

# 移動跳躍ソフトロボット KOHARO

## Crawling and Jumping Soft Robot – KOHARO

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

Yuuta Sugiyama, Ayumi Shiotsu, Masashi Yamanaka, and Shinichi Hirai  
Dept. of Robotics, Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

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.

*Key Words:* crawling, jumping, locomotion, deformation

### 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。本報告では、柔軟なボディの変形を用いた手法を提案し、実演によりその性能を検証する。

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 [3-5]、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か、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。

本報告では、球形柔軟ロボットを試作し、その性能を実験を通して検証する。このロボットを「転がり (KO) 跳ねる (HA) ロボット (RO)」の略で、KOHARO と称する。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、球形柔軟ロボットのプロトタイプについて述べる。さらに、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。

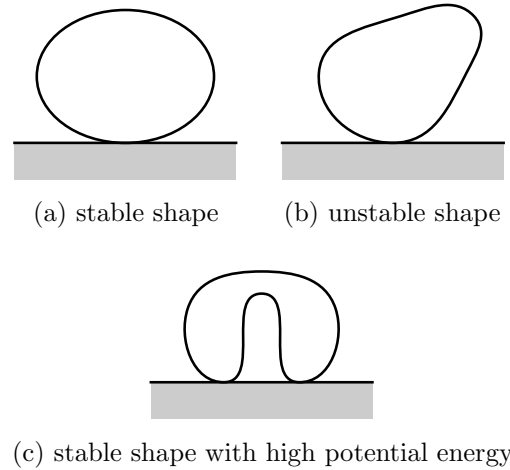


Fig.1 Principle of crawling and jumping

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. 球形ソフトロボット

柔軟ロボットの移動と跳躍の可能性を実証するために、二種類の球形ソフトロボットを試作した。試作したプロトタイプを、Fig.2 に示す。球形ソフトロボットのボディは、互いに直交する三本の円形殻から成る。Fig.2-(a) に示すプロトタイプ (prototype A) は、移動型である。これは、18本の SMA コイルとバネ綱の殻から成る。ロボットの直径は 200mm、自重は 137g である。球形ボディの

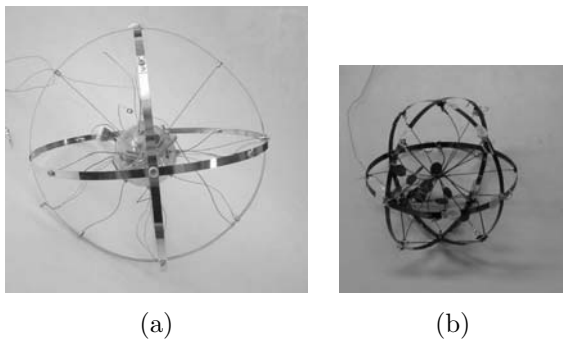


Fig.2 Prototypes of spherical soft robot

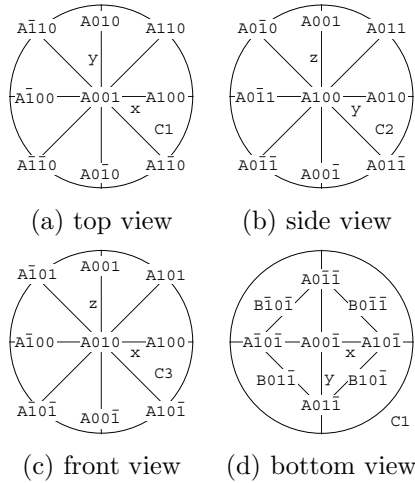


Fig.3 SMA coils attached to spherical prototype

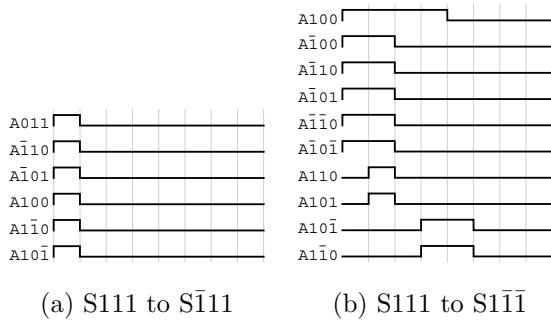


Fig.4 Voltage patterns for a crawling spherical prototype

中心に、SMA コイルの駆動回路とマイクロプロセッサ、シリアル通信回路が内蔵されている。回路の重量は 75g である。Fig.2-(b) に示すプロトタイプ (prototype B) は、跳躍移動型である。これは、22 本の SMA コイルとパネ網の殻から成る。ロボットの直径は 90mm、自重は 5g である。SMA コイルの駆動回路やコンピュータは、外部に設置されている。

SMA コイルの駆動パターンを指定するために、Fig.3 に示すように、SMA コイルに記号を付ける。Fig.3-(a), (b), (c) に、球形ソフトロボットの三面図を示す。球形の中心から円形殻の交点に向かう方向に、 $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸を定める。ここで、 $x$  軸の正方向のコイルを  $A100$ 、負方向のコイルを  $A\bar{1}00$  とよぶ。同様に、 $y$  軸方向のコイルを  $A010$  ならびに  $A0\bar{1}0$ ,  $z$  軸方向のコイルを  $A001$  ならびに  $A00\bar{1}$  とよぶ。交点間のコイルは、交点に対応するコイルのデジタル和で表す。たとえば、 $A100$  と  $A010$  の間のコイルを、 $A110$  とよぶ。このようにして、18 本の移動用コ

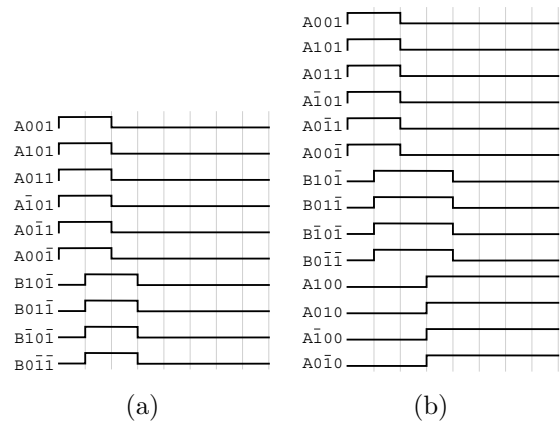


Fig.8 Voltage patterns for spherical prototype jumping

イルに記号を付ける。プロトタイプ B では、Fig.3-(d) に示すように、4 本の跳躍用コイルが、 $A00\bar{1}$  の周りに配置されている。コイル  $A00\bar{1}$  周りの回転を考慮して、4 本の跳躍用コイルを  $B10\bar{1}$ ,  $B01\bar{1}$ ,  $B\bar{1}0\bar{1}$ ,  $A0\bar{1}\bar{1}$  とよぶ。たとえば、コイル  $B10\bar{1}$  は、コイル  $A10\bar{1}$  の端点をその始点としている。

球面は、互いに直交する 3 個の円により、8 個の領域に分割できる。球形ソフトロボットの安定状態は、下部の領域により指定することができる。領域は、その三個の頂点のデジタル和で記述する。結局、安定状態は、 $S\bar{1}\bar{1}\bar{1}$ ,  $S1\bar{1}\bar{1}$ ,  $S\bar{1}1\bar{1}$ ,  $S11\bar{1}$ ,  $S\bar{1}11$ ,  $S111$ ,  $S111$  と表すことができる。

#### 4. 実験結果

球形ソフトロボットのプロトタイプを用いて、移動と坂登りならびに跳躍を行った結果を示す。

移動 Fig.4 に示す電圧パターンを与えると、プロトタイプは移動する。Fig.4-(a) に示す電圧パターンでは、安定状態に対応するセクションの稜線を越えるように移動する。そこで、この電圧パターンを、稜線パターンとよぶ。Fig.4-(b) に示す電圧パターンでは、安定状態に対応するセクションの頂点を通るように移動する。そこで、この電圧パターンを、頂点パターンとよぶ。稜線パターンと頂点パターンを交互に与えることで、球形ソフトロボットは直線に沿って移動することができる。Fig.5 に、プロトタイプ A の移動の様子を示す。Fig.6 に、プロトタイプ B 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。

坂登り プロトタイプ B に稜線パターンを与えると  $6^\circ$  の坂を、頂点パターンを与えると  $10^\circ$  の坂を登りことができる。Fig.7 に、 $10^\circ$  の坂登りの様子を示す。

跳躍 Fig.8 に示す電圧パターンにより、プロトタイプ B は跳躍する。Fig.8-(a) に示す電圧パターンにより、プロトタイプは 70mm 跳躍する。Fig.8-(b) に示す電圧パターンにより、プロトタイプは 180mm 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。この跳躍の様子を、Fig.9 に示す。

#### 5. 実演

愛知万博では、移動型プロトタイプ (prototype A) の視覚誘導と跳躍型プロトタイプ (prototype B) の跳躍を実演する。

視覚誘導のデモでは、カメラで複数のプロトタイプの位置と姿勢を求め、その結果をプロトタイプに送信することにより、複数のプロトタイプの協調的な運動を示す。移動型プロトタイプには 6 個の LED が取り付けられている。内部のマイクロプロセッサで LED の発光パターンを制御しつつ、外部のカメラと通信する。カメラは、複数枚の撮影画像から、プロトタイプの位置と姿勢を計算し、その結果をプロトタイプに送信する。プロトタイプ

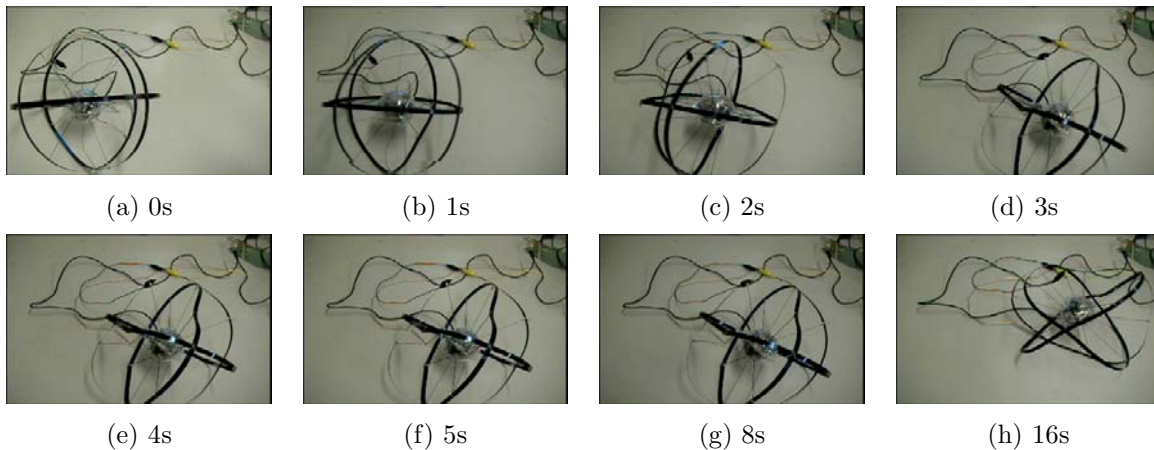


Fig.5 Spherical soft robot crawling (prptotype A)

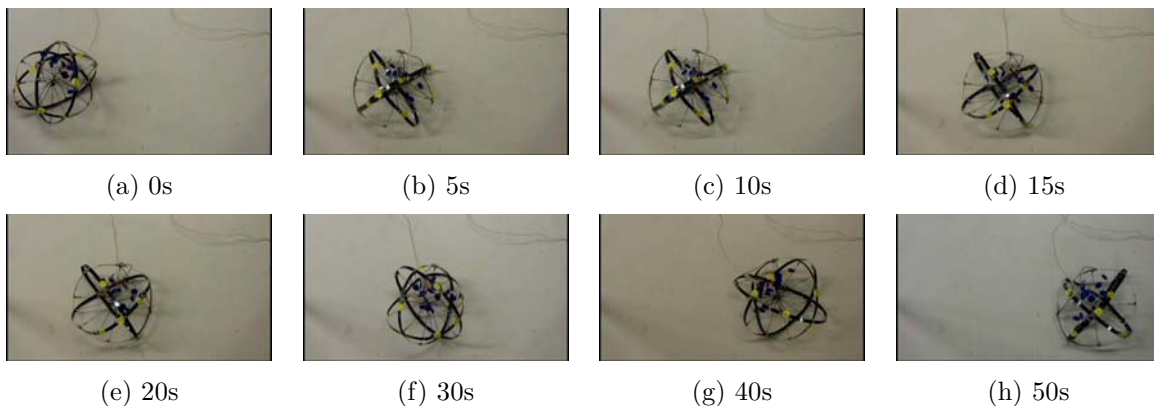


Fig.6 Spherical soft robot crawling (prototype B)

は、現在の位置と姿勢と目標の位置から、アクチュエータの駆動パターンを決定し、動作する。跳躍のデモでは、複数のプロトタイプ連続的な跳躍を示す。

## 6. おわりに

本報告では、球形ソフトロボットの移動と跳躍について述べた。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、球形ソフトロボットの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。

円形ソフトロボットの開発では、二次元シミュレーションを通して円形ソフトロボットのパフォーマンスを分析し、より良いパフォーマンスを示すハードウェアやアクチュエータの駆動パターンを得た [8]。現在、球形ソフトロボットの三次元シミュレーションを開発している。これにより、より速い移動、より高い跳躍のためのメカニズムや駆動パターンが得られると期待できる。

本報告で示した変形による移動と跳躍においては、ボディの力学特性が移動速度や跳躍高さに影響する。このような依存性を解析することにより、変形による移動と跳躍の力学を明確にし、柔らかい材料を含む機械システムや生物の分析につなげたい。

## 謝辞

本研究は、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。

## 【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) Sugiyama, Y. and Hirai, S., *Crawling and Jumping by a Deformable Robot*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.

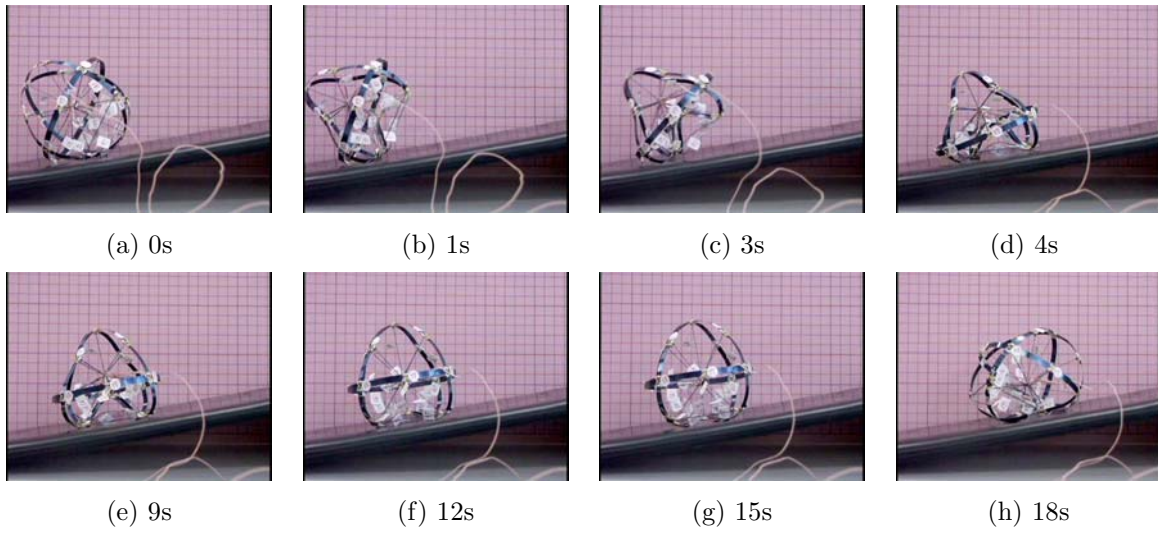


Fig.7 Spherical prototype climbing a slope (prototype B)

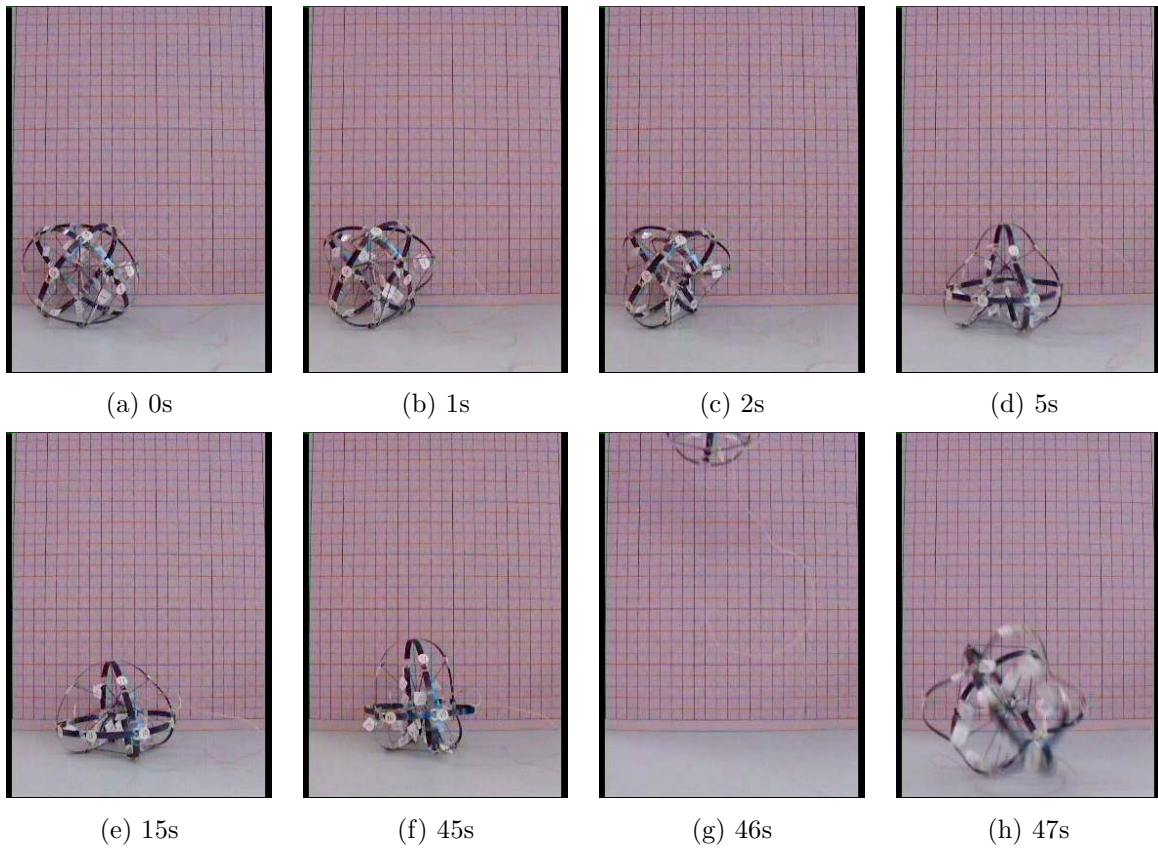


Fig.9 Spherical soft robot jumping (prototype B)