

称号及び氏名 博士（工学） 高井 飛鳥

学位授与の日付 平成 27 年 3 月 31 日

論文名 「個人に適合した身体負荷の低減と残存機能の活用が可能な立ち上がり動作支援に関する研究」

論文審査委員 主査 伊藤 智博

副査 杉村 延広

副査 菊田 久雄

副査 新谷 篤彦

論文要旨

日常生活動作である起立や歩行、また自由な活動において、筋力や平衡機能などの身体機能が低下していることで様々な制限が加わり、生活の質（QOL）が低下した高齢者が多く存在する。このような高齢者は、活動量が減少して廃用状態となり筋が萎縮する、また動作時に転倒するなどして身体機能がさらに低下すると言われている。そして自立度が低下してくると、高齢者は要支援・要介護認定を受けて介護サービスを利用するなどし、高齢者人口が増加傾向にあることも加わって、今後さらに介護費用等が増加していくと予想される。このように日本を始め超高齢化社会にある成熟国家の財政を圧迫する社会問題へと発展していくことから、近年、健康・介護分野でロボット技術を導入した新産業の創出が図られている。例えば、経済産業省ロボット介護機器開発・導入促進事業では、屋内外での移動を支援する移動支援機器や、車いすやベッド間の移動を支援する移乗介助機器を含む 8 項目の重点開発機器を定めるなど、実用化に向けた試みが多くなされている。

一方、介護施設などでは職員の多くが起立動作の介助の際に腰痛を訴えるなどしており、国内外において人力で介助を行わないことを定めるノーリフティング・ポリシーの導入が進んでいる。そのため高齢者等をリフトで吊り上げることで移乗介助する福祉器具などが多くの介護施設や住宅に導入されたが、扱いの手間などから使用が徹底されていないのが現状である。またこの他にも多くの移乗介助装置が開発されたが、いずれも人による介助に比べて優れているとは言い難い。従来の起立動作支援装置では、健常者の動きを分析する、または介助者の動きを分析するなどして、これらの動きの再現を試みる装置が多く見られる。また装置を使う対象者として、主に介助を必要とする高齢者等とその介助者としているが、実際には高齢者等の身体の個人差や装置使用中の身体機能の活用についてはあまり議論が成されてこなかった。その結果、介助者の身体負荷は軽減されるものの、装置を使用することで高齢者等が不自然な姿勢で立ち上がるなどの報告や、身体機能がさらに低下する事への懸念、装置を購入したが使用しないという実態が散見されるに至ったと考えられる。

以上の事から、高齢者等の身体や起立挙動の個人差を考慮し、最小限の身体負荷となる最適な姿勢で立ち上がり可能な装置の開発が望まれていると考えられる。また、装置で起立動作を代替せずに、高齢者が身体機能を使用することで、一人では出来なかった起立動作が可能になること

は、自立度の高い高齢者数を増やしていくためにも非常に重要であると考えられる。また、身体機能がさらに低下することを少しでも遅延できる可能性もある。したがって本研究は、高齢者個人に適合して、支援を受ける時の身体負荷を低減し、なおかつ残存機能を活用することが可能な支援装置を実現するための一つの手法を提案する目的で行われたものである。このようなシステムが、日常生活活動（ADL）と QOL を高める一助となって、前述の社会問題の解決に寄与することも可能であると考えられる。

本研究は、6章で構成される。

第1章では、超高齢化社会を迎える日本の要介護高齢者数の増加や、それによる医療費負担等の増加傾向について概説し、QOL 向上に向けた取り組みや介護職員の労災被害を軽減するための試みなどについて述べる。これらの問題の解決のために注目されている起立動作支援装置について整理し、その支援効果や特徴を示すとともに、課題について指摘する。そして個人々の身体特徴に適應する事と残存機能を活用することの重要性を示す。最後に本研究の目的である個人々の最適化された動作を実装した起立動作支援装置について述べる。

第2章では、起立動作の動的挙動解析を行う。人体を数値モデル化し、人体に加わる外力を考慮した逆ダイナミクス解析について述べ、これにより動的な身体負荷を導出し評価することができることを示す。解析の結果、同じ高さの椅子から立ち上がる場合でも、その姿勢を変えると身体負荷が異なることを明らかにする。また起立動作パターンは、個人々の身体機能の変化に応じて変化することから、起立動作パターンは変動的で微細な違いが身体に及ぼす効果が高いことを明らかにすると共に、この着眼点を装置に利用する価値について述べる。運動方程式の外力項に座面反力を考慮したモーメントを代入することにより、下肢関節モーメントの推定の正確度が既往研究よりも高くなることを示す。

第3章では、既存研究では特定されていなかった身体負荷を定量的に評価する物理量を、個人の挙動特徴に対応させる必要があることを指摘し、統計学的手法により個人毎に評価指標を選定する方法について述べる。定量化する指標値はこれまで既往研究例ごとに異なっていたが、被験者ごとでは同じ物理量（膝関節モーメントの最大値など）が用いられてきた。回帰分析を用いた結果、複数の被験者それぞれに対して、座面高と強い相関を持つ特定の物理量（関節角速度および関節モーメントなど）が存在することを明らかにする。このような座面高と強い相関を持つ物理量を用いることで、身体負荷を座面高に置き換えて表現できるようにもなり、使用者にも感覚的に伝わりやすくなる付随的な効果も得られる。

第4章では、既存の装置では健常者の自然な起立動作を手本とする傾向があったが、多様な起立動作の姿勢の中から最適な姿勢を選び出す必要性について指摘し、自然な起立動作よりも身体負荷を低減できる最適起立動作を遺伝的アルゴリズムを用いて探索する方法について述べる。身体負荷を表す指標値が最小となる起立動作姿勢は、被験者が現実的に取りえる範囲の姿勢で、かつ自然な起立動作よりも負荷が低減されることを示す。本研究の手法は、既往研究に比べて、解析モデルに付加すべき制約条件が少なく、また下肢関節の角速度から姿勢を唯一に指定できる点において優れている。また、そのようにして求められた最適起立動作と自然な起立動作との差異を表示し、軌跡どおりに動くための指示などを表示する仕組みの重要性を示し、高齢者が一人でも起立動作訓練を行えるインターフェースについて提案する。

第5章では、既存の起立動作支援装置に対して、個人に適合した身体負荷の低減と、残存機能の活用が可能な支援を実現する装置の設計概念を示す。次に、簡易型支援装置を用いて健常者を受動的に支援することで、使用者の力と支援の力を合わせて起立するという、不足を補う方式を提案し、そのような装置の実現可能性を検証する。また最適起立動作に身体が沿うように装置を制御することで、起立動作中を通して負担を低減できる可能性を明らかにする。さらに、身体負荷を最小とする最適起立動作軌跡に沿って支援する装置について、それを実現する機構を検討し、個人に合わせて設計する手法と試作機の外観などを述べる。最後に、前述の設計概念を実現するための磁気ダンピング効果と構造的柔軟性を併せ持つソレノイド式直動型アクチュエータについて、既存のアクチュエータとの特徴や相違点について整理し、設計概念を述べる。また、試作機

への秀れた適用性を示す。

第6章では、本論文の全体的な総括を行い、得られた知見から、今後実用化されるべき次世代の起立動作支援システムの設計について提言を行う。

本研究の位置づけは、個々人の身体に適応すること、最小限の負荷で起立すること、残存機能を活用して支援装置で起立に不足する力を補うことの3つを同時に可能にする装置を開発するための必要要件を解明することと言える。これまでの起立動作支援装置では、動作中の動的負荷や身体の個人差を考慮せずに、起立動作を全面的に介助していた。そのため、起立するという目的は達成されるが、その後の活動を行うための身体機能を維持し続けることは難しい。これに対して、本研究は、動作中の動的負荷や身体の個人差を考慮しつつ、起立動作を行うために不足する力を補うことで、残存する身体機能を活用できる起立動作支援装置の可能性を示したものである。

本研究で示した装置は、健常者に対しては装置が無い場合に比べて身体負荷を低減でき、高齢者に対しては残存する身体機能を活用できる点で有用である。また、インターフェースと支援装置からなるシステムにより、最適起立動作を習得する訓練の一助となることを示すことができたものとする。本研究の提案するシステムが実用化され、身体機能の低下した高齢者のADLとQOLを高める一助となることを期待する。

審査結果の要旨

本論文は、高齢者が椅子から立ち上がる動作を支援できる装置について研究したものであり、個人の身体機能に適合させ、かつ残存する身体機能を活用することにより、立ち上がりの負担軽減を図るとともに身体機能の回復も狙った支援装置の開発に関するもので、以下の重要な成果を得ている。

- (1) 個人に適合した人体挙動の数値解析モデルを構築し、座面反力を考慮した動力的な挙動解析手法を提案した。提案手法は、先行研究の手法よりも、支援を受ける時の関節モーメントの推定を高精度に行えることを示した。
- (2) 立ち上がり動作計測実験を実施し、そこに統計学的分析手法を適用して、椅子の座面の高さとの相関関係を持つ物理量を個人毎に特定した。立ち上がりにくさなど客観的評価が困難な身体負荷を、ここで特定した物理量を指標値として用いることにより定量的に表現できることを明らかにした。統計学的根拠に基づいた提案手法を適用することにより、身体負荷の低減を図りうる有効な起立支援を行うに際し、支援装置駆動時に評価指標とすべき物理量を個人の身体機能に適合して選択することができることを示した。
- (3) 最適化計算手法を導入することにより、身体負荷の指標値が最小となる時の姿勢を特定し最適な起立動作を導出する手法を提案した。提案手法によれば、多様な動作パターンの中から、個人が負担低減を希望する関節における負荷を低減でき、なおかつ、自然な起立動作と比較してより身体負荷の少ない起立動作を導出することに成功している。また、導出した最適動作と実際の起立動作の差異をモニター画面に表示し、リハビリを効果的に行うシステムを構築している。
- (4) 個人の身体的特徴に適合した最適動作軌跡においては、矢状面から見た膝関節中心は、いったん前方へ移動してその後後方へ戻るような複雑な円弧軌跡となり、股関節中心の移動軌跡もS字状軌跡となる。この軌跡に沿って座部を動かし、必要な支援力を付与するための構造的柔軟性を持つ一軸制御による直動型駆動機構を考案し、それによる椅子型起立動作支援装置を試

作した。

以上の諸成果は、大腿部と下腿部の運動連鎖を適切に行うことにより、余分な身体負荷を低減しつつ残存する下肢の力を活用できる最適起立動作を可能とする立ち上がり支援装置の設計指針を示したものであり、本分野の学術的・産業的発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査の結果から、申請者に博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。