

モーションキャプチャによる動作解析に基づく ユニバーサルデザイン手法の提案

Proposal of a Universal Design Method Based on Motion Analysis by Motion Capture

清水澤 義和 (明治大学大学院理工学研究科) *1 松田 珠里 (明治大学工学部) *2
山内 智幸 (明治大学工学部) *3 井上 全人 (明治大学工学部) *4

*1 Yoshikazu SHIMIZUSAWA, Graduate School of Science and Technology, Meiji University
1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan, rupia6029@gmail.com

*2 Juri MATSUDA, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University
1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan

*3 Tomoyuki YAMAUCHI, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University
1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan

*4 Masato INOUE, Department of Mechanical Engineering Informatics, Meiji University
1-1-1 Higashi-Mita, Tama-ku, Kawasaki, Kanagawa 214-8571, Japan, m_inoue@meiji.ac.jp

キーワード: モーションキャプチャ, ユニバーサルデザイン, セットベース設計

1. 緒 言

近年の急速な経済の国際化や高齢化社会の到来に伴い、各企業はユーザーの多様性に配慮した製品開発が求められており、多様なユーザーを満足させるユニバーサルデザイン(UD)の考え方に注目が集まっている。UDとは、Maceにより提唱された7つの原則⁽¹⁾で構成される概念である。UDを製品開発で実現させるためには、ユーザーの身体的多様性と製品使用時の身体負荷を考慮する必要がある。現状では、平均的な体格などの特定のユーザーを対象とした設計手法が用いられていることが多く、多様なユーザーを満足させるUD手法の一般化が望まれている。本研究では、できるだけ多くの人が使いやすい設計を目的として、筋骨格モデルを用いた動作解析により身体負荷を考慮したUD手法を提案する。具体的には、ユーザーの身体特徴を範囲値で表現し、できるだけ多くのユーザーが満足する共通範囲解を導出することで、できるだけ多くのユーザーが、少ない身体負荷で製品を使用できるUD解を導出する。最後に、提案手法を陳列棚高さの設計問題に適用し、本研究の有効性を示す。

2. 多くのユーザーの身体負荷を軽減するUD手法

本章では、提案するユニバーサルデザイン手法における各ステップの方法について述べる。

2.1. 動作の計測

設計者はヒアリングや行動観察から製品の使用状況を調査し、ユーザーの要求事項を明確化する。このとき、モーションキャプチャを用いて動作を計測することで、製品使用時の姿勢を再現した条件を設計に反映させる。

2.2. ユーザーの分類

設計者はユーザーの要求事項を明確化する際、対象とす

るユーザーを定義し、階層クラスター分析のマハラノビス距離を用いて体格の似たユーザーをグループ毎に分類する。分析するデータは筋骨格モデル作成時に必要な身体各部とする。

2.3. 設計変数と性能変数の定義と分類

要求事項を基に設計変数と性能変数を定義する。UDを実現するためには、製品特性のみでなくユーザーの身体特性も考慮する必要がある。そのため、提案手法では設計変数を身体情報と製品情報の2種類に分類する。身体情報では、身長や体重などのユーザーの身体特性を表し、設計者が自由に変更できない変数を生業不能因子と定義する。製品情報も同様に、製品の寸法や質量などの変更可能な変数を制御可能因子、規格などにより製品特性が決められた変数を制御不能因子とそれぞれ定義する。製品特性と身体特性を設計変数として同等に扱うことで、ユーザーの身体的多様性を定量的に製品情報に反映させる。性能変数は、身体負荷を考慮するために、満たすべき製品使用時の身体負荷の値を要求性能と定義する。また、多様なユーザーを考慮することが目的のため、ユーザーがその製品を最低限使用できる条件を制約条件として設定する。

2.4. 設計変数と性能変数の範囲設定

提案手法では、ユーザーの身体特性を範囲値として表現することで、ユーザーの身体的多様性を考慮する。そのため、グループ毎に設計変数および性能変数に範囲値を付加する必要がある。設計変数における身体情報は、筋骨格モデル作成時に使用した変数から設定する。製品情報は、設計仕様や寸法規格を基に設定する。性能変数における要求性能は、2.3節で定めた満たすべき身体負荷の値を基に設定する。制約条件は、ユーザーの使用状況を把握し、最低限使用できる範囲内とする。

2.5. 設計変数と性能変数の関係式の導出

以上で設定した設計変数と性能変数を基に、設計変数と

性能変数の関係式を導出する．実験計画法の直交表から因子を身体情報に設定し，筋骨格モデルで製品使用時の身体負荷を解析することで，定量的に身体負荷や製品寸法を算出する．そして，応答曲面法を用いて近似式を導出する．

2.6. 設計解候補の導出

2.5 節で定式化した関係式より区間演算を行う．このとき，設計変数における制御可能因子の範囲値のみを分割し，設計変数の組み合わせがとりうる性能の範囲である可能性範囲を導出する．そして，実現性の少ない設計値を絞り込み，要求性能と制約条件を満たす設計変数の組み合わせを設計解候補として導出する⁽²⁾．

2.7. 設計解の決定

2.6 節で得られたグループ毎の設計解候補から共通集合を求め，設計解と定義する．

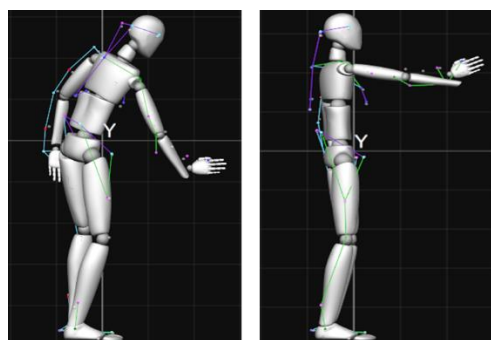
3. 陳列棚高さの設計問題への適用

3.1. 適用事例

私生活において，生活必需品を購入する時など重量物を取り扱うことは多々ある．例えば，小売店で使用される陳列棚には重い商品が下段に置かれる傾向が多く，様々な身体特性のユーザーが利用することが考えられる．そのため，商品を陳列する際，その商品の重量を考慮し適切な高さを設定する必要がある．しかし，実際の現場では，適切に高さが定められていないことが多く，個人の身長や筋肉量に合わせた高さが設定されていないため，前かがみの姿勢で重量物を取り扱うことになり，腰痛を引き起こす要因となる．そのため，設計者は，ユーザーの腰痛リスクなどを低減させるために，製品使用時の身体負荷を考慮した作業環境の設計が求められている．そこで，本研究ではデータベースから得られたすべてのユーザーを対象として，身体負荷の少ない陳列棚高さの設計を目的とする．

3.2. 動作の計測

本事例では，設計対象を使用する際の動作の計測として，身長 170.0cm，体重 62.0kg，体脂肪率 13.0%の成人男性を被験者とし，腰の高さにある物を把持する動作(動作 1)と肩の高さにある物を把持する動作(動作 2)の 2 種類を計測した．図 1 にそれぞれの動作の物体を把持する姿勢を示す．本事例ではこの 2 種類の動作を行った場合の陳列棚高さを設計することを目的とする．動作の計測には光学式モーションキャプチャ OptiTrack を使用した．



(a)posture 1 (b)posture 2
Fig.1 Posture when Grasping an Object

3.3. ユーザーの分類

本事例では，対象とするユーザーを人間特性データベースに含まれる日本人男性と定義した．このデータは，人数が 523 人，年齢が 21~84 歳の健常者から計測した値である．つぎに，階層クラスター分析のマハラノビス距離を用いてユーザーの分類を行う．分析するデータは，筋骨格モデル作成時に必要な変数である身長，体重，体脂肪率に加えて，グループ毎の身体特性の違いをより反映させるために手長，前腕長，上腕長，大腿長，下腿長，足長を追加で選択した．図 2 に階層クラスター分析の結果を示す．今回は 10 グループに分類した．

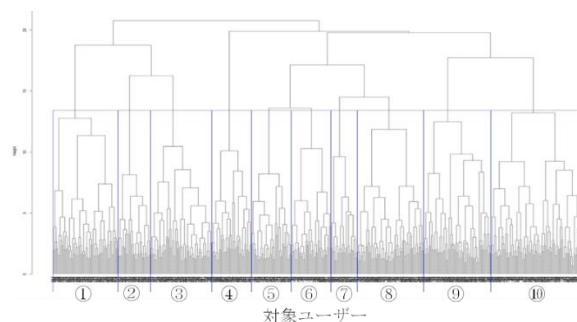


Fig.2 Result of Hierarchical Cluster Analysis

3.4. 設計変数と性能変数の定義と分類

設計変数と性能変数を定義するため，図 3 に示す陳列棚使用時の姿勢モデルを仮定した．図 3 より，ユーザーの身体情報のうち，身長 h ，体重 w ，体脂肪率 f が，製品使用時の身体負荷に大きな影響を与えると考えられるため，設計変数に定義する．さらに，製品情報として，本事例で算出する設計値を陳列棚高さ x と定義した．性能変数は，陳列棚使用時に腰への負担が最も大きいと考えたため，要求性能を L5/S1 椎間版(第五腰椎と仙骨の間)圧縮力 B_w と定義した．さらに，設計変数を制御可能因子と制御不能因子に分類する．身長 h ，体重 w ，体脂肪率 f は設計者が自由に変更できないため制御不能因子として定義する．製品情報の陳列棚高さ x は，設計者が自由に変更できるため制御可能因子として定義する．

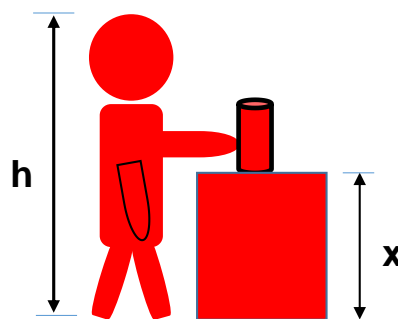


Fig.3 Posture model for Using a Display Shelf

3.5. 設計変数と性能変数の範囲設定

前節で分類した設計変数と性能変数の範囲設定を行う．しかし，グループ毎に設計解を導出するため，グループ間での違いは身体情報の身長と体重のみである．そのため，本節からはグループ 1 を例に範囲設定から設計解の決定ま

で行う。表1に設定した各変数とそれらの範囲を示す。制御不能因子の身長 h と体重 w および体脂肪率 f は正規分布に従うと仮定し、平均値より標準偏差 $\pm 2\sigma$ を範囲として設定した。性能変数の要求性能である L5/S1 椎間板圧縮力 B_w は、米国労働安全衛生研究所 (NIOSH) が定めたガイドライン⁽³⁾によると、腰部椎間板にかかる圧縮力が 3,400N を超えると腰痛のリスクが 20~30%増加すると報告されている。そのため、この値以下を条件として要求性能を定義する。また、陳列棚高さ x は求める設計値のため、0cm 以上を条件とする。

Table 1 Range of set design variables and constraints

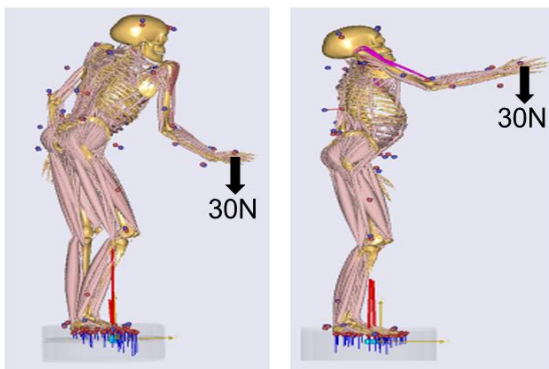
種類	名称	変数名	範囲	
設計変数	制御可能因子	陳列棚高さ [cm]	x	0以上
	制御不能因子	身長 [cm]	h	[162.2, 183.1]
		体重 [kg]	w	[48.7, 77.3]
		体脂肪率 [%]	f	[9.2, 32.0]
性能変数	要求性能	L5/S1椎間板圧縮力 [N]	B_w	[0, 3400]

3.6. 設計変数と性能変数の関係式の導出

以上の条件から、設計変数と性能変数の関係式を導出する。初めに直交表の因子と水準を設定する。因子は筋骨格モデル作成時に必要な変数である身長 h 、体重 w 、体脂肪率 f を設定した。これらの変数は正規分布に従うため、範囲の平均値から標準偏差 $\pm 2\sigma$ 、標準偏差 $\pm 1\sigma$ の 4つの値を水準に設定した。また、複数の動作を1つの直交表で考慮するために、動作1を水準1および3、動作2を水準2および4にそれぞれ設定した。なお、本研究では $L_{16}(4^4)$ 直交表を選定した。

ここで、 $L_{16}(4^4)$ 直交表を基に筋骨格モデルを作成するソフトウェアである AnyBody でモデル化する。さらに、3kgの物体を把持した瞬間から手先に 30N の力を加えることで、物体を把持した様子を再現した。また、物体を把持した時の手先高さを陳列棚高さ x とする。図4に作成した筋骨格モデルの例を示す。作成した筋骨格モデルを用いて動作解析を行い、それぞれの動作を行った際の L5/S1 圧縮力 B_w の最大値、陳列棚高さ x を解析する。表2に解析した L5/S1 圧縮力 B_w 、陳列棚高さ x の値を示す。

以上で 16通りのモデルを作成し、得られたデータから応答曲面法を用いて、動作毎に $B_w = F(h, w, f, x)$ の近似式を作成した。



(a)posture 1 (b)posture 2

Fig.4 Musculoskeletal model.

3.7. 設計解候補の導出

3.6節で作成した関係式を用いて、区間演算により動作毎に設計解候補を導出する。設計変数のうち制御不能因子である身長 h 、体重 w 、体脂肪率 f は絞り込みを行わず、制御可能因子である陳列棚高さ x のみを8分割し、8通りの設計変数の組み合わせがとりうる範囲である可能性範囲を導出した。そして、要求性能である L5/S1 椎間板圧縮力 B_w の範囲を満たす可能性範囲を設計解候補とする。要求性能である L5/S1 椎間板圧縮力を [0, 3400]N とした場合、すべてのグループで、8通りすべての可能性範囲が要求性能を満たしてしまつた。そのため、動作1では 1450N 以下、動作2では 1200N 以下と要求条件を厳しく設定し、再度絞り込みを行った。その結果、グループ1の場合、8通りすべての可能性範囲が要求性能を満たす設計解候補として、動作1では陳列棚高さ $x = [84.2, 95.1]$ cm、動作2では陳列棚高さ $x = [134.3, 151.6]$ cm が得られた。

3.8. 設計解の決定

3.4節から 3.7節のプロセスをすべてのグループで行い、各グループの設計解候補から共通集合をとり設計解とする。図5に全グループの動作1の設計解候補の範囲を、図6に動作2の全グループの設計解候補の範囲をそれぞれ示す。動作1のグループ4で要求性能を満たす設計解候補が存在しない原因としては、身長 156.8cm で体重 103.3kg といった極端に身長が低く、体重が重い身体的特徴を持つ人が含まれていたことが考えられる。これより、対象とするすべてのユーザーが満足する陳列棚高さ x の範囲は、動作1では [79.5, 81.7]cm、[86.9, 88.1]cm が得られ、動作2では [134.3, 140.5]cm が得られた。

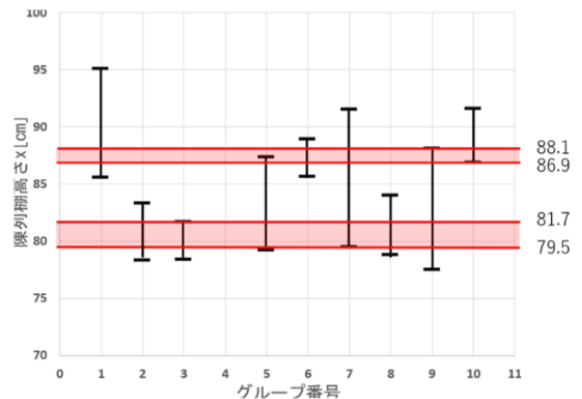


Fig.5 Design Ranged Solutions for Posture 1 for all Groups

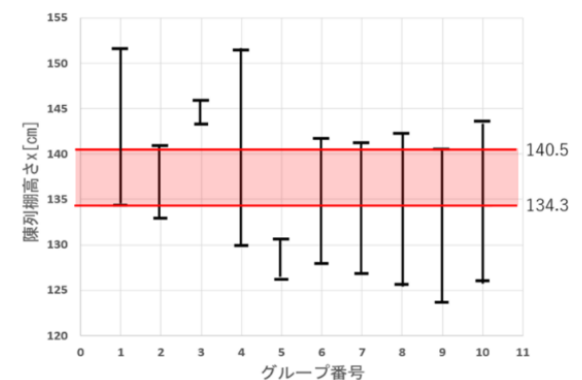


Fig.6 Design Ranged Solutions for Posture 2 for all Groups

3.9. 考察

図5と図6より、できるだけ多くのユーザーの製品使用時の身体負荷を少なくするためには、動作1では[79.5, 81.7]cm, [86.9, 88.1]cm, 動作2では[134.3, 140.5]cmの範囲で陳列棚高さ x を設計すればよいという結果が得られた。

しかし、動作1のグループ4, 動作2のグループ3, グループ5は共通集合に含むことができなかった。共通集合に含むことのできないグループに対しては、そのグループが満足する高さの陳列棚を別に用意する必要がある。

本事例では被験者1名の動作2種類をすべてのユーザーの動作サンプルとして扱っているため、身体情報の違いによる動作の変化や、同一目的を達成できる別の動作などの、ユーザーによる動作の違いは考慮されていない。したがって、製品を使用する際の動作は、本事例で想定しているよりも、様々な種類があり、それらを考慮して身体負荷を評価する必要がある。これを実現するために、複数の被験者から動作を計測し、動作の特徴によって分類をすることで直交表に割り当てるプロセスを導入する必要があると考えられる。

また、本事例ではNIOSHを参考に要求性能として腰部椎間版圧縮力を3,400N以下に設定しているが、他にも性別や年齢の違いによって圧縮力の基準値が変わることが報告されている⁽³⁾。そのため、年齢や性別などの様々な観点からも評価を行うことで、より多くのユーザーが製品使用時の身体負荷が少なくなるような設計を実現できると考えられる。

6. 結 言

本研究では、モーションキャプチャによる動作解析にユニバーサルデザイン手法の提案をした。これを陳列棚高さの設計問題に適用した結果、対象とする多くのユーザーが製品使用時に腰痛のリスクが少なくなるような高さが得られた。今後は、身体情報およびユーザーによる動作の違いを考慮してユニバーサルデザイン手法の改善により組むことで、より提案手法の有用性を高めることを目指す。

文 献

- (1) North Carolina State University: The center of universal design, https://projects.ncsu.edu/ncsu/design/cud/about_ud/about_ud.html (Accessed 1 September 2023).
- (2) 加藤勇吹, 中島孝行, 山田周歩, 山田哲男, 井上全人: 階層クラスター分析を用いた作業者の身体特性を考慮した設備のデザインアプローチの提案, 日本設備管理学会誌, Vol. 33, No. 3, 96-104, 2021.
- (3) Waters, TR., Lu ML., Piacitelli LA., Werren D., Deddens JA.: Efficacy of the Revised NIOSH Equation to Predict Risk of Low Back Pain due to Manual Lifting, Journal of Occupational and Environmental Medicine, Vol. 53, No. 9, 1061-1067, 2011.