収縮率推定による McKibben 型空気圧ゴム人工筋の位置決め制御実験

横 山 浩一郎*・小木曾 公 尚*

Position Control Experiments of McKibben Pneumatic Artificial Muscle Using Contraction Ratio Estimation

Kouichirou YOKOYAMA* and Kiminao KOGISO*

This paper considers position control of a practical McKibben pneumatic artificial muscle without measuring a PAM length. Unscented Kalman filter is employed to estimate the length based on pressure measurement. Comparing with some PID control systems, the effectiveness that UKF can be used as a distance sensor for the PAM position control is illustrated.

Key Words: McKibben pneumatic artificial muscle, unscented Kalman filter, position control

1. はじめに

McKibben 型空気圧人工筋は、空気圧で収縮・伸張するアクチュエータである。人工筋は、内部にゴムチューブをもち、その外側をメッシュ状の化学繊維で覆われた構造で、内部のゴムに圧縮空気を入れることでゴムチューブが膨張し、径方向に膨張する。このとき外側を覆うメッシュも膨らむが、メッシュ自体の長さが変化しないため、人工筋は、長さ方向に縮み、収縮力を生じさせる。一方で、空気を抜くことで人工筋は、伸張するが、このとき押す力は、発生しない。

人工筋の構成材料は、ゴムと繊維であるため、柔軟性および軽さに優れている。こうした特徴から、ここ約 20 年間の研究では、リハビリテーションロボット^{1),2)}やヒューマノイドロボット³⁾に使用されている。人工筋を用いたロボットや装置は、物体の把持、整列および運搬などを行なうため、位置決め制御が重要な役割を占めている。しかし、制御の観点で人工筋は、圧力-収縮率の関係 (Fig. 1) にヒステリシスをもち、ヒステリシスは、入力 of 過去情報により、出力が異なる特性であり、モデルの構造を複雑に、また、高精度な制御システムの構築を難しくする。そのため、人工筋による駆動装置で、位置決め制御に関する研究が行なわれている。

人工筋の位置決め・力制御に関する先行研究には、2 自由度 PI 制御⁴⁾、ファジィ制御⁵⁾、閉ループ制御⁶⁾、モデル予測制御⁷⁾、Integrated Intelligent Nonlinear 制御⁸⁾などがある。

Fig. 1 Hysteresis curve of steady-state characteristic and mapping function

る。これらの制御系では、距離センサを用い、人工筋の収縮率または、長さが計測可能であることを前提としている。実際のロボットや装置に距離センサを取り付けることは、コストの増加や空間の制約などが発生することから、必ずしも可能でない。距離センサを用いずに制御可能な仕組みを構築できれば、より多くの位置決め装置に制御手法の研究成果を生かすことができる。

距離センサが使えない場合、収縮率を推定する仕組みが必要である。非線形な数値モデルに適用可能な推定器では、unscented Kalman filter (UKF)^{9),10)}がある。UKF に先行研究の人工筋数値モデル¹¹⁾を適用することで、入力を電圧、観測値を人工筋の内圧、推定値を人工筋の収縮率とするオブザーバが構成される¹²⁾。しかし、人工筋の収縮率推定を用いて位置決め制御する研究は、今のところ見当たらない。

そこで本稿では、UKF の収縮率推定機構を含むいくつかの人工筋位置決め制御系を構築し、それぞれの制御性能の評

* 電気通信大学大学院情報理工学研究科 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Graduate School of Information and Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

(Received April 11, 2017)

(Revised June 15, 2017)

価を行なう。状態推定の手法には, unscented Kalman filter (UKF) ^{9), 10)}を採用し, 人工筋の数理モデルには, 先行研究 ¹¹⁾を用いた。そして, 人工筋に対し, UKF 状態推定機構を併用した圧力フィードバックによる位置決め制御系, 圧力フィードバックのみによる位置決め制御系, そして, 位置フィードバックによる位置決め制御系を, それぞれ PID 補償器を用いて構築した。矩形波と正弦波の参照入力 (人工筋の収縮率) を設定した制御実機により, それぞれの系の追従性能を評価する。ただし本実験では, 試行錯誤により, 最も制御性能の良好な応答になるように PID ゲインをそれぞれ定めた。

2. UKF を用いた位置決め制御系

本章では, 距離センサの代わりに UKF を用い, 人工筋の位置制御システムを考える。

2.1 UKF による収縮率推定

UKF に人工筋の数理モデル ¹¹⁾を適用した状態方程式は, 以下の非線形ハイブリッドシステムで表わされる ¹²⁾。

$$\begin{aligned} x[k+1] &= f_{\sigma}(x[k], u[k], k) + q[k], \text{ if } x[k] \in X_{\sigma} \\ y[k] &= h(x[k]) + r[k] \end{aligned}$$

ただし, 時刻 $k \in \mathbb{Z}^+$ (非負の整数集合), 状態変数 $x = [\varepsilon \dot{\varepsilon} P]^T \in \mathbb{R}^3$, 入力 $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}$, 出力 $y \in \mathbb{R}$, 収縮率 $\varepsilon \in \mathbb{R}$, 収縮速度 $\dot{\varepsilon} \in \mathbb{R}$, 人工筋の内圧 $P \in \mathbb{R}$, サブシステムのインデックス $\sigma \in \Sigma = \{1, 2, \dots, 12\}$, $X_{\sigma} = \{x \in \mathbb{R}^3 | \Psi_{\sigma}(x) \leq 0\}$ である。 $\Psi_{\sigma}(x) : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ は, if-then ルールの条件文から定まる関数であり, 12 個のサブシステムをもつ運動方程式 $f_{\sigma} : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ は, 連続時間モデルを 4 次のルンゲ・クッタ法を用いて逐次的に離散化して得られる。 $h(x[k]) : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R} = [0 \ 0 \ 1]^T x[k]$ であり, $q \in \mathbb{R}^3$ は, 差分方程式の更新ノイズ, $r \in \mathbb{R}$ は, 観測ノイズである。 q と r は, 互いに独立なノイズであり, それぞれの平均 $\bar{q} = 0$, $\bar{r} = 0$ とそれぞれの共分散行列 $Q \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$, $R \in \mathbb{R}$ をもつことに注意する。

UKF では, 確率分布をいくつかの代表点からなるとみなし, その平均と共分散行列を計算する。そのために, 状態変数 x と出力 y の確率分布における代表点として, x , y のシグマポイント $\mathcal{X} \in \mathbb{R}^3$, $\mathcal{Y} \in \mathbb{R}$ を設定する。差分方程式で更新される前のシグマポイント $\mathcal{X}$ は,

$$\begin{aligned} \mathcal{X}_0[k] &= \hat{x}[k] \\ \mathcal{X}_i[k] &= \hat{x}[k] + \left(\sqrt{(n+\kappa)\hat{P}[k]} \right)_{*i} \\ \mathcal{X}_{n+i}[k] &= \hat{x}[k] - \left(\sqrt{(n+\kappa)\hat{P}[k]} \right)_{*i} \end{aligned}$$

より定まり, PAM モデルに適用する上で $i = 1, 2, 3$, $n = 3$ とする。また, $\hat{x} \in \mathbb{R}^3$ と $\hat{P}[k] \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ は, それぞれ UKF によって求められた状態変数の推定値, 状態変数の推定共分散行列である。ここで, 正方行列 G に対し, $G = H^2$ のとき $H = \sqrt{G}$ と表記し, 行列 H の i 列における縦ベクトルの要

(a) UKF-based position control with the pressure sensor (UC).

(b) Position control with the distance sensor (IC).

(c) Pressure-based position control with the pressure sensor and the lookup table (PC).

Fig. 2 Three configurations of PID control systems implemented into the PAM system

素を $(H)_{*i}$ と表わす。 $\kappa \in \mathbb{R}$ は, 正規分布尖度調整用のパラメータで $\kappa > -n$ である。

パラメータ κ は, f, h によって写像されたシグマポイントから, 平均と共分散行列を再計算する際に使われる重み関数 $W_i \in \mathbb{R}$ にも存在する。ここで W_i は, $W_0 = \kappa/(n+\kappa)$, $W_i = W_{n+i} = 1/2(n+\kappa)$ である。本稿では, 状態変数と共分散行列の初期値および UKF のパラメータを経験的に与えている。

2.2 検証用の位置決め制御系

PID 制御器の状態空間表現は, つぎのとおりである。

$$\begin{aligned} x_c[k+1] &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} x_c[k] + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e[k] \\ u[k] &= [K_I \quad -K_D] x_c[k] + (K_I + K_P + K_D)e[k] \end{aligned}$$

ここで, 制御器の状態変数 $x_c \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は, 初期値 $x_c[0] = [0 \ 0]^T$ であり, 入力, フィードバック誤差 $e = r - \varepsilon$, 出力は, 制御入力 u である。 K_P , K_I , K_D は, それぞれ PID 制御器の比例, 積分, 微分ゲインである。この PID 制御器を用いて, 3 つの制御系を構築する。

1 つ目の制御手法は, UKF による収縮率推定を用いた収縮率フィードバックによる位置決め制御系 (UKF-based control: UC) である。UC のブロック線図を Fig. 2(a) に示す。この手法では, 圧力センサの情報に基づき, UKF により推定される収縮率の情報を用いて位置制御を行なう。

2 つ目の制御手法は, 距離センサを用いた収縮率フィードバックによる位置決め制御系 (Ideal control: IC) である。IC のブロック線図を Fig. 2(b) に示す。ここでは, 距離センサを用いない制御系と比較するために, IC を構築する。

3 つ目の制御手法は、圧力センサを用いた圧力フィードバックによる位置決め制御系 (Pressure-based control: PC) である。PC のブロック線図を Fig. 2(c) に示す。この手法は、事前の実験から定常状態における圧力-収縮率の mapping table (Fig. 1) を作成し、入力された位置の目標を圧力の目標に変換し、圧力に対してフィードバック制御を行なう。mapping table は、事前に人工筋の収縮・伸長定常応答を計測し、収縮時および伸長時における対応関係の平均値を返す look-up table である。PC は、圧力-収縮率の関係にヒステリシスがないと仮定しているため、位置の推定精度が粗い制御系となる。

3. 実機検証と考察

本章では、実験で用いた実験装置の構成、パラメータの設定、実験結果および考察について示す。

3.1 実験装置の構成

実験装置全体の電気および圧縮空気の経路を Fig. 3 に示す。本実験で用いる人工筋は、Fig. 4 の DMSP-10-250N (FESTO) であり、上端側を固定して下端側に反射板およびおもり 1 kg を取り付ける。制御装置 (計算機) は、CPU Pentium Dual-Core E5400 2.7 GHz (Intel)、メモリ 4 GB、OS Vine Linux 5.0 であり、RT-Preempt Patch を適用し、サンプリング周期は、リアルタイム性に配慮して 10 ms に設定した。計算機の AD/DA ボード PCI-3522A (Interface) から出力される電圧指令値 (制御入力) により、比例流量制御弁 MPYE-5-M5-010-B (FESTO) の開度が磁気コイルで調整される。その開度に応じて圧縮空気が流入出し、人工筋を収縮・伸長させ、人工筋の長さおよび圧力を測定する。ここで、AD/DA ボードの電圧指令値の分解能は、指令電圧および読み取り電圧どちらも 12 bit である。圧縮空気は、コンプレッサーにより 7 気圧が保たれ、人工筋の体積に比べ十分に容量の大きなタンク (25 l) に供給される。本実験では、供給圧力の変動がないものとする。そして、タンクの絶対圧、および、人工筋の内圧は、圧力センサ E8M-10 (OMRON) で測定する。人工筋の長さは、人工筋上端から人工筋下端に取り付けられた反射板までの距離を、分解能 300 μ m のレーザーセンサ ZX-LD300L・ZX-LDA11-N (OMRON) で測定する。

3.2 制御器および UKF の設定

各制御系の実装にあたり制御器の PID ゲインは、経験的に調整された Table 1 に示す値を用いる。Table 2 に示す UKF に用いる人工筋のパラメータは、シミュレーターの定常応答および過渡応答が、経験的に最も良くなる値を設定する。また、UKF における状態変数および共分散行列の初期値は、 $\hat{x}[0] = x[0] = [0 \ 0 \ 1.013 \times 10^5]^T$, $\hat{P}[0] = \text{diag}(10^{-4}, 1, 10^8)$ であり、状態変数に関するノイズの共分散行列、観測ノイズの分散および尖度調整パラメータは、 $Q = \text{diag}(10^{-5}, 0, 10^9)$, $R = 10^5$, $\kappa = 10$ である。

3.3 実験結果

制御系の性能評価の手段として、次式に示す各制御系の参照入力および収縮率における誤差 $e = r - y$ の l_2 -ノルム $\|e\|_2$

Fig. 3 Block diagrams of the PAM system

Fig. 4 FESTO DMSP-10-250N

Table 1 PID gains of each controller

Method	K_P	K_I	K_D
UC	0.6	0.0012	65
IC	0.12	0.0006	0.0012
PC	0.1	0.005	0.008

Table 2 PAM's parameters with $M = 1.0$ kg

DMSP-10-250N	
D_0 [m]	0.010
L_0 [m]	0.250
D_1 [m ³]	-4.13×10^{-4}
D_2 [m ³]	2.40×10^{-4}
D_3 [m ³]	1.99×10^{-5}
P_{tank} [Pa]	0.701×10^6
P_{out} [Pa]	0.101×10^6
k [-]	1.4
R [J/kg·K]	287
T [K]	293
K [N/m ³]	2.05×10^6
θ [rad]	7.71×10^{-1}
C_{q1} [-]	6.78×10^{-1}
C_{q2} [1/Pa]	-2.58×10^{-6}
c_c [N]	4.69×10^{-1}
A_0 [m ²]	4.06×10^{-8}
k_1 [-]	1.13
k_2 [-]	8.12×10^{-1}
c_v [Ns/m]	1.25×10^2

Fig. 5 Time responses of the practical PAM control systems with the step-like reference

および時間平均 $\bar{e}$ を用いる.

$$\|e\|_2 = \sqrt{\sum_{k=N_s}^{N_f} e^2[k]} \quad \bar{e} = \frac{1}{N_f - N_s + 1} \sum_{k=N_s}^{N_f} e[k]$$

ここで, N_s は, 評価開始時のステップであり, N_f は, 評価終了時のステップである. たとえば, 0 to 200 s の計算であれば, 計算機のサンプリング周期が 10 ms であるから, $N_s = 0$ ステップで, $N_f = 20000$ ステップであり, 10 to 200 s の計

Fig. 6 Time responses of the practical PAM control systems with the sinusoidal reference

算であれば, $N_s = 1000$ ステップで, $N_f = 20000$ ステップである。

本実験では, さまざまな圧力帯域での応答を調べるために,

矩形波と正弦波の参照入力を設定する。矩形波は, 最初の 70 秒までを収縮率 10.2% と 6.4%, 130 秒までを 14.0% と 10.2%, そして, 190 秒までを 14.0% と 6.2% を交互に切替わるステッ

Table 3 l_2 -norm of constraction ratio error from reference

Reference	Time	UC	IC	PC
Step-like	0 to 200 s	1.431	1.864	3.102
	10 to 200 s	1.287	1.191	3.009
Sinusoidal	0 to 200 s	1.098	1.742	3.709
	10 to 200 s	0.943	1.118	3.598

Table 4 Mean of constraction ratio error from reference

Reference	Time	UC	IC	PC
Step-like	0 to 200 s	13.05	14.71	-186.59
	10 to 200 s	6.87	-0.02	-187.46
Sinusoidal	0 to 200 s	-4.92	14.50	-237.72
	10 to 200 s	-9.70	-1.25	-238.07

 $\times 10^{-4}$

プ信号で構成される。このとき切替わるまでの時間は、5秒と20秒の二種類である。正弦波は、最初の40秒までを収縮率10.2%から6.4%の範囲で、80秒までを14.0%から10.2%の範囲で、120秒までを14.0%から6.2%の範囲で連続的に変化する。そして、その後は、最初の値に戻って入力を繰り返す。各正弦波の周期は、10秒で統一する。

参照入力を矩形波にして制御した結果をFig. 5に示す。UCは、過渡応答が参照入力に追従しており、オーバーシュートが見られない。Table 3, Table 4は、収縮率誤差の l_2 -ノルムおよび時間平均を示す。矩形波の場合、UCとPCの l_2 -ノルム(10 to 200 s)が、1.287と3.009であり、UCのほうが小さく、時間平均(10 to 200 s)は、 6.87×10^{-4} と -187.46×10^{-4} であり、参照入力により近づく結果である。さらに、UCとICは、 l_2 -ノルム(10 to 200 s)が1.287と1.191であり、UCは、 l_2 -ノルムの点でICに近い追従性能を有することがわかる。

参照入力を正弦波にして制御した結果をFig. 6に示す。実験の結果、UCは、PCに比べて参照入力に追従しており、オーバーシュートなども見られない。収縮率誤差の l_2 -ノルムおよび時間平均(Table 3, Table 4)から、UCとICの l_2 -ノルム(10 to 200 s)は、0.943と1.118で、UCがICよりも小さい。時間平均(10 to 200 s)は、UCとICにおいて -9.70×10^{-4} と -1.25×10^{-4} で同程度である。PCの時間平均(10 to 200 s)は、 -238.07×10^{-4} であり、PCと比較してUCは、参照入力との誤差が少ないことがわかる。

3.4 考察

ゲイン K_D についてICとUCでは、それぞれ、0.0012と65と設定した。UKFは、ノイズを除去する性質があるため、収縮率の推定値が振動的にならず、フィードバック誤差にノイズの影響がのりにくい。微分器の影響を強くしても応答が振動的にならないことから、 K_D を大きく設定することができ、矩形波入力に対する追従性能が改善されたと考えられる。

Fig. 5(a)の10~15秒および70~75秒あたりで、UCの応答に振動が見られる。これは、ゲイン K_D を大きくしたこと、矩形波の参照入力が切替わる際に、ベアリングと人工筋ガイド軸との間に生じる摩擦に起因する振動が増幅されていると考えられる。人工筋とベアリングの軸芯出しにてこの現

(a) Calculation time at step-like reference

(b) Calculation time at sinusoidal reference

Fig. 7 Calculation times from 0 to 50 seconds

象は抑制できると思われる。

Fig. 5(e) および Fig. 6(e) の UKF による推定結果では、矩形波の推定のほうがより遅れるようすが見られる。これは、UKF に適用するモデルが非線形であること (もしくは、そのモデル化誤差) が原因と考えられるが、その解明については今後の課題としたい。

制御処理のリアルタイム性を述べる。Fig. 7 は、UC₁ の1ステップ内での収縮率推定および入力 u の計算に要する時間を示し、平均0.139 ms、最大0.281 msである。計算時間がサンプリング周期10 msに収まることから、制御系は、リアルタイムに処理されていることがわかる。さらに、より短いサンプリング周期での制御も可能であることから、サンプリング周期の長短が与える応答への影響や、前述の推定遅れとの関連性についても今後検討したい。

4. おわりに

本稿では、UKFの収縮率推定を含む3種類の人工筋位置決め制御系を構築し、試行錯誤に基づくゲイン設計により得られた実験結果から人工筋制御系の追従制御性能を定量的に比較、評価した。そして、比較結果から、圧力フィードバックとUKFの状態推定機構を併用した位置決め制御系が良好な追従性能を有することを示した。

今後の課題は、他製品の人工筋に対してUKFを用いた位置決め制御系の有効性の確認、負荷変動や未知外乱による影響を受ける場合の位置決め制御性能評価実験、そして、短いサンプリング周期における制御系の応答や推定精度に与える影響などを実験的に調べることが挙げられる。

謝辞 本研究は、JSPS 科研費若手研究 (A) JP25709014 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) T. Noritsugu and T. Tanaka: Application of rubber artificial muscle manipulator as a rehabilitation robot, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **2-4**, 259/267 (1997)
- 2) N.G. Tsagarakis and D.G. Caldwell: Development and control of a soft-actuated exoskeleton for use in physiotherapy and training, *Autonomous Robots*, **15-1**, 21/33 (2003)
- 3) D. Shin, I. Sardellitti and O. Khatib: A hybrid actuation approach for human-friendly robot design, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1747/1752 (2008)
- 4) T.V. Minh, T. Tjahjowidodo, H. Ramon and H.V. Brussel:

- Control of a pneumatic artificial muscle with model-based hysteresis compensation, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1082/1087 (2009)
- 5) H. Jahanabadi, M. Mailah and M.Z.M. Zain: Active force control of a fluidic muscle system using fuzzy logic, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1970/1975 (2009)
 - 6) B. Tondur: Closed-loop position control of artificial muscles with a single integral action: Application to robust positioning of McKibben artificial muscle, *IEEE International Conference on Mechatronics*, 718/723 (2013)
 - 7) G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, I. Arvanitakis and S. Manesis: Piecewise affine modeling and constrained optimal control for a pneumatic artificial muscle, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**-2, 904/916 (2014)
 - 8) D.X. Ba, T.Q. Dinh and K.K. Ahn: An integrated intelligent nonlinear control method for a pneumatic artificial muscle, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, **21**-4, 1835/1845 (2016)
 - 9) S.J. Julier, J.K. Uhlmann and H.F. Durrant-Whyte: A new approach for filtering nonlinear systems, *American Control Conference*, **3**, 1628/1632 (1995)
 - 10) H.M.T. Menegaz, J.Y. Ishihara, G.A. Borges and A.N. Vargas: A systematization of the unscented Kalman filter theory, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **60**-10, 2583/2598 (2015)
 - 11) K. Urabe and K. Kogiso: Hybrid nonlinear model of McKibben pneumatic artificial muscle systems incorporating a pressure-dependent Coulomb friction coefficient, *IEEE Conference on Control Applications*, 1571/1578 (2015)
 - 12) T. Kodama and K. Kogiso: Applications of UKF and EnKF to estimation of contraction ratio of McKibben pneumatic artificial muscles, *American Control Conference*, 5217/5222 (2017)

=====

[著 者 紹 介]

横 山 浩一郎 (学生会員)

2017 年電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業。同年同大学大学院情報理工学研究科機械知能システム学専攻入学。空気圧ゴム人工筋の制御・モデル化に従事。

小 木 曾 公 尚 (正会員)

2004 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科 21 世紀 COE 研究員。2005 年同大学院助手、助教、2014 年電気通信大学大学院情報理工学研究科知能機械工学専攻准教授、現在に至る。2010～2011 年ジョージア工科大学客員研究員。拘束システムやハイブリッドシステムの解析と制御、ゲーム理論とその工学応用、制御セキュリティに関する研究に従事。博士(工学)。システム制御情報学会、日本機械学会、IEEE の会員。

=====