

テンセグリティ型多面体ロボットの転がり移動

柴田瑞穂 寺師和真 仲瀬洸男 平井慎一 (立命館大学)

Rolling of Polyhedral Locomotion Robot with Tensegrity Structure

*Mizuho SHIBATA, Kazuma TERASHI, Mitsuo NAKASE, and Shinichi HIRAI
(Ritsumeikan Univ.)

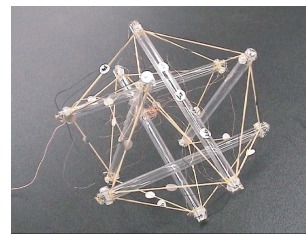
Abstract— This paper represents a rolling of a deformable polyhedral robot with a tensegrity structure. In this paper, we make a prototype of tensegrity locomotion robot, which corresponds with the right-handed snub cube. We find that the moving strategy of tensegrity locomotion robots using the body deformation depends on the structure itself through an analysis of the gravitational potential energy. In the snub cube, the gravitational potential energy at four-point contact is smaller than one at three-point contact, which results in moving directionality.

Key Words: Polyhedral Robot, Tensegrity, Body Deformation, Rolling, Locomotion

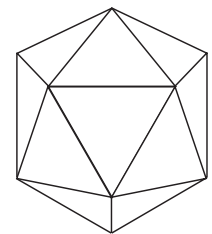
1. 緒言

近年、ロボットの外殻を変形させ、移動・跳躍を実現する研究が盛んに行われている [1, 2, 3, 4]。これらの研究により、実験・解析の両面から、外殻変形による移動・跳躍の有用性が明らかになりつつある。これまで開発されてきた柔軟移動跳躍ロボット [1, 5] では、外殻変形による重心移動およびポテンシャルエネルギーの蓄積・開放を利用することで、転がり移動や跳躍を実現している。しかしながら、外殻が一般的な単一材料によって作成されていたため、構造体のサイズと剛性を独立に選ぶことができなかった。例えば、単一材料でサイズの大きな外殻を作成する場合、剛性は低くなる。剛性が低くなるにつれて、自重で本体の形状を維持することが難しくなる。柔軟外殻のサイズと剛性の設計の自由度が増えることは、外殻変形移動ロボットの適用範囲を広げるために必須である。この構造的限界を打ち破るために、我々は、ロボットの外殻としてテンセグリティ構造体を採用した [6, 7]。テンセグリティ構造とは、不連続な圧縮材と連続する張力材で構成され、各部材が有効に機能して剛形態をつくるような骨格構造である [8]。テンセグリティ構造体の移動ロボットへの適応は、Paul らによって成された [9]。彼らのテンセグリティ移動ロボットは、歩行移動を基本としている。

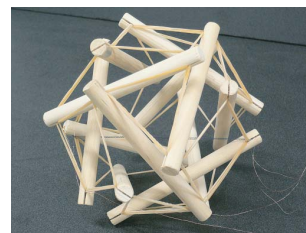
本研究では、テンセグリティ構造体の外殻を変形させることによる転がり移動を実現する。テンセグリティ構造体の外殻を変形させることによって、転がり運動可能であることは、実証されている [6]。しかしながら、どのように移動戦略を立てればよいかについては未知である。本研究では、テンセグリティ構造体を多面体と考え、種々の多面体構造を有する移動ロボットを実現する。図 1 に、テンセグリティ構造体の例を示す。図 1-(a) に示される構造体は、圧縮材が 6 本からなるテンセグリティ構造体であり、正二十面体を基にしている [7]。図 1-(b) に示される構造体は、圧縮材が 12 本からなるテンセグリティ構造体であり、変形立方体を基にしている。変形立方体は、準正多面体であり、6 つの正



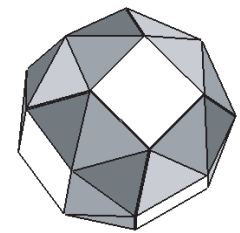
(a-1) 6-strut tensegrity



(a-2) Icosahedron



(b-1) 12-strut tensegrity



(b-2) Snub cube

Fig.1 Polyhedral tensegrity structures

方形と 32 個の正三角形から構成される [10]。本報告では、準正多面体に基づくテンセグリティ移動ロボットの転がり運動を解析することで、構造に応じて、重力ポテンシャルエネルギーの観点から、移動戦略を決定することの可能性について論じる。

2. 外殻変形による移動

本機構では、ロボットの外殻を変形させることによって転がり移動を実現する [1]。アクチュエータにより外殻を変形させると、重心のポテンシャルエネルギーに勾配が生じ、ロボットと地面との接触点まわりに、重力によるモーメントが発生する。このモーメントの作用により、ロボットは地面の上を転がり、移動する。

本機構では、構成する部材の種類が複数であるため、外殻を変形する方法として (a) 張力材そのものを変形

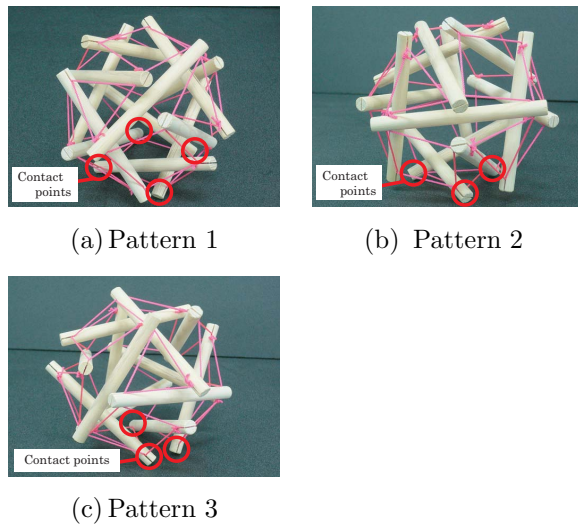


Fig.2 Contact conditions between floor and tensegrity robot

させる方法, (b) 圧縮材そのものを変形させる方法, (c) 圧縮材の幾何配置を変える方法が考えられる [6]. 方法 (c) は, 圧縮材の幾何配置により, 2 つのパターンに分類される. 方法 (c-1) では, 同一の張力材によって結合されている 2 つの圧縮材の距離を変化させる. 方法 (c-2) では, 同一の張力材によって結合されていない 2 つの圧縮材の距離を変化させる. 変形させたい場所および量に応じて, 変形方法を適宜選択する必要がある.

3. テンセグリティ移動ロボット

本章では, 圧縮材の接地状態からテンセグリティ構造体の移動形態を分類する. また, 転がる際の重力ポテンシャルエネルギーの推移を検証する.

3-1 対象とするテンセグリティ構造体と接地状態

本報告では, 転がり移動を実現するために, 図 1-(b-1) に示す, 12 本の圧縮材からなるテンセグリティ構造体を採用する. 本構造では, 圧縮材は 12 本, 張力材は 48 本である. 圧縮材の端点に張力材を配置する. 本構造体では, 自重を考慮しないとき, つりあい状態では, 張力材の長さがすべて等しい. 圧縮材の端点を頂点, 張力材を辺と考えると, 本構造は変形立方体から 12 本の辺を取り除いた構造に等しい. したがって, 本構造の安定状態は, 床に圧縮材の 4 つの端点が接地する状態 (図 2-(a)), または圧縮材の 3 つの端点が接地する状態 (図 2-(b), (c)) となる. 図の赤丸で示した点が接地点である. また, 3 点接地は, 接地する圧縮材の向きによって, 2 つに分類される. 4 点接地を接地状態 1 (図 2-(a)), 3 点接地のうち, 接地する圧縮材の床に対する角度が 3 本とも等しい状態を接地状態 2 (図 2-(b)), 2 本の接地角度が等しく残り 1 本が異なるものを接地状態 3 (図 2-(c)) と分類する.

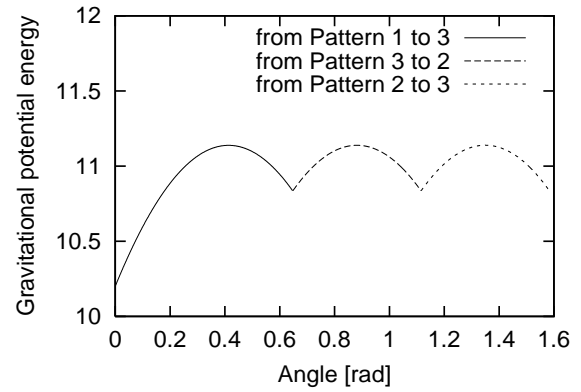


Fig.3 Transition of gravitational potential energy

3-2 重力ポテンシャルエネルギーの推移

前節で分類した接地状態に基づいて, それぞれの移動遷移のしやすさを重力ポテンシャルエネルギーの観点から比較する. ここでは, 遷移中に外殻が変形せず, 移動が準静的に行われていると仮定する. 第 i 番目の圧縮材の質量および床からの重心の高さをそれぞれ m_i , h_i とする. また, 重力加速度を g とするとき, 重力ポテンシャルエネルギーの総和 E_g は, 以下の式で表される.

$$E_g = \sum_{i=1}^N (m_i g h_i). \quad (1)$$

ここで, 記号 N は, 圧縮材の数であり, 本報告では $N = 12$ である. 図 3 に, それぞれの移動形態からの重力ポテンシャルエネルギーの推移を示す. 圧縮材の位置の計算には, 文献 [11] のデータを参考にした. ここでは, まず接地状態 1 から状態 3 に転がり, 次に状態 2 に転がり, 最後に状態 3 に転がったときの一連の重力ポテンシャルエネルギーの推移を示している. それぞれ転がる際にテンセグリティ構造体は変形せず, 多面体で考えた場合の辺を軸として回転するものとする. 状態 1 と状態 2 は辺で接していないため, 評価していない. 図の横軸は移動した際の合計の回転角度, 縦軸は重力ポテンシャルエネルギーであり, 半径 1 の円に内接する重さ 1 のテンセグリティ構造体であるとして正規化している. 図より, 接地状態 1 における重力ポテンシャルエネルギーが接地状態 2 および 3 と比べて低いということが分かった. これは, 圧縮材を一樣な剛体であると考えると, 接地点が多いことが起因していると考えられる. この現象は, 移動した場合に, 局所的に接地状態 1 に遷移しやすいことを示唆している. この結果は, 6 本の圧縮材を使用したテンセグリティ構造体の解析では確認されなかった [7]. この結果は, 多面体を選定することによって, 重力ポテンシャルの推移の意味から, 移動のしやすい方向を決定することが可能であることを示唆している.

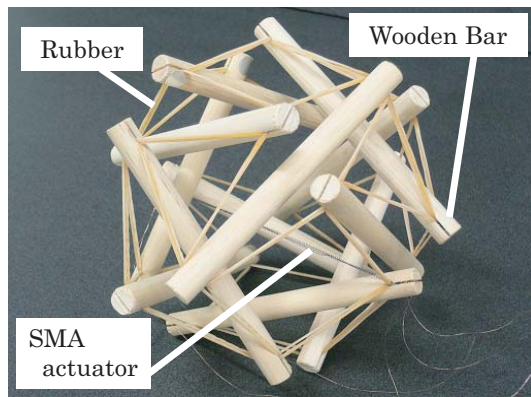


Fig.4 Prototype of deformable robot with tensegrity structure (12 struts)

4. 実験

本章では、実験を通して本機構が移動できることを確認する。まず、試作した実機での接地状態を確認し、それぞれの接地状態から移動が可能かどうかを検討する。

4.1 試作機

図4に試作機を示す。変形立方体には、鏡像関係にある2つの配置が考えられるが、本試作機は右手系の変形立方体を基にしている。本試作機では、圧縮材には $\phi 10$ の木材を、張力材にはばね定数 38N/m のゴムを使用した。圧縮材1本の長さは 110mm である。また、実機全体の質量は、 53.0g である。外殻の変形方法として、同一の張力材によって結合されていない2つの圧縮材の距離を変化させる方法((c-2))を採用した。アクチュエータとして、SMA (BMX150:トキコーポレーション製)を使用した。このSMAに通電し、発熱させることで収縮させる。

4.2 実験結果

試作機の移動可能性を検討するために、接地状態1および接地状態2からの遷移を確認する。試作機では、接地状態3は安定に静止することができず、遷移を確認することができなかった。図5に、外殻を変形させるために、収縮力を与える点を示す。図中の赤丸で示す2点間に収縮力を作用させる。それぞれの点にSMAコイルの端点を配置し、変形させる。図6に変形立方体の頂点の標記を示す。この標記は、文献[11]の結果に基づいて計算された頂点データ[12]の標記に準じる。図7に初期状態1からの実験結果を、図8に初期状態2からの実験結果を示す。図6の標記にしたがうと、図7の実験では、0, 1, 2, 3の4つの点が接地している。このとき、4, 8の2点の幾何配置を変更することで、転がり移動を実現した。図8の実験では、0, 4, 5の3つの点が接地している。このとき、4, 8の2点の幾何配置を変更することで、転がり移動を実現した。図7

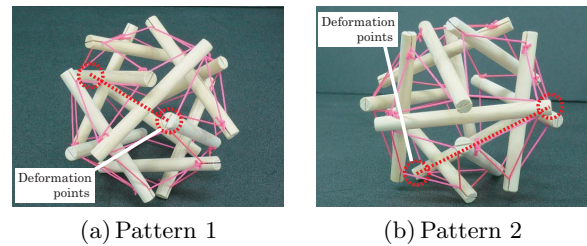


Fig.5 Arrangement of an SMA actuator for deformation

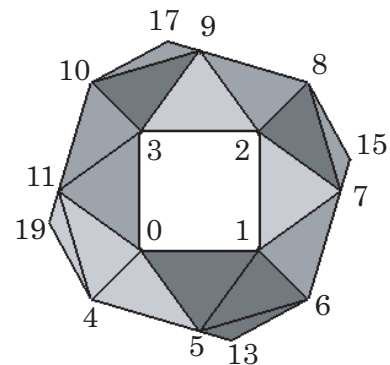


Fig.6 Vertices of a 12-strut tensegrity

の実験では、接地状態1(図7-(a))から外殻全体が変形し(図7-(b))、接地状態1に遷移し(図7-(c))、そのまま接地状態1で静止した(図7-(d))。図8の実験では、接地状態2(図8-(a))から変形を開始し(図8-(b))、状態1に遷移し(図8-(c))、そのまま接地状態1で静止した(図8-(d))。図に示すように、提案する実機において、それぞれの接地状態から転がり移動が可能であることを確認した。前章の結果によれば、接地状態1が接地状態2、接地状態3に比べて重力によるポテンシャルエネルギーが小さいため、移動後、接地状態1になる可能性が高いと考えられる。これらの実験結果は、前章の解析結果を支持するものである。この結果から、本試作機は4点で接地する可能性が高い。したがって、移動戦略を考える際に、4点接地からの移動を基本に考えるとよいことが示唆される。変形立方体では、向かい合う2つの四角形は平行に配置されており、ひとつの四角形から見て、2組の平行に向かい合う四角形が直角に配置されている。したがって、Fig.9に示すような方向に転がるのが想定される。この関係に基づく移動戦略の実現は、今後の検討課題とする。

5. 結言

本報告では、変形立方体に基づくテンセグリティ移動ロボットの転がり運動を解析した。その結果、構造に応じて、重力ポテンシャルエネルギーの観点から、移動戦略を決定することができる可能性を見出した。変形立方体に基づくテンセグリティ移動ロボットでは、4点接地の接地状態に基づいて移動戦略を立てることができる見通しを示した。これを解析、実験の両面から確

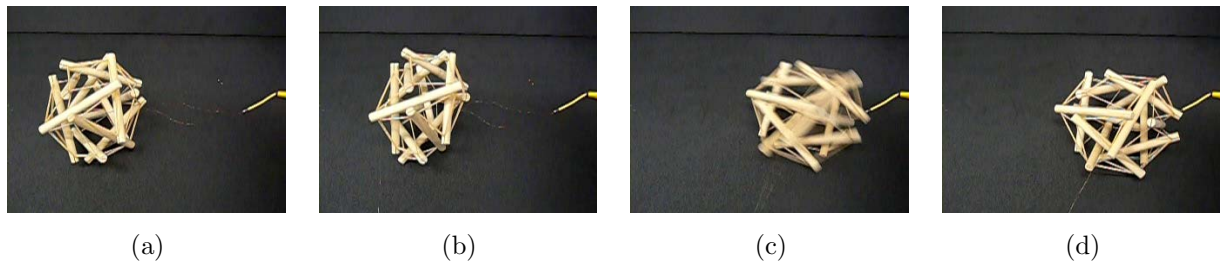


Fig.7 Rolling from pattern 1

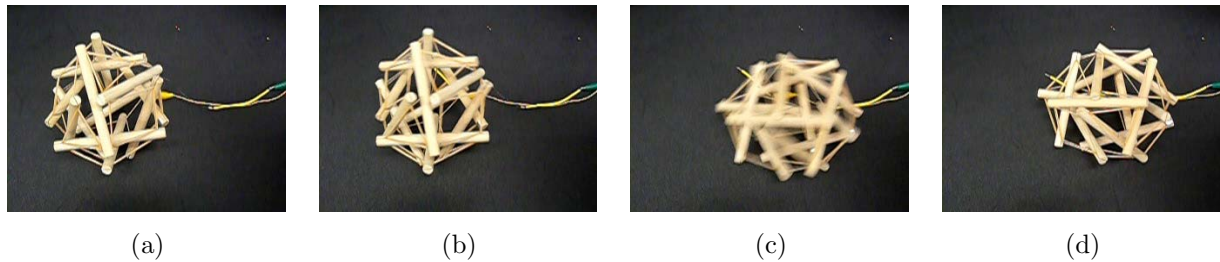


Fig.8 Rolling from pattern 2

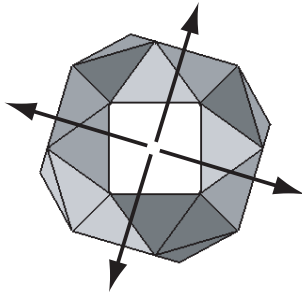


Fig.9 Moving directions of the prototype of 12-strut tensegrity robot

認した。

今後の課題としては、実際に本報告で得られた移動戦略を実装することが挙げられる。変形する場所と変形効率の関係性を明らかにし、連続的な転がりを実現する予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成 21 年度 科学研究費補助金 若手研究 (B) (課題番号: 21760210) の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 杉山勇太, 平井慎一: “柔軟ロボットの变形を用いた移動と跳躍”, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.102-111, 2006.
- [2] 山田篤史, 望山洋, 藤本英雄: “閉ループ柔軟カタパルトの静力学解析”, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.2, pp.49-57, 2008.

- [3] Y. Matsuyama and S. Hirai: “Analysis of Circular Robot Jumping by Body Deformation”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1968-1973, 2007.
- [4] T. Matsuda and S. Murata: “Stiffness Distribution Control –Locomotion of Closed Link Robot with Mechanical Softness–”, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1491-1498, 2006.
- [5] R. Armour, K. Paskins, A. Bowyer, J. Vincent, and W. Megill: “Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain”, Bioinspiratoion and Biomimetics Vol.2, Issue 3, 65/S82 (2007)
- [6] 柴田瑞穂, 西條文雄, 平井慎一: “テンセグリティ型柔軟移動ロボットの実験的検討”, 第 26 回日本ロボット学会講演集, 2008.
- [7] 西條文雄, 柴田瑞穂, 平井慎一: “テンセグリティ型柔軟ロボットの転がり移動の解析”, 第 9 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2008.
- [8] R. Motro: “Tensegrity”, Kogan Page, 2003.
- [9] C. Paul, F. J. Valero-Cuevas, and H. Lipson: “Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion”, IEEE Transactions on Robotics, Vol.22, No.5, pp.944-957, 2006.
- [10] 一松信: “正多面体を解く”, 東海大学出版会, 2002.
- [11] 小林光夫, 鈴木卓治: “正多面体を面に持つすべての凸多面体の頂点座標の計算”, 電気通信大学紀要, Vol. 5, No. 2, pp.147-184, 1992.
- [12] “<http://people.freebsd.org/~maho/mxico/Tamentai.html>”.