

マッキベンアクチュエータにより駆動される テンセグリティロボットの実験的評価

小泉 祐介^{*1}, 柴田 瑞穂^{*2}, 平井 慎一^{*1}

Experimental Investigation of Pneumatically Driven Tensegrity Robot

Yuusuke Koizumi^{*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 experimental evaluation of rolling of a tensegrity robot driven by a set of pneumatic soft actuators. Tensegrity is a mechanical structure consisting of a set of rigid elements connected by elastic tensional elements. Introducing tensegrity structures, we are able to build soft robots with larger size. We show the prototype of a six-strut tensegrity robot, which is driven by twenty-four pneumatic McKibben actuators. We experimentally examine if rolling can be performed over a flat ground to discuss the strategy of rolling.

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

1. 緒 言

本原稿では、空気圧アクチュエータにより駆動されるテンセグリティロボットの転がりについて述べる。

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)~(4)}。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。サイズが大きいロボットを構成するときには、柔軟材料ロボットに「骨」を導入する必要がある。伝統的なロボットメカニズムでは、硬い部材を機械的な関節で接続した、リンク構造が用いられている。このようなリンク構造を柔軟材料ロボットに導入することはできる。ただし、リンク構造は柔軟材料ロボットの変形を妨げる。また、リンクそのものの質量と複雑な関節機構の質量のために、リンク構造は重くなりやすい。このようなジレンマを解消するために、われわれはテンセグリティ構造を柔軟材料ロボットに適用することを提案した⁽⁵⁾。

テンセグリティとは、硬い要素（ストラット）が弾性要素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、弾性要素による張力で結合されている。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。テンセグリティは、

建築学で提案された概念である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。テンセグリティ構造は軽量で柔軟であり、橋やドームの構造に適用されている。建築学では、テンセグリティの特性を明らかにするために、多くの研究が成されている^{(8)~(10)}。テンセグリティの概念は、建築以外の分野、たとえば生物学やロボティクスに適用されている。生物学では、テンセグリティ構造を用いて生物の細胞を表現している⁽¹¹⁾。ロボティクスでは、テンセグリティが軽量ロボットアーム⁽¹²⁾や移動ロボット⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾に適用されている。また、モジュール構造のテンセグリティが提案され、その運動学と静力学が解析されている⁽¹⁵⁾。

著者らは、寸法が約 150 mm のテンセグリティロボットを試作し、その転がり移動を実現した⁽⁵⁾⁽¹⁶⁾。このロボットで用いた SMA アクチュエータが、ロボットの寸法を制限していた。本発表では、寸法が約 600 mm のテンセグリティロボットを試作した結果を示す。テンセグリティロボットの寸法を大きくするために、SMA アクチュエータより大きい力を出すことができる空気圧マッキベンアクチュエータを採用する。さらに、試作したテンセグリティロボットが連続的な転がりを実現できるかどうかを実験的に評価する。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幾何記述を紹介する。第 3 節では、テンセグリティロボットの転がりのダイナミクスを簡単に述べる。第 4 節で実験結果を示し、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)

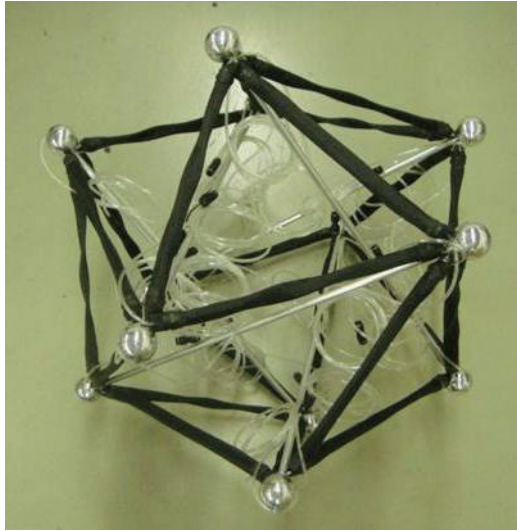


Fig. 1 Prototype of six-strut tensegrity robot

2. テンセグリティロボットの転がり

2.1 テンセグリティロボット Fig. 1 にテンセグリティロボットのプロトタイプを示す. このテンセグリティロボットは, 6 個のストラットと 24 個のマッキベン空気圧アクチュエータから構成されている. マッキベン空気圧アクチュエータは弾性を有しており, 伸びるときに弾性要素として働く.

テンセグリティロボットが平らな床の上にあるとき, テンセグリティロボットは重力のために変形し, 安定な状態になる. このとき, 重力ポテンシャルエネルギーが最小になる. 空気圧を加えるとマッキベン空気圧アクチュエータは縮み, テンセグリティロボットに作用している力の平衡が崩れる. 結果としてロボットは転がり始め, 別の安定状態に向けて移動する. 加えた空気圧を解放すると, テンセグリティ構造は自然形状に戻る. これを繰り返すことにより, テンセグリティロボットは床の上を転がる.

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 20 面体を成す. 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. このとき個々の安定状態は, 床に接触している三角形に対応する.

2.2 テンセグリティの幾何表現 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

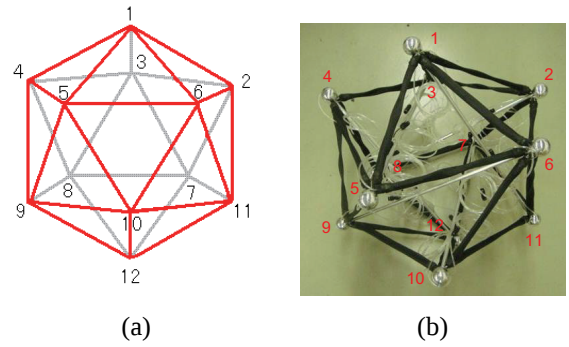


Fig. 2 Geometry of six-strut tensegrity robot

Table 1 Struts and corresponding vertices

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

Table 2 Actuators and corresponding vertices

actuator #	vertices		actuator #	vertices	
1	1	2	13	5	6
2	1	3	14	5	9
3	1	5	15	6	10
4	1	6	16	6	11
5	2	3	17	7	8
6	2	7	18	7	11
7	2	11	19	7	12
8	3	4	20	8	12
9	3	8	21	9	10
10	4	5	22	9	12
11	4	8	23	10	11
12	4	9	24	10	12

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⁽¹⁷⁾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. 個々のストラットを表す一対の頂点番号を Table 1 に示す. 同様に, マッキベン空気圧アクチュエータも, 両端の頂点の番号の対で表される. たとえば, 頂点 1 と 6 を結ぶアクチュエータは (1,6) と表される. 個々のアクチュエータを表す一対の頂点番号を Table 2 に示す.

個々の三角形は, 三個の頂点番号で表される. たとえば, 頂点 1, 5, 6 から成る正三角形は (1,5,6) と表

Table 3 Triangles and corresponding vertices
(a) regular triangles (b) isosceles triangles

#	vertices			#	vertices		
1	1	2	3	1	1	6	2
2	1	5	6	2	2	7	3
3	2	7	11	3	3	4	1
4	3	4	8	4	4	8	9
5	4	5	9	5	5	1	4
6	6	10	11	6	6	5	10
7	7	8	12	7	7	11	12
8	9	10	13	8	8	3	7
				9	9	10	5
				10	10	12	11
				11	11	2	6
				12	12	9	8

される。この三角形では、すべての稜線に沿ってアクチュエータが配置されている。一方、正三角形ではない二等辺三角形 (1,6,2) では、稜線 (1,6) と (1,2) に沿ってアクチュエータが配置されているが、稜線 (2,6) に沿うアクチュエータはない。正三角形における頂点番号を Table 3-(a) に、正三角形ではない二等辺三角形における頂点番号を Table 3-(b) に示す。

2.3 接触の表現 6本のストラットから成るテンセグリティの表面は、8個の正三角形と12個の二等辺三角形から成り、テンセグリティロボットはこれらの三角形のどれか一つを通して床と接触する。すなわち、テンセグリティロボットの転がり移動では20個の安定状態があり、それぞれの安定状態には床に接触している三角形が対応する。正三角形は3本のアクチュエータを、正三角形でない二等辺三角形は2本のアクチュエータを含む。Fig. 3は、正三角形が床と接触している安定状態の一つを表す。図に示すように、テンセグリティロボットは床面の法線に対して軸対称である。テンセグリティロボットを法線周りに角度 $2\pi/3$ 回転させると、もとの形状に一致する。このような安定状態を軸対称接触とよぶ。一方、Fig. 4は、二等辺三角形が床と接触している安定状態の一つを表す。図に示すように、テンセグリティロボットは、床に垂直なある面に対して面对称である。このような安定状態を面对称接触とよぶ。

3. テンセグリティロボットの転がりのダイナミクス

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の配位は、6本のストラットの位置と姿勢の組で与えられる。個々のストラットの配位は、位置を表す3個の一般化座標と姿勢を表す3個の一般化座標で

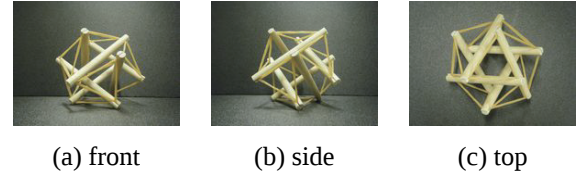


Fig. 3 Axial symmetry contact

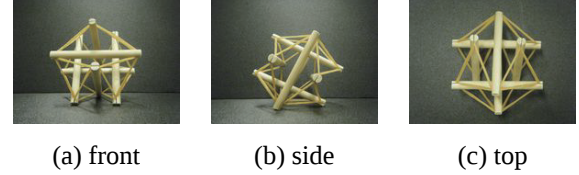


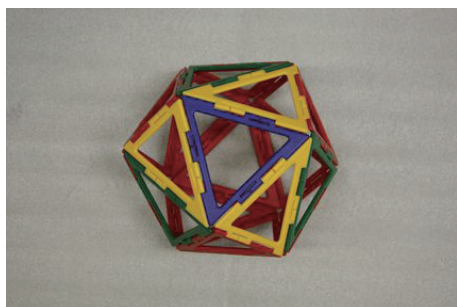
Fig. 4 Planar symmetry contact

与えられる。したがって、6本のストラットから構成されるテンセグリティの配位は、36個の一般化座標から成る。テンセグリティロボットと平らな床との接触は、テンセグリティロボットに幾何学的制約を課することを意味する。テンセグリティロボットの安定状態では、幾何学的制約を満たしテンセグリティの内部エネルギーが極小となる。すなわち、内部エネルギーに未定乗数と幾何学的制約との積を加えた関数の最小化により、安定状態を計算することができる。床面の法線に沿う幾何学的制約は単方向制約であり、垂直抗力に対応する未定乗数の値は非負でなくてはならない。

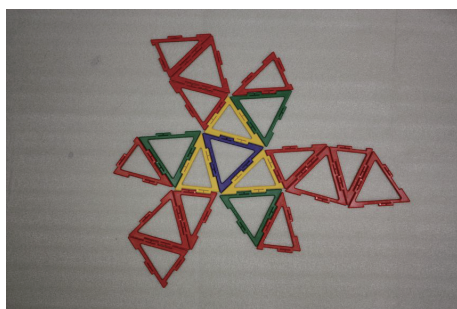
マッキベン空気圧アクチュエータに空気圧を加えると、内部エネルギーに影響し、結果として未定乗数の値が変わる。垂直抗力に対応する未定乗数の値が負となると、その単方向制約は失われ、結果として接触が失われる。これにより安定状態から不安定な状態に遷移し、さらに別の安定状態に遷移する可能性が生じる。すなわち、安定状態から別の安定状態への遷移は、途中に不安定な状態と運動方程式に課せられる幾何学的制約の位相的な変化を含む。これらを定式化することは煩雑であるので、本原稿では安定状態から別の安定状態への遷移の可能性を実験的に評価する。

4. 実験

4.1 実験装置 Fig. 1に、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のプロトタイプを示す。ストラットは長さ570mmでアルミニウム製である。直径45mmのアルミニウム製の球が、ストラットの両端に取り付けられている。マッキベン空気圧アクチュエータは神田通信工業株式会社製である。このアクチュエータは、0.5 MPaの空気圧を印加することで800Nの力を発生することができる。縮み率は、負荷なしで0.5 MPaの空気圧を印加するとき約34%、負荷3Nのとき約20%である。空気圧は外部からチュー

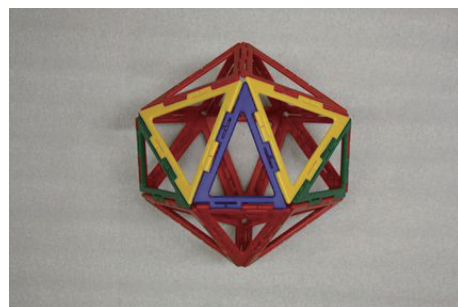


(a)

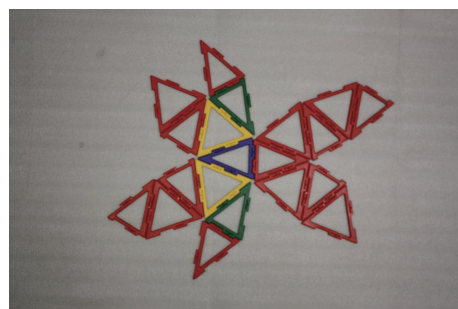


(b)

Fig. 5 Transitions from axial symmetric contact



(a)



(b)

Fig. 6 Transitions from planar symmetric contact

ブを通して供給される。自然状態においてプロトタイプの高さは 590 mm, 幅は 780 mm である。プロトタイプの種類は 3.3 kg である。

マッキベン空気圧アクチュエータに空気圧を印加し解放することにより、テンセグリティロボットはある安定状態から別の安定状態に遷移する。この遷移が可能かどうかを実験的に検証する。一本のアクチュエータに空気圧を印加しても、遷移が生じないことが実験的にわかった。そこで、二本のアクチュエータに空気圧を 0.05 MPa から 0.50 MPa まで 0.05 MPa 間隔で同時に印加し、遷移が生じるかどうかを調べる。二本のアクチュエータのすべての組み合わせに対して、遷移が生じる最小の圧力を記録する。

4.2 実験結果 Fig. 5 は、ある軸対称接触からの遷移を表す。Fig. 5-(a) は、ある正三角形が接地している状態を示す。Fig. 5-(b) に示すように、テンセグリティロボットを表す二十面体を、接地している正三角形のまわりに展開する。図の中心の青い正三角形が接地している。空気圧を印加するとき生じる状態遷移を観察したところ、状態遷移は次の二通りに分類できることがわかった。

AP 軸対称接触 → 面対称接触

AA 軸対称接触 → 面対称接触 → 軸対称接触

前者は、軸対称接触 (青色の正三角形) から隣接する面対称接触 (黄色の二等辺三角形のひとつ) への単一の遷移である。後者は、二個の遷移から成る。まず、軸対

称接触 (青色の正三角形) から隣接する面対称接触 (黄色の二等辺三角形) へ遷移し、続いて面対称接触に隣接する軸対称接触 (緑色の正三角形) に遷移する。このとき、途中の接触 (黄色の二等辺三角形) は不安定である。テンセグリティロボットはこの状態を通り過ぎ、別の安定状態に遷移する。

テンセグリティロボットが持つ 24 本のマッキベン空気圧アクチュエータの内、2 本を駆動しているので、 ${}_{24}C_2 = 276$ 通りの駆動がある。この 276 通りのどれがロボットに転がりを生じさせるかを調べる。Table 4 にその結果をまとめる。その結果、6 通りがカテゴリー AP の遷移を実現することがわかった。必要な空気圧はすべて 0.40 MPa であった。また、3 通りがカテゴリー AA の遷移を実現することがわかった。このとき、必要な空気圧はすべて 0.50 MPa であった。この他の 267 通りでは、遷移を実現することができなかった。すなわち、テンセグリティロボットは変形するが、軸対称接触からの遷移を実現することはできなかった。

Fig. 6 は、ある面対称接触からの遷移を表す。Fig. 6-(a) は、ある二等辺三角形が接地している状態を示す。Fig. 6-(b) に示すように、テンセグリティロボットを表す二十面体を、接地している二等辺三角形のまわりに展開する。図の中心の青い二等辺三角形が接地している。空気圧を印加するとき生じる状態遷移を観察したところ、状態遷移は次の二通りに分類できることがわかった。

Table 4 The number of actuator pairs that can perform transitions from axial symmetric contact

pressure [MPa]	category AP	category AA
0.50	0	0
0.10	0	0
0.15	0	0
0.20	0	0
0.25	0	0
0.30	0	0
0.35	0	0
0.40	6	0
0.45	0	0
0.50	0	3
total	6	3

Table 5 The number of actuator pairs that can perform transitions from planar symmetric contact

pressure [MPa]	category PA	category PP
0.50	0	0
0.10	4	0
0.15	18	2
0.20	6	0
0.25	6	0
0.30	2	0
0.35	4	0
0.40	4	0
0.45	0	0
0.50	10	0
total	54	2

PA 面対称接触 → 軸対称接触

PP 面対称接触 → 軸対称接触 → 面対称接触

前者は、面対称接触(青色の二等辺三角形)から隣接する軸対称接触(黄色の正三角形のひとつ)への単一の遷移である。後者は、二個の遷移から成る。まず、面対称接触(青色の二等辺三角形)から隣接する軸対称接触(黄色の正三角形)へ遷移し、続いて軸対称接触に隣接する面対称接触(緑色の二等辺三角形)に遷移する。このとき、途中の接触(黄色の正三角形)は不安定である。テンセグリティロボットはこの状態を通り過ぎ、別の安定状態に遷移する。

ある面対称接触から、276通りのどれがロボットに転がりを生じさせるかを調べる。Table 5にその結果をまとめる。その結果、54通りがカテゴリー PA の遷移を実現することがわかった。このうち4通りは、0.10 MPaの空気圧で実現された。また、2通りがカテ

グリー PP の遷移を実現することがわかった。このとき、必要な空気圧はすべて 0.15 MPa であった。その他の 220 通りでは、遷移を実現することができなかった。すなわち、テンセグリティロボットは変形するが、面対称接触からの遷移を実現することはできなかった。

4.3 議論 実験の結果、カテゴリー AP や AA より低い空気圧で、カテゴリー PA と PP を実現できることがわかった。ただし、カテゴリー PA に含まれる遷移を実現した後は、カテゴリー AP あるいは AA に含まれる遷移を実現する必要がある。したがって、連続的な転がりを実現するためには、たとえカテゴリー PA に必要な空気圧が低くても、カテゴリー AP あるいは AA を実現するための高い空気圧が必要となる。一方、カテゴリー PP に含まれる遷移を繰り返して実行することにより、テンセグリティロボットは連続的な転がりを実現できる。カテゴリー PP に含まれる遷移は、圧力 0.15 MPa で実現できる。すなわち、0.15 MPa の空気圧によりカテゴリー PP に含まれる遷移を繰り返すことができる。したがって、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の転がり移動では、カテゴリー PP を基本とするべきである。すなわち、ロボットは基本的に面対称接触で安定状態とする。もし、何らかの不確定要因で軸対称接触が生じたときには、カテゴリー AP に含まれる遷移を実行し、テンセグリティロボットを面接触状態にもどし、カテゴリー PP に含まれる遷移を実行できるようにする。カテゴリー PP に含まれる遷移に必要な圧力は 0.15 MPa であるのに対して、カテゴリー AP に含まれる遷移に必要な圧力は 0.40 MPa である。したがって、連続的な転がりは基本的に 0.15 MPa の空気圧で実現できる。ただし、軸対称接触が生じたときには、0.40 MPa の空気圧が必要である。

Fig. 7に、プロトタイプの連続的な転がりを示す。上述の方法により、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は連続的に転がることができる。

5. 結 言

本原稿では、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の転がり移動を実験的に調べた。テンセグリティロボットの幾何学的記述から、ロボットの安定状態は軸対称接触と面対称接触に分類でき、前者はテンセグリティの正三角形の面、後者は二等辺三角形の面で表されることを示した。個々の安定状態から別の状態に遷移するために、どれくらいの空気圧が必要であるかを実験的に調べ、カテゴリー PP に含まれる遷移が連続的な転がりに適切であることを示した。

今後の課題は、(a) 不整地上の移動、(b) ダイナミッ

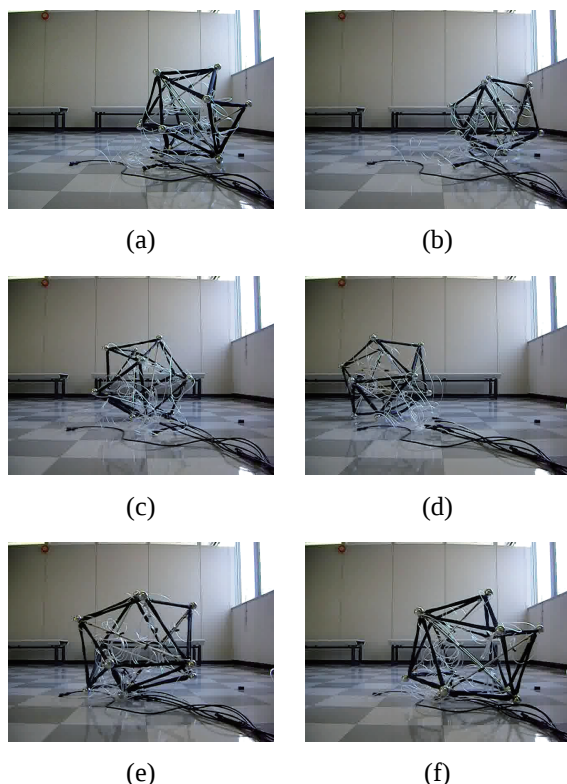


Fig. 7 Successive rolling of a six-strut tensegrity robot

クシミュレーション, (c) 内部空気圧源による自立移動である。本原稿で対象とした平らな面上の転がり移動に加えて, テンセグリティロボットの不整地上の移動を実験的に評価する。さらに, テンセグリティロボットの移動をシミュレーションで評価できるように, ロボットのダイナミックシミュレーションを実現する。現在のプロトタイプでは, アクチュエータを駆動するための空気圧源と制御弁は外部にある。テンセグリティロボットは, 空気圧システムを設置する空間を内部に有する。また, 著者らは小型の空気圧制御弁をすでに開発している⁽¹⁸⁾。この技術をもとに, 空気圧源, 空気圧制御弁, コントローラをテンセグリティロボットに内蔵し, ロボットの自立移動を実現する予定である。

謝 辞

本研究は, 日本学術振興会科学研究費補助金 (課題番号 21760210) の支援を受けた。

参 考 文 献

- (1) 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, 2004.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) DARPA Chemical Robots (ChemBots), http://www.darpa.mil/Our_Work/DSO/Programs/Chemical_Robots_%28ChemBots%29.aspx
- (5) 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.
- (6) <http://www.kennethnelson.net/>.
- (7) Buckminster Fuller Institute, <http://www.bfi.org/>.
- (8) Wang, B. B., *Free-standing Tension Structures – From tensegrity systems to cable-strut systems*, Taylor & Francis, 2004
- (9) 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.
- (10) Skelton, R. E. and de Oliveira, M. C., *Tensegrity Systems*, Springer, 2009.
- (11) Ingber, D. E., *The Architecture of Life*, Scientific American, Jan., pp.30–39, 1998.
- (12) 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.
- (13) Paul, C., Roberts, J. W., Lipson, H., and Valero-Cuevas, F. J., *Gait Production in a Tensegrity Based Robot*, Proc. Int. Conf. on Advanced Robotics, pp.216–222, 2005.
- (14) 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.
- (15) Arsenaault 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.
- (16) Shibata, M. and Hirai, S., *Moving strategy of tensegrity robots with semiregular polyhedral body*, Proc. 13th Int. Conf. Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2010), Nagoya, 2010.
- (17) Virtual Polyhedra, <http://www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html>.
- (18) Jien, S., Hirai, S., and Honda, K., *Miniaturization Design of Piezoelectric Vibration-Driven Pneumatic Unconstrained Valves*, J. Robotics and Mechatronics, Vol. 22, No. 1, pp.91–99, 2010.