

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06156

研究課題名(和文) 機能的電気刺激による下肢リハビリシステムのペダリング運動制御に関する研究

研究課題名(英文) FES-assisted Cycling with Cadence Tracking Control for Lower Limb Rehabilitation

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では下肢に問題を抱える人のリハビリテーション手法を提案した。特に、機能的電気刺激を用いて片麻痺患者のペダリング運動を実現するための制御則を提案し、理論的な安定性解析をおこなった。実用面からの貢献としてエアロバイクとリカンベントトライクを用いた2種類のリハビリテーションシステムを構築し、健常者ならびに片麻痺患者による検証実験により提案手法の有用性を検証した。

研究成果の概要(英文)：This project has proposed a rehabilitation method for lower limb disorders. Specially, the cadence tracking control with functional electrical stimulation has been considered for rehabilitation of hemiparesis. From a theoretical point of view, the stability analysis of the proposed methods is given. Two rehabilitation systems are developed by combining a muscle stimulator with an aero bike or a recumbent trike. Experiments are carried out to confirm the validity of the proposed method in healthy participants and a hemiparesis patient who had a cerebral hemorrhage from a practical point of view.

研究分野：制御工学

キーワード：ペダリング運動 機能的電気刺激 リハビリシステム 速度制御

### 1. 研究開始当初の背景

人間の身体は、脊髄運動ニューロンの発火が骨格筋を活性化させることで、複雑な動きを可能にしている。脊髄運動ニューロンを傷つけるような神経障害は、不全麻痺や運動障害を引き起こす可能性がある。特に、脳卒中や脊髄損傷のような上位運動ニューロンの損傷を抱える人は、機能的な運動を実現することが困難になっている。そこで、機能的電気刺激(FES)を用いて失われた脊髄運動ニューロンの機能を人工的に補うことにより、歩行、立ち上がり、物の把持などを実現するための研究がおこなわれている。特に、FESによるペダリング運動は複数の筋肉を刺激する周期運動であるため、下肢に問題を抱える人のリハビリに有効となる。なかでも、リカンベントトライクはバランスが取りやすいため、リハビリの手段としてだけでなく移動手段としても期待されている。

この FES を用いたペダリング運動については生理学・心理学的な知見からの研究が多く報告されている。しかしながら、筋肉への電気刺激により得られるすべての力をペダリング運動に伝えることはできておらず、健常者に比べると効率的な運動が実現できていないのが現状である。

近年になって、工学的な知見からより効率的な運動の実現を目指し、海外の有力研究グループにより FES を用いた下肢の追従制御において筋肉の有する非線形性を考慮した安定性解析の研究がおこなわれはじめている。ただし、レッグカールマシンなどの膝関節だけを動かす運動に限定されており、FES を用いたペダリング運動に対する理論的な研究はほとんどおこなわれていない。このような背景のもと、より効率的な運動を実現させるために、FES を用いたペダリング運動に対する理論的な研究成果が期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、機能的電気刺激(FES)を用いた下肢リハビリシステムにおける運動制御の手法を、下肢に問題を抱える人が使用する状況を想定した問題設定を考えることで実用的かつ理論的なアプローチによって提案することにある。

そのため、まずは下肢の筋特性を含めた FES サイクリングをモデル化する。そして、片麻痺患者に対するリハビリテーションを実現するために、ペダリング運動における速度追従を達成する速度制御法を提案し、リアプノフの安定論に基づき安定性解析をおこなうことが理論的なアプローチにおける研究目的となる。

提案手法を検証するための実験システムとして、リカンベントトライク、計算機、筋刺激装置などで構成されるリハビリテーションシステムを構築する。そして、構築した実験システムにより健常者と片麻痺患者で実験をおこなうことで提案手法の有用性を

検証することが実用的なアプローチにおける研究目的となる。

### 3. 研究の方法

機能的電気刺激による下肢のペダリング運動制御を実現するために、下肢のモデル化、制御則の提案、理論的な安定性解析、実験システムの構築ならびに検証実験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

ペダリングシステムの運動モデルは、クランクの角度を  $q$  とすると

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

と表される。このモデルに対して筋特性を考慮すると、クランク中心のトルクは

$$\tau = \sum_{i \in S} F_i^T \times \begin{bmatrix} l_3 C_3 \\ l_3 S_3 \end{bmatrix} + M_e(q) + M_v(\dot{q}) - d$$

$$S := \{\text{Glut, Ham, Gast, Quad}\}$$

となる。ただし、Glut, Ham, Gast, Quad は大臀筋、ハムストリングス、腓腹筋、大腿四頭筋を意味し、 $F_i$  は各筋群がペダルに及ぼす力を表す (図1参照)。

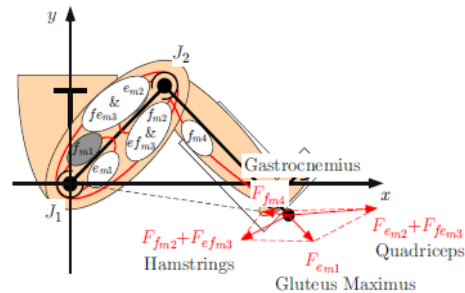


図1 下肢の筋モデルと足先の力

ここで、筋刺激により与えられる入力を  $u$  とし、上記2つの式を組み合わせると運動モデルとして

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) - M_e(q) - M_v(\dot{q}) + d = \Omega_\chi u$$

が得られる。

このとき、ペダリングの速度追従を達成するために制御入力  $u$  を以下のように与える。

$$u = k_1 r + k_2 \text{sgn}(r)$$

ただし  $r := \dot{q}_d - \dot{q}$  と定義され、 $\dot{q}_d$  は目標クランク速度、 $k_1$  と  $k_2$  は正のゲインである。この制御入力と、上記の運動モデルで構成される閉ループ系に対して、つぎの正定関数を考える。

$$V = \frac{1}{2} r^T M_\Omega(q) r$$

この関数を時間微分すると、その上界が

$$\dot{V} \leq^{a.e.} -(k_2 - c_1)|r| - (k_1 - c_2)r^2$$

となる。これより、 $k_1 > c_2$ 、 $k_2 > c_1$  の条件のもとでリアプノフの安定定理に基づき閉

ループ系の平衡点  $|r| = 0$  の漸近安定性が示される。以上により、4つの筋群を連続的に切り替えながら筋刺激をおこなうペダリング運動において、提案する制御則に基づいた適切な電流を筋に流すことでクランク速度を与えられた目標速度に一致させたペダリング運動が実現されることが示される。この安定性解析が本研究における理論的な貢献のひとつである。

つぎに本研究で構築した2種の FES リハビリテーションシステムのプロトタイプを図2と図3に示す。

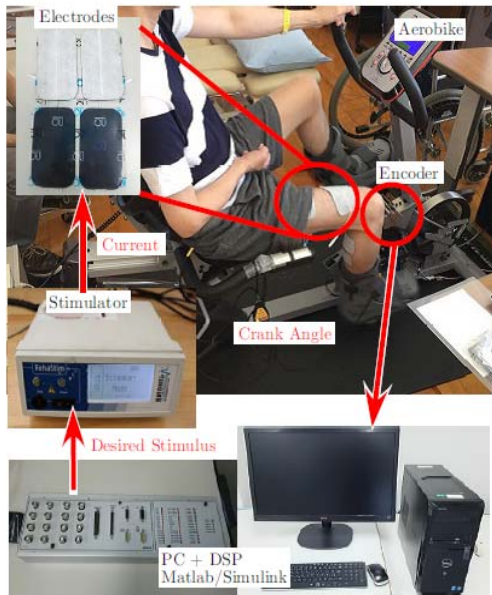


図2 エアロバイクによる FES リハビリテーションシステムのプロトタイプ

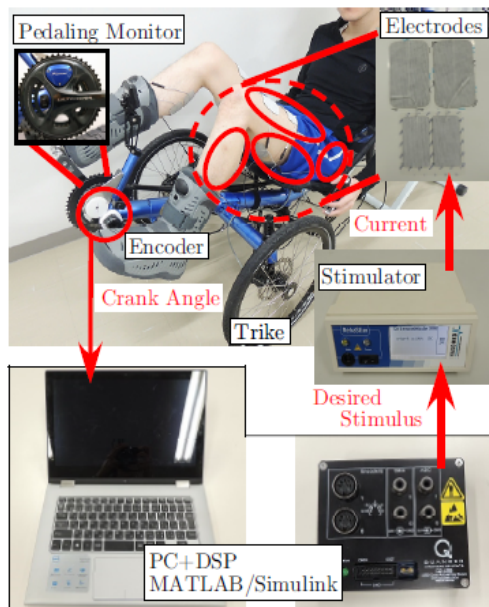


図3 リカンベントトライクによる FES リハビリテーションシステムのプロトタイプ

図2の FES リハビリテーションシステムを用いた検証実験に対する被験者は20代の健常な男性4名と40代の片麻痺患者1名

である。また図3の FES リハビリテーションシステムを用いた検証実験に対する被験者は20代の健常な男性4名である。検証実験は金沢工業大学の倫理委員会の承認を得たうえで被験者に実験内容の十分な説明をし、同意を得て実施した。片麻痺患者に対する検証実験はさらに済生会金沢病院の倫理委員会の承認をえたうえで、被験者に十分な説明をし、同意を得て実施した。検証実験は被験者の様子を確認しながら実施し、実験と実験の間には十分な休息を挟んだ。

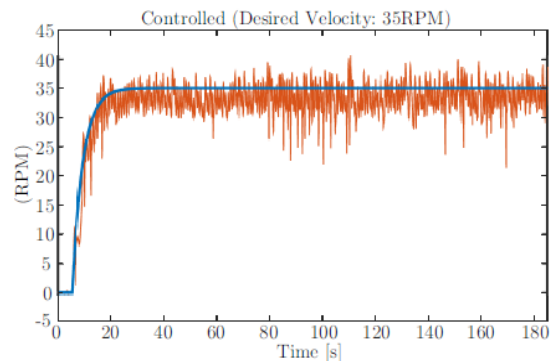


図4 健常者の両下肢を提案手法で筋刺激した場合のクランク速度(赤：実測値，青：目標速度)

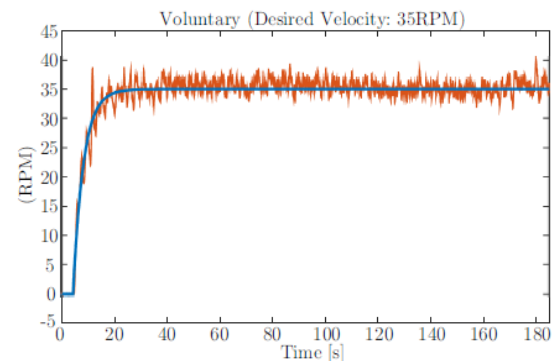


図5 健常者の自発的なペダリング運動のクランク速度(赤：実測値，青：目標速度)

表1 健常者4名のクランク速度偏差

Participants	Velocity Error (RPM)	
	Voluntary Tracking	Controlled Tracking
A	$-0.28 \pm 1.40$	$1.56 \pm 2.51$
B	$-0.13 \pm 1.84$	$3.51 \pm 2.58$
C	$0.01 \pm 1.66$	$4.29 \pm 3.02$
D	$-0.37 \pm 2.32$	$3.76 \pm 3.02$

図4と図5に健常な被験者1名の実験結果を、表1に健常な被験者4名の実験結果を示す。図4には両下肢を提案手法で筋刺激した場合のクランク速度を、図5には自発的なペダリング運動のクランク速度を示す。両図より、提案手法により自発的な運動に近いペダリングが実現できていることが確認される。また、表1には自発的なペダリング運動と提案手法でのペダリング運動とのクランク速度偏差の平均と標準偏差を示す。追従性能は

自発的なペダリング運動に及ばないものの、提案手法により目標値追従が実現できていることが確認される。

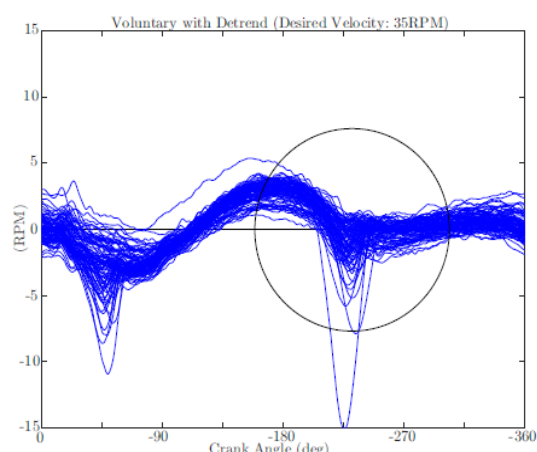


図6 片麻痺患者の自発的なペダリング運動のクランク速度偏差（1回目）

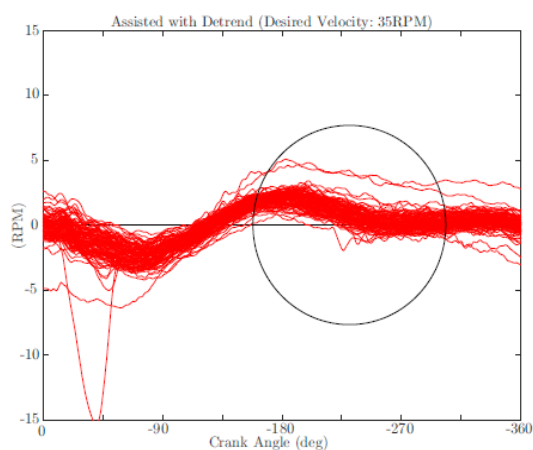


図7 片麻痺患者の麻痺脚に提案手法で筋刺激した場合のクランク速度偏差（1回目）

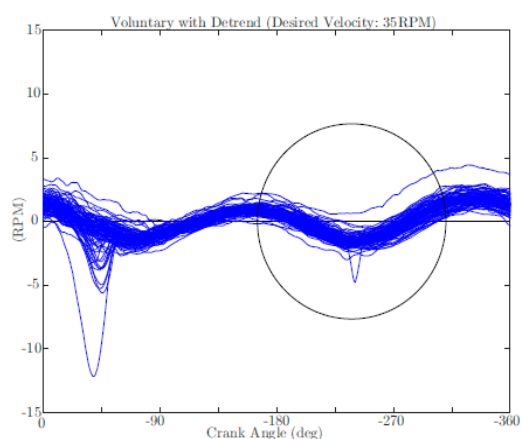


図8 片麻痺患者の自発的なペダリング運動のクランク速度偏差（8回目）

図6から図8に片麻痺患者の実験結果を示す。実験は週2回の4週間で合計8回実施しており、図6と図7は1回目の実験結果でそれぞれ自発的なペダリング運動でのクランク速度偏差と提案手法により筋刺激をした

場合のクランク速度偏差を表している。被験者は右下肢に麻痺を抱えているため、図6における丸で囲んだ $-240^{\circ}$ 付近でクランク速度が低下する傾向がみられた。それに対し図7での提案手法による筋刺激を施したペダリング運動では、 $-240^{\circ}$ 付近でのクランク速度の低下が抑えられていることが確認できる。さらに図8に示す8回目の自発的なペダリング運動のクランク速度偏差より、実験開始前に見られた $-240^{\circ}$ 付近でのクランク速度の低下が減少し、滑らかなペダリング運動が実現されている。実際の片麻痺患者の被験者数を増やした検証実験が必要であるが、この実験結果より本研究で提案した手法のリハビリテーションとしての効果に期待が持てると思われる。

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機能的電気刺激による運動制御の知見をもとに、ペダリング運動だけでなくローリング運動や立ち上がり動作などの別の運動に対するリハビリシステム構築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 2 件）

① H. Kawai, M. J. Bellman, R. J. Downey, and W. E. Dixon, Closed-Loop Position and Cadence Tracking Control for FES-Cycling Exploiting Pedal Force Direction with Antagonistic Bi-Articular Muscles, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 査読有, 2018(掲載決定).

DOI: 10.1109/TCST.2017.2771727

② R. J. Downey, M. J. Bellman, H. Kawai, C. M. Gregory, and W. E. Dixon, Comparing the Induced Muscle Fatigue Between Asynchronous and Synchronous Electrical Stimulation in Able-bodied and Spinal Cord Injured Populations, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 査読有, Vol. 23, No. 6, pp. 964-972, 2015.

DOI: 10.1109/TNSRE.2014.2364735

〔学会発表〕（計 12 件）

① T. Murao, H. Kawai, K. Hirata, and M. Fujita, Bilateral Control of Nonlinear Teleoperation for 2DOF Robot Manipulators with Antagonistic Bi-articular Muscles, Proc. of the 11th Asian Control Conference, pp. 204-209, Gold Coast, Australia, Dec. 18, 2017.

② Y. Kawai, K. Honda, H. Kawai, T. Miyoshi, and M. Fujita, Tele-Rehabilitation System for Human Lower Limb using Electrical



Stimulation based on Bilateral Teleoperation, Proc. of the 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, Kohala Coast, Hawaii, pp. 1446-1451, Aug. 29, 2017.

③ Y. Kushima, H. Kawai, T. Murao, Y. Kawai, M. Kishitani, R. Suzuki, and M. Fujita, FES-assisted Cycling with Velocity Tracking Control for Hemiparesis Rehabilitation, Proc. of The 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Munich, Germany, pp. 645-650, July 5, 2017.

④ 中村光一, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 機能的電気刺激を用いた立ち上がり動作のリハビリシステム構築に関する研究, 第 18 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, pp. 2381-2385, 仙台, Dec. 22, 2017.

⑤ Y. Kawai, K. Ejiri, and H. Kawai, Tracking Control using Muscle Contraction Model for Human Lower Limb, Proc. of the SICE Annual Conference 2016, Tsukuba, Japan, pp. 1316-1319, Sep. 23, 2016.

⑥ Y. Yamazaki, Y. Kushima, H. Kawai, Y. Kawai, T. Murao, and R. Suzuki, Development of FES Alternate Knee Bending and Stretching System with RISE-based Control, Proc. of the SICE Annual Conference 2016, Tsukuba, Japan, pp. 991-994, Sep. 22, 2016.

⑦ H. Kawai, M. Kishitani, T. Murao, and R. Suzuki, A Case Study on FES-assisted Cycling for Stroke Patients with Hemiparesis, ISYS 2016 Decennial Workshop, Stuttgart, Germany, Apr. 20, 2016.

⑧ 久島康嘉, 河合宏之, 岸谷都, 機能的電気刺激によるペダリング運動の速度制御, 第 17 回 SICE システムインテグレーション部門講演会論文集, 札幌, pp. 2839-2843, Dec. 17, 2016.

⑨ Y. Kawai, K. Ejiri, and H. Kawai, Co-Contraction of Antagonist Muscles of Human Limb using Neural Network-based Control, Proc. of the 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, Nagoya, Japan, pp. 33-38, Dec. 12, 2015.

⑩ Y. Kushima, K. Kawataka, H. Kawai, Y. Kawai, and W. E. Dixon, FES Knee Bending and Stretching System with RISE-based Tracking Control for Human Limb, Proc. of

the 2015 IEEE Multi-conference on Systems and Control, Sydney, Australia, pp. 870-875, Sep. 22, 2015.

⑪ 河合宏之, 機能的電気刺激を用いた下肢の運動制御, 第 58 回 自動制御連合講演会, 神戸, 1A1-4, Nov. 14, 2015.

⑫ 久島康嘉, 河合宏之, 河合康典, 機能的電気刺激を用いた屈伸運動システムの構築, 平成 27 年度 電気関係学会 北陸支部連合大会 講演論文集, 石川, H-17, Sep. 12, 2015.

[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