

McKibben 型空気圧ゴム人工筋のモデル化とパラメータ推定

小木 曾 公 尚*

*電気通信大学 東京都調布調布ヶ丘 1-5-1
 *The University of Electro-Communications, 1-5-1 Choufugaoka, Choufu, Tokyo, Japan
 *E-mail: kogiso@uec.ac.jp

キーワード：モデル化 (modeling), 非線形システム (nonlinear system).
 JLE 0004/17/5604-0253 ©2017 SICE

1. はじめに

McKibben 型空気圧ゴム人工筋 (図 1) は、非伸縮性のメッシュで包まれたゴムチューブ内部に圧縮空気を注入することで膨張させて収縮力を発生させる。このような構造を有する人工筋は、大部分がチューブとメッシュで構成されるために軽量であり、出力荷重比や柔軟性などに優れている。その一方で、摩擦に起因するヒステリシスや圧縮流体の特性を考慮しなければならず、文献 20) では、人工筋のモデル化と制御は、挑戦的課題と述べられている。特に当時は、ON-OFF 制御弁を用いた研究が多く、弁が動作するたびに生じる圧力変化の伝搬が応答に現れていた。そして、2010 年頃から、弁の開度をフィードフォワード制御する実用的な流量制御弁が市販されるようになり、人工筋を滑らかにかつ的確に動かせるようになった。しかしながら、それまでの ON-OFF 制御弁を想定した人工筋モデルでは、ダイナミクスの捉え方や興味の帯域 (近似の影響) が変わることが容易に想像できる。精密にかつ的確に人工筋を制御するためには、流量制御弁の特性も含んだ人工筋モデルを同定する必要がある。

そこでわれわれは、流量制御弁と人工筋を構成する要素モデルを基礎にしてボトムアップ方式で厳密な人工筋モデルを同定することを目標と定めた。厳密なモデルを



図 1 McKibben 型空気圧ゴム人工筋

導出する動機は、推定器の活用や高性能な制御系の設計・開発に繋がるだけでなく、モデルの近似法や近似精度の議論が可能になることである。さらに、拮抗配置の機構に発展させて位置や力制御が実現できれば、柔軟なアクチュエータの開発が期待できる。本稿では、これまでに得られた人工筋のモデル化およびモデルパラメータの推定法に関する成果や知見を紹介する。

2. 人工筋モデルの構造

2.1 人工筋を構成する要素モデル

人工筋モデルは、主に 5 つの要素モデルで構成されており、各モデルのパラメータは、表 1 にまとめておく。

(1) 収縮力のモデル

人工筋の収縮力モデルは、収縮率 ϵ と内圧 P に依存する関数であり、その導出には筒の形状変化に対して仮想仕事の原理が用いられる。しかしながら、人工筋両端部でメッシュ・チューブと固定具とをかしめるために、仮想仕事だけでは形状変化の影響を捉えられない。実際、既存モデルをそのまま用いた場合、実測値とのずれが大き

表 1 人工筋モデルのパラメーター一覧

D_0	: 人工筋初期直径 [m]	parameters determined in advance
L_0	: 人工筋自然長 [m]	
L	: おもり付加後の人工筋初期長 [m]	
D_1, D_2, D_3	: 体積の関係式の係数 [m^3]	
M	: おもり質量 [Kg]	
g	: 重力加速度 [m/s^2]	
P_{tank}	: 圧力タンク絶対圧力 [Pa]	
P_{out}	: 大気圧 [Pa]	
k	: 空気の比熱比 [-]	
R	: 気体定数 [J/Kg·K]	
T	: 空気の絶対温度 [K]	parameters to be identified
K	: 弾性係数 [N/m^3]	
θ	: メッシュ角度 [deg]	
C_{q1}	: 収縮率の補正係数 [-]	
C_{q2}	: 収縮率の補正係数 [1/Pa]	
c_c	: クーロン摩擦力 [N]	
A_0	: 流量制御弁断面積 [m^2]	
k_1, k_2	: ポリトロップ指数 [-]	
c_v	: 粘性摩擦係数 [Ns/m]	



図2 人工筋体積の測定¹⁾

く、モデル構造の特定には新たな補正が必要であることがわかった。試行錯誤の結果、人工筋端部の形状に関する補正係数 C_{q1} , C_{q2} を加えることで精度の改善が確認できたため、つぎの式を用いることとした¹³⁾。

$$F(P, \epsilon, t) = \frac{\pi D_0^2}{4} (P(t) - P_{out}) \left[\frac{3}{\tan^2 \theta} \{1 - C_{q1}(M) \times (1 + e^{C_{q2}(M)(P(t) - P_{out})}) \epsilon(t)\}^2 - \frac{1}{\sin^2 \theta} \right]$$

(2) 圧力変化のモデル

人工筋内の圧力変化に関しては、従来研究と同様に、圧縮空気を理想流体とみなし、ポリトロープ指数 $k_1, k_2 \in [1, 1.4]$ とするポリトロープ過程を表わす式を採用している。

$$\dot{P}(t) = k_1 \frac{RT}{V(t)} m(t) - k_2 \frac{\dot{V}(t)}{V(t)} P(t)$$

(3) 体積のモデル

人工筋の体積変化を解析的に導出することは難しいため、体積の変化式を収縮率の二次関数として近似する。本研究もそれに従い、各係数は、水を張ったメスシリンダーに人工筋を沈めて水位の変化を測定すること(図2)で、体積の近似関数を実験的に求めた¹⁾。

$$V(t) = D_1 \epsilon(t)^2 + D_2 \epsilon(t) + D_3$$

(4) 比例流量制御弁の総入出流量モデル

本研究で扱う比例流量制御弁(FESTO MPYE-5-M5-010-B)は、圧力タンクからの流入と大気中への流出が同時に起こり、その差異で人工筋内圧を減圧および加圧する仕組みである。研究開始当時、バルブの特性を陽に考慮した既存研究が見あたらなかったため、本研究では、弁内部に仮想のオリフィスが存在するとし、圧縮空気の正味の流入出量を制御弁のモデルとして定式化した¹³⁾。

$$m(t) = \alpha(t)m_i(t) - (1 - \alpha(t))m_o(t)$$

ここで、 $\alpha \in [0, 1]$ は、パラメータ、 m_i は、流入口の流量であり、 $P_1 = P_{tank}$, $P_2 = P$ を用い、つぎの式で表わす。

$$m_i(t) = \begin{cases} \frac{A_0 P_{tank}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \text{if } P(t) \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_{tank} \\ \frac{A_0 P_{tank}}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \left(\frac{P(t)}{P_{tank}}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P(t)}{P_{tank}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \text{if } P(t) > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} P_{tank} \end{cases}$$

また、 m_o は、流出口の流量であり、 $P_1 = P$, $P_2 = P_{out}$ を用い、つぎの式で表わす。

$$m_o(t) = \begin{cases} \frac{A_0 P(t)}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} & \text{if } P(t) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \geq P_{out} \\ \frac{A_0 P(t)}{\sqrt{T}} \sqrt{\frac{2k}{R(k-1)}} \left(\frac{P_{out}}{P(t)}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{P_{out}}{P(t)}\right)^{\frac{k-1}{k}}} & \text{if } P(t) \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} < P_{out} \end{cases}$$

この制御弁モデルは、実物の制御弁に存在しないパラメータ α が流量を決める仕組みであるため、制御弁への入力(指令電圧) u が α を変化させると考える必要がある。 α と u の関係は、下記に紹介する手順で導出可能である。モデルより求まる圧力(定常値) \bar{P}_{sim} と α の関係 $\bar{P}_{sim} = \kappa_{sim}(\alpha)$, そして、実機より計測される圧力(定常値) \bar{P}_{exp} と制御入力 u の関係 $\bar{P}_{exp} = \kappa_{exp}(u)$ を、それぞれ、lookup table 形式で求める。 $\bar{P} = \bar{P}_{exp}$ と選べるので、 $\alpha = \kappa_{sim}^{-1} \circ \kappa_{exp}(u)$ が結果的に求まる³⁾。この $\kappa := \kappa_{sim}^{-1} \circ \kappa_{exp}$ も lookup table 形式となるので、制御弁モデルの一部として組み込める。これまでの経験から、 κ は、人工筋や制御弁の個体ごとに異なることが確認されており、モデルの精度を維持するためには、人工筋の種別や劣化度合い、または、制御弁の種類に応じて κ を再設定する必要がある。

(5) 負荷に関するモデル

負荷に関する運動方程式は、つぎのとおりに定めた。

$$ML\ddot{\epsilon}(t)$$

$$= \begin{cases} F(P, \epsilon, t) - Mg - F_f(t) \\ -K(M) \{L_0 - L(1 - \epsilon(t))\}^3 & \text{if } \epsilon(t) \leq \frac{L-L_0}{L} \\ F(P, \epsilon, t) - Mg - F_f(t) & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここで、 K は、ゴムの弾性のある種のパネと捉え、定常応答の低圧域に着目しながら収縮量の3乗に比例させるよう経験的に定めた。

つぎに、摩擦力 F_f に関しては、定常応答でのヒステリシスループの幅と形状に着目し、さまざまな摩擦モ

ルを用いて比較検討した結果、菊植らの摩擦モデル²¹⁾を採用することにした。

$$F_f = \begin{cases} (c'_c \text{sgn}(\dot{\epsilon}_i^v) + c_v \dot{\epsilon}_i^v) / (1 + Zc_v) & \text{if } |\dot{\epsilon}_i^v| > Zc'_c \\ \dot{\epsilon}_i^v / Z & \text{if } |\dot{\epsilon}_i^v| \leq Zc'_c \end{cases}$$

ここで、 c_v は、粘性摩擦係数である。この摩擦モデルは、離散時間モデルであるため、数値計算の都合上、零次ホールドでサンプル点間を補間している。モデルの詳細については、同文献 (25) 式を確認のこと。

そして、 c'_c は、修正クーロン摩擦力である。これも経験上、下記に示す圧力依存の形式を採用することで、高圧帯域 (4~6 気圧) での定常応答が実機の応答に近づくことが確認できている⁸⁾。

$$c'_c = h \frac{c_c}{P(t)}$$

2.2 人工筋モデルの切替え系表現

これまでの各モデルをまとめると、人工筋モデルは、12 個のサブシステム $f_\sigma : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^3$ で構成される切替え系として記述される⁹⁾。

$$\dot{x}(t) = f_\sigma(x(t), u(t)) \quad \text{if } x(t) \in X_\sigma \quad (1a)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x(t) \quad (1b)$$

ここで、状態 $x \in \mathbb{R}^3$ および出力 $y \in \mathbb{R}^2$ は、それぞれ、 $x := [\epsilon \dot{\epsilon} P]^T$ および $y := [\epsilon P]$ である。また、制御入力 $u \in \mathcal{U} \subset \mathbb{R}$ 、サブシステムの指標 $\sigma \in \Sigma := \{1, 2, \dots, 12\}$ 、サブシステム σ に対する定義域 $X_\sigma := \{x \in \mathbb{R}^3 \mid \Psi_\sigma(x) \leq 0\}$ 、そして、 $\Psi_\sigma : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ if-then を規定する条件式である。図 3 に人工筋モデルのブロック線図を示す。同図から、出力 y の上流に ϵ と P が存在するため、人工筋の長さや内圧を独立に制御することは難しい。なお、人工筋モデルは、連続時間の関数であるために、数値計算を行う場合には、ルンゲクッタ法により離散化する。

この人工筋モデルは、表 1 に示す 22 個のパラメータを含んでおり、適切なパラメータの値を求める (または、推定する) ことで、異なる人工筋製品の振る舞いを模擬することができる¹⁾。次章では、パラメータの推定方法と推定結果を紹介する。

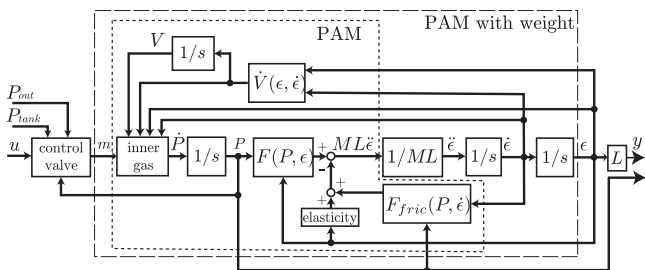


図 3 人工筋モデルのブロック線図

3. パラメータ推定

3.1 モデルパラメータ

人工筋モデルに存在する 22 個のパラメータのうち、13 個は、人工筋の長さなどの形状や外気温などの環境を計測することで値が定まる既知パラメータであり、残りの 9 個は、推定の必要な未知パラメータである^{2), 10), 12)}。これらの未知パラメータは、 $K, \theta, C_{q1}, C_{q2}, c_c$ が定常特性に、 A_0, k_1, k_2, c_v が過渡特性に、それぞれ、影響を与えることがモデルの定常解析により判明している¹²⁾。(注¹⁾ 加えて、 $M = 10 \text{ kg}$ までの負荷においては、 $K, \theta, C_{q1}, C_{q2}, c_c$ は、負荷に依存し、一方、 A_0, k_1, k_2, c_v は、負荷にほとんど依存しないため定値とみなせる³⁾。これらのことから、負荷に依存するパラメータの推定には、負荷一定のもと各パラメータ値を求めた後に、適当な関数で補間する必要がある¹¹⁾。

3.2 パラメータ推定問題

本研究でのパラメータ推定の方針は、負荷 (おもり) を定数とし、事前の実機より取得した参照データ \mathbb{D}_{exp} と人工筋モデルより得られる予測データとを比較し、応答データの差 (面積誤差) が小さくなるパラメータ値を見つけることである。これは、パラメータ $p = (K, \theta, C_{q1}, C_{q2}, c_c, A_0, k_1, k_2, c_v) \in \mathbb{R}^9$ を決定変数、与えられたデータ間の距離 (スカラー値) を返す関数 $d(\cdot, \cdot)$ を評価関数とする非線形最適化問題として定式化できる。

$$\inf_{p \in \mathbb{R}^9} d(\mathbb{D}_{\text{sim}}(p), \mathbb{D}_{\text{exp}})$$

s.t. discretized model of (1) generates $\mathbb{D}_{\text{sim}}(p)$.

ここで、 $\mathbb{D}_{\text{sim}}(p)$ は、あるパラメータ値 p を用いて得られるシミュレーション結果 (\mathbb{D}_{exp} に該当する定常応答および時間応答) である。評価関数の定義と計算の詳細は、文献 2), 10) を参照のこと。

上述の決定変数は、定常特定と過渡特性に関するパラメータに分けられるため、パラメータ推定問題を定常特性のパラメータと過渡特性のパラメータをそれぞれ決定変数とする問題に分割できる。つまり、 $p_s = (K, \theta, C_{q1}, C_{q2}, c_c) \in \mathbb{R}^5$ および $p_t = (A_0, k_1, k_2, c_v) \in \mathbb{R}^4$ と定める ($p = (p_s, p_t)$)。まず、定常特性に影響を与えるパラメータ p_s の推定問題は、ある適当な p_t のもとで、つぎの非線形最適化問題を解くことになる。

$$\inf_{p_s \in \mathbb{R}^5} d(\mathbb{D}_{\text{sim}}(p_s, p_t), \mathbb{D}_{\text{exp}})$$

s.t. discretized model (1) generates $\mathbb{D}_{\text{sim}}(p_s, p_t)$.

ここでは、収縮・伸張においてそれぞれ 16 回のステップ信号を段階的に入力し、各応答の定常値を評価する。つ

(注¹⁾ この解析結果に対し、人工筋を用いた実機制作に携わるある研究者から、当然の結果であるとの指摘を受け、モデルが客観的かつ妥当であるとの確信を得た。

ぎに、上記の解 p_s^* を用い、過渡特性に影響を与えるパラメータ p_t の推定問題を解く。

$$\begin{aligned} & \inf_{p_t \in \mathbb{R}^4} d(\mathbb{D}_{\text{sim}}(p_s^*, p_t), \mathbb{D}_{\text{exp}}) \\ & \text{s.t. discretized model (1) generates } \mathbb{D}_{\text{sim}}(p_s^*, p_t). \end{aligned}$$

ここで、詳細は触れないが、過渡特性に関する推定問題では、いくつかの圧力帯域において合計8種類のステップ応答を評価する。

9個の未知パラメータの値を効率的に求めるためには、人工筋モデルのパラメータ推定に適した求解アルゴリズムが好ましい。次節では、これまでに試みた求解アルゴリズムを紹介する。

3.3 推定アルゴリズム

まずはじめに、パラメータ値と各応答の関係を調べるため、モデルより求まる応答を目視で確認しながらパラメータの値を手作業で調整する試行錯誤法を実践した。その過程で、定常応答の低圧域や高圧域での振る舞いやヒステリシスループの幅に関するパラメータを特定することができた¹³⁾。しかし、パラメータが干渉するなど、手作業での探索は効率が悪いことがわかった。実際に、事前知識のない学生が良好なパラメータ値を見つけるのに1ヶ月近くかかったことがある。

つぎに、評価関数の勾配を解析的に求めることは難しいため、数値的に勾配を求める非線形最適化アルゴリズムである準ニュートン法やNelder-Meadシンプレックス法^(注2)を適用した¹¹⁾。さらに、時間短縮をねらい、実行可能領域を格子で制限することで、パラメータをプレイヤとするゲーム理論的アルゴリズム²⁾の適用を試みた。これらの結果から、狙い通りに探索時間を減少することはできたが、容易に質の悪い局所解に陥ることがわかった。良好なパラメータを得るためには、探索初期点の配置方法や格子幅の再調整に対する経験則(または事前知識)が必要となる^{2), 10)}。

そして、個体群(複数探索点)に基づく最適化アルゴリズムである粒子群最適化や差分進化法を適用した。これらは、局所解からの脱出が確率変数をとおして調整可能であり、探索履歴の活用や探索点の並列処理をおこなうアルゴリズムであるため、前述のアルゴリズムに比べてより短い時間で良好な推定結果が得られるようになった⁵⁾(注3)。しかし、やはり、探索アルゴリズムのパラメータ調整に経験則(試行錯誤)が要求される。

経験則を排除するためには、求解アルゴリズムに人工筋種別に関する事前情報を組み込むことが重要と考え、カーネル法による非線形サポートベクターマシン(SVM)を用い、製品種別に対応するパラメータ値の存在領域(決

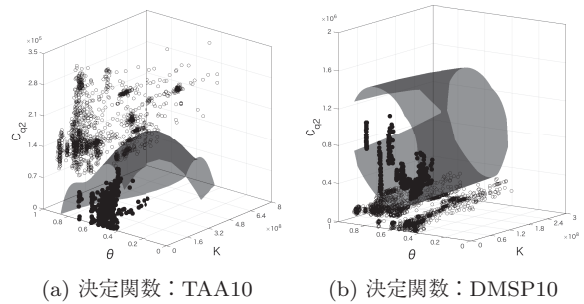


図4 SVMによるパラメータ空間での学習結果

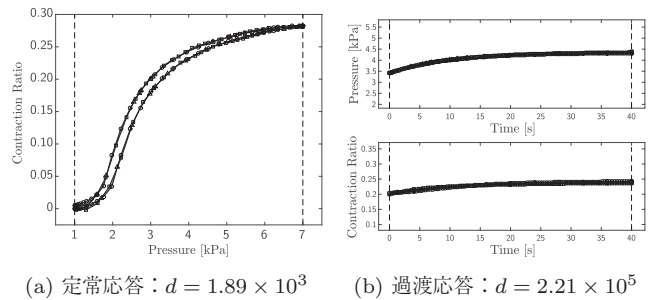


図5 TAA10用モデルと実験結果の応答比較

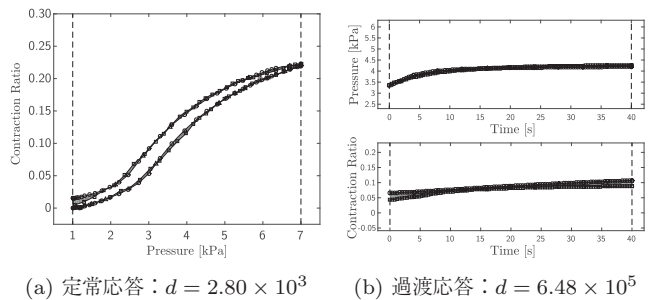


図6 DMSP10用モデルと実験結果の応答比較

定関数)を学習させた(図4)^{14), 16)}。製品種別が識別可能な決定関数を推定問題の制約条件に加えることで、効率的なパラメータ推定が可能となった¹⁷⁾。たとえば、TAA10(ActiveLink製)およびDMSP10(FESTO製)の同定結果を示す図5、図6から、モデルの同定結果は、良好であり、モデルのパラメータ値を変更するだけで異なる製品の動特性を表わせることがわかる¹⁾。また、推定に要する時間は、約4時間まで短縮することができた。

3.4 知見と所感

人工筋モデルのパラメータ推定に関して下記の知見が得られている。前述のようにパラメータ推定の主問題が分割できることの意義は大きい。たとえば、定常応答に関するモデルの精度が良好な場合、過渡応答の評価区間の始点と終点が一致しやすい傾向にある。つまり、過渡応答のパラメータを調整しても始点と終点を動かさないことから、同パラメータの変化に対して評価関数の感度は低く、比較的容易に(短時間で)解が求まる。よって、モデルの精度を確保するためには、定常応答に関する良好なパラメータ値を推定することが重要である。

(注2) Matlab の関数 `fminunc` と `fminsearch` を用いた。
(注3) 各パラメータ値の有効桁数の差異に起因する数値計算誤差を回避するため、自然対数をとったパラメータを決定変数と再定義している。

4. おわりに

本稿では, McKibben 型空気圧ゴム人工筋のモデル構造とモデルパラメータの推定法を解説した. 厳密な人工筋モデルが得られるようになったので状態推定や制御系設計への応用が検討できる段階になった. たとえば, モデル予測制御の適用⁹⁾, 非線形カルマンフィルタによる収縮率推定^{4), 19)}, パラメータの変化をオンライン推定するための同時推定¹⁸⁾, 圧力フィードバックによる位置決め制御などがある. さらに, 拮抗型人工筋システムのモデル化への検討⁷⁾も進めている.

今後は, これまでに得られたモデル化や制御系設計に関する知見や見識をもとに, モデルベース制御による柔軟なアクチュエータの開発を目指して研究を進めたい.

謝辞 本研究は, 第 25 回 マツダ研究助成 (09KK-296) および日本科学技術振興会 科学研究費 若手研究 (A) (25709014, 平成 25 年度~27 年度) の補助を受けた.

(2017 年 1 月 18 日受付)

参考文献

- 1) 浦邊, 内藤, 小木曾: McKibben 型空気圧ゴム人工筋モデルの妥当性, 計測自動制御学会論文集, **51**-4, 267/273 (2015)
- 2) 内藤, 小木曾: ゲーム理論的学習による McKibben 型空気圧ゴム人工筋のパラメータ推定, 計測自動制御学会論文集, **50**-5, 411/417 (2014)
- 3) 小木曾, 内藤: 負荷に依存するパラメータを用いた McKibben 型空気圧ゴム人工筋の数理モデル, システム制御情報学会論文誌, **26**-7, 269/276 (2013)
- 4) T. Kodama and K. Kogiso: Applications of UKF and EnKF to estimation of contraction ratio of McKibben pneumatic artificial muscles, *Proceedings of American Control Conference* (2017) (to be presented)
- 5) A. Okabe and K. Kogiso: Application of particle swarm optimization to parameter estimation of McKibben pneumatic artificial muscle model, *Proceedings of IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, 49/54 (2016)
- 6) T. Kodama, A. Okabe, and K. Kogiso: Simultaneous estimation of contraction ratio and parameter of McKibben pneumatic artificial muscle model using log-normalized unscented Kalman filter, *Proceedings of IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, 44/48 (2016)
- 7) R. Kadoya and K. Kogiso: Invariant-length PAM model considering virtual weight and PI compensation, *Proceedings of SICE International Symposium on Control Systems*, 4A2-1 (2016)
- 8) K. Urabe and K. Kogiso: Hybrid nonlinear model of McKibben pneumatic artificial muscle systems incorporating a pressure-dependent Coulomb friction coefficient, *Proceedings of IEEE Multi-conference on Systems and Control*, 1571/1578 (2015)
- 9) K. Urabe and K. Kogiso: Application of hybrid model predictive control to McKibben pneumatic artificial muscle

system, *SICE International Symposium on Control Systems*, 514-5 (2015)

- 10) K. Kogiso, R. Naito, and K. Sugimoto: Application of game-theoretic learning to gray-box modeling of McKibben pneumatic artificial muscle systems, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 5795/5802 (2013)
- 11) K. Kogiso, R. Naito, and K. Sugimoto: Gray-box identification of McKibben pneumatic artificial muscle using interpolation of load-dependent parameters, *Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1228/1234 (2013)
- 12) K. Kogiso, K. Sawano, T. Itto, and K. Sugimoto: Identification procedure for McKibben pneumatic artificial muscle systems, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3714/3721 (2012)
- 13) T. Itto and K. Kogiso: Hybrid modeling of McKibben pneumatic artificial muscle systems, *Proceedings of Joint IEEE International Conference on Industrial Technology & Southeastern Symposium on System Theory*, 57/62 (2011)
- 14) 石川, 西山, 小木曾: McKibben 型空気圧ゴム人工筋モデルの特徴的なパラメータの抽出, 第 59 回 自動制御連合講演会, FrA4-1 (2016)
- 15) 岡部, 石川, 小木曾: 人工筋モデルのパラメータ推定精度に関する考察, 第 59 回 自動制御連合講演会, ThC4-5 (2016)
- 16) 石川, 岡部, 西山, 小木曾: McKibben 型空気圧ゴム人工筋の製品種別に関する識別器の構成, 第 3 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 1B1-1 (2016)
- 17) 岡部, 石川, 小木曾: 探索初期点の範囲指定による空気圧ゴム人工筋モデルパラメータの推定効率化, 第 3 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 1B1-2 (2016)
- 18) 小玉, 岡部, 小木曾: 対数化 UKF を用いた空気圧ゴム人工筋の収縮率とパラメータの同時推定, 第 58 回 自動制御連合講演会, 1G2-3 (2015)
- 19) 小玉, 小木曾, 中野: UKF を用いた空気圧ゴム人工筋の収縮率推定, 第 2 回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 631-4 (2015)
- 20) B. Tondu and P. Lopez: Modeling and control of McKibben artificial muscle robot actuators, *IEEE Control System Magazine*, **20**-2, 15/38 (2000)
- 21) R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama, and H. Fujimoto: Admittance and impedance representations of friction based on implicit Euler integration, *IEEE Transactions on Robotics*, **22**-6, 1176/1188 (2006)

[著者紹介]

こぎそ きみなお 君 (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. 05 年同大学院助手, 助教, 14 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. 2010~11 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.