

# ボディの変形による跳躍の力学

松山吉成\* 平井慎一\*

## Mechanics of Jumping via Body Deformation

Yoshinari Matsuyama\* and Shinichi Hirai\*

As jumping is an effective method of moving over rough terrain, there is much interest in building robots that can jump, and deformation of a soft robot's body is an effective method to induce jumping. Our aim was to investigate the effect of the initial deformed shape of deformation of a circular shell made of spring metal. The dish shape jumped the highest in the initial shapes of deformation, with the dish jumping twice as high as the cap. A simulation of a model was in good agreement with the observations. We showed that the jumping height is determined by impulse, time and the center of gravity until taking off from the ground.

**Key Words:** Jumping, Deformation, Mechanics, Circular Robot, Simulation

### 1. はじめに

動物や昆虫によく見られる跳躍移動は、障害物が存在する不整地において踏破性を向上させる効果的な移動手段である。そのため、ロボットにおける跳躍移動に関する研究が盛んに行われている [1] ~ [7]。提案されている多くの跳躍移動ロボットには、回転型モータを用いた機構やエネルギーを蓄積するばね・空圧式アクチュエータが用いられており、ロボット自体が大きく、重く、複雑な機構である。硬く重いロボットのボディは人に危害を与える可能性がある。そこで、柔らかい素材を用いた安全な構造の跳躍移動ロボットの実現が期待される。近年、形状記憶合金アクチュエータやポリマー/ゲルアクチュエータなどの柔らかいアクチュエータに関する研究が盛んに行われている [8] ~ [12]。これらのアクチュエータは軽くて柔らかいという利点がある。一方、それらのアクチュエータの発生力では、跳躍のための十分な力を発生することが困難である。そこで、杉山らは、ばね鋼などの柔軟な外殻を形状記憶合金アクチュエータにより変形し、外殻に蓄積したポテンシャルエネルギーを一瞬で放出することで跳躍を行うロボットを開発した [13]。しかしながら、跳躍に適したアクチュエータの配置や跳躍量が向上する変形状態について不明な点が多い。

本論文では、柔軟円形ロボットの外殻変形を利用した跳躍を実験的ならびにシミュレーションを通して解析する。特に、外殻が変形して曲げひずみエネルギーを蓄積した初期変形状態と跳躍量の関係を解析する。最初に、外殻変形による跳躍の原理

を述べる。次に、外殻に蓄積した曲げひずみエネルギーが等しく、異なった初期形状を用いて、外殻の初期形状と跳躍量の関係を実験とシミュレーションの両面から調べる。シミュレーションには、particle-based modeling [14] を用いた外殻変形による跳躍動作の力学モデルを用いる。このシミュレーションを通して、跳躍量、跳躍動作中に外殻が地面から受ける地面反力、力積、接地時間および力学的エネルギーの推移を評価し、外殻の初期形状が跳躍量に与える影響を調べる。

### 2. 外殻変形による跳躍の原理

円形ロボットの外殻変形による跳躍の原理を述べる。まず、ロボットの自然状態である円形から、外力やアクチュエータの発生力により柔軟な外殻を変形し、外殻に曲げひずみエネルギーを蓄積する。次に、蓄積したエネルギーを放出して地面に力を加え、その反力により運動エネルギーが増加する。最後に、運動エネルギーが位置エネルギーへ変換されることで跳躍する。その際、外殻の初期形状の違いにより、跳躍動作中の力積が異なり、曲げひずみエネルギーから位置エネルギーへの変換率が異なるので跳躍量に違いが生じる。

外殻の変形を利用した跳躍は大きく二つに分けられる。一つ目は、Fig. 1 に示すロボットの底面が地面を叩きつける跳躍である。外殻の自然状態である円形形状から、Fig. 1-(b) に示すようにロボットの底面が円形の内側に入り込んだ形状に変形させる。外殻に蓄積したエネルギーを放出することで、ロボットは底面を地面に叩きつけてその反力により跳躍する [13]。二つ目は、Fig. 2 に示すロボットの底面が地面に接地した状態で伸び上がる跳躍である。外殻の自然状態である円形形状から、Fig. 2-(b) に示すようにロボットの底面と地面が広く接地した形状に変形

原稿受付

\*立命館大学ロボティクス学科

\*Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

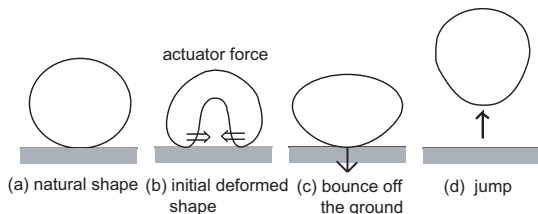


Fig. 1 Principle of jumping by bouncing off the ground

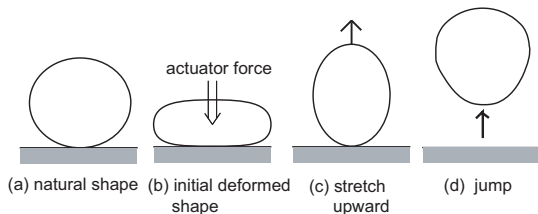


Fig. 2 Principle of jumping by stretching upward

させる．外殻に蓄積したエネルギーを放出することで，ロボットは底面が地面に接地した状態で上面が伸び上がるように跳躍する．

### 3. 異なる初期形状からの跳躍

円形ロボットの初期形状と跳躍量の実験的に調べるために，形状記憶合金アクチュエータにより変形できる可能性のある形状の中から，特徴的な4種類の形状を作成する．ただし，全ての形状の曲げひずみエネルギーは等しい．作成した初期形状をばね鋼と糸を用いて作成する．糸は，ばね鋼の初期形状は保つために用いる．また，糸は一箇所でお互いになっており，その一点を瞬間的に切ることで，元の円形に戻り跳躍する．作成した形状を Fig. 3 に示す．各形状を cap shape, cup shape, peanut shape, dish shape と名付ける．

Fig. 3-(a) に示す cap shape は，底面の変形した両端の二点が地面に接地している形状で，底面の凹んだ部分が円形に戻る際に地面を叩きつけることで跳躍する．Fig. 3-(b) に示す cup shape は，底面の凸部分が地面に接地している形状で，反り返っている両端を地面に叩きつけることで跳躍する．Fig. 3-(c) に示す peanut shape は，上面と底面が凹んでいる形状で，底面が地面を叩きつけた後に上面が伸び上がるように跳躍する．Fig. 3-(d) に示す dish shape は，底面が平たく地面に接地している形状で，上面が伸び上がるように跳躍する．本実験では，質量 4.6 [g]，幅 12 [mm]，厚さ 0.15 [mm] のばね鋼 (SUP3) で，直径 100 [mm] の円形の外殻を用いる．

蓄積した曲げひずみエネルギーが等しい Fig. 3 の4形状について，跳躍を実験的に調べる．曲げひずみエネルギーはどれも  $16.0 \times 10^{-2}$  [Nm] である．各形状の最高点における円形ロボットの高さを Fig. 4 に示す．変形形状の重心の高さの最大値を跳躍量とする．このとき跳躍量は，cap shape では 480 [mm]，cup shape では 670 [mm]，peanut shape では 970 [mm]，dish shape では 1180 [mm] となる．跳躍量は，dish shape と cap shape で最大約 2.5 倍の差が生じる．したがって，跳躍量は蓄積した曲げひずみエネルギーのみならず，外殻の初期形状に依

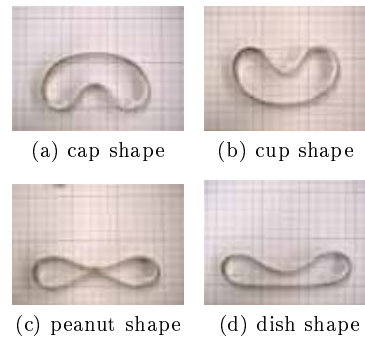


Fig. 3 Initial deformation shapes tested for jumping capability

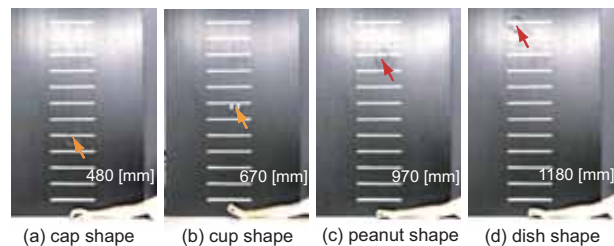


Fig. 4 Effect of initial deformed to jumping height

存することが分かる．

次に，各初期形状からの跳躍の様子を Fig. 5 から Fig. 8 に示す．跳躍の様子は高速度カメラを用いて 1000 [fps] で撮影した．Fig. 5 に cap shape の跳躍を示す．跳躍の際には，6 [ms] で凹んでいた底面が地面を叩きつけ，cup shape のように円形の左右が上方に反り返る．次に，13 [ms] で地面を叩きつけた底面が跳ね返る．そして，17 [ms] でもう一度円形の底面を地面に叩きつけて跳躍する．すなわち，cap shape ではこの2回目の叩きつけを最終的な踏み切りとする．Fig. 6 に cup shape の跳躍を示す．跳躍の際には，6 [ms] で反り返っている左右の両端が地面を叩きつける．次に，9 [ms] で円形の底面を地面に叩きつけて，12 [ms] で地面を踏み切って跳躍する．Fig. 7 に peanut shape の跳躍を示す．跳躍の際には，3 [ms] で底面が地面を叩きつける．その後，上面が上方に伸び上がるように跳躍して，12 [ms] で地面を踏み切って跳躍する．Fig. 8 に dish shape の跳躍を示す．跳躍の際には，円形の上面が上方に伸び上がるように跳躍を行う．また，13 [ms] で踏み切るまで，底面の接地面積は減少しているが，常に接地した状態である．以上より，各初期形状からの跳躍過程の違いによって，跳躍量が異なると考えられる．

### 4. ボディの変形による跳躍の解析

本節では，円形柔軟ロボットの跳躍の解析を行うための力学シミュレーションについて述べる．まず，外殻のモデリング，変形状態に蓄積されている曲げひずみエネルギーの算出方法，曲げ粘性の同定方法，地面のモデリング方法を述べる．次に，シミュレーションと実機実験の結果を比較し，シミュレーションの妥当性を確認する．最後に，跳躍動作中の外殻が地面から受ける地面反力，力積，接地時間および力学的エネルギーの推移を評価する．

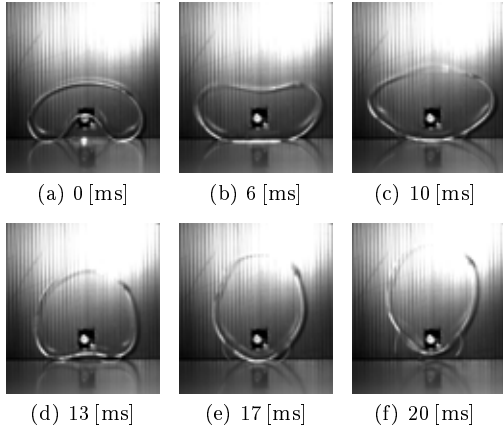


Fig. 5 Successive images of cap shape jumping

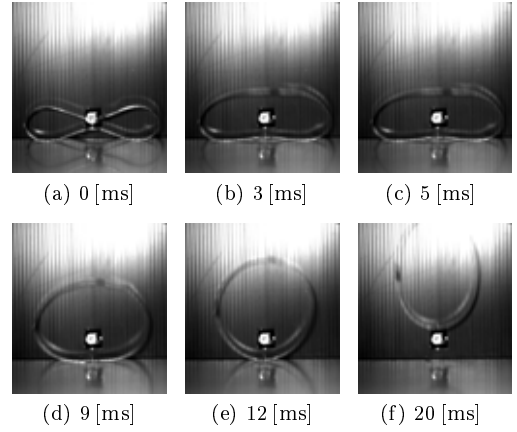


Fig. 7 Successive images of peanut shape jumping

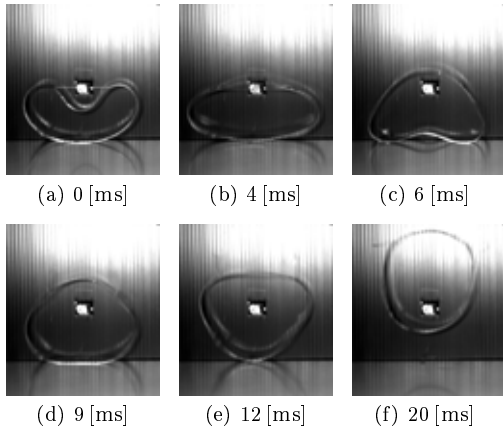


Fig. 6 Successive images of cup shape jumping

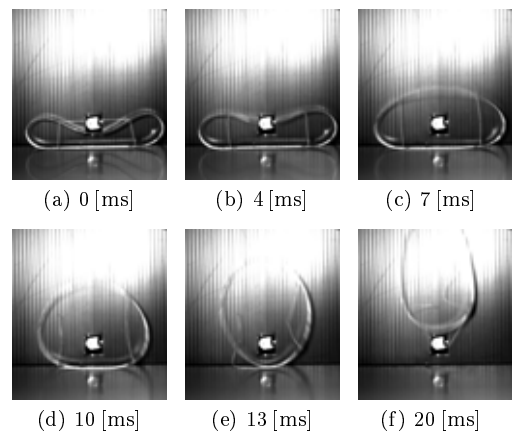


Fig. 8 Successive images of dish shape jumping

#### 4.1 外殻のモデリング

外力により変形する柔軟な外殻の変形モデルを構築する。Fig. 9 に質点周りの曲げフォークトモデルを示す。質点  $P_j$  周りの曲げ角度を  $\theta_j$  で表す。曲げ弾性係数を  $k_{\text{bend}}$ 、曲げ粘性係数を  $b_{\text{bend}}$  とすると、 $P_j$  周りに生じるトルク  $\tau_j$  は

$$\tau_j = -k_{\text{bend}}\theta_j - b_{\text{bend}}\dot{\theta}_j \quad (1)$$

である。次に、トルク  $\tau_j$  を各質点に生じる等価な力に変換する。質点  $P_i$  から質点  $P_j$  を向く単位ベクトルを  $\mathbf{e}_{i,j}$ 、それに垂直なベクトルを  $\mathbf{n}_{i,j}$  で表す。ベクトル  $\mathbf{e}_{i,j}$  と  $\mathbf{n}_{i,j}$  は右手系を成す。連結した質点間の距離を  $l$  とすると、質点  $P_i, P_j, P_k$  に生じる力は、 $(\tau_j/l)\mathbf{n}_{i,j}$ 、 $-(\tau_j/l)\mathbf{n}_{i,j} - (\tau_j/l)\mathbf{n}_{j,k}$ 、 $(\tau_j/l)\mathbf{n}_{j,k}$  となる。

#### 4.2 外殻の曲げひずみエネルギー

円形ロボットの外殻の初期形状に伴う曲げひずみエネルギー  $U_{\text{flex}}$  は、

$$U_{\text{flex}} = \sum_j \frac{1}{2} k_{\text{bend}} \theta_j^2 \quad (2)$$

となる。ヤング率を  $E$ 、断面二次モーメントを  $I$  とすると、曲げ剛性は  $R_{\text{flex}} = EI$  で求められる。質点間の距離が  $l$  であるので、 $k_{\text{bend}} = R_{\text{flex}}/l$  である。

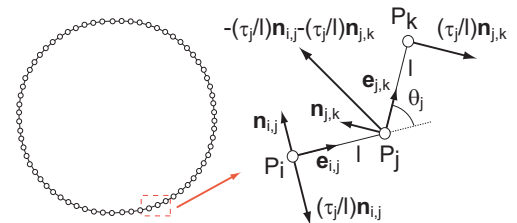


Fig. 9 Flexural Voigt model around shell particle

#### 4.3 曲げ粘性係数の同定

曲げ粘性係数  $b_{\text{bend}}$  の同定方法を述べる。Fig. 10 に片持ちばりのばね鋼の減衰振動を測定する実験装置を示す。まず、レーザー変位センサ (KEYENCE: LB-01, 分解能: 180 [ $\mu\text{m}$ ]) を用いて、片持ちばりのばね鋼の先端の振動を測定する。片持ちばりの長さは 147 [mm] であり、自由端から 10 [mm] の位置で振動を測定した。ばね鋼の減衰振動の測定結果を Fig. 11 に示す。測定結果より、減衰式を算出する。次に、実験で用いた片持ちばりのばね鋼のシミュレーションを行う。求めた減衰式とシミュレーション結果を比較し、ばね鋼の曲げ粘性係数を決定する。

#### 4.4 地面のモデリング

ロボットは地面に力を加えることで、その地面反力により跳躍を行う。ペナルティ法に基づく地面のモデルを Fig. 12 に示

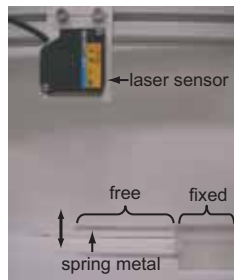


Fig. 10 Experimental system of measuring the flexural viscous constant

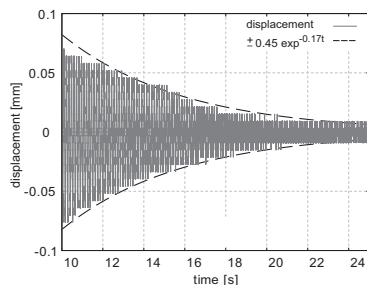


Fig. 11 Experimental result of damped vibration by spring metal

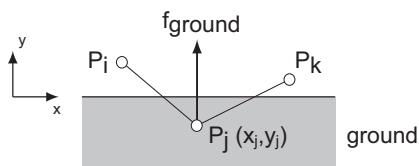


Fig. 12 Model of ground

す。質点が地面より下方向に入り込んだ際に、ばねとダンパー要素からなる Voigt 要素が働き、地面より上側に押し戻す地面反力を発生させる [15]。地面を  $y = 0$  で表す。質点  $P_j$  の  $y$  座標  $y_j$  が負の場合、質点には  $y$  軸方向に地面反力が発生する。地面の弾性係数を  $k_{\text{ground}}$ 、地面の粘性係数を  $b_{\text{ground}}$  で表すと、 $P_j$  に生じる地面反力の大きさは

$$f_{\text{ground}} = -k_{\text{ground}}y_j - b_{\text{ground}}\dot{y}_j \quad (3)$$

となる。また、質点の進入量に対して働く垂直抗力に摩擦係数を乗することで地面の摩擦力を表す。摩擦力は  $x$  軸方向に作用し、摩擦力の方向は質点  $P_j$  の  $x$  軸方向の速度成分の正負で決まる。摩擦係数を  $\mu$  で表すと、 $P_j$  に生じる摩擦力の大きさは  $\mu f_{\text{ground}}$  となる。

#### 4.5 実機実験とシミュレーション結果の比較

ばね鋼を用いて作成した初期形状を Fig. 13 に示す。ここで、 $E = 206$  [GPa] より、ばね鋼の曲げ剛性は  $R_{\text{flex}} = 6.9 \times 10^{-4}$  [Nm<sup>2</sup>] となる。式(2)より、自然状態における円形の曲げひずみエネルギーは  $U_{\text{flex}} = 4.4 \times 10^{-2}$  [Nm] となる。外殻に蓄積している曲げひずみエネルギーは左の列から右の列の順に大きく、Fig. 13-(a-1), (b-1), (c-1), (d-1) は  $U_{\text{flex}} = 8.77 \times 10^{-2}$  [Nm]、Fig. 13-(a-2), (b-2), (c-2), (d-2) は  $U_{\text{flex}} = 12.3 \times 10^{-2}$  [Nm]、Fig. 13-(a-3), (b-3), (c-3), (d-3) は  $U_{\text{flex}} = 16.0 \times 10^{-2}$  [Nm]

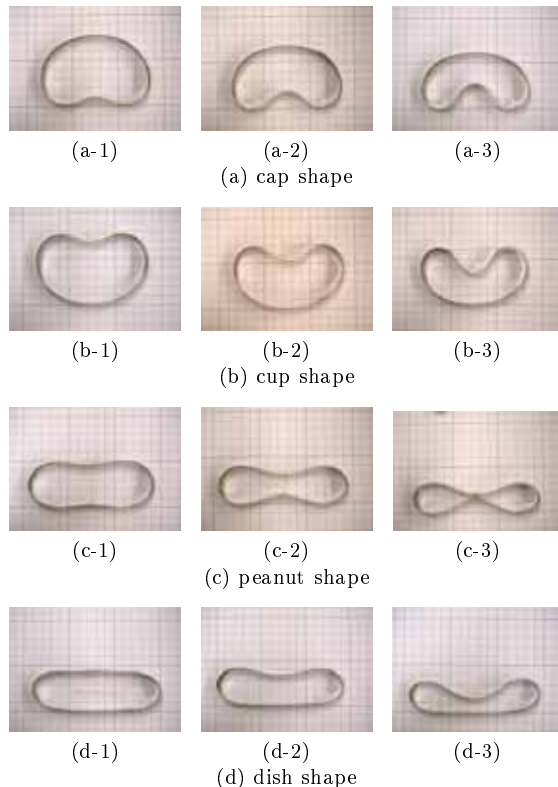


Fig. 13 Initial shapes for jumping

である。なお、最後の4個の形状は、Fig. 3 に示した4個の形状に等しい。

Fig. 13 で示した各初期形状からの跳躍をシミュレーションする。本実験で用いるばね鋼の外殻を64個の質点に分割する。シミュレーション内の外殻のパラメータを実験で用いた外殻から算出すると、各質点の質量  $0.074$  [g]、質点間の距離  $h = 4.9$  [mm]、曲げ弾性係数  $k_{\text{bend}} = 0.1417$  [Nm/rad] が得られた。実験的に同定した結果、曲げ粘性係数  $b_{\text{bend}} = 0.00002$  [Nm/(rad/s)] を得た。次に、実験はメラミン化粧板の机上で行うため、シミュレーション内では仮想的な硬い地面を想定して、地面の弾性係数  $k_{\text{ground}} = 1.0 \times 10^6$  [N/m]、地面の粘性係数  $b_{\text{ground}} = 1.0 \times 10^3$  [N/(m/s)]、動摩擦係数  $0.3$ 、静止摩擦係数  $0.5$  と仮定した。なお、地面の弾性係数のこの値は、力学シミュレーションが可能で上限値に近い。実機実験とシミュレーションの跳躍量の結果を Table 1 に示す。曲げひずみエネルギーは Fig. 13-(a-3) から (d-3) まで等しい。しかし、Fig. 13-(a-3) に示す cap shape の跳躍量は  $457$  [mm] であるのに対し、Fig. 13-(d-3) に示す dish shape の跳躍量は  $1171$  [mm] であり、約  $2.5$  倍の跳躍量の違いが生じている。実機実験とシミュレーションの跳躍量を比較すると、両者に同じ傾向が見られ、その値はほぼ一致している。また、Fig. 13-(c-1) の場合に誤差は最大で、 $15.8\%$  となる。Fig. 14 に cap shape のシミュレーションと実機実験による跳躍の様子を示す。実機実験とシミュレーションの結果を比較すると、跳躍動作中の初期形状がほぼ一致していることが分かる。他の初期形状についても、実機実験とシミュレーションは同じ変形過程を経て跳躍を行う。したがって、本実験で作成

Table 1 Jumping height

	experiment [mm]	simulation [mm]
cap shape		
(a-1)	270	271
(a-2)	410	382
(a-3)	480	457
cup shape		
(b-1)	260	272
(b-2)	490	483
(b-3)	670	669
peanut shape		
(c-1)	550	462
(c-2)	800	771
(c-3)	970	980
dish shape		
(d-1)	570	495
(d-2)	920	876
(d-3)	1180	1171

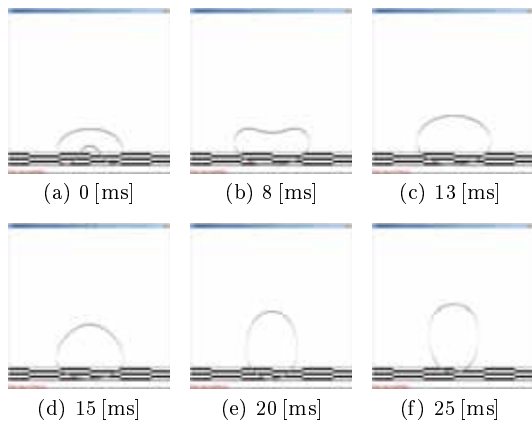


Fig. 14 Successive images of the cap shape jumping by simulation

したシミュレーションは妥当であると考えられる．以降，このシミュレーションを用いて跳躍動作を解析する．

4.6 跳躍動作中の地面反力と力積

跳躍動作中の地面反力と力積をシミュレーションによって評価する．各初期形状からの跳躍の際の地面反力を Fig. 15 に示す．Fig. 15-(a) に cap shape の跳躍時の地面反力を示す．円形の底面が地面を叩きつける時に，瞬間的に大きな地面反力が生じる．その後，地面を踏み切るまで小さな地面反力が生じる．Fig. 15-(b) に cup shape の跳躍時の地面反力を示す．円形の左右の両端を地面に叩きつける時に小さな地面反力が生じる．その 3~4 [ms] 後，円形の底面が地面を叩きつけ時に大きな地面反力が生じる．Fig. 15-(c) に peanut shape の跳躍時の地面反力を示す．円形の底面が地面を叩きつける時に，大きな地面反力が生じる．また，瞬間的に大きな地面反力が生じた後，小さな地面反力が cap shape, cup shape よりも長く続いていることが分かる．Fig. 15-(d) に dish shape の跳躍時の地面反力を示す．他の初期形状と異なり大きな地面反力は生じていない．また，dish shape は同じ曲げひずみエネルギーの場合で比較すると，接地している時間が長い．したがって，跳躍量は瞬間の最大地面反力の大きさとは直接的な関係がないことが分かる．

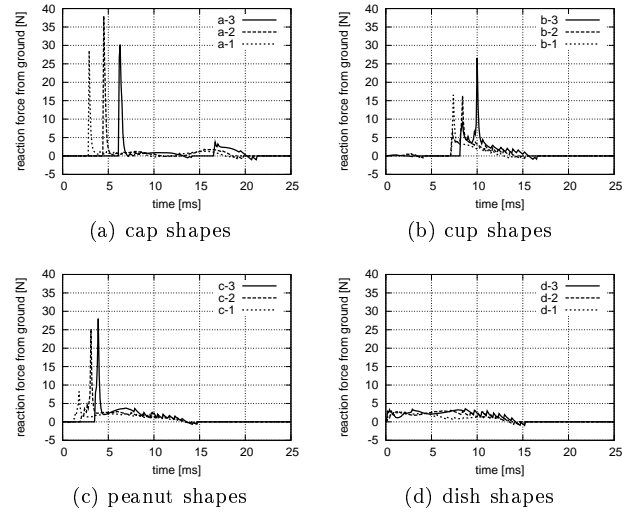


Fig. 15 Reaction force from ground

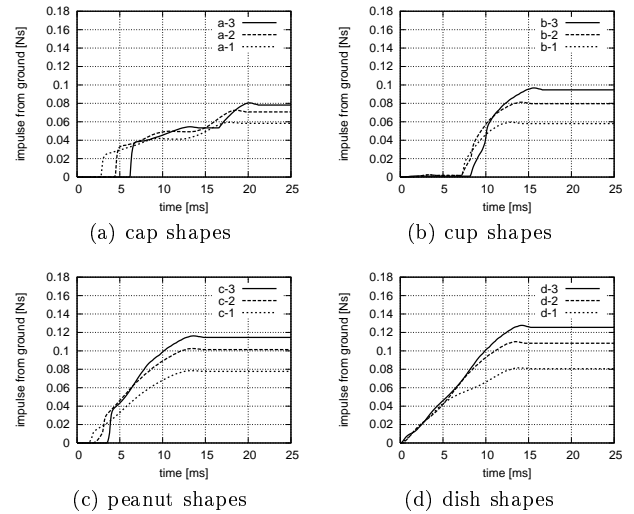


Fig. 16 Impulse from ground during jumping

地面反力を時間積分することにより，地面からの力積を計算する．計算結果を Fig. 16 に示す．Fig. 16-(a) に cap shape の地面からの力積を示す．円形の底面が地面を叩きつける時に，力積が急激に増加する．その後，地面を踏み切るまで，力積はゆっくりと増加する．Fig. 16-(b) に cup shape の地面からの力積を示す．力積は約 7 [ms] の時点で急激に増加して，そのまま最大値に達する．Fig. 16-(c) に peanut shape の地面からの力積を示す．円形の底面が地面を叩きつける時に，瞬間的に増加する．その後，力積は最大値に達するまで単調に増加する．Fig. 16-(d) に dish shape の地面からの力積を示す．力積は最初から単調に増加し，そのまま最大値に達する．外殻に蓄積した曲げひずみエネルギーが等しい 4 種類の初期形状を比較すると，dish shape の地面反力の瞬間の最大値は 4 形状の中で一番小さい．しかし，dish shape の地面を踏み切る際の力積は一番大きい．したがって，跳躍量は地面反力の最大値が直接的に関係するのではなく，力積の大きさが影響することが分かる．

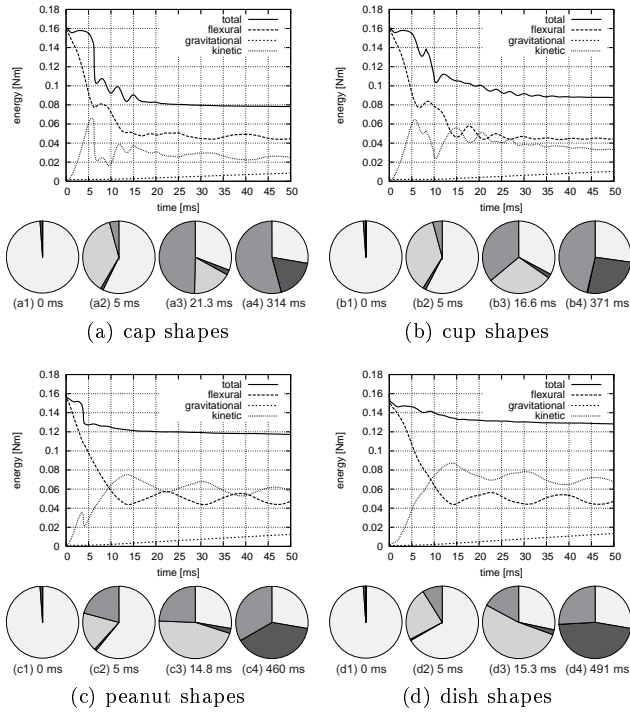


Fig. 17 Kinetic and potential energies of a circular robot during jumping

- flexural potential energy
- gravitational potential energy
- ◻ kinetic energy
- ◼ energy loss

#### 4.7 力学的エネルギーの推移と損失

各々の初期形状からの跳躍における運動エネルギー、位置エネルギー、曲げひずみエネルギーの推移を Fig. 17 に示す。ただし、図中に示す一点鎖線は外殻が地面を踏み切る瞬間を示す。また、外殻の初期形状を保つための拘束を解放する瞬間を 0 [ms] とする。円グラフは 0 [ms] での全エネルギーを 100% とした時、各時刻の力学的エネルギーの割合を示す。また、Fig. 17-(a2) から (d2) に 5 [ms] でのエネルギーの割合、Fig. 17-(a3) から (d3) に地面を踏み切る瞬間のエネルギーの割合、Fig. 17-(a4) から (d4) に最高点に達した瞬間のエネルギーの割合を示す。まず、0 [ms] においては、曲げひずみエネルギーが 97% 以上を占めている。次に、外殻の拘束を解放すると、曲げひずみエネルギーは運動エネルギーへと変換される。外殻が地面を踏み切った後、運動エネルギーが位置エネルギーへと変換される。各跳躍のエネルギーの推移を見ると、cap shape と cup shape では地面との衝突により全体のエネルギーは約 0.06 [Nm] 減少し、運動エネルギーが急激に減少する。同様に、peanut shape では地面との衝突により全体のエネルギーは約 0.03 [Nm] 減少するが、地面を踏み切るまで運動エネルギーが増加する。一方、dish shape では全体のエネルギーの減少は少なく、地面を踏み切るまで運動エネルギーが増加する。したがって、地面を叩きつける跳躍は踏み切る際に運動エネルギーが小さくなるため、伸び上がる跳躍よりも跳躍量が低くなること分かる。

次に、変形により外殻に蓄積した曲げひずみエネルギーから

Table 2 Conversion of flexural potential energy into gravitational energy

Flexural Potential Energy	Conversion ratio %			
	cap	cup	peanut	dish
1: $8.77 \times 10^{-2}$ [Nm]	39.3	39.4	66.9	71.7
2: $12.3 \times 10^{-2}$ [Nm]	30.6	38.7	61.7	69.9
3: $16.0 \times 10^{-2}$ [Nm]	25.1	36.7	53.8	64.3

最高点での位置エネルギーへの変換率を Table 2 に示す。円形の外殻が変形することで、蓄積した曲げひずみエネルギーが、位置エネルギーにすべて変換された時の変換率を 100% とする。まず、dish shape のように上方に伸び上がる跳躍方法は、位置エネルギーへの変換率が高く、初期形状からの跳躍のエネルギー損失が小さいことが分かる。一方、cap shape や cup shape のように地面を叩きつける跳躍方法は、エネルギー損失が大きく、跳躍量が低いことが分かる。

#### 5. 初期形状と跳躍量の関係

本節では、シミュレーションを用いて、円形柔軟ロボットの上表面と底面の初期形状が跳躍に与える影響を検討する。これまでの研究で、底面が接地した初期形状が跳躍に有利であることが分かった。しかし、外殻の初期形状と力積との関係が不明である。そこで、初期形状が跳躍時の地面からの力積にどのような影響を与えるか調べるために、形状の特徴を上表面と底面に分けて解析する。まず、等しい曲げひずみエネルギーで、上表面と底面の特徴の組み合わせにより 8 個の形状を作成する。次に、シミュレーションにより、跳躍動作中の接地時間と平均地面反力を評価する。

##### 5.1 初期形状の選定と特徴

初期形状の上表面と底面の形状の特徴を、円の外側に膨らんだ円弧は凸、円の内側に入り込んだ形状は凹、平らな形状は平面と表す。ただし、平面は図中および表中では四角形で表す。そこで、Fig. 13-(a-3), (b-3), (c-3), (d-3) の形状に、新しい 4 個の形状を加えて、曲げひずみエネルギーが等しい 8 通りの特徴を持った初期形状を作成する。ここで、 $U_{flex} = 16.0 \times 10^{-2}$  [Nm] の場合の初期形状を Fig. 18 に示す。まず、shape A, B, C, D はそれぞれ cap, cup, peanut, dish shape と同じ形状である。各形状の特徴を示す。Fig. 18-(a) は上面が凸、底面が凹である。Fig. 18-(b) は上面が凹、底面が凸である。Fig. 18-(c) は上面と底面が凹である。Fig. 18-(d) は上面が凹、底面が平面である。次に、新しく加える 4 形状の形状と跳躍の特徴を述べる。Fig. 18-(e) は上面と底面が平面で、底面は接地したままで上面が伸び上がることで跳躍する。Fig. 18-(f) は上面が平面、底面が凹で、底面を地面に叩きつけた後、上面が伸び上がることで跳躍する。Fig. 18-(g) は上面が凸、底面が平面で、底面が上面を押し上げることで跳躍する。Fig. 18-(h) は上面が平面、底面が凸で、反り返っている両端を地面に叩きつけた後、上面が伸び上がることで跳躍する。

##### 5.2 初期形状と接地時間・平均地面反力の関係

シミュレーションにより地面反力を算出する。外殻の跳躍動作中の地面反力を時間積分して力積を求める。外殻が最後に地面を踏み切るまでの間に、外殻と地面が接地している時間の和

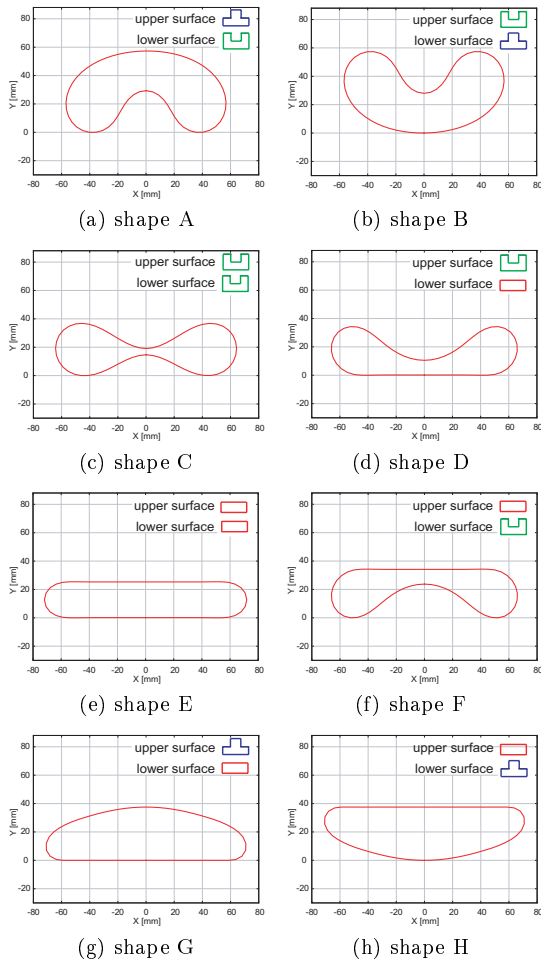


Fig. 18 Initial shapes for evaluation of jumping

を接地時間とする．求めた力積を接地時間で除することで，外殻の接地状態での平均地面反力を求める．各形状の跳躍量，平均地面反力，接地時間のシミュレーション結果を Table 3 に示す．ただし，形状の並びは跳躍量が高い順番に並び替えている．また，括弧内の数字は，跳躍量，接地時間，平均地面反力の各値の順位を示す．平均地面反力の結果より，平均地面反力が高い順に shape C, shape B, shape D, 次に大きい形状は shape H, shape F, shape E である．ここで，shape C, shape B, shape D の上面の形状に着目すると，上面の初期形状は全て凹である．また，shape H, shape F, shape E の上面の形状に着目すると，上面の初期形状は全て平面である．したがって，底面が凸，凹，平面の各形状において，上面が内側に入り込んだ形状は平均地面反力が大きくなるのが分かる．次に，接地時間の結果より，接地時間が長い順は shape G, shape E, shape D である．各形状について，上面が同様の特徴を持った形状と比較すると，shape G, shape E, shape D の接地時間は 3~4 [ms] 程度長い．ここで，shape G, shape E, shape D の底面に着目すると，底面の初期形状は平面である．したがって，上面が凸，凹，平面の各形状において，底面が接地面積が広い平らな形状であれば，接地時間が長くなるのが分かる．

跳躍時の接地時間と平均地面反力の関係を Fig. 19 に示す．こ

Table 3 Ground contact time and average of reaction force during jumping

shapes							
D	E	C	G	F	B	H	A
jumping height [mm]							
1117	1001	981	777	713	669	654	457
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
average of reaction force from ground [N]							
2.06	1.79	2.49	1.49	1.94	2.08	1.96	1.55
(3)	(6)	(1)	(8)	(5)	(2)	(4)	(7)
ground-contact time [ms]							
15.2	16.2	11.1	16.9	12.6	11.4	11.9	12.7
(3)	(2)	(8)	(1)	(5)	(7)	(6)	(4)

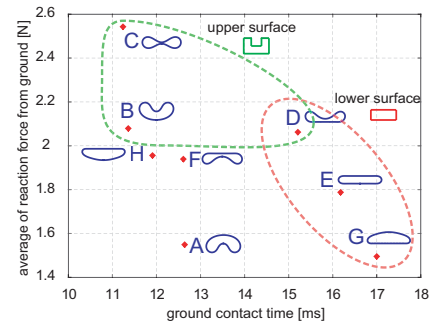


Fig. 19 Relationship between ground-contact time and average of friction force during jumping

の時，shape C, shape B, shape D は地面反力が大きく，shape G, shape E, shape D は接地時間が長くなっている．ここで，上面が凹と底面が平面の特徴を持った形状をそれぞれ点線でグループ分けする．すると，shape C, shape B は接地時間が，shape G, shape E では平均地面反力が跳躍量の制限因子となることがわかる．一方，shape D は平均地面反力が大きくなる上面の凹と接地時間が長くなる底面の平面という二つの特徴を併せ持っており，跳躍量が最大となったと考えられる．

## 6. おわりに

本報告では，外殻変形による跳躍において，初期形状と跳躍量との関係を解析した．まず，柔軟な外殻の変形を利用した跳躍の原理について述べた．次に，ばね鋼を用いて 4 種類の初期形状を作成した．それらを用いた跳躍実験より，円形ロボットの跳躍量を測定した．次に，変形の力学モデルを提案し，シミュレーションを用いて跳躍量，地面反力，力積，力学的エネルギーの推移と損失を求めた．さらに，4 個の特徴的な形状を用いて，平均地面反力，接地時間，力積と跳躍量の関係を調べた．その結果，最大で約 2.5 倍の跳躍量の差が生じることを実験およびシミュレーションの両面から確認した．また，跳躍量は地面反力が直接的に影響するのではなく，力積の大きさに依存していることが分かった．跳躍動作中の力学的エネルギーの推移を調べた結果，地面を叩きつける跳躍方法は，全体のエネルギーの損失が大きく跳躍時の運動エネルギーが小さいこと，最高点に

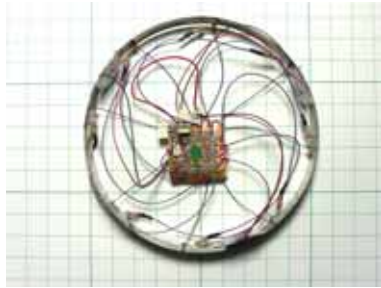


Fig. 20 Circular soft robot with built-in battery

おける位置エネルギーへの変換率が低いことが分かった。そして、8個の特徴的な形状を用いて、跳躍時の接地時間と平均地面反力を求めた結果、上面の形状は平均地面反力に関係しており、円形の内側に入り込んだ形状は平均地面反力を大きくする効果があることが分かった。また、底面の形状は接地時間に関係しており、接地面積の広い平らな形状は接地時間を長くする効果があることが分かった。さらに、力積を平均地面反力と接地時間の積から求めると、跳躍量が向上するためには、平均地面反力と接地時間の割合が重要であることが分かった。以上より、外殻の初期形状に応じて、地面を踏み切るまでの変形過程が異なり、力積、踏み切るまでの時間、重心の高さに違いが生じる。その結果、跳躍量に大きな違いが生じることが分かった。

現在、著者らが製作している駆動回路とバッテリーを搭載した円形ロボット [16] を Fig. 20 に示す。駆動回路と Li-Po 電池の質量は合わせて約 5 [g] である。シミュレーションにおいて、各質点の質量を 2 倍にすると跳躍量が半分になることが分かった。したがって、駆動回路と Li-Po 電池を搭載することで、自立的な跳躍ロボットが可能になると考える。また、駆動回路やバッテリーの搭載位置によって変化するロボットの質量分布が、ロボットの跳躍に影響を与えることと考えられる。今後、質量分布が跳躍に与える影響を解析したい。

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] Kikuchi, F., Ota, Y., and Hirose, S., "Basic Performance Experiments for Jumping Quadruped", *IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.3378-3383, 2003.
- [2] Armour, R., Paskins, K., Bowyer, A., Vincent, J., and Megill, W., "Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain", *Bioinspir. Biomim.*, Vol.2, pp.65-82, 2007.
- [3] Tsukagoshi, H., Mori, Y., Sasaki, M., Tanaka, T., Kitagawa, A., "Development of Jumping and Rolling Inspector to Improve the Debris Traverse Ability", *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.15, No.5, pp.482-490, 2003.
- [4] Fiorini, P., and Burdick, J., "The Development of Hopping Capabilities for Small Robots", *Autonomous Robots*, Vol.14, No.2-3, pp.239-254, 2007.
- [5] Hayashi, R., and Tsujio, S., "High-performance Jumping Movements by Pendulum-type Jumping Machines", *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp.722-727, 2001.
- [6] Scarfogliero, U., Stefanini, C., and Dario, P., "A Bioinspired Concept for High Efficiency Locomotion in Micro Robots: the Jumping Robot Grillo", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Florida, May, pp.4037-4042, 2006.
- [7] 浅井雄士, 千葉泰裕, 武士田直毅, 坂口慶介, 菊池耕生, 須藤孝幸, "2 自由度振動系を利用した高速階段昇降に関する研究 - ハードウェアによる跳躍とソフトランディングの実現 -", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'07, 2007.
- [8] 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.
- [9] Ashley, S., "Artificial Muscles", *Scientific American*, October, pp.34-41, 2003.
- [10] Hirai, T., Uddin, Z., Zheng, J., Yamaguchi, M., Kobayashi, S., Watanabe, M., and Shirai, H., "Quick and large electrostrictive deformation of non-ionic soft polymer materials", *Smart Structures and Materials 2003, Proc. SPIE*, Vol.5051, pp.198-206, 2003.
- [11] Choi, H. R., Jung, K. M., Kwak, J. W., Lee, S. W., Kim, H. M., Jeon, J. W., and Nam, J. D., "Digital Polymer Motor for Robotic Applications", *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, Taipei, September, pp.1857-1862, 2003.
- [12] Selden, B., Cho, K.-J., and Asada, H.-H., "Segmented Binary Control of Shape Memory Alloy Actuator Systems Using the Peltier Effect", *Proc. IEEE Int. Conf. on Control Applications*, New Orleans, April, pp.4931-4936, 2004.
- [13] Sugiyama, Y., and Hirai, S., "Crawling and Jumping by a Deformable Robot", *Int. J. of Robotics Research*, Vol.25, No.5-6, pp.603-620, May-June, 2006.
- [14] 友國誠至, 杉山勇太, 平井慎一, "実時間計算可能な仮想レオロジー物体の構築", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.247-254, 2003.
- [15] Moore, M., and Wilhelms, J., "Collision detection and response for computer animation", *Proc. 15th Annual Conf. on Computer Graphics*, pp.289-298, 1988.
- [16] 松本泰明, 平井慎一, "電源内蔵型移動跳躍ソフトロボット", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会, pp.617-618, 2007.

松山吉成 (Yoshinari Matsuyama)

1983 年 4 月 2 日生。2006 年 立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業。2008 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。同年、松下電器産業株式会社に入社し、現在に至る。  
(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 Best Automation Paper Award Finalist。2005 年、2006 年 IEEE ICRA Best Manipulation Paper Award Finalist。2006 年 IEEE ICRA Best Vision Paper Award Finalist。2007 年 ロボティクスシンポジウム最優秀論文賞。2006 年より IEEE Transactions on Robotics の Associate Editor。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、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)