

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 24 日現在

機関番号：33302

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760343

研究課題名(和文) 生物を規範とする二関節筋ロボットの視覚フィードバック制御に関する研究

研究課題名(英文) Passivity-based Visual Force Feedback Control for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-Articular Muscles

研究代表者

河合 宏之 (Kawai, Hiroyuki)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70410298

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロボットに生物の有する環境に対する柔軟性を獲得させた生物規範型のロボット制御を実現するために、腕の関節角度、視覚情報と触覚情報を用いたシステムの検討に加えて、人間が動作を繰り返すことでその動作の精度を向上させる学習制御のアプローチにより、モデルの不確かさに影響を受けにくい制御系を設計し安定性解析をおこなった。そして、シミュレーション環境と実験システムを構築し二関節筋ロボットにおける問題点と有用性について検討した。

研究成果の概要(英文)：This project investigates new control methods for two-degree-of-freedom (2DOF) robot manipulators with antagonistic bi-articular muscles in order to realize robot control of locomotion that has acquired the flexibility for the environment with a biological strategy. Firstly, open-loop control, which does not need the joint angles and velocities, is discussed for the 2DOF bi-articular manipulator dynamics. Next, iterative learning control based on passivity is considered to obtain the robustness for parametric uncertainty. Simulation and experimental results are shown to confirm the proposed methods and give us a new difficulty to realize the mechanism of antagonistic bi-articular muscles.

研究分野：ロボット制御工学

キーワード：制御工学 知能ロボティクス 二関節筋 視覚情報 触覚情報

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットが研究されはじめてから、およそ半世紀が経過し、その技術は成熟期にはいつているともいわれている。産業用ロボットをはじめとするロボット分野において日本の産業界の技術力が高いことは周知の事実であるが、その理論的な裏づけとなる学術的なアプローチは産業界の技術力をより高めていくために必要不可欠であり、近年では制御系設計理論をロボット制御に展開したロボット制御理論の発展が期待されている。ロボット制御はモデルベース制御とダイナミクスベース制御の2つに大別され、前者はロボットが有する非線形特性を打ち消し、すでに体系づけられた線形制御理論を用いて制御則を設計する手法に対し、後者はロボットが有する固有の力学的本質(受動性)を上手に用いた設計法である。どちらの手法も一長一短はあるが、ロボット固有の特性を活かしたダイナミクスベース制御は、その特性が「発明」されたものではなく「発見」されたものという意味で自然な制御と認識されている。このように人工物であるロボットの自然な制御を目指す一方で、多くのロボットは関節にアクチュエータを有しており、その構造は極めて人工的であるといわざるをえないのが現状である。そのため、ロボットに生物の有する柔軟性を獲得させるためには、ロボットに生物の構造的な特徴を付加したうえで制御することが必要不可欠であると考えられる。

一方、医学の分野においては生物が二関節筋を有していることは周知の事実であったが、最近になってようやくこの二関節筋が工学の分野に展開され、研究されようになってきた。二関節筋ロボットの運動解析に関しては多くの研究がはじめられてる一方で、二関節筋ロボットの運動制御に関してはほとんどなされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、二関節筋を有するロボットマニピュレータの位置決めをオープンループで制御し、軌道生成やマニピュレータの不確かさの対処に視覚情報と触覚情報を用いることで、ロボットに生物の有する環境に対する柔軟性を獲得させることにある。そのため、制御則に関節角度と関節角速度を必要としないオープンループ制御(センサレス制御)での安定性解析をおこなう。

つぎに、視覚情報と力・触覚を考慮した受動性に基づく視覚フィードバック制御を発展させ、二関節筋を有する生物の特徴のひとつであるコンタクトタスクへの適応を可能とする制御系設計法を検討する。提案する制御アルゴリズムを三次元シミュレーションと実システムに実装することで、理論値と実験データの両面から設計法の性能評価および検証をおこなう。

## 3. 研究の方法

二関節筋を有するロボットマニピュレータのモデル化、制御則の提案、理論的な安定性解析、シミュレーションと実験システムによる提案手法の有用性の検討と考察をおこなう。

## 4. 研究成果

まずは、下記のように二関節筋ロボットのモデル化をおこなった。

$$M_b(\theta)\ddot{\theta} + C_b(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g_b + K_r\theta + B_r\dot{\theta} = \tau$$

ここで $\theta$ はロボットの関節角度  $q=[q_1 \ q_2]^T$  を含む形で  $\theta=[q_1 \ q_2 \ \dot{q}_1 + \dot{q}_2]^T$  と表現し、条件つきではあるが  $M_b$  の正定性と  $\dot{M}_b - 2C_b$  の歪対称性を示したことが大きな貢献といえる。これは、従来のロボットダイナミクスの性質を保存した表現方法であり、二関節筋ロボットでは初めて示されたことである。

モデル化した二関節筋ロボットに対して、制御則に関節角度と関節角速度を必要としない下記に示すオープンループ制御則を提案した。

$$\tau = M_b(\theta_d)\ddot{\theta}_d + C_b(\theta_d, \dot{\theta}_d)\dot{\theta}_d + g_b(\theta_d) + K_r\theta_d + B_r\dot{\theta}_d$$

この制御則を用いた閉ループ系は、ある条件のもと下記のリアプノフ関数を用いることで平衡点  $(e, \dot{e}) = (0, 0)$  の漸近安定性が示される。

$$V(t, e, \dot{e}) = \frac{1}{2}\dot{e}^T M_b(\theta)\dot{e} + \frac{1}{2}e^T K_r e + \gamma \text{Sin}(e)^T M_b(\theta)\dot{e}$$

つぎに視覚・触覚を用いて関節角度と関節角速度を用いない制御則を検討した。二関節筋ロボットにおいて視覚・触覚情報を用いるには、従来のヤコビアンを拡張した下記の新たなヤコビアン  $J_b(\theta) \in R^{6 \times 3}$  を導入することで可能となる。

$$J_b^T(\theta) = \begin{bmatrix} l_1 S_2 & l_1 C_2 + l_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & l_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ただし、この手法は関節角度と関節角速度を必要とし、関節角度と関節角速度を用いずに視覚と触覚情報だけを用いる手法は確立できなかった。

その代案として、二関節筋ロボットに生物の有する環境に対する柔軟性を獲得させるために、人間が動作を繰り返すことでその動作の精度を向上させる学習制御のアプローチにより、モデルの不確かさに影響を受けにくい制御系を新たに設計した。提案する制御則ならびに学習制御更新則を下記に示す。

$$\tau = -K_y y + \tau_1, \quad y = \dot{e} + k_p \text{Sin}(e)$$

$$\tau_1^{k+1} = \tau_1^k - K_l y^k$$

オープンループ制御が二関節筋ロボットダ

ダイナミクスを含んでいたのに対して、学習制御のアプローチによる制御則ではダイナミクスを含んでいないため、モデルの不確かさに影響を受けないことがわかる。この手法による平衡点の安定性解析は先に示したエネルギー関数  $V(t, e, \dot{e})$  を用いて証明することができる。シミュレーション結果を図 1-3 に示す。これらの図から試行回数が増すごとに、目標軌道に手先の軌道が学習的に追従していく様子が確認できる。

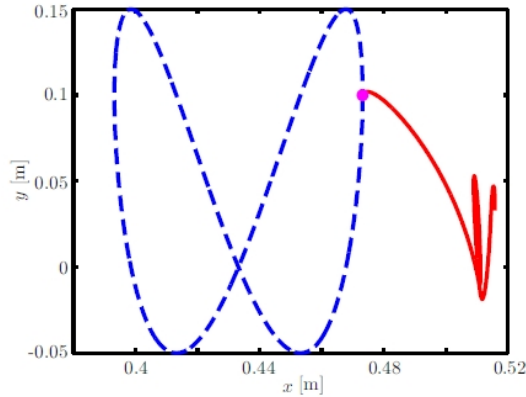


図 1 学習制御 (試行回数 1 回)

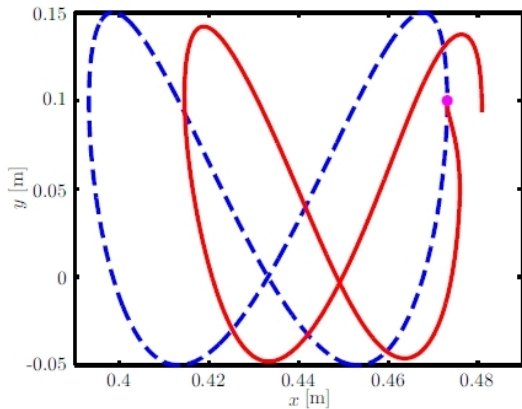


図 2 学習制御 (試行回数 5 回)

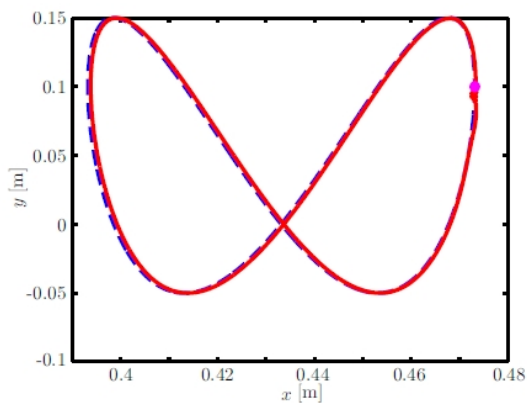


図 3 学習制御 (試行回数 12 回)

最後に試作した実験システムについて記述する。二関節ロボットの特徴は 2 自由度のアームに対して、アクチュエータが 3 つあり、各関節それぞれと 2 関節にまたがるよう

にバネ・ダンパ要素が付加されることである。それらを踏まえて試作した二関節筋ロボットマニピュレータを図 4-6 に示す。

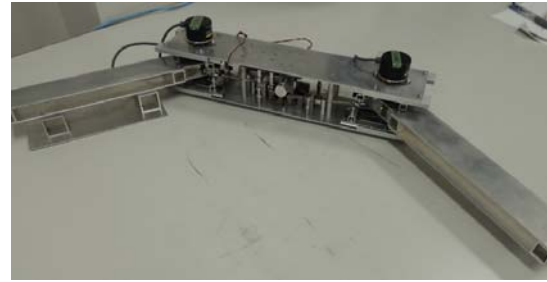


図 4 プロトタイプ 1 (ワイヤー駆動)

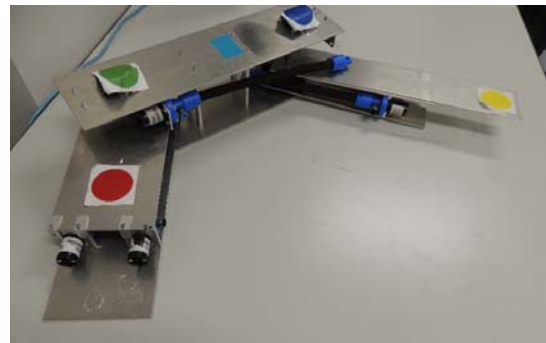


図 5 プロトタイプ 2 (人工筋肉)

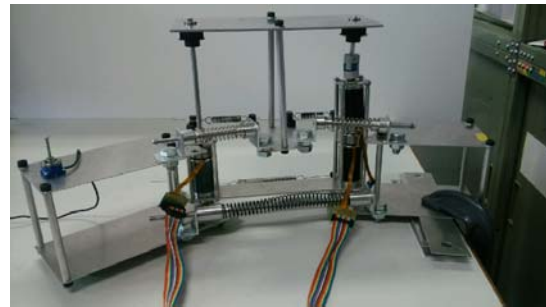


図 6 プロトタイプ 3 (力トルクセンサ)

図 4 のプロトタイプ 1 はワイヤー駆動方式、図 5 のプロトタイプ 2 は空気圧アクチュエータ (人工筋肉) による駆動を採用したものである。これらのプロトタイプではバネ・ダンパの要素は付加されたものの、アクチュエータのトルク合成においてハードウェアとしての干渉 (1 つのアクチュエータが他のアクチュエータに悪影響を及ぼす) が避けられず、ソフトウェアを介して干渉を取り除く必要があるとの結論に至った。そこで、3 対 6 筋のバネ要素は残しつつ、アクチュエータを 2 つに減らし、手先に加わる力の影響を検討するための試作機 (プロトタイプ 3) を図 6 に示す。このプロトタイプ 3 での力制御において、二関節筋の有無により手先に加わる力の影響を比較するために、二関節筋バネがある場合の手先の力の目標値応答を図 7 に、二関節筋バネがない場合の手先の力の目標値応答を図 8 に示す。どちらも時間が十分経った後では力の目標値  $-0.5 \text{ mN}$  に一致して

いるが、二関節筋バネがある方が収束までの時間が短いことがわかる。また、アクチュエータに加えた入力も二関節筋バネありの方が小さかったことから、二関節筋バネが手先の力制御において入力トルクを助ける働きをしていると考えることができる。

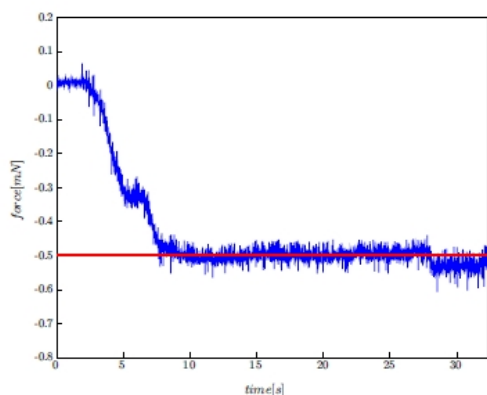


図7 力の目標値応答(二関節筋バネあり)

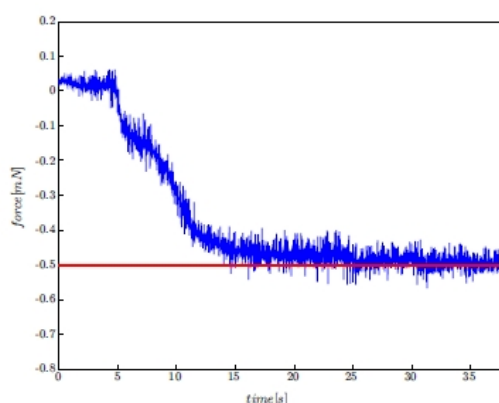


図8 力の目標値応答(二関節筋バネあり)

これらの研究成果を論文・学会発表として報告した。また、本研究を通して得られた二関節筋の知見をもとに、ロボット制御から身体の運動制御(リハビリシステム)へ展開したことも成果のひとつと考えられる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

① R. J. Downey, M. Tate, H. Kawai, and W. E. Dixon, Comparing the Force Ripple during Asynchronous and Conventional Stimulation, *Muscle & Nerve*, 査読有, Vol. 50, No. 4, pp. 549-555, 2014.

② H. Kawai, H. Kobayashi, Y. Hino, and K. Matsuda, Corridor Sensor Arrays for Dementia Group Home, J. Biswas, H. Kobayashi, L. Wong, B. Abdulrazak and M. Mokhtari (Eds.), *Inclusive Society: Health and Wellbeing in the Community, and Care at Home*, Lecture Notes in Computer Science Volume 7910, Springer, 査読有, pp. 19-26, 2013.

③ T. Murao, H. Kawai, and M. Fujita, Stabilizing Predictive Visual Feedback Control via Image Space Navigation Function, *Electronics and Communications in Japan*, 査読有, Vol. 96, No. 10, pp. 12-21, 2013.

④ 村尾俊幸, 河合宏之, 鶴尾有生, 藤田政之, ナビゲーション関数を用いた視覚フィードバック制御による障害物回避, *電気学会論文誌 C*, 査読有, Vol. 133, No. 7, pp. 1367-1375, 2013.

⑤ 河合宏之, 村尾俊幸, 鶴尾有生, 藤田政之, 入力飽和を考慮した動的視覚オブザーバによる位置姿勢制御 —小型自律飛行ロボットへの適用—, *計測自動制御学会論文集*, 査読有, Vol. 49, No. 6, pp. 639-645, 2013.

⑥ 村尾俊幸, 河合宏之, 藤田政之, 安定化予測視覚フィードバック制御に対するナビゲーション関数を用いた目標位置姿勢生成, *電気学会論文誌 C*, 査読有, Vol. 132, No. 5, pp. 721-729, 2012.

⑦ 河合宏之, 橋本龍馬, 鈴木亮一, 小林伸明, 平行2リンクマニピュレータのPID型視覚フィードバック制御, *日本機械学会論文集 C 編*, 査読有, Vol. 78, No. 794, pp. 3515-3528, 2012.

[学会発表] (計 8 件)

① U. Ichijo, T. Murao, H. Kawai, and M. Fujita, Passivity-Based Iterative Learning Control for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-Articular Muscles, *Proc. of the 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Nice/Antibes, France, Oct. 8*, pp. 234-239, 2014.

② H. Kawai, M. J. Bellman, R. J. Downey, and W. E. Dixon, Tracking Control for FES-Cycling based on Force Direction Efficiency with Antagonistic Bi-Articular Muscles, *Proc. of the 2014 American Control Conference, Portland OR, USA, June 6*, pp. 5484-5489, 2014.

③ Y. Kawai, R. J. Downey, H. Kawai, and W. E. Dixon, Co-contraction of Antagonist Bi-Articular Muscles for Tracking Control of Human Limb, *Proc. of the 2014 American Control Conference, Portland OR, USA, June 5*, pp. 3316-3321, 2014.

④ Y. Kawai, H. Kawai, and M. Fujita, RISE Control for 2DOF Human Lower Limb with Antagonistic Bi-Articular Muscles, *Proc.*

of the 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Hyderabad, India, Aug. 29, pp. 109-114, 2013.

⑤ T. Murao, H. Kawai, Y. Tsuruo, and M. Fujita, Visual Motion Observer-Based Bilateral Control for Eye-in-Hand Mobile Robot Teleoperation, Proc. of the 2013 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Hyderabad, India, Aug. 28, pp. 623-630, 2013.

⑥ Y. Tsuruo, T. Murao, H. Kawai, and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Pose Control via Obstacle Avoidance Navigation Function for Eye-in-Hand Systems, Proc. of the 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montreal, Quebec, Canada, pp. 2531-2536, Oct. 25, 2012.

⑦ K. Sano, H. Kawai, T. Murao, and M. Fujita, Open-loop Control for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-articular Muscles, Proc. of the 2012 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Dubrovnik, Croatia, pp. 1346-1351, Oct. 5, 2012.

⑧ T. Murao, H. Kawai, and M. Fujita, Visual Motion Observer-based Stabilizing Receding Horizon Control via Obstacle Avoidance Navigation Function, Proc. of the 2012 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Dubrovnik, Croatia, pp. 903-909, Oct. 4, 2012.

[その他]

ホームページ等

<http://www2.kanazawa-it.ac.jp/klab/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河合 宏之 (KAWAI, Hiroyuki)

金沢工業大学・工学部・准教授

研究者番号：70410298