with PID and Adaptive Disturbance compensation

Fig.9 Experiment results of Bending(Rubber-Spring)

と構成した。

回転に対して使用したパラメータは

(a) SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 8]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[20, 110, 2.5, 5]$$

(b) PID 補償を付加した SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 8]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[20, 110, 2.5, 5]$$

$$K_P = 0.01, K_V = 0.04, K_I = 8$$

(c) PID+適応形外乱補償を付加した SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 8, 0.01, 0.01]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[20, 110, 2.5, 5, 10, 15]$$

$$K_P = 0.01, K_V = 0.04, K_I = 8$$

とし、 σ はすべて $\sigma = 0.01$ とした。また、曲げの場合は

(a) SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 1]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[5, 8, 1, 1]$$

(b) PID 補償を付加した SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 1]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[5, 8, 1, 1]$$

$$K_P = 0.01, K_V = 0.04, K_I = 8$$

(c) PID+適応形外乱補償を付加した SAC

$$\Gamma_P = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 1, 1]$$

$$\Gamma_I = \text{diag}[5, 8, 1, 1, 5, 8]$$

$$K_P = 0.01, K_V = 0.04, K_I = 8$$

とし、 σ はすべて $\sigma = 0.01$ とした。さらに、両方とも $F(s)$ のパラメータは $\alpha = 2.0$, $\beta = 0.001$ とし、サンプリング時間は 4ms とした。

実際の入力では、回転の場合、ベース圧入力を P_0 とすると、

$$u_1 = P_0 + u(t)$$

$$u_2 = P_0 - u(t)$$

なる信号を各々のゴム人工筋の入力として与えた。曲げの場合、初期位置 0.2rad まで少しずつ圧力を上昇させ、その圧力を P_0 とすると、

$$u = P_0 + u(t)$$

を入力として与えている。これは、スプリングで引張っているため、ストッパーの作用を切り離すためのものである。

図 8, 図 9 に回転, 曲げの結果を示す。各々(a) が SAC のみの場合であり, (b) が PID 補償を付加した場合, そして (c) がさらに適応形外乱補償を付加した場合を示している。

実験結果をみると, PID 補償を付加した場合は, I 分により定常誤差はほとんどなくなり, また D 分による過渡応答の改善効果も現れている。さらに, 適応形外乱補償を付加した場合は, 指令値が変化している部分でも応答の改善がみられ, ゴム人工筋の非線形特性を状態 (出力) 依存性外乱とみなして積極的に考慮し

た効果が現れていることがわかる。なお, 図 8(a) と図 9(a) の場合, 図 9(a) が山と谷の中間で大きな誤差を示すのは, ゴム人工筋-ゴム人工筋とゴム人工筋-スプリングの駆動特性の差に基づくものと考えられる。また, 回転の場合, 精度は変わらないが, 振動ぎみに追従する傾向がみられる。これは, 回転の場合, 二つのゴム人工筋を制御するため, SVO(サーボバルブ) の応答特性の差異や相互干渉等の影響が考えられる。

7. 結言

本論文では, ゴム人工筋-ゴム人工筋とゴム人工筋-スプリングの二つの駆動形式からなる 2 自由度アクチュエータに対し, 理論式による制御対象の構造を考慮して PID 補償を付加した SAC, さらに PID+適応形外乱補償を付加した SAC を各軸ごとに適用し, 基本的な制御性能を実験によって検討を行ったものである。

これによって以下の結果を得た。

- (1) ゴム人工筋の非線形特性を状態依存性外乱とみなして, SAC に PID 補償および適応形外乱補償を付加すると, 指令値の変動に対する大幅な制御性能の向上がはかれる。
- (2) ゴム人工筋-ゴム人工筋よりもゴム人工筋-スプリングの場合が, やや追従が滑らかに行われる。

今後, 本研究で行わなかった, 2 軸を同時に動かす場合について検討を行い, さらにその特性を明らかにする必要がある。

なお, 適応形外乱補償入力 $u_S(t)$ の構成から分るように, $d_2(t)/c$ を同定する可変調整パラメータ $k_{SP}(t)$, $k_{SI}(t)$ の第 1 要素は, σ 修正項を無視すれば, それぞれ比例器および積分器そのものである。従って, 適当な初期値およびゲイン Γ_{SP} , Γ_{SI} を与えれば, PID 補償の PI 分は必要ないと考えられる。これは, 今後の課題としたい。

最後に, 本研究は, 科学技術庁委託調査研究「生活・地域流動研究」の一環としてなされたものであることを付記し, 謝意を表する。

参考文献

- (1) 宇野, ゴム人工筋とロボットへの応用, 油圧と空気圧, 17-3(1986), 175-180
- (2) 則次・和田, ゴム人工筋のロボット制御への応用, 日本ロボット学会誌, 9-4(1991), 502-506

- (3) 陳・渡辺・中村・福田, ファジィ補償によるゴム人工筋ロボットマニピュレータの非線形制御, 日本ロボット学会誌, **11-5**(1993), 737-744
- (4) 陳・渡辺・中村, ゴム人工筋マニピュレータの多重ファジィ制御実験, 日本ロボット学会誌, **12-4**(1994), 596-602
- (5) 陳・渡辺・中村, ゴム人工筋 2 リンクマニピュレータの線形軌道追従制御, 日本機械学会論文集 (C 編), **59-565**(1993), 2745-2752
- (6) 片山・川人, 筋肉・骨格系の運動制御を行う並列階層制御神経回路モデル, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J73-D-II-8(1990), 1328-1335
- (7) 田中他, 空気圧サーボ系の適応制御, 計測と制御, **35-2**(1996), 129-133
- (8) 岩井, SAC(Simple Adaptive Control) の理論と応用, SICE セミナー「適応制御」テキスト, (1994), 31-46
- (9) 岩井・大友・水本, 構造の簡単なロバスト適応制御系, 計測自動制御学会論文集, **27-3**(1991), 306-313
- (10) 岩井・筒井・甲斐, 並列フィードフォワード補償を併用した単純適応制御系とその寄生要素に関するロバスト性, 計測自動制御学会論文集, **27-9**(1991), 996-1001
- (11) 香川・藤田・山中, 人工筋アクチュエータの非線形モデル, 計測自動制御学会論文集, **29-10**(1993), 1241-1243
- (12) 加藤・伊藤・伊藤・羅志, 筋骨格系の双線形モデルとゴム人工筋の粘弾性特性, 第 5 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1987), 657-658
- (13) 坂口, ゴム人工筋の空気圧サーボ, 油圧技術, (1987), 41-46
- (14) 岩井他, 微分動作付加による単純適応制御系の応答改善とその DD サーボ系による検討, 日本機械学会論文集 (C 編), **58-553**(1992), 2637-2643