

〔日本学術振興会 科学研究費助成事業・基盤研究 C〕

健康長寿社会のための筋骨格モデルにもとづくエクササイズの GUI デザイン

平田一郎, 福井 航, 後藤泰徳

1 目的

本研究の目的は、「健康寿命の延伸」および「高齢者の QOL (Quality of Life) 向上」を目指し、高齢者が自発的に運動や外出へと取り組むよう促進する方策を検討することである。身体活動量の増加は、生活習慣病の発症や加齢に伴う身体機能の低下といったリスクを軽減する効果が期待されており、健康維持・増進の観点からも重要である。そこで本研究では、日常生活における行動・運動情報に基づき、筋活動を可視化する手法の確立を目指した。

2 研究方法

対象者の日常的な行動に即した健康増進メニューを提案するため、日常動作に基づく筋活動量の推定手法の確立を図った。これを実現するため、以下の5つの内容について取り組んだ。

1. 姿勢動作に基づく筋活動量の計測
2. 筋活動量のシミュレーション
3. 日常行動の簡易計測方法
4. メンタルモデルダイアグラムによる日常生活の分類
5. 日常行動における筋活動量の可視化

2.1 姿勢動作に基づく筋活動量の計測

歩行能力は高齢者の日常生活動作 (ADL: Activities of Daily Living) の維持に不可欠な身体機能の一つであり、その低下は転倒リスクの増大や社会的孤立、さらには要介護状態への進行といった深刻な健康問題と強く関連している。特に、歩行速度は高齢者の身体的・認知的機能を反映する客観的な指標として注目されており、多くの疫学的研究において、歩行速度の遅延は全死亡率や疾患発症リスクとの相関があることが示されている。本研究では、歩行動作に着目し、「歩行姿勢の違いが筋活動量に与える影響」を明らかにすることを目的とした。特に、歩行姿勢を高齢者の健康状態を推定するための指標として活用可能であるかを検討するため、歩幅や体幹の傾きといった姿勢の変化が筋活動に及ぼす影響を、表面筋電図 (sEMG: surface Electromyography) を用いて定量的に計測した。実験では、複数の異なる歩行姿勢 (通常歩行、歩幅を広げた歩行、背筋を伸ばした歩行など) を被験者に実施してもらい、大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭の4部位に装着した表面筋電センサにより筋活動量を記録した。取得された筋電図データは、筋活動の振幅 (RMS 値) を用いて定量化し、姿勢ごとの活動レベルの差異を比較・分析した。

2.2 筋活動量のシミュレーション

表面筋電図 (sEMG) は、筋肉の電氣的活動を直接的に計測できる有効な手段であるが、測定対象となる筋部位にセンサを装着する必要がある。このため、対象者への身体的負担や装着位置のばらつき、計測の再現性確保といった課題があり、日常的あるいは広範囲な社会実装には不向きである。そこで本研究では、センサを装着せずに筋活動量を推定する方法として、筋骨格シミュレーションソフトウェアを用いた解析を試みた。この手法では、人体の骨格構造と筋・関節に関する力学的特性をモデル化し、動作データを入力とすることで各筋群の活動量、関節モーメント、エネルギー消費量などを数値的に推定することが可能である。特に、解析対象の筋にセンサを貼付せずとも、関節角度や加速度などから内

部筋活動を定量化できる点において、高い実用性を有している。本研究では、筋骨格モデリング・シミュレーションソフトウェア「AnyBody (AnyBody Technology 社製)」を用いた(図 2)。まず、被験者の歩行動作を三次元モーションキャプチャシステム (VENUS3D、株式会社ノビテック製) によって計測し、その計測データを AnyBody にインポートした。次に、AnyBody 上であらかじめ構築された全身筋骨格モデルに対して、歩行動作を再現させるための逆動力学解析 (Inverse Dynamics Analysis) を実行した。逆動力学では、運動データ (関節の位置、速度、加速度) から関節に働く力やモーメントを逆算することにより、動作を支えるために必要な筋力やトルクの推定が可能となった。また、関節モーメントをもとに静的最適化手法を適用し、各関節において複数の筋がどのように分担して力を発揮しているかを推定した。この静的最適化では、「筋力の総和」や「筋の活動レベルの二乗和」といった目的関数を最小化することで、実際に起こり得ると考えられる筋活動パターンを算出することができる。



図 1 歩行計測の実験

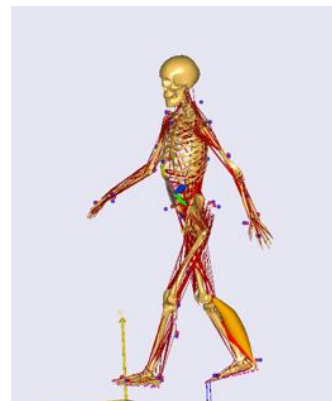


図 2 AnyBody

2.3 日常行動の簡易計測方法

筋骨格シミュレーションを用いて筋活動量を推定するには、対象者の関節角度、速度、加速度などの高精度な動作情報が必須である。通常、これらの動作データはモーションキャプチャシステムを用いて取得される。たとえば、本研究で用いた VENUS3D のような光学式のモーションキャプチャシステムは、複数台の赤外線カメラと反射マーカを併用することで、被験者の身体各部位の三次元位置情報を計測する。しかしモーションキャプチャは高価で設置・運用に専門的な技術を要するため、日常生活環境での継続的な利用には不向きである。この課題を克服し、現実的な環境での応用可能性を高めるため、本研究ではより簡便で低侵襲な動作取得手法の検討を行った。これまでの研究で、ウェアラブルデバイスとして一般的に利用されている加速度センサ (IMU: Inertial Measurement Unit) を靴や歩行器に装着し、歩行周期や歩幅などの基本的な動作パラメータを取得する方法を検討した。また、壁面に貼付した測距センサを用いて、対象者の接近距離や移動速度を非接触で計測する方法についても試行した¹⁾。これらの方法は、センサの設置箇所や数に制約があるものの、比較的安価かつ簡便に日常動作を記録できる点で有効であった。さらに近年、深層学習 (Deep Learning) 技術の発展により、RGB カメラ映像から人物の骨格情報を自動抽出する姿勢推定技術 (Pose Estimation) が急速に進展している。OpenPose、MediaPipe などの代表的なフレームワークを用いることで、通常のビデオカメラ映像から人体の関節位置を 2 次元あるいは 3 次元で推定することが可能となっている (図 3)。これらの方法により、センサを被験者に装着せず、またモーションキャプチャ装置のような専用環境も不要で、一般的な居住空間や公共施設においても柔軟に動作データの取得が可能となる。

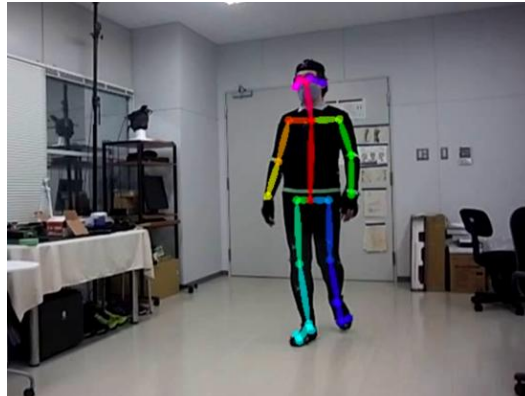


図3 映像から姿勢を推 (OpenPose)

2.4 メンタルモデルダイアグラムによる日常生活の分類

身体活動は大きく「生活活動」と「運動」の2つに分類される²⁾。前者は家事、通勤、買い物、育児など日常生活の中で自然に行われる身体的活動を指し、後者は健康維持や体力向上などを目的として意図的に実施される活動を意味する。高齢者の身体活動量を向上させるためには、運動習慣の定着だけでなく、生活活動をいかに活性化させるかが重要な課題である。特に、運動が困難な高齢者においては、日常生活の中における活動の意識化と自発的な実施が、フレイル予防やQOL向上において有効な戦略となる。以上の背景を踏まえ、本研究では生活活動に着目し、それらを体系的に分類・可視化する手法として「メンタルモデルダイアグラム (Mental Model Diagram)」を応用した分析アプローチを提案した。

メンタルモデルダイアグラムは、ユーザーインタビューなどから得られる自由発話データをもとに、行動（タスク）や思考の構造を抽出・グループ化し、それらを視覚的に配置することで、ユーザが持つ内的な行動モデルや心理的傾向を明らかにする手法である。通常、UI/UX設計や製品開発分野で用いられるが、本研究ではこの手法を高齢者の日常生活活動の整理・構造化に転用し、健康行動促進の視点から再構成した。具体的には、厚生労働省が公表している「健康づくりのための身体活動基準 2013」³⁾に記載された生活活動 62 事例に対し、類似性や行動目的に基づく階層的グルーピングを実施し、それぞれの行動群（タワー）に代表的な動詞（例：「歩く」「持ち上げる」「運ぶ」など）を割り当てた。さらに、それぞれの行動例に付与された METs (Metabolic Equivalents：代謝当量) 値との対応関係を図式化し、ユーザが自身の日常的な行動がどの程度の身体活動量に相当するかを一目で理解できるように設計した。

2.5 日常行動における筋活動量の可視化

運動実施時に活性化される筋肉部位を効果的に見せる方法について検討した。最初に検討したのは筋活動量に応じて、人体モデル上に色分けされたヒートマップを重ねることで、視覚的にどの筋肉に負荷が集中しているかを一目で理解できるようにすることである。また、高齢者や一般利用者向けには、専門用語を排除し、色と形状による直感的理解を促進する簡易表示モードにすることも検討した。

3 結果と考察

3.1 姿勢動作に基づく筋活動量の計測

被験者の大腿直筋、大腿二頭筋、前脛骨筋、腓腹筋内側頭の4部位に表面筋電センサ (biosignalsplux, 株式会社クレクト製) を装着し、3種類の異なる歩行姿勢における筋活動量を計測した。その結果、大腿直筋は股関節屈曲および膝関節伸展に関与する部位であり、歩幅を広げた歩行時

に活動量が有意に増加することを確認した（図 4）。特に大腿直筋においては、歩幅を広げた歩行時に筋活動量が有意に増加する傾向が確認された。この筋は股関節屈曲および膝関節伸展という主要な歩行動作に関与するため、歩幅の拡大に伴う股関節の可動域増大および前方推進力の強化が、筋活動量の増加に寄与したと考えられる。また、その他の筋群についても、体幹姿勢の変化や歩幅の調整に応じて活動量の差異が見られ、歩行姿勢の違いが筋負荷の分布に影響を与えることが示唆された。

上記の実験により、日常的に見られる歩行特性の違い（例：歩幅、姿勢の意識）が下肢の筋活動量に及ぼす影響を定量的に把握できることが確認された。これにより、歩行姿勢の改善指導や個々の身体特性に応じた運動メニューの設計に対するフィードバック指標として、筋活動量のモニタリングが有効であることが示唆された。

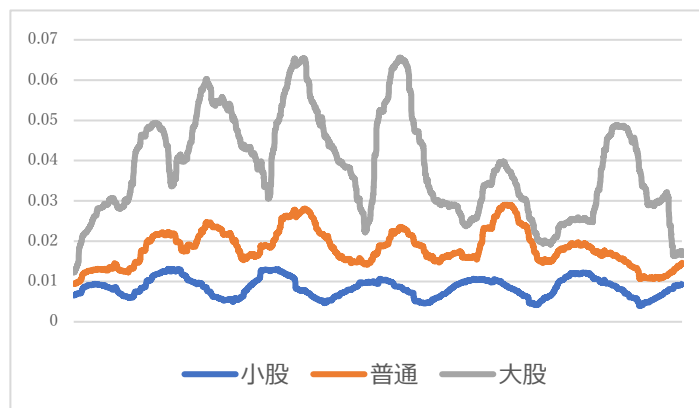


図 4 大腿直筋の筋活動量比較

3.2 筋活動量のシミュレーション

筋骨格シミュレーションにより、動作データに基づく筋活動量の推定が可能であることを確認した。計測されたモーションデータを、筋骨格モデリングソフトウェア（AnyBody）にインポートし、逆動力学解析（inverse dynamics）および筋活動の静的最適化手法を適用することで、各筋の活動量を算出した。これにより、歩行姿勢や速度の変化に伴う筋活動量の違いを評価することが可能となった。本研究では、筋骨格シミュレーション技術を活用することで、モーションデータに基づく筋活動量の推定が可能であることを確認した（図 5）。筋骨格シミュレーションは、生体力学に基づいて人体の骨格、関節、筋構造をコンピュータ上に再現し、身体動作に伴う力学的パラメータ（筋張力、関節反力、モーメント、エネルギー消費量など）を数值的に解析する手法である。これにより、センサを装着せずに内部の筋活動を推定することが可能となった。これらの解析により、歩行姿勢や歩行速度の変化に応じた全身の筋活動量の分布を、非侵襲的かつ高精度に可視化することができた。例えば、歩幅を拡大した場合には大腿直筋や腸腰筋など股関節屈曲に関与する筋群の活動が増加し、歩行速度を上げた場合には下腿三頭筋やハムストリングスにより強い負荷がかかる様子が定量的に確認された。また、表面筋電図による実測では 4～6 部位程度が計測限界であるのに対し、筋骨格シミュレーションでは、身体全体の数十か所の筋群について同時に活動量を推定することが可能である。これにより「特定の筋への依存」「左右のアンバランス」「筋力の過不足」などを網羅的に把握することができる。加えて、筋骨格シミュレーションは「実際にセンサを装着していない部位」における筋活動も推定できるため、現場での身体計測の簡略化と同時に、計測できない深部筋や小筋群の活動までを含めた包括的な評価が可能となる。

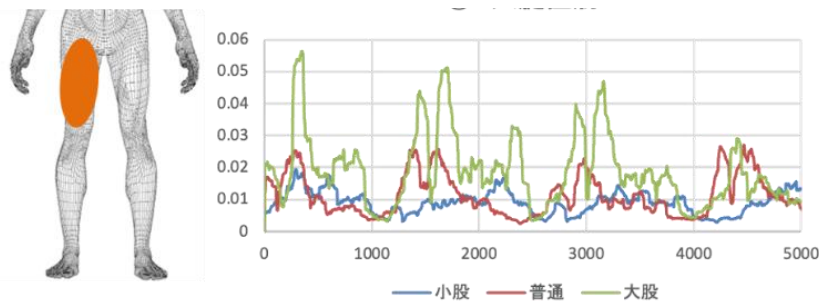


図5 筋骨格シミュレーションによる解析（大腿部）

3.3 日常行動の簡易計測方法

深層学習ベースの姿勢推定技術により、右腕の屈伸動作を動画とモーションキャプチャで同時計測し、その精度を比較した。図6に、右手首（R_WRIST）におけるX（左右方向）、Y（奥行き方向）、Z（上下方向）の各軸における座標変化の比較を示す。実線はモーションキャプチャによる実測データ、点線は姿勢推定による推定データを表している。この図から、X軸およびZ軸方向（左右および上下方向）では、推定値が実測値とほぼ同一の周期性および振幅特性を示しており、十分な精度が得られていることが確認された。一方で、Y軸（奥行き方向）については若干の誤差が認められたものの、動作の傾向そのものは良好にトレースされており、実用上許容可能な精度であると考えられる。

上記の結果は、深層学習ベースの姿勢推定技術が通常のビデオカメラを用いた簡便な手法を用いた場合でも、特定の動作においてはモーションキャプチャに近い精度で関節座標を再現できることを示唆している。本技術を応用することで、日常環境において特別な装置を用いずに動作を記録し、得られた関節座標データを筋骨格シミュレーションに取り込むことで、センサレスでの筋活動量推定が実現可能となる。これにより、家庭内や施設における日常的な運動モニタリングが容易となり、高齢者の身体機能の変化を非侵襲的かつ継続的に把握することが可能になる。特に、フレイル予防やリハビリテーション支援等、今回の研究で対象としている環境においては、ユーザにストレスをかけずに運動データを取得・分析できる技術として高い実用性が期待される。

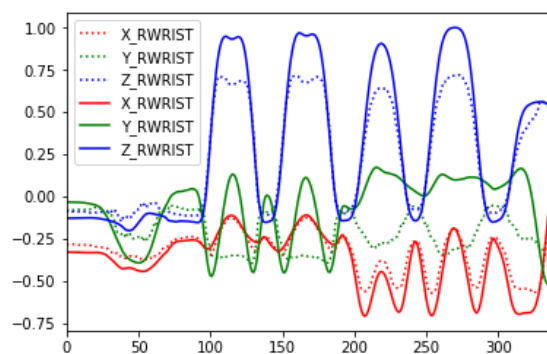


図6 右手首の座標値の比較

本研究では、以上のような深層学習ベースの姿勢推定技術を導入することで、センサフリーかつ非接触での動作計測の可能性を探った。特に、動画撮影のみで骨格情報（関節位置座標）を抽出できる点に注目し、将来的には得られた骨格データを簡易的な筋骨格モデルに入力することで、高精度装置を用いずとも筋活動量の推定を可能とするシステムの構築が期待できる。家庭や施設などの自然環境下におけるユーザの運動機能を長期間にわたって非侵襲にモニタリングする手段として有効である。

3.4 メンタルモデルダイアグラムによる日常生活の分類

生活活動の62事例を10のカテゴリに再分類し、各カテゴリ内で活動強度の段階化を行った（図7）。これにより、利用者自身が自らの行動とMETs値との関係性を把握しやすくなり、活動促進への動機づけが期待できる。この手法により、これまで定性的であった生活活動の構造が視覚的に整理され、かつMETsという定量的指標との関係性が明示されることで、高齢者自身が「どの活動をどの程度行えば良いのか」を直感的に理解しやすくなる。さらに、活動例のグループ化により、同一カテゴリ内の活動を相互に置き換えたり、段階的に負荷を高めたりする応用が可能となる。メンタルモデルダイアグラムを用いた生活活動の再分類と可視化は、従来のMETs表では捉えにくかった「行動選択の自由度」や「心理的抵抗の低さ」といった観点を取り入れた、柔軟で実用性の高い身体活動促進ツールとなった。

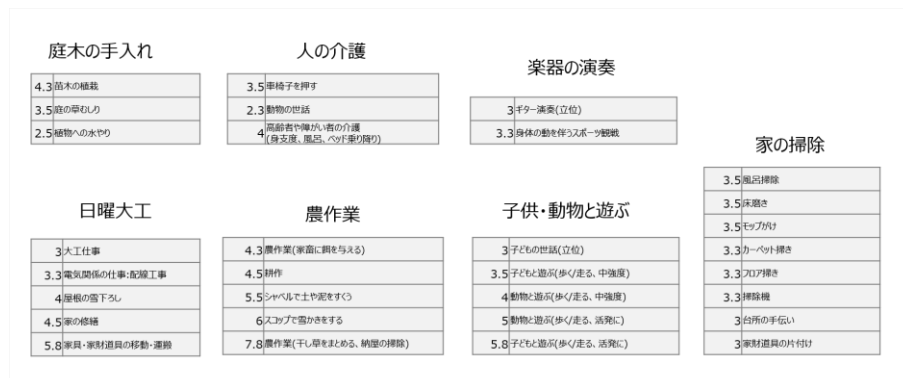


図7 メンタルモデルダイアグラムによる日常生活行動の分類

3.5 日常行動における筋活動量の可視化

筋活動および行動分類の結果を視覚的に直感的に提示する方法として、本研究では人体の筋骨格構造を簡素化した「簡略筋肉モデル」を導入し、主要筋群のみを選定して図示する可視化手法を提案した（図8）。このモデルでは、各筋における推定活動量を色調または強調表示で示すことで筋活動の相対的な大小を視認しやすく設計している。特に高齢者を対象とする場合、一般成人と比較して全身の筋肉量が減少していること、および個別の筋細分類の視覚的把握が臨床的・実践的にさほど重要でないという観点から、表示内容を過度に詳細化せず、主要な運動筋に絞って可視化することで、情報の過剰提示を避けつつ理解しやすい出力形式とした。

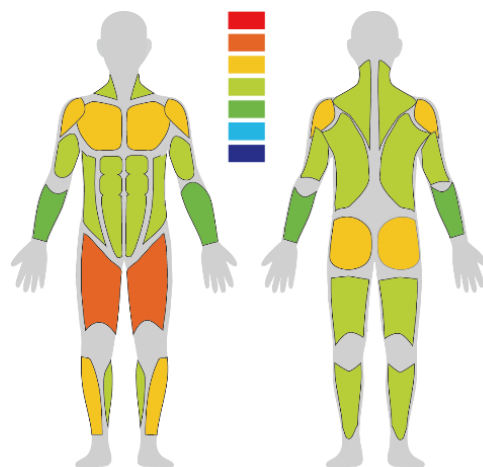


図8 筋活動の可視化

参考文献

- 1) 平田 一郎、福井 航、福田 純、後藤 泰徳, 日常活動における筋活動量の計測と可視化の取り組み-筋骨格モデルによる筋活動量計算と AI による姿勢推定-, 第 24 回 日本感性工学会, 1D-2-05, 2022
- 2) 健康づくりのための身体活動・運動ガイド 2023
<https://www.mhlw.go.jp/content/001194020.pdf>
- 3) 厚生労働省, 運動基準・運動指針の改定に関する検討会 報告書
<https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf>

(問合せ先 平田一郎)

(校 閲 阿部 剛)