

令和元年6月7日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01247

研究課題名(和文) 身体負荷の異なる複数タスクの順序効果を考慮した負担評価法の開発

研究課題名(英文) Development of a method of workload estimation for sequential manual tasks consisting multiple tasks with various level of physical workload

研究代表者

瀬尾 明彦 (SEO, Akihiko)

首都大学東京・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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、身体的な負荷が異なる複数の作業の実施順序を変えた場合の身体負担の違いを明らかにし、適切な作業順序の設計に利用できる評価法の構築を試みた。まず作業負荷の異なる複数の作業の順序を変えて行う模擬実験により、作業の実施順序により特に主観的負担感に明らかな順序効果が表れることを確認した。そこで、この現象を筋の生理学的なモデルに当てはめ、さらに時間的な平滑化を行うことで、任意の複数作業を任意の順序で実施した場合の負担評価と実施順序の検討ができるシステムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

仕事の実施順序をどのように決めるべきかという課題は、仕事だけでなく生活面でも多くみられる。それを設計する根拠となる推定法を提案したことが、本研究の学術的意義である。また、推定法をデジタルヒューマンに組み込んで任意の作業を仮想的に組んで順序効果をテストできるシステムとしたことは、この研究成果の手軽な利用を推進する効果があり、社会的に有益であると思われる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a system to evaluate the work-load of multiple sequential tasks using a digital human and muscle fatigue model. Several experiments of material handlings with various levels of physical workload were carried out to clarify the effect of the order of the sequential tasks. To establish a theoretical model and evaluating procedures, the muscle fatigue model was applied. The model assumes that the muscle motor unit consists of resting, activated, and fatigued components. A temporal smoothed value of the active component ratio to the non-fatigued component was used to estimate workload. A system was developed using this model to evaluate workload of any combination of sequential tasks of the single manual handling task. We found that the estimated workload using the simulation and the subjective scores showed a similar pattern with the load of the sequential tasks and repetitions.

研究分野：社会システム工学・安全システム

キーワード：人間工学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 昨今のものでづくりの現場では、現場製品の使いやすさや職場の働きやすさを改善するために身体負担の軽減が進められている。その目的でデジタルヒューマンモデル（以下、DHM）の利用が進みつつある。DHMには、身体負担評価手法として、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評価法のほか、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）により連続的に作業負荷を数値化する生体力学モデルをベースとする方法がある。このうち生体力学モデルによる方法は、姿勢の微妙な変化もトルクや力の変化として記録できるので、詳細な検討が可能である。時間的な効果についても、筋生理学的な観点から、姿勢保持に必要なトルクを筋が発揮した場合の疲労の蓄積と休息による疲労回復の過程についてすでに多くの研究があり、時間累積の効果や休憩による改善効果のモデル化の基礎ができています。

(2) ただしDHMを利用した評価法においても、多彩な負荷のかかる複数タスクの順序効果の研究やその評価法の開発はほとんど行われていない。現状で唯一実用的な形で提案されている評価法は、米国のNIOSH（国立産業安全衛生研究所）の順序を考慮した荷物持ち上げ式である。しかしこの方法は、荷物持ち上げタスクを半日以上行うような長い時間の評価を対象とし、かつ作業の腰部への負担評価に限定されている。筋疲労モデルによる評価も、同一作業を反復する場合の経時的評価にとどまり、複数作業の順序効果の検討はほとんど行われていない。

2. 研究の目的

作業の快適性向上のため、コンピュータ上に構築された仮想の生産システムとDHMの併用が広がりつつある。仮想生産システムを利用すると、すべての作業条件が数値的に得られるので、作業の身体負荷の数値化も容易である。しかし、複数のタスクよりなる作業で、身体負荷の高いタスクと低いタスクをどのような順序で編成すると作業者の負担が低減されるかについては研究がほとんど進んでいない。そこで本研究では、まず負荷の異なる作業の実施順序を変えた実験により順序効果の現れ方を明らかにし、その結果に基づいてDHMの生体力学解析による身体負荷推定値を利用した複数タスクの順序効果を評価できる手法とシステムの開発を試みる。

3. 研究の方法

(1) 身体部位により負荷が異なるタスクの順序効果に関する実験：実際の作業を模した異なる姿勢での作業を異なる実施順序で行い、順序効果を調べる実験を行う。作業としては、前屈、中腰、座位といった負荷の部位と程度が異なる基本的な作業姿勢を選定する。これらの作業中の姿勢、筋電図、および主観的負担感を記録する。

(2) 作業順序効果のモデル化：作業順序の効果は、作業負荷が持続すると疲労が蓄積して時間的に負担感が高くなるが、その程度が作業による負荷の程度や負荷のかかる部位が変わると蓄積したり回復したりするモデルである。このモデルとして、DHMによって推定された筋活動のフィルタ処理あるいは疲労の蓄積・回復の経時的モデルである筋疲労モデルの適用可能性を検討する。順序効果のモデル化としては、筋疲労モデルをそのまま利用する方法と、身体各部位の負荷を二値化して組み合わせを検討する方法の検討も試みる。

(3) DHMへの実装：以上の結果を踏まえて作業順序効果の検討がモデル上で実施可能な機能を構築し、DHMに実装を試みる。

4. 研究成果

(1) 前傾の程度に違いのある複数の保持姿勢作業における負担評価の実験において、その順序を入れ替えた場合の腰部の負担の推移を検討した。評価は筋電図と主観と姿勢により行った。結果的に筋電図と姿勢（体幹前傾角）には明確な順序効果の影響はとらえられなかったため、主観を中心に評価することとした。主観は作業時間とともに経時的に増加する傾向があり、それが姿勢の種類を変えると一時的に軽減する傾向が明らかになった。その際、前傾が深く腰部への負荷が高い作業が持続したあとに前傾が浅く負荷が軽い作業が続くと特に大きな軽減効果が表れることが明らかになった。また、主観に基づく評価指標として、全体の平均負担度、経過中の負担度の最大値、最終の負担度の3つが、評価指標として利用できることが明らかになった。

(2) 作業種類を変えた場合の繰り返し持ち上げ姿勢での負担評価実験として、前屈持ち上げ、中腰持ち上げ、腕持ち上げの3種類の持ち上げ姿勢の影響を調べた。いずれの作業も部位に応じた主観的負担感の増加が明確にとらえられたが、持ち上げ動作による作業の回数やトルクの累積負荷に応じた負担感の増加に加え、単に時間的に増加する負担成分があることも明らかになった。

(3) 任意の動作で作業による負荷で生じる筋疲労を定量的に求めることができるモデルを利用し、反復動作の負担評価の定式化を試みた。ここで利用した筋疲労モデルは Xia らのモデル (引用文献①) で、筋運動単位を活動分、疲労分、非活動分の 3 要素とし、その構成が筋活動と休息により増減するとみなす。反復動作の評価は、筋の疲労成分の増減をそのまま利用する方法と、疲労していない成分に対する筋活動成分を用いる方法がある。文献的に得られる筋疲労モデルのパラメータによると、筋の疲労成分の回復にかかる時間は極めて長く、そのままでは一時的な休憩による筋疲労の回復を表現できない。逆に、疲労していない成分に対する筋活動成分を使用すると、筋活動の低い休憩時には疲労度がすぐに低下してしまい、通常、休息時に徐々に回復する疲労感のパターンとも一致しない。そこで本研究では、後者に対して時間的に平滑化する方法を利用することにした。平滑化の方法としては、単純な移動平均法と指数平滑化法を比較検討した。

(4) 身体部位の負荷を二値化した順序効果の検討法：任意の作業の負荷をそのまま順序効果の検討に利用する方法は、作業の種類が多い場合にその順序の組み合わせが多いため、計算時間が膨大になる。そこで、身体各部位の負荷を二値にしてその組み合わせで順序を評価する方法を検討した。高負荷が連続する順序の組み合わせは、疲労が蓄積するので回避すべき順序の並びとすると、このモデルは連の長さを最小化する問題に帰着する。また、作業の後半に高負荷作業があると、作業の終了時点の疲労感が特に高くなる。そこでこの 2 点を踏まえた組み合わせ最適化問題として検討を行った。結果として、作業順序をある程度の数まで絞ることは可能になったが、最終的には絞った作業順序については、筋疲労モデル等を併用して評価する必要性が明らかになった。

(5) 平滑化を利用した反復疲労の推定モデルに実測データを当てはめ、その適用条件や平滑化パラメータの検討を行った。実測データは、座位、中腰、腕持ち上げの 3 種類の作業の反復と短時間の休憩の挿入をいくつかの組み合わせで行い、その間の主観的な負担感を上肢・腰部・下肢で記録した。評価に使用する関節については、肩・肘・腰部・股・膝の各関節の使用の可否を検討した。その結果、関節としては肩関節・腰関節・股関節がそれぞれ評価に適すること、平滑化法については、移動平均よりも指数平滑化法のほうが逐次的に評価値を計算できる利点があり、かつ主観的な負担感と高い一致性を示すことが示された (図 1)。推定した評価値と主観的な負担感との相関は、肩関節・腰部・股関節でそれぞれ 0.938、0.855、0.974 であった。なお、複数タスクを繰り返す作業の実験データは、データ量が膨大になってその切り分けが困難になる。そのため、動作データの特徴量に基づく動作分割法の適用可能性の検討も合わせて行った。

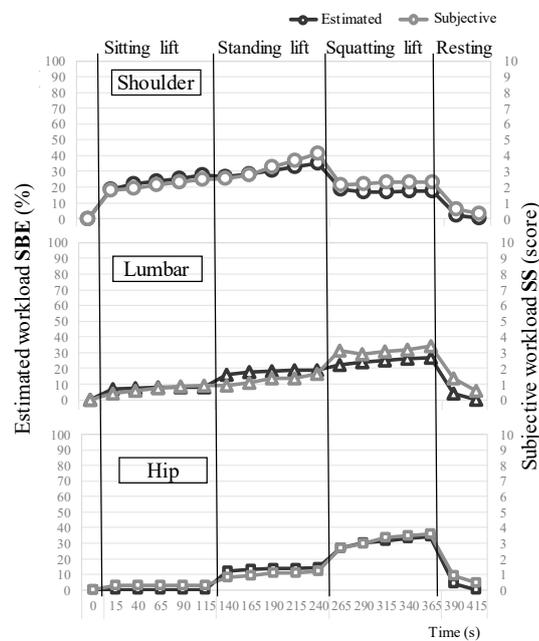


図 1. 指数平滑化推定による疲労の推定値と主観的負担感の経時的変化

(6) これまでの成果を作業順序評価システムとしてとりまとめ、DHM への実装を試みた (図 2)。平滑化法としては指数平滑化が妥当であるが、係数は変更の可能性を残した。筋疲労モデルによる推定値は、テキスト出力することで他のシステムから利用可能にし、かつ DHM 内でもグラフ表示することで、タスク中の負担感の経時変化の観察を随時可能にした。タスク順序入れ替えの総合的な評価値としては、筋疲労モデルにおける疲労度の全体平均値、最終値、ピーク値などを求めることができたようにした。複数タスクの順序効果の検討については、指定された反復作業のタスク条件でタスクの順序を入れ替えた評価結果を出力可能とし、その順位付けを可能にした。順序効果の評価は、すべての組み合わせでの疲労度を計算して指定した評価値でソートして順位付けができるようにした。

(7) 実際の利用場面を考慮し、短時間の複数のタスクを反復する作業を設定した実験を行った。作業としては上肢のみを使用する動作の小さいタスク、上肢の上下動が大きいタスク、上肢と腰部を同時に使用するタスクの 3 種類とし、そのすべての順序の組み合わせで実験を行った。モーションキャプチャによる姿勢計測と筋電図および主観的負担感を記録した。これを筋疲労モデルで解析したところ、時間的な累積効果がモデルではやや低めになることが判明した。また、これまでの結果とは異なり、姿勢の変化や筋電図の変化が明確に認められた。これは軽負

荷での短時間反復作業であったことが影響した可能性があり、姿勢変動を含めたモデルに今後展開させる必要があると推察された。

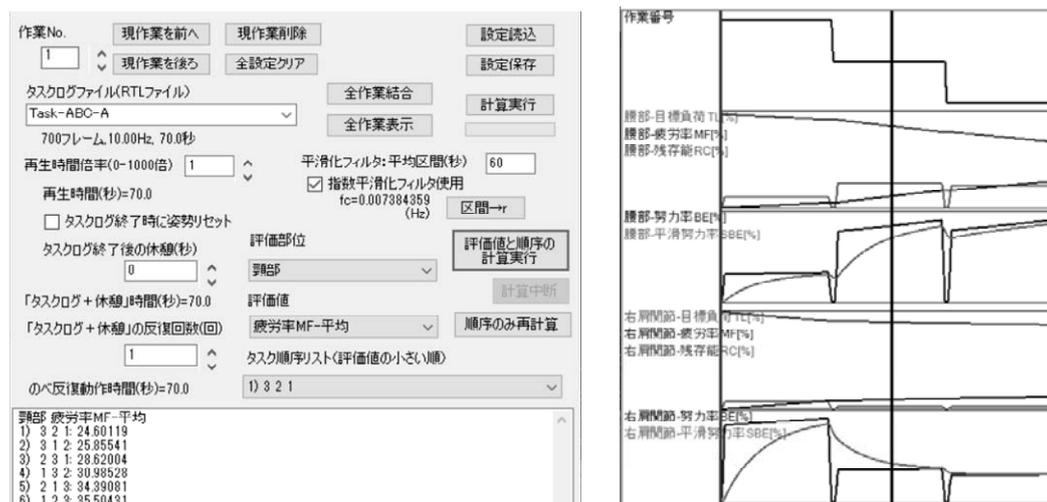


図 2. DHM に実装した順序評価機能

<引用文献>

- ① Xia, T., Frey-Law, L.A., A theoretical approach for modeling peripheral muscle fatigue and recovery. Journal of Biomechanics 41, 3046-3052, 2008

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 9 件)

- ① 矢治美穂, 平内和樹, 倉元昭季, 瀬尾明彦, 複数の反復作業の実施順序が身体負担に与える影響, 日本人間工学会第 60 回大会, 2019 年 6 月 15 日~16 日
- ② Akihiko Seo, Maki Sakaguchi, Kazuki Hiranai, Atsushi Sugama, Takanori Chihara, Workload estimation system of sequential manual tasks by using muscle fatigue model, 20th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, August 26-30, 2018
- ③ Kazuki Hiranai, Atsushi Sugama, Takanori Chihara, Akihiko Seo, Evaluation of neck motion due to change in working velocity based on feature extraction with motion division, 20th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, August 26-30, 2018
- ④ 坂口万喜, 瀬尾明彦, 筋疲労モデルを用いた負荷の異なる複数作業の人間工学的評価, 日本人間工学会関東支部 第 47 回大会, 2017 年 12 月 16~17 日
- ⑤ 瀬尾明彦, 坂口万喜, 茅原崇徳, 筋疲労モデルによる反復動作評価のシミュレーション, 日本人間工学会第 57 回大会, 2017 年 6 月 1~4 日
- ⑥ 瀬尾明彦, 坂口万喜, 村井啓太, 製品や生産システムの設計段階で利用する身体負担の可視化, 日本産業衛生学会 第 18 回作業関連性運動器障害研究会, 2017 年 12 月 2 日
- ⑦ 瀬尾明彦, 坂口万喜, 野沢朱那, 茅原崇徳, 反復荷物持ち上げ動作評価への筋疲労モデルの適用, 日本人間工学会関東支部 第 46 回大会, 2016 年 12 月 3~4 日
- ⑧ 瀬尾明彦, 茅原崇徳, 関節モーメントと関節角に関連する要因を考慮した作業姿勢評価法, 日本人間工学会第 57 回大会, 2016 年 6 月 25~26 日
- ⑨ 坂口万喜, 瀬尾明彦, 複数作業の実施順序が腰部負担に与える影響, 日本経営工学会平成 28 年度春季研究大会, 2016 年 5 月 28~29 日

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 坂口 万喜

ローマ字氏名: SAKAGUCHI, Maki