

# テンセグリティ型柔軟移動ロボットの実験的検討

柴田瑞穂 西條文雄 平井慎一 (立命館大学)

## Experimental Study of Deformable Clawing Robot with Tensegrity Structure

\*Mizuho SHIBATA, Fumio SAIJO, Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

**Abstract**— This paper represents a crawling of a deformable robot with a tensile structure body. The body consists of tensegrity, which has noncontiguous compressed rods and contiguous tensioned strings. This structure has a low weight per unit volume because of the small number of components. This robot crawls by body deformation. In this paper, we deform the body by varying a distance between two compressed rods using a shape memory actuator. Our prototype has two contact conditions between a floor and the rods. We confirm robotic crawling experimentally for each contact condition.

**Key Words:** Deformable robot, Clawing, Tensile Structure, Tensegrity

### 1. 緒言

不整地での移動を実現するロボットには、クローラや脚機構、ヘビ型ロボットなどのメカニズムが使われている [1]。これらのロボットは一般的に硬い部品から構成されており、転倒からの回復が容易ではないという欠点がある。この観点から、近年、外殻変形を利用した柔軟ロボットに関する研究が盛んに行われている [2, 3]。これらの研究の多くは、ばね鋼などヤング率の高い材質を薄くした部材を使用している。すなわち、部材の幾何学的柔軟性を利用することで、外殻を变形することができる。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。これまで開発されてきた柔軟移動跳躍ロボット [2, 3] では、外殻が一般的な単一材料によって作成されていた。効率的な移動、跳躍を実現するためにはロボット全体の質量が小さい方が望ましいが、単一材料であるため、同じ剛性を維持しながら軽くするためにはロボットそのものを小さくする必要がある。本研究では、これを解決するために、外殻として張力構造を利用する。本機構では、張力構造体としてテンセグリティ構造を参考にする。この構造では、全体の剛性は張力材によって決定されるため、圧縮材の選定によって、同じ剛性を維持しながら軽量化することが可能となる。本報告では、外殻を張力構造とする柔軟ロボットの移動原理を提案し、実験を通して転がり移動を実現する。

### 2. 従来研究

近年、ロボットの外殻を变形させ、移動・跳躍を実現する研究が盛んに行われている。Sugiyama らは、外殻にばね鋼を、アクチュエータに形状記憶合金 (Shape Memory Alloy: SMA) を使用し、移動・跳躍を実現するロボットを開発した [2, 4]。この研究を受けて、柔軟ロボットの外殻変形による受動的な転がりおよび跳躍の解析がなされた [6, 5]。Matsuyama らは、跳躍量が力積に依存し、外殻の初期形状が跳躍量に与える影響

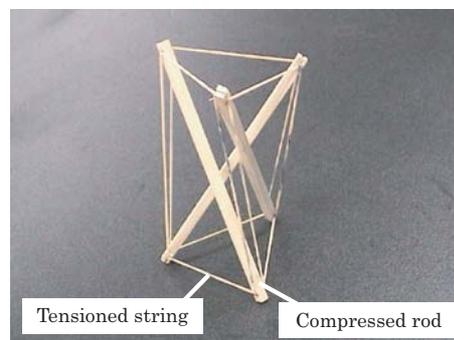


Fig.1 Tensegrity

を明らかにした。文献 [6] では、外殻を床にたたきつける跳躍に比べて、接地時間が大きい跳躍の方がより高く跳躍できることを解析・実験の両面から確認している。山田らは、梁の飛び移り座屈を利用し、柔軟外殻を用いた跳躍を実現している [3, 7]。ここでは、飛び移り座屈を実現するために、モータを使用しており、数 Hz 程度の連続した跳躍を可能にしている。連続的に移動できることを利用して、遊泳ロボットを実現している [8]。外殻の物理特性の影響を検討する研究も行われている。Matsuda らは円形モジュラーロボットを作成し、可動部の剛性を運動中に調整することで、効率のよい転がり、移動状態からの停止などを実現している [9]。このように、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。

### 3. 張力構造体

本研究では、張力構造体としてテンセグリティ構造を参考にする。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のことをいう [10, 11, 12, 13]。この構造の特徴として、構造体の単位空間あたりの自重を小さく構成できることが挙げられる。また、全体の剛性が張力材によって決定されるため、圧

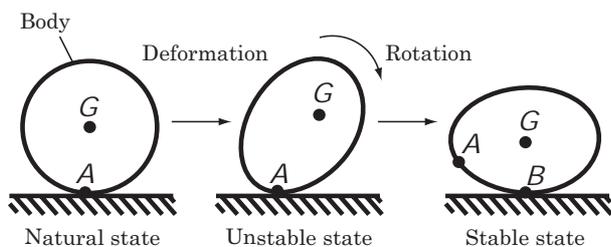


Fig.2 Principle of crawling by body deformation

縮材の選定によって、同じ剛性を維持しながら軽量化することが可能となる。Fig.1 にテンセグリティ構造の例を示す。図に示すテンセグリティ構造では、圧縮材が3本、張力材が9本で構成される。

#### 4. 外殻変形による移動

本章では、柔軟ロボットの外殻変形による移動原理および張力構造を有する柔軟ロボットの外殻変形方法を述べる。

##### 4.1 移動原理

柔軟ロボットの外殻変形による移動原理を Fig.2 に示す [4]。図中の点  $G$  を本体の重心位置とする。図では簡単のために、外殻を一樣な材料とし、その形状が円形であり、点  $A$  で接地しているとす。アクチュエータにより外殻を変形させると、重心位置  $G$  が移動する。したがって、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。例えば、Fig.2 の場合は、右回りにモーメントが発生し右方向に移動する。その結果、点  $A$  とは異なる点  $B$  にて外殻は安定形状となる。このように、アクチュエータによって連続的な変形を行うことで、ロボットは移動し続けることができる。

##### 4.2 外殻変形方法

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。Fig.3 にそれぞれの外殻変形方法を示す。方法 (a) は、張力材自体が並進のアクチュエータになっている場合である。例えば、張力材として SMA アクチュエータを使用することで実現できる。1つの圧縮材の端点には複数の張力材が配置されているので、1つの張力材の長さが増えることで外殻が変形する。方法 (b) は、圧縮材自体が並進のアクチュエータになっている場合である。例えば、圧縮材として空気圧シリンダを使用することで実現できる。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。2つの圧縮材の端点の間には張力材が存在

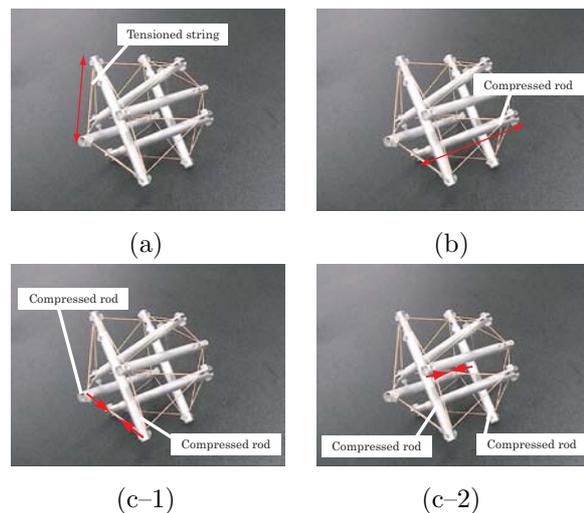


Fig.3 Deformation of tensile structure

するため、その張力材に沿う形で並進のアクチュエータを配置することで実現することができる。1つの圧縮材の端点には複数の張力材が配置されている。2つの圧縮材の端点の距離を変更することによって、複数の張力材が変形する。張力構造体を使用する圧縮材の総数が少ない場合には、比較的大きな外殻変形をもたらす。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。2つの圧縮材の幾何配置によっては、その距離を変化させにくいといった現象がみられるが、張力構造体を使用する圧縮材の総数が多い場合にも、大きな外殻変形をもたらす可能性がある。

#### 5. 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。

##### 5.1 試作機

Fig.4 に試作機を示す。本試作機では、圧縮材には  $\phi 8$  のアクリルパイプを、張力材にはばね定数  $13.1 \text{ N/m}$  のゴムを使用した。また、圧縮材を6本、張力材を24本を使用した。圧縮材1本の長さは  $150 \text{ mm}$  である。また、実機全体の質量は、 $25.2 \text{ g}$  である。本試作機では、ほぼ並行になる2本の圧縮材が3対ある形状で圧縮材および張力材がつりあい状態となる。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。圧縮材の配置を変えるため、図に示すように、張力材に沿うように SMA を配置した。この SMA は通電し、発熱させることで収縮する。ここで、張力構造体全体が持つ、ばねによるポテンシャルエネルギーの総和  $E$  は、 $i$  番目の張力材のばね定数を  $k_i$ 、自然長

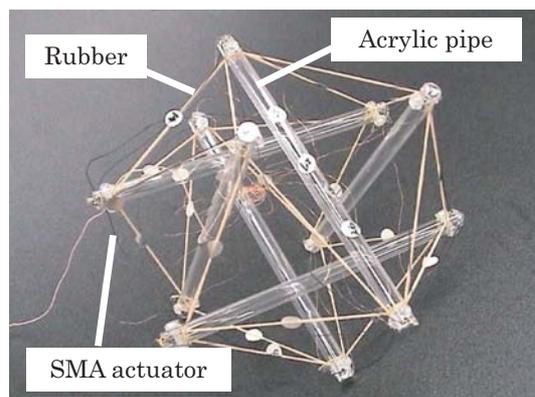


Fig.4 Prototype of deformable robot with tensile structure

からの伸びを  $d_i$  とすると,

$$E = \sum_{i=1}^N \left( \frac{1}{2} k_i d_i^2 \right) \quad (1)$$

で与えられる.

## 5.2 実験結果

本試作機では、構造上、床に外殻の3点が接地することで安定状態となる。したがって、Fig.5に示すように、接地する圧縮材の関係によって接地状態が2種類ある。Fig.5-(a)では、対になった2本の圧縮材と他の1本が接地する場合の安定状態、Fig.5-(b)では、それぞれ対になっていない3本の圧縮材が接地する場合の安定状態を示している。本節では、それぞれの接地状態から移動が可能であることを実験的に確認する。空中に浮いている2つ圧縮材の幾何配置を変化させる場合に比べて、接地する圧縮材の幾何配置を変化させる方がよりポテンシャルエネルギーの勾配が大きくなると考えられる。そこで、それぞれの接地状態において、Fig.5に示す2つの圧縮材の幾何配置を変化させる。Fig.6に、実験結果を示す。Fig.6-(a)が、2本の圧縮材と他の1本が接地する場合の安定状態からの遷移を、Fig.6-(b)が、それぞれ対になっていない3本の圧縮材が接地する場合の安定状態からの遷移を示している。図に示すように、それぞれの接地状態から移動可能であることが確認された。Fig.6-(a)の場合は幾何配置を変化させる2つの圧縮材の端は、それぞれ空中に浮いている。これに対して、Fig.6-(b)の場合は両方の端が接地している。したがって、アクチュエータを選定する際には、床と圧縮材の摩擦力も考慮に入れる必要がある。アクチュエータの選定および転がり方向の制御に関しては、今後の課題とする。

## 6. 議論

前節の実験結果より、本報告で提案した外殻を張力構造とする柔軟ロボットが外殻を変形させることで移動が可能であることが分かった。Fig.7に、圧縮材とし

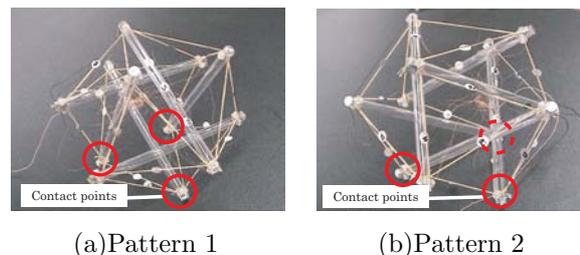


Fig.5 Contact conditions between floor and tensile structure

てアルミパイプを使用した試作機を示す。アルミパイプの長さは前章の実機で使用した圧縮材と同じ長さである。張力材は前章の実機と同じものを使用している。このように、本機構では圧縮材を選定することで同じ剛体であるにもかかわらず総重量を変化させることができる。効率的な移動、跳躍を実現するためにはロボット全体の質量が小さい方が望ましい。これまで開発されてきた柔軟移動跳躍ロボット [2, 3] では、外殻が単一材料によって作成されていたため、同じ剛性を維持しながら軽くするためにはロボットそのものを小さくする必要があった。本機構では、全体の剛性は張力材によって決定されるため、圧縮材の選定によって、同じ剛性を維持しながら軽量化することが可能となる。Fig.7に示した試作機は、前章で示した試作機と比べ、圧縮材および張力材の数は変わらないが、質量は53.8gと2.1倍大きい。この試作機において、前章に示す外殻変形法で移動を実現することを実験的に確認している。質量が大きくなることによって、変形に要するエネルギーは増えるため、積極的に質量を増やす必要はない。しかしながら、この実験結果は本機構を用いた柔軟ロボットの本体の中に電源および駆動回路を搭載できることを示唆しており、本機構の有用性を示している。さらに、本報告で提案する柔軟ロボットでは、張力材自体が硬い場合にも構造的に変形する可能性があり、全体としては硬いが、変形しながら移動する機構を実現することができる。この特徴を生かし、可動する構造物を開発している研究が報告されている [14]。

## 7. 結言

本報告では、外殻を張力構造とする柔軟移動ロボットを実現した。本機構では、外殻を変形することによって、本体の重心位置を変え、移動を実現する。本報告では、外殻を変形する方法として、(a)張力材そのものを変形させる方法、(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を提案した。また、2本の圧縮材の端点の距離を変化させる方法を実装し、実験を通して本機構によって移動が可能であることを確認した。

今後の課題としては、(1)張力構造体の基本特性の計測および解析、(2)他の外殻変形方法の検討、(3)効率的な移動方法の探索、(4)跳躍の実現が挙げられる。

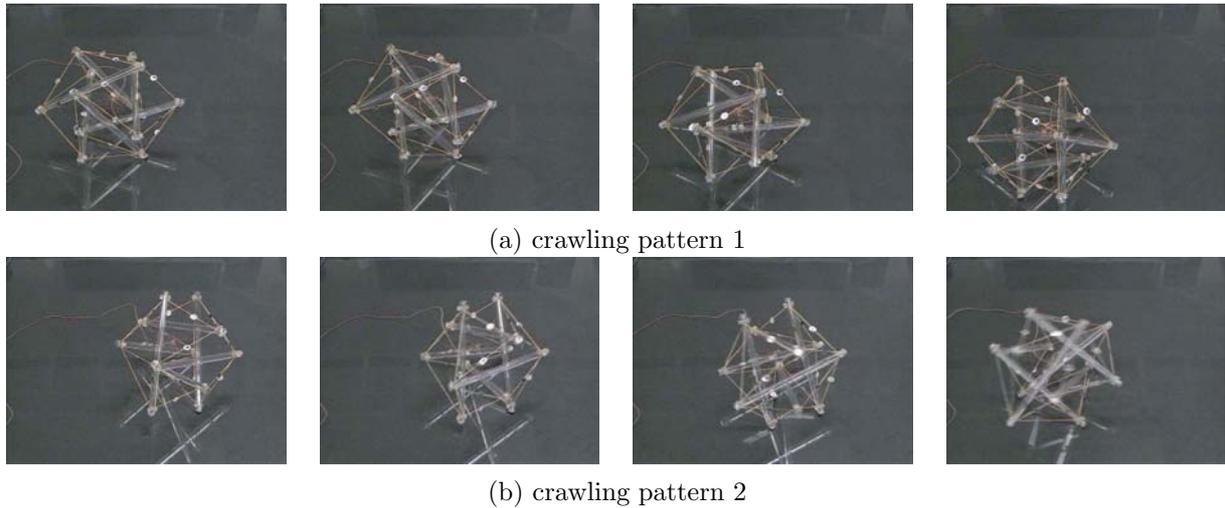


Fig.6 Crawling by body deformation

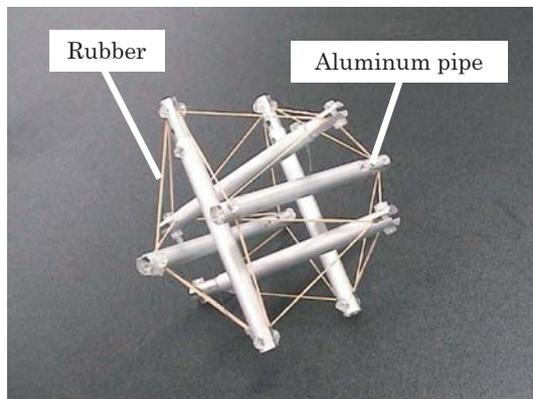


Fig.7 Prototype (heavy weight type)

#### 参考文献

- [1] 広瀬茂男: “ロコモーション研究の 20 年-私的回想と展望-”, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.1-6, 2002 .
- [2] Y. Sugiyama and S. Hirai: “Crawling and Jumping by a Deformable Robot”, Int. J. of Robotics Research, 25, 5-6, pp.603-620, 2004.
- [3] 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.
- [4] 杉山勇太, 平井慎一: “柔軟ロボットの変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 .
- [5] H. Nakanishi and S. Hirai: “Passive Crawling of a Soft Robot”, Proc. of 2007 IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, 2007.
- [6] 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.
- [7] 山田篤史, 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: “跳躍ロボットのための非対称型閉ループ柔軟カタパルト”, 日本ロボット学会誌, Vol.26, No.4, pp.63-71, 2008.
- [8] 渡正充, 望山洋, 藤本英雄: “閉ループ柔軟カタパルトを利用した遊泳ロボット腕ふり型カタパルトの解析と旋回運動の実現”, 第 25 回日本ロボット学会学術講演会論文集, 2007 .
- [9] 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.
- [10] “K. Snelson のウェブサイト”, <http://www.kennethsnelson.net/>.
- [11] 渡部正, 川口健一編著: “バイオに学びバイオを超える”, pp.233-250, 日本評論社, 2004.
- [12] D. E. Ingber: “The Architecture of Life”, Scientific American, Jan., pp.30-39, 1998.
- [13] 大崎純, 張景耀: “固有値解析によるテンセグリティの形状設計と安定性条件”, 第 55 回理論応用力学講演会講演論文集, 2006.
- [14] 潮崎晴紀, 盛真唯子, 門脇信傑, 鈴森康一: “テンセグリティ構造を用いたジャッキアップツール”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08 講演論文集, 2008 .