W121002

人間工学的設計への最適化法の適用*

茅原 崇徳^{*1}

Application of Optimization Methodology to Ergonomic Design

Takanori CHIHARA^{*1}^{*1} Tokyo Metropolitan University, Faculty of System Design
6-6, Asahigaoka, Hino, Tokyo, 191-0065 Japan

This paper describes the formulation method of ergonomic design problems and its application. The physical target property that decides the usability and comfort of product is picked out. If the picked target property is single, the ergonomic design problem is formulated as a single objective optimization problem. Otherwise, the problem is formulated as a multi-objective optimization problem. In the case of multi-objective optimization problem, the optimum solution for each participant is obtained with the help of their subjective evaluation; and the regret is defined as the difference from the objective function value of their each optimum. Then, the optimum solution for all participants is obtained by minimization of the maximum regret. The proposed formulation method was applied to the design problems of aluminum beverage bottle closure for openability and handrail position for sit-to-stand movement so as to validate the proposed method. The case studies were evaluated quantitatively, and the optimum solutions that maximize its usability and comfort were obtained.

Key Words : Design Engineering, Ergonomics, Optimization, Multi-objective Optimization, Response Surface Method

1. 結 言

近年、製品の基本的な性能や品質に加えて付加価値を持った製品の設計が求められており、使いやすさや快適性を考慮した人間工学の考え方に基づく製品設計が行われている。筆者は最適化の考え方をを用いて人間の感覚を定量的に表現する評価関数を定式化し、一般的な人間工学的設計手法を確立することを試みている^{(1)~(4)}。人間工学的設計問題に最適化の考え方を適用して問題を定量的に評価することで、満足感を最大化するために設計変数をどの程度変更すればよいかを求めることや、複数の要因が関係する複雑な問題に対して意思決定を支援する情報を設計者に提示することが可能になると考えられる。本報では、筆者らが提案する人間の感覚を定量的に表現する評価関数の定式化法と、提案する手法を製品設計へ適用した例について説明する。

2. 人間工学的設計問題の定式化

2・1 単一目的最適化問題の場合

対象とする製品の使いやすさや使用者に与える身体負担を決定する物理的要因である目標特性 T を抽出する。ここで、目標特性は望小特性であると仮定する。また、個人差を考慮するために、目標特性と相関が認められる人体寸法 a を抽出し、設計変数と人体寸法の関数として次式で表される目標特性 T の応答曲面を作成する。

$$\hat{T} = f(x, a) \quad (1)$$

ここで、 $\hat{T}$ は目標特性 T の予測値であり、 $x = \{x_1, x_2, \dots, x_{ndes}\}^T$ は設計変数、 f は目標特性の応答曲面である。人間工学的設計問題は以下のように定式化される。

^{*1} 正員, 首都大学東京 (〒191-0065 東京都日野市旭が丘 6-6)
E-mail: chihara@sd.tmu.ac.jp

$$\begin{aligned} \int_a \{f(x, a) \cdot P_a(a)\} da &\rightarrow \min \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U \quad (i=1, 2, \dots, ndes) \\ g_l(x) &\leq 0 \quad (l=1, 2, \dots, ncon) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 x_i^L と x_i^U は i 番目の設計変数の側面制約条件である。 $g_l(x)$ は挙動制約条件であり、 $ncon$ はその数である。また、 $P_a(a)$ は個人差を表す変数の分布に基づく重み関数である。式 (2) は目標特性の積分値を最小化する問題であり、想定される集団の個人差を考慮して身体負担を評価する関数である。

2・2 多目的最適化問題の場合

目標特性が複数存在する場合には、多目的最適化問題として定式化する。ただし、単一目的の場合と異なり、すべての目的関数に対して相関が存在する人体寸法を抽出することは困難であると考えられる。そこで、被験者ごとに最適解を求め、各被験者の最適解における目的関数値との差を不達成度と定義し、不達成度の最大値を最小化することで被験者全体での最適解を求める。 k 番目の被験者における設計問題は次のように定式化される。

$$\begin{aligned} (f_{1,k}(x), f_{2,k}(x), \dots, f_{nobj,k}(x)) &\rightarrow \min \\ x_i^L &\leq x_i \leq x_i^U \quad (i=1, 2, \dots, ndes) \\ g_l(x) &\leq 0 \quad (l=1, 2, \dots, ncon) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 $nobj$ は目標特性（目的関数）の数である。満足化トレードオフ法（Satisficing Trade-Off Method; STOM）⁽⁹⁾を用いて式 (3) で表される多目的最適化問題を解き、パレート最適解の中から各被験者の感覚に合った最適解 $x_k^* = \{x_{1,k}^*, x_{2,k}^*, \dots, x_{ndes,k}^*\}^T$ を選択する。 $npar$ 名の被験者の不達成度 $f_{j,k}(x) - f_{j,k}(x_k^*)$ の中で最大のものを最小化する設計変数 $x^c = \{x_1^c, x_2^c, \dots, x_{ndes}^c\}^T$ を被験者全体での最適解とする。被験者全体での最適解 x^c を求めるための問題は次のように定式化される。

$$\max_{1 \leq j \leq nobj, 1 \leq k \leq npar} \{f_{j,k}(x) - f_{j,k}(x_k^*)\} \rightarrow \min \quad (4)$$

式 (4) で表される min-max 問題は、各被験者の不達成度の最大値を最小化する問題である。つまり、すべての被験者の目標特性を可能な限り各被験者の選好解における目標特性に近づけることを意味している。

3. 製品設計への適用例

3・1 飲料容器の開けやすいキャップ径の最適設計⁽²⁾

図1に示すキャップ付きアルミボトルはキャップを再栓できる（リシール性）ことから、リシール機能を持たない他の飲料容器と比較して、消費者からの需要の高い飲料容器である。また、密封性やコストなどの容器としての基本性能に加え、消費者にとって使いやすい容器の設計開発が求められている。そこで、開けやすさを定量的に評価する手法について検討を行った。

開栓動作時に人間が発揮できるトルクの最大値（最大発揮トルク： T_{max} ）に対する開栓に必要なトルク（必要開栓トルク： T_{open} ）の割合 T_{open}/T_{max} を負担割合と定義し、キャップ開栓時の負担の最小化問題を以下のように定式化した。

$$\begin{aligned} \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} f_o(d, L_l) \cdot P_{L_l}(L_l) dL_l &\rightarrow \min \\ 28.0 \leq d \leq 43.0 \quad (\text{in millimeter}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 d は口径（キャップ径）、 f_o は負担割合の近似関数である。 L_l は最大発揮トルクと相関が認められた被験者の母指長であり、 $L_{\min}$ と $L_{\max}$ は母指長の最小値と最大値であり、 $P_{L_l}(L_l)$ は母指長の分布をもとに設定した重み関数である。

男性6名と女性4名を被験者とし、開けやすさ評価関数を作成した。作成した開けやすさ評価関数を図2に示す。評価関数の関数値が最小となる最適解は $d = 30.6$ mm である。また、目的関数値が比較的低い 28～33 mm の範囲であれば開けやすいと感じると考えられる。次に、被験者の力の強さと開けやすい口径との関

Fig.1 Aluminum beverage bottle samples

Fig.2 Evaluation function of openability

Fig.3 Transition of evaluation function with thumb length

係について検討を行った。母指長の最小値である 55.1 mm から最大値である 66.2 mm まで等間隔に取った 5 点 ($L_t = 55.1, 57.9, 60.7, 63.4, 66.2$ mm) における評価関数をグラフにしたものを図 3 に示す。図 3 より、母指長の増加に伴い最適な口径が増加することが確認できる。このように、個人差により開けやすい口径が変化することを定量的に評価することが可能である。

3・2 立ち上がり補助のための手すり設置位置の最適設計

椅子や便座からの立ち上がり動作は一日の生活の中で頻繁に行われる動作であり、立ち上がりやすさを向上させる方法の一つとして手すりを設置することが挙げられる。手すりの設置位置に関する研究は主観評価によるものや下肢の負担に重点を置いたものが多く、上肢と下肢の負担を総合的に評価して手すりの設置位置を検討した研究は十分に報告されていない。そこで、図 4 に示す手すりの設置位置（高さ h と距離 d ）の設計問題について検討した。

8 名の被験者（男性）を対象に複数の筋電図を計測し、図 5 に示す上腕三頭筋と前脛骨筋の筋電図が手すりの設置位置に対して有意に変化することを確認した。そこで、二つの筋電図を目的関数とし、 k 番目の被験者における手すりの設置位置の設計問題は次のように定式化した。

$$\begin{aligned} (f_{1,k}(h,d), f_{2,k}(h,d)) &\rightarrow \min \\ 100 \leq h \leq 300 &\quad (\text{in millimeter}) \\ 400 \leq d \leq 800 &\quad (\text{in millimeter}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $f_{1,k}$ と $f_{2,k}$ は、それぞれ上腕三頭筋と前脛骨筋の%MVC の応答曲面である。式 (6) で表される問題を最適化し、各被験者の選好解を求めた。ただし、STOM を用いる際の理想点は筋負担がゼロの点とし、希求水準は主観評価が最大となる点とした。さらに、被験者全体での最適解を求める問題を以下のように定式化した。

$$\max_{1 \leq j \leq 2, 1 \leq k \leq 8} \{f_{j,k}(x) - f_{j,k}(x_k^*)\} \rightarrow \min \quad (7)$$

各被験者の最適解と被験者全体での最適解を図 6 に示す。また、各被験者の最適解の平均値と式 (8) を最適化して得られた最適解との比較を表 1 に示す。図 6 より、各被験者の最適解は比較的広い範囲にばらついているこ

Fig.4 Location of handrail

(a) Triceps brachii (b) Tibialis anterior

Fig.5 Target muscles

Fig.6 Optimum solutions

Table 1 Average preferred solutions of the participant versus optimum for all participants

Solution type	Height h [mm]	Distance d [mm]	Average regret [%MVC]	Maximum regret [%MVC]
Average preferred solution	238	575	5.74	14.4
Optimum solution for all participants	296	730	4.65	7.86

とが確認できる。また、表 1 より、単純に各被験者の最適解を平均した設計変数よりも、提案する定式化をもとに最適化した最適解の方が不達成度が低くなっていることが確認できる。このように、二つの筋負担の総合評価を多目的最適化問題として定式化することで、被験者の身体負担を低減する、より適切な最適解を求めることができていることがわかる。

4. 結 言

本報では、人間工学的設計問題の定式化法とその応用例について説明した。人間の感覚は曖昧でばらつきが大きく定量的な評価が困難であるが、最適化の考え方を応用することで、人間工学における設計問題を定量的に評価することができることを確認した。人間の感覚を定式化することで、満足感を最大化する設計変数を特定することや、身体的・精神的負担などの複数の要因が関係する複雑な問題に対し、設計者の意思決定を支援する情報を提示することが可能になると考えられる。また、人間の感覚を定式化することで、機械的な品質と人間の感覚に依存する品質を同時に考慮した設計を行うことが期待できる。

文 献

- (1) Chihara, T., Yamazaki, K., "Evaluation function of drinking ease from aluminum beverage bottles relative to optimum bottle opening diameter and beverage type", *Applied Ergonomics*, Vol.43, No.1 (2012), pp.157-165.
- (2) 茅原崇徳, 広幡哲志, 山崎光悦, "アルミボトル口径最適化のための開けやすさ評価関数の提案", *人間工学*, Vol.46, No.2 (2010), pp.127-135.
- (3) 茅原崇徳, 瀬尾明彦, "筋負担の総合評価に基づく人間工学的設計法に関する基礎的検討", *日本機械学会論文集中 C 編*, Vol.77, No.776 (2011), pp.1477-1490.
- (4) 茅原崇徳, 和泉太樹, 瀬尾明彦, "筋負担の総合評価に基づく人間工学的設計法に関する検討 (第 2 報, 妥協解群の提示による設計者の意思決定支援)", *日本機械学会論文集中 C 編*, Vol.77, No.780 (2011), pp.3104-3116.
- (5) 日本機械学会編, 革新的ものづくりのための最適設計法入門 (2008), pp.91-107, 日本機械学会.