

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 21 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820085

研究課題名(和文) 下肢麻痺者用装着型ロボットの歩行速度を向上するためのセンサ・制御システムの開発

研究課題名(英文) Control of wearable robot for paraplegics aiming at faster walking assistance

研究代表者

香川 高弘 (Kagawa, Takahiro)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30445457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：国内外で下肢麻痺者の歩行補助ロボットが開発されているが、非常にゆっくりした歩行しか実現できないため移動手段としての実用性が低い。本研究は歩行補助ロボットの最大歩行速度を向上するために(1)歩行軌道生成アルゴリズムの開発、(2)歩幅と歩行速度を調整するセンサ・制御システムの開発を行った。歩行軌道生成では、最適化手法を用いることで従来と比べて歩行速度を2倍以上向上した。また、歩行軌道生成アルゴリズムを歩幅と歩行速度のオンライン協調制御に導入することによって、ロボットが停止することなくユーザの動作に応じて歩き方を変えながら歩行することが可能となった。

研究成果の概要(英文)：Although various wearable robots have been developed, the walking speed is too slow to use in the daily lives. In this study we developed (1) motion planning algorithm to assist walking, (2) cooperative control system to adjust stride and walking speed by the user. The leg motion of robot is planned on the basis of optimization and the planned walking pattern is twice as fast as the previous walking pattern. the motion planning algorithm was applied for the cooperative control that the user can adjust the stride length and walking speed by the his/her movements. By using the novel control system, user's could walk continuously while adjusting thier walking patterns by themselves.

研究分野：メカトロニクス

キーワード：装着型ロボット 歩行補助 軌道計画 ヒューマンインタフェース

1. 研究開始当初の背景

事故や病気などによって脊髄を損傷すると、損傷部位以下の神経支配を受ける筋群に麻痺が生じる。腰椎上位から頸椎下位の損傷では両下肢の麻痺が生じ、自立した立位・歩行が困難となる。下肢麻痺者の移動手段として一般に車椅子が使用されるが、行動範囲が制限されるとともに骨粗鬆症などの2次合併症のリスクが増加する。厚生労働省の2001年の調査によれば、脊髄損傷により両下肢に麻痺が生じ、歩行などの下肢運動に障害を持つ患者は国内だけで58,000人程度と推計されている。下肢運動障害者の生活の質(QOL)を向上するために、下肢関節をモータなどの動力によって駆動する歩行補助ロボットが国内外で高い関心を集め、盛んに研究されている。例えば、実用化された歩行補助ロボットとして、Ekso (Ekso Bionics), Rewalk (Rewalk Robotics), HAL (Cyberdyne) などが挙げられる。

本研究では図1に示す下肢麻痺者用の歩行補助ロボットWPAL(アスカ株式会社)をプラットフォームとしてセンサ・制御システムの開発を行う。WPALは左右の股関節・膝関節・足関節に取り付けられたモータにより下肢麻痺者の下肢関節を他動的に動かすことで歩行を実現する。

これまでに開発された歩行補助ロボット

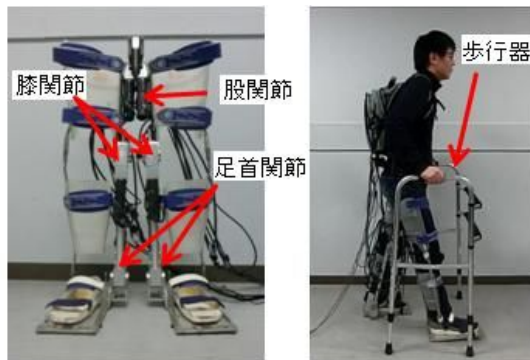


図1 装着型ロボットWPAL。歩行には腕の支持が必要なため、歩行器(右図)を使用する。

の多くは、あらかじめ一步の目標軌道を決めて、それを繰り返し実行することで歩行を実行する。そのため、ユーザの歩きやすい歩幅や歩行速度に応じて歩行パターンを調整することが困難である。ユーザの望む歩き方を実現するには、所望の歩幅や歩行速度などの歩行パラメータを入力するヒューマンインタフェースと歩行パラメータからオンラインでロボットの軌道を計画・実行する制御システムが必要である。以前にユーザの歩行器の移動距離から歩幅を入力して、ユーザの意図する歩行を実現するシステムを開発したが、歩行速度が遅く実用性が低かった。

2. 研究の目的

歩行速度が遅い第一の原因として、健常者の歩行パターンや、試行錯誤的に定めた歩行パターンが使われており、動作の効率性が十

分に考慮されていないことが挙げられる。そこで本研究では、歩行中のロボットの目標軌道を最適化手法に基づいて計画するアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムでは運動中の重要なポイントを経由点と定義して、経由点におけるロボットの姿勢と速度を指定したコスト関数が最小となるように最適化する。

次に、ユーザの歩きやすい歩幅や歩行速度を予測するヒューマンインタフェースを開発し、その予測から最適化アルゴリズムによって歩行パターンをオンラインで計画・実行する協調制御システムを開発した。また、歩行の安定性を向上するため、ロボットの足底と歩行器の接地部に力センサを取付け、歩行中の力を計測した。

開発したシステムに対して、まず健常者に対してシステムの動作試験を実施してその有効性を確かめた。

3. 研究の方法

3.1 軌道計画アルゴリズム

歩行補助ロボットの目標軌道を最適化に基づいて決定するアルゴリズムを開発した。ロボットの各関節の角度軌道を経由点付き躍度最小軌道で表現し、角速度の二乗和の積分値が最小となるように経由点の角度と角速度を決定する。このとき、爪先や踵が地面と接触しないことや、関節可動域および最大覚速度の上下制限を考慮する。

歩行軌道において、後方転倒に対して安定な動作パターンを生成することが重要である。そこで、スイング動作中の重心のダイナミクスを線形倒立振子でモデル化し、スイング開始時の適切な姿勢と速度を導出し、スイング動作の運動時間を決定した。

軌道全体を最適化するのではなく、経由点の姿勢と角速度のみに最適化変数を限定するとともに、倒立振子モデルを導入して最適化変数を縮減した。これによって軌道の計算時間の短縮を図った。

図2に計画した歩行パターンの一例をステイック図で示す。遊脚が地面と接触せずにスムーズなスイング動作を計画できていることが分かる。

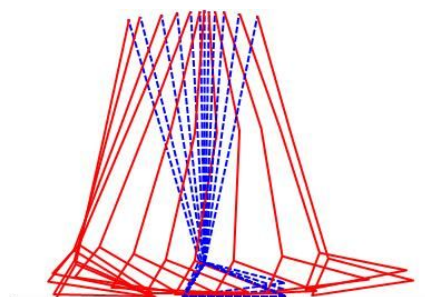


図2 軌道計画アルゴリズムで計算した歩行パターン(歩幅0.8m, 0.36m/s)。赤の実線が支持脚、青の点線が支持脚を表す。

3.2 協調制御システム

ユーザの意図する歩幅と歩行速度を予測するため、身体を支えるために用いる歩行器（図1右）の動作に着目する。ユーザによる歩行器の移動距離に応じてロボットの歩幅を調整することによって、ユーザは歩行器の動作から所望の歩行となるように足の動きを調整できる。以前のシステムでは歩行器の動作を加速度センサで計測していたが、歩行が速くなると位置の推定精度が下がるという問題があった。そこで、レーザーレンジセンサによって、図3に示すように歩行器と左右の足の相対位置を計測する。レーザーレンジセンサの時間分解能を補うため、加速度センサの信号を同時に計測する。

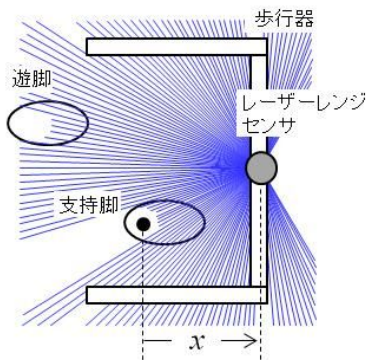


図3 レーザーレンジセンサによる左右の足と歩行器の相対位置の計測。

一歩ごとに静止せずに連続的に歩行を行うため、3.1で説明した軌道計画アルゴリズムをベースとした2段階のオンライン軌道計画アルゴリズムを開発した。連続歩行では、歩行器の動作中に脚のスイング動作を開始するため、一歩前の歩幅と歩行速度から前述の最適化アルゴリズムで軌道を決定する。歩行器の動作によって得られる新しい歩幅から着地時におけるロボットの角度・角速度を広義ニュートン法を用いて修正する。また、関節可動域や地面との接触に関する不等式制約をバリア関数によって考慮する。

3.3 歩行器の力の計測

図4に示すように、歩行器の接地位置に3軸力覚センサを取付け、歩行中の腕の支持力を計測するシステムを開発した。



図4 歩行器にかかる力を計測する力覚センサ

4. 研究成果

本研究で開発した軌道計画アルゴリズムと協調制御システムの有効性を検証するため、以下の実験を行った。

4.1 最適歩行パターンによる歩行性能評価試験

3.1のアルゴリズムで計算した歩行軌道と従来の作業空間上で計画した歩行軌道と比較した。作業空間上で計画する手法では、歩幅0.8m、歩行速度0.18m/sが最も速い動作パターンであった。一方、開発した軌道計画手法では、トレッドミル上において歩幅0.8mで歩行速度は0.36m/s、平地歩行では0.27m/sで歩行可能であった。それぞれの手法の歩行効率を比較するため、電源からのモータに流れる電流を計測し、その消費電力を評価した。

図5にロボットの歩行動作の様子を示す。左が本研究で開発した歩行パターン、右がこれまでの歩行パターンでの動作である。本研究で開発した歩行パターンにより一歩に要する時間を大幅に低減できていることが分かる。

本研究の手法, $V = 0.27$ m/s 従来手法, $V = 0.18$ m/s

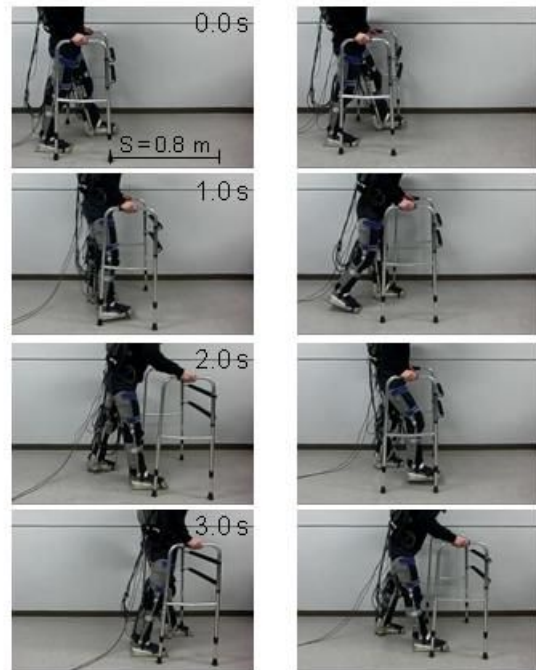


図5 計画した歩行パターンによる歩行の様子

図6は、一歩の間の電力の平均とピークを示す。開発した歩行パターンの方が2倍速いにもかかわらず、消費電力はほぼ同等であることが分かる。また、同一の歩行速度で比較すると、本研究の手法によって、電力消費が半分程度に抑えられることが分かる。以上より、開発した軌道計画アルゴリズムがより速く効率的な歩行パターンを計算できることが確認できた。

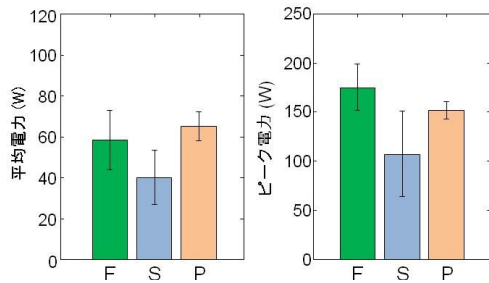


図 7 床面での歩行中の消費電力．F は本研究の軌道計画手法での最速の歩行パターン(0.27 m/s)での結果，S と P は 0.18 m/s における本研究での歩行パターン (S) と従来法での歩行パターン (P) の結果を表す．

4. 2 協調制御システムの動作検証試験

3. 2 の協調制御システムによって，実際に歩幅や歩行速度を変えながら連続歩行が可能かどうかを確認する動作試験を行った．

図 7 は協調制御システムによる歩行の様子を示す．歩幅に依らず，歩行器と脚の位置関係が維持されていることが分かる．このことは，歩行器の移動距離に応じてロボットの脚の動きが調整できていることを示している．

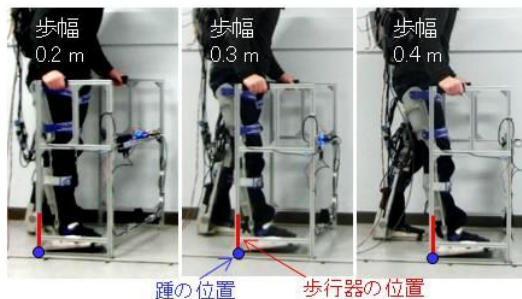


図 6 協調制御システムによる歩行の様子

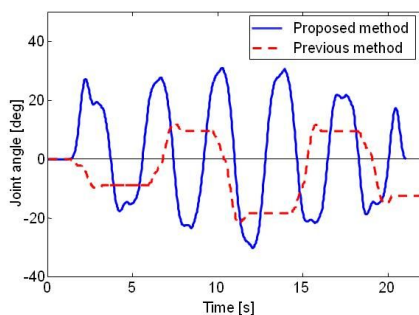


図 8 歩行中の股関節角度．青の実線が本研究の協調制御システムによる歩行，赤の点線が以前に開発した歩幅調整制御システムによる歩行の結果を示す

図 8 は歩行中のロボットの股関節軌道を表す．青の実線が本研究で開発した協調制御システムの軌道で，赤の点線が以前に開発した歩幅調整制御システムの軌道である．以前のシステムでは一歩ごとに停止しており，歩行速度が非常に遅いことが分かる．一方，本研究で開発したシステムは静止するフェーズが

なく，連続的に歩行できたことが分かる．また，股関節の振幅が歩行初期では増加し終盤で減少しているのは，歩幅に応じて股関節軌道が変化したことを表している．以上より，開発した協調制御システムによって歩幅を調整でき，連続的な歩行を実現できたことが確認できた．

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 4 件)

Sung CH, Kagawa T and Uno Y (2015) "Synthesis of humanoid whole-body motion with smooth transition", Advanced Robotics, Accepted.

Kagawa T, Ishikawa H, Kato T, Sung CH, and Uno Y (2015) "Optimization-based motion planning in joint space for walking assistance with wearable robot", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 31, No. 2, pp.415-424.

Sung CH, Kagawa T, Uno Y (2013) "Efficient Planning of Humanoid Motions by Modifying Constraints", Journal of Behavioral Robotics. DOI: 10.2478/pjbr-2013-0002.

Sung CH, Kagawa T, Uno Y (2013) "Whole-body motion planning for humanoid robots by specifying via-points", International Journal of Advanced Robotic Systems, DOI: 10.5772/56747.

[学会発表](計 9 件)

Kagawa T and Uno Y (2013) "Coordination between the stance and swing leg in perturbed walking", 2nd Joint World Congress of ISPG and Gait and Mental Function, 2013 年 6 月 25 日，秋田ビューホテル．

Kagawa T and Uno Y (2013) "Analysis of transient phase of balance recovery response in human locomotion", Proceedings of The 5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Function, 2013 年 6 月 29 日，カナダ，バンクーバー市)．

Sung CH, Kagawa T and Uno Y (2013) "Optimization-based gait planning for wearable power-assist locomotor by specifying via-points", Proceedings of 16th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technology for Mobile Machines, 2013 年 7 月 17 日，オーストラリア，シドニー市)

香川高弘，人間の歩行バランスの分析と歩行補助ロボットへの応用”，東海ダイナミクス・制御研究会，2013 年 11 月 8 日，名古屋大学．

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19日，神戸国際会議場。

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 ME とバイオサイバネティクス研究会，2014年3月17日，玉川大学。

加藤高之，香川高弘，宇野洋二，“逐次的な歩様の変更のための歩行補助ロボットの軌道計画法”，第32回日本ロボット学会学術講演会，2014年9月5日，九州産業大学。

加藤高之，香川高弘，宇野洋二，“ユーザの動作に基づく装着型ロボットのオンライン最適歩行パターン生成”，電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会 2014年12月13日，名古屋大学。

加藤高之，香川高弘，宇野洋二，“ユーザ動作のセンシングと軌道最適化に基づく装着型ロボットのオンライン歩行制御”，第2回制御部門マルチシンポジウム，2015年3月6日，東京電機大学。

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年月日：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.uno.nuem.nagoya-u.ac.jp/~kagawa>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

香川高弘 (KAGAWA TAKAHIRO)

名古屋大学・大学院工学研究科 助教

研究者番号：30445457

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし