

起立動作中の筋力モビリティ楕円体を考慮した支援椅子の座面制御法の開発

東京大学 ○早瀬瑞華, 菊地謙 理化学研究所 古川淳一朗, 井藤隆秀
京都大学 森本淳, 中村裕一 東京大学 淺間一, 山下淳, 安琪

1. 序論

現在の日本では、65歳以上人口が総人口に占める割合の増加傾向が続いている。今後も増加傾向は続くと考えられており、介護者が要介護者に対して不足することが推測できる。そのため、高齢者自身で行動することができるように身体機能の維持・改善をすることが必要である。日常生活の中でも、起立動作は起点となる動作であり身体機能低下の予防として起立動作を行うことは重要である。そのため、起立動作を支援する機器が開発されてきた。

起立支援機器の中でも、装着が必要ない機器として椅子型機器が挙げられる。黒田らが開発した座面が前後上下方向に動作する支援椅子では、若年者・高齢者の起立動作中の大転子の軌道を再現することで、支援を行った[1]。膝の伸展に寄与する外側広筋の筋活動は減少したが、前方への転倒を抑制するために大殿筋、大腿二頭筋や腓腹筋に関しては、筋活動が増加した。起立動作には個人差があるため、複数人から計測した大転子の軌道では、個人に合わせた支援を行うことができなかつたと考えられる。そこで、身体の移動方向に合わせた制御手法を提案することで解決できる可能性がある。筋力モビリティ楕円体[2]を股関節において用いて若年者と高齢者の筋張力による運動方向の違いを解析した結果、全身の伸展時に楕円体の長軸方向が有意に異なっていることが示された[3]。しかし、股関節の筋力モビリティ楕円体の算出には高齢者の起立動作の特徴である上体の角度が直接的に考慮されていない。そこで本研究では、起立戦略の異なる若年者と高齢者における起立動作を、重心の筋力モビリティ楕円体という観点から調査し、その結果を用いて、椅子型支援機器[1]の座面の制御法を開発する。

2. 手法

2.1 筋力モビリティ楕円体の算出

ヒトの筋骨格系は疑似的にリンク機構の運動とみなすことができる。リンク機構の操作性を評価する手段の中でも筋力を入力とする筋力モビリティ楕円体[2]について着目する。筋力モビリティ楕円体とは、筋が発揮する張力の2乗和が一定であるという条件の下で、実現される作業空間加速度的ことである。

股関節の筋力モビリティ楕円体の解析[3]と同様に、4リンク11筋の2次元モデルを使用し、求めた4関節の角加速度に対してヤコビ行列 $J(\theta) \in \mathbb{R}^{2 \times 4}$ をかけて重心の加速度を算出する。

2.2 若年者と高齢者の筋力モビリティ楕円体の解析

若年者と高齢者の起立動作を計測し、筋力モビリティ楕円体の解析を行う。股関節の筋力モビリティ楕円体においては、姿勢による影響のみ解析していた。しかし、高齢者の特徴としては、起立時の前傾角度が大きいことだけでなく、筋力が衰えていることが挙げられるため、解析項目は、1. 姿勢による影響に2. 筋力の衰えによる影響を加えた2項目とする。

2.2.1 解析1: 姿勢による影響

計測した起立動作中の姿勢に対して、各リンクの長さ・質量や最大筋張力などのパラメータが同じ筋骨格モデルを用いて筋力モビリティ楕円体を算出する。高齢者は若年者と比較して起立動作の動作時間が長く、動作開始から離殿までの時間の動作全体に占める割

合が増大していることが報告されている[4]。高齢者と若年者間で比較をするために、起立動作のフェーズごとに区切り解析を行う。

2.2.2 解析2: 筋力の衰えによる影響

筋骨格モデルにおいて、各リンクの長さ・質量と最大筋張力はSIMM (MusculoGraphics 社) を用いて個人ごとに推定した値を用いる。高齢者は膝の伸展筋が若年者と比較して衰えることをモデルにおいて再現するため、膝の伸展に関する大腿直筋・外側広筋の膝関節に対するモーメントアーム長を変化させる。モーメントアーム長を変化させることで、起立動作中の関節角度は同じであるが、筋力が変化した場合、筋力モビリティ楕円体の長軸方向と扁平度と与える影響を解析する。

2.3 支援機器の座面制御法

2.2節で解析した結果をふまえ、図1に示す座面が前後上下方向に動作する椅子型支援機器において支援を行う。座面の中には6軸力学センサ (Leprino 社 FFS080YS102A6) を埋め込んでおり、座面にかかる力が計測可能である。高齢者の起立動作中の筋力モビリティ楕円体の長軸方向を若年者に近づけることでより鉛直方向に力を発揮しやすい姿勢に導くことが可能であると考えられる。

本研究では、膝伸展筋が衰えた高齢者の起立動作を膝伸展筋が衰えていない状態の起立動作に近づけることを想定した支援を行う。膝伸展筋の衰えを再現するために健康若年者である実験参加者の大腿部に重りをつけて起立動作を行う。このときの動作を計測し、筋力モビリティ楕円体を算出する。筋骨格モデルは、最大筋張力はすべての実験参加者で同一とし、リンク長・質量のみ個人に合わせる。重りをつけた条件では、大腿部の質量を重りに合わせて増加させる。また、筋が衰えていない時を想定した理想状態として、重りを外した状態で計測した起立動作の筋力モビリティ楕円体を算出する。座面にかかる垂直方向の力が初期値の85%となるときに支援を開始する。支援方向は、支援開始タイミングにおける重りをつけた状態の筋力モビリティ楕円体の長軸ベクトルを \mathbf{a} と理想状態の長軸ベクトルを \mathbf{b} とすると

$$\mathbf{b} - \mathbf{a}, \quad (1)$$

の方向とする。理想状態との差分方向に離殿前から支援を行うことで、動作の改善が可能になると期待される。

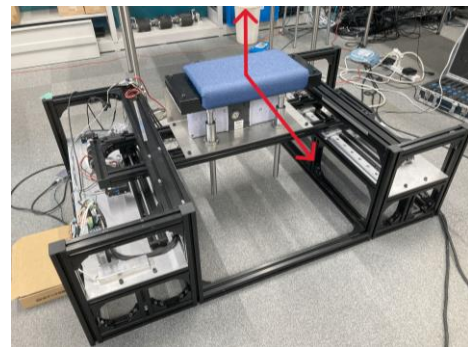


図1 椅子型支援機器

3. 若年者と高齢者の筋力モビリティ楕円体の解析

3.1 起立動作データの計測

計測参加者は健康若年者6名(男性:25.0±3.0歳)と健康高齢者7名(男性:65.7±2.5歳)である。腕を前に組むことのみを指示し、自由に起立を行う様子をモーションキャプチャ(MotionAnalysis社MAC3D)で計測した。また、座面に床反力計(テック技販社TF3040)を設置し、起立のタイミングを計測した。

3.2 結果

3.2.1 解析1:姿勢による影響

フェーズごとの筋力モビリティ楕円体の長軸方向の角度の平均を図2に示す。エラーバーは標準誤差を示す。重心においては、前傾が行われるphase1において特に有意差(p<0.01)が見られた。全体の傾向としては股関節において[3]と同様に筋が力を発揮しやすい方向は高齢者の方が上向き成分が弱いことが明らかになった。

3.2.2 解析2:筋力の衰えによる影響

膝の伸展筋のパラメータを変化させた際には、筋力モビリティ楕円体の長軸方向には有意な差は見られなかったが、楕円体の形状について差が見られた。そこで図3にフェーズごとの楕円の扁平度を示す。高齢者・若年者ともに膝伸展筋が弱まった条件において真円に近づいており長軸方向の操作性が低下していることが示された。

4. 椅子型機器による支援実験

4.1 実験方法

実験参加者は健康若年者1名(男性:23歳)である。モーションキャプチャ(Qualisys社Theia3d)で起立動作を計測し、筋電計(Cometa社Wave Infinity Mini)で外腹斜筋、脊柱起立筋、外側広筋、大腿直筋、二頭筋長頭、大殿筋、前脛骨筋、腓腹筋の8筋の活動を計測した。負荷の有無、支援の有無を組み合わせた4条件で起立動作を行った。負荷あり条件では両足に3kgずつ重りを巻き付けて起立動作を行った。

4.2 結果

負荷あり条件下で支援ありと支援なしを比較したところ、楕円の長軸方向は、支援あり条件では支援なし条件と比較して下向き

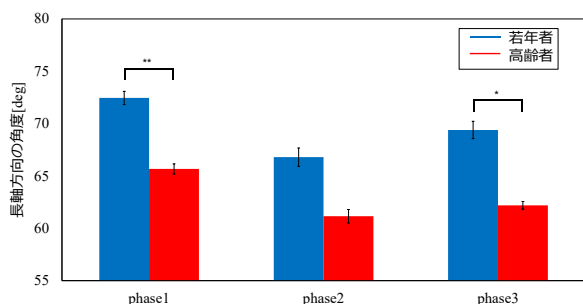


図2 フェーズごとの長軸方向の平均角度

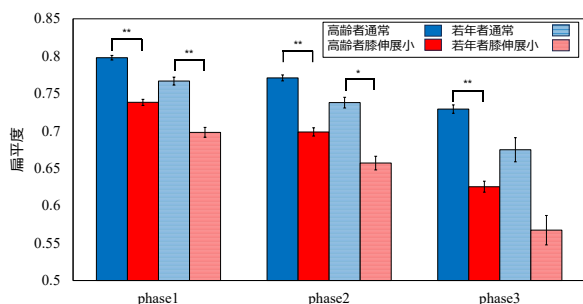


図3 フェーズごとの扁平度

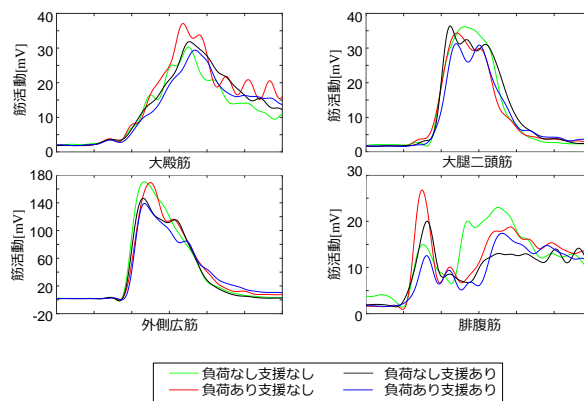


図4 主な筋の筋活動

の傾向となった。支援なし条件と比較して、支援あり条件では、支援開始前から前傾が強く行われていたためである。

筋活動について主な結果を図4に示す。膝の伸展筋によって発揮される方向の力が支援椅子によって低減されたため、支援あり条件において膝の伸展筋である外側広筋の筋活動が低下した。また、先行研究においては前方への転倒を抑制するために大殿筋、大腿二頭筋、腓腹筋に関して筋活動の増加が見られたが、いずれの筋も負荷あり支援あり条件において支援なし条件よりも筋活動が低下した。

5. 結論

本研究では、若年者と高齢者の起立動作を筋が力を発揮しやすい方向という観点で比較し、座面が前後上下方向に動作する支援椅子を用いて理想状態との差分ベクトル方向に基づいて支援する手法を提案した。若年者において大腿部に負荷をかけることで筋が衰えている状況を模擬し、支援を行った。負荷をかけない状態との比較により、提案手法は筋が衰えた状態を模擬した起立動作に対して補助をすることで筋活動を減少させることが確認できた。また、支援に抗うような筋活動も見られなかった。

今回は理想状態を実際に計測して支援方向を定めたが、実際の高齢者である場合は理想状態を計測することはできない。今後の課題としては、理想状態での起立動作の推定が挙げられる。

謝辞

本研究はJSPS 科研費JP22H01452の助成を受けたものである。

参考文献

- 黒田大登, Qi An, 山川博司, 下田真吾, 古川淳一郎, 森本淳, 中村裕一, 倉爪亮: “ヒトの起立動作を支援する椅子の開発-ジップチェーンアクチュエータを用いた座面の移動機構-,” 第39回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2021.
- 辻敏夫, 伊藤宏司, 長町三生, 池本貴志: “筋運動制御系のインピーダンス調節機構と手先操作性,” 計測自動制御学会論文集, vol. 24, no. 4, pp. 385-392, 1988.
- 早瀬瑞華, 菊地謙, 古川淳一郎, 井藤隆秀, 森本淳, 中村裕一, 浅間一, 山下淳, 安琪: “加齢が起立動作中の筋力モビリティ楕円体に与える影響,” 第24回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論文集, pp. 3004-3006, 2023.
- Samuel H.L. Smith, Peter Reilly, and Anthony M.J. Bull: “A musculoskeletal modelling approach to explain sit-to-stand difficulties in older people due to changes in muscle recruitment and movement strategies”. *Journal of Biomechanics* 98, p. 109451, 2020.