

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04922

研究課題名（和文）動作変動を考慮した筋疲労モデルによる反復作業の身体負担評価法の開発

研究課題名（英文）Development of physical workload evaluation system for repetitive task using muscle fatigue model considering movement variability

研究代表者

瀬尾 明彦（Seo, Akihiko）

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：80206606

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）：本研究では、まず、反復動作による人の操作動作の変動の要因の分析のための測定装置の開発を行った。ついでそれを使用して得たデータから、動作の変動の要因とその関係を解析し、動作による発揮力や姿勢の変動の特徴を明らかにできた。さらにデジタルヒューマンモデルを拡張して、動作のばらつきの要因と作業時間の関係を検討できるシステムを構築し、作業条件の要因が作業時間に与える影響をシミュレーションで検討した。また、シミュレーションで必要になる動作のばらつきのデータを実測してシミュレーションの妥当性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、作業者の移動によって生じる手位置の変動を考慮することで、連続作業時間の適切な増減が得られることを明らかにできた。立ち位置の変動は、設計段階での作業限界シミュレーションに利用しやすく、様々な作業に利用できる可能性が高く、社会的な意義は高いと考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this research, a measurement device was developed to analyze the factors that cause variability in human manipulation due to repetitive tasks. Then, from the data obtained by using the device, the factors of movement variability and their relationship were analyzed. As a result, we were able to clarify the characteristics of exerted force and changes in posture due to movement. Furthermore, by expanding functions of a digital human model, a system was developed that can examine the relationship between the causes of movement variability and work endurance time. Through the simulation using the system, the effects of working condition factors on working time were examined. In addition, the validity of the simulation was confirmed by actually measuring the data of the variation in operation required for the simulation.

研究分野：人間工学

キーワード：反復作業 筋疲労モデル 連続作業時間

### 1. 研究開始当初の背景

昨今のものづくりの現場では、現場製品の使いやすさ、生産のやりやすさ、製品の保守のやりやすさの3つのニーズに対応するため、コンピュータ上に仮想の製品や製造環境を構築した仮想生産システムとデジタルヒューマンモデル（以下、DHM）が利用されている。DHMによる身体負担評価手法には、OWAS（Ovako式作業姿勢分析法）やRULA（迅速上肢評価システム）などの観察法で実績のある方法と、関節にかかるトルクや腰部の椎間板にかかる力（腰部椎間板圧縮力）を生体力学モデルで推定する理論的な方法がよく利用される。

しかし反復作業の身体負担評価は、まだ十分に実施できる状況にない。全身の持ち上げ作業の反復はRNLE（米国国立産業安全衛生研究所(NIOSH)の改定版荷物取り扱い式）とその拡張法があり、その他の任意の姿勢・動作の反復作業については、筋の疲労・回復の過程を定式化した筋疲労モデルと生体力学モデルを併用する方法がある。しかしこの試みはまだ十分な成果が出ていない。

### 2. 研究の目的

本研究は、昨今の多様な生産システムや先進的な製品設計に対応するため、多彩な姿勢・動作を含む作業を任意の回数・頻度で反復する場合の負担度を推定する手法の開発を目的とする。具体的には、人の生体力学モデルをコンピュータ上で構築するデジタルヒューマンモデルを利用し、(1) 動作変動の要因の探索と筋の疲労と回復のモデルに動作変動を組み入れた新たな反復作業の負担推定法の構築、(2) 多彩な動作の組み合わせで構成される作業の反復評価への拡張、(3) 構築した反復作業評価の結果を可視化して設計に利用可能なシステムの構築を行う。

### 3. 研究の方法

本研究では、まず、反復動作による人の操作動作の変動の要因の分析のための測定装置の開発を行う。ついでそれを使用して得たデータから、動作の変動の要因とその関係を解析する。さらにデジタルヒューマンモデルを拡張して、動作のばらつきの要因と作業時間の関係を検討できるシステムを構築する。シミュレーションにより、変動要因の影響を明らかにする。最後に、シミュレーションに必要な変動要因のパラメータを実測し、以上の結果を利用して可視化と設計に利用できるシステムにまとめる。

### 4. 研究成果

#### (1) 操作動作のばらつきの計測と経路探索法を用いた解析

基本的な筋活動の場面として、両手での荷物の持ち上げ作業を想定し、その作業により左右の手にかかる力の変動を正確に実測できる測定ボックスを試作した。測定ボックスには6軸力覚センサを埋め込み、操作力の作用方向と作用点を3軸の操作力およびモーメントの成分で精密に測定できるようにした。荷物の重心位置を変更可能とし、意図的な動作変動が生じやすい要件も加味できるようにした。この測定ボックスを用いた反復の持ち上げ動作より、操作力の大きさや変動の緩やかな増加や現象の傾向が認められた。これは荷物の重心位置により変わることで、持ち上げでは傾向がわかりやすいが持ち下げでは傾向がみとめられないこと、左右差があることなど、多彩な動作のばらつきの成分が抽出できた。また、ばらつきの要因をさらに詳しく分析するため、方法および動作のばらつきを含めたモデルについても研究をすすめた。ばらつきの要因については、動作に変動を加えた場合の姿勢変化を異常検知手法を用いて分析する方法を検討した。

さらに、生体力学モデルにおいて動作経路がばらつく原因を解明するため、動作の始点から終点への経路の最適パスを生成する手法で持ち上げ動作と持ち下げ動作を分析し、経路に差が生じかつそれが評価する関節トルクにより異なることを明らかにした（図1）。

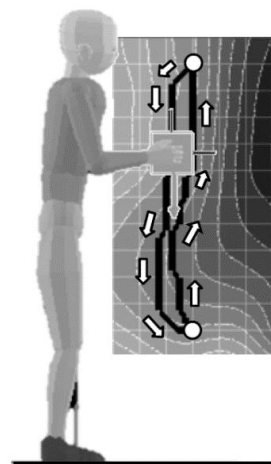


図1. 持ち上げ下げの際に選択される手位置の経路

#### (2) 反復持ち上げ動作によるばらつきの要因の解析

前述した荷物取り扱い時の操作力測定装置を利用し、荷物の反復持ち上げ動作実験を再度行い、動作時の操作力の反復に伴う緩やかな増減のトレンドを調べた。荷物の重心位置および利き手・非利き手により、操作力のトレンドが変化することを明らかにした。また、操作力や筋電図に関して操作中の手の動きのばらつきの変動成分を詳細に検討するためSTF（短時間フーリエ変換法）を利用して解析を行い、ばらつきの周波数成分にも動作の繰り返しの影響が現れることを確認した。あわせて、動作のばらつきの要因としての全身の関節角の関連性を探るため、スパス構造解析を試み、動作パターンによって関連性にも変化がみられることを明らかにした。

経路探索を利用した動作のばらつきに関しては、経路計算上のパラメータの設定法に関する

研究を進めた。具体的には、移動距離、関節トルク値、関節トルク値の変化の3要因を含めた距離コスト関数の3者の重みの配分を変えて経路がどう変わるか、またそれが身体部位によってどう経路変化を生み出すかを検討した。その結果、上肢と下肢に関しては、3要因に重みを入れない条件でおおむね妥当なばらつきを持った経路が生成できることが判明した。また、どの身体部位の関節トルクに重みを置くかを変えることで、反復作業時間に20%程度の増減が生じることが確認できた。

### (3) デジタルヒューマンモデルによるシミュレーション解析

任意の作業での動作のばらつきの影響の検討は、DHMによるシミュレーションで行った。まず、ランダムにばらつきが混入する条件での動作シミュレーションが可能ないように、DHMのシステムを拡張した。具体的には、人や荷物の配置、力の大きさ、移動方向などをランダムに生成できるようにスクリプト機能の拡張と処理の高速化を行った。その結果、最大15,000秒(4時間)までのランダムな荷物取り扱い作業のシミュレーションが可能になった。また、従来の反復作業の負担評価手法の文献を改めて整理し、力の大きさと頻度に加えて反復作業時間中の活動時間の比率(デューティ比, DC)も評価のための作業要因として扱うことにした。

以上を踏まえて、作業の保持時間や手位置(Hp)などを変えた荷物取り扱い作業のシミュレーションを行い、反復作業時間との関係を調べた。その結果、たとえば持ち上げ距離が長いことよりも、始点と終点の位置のばらつきのほうが、反復可能時間の短縮に影響しやすいこと、デューティ比については、これが高いと単純に反復可能時間は減少するが、ランダムな手位置変化を与えないと反復作業時間が延長することなどを明らかにすることができた(表1)。手位置Hpの変動による作業時間の短縮は、デューティ比によるばらつきよりも大きく、かつ任意の作業動作で利用できるため、有用なばらつきの要因であると判断された。

表1. デューティ比DCと手位置Hpの変動による連続作業時間D(秒, 上段)とその相対値(% , 下段)

関節	DC	Hp
肩関節	951±68	733±85
	102.5±7.3	78.9±9.2
腰部	1067±43	849±59
	103.8±4.1	82.6±5.7
膝関節	948±67	689±49
	103.5±7.3	80.3±5.4

### (4) 実測による動作のばらつきの実測

(3)のシミュレーションで、反復作業時間に手位置の変動が与える影響が大きいことが明らかになった。そこで、手位置が変動する作業条件での実測実験を行い、その影響を検討した。実験条件としては、荷物質量を1, 7.5, 15 kgの3条件、荷物高さは2条件とし、同じ質量の荷物4個を設置方位が90度に直交するようにレイアウトされた高さの異なる作業台の間を移動しながら、荷物の運搬を行う作業とした。荷物の取り置き順番は指定したが、立ち位置と作業姿勢は任意とし、一般的な荷物運搬で発生するランダムな立ち位置が生じるようにした。同じ荷物質量、高さの条件ごとに200回の荷物の持ち上げと下ろしを測定し、そのデータの分布の傾向を検討した。作業姿勢と作業位置はモーションキャプチャシステムで測定した。分布は、両足中心を原点として手位置も左右の midpoint の床平面上での原点からの変位により検討することとした。データ分布はカーネル密度推定によるコンター図の作成と、前後左右方向の変位の平均値と標準偏差による数値化を行った。その結果、手位置は荷物が重いほど体に近づく傾向はみられたものの、そのばらつきは標準偏差で10~15 cm程度(図2)であり、荷物質量の影響は見られなかった。また、荷物位置が高い場合と低い場合においても、手位置が高いほうが前後方向よりも左右方向のばらつきがやや大きい傾向がみられた。

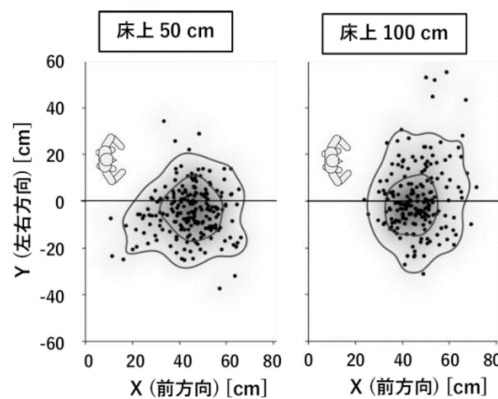


図2. 手位置のばらつき(荷物質量7.5 kg条件)

今回得られた手位置のばらつきは、(3)のシミュレーションで仮に使用したばらつきと同程度であった。この値を利用することでばらつきを考慮した反復作業評価が可能になったことが確認できた(図3)。

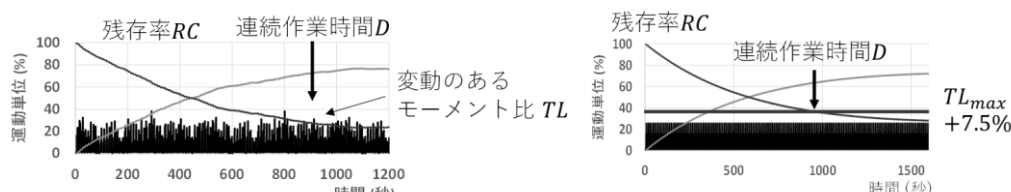


図3. 手位置のばらつきのモデルへの追加方法(左:手位置ばらつきを直接設定する方法、右:モーメントに一定のばらつきのレンジを設定する方法)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 HIRANAI Kazuki, SEO Akihiko	4. 巻 8
2. 論文標題 Evaluation of time-varying working posture based on interjoint coordination features extracted from sparse structure learning	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00500	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 瀬尾明彦, 平内和樹, 菅間敦
2. 発表標題 保持時間と作業位置の変動が反復持ち上げ作業の連続作業時間に与える影響
3. 学会等名 日本人間工学会第63回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hiranai, Miho Yaji1, Akihiko Seo
2. 発表標題 Evaluation of Force Exertion Strategies During Repetitive Lifting/Lowering Tasks Based on Time-Frequency Analysis
3. 学会等名 21th Triennial Congress of the International Ergonomics Association（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬尾明彦, 平内和樹
2. 発表標題 経路探索法を利用した荷物取り扱い動作の経路とばらつき
3. 学会等名 本人間工学会第62回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 矢治美穂, 平内和樹, 倉元昭季, 瀬尾明彦
2. 発表標題 左右負荷の不均一さが荷物持ち上げ反復作業に与える影響
3. 学会等名 日本人間工学会第61回大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関