

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24年 6月 8日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760192

研究課題名（和文） 早期回復を促し安全で長時間駆動可能なエネルギー回生型ウェアラブル装具の開発

研究課題名（英文） Development of the safe wearable orthotic device using energy regeneration, which can recover early and be driven for a long time

研究代表者

芝田 京子（SHIBATA KYOKO）

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：00307117

研究成果の概要（和文）：ウェアラブル機器に制御機能をもたせ高機能化し、かつ、安全な長時間の連続駆動を可能とするため、制御中の機器の動作や健全部の運動からエネルギーを回生することを検討した。セミアクティブ短下肢装具、2つのDCモータを用いた力センサレスのシンプルなマスタースレーブシステム、および上肢リハビリ訓練装置を開発し、86.5%の高い電力回収率、高い追従性、さらに、患者自身の機器コントロールによるリハビリの効果向上を確認した。

研究成果の概要（英文）：To make a wearable orthotic device control intelligently and to enable safety long-time continuous drive, it is discussed that driven energy is regenerated from movement of a controlled device or motion at healthy region of human body. A semi-active ankle foot orthosis, simple master-slave system using two DC motors without a force sensor and rehabilitation training system for hemiplegic patients with a unilaterally disabled upper limb are developed. These proposed systems show high electricity recovery (86.5%), high following capability and the improvement of the rehabilitation effect.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：エネルギー回生、セミアクティブダンパ、アクティブ制御、能動リハビリ、短下肢装具、マスタースレーブ

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーション（以下リハビリ）や生活支援において用いられる身につけられるウェアラブル装具、例えば、片麻痺歩行を補助する短下肢装具（以下AFO）や上肢リハビリ訓練機器などを用いる患者の最大のニーズは、早期の機能回復であると考えられる。

そのために患者の状態を常時センシングして装具を制御するインテリジェント化が強く求められるが、機器の大型化とこれに伴うリハビリの自由度低下、エネルギー源の確保、安全性が大きな問題となる。

2. 研究の目的

本研究では、場所や時間に制約なく安全にリハビリが行えて患者自身が装具をコントロールできる仕組みを考える。そこで新しい試みとして、アクチュエータを有するウェアラブル機器にエネルギー回生の技術を適用し、以下2方法により安全に駆動エネルギーを確保する。

- (1) 装具のブレーキにより消費されるエネルギーを電氣的に回生して(セミアクティブ制御) 駆動力とする
- (2) 健常部の運動からエネルギーを回収して(アクティブ制御)装具に能動的な動きを追加するための駆動力を得る

これらにより系の消費エネルギーが大幅に減ることから駆動源は小型軽量バッテリーで十分となり、場所の制約のない装具の長時間使用が実現する。また、健常部のエネルギーを回生して障害部に力を加える場合には、後述のように反力を感じながら自身の意思で力を調整して加えることができるため、機器の暴走などを心配する必要がなく患者は安全に安心してリハビリが行え、さらに患者自身の介入による脳神経系との連動により能動的なリハビリが実現できることからリハビリ効果の向上が期待できる。本研究では、このような新たなウェアラブル装具のエネルギー系、および制御系を確立する。

3. 研究の方法

前節(1)の例題として AFO を、(2)の例題としてマスタースレーブシステムを取り上げた。

(1) 健常歩行の立脚期における足関節(足首の関節)はなめらかに大きく開閉し、遊脚期では地面に設置しないよう足先を保持する。つまり、健常歩行では歩行状態に応じて適宜足関節まわりに制動力をかけることでスムーズな歩行を実現している。一方片麻痺歩行では足関節の制御が効かず、遊脚期に足先を持ち上げることができずに垂れ下がり(下垂足)、つまずきや転倒に至るため、従来は足関節を90度に固定するAFOを装着し下垂足を防いでいる。しかし、従来型AFOでは足関節角度を自由に変えることができないため、立脚期において非常に不自然でエネルギー消費の大きい動きを強いてしまい、異常歩行や膝関節の過伸展を引き起こしたり、歩きにくさ故ますますリハビリから遠ざかってしまう。ここで、歩行状態に応じて適切にブレーキをかけたりパワーを供給したり、つまり足関節部の減衰をリアルタイムに可変制御できるようなインテリジェント化されたAFOがあれば、片麻痺者が自然でスムーズな歩行を再獲得するのに非常に有用である。そこで、上述のように、装具の軽量化、長時間駆動のためのエネルギー源の確保を実現するためエネルギー回生を適用する。回生源は、

麻痺側の足関節のブレーキを用いる。具体的には、歩行状態に応じてDCモータの電磁ブレーキを利用して制動モーメントを発生させ、昇圧チョップ回路(図1)により2つの回路を高速で切り替えて、モータトルクに比例する平均電流を変化させることでDCモータの減衰定数を変化させると同時に、その過程で生まれる電気エネルギーをバッテリーへ回生する。昇圧チョップ回路を用いることによってモータの誘導電圧がバッテリー電圧よりも小さい場合でもバッテリーを充電することが可能となる。歩行状態のセンシングには足裏の2つの感圧センサを用いる。これにより歩行状態に応じた減衰可変制御と、長時間の駆動が可能となる。試作したセミアクティブAFOを図2に示す。

セミアクティブ制御の最適化では、電力回収率の高効率化が重要課題である。そこで、昇圧チョップの基礎回路で数値計算と実験により想定可能な入力条件のちがいによる回生電圧量を導出した。この結果を踏まえ実装回路を製作し搭載した試作機を用いて歩行実験を行い、下垂足防止効果と、電力回収率を算出した。

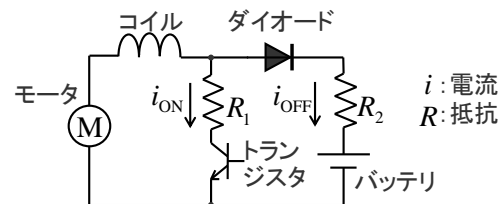


図1 昇圧チョップ回路

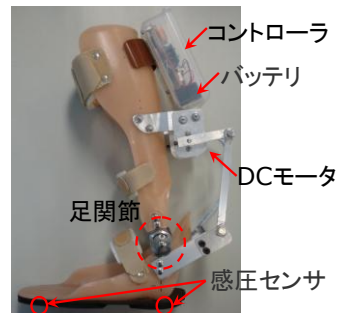


図2 提案するセミアクティブ短下肢装具

(2) アクティブ制御の検討として、2つのDCモータを用いたシンプルな構造のマスタースレーブシステム(図3)を考える。健常側の運動をモータを通して電気エネルギーに変換し、そのエネルギーをもう一方のモータで機械エネルギーに再変換して麻痺側を駆動する。同様の過程により麻痺側の抵抗が健常側に帰還されるため、力センサを用いずに患者自身が麻痺側の反力を感じることができる。したがって、エネルギー回生を適用した提案法により、小型軽量化、長時間駆動、力センサレスでの力覚の実装、バイラテラル

動作が実現可能となる。

このとき問題となるのが電気系でのエネルギー消費による運動制御性能の低下である。改善策として、速度、変位フィードバックにより小型バッテリーを用いた損失分の補充、異なるモータ特性の活用、増速機構の挿入、およびこれらの組み合わせについて、理論による検討を行い、さらに、小型軽量化を考慮したマイコン制御による実験回路を製作し追従性を検討した。このとき、力覚の確認も行った。さらに実用化の一例として、バイラテラルな上肢リハビリが可能な試作機を開発し、その効果を脳活動の計測により確認した。

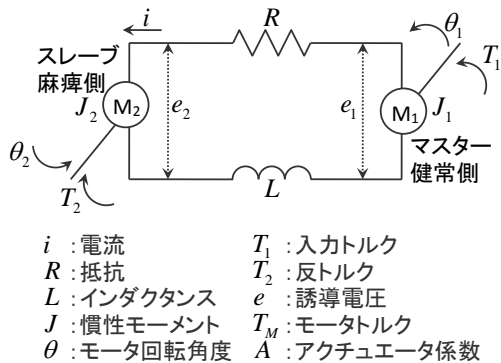


図3 提案システムの等価電気回路

4. 研究成果

(1) 昇圧チョップの基礎回路において、回路を切り替える割合であるデューティ比、モータからの入力電圧を変化させた場合の回路電流を数値シミュレーションと実験により比較した。結果の一部を図4、5に示す。デューティ比の変化、入力電圧の変化により、モータトルクに比例する回路電流が変化することが確かめられ、歩行状態に応じた可変制御の見通しが示された。また、数値シミュレーションと実験で似た波形を得ることができたため、回収率の高効率化に向けた最適条件の導出が可能となった。

次に、図2の試作機を装着した歩行実験の結果を示す。図6は、健常者による従来型AFOと提案するセミアクティブAFOを装着した際の1歩分の足関節角度である。各データで1つ目の山が踵接地、足関節角度が最も小さい部分が立脚後期、これ以降が遊脚期である。図よりどちらのAFOを装着した場合も下垂足を防止できていることがわかる。加えて、従来型AFOに比べ提案するAFOは足関節の角度変化が大きいことから、装具の剛性による歩きにくさが改善されたと考えられる。よって、提案法により歩行改善の効果と、従来型AFOとの優位性が示された。図7は、提案するAFOを装着したときの充電用バッテリーに流れ込む電流の計測結果である。

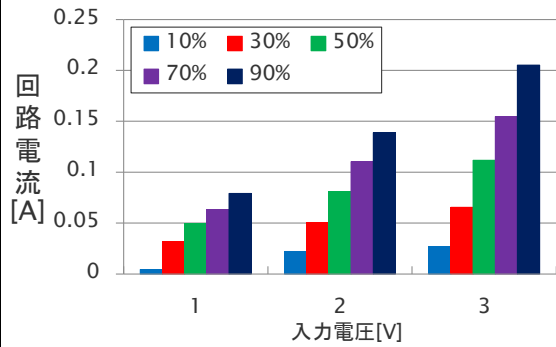


図4 各入力電圧におけるデューティ比ごとの平均電流

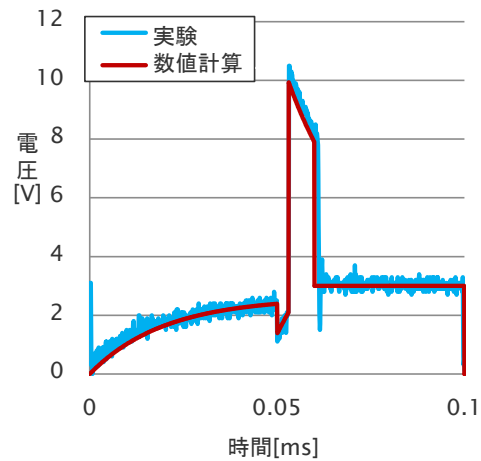


図5 電圧の比較 (デューティ比 50%)

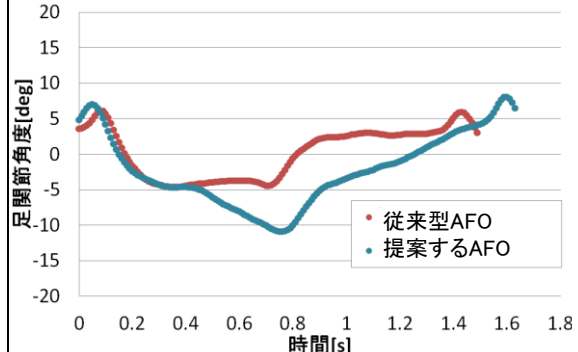


図6 2種のAFO装着歩行時の足関節角度の比較実験結果

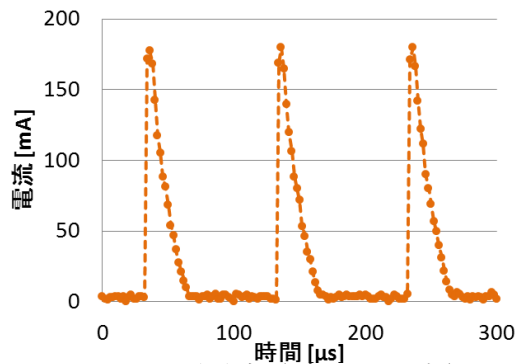


図7 充電電流 (データの一部分)

これと、バッテリーからの流出電流量の計測値から、歩行時の消費電力と充電電力を導出し、足関節のブレーキ力の回生による電力回収率を導出した結果 86.5%となり、セミアクティブ制御において長時間使用が可能となった。

(2) マイコン制御による実験装置を図 8 に、運動性能改善のため増速機構を組み込み、変位フィードバックにより小型バッテリーを用いた損失分の補充を行った際の検証用回路の模式図を図 9 に示す。マスターモータへの入力には、入力用モータによる安定した回転と手動による入力を与える。また、スレーブモータへは負荷モータを接続し、その負荷を変化させることで負荷に対しての追従性を検討した。無負荷時の実験結果を図 10 に示す。マスターとスレーブを単に電氣的に接続させた場合(緑)にはマスターとスレーブで速度差が生じているが、不足分の補充を行う(赤)ことで広い駆動速度範囲において高い追従性を実現できた。また、マスターモータに一定回転数を与えた場合の補充電圧量を図 11 に示す。回転数が高くなるにつれ補充電圧量も大きくなっていくが、最大で 0.45[V]未達となった。急激に変化する回転数を与えた場合も、最大で 6[V]程度であったことから、さらなる装置の小型化が可能であることが示された。

次に、本システムの特長である力センサを用いることなく力覚を有することの検証実験を行った結果を図 12 に示す。本システムが力センサレスでもほぼ 1:1 の力覚を有していること、また、その力覚が角度制御を行っても変化しないことが確認できた。

以上より、患者自身が自らの意思によりウェアラブル機器を操作できるシステムの開発の見通しが立った。そこで、能動リハビリが可能な上肢リハビリ訓練装置を試作し(図 13)、速度と位置の追従性が行えていることを確認した上で、リハビリの効果を検証するため訓練中の脳活動情報を NIRS (光トポグラフィ)により計測した結果、脳血流の活性化が示された。よって、提案法によって、患者自身がウェアラブル機器の動きをコントロール可能であり、脳神経系との連動によって早期の機能回復が期待できることが示された。

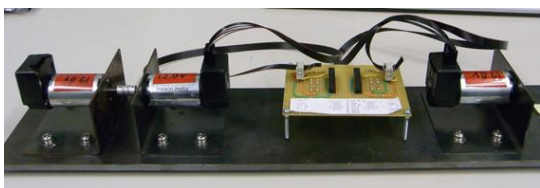


図 8 マスタースレーブシステムの実験装置

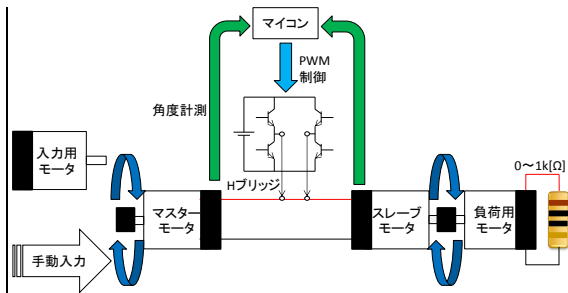


図 9 角度制御実験の方法

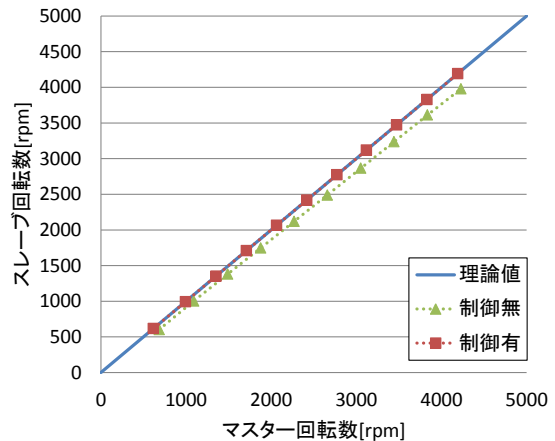


図 10 無負荷時の制御実験結果

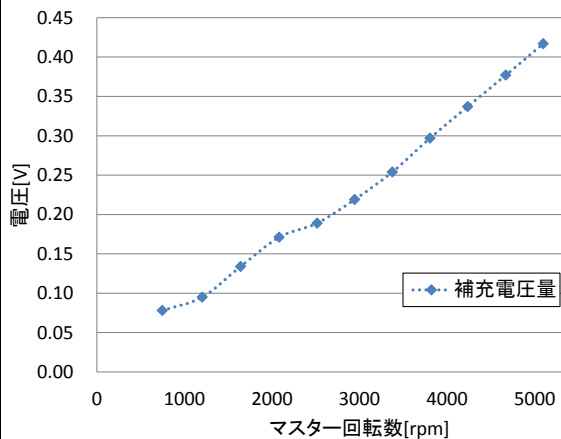


図 11 一定回転時の補充電圧量

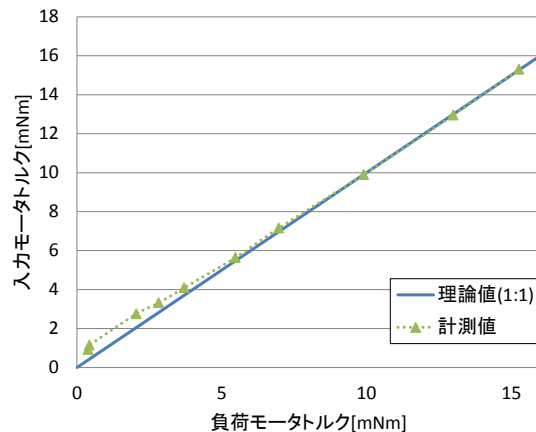


図 12 角度制御時のトルク計測結果

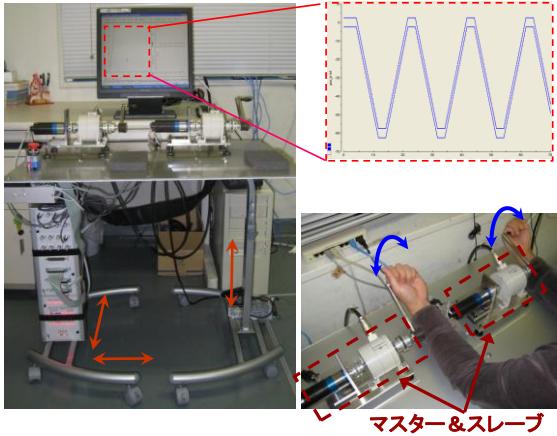


図 13 上肢リハビリ訓練装置

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)

- ① C. Li, Y. Inoue, T. Liu, K. Shibata, L. Sun, Modeling and Verification of a Bimanual-Coordinated Training System, Advanced Robotics, 査読有, Vol. 25, 2011, pp. 1969-1989
- ② C. Li, Y. Inoue, T. Liu, K. Shibata, K. Oka, A New Master-Slave Control Method for Implementing Force Sensing and Energy Recycling in a Bilateral Arm Training Robot, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 査読有, Vol. 7, 2011, pp. 471-485
- ③ C. Li, Y. Inoue, T. Liu, K. Shibata, K. Oka, Additional Design features of a Master-Slave Control System with Force Sensing and Energy Recycling for Upper Limb Rehabilitation Robots, Instrumentation Science and Technology, 査読有, Vol. 38, 2010, pp. 385-410

[学会発表] (計 1 6 件)

- ① 芝田京子, エネルギー回生によるセミアクティブな短下肢装具の開発, 2011 年度年次大会, 日本機械学会, No. 11-1, 講演番号 J102013, 2011. 9. 12, 東京工業大学
- ② C. Li, A Novel Rehabilitation System Supporting Bilateral Arm Cooperative Training, IROS2010, 2010/10/18-22, Taiwan
- ③ 芝田京子, DC モーターによるエネルギー回

生を用いた短下肢装具の開発, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010, 2010. 9. 19, 大阪大学

- ④ C. Li, Evaluation of a bimanual-coordinated upper-limbs training system based on the near infrared spectroscopic signals on brain, EMBC2010, 2010/8/31-9/4, Argentina

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芝田 京子 (SHIBATA KYOKO)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号 : 00307117

(2) 研究分担者

()

研究者番号 :

(3) 連携研究者

()

研究者番号 :