研究論文

空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータのモデル予測制御*

永瀬 純也**, 佐藤 俊之***, 嵯峨 宣彦**, 鈴森 康一****

Predictive Functional Control of a Tendon-driven Actuator
Using a Pneumatic Balloon

Jun-ya NAGASE, Toshiyuki SATOH, Norihiko SAGA, Koichi SUZUMORI

In recent years, Japanese society has been aging, engendering a labor shortage of young workers. Robots are therefore expected to be useful to perform tasks such as day-to-day work support for elderly people. Therefore, a tendon-driven balloon actuator has been developed for the robot hand in such environments. In this study, we have evaluated characteristics of force control of a balloon actuator using a predictive functional control (PFC) system. Predictive functional control is one of the models based on predictive control (MPC) schemes, which predict the future outputs of the actual plant over the prediction horizon and compute the control effort over the control horizon at every sampling instance. In this paper, PFC control performance of a 1-link finger using a pneumatic balloon actuator is reported.

Key words : Predictive Functional Control, Tendon driven System, Pneumatic balloon, Soft actuator, Robot hand.

1. 緒 言

現在, 日本は超高齢社会に突入しており, 高齢者人口の割合は今後さらに伸びていくと予想されている. そのため若年労働力の減少の懸念から, 介護や福祉, リハビリテーションなど, 人間と密接に関わりあう環境におけるロボットの活躍が期待されている. 実際に実用化されているものも存在し¹⁾, ロボットハンドにおいては筋電義手²⁾が実用され始めている. 2021年には日本の総人口における高齢者の割合が30%にまで達する見込み³⁾であり, 介護・福祉を目的としたロボットハンドの産業界における需要は今後さらに伸びていくと予想される.

このようなロボットハンドは人間に対しての安全に配慮する必要がある, かつ人間との親和性も重要な要素となる. そのため, 軽量化による衝撃力の低減や, 人間との接触部に受動変形要素を有する空気圧人工筋を用いたロボットハンドの研究⁴⁾⁻⁷⁾が多く行われている. このような中で, 我々は従来の空気圧人工筋に対して, 自重比対ストローク比および自重比対発生力比の高い, 空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータ⁸⁾ (以下, バルーンアクチュエータ)を開発し,

それをロボットハンドに応用した⁹⁾.

通常, ロボットハンドは, 柔軟な対象物を握り潰さないように, また物を器用に操るために, 把持力制御が必要不可欠である. しかしながら, バルーンアクチュエータを含むゴム製の空気圧人工筋の場合, ゴムの非線形性やモデル変動などの影響を受けるため, 一般に精密な制御が困難である. そのため, 空気圧人工筋に対してはスライディングモード制御や H_∞ 制御などのロバスト制御系の適用¹⁰⁾⁻¹²⁾が試みられてきた. しかしながら, ロバスト制御は複雑で難解であるといったことから産業界にはほとんど浸透していないというのが現状であり, 今なおPID制御系が産業界では主流である. しかしPID制御は構造が単純で扱い易いという特徴を有するものの, 非線形性やモデル変動を有する制御対象に対しては, 良好な制御性能を達成するゲインを見出すことは, 多くの手間と時間を要する.

そこで本研究ではバルーンアクチュエータに, 制御則が比較的シンプルでかつロバスト性の高い, Predictive Functional Control^{13), 14)} (以下, PFC) の適用を試みた. PFCはモデル予測制御法の一つであり産業向けに開発されたものである. 一般に, モデル予測制御はサンプル時間毎に非線形最適化問題を解く必要があり計算負荷が高いために, サンプル時間の長い化学プラントなどに適用されている. これに対してPFCは, 制御則が基本関数のみで構成されるため計算負荷が小さく, また調整パラメータが一つのみであるためチューニングが比較的容易である. また, 内部モデルを有するため, モデル変動や外乱に対して高いロバスト性を有する. 本論文では, バルーンアクチュエータを用いた1リンクフィンガモデルのPFC力制御実験およびPID制御系と

*平成23年4月27日 原稿受付

**関西学院大学理工学部

(所在地 兵庫県三田市学園2-1)

(E-mail: J.Nagase@kwanseiac.jp)

***秋田県立大学システム科学技術学部

(所在地 秋田県由利本荘市土谷字海老乃口84-4)

****岡山大学自然科学研究科

(所在地 岡山県岡山市北区津島中3-1-1)

の比較評価により、バルーンアクチュエータを用いたロボットハンドのための力制御系としての評価を行う。

2. Predictive functional control

本節ではPredictive Functional Control (PFC) の考え方と理論について述べる。Fig. 1にPFCの概念図を示す。PFCはまず、第1ステップとして、現在のサンプリング時刻 k におけるプラント出力を起点とし、目標値への理想的な近づき方をあらわす曲線である参照軌道を設定する。第2ステップではプラントモデルを使って計算されたプラント出力の将来予測値を用い、参照軌道上に設定してある一致点での誤差（プラント出力の予測値と、一致点における参照軌道の値との差）を最小化する制御則を決定する。そして、求めた操作量の式に時刻 k を代入して、得られた操作量をプラントに加える。最後に、次のサンプル時刻 $k+1$ において、時刻を k に置きなおし、ステップ1に戻る。ただし、実際にはこの順序通りに実行するわけではなく、参照軌道の形や一致点をあらかじめ決めておけば、ステップ2で求めるべき制御則は解析的に得られるので、実際にオンラインでサンプル時刻ごとに行っているのは、制御則に含まれるいくつかの未知係数を決め、操作量をプラントに適用しているだけである。

次に、むだ時間要素を含むPFC¹⁵⁾の制御則導出について述べていく。PFCでは、以下に示される離散時間系の状態方程式および出力方程式を、SISOプラントの内部モデルとして用いる。

$$x_M(k+1) = A_M x_M(k) + B_M u(k) \quad (1)$$

$$y_M(k) = C_M x_M(k)$$

ここで、 $x_M \in \mathbb{R}^n$ は状態変数、 $u \in \mathbb{R}$ は操作量、 $y_M \in \mathbb{R}$ はモデル出力である。また、モデル出力 $y_M(k)$ は時刻 $k+d$ における実プラント出力の予測値 $\hat{y}_p(k+d)$ であり、 d はプラントに含まれるむだ時間を L 秒とした際にこれに対応するサンプル数 $\text{int}(L/T_s)$ を示す。このとき、参照軌道は以下のように与えられる。

$$y_R(k+d+i) = c(k+d+i) - \alpha^i (c(k+d) - \hat{y}_p(k+d)) \quad (2)$$

$$i = 0, 1, \dots$$

ここで、 $\alpha \in \mathbb{R}$ は参照軌道の調整パラメータで $0 < \alpha < 1$ となるように選ばれる定数であり、文献16)と同様に次式のように選ぶ。

$$\alpha = e^{-3T_s/T_{CLRT}} \quad (3)$$

ここで T_{CLRT} は希望する閉ループ応答時間をあらわし、設定値の95%に応答が到達するために必要な時間をあらわす。PFCでは、この希望閉ループ応答時間 T_{CLRT} が設計パラメータとなる。また T_s はサンプリング周期である。ここで評価関数を、一致点における誤差に基づき次式のように定義する。

$$D(k) = \sum_{j=1}^{n_h} \left\{ \hat{y}_p(k+d+h_j) - y_R(k+d+h_j) \right\}^2 \quad (4)$$

Fig. 1 Principle of predictive functional control

ただし、 h_j は一致点を表しており、 n_h は一致点の数である。一致点は任意であるが、本研究では、文献16)に示される以下の三点を用いる。

$$(h_1 \ h_2 \ h_3)^T = \left(\frac{T_{CLRT}}{3T_s} \quad \frac{T_{CLRT}}{2T_s} \quad \frac{T_{CLRT}}{T_s} \right)^T \quad (5)$$

また、予測誤差 $e(k+d)$ は次式で表される。

$$e(k+d) := \hat{y}_p(k+d) - y_M(k) \cong y_p(k) - y_M(k-d) \quad (6)$$

各サンプル時刻における操作量は、以下のように基本関数の重ね合わせで表されるものとする。

$$u(k+i) := \sum_{l=1}^{n_b} \mu_l(k) U_{B_l}(i) \quad (7)$$

ここで n_b は基本関数の数、 μ_l は未知係数である。また U_{B_l} は基底関数であり通常、次式のような多項式基底が適用される。

$$U_{B_l}(i) = i^{l-1}, i = 0, 1, \dots \quad (8)$$

実際に適用する操作量は $u(k+i)$ の最初の要素、すなわち、

$$u(k) := \sum_{l=1}^{n_b} \mu_l(k) U_{B_l}(0) \quad (9)$$

のみである。いま、時刻 $k+i$ におけるモデル出力 y_M を、次式のように強制応答 y_F と自由応答 y_{UF} に分解する。

$$y_M(k+i) = y_F(k+i) = y_{UF}(k+i) \quad (10)$$

このとき、強制応答は次式で表わされる。

$$y_F(k+i) = \sum_{l=1}^{n_b} \mu_l(k) y_{B_l}(i) \quad (11)$$

ここで、 y_{B_l} は基底関数 U_{B_l} に対応する応答である。一方、自由応答は以下のように表わされる。

$$y_{UF}(k+i) = C_M A_M^i x_M(k) \quad (12)$$

いま、時刻 $k+d+i$ における予測誤差が次式の様な多項式で近似されるものと仮定する。

$$\hat{e}(k+d+i) = e(k+d) + \sum_{m=1}^{d_e} e_m(k+d) i^m \quad (13)$$

ただし、 d_e および e_m は多項式近似の次数、および現在と過去の誤差データを用いて計算される未知係数をそれぞれ表している。同様に、将来の設定値は以下の多項式で表わす

ことができる.

$$c(k+d+i) = c(k+d) + \sum_{p=1}^{d_c} c_p(k+d)i^p \quad (14)$$

ここで, d_c と c_p はそれぞれ多項式近似の次数および未知係数である. 以上の式を用いて, 評価関数 $D(k)$ を最小化するような最適操作量は次式で与えられる.

$$u(k) = k_0 \left\{ c(k+d) - y_p(k) \right\} + \sum_{m=1}^{d_c} k_m c_m(k+d) - \sum_{m=1}^{d_c} k_m e_m(k+d) + \tilde{v}_x^T x_M(k) + \tilde{v}_{xd}^T x_M(k-d) \quad (15)$$

ここで K_0 , $\tilde{v}_x$, k_m , および $\tilde{v}_{xd}$ はそれぞれ以下の通りである.

$$k_0 = v^T \begin{pmatrix} 1 - \alpha^{h_1} \\ \vdots \\ 1 - \alpha^{h_{n_h}} \end{pmatrix}, \quad \tilde{v}_x = - \begin{pmatrix} C_M(A_M^{h_1} - \alpha^{h_1}I) \\ \vdots \\ C_M(A_M^{h_{n_h}} - \alpha^{h_{n_h}}I) \end{pmatrix}^T v$$

$$k_m = v^T \begin{pmatrix} h_1^m \\ \vdots \\ h_{n_h}^m \end{pmatrix}, \quad \tilde{v}_{xd} = - \begin{pmatrix} (\alpha^{h_1} - 1) C_M \\ \vdots \\ (\alpha^{h_{n_h}} - 1) C_M \end{pmatrix}^T v \quad (16)$$

ただし, (16)式における v は次式で表わされる.

$$v = (y_B(h_1) \cdots y_B(h_{n_h}))^T \left(\sum_{j=1}^{n_h} y_B(h_j) y_B(h_j)^T \right)^{-1} U_B(0) \quad (17)$$

ここで,

$$y_B(h_j) = (y_{B_1}(h_j) \cdots y_{B_{n_h}}(h_j))^T, \quad U_B(0) = (1 \ 0 \ \cdots \ 0)^T \quad (18)$$

3. 空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータを用いた 1 リンクフィンガシステム

3.1 空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータ

本研究で扱う空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータ (以下, バルーンアクチュエータ) の写真をFig. 2に, バルーンの仕様をTable 1にそれぞれ示す. バルーンアクチュエータは, 特に自重比に対する発生力比およびストローク比が高い⁹⁾ という特徴を有するため, ロボットハンド内部のような比較的狭いスペースに搭載しても, ハンドを駆動させるための十分なストロークや力が発生可能である.

バルーンアクチュエータは空気圧駆動で, 圧縮空気が送り込まれるバルーンとその外周に沿って巻きつけられた帯状の腱から構成される. このバルーンは, 断面寸法が長径21mm, 短径9mmおよび長さが20mmの扁平状の円形シリコンチューブで, バルーンの片側が塞がれており, もう片側は圧縮空気の給排気を行うためのホースが取り付けられている. また, 腱はポリプロピレン製であり, バルーンと接触する側の面には摩擦低減の目的で伸縮性のあるナイロン繊維を貼り付けてある. バルーンの両端は仕切り板によって位置が固定されており, バルーン側面の一方にはバルーンの膨張方向変位を拘束するための壁を設けている. 本アクチュエータの駆動原理は, バルーンに圧縮空気を給気することでバルーンが膨張し, その周囲に配置されている腱がその膨張とともに膨らむことで先端に引張り力を発生し

Fig. 2 Tendon driven balloon actuator

Table 1 Specification of a balloon

Material	Silicone rubber	
Length	25mm	
	Long diameter	Short diameter
Outer diameter	21.0mm	9.0mm
Inner diameter	17.8mm	5.8mm

Fig. 3 Photograph of 1-link finger system using balloon actuator

て腱駆動を実現している.

3.2 1 リンクフィンガシステム

本研究では, このバルーンアクチュエータを用いた 1 リンクフィンガシステムを製作し, 制御実験を行うことにより, PFCのロボットハンドのための力制御系としての評価を行う. Fig. 3に本実験で取り扱った 1 リンクフィンガシステムの写真を示す. このフィンガシステムは, 主にバルーンアクチュエータ, 引張バネ, およびフィンガで構成される. アクチュエータ-引張バネ拮抗型システムである. 駆動原理は, 引張バネの復元力を用いることによりフィンガを対象物に接近させて接触力を発生させ, 引張バネと拮抗したバルーンアクチュエータの発生力を用いることにより, それとは逆方向に力を与えることで接触力を減少させる機構となっている. これは, ロボットハンドの動作中においてシステムが異常停止した場合でも, バネの復元力により把持力を確保でき, 対象物の落下を防ぐことを目的としたフェールセーフ設計としているためである.

フィンガの設計においては, フィンガの可動角度はヒトの手の指とほぼ同じ 90° とし, この角度の時の, 1 リンクフィンガシステムにおけるバルーンアクチュエータのストローク量と, 3 リンクのフィンガを有するロボットハンド

にバルーンアクチュエータを内挿したときのストローク量が一致するように、プーリ径を検討し、半径を11mmとした。また、引張バネについては、バルーンアクチュエータに最大空気圧の0.2MPaを印加したときにフィンガの角度が可動角度上限の90°になるようにバネの仕様を検討し、結果、バネ定数が1.0N/mm、初張力が5.3Nの引張バネを選定した。

次に、1リンクフィンガの物理モデルについて述べる。Fig. 4に本実験で扱う1リンクフィンガモデルを示す。バルーンへの入力圧力から腱の引張力の発生までの過程を考えると、厳密なモデル化を行うには、空気の伝播速度や圧縮性、バルーン材料の非線形性、バルーン—腱間の摩擦、および腱の粘弾性など、応答特性に起因する様々なパラメータを考慮する必要がある。ただし、それらを全て考慮して正確にモデル化を行うことは一般に困難である。今回はPFCとPIDの比較評価が主な目的であることと、次章のFig. 7に示す1リンクフィンガのステップ応答波形の形状から、アクチュエータの入力圧力に対する発生力を一次遅れ系で近似することが妥当であると考えた。そこでFig. 4においてフィンガと対象物が接触している状態、すなわち $r^2 k \theta \geq r F$ を満たすときの接触力 F_{cont} を次式で与えた。

$$r F_1(t) / F_{cont}(t) = 0 \quad (19)$$

$$F_1(t) + \alpha F_1(t) = \beta p_1(t) \quad (20)$$

ただし、

$$F_1(t) := F_0(t) - F(t) \quad (21)$$

Fig. 4 1-link finger model using balloon actuator

Fig. 5 Experimental system of force control of 1-link finger using balloon actuator

$$p_1(t) := p_0(t) - p(t) \quad (22)$$

ここで、 r はプーリ半径、 k は引張バネのバネ定数、 θ は引張バネの自然長におけるフィンガの角度を0°とした時のフィンガ角度、 F_{cont} は対象物との接触力、 F はアクチュエータの発生力、 F_0 は $F_{cont}=0$ の時のアクチュエータ発生力、 p は印加圧力、 p_0 は $F_{cont}=0$ の時の印加圧力、 l はプーリ中心からフィンガ先端部までの距離（本実験では30mm）であり、そして α および β は、それぞれ p_1 に対応する未知係数を表している。本研究では、これらのモデルのパラメータ同定を、実機を用いた同定実験により行う。

4. 制御実験

4.1 実験装置

Fig. 5に本実験で使用した実験装置の概略図を示す。バルーンアクチュエータに供給する圧縮空気はコンプレッサー（YC-4：八重崎空圧製）から取り込み、間に介した電空レギュレータ（ETR200：コガネイ製）によりバルーンアクチュエータへの印加圧力を制御する。また台座に剛体のプレートをフィンガ先端の軌道上に固定する。そして、プレートとフィンガ先端の接触力を小型ロードセル（LMBT-A-100N：KYOWA製）により測定し、I/Oボード（Q4 PCI board：Quanser製）を介してPCに信号を取り込む。また、サンプル時間は0.002sとした。

4.2 モデルの同定

前章で述べた物理モデルにおける式(19)、(20)のパラメータを、実験により同定する。本研究で扱う制御対象は、バルーンアクチュエータ—引張バネ拮抗型の1リンクフィンガであるため、フィンガが対象物と接触する時の印加圧力は、その時のフィンガの角度 θ によって異なる。そのため、印加圧力 p に対する接触力 F の関係は、対象と接触する時のフィンガ角度 θ が変わると大きく変化してしまう。そこで本研究では、フィンガが対象と接触する時の印加圧力を基準圧力 p_0 とおき、これと印加圧力 p との差 $p_0 - p$ を入力とし、この時の接触力 F_{cont} を出力としたときの伝達関数モデルを考えた。従って、本モデルは式(19)、(20)より、次式のような1次遅れ系の伝達関数 $G(s)$ で表わされる。

$$G(s) = \frac{(l/r)(\beta/\alpha)}{s/\alpha + 1} \quad (23)$$

ここで、 $(l/r)(\beta/\alpha)$ はゲイン K 、および $1/\alpha$ は時定数 T をそれぞれ表している。本研究では、プレートをフィンガ角度30°においてフィンガと接触する位置に固定し、その時の圧力 p_0 に対する接触力 F_{cont} のステップ応答特性を測定し、その波形をカーブフィットすることにより、上式の伝達関数モデルの同定を行った。各圧力 $p_0 - p$ における同定結果をFig. 6に示す。結果、ゲイン K については35.0~47.5、時定数 T については0.54~0.60となり、印加圧力によって多少のばらつきが見られた。今回は各パラメータの中央値を採り、ゲイン K を41.3、時定数 T を0.57sと同定した。また、本研究

Fig. 6 Identified parameters in transfer function

Fig. 7 Step response of 1-link finger with regulator and only regulator

(a) PID control system with smith predictor

(b) PFC control system

Fig. 8 Block diagram of control system used in this study

で扱うPFC制御系においては式(1)のような離散系状態空間モデルが必要であるため、同定した式(23)の連続系伝達関数モデルを0次ホールドにより離散化後、状態空間モデルに変換した。

Fig.7の実線は、1リンクフィンガシステムにおける電空レギュレータへの指令電圧に対するフィンガの接触力 F_{cont} のステップ応答を示している。また破線は指令電圧に対する電空レギュレータからの出力圧力の変化量 Δp_{out} のステップ応答である。Fig.7から、本制御対象には主に電空レギュレータの応答特性にむだ時間が存在することがわかる。そこで、PID制御系にはむだ時間補償の一つであるスミス補償を適用したものを使用する。スミス補償とはプラントモデルを用いて見かけ上の制御対象の特性を変えて、むだ時

間を制御ループの外側に出して、1次遅れ系として制御しようとする考え方である。スミス補償型のPID制御系を適用するには、むだ時間の伝達関数 $G_L(s)$ が必要である。そこで、実験により測定したむだ時間からPADE近似を用いて伝達関数化を行った。ステップ応答の測定により、1リンクフィンガのむだ時間は0.12sであったため、これを2次のPADE近似により伝達関数 $G_L(s)$ を求めた結果、次式の通りとなった。

$$G_L(s) = \frac{s^2 - 50s + 833.3}{s^2 + 50s + 833.3} \quad (24)$$

なお、スミス補償型PID制御系の構造については文献17)の通りだが、本論文では省略する。

4.3 実験方法

本実験で扱うスミス補償型PID制御系、およびPFC制御系のブロック線図をFig.8に示す。本1リンクフィンガはアクチュエータへの印加圧力の増加により接触力を減少させ、また印加圧力の減少により接触力を増加させる機構

(a) $F_r=1\text{N}$ (b) $F_r=2\text{N}$ (c) $F_r=3\text{N}$

Fig. 9 Experimental result of force control when angle of finger is 30°

Fig. 10 Force and input pressure when angle of finger is 30°

となっている。そのため、対象物と接触直後は、圧力の指令値が負圧になる可能性がある。しかしながら、本実験システムにおける圧縮空気の出給源はコンプレッサであり負圧を与えるものでないため、印加圧力 p に関して以下の制約条件が存在する。

$$p \geq 0 \quad (25)$$

そのため、PID制御系においては、PIDコントローラとプラントの間に式(25)を満たすリミッターを設けた。またPFC制御系においても、PFCコントローラからの出力直後にリミッターを設け、リミッターからの出力をプラントに入力するとともに、内部モデルにも入力した。PFCは、このリミッターからの出力を内部モデルにも与えることで、操作量に制約条件を容易に考慮することが可能となる¹⁸⁾。

実験では、まずバルーンアクチュエータに0.2MPaの圧力を印加し、プレートと反対方向にフィンガを駆動させて非接触状態にする。次に、その状態から印加圧力を1秒間に0.02MPaずつ減少させながら、フィンガ先端を対象物に近づけていき、フィンガがプレートと接触後、力制御を開始させた。フィンガが接触する時のフィンガ角度は 30° 、 60° 、 90° の3条件に設定し、それぞれにおいて目標値をステップ状に1N、2N、3Nとそれぞれ与えた時の制御特性を調べた。

PIDコントローラの各パラメータは、ステップ応答法を用いて求めた後、試行錯誤的に調整を行った。PFCコントローラの調整パラメータは、基本的には、前述したように希望する閉ループ応答時間 T_{CLRT} のみであるため、このパラ

メータを減少させるほど速応性は向上するものの、プラント出力のノイズ成分やモデル化誤差の影響を受け易くなりロバスト安定性が低下する恐れがある。そこで、振動的な応答とならない最小の T_{CLRT} を実験的に求めた。PIDおよびPFCのパラメータ調整の結果、PIDについては比例ゲインを-12、積分時間を0.45s、および微分時間を0.06sとし、PFCにおいては T_{CLRT} を0.10sに設定した。

4.4 実験結果

Fig. 9に、フィンガを角度 30° において対象物のプレートと接触させた時の、PID制御系およびPFC制御系による力制御実験の結果を示す。Fig. 8より、オーバーシュート量を比較すると、目標値が1Nおよび2Nにおいては、いずれにおいても約0.5Nのオーバーシュートが見られたが、目標値が3Nの時においては、PID制御においては約0.6Nのオーバーシュートが見受けられ、PFC制御についてはその半以下の約0.25Nであった。次に、整定時間を比較すると、PID制御については、目標値の低い順から、2.5s、2.4s、3.4sであり、またPFC制御においては、0.7s、0.7s、1.3sであり、いずれの目標値においてもPFC制御の方が、PID制御に比べて整定時間が約2秒短い結果となった。特に、目標値3Nにおいては、オーバーシュート量および整定時間ともに、PID制御の方が、顕著に低い制御特性を示す結果となった。

この理由について考察する。Fig. 10は目標値3Nにおける、PFC制御およびPID制御の場合のそれぞれの印加圧力と接触力を示した図である。Fig. 10においてまずPID制御においては、制御開始からしばらくは、印加圧力がリミッターで制限した下限値の0MPaであり、約0.4Nオーバーシュートした約15秒後から、ようやく印加圧力が上昇し始めて接触力を減少させている。一方PFC制御においては、制御開始後の印加圧力は下限値の0MPaであるものの、接触力が目標値付近となる約0.8秒で印加圧力が上昇し始めている様子が見受けられる。これは、(25)式に示す制約を設けたことによりPID制御においては積分コントローラによるワインドアップ現象が生じたため、PIDはPFCに比べて過大なオーバーシュートが生じていると考える。また目標値が1Nおよび2Nの場合は、3Nの場合ほどPFCとPIDとでオーバーシュート量に顕著な差は見られないが、これは、目標値が1N、2Nの時は目標値に達するための印加圧力の減少量が比較的小さいため、制約条件の影響を受けにくかったためであると考えられる。

しかしながら一方で、特に目標値3NにおいてPFC制御とPID制御に顕著な差が見られた他の要因として、制約条件に加えて、モデル化誤差の影響も考えられる。すなわち、目標値1Nおよび2Nの場合における印加圧力範囲においては、制御対象のモデル化誤差が大きいため、結果的にPIDとPFCでオーバーシュートに関して顕著な差が見られなくなった可能性が考えられる。そこでこの可能性について考察していく。本研究では制御対象を1次遅れ要素でモ

デル化したため、制御パラメータには時定数 T およびゲイン K が存在する。同定実験においては、各印加圧力においてそれぞれのパラメータにバラツキが見られたため、本研究ではそれらの中央値をモデルパラメータとして同定した。同定実験により見られたバラツキは、時定数 T については $0.54\text{s} \sim 0.60\text{s}$ 、ゲイン K については $35.0 \sim 47.5$ であった。時定数については同定値が 0.57s であるため、バラツキはわずかに $\pm 0.03\text{s}$ である。ここで議論しているのは、制御特性に大きな影響を与えた要因についてであるが、同定値 0.57s に対するバラツキ $\pm 0.03\text{s}$ が、制御特性に大きな影響を及ぼしたとは考えにくい。したがってここではゲイン K についてのみ言及していくことにする。実験により同定したゲイン K は 41.3 であるが、Fig. 6より、実際は印加圧力によってゲイン K に $35.0 \sim 47.5$ のバラツキが見られる。ゲイン K が同定パラメータの 41.3 を示すときの p_0 - p 値は、Fig. 6より約 0.03MPa であることがわかる。また、この 0.03MPa より圧力が増加す

るに伴い、ゲイン K は 41.3 から離れていくことがわかる。すなわち、制御時における p_0 - p 値が 0.03MPa より離れるほど、制御対象のモデル化誤差が大きくなり制御性能の低下を招きやすくなることになる。本PFC制御実験における印加圧力 p_0 - p の範囲は、フィンガがプレートと接触した瞬間を除けば、目標値 1N 時においては、 $0.03\text{MPa} \sim 0.09\text{MPa}$ 、また目標値 3N 時においては $0.06\text{MPa} \sim 0.09\text{MPa}$ であった。このことから目標値 3N の時の方が 1N の時に比べて制御対象のモデル化誤差が大きいはずであり、前述において懸念した、目標値 1N および 2N の時において、 3N の時に対してモデル化誤差の影響で制御性能が低下したという可能性は低いと考えられる。

Fig. 9より、目標値 1N および 2N においてPFCとPIDでオーバーシュートに関してあまり差は見られないものの、整定時間に関しては差が見受けられ、PID制御の方が、整定時間が 1.8s 程長いことがわかる。PIDパラメータの調整に

(a) $F_r = 1\text{N}$ (b) $F_r = 2\text{N}$ (c) $F_r = 3\text{N}$

Fig. 11 Experimental result of force control when angle of finger is 60°

(a) $F_r = 1\text{N}$ (b) $F_r = 2\text{N}$ (c) $F_r = 3\text{N}$

Fig. 12 Experimental result of force control when angle of finger is 90°

より、Fig. 8の結果よりもPID制御における整定時間の短縮は可能であったが、このPIDパラメータにおいて目標値3Nの時の制御特性を確認すると不安定な応答となった。つまり制約条件の影響を最も受けやすい目標値3NにおけるPIDパラメータが、制約条件の影響をあまり受けない目標値の時の制御特性にも影響を及ぼす結果となった。

バルーンアクチュエータはシリコンゴムを膨張させて駆動させるため、ゴムの非線形性の影響で膨張量の違いによって力の応答特性が異なり、制御特性に影響を及ぼす恐れがある。そこでフィンガが対象物と接触する時の角度 θ をそれぞれ 60° 、 90° としたときの制御特性を実験により確認した。Fig. 11およびFig. 12に実験結果を示す。オーバーシュート量はいずれの角度においても、 30° の場合と同等の結果を示した。整定時間については、PID制御においては $1.8\text{s} \sim 2.1\text{s}$ であり、またPFC制御においては $0.4\text{s} \sim 0.8\text{s}$ となり、角度を変えてもPFC制御の方がPID制御に比べて 1s 以上、整定時間が短い結果となった。また、対象物と接触する時のフィンガ角度を変化させても制御特性が低下しないことを本実験により確認できた。

5. 結 言

本研究では空気圧バルーン型腱駆動アクチュエータを用いた1リンクフィンガのPFC制御による力制御特性を調べ、PID制御との比較評価を行った。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) バルーンアクチュエータを用いた本フィンガシステムは、空気圧の減圧により接触力を高める機構となっているが、空気の供給源はコンプレッサーであるため、入力圧力は 0 MPa 以上という制約条件が存在する。これの影響を受けて、積分器を有するPID制御系では、立ち上がり時に入力が飽和することで積分器に入力が蓄積してしまい、結果、ワインドアップ現象が発生する問題が生じる。本研究では、このような問題に対して、積分器の無かつ制約条件を容易に考慮可能なPFC制御系を適用することで、PID制御系に比べ良好な制御特性が得られることを実験により確認できた。
- (2) 実験においては、PID制御系においては制御量が整定するまで約 $1.8 \sim 3.4\text{s}$ の時間を要していたが、PFC制御系においては整定時間は約 $0.4\text{s} \sim 1.3\text{s}$ となり、PFC制御系の方が最大で約 2.1s 素早く収束する結果となった。また、実験条件によっては、PID制御の方がPFC制御に比べて2倍以上のオーバーシュートが見受けられた。
- (3) バルーンアクチュエータはゴムを膨張させて力を発生させるが、フィンガが対象と接触するときのフィンガ角度によってゴムの膨張量が異なるため、ゴムの有する非線形性の影響を受けて制御特性が低下する恐れがあるが、本制御実験において、フィンガの角度を変えても力制御特性の低下が見受けられないことを確認で

きた。

謝 辞

本研究の一部は、科学研究費 若手研究 (B) (課題番号23760246) の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) Suzuki, K., Mito, G., Kawamoto, H., Hasegawa, Y., Sankai Y.: Intention-Based Walking Support for Paraplegia Patient with Robot Suit HAL, Climbing and Walking Robots, p. 383-408 (2010)
- 2) http://www.h-e-ico.jp/Products/e_m_g/ph_sh_2.html
- 3) <http://www.ipss.go.jp/pp-newest/j/newest03/newest03.asp>
- 4) Suzumori, K., Iikura, S., Tanaka, H.: Applying a Flexible Microactuator to Robotic Mechanisms, IEEE Control Systems, Vol. 12, No. 1, p. 21-27 (1992)
- 5) Noritsugu, T., Kubota, M., Yoshimatsu, S.: Development of Pneumatic Rotary Soft Actuator Made of Silicone Rubber, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 13, No. 1, p. 17-22 (2001)
- 6) <http://www.shadow.org.uk/products/newhand.shtml>
- 7) http://www.festo.com/cms/en-gb_gb/5001.htm
- 8) Saga, N., Nagase, J., Kondo, Y.: Development of a Tendon-Driven System Using a Pneumatic Balloon, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 2, p. 139-145 (2006)
- 9) 永瀬純也, 嵯峨宣彦: 空気圧バルーンを用いた腱駆動ロボットハンドの開発, 計測自動制御学会産業論文集, Vol. 9, No. 11, p. 76-83 (2010)
- 10) Van Damme, M., Vanderborght, B., Van Ham, R., Verrelst, B., Daerden, F., Lefeber, D.: Proxy-Based Sliding Mode Control of a Manipulator Actuated by Pleated Pneumatic Artificial Muscles, proc. of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, p. 4355-4360 (2007)
- 11) Tondu, B., Braikia, K., Chettouh, M., Ippolito, S.: Second order sliding mode control for an anthropomorphic robot-arm driven with pneumatic artificial muscles, 2009 9th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, p. 47-54 (2009)
- 12) Yaegashi, K., Saga, N., Satoh, T.: Control of robot arm using pneumatic artificial muscle with spherical joint, Proc. of the IEEE International Conference on Mechatronics & Automation, p. 1093-1098 (2005)
- 13) Richalet, J., Abu el Ata-Doss, S., Arber, C., Kuntze, H. B., Jacobasch, A., Schill, W.: Predictive functional control: application to fast and accurate robot, Proc. of IFAC 10th World Congress, p. 251-259 (1987)

-
- 14) Richalet, J. : Industrial applications of model based predictive control, Automatica, Vol. 29, No. 5, p. 1251-1274 (1993)
 - 15) Satoh, T., Saito, N., Saga, N. : Predictive functional control with disturbance observer for pneumatic artificial muscle actuator, Proc. of the 1st International Conference on Applied Bionics and Biomechanics (2010)
 - 16) Dieulot, J. Y., Benhammi, T., Colas, F., Barre, P. J. : Composite predictive functional control strategies, Application to positioning axes, International Journal of Computers, Communications & Control, Vol. III, No. 1, p. 41-50 (2008)
 - 17) Smith, O. J. : A Controller to Overcome Dead Time, ISA Journal, Vol. 6, No. 2, p. 28-33 (1959)
 - 18) ジャック・リシャレ, 江口 元 : モデル予測制御—PFC (Predictive Functional Control) の原理と応用— (小崎恭寿男 監修), 104, 日本工業出版 (2007)