

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 18 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760123

研究課題名(和文)人間工学的設計のための負担感評価モデルの構築

研究課題名(英文)Development of perceived discomfort model for ergonomic design

研究代表者

茅原 崇徳(CHIHARA, Takanori)

首都大学東京・システムデザイン学部・助教

研究者番号：00582967

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)：本研究では、身体負担の総合評価関数の定式化について検討した。はじめに、身体部位ごとに任意の作業負荷をかけて負担感を計測する実験を行った。複数の近似モデルで負担感評価関数を作成し、ロジスティック関数を用いて負担感を高い精度で予測できることを確認した。さらに、上肢および全身の総合負担を予測する評価関数を定式化した。具体的には、すべての部位の負担が低い場合は平均値に影響され、一つ以上の負担感が高い場合には最大値に影響される関数として定式化した。提案した総合負担評価関数の有効性を実験により検証し、従来手法と比較して精度の高い評価指標であることを実証した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to formulate a relationship between the total perceived discomfort and the perceived discomforts of each body part. The perceived discomforts of each body part were measured with different workloads. Multiple approximation models were compared in terms of the accuracy of predicting the perceived discomfort, and the logistic function was selected because its average error was lowest. In addition, the total perceived discomfort functions of upper limb and entire body were formulated. The total perceived discomfort of these functions was dominated by the average discomfort when the discomfort of each body part was relatively low; conversely, it was dominated by the maximum discomfort when the discomfort of each body parts was relatively high. A verification experiment showed that the prediction accuracy of the proposed total perceived discomfort function was the highest compared with typical observational methods for assessing the physical workload.

研究分野：設計工学

キーワード：人間工学 身体負担 関節モーメント 生体力学解析 デジタルヒューマン 応答曲面

1. 研究開始当初の背景

作業者の身体負担の増加は筋骨格系障害の発生につながるため、製造現場において身体負担が低い作業環境を設計することが求められる。また、工業製品の設計においても、使用者の身体負担の軽減は製品価値の向上につながるため、身体負担を考慮した設計が重要である。生体信号を用いて身体負担を実験により評価する場合、モックアップの作成や被験者の確保が必要であるため、時間やコストがかかるという問題がある。また、被験者に対する倫理的配慮から膨大な数の実験条件を設定することは困難であり、限られた実験条件数で実験を行う必要がある。

実験に基づく身体負担の評価が行われている一方で、人体をモデル化してコンピュータ上に構築したデジタルヒューマンモデル(DHM)を設計に応用する研究が注目されている。DHMを用いて身体負担をコンピュータ上で評価することで、試作の回数を削減することが可能になり、人間工学的設計を効率的に実施することが可能になる。

DHMでは、人体を剛体リンクモデルとみなし、人間の身体にかかる負担を力学的に求める生体力学解析により身体負担を評価する。最も基本となる静的な条件では、身体の自重や外力に対抗して姿勢を維持するために必要な各関節のモーメント(以下、関節モーメント)を用いて身体負担を評価する。生体力学解析では複数の関節自由度の関節モーメントが算出される。しかし、任意の関節モーメントを發揮した際に、人間が感じる負担感を定量的に評価した研究は十分に行われていない。さらに、複数の関節モーメントから負担感を総合的に評価する手法はほとんど検討されていない。関節モーメントを個別に評価すると、複数の関節モーメントにトレードオフの関係が存在する場合に、一つ的设计案を選択することが困難になる。したがって、複数の設計案から最適な設計案を選択するためには、身体負担の総合評価指標の構築が必要である。身体負担の総合評価指標の確立により、DHMを応用した効率的な人間工学的設計の実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、身体負担の総合評価指標を確立することを目的とする。はじめに、各関節における関節モーメントと主観的負担感の関係を定式化することを目的として、各関節に任意のモーメントをかけて主観的負担感を計測する実験を行った。その際、関節角度や性別が与える影響についても調査した。次に、複数の関節モーメントを総合評価するための基礎的な知見を得ることを目的として、上肢のみを対象とした総合負担評価関数の定式化について検討した。さらに、全身を対象とした総合負担評価関数の定式化を行い、観察に基づく身体負担の評価法(観察法)と評価結果を比較し、提案する評価式の有効性

について検討した。

3. 研究の方法

(1) 関節ごとの主観的負担感の定式化

10名の男性被験者を対象に、任意の関節モーメントを付加した際の負担感を計測した。計測対象は上肢の12個の関節運動方向(肩関節の伸展、屈曲、内転、外転、内旋、外旋、肘関節の伸展、屈曲、手関節の背屈、掌屈、尺屈、橈屈)である。また、関節モーメントの大きさは各被験者の最大値で正規化し(以下、関節モーメント比)、20、40、60%とした。関節モーメント比は保持する重りを変化させて調整した。例として肩関節の屈曲、内転、内旋の肢位を図1に示す。主観評価の計測には、負担感を5段階で評価したのち、さらに10段階で評価するCategory Partitioning 50(CP-50)を使用した。

負担感評価関数の近似モデルとして以下の三つの単調増加関数を設定した。

$$w = a_s \cdot r + b_s \quad (1)$$

$$w = a_s + b_s \cdot \exp(c_s r) \quad (2)$$

$$w = \frac{a_s}{1 + \exp\{b_s(r - c_s)\}} \quad (3)$$

式(1)は線形モデル、式(2)は指数関数モデル、式(3)はロジスティック関数モデルである。 w は0から1に正規化した主観的負担感であり、 r は関節モーメント比である。また、 a_s 、 b_s 、 c_s は各モデルの回帰係数である。なお、回帰係数は誤差二乗和の最小化問題を最適化して決定した。3つの近似モデルを用いて応答曲面を作成し、平均絶対誤差を比較して使用する近似モデルを選定した。

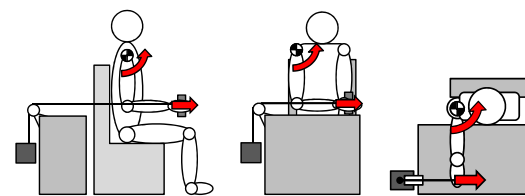


図1 関節モーメントを發揮する肢位

(2) 上肢の総合負担評価関数の定式化

上肢の負担感を評価する観察法であるRULA(Rapid Upper Limb Assessment)を使用して教師データを作成し、上肢の総合負担関数の近似モデルの選定を行った。具体的には、RULAの姿勢と保持重量の分類に基づいて生体力学解析を行い、RULAの総合スコアを目的変数とし、各関節自由度の関節モーメントを説明変数とした。上肢の総合負担感 T_U の近似モデルとして、以下の3つを設定した。

$$T_U = a_U \cdot \sum_{i=1}^{N_U} w_i / N_U \quad (4)$$

$$T_U = a_U \cdot \max_i w_i \quad (5)$$

$$T_U = a_{U,1}(1-p_U) \cdot \sum_{i=1}^{N_U} w_i / N_U \quad (6)$$

$$+ a_{U,2} \cdot p_U \cdot \max_i w_i$$

$$p_U = \frac{1}{1 + \exp\left\{b_U \left(\max_i w_i - c_U\right)\right\}} \quad (7)$$

式(4)は平均モデル,式(5)は最大モデル,式(6)はハイブリッドモデルである。また, w_i は*i*番目の関節自由度の負担感であり, N_U は考慮する関節自由度の数である。 $a_{U,1}$, $a_{U,2}$ は各モデルの回帰係数である。式(7)で表される p_U は平均モデルから最大モデルへの遷移の度合いを表す関数(以下,遷移関数)であり b_U と c_U は遷移関数の回帰係数である。図2に示すように,遷移関数 p_U は各自由度の負担感の最大値とともに増加する。各自由度の負担感が比較的低い場合,遷移関数 p_U は小さくなり,主観的負担感は平均モデルにより決定される。一方,各自由度の負担感が比較的高い場合,遷移関数 p_U は大きくなり,主観的負担感は最大モデルにより決定される。なお,回帰係数は誤差二乗和の最小化問題を最適化して決定した。3つのモデルの平均絶対誤差を比較し,使用する近似モデルを選定した。

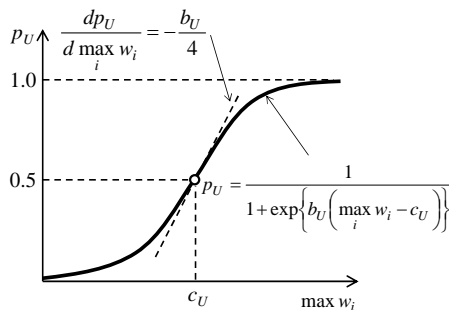


図2 遷移関数の模式図

(3) 全身の総合負担評価関数の定式化

被験者に重量物を保持させて姿勢と総合負担感を計測し,計測した姿勢から関節モーメント比を計算して教師データを作成した。被験者は12名(男性6名,女性6名)であり,実験要因は作業点の水平距離,作業点の高さ,荷物重量の三要因である。水平距離と高さは被験者の足関節と地面の交点が基準であり,水平距離は被験者の身長比の20%,40%とし,高さは身長比の40%,60%,80%とした(図3)。また,荷物重量は男性被験者が0.0,5.0,10kgであり,女性被験者が0.0,2.5,5.0kgである。総合負担感 T_E はCP-50を用いて50段階で計測したのち,0から1に正規化した。

全身の総合負担感 T_E の近似モデルとして,以下のモデルを設定した。

$$T_E = (1-p_E) \cdot \sum_{i=1}^{N_E} t_i / N_E + p_E \cdot \max_i t_i \quad (8)$$

$$t_i = \frac{1}{1 + \exp\{a_{E,i}(r_i - b_{E,i})\}} \quad (9)$$

$$p_E = \frac{1}{1 + \exp\left\{c_E \left(\max_i t_i - d_E\right)\right\}} \quad (10)$$

ここで, t_i と p_E は*i*番目の関節自由度の負担感と遷移関数である。 N_E は考慮する関節モーメントの数である。また, $a_{E,i}$ と $b_{E,i}$ は各負担感の回帰係数であり, c_E と d_E は遷移関数の回帰係数である。誤差二乗和の最小化問題を最適化して回帰係数を決定した。

総合負担感評価関数の有効性について検討するために,観察法との比較を行った。比較する評価法には,OWAS(Ovako Working Posture Analysing System),RULA,REBA(Rapid Entire Body Assessment),NIOSH Lifting Equationの4つを用いた。実験により計測された被験者の姿勢と把持重量から各手法の手順に従い総合負担感を求め,提案手法による結果と比較した。比較には各手法の総合負担感の予測値と実験で計測した総合負担感の実測値との相関係数を用いた。

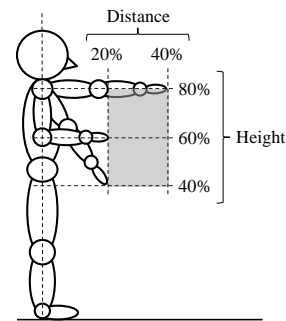


図3 重量物の保持位置

4. 研究成果

(1) 関節ごとの主観的負担感の定式化

負担感の計測結果をもとに,式(1)から式(3)の近似モデルを用いて応答曲面を作成した。作成した応答曲面の平均誤差を図4に示す。手関節の撓屈を除くすべての関節運動方向で,線形モデルの平均誤差が指数関数モデルとロジスティック関数モデルのいずれか,または両方よりも有意に高い。したがって,非線形関数の近似モデルの近似精度が線形モデルよりも有意に高いことから,被験者の主観的負担感には弱い非線形性を有していると考えられる。また,12方向のうち11方向でロジスティック関数モデルの平均誤差が最も低く,近似精度が高い。ロジスティック関数を用いた負担感評価関数の平均誤差は3~6%であり,十分な精度を有していることから,近似モデルとして採用した。各関節運動方向の回帰係数を表1に示す。

表1に示した回帰係数に対してクラスタ分析を応用した解析を行った結果,12個の負担感評価関数は肘関節屈曲以外の11個の運動方向で構成される第一クラスタと肘関節屈曲で構成される第二クラスタに分割された。

第一クラスタの負担感評価関数の回帰係数 a_S , b_S , c_S は、それぞれ 0.986, -7.56, 0.354 であった。また、女性被験者を加えて関節角度を変化させて同様の実験を行った結果、関節角度や性別が変化しても負担感評価関数が変化しないことを確認した。

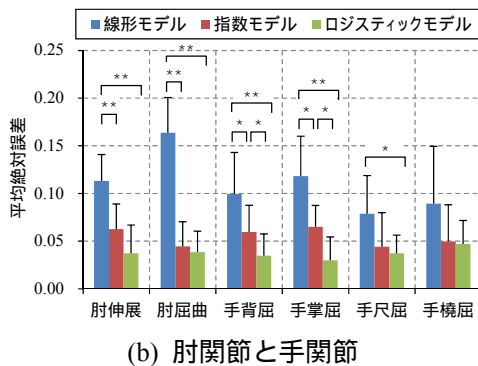
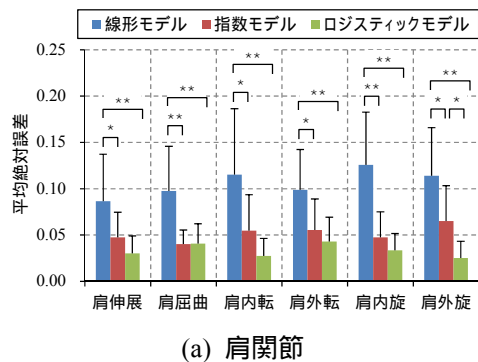


図 4 近似精度の比較 (各関節運動方向の負担感)

表 1 各関節運動方向の負担感評価関数の回帰係数

関節運動方向	a_S	b_S	c_S
肩関節伸展	0.996	-6.68	0.398
肩関節屈曲	0.974	-7.17	0.335
肩関節内転	0.974	-8.19	0.322
肩関節外転	0.988	-7.48	0.367
肩関節内旋	0.966	-8.58	0.296
肩関節外旋	0.984	-8.53	0.346
肘関節伸展	0.986	-8.26	0.338
肘関節屈曲	0.978	-9.93	0.234
手関節背屈	0.992	-7.89	0.366
手関節掌屈	1.000	-8.47	0.344
手関節尺屈	1.012	-6.40	0.420
手関節橈屈	0.994	-6.47	0.379

(2) 上肢の総合負担評価関数の定式化

各自由度の負担感の大きさにより総合的負担感を支配する要因が変化する可能性を検証することを目的として、各関節自由度の負担感の大きさにより教師データを二つのグループに分割し、各グループに属する解析条件の結果を用いて応答曲面を作成した。具

体的には、すべての自由度の負担感が 0.5 を下回るグループ (低負担感グループ) と負担感の最大値が 0.5 以上となるグループ (高負担感グループ) に分割した。そして、低負担感グループ、高負担感グループ、および全条件 (低負担感 + 高負担感) の三種類のデータセットで応答曲面を作成した。なお、負担感の計算には 4-(1) で導出した式を使用した。

表 2 に各近似モデルの回帰係数を示す。また、図 5 に近似精度の比較結果を示す。平均モデルと最大モデルを比較すると、低負担感グループでは平均モデルの平均誤差が低く、高負担感グループでは最大モデルの平均誤差が低い。したがって、総合負担感には各負担感が低い範囲では平均値に影響され、各負担感のいずれか一つでも高い値になると、最大値に影響を受けるようになると思われる。ハイブリッドモデルはこの特性を加味しており、平均誤差は 10% 程度と低いことから、総合負担感の定式化に対して妥当な近似モデルであると考えられる。

表 2 上肢の総合負担評価関数の回帰係数

近似モデル	回帰係数	
平均	a_U	1.79
最大	a_U	0.783
ハイブリッド	$a_{U,1}$	4.55
	$a_{U,2}$	0.729
	b_U	-8.54
	c_U	0.345

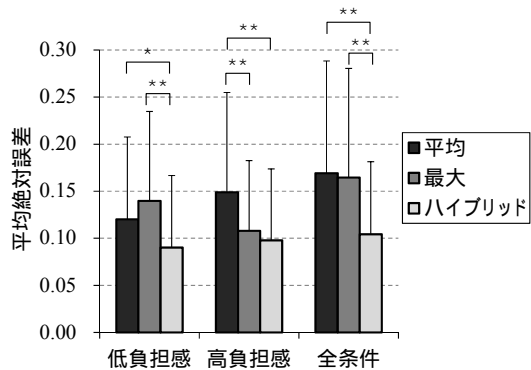


図 5 近似精度の比較 (上肢の総合負担)

(3) 全身の総合負担評価関数の定式化

表 3 に各関節の負担感関数と遷移関数の回帰係数を示す。また、各関節の負担感関数を図 6 に、遷移関数を図 7 に示す。6 つの関節のうち肘関節、肩関節、L5/S1 の三つの関節はモーメント比が比較的低い時点から負担感が増加し、モーメント比が 0.4 ~ 0.6 の範囲で負担感が上限に達している。一方、股関節、膝関節、足関節の三つはモーメント比が 0.8 ~ 1.0 の範囲で負担感が上限に到達する。したがって、作業環境の設計において、上肢と L5/S1 のモーメント比を下げるように設計を行うことがより重要であると考えられる。遷移関数の値は各関節の負担感の最大値が 0 を

超えた時点から急激に増加し、約 0.04 で 1.0 になっている。したがって、総合負担はほぼ各関節の負担感の最大値によって決定されることがわかる。なお、総合負担評価関数の平均絶対誤差は 0.116 であった。

総合負担感の実測値と予測値の相関係数を表 4 に示す。式 (8) で表される総合負担感評価関数は他の手法と比較して相関係数が高く、平均誤差は 10%程度であり、総合負担感を適切に評価できている。また、総合負担感評価関数は任意の方向の外力に対応可能であることや、評価値が連続量であるため詳細な評価が可能であるという利点から、従来手法よりも汎用性の高い評価指標である。

表 3 全身の総合負担感評価関数の回帰係数

関節	$a_E (c_E)$	$b_E (d_E)$
肩関節	-15.8	0.291
肘関節	-21.7	0.212
L5/S1	-16.5	0.278
股関節	-15.0	0.564
膝関節	-13.5	0.547
足関節	-13.9	0.658
遷移関数	-209	0.0219

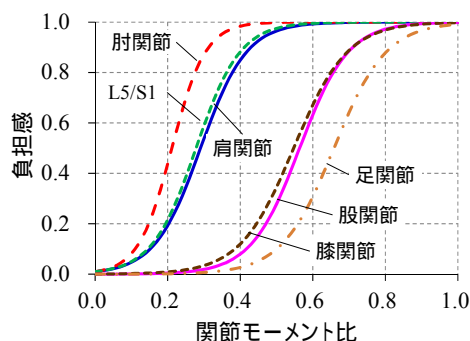


図 6 各関節の負担感

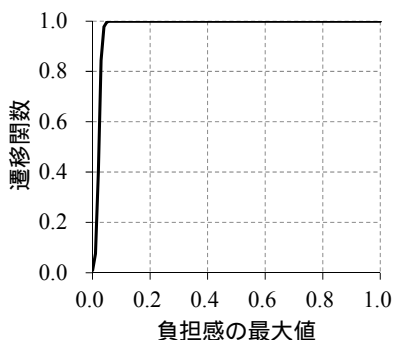


図 7 全身の総合負担評価関数の遷移関数

表 4 総合負担の実測値と予測値の相関係数

OWAS	RULA	REBA	NIOSH	提案式
0.161	0.429	0.593	0.436	0.840

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Chihara, T., Seo, A., Izumi, T., Total perceived discomfort function for upper limbs based on joint moment, Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering, 査読有, Vol.1, No.1, 2014, 36-50

Chihara, T., Izumi, T., Seo, A., Perceived discomfort functions based on joint moment for various joint motion directions of the upper limb, Applied Ergonomics, 査読有, Vol.45, No.2, Part B, 2014, 308-317

茅原崇徳, 和泉大樹, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく上肢の主観的負担感の定式化における関節角度の影響, 査読有, 人間工学, Vol.49, No.5, 2013, 211-218

〔学会発表〕(計 10 件)

Chihara, T., Hoshi, S., Seo, A., Function approximation model for prediction of total perceived discomfort considering differences of discomfort characteristics depending on body part, 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association, August 9-14, 2015, Melbourne (Australia)

茅原崇徳, 保志沙那子, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく矢状面における全身の総合的負担感の定式化(観察法との比較), 日本機械学会 第 24 回設計工学・システム部門講演会, 2014 年 9 月 17-19 日, 徳島大学(徳島県・徳島市)

茅原崇徳, 保志沙那子, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく矢状面における全身の総合的負担感の定式化に関する基礎的検討, 日本人間工学会 第 55 回大会, 2014 年 6 月 5-6 日, 神戸国際会議場(兵庫県・神戸市)

茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく上肢の総合的負担感の定式化, 日本機械学会 第 23 回設計工学・システム部門講演会, 2013 年 10 月 23-25 日, 沖縄県読谷村役場(沖縄県・読谷村)

Chihara, T., Seo, A., Proposal of Function Approximation Model for Prediction of Total Perceived Discomfort on Upper Limb, JSST 2013 International Conference on Simulation Technology, September 11-13, 2013, Tokyo (Japan)

Chihara, T., Izumi, T., Seo, A., Selection of Approximation Model on Total Perceived Discomfort Function for the Upper Limb base on Joint Moment, The Institute of Industrial Engineering Asian Conference 2013, July 18-20, 2013, Taipei (Taiwan)

茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, 関節モ

ーメントに基づく上肢の主観的負担感の定量化(関節角度による影響の検討), 日本人間工学会 第 54 回大会, 2013 年 6 月 1-2 日, 日本大学 生産工学部(千葉県・習志野市)

保志沙那子, 茅原崇徳, 瀬尾明彦, 身体負担の異なる複数作業を行う作業台高さの基礎的検討, 日本人間工学会 第 54 回大会, 2013 年 6 月 1-2 日, 日本大学 生産工学部(千葉県・習志野市)

茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく上肢の主観的負担感の定量化(個人差による影響の検討), 日本機械学会 第 22 回設計工学・システム部門講演会, 2012 年 9 月 26-28 日, 広島大学(広島県・東広島市)

茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, 関節モーメントに基づく上肢負担感の定量化(近似モデルの検討), 日本人間工学会 第 53 回大会, 2012 年 6 月 9-10 日, 九州大学大橋キャンパス(福岡県・福岡市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

茅原 崇徳 (CHIHARA, Takanori)

首都大学東京・システムデザイン学部・助教

研究者番号: 582967