

	なかむら たかひこ		
氏名	中村 尚彦		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成18年3月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) バイオロボティクス専攻		
学位論文題目	人体モデルに基づく歩行用装着型抗重力筋支援システム		
指導教員	東北大学教授 小菅 一弘		
論文審査委員	主査 東北大学教授 小菅 一弘	東北大学教授 新井 史人	
	東北大学教授 内山 勝	東北大学教授 田所 論	
	東北大学助教授 王 志東		

論文内容要旨

社会の高齢化を背景として、加齢に伴う筋力の衰え等により、自立歩行に困難をきたす高齢者が増加している。近年のロボット技術の発展により、身体機能の衰えた高齢者を対象とした装着型歩行支援システムやパワーアシストシステムが多数提案されているが、提案されているシステムは、筋電信号等の生体信号に基づいて装着者が行っている動作を推定し、支援を実現しているシステムが多い。

生体信号に基づいて動作を推定する場合、生体信号は計測部位や被験者の違い、あるいは同一の被験者であっても体調等により変化すること

や、計測中の汗等により、計測精度が低下するといったことから、正確な計測は容易ではなく、また、計測された信号はノイズを多く含んでいることから、高い信号処理能力が必要となる。さらに、動作に基づいて支援を行う場合、動作と支援を対応づけるデータベースが必要となるため、データベースにある動作しか支援できないといった問題や、動作ごとに支援が異なるため、ある動作からある動作へと動作が切り替わる際に、支援が不連続となりうるといった問題があった。

そこで、本研究は、脚筋力を連続的に補助することで、脚筋力が衰えた高齢者でも、長時間の連続



Fig. 1 Wearable Support System

的な下肢の運動を可能とする、新しい原理に基づく装着型支援ロボットシステムの開発を目的として行ったもので、本論文は全編8章よりなる。

第1章では、高齢者用の装着型支援システムが必要となる背景について考察するとともに、本研究の目的について述べる。また、本研究で開発する装着型支援ロボットシステムが対象としている、“日常生活における各種動作の支援”、“身体機能を可能な限り維持するためのアシスト型運動支援”および“生き活きとした動作を可能とする動的な運動支援”の必要性について説明する。最後に、これまでに開発されている装着型支援システムを“装着型運動能力拡大システム”、“装着型運動機能回復支援システム”、“装着型運動機能補助システム”に大別し、紹介するとともに、提案するシステムの位置付けについて説明する。

第2章では、まず、運動の重要性を明確にするために、歩行をはじめとする運動が健康に与える影響について述べる。次に、高齢者体験および高齢者と一般成人との歩行中の筋活動の比較を通じて、身体機能が衰えた高齢者への支援の重要性とその必要性を確認する。さらに、現行の運動支援機器のなかで最も広く普及している歩行補助具について、その支援メカニズムと有効性、および問題点について解説する。最後に、“推定された動作に基づいて支援量を決定するのではなく、意図した運動を遂行する際に必要となる関節モーメントの一部に基づいて支援量を決定する”という、本論文で提案する装着型支援システムのコンセプトと、本支援システムが対象としているユーザについて考察する。

第3章では、本研究で用いる人体の近似動的モデルを提案し、実験により提案する人体モデルの妥当性を確認する。また、運動の人体への負担を推定するために、関節に作用する関節モーメントに着目し、提案する人体モデルに基づき、動力学的に関節モーメントを算出する手法を提案する。本モデルは、意図した運動を遂行する際に必要な関節モーメントを、筋電信号のような生体信号を用いることなく推定するために利用する近似動的モデルであり、歩行運動に対して、十分な精度で関節モーメントが推定

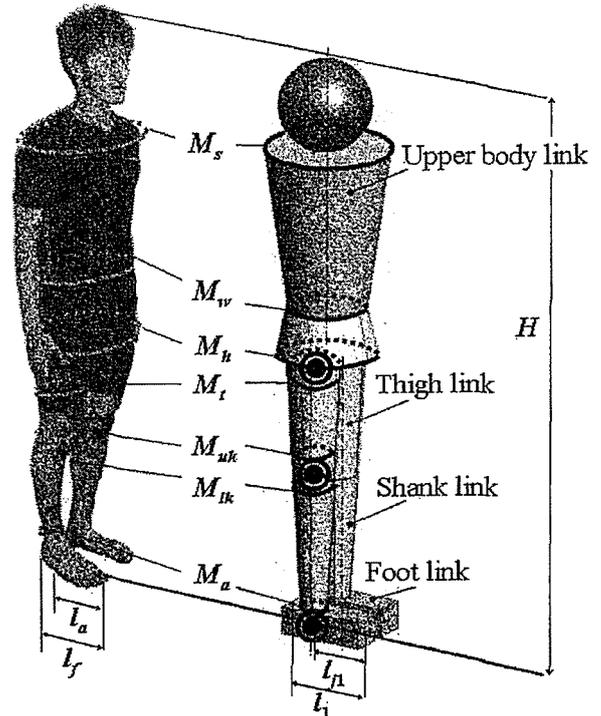


Fig. 2 Simplified Human Link Model

できることを示す。

第4章では、まず、運動を妨げず、かつ安全な装着型脚筋力支援デバイス、“Wearable Walking Helper”を開発するために、支援対象となる膝および股関節の構造について考察する。次に、運動中の膝および股関節の運動範囲、運動速度及び関節モーメントを算出し設計要求を決定する。最後に、開発された Fig. 3 に示す脚部筋力支援デバイス、“Wearable Walking Helper”を提案する。

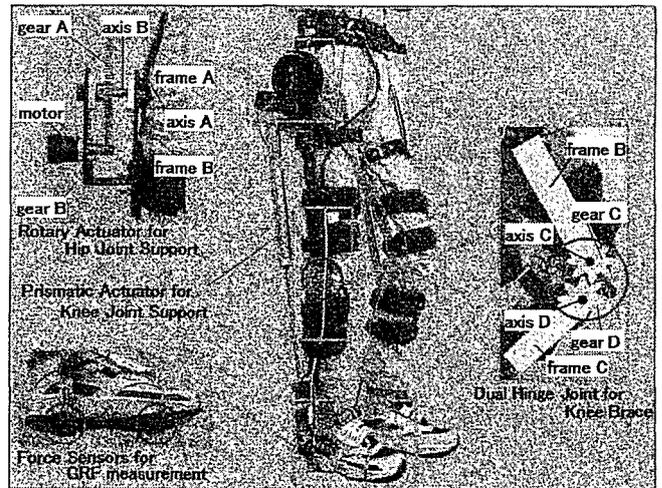


Fig. 3 Proposed Wearable Walking Helper

第5章では、歩行補助具の使用により抗重力筋の負担が緩和され長時間の自立歩行が可能となることから、抗重力筋の負担を軽減することを目的とした支援アルゴリズム、“Model-based control algorithm for Anti-Gravity Muscles Assist (MAGMA)”を提案する。抗重力筋が主に姿勢を保持するために働く筋であることから、ここで提案するアルゴリズムは装着者の姿勢に基づいて支援関節モーメントの設計を行う。また、提案した支援アルゴリズム“MAGMA”を装着型支援デバイス、“Wearable Walking Helper”に適用し、被支援者への肉体的負担に対する検証実験を行い、動作の推定や生体信号を用いることなく支援を実現し、見かけの最大筋力や筋持久力を増大させることを示す。さらに、膝関節まわりのみでなく、膝関節まわりおよび股関節まわりの両方を支援したほうがこの傾向が強いことも示す。

第6章では、“日常生活における各種動作の支援”の実現を目的とし、歩行のような立脚期、遊脚期が継続的に切り替わる運動においても連続的な支援を可能とするための支援アルゴリズム“Model-based control algorithm for Anti-Gravity Muscles Assist with Ground Reaction Force feedback (MAGMA-GRF)”を提案する。床反力を用いることで脚の状態が立脚、遊脚と切り替わっても、モデルを切り替えることなく連続的に関節モーメントの算出が可能となることから、ここで提案するアルゴリズムでは床反力を用いて支援関節モーメントの設計を行う。

提案した支援アルゴリズム“MAGMA-GRF”を装着支援デバイス“Wearable Walking Helper”に適用し、支援の連続性および被支援者への肉体的負担に対する検証実験を行う。検証実験によりここで構築したシステムが、脚の状態のみならず、Fig. 4 に示すように装着者の運動が遷移しても、モデル

の切り替えなしに滑らかに支援関節モーメントが生成可能なことを示す。また、そのようにして生成された支援関節モーメントが下肢の筋肉に対する負担を効果的に軽減するだけでなく、運動強度の減少も可能なことを確認する。

第 7 章では、“生き活きとした動作を可能とする動的な運動支援”の実現を目的とし、全身協調動作を考慮した支援を行うための新しい動的支援アルゴリズム，“Model-based control

algorithm for Anti-Gravity Muscles Assist with Dynamics Terms (MAGMA-DynamiTe)”を提案する。

人間は、日常生活において、全身の各部位を協調的に動かすことにより、特定の部位に負担が集中することなく意図した運動を実現していることから、ここで提案するアルゴリズムでは、全身協調動作に対応するために、関節モーメントの重力項のみならず、慣性項やコリオリ項も含めて支援関節モーメントを決定する。

また、提案した支援アルゴリズム“MAGMA-DynamiTe”を装着型脚筋力支援デバイス“Wearable Walking Helper”に適用し、日常的な運動の中で最も肉体的負担の大きいものの一つと考えられる起立動作を例に取り、動作中の筋の負担に対する検証実験を行い、抗重力筋の負担を効果的に軽減可能なことを確認する。

第 8 章では、本論文をまとめた後、今後の展望について述べる。

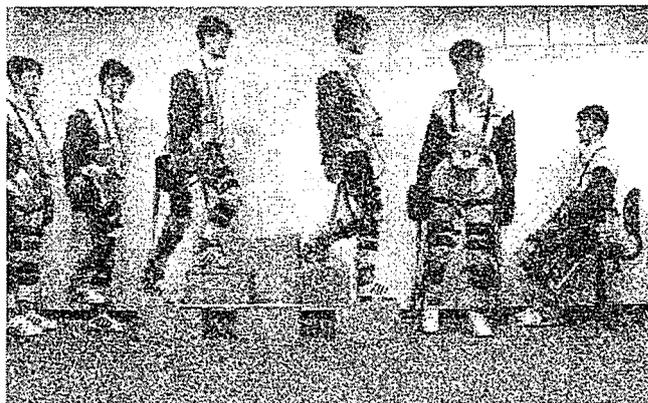


Fig. 4 Typical Motion Patterns for ADL

論文審査結果の要旨

社会の高齢化を背景として、高齢者を対象とした装着型歩行支援システムやパワーアシストシステムが多数提案されているが、提案されているシステムは、筋電信号に基づいて、筋肉の活動やユーザの運動パターンを予測し、歩行支援を実現しているシステムが多い。しかし、筋電信号は正確な計測が難しく、また、電極の配置や計測時のユーザの状態に依存するので、可能ならば筋電信号を用いずにシステムを構築することが望ましい。本論文は、筋電信号を用いずに運動の支援が可能な装着型支援システムを提案するとともに、その制御方法について論じたもので、全編8章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、従来から用いられている歩行補助具とそのメカニズムを紹介するとともに、それらの原理と問題点について考察し、本論文で提案する装着型歩行支援システムのコンセプトと、それが対象とするユーザについて述べている。提案する装着型歩行支援システムのコンセプトは、従来のシステムが持つ問題点を解決する独創的なコンセプトである。

第3章では、人体の近似動的モデルを導出し、そのパラメータ同定法について考察し、実験によりモデルの有効性を確認するとともに、導出した近似動的モデルに基づく、運動中の人体の関節モーメント推定手法を提案している。提案されている手法は、運動中の人体の負担を定量的に評価するための実用的な手法である。

第4章では、支援対象となる膝関節および股関節の構造について考察し、両関節の動作範囲や角速度、必要関節モーメント等を考慮して開発された装着型抗重力筋支援デバイスを提案している。これは安全かつ適切に人間の運動を支援することを可能とする、独創的な成果である。

第5章では、開発された支援デバイスを用いて、抗重力筋の負担を軽減することを目的とした支援関節モーメント制御アルゴリズムを提案するとともに、実際に支援デバイスを用いて実験を行い、その有効性を確認している。これは、筋電信号を用いずに歩行支援の実現を可能にする実用的な手法である。

第6章では、歩行時のように、立脚期と遊脚期が交互に切り替わる運動においても、床反力を利用することによって、アルゴリズムを切り替えることなく支援が可能な、新しい関節モーメント制御アルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を確認している。これは、人間の連続的な運動の支援を、統一的に実現する画期的な手法である。

第7章では、全身の各部位を協調的に動かすことにより、特定の部位に負担が集中することなく全身の運動を実現することを目的として、起立動作を例に取り全身協調動作について考察するとともに、全身協調動作を考慮した支援を行うための新しい動的支援アルゴリズムを提案し、実験によりその有効性を確認している。これは実用上有益な成果である。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、人体の近似動的モデルを用いることによって、筋電信号を用いずに歩行支援が可能な装着型支援システムを提案し、その制御方法について論じたもので、機械工学、ロボット工学、および福祉工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。