

ストラット駆動によるテンセグリティロボットの転がりと跳躍

網干 雄城^{*1}, 柴田 瑞穂^{*2}, 平井 慎一^{*1}

Rolling and Jumping of a Tensegrity Robot via Strut Driving

Yuuki Aboshi^{*1}, Mizuho Shibata^{*2}, and Shinichi Hirai^{*1},

^{*1} Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

^{*2} Dept. Intelligent Mechanical Engineering, Kinki Univ., Higashi Hiroshima, Hiroshima 739-2116, Japan

This paper describes rolling and jumping performed by a strut-driven tensegrity robot. Tensegrity is a structure consisting of rigid struts and elastic tensile elements connecting the struts. We have proposed a rolling tensegrity robot driven by pneumatic McKebben actuators attached as tensile elements. This paper focuses on a tensegrity robot driven by strut extension. We have applied pneumatic cylinders to tensegrity struts and investigated which transitions can be performed by strut extension. It turns out that all transitions between neighboring stable states can be realized by strut extension. Additionally, we show that jumping of a tensegrity robot can be performed by strut extension.

Key Words : Soft Robot, Tensegrity, Deformation, Rolling, Jumping

1. 緒 言

本原稿では、ストラットの伸縮により駆動されるテンセグリティロボットの転がりと跳躍について述べる。近年、柔らかい材料で構成されるロボットに関する研究が進められている^{(1)~(6)}。柔らかい材料から成るロボットは、その形状を変化させることにより、狭隘部を通過できる可能性がある。また、柔らかい材料にポテンシャルエネルギーを蓄積し、移動や跳躍に利用できる可能性を持つ。一方、柔らかい材料でサイズが大きいロボットを構成することは困難である。そこで著者らは、柔軟材料ロボットの骨として、テンセグリティ構造を適用することを提案した⁽⁷⁾。

テンセグリティとは、建築学で提案された概念であり^{(8) (9)}、硬い要素（ストラット）が張力材により結合された構造を指す。ストラットどうしは接触せず、張力材により結合されている。テンセグリティは、構造に作用する張力と圧縮力の平衡により、その形状を保っている。テンセグリティの概念は、建築学^{(10)~(12)}のみならず、生物学⁽¹³⁾やロボティクス^{(14)~(16)}に適用されている。

著者らは、6本のストラットから成るテンセグリティロボットを試作し、その転がり運動を実験的に評価した^{(17) (18)}。試作したテンセグリティロボットでは張力材として、SMA アクチュエータやマッキベン空気圧

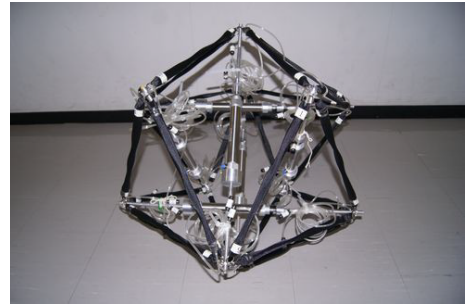


Fig. 1 ストラット駆動型テンセグリティロボットのプロトタイプ

アクチュエータを用いている。すなわち、張力材を伸縮させることにより、テンセグリティ構造を変形させ、転がりを実現している。このとき転がりは、テンセグリティ構造の外形を表す多面体において、ある面から隣接する面への遷移の連鎖に対応する⁽¹⁸⁾。ただし、張力材の伸縮により駆動されるテンセグリティロボットでは、実現できない遷移があることがわかっている。そこで本原稿では、張力材の代わりにストラットを伸縮させることによりテンセグリティロボットを駆動することを試みる。

本原稿は5節から成る。第2節では、テンセグリティロボットとその転がりの幾何記述を紹介する。第3節で転がりの実験結果を、第4節で跳躍の実験結果を示す。最後に第5節で結論と今後の課題を述べる。

^{*1} 立命館大学 ロボティクス学科 (〒 525-8577 滋賀県草津市)

^{*2} 近畿大学 知能機械工学科 (〒 739-2116 広島県東広島市)

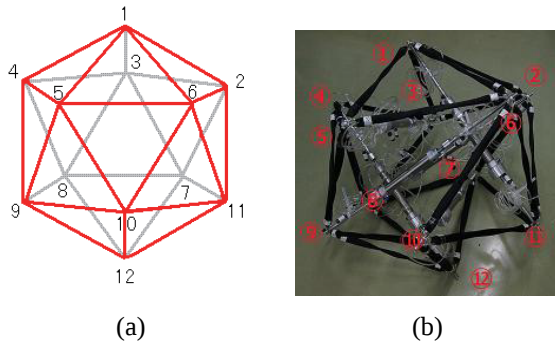


Fig. 2 Geometry of six-strut tensegrity robot

2. テンセグリティロボットの転がりの幾何記述

2.1 ストラット駆動型テンセグリティロボット

Fig. 1 に 6 本のストラットから成るテンセグリティロボットのプロトタイプを示す. このロボットのストラットは空気圧シリンダであり, 空気圧を印加するとストラットが伸張する. 12 本の張力材として, 空気圧 McKibben アクチュエータを用いている.

2.2 テンセグリティの幾何表現 6 本のストラットから構成されるテンセグリティは, 8 個の正三角形と 12 個の二等辺三角形から構成される二十面体を成す. 二等辺三角形の等しい二辺の長さは, 正三角形の辺の長さに等しい. 正三角形の辺の長さと二等辺三角形の底辺の長さは, テンセグリティのストラットの長さと張力材の長さで決まる.

Fig. 2-(a) に示すように, 6 本のストラットから成るテンセグリティの頂点に番号を付す. これは, 幾何学における標準的な番号付け⁽¹⁹⁾に準じている. 試作したテンセグリティロボットにおける頂点の番号を Fig. 2-(b) に示す. このときストラットは, 両端における頂点の番号の対で表される. たとえば, 頂点 1 と 11 を結ぶストラットは (1,11) と表される. 同様に, 張力材も両端の頂点の番号の対で表される. たとえば, 頂点 1 と 6 を結ぶ張力材は (1,6) と表される.

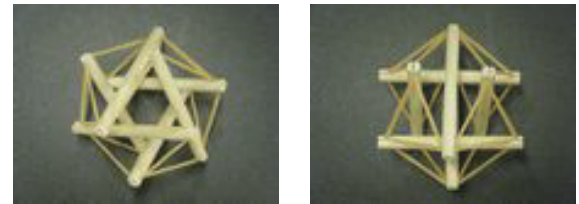
テンセグリティの表面を構成する三角形は, 3 個の頂点で表される. 8 個の正三角形と 12 個の二等辺三角形を表す頂点を, 表 1 に示す.

2.3 テンセグリティの転がりの表現 重力下におけるテンセグリティの安定状態は, 20 個の三角形のいずれかが床と接触することにより実現される. すなわち, 個々の安定状態は, 床と接触する三角形によって規定される. 6 本のストラットから成るテンセグリティロボットが平らな床の上を転がりながら移動するとき, 移動は安定状態から別の安定状態への遷移として表すことができる. 幾何学的に可能な遷移は, ある三角形からそれに隣接する三角形への遷移である. 6

Table 1 Triangles and corresponding vertices
(a) regular triangles (b) isosceles triangles

#	vertices		
1	1	2	3
2	1	5	6
3	2	11	7
4	3	8	4
5	4	9	5
6	6	10	11
7	7	12	8
8	9	12	10

#	vertices		
1	1	3	4
2	1	4	5
3	1	6	2
4	2	6	11
5	2	7	3
6	3	7	8
7	4	8	9
8	5	9	10
9	5	10	6
10	7	11	12
11	8	12	9
12	10	12	11



(a) axial-symmetric (b) planar-symmetric

Fig. 4 接触状態 (上面図)

本のストラットから成るテンセグリティロボットを表す二十面体を展開した結果を Fig. 3 に示す. この図により三角形の隣接関係を表すことができる.

6 本のストラットから成るテンセグリティロボットが床に接触しているとき, 3 本のストラット的一端が床に接触している. すなわち, テンセグリティロボットは 3 点で床に接触して, 安定な状態を保っている. 正三角形の面が床に接触しているとき, 床に接触している 3 本のストラットは, 床のある法線に関して点对称の関係にある. そこで, 正三角形の面が床に接触している安定状態 (4-(a)) を, 軸対称接触とよぶ. 二等辺三角形の面が床に接触しているとき, 床に接触している 3 本のストラットは, 床に直交するある面に関して面对称の関係にある. そこで, 二等辺三角形の面が床に接触している安定状態 (4-(b)) を, 面对称接触とよぶ. Fig. 3 から幾何学的に可能な遷移は,

- 軸面 軸対称接触から面对称接触への遷移
- 面軸 面对称接触から軸対称接触への遷移
- 面面 面对称接触から面对称接触への遷移

に分類できることがわかる. たとえば, 正三角形 (1,2,3) から隣接する二等辺三角形 (1,3,4) への遷移は, 軸面遷移である. 二等辺三角形 (1,3,4) から隣接

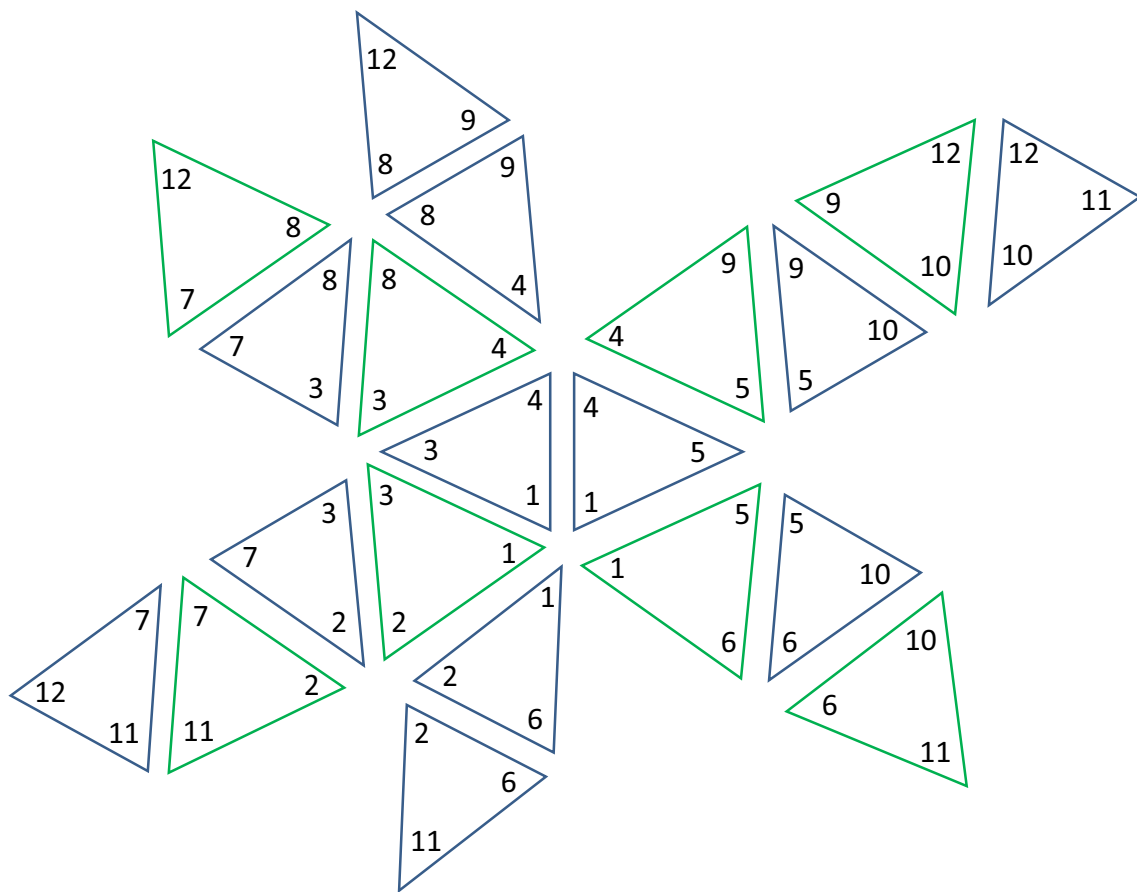


Fig. 3 二十面体の展開図

する正三角形 (3,8,4) への遷移は、面軸遷移である。二等辺三角形 (1,3,4) から隣接する二等辺三角形 (1,4,5) への遷移は、面面遷移である。正三角形どうしは隣接していないので、軸軸遷移は存在しない。

転がり移動の実現のために、いくつかのストラットの長さを同時に変化させる。このとき、テンセグリティロボットの形状は変形し、正三角形や二等辺三角形の形状は崩れる。転がった後にストラットの長さをもとに戻す。これにより、テンセグリティロボットの形状は初期形状に戻り、正三角形や二等辺三角形の形状は回復する。

3. 転 が り 実 験

本節では、ストラットを駆動させることによりどのような遷移が生じるかを実験的に調べる。実験には、Fig. 2-(b) に示すテンセグリティロボットを用いる。このテンセグリティロボットでは、6本のストラットが空気圧シリンダになっており、それぞれのストラットの長さを変化させることができる。このテンセグリティロボットは、全高 600 mm、全幅 680 mm、重量 5.2 kg である。ストラットには、SMC 社製の空気圧シリンダ CM2G25F-75 を用いている。この空気圧シリンダ

の自然長 (全長) は 250 mm、最大伸縮量は 75 mm、断面の直径は 25 mm である。空気圧シリンダに空気圧を印加することにより、ストラットが伸縮する。張力材は、神田通信工業株式会社製の空気圧 McKibben アクチュエータである。ただし、空気圧 McKibben アクチュエータには空気圧を印加しないので、張力材は能動的に伸縮はしない。転がりの実験においては、1本の空気圧シリンダに空気圧を印加し、どのような転がりが生じるかを記録する。空気圧シリンダへ 0.00 MPa から 0.60 MPa までの圧縮空気を 0.05 MPa 刻みで供給する。空気圧の制御はレギュレータで行い、空気圧シリンダの制御は電磁弁の ON-OFF 制御で行う。

Table 2 に、軸対称接触から面対称接触への遷移の実験結果を示す。表の最初の行は、テンセグリティロボットが軸対称接触 (1,2,3) にあるとき、シリンダ (2,8) に 0.30 MPa の空気圧を印加すれば、ロボットが面対称接触 (1,3,4) に遷移したことを示す。軸対称接触 (1,2,3) から遷移できる面対称接触は、(1,3,4), (1,6,2), (2,7,3) の 3 個である。表に示すように、軸対称接触 (1,2,3) からは、いずれの隣接する面対称接触へ遷移を実現することができた。さらに表より、すべての軸対称接触から隣接する面対称接触への遷移が実現できたことがわ

Table 2 軸面の実験結果

初期面	移動面	シリンダ	圧力 [MPa]
1,2,3	1,3,4	2,8	0.30
1,2,3	1,6,2	3,5	0.30
1,2,3	2,7,3	1,11	0.35
1,5,6	1,4,5	6,9	0.30
1,5,6	1,6,2	3,5	0.30
1,5,6	5,10,6	1,11	0.35
2,11,7	2,6,11	7,10	0.35
2,11,7	2,7,3	1,11	0.30
2,11,7	7,11,12	2,8	0.30
3,8,4	1,3,4	2,8	0.30
3,8,4	3,7,8	4,12	0.35
3,8,4	4,8,9	3,5	0.30
4,9,5	1,4,5	6,9	0.35
4,9,5	4,8,9	3,5	0.30
4,9,5	5,9,10	4,12	0.30
6,10,11	2,6,11	7,10	0.30
6,10,11	5,10,6	1,11	0.35
6,10,11	10,12,11	6,9	0.30
7,12,8	3,7,8	4,12	0.35
7,12,8	7,11,12	2,8	0.30
7,12,8	8,12,9	7,10	0.30
9,12,10	5,9,10	4,12	0.30
9,12,10	8,12,9	7,10	0.30
9,12,10	10,12,11	6,9	0.30

Table 3 面軸の実験結果

初期面	移動面	シリンダ	圧力 [MPa]
1,3,4	1,2,3	6,9	0.55
1,3,4	3,8,4	1,11	0.50
1,4,5	4,9,5	1,11	0.50
1,4,5	1,5,6	4,12	0.50
1,6,2	1,2,3	6,9	0.55
1,6,2	1,5,6	2,8	0.50
2,6,11	2,11,7	6,9	0.55
2,6,11	6,10,11	2,8	0.50
2,7,3	2,11,7	3,5	0.50
2,7,3	1,2,3	7,10	0.50
3,7,8	7,12,8	3,5	0.50
3,7,8	3,8,4	7,10	0.50
4,8,9	4,9,5	2,8	0.50
4,8,9	3,8,4	6,9	0.50
5,9,10	6,10,11	3,5	0.50
5,9,10	4,9,5	7,10	0.50
5,10,6	1,5,6	2,10	0.55
5,10,6	6,10,11	3,5	0.55
7,11,12	2,11,7	7,10	0.55
7,11,12	7,12,8	1,11	0.50
8,12,9	9,12,10	2,8	0.50
8,12,9	7,12,8	6,9	0.50
10,12,11	6,10,11	4,12	0.50
10,12,11	9,12,10	7,10	0.55

かる。

Table 3 に、面对称接触から軸対称接触への遷移の実験結果を示す。表の最初の行は、テンセグリティロボットが面对称接触 (1,3,4) にあるとき、シリンダ (6,9) に 0.55 MPa の空気圧を印加すれば、ロボットが軸対称接触 (1,2,3) に遷移したことを示す。面对称接触 (1,3,4) から遷移できる軸対称接触は、(1,2,3)、(3,8,4) の 2 個である。表に示すように、面对称接触 (1,3,4) からは、いずれの隣接する軸対称接触へ遷移を実現することができた。さらに表より、すべての面对称接触から隣接する軸対称接触への遷移が実現できたことがわかる。

Table 4 に、面对称接触から面对称接触への遷移の実験結果を示す。表の最初の行は、テンセグリティロボットが面对称接触 (1,3,4) にあるとき、シリンダ (3,5) に 0.50 MPa の空気圧を印加すれば、ロボットが面对称接触 (1,4,5) に遷移したことを示す。面对称接触 (1,3,4) から遷移できる面对称接触は、(1,4,5) のみである。表に示すように、すべての面对称接触から隣接する面对称接触への遷移が実現できたことがわかる。以上に示したように、空気圧アクチュエータ 1 本の駆動により、

すべての軸面遷移、すべての面軸遷移、すべての面面遷移を実現することができた。軸面遷移においては最大 0.35 MPa、面軸遷移においては最大 0.55 MPa、面面遷移においては最大 0.50 MPa の空気圧を印加する必要がある。

張力材を駆動する場合⁽¹⁸⁾と今回の実験結果を比較する。軸面遷移においては、最低駆動圧力が 0.4 MPa から 0.35 MPa へと 0.05 MPa 減少し、駆動に必要な空気量は 0.14 L から 0.03 L まで減少した。一方、面軸遷移においては、最低駆動圧力が 0.15 MPa から 0.40 MPa へ 0.35 MPa 増加し、駆動に必要な空気量は 0.02 L から 0.03 L まで増加した。また、面面遷移は、張力材の駆動では実現できず、今回のストラット駆動で実現できた。一方、張力材の駆動では、軸対称接触から面对称接触を経て軸対称接触に至る軸面軸遷移や面对称接触から軸対称接触を経て面对称接触に至る面軸面遷移を実現することができている。このように、張力材を駆動するかストラットを駆動するかで、実現できる遷移やそれに必要な空気圧が異なる。したがって効果的な転がり移動を実現するためには、どれを選択して転が

Table 4 面面の実験結果

初期面	移動面	シリンダ	圧力 [MPa]
1,3,4	1,4,5	3,5	0.50
1,4,5	2,6,11	1,11	0.50
1,6,2	2,6,11	1,11	0.50
2,6,11	1,3,4	3,5	0.50
2,7,3	3,7,8	2,8	0.50
3,7,8	2,3,7	2,8	0.50
4,8,9	8,9,12	4,12	0.50
5,9,10	5,6,10	6,9	0.50
5,10,6	5,9,10	6,9	0.50
7,11,12	10,11,12	7,10	0.50
8,12,9	4,8,9	4,12	0.50
10,12,11	7,11,12	7,10	0.50

りを実現するかを考察する必要がある。また、今回のストラット駆動型テンセグリティがすべての方向に転がることができたのは、シリンダの収縮がロボット本体の転がり運動を促した結果である。したがって、形状記憶合金や McKibben を利用する場合でもアクチュエータの配置を工夫することで転がるために十分な外殻変形が得られる可能性がある⁽²⁰⁾。この点は今後の検討課題である。

4. 跳 躍 実 験

本節では、ストラット駆動型テンセグリティロボットの跳躍について考察する。ストラット駆動型のテンセグリティロボットの跳躍原理として

- 張力材に変形エネルギーを蓄積し、それを解放する
- 空気圧シリンダの発生力を用いる

の二つが挙げられる。従来のソフトロボット⁽²⁾では、ロボットのボディである弾性体にエネルギーを蓄積し、それを短い時間で解放することにより、跳躍に必要な力積を得ていた。このロボットに用いていた形状記憶合金アクチュエータは駆動速度が遅く、単独では跳躍に必要な力積を得られなかったためである。一方、空気圧シリンダは、形状記憶合金アクチュエータより十分に早い駆動速度を実現できる。そこで本節では、空気圧シリンダの発生力を直接用いることにより、ストラット駆動型テンセグリティロボットの跳躍を実現できるかどうかを実験的に確かめる。

Fig. 5 にテンセグリティロボットの試作機を示す。試作機は、全高 150 mm、全幅 190 mm、重量 312 g である。試作機は、ストラット 6 本と張力材 24 本から成る。ストラットには、空気圧シリンダ TOPEAK 社製 Micro Rocket AL を用いている。この空気圧シリンダ

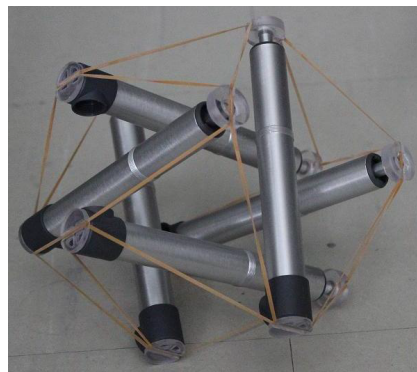
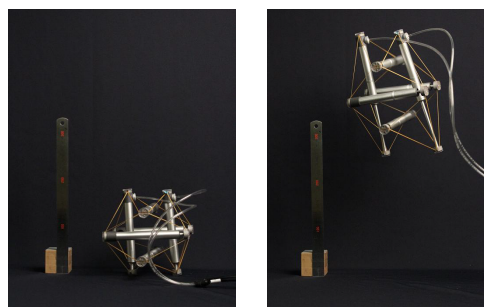


Fig. 5 跳躍用テンセグリティロボット



(a) before driving (b) after driving

Fig. 6 テンセグリティロボットの跳躍

の自然長(全長)は 160 mm、最大伸縮量は 95 mm、断面の直径は 20 mm である。張力材には $\phi 150$ のゴムバンドを用いている。

接地している空気圧シリンダ 2 本を 0.5 MPa で駆動させることによりテンセグリティロボットを変形させ、跳躍できるか否かを確認する。空気圧の制御はレギュレータで行い、空気圧シリンダの制御は電磁弁の ON-OFF 制御で行う。Fig. 6 に跳躍の様子を示す。跳躍高度は約 250 mm であった。したがって、ストラットの駆動によりテンセグリティロボットの跳躍を実現する可能性があることがわかった。ただし、本節では、二本のストラットが地面に垂直に接している状態から始めている。この状態は、転がり移動で生じる軸対称接触や面对称接触とは異なる。したがって、軸対称接触や面对称接触からの跳躍を実現するか、軸対称接触や面对称接触から二本のストラットが地面に垂直に接している状態への遷移を実現することが必要となる。また、軸対称接触や面对称接触において、ストラットは地面に垂直ではないため、上方の跳躍ではなく、斜め方向の跳躍を実現できる可能性がある。

5. 結 言

本報告では、テンセグリティロボットの駆動方法としてストラットの伸縮を提案し、それによりどのよう

な転がり移動や跳躍が可能であるかを実験的に調べた。張力材の伸縮による駆動では、面对称接触からそれに隣接する面对称接触へ直接遷移することができなかった。今回用いたストラットの伸縮により、隣接する面对称接触どうしの直接遷移が可能となった。印加圧力を増加させる必要のある遷移と減少させることができる遷移があることを示した。さらにストラット駆動型テンセグリティロボットが跳躍できる可能性を示した。

今後の課題としては、張力材のみの駆動、ストラットのみの駆動、張力材とストラットの双方の駆動において、どの張力材やストラットを駆動するすれば効率良く運動を実現できるかを明らかにすること、さらに、現在の場所から別の場所にテンセグリティロボットが移動するためには必要となる張力材やストラットの一連の駆動を明らかにすることが挙げられる。また、軸対称接触や面对称接触からの跳躍を実現することが課題である。

本報告では、ある静止した接触状態から単一の駆動パターンを与えたときに、どのような転がりや跳躍が生じるかを調べており、連続的な駆動に関しては調べていない。パターンを連続的に与えて、動的な効果を利用することにより、効果的な転がりや跳躍を実現できる可能性がある⁽²¹⁾。このような連続的な駆動による転がりや跳躍の実現は今後の課題である。転がりや移動を実現するための駆動パターンは、試行錯誤的に見出ししているのが現状であり、理論的な解析はほとんど成されていない。転がりや移動に関する力学的な解析を進め、転がりや移動を実現するための駆動パターンを系統的に見出すことが、様々な形態のテンセグリティロボットにおいて必要になると考える。

参 考 文 献

- (1) Otake, M., Inaba, M., and Inoue, H., *Development of a gel robot made of electro-active polymer PAMPS gel*, Proc. IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 2, pp.788–793, 1999.
- (2) Sugiyama, Y. and Hirai, S., *Crawling and Jumping by a Deformable Robot*, Int. J. of Robotics Research, Vol. 25, No.5–6, pp.603–620, 2006.
- (3) Mochiyama, H., Watari, M., and Fujimoto, H., *A robotic catapult based on the closed elastica and its application to robotic tasks*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1508–1513, 2007.
- (4) Steltz, E., Mozeika, A., Rodenberg, N., Brown, E., and Jaeger, H. M., *JSEL: Jamming Skin Enabled Locomotion*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.5672–5677, 2009.
- (5) Petralia, M.T. and Wood, R.J., *Fabrication and analysis of dielectric-elastomer minimum-energy structures for highly-deformable soft robotic systems*, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp.2357–2363, 2010.
- (6) DARPA Chemical Robots (ChemBots), http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Chemical_Robots_%28ChemBots%29.aspx
- (7) Shibata, M., Saijyo, F., and Hirai, S., *Crawling by Body Deformation of Tensegrity Structure Robots*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4375–4380, Kobe, 2009.
- (8) <http://www.kennethsnelson.net/>.
- (9) Buckminster Fuller Institute, <http://www.bfi.org/>.
- (10) Wang, B. B., *Free-standing Tension Structures – From tensegrity systems to cable-strut systems*, Taylor & Francis, 2004.
- (11) Zhang, J. Y., and Ohsaki, M., *Optimization Methods for Force and Shape Design of Tensegrity Structures*, Proc. 7th World Congresses of Structural and Multidisciplinary Optimization, pp.40–49, 2007.
- (12) Skelton, R. E. and de Oliveira, M. C., *Tensegrity Systems*, Springer, 2009.
- (13) Ingber, D. E., *The Architecture of Life*, Scientific American, Jan., pp.30–39, 1998.
- (14) Aldrich, J. B., Skelton, R. E., and Kreutz-Delgado, K., *Control Synthesis for a Class of Light and Agile Robotic Tensegrity Structures*, Proc. American Control Conference, pp.5245–5251, 2003.
- (15) Paul, C., Valero-Cuevas, F. J., and Lipson, H., *Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion*, IEEE Trans. on Robotics, Vol. 22, No. 5, pp.944–957, 2006.
- (16) Arsenault, M., and Gosselin, C. M., *Kinematic and Static Analysis of a Three-degree-of-freedom Spatial Modular Tensegrity Mechanism*, Int. J. of Robotics Research, Vol. 27, No. 8, pp.951–966, 2008.
- (17) Shibata, M., Saijyo, F., and Hirai, S., *Crawling by Body Deformation of Tensegrity Structure Robots*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4375–4380, Kobe, May 12–17, 2009.
- (18) Koizumi, Y., Shibata, M., and Hirai, S., *Rolling Tensegrity Driven by Pneumatic Soft Actuators*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1988–1993, St. Paul, U.S.A., May 14–18, 2012.
- (19) *Virtual Polyhedra*, <http://www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html>.
- (20) 柴田瑞穂, 力植友彬, 平井慎一, “テンセグリティ型移動ロボットの幾何学的対称性を考慮したアクチュエータ配置”, 第30回日本ロボット学会講演集, 2012.
- (21) Sastra, J., Chitta, S., and Yim, M., *Dynamic Rolling for a Modular Loop Robot* Int. J. of Robotics Research, Vol. 28, No. 6, pp.758–773, 2009.