

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：32692

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350673

研究課題名(和文) 下肢関節障害に適合した健康増進電動カートの開発

研究課題名(英文) Development of a Health-Promoting Electric Cart for People with Lower-Limb Injuries

研究代表者

しゃ 錦華 (SHE, Jinhua)

東京工科大学・工学部・教授

研究者番号：10257264

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)：本研究は、様々な下肢関節障害を対象に、下肢運動能力の向上を図るため、人間を中心とした非対称の下肢リハビリ機器を開発することを目的として進めてきた。主に、ペダリング機構の設計、試作と有効性検証を行い、人間感覚モデルとペダリング負荷印加法を提案し、繰返し制御と等価入力外乱手法をリハビリ分野に拡張するようにするなど、様々な研究成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：This study focused on developing a human-centered bilaterally asymmetric rehabilitation machine to improve the motor function of lower limbs for people with various lower-limb injuries. We designed a pedaling mechanism, built a prototype of the machine, and verified the validity of the mechanism. We devised a model of human sense and a method of adding pedaling load. And we extended the repetitive control method and the equivalent-input disturbance approach to the field of rehabilitation.

研究分野：リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：福祉機器 リハビリ機器 下肢関節 人間適応 ペダリング 最適負荷 繰返し制御 等価入力外乱手法

1. 研究開始当初の背景

歩行機能は日常生活における最も重要な機能の一つである。それを保障するために、患者の様々な下肢関節障害に適切に対処するようにリハビリを行う必要があるが、現状のリハビリ機器は個々の関節障害に適応したものがなく、患者は機械に合わせてリハビリを行わざるを得ず、時としてリハビリ時の疼痛や動作障害は非常に苦痛に感じたり、個人に適した効用を感じずにリハビリを諦めたりすることがある。リハビリの継続性を高めるために、リハビリ機器が様々な下肢関節障害に適合し、その構造や特性が変えられるような設計論を見出す必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、利用者がリハビリ器具に合わせる状況を打開するため、人間を中心とした非対称の下肢リハビリ機器を開発することを目的とする。下肢の様々な関節障害に対応し、下肢運動能力の向上を図るため、患者の各種ニーズに柔軟に対応できる新たなリハビリ機器を設計し、その有効性を検証する。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下のよう
に研究を行った。

- 下肢関節障害に適合したペダリング機構の設計と試作：まず、リハビリのニーズと段階を考慮してリハビリプロセスと筋肉の鍛え方を詳しく分析した。それに基づき、リハビリの進捗状況に合わせて可変負荷を生成するスライド式のペダリング機構を、使用のしやすさ、調整のしやすさや制御のしやすさなどの観点から設計した。
- ペダリング負荷に関する検討：ペダリング負荷もリハビリ効果に直接に影響を与える。本研究でのペダリング運動に焦点を当て、ペダル負荷選定法の検討を行った。
- リハビリ機構の制御に関する検討：被験者に安全かつ効率よくリハビリを行わせるために、リハビリ機構を最適に制御する必要がある。そのような制御を実現するために、研究代表者が先に提案した等価入力外乱手法をリハビリに拡張することについて検討した。

4. 研究成果

本研究では、以下の研究成果が得られた。

- ペダリング機構の設計と試作：各種検討を重ねた結果、4種類の機構を設計した。これらの機構は、すべて左右の足が独立してリハビリできる非対象型であり、静的筋肉と動的筋肉の両方が鍛えられるようになっている。また、滑車式のペダリング機構のプロットタイプを試作し、東京工科大学の在学生を対象にペダリングテストを行い、その有効性を検証し、ペダリング角度、

踏力と筋電との関係を調べ、リハビリ機器の傾斜角度が 60 度前後の場合、ペダリングが一番しやすいことを明らかにした。

- 人間感覚モデル：人体構造と感覚は非常に複雑である。リハビリ効果を測定・評価するために、生体モデルを構築する必要がある。本研究では、まず、人間の温熱モデルを構築することを試みた。構築したモデルの次数を低減するために、最小実現と平衡実現を融合した低次元手法を提案し、従来の 18 次のモデルを、人間の感覚範囲内で同じ精度を持つ 7 次元のモデルに低次元化することに成功した。この結果を参考に、心拍数や筋電図などの生体データと、踏力や下肢関節の位置・速度などの運動データを集計・処理する計測システムを構築し、コンピュータを用いたリハビリ管理と制御の環境構築を整えた。
- ペダリング負荷：印加するペダリング負荷を正確に評価するための最大心拍数の計算法が数多く提案されている中、ペダリング運動を中心に、最も広く用いられる六つの最大心拍数計算法を選定し、47 名の被験者の実験データをもとに、それらの比較検証を行い、 $HR_{max} = 220 - \text{age}$ と $HR_{max} = 217 - 0.85 \times \text{age}$ という二つの計算法が一番正確であることが分かった。
- リハビリ機構の制御：被験者に安全かつ効率よくリハビリを行わせるために、リハビリ機構を最適に制御する必要がある。ペダリングは周期的運動となっていること、各種ペダル負荷による影響と機械システムの非線形性に注目し、入力デッドゾーン、非線形状態や無駄時間などを含む制御対象に対して、繰返し制御と等価入力外乱手法を融合した制御手法を検討し、制御誤差が従来の半分以下という優れた制御効果が得られることが確認できた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 11 件)

- [1] Jinhua She, Fajian Wu, Toshihiro Mita, Hiroshi Hashimoto, Min Wu, and Abdullah M. Ilyasu, Design of a New Lower-Limb Rehabilitation Machine, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 21, No. 3, pp. 409-416, May 2017, 査読あり
- [2] Min Wu, Pan Yu, Xin Chen, Jinhua She, Design of repetitive-control system with input dead zone based on generalized extended-state observer. *Transactions of the*

- ASME, *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 139, pp. 071008-1~9, Doi: 10.1115/1.4035615, 2017, 査読あり
- [3] Min Wu, Fang Gao, Jinhua She, and Weihua Cao, Active Disturbance Rejection in Switched Neutral-Delay Systems Based on Equivalent-Input-Disturbance Approach, *IET Control Theory & Applications*, Vol. 10, No. 18, pp. 2387-2393, DOI: 10.1049/iet-cta.2016.0211 December, 2016, 査読あり
- [4] Pan Yu, Min Wu, Jinhua She, and Qi Lei, Robust Repetitive Control and Disturbance Rejection Based on Two-Dimensional Model and Equivalent-Input-Disturbance Approach, *Asian Journal of Control*, Vol. 18, No. 6, pp. 2325-2335, DOI: 10.1002/asjc.1287, November 2016, 査読あり
- [5] Fang Gao, Min Wu, Jinhua She, and Yong He, Delay-dependent guaranteed-cost control based on combination of smith predictor and equivalent-input-disturbance approach, *ISA Transactions*, Vol. 62, pp. 215-221, doi:10.1016/j.isatra.2016.02.008, May, 2016, 査読あり
- [6] Fang Gao, Min Wu, Jinhua She, and Weihua Cao, Disturbance Rejection in Nonlinear Systems Based on Equivalent-Input-Disturbance Approach, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 282, pp. 244-253, doi:10.1016/j.amc.2016.02.014, May, 2016, 査読あり.
- [7] Jinhua She, Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, Reduced-Order Modeling of Human Body for Brain Hypothermia Treatment, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 13, No. 2, pp. 159-167, DOI: 10.1007/s11633-016-0961-y, April, 2016, 査読あり
- [8] Fang Gao, Min Wu, Jinhua She, and Pan Yu, Guaranteed Cost Control of State-Delay Systems Based on Equivalent-Input-Disturbance Approach, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 20, No. 2, pp. 246-253, DOI: 10.20965/jaciii.2016.p0246, March, 2016, 査読あり
- [9] Qi Shi, Zhejun Fang, Jinhua She, Junya Imani, and Yasuhiro Ohyama, Motion Control of a Wheeled Inverted Pendulum Using Equivalent-Input-Disturbance Approach, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, Vol. 19, No. 2, pp. 293-300, ISSN: 1343-0130, Fuji Technology Press Co., Ltd., March, 2015, 査読あり
- [10] Jinhua She, Hitoshi Nakamura, Koji Makino, Yasuhiro Ohyama, and Hiroshi Hashimoto, Selection of Suitable Maximum-heart-rate Formulas for Use with Karvonen Formula to Calculate Exercise Intensity, *International Journal of Automation and Computing*, Vol. 12, No. 1, pp. 62-69, DOI: 10.1007/s11633-014-0824-3, Springer, February 2015, 査読あり
- [11] Jinhua She, Kohji Makino, Liyu Ouyang, Hiroshi Hashimoto, Hideki Murakoshi, and Min Wu, Estimation of Normalized Longitudinal Force for an Electric Cart Using Equivalent-Input-Disturbance Approach, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, No. 8, pp. 3642-3650, DOI: 10.1109/TVT.2014.2309954, October, 2014, 査読あり
- 〔学会発表〕(計 14 件)
- [1] Milun Liu, Fajian Wu, Jinhua She, Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, A Left-Right-Asymmetric Pedaling Machine for Medical Rehabilitation of Lower Limbs, *Proc. of the 14th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2017)*, Madrid, Spain, 26-28 July, 2017 (論文採用済み), 査読あり
- [2] Jinhua She, Fajian Wu, Hiroshi Hashimoto, Toshihiro Mita, and Min Wu, Design of a Bilaterally Asymmetric Pedaling Machine and its Measuring System for Medical Rehabilitation, *The 1st International Conference on Human Computer Interaction Theory and Applications*, Vol. 2, pp. 122-127, Porto, Portugal, 27 February-1 March, 2017, 査読あり
- [3] 吳 發鍵, 余 錦華, 三田 俊裕, 橋本 洋志, 左右非対称の下肢リハビリ機器の開発, 第 17 回システムインテグレーション部門講演会, pp. 983-986, 札幌紺ペンションセンター, 北海道札幌市, 12 月 15 日 ~ 17 日, 2016, 査読なし
- [4] Jinhua She, Fajian Wu, Toshihiro Mita, Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, Design of a New Human-Centered Rehabilitation Machine, *Proceedings of IEEE-NIH 2016 Special Topics Conference on Healthcare Innovations and Point-of-Care Technologies (HI-POCT 2016)*, pp. 1, November 9-11, 2016, CasaMagna Marriott Cancun Resort, Cancun, Mexico, 査読あり
- [5] Fajian Wu and Jinhua She, Design of a New Lower-Limb Rehabilitation Machine, *Proceedings of the 11th Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications (ITCA 2016)*, pp. 64-67, August 1-7, 2016, Tokyo

- University of Technology, Tokyo, Japan, 査読あり
- [6] Qi Shi, [Jinhua She](#), and Yasuhiro Ohyama, Motion Control of a Wheeled Inverted Pendulum Using Equivalent Input Disturbance Approach, *Proceedings of the 11th Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications (ITCA 2016)*, pp. 84-92, August 1-7, 2016, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, 査読あり
- [7] Yuan Gao, Qi Shi, and [Jinhua She](#), Development of New Fatigue Evaluation System, *Proceedings of the 11th Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications (ITCA 2016)*, pp. 56-59, August 1-7, 2016, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, 査読あり
- [8] [Jinhua She](#), Fajian Wu, Toshihiro Mita, Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, Design of a New Human-Centered Rehabilitation Machine, *Proceedings of the 9th Pervasive Technologies Related to Assistive Environments conference (PETRA 2016)*, pp. 1-4, doi: 10.1145/2910674.2910684, June 29-July 1, 2016, Corfu Holiday Palace Hotel, Corfu, Greece, 査読あり
- [9] Kou Miyamoto, [Jinhua She](#), Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, Norm Selection for Evaluation Criterion for Placement Planning of Active Damping Devices in Structure, the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2015), pp. 117-122, Colmar Alsace, France, 21-23 July 2015, 査読あり
- [10] [Jinhua She](#), Hiroshi Hashimoto, Qi Lei, and Min Wu, Construction of Reduced-Order Biothermal Model of Human Body for Brain Hypothermia, *International Symposium on Industrial Electronics 2015 (ISIE 2015)*, pp. 952-957, Rio de Janeiro, Brazil, 3-5 June, 2015, 査読あり
- [11] Pan Yu, Min Wu, [Jinhua She](#), and Qi Lei, Two-Dimensional Robust Modified Repetitive Control for Uncertain Systems with Disturbances, *Proceedings of the 10th Asian Control Conference 2015 (ASCC 2015)*, pp. 3081-3086, Kota Kinabalu, Malaysia, 31 May - 3 June 2015, 査読あり
- [12] [Jinhua She](#), Yaodong Pan, Hiroshi Hashimoto, Qi Lei, and Min Wu, Equivalent-Input-Disturbance Approach Enables Sliding-Mode Control Systems to Reject Unmatched Disturbances, *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2015)*, pp. 226-231, Seville, Spain, March 17-19, 2015.
- [13] Qi Shi, Zhejun Fang, [Jinhua She](#), Junya Imani, and Yasuhiro Ohyama, Motion Control of a Mobile Wheeled Inverted Pendulum Using Equivalent-Input-Disturbance Approach, The Joint International Conference of the 10th China-Japan International Workshop on Information Technology and Control Applications and the 6th International Symposium on Computational Intelligence and Industrial Applications (ITCA & ISCIIA 2014), pp. 201-207, Central South University, 15-20, September, 2014, Hunan, China, 査読あり
- [14] [Jinhua She](#), Hitoshi Nakamura, Junya Imani, Yasuhiro Ohyama, Hiroshi Hashimoto, and Min Wu, Verification of Relationship between Heart Rate and Body Movement for Fatigue Estimation, The 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN2014), pp. 781-785, DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945611, 27-30 July, 2014, Porto Alegre, Brazil, 査読あり

〔図書〕(計1件)

- [1] [Jinhua She](#), Yasuhiro Ohyama, Xin Chen, and Jie Chen Ed., *Proceedings of the Eleventh Japan-China International Workshop on Information Technology and Control Applications (ITCA 2016)*, pp. 1-289, Tokyo University of Technology, Tokyo, Japan, August, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

しゃ 錦華 (SHE, Jinhua)
 東京工科大学・工学部・教授
 研究者番号：10257264