

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2015

課題番号：25709014

研究課題名(和文)多配置人工筋による駆動制御ユニットのための計測制御技術の開発

研究課題名(英文)Development of measurement and control technologies for an actuator unit with multiple McKibben pneumatic artificial muscles

研究代表者

小木曾 公尚 (Kogiso, Kiminao)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：30379549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、McKibben型空気圧ゴム人工筋を複数用いた駆動制御ユニットを開発するための計測制御技術の構築を目的とし、人工筋の厳密な数理モデル化を経て、モデルに基づく計測制御手法の構築を目指した。人工筋の収縮・伸張は、圧縮流体の力学やヒステリシスなどの非線形挙動を示すため、実機の人工筋システムから得られる計測データ(人工筋の内圧や長さ)を用い、可能な限り実機の振る舞いに近い応答となるようなモデル(非線形切替え系)を得た。そして、得られた数理モデルの解析結果(モデルパラメータ空間の特徴付けなど)から、非線形カルマンフィルタやモデル予測制御などの計測・制御技術の開発につなげることができた。

研究成果の概要(英文)：This project was aimed at developing fundamental measurement and control technologies for a pneumatic actuator unit with multiple McKibben pneumatic artificial muscles (PAMs). Acquiring a precise mathematical model of the PAM that enables to simulate dynamic behaviors of the PAM well, the model-based measurement and control methods have been developed. In contraction and expansion processes of the PAM its behaviors are nonlinear due to friction of a tube and fluid dynamics of compressed air. This project has obtained precise and stable switched systems in the state-space form. A model validation using measured data from a practical PAM system confirms that the outputs of the model are very close to the real outputs. Moreover, the obtained model enabled to develop an estimator of the contraction ratio, such as an unscented Kalman filter and an extended Kalman filter, and to consider a model predictive control and its implementation to the practical system.

研究分野：制御工学

キーワード：McKibben空気圧ゴム人工筋 筋肉 モデル化 切替えシステム カルマンフィルタ モデル予測制御

1. 研究開始当初の背景

McKibben 型空気圧人工筋は、非伸縮性カバーで覆われたゴム製チューブが空気圧により膨張し、筋全体の収縮により引張力を発生させるアクチュエータである。この人工筋は、人に対して柔軟かつ安全であり、駆動には圧縮空気を用いるため環境に優しい、さらに、軽量の割には電気モータより大きな出力(収縮力)を発生させられる。近年、これらの特徴を生かし、ロボットの駆動部の軽量化だけでなく、パワーアシスト装具やリハビリ装置の社会的ニーズを背景に、高齢介護者の体力的負担軽減や高齢者自身の自立支援を目指したシステムの研究開発が盛んである。

このようなシステムでは、人の動き方に従うように、もしくは、人の動作を妨げるように的確かつ滑らかな位置/力制御を空気圧駆動により実現する制御技術が必要である。しかしながら、人工筋自体の非線形特性(ヒステリシスや流体の特性など)が複雑なため、現在でも有用な制御法は確立されていない。人工筋の制御問題は、1990年代から見られるが、ほとんどが空気圧制御弁(on-off 電磁弁)を用いるため、滑らかな動作は難しい。さらに、非線形特性を無視又は線形化した設計用簡易モデルを用いるため、速い動特性が現れる高周波数帯域での制御は困難である。一方、7年ほど前から圧縮空気の流量を制御する比例流量制御弁が FESTO より市販された。この制御弁は、流路幅を操作して流入出量をきめ細かに調整できるため、人工筋を滑らかに駆動(又は制御)するのに適しているが、残念ながら、そのような特性を捉えた人工筋の数理モデル化に関する研究は、その複雑さゆえにあまり多くは報告されていない。

2. 研究の目的

本研究では、多配置人工筋による駆動制御ユニットを開発するための基盤的な計測制御技術の開発をおこなうことを目的と定めた。計測および制御技術を構築するためには、人工筋の非線形な動特性を数理でモデル化する必要がある。そして、得られた数理モデルが実機の振る舞いに近ければ、カルマンフィルタ、モデル予測制御などのモデルに基づいた計測制御技術を実現することができる。

3. 研究の方法

空気圧ゴム人工筋の計測制御技術を構築するために、図1に示す空気圧ゴム人工筋システムを用いて、下記の課題解決に取り組んだ。

- (1) McKibben 型空気圧ゴム人工筋の数理モデル化と解析
- (2) 人工筋モデルのパラメータ推定法
- (3) モデルパラメータの特徴量分析
- (4) 非線形カルマンフィルタを用いた収縮率推定

なお、図1の人工筋システムは、流量制御弁への指令電圧を入力、人工筋の内圧及び長さ

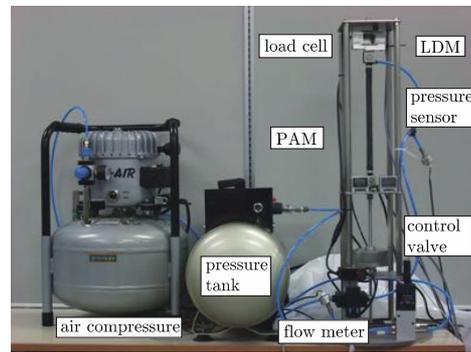


図1: 空気圧ゴム人工筋システム

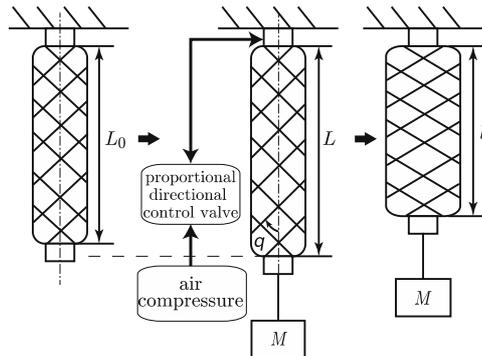


図2: 圧縮空気による PAM の収縮の様子

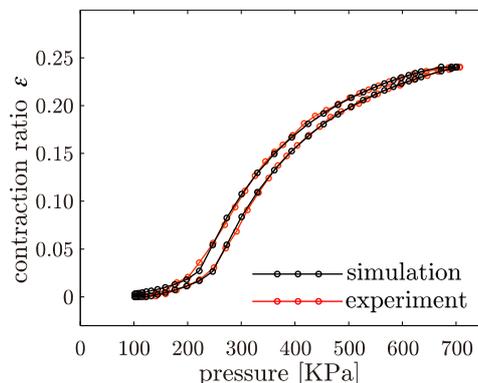


図3: ActiveLink 社製人工筋、負荷 8 kg 時の定常応答の比較

を出力(センサ計測値)であり、アタッチメントを変更することで様々な製品の人工筋を取り付けること可能であり、各種人工筋を用いて計測および制御実験がおこなえる。

4. 研究成果

(1) McKibben 型空気圧ゴム人工筋の数理モデル化と解析結果

本課題では、ある質量のおもりが人工筋に吊り下げられた状況(図2)を想定し、人工筋一本の振る舞いを可能な限り厳密に数式で記述することを目標と定めた。このとき、モデル化の対象となるシステムは、比例流量制御弁の開度を調整する指令電圧値を入力、伸縮する人工筋の長さ及び内圧の計測値を出力とする人工筋システムとなる。様々な実験計測データや実際の人工筋の振る舞いを観察・比較し、人工筋システムの数理モデルに相応しい非線形関数と数理構造を検討した結果、人工

筋の収縮率と内圧を状態変数とする非線形ハイブリッドシステムで記述できることがわかった(図3)。この数理モデルは、雑誌論文にて提案し、その妥当性は、雑誌論文で示した。

提案モデルは、表1に示す変数及びパラメータを用い、人工筋の収縮力、負荷の運動方程式、人工筋の体積(収縮率の二次関数近似)、制御弁を通過する質量流量を表す方程式で構成される。そして、提案モデルの定常解析をおこなうことで、各パラメータが、事前に計測可能なもの、人工筋の過渡応答または定常応答に影響を与えるものに分けられることがわかった。この解析結果により、人工筋モデルのパラメータを推定する問題が、定常応答に係るパラメータを推定した後に過渡応答に係るパラメータを推定する二手順に分けられる、つまり、一般的に問題を小さくして扱えることがわかった。これは、人工筋モデルの数理構造を解析することで得られた本研究の特徴的な成果である。

今後の課題は、人工筋を拮抗配置にしたシステム(入力:各バルブへの指令電圧,出力:トルク)の数理モデル化である。現在、このモデルを得るために、人工筋の両端を固定した収縮率変化の無い数理モデルが得られており(学会発表),そこからトルクを示す方程式を統合することで、拮抗配置の数理モデルを導出できる、と考えている。

(2) 人工筋モデルのパラメータ推定法

ある特定の人工筋を対象にした人工筋モ

表 1: 人工筋モデルの変数とパラメータ

l	: 人工筋の長さ [m]	variables
$\epsilon = \frac{L-l}{L}$: 収縮率 [-]	
$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$: 収縮率速度 [-]	
P	: 人工筋内部の絶対圧力 [Pa]	
V	: 人工筋内部の体積 [m ³]	
m	: 制御弁の流量質量 [Kg/s]	
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]	
K	: 弾性係数 [N/m ³], M 依存	parameters to be identified
θ	: メッシュ角度 [deg], M 依存	
C_{q1}	: 収縮率の補正係数 [-], M 依存	
C_{q2}	: 収縮率の補正係数 [1/Pa], M 依存	
c_c	: クーロン摩擦力 [N], M 依存	
A_0	: 流量制御弁断面積 [m ²]	
k_1, k_2	: ポリトロープ指数 [-]	
c_v	: 粘性摩擦係数 [Ns/m]	



図 4: 本研究で同定対象の人工筋製品 5 種(上から, ActiveLink 社 10mm, 0.25m, FESTO 社, 10mm, 0.25m, FESTO 社, 20mm, 0.20m, 神田通信工業社 1.25inch, 0.20m, 神田通信工業社 0.5inch, 0.17m. 数値は, それぞれ, 人工筋の直径と長さ.)

デルを得るためには、その対象に適したパラメータの値を定める必要がある。そこで、提案モデルのパラメータ探索問題を非線形計画問題に帰着させて、最良のパラメータ値を探索する求解アルゴリズム(パラメータ推定法)を二つ提案した。一つは、ゲーム理論的アプローチによる方法、もう一つは、粒子群最適化アルゴリズムによる方法である。推定が必要なパラメータ数は、9つである。そのうち、5つが定常応答に、残り4つが過渡応答に影響を与える。

ゲーム理論的学習による探索(学術論文)

最良のパラメータを探索する際に、各パラメータをプレイヤーとし、プレイヤーの行動をパラメータ値の更新量(±1%などの固定幅)、そして、暫定パラメータ値を用いたシミュレーション結果と事前に計測した実験値との誤差をプレイヤーの利得とする有限な非協力ゲームを定式化した。このゲームモデルの均衡解析により、利得値の釣り合い状態となるパラメータ値がナッシュ均衡になることを数理的に保証することができ、その結果、ナッシュ均衡の意味で最良のパラメータ値が求まる。ただし本手法では、多くのナッシュ均衡が存在するために、最良のパラメータ値を求めるためには、非常に多くの計算時間を要する。

粒子群に基づく多点探索(学会発表)
 粒子群最適化法で用いられる確率的多点探索法を適用する。本手法では、パラメータの候補を事前に複数個用意し、ある種の確率を用いた更新ルールに基づき、一斉にパラメータ空間を探索させる。その探索履歴の中からパラメータ値が更新されなくなった段階で、最良のパラメータ値が求まる仕組みである。したがって、理論的に解の収束を保証することは難しい。また、初期のパラメータ候補の生成について検討の余地が残る。しかしながら、ゲーム理論的学習の探索法に比べて、パラメータ値の決定に要する時間が短くなることがわかった。今後は、パラメータ候補の決め方について検討し、より効率的な推定アルゴリズムに発展させることが重要である。

(3) モデルパラメータの特徴量分析

人工筋モデルのパラメータ空間において、推定したパラメータ値の違いだけで、人工筋の製品種別が特定可能であるかを調べるため、図4に示す5種類の人工筋製品を用いた。本課題では、教師あり機械学習(サポートベクターマシン)を用い、パラメータの値から人工筋の製品種別を99%以上の精度で特定できることを確認した。これにより、特定の人工筋を特徴づける決定関数が明らかになり、その関数情報をパラメータ推定手法に応用することで効率的なパラメータ推定法が構成可能であろう。この点については、今後の課題である。

(4) 非線形カルマンフィルタを用いた収縮率推定

収縮率の変化を測定するため、高価なレーザー変位センサを用いている。人工筋を用いたシステム統合時にセンサレスは、システムのコスト削減に役立つ。そこで、最良のパラメータ値をもつ人工筋モデルを用いて、非線形カルマンフィルタ(Extended Kalman Filter および Unscented Kalman Filter)により、収縮率の推定をおこなった。このフィルタによる推定では、人工筋内部の圧力情報を用いた。対象となる人工筋は、ActiveLink社製とFESTO社製の3つの人工筋に対して、1気圧から7気圧までを周期的に変化させて収縮率の推定実験をおこなった。その結果、良好な推定精度を有する結果が得られた。たとえば、ActiveLink社製を用いた結果を図5に示す。この場合、推定値とレーザー変位センサでの実測値とを比較したところ、図6の下図に示すように、約4%未満の精度で推定できていることがわかる。なお、Extended Kalman Filterによる結果では、非線形モデルの線形化手順が加わるため、推定精度がより悪い結果となることを確認した。一方で、モデルが制御対象の振る舞いを的確に捉えていれば、つまり、正確なモデルであれば、非線形カルマンフィルタによる推定

結果は、実測値に近くなる。これより、この実験結果ら、提案モデルが人工筋のモデルとして妥当であることを示している。よって、計算時間の問題はあるものの、モデル予測制

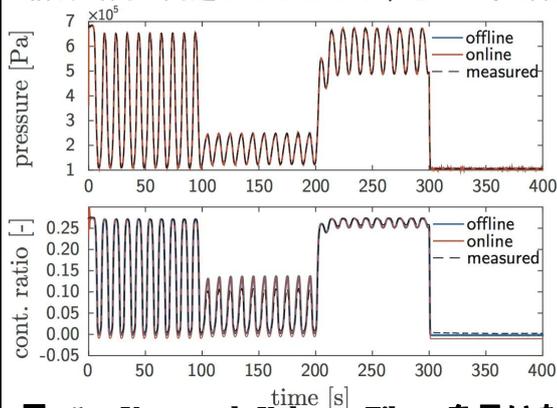


図5: Unscented Kalman Filter を用いた ActiveLink 社製人工筋の収縮率推定結果(上段 人工筋内圧, 下段 収縮率)。

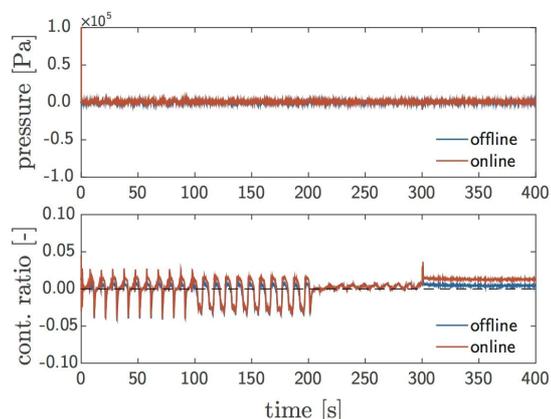


図6: Unscented Kalman Filter を用いた ActiveLink 社製人工筋の収縮率推定結果(上段 内圧の実測値と推定値の誤差, 下段 収縮率の実測値と推定値の誤差)

御などのモデルベースド制御に有用なモデルになっていることがわかる。今後の課題は、モデルの適切な近似法や制御系設計に取り組むことである。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

- 浦邊研太郎, 内藤諒, 小木曾公尚: 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, Vol. 51, No. 4, pp. 267-273, 2015.
- 内藤諒, 小木曾公尚: 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, Vol. 50, No. 5, pp. 411-417, 2014
- 小木曾公尚, 内藤諒: 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, Vol. 26, No. 7, pp. 268-276, 2013.

[学会発表](計17件)

Rieko Kadoya and Kiminao Kogiso:

Invariant-length PAM model considering virtual weight and PI compensation, *SICE International Symposium on Control Systems (ISCS)*, 4A2-1, 2016/3/7-3/10, 南山大学(愛知県名古屋市)

石川貴大,岡部篤,西山悠,小木曾公尚: 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, 2016/3/7-3/10, 南山大学(愛知県名古屋市)

岡部篤,石川貴大,小木曾公尚: 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, 2016/3/7-3/10, 南山大学(愛知県名古屋市)

角谷理映子,小木曾公尚: 仮想的な負荷変動とPI補償による収縮率変化のない空気圧ゴム人工筋モデル, 第58回 自動制御連合講演会, 1G2-2, 2015/11/14-11/15, 神戸大学(兵庫県神戸市)

小玉隆志,岡部篤,小木曾公尚: 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, 2015/11/14-11/15, 神戸大学(兵庫県神戸市)

Kentaro Urabe and Kiminao Kogiso: Hybrid nonlinear model of McKibben pneumatic artificial muscle systems incorporating a pressure-dependent Coulomb friction coefficient, *IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC)*, pp. 1571-1578, 2015/9/21-9/23, Sydney (Australia)

小玉隆志,小木曾公尚: McKibben 型空気圧ゴム人工筋の状態推定に関する実験的考察, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 212-1, 2015/05/20-05/22, 中央電気倶楽部(大阪府大阪市)

浦邊研太郎,小木曾公尚: McKibben 型空気圧ゴム人工筋の非線形モデル予測制御に関する実験的考察, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 352-1, 2015/05/20-05/22, 中央電気倶楽部(大阪府大阪市)

Kentaro Urabe and Kiminao Kogiso: Application of hybrid model predictive control to McKibben pneumatic artificial muscle system, *SICE International Symposium on Control Systems (ISCS)*, 514-5, 2015/03/04-03/07, 東京電機大学(東京都足立区)

小玉隆志,小木曾公尚,中野和司: 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, 2015/03/04-03/07, 東京電機大学(東京都足立区)

岡野哲大,倉嶋俊,小木曾公尚: 空気圧ゴム人工筋モデルの温度変化による影響とパラメータの分類, 第2回 計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, PS-47, 2015/03/04-03/07, 東京電機大学(東京都足立区)

浦邊研太郎,石原弘二,藤田貴大,内藤諒,小木曾公尚,杉本謙二: McKibben 型空気圧ゴム人工筋モデルの妥当性, 大58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014/05/21-05/23, 京都テルサ(京都府京都市)

浦邊研太郎,石原弘二,藤田貴大,内藤諒,小木曾公尚,杉本謙二: McKibben 型空気圧人工筋モデルの妥当性に関する実験的考察, 第1回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 2014.03.04-03.07, 電気通信大学(東京都調布市)

内藤諒,小木曾公尚,杉本謙二: 圧力依存のクーロン摩擦を用いた空気圧ゴム人工筋モデル, 第1回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 2014.03.04-03.07, 電気通信大学(東京都調布市)

内藤諒,小木曾公尚,杉本謙二: 空気圧ゴム人工筋のゲーム理論的同定法に関する数値的考察, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会, 2014.01.17, 大阪センター(大阪府大阪市)

Kiminao Kogiso, Ryo Naito, Kenji Sugimoto: Application of Game-theoretic Learning to Gray-box Modeling of McKibben Pneumatic Artificial Muscle Systems, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5795-5862, 2013.11.03-11.08, Tokyo Big Sight (東京都江東区)

内藤諒,小木曾公尚,杉本謙二: ゲーム理論的学習を用いた空気圧ゴム人工筋のグレーボックスモデリング: 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 2013.05.15-05.17, 兵庫県民会館(兵庫県神戸市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.kimi lab. tokyo/ research>

新聞報道：

日刊工業新聞 レーザー「制御を生業に」,
p. 27, 2015.08.20
日刊工業新聞 探訪先端研究, p. 27,
2015.6.26

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小木曾 公尚 (KOGISO, Kiminao)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・
准教授

研究者番号：30379549