

身体動作特性計測に基づく人間中心型知能システムに関する研究

研究代表者 菅野 重樹
(創造理工学部 総合機械工学科 教授)

1. 研究課題

本研究では人間特性計測システムを用いて、医療福祉ロボット、パートナーロボット、コンピュータグラフィックスなどのヒトの身体動作解析に基づいたアプローチが必要となる研究領域において、人間中心設計の方法論の確立を目指す。本研究では人間特性計測システムを用いて、人の動作状態の計測や人の動作意図を反映する生体指標の解析をすることにより、個人の状態を同定し、個人に対し適応的に振る舞う人間中心型知能システムの開発を目指す。本研究室では、「個人に必要最低限の抵抗負荷を与えるリハビリテーションロボット」の研究があり、本年度の研究成果を次節より報告する。本項では、その研究の社会背景、特徴、及び課題点を下記に述べる。

骨格筋の機能低下は、自立心や日常生活能力を低下させ加齢に伴う深刻な問題の一つである。筋力低下状態からの回復を促すためには、各個人の身体状況に適した訓練が重要である。特に骨折時等の治療では、長期の安静臥床や関節の固定が必要となり、筋を長期間使用しないため、廃用性筋萎縮が誘発される。萎縮した筋を効率的に肥大させ、効率的な筋回復を促進させることが重要である。一方で、高齢者においては、強い抵抗負荷は傷害のリスクを伴うため、傷害リスクが高くない効果的な抵抗負荷の設定が、骨格筋肥大に向けたリハビリテーションにとって重要である。そこで、本研究では、個人に適した最小抵抗負荷を推定し、印加するシステムを提案した。

2. 主な研究成果

2. 1. 最小負荷印加ロボットの開発

表面筋電図 (EMG) の測定は、患者の筋状態を判断するための比較的容易かつ非侵襲的な方法である。抵抗負荷の増加に伴い、疲労抵抗性の筋線維群から疲労感受性の筋線維群へと動員される筋線維群が変化する。疲労しやすい筋線維群の動員が筋肥大の成長を促す代謝物質の分泌につながる。一回の抵抗運動時の筋活動を計測するために、印加した抵抗負荷に対する積分 EMG (IEMG) を取得した。筋電位の大きさは活性化された筋繊維の数に関連する。筋の表層から深部へと順に筋線維群が動員されていくため、負荷の増加に応じて IEMG の増加率は減少する傾向がある。そこで、IEMG と抵抗負荷の関係を表現するために、勾配が 0 に近づく対数関数を適用した。そして、疲労しやすい筋線維群の動員がされる前と後で 2 種類の対数曲線の式が変化すると考えた。図 1 に示すように、抵抗負荷を漸増的に印加し、IEMG-抵抗負荷関係をプロットするための IEMG を得ることが可能なワイヤ駆動ロボットシステムを開発した。このシステムは、IEMG と抵抗負荷の関係を対数モデルに近似し、対数関数の型の変化をリアルタイムに検出することで、有効負荷の最小離散値を検出することができる。

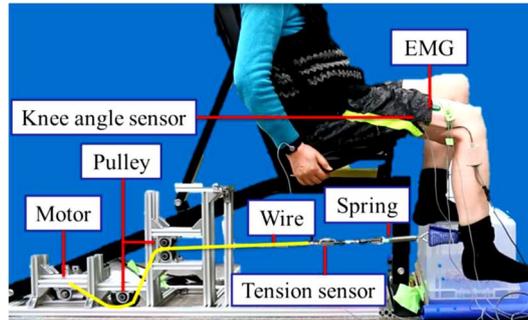


図1 最小抵抗負荷印加のためのワイヤ駆動型ロボットシステム

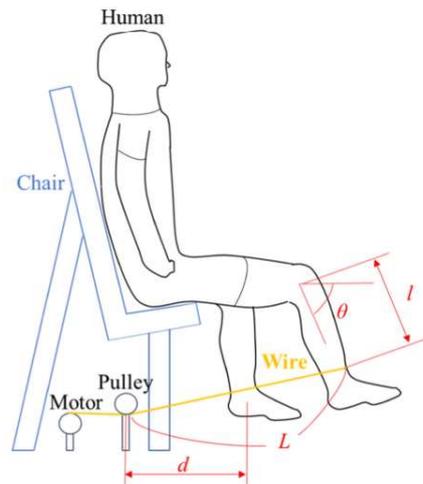


図2 システムの変数の定義

IEMG は、膝蓋骨上縁と上前腸骨棘を結んだ線の中点に貼り付けた EMG センサ (SX230-1000, Biometrics 社製) により計測した。また、大腿骨内外側顆上と、脛骨・腓骨の内外側果上両端に貼り付けた Goniometer (SG150, Biometrics 社製) により膝関節角度を計測した。関節角度とワイヤ張力値を基に、関節のトルク-角度特性に近い性質で抵抗力を印加可能なゴムバンドを用いた膝伸展運動訓練方法を模倣した。椅子に座った被験者の足関節にワイヤを取り付け、膝関節角度とワイヤ張力をフィードバックし、回転位置ベースの力制御で電気モーターを制御することにより張力を自動調整した。ロードセルを用いた 6 種類のゴムバンド特性の測定結果から、滑車からのワイヤ長さ L に応じた目標ワイヤ張力 F_t の計算式を以下のように近似した (変数の定義は図 2 の通り)。

$$F_t = a \cdot \log(L) - b, \quad (1)$$

$$L = \sqrt{(d + l \cdot \cos \theta)^2 + (l \cdot (1 - \sin \theta))^2}. \quad (2)$$

印加した抵抗負荷に対する積分 EMG (IEMG) を取得した。筋電位の大きさは活性化された筋繊維の数に関連する。筋の表層から深部へと順に筋線維群が動員されていくため、負荷の増加に応じて IEMG の増加率は減少する傾向がある。そこで、IEMG と負荷の関係を表現するために、勾配が 0 に近づく対数関数を適用した。そして、疲労しやすい筋線維群の動員がされる前と後で 2 種類の

対数曲線の式が変化すると考えた。筋肥大に有効な負荷の最小値を検出するために、抵抗負荷と IEMG のプロットを対数モデルで近似し、対数関数の型の変化を検出した。

2. 2. 実験結果とまとめ

若年健常者 6 名（男女 3 名ずつ）において実験を行った。脚伸展運動速度は $30 \pm 5^\circ / s$ とし、図 2 のように、開発したシステムでゴムバンドを模した力制御を実施した。被験者は膝関節角度の基準値と実測値をカラーバーで示した画面を見ながら膝を伸展させた。試験荷重はピーク値まで約 5N のステップで増加させた。最小負荷は男性 40N、女性 35N とし、最大負荷は各年齢層の筋力を考慮して 75~90N の範囲とした。大腿部周囲長に基づく急性大腿部膨張率を計測することが、筋肥大に影響を持つかどうかを判定する最も簡単な方法である。本実験の目的は、開発したシステムの短期的な効果の検証であるため、実験時間を考慮し、筋成長に及ぼす潜在的な影響を評価する簡単な方法を用いた。

図 3 に、6 名の若年被験者の大腿部膨張率を示す。近似した対数関数が変化を検出することで導出した抵抗負荷とそれよりも 1 段階小さい負荷と 1 段階大きい負荷の膨張率を比較した。検出した抵抗負荷と 1 段階小さい負荷の膨張率には有意な違いがあった。すべての被験者は、導出した抵抗負荷閾値で下肢伸展運動を行った後、急性大腿拡張を経験した。これらの結果から、本手法は廃用性筋萎縮により筋力が低下した患者に対して、より安全で効果的なりハビリテーション運動法を提供できる可能性が示唆された。

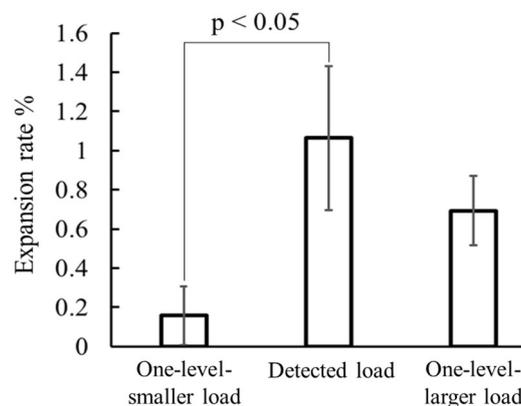


図 3 提案手法で推定した負荷とその前後の負荷における大腿部周囲径の増加率

3. 研究業績

3. 1. 学術論文

- [1] Tamon Miyake, Hiromasa Ito, Naomi Okamura, Yo Kobayashi, Masakatsu G. Fujie, and Shigeki Sugano, "EMG-Based Detection of Minimum Effective Load with Robotic-Resistance Leg Extensor Training," IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 54, pp. 34-43, 2024
- [2] Lena Guinot, Hiroyasu Iwata, "Analysis of the Importance of Gender Balanced Data Sets for Human Motion Operated Robots," 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2024), pp. 1470-1475, 2024.
- [3] Akira Koshino, Kazuhiro Yasuda, Saki Takazawa, Shuntaro Kawaguchi, Hiroyasu Iwata, "Immersive VR System for Evaluating the Severity of Object-Centered Neglect Based on

Environmental Complexity,” 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2024), pp. 172-177, 2024.

3. 2. 学会および社会的活動

- [4] 山口皓大, 亀崎允啓, 濱田太郎, 三宅 太文, 櫻井絵梨子, 菅野重樹, “協働作業者の行動推定と譲り合いに基づく協働作業ロボットの適応的行動決定システム”, 第41回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2023), 3F3-02, 2023年9月11~14日, 仙台.
- [5] 今西優登, 亀崎允啓, 櫻井絵梨子, 三宅 太文, 山口皓大, 今治諭志, 菅野重樹, “解析解と数値解を用いた Dynamic Waypoint Navigation の軌道計画高速化に関する研究”, 第41回日本ロボット学会学術講演会論文集(RSJ2023), 1H4-08, 2023年9月11~14日, 仙台.

4. 研究活動の課題と展望

本研究では, 個人に応じて抵抗負荷を調整可能なワイヤ駆動式の抵抗負荷印加装置を開発し, 低負荷印加時の表面筋電位の情報から, 大腿周囲長を効果的に膨張させることが可能な抵抗負荷の大きさを推定することができた. 本手法では, 大腿部のみを対象としたものとなっているため, 全身の部位へシステムを拡張することが今後の課題である.