設計者の創造性と最適設計法に基づいた コンプライアントメカニズムの創成設計法*

小林正和** 西脇眞二*** 泉井一浩*** 吉村允孝***

An Innovative Design Method for Compliant Mechanisms
Combining Topology Optimization and Designer Creativity

Masakazu KOBAYASHI, Shinji NISHIWAKI, Kazuhiro IZUI and Masataka YOSHIMURA

This paper proposes an innovative two-step approach to the design of practical and sophisticated compliant mechanisms. The approach consists of two optimization methods: topology and shape optimizations, and a scheme to implement designer input of ideas. In the first step, a designer explores the most fruitful design concepts for mechanisms that achieve the design requirements by combining several compliant mechanisms generated by the topology optimization with additional mechanisms based on his or her ideas. This step integrates the topology optimization with a support method that assists the designer's exploration of new ideas and design concepts. In the second step, the shape optimization procedure yields a detailed optimal shape based on the design concept. The combination of initial compliant mechanisms and additional mechanisms based on a designer's ideas enables the creation of devices having higher performance or increased capability than would be possible using a single compliant mechanism alone. Executing the shape optimization at the second step facilitates the determination of a detailed optimal shape, and also makes it possible to consider stress concentration and make accurate quantitative performance evaluations, which neither topology optimization nor a designer's creative activity alone can provide.

Key words: optimal Design, compliant mechanism, topology optimization, shape optimization, designer's creativity

1. 緒 言

近年、機械構造物の柔軟性を利用した新しいメカニズムとしてコンプライアントメカニズム¹⁾が提案されている。コンプライアントメカニズムは通常のメカニズムとは異なり、ジョイントの代わりに、構造物の適切な位置に柔軟性を付与することで、メカニズムとしての機能を実現する。コンプライアントメカニズムは、ジョイント等の可動部を持たないため、(1)無騒音、(2)無潤滑、(3)部品点数の削減、(4)小型化¹⁾、などの利点を持ち、機械製品から医療部品、MEMS (Micro-Electro Mechanical Systems)¹²⁾など多くの適用範囲が考えられている。

コンプライアントメカニズムの設計法としては、これまでに2種類の方法が提案されている。1つ目の方法は、通常のメカニズムをもとに、ジョイント部に局所的柔軟構造を付加する方法である³⁾。しかしながら、この方法では、設計者の勘と経験に基づく試行錯誤の過程が不可欠であり、また必ずしも最適なコンプライアントメカニズムが得られるという保証はない。

もう1つの方法は、トポロジー最適化⁴⁾に基づいた創成設計法である⁵⁶⁾。この方法では、入出力の位置と方向のみを設定して最適化を行うことで、設計者の試行錯誤なしに最適な構造を創成することができる。しかし、この方法には、(1)変位や応力などの局所性を示す物理量の取り扱いが困難、(2)ヒンジ構造の生成、(3)大変形解析が困難などの問題が指摘されている。これらの問題を解決する方法としては、局所性の緩和⁷⁸⁾について、ヒンジ問題の克服⁹⁾¹⁰⁾について、大変形解析の取り扱い¹¹⁾¹²⁾についてなど、幾つかの方法が提案されているが、根本的な解決には至っていない。

そこで、これらの問題を解決し実用的な構造を創成するために、前報¹³⁾では、トポロジー最適化と形状最適化を段階的に実行する多段階設計法を提案した。これにより、応力集中などの工学的要件を考慮した実用的なコンプライアントメカニズムの創成設計が行えるようになった。

本報では、前報で構築した方法を基に、コンプライアントメカニズムに更に新しい機能を付加する方法を検討する。すなわち、例えば、コンプライアントメカニズムが構造的に適切な2つの安定な状態(Bistable)をもつように設計することにより、コンプライアントメカニズムがワークピースを把持する場合に、外力を作用させる必要なく把持続けるようにする機能を付加することができる。

このような機能を付加する方法としては、トポロジー最適化を拡張し、付加機能を考慮可能な目的関数を設定し、最適構造を得る方法が考えられる。Bruns と Sigumund¹⁴⁾や大崎と西脇¹⁵⁾は大変形解析の取り扱いを拡張することで2つの安定な状態をもつコンプライアントメカニズムを得ている。しかし、これらの方法では、解析時間に多大な時間を要する上に、最適構造が初期解に大きく影響するため、常に物理的に意味のある最適構造を得るにいたっていない。

他方で、このような問題を解決する方法として、設計者の過去の経験や創造性を有効に利用する方法が考えられる。従来までに、設計者の創造性に基づいて革新的な設計案を効率的に求める方法がいくつか提案されている。例えば、Conklin らの gIBIS¹⁶⁾や著者らの方法¹⁷⁾は、集団による活動を対象とし、コミュニケーションプロセスの可視化に基づく方法である。このような方法を用いることで、これまでは無意識に行われていた創造的な思考が明示的に行われるようになるため、設計者の創造性を効率的に引き出すことが可能になる。特に著者らの方法は、

* 原稿受付 平成 16 年 12 月 20 日

** 学生会員 京都大学大学院 (京都府京都市左京区吉田本町)

*** 正 会 員 京都大学大学院

概念設計のように抽象的で幅広いアイデアを扱う場合に効果を発揮する。設計者の創造性に基づいた方法は、最適化手法のように決められた条件下での最適解の探索には適さないものの、制約に捕らわれることなく新しい機構や組み合わせを創成することができる。

そこで、本論では、このような設計者の創造性に注目し、最適化手法により創成されたコンプライアントメカニズムに新しい機能を付加するために、設計者の創造性に基づいて得られたアイデアを有機的に付与する方法を検討する。しかし、このような設計者の創造性に基づくプロセスは、一般により良いアイデアを求めるための試行錯誤が避けられないため、効率的な設計を実現するためには、何らかの支援手法が不可欠である。そこで本論では、設計者の発想を支援可能な方法と最適化手法を組み合わせることにより、設計者が効果的にコンプライアントメカニズムの設計が可能となるような創成設計法の構築を行う。これにより、設計者の革新的なアイデアを付与することが可能となり、最適化の枠を越えた高機能・高性能なコンプライアントメカニズムが可能となる。

2. 設計者の創造性と最適化手法に基づいた創成設計法

2.1 創成設計法の概要

本論では、コンプライアントメカニズムを用いた実用的かつ、革新的なメカニズムの設計を可能とするために、図1に示した2段階からなる創成設計法を提案する。すなわち、第1段階では、設計者が発想支援手法とトポロジー最適化を用いて、コンプライアントメカニズムや付加的な機構を創成し、これらを組み合わせ素性の良い設計コンセプトを作成する。第2段階では、設計コンセプトを基に最適化モデルを作成し、形状最適化を実施することで、定量的な性能と、応力集中などの工学的要件を考慮した最適形状を求める。以下、各段階について詳細を述べる。

2.2 第1段階：発想支援手法を用いた設計コンセプトの作成

第1段階では、発想支援手法を用いて機構を創成し、それらを組み合わせ素性の良い設計コンセプトを作成する。

2.2.1 発想支援手法の構築

本論では、設計コンセプト作成のプロセスを支援するために、著者らの提案する方法¹⁷⁾を個人による創造活動である設計コンセプト作成のプロセスに適用する。この時、一連のプロセスは、(1)設計者の詳細な思考の流れと、(2)設計目標と得られたアイデアの間の関係という2つの視点から可視化できる。そこで、以下にこの2つの視点に基づいた可視化の方法について述べる。

Fig.1 Flowchart of a proposed design method

(1) 設計者の詳細な思考の流れ

創造活動における設計者の行動は、アイデアの発想と検討という2つの行動に大別できる。そして、この2つの行動を定義したとき、設計者の思考の流れは、一つのアイデアの発想とそこから生じる一連の検討という一まとまりの流れの集合として表現できる。本手法では、この一まとまりの流れをセッションと呼び、創造活動の基本単位とする。また、セッションのきっかけとなる行動をトリガーアクション、そこから引き起こされる一連の行動をレスポンスアクションと呼ぶ。以下にトリガーアクションとレスポンスアクションを定義する。

・トリガーアクション

アイデアの発想やレスポンスアクションで検討したい話題の提示などの、セッションの起点となる行動。

・レスポンスアクション

アイデアの検討やトリガーアクションで提示された話題の検討、セッションの過程で新たに得られたアイデアの提示など、トリガーアクションや他のレスポンスアクションに対して取られる行動。

レスポンスアクションはトリガーアクションや他のレスポンスアクションに対して自由に行うことができるため、セッションは図2のようなツリー構造として可視化できる。これにより、創造活動における設計者の思考の流れは、このセッションのツリー構造が集まったものとして可視化できる。

(2) 設計目標とアイデアの間の関係

一般に、問題の解決や目標の達成を目指して新しいアイデアを模索する場合、初めに問題解決や目的達成のための方向性を考え、その後にその方向性に基づいてアイデアの具体化を行う。この目標達成の方向性をアプローチと定義する。アプローチを定義することで、目標とアイデアの関係は、図3に示すような目標、アプローチ、アイデアの3階層からなる階層構造としてモデル化できる。そこで、この階層構造図を用いて、方向性、すなわちアプローチを考える過程を明示的に実施し、アプローチに基づいてアイデアを具体化することで、より多くの幅広いアイデアを探索することが可能となる。

本研究では、製品に持たせたい機能为目标に置き、その機能を実現するための機構の構想をアプローチに、そのアプローチに基づいて具体化した機構をアイデアとして階層構造図を作成する。本手法において創成する機構はコンプライアントメカニズムとそれ以外の部位や機構に分類できるが、コンプライアントメカニズムについては、設計領域と入出力の関係をアプローチとし、それ以外の部位については、部位の動作原理をアプローチとする。なお、アプローチから機構の具体化を行う際には、コンプライアントメカニズムについてはトポロジー最適化を用

Fig.2 Session tree structure

Fig.3 Hierarchical structure consisting of goals, approaches and ideas

Fig.4 Addition of a buckling stopper to compliant mechanism

い、それ以外の機構については設計者の創造性に基づいて具体化を行う。それぞれの具体化の方法については後述する。

2.2.2 高機能・高性能なメカニズムシステムの創成

次に、発想支援手法を用いて創生した機構を用いて、どのような設計コンセプトを作成するのかについてであるが、本論では、コンプライアントメカニズムに付加的な機能を持った機構を組み合わせることを考える。これにより、コンプライアントメカニズムだけでは実現することのできない高機能・高性能なメカニズムシステムが実現できる。その一例として、図4にストッパー機構を付与したグリッパーを挙げる。この例では、図4(a)に示すコンプライアントメカニズムに基づいたグリッパーに座屈現象を利用したストッパーを付与することで、グリッパーがワークピースを把持した際に、外力を負荷し続けることなくワークピースを把持し続けることができる。

2.2.3 設計コンセプトの作成手順

最後に発想支援手法を用いた設計コンセプト作成の手順を述べる。本手順は2つのステップからなる。

ステップ1：階層構造図の作成

設計者は創造活動の流れをセッションとして記録しながら、アプローチやアイデアをリンク構造図に書き込み階層構造図を作り上げていく。

ステップ2：設計コンセプトの作成と評価

ステップ1で得られたメカニズムを組み合わせ、設計コンセプトを作成し、評価を行う。設計者の満足する設計コンセプトが得られた場合、第1段階を終了し、第2段階へと移行する。一方で、満足できなかった場合は、その設計コンセプトの問題点を分析した後にステップ1へと戻り、新しい機構を創成し、新たな設計コンセプトの作成を試みる。設計コンセプトの作成と評価の段階においても、その一連のプロセスをセッションを用いて可視化することとする。これにより、検討や改良のプロセスが明確になるため、より良い設計コンセプトを模索する助けになる。

2.3 トポロジー最適化によるコンプライアントメカニズムの創成

本論では、コンプライアントメカニズムを生成するためにトポロジー最適化を用いる。以下にその手順を述べる。

2.3.1 トポロジー最適化の設計条件と設計領域の設定

トポロジー最適化の前段階として、設計領域、境界条件および付加すべき柔軟性の方向（入力及び出力の位置と方向）を決定する。すなわち、図5に示すように、最適構造となる領域 Ω_d を包含する固定設計領域 D を最初に設定し、その固定設計領域にコンプライアントメカニズムに作用させる表面力 t^1 とその境界 Γ_1 、そして、機構としての機能を実現するために構造が変形する方向を示す仮想的なダミーロードを示す表面力 t^2 とその境界 Γ_2 を設定する。設計領域、境界条件、および入出力の位置と

Fig.5 Initial settings of topology optimization

(a) Loading of surface force t^1 (b) Configuration of dummy load t^2 (c) Loading of surface force t^3 (d) Loading of surface reaction force t^4

Fig.6 Specifications for a compliant mechanism design

方向は、階層構造図を構築する過程で得られたアプローチに基づいて設定する。さらに、最適設計時に用いる体積制約に必要な制約の条件値および変位場の解析に必要なヤング率とポアソン比の設定も同時に行う。

2.3.2 トポロジー最適化による最適構造の創成

先に設定した設計条件と設計領域に従い、トポロジー最適化を行う。本論では、トポロジー最適化手法として、トポロジー最適化の持つ数学的不安定性を回避するために、松井らのCAMD法¹⁸⁾¹⁹⁾を用いる。

次に、この方法を用いてコンプライアントメカニズムの設計を行うための目的関数の設定であるが、本論では、以下に示す目的関数¹⁹⁾を用いる。

$$\underset{r}{\text{maximize}} f_1 = \frac{l^2(u^1)}{w_1 l^1(u^1) + w_2 l^2(u^2) + w_3 l^3(u^3) + w_4 l^4(u^4)} \quad (1)$$

ここで、 l^1 は図6(a)に示すように、境界 Γ_1 に表面力 t^1 を作用させたときの境界 Γ_1 における平均コンプライアンス、 l^2 は図6(b)に示すように、境界 Γ_2 に表面力 t^2 を作用させたときの境界 Γ_2 における平均コンプライアンス、 l^3 は図6(c)に示すように、境界 Γ_2 を固定し、境界 Γ_1 に表面力 $t^3=t^1$ を作用させた場合の境界 Γ_1 における平均コンプライアンス、 l^4 は図6(d)に示すように、境界 Γ_1 を固定し、境界 Γ_2 に表面力 $t^4=-t^2$ を作用させた場合の境界 Γ_2 における平均コンプライアンスである。 w_1, w_2, w_3, w_4 は重み係数であり、 w_1 と w_2 を変更することで、入力変位と出力変位の比を調整することができる。

2.4 設計者の発想に基づいた機構の創成

コンプライアントメカニズムを除いたその他の機構は、設計者の経験や知識、発想などに基づいて設計者が自ら創成する。機構の具体的な形状は第2段階の形状最適化を実施することで決定されるため、第1段階では、どのような機構を付与するか、アプローチに基づいて機構の大まかな形状を創成すればよい。

2.5 第2段階：設計コンセプトの具体化

第2段階では、第1段階で作成された設計コンセプトを元に形状最適化を実施することで、具体的な形状を決定する。第2

Fig. 7 Geometrical features of optimal configuration

Fig. 8 Allocation of design variables and control points to initial model

段階は、初期形状の作成、設計条件の設定、形状最適化の実施および、最適構造の評価の4ステップから構成される。

2.6 形状最適化の初期形状の作成

まず初めに、設計コンセプトを元に形状最適化の初期形状を作成する。初期形状の作成方法は、コンプライアントメカニズムとそれ以外の部位では異なるため、順番にその作成法を述べる。

2.6.1 コンプライアントメカニズムの初期形状の作成方法

次に、トポロジー最適化によって得られた最適構造から形状最適化に必要な初期形状を抽出する。抽出の方法としては、著者が前報で提案した方法¹³⁾を用いる。この方法では、図7に示すようなコンプライアントメカニズムから初期形状を抽出する際に、トポロジー最適化の際に考慮した2つの性能、すなわち柔軟性と剛性を特徴付ける部位であるヒンジ部とランプ部に図8に示すように設計変数を配置することで、形状抽出後にも性能を確保しながら形状最適化が行えるという特徴を持つ。以下にその手順を示す。

(1) 設計変数の配置

コンプライアントメカニズムの柔軟性と剛性を特徴付ける部位であるヒンジ部とランプ部に設計変数を配置する。ヒンジ部は通常メカニズムのジョイントとほぼ同等の機能を持ち、その特徴を操作することにより、ヒンジを軸とした柔軟性に関する変形を制御することができる。しかし、実際の設計においては、ヒンジを作成することはできないため、図8に示すようにヒンジの幅方向に設計変数を設置して、応力制約を満足しながら十分な柔軟性をもつ部位が得られるようにする。また、ヒンジの位置も性能を左右するため設計変数とする。ただし、位置が大幅に変化すれば、構造のトポロジー等も変化してしまうため、変更は初期位置の近傍のみとする。また、ランプ部については、2つのヒンジを連結する構造と考え、ヒンジ部の中間位置の幅を設計変数とする。

(2) コントロールポイントと曲線の設定

設計変数の設定後、形状を表現するために必要な曲線のコントロールポイントを設定する。図8に示したように、ヒンジ部とランプ部に設定した構造の幅に関して、その両端をコントロールポイントとする。そして、隣りあうコントロールポイントを曲線が交差することのないように連結する。なお、曲線としてはスプライン曲線を用いる。

2.6.2 コンプライアントメカニズム以外の部位の初期形状の作成方法

コンプライアントメカニズム以外の部位に関して、その初期形状の作成方法については、付与した機構の種類によって異なるため、機構の種類に応じて設計変数を設定し、初期形状を作成する。

2.7 形状最適化の設計条件の設定

次に、形状最適化の設計条件を設定する。この最適化問題の定式化は、組み合わせたコンプライアントメカニズムや付加的な機構の種類、そしてメカニズムの用途により異なる。形状最適化で用いられる物理量としては、主に図5に示した境界 Γ_1 と境界 Γ_2 の変位量と反力荷重、そして設計領域内の応力が挙げられる。ここでは、代表例としてこれらの物理量に関して、次式のように定式化を行う。

$$\text{maximize } d_{out} \quad (2)$$

制約条件

$$\sigma_M \leq \sigma_{allow} \quad (3)$$

$$F_{in} \leq F_{max} \quad (4)$$

ここで、 d_{out} は図5に示した境界 Γ_2 すなわち、対象物に荷重を負荷する箇所のダミーロード t^2 で示した方向の変位、 σ_M はミーゼス相当応力、 σ_{allow} は許容応力、 F_{in} は境界 Γ_1 すなわち、荷重を作用させる箇所の反力荷重で、 F_{max} はその最大値である。なお本論では、目的関数の一例として、境界 Γ_2 における変位量を取り上げたが、他にも形状最適化手法が扱うことのできる物理量は全て目的関数や制約条件として用いることができる。

また、定量的な解析を行うためには、設計領域が境界 Γ_2 を介して受ける加工物の反力も、実際の現象に沿って定量的に評価する必要がある。そこで、境界 Γ_2 にあらかじめ実験により求めたばね定数をもつばね要素を付加することにより、加工物の反力を表現するのが望ましい。

2.8 形状最適化による詳細な最適形状の決定

初期形状を作成し、最適化の設計条件を設定した後、形状最適化を実施する。このステップの目的は変位量、反力、応力の定量的な評価により、メカニズムの詳細な形状を決定することにあるので、それらの物理量を得る解析は、実際の挙動を厳密に評価できなければならない。そのため、本ステップでは、大変形非線形応答解析を行いながら最適化を実施するのが望ましい。本論では、汎用解析ソフトウェア ANSYS Ver. 8.0 を用いて解析と最適化を行った。

2.9 形状最適化の最適構造の評価

最後に、形状最適化により得られた最適構造の評価を行う。得られた最適構造が設計要求を満たし、設計者が得られた結果に満足している場合、設計を終了する。一方、得られた最適構造が設計要求を満たしていない、もしくは設計者が結果に満足していない場合は、第1段階に戻り、新たな設計コンセプトを作成する。

3. 適用事例

本手法の妥当性を検証するために、本手法を用いてストッパー付きのグリッパーの設計を行う。

3.1 設計要求

本事例では、グリッパーにストッパー機能を付与したストッパー付きグリッパーを設計する。入出力の関係については、使用者が力を加えた場合にグリッパー先端部が閉じることとし、入力的位置と方向は自由に決定できるものとする。ストッパー

は、使用者が力を加えた際に作動し、グripperを閉じた状態で固定するものとする。なお、材料は厚さ 5mm の超高分子量ポリエチレンを用い、ヤング率 720MPa、ポアソン比 0.3 として最適化を実施する。

3.2 第 1 段階

第 1 段階では、発想支援手法を用いて、ストッパー付きグ

Fig.9 Flow of thoughts during 1st step design concept creation

Fig.10 The hierarchical structure

Fig.11 Two concepts of compliant mechanisms

Fig.12 Created mechanisms

ッパーの設計コンセプトを作成する。

図 9 にセッションを用いて可視化した第 1 段階の流れを、図 10 に作成された階層構造図を示す。また、コンプライアントメカニズムのコンセプト 1 の詳細を図 11(a)に、コンプライアントメカニズムのコンセプト 2 の詳細を図 11(b)に示し、コンプライアントメカニズム 1, 2, 3 及びストッパー 1, 2 の詳細を図 12(a)から図 12(e)に示す。なお、コンプライアントメカニズムに関しては、上下対称の形状を考え、設計領域は上半分として、トポロジー最適化による形状創成を行った。

次に、設計コンセプトの作成であるが、本事例では図 9 に示すように様々な要因を考慮した結果、コンプライアントメカニズム 3 と座屈を利用したストッパー 2 を組み合わせたものを設計コンセプトとして採用した。

3.3 第 2 段階

第 1 段階で作成した設計コンセプトに基づいて、初期形状を作成し、形状最適化を実施する。

3.3.1 初期形状の作成

グripperに関しては、図 13 に示す $H_1 \sim H_7$ の 7 つのヒンジに設計変数を配置した。ヒンジ部の設計変数としては、ヒンジの位置と幅があるが、本事例では、各ヒンジ部に配置する 2 つのコントロールポイントの位置を設計変数にすることで、ヒンジの位置と幅を同時に制御する。一方、ランプ部に関しては、最適化の計算量を削減し、安定した最適化を行うために、その幅は固定値とした。そして、これらの設計変数に基づいてコントロールポイントを配置し、スプライン曲線で連結することで、最適化モデルの形状を決定する。

ストッパーに関しては、図 14 に示すように V 字型のストッパーを考え、V 字部の奥行き D_b と幅 W_b を設計変数に取った。外側のフレームの幅に関しては、十分に厚みを持たせる代わりに、設計変数とせず固定値とした。そして、これらの設計変数を元に、直線と曲線を組み合わせてストッパー部の最適化モデルを作成する。

図 15 にグripperとストッパーのモデルを結合した、全体モデルを示す。この全体モデルを用いて形状最適化を実施する。

3.3.2 設計条件の設定

目的関数としては、グripper先端の出力部の変位 d_{out} を用い、設計変数としては 3.3.1 で設定したパラメータを用いた。また、

Fig.13 The model of the gripper

Fig.14 The model of the buckling stopper

Fig.15 Combined model

Fig.16 Optimal shape of combined model

Fig.17 History of F_{in}

解析の関係上、図 15 に示す入力点 P_{in} に荷重ではなく強制変位を付与した。制約条件としては最大相当応力 $\sigma_{ma} \leq 60\text{MPa}$ と、強制変位を段階的に付加していく過程で、入力点 P_{in} に生じる反力 F_{in} が 0N 以下になる状態があることとした。反力 F_{in} が 0N になるということは、座屈により生じる力と、グリッパーからの反力が釣り合い、外部からの入力無しにその状態が維持されることを示す。

3.3.3 形状最適化

最適化モデルと設計条件に基づいて形状最適化を実施した。

図 16 に最適形状を、図 17 に入力点 P_{in} の変位量と反力 F_{in} の関係を表したグラフを示す。図 15 に示す初期形状と図 16 に示す最適形状を比較すると、 $H_1 \sim H_7$ の 7 つのヒンジ部がそれぞれ細く、より柔軟性の高い形状になっていることが分かる。一方で、図 17 より、入力点 P_{in} の変位量が 16.2mm の時に、反力 $F_{in} = -1.95\text{N}$ となり、ストッパーが正しく機能していることが分かる。また、最終的に目的関数 $d_{out} = 6.18\text{mm}$ 、最大相当応力 $\sigma_m = 54.9\text{MPa}$ となった。

4. 結 言

本論では、革新的なコンプライアントメカニズムの設計を可能とするために、トポロジー最適化によって創成したコンプライアントメカニズムと、設計者が創成した付加的な機構を組み

合わせて設計コンセプトを作成し、その後に形状最適化を行うという創成設計法を構築した。以下に結果を記す。

- (1)コンプライアントメカニズムと付加的な機構を組み合わせることで、高機能・高性能なメカニズムが実現できるが、このようなメカニズムの設計コンセプトを効率的に創成するために、設計者の試行錯誤の過程を支援する発想支援手法を構築した。
- (2)得られた設計コンセプトから、応力集中などの工学的要件を満たしつつ、メカニズムの具体的な形状を得るために、設計コンセプトに基づいて初期形状を作成し、形状最適化を実施する方法を構築した。
- (3)本手法の手順を解説するために、ストッパー付きグリッパーの創成設計に本手法を適用した。

参 考 文 献

- 1) Howell, L. L.: *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, Inc., New York, N. Y., (2001)1.
- 2) Larsen, U. D., Sigmund, O., and Bouswstra, S.: An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems, Proceedings of the IEEE Ninth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, San Diego, California, (1996)365.
- 3) Howell, L. L. and Midha, A.: Method for the Design of Compliant Mechanisms with Small-Length Flexural Pivots, *J. Mech. Design, Trans. ASME*, **116**, (1994)280.
- 4) Bendsoe, M.P. and Kikuchi, N.: Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method, *Comput. Methods. Appl. Mech. Eng.*, **71**, 2, (1988)197.
- 5) Nishiwaki, S., Min, S., Yoo, J., and Kikuchi, N.: Optimal Structural Design Considering Flexibility, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **190**, 34, (2001)4457.
- 6) Sigmund O.: On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization, *Mech. Struct. & Mach.*, **25**, 4, (1997)493.
- 7) Pereira J. T., Fancello, E. A., and Barcellos, C. S.: Topology Optimization of Continuum Structures with Material Failure Constraints, *Struct Multidisc Optim*, (2003).
- 8) Duysinx, P and Bendsoe, M.P.: Topology Optimization of Continuum Structures with Local Stress Constraints, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **43**, (1998)1453.
- 9) Poulsen, T.A.: A new Scheme for Imposing a Minimum Length Scale in Topology Optimization, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **57**, (2003)741.
- 10) Yoon, G. H., Kim, Y. Y., Bendsoe, M. P., and Sigmund, O.: High-free topology optimization with embedded translation-invariant differentiable wavelet shrinkage, *Struct Multidisc Optim*, **27**, (2004)139.
- 11) Pedersen, C.B., Buhl, Y., and Sigmund, O.: Topology synthesis of large-displacement compliant mechanisms, *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, **50**, (2001)2683.
- 12) Bruns, T. E. and Tortorelli, D. A.: Topology Optimization of Non-linear Structures and Compliant Mechanisms, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **190**, 26-27, (2001)3443.
- 13) 小林正和, 山下進介, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 富田直秀: トポロジー最適化と形状最適化に基づいたコンプライアントメカニズムの多段階創成設計法, *精密工学会誌*, **70**, 11(2004)1455.
- 14) Bruns, T. E. and Sigmund, O.: Toward the topology design of mechanisms that exhibit snap-through behavior, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, **193**, (2004)3793.
- 15) Ohsaki, M. and Nishiwaki, S.: Shape design of bistable compliant mechanisms by utilizing snapthrough behavior, *Proceedings, The Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, (2004)39.
- 16) Conklin, J., Begeman, M. L.: gIBIS: A Hypertext Tool for Exploratory Policy Discussion, *Proceedings of CSCW'88*, (1988)140.
- 17) 吉村允孝, 小林正和, 泉井一浩: デザイナー間のインタラクションに基づいた創造的コラボレーション, *日本機械学会論文集*, **70**, 690(2004)523.
- 18) 松井和己, 寺田賢二郎: 連続的材料分布の節点補間によるトポロジー最適化手法, *日本機械学会論文集*, **69**, 684(2003)1257.
- 19) 細山亮, 西脇眞二, 泉井一浩, 吉村允孝, 松井和己, 寺田賢二郎: コンプライアントメカニズムのトポロジー最適設計法, *日本機械学会論文集*, **70**, 696(2004)2384.