

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21760184

研究課題名（和文） 受動・能動ハイブリッド型歩行機能再建支援システムの開発

研究課題名（英文） Development of active-passive hybrid locomotor assistive system

研究代表者

河本 浩明（KAWAMOTO HIROAKI）

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：00400713

研究成果の概要（和文）：

本研究では、下肢の歩行障害をもつ方を対象に、人間と機械を一体化させ人間の身体機能を強化・拡張・補助するロボットスーツ HAL の受動的動作（ロボットの自律制御）と能動的動作（随意制御）を活用し、脳の運動学習過程に立脚した歩行機能再建支援システムの開発を行った。実証試験の結果、歩行能力、及びバランス能力の改善が認められ、本システムによる歩行機能再建の可能性が示唆された。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we developed a locomotor training system with Robot Suit HAL for patients with gait deficit. This system effectively uses both active motion support that HAL provides with wearer's voluntary motion, and passive motion support that HAL autonomously generates as a predefined motion. Experimental results of locomotor training with the developed system showed the improvement of walking ability and balance ability of people with ambulation difficulty, and would be feasible for locomotor training with the developed system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：人間支援型ロボット、ロボットスーツ、医療・福祉、脳・神経、リハビリテーション

## 1. 研究開始当初の背景

歩行は身体諸機能を維持するため重要な運動である。脳血管障害、脊椎損傷等により下半身に障害を持ち一旦歩行が困難になってしまった場合、リハビリテーションにより歩行を再獲得させることが重要な課題となる。

近年、障害を持つ方の運動機能の再建を脳の運動学習として捉える考え方が注目され始めている。脳の運動学習は大まかに3つの段階で捉えることが出来る。第一段階：感覚器から運動中枢への入力（求心性入力）によって、【脳機能が再構成される段階】。患者自らの動作は要求せず他動的な動作で実施さ

れる。第二段階：運動中枢から筋へ運動指令が試みられる【運動指令の試行段階】。第三段階：フィードバック情報を基に運動指令が修正され運動が完成していく、【運動指令が形成される段階】。第二段階、第三段階は患者の自らの能動的な動作で実施される。

下肢の運動機能に障害を有する方に対する歩行機能の回復のための最新の歩行訓練方法として、トレッドミル上で機械を用いて訓練者の脚を交互に送り出すことによって脳神経系の機能再構成を促進させ、歩行機能を回復・向上させる方法が研究され始めている (Reinkensmeyer DJ et al. 2006)。しかし、この歩行訓練方法は決まった歩行パターン動作を提供するのみであり、上述した運動学習過程でいえば、第一段階である受動的動作のみで終わってしまっている。一方、手の把持機能を改善・向上させるリハビリテーションの最新研究では、機器による受動的動作よりも、残存している機能を使って自らの力で動作する能動的動作の方が効果的に把持機能を高めるという報告がある (Lotze et al. 2003)。これは運動学習過程の第二段階、第三段階の能動的動作を利用した機能再建方法である。

本研究では、まず、第一段階として、ロボットスーツの自律制御機構による受動的歩行動作パターンを繰り返すことにより、装着者の筋、靭帯、関節の受容器の刺激から、運動中枢系へ求心性入力を継続的に送り続けることで脳神経系の機能的再構成を促進させていく。第二段階では、受動的動作の中で、装着者は随意的な運動を意識して動作を試みることによって、運動中枢からの歩行に必要な下肢への運動指令の試行が期待される。第三段階では、自律制御機構と随意制御機構を混在して適用し、試行された運動指令を基に、随意制御機構による能動的動作の割合を徐々に増やしていくことで運動指令の形成が期待される。以上の着想に基づき、二つの制御機構を駆使することで、歩行機能再建のための支援システムの開発を推進する。

## 2. 研究の目的

我々は人間・機械を一体化させ人間の身体機能を強化・拡張・補助するロボットスーツ HAL の開発を行っている。HAL は人間の運動学・生理学特性を取り込み、人間・機械間の力・動作情報のインタラクションを実現することで、身体機能を向上させるものであり、医療福祉分野、重労働分野等へ広範な活用が期待される次世代人支援型ロボットである。

本研究では、下肢の歩行障害をもつ方を対象に、人間と機械を一体化させ人間の身体機能を強化・拡張・補助するロボットスーツ HAL を活用し、脳の運動学習過程に立脚した歩行機能再建支援システムを開発することを目

的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) ロボットスーツ HAL を用いた歩行トレーニング装置の開発

本開発では、歩行トレーニング装置として、トレッドミルを用いた。トレッドミル上での歩行は後脚の蹴りだし動作を必要としないため、軽度から重度まで幅広い症状の方を対象に歩行訓練することが可能である。また、歩行リハビリテーションでは、トレッドミル歩行と平地歩行と比較して、歩行能力の改善に大きな差がないことが示されており、省スペースでの歩行訓練も可能である。

HAL を使ったトレッドミルによる歩行訓練では、トレッドミルの歩行速度に合わせた HAL の歩容生成が必要となる。そこでまず、トレッドミルのベルト速度と人の歩容パターンの特性を抽出する実験を行った。0.6～2.0km/h の範囲で 0.2 km/h 刻みで速度を上げていった際の股関節、膝関節の角度軌道・床反力を計測した。実験の結果、1) 左右足の床反力が一致する付近で股関節の屈曲が開始される、2) 股関節屈曲が開始される際、既に膝関節の屈曲が開始されている、ことが分かった。

そこで、トレッドミル上で用いる HAL の歩容として、遊脚 phase の開始条件は、両足床反力が均等となること、膝関節が屈曲した状態で股関節の振り出しを開始させることで、様々なトレッドミルの速度に対応した HAL の歩容パターンを生成させることとした。

### (2) 歩行支援用自律制御機構

受動的な遊脚步容パターンを生成する方法として、関節角度に基づく躍度最小モデルを使った遊脚軌道パターンを用いる。本モデルは到達運動中の関節角加速度の微分値である躍度を最小にするモデルであり、生物の自然な運動を表すとされている。また、リアルタイムでの計算が可能であるため、データファイルの生成・転送等の作業を必要とせずにパラメータの変更のみでの調整作業とすることが可能である。

関節角躍度最小モデルは式(i)の評価関数  $C_\theta$  を最小にする軌道のことで、運動開始・終了時の関節角速度・角加速度が 0 である場合に式(ii)を用いて計算することができる。ここで、 $t$  は 0～1 で正規化した躍度最小モデル開始から終了までの経過時間、 $\theta_0$  は初期角度、 $\theta_f$  は目標とする角度である。

$$C_\theta = \int_0^1 \left( \frac{d^3\theta}{dt^3} \right)^2 dt \quad (i)$$

$$\theta_{(t)} = \theta_0 + (\theta_f - \theta_0)(6t^5 - 15t^4 + 10t^3) \quad (ii)$$

この際、パラメータとして関節毎に以下を定義する。運動開始時の関節角度  $\theta_f$  最大屈曲時の関節角度  $\theta_{up}$  運動終了時の関節角度  $\theta_{down}$  運動開始の総運動時間に占める割合  $t_{start}$  最大屈曲時の総運動時間に占める割合  $t_{up}$  運動終了の総運動時間に占める割合  $t_{down}$  をしめす。また、目標軌道パターンの総運動時間として  $t_{period}$  を定義する。ここで、 $\theta_f$  は運動開始時の関節角度を用いることが可能であるため、実際に設定するパラメータは関節毎に5つ及び総運動時間の合計21個となる。各関節の振り上げ・振り下ろしの関節角度の間を躍度最小モデルで補完することによって、遊脚の軌道を生成する。計算式としては、屈曲・伸展で別の計算式となっており、式(iii), (iv)によって算出される。図1にそれぞれの式が軌道のどの部分で使用されているかと各パラメータを示す。

$$\begin{cases} \theta_{ref}(T) = \theta_0 + (\theta_{up} - \theta_0)(6t^5 - 15t^4 + 10t^3) \\ t_{up} > \frac{T}{t_{period}} > t_{start} \\ t = \frac{T - t_{start}t_{period}}{(t_{up} - t_{start})t_{period}} \end{cases} \quad (iii)$$

$$\begin{cases} \theta_{ref}(T) = \theta_{up} + (\theta_{down} - \theta_{up})(6t^5 - 15t^4 + 10t^3) \\ t_{down} > \frac{T}{t_{period}} > t_{up} \\ t = \frac{T - t_{up}t_{period}}{(t_{down} - t_{up})t_{period}} \end{cases} \quad (iv)$$

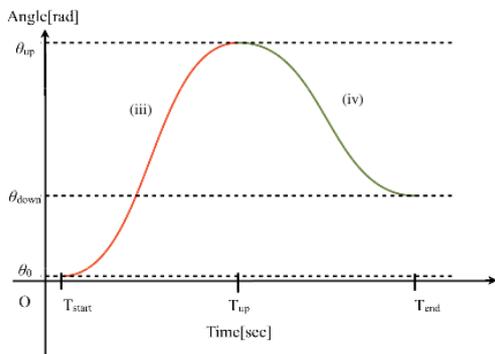


図1 躍度最小モデルによって生成される遊脚軌道

(3) 視覚情報フィードバックシステムの開発

足底部の感覚情報を視覚情報としてフィードバックすることで、知覚及び動作の支援を行うシステムを開発した。視覚情報を用いることで、自分の姿勢や足裏の状態をすぐに把握することができ、詳細な情報までも提示することができるため、フィードバックの手段として有効である。視覚情報フィードバックによって提示する情報は図2に示す様に、各床反力センサから計測される床反力値、ま

たそこから計算される床反力中心である。床反力中心は、常に支持脚接地面が張る支持多角形内に表示される。Front foot, Rear footそれぞれのセンサで床反力が計測されている場合、画面の足の形状をかたどったパッドを表示させる。また、センサによって床反力が計測されない場合、つまり足が地面と接地していない場合や、力がかかっていない場合には、足のパッドを非表示にする。これは、画面を見ているときにすぐ、足が地面と接地している場合としていない場合と容易に認識をさせるためである。

さらに、視覚情報によって提示するものは、歩行の遷移状態を表す Phase, 床反力中心の目標エリアである。目標エリアの大きさは、装着者の身体の状態や訓練状況に応じて、容易に変更できるようになっている。体重移動の際は、装着者の床反力中心をこの目標エリ

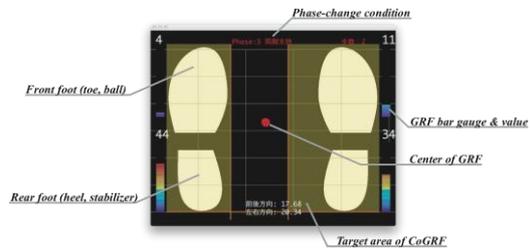


図2 視覚情報フィードバックシステム

アに移動することによって、HAL が歩行動作を支援する。HAL を装着して歩行と視覚情報フィードバックの一連の動きを図3に示す。

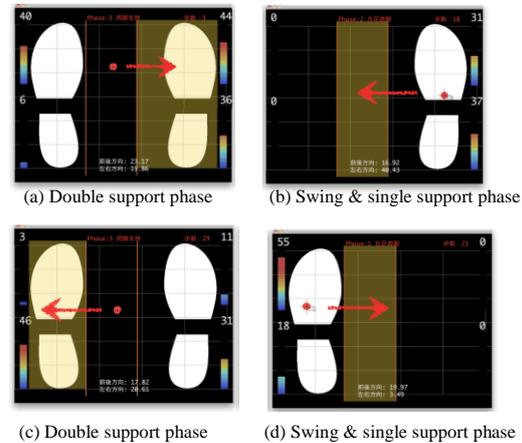
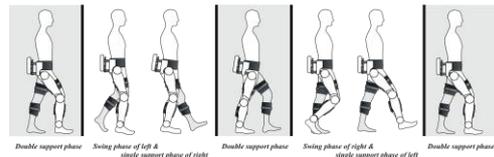


図3 歩行 Phase と視覚情報フィードバック

両脚支持期から、右足への体重移動を行うことによって、HAL によるサポートを受け左足遊脚期、右足立脚期となる。このとき体重は右足に乗っており、左足の遊脚が終わると単脚支持期から両脚支持期へと移る。そして今度は左足に体重移動を行うことで、HAL によるサポートを受け右足遊脚期、左足立脚期、単脚支持期というように体重移動を行う。また、HAL が足を踏み出すタイミングは、床反力中心が目標エリアに入った際に開始される。

#### 4. 研究成果

対象患者に対して、各システムを取り入れた実証試験により、被験者の歩行能力改善の評価を実施した。本実証試験では、外傷性脳損傷による片麻痺を有する方（被験者 A）及び、脳卒中による四肢麻痺を有する方（被験者 B）の 2 名の方に本システムによる歩行訓練を実施した。試験プロトコルとして、週 2 回、8 週（計 16 回）をトレーニング期間とした。

本歩行支援システムの有用性の評価項目は、トレーニング期間前後の 10m 歩行テスト、及び Timed Up and Go (TUG) テストとした。10m 歩行テストは 10m 区間の所要時間によって歩行能力を評価し、TUG テストは、椅子に着座した状態から、起立し、3m 先の目印まで歩き、折り返して椅子に座るまでの所要時間によって動的バランス能力を評価するものである。

トレーニング期間中、前半に動作が困難な麻痺関節部に対して、自律制御機構による受動的運動を適用し、トレーニング期間中後半から随意的な動作に基づく生体電位信号を活用した能動的動作による歩行訓練を実施した（図 4）。

図 5、図 6 に各被験者のトレーニング期間前後の 10m 歩行テスト、TUG テストの結果を示す。これらの結果、被験者 A では 10m 歩行時間、及び、TUG テストで約 60 秒の減少が認められ、また、被験者 B では、10m 歩行時間では、約 2.4 秒、TUG テストでは約 0.7 秒の減少が認められた。これは、訓練前半の受動的動作の後、能動的動作による訓練によって、運動学習が促進され、歩行能力およびバランス能力の改善したものと考えられる。

以上、本研究により、下肢の歩行障害をもつ方を対象とした受動的動作、及び能動的動作を駆使することによって、運動学習に立脚した歩行機能再建システムの実現可能性が示された。今後は、本システムの効果が期待できる対象者の疾患を特定するための探索的研究を行った後、比較試験による有用性を実証していく。



図 4 当該システムによる歩行訓練

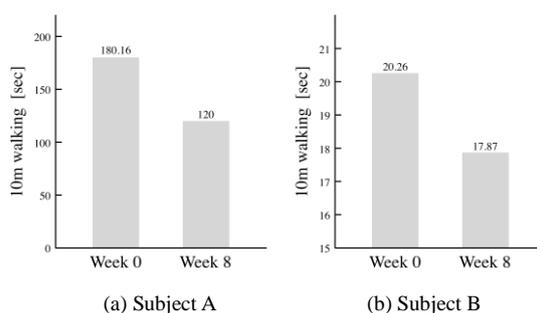


図 5 10m walking test

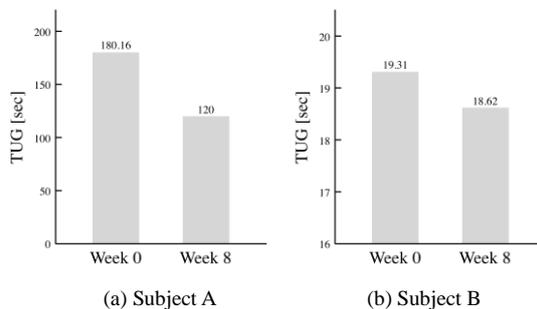


図 6 TUG test

#### 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 3 件）

- ① Cota Nabeshima, Hiroaki Kawamoto, Yoshiyuki Sankai, Typical Risks and Protective Measures of Wearable Walking Assistant Robots, Proceedings of 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2011, E1-3, 査読有, DOI:10.1109/SII.2011.6147571
- ② H. Kawamoto, S. Taal, H. Niniss, T. Hayashi, K. Kamibayashi, K. Eguchi, and

Y. Sankai, Voluntary Motion Support Control of Robot Suit HAL Triggered by Bioelectrical Signal for Hemiplegia, Proceedings of 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2010, pp.462-466, 査読有

- ③ Hiroaki Kawamoto, Tomohiro Hayashi, Takeru Sakurai, Kiyoshi Eguchi and Yoshiyuki Sankai, Development of Single Leg Version of HAL for Hemiplegia, Proceedings of 31st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2009, pp. 5038-5043, 査読有

[学会発表] (計 3 件)

- ① K. Yamawaki, H. Kawamoto, K. Eguchi, Y. Nakata, Y. Sankai and N. Ochiai, Gait training for a spinal Canal Stenosis Patient using Robot Suit HAL -A Case Report-, the 6th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine, Jun. 15, 2011, San Juan, Puerto Rico
- ② 有安諒平, 山脇香奈子, 久保田茂希, 河本浩明, 中田由夫, 江口 清, 山海嘉之, 落合直之, 脊髓損傷不全麻痺患者に対するロボットスーツ HAL を用いたリハビリテーションの試み, 第 33 回国立大学法人リハビリテーション コ・メディカル学術大会, 2011 年 10 月 8 日, ベルクラシック 甲府、甲府, 山梨
- ③ Eguchi K, Kawamoto H, Hayashi T, Sankai Y, Yoshida T, Shimizu T, Ochiai N, Use of a wearable robot - the hybrid assistive Limb - to assist walking in a stroke patient: a case report, the 5th world congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine, Jun. 13, 2009, Istanbul, Turkey

[図書] (計 1 件)

- ① Hiroaki Kawamoto, University of Tsukuba, Lecture Notes on Cybrnics - Fusion of Human, Machine and Information Systems, 2012, pp. 19-33

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河本 浩明 (KAWAMOTO HIROAKI)  
筑波大学・システム情報系・助教  
研究者番号：00400713