

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560526

研究課題名(和文) 下肢麻痺患者の自立歩行の範囲を広げる補助ロボットのセンサ・制御系の開発

研究課題名(英文) Development of sensing and control systems of a wearable robot to assist paraplegic gait in various road surface

研究代表者

宇野 洋二 (UNO, Yoji)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10203572

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：脊髄の損傷等で下肢機能が麻痺したために車椅子の生活を送っている患者に対して、立位歩行を可能にする装着型補助ロボットの開発を行った。特に、平地だけでなく斜面や段差のある場所でも、バランスを崩すことなくスムーズな歩行を可能にするためのセンサ・制御系を構築した。歩行器に3軸角度センサと加速度センサを搭載するとともに、補助ロボットの足底に小型力覚センサを挟み込み、転倒予防の機構を組み込んだ。さらに、健康者に本システムを装着させて歩行実験を行った結果、足底の圧力情報に従って遊脚の動作パターンが選択され、転倒することなくスムーズな歩行が継続できることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Paraplegic patients who were injured on the spinal cord cannot walk and must use wheelchairs for locomotion. We have developed sensing and control systems of a wearable robot to assist paraplegic gait in various road surface. It is important in walking reconstruction with a wearable robot to prevent backward falling. We constructed a measurement system of ground reaction force, and proposed a control method to adjust the timing of swing motion on the basis of zero-moment-point (ZMP). Our system has three functions (1) sensing of a bump from a movement of a walker, (2) detecting a foot placement state related to the bump and (3) generating gait patterns of stepping up and down for the bump. Walking experiment of healthy subjects wearing the robot were carried out and the stability of the system was confirmed.

研究分野：工学

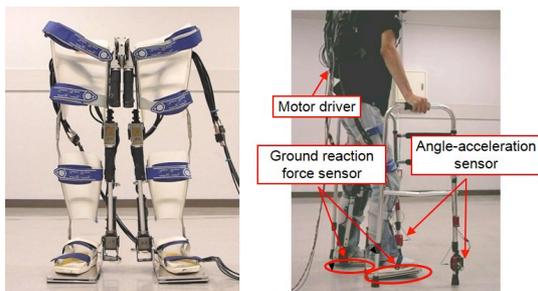
科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：装着型ロボット 下肢麻痺患者 歩行補助 転倒予防 知能ロボティクス 歩行器

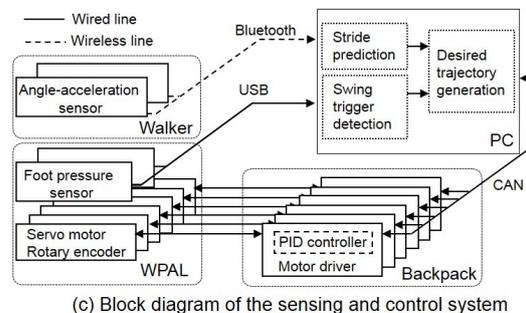
1. 研究開始当初の背景

リハビリテーションなどの臨床現場では、下肢麻痺などの歩行障害は主要な疾患であり、年々増加の傾向にある。下肢麻痺患者の多くは車椅子の生活を送っているが、実社会には車椅子で移動できない箇所が多く存在し、その行動が大きく制限されている。そのため、車椅子に頼らず立って歩きたいという患者の要望はたいへん強く、近年、モータなどの動力によって歩行を補助するシステムの研究が国内外で行われるようになり、いくつかの特徴のある装着型ロボットも登場してきた。しかしながら、下肢麻痺患者用の装着型「歩行補助ロボット」は、その安全性と安定性、操作性、運動疲労、価格などの面で解決すべき多くの問題があって、実用化されるには至っていない。

本研究の代表者らもこれまで対麻痺者用の歩行補助ロボット (WPAL: Wearable Power-Assist Locomotor, 図1) の研究開発を続けてきた。しかしながら、下肢麻痺患者の平地での歩行を想定していたために、歩行補助システムの用途が屋内のかなり限られた場所に限定されていた。そこで、斜面や段差のある場所でも歩行補助を可能にすることが重要な課題となった。下肢麻痺患者はロボットを装着すると機械的に身体が拘束されるので、不整地での歩行や段差を乗り越える動作ではバランスを崩して転倒しやすい。特に、後方への転倒は重大な損傷につながりやすい。よって、下肢麻痺患者の歩行補助システムにおいて、後方への転倒防止は安全性に直結するために確保すべき必須の技術である。



(a) A prototype of WPAL (b) A sensing and control system



(c) Block diagram of the sensing and control system

図1 歩行補助ロボットのシステム構成。(a)歩行補助ロボット WPAL の外形。(b)ロボットのセンサ・制御系。(c)センサ・制御系のブロック図。

2. 研究の目的

斜面や段差でも安定な歩行を可能にするセンサ・制御系を組み込んだ補助ロボットのプロトタイプを試作する。この目的を達成するために、次のような2つの研究課題を設定した。

(1) 段差/斜面における自立歩行の実現

ユーザ (下肢麻痺患者) の上肢・体幹の運動情報と足底圧情報、歩行器の加速度と荷重情報とを統合することによって、ユーザの意図する歩行パターン (歩幅、接地・離脚のタイミング、遊脚の高さなど) を推定するアルゴリズムを開発する。さらに、下肢の関節角軌道を決めるとともに、歩行動作をアシストするロボットコントローラを設計・製作する。最終的には、屋内にある段差 (最大で7cmほど) を乗り越える、あるいは降りることができるよう、加えて5~10度程度の緩やかなスロープでの歩行が可能のように、センサ・制御系を構築する。

(2) 段差/斜面における後方転倒の予防

補助ロボットを装着したユーザ (下肢麻痺患者) は、身体が拘束されて動作が機械的に生成されるので、段差のある箇所や斜面において、両脚が接地の状態 (両脚支持期) から前に踏み出そうと片足をあげたとき (単脚支持期) にバランスを崩して転倒しやすい。特に、後方への転倒は重大な損傷につながりやすい。そこで、姿勢センサや足底圧センサを用いて歩行動作中のユーザの身体各部の動きと補助ロボットの力学的状態とをリアルタイムで計測・推定し、後方転倒のリスクを判定することにより、転倒を予防する制御系を構築する。

3. 研究の方法

下肢麻痺患者の立位歩行を可能にするために、まず、下肢麻痺患者、補助ロボット、歩行器、各種センサ、通信系、コントローラから成るシステム (図2) 全体の基本的な設計を行う。また、離脚と接地のタイミングの検出と重心の推定のために、軽量かつ薄型の足底圧計測装置を製作する。

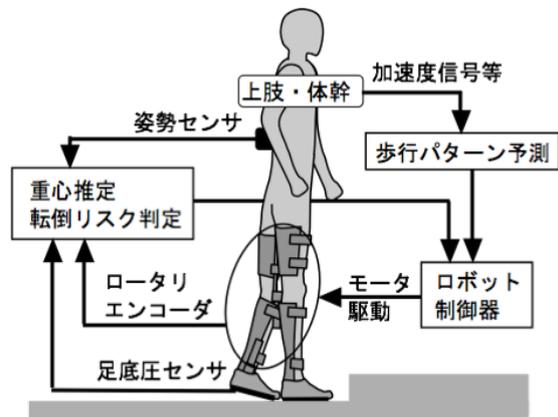


図2. 歩行補助のセンサ・制御系

次に、構築したシステムを用いて、段差のある場所や斜面で、下肢麻痺患者の上肢や体幹の動きに応じて脚の運動を適切に補助するロボットの制御法を開発する。両脚が接地している状態から片足を挙げるときにバランスを崩しやすいので、重心速度の値によって後方転倒の危険性を判定し、適宜補助トルクを駆動する仕組みにする。プロトタイプの補助ロボットのセンサ・制御系を完成させた後、まずは、健常者で動作テストを行って、転倒リスクが高まったときにロボットが自律的に離脚タイミングを制御できるかを検証する。

4. 研究成果

本研究の主な成果は以下の通りである。

(1) 段差歩行のためのセンサ制御系の開発

歩行補助ロボットを用いて段差面での歩行を可能にするために、センサ制御系を構築するとともに、後方転倒しないようなロボットリンクの関節角軌道を生成した。まず、歩行器に取り付けた角度・加速度センサを用いて、段差歩行直前の歩行器のセンシングから段差を検出し、その高さを推定する方法を考案した。具体的には、歩行器に取り付けられた角度・加速度センサによって歩行器の傾斜角度を計測し、その値が設定した閾値以上となったとき、上り段差を検出する。そして、歩行器の移動終了時の傾斜角度と歩行器の前後方向の長さから段差の高さを推定する。動作テストでは、段差の高さ 15, 3, 45 [mm] に対して、推定誤差および標準偏差がいずれもほぼ 1 [mm] 以内の精度で推定できた。

次に、ロボット足底の床反力センサから得られる圧力中心位置 (COP) を利用して、着地時における遊脚の足底面と段差上面との接地状態を検出した。段差の端に着地した場合は、支持基底面の制限によって着地時の COP が足部の前方になることに着目し、足底部全体が段差上面に接地した時の COP の分布の 95% 等確率楕円に対する COP の位置から接地状態を検出した。これにより足底部全体が接地したときのみ 2 歩目を開始することができ、着地位置に起因する後方転倒を予防した。

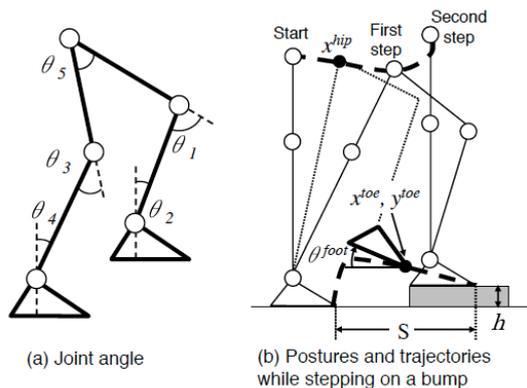
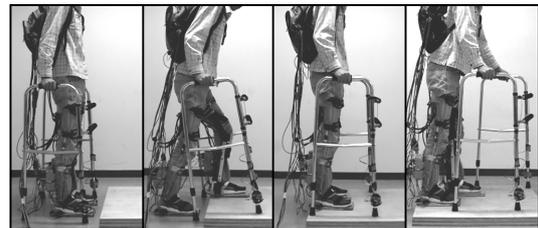


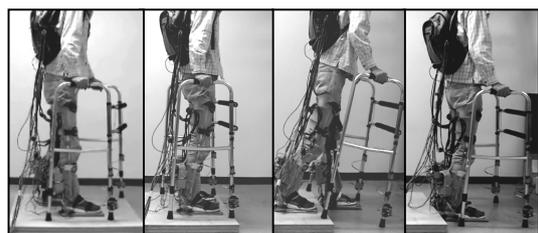
図3. 段差でのロボットの動作パターン生成

段差に対する歩行補助ロボットの動作パターンは以下のように生成した。図3には昇段歩行時の動作パターンの生成を示す。初期状態は直立姿勢であり、一步目で右脚を段差上面に乗せ、その後2歩目で左脚を段差上面に乗せる。段差に乗り上げた後の終了姿勢は初期状態と同じく直立姿勢である。歩幅 S はロボットの関節可動域を超えないように 0.35cm とした。また、使用者の負担やモータへの負荷が少なくなるように、歩行中の全関節の角躍度 (角加速度の変化率) の2乗の総和を評価関数として定めた。さらに、股関節の軌道を時間に対する多項式で表現し、その多項式係数を最適化変数として評価関数を最適化することにより股関節の軌道を得た。また、段差高さと同項式係数との関係を直線近似することによって、最適化に必要な繰り返し計算を行うことなくオンラインで軌道生成した。生成した歩行パターンにおいて、スイング脚が床面や段差に接触することはなく、後方転倒防止の条件を満たした。また、生成した関節角軌道は滑らかで、急激な角度変化を抑えることができた。

最終的に、健常者を被験者として昇段歩行と降段歩行におけるセンサ制御系の動作テストを行った。異なる段差の高さに対しても歩行直前の歩行器の動作により段差を正確に検出でき、推定した高さに応じて昇段歩行および降段歩行を行うことができた。60 [mm] の高さの段差に対する昇段歩行の様子を図4 (a) に、降段歩行の様子を図3 (b) 示す。遊脚と段差が衝突することなく、スムーズに歩行が行われたことがわかる。また、足底内の圧力中心位置 (COP) の軌道を解析したところ、1歩目の着地時における遊脚の COP が安全な領域内にあること、単脚支持期における COP は余裕を持って支持脚足部の内に納まり変動も小さかったことから、安定した歩行が実現されたことが確認できた。



(a) 昇段



(b) 降段

図4. 段差 (6cm) での昇段と降段の動作テスト

(2) つまずきに対するセンサ制御系の開発

歩行補助ロボットのつまずきに対して、歩行を継続できるようにバランスを回復するセンサ制御系を開発した。はじめに、歩行補助ロボットの転倒防止に利用する足底の床反力計測システム（図4）の改良を行った。これは2枚の足底板の間に4つの小型3軸力覚センサが取り付けられ、各力センサの信号がアンプフィルタ回路を通して、AD変換器に送られる。AD変換された信号はシリアル通信によりPCに送られて足底圧データとして記録される。この信号をモニターすることにより、つまずきを検出できるようになった。

次に、トレッドミルを用いた歩行実験により、人間が歩行中につまづいたときにはそのタイミングに依存して、足を上昇させる応答と下降させる応答の2種類の反射パターンが現れることを確認した。この反射パターンに対応して、つまずきに対して上昇動作と下降動作を選択してオンラインで目標歩行パターンを修正する制御法を考案した。具体的には、歩行の1つのステップ動作の初期でつまづいた場合には、躍度最小軌道によりつま先を垂直下方向へ動かす軌道を生成する。一方、ステップ動作の後期でつまづいた場合には、つま先の上昇動作の軌道を生成する。

この制御法を検証するために、健常者を被験者として、センサ制御系の動作テストを行った。その結果、歩行補助ロボットを用いた歩行中のつまずきに対して、開発したセンサ制御系により修正動作が実行され、ロボットの過電流による非常停止や身体のバランスを崩すことなく歩行を継続できることを確認した。しかしつまずきに対する上昇動作または下降動作の時間を調整していないので、目標軌道の運動時間が短いと最大速度が大きくなり、ロボットが追従できなくなる恐れがある。そのため、つまづいたタイミングに応じて、適切な回復動作の運動時間を設定し、上昇動作または下降動作をスムーズに行えるようにすることが、今後の課題となる。

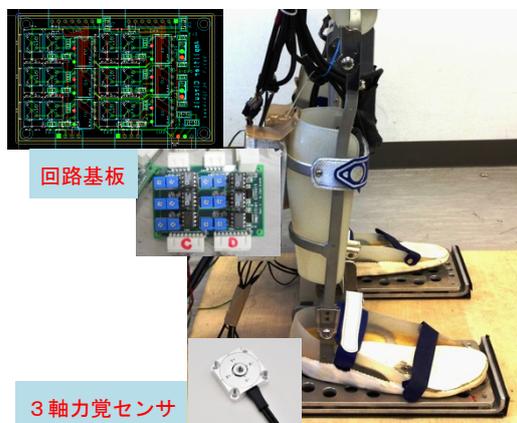


図4. 床反力計測システム. 足底の4カ所の板間に3軸力覚センサが挟みこまれている。足圧情報が計測回路を経てコントローラに送られる。

(3) 傾斜面上での立位姿勢制御

歩行補助ロボットの斜面への適用の第一歩として、傾斜面上での立位姿勢制御を行った。まず、身体の静的モデルを用いて、傾斜面における傾斜角度と体幹角度、腕に作用する力の範囲を求めた。その結果、ユーザが傾斜面において立位姿勢を維持するためには、足首角度を調整することが有効であることがわかった。そこで、圧力中心位置(COP)と床反力の変化に応じて、足首関節角度を調整する制御方法を考案した。動作テストを行ったところ、傾斜角度11度の斜面において、ユーザが安定した立位姿勢を維持できること、また、足首関節の調整により腕にかかる力が大幅に軽減できることも確認した。これらの結果は静的モデルの解析結果と一致するものである。

以上、下肢麻痺患者用の装着型歩行補助ロボットの段差面での歩行を可能にするためのセンサ・制御系の開発を行った。すなわち、歩行器に3軸角度センサと加速度センサを搭載するとともに、補助ロボットの足底に小型力覚センサを挟み込み、転倒予防の機構を組み込んだ。次に、段差面に対して歩行器のセンサ情報と足底圧情報に基づいてその高さを推定し、安定な昇段歩行のパターンを生成する制御法を開発した。また、健常者に本システムを装着させて歩行実験を行い、足底の圧力情報に従って遊脚の動作パターンが選択され、転倒することなくスムーズな歩行が継続できることを確認した。本研究では健常者を対象にシステムの動作テストを行ったが、今後はリハビリテーション医や理学療法士の協力を得ながら、下肢麻痺患者の方に本システムを試していただき、その操作性を評価しなければならない。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計7件)

- ① ChangHyun Sung, Takahiro Kagawa & Yoji Uno: Efficient planning of humanoid motions by modifying constraints, *Journal of Behavioral Robotics*, DOI: 10.2478/pjbr-2013-0002, 2013. 査読有。
- ② ChangHyun Sung, Takahiro Kagawa & Yoji Uno: Whole-body motion planning for humanoid robots by specifying via-points, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, DOI: 10.5772/56747, 2013. 査読有。
- ③ Yuji Harata, Fumihiko Asano, Kouichi Taji & Yoji Uno: Efficient parametric excitation walking with delayed feedback control, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 67, pp. 1327-1335, 2012. 査読有。
<http://link.springer.com/journal/11071>
- ④ 小田佑樹, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットによる段差歩行のためのセンサ制御系の開発, *電気学会論文誌C*, Vol. 131, pp. 2181-2188, 2011. 査読有。

- http://www.iee.jp/eiss/?page_id=115
- ⑤ 北村仁, 香川高弘, 宇野洋二: 装着型ロボットの歩行補助における後方転倒予防のための一方策, 電気学会論文誌 Vol. 131, pp.2000-2008, 2011. 査読有.
http://www.iee.jp/eiss/?page_id=115
- ⑥ Yuji Harata, Fumihiko Asano, Kouichi Taji & Yoji Uno: Parametric excitation-based inverse bending gait generation, *Robotica*, Vol.29, pp.831-841, 2011. 査読有.
<http://journals.cambridge.org/action/displayJournal?jid=ROB>
- ⑦ Takahiro Kagawa, Yuji Ohta & Yoji Uno: State-dependent corrective reactions for backward balance losses in human walking, *Human Movement Science*, Vol. 30, pp.1210-1224, 2011. 査読有.
<http://www.journals.elsevier.com/human-movement-science/>

[学会発表] (計 4 件)

- ① 石川寛典, 加藤高之, Chang-Hyun Sung, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットの歩行速度向上のための軌道計画法, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2014 年 3 月, 玉川大学 (東京都).
- ② 唐島田龍馬, 香川高弘, 宇野洋二: 上肢運動と協調した装着型ロボットの起立動作補助, 日本機械学会東海支部第 63 期総会講演会, 2014 年 3 月, 大同大学 (愛知県).
- ③ 加藤高之, 香川高弘, 宇野洋二: センシング歩行器の開発とオンライン歩幅推定, 第 14 回計測自動制御学会 SI 部門講演会, 2013 年 12 月, 神戸国際会議場 (兵庫県).
- ④ 石川寛典, Chang-Hyun Sung, 香川高弘, 宇野洋二: 関節可動域を考慮した歩行補助ロボットのオンライン最適軌道生成, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013 年 9 月, 首都大学東京 (東京都).
- ⑤ Takahiro Kagawa & Yoji Uno: Analysis of transient phase of balance recovery response in human locomotion, The 5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Function, 2013 年 6 月, University of British Columbia (Canada).
- ⑥ Takahiro Kagawa & Yoji Uno: Coordination between the stance and swing leg in perturbed walking, 2nd Joint World Congress of ISPGR and Gait and Mental Function, 2013 年 6 月, 秋田ビューホテル (秋田県).
- ⑦ 加藤高之, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットの着地制御法の開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013 年 5 月, つくば国際会議場 (茨城県).
- ⑧ 香川高弘, 宇野洋二: Interlimb coordination to avoid backward falling

in perturbed walking (外乱歩行における転倒回避のための脚間協調), 第 27 回生体生理学シンポジウム, 2012 年 9 月, 北海道大学 (北海道).

- ⑨ 後藤謙治, 香川高弘, 宇野洋二: 床反力情報に基づく装着型ロボットによる起立動作補助, 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2012 年 3 月, 玉川大学 (東京都).
- ⑩ 周 広宇, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットのつまずきに対応するセンサ制御系の開発, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2012 年 3 月, 玉川大学 (東京都).
- ⑪ Takahiro Kagawa, Kenji Goto & Yoji Uno: Posture adjustment of standing on a slope with a wearable robot, The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI 2011), 2011 年 11 月, Seoul (韓国).
- ⑫ 後藤高彰, 香川高弘, 宇野洋二: 傾斜面上における歩行補助ロボットの直立姿勢制御, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, 2011 年 11 月, 豊橋技術科学大学 (愛知県).
- ⑬ 周 広宇, 香川高弘, 宇野洋二: 歩行補助ロボットのつまずきに対する回復動作の制御, 第 54 回自動制御連合講演会論文集, 2011 年 11 月, 豊橋技術科学大学 (愛知県).
- ⑭ Takahiro Kagawa, Yuki Oda & Yoji Uno: Human interface of a wearable robot for walking on a step, The 14th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines, 2011 年 9 月, Paris (フランス).

[図書] (計 2 件)

- ① 香川高弘, 宇野洋二: 下肢麻痺者用歩行補助ロボットのセンサ・制御系, Nagoya University eブックシリーズ 1 最先端メディカルエンジニアリング, 名古屋大学最先端メディカルエンジニアリング編集委員会編, 一粒書房, pp.106-111. 2013.
- ② Takahiro Kagawa & Yoji Uno: Evaluation of gait stability based on recovery steps in perturbed gait, in *Treadmills: Kinematic Variability, Uses in Therapy and Effects on Muscle Activity*, M. Lopez and A. Gillingham (eds.), Nova Science Publishers, pp.69-85, 2013.

[その他]

ホームページ等

<http://www.uno.nuem.nagoya-u.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 洋二 (UNO YOJI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 10203572