

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 15 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21560476

研究課題名（和文） 床反力推定機能を有する制御系設計法の提案とけり動作を実現する短下肢義足の開発

研究課題名（英文） Study of Control Design Method to Estimate Reflection Force and Development of Powered Ankle-foot Prostheses

研究代表者

小林 伸明（KOBAYASHI NOBUAKI）

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：60186757

研究成果の概要（和文）：

本研究では、人の歩行動作のように、接地状態に応じて足関節を制御し、足先に力を加えてけり動作を発生させる義足の実現のため、足の裏面が接地したときの反力を推定することができる制御系設計法を提案した。理論面においては制御器の低次元化の可能性についても明らかにした。また、提案する制御系設計法の有効性を確認するために、腱駆動型の能動型短下肢義足の試作機を製作した。さらに、実験により床反力を推定することができ、適切なけり動作を生成できることを確認した。

研究成果の概要（英文）：

The research focuses on control methods for powered ankle-knee prostheses. Powered ankle-foot prostheses have been developed and studied to improve quality of life for disabilities. The main goal of this study is to determine the feasibility of generating adequate plantar flexion force and also to propose an adaptation control method for different gait speed by using the internal model control design. The prototype of the powered ankle foot prosthesis is developed to evaluate the proposed controller with gait speed adaptation. The results show that the prototype is able to a more natural gait than a conventional passive prosthesis and to provide adequate plantar flexion force for different gait speed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：制御機器、福祉機器

1. 研究開始当初の背景

短下肢義足の提案は種々なものがなされているが、最も新しいものについても、足の接地状態に応じてオンオフ制御により足関節のまわりの後背屈動作が基本であり、けり動作についての従来の材質のこわさに依存した形で実現することに限られている。

これは着地の際に足首の材質に貯えられるエネルギーで十分とみなされていると同時に、けり動作を実現する技術が確立されていない点にも起因する。短下肢において人の歩行動作のように、能動的に接地の状態に応じて足関節を制御し、足先に力を加えてけり動作を発生させるような義足の形にはなっていない。

短下肢義足の研究の状況はわが国が先駆的であり、以下のような研究がなされている。

- 福田耕治他(3名):超音波モータを用いた短下肢装具の足首角制御, システム制御情報学会論文誌, Vol. 13, No. 12, pp. 560-565, 2000.
- 赤澤康史他(5名):メカトロニクスを導入した短下肢装具の開発研究—粘性抵抗可変の継手を有する短下肢装具の試作と歩行実験—, 兵庫県立福祉のまちづくり工学研究所報告集, pp. 199-202, 2003.
- 井上喜雄, 芝田京子, エネルギー回生を考慮した短下肢義足の開発, 福祉工学シンポジウム講演論文集, pp. 23-26, 2005.
- メーカー開発製品:ナブテスコ, ハイブリットニー及びインテリジェント膝継手.

人の実際の動きと同じ動作を行う為には足関節の動きの制御と同時に、踏み出す力の弱い人にとっては接地力の制御によるけり動作も必要となる。足関節の回転に関する制御についてはいくつかの前述の先行的な研究も行われているが、けり動作を実現するものは見られない。

けり出しのエネルギーを貯める材質を選定することで十分と考えられているが、健常者と同様のけり機能を持つほうが、踏み込み力の弱い人にとっては有用であり自然であると思われる。また、大腿義足等を考える場合にも短下肢部分にこのような機能を持たせた方が、より優れた歩行を実現できると考える。近年、以下のような研究報告もあるが、ここで考えるけりの力を制御するものではなく、基本的に内容は異なるものである。

- 李成求, 森本正治他(6名):インテリジェント義足足継手の研究開発, 日本機械学会論文集C編, Vol. 72, No. 720, pp. 2533-2539, 2006.

一方、制御技術については、足の面が接地したときの反力を推定する機能についての理論として、内部モデル制御の応用が1つの有効な手段として考えられる。しかしながら、このような義足の力の制御に応用できるか否かは明確でなく、制御方法自体にも反力(外乱)を推定する機能はあるものの、これを利用して力を制御するような理論も確立されていないが、昨年来の事前調査研究から通常の平坦地歩行の場合、歩行パターンどおりに足関節の角度を出力させるよう、床面からの反力を打ち消す力がけり動作と関連する見通しを得ている。

2. 研究の目的

本研究では人の短下肢と同じように、足関

節の後背屈運動と同時に足裏面のけり動作の自然な動きを実現する為、ワイヤーによる腱駆動型の短下肢義足を試作し評価することを目的とする。これを実現する為、以下の点を検討、解決する。

(1) 基礎理論面においては、内部モデル制御あるいは一般化安定化補償器の外乱(外力)推定機能を発展させ、力センサーを必要とせず反力を制御する新しい制御方式を提案し、その特性を解明する。さらに、この問題と並行し、一般にコントローラ次数が高くなるという内部モデル制御の欠点に対し、最近1入出力系の場合のコントローラ次数の低次元化法を申請者らは確立した。この成果をもとに多変数系に対しても適用できる簡易設計法を明らかにし、マイコンなどへの組み込みを容易にできるコントローラの簡略化を行う。

(2) 短下肢義足の構成においては、義足の機構構成やワイヤーの張り方等の課題を、義足の軽量化・小型化の着眼から実行可能な機構を提案・解析・再設計を行い、試作機を完成する。また、足関節まわりの後背屈運動と同時にけり動作を実行する為、足裏への接地面からの反力を推定し、これをワイヤーの張力によってけり力(反力)を制御できる形に、前述の理論を具体化し、試作機にこれをコントローラとして組み込み、実験によりけり動作を検討する。

(3) 実用化に向けて、小型・軽量化、使用者の個体差に対応できる設計、信頼性・安全性向上の為、試作機からの評価データをもとに、ユーザーの立場から意思調査を行い、改善点を獲得し実用化の為の知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 平成21年、平成22年、平成23年度の3年間にわたり、つぎのような計画と方法により実施した。

【平成21年度】

腱駆動型の基本設計及び詳細設計までを行い、動作方法を実現する機構及び構造、動作方式の検討と評価を行い、試作機(一次モデル)の製作を完成する。さらに、モータの選定、駆動回路等の設計を行い、試作機に組み込む。

試作機を制御する制御理論の構築を行い、力制御の可能性をシミュレーションにより検討し、制御系設計を行う。シミュレーション結果をもとに、提案する理論の再検討をする。

【平成22年度】

制御理論については、内部モデル制御及び一般化安定化補償器に関する理論の拡張と発

展をさせるとともに、低次元設計方式の新しい方式の導出とその一般化を目指し、義足の力制御のための新しい制御系設計法を提案する。また、一般の計算機に制御プログラムを実装し、シミュレーション及び試作機を用いた実験によりその有効性を確認した。

試作機については、動作試験、評価試験を行い、試作機の性能を計るためのデータ収集及び解析を行った。さらに、これらの制御結果をもとに試作機の機構構造、駆動回路等の設計の見直しを行い、必要箇所を修正し改善した。とりわけ、反力推定値、外乱の影響による制御性能に係わるデータの解析と評価をし、短下肢義足に最適なけり動作を実現する構造、制御パラメータの調整を行い、次年度に向けたデータを得る。

【平成23年度】

実用化に向けた装着可能な短下肢義足の試作機の完成を目指し、足裏面の反力推定精度、けり動作によるユーザーへの負担、外乱や路面状況による影響などのデータ収集と性能評価を行い、必要な箇所の修正と改善を行う。また、自然な歩行動作を実現するための有効な歩行軌道の与え方を検討する。

つぎに、個体差に応じた対応性を高めるため、義足の設計パラメータと制御系設計パラメータのおおよその関連性を、実験データより分析し、製作やプログラミングに反映させるデータの蓄積を行う。

(2) 研究の役割分担については、つぎのようにした。

- 短下肢義足設計に係わる基本構想、構造設計、駆動回路・電気回路の設計、制御理論の提案、力制御を実現するための新しい制御理論の構築については、小林(研究代表者)が担当した。
- 制御理論のプログラミング、シミュレーションによる評価・解析、実機へのプログラムの実装、試作機における実験データ取得、解析・評価は鈴木(研究分担者)が担当した。
- 試作機の図面作成、加工製作、回路基板の製作に係わる部分は、研究室に所属する大学院生、及び技師(夢考房)の協力の下、作業を進めた。

4. 研究成果

(1-1) 能動型短下肢義足の試作機の構成

安定したけり動作を実現するために、試作する義足はモータを用いて能動的にけり動作を実現する。モータの重量感を減少させるため、モータ位置を義足のパイプアダプダ部分に配置し重心位置を高くする。モータの動力はワイヤー腱駆動を用いて足底に伝達させる。足首の角度を計測するロータリエンコーダのみをとりつけ、他のセンサーは付加と

しない。制御装置は一般的で安価なマイコンを用いる。

試作した義足の外観と義足を装着した様子を図1に示す。底屈動作時はモータが回転し、ワイヤーを巻き取る。これによりモータの動力をけり力に変換する。義足前方にバネを配置し、モータの動力を開放することで背屈動作を行う。また、義足のシステム構成図を図2に示す。ロータリエンコーダの情報はマイコンにて読み込む。マイコン制御プログラムによりモータに必要なトルクを算出し、モータドライバ回路を介して制御を行う。

製作した義足の総重量は2.0[kg]、制御装置とバッテリーは1.8[kg]であり、これらは体に装着することができる。

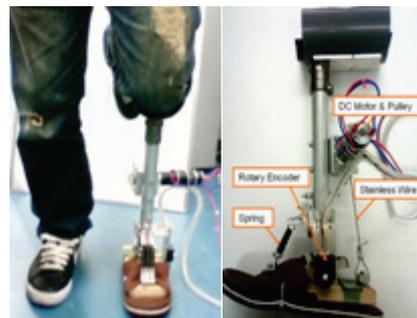


図1：試作機の外観

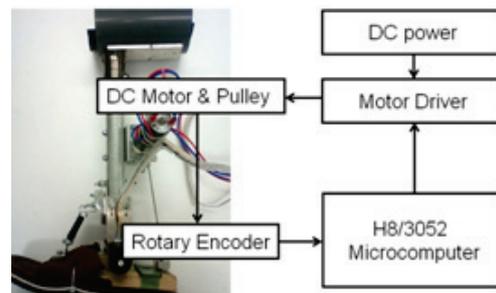


図2：システム構成図

(1-2) 歩行モードの解析

健常者の歩行モードと足首関節の角度の様子を図3に示す。このモードにおいて、足裏面が地面に接地してけり動作を行い、接地面から足裏が離れるモード3の制御方法を提案し、実験によりその有効性を確かめる。

(1-3) 提案する制御方法

図4に提案する制御方法のブロック線図を示す。制御系設計法の特徴、特性については文献3-5に説明があるので参照されたい。提案する制御系は、足裏面が受ける床面からの反力を推定することができる機構となっており、この値をもとにけり動作を実現する適切な入力トルクを計算することができる。

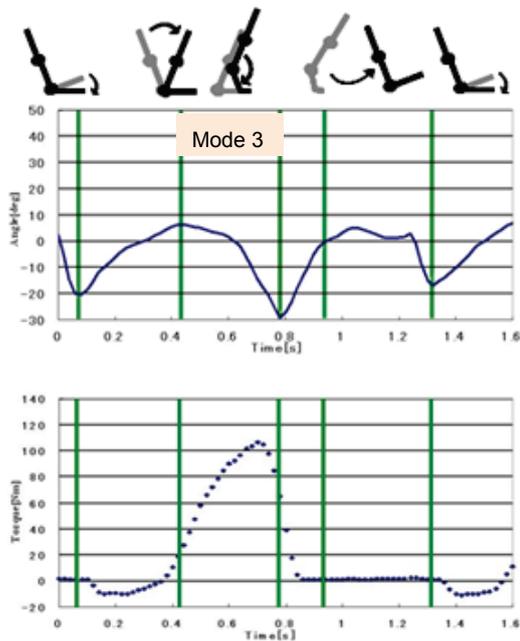


図3：歩行モード
(上が足首角度、下がモーメント)

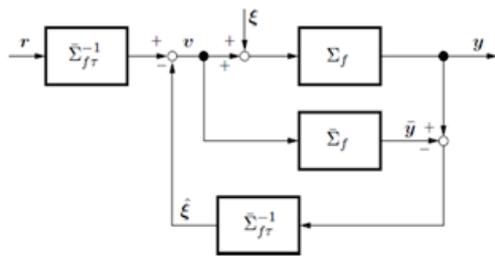


図4：提案する制御方法

なお、図4の制御系は低次元化することも可能であり、次数の高いシステムへの応用も期待される。さらには、研究成果としてはまとめていないが、最小位相系のみならず、非最小位相系の簡易型内部モデル制御へ拡張することができる見通しも得ている。

(2) 実験結果

提案した制御系設計法をマイコンに実装し、適切なけり動作を実現するための力を生成することができるか、歩行速度の違いに対応できるか否かを平地において実験検証した。実験の様子を図5に示す。

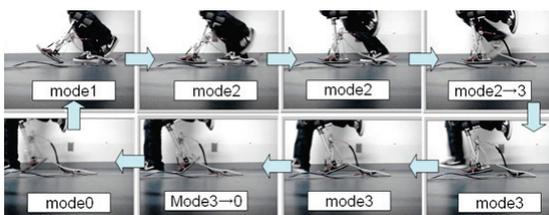


図5：実験の様子

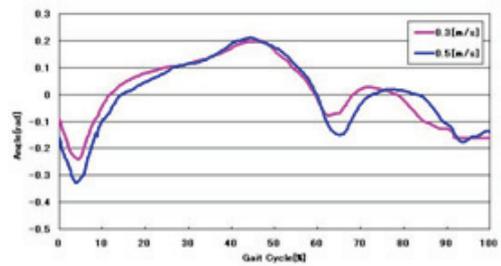


図6-1：健常者の足首角度

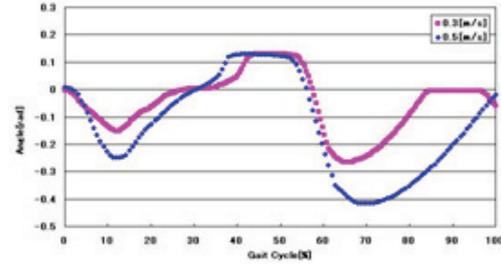


図6-2：試作した義足の足首角度

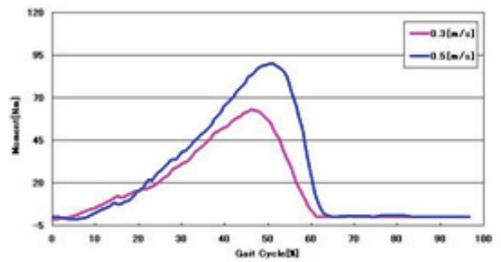


図7-1：健常者の足首関節モーメント

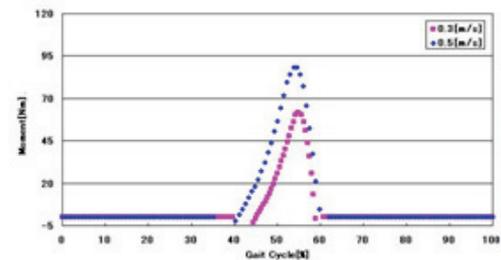


図7-2：義足の足首関節モーメント

試作した義足を装着し、平地歩行したときの足首角度及び足首関節モーメントを示す結果を図6及び図7に示す。また、図の赤色は0.3m/sで歩行したときの結果、青色は0.5m/sで歩行したときの結果である。

健常者は歩行スピードの違いに応じて適切に足首角度を調整することで、足首関節モーメントを生成しけり動作を実現していることが図6-1及び図7-1より読みとれる。

図6-2及び図7-2を見ると、提案する制御方法を実装した試作機は、歩行スピードの変化に応じて足首角度を制御し、適切な足首関節モーメントを生成できていることがわかる。健常者のデータに比べ滑らかでない理由は、モード3のみ制御しているためであり(約40秒から60秒の間)、けり動作を実現しているという意味では、足首関節モーメントの最大値がほぼ同じである点に着目されたい。今後、さらに健常者の歩行動作に近い自然な歩行ができる短下肢義足の提案、及び平地のみならず安定した昇降動作、下降動作が自然にできる義足の制御方法を確立することが今後の課題である。

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6件)

1. R. Suzuki, T. Sawada, N. Kobayashi, E. P. Hofer: Control Method for Powered Ankle Prosthesis via Internal Model Control Design, Proc. the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 237-242, 2011. 査読有
2. R. Suzuki, T. Sawada, N. Kobayashi, E. P. Hofer: Internal Model Control Design for Powered Below-knee Prosthesis, Proc. the XIV International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics, pp. 284-289, 2011. 査読有
3. 鈴木亮一, 伊藤恒平, 菅原映, 小林伸明: 簡易型内部モデル制御の構成法と把持力制御への応用, 電気学会論文誌C, Vol. 130-1, pp. 139-145, 2010. 査読有
4. 鈴木亮一, 谷正史, 池本元紀, 小林伸明: 状態フィードバックによる H^∞ 制御の極限特性についての検討, 計測自動制御学会論文集, Vol. 46, No. 3, pp. 157-167, 2010. 査読有
5. R. Suzuki, I. Kitabayashi, N. Kobayashi, E. P. Hofer: Control System for Lower Limb Function Training Device by Using Internal Model Control Design, Proc. IEEE 11th International Conference on Rehabilitation Robotics, pp. 556-559, 2009. 査読有

[学会発表] (計5件)

1. 澤田隆之, 松本俊哉, 高須賀俊輔, 鈴木亮一, 小林伸明: 内部モデル制御を利用した短下肢義足の足首関節角度制御と階段昇降動作の生成, 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, 2011年12月25日, 京都・京都大学

2. 鈴木亮一, 澤田隆之, 山本匠太, 小林伸明: 内部モデル制御を利用した短下肢義足の角度制御によるけり動作の生成, 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, 2010年12月25日, 仙台・東北大学
3. 澤田隆之, 山本匠太, 鈴木亮一, 小林伸明: 能動型下腿義足のためのけり動作を実現する補助装置の開発, 電気関係学会北陸支部連合大会, 2010年9月11日, 福井・福井高専

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 伸明 (KOBAYASHI NOBUAKI)
金沢工業大学・工学部・教授
研究者番号: 60186757

(2) 研究分担者

鈴木 亮一 (SUZUKI RYOICHI)
金沢工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 50319042