

# 弾性ポテンシャルエネルギーの蓄積・放出を用いた 円形 / 球形ソフトロボットの移動と跳躍

杉山勇太, 塩津あゆみ, 山中雅史, 平井慎一  
立命館大学 ロボティクス学科

## Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping via Charge and Release of Elastic Potential Energy

Yuuta Sugiyama, Ayumi Shiozu, Masashi Yamanaka, and Shinichi Hirai  
Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ.

**Abstract** - We describe circular/spherical robots for crawling and jumping. Locomotion over rough terrain has been achieved mainly by rigid body systems including crawlers and leg mechanisms. This paper presents an alternative method of moving over rough terrain, one that employs deformation. First, we describe the principle of crawling and jumping as performed through deformation of a robot body. Second, in a physical simulation, we investigate the feasibility of the approach. Next, we show experimentally that prototypes of a circular robot and a spherical robot can crawl and jump.

keywords: deformation, locomotion, crawling, jumping, soft body

### 1. はじめに

不整地走行は、クローラや脚機構など、剛体系により実現されてきた。本論文では、柔軟なボディの変形を用いた、別の手法を提案する。

剛体系により構成される走行機構には、大きい自重が人に衝撃を与える可能性が高く、転倒からの回復が容易ではないという欠点がある。近年、転倒からの回復が可能な機構に関する研究が進められている [1, 2] が、メカニズムが複雑になりやすい。したがって、軽量で単純な走行機構が求められている。一方、近年のソフトアクチュエータ、すなわち形状記憶合金 (SMA) アクチュエータやポリマー/ゲルアクチュエータの発展は目覚ましく [3, 4, 5]、脚機構や柔軟ロボットの駆動に用いられている [6]。ソフトアクチュエータを用いた移動機構は、軽量になる可能性が高い。しかしながら、現在のソフトアクチュエータには、いくつかの欠点がある。一般的に発生できる力が小さく、大きい力を発生させるためには 1,000V を越える電圧が必要であるが、水中で駆動させる必要がある。このような課題を解決するために、ソフトアクチュエータをロボットボディを変形させるために用い、変形により不整地上の走行と跳躍を実現する手法を提案する。変形を用いた移動と跳躍は、剛体系による不整地走行より、高い適応性を発揮すると期待できる。さらに、柔らかいロボットボディは、人に与える衝撃が小さくなる。

本論文では、円形柔軟ロボットと球形柔軟ロボットを提案し、その性能をシミュレーションと実験を通して検証する。まず、ロボットボディの変形による移動と跳躍の原理を述べる。次に、力学シミュレーションを通して、提案手法の実現可能性を検証する。さらに、円形柔軟ロボットと球形柔軟ロボットのプロトタイプが、移動と跳躍を実行できることを実験的に示す。

### 2. 移動と跳躍の原理

Fig.1-(a) に示すように、ロボットが地面で安定状態にあるとする。このとき、ロボットの重力ポテンシャルエネルギーは極小であり、ポテンシャルの勾配は 0 である。ロボットがボディを変形させ、ポテンシャルエネルギーの勾配が生じると、ロボットと地面との接

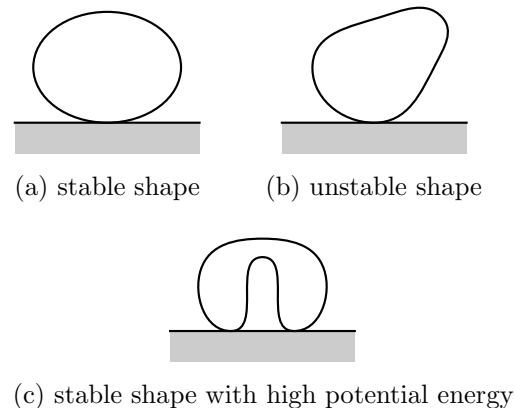


Fig.1: Principle of crawling and jumping

触領域まわりに、重力によるモーメントが生じる。このモーメントにより、ロボットは地面の上を移動する。たとえば、Fig.1-(a) に示す安定形状から Fig.1-(b) に示す不安定形状にロボットが変形した場合、ロボットは右向きに移動する。ロボット内部のアクチュエータによりロボットボディを連続的に変形させると、ロボットは地面の上を連続的に移動する。結局、提案する手法では、ボディの変形によりロボットの重力ポテンシャルを制御することにより、移動を実現する。

ロボットボディの変形により、弾性ポテンシャルエネルギーをボディに蓄積し、蓄積した弾性ポテンシャルエネルギーを急速に放出することにより、跳躍を実現する大きい力を発生することができる。Fig.1-(a) に示す安定形状から Fig.1-(c) に示す別の安定形状にロボットが変形したとする。Fig.1-(c) に示す安定形状には、高いポテンシャルエネルギーが蓄えられている。このポテンシャルエネルギーを十分速く放出できれば、ロボットは跳躍できる。Fig.1-(c) に示す高エネルギー状態は、小さい外乱により Fig.1-(a) に示す低エネルギー形状に移る。このとき、跳躍に必要な力を発生する。結局、提案する跳躍方法は、弾性ポテンシャルエネルギーの蓄

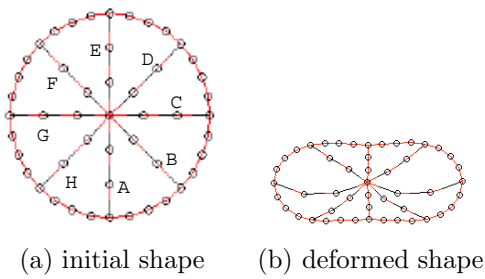


Fig.2: Circular soft robot

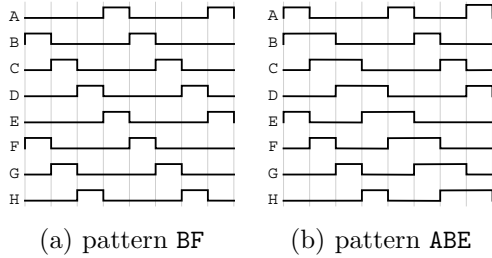


Fig.3: Voltage patterns applied to SMA coils

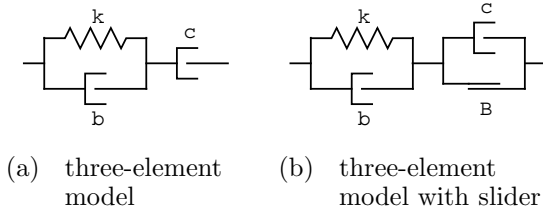


Fig.4: Model of SMA coils

積と放出を利用している。ロボット内のアクチュエータは、弾性エネルギーを蓄えるために用いられる。弾性エネルギーを蓄えるために必要な力は、跳躍に必要な力より、一般に十分小さい。なお、このような弾性エネルギーの蓄積と放出は、昆虫の跳躍に見ることができる [7]。

### 3. シミュレーション

本節では、柔軟ロボットの移動と跳躍の実現可能性を、力学シミュレーションを通して検証する。

**円形ソフトロボットのモデリング** Fig.2に示す円形ソフトロボットの挙動をシミュレーションする。円形ソフトロボットは、Fig.2-(a)に示すように、円形の弾性殻と内部に配置されたソフトアクチュエータから構成される。このロボットには、8本のSMAコイルが配置されている。各SMAコイルを、AからHまでの記号で区別する。アクチュエータが収縮すると、Fig.2-(b)に示すように、ロボットボディすなわち円形殻が変形する。SMAコイルには、オープンループのPWM制御を適用する。移動においては、周期的な電圧パターンをSMAコイルに印加する。Fig.3に図示するように、最初の時間区間でアクティブなSMAコイルの組により、電圧パターンを表す。Fig.3-(a)に示すパターンBFでは、最初の時間区間でSMAコイルBとFに電圧を印加し、次の時間区間ではCとG、さらにDとH、EとAの順に印加する。Fig.3-(b)に示すパターンABEでは、まずSMAコイルA、B、Eに電圧を印加し、次にB、C、Fに印加する。

弾性殻は弾性物体としてモデリングする。一方、SMAコイルやポリマー/ゲルアクチュエータの非弾性的な特

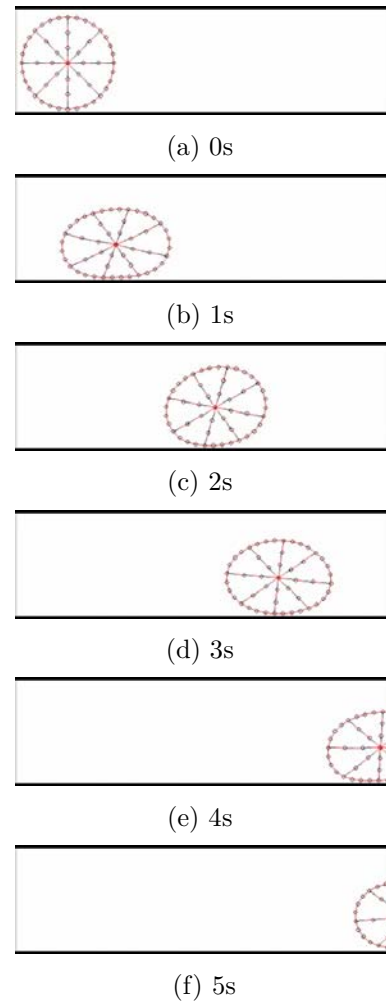


Fig.5: Simulation of a circular soft robot crawling

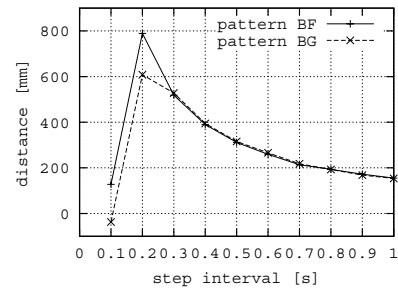


Fig.6: Comparison of pattern BF and BG

性を表せるように、アクチュエータはレオロジー物体 [8]としてモデリングする。ここでは、SMAコイルをスライダー付き三要素モデルで表す。これにより、アクチュエータの収縮速度、最大収縮率、最大発生力を、モデルパラメータとして指定することができる。

弾性殻の伸縮はVoigtモデルで、曲げは弾性要素で表す。伸縮のVoigtモデルは、弾性要素 $k_{body}$ と粘性要素 $b_{body}$ の並列結合である。曲げ変形の弾性は $k_{bend}$ で表す。円形ソフトロボットのプロトタイプの弾性殻に対して、あらかじめモデル同定実験を行い、 $k_{body} = 500\text{N/m}$ 、 $b_{body} = 0.1\text{N}/(\text{m/s})$ 、 $k_{bend} = 0.0015\text{Nm/rad}$ を得た。円形ソフトロボットのシミュレーションでは、これらの結果を用いる。

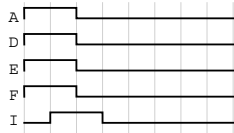


Fig.7: Voltage patterns for jumping

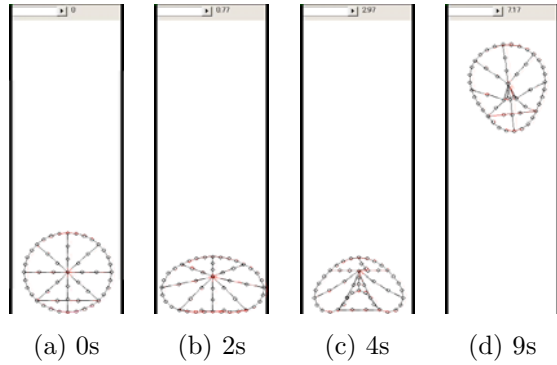


Fig.8: Simulation of a circular soft robot jumping

SMA コイルのモデリング まず, SMA コイルの受動的な変形, すなわち外力に対する変形を定式化する. SMA コイルは, 粘弾性とともな塑性的な変形を示す. したがって, SMA コイルの受動的な変形は, 三要素モデルで表現できる. 三要素モデルは, Fig.4-(a) に示すように, Voigt 要素と粘性要素の直列結合である. 弾性係数  $k$  と粘性係数  $b$  が, Voigt 要素の挙動を定める. 粘性係数  $c$  は, 粘性要素の性質を定める. 三要素モデルの長さを  $x$ , Voigt 要素と粘性要素の長さをそれぞれ,  $x_v$  と  $x_d$  で表す. 三要素モデルは, 次式のように定式化できる.

$$x = x_v + x_d, \quad (1)$$

$$f_{pas} = -kx_v - b\dot{x}_v, \quad (2)$$

$$f_{pas} = -c\dot{x}_d \quad (3)$$

ここで,  $f_{pas}$  は, 三要素モデルが発生する力を表す. 外力が作用する限り, 三要素モデルは変形し続ける. このような無制限の変形を防ぐために, Fig.4-(b) に示すスライダー付き三要素モデルを採用する. スライダーの挙動は, 力限界  $B$  で定められる. スライダー付き三要素モデルでは, (3) 式の代わりに次式を用いる.

$$-c\dot{x}_d = \begin{cases} f_{pas} & \text{if } fx \leq Bx_v^{init} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

ここで,  $f$  はスライダー付き三要素モデルに作用する外力を,  $x_v^{init}$  は要素内 Voigt モデルの初期長さを表す. 電圧を印加することにより, SMA コイルは力を発生する. この発生力を定式化する. SMA コイルに印加される電圧を  $V(t)$  とする. オープンループ PWM を SMA コイルに適用しているため, 電圧  $V(t)$  は, 電圧  $V$  あるいは 0 のどちらかの値を取る. 時刻  $t$  で SMA コイルに発生する力を  $F(t)$  で表す. コイルが発生する収縮力の時間変化率を  $D_{on}$ , 印加電圧を切ったときの力の緩和率を  $D_{off}$  とする. さらに, コイルが発生する最大力を  $F_{max}$  で表す. 電圧印加により SMA コイルが発生する力は, 次式で表される.

$$\frac{dF}{dt} = \begin{cases} D_{on} & V(t) = V \text{ and } F(t) < F_{max} \\ -D_{off} & V(t) = 0 \text{ and } F(t) > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

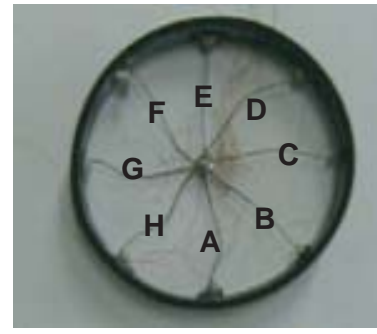


Fig.9: Prototype of a circular soft robot

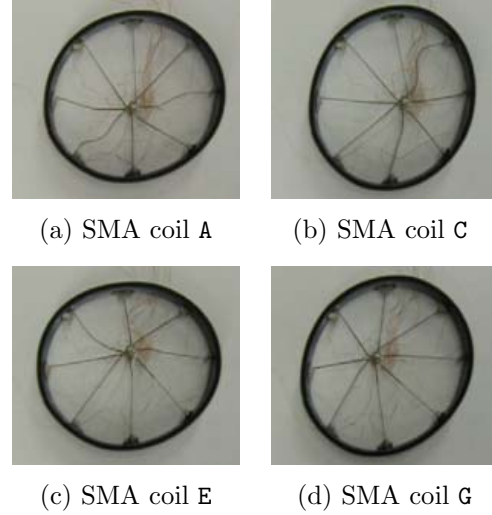


Fig.10: Deformation of a circular soft robot

時間区間  $[0, t]$  で上式を積分することにより, 時刻  $t$  においてコイルが発生する力を計算することができる. 力  $F(t)$  の値は, 区間  $[0, F_{max}]$  の範囲で変化する.

円形ソフトロボットのプロトタイプを試作に, SMA コイル BMX100 を採用した. (1)-(5) 式に含まれるモデルパラメータの値を実験的に同定し,  $k = 50\text{N/m}$ ,  $b = 0.1\text{N/(m/s)}$ ,  $c = 10\text{N/(m/s)}$ ,  $B = 0.016\text{N}$ ,  $D_{on} = 150\text{mN/s}$ ,  $F_{max} = 150\text{mN}$  を得た.

シミュレーション結果 Fig.5 に円形ソフトロボットの移動をシミュレーションした結果を示す. 移動においては, 一つあるいは複数の SMA コイルに, 周期的な電圧パターンを与える. このシミュレーションでは, Fig.3-(a) に示すパターン BF を与えて SMA コイルを駆動した. 図に示すように, 8 個の SMA コイルの PWM 制御により, 円形ソフトロボットは平らな水平面上を移動することができる. また, シミュレーションを通して, 移動に適切な電圧パターンを見つけることができる. Fig.6 に, 様々なステップ間隔に対して, 10s で進む距離を計算した結果を示す. 図に示すように, ステップ間隔 0.2s の電圧パターン BF が, 計算した中では最良である.

円形柔軟ロボットの跳躍のために, 8 個の SMA コイルに加えて, SMA コイル I を B と H の端点の間に取り付ける. Fig.7 に示す電圧パターンを, SMA コイルに印加する. 4 個の SMA コイル A, D, E, F に電圧を印加後, コイル I に印加する. 4 個の SMA コイルの印加電圧を切った後, コイル I の印加電圧を切る. Fig.8 に, 円形ソフトロボットの跳躍をシミュレーションした結果を示す. 図に示すように, SMA コイルの PWM 制御

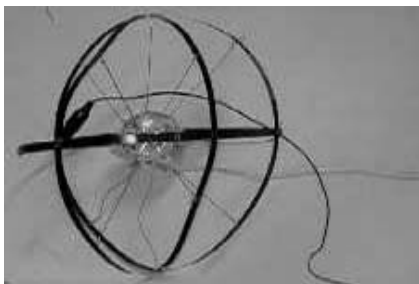


Fig.11: Prototype of a spherical soft robot

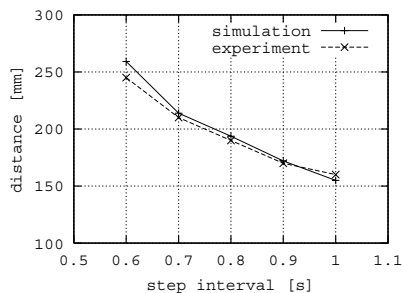


Fig.13: Comparison between simulation and experimental results for voltage pattern BF

により、円形ソフトロボットは重力下で跳躍できる。提案するモデリング手法を用いると、球形ロボットの三次元運動をシミュレーションすることが可能である。

#### 4. 実験結果

柔軟ロボットの移動と跳躍の可能性を実証するために、二種類のプロトタイプ、すなわち円形ソフトロボットと球形ソフトロボットを試作した。Fig.9に、円形ソフトロボットのプロトタイプを示す。このプロトタイプは、8本のSMAコイルBMX100が円形のゴム殻の内部に取り付けられている。円形ボディの直径は40mm、ロボットの自重は3gである。各コイルに電圧を印加すると、コイルは収縮し、Fig.10に示すように円形ボディが変形する。各図は、一本のコイルA, C, E, Gの収縮による変形を表している。Fig.11に、球形ソフトロボットのプロトタイプを示す。このプロトタイプは、18本のBMX100とバネ網の殻から成る。ロボットの直径は200mm、自重は137gである。球形ボディの中心に、SMAコイルの駆動回路が配置されている。回路の重量は75gである。

**移動** Fig.12に、円形プロトタイプの移動の様子を示す。電圧パターンBFをSMAコイルに印加した。図に示すように、円形プロトタイプは、平地上を移動することができる。ここで、シミュレーションと実験結果を比較する。Fig.13に、様々なステップ間隔に対して、10sで移動する距離を示す。プロトタイプは、ステップ間隔0.6sのとき、10sで260mm移動した。すなわち、一秒間に直径の約65%移動することができる。図に示すように、シミュレーション結果は実験結果に良く一致する。ある範囲でステップ間隔を減らすと、より速い移動を実現できる。ただし、SMAコイルは自然放熱により伸長し、伸長に時間を要する。したがって、ステップ間隔は、伸長に要する時間より長く必要である。

Fig.14に、球形プロトタイプの移動の様子を示す。図に示すように、球形プロトタイプは、平地上を移動することができる。しかしながら、直進が困難であり、移



Fig.17: Spherical prototype for crawling and jumping

動速度は評価していない。

**坂登り** Fig.15に、円形プロトタイプの坂登りの様子を示す。Fig.3-(b)に示した電圧パターンABEをアクチュエータに印加することにより、円形プロトタイプは、20°の坂を登ることができる。

**跳躍** 円形ソフトロボットの跳躍においては、SMAコイルIを用いる。Fig.16に、円形プロトタイプの跳躍の様子を示す。プロトタイプは80mm跳躍することができる。これは、プロトタイプの直径の2倍に相当する。

また、Fig.11に示すプロトタイプは跳躍ができなかった。そこで、Fig.17に示す、跳躍用の球形ソフトロボットのプロトタイプを試作した。プロトタイプは、移動のために18本、跳躍のために4本のSMAコイルを有している。SMAコイルの駆動回路をロボットの外部に置き、ロボットの重量を減らしている。プロトタイプの直径は90mm、自重は5gである。Fig.18に、この球形プロトタイプの跳躍の様子を示す。プロトタイプは200mm跳躍することができる。これは、プロトタイプの直径の2倍に相当する。

#### 5. おわりに

本報告では、移動と跳躍が可能なソフトロボットを提案した。まず、ロボットボディの変形を利用した移動と跳躍の原理を述べた。次に、スライダ付き三要素モデルを用いた変形シミュレーションにより、ソフトロボットが移動と跳躍を実現できる可能性を示した。さらに、円形ソフトロボットと球形ソフトロボットという二種類のプロトタイプが、移動と跳躍を実現できることを実験的に示した。円形プロトタイプは、一秒間に直径の約65%移動し、20°の坂を登り、直径の2倍の高さに跳躍することができた。球形プロトタイプは、直径の2倍の高さを跳躍することができた。

将来の課題として、以下を挙げる。現在まで、円形ロボットや球形ロボットの運動に関する解析は行っていない。そこで、線状物体モデリング[9]を適用し、円形ロボットの運動を解析する。移動あるいは跳躍過程における、弾性および重力ポテンシャルエネルギーを評価することにより、円形ロボットの運動を理解できると考えている。本報告では、球形ソフトロボットのプロトタイプについて述べた。しかしながら、現在の球形プロトタイプの性能は限定されており、新たな機構の設計や材質の選択が必要である。また、現在のプロトタイプにはセンサフィードバックが導入されていない。加速度センサあるいは視覚センサを用いた姿勢制御を導入し、ソフトロボットの自律的な移動を実現する予定である。

#### 謝辞

本研究の一部は、新エネルギー・産業技術総合開発機構の21世紀ロボットチャレンジプログラム・プロトタイプ開発支援事業の補助を受けた。



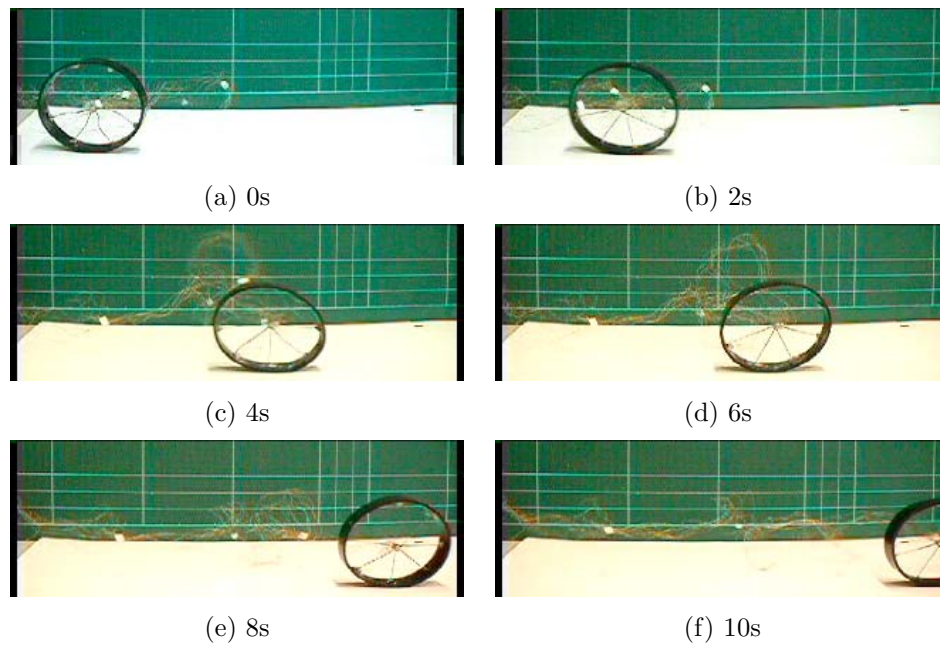


Fig.12: Circular soft robot crawling

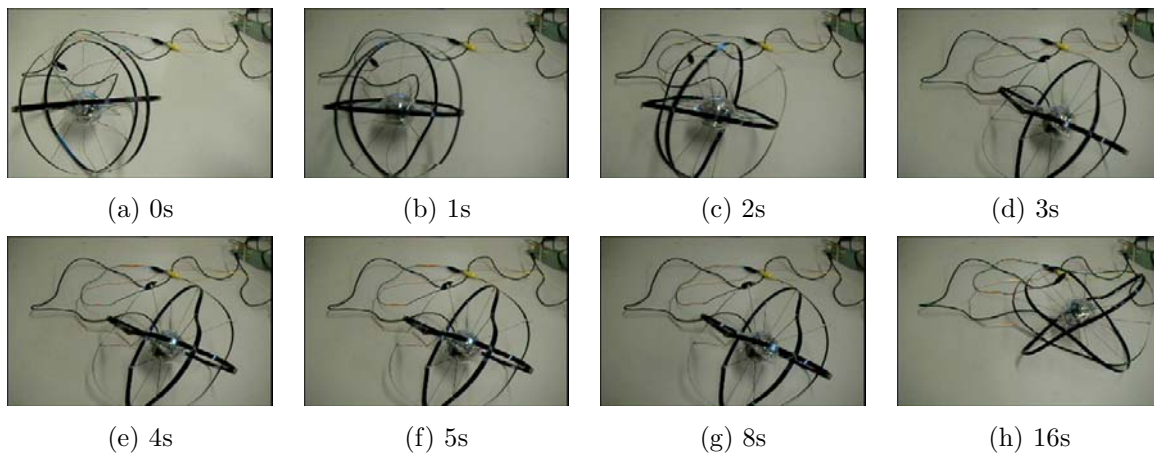


Fig.14: Spherical soft robot crawling

【参考文献】

- 1) Saranli, U., Buehler, M., and Koditschek, D. E., *RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot*, Int. J. of Robotics Research, Vol. 20, No. 7, pp.616–631, 2001.
- 2) Yim, M., Eldershaw, C., Zhang, Y., and Duff, D., *Limbless Conforming Gaits with Modular Robots*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
- 3) Pelrine, R., Kornbluh, R., Pei, Q., and Joseph, J., *High-speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%*, Science, Vol. 287, February, pp.836–839, 2000.
- 4) *The First Conference on Artificial Muscles*, December, 2001.
- 5) *Artificial Muscles*, Scientific American, October, pp.34–41, 2003.
- 6) Otake, M., Kagami, Y., Inaba, M., and Inoue, H., *Motion design of a starfish-shaped gel robots made of electroactive polymer gel*, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 40, pp.185–191, 2002.
- 7) 動物大百科 15 昆虫, 平凡社, pp.84–85, 1987.
- 8) Kimura, M., Sugiyama, Y., Tomokuni, S., and Hirai, S., *Constructing Rheologically Deformable Virtual Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, September, 2003.
- 9) Wakamatsu, H. and Hirai, S., *Static Modeling of Linear Object Deformation based on Differential Geometry*, Int. J. Robotics Research, Vol. 23, No. 3, March, pp.293–311, 2004.

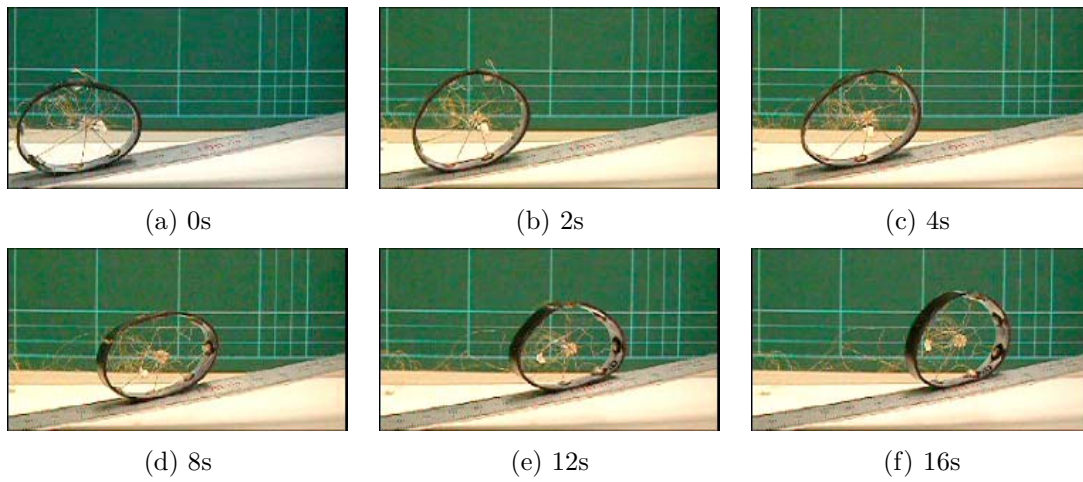


Fig.15: Circular soft robot climbing a slope

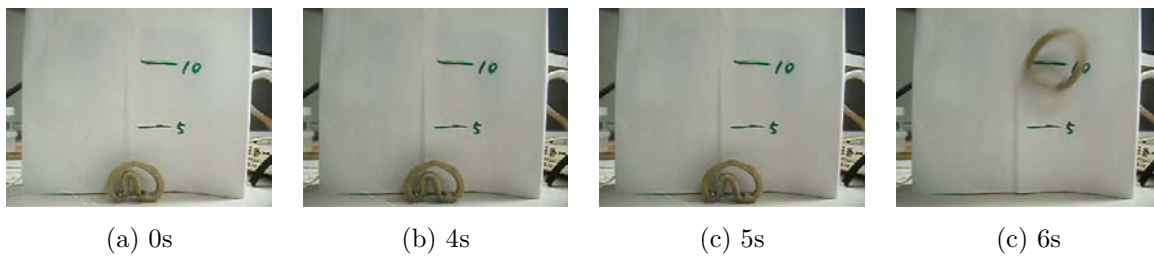


Fig.16: Circular soft robot jumping

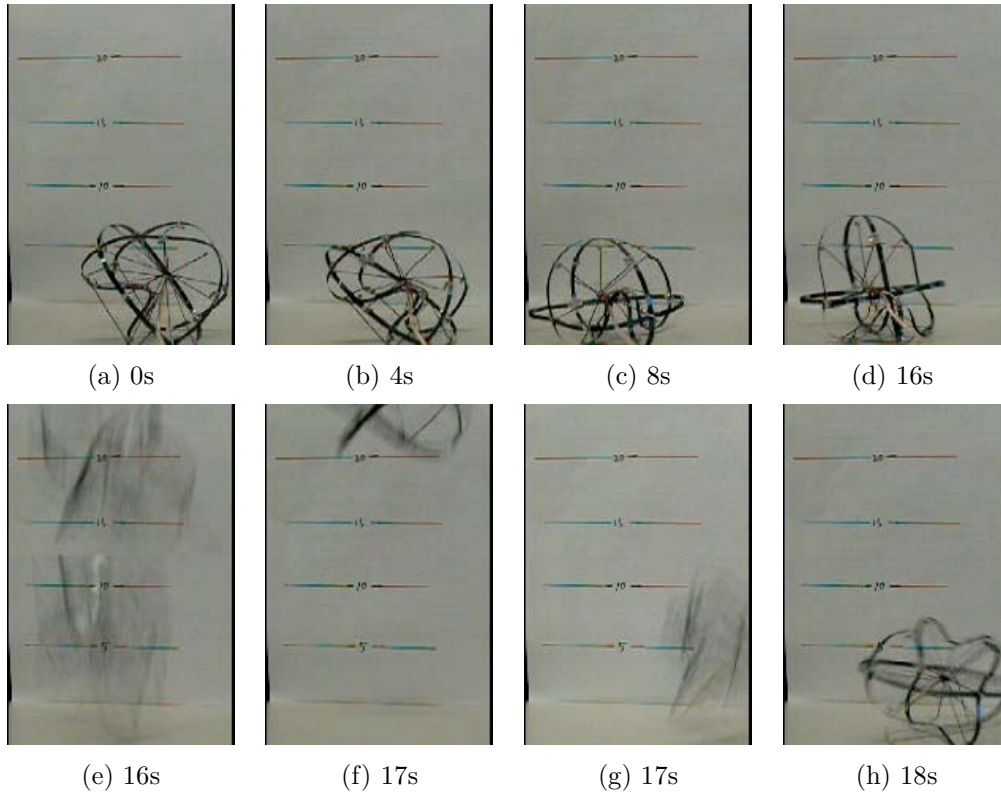


Fig.18: Spherical soft robot jumping