

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 22 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630098

研究課題名(和文) テンセグリティ構造の動的移動におけるダイナミクス

研究課題名(英文) Dynamics in Tensegrity Structure Locomotion

研究代表者

平井 慎一 (Hirai, Shinichi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：90212167

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、テンセグリティロボットの転がり移動におけるダイナミクスを、離散的な状態遷移と連続的な微分方程式から構成されるシステムとして表現することである。まず、テンセグリティロボットの幾何学的表現から、転がりを表す離散的な状態遷移を導いた。次に、テンセグリティロボットの運動方程式を導き、ロボットの転がりをシミュレーションした。6ストラットテンセグリティロボットと星形テンセグリティロボットのシミュレーションを行い、軸対称接触と面対称接触の間の遷移が可能であることを示した。さらに、ストラット駆動は、軸対称接触と面対称接触の間の遷移、面対称接触と面対称接触の間の遷移が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to formulate the dynamic rolling of tensegrity robots as a system consisting of discrete contact state transitions and continuous dynamic equations. First, we derived a graph representing contact state transitions during rolling based on geometric description of tensegrity robots. Second, we derived a set of equations of dynamic rolling of tensegrity robots to simulate their rolling over the ground. Through simulation of the rolling of a six-strut tensegrity robot and a star-shaped tensegrity robot, it turned out that these tensegrity robots could perform transitions between an axial symmetric contact and a planar symmetric contact but could not transitions between neighboring planar symmetric contacts. Additionally it turned out that strut driving enables us not only transitions between an axial symmetric contact and a planar symmetric contact but also transitions between neighboring planar symmetric contacts.

研究分野：ロボティクス

キーワード：テンセグリティ 転がり ダイナミクス 状態遷移

1. 研究開始当初の背景

現在、国内外で柔らかいロボット(ソフトロボット)に関する研究が進められている。米国の Chemical Robots (ChemBots) プロジェクトでは、ボディの変形により隘路や障害物を通り抜けることができるソフトロボットが多数提案されている。国内では、弾性カタパルトや繊毛機構を用いて、柔らかいロボットを駆動させる研究が進められている。

応募者はこれまでに、弾性殻を有するソフトロボットによる転がり移動と跳躍に関する研究を進め、その発展としてテンセグリティロボットを提案した。テンセグリティロボットは、複数の剛体とそれらを結合する弾性体から構成されており、外殻は多面体で表すことができる。したがって、テンセグリティロボットの転がりは、多面体を構成する面から面への遷移で表され、結果として離散的な状態遷移に帰着される。同時に、転がりのダイナミクスは、複数の剛体と弾性体から成る機構の運動と変形に関する連続的な微分方程式で表される。このように、離散的な状態遷移と連続的な微分方程式から構成されるテンセグリティロボットのダイナミクスには、不明の点が多い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、テンセグリティロボットの転がり移動におけるダイナミクスを、離散的な状態遷移と連続的な微分方程式から構成されるシステムとして明らかにすることである。この定式化により、テンセグリティロボットの転がりをシミュレーションするとともに、転がりを力学的に理解することを目指す。

3. 研究の方法

テンセグリティロボットの幾何学的表現から、転がりを表す離散的な状態遷移を導く。さらに、テンセグリティロボットの弾性要素とアクチュエータに発生する力を定式化するとともに、テンセグリティロボットを構成する複数のストラットの運動方程式を導き、ストラットの運動方程式とストラットと地面との接触に起因する運動制約を統合することでテンセグリティロボットの運動方程式を得る。

複数のテンセグリティ構造に対して、運動方程式を定式化し、転がりをシミュレーションする。さらに、実機を試作し、実機の転がりとシミュレーションの結果を比較することにより、転がりの定式化の妥当性を検証する。

4. 研究成果

(1) 転がりの離散的な表現

テンセグリティロボットの閉包は、凸多面体となる。たとえば、6本のストラットから構成されるテンセグリティロボット(図1)の閉包は、8個の正三角形と12個の二等辺三

角形から成る二十面体で表される(図2)。

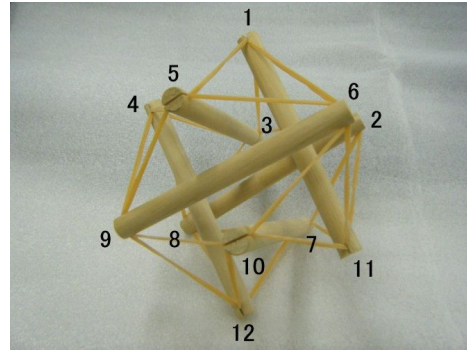


図1 6ストラットテンセグリティ

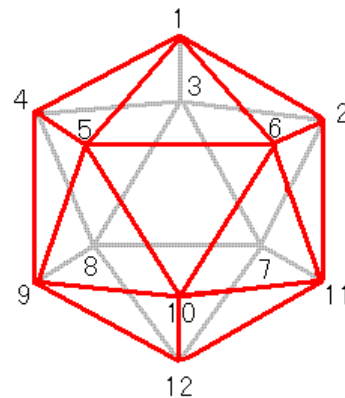


図2 6ストラットテンセグリティの閉包

テンセグリティロボットの静的な安定状態は、地面と接触する多角形で表される。したがって、テンセグリティロボットの転がりは、隣接する多角形間の遷移に対応する。6ストラットテンセグリティロボットの転がりは、図3に示す20面体の展開図において、隣接する三角形間の遷移として表すことができる。

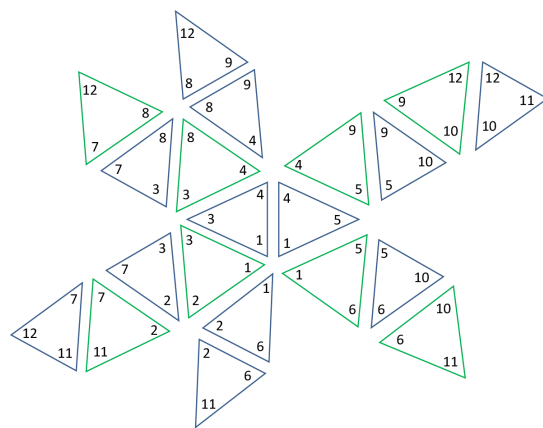
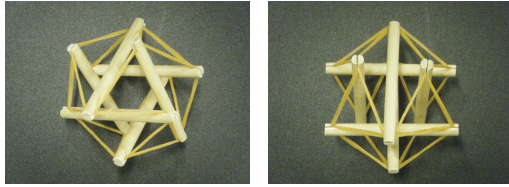


図3 6ストラットテンセグリティの転がりの表現

正三角形が接地している場合、上部からテンセグリティロボットを見ると、軸対称の構造となっている(図4(a))。これを、軸対称接触(A)と称する。一方、二等辺三角形が接

地している場合，上部からテンセグリティロボットを見ると，面対称の構造となっている．(図4(b))これを，面対称接触(P)と称する．



(a) 軸対称接触 (b) 面対称接触

図4 6ストラットテンセグリティの接触状態

6ストラットテンセグリティロボットの転がりにおける接触状態の遷移は

- AP 軸対称接触から面対称接触
- PA 面対称接触から軸対称接触
- PP 面対称接触から面対称接触

に分類できる．したがって，転がりの検証においては，これらの遷移の可能性を確認することが必要である．

## (2) 転がりの運動方程式

テンセグリティロボットのストラットを剛体とみなして，ストラットの並進運動と回転運動の方程式を導く．ストラットは空間内で自由に回転することができるので，ストラットの姿勢の表現には，四元数を用いた．ストラットの質量を  $m$ ，慣性行列を  $J$  とする．第  $i$  ストラットの位置を  $x_i$ ，姿勢を表す四元数を  $q_i$ ，第  $i$  ストラットに作用する力を  $f_i$ ，モーメントを  $\tau_i$  とすると，第  $i$  ストラットの運動方程式は

$$m\ddot{x}_i = f_i$$

$$\ddot{q}_i = h(q_i, \dot{q}_i, \tau_i)$$

と表される．ここで，ベクトル関数  $h$  は，慣性行列の逆行列を含む．各ストラットの両端には，弾性要素が結合されている．第  $i$  ストラットの両端に作用する力は，

$$f_i^+ = \sum_{j=v_i^+, l \in R_i^+} f_{\text{ela}}(x_j, x_l, \dot{x}_j, \dot{x}_l)$$

$$f_i^- = \sum_{k=v_i^-, l \in R_i^-} f_{\text{ela}}(x_k, x_l, \dot{x}_k, \dot{x}_l)$$

地面との接地に起因する接触力は

$$f_{\text{con}}(x) = \begin{cases} 0 & (z > 0) \\ -Kz - C\dot{z} & (z \leq 0) \end{cases}$$

と表すことができる．これらを用いて，スト

ラットの並進と回転の運動方程式を導いた．

## (3) 転がりのシミュレーション

6ストラットテンセグリティロボットの転がりのシミュレーションを行った(図5)．緑色がストラット，青色がアクチュエータを表す．また，赤色が接地しているストラットの端点，黄色が接地していない端点を表す．

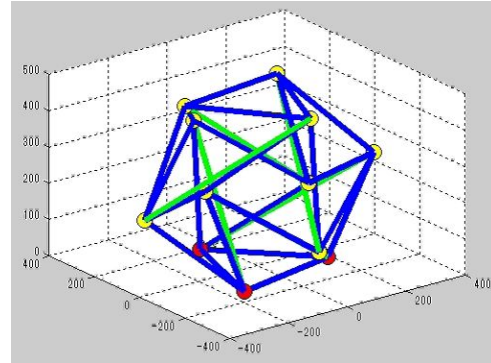


図5 6ストラットテンセグリティロボットのシミュレーションモデル

図6に，6ストラットテンセグリティロボットの軸対称接触から面対称接触への遷移をシミュレーションした結果を示す．シミュレーションにおいては，正三角形(1,2,3)で指定される軸対称接触から，(1,2)と(2,11)で指定される一対のアクチュエータを駆動し，どの接触状態への遷移が生じるかを調べた．結果として，二等辺三角形(2,3,7)への遷移が生じることがわかった．これは，試作した実機での遷移と一致する．また，面対称接触から軸対称接触への遷移をシミュレーションし，シミュレーション結果と実機を用いた実験結果が一致することを確認した．

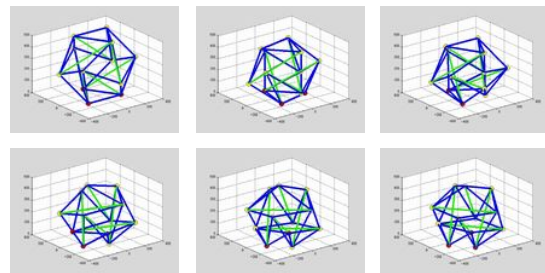


図6 軸対称接触から面対称接触への転がりのシミュレーション

## (4) 星形テンセグリティロボット

6ストラットテンセグリティロボットは，24本のアクチュエータを必要とする．ストラットの本数を保ちつつ，アクチュエータの個数を減らすことが可能な構造として，星形テンセグリティロボットを提案した．図7に星形テンセグリティロボットのシミュレーションモデルを示す．このテンセグリティロボッ

トは  $\beta$ 本のストラットと12本の弾性要素(アクチュエータ)から構成される。6 ストラットテンセグリティロボットに比べると、アクチュエータが半減する。さらに、星形テンセグリティロボットは、弾性要素(アクチュエータ)が地面と接することがないという利点を持つ。

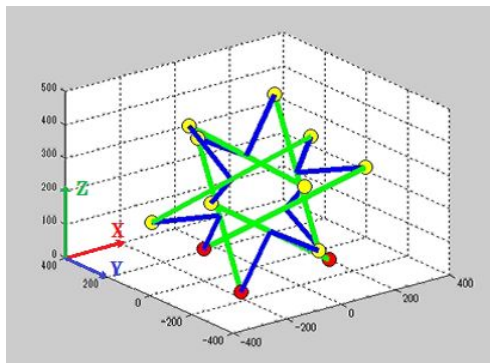


図7 星形テンセグリティロボット

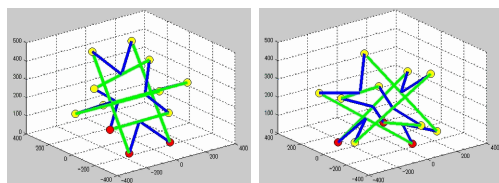
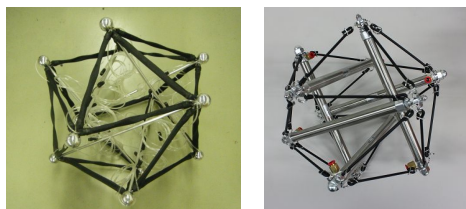


図8 星形テンセグリティロボットの転がりのシミュレーション

星形テンセグリティロボットの転がりシミュレーションの結果を、図8に示す。シミュレーションの結果、軸対称接触から面对称接触への遷移、面对称接触から軸対称接触への遷移が可能であることがわかった。

### (5) ストラット駆動ロボット

これまでのテンセグリティロボットでは、弾性体をアクチュエータとしてきた(図9(a))。弾性体駆動の場合、軸対称接触から面对称接触への遷移と面对称接触から軸対称接触への遷移は実現できるが、面对称接触から面对称接触への遷移が実現できなかった。また、駆動するアクチュエータの数が多く、自立的な移動を目指す上での障害となっていた。



(a) 弾性体駆動 (b) ストラット駆動  
図9 テンセグリティロボットの駆動方式

そこで、弾性体を駆動する代わりにストラ

ットを駆動することを検討した。ストラットを駆動するテンセグリティロボット(図9(b))の転がり移動を、実験的に評価した。その結果、図10に示すように、軸対称接触から面对称接触への遷移、面对称接触から軸対称接触への遷移、面对称接触から面对称接触への遷移のすべてを実現することができた。また、弾性体駆動で遷移を実現するためには、同時に二本のアクチュエータを駆動する必要があった。一方、ストラット駆動では、一本のアクチュエータを駆動することで、遷移を実現することができた。すなわち、ストラット駆動には、すべての遷移を実現することができる、遷移を実現するために必要なアクチュエータの個数が少ないという長所があることがわかった。

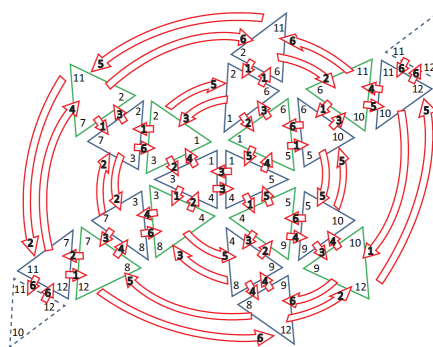


図10 ストラット駆動による遷移

### 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0件)

[学会発表](計5件)

川井 郁弥, 平井 慎一, ストラット駆動型テンセグリティロボットの転がり移動の実験的評価, 第20回ロボティクスシンポジア, 長野県軽井沢町 軽井沢プリンスホテルウエスト, Mar. 16, 2015

Shinichi Hirai and Ryo Imuta, Dynamic Modeling of Tensegrity Robots Rolling over the Ground, The 5th International Conference on Computational Methods (ICCM2014), Fitzwilliam College, Cambridge, U.K., July 28, 2014

伊牟田 遼, 平井 慎一, 星形テンセグリティ構造の変形による転がり移動, 第31回日本ロボット学会学術講演会, 首都大学東京 南大沢キャンパス(東京都), Sept. 6, 2013

Shinichi Hirai, Yuusuke Koizumi, and Mizuho Shibata, Active Shaping of a Tensegrity Robot via Pre-pressure, 2013 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2013), Wollongong, Australia, July 10, 2013

川井 郁弥, 平井 慎一, 圧縮材 12 本を使用したテンセグリティ型柔軟移動ロボットの転倒移動, ロボティクス・メカトロニクス '13 講演会, つくば国際会議場(茨城県), May 24, 2013

〔その他〕  
ホームページ等

<http://www.ritsumeai.ac.jp/se/~hirai/research/tensegrity-j.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

平井 慎一 (HIRAI SHINICHI)  
立命館大学・理工学部・教授  
研究者番号 : 90212167