

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：33903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05894

研究課題名(和文) 装着型歩行補助ロボットとユーザの協調学習システム

研究課題名(英文) Learning system of wearable robot for cooperative gait assistance with user

研究代表者

香川 高弘 (KAGAWA, Takahiro)

愛知工業大学・工学部・准教授

研究者番号：30445457

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、装着型ロボットの歩行アシスト軌道をオンラインで学習する制御システムを開発した。歩行軌道を経由点付き躍度最小軌道で表し、その経由点が使用者の腕の負荷荷重が減少するようにオンラインで修正される。少ない試行回数で学習が進むように、経由点の修正量に逐次最小二乗法を用いる手法を考案し、計算機シミュレーションでその有効性を確かめた。また、実機を用いた動作試験を実施して、開発した学習制御システムによって使用者の腕の負荷力が減少することを確かめた。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed an on-line learning system of gait pattern for a wearable robot to assist walking. A cost function of our learning system was defined by the sum of the measured arm loading force of a user and the power consumption of the motors during walking. Via-points of the joint trajectories were optimized so as to reduce the cost function by Newton-like method. We propose an on-line learning algorithm of the via-point parameters by RLS algorithm which achieves less number of iteration than a conventional method. We confirmed that the arm loading force of a user decreased while walking with a wearable robot with little change of power consumption by using the proposed algorithm.

研究分野：メカトロニクス・ロボット制御

キーワード：装着型ロボット 学習制御

### 1. 研究開始当初の背景

麻痺などにより運動に障害のある人の日常生活を支援する手段として装着型ロボットの実用化が期待されている。両下肢に麻痺のある患者の移動手段は一般に車いすであるが、狭路や段差の移動が困難であることや筋肉の萎縮や骨粗しょう症などの2次合併症の問題があり、歩行機能の再建が望まれている。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パターンになるようにロボットの動作を調整することが困難であるという問題があった。

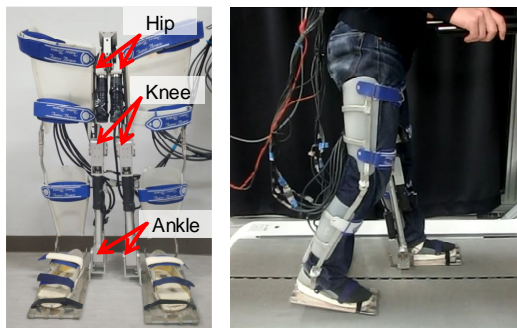
### 2. 研究の目的

本研究では、ユーザが歩行補助ロボットで歩行している間の腕の力を計測し、ユーザの腕の負担が減少するように歩行補助ロボットの関節軌道をオンラインで修正する学習制御システムを開発することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、歩行の学習制御システムを開発するにあたり、以下の3つの課題に取り組んだ。

1. 学習制御アルゴリズムの開発
2. 学習制御システムの構築と実機試験



Wearable robot WPAL Walking on a treadmill

図1 装着型ロボットWPAL(左).トレッドミル上での歩行(右).歩行には腕の支持が必要なため、手すりを使用する。

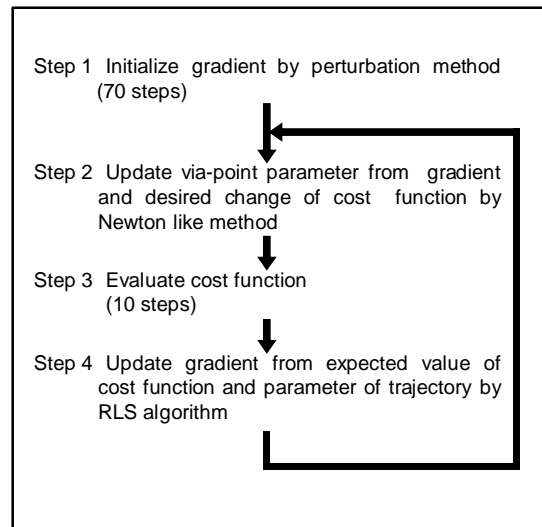


図2 学習制御の計算手順

以下に、各項目について具体的に説明する。  
(1) 学習制御アルゴリズム

以前の研究では、関節角速度の2乗和を評価関数として歩行補助ロボットの関節角軌道を最適化する手法を開発した。この手法では、オフラインで最適軌道を計算できるが、個々の使用者の歩行のパフォーマンスを考慮して軌道を計画することができない。言い換えると、以前の方法では個々のユーザに適した歩行パターンを計算することができない。

そこで本研究では、歩行中の腕の負荷力を評価指標として、個々の使用者に適合する最適軌道を学習するアルゴリズムを開発した。歩行時の関節軌道において、運動途中の点を経由点として与え、評価関数が減少するように経由点の位置と速度を学習する。実データによる学習の問題の一つは、学習パラメータ(経由点の位置・速度)の変化に対する評価関数の勾配がわからないことが挙げられる。勾配を求めるためには、パラメータに微小摂動を加えた時の評価関数の変化を観測する必要があるが、この方法では1回の修正に数十歩も歩かなければならず、学習法として効率的ではない。本研究では勾配の推定とパラメータの更新を同時に行うためにRLSアルゴリズムを導入した学習制御法を開発した。

学習制御の計算手順を図2に示す。ステップ1では、初期の学習パラメータに対するヤコビアンを摂動法で推定する。ステップ2では推定した勾配から広義ニュートン法を用いてパラメータの修正量を求める。ステップ3ではパラメータ修正後の軌道による歩行アシストを行い、そのときの腕の負荷力から評価関数の値を求める。パラメータの変化と評価関数の変化から、RLSアルゴリズムを用いて勾配の推定値を更新する。推定した勾配を用いてステップ2に戻ってパラメータの修正を繰り返すことで学習パラメータを最適化する。

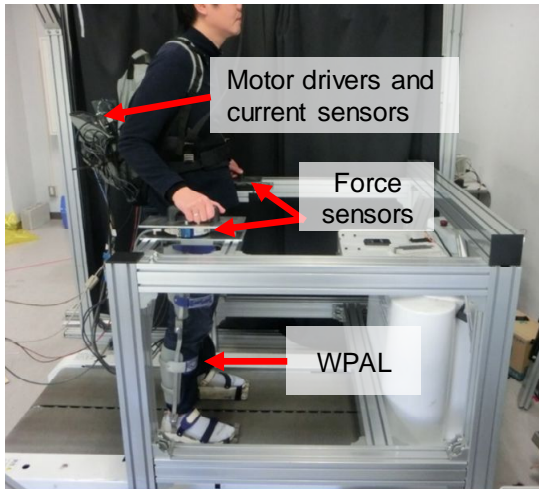


図3 歩行補助ロボットの学習制御システム

### (2) 学習制御システムの構築

本研究で構築した歩行補助ロボットの学習制御システムを図3に示す。使用者は装着型ロボット WPAL を着用してトレッドミル上を歩行した。また、歩行中に転倒して外傷を負うことがないように、使用者はハーネスを着用して歩行した。左右の手すりの下に6軸力・モーメントセンサを取り付け、腕の負荷力を計測した。また、歩行中の各モータの消費電力を計測した。加えて、歩行中の身体の動きを3次元位置計測装置により計測した。

学習制御の評価関数を一歩の間の腕の負荷力の積分値とモータの消費電力の積分値の重み付け和により定義し、図2に示す学習制御アルゴリズムを歩行補助ロボットの制御システムに実装した。

## 4. 研究成果

### (1) 学習制御アルゴリズムの検証

実機試験を実施する前に、本研究で考案した学習制御アルゴリズムによって評価関数が減少するように歩行軌道が修正されるかどうかを計算機シミュレーションによって検証した。実データを扱う場合、同一の学習パラメータであっても評価関数の値が変動するため、複数の試行の平均によって試行ごとのばらつきの影響を抑える必要がある。予備実験として、図3の環境の下で歩行中の負荷を計測する実験を行った。同一の学習パラメータにおける試行を繰り返し、評価関数のばらつきを見積もった。評価関数の分布を用いて計算機シミュレーションを行い、10試行の平均を用いることで評価関数が減少する方向にパラメータが修正されることを確認した。また、広義ニュートン法における学習係数の適切な値の範囲もシミュレーションによって同定した。

### (2) 学習制御システムの実機試験

1名の被験者に対して、開発した学習制御システムを用いた実機試験を実施した。図4

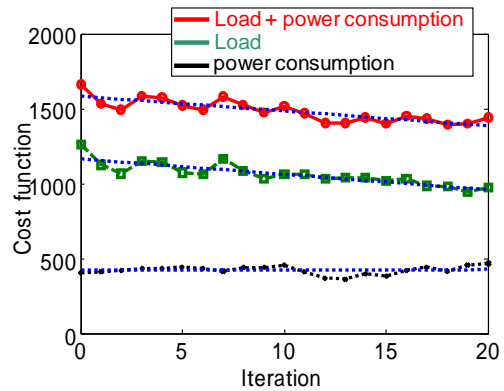


図4 パラメータの修正ごとの評価関数の変化

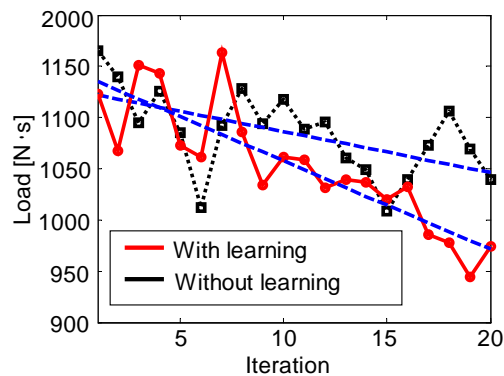


図5 学習の有無による評価関数の違い

に評価関数の変化のグラフを示す。赤線が腕の負荷とモータの電流値の重みづけ和の評価関数の値を表す。横軸が学習パラメータの更新回数を表す。学習パラメータの更新を繰り返すにしたがって、評価関数の値が減少したことがわかる。緑線と青線はそれぞれ腕の負荷とモータの消費電力を表す。腕の負荷が繰り返しごとに減少した一方で、電力消費はほとんど変化しなかったことがわかる。この結果から、本学習制御システムでは、モータの負荷を増大することなく腕の負荷力を軽減できたことがわかった。

次に図5に学習アルゴリズムを適用した条件と適用しない条件による腕の負荷力の変化を示す。黒線は学習による軌道の修正をしない場合の腕の負荷力、赤線が軌道を学習した時の結果を示す。学習の初期において、腕の負荷力はほぼ同じであるが、繰り返し回数が増えるにつれて学習条件のほうが腕の負荷力をより低減できることが確認できた。

実機による検証実験の結果、開発した学習制御システムはユーザの腕の負荷力を低減する歩行アシストの制御法として有効であることが確かめられた。

## 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 1 件)

香川高弘, 宇野洋二, “ 使用者の動きと協調する装着型歩行補助ロボットのアシスト制御”, 地域ケアリング, Vol.18, No.1, pp.62-64 .

〔学会発表〕(計 10 件)

Kagawa T, Kato T, and Uno Y, "On-line control of continuous walking of wearable robot coordinating with user's voluntary motion", The 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015), 2015 年 9 月, ドイツ, ハンブルグ市 .

川岸敬生, 香川高弘, 宇野洋二, “ ヒューマノイドロボットによる障害物踏み越え動作の生成”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 2016 年 9 月, 山形大学 .

高橋史哉, 香川高弘, 宇野洋二, “ 歩行補助ロボットの軌道計画に対する学習制御”, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016 年 12 月, 札幌コンベンションセンター, 2016 年 .

大島悠輔, 香川高弘, 宇野洋二, “ フィードバックゲインに応じた仮想軌道修正に基づくロボットアーム制御”, 第 29 回自律分散システムシンポジウム, 2017 年 1 月, 調布クレストンホテル .

香川高弘, 宇野洋二, “ 単振子と倒立振子に基づく歩行バランスに関する検討”, 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2017 年 3 月, 機械振興会館 .

木場亮太, 香川高弘, 宇野洋二, “ フィードバックトルクを用いた冗長関節アームの協調動作生成 ” 電子情報通信学会 NC 研究会, 2017 年 3 月, 機械振興会館 .

大島悠輔, 香川高弘, 宇野洋二, “ 多関節アームの繰り返し制御における仮想軌道の調整”, 電子情報通信学会 NC 研究会, 2017 年 3 月, 機械振興会館 .

Kagawa T, Takahashi F, Uno Y (2017) "On-line learning system for gait assistance with wearable robot", SICE Annual Conference 2017, 2017 年 9 月, 金沢大学 .

香川高弘, 宇野洋二, “ 弾道歩行モデルに基づく転倒の条件に関する検討”, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 2017 年 9 月, 東洋大学 .

福井俊太郎, 香川高弘, 宇野洋二, “ 歩行補助ロボットと協調する歩行器の開発”, 電子情報通信学会 MBE 研究会, 2017 年 12 月, 名古屋大学 .

〔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 :  
取得年月日 :  
国内外の別 :

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://aitech.ac.jp/~kagawa/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

香川高弘 (KAGAWA, Takahiro)  
愛知工業大学・工学部・准教授  
研究者番号 : 30445457

### (2) 研究分担者

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

### (3) 連携研究者

なし