

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350449

研究課題名(和文) 作業の身体負担評価の自動化と最適作業条件探索のための手法の開発

研究課題名(英文) Development of a system for automatic evaluation of physical workload and searching for optimum working condition

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：作業の快適性向上のため、各種の人間工学的な身体負担評価法が利用されてきた。従来の評価手法は人の目視による観察法に基づく評価法なので、デジタルファクトリーでの微細な作業改善への適用には限界がある。そこで本研究では、作業特性や実測データをもとに作業姿勢を自動生成する方法と、生体力学モデルをもとに任意の姿勢での身体負担評価が可能な方法を開発した。これにより、解析の設定パラメータを最小限に抑えながら作業負担を可視化して最適作業条件の探索が可能となった。

研究成果の概要(英文)：For improving comfortable work place, various physical workload evaluation methods were used. The traditional method were based on visual inspections, thus application of detailed work load analysis for digital factory environment was limited. In this study, we developed an automatic posture generation method using posture characteristics related to working conditions and real working posture data. A new posture evaluation method for a given working posture was also developed based on biomechanical modeling. This method enabled to visualize the work load and to search optimum working posture with minimum numbers of parameters for the analysis.

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 作業姿勢

## 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は作業シーンを可視化できるので多くの人にとって理解しやすく、生産システムの構築のスピードアップに貢献している。

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）などが組み込まれているので、身体負担評価にも利用できる。しかし作業シーンの可視化の活用と比べると、これら身体負担評価はあまり利用されていない。その理由の一つは、これらの評価法が元々、目視による観察法として開発されたため、姿勢や作業条件の区分が2~4区分と荒く、結果的に評価結果もせいぜい4段階にとどまり、細かい分析には適さないことがあげられる。

これを補う精細な評価手法としては、生体力学的モデルがある。これは姿勢（関節角度）や操作力の連続量のデータをそのまま用い、各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）などの連続量の評価値を得ることができる。ただしデジタルファクトリーのなかで使えるような3次元のDHMを扱うには、姿勢や操作力データを3次元的に得る必要がある。姿勢については、テンプレート姿勢、姿勢生成のための逆運動学（IK）等の手法、あるいはモーションキャプチャで得た動的姿勢が利用される。操作力については、荷物だと単純にその質量でほぼ大きさと方向が決まるが、ドアやスイッチなどの機器の操作の場合は設計値とは異なる複雑な挙動を示すので実測が必要となる。以上のように姿勢や操作力のデータがそろえば、3次元の生体力学的モデルを用いた身体負担評価は利用可能になる。しかし現実には依然として設定すべきパラメータが多く、手軽には利用できない。3次元のモデルだと、比較的簡単なモデルでも指を除いてのべ40個前後の関節の自由度があり、厳密に姿勢や手に係る外力等を指定しないと、不要な回転軸成分のトルクが発生して評価値が大きくなる。また、関節の自由度が多いので、それだけ多数の評価値が算出されてしまい、全体を要約して評価を下すのも困難になる。

このように3次元の生体力学的解析を利用して作業の人間工学的な身体負担評価を利用するには、作業条件の設定と評価結果の取り扱いに依然として問題が多く残っている。

## 2. 研究の目的

作業の快適性向上のため、各種の人間工学的な身体負担評価法が利用されてきたが、昨今の3次元のデジタルファクトリーでの微細な作業改善への適用を可能とするため、本研究では、身体特性と作業特性を考慮することで設定パラメータを増やさずに所定の作業

条件での作業姿勢や操作力を自動的に生成し、生体力学モデルを用いて身体負担評価値を詳細に求める手法を開発する。そして、微細な作業条件変化に応じた身体負担の変化より、最適な作業条件を探索できるシステムの構築を試みる。具体的には、作業条件に応じた作業姿勢等の自動生成に基づく負担評価の自動化手法の開発、保守作業場面や福祉作業場面で見られるやや特殊な作業姿勢条件への適用の展開、開発した手法の妥当性の検証を行う。

## 3. 研究の方法

(1) 代表的な作業条件の探索場面の選定：人間工学評価で多く検討される作業条件は、操作物の条件と人の条件に大別される。これらの条件に含まれる要因の選別を関係論文のリビューによりまず行う。手作業を想定した場合の操作物の条件としては、操作物の高さや水平距離、操作面の傾斜角、操作力や操作トルクが想定される。人の条件については、性別、年齢、身長、体重が主な要因と考えられる。このような基本的な作業場面の条件について作業実験を行い、その姿勢生成や負担特徴を明らかにする。

(2) 保守作業場面と福祉場面への適用：保守作業場面では、生産場面とは異なり、不自然な姿勢が現れやすい。そこで保守作業場面に現れるいくつかの作業を自動生成して評価できるように試みる。ここで想定されるのは最大リーチ動作や仰臥位（あおむけ姿勢）である。最大リーチ動作では、肩甲骨、体幹、頸が同時に回旋する複雑な姿勢変化を示し、肩、腰、頸への負担が特に高くなる。こういった作業と姿勢の特性を想定し、その負担評価のための姿勢の自動生成と評価の手法を検討する。福祉場面については、車いす利用場面を想定する。これは、平成19年に公表された「公共交通機関の車両等に関する移動等円滑化整備ガイドライン」などで車いす利用者が想定されていることなどによる。

(3) システムの開発とモデル作業での評価確認：選定された作業条件と実測データや経験則を踏まえて姿勢の自動生成をするシステムを構築する。このシステムは、申請者が独自に開発しているDHMに組み込む。作業条件の変化に伴う身体負担度は、可視化して最適条件を提示する方法を試みる。構築した自動生成の手続きと評価値の確認は、計測システムを構築して実測値と比較することで行う。

(4) 妥当性の検証：妥当性の検証は、従来法との比較と新たな作業場面との比較で行う。従来法としては、広く利用されているOWASやRULAをその対象とする。新たな作業場面としては、上肢作業と全身作業が組み合わさった作業姿勢で比較実験を行う。

#### 4. 研究成果

(1) 姿勢生成に必要な作業場面と作業条件の選定を行った。最近の人間工学で姿勢評価が必要になる場面としては、従来の重量物の取り扱い作業や全身を大きく動かす作業よりも、スイッチやタッチパネルの操作で簡単に操作できる機器が広まっている。姿勢を決める作業要因として、操作物の位置（高さ・水平距離・方位）は特に全身の大まかな姿勢を決める要因である。軽作業の場合は、操作時間、頻度、操作速度、作業精度が手および上肢の肢位に影響を与える。そこで、一般的な機器操作場面を想定してタッチパネル操作を行い、その操作物の位置と操作回数を変えた実験を実施した。その結果、操作位置に応じて作業者が姿勢を変えることは従来通り観察されたが、それ以外に操作面の傾き角と操作回数が、手関節・肘関節・肩関節のすべてに影響あたえることが確認できた。これは特に作業位置が肩の高さにあって上肢でしか姿勢の調整が困難な条件や、作業位置が腰の高さにあって姿勢の取り方の自由度が高い条件で明らかであった。本実験での姿勢はモーションキャプチャで記録し、それから平均の関節角度データを求めてテンプレート姿勢を作成し、姿勢の自動生成に利用できるようにした。この操作面角度と操作回数を考慮した姿勢テンプレートと従来の姿勢テンプレートとを比較し、その特徴を分析した。

同様に軽い操作力を与える場合の姿勢も、反復を前提としないごく短時間の操作時間の場合と、持続的な力発揮をする場合との実験も行った。その結果、操作力を与える姿勢では、反復の有無が姿勢に与える影響は小さいが、短時間の操作のほうが発揮力が高くなるために身体負担は高めになることが確認できた。この姿勢データも、タッチパネル操作と同様、平均の関節角を求めて姿勢テンプレートとして利用可能にした。

(2) より多様な場面での姿勢生成に対応するため、メンテナンス作業に関係のある仰臥位での押し動作、最大リーチ動作、車いす作業時の姿勢の分析を行った。仰臥位では、姿勢の変化は小さいが、作業条件に応じて床反力の作用点が変わり、それに伴って体幹部の身体負担が変わることを考慮する必要があった。最大リーチ動作については、操作方向に応じた肩周囲（肩甲帯）の動きと筋活動を分析した。肩の動きは操作方向にはあまり影響を受けなかったが、筋活動はその操作方向に応じた筋が選択的に活動することを確認した。このデータを用い、肩甲帯の動きの推定式と負担評価モデル式を構築した。肩甲帯の動きの推定式を用いることで、従来、キャプチャが難しく、上肢のリーチ動作と姿勢が不自然だった部分が改善されるようになった。また、肩甲帯の最大リーチ周辺での作業の負担の負担評価モデル式により、単純な生体力学モデルでは評価できない上肢の拳上時の

姿勢評価が適切に行えるようになった。車いす動作については、操作物の位置の条件（高さ・水平距離・方位）に加えて車いすの設置方位を変えた実験を行った。その結果、車いすの方向に応じて上肢だけでなく体幹の動きが大きく変化する。専用のテンプレートが必要なことが確認できた。これまでの実験データにより得られた実測テンプレートを活用して姿勢の自動生成機能を向上させるため、個別の実測テンプレートの平均を求める機能をDHMのシステムに組み込んだ。計測したデータが静的な場合と動的な場合の両方に対応出来るようにした。これにより、条件間の違いを平均化して比較できるようになった。

(3) ここまでの研究で、作業位置に応じた姿勢の生成が可能になった。これを利用し、姿勢による身体負担の新たな総合評価法の構築を行った。評価のベースとしたのは生体力学モデルによる関節のトルク比である。評価は、部位別の評価と改善への利用を想定して、左右の上肢・腰部・左右の下肢の評価値を求め、そのうえで全身の総合評価値を決めた。上肢の評価値は、肩関節・肘関節・手関節の関節トルク比の最大値とした。ただし肩関節トルク比のみでは上肢を水平より拳上した肢位での評価値が低めになるため、先述した最大リーチに伴う肩周囲の筋活動に伴う評価値を加味するようにした。手関節についても、手に係る外力の作用点の推定精度が無視できなくなるため、操作力に応じてその寄与を調整するようにした。腰部の評価値は、腰部椎体まわりの関節トルク比と腰部椎間板圧縮力を考慮した値とした。下肢は、股関節・膝関節・足関節の3関節のうちの膝関節のみの最大トルク比とした。これは、股関節は腰部評価値との独立性が低いこと、足関節は床反力推定値の精度の影響を大きく受けてしまうことから評価に含めなかった。以上の部位別評価値の最大値を全身の総合評価値とした。

(4) 姿勢の評価値は、単純な複数の姿勢の比較であればその数値の大きさを比較するだけでよいが、作業条件の探索をするには、条件に応じた身体負担を立体的に可視化する必要がある。そこで、与えられた作業位置を中心に、所定の上下・前後・左右の空間に作業点が移動した場合の作業姿勢を自動生成し、その姿勢評価値を立体グラフで示す機能を構築した。これにより、ある作業空間での評価値の高低が可視化され、評価値の探索結果の妥当性が確認しやすくなった。評価値は、上肢・腰部・下肢それぞれの評価値およびその評価値を選べるようにした。これにより美別および全身の評価値が可視化される。そのうえで、最適化手法の1つである滑降シンプレックス法を用い、身体負荷の評価値が最少となる最適作業位置を探索できる機能をシ

システムに組み込んだ。

(5) 評価法の妥当性の検証について、従来から姿勢評価法として利用されている OWAS 法, RULA 法, REBA 法の 3 手法との評価値の比較を行った。いずれの評価法も DHM に組み込み、今回開発したシステムと同じ姿勢での同時評価が可能になるようにした。その結果、手に外力がかからない条件では、OWAS 法と REBA 法の 2 手法と今回開発した評価法は高い相関を持つことが確認できた。しかし上肢評価法である RULA 法との相関は低く、また外力がかかる場合はいずれの方法とも相関が低かった。RULA 法との相関が低かったのは、本研究の評価値が関節トルク比を重視して関節角の影響が反映されにくいためと考えられた。また、実測データと比較したところ、最適化で探索を行うと体に近い位置は姿勢に寄らず関節トルク比が小さくなるため、不自然な姿勢が選択される場面が認められた。そのため、関節角による影響を加味した評価値を生成できるようにシステムの拡張し、妥当な姿勢が生成されるようになった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① 門松 誠, 瀬尾 明彦, タッチパネルの操作法が全身の姿勢と身体負担に与える影響, 日本経営工学会論文誌, 査読有, Vol. 67, pp. 10-19, 2016
- ② 門松 誠, 瀬尾 明彦, 組立作業の押し込み動作と作業条件が全身姿勢生成に与える影響および身体負担評価, 日本経営工学会論文誌, 査読有, Vol. 67, pp. 49-58, 2016

〔学会発表〕(計 11 件)

- ① 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, 三重県立看護大学(三重県津市), 2016 年 06 月 25 日~2016 年 06 月 26 日
- ② 瀬尾 明彦, 門松 誠, 茅原 崇徳, 最適作業条件探索のための身体負担評価法と可視化システム, 日本経営工学会 2015 年度秋季大会, 金沢工業大学 扇が丘キャンパス(石川県野々市), 2015 年 11 月 28 日~2015 年 11 月 29 日
- ③ 瀬尾 明彦, 産業現場での人間工学の役割と可能性, 第 88 回日本産業衛生学会, グランフロント大阪(大阪府大阪市), 2015 年 05 月 13 日~2015 年 05 月 14 日
- ④ 門松 誠, 瀬尾 明彦, 仰臥位作業時における体圧分布の変化と体幹の負担の関係, 日本人間工学会関東支部 第 43 回大会, 首都大学東京 日野キャンパス(東京都日野市), 2013 年 12 月 07 日~2013 年 12 月 08 日
- ⑤ 門松 誠, 茅原 崇徳, 瀬尾 明彦, 作業条

件に基づく姿勢生成手順の基礎的検討および姿勢負担評価, 日本経営工学会 平成 25 年度秋季研究大会, 日本工業大学 宮代キャンパス(埼玉県南埼玉郡宮代町), 2013 年 11 月 16 日~2013 年 11 月 17 日

- ⑥ 門松 誠, 瀬尾 明彦, 背面接触圧を考慮した仰臥位作業時の上肢関節トルクの推定, 日本人間工学会関東支部 第 44 回大会, 早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都新宿区), 2014 年 12 月 06 日~2014 年 12 月 07 日
- ⑦ 西島 麗, 瀬尾 明彦, 最大リーチを伴う作業の操作方向が身体負担に与える影響, 日本人間工学会関東支部 第 44 回大会, 早稲田大学 早稲田キャンパス(東京都新宿区), 2014 年 12 月 06 日~2014 年 12 月 07 日
- ⑧ 門松 誠, 瀬尾 明彦, 車いす利用時における操作機器の位置が作業姿勢に与える影響, 日本経営工学会平成 26 年度秋季研究大会, 広島大学(広島県東広島市), 2014 年 11 月 08 日~2014 年 11 月 09 日
- ⑨ Makoto Kadomatsu, Akihiko Seo, Effect of number of operations of touch panel on whole body working posture and physical workload, The 15th Asia Pacific Industrial Engineering and Management System Conference, Korea (Jeju), 2014 年 10 月 12 日~2014 年 10 月 15 日
- ⑩ Makoto Kadomatsu, Akihiko Seo, Effect of pushing direction and working posture during assembly task, The 21st Asian Conference on Occupational Health, Japan (Fukuoka), 2014 年 09 月 02 日~2014 年 09 月 04 日
- ⑪ 門松 誠, 瀬尾 明彦, 組立作業の押込方向と押込荷重が作業姿勢に与える影響, 日本経営工学会平成 26 年度春季研究大会, 東京理科大学野田キャンパス(千葉県野田市), 2014 年 05 月 17 日~2014 年 05 月 18 日

## 6. 研究組織

(1) 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

(2) 連携研究者

茅原 崇徳 (CHIHARA, Takanori)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号: 00582967

(3) 研究協力者

門松 誠 (KADOMATSU, Makoto)