

内3-17

早稲田大学大学院理工学研究科

博士論文概要

論文題目

階段昇降歩行が可能な大腿義足の研究

申請者

藤本 浩志

Hiroshi Fujimoto

機械工学専攻・生物制御工学研究

平成 3 年 12 月

理 1521 (1795)

病気や事故等で下肢を失った障害者にとって、義足は日常生活をおくるうえで必要不可欠な機能代替機器である。しかし現用の大腿義足ではその機能は未だ十分であるとはいえない。

大腿義足に求められる機能としては、外観的に健常者と見分けが付きにくくするコスメティックな機能や、正座や胡座さらに用便動作等の家庭や職場におけるA D L (Activity of Daily Living) を無理なく行える機能が挙げられるが、それ以上に脚が本来有する移動のための歩行機能が重要であろう。しかしながらその歩行機能に限定して考えても、現用の大腿義足では平地での歩行動作のみを対象として設計されているため、装着者は生活空間内に数多く存在する階段や段差において不安定で不自然な歩容を強いられている。このことは、下腿切断者が義足を装着することで歩行のみならず走行や跳躍動作も可能となり、実際にソフトボールや卓球等様々なスポーツを楽しんでいることと対照的である。これは主として義足膝関節の不十分な機能に起因しており、この事実はとりもなおさず、姿勢を維持したり運動したりする際の複雑で巧緻な膝関節機能の重要性を示すものであり、それは同時に膝関節機能を義足で代替することの困難さを示しているといえよう。

現用の大腿義足に関するこれらの現状および切断者からの強い要望を踏まえ、本研究では大腿切断者の歩行機能すなわち移動能力を高めるために、以下に示す機能を有する階段昇降可能な大腿義足の開発を目的とする。

①義足立脚期に、上体を支持しながら上のステップへと伸び上がるためのトルクを発生する機能。

②そのための適切な制御トリガを検出する機能。

①の機能は、適切なアクチュエータによって関節をアクティブに駆動する、換言すれば義足を動力化することによって実現できる。それに加えて②に示したように、義足の動力化に伴い制御手法の構築が非常に重要な課題となる。それは、現用の大腿義足のように受動的な歩行動作のみであれば、駆動源である股関節によって容易に義足を制御できるのに対し、関節がアクティブに動作する場合においては、適切な制御トリガによる適切なタイミングでパワーを付加しなければ、装着者による随意的な歩行動作を実現することができないからである。このように義足に動力を導入するには、メカニズムの実現と制御手法の考案の二つの要素が不可欠である。本研究ではこれらを主たるテーマとして位置づけており、本論文はこれを踏まえて大きく4部から構成される。第1部では平地および階段における健常者の歩行動作を解析し、システム開発のために必要な仕様を、機構的な側面と制御手法的な側面の両面から明確にした。第2部および第3部は上記①、②とそれぞれ対応しており、第1部の結果をもとに機構的な設計および制御手法の検討を行った。最後に第4部で義足システムの評価のために行った切断者による装着実験について述べる。以下、順に各章ごとの概要を述べる。

第1章は序論である。まず現用の大腿義足で取り入れられている様々な機能について述べた。さらに従来行われてきた大腿義足の開発研究について概説し、それらがほとんど受動義足の特性の調節に終始してきたこと。さらに本研究で目標とした大腿義足の動力化に関する研究はほとんど行われてこなかったことを示し、本研究の位置づけおよび目的を明らかにした。

第2章では階段昇降可能な大腿義足のシステム設計に先立ち、健常者が各関節にどのようなトルクを発生させて歩行を実現しているのかを解析した。人体下肢を矢状面上の剛体リンクでモデル化し、ニュートンオイラーの手法を用いて導出した運動方程式による逆動力学解析によって関節トルクやパワーを算出した。各関節位置は2台のカメラを用いた3次元歩行分析システムで採取し、そこから各関節角度を算出した。また歩行路面から受ける床反力はフォースプレートから採取した。階段歩行時の床反力は、フォースプレートの上に階段に相当する段を設置することで計測した。解析の結果、各々の歩行について以下の知見が得られた。

(1) 平地歩行：主として股関節が駆動源として作用し、下肢の動作を生起させるとともに前進する駆動力を発生させる。多方膝関節や足関節には、制動を加えることでなめらかな歩行動作を実現している。

(2) 階段降り歩行：股関節によって下降動作のきっかけが付与された後は、3関節が運動するように互いに抗重力筋群を協調させることで制動を行い、急激な膝折れを防いで滑らかな下降動作を実現している。

(3) 階段昇り歩行：主として下肢の全関節に駆動トルクが発生する。特に大きな関節変化を起こす膝関節については、立脚期の伸展動作時と立脚期終わってから遊脚期にかけての屈曲動作時とに駆動トルクが必要となる。

第3章では第2章の結果を受けて、大腿義足システムの機構に関する基本仕様と制御方法に関する基本仕様とにまとめた。

第4章では、前章でまとめた機構的な基本仕様を受けて行った大腿義足の開発について述べた。上記の基本仕様を満たすために、新たに油圧＝電気ハイブリッドアクチュエータを考案した。本アクチュエータは、油圧駆動系と電気駆動系とで構成される。油圧駆動系は膝関節および足関節の動きに連動したピストンを有し、油圧閉管路で構成される。一方、電気駆動系はDCモータおよびトルクを膝関節に伝達するボールねじ等より構成される。これら両駆動系は互いに補うよう作動し、現用の義足と同様のパッシブな動きを保証しながら、なおかつ必要な時期にのみ速やかに外部パワーを付加できる機能を機構的な工夫により実現している。

第5章では、第3章でまとめた制御手法に関する基本仕様を受けて、歩行状態を定量的に記述できる信号について検討した。本研究で目標としているような動力義足を制御するには、実効性および安全性の面からも装着者の随意的な制御を行なうための制御信号が必要不可欠である。大腿義足と装着者とをマンマシンシステムと捉

えた場合、インターフェイスに相当するのはソケットである。大腿義足を装着して歩行する際には膝関節の制御が必要となるため、通常装着者はソケットを介して義足の状態を検知し、その情報をもとに義足を制御している。これらは両者とも力学的な量で伝達されるため、このソケットに作用する力を何らかの方法で検出できれば、装着者がいかに義足を制御しているかを評価できるのではないかと考えられる。さらにこれらが計測できれば、装着者が断端部に受けている力を直接検出できたことになり、歩行状態の定量的な分析評価ができ、さらに派生的に以下に挙げるような応用や発展性が期待できる。

- (1) 現在義肢装具士の経験と勘によって調節されているアライメントを定量的に評価することができる。なお、これに関しては付録4で詳述する。
- (2) 義足の支柱パイプや継ぎ手部分の強度設計のための指標として利用できる。
- (3) 各種3次元位置計測システムやワークステーションの普及により大腿切断部の形状測定およびデータ処理が容易になりつつある現状を踏まえ、近い将来想定される有限要素法等を用いたソケットの最適形状設計等のための基礎データとして用いることができる。

そこでソケットを介した力情報に着目し、ソケットと義足をつなぐ継手部に6軸力センサを取り付け、軸力の計測を試みた。まず、切断者が日常装着している義足を用いて歩行中に作用する軸力を計測した結果、歩調の変化に応じて軸力パターンにも違いが認められ、歩行状態や装着者がソケットを介して行っている制御操作を定量的に表現できることが確認できた。

第6章では、前章の結果を受けて実際に本システムを制御するための信号について検討を行った。シミュレーション解析の結果から、実際に外部パワーを必要とするのは、階段昇り歩行時において、上体を持ち上げるために義足の膝関節を伸展させる時期と、義足を上の段に持ち上げる際につま先が接触しないよう義足の膝関節を屈曲させる時期である。この各々の時期に対して、適切な軸力を実験により選定した。その結果、伸展トリガとしては前後方向のせん断力、屈曲トリガとしては圧縮力が適切であることが確認できた。またその閾値も予備実験により決定した。

第7章では、本研究で開発した大腿義足の各機能を確認するために行った切断者による装着実験について述べた。実験の結果、所期の目的とおり、平地歩行および階段降り歩行に関しては油圧駆動系により基本的な歩行動作を実現できた。さらに前章の結果を用いて階段昇り歩行を行ったところ、装着者は日頃義足による階段昇り歩行を行っていないにもかかわらず、僅かな練習（約30分）の後には手すりに頼らずに、健常者と同等の歩容での階段昇り歩行を実現することができた。また本研究で提案した制御トリガについても、再現性および有効性が確認できた。

第8章は結論であり、これまでの各章で得られた成果をまとめた。