

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

川井 郁弥^{*1}, 平井 慎一^{*1,*2}

Experimental Evaluation of Rolling of Strut-driven Tensegrity Robot

Fumiya Kawai^{*1} and Shinichi Hirai^{*1,*2}

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

^{*2} State Key Lab. of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

This paper describes experimental investigation of the rolling of a strut-driven tensegrity robot. Tensegrity robots consist of rigid struts and elastic tensile elements. In this paper, we apply air cylinders to struts so that the robot can extend/shrink struts for rolling. Rolling of a tensegrity robot is formulated by a series of transitions among contacts. We found that all transitions between neighboring contacts could be realized by driving struts.

Key Words : Soft Robot, Tensegrity, Deformation, Rolling

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移動について述べる。近年、柔らかい材料で構成されるソフトロボットに関する研究が進められている^{(1)~(6)}。ソフトロボットは、ボディに蓄積したポテンシャルエネルギーを用いることにより移動や跳躍を実現したり、その形状を変化させることにより狭隘部を通過したりすることができる。一方、柔らかい材料のみで、サイズが大きいロボットを構成することは困難である。この課題を解決するために、テンセグリティ構造を適用することが提案されている^{(7)~(9)}。テンセグリティとは、建築学で提案された概念であり⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、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。

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⁽¹²⁾⁽¹³⁾。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アクチュエータを用いていた。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た。ただし、地面に接触する張力材を伸縮させる方式では、張力材と地面との摩擦や磨耗が課題として残る。一方、張力材の代わりに、スト

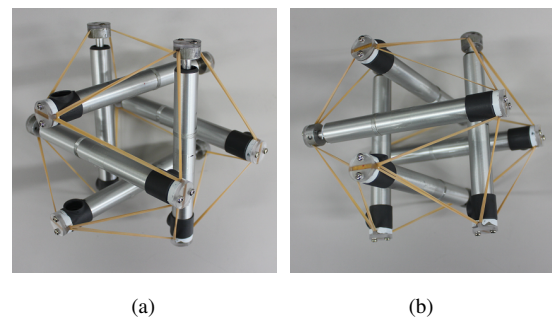


Fig. 1 Prototype of strut-driven tensegrity robot

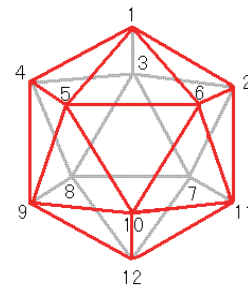


Fig. 2 Geometry of six-strut tensegrity robot

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が試みられている⁽¹⁴⁾。本報告では、ストラットを駆動するテンセグリティロボットの転がり移動を実験的に評価する。

2. ストラット駆動型テンセグリティロボット

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を、Fig. 1 に示す。製作したストラット駆動型

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

^{*2} 中国科学院瀋陽自動化研究所ロボティクス国家重点実験室

Table 1 Struts and corresponding vertices

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

Table 2 Tensional elements and corresponding vertices

#	vertices		#	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

テンセグリティロボットは、圧縮材6本、張力材24本から成る。このテンセグリティロボットの凸包は20面体となる。テンセグリティロボットの重量は320gである。Fig. 1(a)の姿勢で全高約160mm、最大全幅約210mm、Fig. 1(b)の姿勢で全高170mm、最大全幅約205mmである。圧縮材として、空気圧アクチュエータであるTOPEAK製MicroRoket ALを用いた。このアクチュエータの重量は52g、初期全長は180mm、シリンダー直径は20mm、可動領域は90mm、最大作動圧力は0.9MPaである。また、発生力は0.5MPaで120Nである。張力材としてIGO製#150ゴムバンドを用いた。

3. テンセグリティロボットの転がりの幾何記述

6本のストラットから構成されるテンセグリティの凸包は、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。正三角形の辺と二等辺三角形の等しい辺には、張力材が対応する。二等辺三角形の底辺には張力材が張られていない。正三角形の辺の長さや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や張力材の長さで決まる。

Fig. 2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、幾何学における幾何学における標準的な手法⁽¹⁵⁾に準じて番号を付す。ストラットは、

Table 3 Triangles and corresponding vertices

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

両端における頂点の番号の対で表される。辞書式にストラットに番号を付ける。ストラットの番号と個々のストラットを表す一对の頂点番号をTable 1に示す。同様に、張力材も両端の頂点の番号の対で表される。張力材の番号と、個々の張力材を表す一对の頂点番号をTable 2に示す。

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、Table 3に示す。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。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。この展開図により、接触と接触の隣接関係を表すことができる。

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対称の関係にある。そこで、正三角形の面が床に接触している安定状態を、軸対称接触(Fig. 1(a))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対称の関係にある。そこで、二等辺三角形の面が床に接触している安定状態を、面対称接触(Fig. 1(b))とよぶ。Fig. 3から幾何学的に可能な遷移は、

- 軸 → 面 軸対称接触から面対称接触への遷移
- 面 → 軸 面対称接触から軸対称接触への遷移

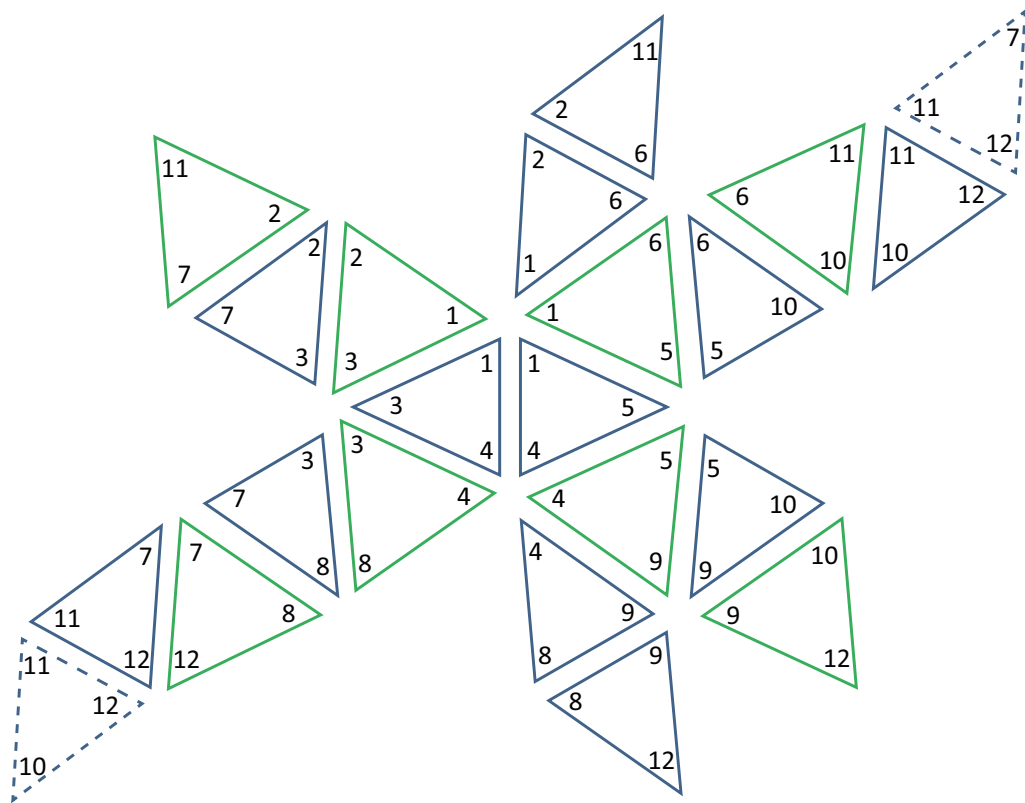


Fig. 3 Development of icosahedron

● 面 → 面 面対称接触から面対称接触への遷移に分類できることがわかる。

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。

4. 転がり実験

本節では、実験を通して転がり移動の有無を確認し、駆動アクチュエータと転がりの関係について、張力材駆動型のテンセグリティロボットの転がり実験の結果⁽¹³⁾と比較する。軸対称接触、面対称接触で実機を静止させた後に、6本のアクチュエータを個々に駆動し、テンセグリティロボットの外殻を変形させることで、軸 → 面、面 → 軸、面 → 面の計 60 通りの転がり移動のいずれかが生じるかを確認する。

軸 → 面

転がり移動 軸 → 面の実験結果を Table 4 に示す。外殻変形の一例を Fig. 4 に示す。従来の張力材駆動型テンセグリティロボットにおける結果と同様、全てのパターンである 24 通りの転がり移動を行うことがで

きた。

面 → 軸

転がり移動 面 → 軸の実験結果を Table 5 に示す。外殻変形の一例を Fig. 5 に示す。従来の張力材駆動型テンセグリティロボットにおける結果と同様、全てのパターンである 24 通りの転がり移動を行うことができた。

面 → 面

転がり移動 面 → 面の実験結果を Table 6 に示す。外殻変形の一例を Fig. 6 に示す。従来のテンセグリティロボットでは、この転がり移動が不可能であった。一方、今回のテンセグリティロボットにおいては、全てのパターンである 12 通りの転がり移動を行うことができた。

以上のように、ストラット駆動型テンセグリティロボットは、隣接する接触間での幾何学的に可能な遷移を、すべて実現することができた。アクチュエータの変位に必要な最低圧力は 0.12 MPa、転がり移動に必要な変位を得るために必要な最低圧力は 0.14 MPa であった。また、従来のテンセグリティロボットでは、軸 → 面 → 軸、面 → 軸 → 面という二段階の転がりが発生する、すなわち本来の転がり移動の後に意図しない転がりが生じるがあった。しかしながら、今回

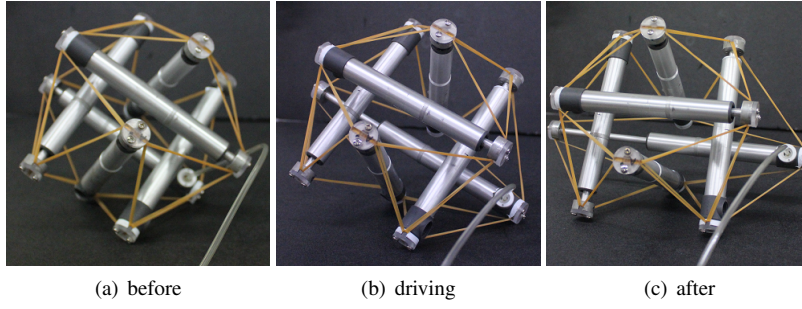


Fig. 4 Deformation in A→P transition

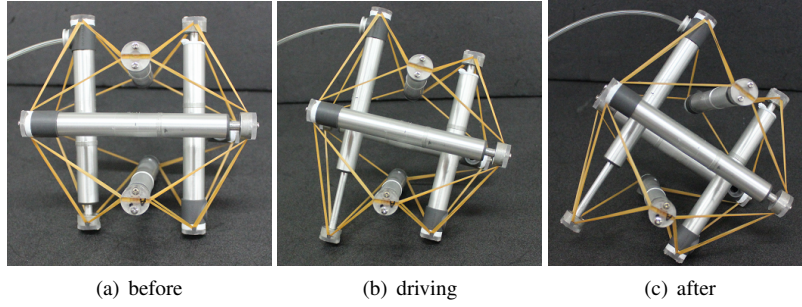


Fig. 5 Deformation in P→A transition

Table 4 Experimental results for transitions A→P

from	to	actuator
1,3,4	1,2,3	4
1,3,4	3,4,8	1
1,4,5	1,5,6	4
1,4,5	4,5,9	1
1,2,6	1,2,3	5
1,2,6	1,5,6	2
2,6,11	2,7,11	5
2,6,11	6,10,11	2
2,3,7	1,2,3	6
2,3,7	2,7,11	3
3,7,8	3,4,8	6
3,7,8	7,8,12	3
4,8,9	3,4,8	5
4,8,9	4,5,9	2
5,6,10	1,5,6	6
5,6,10	6,10,11	3
5,9,10	4,5,9	6
5,9,10	9,10,12	3
7,11,12	2,7,11	4
7,11,12	7,8,12	1
8,9,12	7,8,12	5
8,9,12	9,10,12	2
10,11,12	6,10,11	4
10,11,12	9,10,12	1

Table 5 Experimental results for transitiona P→A

from	to	actuator
1,2,3	1,2,6	3
1,2,3	1,3,4	2
1,2,3	2,3,7	1
1,5,6	1,2,6	3
1,5,6	1,4,5	5
1,5,6	5,6,10	1
2,7,11	2,3,7	1
2,7,11	2,6,11	6
2,7,11	7,11,12	2
3,4,8	1,3,4	2
3,4,8	4,8,9	3
3,4,8	3,7,8	4
4,5,9	1,4,5	5
4,5,9	4,8,9	3
4,5,9	5,9,10	4
6,10,11	2,6,11	6
6,10,11	5,6,10	1
6,10,11	10,11,12	5
7,8,12	3,7,8	4
7,8,12	7,11,12	2
7,8,12	8,9,12	6
9,10,12	5,9,10	4
9,10,12	8,9,12	6
9,10,12	10,11,12	5

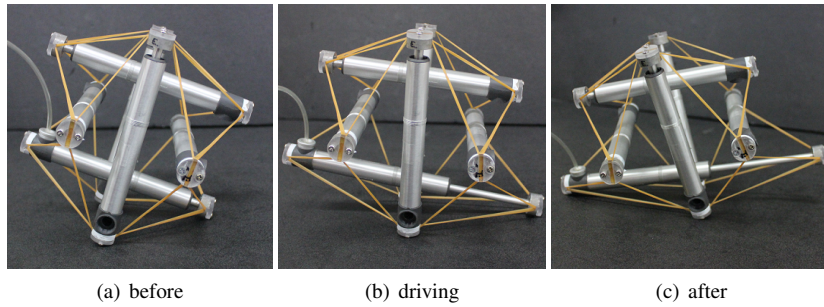


Fig. 6 Deformation in P→P transition

Table 6 Experimental results for transitions P→P

from	to	actuator
1,3,4	1,4,5	3
1,4,5	1,3,4	3
1,2,6	2,6,11	1
2,6,11	1,2,6	1
2,3,7	3,7,8	2
3,7,8	2,3,7	2
4,8,9	8,9,12	4
5,6,10	5,9,10	5
5,9,10	5,6,10	5
7,11,12	10,11,12	6
8,9,12	4,8,9	4
10,11,12	7,11,12	6

のストラット駆動型テンセグリティロボットでは、このような二段階の転がりは生じなかった。以上の結果をまとめると、Fig. 7に示す遷移図を得る。この遷移図において、三角形と三角形を結ぶ矢印に付している番号は、矢印に対応する遷移を実現するアクチュエータの番号を表す。ある接触には、三通りの接触が隣接する。ある軸対称接触（正三角形）とそれに隣接する面对称接触との遷移には、1から6まですべてのアクチュエータ番号が表れる。一方、ある面对称接触とそれに隣接する面对称接触との遷移と、それと逆の遷移は、ともに同じ番号のアクチュエータで実現される。

5. 結 言

本発表では、ストラット駆動型テンセグリティの転がり移動を実験的に評価した。その結果、6本のストラットの1本を駆動することにより、軸→面の24通りのすべての遷移、面→軸の24通りのすべての遷移、面→面の12通りのすべての遷移を実現できることがわかった。張力材を駆動するテンセグリティロボットでは、面→面の遷移を実現できなかった。一方、今回のストラット駆動型テンセグリティロボットでは、面

→面の遷移を実現することができた。一方、張力材を駆動するテンセグリティロボットで生じていた二段階の転がりは、今回のストラット駆動型テンセグリティロボットでは、生じていない。また、張力材を駆動するテンセグリティロボットにおける転がりでは、二本のアクチュエータを同時に駆動することが必要であった。今回のストラット駆動型テンセグリティロボットでは、一本のアクチュエータを駆動することで転がりを実現できおり、転がり移動の制御を簡単化することができた。

謝 辞

本研究は、科学研究費補助金 (No.25630098) の支援を受けた。

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.

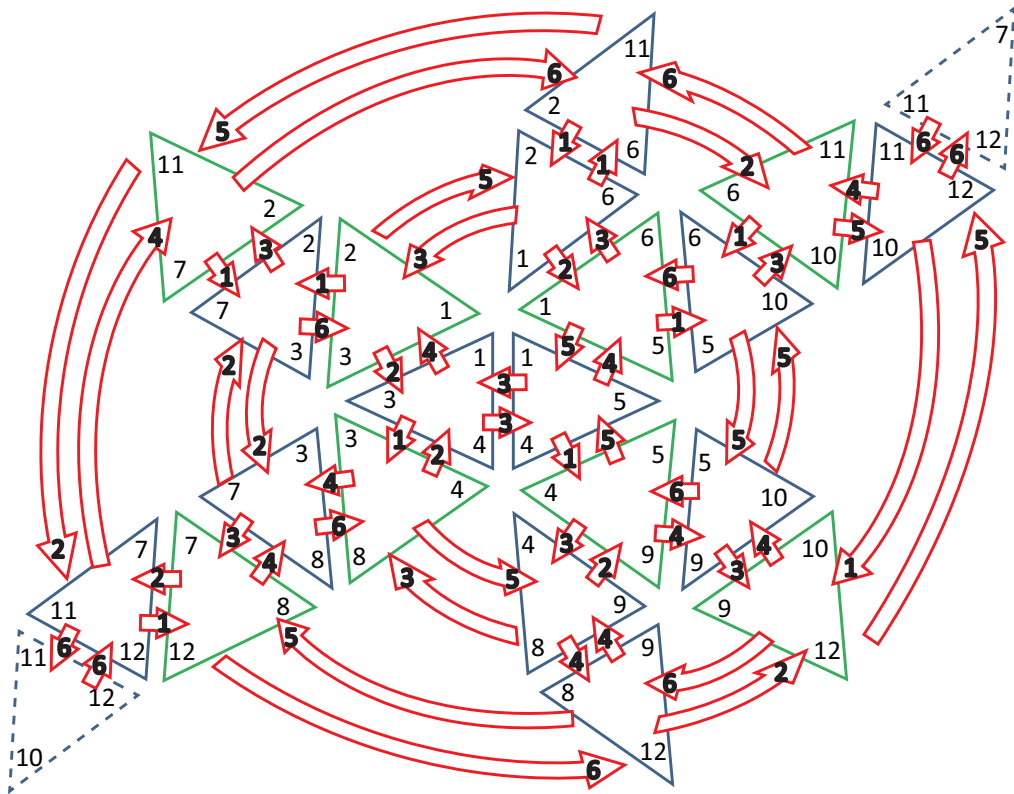


Fig. 7 Actuators performing transitions between neighboring contacts

- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 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.
- (10) <http://www.kennethsnelson.net/>.
- (11) *Buckminster Fuller Institute*, <http://www.bfi.org/>.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) 網干 雄城, 柴田 瑞穂, 平井 慎一, 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, 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp.102–107, 上山, Mar. 14-15, 2013.
- (15) *Virtual Polyhedra*, <http://www.georgehart.com/virtual-polyhedra/vp.html>.