

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 18 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700660

研究課題名(和文) 予備動作に基づいた完全脊髄損傷患者の歩行動作意思推定

研究課題名(英文) Gait Intention Estimation Based on Preliminary Motion for Complete Spinal Cord Injury Patients

研究代表者

塚原 淳(Tsukahara, Atsushi)

筑波大学・サイバニクス研究コア・研究員

研究者番号：70601128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円、(間接経費) 1,110,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、完全脊髄損傷患者の歩行機能を再建するために、生体電位信号を検出することなく、歩行の直前に観測される随意運動(重心移動)に基づいて、遊脚開始に関する動作意思と遊脚速度を推定するアルゴリズムを構築し、より直感的な歩行が可能な外骨格型歩行支援システムの開発を行った。マネキンを用いた事前の歩行実験後、実際の脊髄損傷患者(ASIA機能障害尺度: grade A)の歩行支援に適用した。その結果、構築したアルゴリズムを搭載したロボットスーツHALは、重心移動に応じて遊脚速度を調整しながら、患者の歩行を首尾よく支援したことから、重度脊髄損傷患者に対する本システムの実現可能性を実証することができた。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a gait intention algorithm that infers the swing speed as well as detects the moment to start the swing leg based on a preliminary motion, i.e., behavior of the center of ground reaction forces, instead of detecting bioelectrical signals. The preliminary motion is a kind of voluntary motion that is detectable immediately before a person starts a walking motion. After the experiments using a mannequin equipped with the exoskeleton robot (Hybrid Assistive Limb: HAL) including the proposed algorithm, we conducted realistic tests with a severe spinal cord injury patient (ASIA classification; grade A) wearing the gait support system. As a result, HAL with the proposed algorithm supported the patient's gait while adjusting the speed of the swing leg. Through the tests, we demonstrated the effectiveness and practical feasibility of the algorithm.

研究分野：人支援ロボティクス

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：動作意思推定 歩行支援 ロボットスーツHAL

## 1. 研究開始当初の背景

寝たきり生活や車いす移動を余儀なくされた下肢麻痺患者に対しての外骨格型ロボットによる歩行支援は、装着者が積極的に自身の脚を使用することで、骨粗鬆症、関節拘縮、褥瘡や深部静脈血栓症等の発症を予防するだけでなく、足裏からの感覚フィードバックにより、中枢・末梢系の機能改善を促すための手段として期待される。

これまで本プロジェクトでは、人間の意思に応じて身体動作を支援する「ロボットスーツ HAL」を開発し、運動意思を反映した生体電位信号 (BES: Bioelectrical signals) に基づくアシスト手法を、世界に先駆けて確立してきた。BES は、人間が動き出す直前に脳から運動ニューロンを介して筋肉に伝達され、皮膚表面上からの検出が可能であることから、BES の検出は、HAL 装着者の動作意思を推定するために、非常に有効な手段である。しかしながら、中枢神経系を損傷した重度脊髄損傷患者の場合、上記手法を用いるために必要な BES を、患者自らの意思で正確に発生させることは極めて困難である。そのため、重度脊髄損傷患者の歩行支援を遂行させるためには、患者の動作意思を外骨格型ロボットに伝達するインタフェースの開発が必要不可欠である。

このような問題を解決するために、音声認識やキーボード操作等による動作タスクの切り替え技術が開発されているが、遊脚速度の調整に関しては考慮されていないため、装着者の姿勢状態に関わらず、常に予め準備された目標軌道によって歩行支援が行われる。その結果、使用者が望む遊脚速度の自由度が制限され、歩行支援中における転倒の可能性も考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、歩行開始の直前に観測される随意運動 (予備動作) を明らかにするとともに、遊脚速度を推定する「歩行意思推定アルゴリズム」を構築し、重度脊髄損傷患者が、より直感的に歩行を実現することが可能な外骨格型歩行支援システムを開発することである。

## 3. 研究の方法

### 3-1. ロボットスーツ HAL の改良

従来型の HAL は、腰・膝関節にモータが搭載され、足関節部はバネを用いた受動機構によって構成されている。しかしながら、本研究の対象者は、自力での立ち上がりや歩行が困難な重度の脊髄損傷患者であるため、体重を支持しながら、下肢における全関節を能動的にアシストする必要がある。

今回改良した重度脊髄損傷患者用 HAL を図 1 に示す。このシステムは、足関節部にもモータが搭載されることによって、下肢関節に

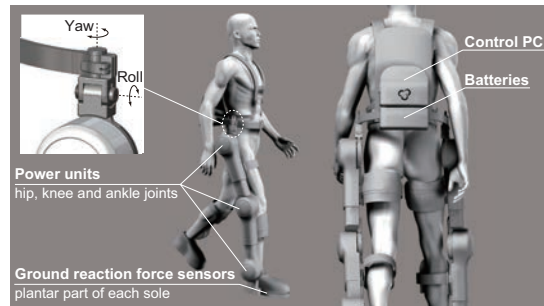


図 1 重度脊髄損傷患者用 HAL の構成図

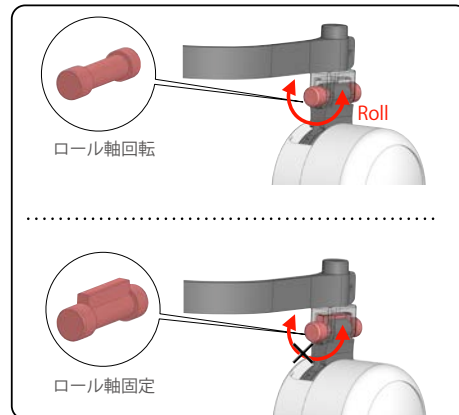


図 2 股関節の構造 (ロール軸周り)

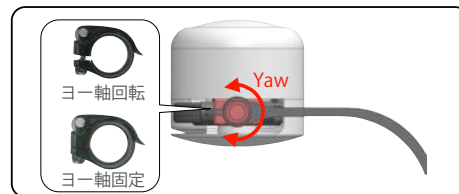


図 3 股関節の構造 (ヨー軸周り)

における全関節の能動的な協調動作を可能にした。さらに、股関節におけるロール軸 (図 2) 及びヨー軸 (図 3) 周りの回転は、物理的なロック機構により、任意の角度で固定することができ、必要に応じてフリー機構となるような構造になっている。

### 3-2. 歩行意思推定アルゴリズムの構築

望ましい遊脚軌道で HAL 装着者の歩行を支援するためには、脚の振り出しの瞬間を検出するだけでなく、歩行速度に対応した遊脚速度を推定し、それに伴った遊脚軌道を提供する必要がある。本研究では、三次元モーションキャプチャシステム、ならびに圧力分布計測システム (図 4: 平成 23 年度購入物品) を用いて、健常者の歩行解析を行い、BES 検出の代わりに、体幹姿勢の変化とそれに伴う床反力中心位置 (CoGRF: Center of ground reaction force) の移動が、他の動作意思と混同することなく、歩行意思としての推定に有用であることを明らかにした。

さらに、通常歩行時における歩行速度と両脚支持時間の関係性 (図 5) から、両脚支持

時間に基づく歩行速度プロファイルを生成し、前述した脚の振り出し開始に関する歩行意思推定と組み合わせることで、「歩行速度プロファイルを有する歩行意思推定アルゴリズム」を構築する。



図 4 圧力分布計測システム  
(Novel 社 pedar-x system)

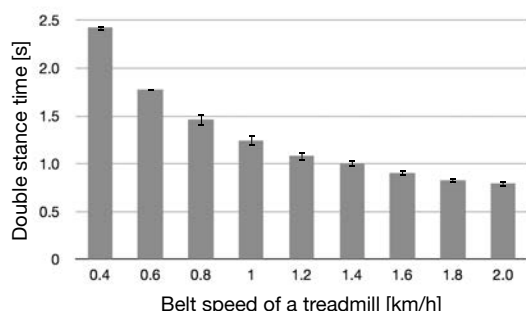


図 5 歩行速度と両脚支持時間

### 3-3. 遊脚軌道計算

一般に、熟練した人間の2点間リーチング動作は、ベル型の速度プロファイルと二峰性加速度を持った運動になることが報告されている。本研究では、このような特性を再現することが可能な躍度最小モデルに基づいて遊脚の目標軌道を計算する。この計算手法の利点は、下肢のダイナミクス特性を考慮せずに、各関節の初期角度と最終角度といった幾何学情報のみから、目標軌道の算出が可能な点にある。計算に必要なパラメータである、各関節の最終角度に関しては、健常者の歩行解析の結果に基づいて決定された関節角度を用いる。

### 3-4. 歩行支援制御

比例微分 (PD) 制御は、時々刻々変化する目標軌道に対して、関節角度を追従させるために広く用いられている。しかしながら、PD制御のようなフィードバック制御は、目標値との誤差に基づいて指令トルクを算出するため、誤差を最小にするために設定されたPDゲインの値によっては、振動やオーバーシュートを引き起こす可能性がある。その結果、各関節の挙動が不安定になるとともに、装着

者に不快感を与えてしまう。そこで本研究では、低ゲインで速度制御系の応答性を向上させるために、PD制御と逆動力学計算の組み合わせによって、各関節を制御する。

歩行支援制御は、提案する歩行意思推定アルゴリズムによって、歩行の開始と遊脚速度が推定された直後から開始される。

## 4. 研究成果

### 4-1. フリージョイントマネキンを用いた事前実験

実際の脊髄損傷患者に適用するための事前実験として、構築された歩行支援システムの性能を評価するため、フリージョイントマネキンを用いて歩行試験を行った。

#### (1) 実験内容および実験条件

マネキンの下肢関節は、患者の運動機能状態を想定し、全関節フリージョイントで構成した。また、マネキンの上肢を移動式免荷装置に固定することで、ピッチ軸以外の回転運動を拘束した(図6)。HALを装着したマネキンの重心移動は、実験者が進行方向に対して外力を加えることで、歩行意思推定器に予備動作として検出させ、システムによって歩行支援が適切に遂行されるかを確認した。

#### (2) 実験結果

本システムは、重心移動によって首尾よく歩行を開始するとともに、移動速度によって変化する両脚支持時間に基づき、遊脚速度を調整することができた。さらに逆動力学補償付きPD制御により、各関節から振動やオーバーシュートを発生させることなく、歩行を遂行することができた。

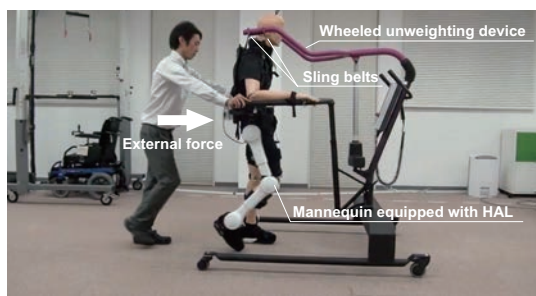


図 6 マネキンを用いた歩行試験の概要図

### 4-2. 脊髄損傷患者に対する歩行試験

開発した歩行支援システムの実現可能性を調査するために、重度の脊髄損傷患者に対して10m歩行試験(10MWT: 10-meter walk test)を実施した。さらに、本システムによる歩行支援と長下肢装具による歩容の違いについても検証した。

#### (1) 試験手順

本システムの適用範囲は、杖または歩行器を用いることで、体重移動が可能な上肢の身

体的能力を備えた脊髄損傷患者である。本試験では、この条件を満たす ASIA 機能障害尺度 A の重度脊髄損傷患者に対して、歩行試験を行った。本試験は、施設内倫理委員会によって承認された手順に従い、患者に対するインフォームド・コンセントを行った後に実施された。

## (2) 試験結果

試験の結果、構築したアルゴリズムによって、首尾よく装着者の歩行意思を検出するとともに、両脚支持期中における CoGRF の移動速度を推定し、それに対応した遊脚軌道を算出・提供することによって、重度脊髄損傷患者の歩行支援が行われたことを確認した (図 7)。また、長下肢装具を用いた 10MWT との比較では、歩行時間と CoGRF 分布の結果に顕著な違いが表れた。特に、長下肢装具歩行では、前傾姿勢のぶん回し歩行に近い歩容結果 (図 8-A: 足裏のつま先側のみ CoGRF が分布) であったのに対し、本システムによる歩行支援では、健常者が自然に行う通常歩行に似た歩容結果 (図 8-B: 踵側からつま先側まで、万遍無く CoGRF が分布) となった。装着者からは「振り出してほしいタイミングと速度で HAL が動くので、楽に動作が行える」といった感想を得た。以上のことから、重度脊髄損傷患者の歩行支援に対して、本システムの実現可能性を実証した。

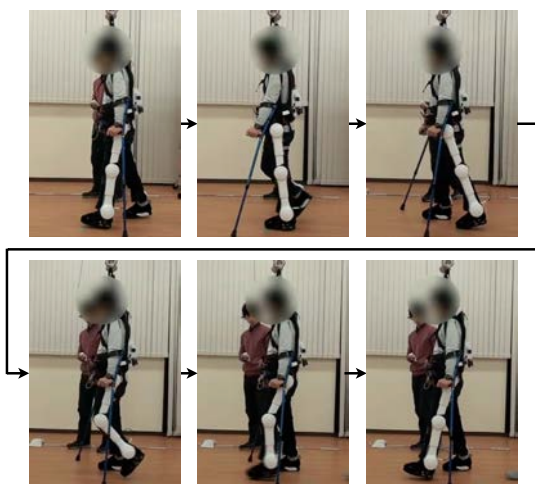


図 7 脊髄損傷患者に対する歩行試験の様子

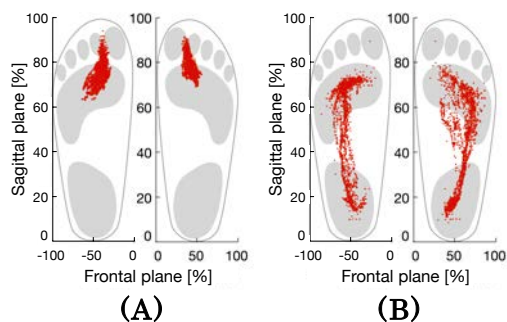


図 8 (A)長下肢装具使用時 (B)開発した歩行支援システム使用時の CoGRF 分布

## 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

- (1) Atsushi Tsukahara, Yasuhisa Hasegawa and Yoshiyuki Sankai, “Gait Support for Complete Spinal Cord Injury Patient by Synchronized Leg-Swing with HAL,” Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int’ l Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2011), September 26, San Francisco, USA, pp. 1737-1742, 2011.

[その他]

筑波大学 最先端サイバニクス研究拠点  
<http://www.first.ccr.tsukuba.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

塚原 淳 (Atsushi Tsukahara)  
 筑波大学・  
 最先端サイバニクス研究コア・研究員  
 研究者番号：70601128

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携分担者

なし