

令和元年5月31日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17871

研究課題名（和文）筋肉の疲労状態を考慮した作業負荷予測が可能なデジタルヒューマンモデルの開発

研究課題名（英文）Development of a digital human model capable of workload prediction considering muscle fatigue

研究代表者

西田 勇 (Nishida, Isamu)

神戸大学・工学研究科・助教

研究者番号：40776556

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、筋肉の疲労状態を考慮した作業負荷予測が可能なデジタルヒューマンモデルを開発することを目的としている。本目的を達成するために従来の筋骨格モデルでは考慮されていなかった冗長筋の機能を考慮した筋骨格モデルを提案した。冗長筋とは、関節を駆動する際に駆動方向を妨げる方向に働く筋肉のことであり、冗長筋の影響が考慮できていないと、推定される筋肉負荷は実際より小さく見積もられる。また、本研究では、筋肉の疲労の程度を予測することが可能な筋の疲労・回復モデルを新たに提案した。本モデルの特徴は、これまで考慮できていなかった筋の速筋線維と遅筋線維の機能を考慮して、筋の疲労予測を可能にしたことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国では2007年に高齢化率が20%を超え、超高齢社会に突入している。また、若年層の製造業者の減少により製造現場での高齢化が大きな問題となっている。製造現場での作業者の高齢化が進むと、作業者の身体的な負担が増えるために作業の安全性や効率が損なわれることになる。本研究では、これらの課題を克服するために、作業者ごとに異なる筋力および疲労進展の程度などの身体特性を考慮して、作業時の筋肉の負荷を予測することが可能なデジタルヒューマンモデルを実現した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a digital human model that can predict workload according to muscle fatigue. In order to achieve this purpose, we proposed a musculoskeletal model that takes into account the role of redundant muscles that was not considered in the conventional musculoskeletal model. The redundant muscles are the muscles that act in opposition to the prime movers or as agonists of a movement. When the roles of this is ignored, the predicted muscle force is smaller than the actual one. Furthermore, we proposed a new muscle fatigue and recovery model that can predict the degree of muscle fatigue. The feature of this model is that it can predict muscle fatigue, considering the roles of slow-twitch and fast-twitch muscles that could not be considered before.

研究分野：人間工学

キーワード：筋骨格モデル 冗長筋 疲労モデル デジタルヒューマンモデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国では 2007 年に高齢化率が 20% を超え、超高齢社会に突入している。また、若年層の製造業者の減少により製造現場での高齢化が大きな問題となっている。製造現場での作業者の高齢化が進むと、作業者の身体的な負担が増えるために作業の安全性や効率が損なわれることになる。

これまで、作業時に人の各筋肉の筋力を推定する筋骨格モデルが研究開発されている。作業時の筋力推定を行うソフトウェアがすでに市販されており、AnyBody や ARMO、SIMM などが有名である。しかし、これらのソフトウェアは筋力の自乗和を最小とする最適化により筋力推定を行っており、人の身体制御の特徴である冗長筋の機能を考慮していないため、推定される筋力は実際の筋力より小さく見積もられることが知られている。これらの差異は筋肉の疲労まで評価する場合には無視できない。冗長筋とは、関節を駆動する際に駆動方向を妨げる方向に働く筋肉のことであり、駆動方向に働く筋肉と同時に作用することで人は独自の身体制御を行っている。また、市販されているソフトウェアでは、筋力の大小による筋肉の疲労を定量的に評価する機能は未だに提供されていない。

2. 研究の目的

本研究は、製造現場において、筋肉の疲労状態を考慮した作業負荷予測が可能なデジタルヒューマンモデルを開発することを目的としている。

まず、従来の筋骨格モデルでは考慮されていなかった冗長筋の機能を考慮した筋骨格モデルを新たに提案する。冗長筋とは、関節を駆動する際に駆動方向を妨げる方向に働く筋肉のことであり、冗長筋の影響が考慮できていないと、推定される筋肉負荷は実際より小さく見積もられることが知られている。次に、筋肉の疲労および回復モデルを新たに提案して、時系列に変化する筋肉の状態を考慮した筋肉の機能を評価する。従来の筋骨格モデルでは筋肉の疲労の影響が十分に考慮されていなかったため、筋肉の疲労が無視できるような短時間の運動や、発揮する筋力が比較的小さな運動のみが評価されていた。本研究で提案する冗長筋を考慮した筋骨格モデルによって、これまで過小に評価されていた筋力を正確に推定し、筋肉の疲労を評価することで、製造現場における作業負荷を予測し、予測結果に基づいた作業動作や作業環境の改善を行うことが期待できる。

3. 研究の方法

本研究は、筋肉の疲労状態を考慮した作業負荷予測が可能なデジタルヒューマンモデルを開発することを目的とし、本目的を達成するために以下に示す 2 つの課題に取り組んだ。

(1) 冗長筋の機能を考慮した筋骨格モデルの提案

図 1 に示すように冗長に働く筋肉の対において、連結ばねモデルを新たに提案する。本モデルでは、一方の筋肉が収縮して筋力を発揮する際に、もう一方の筋肉が定常状態を保とうとすることで収縮し、筋力を発揮する機構となっている。本モデルにより冗長筋の機能を表現することができる。

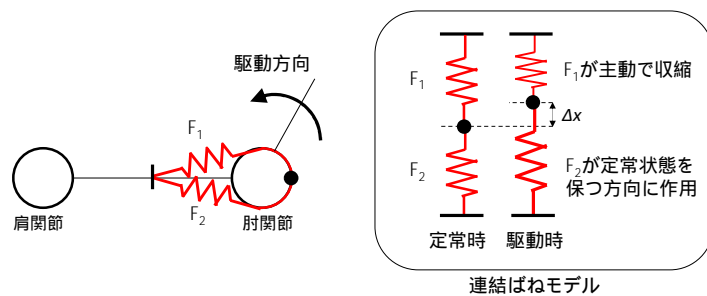


図 1 冗長筋の機能を表現する連結ばねモデル

(2) 筋肉の疲労の程度を予測することが可能な筋の疲労・回復モデルの提案

生理学的な筋線維の働きに注目した筋肉の疲労モデルを参考に、人によって異なる各筋肉の最大筋力や疲労速度・回復速度といった筋肉の疲労・回復履歴を考慮した筋肉の疲労・回復予測を可能とする筋肉の疲労および回復モデルを提案する。図 2 に示すように、筋肉を小さなモータユニットの集合とし、そのモータユニットが 3 種類の状態(待機状態、活性化状態、疲労状態)に変化すると考えた場合、筋力発揮時には待機状態が活性化状態に遷移すると同時に活性化状態から疲労状態に遷移する。筋力の発揮をやめて筋肉が休憩をしている状態では、疲労状態から待機状態に遷移する。疲労状態のモータユニットが完全に待機状態に遷移していない状態で筋力の発揮を再開すると、最大で発揮できる筋力は小さくなり、同じ力を発揮する場合には負荷の程度が大きくなる。本研究で提案するモデルを用いることで、筋力の変化から筋肉の疲労の程度を時系列に予測することが可能となる。本研究の特徴は、これまで考慮できていなかった筋の速筋線維と遅筋線維の機能を考慮して、筋の疲労予測を可能にすることである。速筋線維は大きな出力を発揮できる一方で疲労の進展が早く、遅筋線維は大きな出力を発揮することはできないが疲労の進展が遅いとい

た特徴を有している．これらの機能を考慮しない場合では，予測した筋の疲労の程度と実際の疲労度合いに大きな差異があることが問題であったが，本研究ではこれらの課題を解決している．

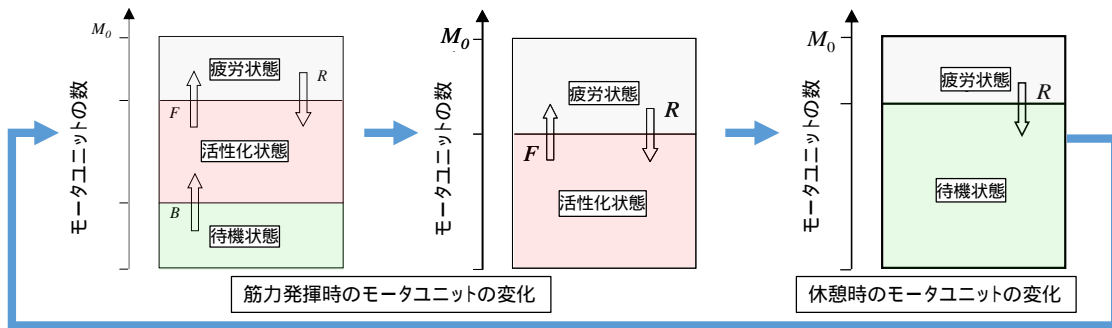


図2 筋肉の疲労および回復における状態遷移

4. 研究成果

本研究の目的を達成するために設定した2つの課題の研究成果を以下に示す．

(1) 冗長筋の機能を考慮した筋骨格モデルの提案

図3に示すように主動筋と拮抗筋を連結ばねと考えることで筋肉の冗長性を表現する．ここで，関節トルク T と主動筋が発生する主動トルク T_1 と拮抗筋が発生する拮抗トルク T_2 の関係は，式(1)で表せる．図3より，関節が角度 $\Delta\theta$ だけ回転する時に主動筋 F_n が発揮する筋力は筋肉のばね定数 k とプリー半径 r を用いて式(2)と表せる．また，筋力とトルクは線形な関係があるため，主動筋 F_n による関節の角度変化 $\Delta\theta$ とトルクの関係は式(3)となる．関節の角度変化は主動筋と拮抗筋で等しくなるため，式(4)が成り立つ．関節に働くトルクは剛体リンクモデルより導出可能で，プリー半径は既知の定数とする．よって，式(4)より筋肉のばね定数 k を決定することができれば，関節トルクを主動トルクと拮抗トルクに配分することができる．

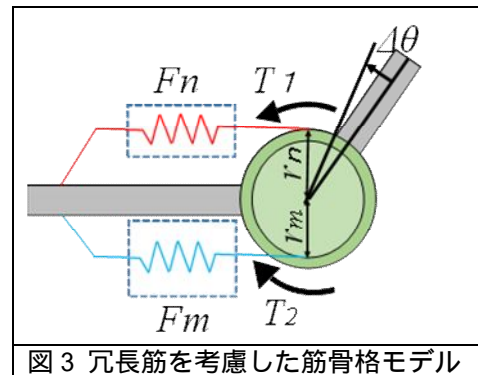


図3 冗長筋を考慮した筋骨格モデル

$$T = T_1 - T_2 \quad (1)$$

$$F_n = k_n r_n |\Delta\theta| \quad (2)$$

$$T_n = r_n^2 k_n |\Delta\theta| \quad (3)$$

$$\Delta\theta = \frac{T_1}{r_m^2 k_m} = \frac{T_2}{r_n^2 k_n} \quad (4)$$

筋肉のばね定数を決定するために，筋肉を図4に示すような円柱材料と仮定する．筋肉が収縮した際の伸びと力の関係より，ばね定数 k は筋肉の長さ L と筋断面積 A ，ヤング率 E を用いて式(5)で表すことができる．

$$k = \frac{AE}{L} \quad (5)$$

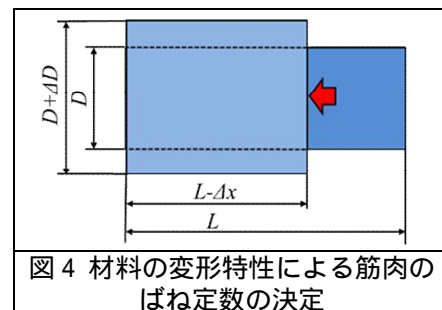
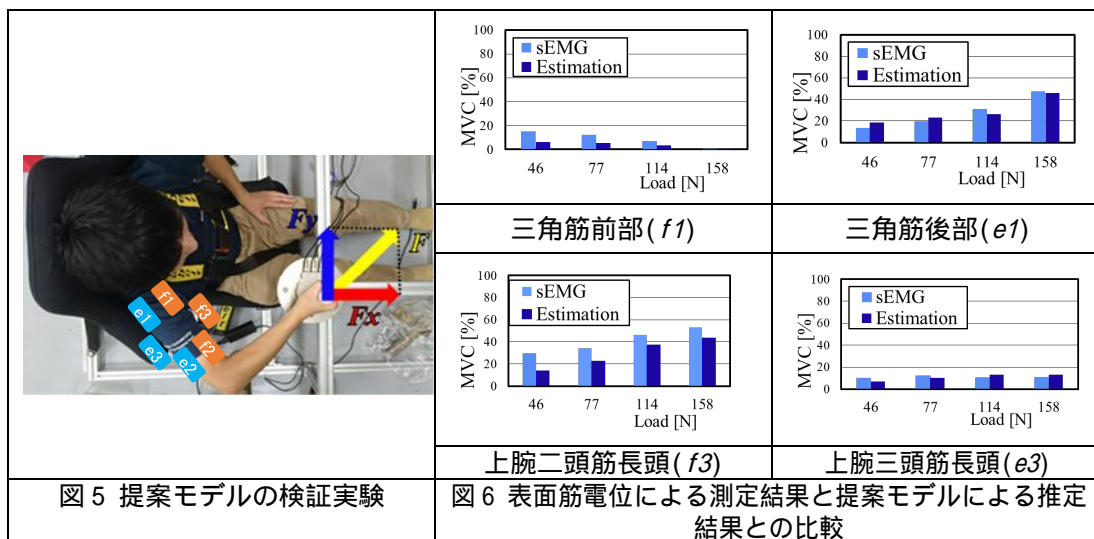


図4 材料の変形特性による筋肉のばね定数の決定

提案した筋力推定手法の妥当性を検証するため，表面筋電計を用いて各筋の表面筋電位を測定し，実験により得られた表面筋電位の結果と本研究で提案したモデルにより得られる推定結果の比較を行った．実験では，上腕に存在する代表的な筋肉に表面筋電計を取り付けて，上肢先端で力を発揮した際の表面筋電位を測定した(図5)．また，上肢先端で発揮される力から肘関節および肩関節に作用する関節トルクを算出して，提案モデルによって各筋肉の筋力を推定した．図6に測定結果と推定結果を比較して示す(横軸：先端で発

揮する力の値、縦軸：得られた出力を最大随意収縮時の出力で除算した値）。図6に示した結果から、提案モデルで推定した出力の傾向は表面筋電位の結果とほぼ一致しており、特に今回の出力方向において拮抗筋の働きをしている上腕三頭筋長頭（ $e3$ ）が活性化している傾向を示せており、従来のモデルでは表現できなかった傾向を示すことができた。



(2) 筋肉の疲労の程度を予測することが可能な筋の疲労・回復モデルの提案

本研究では図7に示すように筋を遅筋および速筋で表現して、それぞれのモータユニットの状態変化をモデル化する。筋肉に存在するユニットの総数は従来モデルと同じように M_0 とし、筋肉に含まれる遅筋、速筋の割合を%ST、%FT とすることにより、筋肉に含まれるそれぞれの筋線維タイプのユニットの総数を M_{0s} , M_{0f} に配分することができる。そのユニットのうち活性化する前の待機状態のそれぞれのユニット数を M_{ucs} , M_{ucf} とし、活性化したユニット数を M_{as} , M_{af} 、疲労状態になったユニット数を M_{fs} , M_{ff} とする。ここで、活性化ユニットである M_{as} , M_{af} のみが筋の出力に関与しており、待機ユニットである M_{ucs} , M_{ucf} や疲労ユニットである M_{fs} , M_{ff} は筋の出力には関与していない。これらのユニット数は全て時間関数であり、初期状態 ($t=0$) では全てのユニットは待機状態として存在している。従って、このときの各ユニット数は以下ようになる。

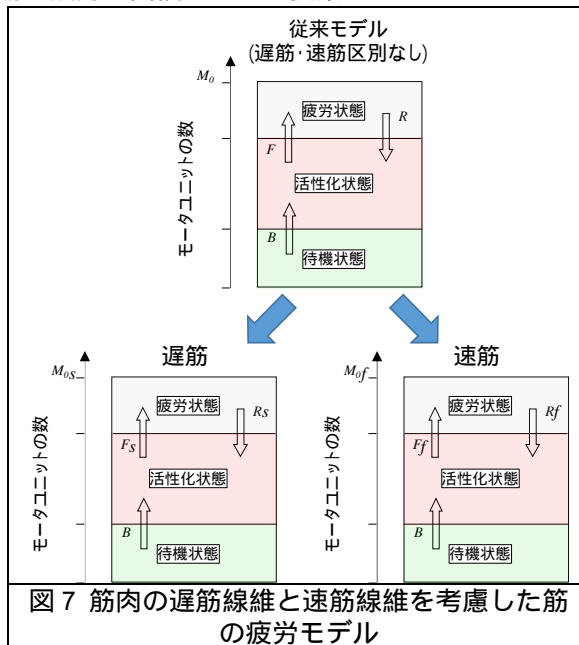
$$M_{Ai} = 0 \quad (i = s, f)$$

$$M_{Fi} = 0 \quad (i = s, f)$$

$$M_{ucs} + M_{ucf} = M_0$$

また、活性化ユニットが疲労ユニットに変化する疲労パラメータを F_s , F_f 、疲労ユニットが活性化ユニットに変化する回復パラメータを R_s , R_f で遅筋、速筋それぞれに設定する。ただし、脳からの指令強度である待機ユニットが活性化ユニットに変化する活性化パラメータは遅筋、速筋ともに一定とし、 B とする。図7中の矢印はそれぞれの効果によるユニットの状態変化の方向を表している。これにより、遅筋と速筋それぞれの筋疲労モデルからそれぞれの出力の推移を予測することができ、筋肉全体の出力の推移はそれぞれの出力を合計することで計算することができる。各状態のユニット数の時間変化は以下の式(7)から(12)で表すことができる。

$$\frac{dM_{As}(t)}{dt} = B \cdot M_{ucs}(t) - F_s \cdot M_{As}(t) + R_s \cdot M_{Fs}(t) \quad (7)$$



(6)

$$\frac{dM_{Fs}(t)}{dt} = F_s \cdot M_{As}(t) - R_s \cdot M_{Fs}(t) \quad (8)$$

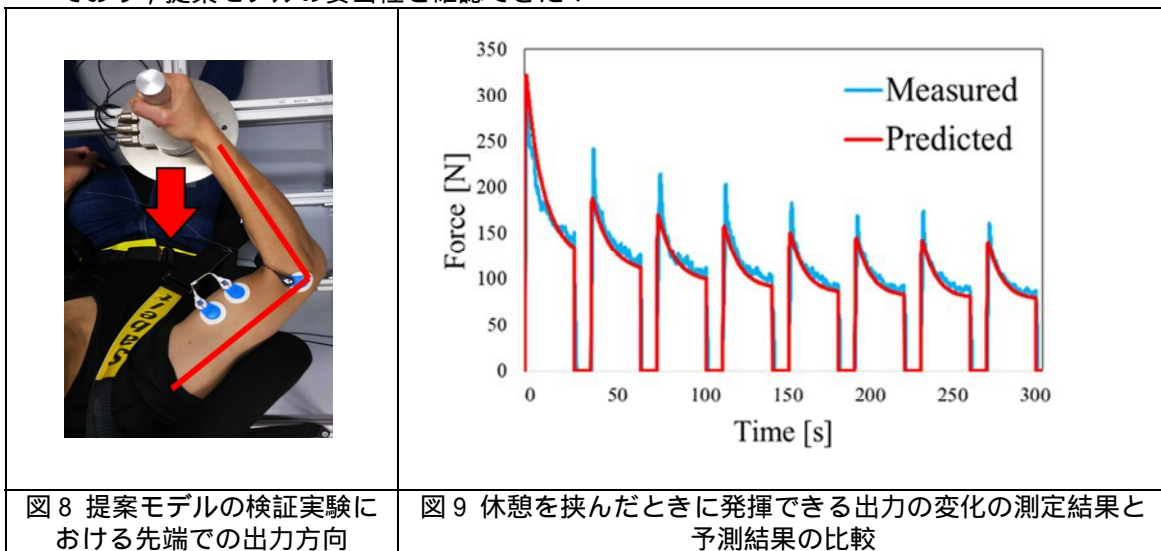
$$M_{ucs}(t) = M_{0s} - M_{As}(t) - M_{Fs}(t) \quad (9)$$

$$\frac{dM_{Af}(t)}{dt} = B \cdot M_{ucf}(t) - F_f \cdot M_{Af}(t) + R_f \cdot M_{Ff}(t) \quad (10)$$

$$\frac{dM_{Ff}(t)}{dt} = F_f \cdot M_{Af}(t) - R_f \cdot M_{Ff}(t) \quad (11)$$

$$M_{ucf}(t) = M_{0f} - M_{Af}(t) - M_{Ff}(t) \quad (12)$$

提案した遅筋と速筋を考慮した筋疲労モデルの妥当性を検証するため、図8に示すように上肢先端に設置した動力計に対して、最大努力での出力と休憩を繰り返した際に発揮できる出力を測定した。また、提案モデルによって、指定した出力時間と休憩時間の間隔から最大努力で発揮できる出力を推定した。図9に動力計で測定した出力の変化と提案モデルで推定した出力の変化を比較する。図9に示した結果から、測定結果と推定結果はおおむね一致しており、提案モデルの妥当性を確認できた。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Hayato Miura, Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Dynamic model of muscle fatigue and recovery considering the roles of slow-twitch and fast-twitch muscles validated with a gripping experiment, Mechanical Engineering Journal, 査読有, Vol.6, No.1, DOI: 10.1299/mej.18-00498 (2019)

Yuki Daiju, Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Muscle force prediction method considering the role of antagonistic muscle based on a coupled spring model, Mechanical Engineering Journal, 査読有 (掲載決定)

〔学会発表〕(計 3 件)

Yuki Daiju, Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Muscle force prediction method considering the role of antagonistic muscle, 9th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2018) and the Affiliated Conferences (2018)

Hayato Miura, Isamu Nishida, Keiichi Shirase, Dynamical model of muscle fatigue and recovery considering the roles of slow-twitch and fast-twitch muscles, 10th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (AHFE 2019) and the Affiliated Conferences (2019)

第十 祐幹, 西田 勇, 白瀬 敬一, 冗長筋群を考慮した筋骨格モデルによる筋力推定, スポーツ

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-cimlab/new_index.html

6．研究組織

(1)研究協力者

研究協力者氏名：第十 祐幹

ローマ字氏名：Daiju Yuki

研究協力者氏名：三浦 隼人

ローマ字氏名：Miura Hayato

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。