

## 様式 C-19

# 科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
研究期間：2007～2009  
課題番号：19760100  
研究課題名 (和文) 最適設計に基づくコンプライアントメカニズムのユニバーサルデザイン  
研究課題名 (英文) Universal Design of Compliant Mechanisms Based on Design Optimization Method  
研究代表者  
泉井一浩 (IZUI KAZUHIRO)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号：90314228

### 研究成果の概要 (和文)：

本研究では、コンプライアントメカニズムにおけるユニバーサルデザインを、定量的な評価尺を用いた設計手法として確立することを目指す。そのために、ノースカロライナ州立大学のグループらがユニバーサルデザインとして提唱している原則等を、コンプライアントメカニズムの設計の場合のための指針として解釈しなおし、リストアップする。そして、その解釈に基づいた定量的な評価手法を確立することで、数理的最適化手法に基づいた設計を行う方法を開発する。

### 研究成果の概要 (英文)：

In this research, a design methodology for of compliant mechanisms considering universal design concept was developed. Several design criteria that can be quantitatively evaluated are proposed based on universal design principles which were proposed by a research group in North Carolina State University, and a design optimization problem for design of compliant mechanisms is formulated using the design criteria. Numerical optimization techniques were utilized to obtain optimal design configuration.

### 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	540,000	3,740,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：設計工学, 最適設計

## 1. 研究開始当初の背景

コンプライアントメカニズムとは、ジョイントを使用せず、構造そのものに柔軟性をもたせることで、機構学的な機能を実現するものである。一般的に機構設計では、熟練設計者がリンクの長さや関節の位置を試行錯誤的に決定する必要があるが、トポロジー最適化手法を用いることで、所定の機構学的な入出力関係を満足するコンプライアントメカニズムを自動的に創成することができる。

しかし、ユーザーが直接手に触れて使用するコンプライアントメカニズム製品では、機構学的な性能以外にも、ユーザーの使用しやすさなど人間工学的要素が重要な設計要件となる。例えば、医療用鉗子の場合でも、実際に製品を使う人によって、手の大きさは異なり、また目標物を掴む位置も異なるため、設定した入出力等の境界条件が正しいとは限らないという問題がある。しかし、このような人間工学的要件は、設計者の勘と経験に頼った試行錯誤的な設計により実現されるのがほとんどであるのが現状であり、より系統的に人間工学的要件を取り扱うことのできる設計手法の確立が求められている。このような人間工学的要件を取り扱い、すべての使用者にとって使いやすい設計を目指した包含した設計工学の概念として、ユニバーサルデザインがある。

しかしながら、通常ユニバーサルデザインで提唱されている考え方は、定量的な設計手法を提示するものではなく、あくまで、あらゆる製品を包含した設計の指針を示したものである。したがって、熟練した設計者に対して良い示唆を与えるものではあるが、これらの指針を用いたからといって、必ずしも、ユニバーサルデザインを達成できるとは限らない。熟練の設計者でなくても、ユニバーサルデザインの目的を達成するには、定量的な評価に基づく設計手法の確立が必要であるといえる。

## 2. 研究の目的

コンプライアントメカニズムにおけるユニバーサルデザインを、定量的な評価尺を用いた設計手法として確立することを目指す。そのために、ユニバーサルデザインで提唱されている原則を、コンプライアントメカニズムの設計の場合のための指針として解釈しなおし、リストアップする。そして、その解釈に基づいた定量的な評価手法を確立することで、数理的最適化手法に基づいた設計を行う方法を開発を行うことを目的と設定した。

## 3. 研究の方法

### 3.1 コンプライアントメカニズム創成問題の定式化

コンプライアントメカニズムの機能的な設計要件には機構的な柔軟性と外力・反力にこうすることができる剛性とがある。これらの評価特性は、以下のように定式化することができる。

#### [i] 機構的柔軟性

図1のように入力部 $\Gamma_1$ に荷重 $t_1$ を加えた際の、出力部 $\Gamma_2$ の変位 $u_1$ を最大化するため、以下の相互コンプライアンスを最大化する。

#### [ii] 外力、反力に抗することができる剛性

出力部 $\Gamma_2$ を拘束し入力部 $\Gamma_1$ に作用荷重 $t_3$ を加えられた際の、剛性を最大化する。また、入力部 $\Gamma_1$ を拘束した場合の出力部の反作用荷重に対する剛性を最大化するために、以下の2つの平均コンプライアンスを最大化する。

以上の2つの要件は、式(1)で表される相互平均コンプライアンスを最大化することで達成される。この相互平均コンプライアンスを最大化するトポロジー最適化問題を解くことで、はさみなどのコンプライアントメカニズムの形状を自動的に創成することが可能である。

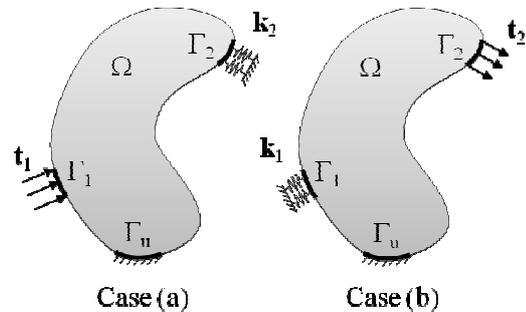


図1 コンプライアントメカニズムの機能的設計指標に関する評価関数のための境界条件

$$l^2(u_1) = \int_{\Gamma_2} t_2 \cdot u_1 d\Gamma \quad (1)$$

さらに、研究目的で述べたユニバーサルデザインを達成するための原則で、コンプライアントメカニズム設計において最も重要な原則として、身体的負担の軽減と、公平な使用

と失敗の許容, を考える.

### 3. 2 身体的負担の軽減

手に取って使用する製品において, 製品の重量は, ユーザーの使いやすさを左右する大きな要因である. 製品の重量は一般的に, 小さければ小さいほどユーザーが感じる身体的負担は少なくなるが, 本構造最適化では体積制約を調整することによって可能である. さらに, もう一つの使いやすさを左右する重量に関する他の要因として, 製品の重心位置があげられる. 製品の重心位置は, ユーザーが操作する際の感覚に大きな影響を及ぼし, 操作の回転中心である持ち手に近付けるほど, 重量は同じであってもユーザーが感じる身体的負担は少なくなる. そこで, ユニバーサルデザインの原則の一つである, ユーザーが製品を使用する際の身体的負担を軽減することを目的とし, 重心の位置を持ち手に近付けることを設計要件とし, 次式により定式化した.

$$\psi_{PB} = \frac{\int_{\Omega} \| \mathbf{x} - \mathbf{x}_0 \| d\Omega}{\int_{\Omega} \rho d\Omega} \quad (2)$$

ここで  $\rho$  は物体の密度であり,  $\mathbf{x}_0$  は, 持ち手の位置をあらわす座標値である.

### 3. 3 公平な使用および失敗の許容

手や指の作業を必要とする製品を用いる際に, 手や指に障がいを持つ人は, 健常者と同じ操作ができるとは限らない. また, 健常者でも, 製品のどの部分をつかむかについては個人差があると考えられる. すなわち, ユーザーが製品を使用する際に, つかむ位置の差異に起因する, 力の負荷方向の差異が存在すると考えられる. 力の負荷方向の差異に対応し, 安定した構造にするためには, 図1に示す  $\mathbf{t}_1$  に垂直な表面力を  $\mathbf{t}_3$  および  $\mathbf{t}_4$  とすると, 図2に示すように境界  $\Gamma_1$  に力の負荷方向の個人差である  $\mathbf{t}_3$  および  $\mathbf{t}_4$  を負荷し, その負荷に対して構造物が安定である, つまりロバストであることが望ましい.

また, 本研究でモデル化を行ったコンプライアントメカニズムはさみは,  $\mathbf{t}_1$  方向に力を負荷することを想定している. すなわち, 使用におけるユーザーの失敗を防ぐためにも,  $\mathbf{t}_3$  および  $\mathbf{t}_4$  に対するロバスト性を負荷した安定な構造が必要であると考えられる.

すなわち, 本研究では, ユニバーサルデザインの原則m, すべての人が公平に使用できること, および, 原則(5)失敗を許容することを目的とし, 力の負荷方向の個人差による変動に対してロバストで安定な構造が得られることを設計要件として次式により定式化した.

$$\begin{aligned} \psi_{FR} &= l^3(\mathbf{u}_3) + l^4(\mathbf{u}_4) \\ &= \int_{\Gamma_1} \mathbf{t}_3 \cdot \mathbf{u}_3 d\Gamma + \int_{\Gamma_1} \mathbf{t}_4 \cdot \mathbf{u}_4 d\Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

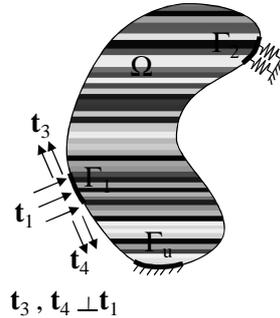


図2 公平な使用についての評価指標を考慮するための境界条件

## 4. 研究成果

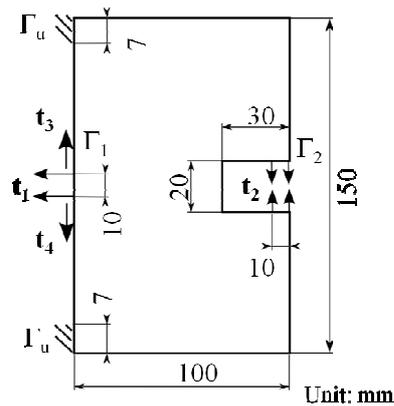


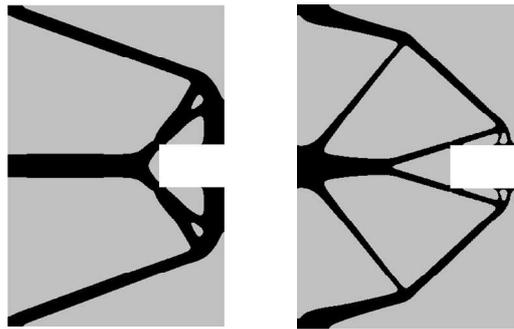
図3 設計領域

本研究で提案した方法論を数値実装し, 得られた結果を示す. 図3にコンプライアントメカニズムはさみの設計領域を示す.  $\mathbf{t}_1$  方向に力を負荷した際の,  $\mathbf{t}_2$  方向への変位を得ることではさみとして機能させる. このとき得られた最適形状を図4に示す.

図4 (a)は, ユニバーサルデザインの指針を全く考慮せずに得られた最適構造であり, 図4 (b)は重心の位置を考慮した場合, 図4 (c)はロバスト性, 図4 (d)は重心の位置とロバスト性の両者を考慮した場合の最適構造である.

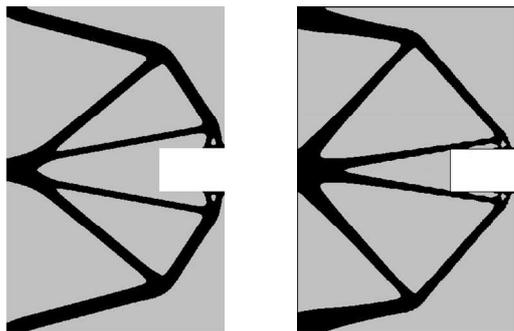
本研究で提案したユニバーサルデザインの評価基準を考慮することで, 得られる形状が大きく変化することがわかった.

最後に得られた最適形状をもとに, コンプライアントメカニズムはさみを試作した. その試作結果を図5に示す. 図5 (a)はユニバ



(a) Gripper A

(b) Gripper B



(c) Gripper C

(d) Gripper D

図4 トポロジー最適化により得られたコンプライアントメカニズムはさみの構造

ユニバーサルデザインの指標を考慮しなかった最適結果に基づいて試作したはさみであり、図5 (b)はユニバーサルデザイン指標を考慮した試作品である。

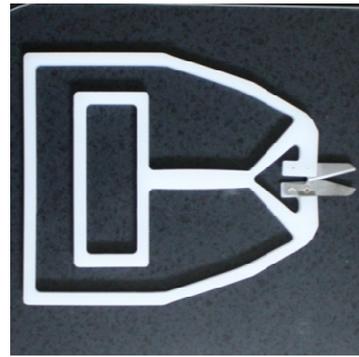
この2つの試作品の使いやすさについて違いを確かめるため、アンケート調査を行った。アンケートの対象は小学生から高齢者までとし、計67名に実際に使用してもらい使用感についてアンケートをとった。そのアンケートの結果、図5 (b)のはさみの使いやすさが非常に良いという結果が得られた。

## 5. 主な発表論文等

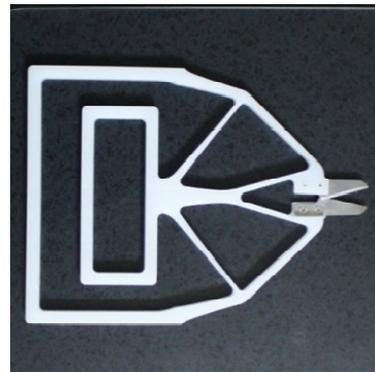
〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計2件)

1. 横田清志, 山田恭崇, 泉井一造, 西脇眞二, 吉村允孝, ユニバーサルデザインを目的としたコンプライアントメカニズムの創成的設計手法の構築, 第18 設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2008 月 9 月, 京都, No. 3304.
2. 横田清志, 泉井一造, 西脇眞二, 吉村允孝, トポロジー最適化に基づく使いやすさを



(a) ユニバーサルデザイン指標を考慮せず



(b) ユニバーサルデザイン指標を考慮

図5 コンプライアントメカニズムはさみの試作

考慮したコンプライアントメカニズムの設計, 第19回設計工学・システム部門講演会, 日本機械学会, 2009年10月, 沖縄, 日本, p.58.

3. Izui, K., Yokota, K., Yamada, T., Nishiwaki, S., and Yoshimura, M., A Structural Optimization Method for Universal Design of Compliant Mechanism Scissors, Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference IDETC/CIE 2009, August 30-September, 2009, San Diego, California, USA, DETC2009-86594.

〔その他〕

ウェブページ

<http://www.osdel.me.kyoto-u.ac.jp/members/izui.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉井 一浩 (IZUI KAZUHIRO)  
京都大学・工学研究科・助教  
研究者番号：90314228

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし