

令和元年6月25日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12950

研究課題名(和文) 上肢運動リズムを介して下肢歩行運動を安定化できる歩行アシストロボット開発

研究課題名(英文) Gait assist robot to stabilize walking by rhythmic input to upper limb motion

研究代表者

三宅 美博 (Miyake, Yoshihiro)

東京工業大学・情報理工学院・教授

研究者番号：20219752

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：従来の歩行アシストロボットは、下肢(脚運動)に直接的に駆動力を加えるため、歩行の不自然さやトラブル時の転倒危険性の問題が指摘されてきた。そこで本研究では上肢運動(腕振り)リズムへの入力を通じて、間接的に下肢運動(歩行)リズムを安定化させる新しい方法を提案し、転倒の危険性の低い安全な歩行アシストロボットを世界で初めて開発した。我々の方法は、上肢と下肢のCPGを介するリズム相互調のなかで、上肢運動リズムの制御を介して歩行の全体的な安定化を誘導するものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の歩行アシストロボットはアクチュエータで下肢運動を直接駆動する方法が採用されてきた。しかし、歩行時に下肢を直接駆動するため歩行が不自然かつ不安定になり、しかも、トラブル発生時には転倒を誘発するため安全面に大きい課題が残されていた。そこで本研究は上肢運動リズムに介入することで、下肢運動リズムが自発的に同調し、歩行の全体的な安定化を実現する新しい歩行アシスト技術を開発した。このように四肢の神経結合を考慮した歩行アシスト技術は本研究が世界で初めてである。

研究成果の概要(英文)：Conventional gait assist robots directly drive power to the lower limbs (leg motions), so problems with unnatural walking and falling have been pointed out. Therefore, in this research, we studied a new mechanism to indirectly stabilize the lower limbs (walking) through the input to the upper limb (arm swing), and firstly developed a safe gait assist robot with a low risk of falling based on it. Our method uses systemic stabilization of gait through control of upper limbs in CPG-mediated rhythmic synchronization between upper and lower limbs.

研究分野：ヒューマンロボットインタラクション

キーワード：歩行アシスト 介助ロボット 歩行リズム 肢間協調

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

従来の歩行アシスト技術では、パワーアシストロボットにより下肢運動を駆動する方法が主流であった。たとえばサイバーダイン社のHALやホンダ技研のホンダ歩行アシストである。しかし、これらは下肢を直接的に駆動するため、歩行が不自然かつ不安定になることや、トラブル発生時には歩行者の転倒を誘発するなど安全面に大きい課題が残されていた。

このような背景の中で、本研究は上肢運動リズムに介入することで、下肢運動リズムが自発的に同調し、歩行の全身的な安定化を実現する歩行アシスト技術の開発にチャレンジした。我々の方法は、上肢（腕振り）と下肢（歩行）の運動リズムの相互同調の中で、上肢リズムの制御を介して下肢リズムを安定な歩行運動に誘導するものである。ここでは上肢と下肢がCPG (Central Pattern Generator) 神経系を介して相互に同調すること、および、上肢運動が下肢運動の動的安定化に寄与することに注目した。このように四肢の神経結合を考慮した歩行アシスト技術は本研究が世界で初めてであり、我々は既に転倒予防や歩行リハビリへの有効性を示唆してきた。

我々はこれまで個体間での歩行リズムの同調現象に注目し、歩行運動を動的に安定化する支援システム Walk-Mate を開発してきた (Miyake, IEEE Trans. on Robotics 2009)。2人で並んで歩くときに自然と歩調が揃うことは身近な体験であるが、それを歩行安定化に応用したものである。

そこで注目されたことは、インターパーソナルな（個体間）同調とイントラパーソナルな（個体内）同調の二重化された制御系である。前者は個体間の下肢運動リズムの同調であり、後者は個体内での下肢と上肢のリズム同調である。そして、その第一歩としてインターパーソナルな同調に注目し、人間と歩行ロボットが足音に対応するリズム音（聴覚刺激）を交換しつつ歩行リズムが同調するシステムを構築し、歩行支援への活用を進めてきた。

これを踏まえて、科研費・基盤B (H19~22)において脳卒中の片麻痺歩行における動的安定化への効果を示した。さらに科研費・基盤B (H23~25)ではパーキンソン病の歩行障害のリハビリへの効果 (Miyake et al. PLoS ONE 2012, 2013, 2014) も示した。

これらの成果は、歩行リズムのインターパーソナルな同調技術とその臨床応用基盤が確立していることを意味する。そこで本研究では、まだ手がつけられていなかった上肢と下肢のイントラパーソナル（個体内）同調に注目し、Walk-Mate の相互同調モデルを四肢の神経結合を考慮した全身的歩行アシストに適用した。

### 2. 研究の目的

本研究は上記の問題点を踏まえて構想されたものであり、上肢運動リズム（腕振り）に介入することで下肢運動リズム（歩行）が自発的に同調し、歩行の全身的な安定化を実現することをめざした。これによって従来技術の問題である下肢の直接駆動による不自然な歩行や転倒の危険性を回避するとともに、歩行を動的に安定化する効果的アシストが可能になると考えた。予備実験ではあるが既に上肢リズムへの介入による歩行安定化の可能性も示されていた。具体的には、これまで我々が提案してきたリズム相互同調型の歩行支援システム Walk-Mate を上下肢のリズム同調現象に拡張することになる。

具体的には、以下の2つの研究項目に取り組んだ。

1. 上肢運動リズムの制御システムの開発
2. 歩行障害への適用とその有効性評価

そして、この結果として期待される成果は、以下の2つである。

1. 上肢運動リズムに介入することで、転倒の危険性の低い安全な歩行アシストロボットを実現できる
2. 四肢全体の神経結合を考慮した全身的歩行アシスト技術に向けての初めての研究成果となる

従来、上肢運動と下肢運動は独立と考えられてきた。しかし、近年では脊髄固有ニューロンを介した四肢間の神経経路の興奮性が歩行中に賦活されること [Diez 2005] や上肢運動が下肢運動に影響することが注目されている [Umberger 2008, van Dieen 2010]。このような背景の中で四肢全体の神経結合を考慮した歩行アシスト技術への期待が高まっており、本研究は上肢運動リズムに介入することで下肢運動に影響を与え、歩行運動の全身的安定化とリハビリ支援をめざす世界で初めての試みである。

### 3. 研究の方法

本研究では、上肢（腕）運動と下肢（脚）運動がCPG神経系を介して相互に同調することに注目し、上肢運動リズムへの介入から下肢運動リズムに間接的に影響を与えることで、歩行運動の全身的な動的安定化を実現できる歩行アシストロボットの開発をめざした。そのために平成28年度から30年度までの3カ年において、上肢のアクチュエータ制御からその臨床評価まで進めた。具体的には以下の2つの研究項目を実施した。

1. 上肢運動リズムの制御システムの開発（アクチュエータと制御器の開発）
2. 歩行障害への適用とその有効性評価（臨床における有効性評価試験）

研究体制としては、研究代表者の三宅美博（東工大・知能システム科学専攻・教授）が研究統括および歩行支援ロボットの開発と評価を担当し、研究分担者の小川健一郎（東工大・知能

システム科学専攻・助教) が数理科学的視点からの歩行の制御モデルの構築を担当した。研究協力者の

関 雅俊 (菊池製作所・ものづくりメカトロ研究所・八王子市) はロボティクスの観点からの上肢駆動装置の開発を担当し、研究協力者の織茂智之 (関東中央病院・神経内科・部長・世田谷区) が神経内科学的視点からの歩行障害の評価を、研究協力者の和田義明 (日産玉川病院・リハビリセンター・副院長・世田谷区) がリハビリ科学的視点からの歩行障害の評価を実施した。

#### 4. 研究成果

研究項目 1 :

上肢運動リズムの制御システムの開発

実施内容 :

上肢運動リズムの駆動システムを開発するために、まず上肢の肩関節の回転運動を駆動するアクチュエータを開発した (図 1)。その結果、上肢への矩形波的なトルク入力によって上肢の振れ角が拡大していることが確認される (図 2)。

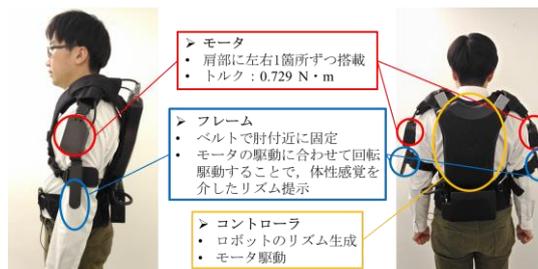


図 1 : 上肢運動リズムの駆動システム

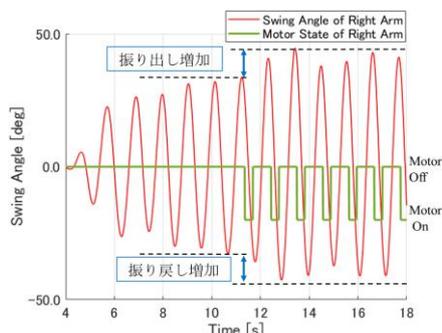


図 2 : 上肢の振れ角の拡大

このとき上下肢の運動リズムの関係を明らかにするために、両運動リズムの同調プロセスを分析した。これはモーションキャプチャを用い、上肢と下肢の位相関係として分析された。そして、この結果に基づいて、上肢と下肢の運動リズム同調を説明する数理モデルを構築した (図 3)。両リズムはCPGを介して接続されるため、神経カップリングのダイナミクスに関するモデルになる。

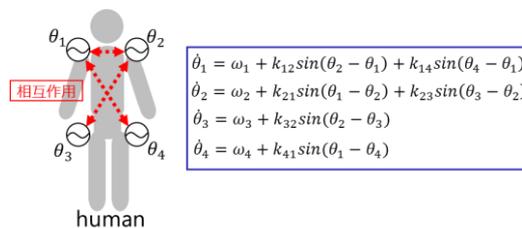


図 3 : 上下肢のリズム同調モデル

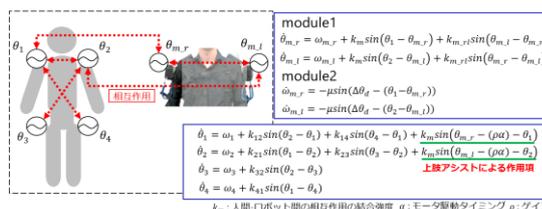


図 4 : 上下肢リズム同調の制御モデル

さらに、上肢運動リズムへの介入によって下肢の歩行運動を安定化できるためには、CPG 神経系を介する上下肢の相互同調がグローバルなアトラクタを形成し、その構造安定性を生成

する必要がある。これは上記のCPG同調モデルを拡張することで制御モデルとして実現された(図4)。このモデル化の基盤には我々が既に提案したWalk-Mateにおける相互同調モデルが用いられた。

研究項目2:

歩行障害への適用とその有効性評価

実施内容:

このように生成された歩行運動の動的安定性を評価するためには、歩行時の足首軌道の時系列データが用いられることになる。これは加速度センサを用いて算出される軌跡であり、この軌道の幾何学的特徴や動的システムとしての長時間相関に基づいて安定性が明らかにされた。

さらに歩行アシストロボットを臨床現場に適用し有効性を評価した。具体的には、パーキンソン病の歩行に適用し、ロボット使用前後で比較した。その結果、図5のように、アシストが共存する場合とそうでない場合で足首軌道が有意に変化した。アシストによって歩幅が増加し、足首の持ち上げ高さも増大したのである。さらに、図6のように、ロボットの使用前後においても、使用後も上記アシスト中と同様の効果が持続したのである。このことはリハビリへの有効性を示唆している。

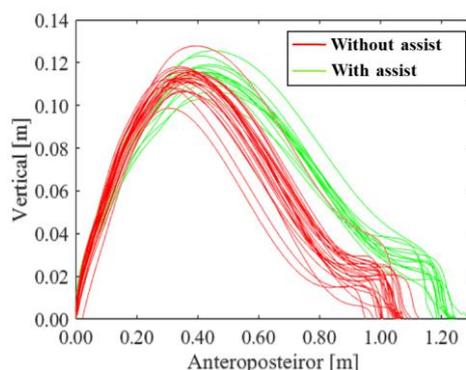


図5: アシストの有無による変化

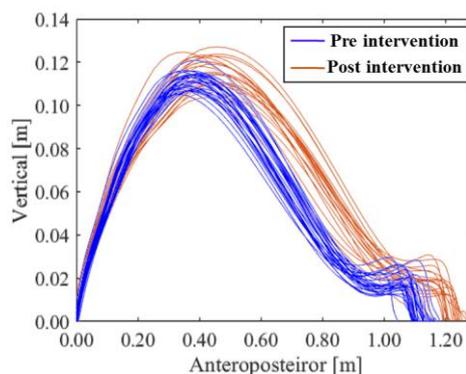


図6: ロボット使用の前後での変化

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) Yap, M.S.R., Ogawa, K., Nagashima, T., Hirobe, Y., Seki, M., Nakayama, M., Ichiryu, K., Miyake, Y., “Gait-assist wearable robot using interactive rhythmic stimulation to upper limbs,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol.6, pp.1-11 (2019) <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00025>
- 2) 長島輝匡, 廣部祐樹, 関雅俊, 中山正之, 三宅美博, “リズム歩行アシストにおける四肢の協調関係の自己組織化と運動制御,” *ヒューマンインターフェース学会論文誌*, vol.20, pp.89-98 (2018) [https://doi.org/10.11184/his.20.1\\_89](https://doi.org/10.11184/his.20.1_89)
- 3) Uchitomi, H., Ogawa, K., Suzuki, K., Nishi, T., Orimo, S., Wada, Y., Miyake, Y., “Effect of interpersonal interaction on festinating gait in rehabilitation for Parkinson’s disease,” *PLoS ONE*, vol.11, pp.1-20 (2016)

[学会発表] (計 3 件)

- 1) Ono, Y., Ora, H., Hori, K., Hashiguchi, H., Mao Y., Sawada, H., Inaba, A., Orimo, S., Miyake, Y., “A gait evaluation of patients with Parkinson’s disease with inertial measurement units,” *The 14th International Conference on Alzheimer’s and Parkinson’s Diseases (AD/PD2019)* (2019)
- 2) Ono, Y., Ora, H., Kiko, Y., Hori, K., Hirobe, Y., Miyagi, A., Mitou, T., Higuma, M., Wada, Y., Miyake, Y., “Gait evaluation of normal pressure hydrocephalus using inertial sensor,” *Proc. of the XXIII World*

Congress of Neurology (WCN2017) (2017)

3) Hori, K., Hirobe, Y., Orimo, S., Sawada, H., Inaba, A., Miyake, Y., “Early detection of Parkinson’s disease based on gait trajectory analysis using wearable sensors,” Proc. of the XXIII World Congress of Neurology (WCN2017) (2017)

〔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〕

該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：小川 健一郎

ローマ字氏名：Ken-ichiro Ogawa

所属研究機関名：東京工業大学

部局名：情報理工学院

職名：助教

研究者番号 (8 桁)：90612656

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：関 雅俊

ローマ字氏名：Masatoshi Seki

所属：菊池製作所・ものづくりメカトロ研究所

研究協力者氏名：織茂 智之

ローマ字氏名：Satoshi Orimo

所属：関東中央病院・神経内科・部長

研究協力者氏名：和田 義明

ローマ字氏名：Yoshiaki Wada

所属：日産玉川病院・副院長