

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：25301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K04714

研究課題名（和文）シザーズ機構を複数組み合わせた展開型立体骨組構造の力学的性能評価と形状設計法

研究課題名（英文）Mechanical performance evaluation and shape design method of deployable frame structure composed of multiple scissor mechanisms

研究代表者

津田 勢太（TSUDA, SEITA）

岡山県立大学・デザイン学部・教授

研究者番号：80584325

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、シザーズ機構を用いた1自由度の展開構造の新しい構成方法を提案するものである。平面シザーズを組み合わせた多面体シザーズ機構を基本ユニットとし、異なるユニットを適切な法則で連結して構成する。一般的なシザーズ機構は2本の部材の中間部をピボットヒンジでつなげるが、本提案では2本以上の偶数本の部材で構成される複合型シザーズ機構を利用する。本手法により、湾曲体など2種類の複雑な展開形状を構成できる。1つ目は軸方向に伸縮する多角柱シザーズ機構およびその端部同士を連結したグリッド状の立体構造物、2つ目は面的に展開する曲面シザーズ機構である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

提案したシザーズ機構の新しい構成方法により、これまでにはない様々な形状に展開する立体構造を計画できるようになった。この3次元伸縮機構によって特定の場所や用途に応じた立体骨組を設計することができ、イベントや災害時などに活用する移動型の仮設建築、組み立て施工が困難な場所における構造物など様々な領域で活用することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：This study proposes a novel configuration method of scissor mechanisms for the deployable structure with one degree of freedom. This method, which combines planar scissors to create a polyhedron as a basic unit and connects several units in a specific manner, has practical applications in creating complex space structures. Unlike conventional scissors-like elements that connect the intermediate parts of two members with a pivot hinge, our proposal utilizes composite scissors-like elements composed of an even number of two or more members. This approach enables the creation of two main structures: a multi-faceted prism scissor mechanism that can fill space by connecting the end parts, forming a grid-like three-dimensional structure, and a surface-deploying curved surface scissor mechanism.

研究分野：建築構造

キーワード：展開構造 メカニズム 立体骨組

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

収納された小さな状態から大きな構造物へと形態変化する展開構造は様々な分野で利用されている。構造物としては仮設・移動型の建築物や宇宙空間で利用するアンテナなど、小さなものでは開閉扉などの建築部品や工作機械、家具・テントなどの日用品など、更に小さなものでは血管内に挿入するステントなどの医療器具などが挙げられる。

展開構造のシステムは種々あるが、1自由度であるとともに高い伸縮性能を有するシザース機構はもっとも有用なシステムのひとつである。シザース部材の形状や配置、ヒンジ接合位置などを工夫した様々な展開形状の可能性が考案されてきたが、これまでに提案されてきた形態変化は、主に直線や円弧などの1次元伸縮(鉛直方向に伸縮するマストや水平方向に伸縮する橋梁など)、または幾何学的に対称性の高い2次元伸縮(大空間構造を覆う屋根や宇宙空間で広がるアンテナなど)に限定されている。

本研究では、複数のシザース機構の構成を工夫して連結することにより、3次元的に伸縮する様々なグリッド状の立体構造物を生成する可能性を探求するものである。この3次元伸縮機構によって、イベント・災害時などに活用する移動型の仮設建築や、組み立て施工が困難な場所(例えば、離島や山岳などの僻地、宇宙、海洋上や水中)における構造物など様々な領域で活用することが期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、複数個の平面シザースを組み合わせた多面体シザース機構を基本ユニットとする。ただし、多面体のすべての面に平面シザースを配置すると機構とならないため、相対する2面は空洞(端面と呼ぶ)とする必要がある。この基本ユニットの端面と他の基本ユニットの端面を連結することで、軸方向に伸縮する多角柱シザース機構を生成できる。多角柱シザース機構を構成するための多面体シザース機構は、対称性を有する同一形状の正多角柱とすることが最も明確であり、機構としての展開性が確保できる。

複数の正多角柱シザース機構をその端部で適切に連結することで、放射上に広がる立体構造物が生成できる。平面シザース機構は1自由度であり、接合部で余分な自由度を増やさないよう配置すれば、この立体展開構造も1自由度となる。空間を充填するよう配置して繋げていくことによって、無限に広がる立体構造物が生成できる。これらの立体機構は、展開後もその対称性が維持されるため、規則正しく配置されたグリッド状の立体構造物が生成される。本研究の目的の一つは、このような規則性のある空間充填可能な配置方法を探求することである。

正多角柱のシザース機構ではなく、形状の異なる平面シザース機構を組み合わせた多角柱シザース機構を用いれば、展開とともに多角柱形状が変化していく。また、シザースのピボットヒンジ位置を変えたり、屈折した部材を用いたりすることで、多角錐型の伸縮機構や屈曲型の伸縮機構を作成することもできる。様々な形状の基本ユニットを組み合わせることで、角度や方向が変化する不規則で特異な形体を生み出すことの可能性を探ることも本研究の目的とする。

1自由度のシザース機構は、1箇所の追加拘束により構造体となるが、曲げ変形の影響で、剛性や荷重支持能力は十分に高いものではない。宇宙空間など荷重が小さい場所以外での利用のためには何らかの補強が必要と考えられる。補強方法としては、機構に後から補強材を挿入する簡易な方法から、最初から機構内部に補強材を装填するなど様々な手法が考えられる。展開性能と構造性能を同時に実現する形状を見出すことも本研究の目的とする。

3. 研究の方法

1自由度である平面シザース機構の展開時幾何形状は、1個の変数により陽に表すことができる。様々な構成の平面シザースを組み合わせた1自由度の多面体シザース機構について、展開時の変形正常を把握するための幾何関係式を導出することで、複数個のシザース機構を組み合わせた複雑な幾何形体を表現できるようにする。また、この関係式を用いることで、シザース機構全体を構成する要素のパラメーターや配置を最適化することによって、目標となる全体形状を生成する方法を探る。

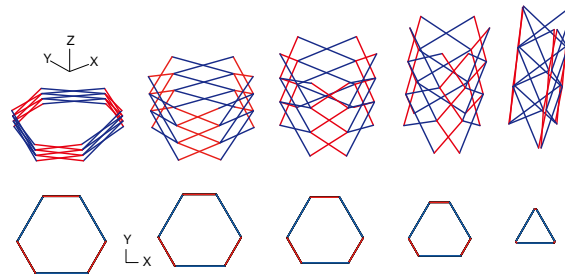
このようにして生成した展開構造の縮小機構模型を製作し、可動試験を実施する。接合部自体の有限な大きさや可動部の隙間、あるいは発生しうる分岐経路などの存在など、数値解析で現れない要因の影響を確認し、修正する。さらに、機構を十分な剛性・強度を有する構造体として機能させるため、展開後に補強部材を追加する方法や補強部材をあらかじめ機構内に組み込む方法などの具体的方法の考案とその特性を数値解析により検証する。

4. 研究成果

(1) 多面体シザースユニットの端面連結による多角柱シザース機構

多面体シザースユニットは、本研究が対象とするすべての立体機構の基礎であり、連結により等辺多角柱および不等辺多角柱が構成できる。等辺多角柱の場合は内角変化が生じないため、角柱稜線の接合部には追加ヒンジは不要となる一方、不等辺多角柱の場合には内角の変化に追従

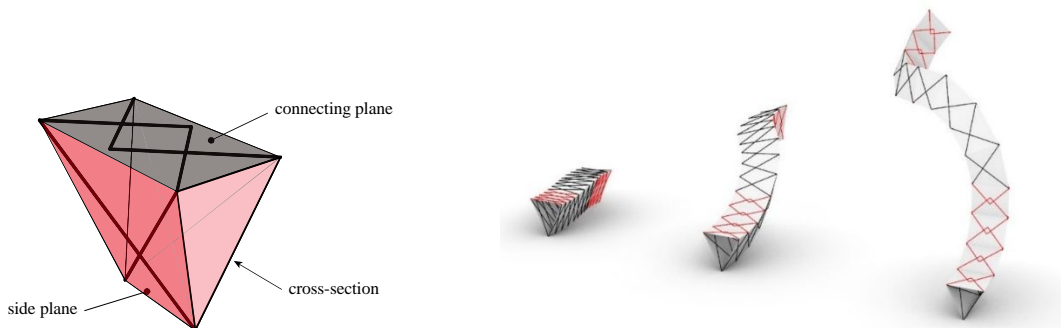
する追加ヒンジ（ヒンジ軸は稜線方向）が必要となる。また，各面に配置した平面シザーズの伸縮率は一定ではなく，短い辺に配置したシザーズ部材の方が立ち上がり角度の変化が早く，多角形の形状が変化していく。この性質を用いると，例えば，不等辺六角柱を2種類の平面シザーズの交互配置することによって，短いシザーズの面が先に伸びるため，展開後に三角柱を形成する（不等辺ではあるが，対称性により内角変化は生じない）。短いシザーズ面はほぼ直線となるため，柱材もしくはトラスの弦材のような役割を担って，展開後の剛性および強度の増大に寄与することになり，補強材を組み込んだ展開構造の一種となる。



端面が不等辺六角形から三角形へ変化する機構

ピボット位置を中心からずらした平面シザーズ（外形は台形）を多面体の2面に並べ，その2面の間を平面シザーズ（外形は長方形）でつなげて閉じた多面体ユニットを作り，これらを端面で連結していくことによって，屈折する三角柱または四角柱シザーズ機構を構成することができる。この長方形型の平面シザーズは，台形型の平面シザーズのピボット位置に応じて，2本以上の偶数本数のシザーズ部材を組み合わせた複合型シザーズが必要となる。

さらに，多面体ユニットの連結位置（端面）において，台形型平面シザーズの配置面を転換することにより，屈折方向を転換することができるため，3次元的に湾曲した角柱シザーズを構成することが可能となる。



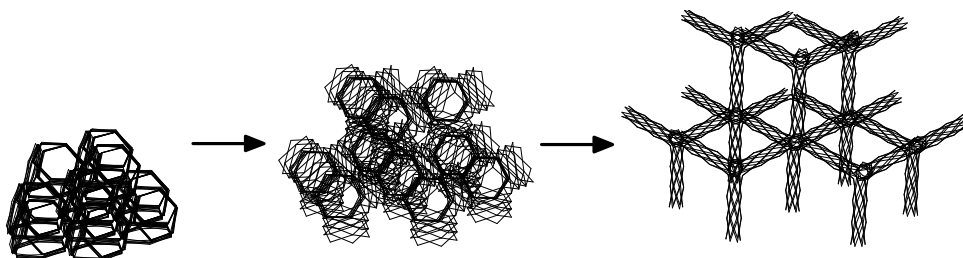
三角柱ユニット

三角柱ユニットを組み合わせた湾曲構造

(2) 多角柱シザーズ機構の連結による立体グリッド機構

1自由度の多角柱シザーズ機構の端部を，他の多角柱シザーズ機構と連結することにより，立体的なグリッド骨組を構成することができる。1自由度の全体機構とするには機構端部の接合部（仕口部）で閉じる必要がある。

空間を満たすような構造体とするには空間充填多面体を利用することができ，仮想の多面体各面に角柱シザーズ機構を配置することで，規則性のあるグリッド状構造物を構成できる。また，角柱に上述した不等辺多角柱シザーズ機構を配置することにより，強度・剛性の高い構造物の構築も可能となる。



切頂四面体に正六角柱シザーズを配置したグリッド骨組

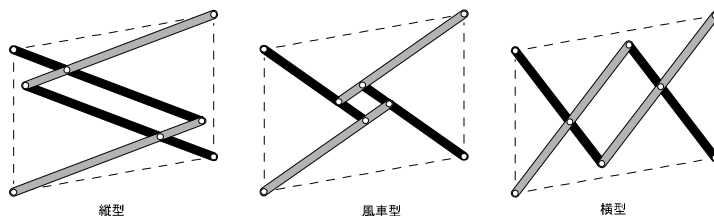
(3) 多面体シザーズユニットの側面連結による曲面グリッド骨組

多面体シザーズユニットの側面同士を連結することで，横方向へ面的に広がる展開構造が可能となる（正確に表現すると隣接ユニットの側面同士を連結するのではなく，側面を共有する）。

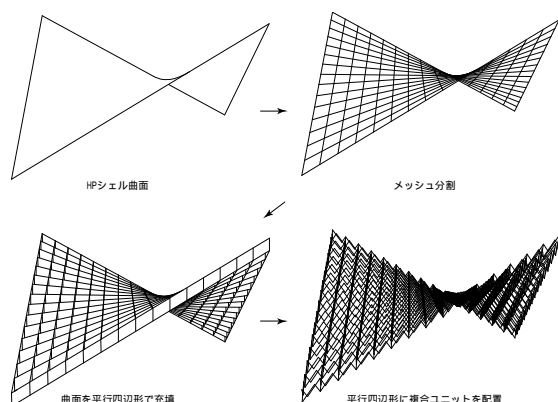
シザーズ機構で構成される曲面機構で1自由度とするためには、通常は高い規則性が必要となる。本研究では複合型シザーズ(2本以上の偶数本数のシザーズ部材)を用いて外形が平行四辺形となる平面シザーズを組み合わせることで、任意の自由曲面を構成する手法を提案した。

機構全体を構成する平行四辺形は、相対する2辺がすべて常に鉛直方向となるよう配置したものであり、平行四辺形の形状(大きさや射角)は任意に設定できるため、様々な曲面を形成することが可能となる。この曲面機構は、最も収縮させた時には束状に折り畳まれ、最も拡げた場合には平面となる。

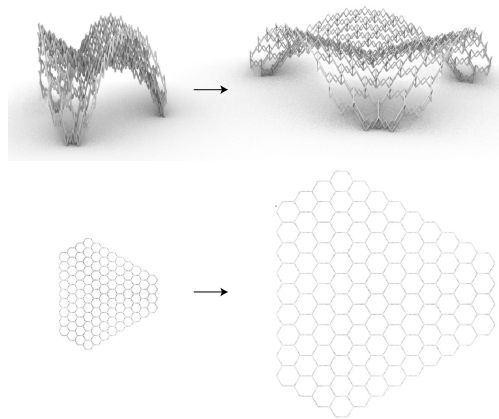
構成の設定手法としては、構成する全要素のパラメーター最適化により、目標形状にフィットする形態を生成することができる。また別の方法としては、生成目標とする展開後の曲面をグリッド分割し、そのグリッド線すべてに一定の高さをもたせることで平行四辺形の集合を作り、それぞれの平行四辺形に一定のルールで複合型シザーズを配置する手法も有効である。



平行四辺形の複合シザーズ



目標曲面への複合型シザーズの配置手法



コノイド曲面を組み合わせた曲面の構成

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Seita Tsuda, Junpei Kohno, Yoshiyuki Nakahara, Makoto Ohsaki	4. 巻 250
2. 論文標題 Composition of curvilinearly extendable tubular scissor mechanisms	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijsolstr.2022.111673	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kentaro Hayakawa, Makoto Ohsaki	4. 巻 216
2. 論文標題 Form generation of rigid origami for approximation of a curved surface based on mechanical property of partially rigid frames	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Solids and Structures	6. 最初と最後の頁 182-199
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijsolstr.2020.12.007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 山浦健士朗, 津田勢太
2. 発表標題 平行四辺形型の複合シザーズユニットによる自由曲面の構成
3. 学会等名 日本建築学会・第18回コロキウム構造形態の解析と創生2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Hayakawa and M. Ohsaki
2. 発表標題 Form generation of rigid origami by multiobjective optimization for approximating curved surface
3. 学会等名 IASS Symposium 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 早川 健太郎, 大崎 純
2. 発表標題 部分剛接合骨組の力学理論を用いた剛体折紙の形状生成の効率化
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 早川 健太郎, 大崎 純
2. 発表標題 剛体折紙の折線パターンの最適化と近似曲面形状生成法
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会講演予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 津田勢太, 河野純平, 大崎 純
2. 発表標題 平面シザーズ構造を組み合わせた展開型角柱の剛性評価(その1) 平面シザーズと四角柱シザーズの剛性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野純平, 津田勢太, 大崎 純
2. 発表標題 平面シザーズ構造を組み合わせた展開型角柱の剛性評価(その2) 不等辺多角柱シザーズの剛性
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演(北陸)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 河野純平, 津田勢太, 大崎 純
2. 発表標題 平面シザーズ構造を組み合わせた展開型角柱による立体骨組の構成手法
3. 学会等名 日本建築学会・第14回コロキウム構造形態の解析と創生2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大崎 純 (Ohsaki Makoto) (40176855)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	中原 嘉之 (Nakahara Yoshiyuki) (60726983)	岡山県立大学・デザイン学部・助教 (25301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------