

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420185

研究課題名(和文)一般軸荷重構造物(テンセグリティ構造体)のための統一的構造解析・設計法の開発

研究課題名(英文)Unified Framework for Design and Analysis of Tensegrity Structures

研究代表者

長瀬 賢二(NAGASE, Kenji)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：70303667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、テンセグリティ構造体の系統的かつ大域的な(統一的な)最適構造設計のための解析・設計法の確立を目指し、自由曲面形成のための汎用基本ユニットの開発、ならびに、最適構造決定のための数学モデルの構築について考えた。特に、基本要素の繰り返し構造を用いて簡便に望みの形状を構成可能な汎用ユニット(テンセグリティシート)の提案、ならびに、構造物の設計パラメータ(要素(棒・ケーブル)数、結合関係、形状など)を計算機上で容易に(自動的に)変更可能なシステムモデルの構築とそれに基づく解析・設計法の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：This research is concerned with analysis and design of tensegrity structures. We aim to establish a systematic and unified way to design tensegrity structures. To fulfil an allotted space by tensegrity structures, we proposed a general-purpose tensegrity assembly (tensegrity sheet) composed of repetition of simple fundamental units. From the sheet, we can produce shell-type structures such as tori, cylinders, paraboloids, spheres, ellipsoids, etc., by specifying the node locations and boundary conditions. For the design and analysis of tensegrity structures, we proposed a mathematical framework, from a network perspective, that can easily handle the change of structural configurations (add/delete/exchange members, change connection/shape, etc.). Some of the design and analysis problems such as minimal mass design and dynamical analysis are discussed under this mathematical formulation.

研究分野：制御工学、機械力学

キーワード：テンセグリティ 構造設計 最適化 動力学解析

1. 研究開始当初の背景

近年、棒（またはパイプ）とワイヤから構成されるテンセグリティ構造体に関する研究が盛んに行われている（図1はテンセグリティ構造で円柱面を構成したもの）。テンセグリティ構造体は、部材が受ける力を、圧縮



図1テンセグリティシリンダ

力もしくは張力といった軸力のみで制限した（モーメントが発生しない）構造体であり、曲げによる降伏を考慮しなくてもよいため構造物を軽量に製作できること、また、ワイヤ長の調整により形状変更が可能であるなどの特徴を有する。軽量であり、また、折りたためばコンパクトに運搬可能であることなどから、大型構造物や宇宙構造物、また、災害時の仮設住宅、ロボットなどへ利用が期待されている。

軸力のみを受ける部材を用いて構造物を構成する枠組みとしては、棒を滑節点で結合したトラス構造が有名であり、空港やドーム球場の屋根、橋桁、宇宙構造物などで広く用いられている。テンセグリティ構造は、棒に加えてワイヤの利用を許容した軸力構造物であり、トラス構造の概念を一般化した構造体とみなすことができる。しかしながら現在までのところ、見た目の奇抜さを活用した芸術作品としての実現例がわずかにみられる程度で、トラス構造に比べて工学的な応用は進んでいない。

2. 研究の目的

テンセグリティ構造体の実用化が難しい一因として、システムの結合関係がトラス構造に比べて複雑で、その設計は一般に、構造物全体で安定性を考慮して行う必要がある点がある。これは、トラス構造の場合において、それ自体が安定な三角形の枠構造を基本ユニットとし、それらを望みの形状になるように単純に組み合わせればよいのと対照的である。また、テンセグリティのシステム構造の決定要因としては、部材の数およびその配置位置、部材間の結合関係（結合の有無）などがあるが、現在までのところ、上記設計パラメータのすべてを計算機上で容易に（自動的に）変更可能なシステムモデルは確立されていない。そのため、これまでのテンセグリティ構造体の多くは、生物システムの模倣や芸術家などにより発見的に見出されたものが多い。

上述のように、テンセグリティ構造はトラス構造を含む広い概念であり、工学的にも有用なシステム構造である。今後、テンセグリティ構造の工学的な応用を進めるためには、系

統的で大域的な最適構造設計のための解析・設計理論の確立が必要である。

3. 研究の方法

2節で述べたように、テンセグリティ構造のさらなる展開のためには、生物システムの模倣や発見的な構造設計のみではなく、系統的で大域的な（構造物全体としての）最適構造設計のための解析・設計理論の確立が必要である。

本研究では、簡便に望みの形状を構成可能な、テンセグリティ構造のための汎用ユニットの開発、ならびに、構造物の設計パラメータのすべてを計算機上で容易に（自動的に）変更可能なシステムモデルとそれに基づく解析・設計法の確立という観点から上記問題について考えた。

特に、基本要素の繰り返しを用いた汎用的な基本ユニット（テンセグリティシート）の提案、ならびに、システム構造の決定パラメータ（要素数、要素位置、結合関係など）を陽に数式モデルに含む、可変構造モデルに基づくシステム解析・設計法の提案という観点から、その問題にアプローチした。

4. 研究成果

3節で述べたように、本研究では、テンセグリティ構造体の系統的かつ大域的な（統一的な）最適構造設計のための解析・設計理論の確立を目指し、特に、自由曲面形成のための汎用基本ユニットの開発、ならびに、最適構造決定のための可変構造モデルに基づくシステム解析・設計法について検討した。

自由曲面形成のための汎用基本ユニットの開発に関しては、既存の円柱型テンセグリティ構造体の結合パターンを基本ユニットに選び、その数学モデルの構築や有効性の検証を詳細に行った。基本ユニットを繰り返し結合した要素（テンセグリティシート）に対する結合行列の生成則を導出するとともに、そこに適当な境界条件（シートの4辺の中の一対の辺のみを結合した場合や4辺の二対とも結合した場合）を付加することで、円柱、放物面、球、円環などの曲面が形成可能な計算アルゴリズムの導出を行った。構造物に含まれるユニット数や曲面の形状（曲率など）は、任意に設定が可能である。図2は、テンセグリティシートと、そこから形成される曲面構造物の一例である。なお、上記計算アルゴリズムを用いた数値解析により、多くの凸曲面において、生成されるテンセグリティ構造が安定となることを確認した。

また、曲面構造物（外郭構造物）の生成に加え、板状の構造物を生成するための汎用基本ユニットについても考え、テンセグリティプリズムを基本要素とした繰り返し構造物の生成方法についても検討を行った。

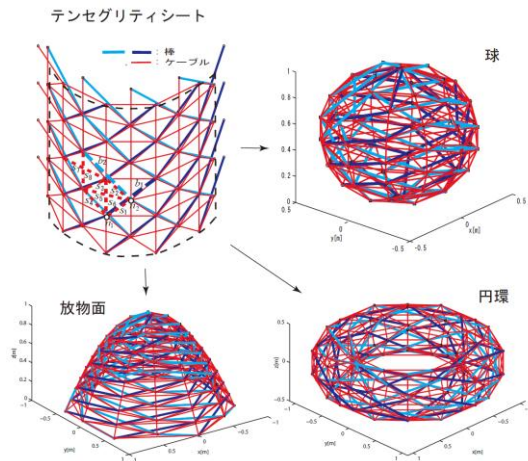


図2 テンセグリティシートから生成される曲面構造

テンセグリティ構造体の大域的な解析・設計手法の開発に関しては、システム構造（要素数、要素位置、結合関係など）を計算機上で容易に変更が可能なモデル表現（可変構造モデル）を得るという観点から、要素位置と結合関係の情報をそれぞれ異なる行列の要素内に配置し、それらの代数演算により要素を表現する数学モデル（分離表現）の検討を行い、静力学、動力学的観点から、解析に有用なモデル表現であるとの知見を得た。

分離表現と呼ばれる数学表現において、はじめに、力の釣り合い条件やシステムの剛性行列の導出を行い、またそれを利用した最適設計法として、力の釣り合いや最大応力などを制約条件とした、質量最小化問題の定式化を行った。最適化問題は、半正定値計画問題（凸問題）として記述でき、内点法などの最適化アルゴリズムを用いて数値的に安定に最適解を求めることができる。図3は、上記テンセグリティシートから生成した円柱面において、与えられた外力（ねじり方向）に抗するために必要な部材質量を、用いたユニット数に対して計算し等高線として図示したものである。最適解（最小質量構造）が、縦横ユニット数のグラフ上のある直線上にあることが分かる。

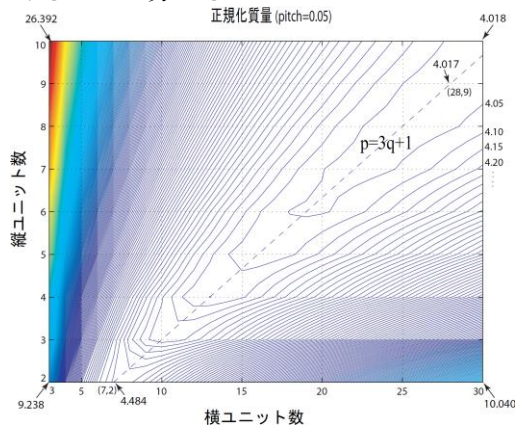


図3 テンセグリティシリンダの質量に関する等高線

また、上記分離表現は、静力学解析のみならず、動力学解析にも利用できる。テンセグリティ構造の棒を剛体、ケーブルを質量のない線形ばねと見なした場合において、分離表現を用いた運動方程式の導出を行った。上記運動方程式は、棒と棒、棒と壁など、剛体結合を含む場合にも適用可能である。分離表現の特徴から、要素数や形状、結合関係の変更も容易であるため、動力学解析による最適構造決定への利用にも適している。図4は、テンセグリティシートから生成した円柱面を台の上に置き、その下面を周期的に加振した場合（地震動を想定）の時間応答の様子である。

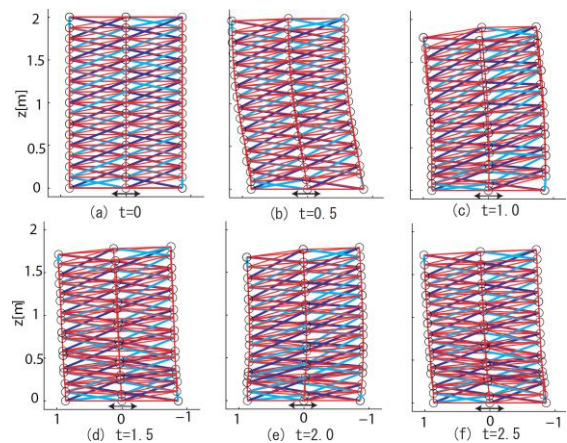


図4 テンセグリティシリンダの動的応答

さらに、上記数学表現の他分野への応用として、自己釣り合い力（平衡状態における内力）を有するマルチエージェントシステムの制御設計への展開を行い、その有用性を確認した。また、上記動力学解析より、繰り返し構造を有するテンセグリティ構造体の振動問題に着目し、波の進行に基づく振動抑制法（波動解析・制御法）についても検討した。図5は、マルチエージェントシステムの制御設計に、上記分離表現に基づく数学モデルを利用した場合の制御応答である。

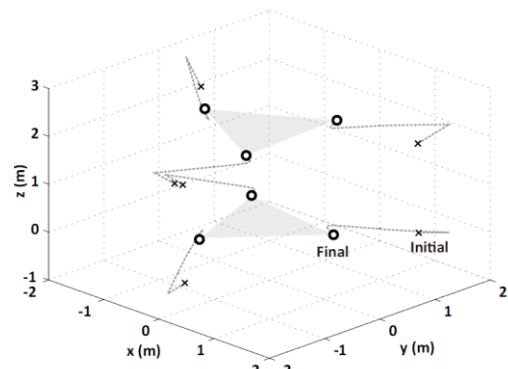


図5 マルチエージェントシステムの制御応答

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① K. Nagase, R. E. Skelton, Double Helix Tensegrity Structures, AIAA Journal, 査読有, Vol. 53, 2015, pp. 847-862.
- ② K. Nagase, Wave Analysis and Control of Double Cascade-Connected Damped Mass-Spring Systems, Mechanics Research Communications, 査読有, Vol. 70, 2015, pp. 49-57.
- ③ 増田容一, 長瀬賢二, 自己釣り合い状態を利用したマルチエージェントシステムのフォーメーション制御, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 51, 2015, pp. 744-754.
- ④ Y. Masuda, K. Nagase, Optimal Internal Force Design for Formation Control of Multi-Agent Systems, Proceedings of 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems, 査読有, 2015, pp. 597-602.
- ⑤ 山下貴大, 長瀬賢二, テンセグリティブリズムを基本要素とした板状構造物の設計, 2015 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 査読無, 2015, G1000603.
- ⑥ K. Nagase, R. E. Skelton, Minimal Mass Tensegrity, Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 査読有, Vol. 55, 2014, pp. 37-48.
- ⑦ K. Nagase, R. E. Skelton, Network and Vector Forms of Tensegrity System Dynamics, Mechanics Research Communications, 査読有, Vol. 59, 2014, pp. 14-25.
- ⑧ 増田容一, 長瀬賢二, 形状と応力の同時最適化によるテンセグリティ構造の最小質量設計, 2014 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 査読無, 2014, J0110105.
- ⑨ 佐藤賢太郎, 長瀬賢二, 剛性と座屈を考慮したテンセグリティ構造体の最小質量設計, 2014 年度日本機械学会年次大会講演論文集, 査読無, 2014, J0110104.
- ⑩ K. Nagase, R. E. Skelton, Minimal Mass Design of Tensegrity Structures, Proceedings of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014, 査読有, 2014, Vol. 9061, 90610W-1.
- ⑪ 長瀬賢二, 中道健太, 多段結合を有するマス・ばね・ダンパ系の波動制御 (基礎理論とテンセグリティ構造体への応用), 日本機械学会論文集 (C 編), 査読有, Vol. 79, 2013, pp. 3732-3747.

[学会発表] (計 5 件)

- ① Y. Masuda, K. Nagase, Optimal Internal Force Design for Formation Control of Multi-Agent Systems, 2015 15th International Conference on Control, Automation and Systems, 2015.10.13~2015.10.16, BEXCO (釜山, 韓国).
- ② 山下貴大, 長瀬賢二, テンセグリティブリズムを基本要素とした板状構造物の設計, 2015 年度日本機械学会年次大会講演会, 2015.9.13~2015.9.16, 北海道大学 (北海道)
- ③ 増田容一, 長瀬賢二, 形状と応力の同時最適化によるテンセグリティ構造の最小質量設計, 2014 年度日本機械学会年次大会講演会, 2014.9.7~2014.9.10, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京).
- ④ 佐藤賢太郎, 長瀬賢二, 剛性と座屈を考慮したテンセグリティ構造体の最小質量設計, 2014 年度日本機械学会年次大会講演会, 2014.9.7~2014.9.10, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京).
- ⑤ K. Nagase, R. E. Skelton, Minimal Mass Design of Tensegrity Structures, SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2014, 2014.3.9~2014.3.13, Town & Country Resort and Convention Center (San Diego, USA).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長瀬 賢二 (NAGASE, Kenji)
和歌山大学・システム工学部・教授
研究者番号: 70303667

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: