

柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍

杉山 勇太* 平井 慎一*

Soft Robots for Crawling and Jumping via Deformation

Yuuta Sugiyama* and Shinichi Hirai*

We describe crawling and jumping by the deformation of a soft robot. Locomotion over rough terrain has been achieved mainly by rigid body systems including crawlers and leg mechanisms. This paper presents an alternative method, one that uses deformation of a robot body. We employ soft actuators to controllably deform a robot body, enabling it to crawl and jump on terrain via charge and release of elastic potential energy of the body. We experimentally show that circular soft robots and spherical soft robots, which consist of an elastic shell made of rubber or spring steel and SMA (shape memory alloy) coils, can crawl on a flat terrain, climb up a slope, and jump over a terrain. We also apply a particle-based modeling to simulate the behavior of a circular soft robot.

Key Words: deformation, locomotion, crawl, jump

1. はじめに

不整地移動ロボットには、主にクローラーや脚メカニズムが使われている。これらのロボットは硬いボディを有している。本論文では、柔らかいボディの変形を用いた従来のメカニズムと異なる移動手法を提案する。

硬いボディを有する移動メカニズムは大きく重いため、人間に危害を加える恐れや姿勢が崩れ反転した際に戻りにくい欠点を抱えている。近年、反転から戻るメカニズムが研究されている [1, 2]。また、跳躍ロボットに関する研究が従来より行われており [3, 4]、近年は小惑星探査への応用 [5]、移動と跳躍により不整地を踏破するメカニズムの開発 [6]、なぞり型脚式ロボットの研究 [7] へ発展している。しかしながら、これらのメカニズムは複雑である。そのため、軽くシンプルなメカニズムで不整地走行を実現することが望まれている。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 [8-14]、足機構や柔軟ロボットの駆動に用いられている [15-17]。柔軟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。すなわち一般的に動作が遅く、移動や跳躍に必要な運動量や力積を生成することが難しい。代表的なソフトアクチュエータである形状記憶合金 (SMA) アクチュエータに関しては、従来より

特性の改善に関する研究が進められており [18, 19]、近年は冷却機構を付加することによる応答の向上が提案されている [20, 21] が、依然として移動や跳躍に必要な運動量や力積を生成することが難しい。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移動と跳躍を実現する手法を提案する。変形するボディにエネルギーを蓄積し、それを急速に放出することにより移動や跳躍に必要な運動量や力積を得る。また、変形を用いた移動と跳躍は、硬いボディ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. 変形による移動と跳躍の原理

本論文で提案する円形柔軟ロボットは円形であり、地面に置くと Fig. 1-(a) に示すように安定状態となる。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。円形のボディを Fig. 1-(b) のように変形させポテンシャルエネルギーに勾配が生じると、ロボットと地面の接触領域まわりに重力によるモーメントが発生する。このモーメントによりロボットは地面の上を転がりながら移動する。例

原稿受付

*立命館大学 ロボティクス学科

*Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

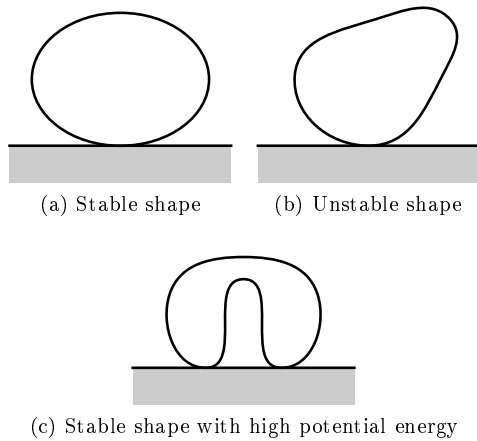


Fig. 1 Principle of crawling and jumping by deformation

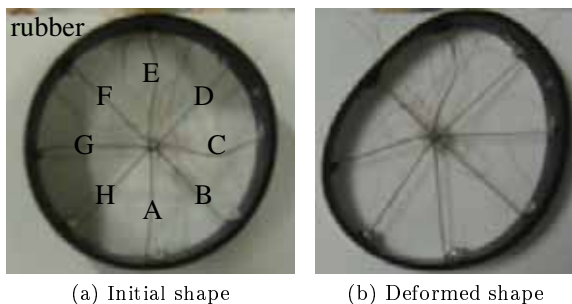


Fig. 2 Prototype of circular soft robot made of rubber

例えば, Fig. 1-(b) 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. 柔軟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. 以上のように提案する移動の方式は, 重力ポテンシャルエネルギーの勾配を用いている.

円形柔軟ロボットの跳躍原理を説明する. 動作すると収縮する柔軟アクチュエータを用いるとする. 一般にアクチュエータ自体の収縮速度は遅く, 跳躍に必要な力積を得ることができない. そこで, 円形のボディの変形を使うことによって跳躍する. 柔軟アクチュエータを動作させ収縮力を発生させると, 柔軟なボディは Fig. 1-(c) に示すように変形し, ボディに弾性ポテンシャルエネルギーを貯めることができる. アクチュエータが力を発生している限り, Fig. 1-(c) の形状は安定である. 一方, アクチュエータの動作を止め収縮力を失うとこの形状は不安定になり, ロボットボディは Fig. 1-(c) の形状から Fig. 1-(a) に示す安定形状へ変形する. この変形を十分に速く実現できれば, ロボットボディは十分に大きい力積を地面に与えることができ, 結果としてロボットは跳躍する. すなわち, この方法は弾性ポテンシャルエネルギーの蓄積と放出を用いている. 内部の柔軟アクチュエータは, 弾性エネルギーを貯めるために使われる. アクチュエータの収縮速度に制限されるため, 弾性エネルギーを蓄積するときロボットボディの変形速度は小さい. 一方, 弾性エネルギーを放出するとき, ロボットボディの変形速度はロボットボディの曲げ変形の粘弾性によって決まるため, 変形速度は弾性エネルギーを蓄積するときより大きくなる. したがっ

て, 変形するロボットボディが有する運動量はエネルギーを放出するときに大きくなり, 跳躍に必要な力積を実現することができる. なお, このような弾性エネルギーの蓄積と放出は, 物体捕獲に用いられている [22]. また, 昆虫の跳躍に見ることができる [23].

円形柔軟ロボットのプロトタイプを Fig. 2 に示す. Fig. 2-(a) に示すように, 円形柔軟ロボットは円形の弾性殻と内部に取り付けられた柔軟アクチュエータから構成される. このロボットには, 円の中心から円周に向かって 8 本の SMA コイルが取り付けられており, A から H とラベル付けされている. SMA コイルを収縮させると弾性殻が変形する. たとえば, SMA コイル F に電圧を印加し収縮させると, 円形柔軟ロボットの弾性殻は Fig. 2-(b) に示すように変形する. この円形柔軟ロボットでは弾性殻の材料に天然ゴムを使用した. 変形させるための柔軟アクチュエータとして, トキ・コーポレーション社製 SMA コイル BMX100 を採用した. 円形の弾性殻の直径は 40mm, ロボット全体の質量は 3.6g である. 一定のパターンに沿って SMA コイルの収縮と弛緩を行うことで, ロボットは移動と跳躍を行う.

3. 柔軟ロボットシミュレーション

3.1 円形殻のモデリング

本章では, 力学シミュレーションを通して, 柔軟ロボットの移動と跳躍の実現可能性を検証する. 円形柔軟ロボットのモデルを Fig. 3 に示す. モデリングにはパーティクルベースモデリング [24, 25] を採用した. パーティクルベースモデルでは, 連続体を質点の集合で表し各質点の運動方程式を解くことにより, 連続体の運動を近似的に求める. Fig. 3-(a) に示すように, 円形の弾性殻は 32 個の質点で表されている. 弾性殻の直径は, Fig. 2 に示すプロトタイプと同じ 40mm である. プロトタイプにおける弾性殻の質量 2.5g を 32 個の質点に等しく配分した. それぞれの SMA コイルは, 中心の質点と弾性殻上の一つの質点, ならびにそれらの間の 2 個の質点で表されている. 中心の質点は 8 本の SMA コイルに共通である. ロボット全体の質量から弾性殻の質量を引いた 1.1g の内, 0.3g を中心の質点に割り当て, 0.8g を SMA コイル上の 16 個の質点に等しく配分した. 円形柔軟ロボットの変形と運動は, 以上に述べた 49 個の質点の運動で表すことができる. たとえばシミュレーションで SMA コイル A と H を収縮させると, ロボットは Fig. 3-(b) のように変形する.

円形の殻を弾性殻とみなし, 弾性物体としてモデリングを行う. Fig. 4 に示すように弾性殻の長さ方向の伸縮は 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. 弾性殻上の隣接する二点 P_i と P_j の位置ベクトルを x_i と x_j で表す. 変位ベクトル $d_{i,j} = x_j - x_i$ を導入すると, 二点間の距離は $d_{i,j} = \|d_{i,j}\|$, その時間微分は $\dot{d}_{i,j} = \dot{d}_{i,j} \cdot e_{i,j}$ で表される. ここで, $e_{i,j} = d_{i,j}/d_{i,j}$ は単位ベクトルである. 伸縮の Voigt モデルが生成する力は

$$f_{i,j}^{\text{body}} = \left\{ k_{\text{body}}(d_{i,j} - d_{i,j}^{\text{init}}) + b_{\text{body}}\dot{d}_{i,j} \right\} e_{i,j}$$

である. ここで $d_{i,j}^{\text{init}}$ は Voigt モデルの初期長さを表す. 質点 P_i

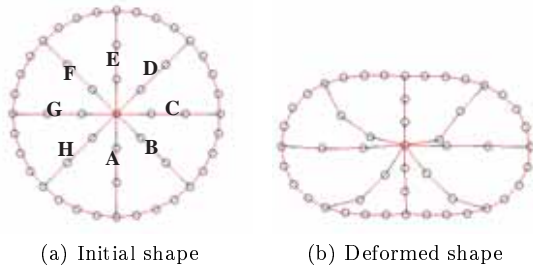


Fig. 3 Model of circular soft robot

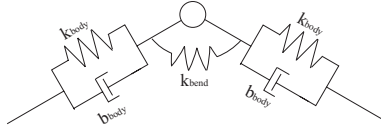


Fig. 4 Model of circular shell

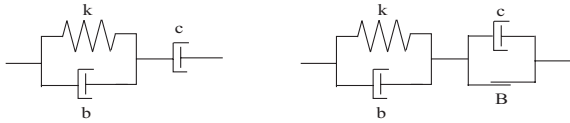


Fig. 5 Two models of SMA coil

には作用 $f_{i,j}^{body}$ が、 P_j には反作用 $-f_{i,j}^{body}$ が作用する。曲げ変形の弾性は k_{bend} で表す。質点 P_j の両端の質点を P_i と P_k で表す。質点 P_j の曲げ角は

$$\theta_j = \arctan \left\{ \frac{\mathbf{d}_{i,j} \times \mathbf{d}_{j,k}}{\mathbf{d}_{i,j} \cdot \mathbf{d}_{j,k}} \right\}$$

で与えられる。曲げ変形の弾性は、質点 P_j まわりに $\tau_j = -k_{bend}\theta_j$ のモーメントを発生する。ベクトル $\mathbf{e}_{i,j}$ と $\mathbf{n}_{i,j}$ が右手系を成すように単位ベクトル $\mathbf{n}_{i,j}$ を定める。モーメント τ_j は、質点 P_j 、 P_i 、 P_k に作用する等価な力 $(\tau_j/d_{i,j})\mathbf{n}_{i,j} + (\tau_j/d_{j,k})\mathbf{n}_{j,k}$ 、 $(\tau_j/d_{i,j})\mathbf{n}_{i,j}$ 、 $(\tau_j/d_{j,k})\mathbf{n}_{j,k}$ に置き換えることができる。

Fig. 2 に示す円形柔軟ロボット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。また $d_{i,j}^{init}$ は、Fig. 3-(a) に示す初期形状において円形殻を近似する 32 角形の一辺の長さである。円形柔軟ロボットのシミュレーションでは、これらの値を用いる。

3.2 SMA コイルのモデリング

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性を表せるように、円形殻のモデリングとは異なり、アクチュエータはレオロジー物体 [26] としてモデリングする。ここでは、SMA コイルをスライダ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力増加速度、収縮力減少速度、最大収縮率、最大収縮力をモデルパラメータとして指定することができる。

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. 5-(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。また、Voigt 要素の初期長さを x_v^{init} とする。Voigt 要素の初期長さが最大収縮時の長さとなる。三要素モデルは、次式のように定式化できる。

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

$$f_{pas} = -k(x_v - x_v^{init}) - b\dot{x}_v \quad (2)$$

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

ここで、 f_{pas} は、三要素モデルが発生する力を表す。伸張方向に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. 5-(b) に示すスライダ付き三要素モデルを採用する。スライダの挙動は、力限界 B で定められる。スライダ付き三要素モデルでは、(3) 式の代わりに次式を用いる。

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

ここで、 f はスライダ付き三要素モデルに作用する外力を表す。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ので、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。

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

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できる。力 $F(t)$ の値は、区間 $[0, F_{max}]$ の範囲で変化する。前述のように円形柔軟ロボットのアクチュエータとして、トキ・コーポレーション社製 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 BMX100 に対して実験的に同定し、 $k = 50\text{N/m}$ 、 $b = 0.1\text{N}/(\text{m/s})$ 、 $c = 10\text{N}/(\text{m/s})$ 、 $B = 62.5\text{N}$ 、 $D_{on} = D_{off} = 150\text{mN/s}$ 、 $F_{max} = 150\text{mN}$ を得た。すなわち最大収縮力は 150mN である。初期長さ x_v^{init} は、全体の長さの 2 分の 1 に設定した。

移動や跳躍をシミュレーションするとき、ロボットは床と接触する。床とロボットの間の垂直抗力を Voigt 要素を用いてモデル化する。ロボットの質点が床に侵入すると Voigt 要素が働き始める。また、Voigt 要素が発生する力を垂直抗力として、動摩擦や静止摩擦が発生する。シミュレーション内では、仮想的な床のフォークト要素の弾性係数は $k_{ground} = 1000\text{N/m}$ 、粘性係数は $b_{ground} = 1\text{N}/(\text{m/s})$ 、動摩擦係数 0.3、静止摩擦係数

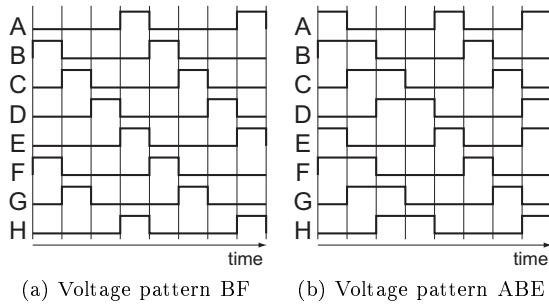


Fig. 6 Voltage patterns applied to SMA coils

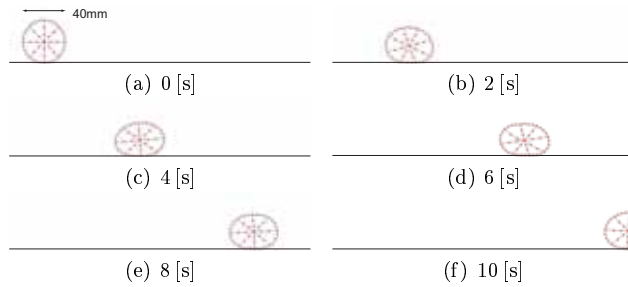


Fig. 7 Simulation of circular soft robot crawling

0.5 とした．弾性係数と摩擦係数は，スチール製のテーブルを対象として実験的に求めた．粘性係数はシミュレーションが振動的にならない範囲で適当に定めた．

結局，弾性殻上の質点には，弾性殻の伸縮を表す Voigt モデルによる力と曲げ弾性要素に起因する力ならびに重力が作用する．さらに，床と接触している質点には，床を表す Voigt モデルによる力と摩擦力が作用する．SMA コイル上の質点には，(5) 式の時間積分により与えられる力と重力が作用する．すべての質点の運動方程式を数値的に解くことにより，円形柔軟ロボットの変形と運動を計算することができる．

3.3 平面移動シミュレーションの結果

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. 6 に示すように，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. 6-(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. 6-(b) に示すパターン ABE では，最初の時間区間で A，B，E に，次の時間区間で B，C，F に電圧を印加する．パターン BF で各 SMA コイルを制御した場合の円形柔軟ロボットの移動のシミュレーション結果を Fig. 7 に示す．8 個の SMA コイルの制御により，円形柔軟ロボットは平面上を移動することができる．

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．パターン BF，BG，FG ならびに BFG に対して，ステップ間隔を変えながら 10s で進む距離を計算した結果を Fig. 8 に示す．図の横軸は 1 ステップ当たりの時間を表す．図に示すように，ステップ間隔が短いほど移動量が大きいが，ある時間を下まわると移動量が小さくなる．また，電圧パターン BF でステップ間隔 0.2s が，計算した中では最良である．以上のようにシミュレーションを通して，移動に適切な電圧パターンとス

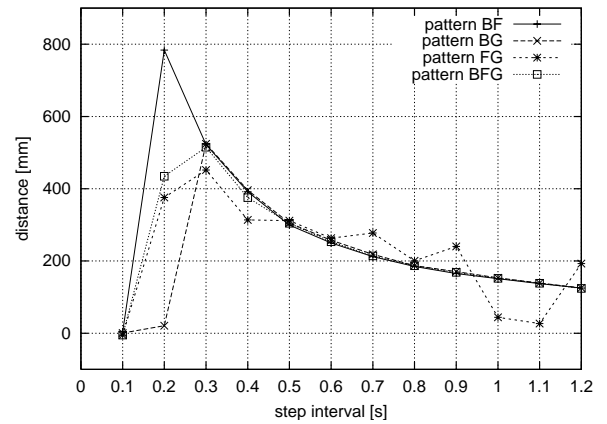


Fig. 8 Crawling distance over 10 [s]

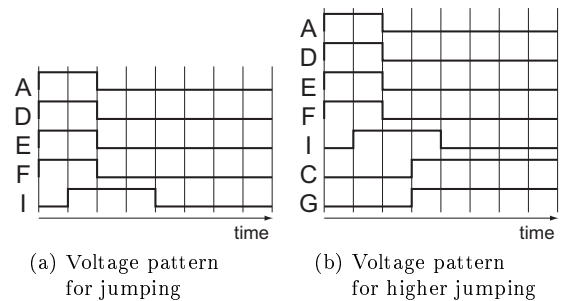


Fig. 9 Voltage patterns for circular soft robot jumping

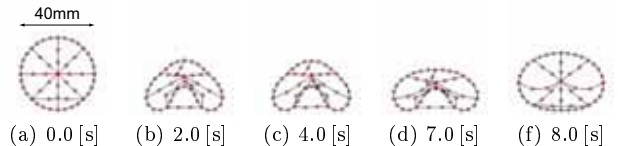


Fig. 10 Simulation of jumping with small elastic coefficient for bending

テップ間隔を求めることができる．

3.4 跳躍シミュレーションの結果

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 SMA コイル I を B と H の端点の間に取り付ける．Fig. 9-(a) に示す電圧パターンを，SMA コイルに印加することで跳躍を実現する．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．この形状で跳躍に必要なポテンシャルエネルギーが貯まる．しかしながら，すべてのコイルを一度に弛緩させると，殻が復元しようとする方向とは逆方向に SMA コイル A，D，E，F の収縮力が働くため，十分な速度でポテンシャルエネルギーを解放できない．そのため，跳躍に必要な力が得られず跳躍できない．そこで，先に 4 個の SMA コイルの印加電圧を切り十分弛緩させた後に，コイル I の印加電圧を切

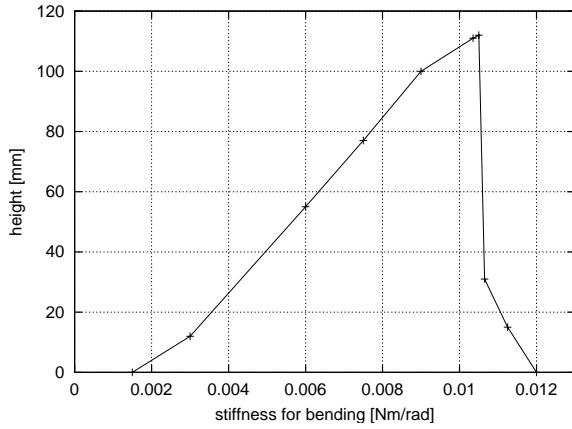


Fig. 11 Height of jumping obtained through simulations



Fig. 12 Simulation of circular soft robot jumping

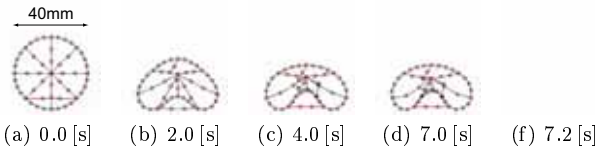


Fig. 13 Simulation of jumping with large elastic coefficient for bending

ることによってこの問題を解決する。コイル I を弛緩させると、B と H の間が徐々に広がり、ある時間に大きく変形している部分が瞬間的に元の形状に戻り跳躍できる。跳躍シミュレーションでは跳躍量を、ロボットの中心が重力方向に移動した距離で測る。

先に同定した曲げ変形の弾性係数 $k_{bend} = 0.0015 \text{ Nm/rad}$ を用いて跳躍シミュレーションを行ったが、跳躍待機形状に変形することができなかった。これは SMA コイルの収縮力が不足していることを意味する。そこで、トキ・コーポレーション社製 SMA コイル BMX200 を用いることを前提とし、跳躍のシミュレーションを行う。この SMA コイルのモデルパラメータの値を実験的に同定し、 $D_{on} = D_{off} = 600 \text{ mN/s}$ 、 $F_{max} = 600 \text{ mN}$

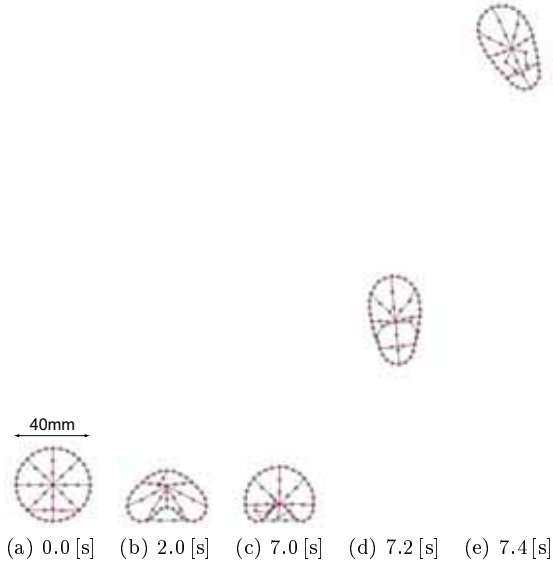
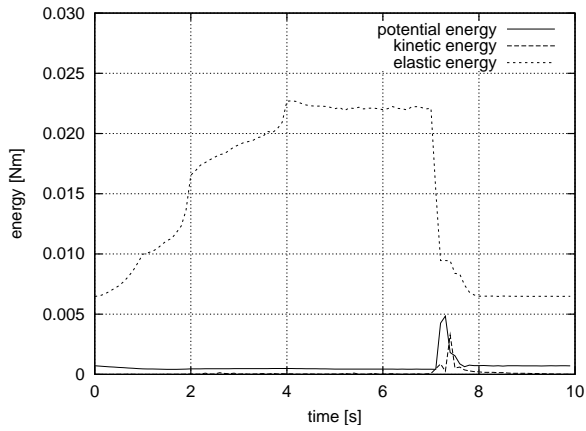


Fig. 14 Simulation of circular soft robot jumping higher

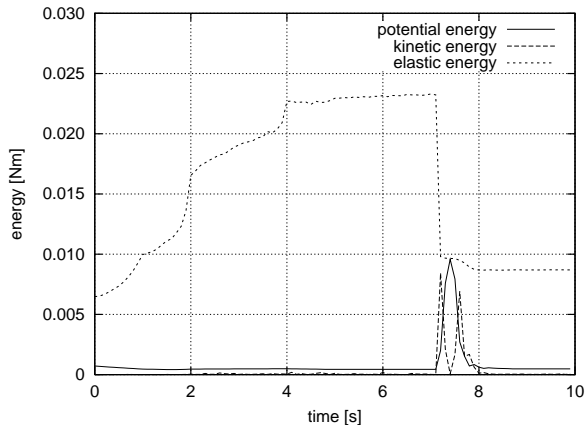
を得た。すなわち、BMX200 の収縮力は BMX100 の収縮力の約 4 倍の 600mN である。それ以外のモデルパラメータの値は、BMX100 のパラメータ値とほぼ等しい。SMA コイル BMX200 のモデルパラメータを用いてシミュレーションを行った結果、ロボットは、Fig. 10 に示すように、跳躍待機形状には変形可能だが、跳躍ができなかった。その理由として、十分な弾性ポテンシャルエネルギーを蓄えることができなかったことが考えられる。材料や寸法を変更すると曲げ弾性係数 k_{bend} の値が変わるので、跳躍が可能な材料や寸法を求めるために、SMA コイルの特性は BMX200 における値に固定し、 k_{bend} の値を変えてシミュレーションを行った。この場合の跳躍量を Fig. 11 に示す。弾性係数 $k_{bend} = 0.0105 \text{ Nm/rad}$ のとき、112mm の跳躍量を示した。このときのシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。SMA コイルの PWM 制御によって、円形柔軟ロボットは重力下で跳躍が可能である。Fig. 11 から、曲げ変形の弾性が大きいほど跳躍量が増加するが、ある値を超えると急速に減少することがわかる。たとえば $k_{bend} = 0.001065 \text{ Nm/rad}$ のときには、Fig. 13 に示すように跳躍待機形状を保持できずほとんど跳躍ができなかった。さらに、 $k_{bend} = 0.012 \text{ Nm/rad}$ のときには、跳躍待機形態に変形できなかった。これは、アクチュエータの収縮力により、跳躍が可能となる曲げ変形の弾性の上限が決まることを示唆する。

Fig. 9-(a) の跳躍パターンに 1 ステップ追加することで、跳躍量を増加させることができる。そのときのパターンを Fig. 9-(b) に、シミュレーション結果を Fig. 14 にしめす。シミュレーション内でロボットは 236mm 跳躍することができた。

Fig. 9-(a) のパターンと Fig. 9-(b) の C と G を含めたパターンでは、跳躍量に 2 倍近い差がある。その違いの理由を調べるため、シミュレーション内の柔軟ロボットのエネルギーの変化を計算した。2 つのパターンの位置エネルギー、運動エネルギー、曲げ弾性エネルギーの変化を Fig. 15 に示す。弾性エネルギーの最大値にはそれほど違いが無く、Fig. 9-(a) のパター



(a) Energy during normal jumping



(b) Energy during higher jumping

Fig. 15 Potential, kinetic, and elastic energies during jumping

ンで 0.0208Nm , Fig. 9-(b) のパターンで 0.0222Nm であった。差は 0.0012Nm であり、曲げ弾性エネルギー全体の 7% 以下となっている。弾性エネルギーを放出する時刻に着目し、その時刻近くの弾性エネルギーの変化を Fig. 16 に示す。グラフを直線近似し、直線の傾きから、単位時間当たりのエネルギーの放出率を求める。その結果、Fig. 9-(a) のパターンにおけるエネルギーの放出率は -0.95Nm/s , Fig. 9-(b) のパターンの放出率は -1.70Nm/s となり、跳躍量が増加するパターンの方が 1.8 倍速くエネルギーを放出している。これは、跳躍量を増やすためには、エネルギーの大きさとともに、エネルギーを放出する速度も重要であることを意味する。

なお、跳躍シミュレーションで用いたモデルでは、前節で用いたモデルに SMA コイル I を追加している。このモデルにおいては、跳躍と移動の両方が可能であることを確認している。

4. 円形柔軟ロボットの実験結果

4.1 平地移動

Fig. 2-(a) に示す円形柔軟ロボットの性能を実験的に検証する。移動の際は、シミュレーション同様、Fig. 6-(a) に示すパターン BF を SMA コイルに印加する。パターン BF での移動の様子を Fig. 17 に示す。図に示すとおり、円形柔軟ロボット

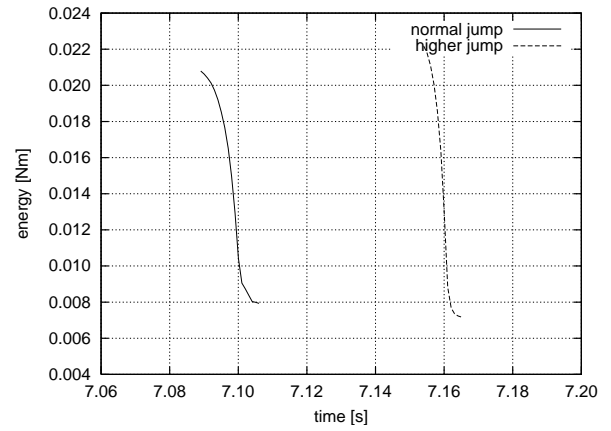


Fig. 16 Elastic energy releasing rate of time during jump

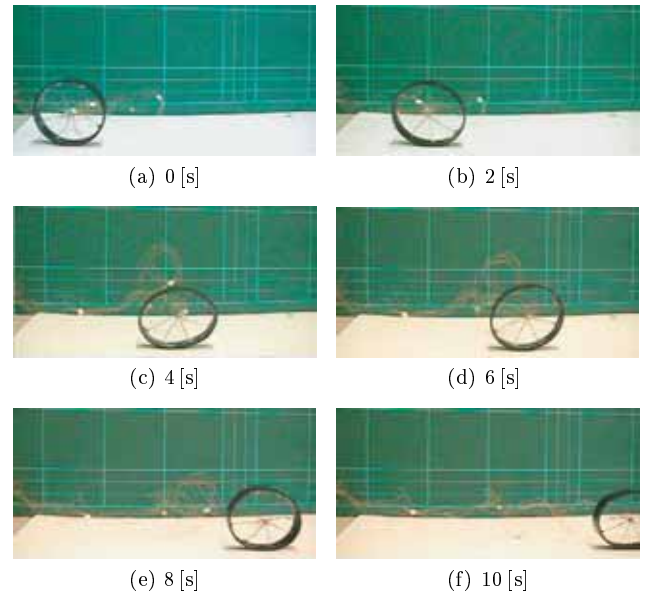


Fig. 17 Circular soft robot crawling

は平面移動できる。パターン BF のステップ間隔を変化させた場合に 10s 間でロボットが移動する距離を、シミュレーションと実機と比較した結果を Fig. 18 に示す。結果がほぼ一致している。なお、本実験での最大移動速度は 26mm/s であった。一秒間に進む距離は、円形柔軟ロボットの直径の 65% に相当する。

4.2 坂道移動

Fig. 6-(b) の電圧パターン ABE を SMA コイルに印加することで、坂道を登ることができる。Fig. 19 に 15° の坂道を登る様子を示す。坂道は金属製のスケールである。この場合、最大 20° の坂道をロボットは登ることができることを確認した。

4.3 跳躍

ゴムの殻を用いた円形柔軟ロボットのプロトタイプでは、跳躍することができなかった。その理由として、十分な曲げ弾性がないことが考えられる。そこで、パネ鋼を円形の殻に用いて、円形柔軟ロボットを試作した。パネ鋼を用いることで、十分な曲げ弾性と塑性変形にくい特性を殻に持たせることができる。幅 12mm 、厚さ 0.1mm のパネ鋼を用いた円形柔軟ロボットの

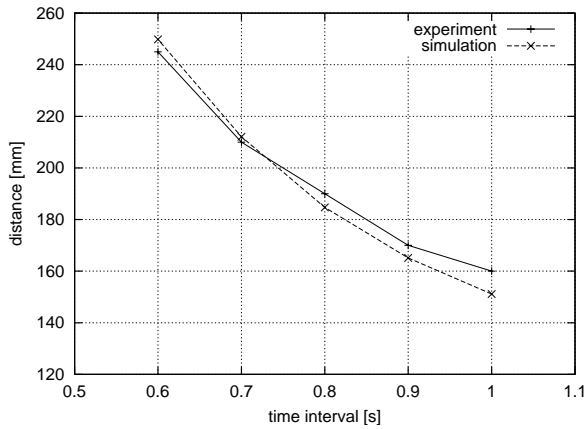


Fig. 18 Comparison of crawling distance between simulation and experiment

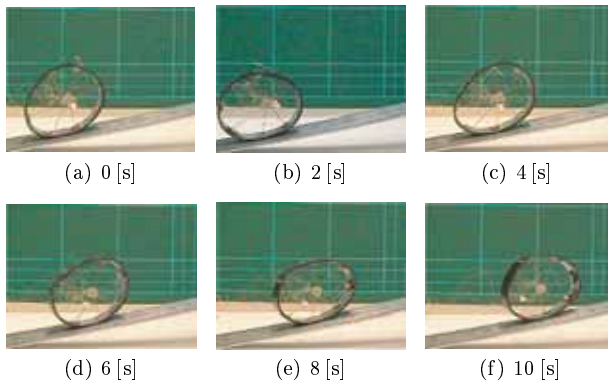


Fig. 19 Circular soft robot climbing a slope

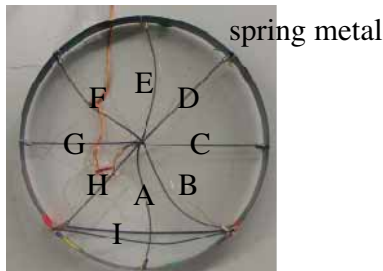


Fig. 20 Prototype of circular soft robot made of spring metal

プロトタイプを Fig. 20 に示す．曲げ弾性を増した分，収縮力の強い BMX200 を用いた．第 3.4 節で述べた通り，BMX200 の収縮力は BMX100 の収縮力の約 4 倍の 600mN である．8 本の SMA コイルを円の内側に取り付け，さらに，跳躍用 SMA コイル I を円の外側を通して B と H の端点の間に取り付けてある．直径は 90mm，質量は 4.0g である．跳躍の過程を横からビデオカメラで撮影し，ロボットの最下部と床との距離を求め，その距離を跳躍実験における跳躍量とする．

Fig. 9-(a) に示す電圧パターンを SMA コイルに印加した．Fig. 21 に示すように，円形柔軟ロボットは跳躍できる．本実験では，step1 = 4s，step2 = 3s，step3 = 10s とした場合，バネ鋼の殻を用いたプロトタイプは 160mm 跳躍することができた．これは円形柔軟ロボットの直径の約 1.7 倍に相当する．シ

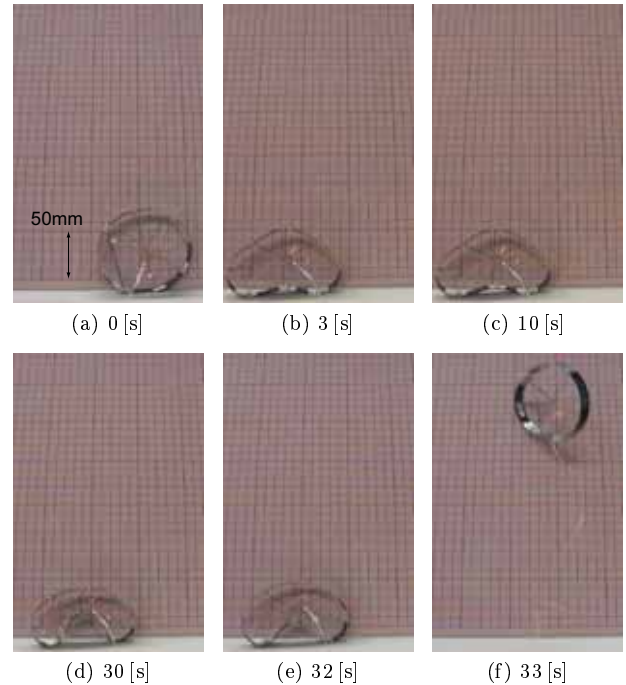


Fig. 21 Circular soft robot made of spring metal jumping

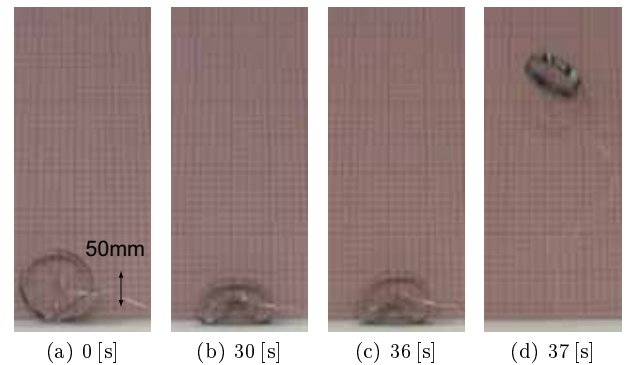


Fig. 22 Circular soft robot made of spring metal jumping higher

ミュレーションで跳躍量が増加した，Fig. 9-(b) に示す電圧パターンを SMA コイルに印加した．そのときの跳躍を Fig. 22 に示す．特に，step1 = 4s，step2 = 3s，step3 = 15s，step4 = 3s とした場合，ロボットは 300mm 跳躍することができ，跳躍量が 2 倍近く増加した．跳躍量は円形柔軟ロボットの直径の約 3.3 倍に相当する．

5. 球形柔軟ロボットの実験結果

円形柔軟ロボットは，円形という形状から，移動方向が前進後退に限られ，十分な不整地走行ができない．この問題を解決するために，球形柔軟ロボットを製作した．基本形状は球形であり，柔軟アクチュエータによって球形のボディを変形させる．柔らかい球形のボディを変形させることによって，多方向への移動と跳躍を実現し不整地を走行する．三つの円形フレームを互いに直交するように組み合わせることで，Fig. 23 に示す球形柔軟ロボットのプロトタイプを試作した．球の殻を構成する三つ

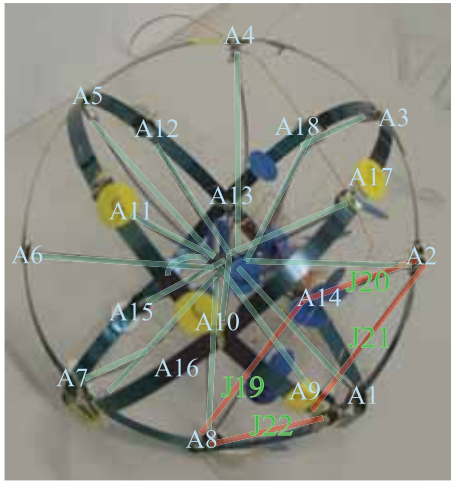


Fig. 23 Prototype of spherical soft robot

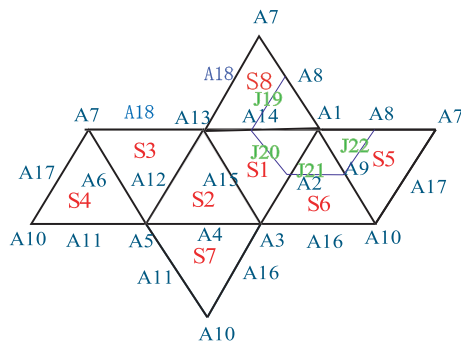


Fig. 24 SMA coils attached to spherical soft robot

のフレームは、幅4mm、厚さ0.1mmのパネ鋼である。Fig. 23に示すように、中心から18本のBMX200を放射状に取り付けてある。各SMAはA1からA18の記号で区別する。また、跳躍用SMAコイル4本が、SMAコイルA2とA9、A9とA8、A8とA14、A14とA2のそれぞれの端末間に取り付けてあり、J19からJ22の記号で区別する。ロボットの直径は90mm、自重は5gである。

5.1 平面移動

球形柔軟ロボットのプロトタイプは完全な球形でなく、三つの円形フレームを組み合わせたロボットである。そのため、水平な床に対して安定な状態は三つのフレームが床に接する場合である。プロトタイプにはこの安定状態が8つ存在する。この安定状態間の遷移により移動を実現する。三フレーム型球形柔軟ロボットの展開図をFig. 24に示す。記号A1からJ22はSMAコイルの付いている位置を示している。8つの安定状態をS1からS8と呼ぶ。一つの安定状態から他の安定状態への遷移を連続的に行うことによって、移動を実現する。三フレーム型球形柔軟ロボットの安定状態からの移動方法は、二つに分類できる。一方は、床と接しているフレームの方向に進むパターンであり、もう一方は、フレームとフレームの交点方向に進むパターンである。前者をエッジパターン、後者をインターセクションパターンと呼ぶ。

エッジパターンの例として、安定状態S1からS2への移動

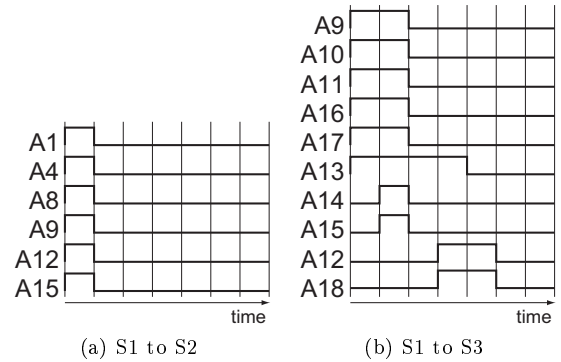


Fig. 25 Voltage patterns for spherical soft robot crawling

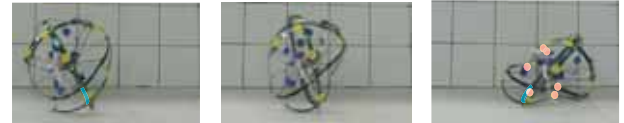


Fig. 26 Deformation in transition through arc



Fig. 27 Deformation in transition via vertex

を示す。移動の様子をFig. 26に示す。SMAコイルA2, A14, A15の端点に対応するフレームが床に接しており、Fig. 26-(a)の状態から、A15が接続されている右のフレームの向きに移動する。その場合、Fig. 25-(a)に示すパターンをSMAコイルに印加することによって、S1からS2へ移動できる。各ステップの時間を短くすることで、移動速度を速めることができる。本実験での最小のステップ時間はstep1 = 3s, step2 = 4sであり、一回の遷移での移動量60mmから移動速度は8.5mm/sと計算できる。すなわち一秒間に進む距離は、球形柔軟ロボットの直径の約9%に相当する。

インターセクションパターンの例として、安定状態S1からS3への移動を示す。移動の様子をFig. 27に示す。Fig. 27-(a)の状態から、SMAコイルA13が接続されている交点の方向に進む。その場合、Fig. 25-(b)に示すパターンをSMAコイルに印加することによって、S1からS3へ移動できる。本実験での、各ステップの最小時間は、step1 = 2s, step2 = 1s, step3 = 4s, step4 = 1s, step5 = 6s, step6 = 10sであり、一回の遷移での移動量90mmから移動速度は3.7mm/sと計算できる。すなわち一秒間に進む距離は、球形柔軟ロボットの直径の約4%に相当する。

5.2 坂道移動

水平面移動で示した二つの移動パターンで、坂道を登ること

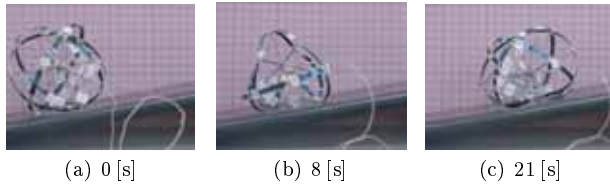


Fig. 28 Sphrical soft robot climbing a slope by a transition via vertex

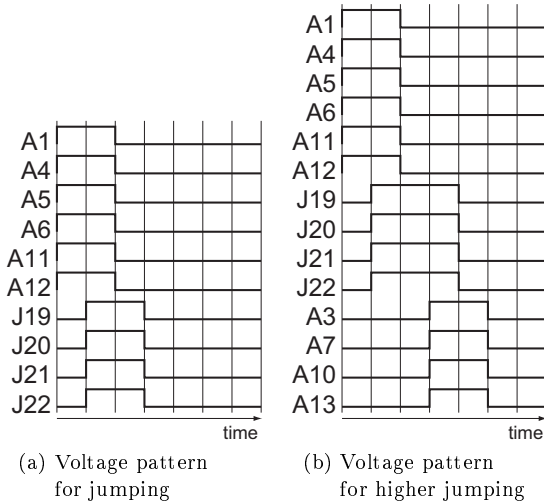


Fig. 29 Voltage patterns for sphrical soft robot jumping

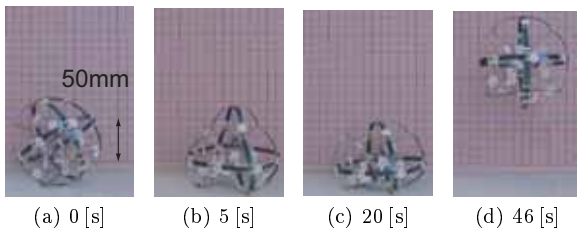


Fig. 30 Sphrical soft robot jumping

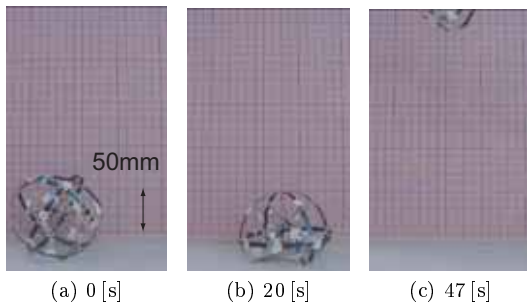


Fig. 31 Sphrical soft robot jumping higher

ができる．インターセクションパターンでの坂道移動の様子を Fig. 28 に示す．坂道はプラスチックの板である．エッジパターンでは 6° ，インターセクションパターンでは 10° の坂道を登ることができることを確認した．

5.3 跳躍

球形柔軟ロボットは，円形柔軟ロボットと同様に跳躍が可能である．Fig. 29-(a) に示す跳躍パターンを SMA コイルに印加することで，跳躍することができる．跳躍の様子を Fig. 30 に

示す．本実験では，step1 = 4s，step2 = 3s，step3 = 30s として SMA コイルを制御した．そのときの跳躍量は 70mm であった．これは球形柔軟ロボットの直径の約 0.7 倍に相当する．

円形柔軟ロボットと同様に，跳躍待機形状で幾つかの SMA に電圧を印加することで，球形柔軟ロボットの跳躍量を増やすことができる．球形柔軟ロボットの跳躍量増加のパターンを Fig. 29-(b) に示す．通常の跳躍パターンに A3, A7, A10, A13 の制御が追加されている．Fig. 29-(b) の電圧パターンで SMA コイルを制御した場合の跳躍の様子を Fig. 31 に示す．跳躍待機形状で A3, A7, A10, A13 に電圧を印加することで，Fig. 31-(c) に示すように床に触れている跳躍変形部の曲率がさらに大きくなっている．この状態で，跳躍用 SMA コイル J19, J20, J21, J22 の電圧を切ると，高く跳躍させることができる．本実験では step1 = 4s，step2 = 3s，step3 = 30s，step4 = 3s として SMA コイルを制御した．このとき，ロボットは 180mm 跳躍することができ，跳躍量が 2.5 倍に増加した．跳躍量は球形柔軟ロボットの直径の約 2 倍に相当する．

6. おわりに

本論文では，柔軟なロボットの変形による移動と跳躍を提案した．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，スライダー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，円形柔軟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，円形柔軟ロボットと球形柔軟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．円形柔軟ロボットのプロトタイプは，一秒間に直径の約 65% 移動し， 20° の坂を登り，直径の 3.3 倍の高さに跳躍することができた．球形柔軟ロボットのプロトタイプは，一秒間に直径の約 9% 移動し， 10° の坂を登り，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．1) パーティクルベースモデルは，パラメータの値がモデルの材料のみならず寸法やモデルの質点の数に依存するという欠点を持つ．そこで，微分幾何座標に基づく線状物体モデリング [27] を適用する．この手法では，パラメータの値がモデルの材料のみに依存し寸法やモデルの質点の数には依存しないため効率的なモデリングが可能である．線状物体モデリングを基に球形柔軟ロボットの移動や跳躍のシミュレーションを実現する．2) 本論文では SMA コイルの最大収縮力の ON/OFF 制御を使用し，収縮量や収縮力を制御していない．SMA コイルの収縮力や収縮量を制御することにより，円形柔軟ロボットや球形柔軟ロボットの性能が向上するか検討する．3) SMA コイルは収縮力を発生するが，曲げモーメントを発生する柔軟アクチュエータが開発されている．このような柔軟アクチュエータを用いて移動や跳躍が可能な柔軟ロボットを構築する．

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．

参考文献

- [1] U. Saranlı, M. Buehler, and D. E. Koditschek, *RHex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot*, Int. J. of Robotics Research, vol. 20, no. 7, pp.616–631, 2001.
- [2] M. Yim, C. Eldershaw, Y. Zhang, and D. Duff, *Limbless Conforming Gaits with Modular Robots*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
- [3] M. H. Raibert, *Legged Robots that Balance*, The MIT Press, Cambridge, 1986.
- [4] J. K. Hodgins, and M. H. Raibert, *Biped Gymnastics*, Int. J. of Robotics Research, vol. 9, no. 2, pp.115–132, 1990.
- [5] E. Hale, N. Schara, J. Burdick, and P. Fiorini, *A Minimally Actuated Hopping Rover for Exploration of Celestial Bodies*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, April, pp.420–427, 2000.
- [6] 塚越, 森, 佐々木, 田中, 北川, 瓦礫踏破能力を向上させる跳躍・回転移動体の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), vol. 70, no. 692, pp.1068–1076, 2004.
- [7] M. Higashimori, M. Harada, M. Yuya, I. Ishii, and M. Kaneko, *Dimensional Analysis Based Design on Tracing Type Legged Robots*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3744–3749, Barcelona, April, 2005.
- [8] 田所, 柔らかいアクチュエータ, 日本ロボット学会誌, vol. 15, no. 3, pp.318–322, 1997.
- [9] 三宅, 人工筋肉. 亀井ブックサービス, 1998.
- [10] R. Pelrine, R. Kornbluh, Q. Pei, and J. Joseph, *High-speed Electrically Actuated Elastomers with Strain Greater Than 100%*, Science, vol. 287, February, pp.836–839, 2000.
- [11] Proc. of the First Conference on Artificial Muscles, December, 2001.
- [12] 釜道, 金田, 山北, 安積, 羅, イオン導電性高分子を用いた直動人工筋アクチュエータの開発 – 歩行ロボットへの応用を目指して –, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3F37, 2002.
- [13] T. Hirai, Z. Uddin, J. Zheng, M. Yamaguchi, S. Kobayashi, M. Watanabe, and H. Shirai, *Quick and large electrostrictive deformation of non-ionic soft polymer materials*, Smart Structures and Materials 2003, Proc. SPIE, vol. 5051, pp.198–206, 2003.
- [14] S. Ashley, *Artificial Muscles*, Scientific American, October, pp.34–41, 2003.
- [15] 大武, 鏡, 稲葉, 井上, ヒト型ゲルロボットの全身変形運動, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1435–1436, 2000.
- [16] 嘉敷, 横井, 兪, アメーバ状ロボットへのアプローチ, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 7, pp.843–849, 2001.
- [17] M. Otake, Y. Kagami, M. Inaba, and H. Inoue, *Motion design of a starfish-shaped gel robots made of electroactive polymer gel*, Robotics and Autonomous Systems, vol. 40, pp.185–191, 2002.
- [18] 三輪, 形状記憶アクチュエータ, 日本ロボット学会誌, vol. 2, no. 4, pp.330–337, 1984.
- [19] 広瀬, 生田, 佐藤, 形状記憶合金アクチュエータの開発 (σ 機構の導入による出力特性の改善), 日本ロボット学会誌, vol. 4, no. 6, pp.618–628, 1986.
- [20] B. Selden, K.-J. Cho, and H.-H. Asada, *Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4931–4936, New Orleans, April, 2004.
- [21] R. Featherstone and Y.-H. Teh, *Improving the Speed of Shape Memory Alloy Actuators by Faster Electrical Heating*, Proc of Int. Symp. on Experimental Robotics, Singapore, June, 2004.
- [22] M. Kaneko, R. Takenaka, M. Higashimori, A. Namiki, and M. Ishikawa, *The 100G Capturing Robot – Too Fast to See*, IEEE Trans. on Mechatronics, vol. 8, no. 1, pp.37–44, 2003.
- [23] C. O’Toole 編, 動物大百科 15 昆虫. 平凡社, pp.84–85, 1987.
- [24] R. E. Rosenblum, W. E. Carlson, and E. Tripp, *Simulating the Structure and Dynamics of Human Hair: Modelling, Rendering and Animation*, Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 2, no. 4, pp.141–148, 1991.
- [25] A. Daldegan, N. M. Thalmann, T. Kurihara, and D. Thalmann, *An Integrated System for Modeling, Animating and Rendering Hair*, Computer Graphics Forum (Eurographics '93), vol. 12, no. 3, pp.211–221, 1993.
- [26] M. Kimura, Y. Sugiyama, S. Tomokuni, and S. Hirai, *Constructing Rheologically Deformable Virtual Objects*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3737–3743, Taipei, September, 2003.
- [27] H. Wakamatsu and S. Hirai, *Static Modeling of Linear Object Deformation based on Differential Geometry*, Int. J. of Robotics Research, vol. 23, no. 3, pp.293–311, 2004.

杉山 勇太 (Yuuta Sugiyama)

1980年5月1日生。2003年立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業。2005年立命館大学理工学研究科修士課程情報システム学専攻修了。2004年IFRR Student Fellowship。

(日本ロボット学会正会員)

平井 慎一 (Shinichi Hirai)

1963年3月19日生。1990年京都大学大学院工学研究科博士課程数理工学専攻単位取得退学。同年大阪大学工学部電子制御機械工学科助手。1995年同助教授。1996年立命館大学理工学部ロボティクス学科助教授, 2002年同教授となり, 現在に至る。1989年米国マサチューセッツ工科大学客員研究員。

1990年度計測自動制御学会論文賞。1996年度日本機械学会ロボティクスメカトロニクス部門業績賞。2001年IEEE ICRA Automation Best Paper Award Finalist。2005年IEEE ICRA Manipulation Best Paper Award Finalist。柔軟指操作, 柔軟物モデリング, リアルタイムビジョンなどの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, IEEEなどの会員。

(日本ロボット学会正会員)