

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*

*Ritsumeikan University, Dept. of Robotics

Noji-higashi 1-1-1, Kusatsu, Shiga, 525-8577, Japan

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 shape of deformation of a circular shell made of spring metal. The dish shape jumped the highest in eight initial shapes of deformation, with the dish jumping twice as high as the cap. The jumping height is determined by impulse, time and the center of gravity until taking off from the ground. A simulation of a model was in good agreement with the observations.

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

1. はじめに

現在、ロボットの活用範囲は生産現場にとどまらず、医療、介護、一般家庭、災害現場などの幅広い分野での活躍が期待されている。それに伴い、不整地移動ロボットの研究が盛んに行われている [1]。提案されているほとんどのロボットは、回転型モータを用いた機構やばね・空圧式アクチュエータ等に蓄積したエネルギーを用いたものであり、ロボット自体が大きく、重く、複雑な機構である [2, 3]。そのため、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ロボットの実現が期待されている。

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。したがって、ロボットにおける跳躍移動の実現により、一般家庭や災害現場などの幅広い分野でロボットの活躍が可能となる。近年、形状記憶合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 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 [4, 5, 6, 7, 8]。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

SMA アクチュエータにより変形することで、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 [9]。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形状について不明な点が多い。

本論文では、柔軟な円形の外殻変形による跳躍の変形形状と跳躍量の関係について解析する。最初に、跳躍の原理と跳躍量の理論式を示す。次に、particle-based modeling [10] を用いて、外殻変形による跳躍動作中の物理量を測定するための力学モデルを示す。そして、曲げひずみエネルギーが等しく、異なった形状を作成する。作成した変形形状を用いて、ばね鋼を用いた実機実験の結果とシミュレーションを比較することでシミュレーションの妥当性を確認する。そのシミュレーションにより、跳躍量、跳躍動作中の地面反力、力積、接地時間などを評価する。さらに、外殻の変形形状が跳躍量に与える影響について述べる。最後に、跳躍量の理論式を評価する。

2. 跳躍の原理

柔軟円形ロボットの最高点における重心の高さを算出する。まず、図 1-(a) に外殻の変形形状から拘束を解放した瞬間の外殻の形状、図 1-(b) に地面を踏み切る瞬間の外殻の形状、図 1-(c) に跳躍の最高点での外殻の形状を示す。ただし、水平方向を x 軸、垂直方向を y 軸とする。外殻の拘束が解放されて円形に戻り始める時刻を $t = 0$ とする。地面を最後に踏み切る時刻 $t = t_1$ における外殻の重心の高さを h_1 とする。外殻の重心が

原稿受付 2007 年 1 月 17 日

* 立命館大学ロボティクス学科

*Dept. Robotics, Ritsumeikan Univ.

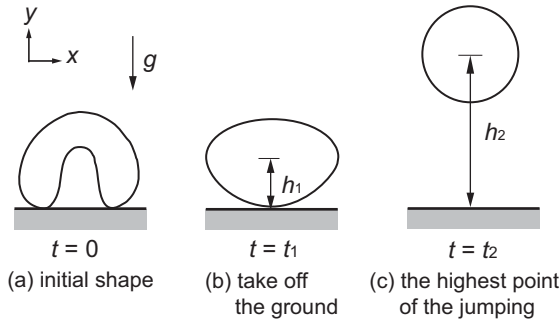


Fig.1 Principle of jumping by deformation

最高点に達した時刻 $t = t_2$ における重心の高さを h_2 とする。ここで、円形の外殻を有限個の質点より構成される質点系と考える。時刻 0 で運動量は 0 とする。地面を踏み切るまでに外殻に加えられる力積は、重力の力積、地面反力の力積、摩擦力の力積の和である。外殻は n 個の質点から成ると仮定し、 i 番目の質点の質量を m_i とする。時刻 $t \in [0, t_1]$ において、質点 i に作用する力 $\mathbf{F}_i$ は、

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} f_i^{\text{frict}}(t) \\ f_i^{\text{react}}(t) - m_i g \end{bmatrix} \quad (1)$$

と表される。したがって、時間区間 $[0, t_1]$ において質点 i に加えられる力積 $\mathbf{I}_i$ は、

$$\mathbf{I}_i = \int_0^{t_1} \begin{bmatrix} f_i^{\text{frict}}(t) \\ f_i^{\text{react}}(t) - m_i g \end{bmatrix} dt \quad (2)$$

で与えられる。時刻 t_1 における運動量を $\mathbf{L}_{\text{init}}$ で表す。時刻 t_1 における質点系の運動量は、時刻 0 における運動量と各質点に加えられる力積の和に等しいので、

$$\mathbf{L}_{\text{init}} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{frict}} \\ \mathbf{I}_{\text{react}} - Mgt_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

ただし、

$$M = \sum_i m_i, \quad (4)$$

$$\mathbf{I}_{\text{frict}} = \int_0^{t_1} \sum_i f_i^{\text{frict}}(t) dt, \quad (5)$$

$$\mathbf{I}_{\text{react}} = \int_0^{t_1} \sum_i f_i^{\text{react}}(t) dt \quad (6)$$

で与えられる。時刻 t_1 における重心の速度 $[v_{Gx}, v_{Gy}]^T$ は、

$$M \begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\text{frict}} \\ \mathbf{I}_{\text{react}} - Mgt_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

より得られる。時間区間 $[t_1, t_2]$ において、質点 i に作用する力は重力のみである。時刻 t_2 で外殻の形状は自然状態での円形に近くなるため、 y 軸方向の運動量は 0 であると仮定する。これより、

$$(I_{\text{react}} - Mgt_1) + Mg(t_2 - t_1) = 0 \quad (8)$$

を得る。最高点における x 軸方向の跳躍距離を l_2 とすると、時刻 t_2 における重心の位置は、

$$\begin{bmatrix} l_2 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ h_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{Gx} \\ v_{Gy} \end{bmatrix} (t_2 - t_1) - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ g \end{bmatrix} (t_2 - t_1)^2 \quad (9)$$

で与えられる。上式を計算すると、

$$l_2 = \frac{I_{\text{frict}}(I_{\text{react}} - Mgt_1)}{M^2 g}, \quad (10)$$

$$h_2 = h_1 + \frac{(I_{\text{react}} - Mgt_1)^2}{2M^2 g} \quad (11)$$

を得る。上式 h_2 が跳躍高さの最大値を表す。以上より、地面を踏み切るまでの各パラメータが分かれば、跳躍量が分かる。式 (11) について、最終的にシミュレーションの値と比較し、理論式が妥当であるか評価する。しかし、 I_{react} や t_1 を実験から動的に測定する事が困難であるため、シミュレーションを用いてそれらの値を算出する。

3. ボディの変形による跳躍の力学モデル

本章では、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、外殻のモデリングと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を述べる。次に、地面のモデリング方法を述べる。

3.1 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。図 2 に質点周りの曲げフォークトモデルを示す。曲げばねの自然角度は π とする。質点 P_j 周りの角度を θ_j で表す。曲げ弾性係数を k_{bend} 、曲げ粘性係数を b_{bend} とすると、 P_j 周りに生じるトルク τ_j は、

$$\tau_j = -k_{\text{bend}} (\theta_j - \pi) - b_{\text{bend}} \dot{\theta}_j \quad (12)$$

である。次に、トルク τ_j を各質点に生じる力に分割する。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。

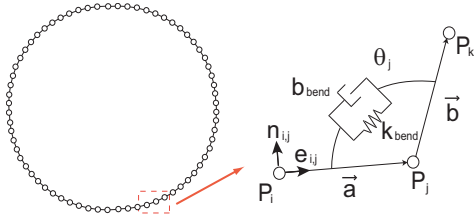


Fig.2 Flexural Voigt model around shell particle

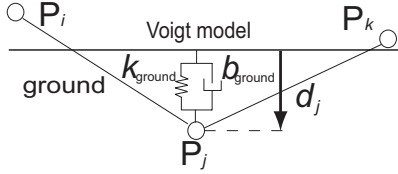


Fig.3 Model of ground

3.2 外殻の曲げひずみエネルギー

円形ロボットの外殻の変形形状に伴う曲げひずみエネルギー U_{flex} は,

$$U_{flex} = \frac{1}{2} k_{bend} \sum_j (\theta_j - \pi)^2 \quad (13)$$

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 $R_{flex} = EI$ で求められる。質点間の距離を h とすると、 $k_{bend} = R_{flex}/h$ で求められる。

3.3 地面のモデリング

ロボットは地面に力を加える事で、その反力により跳躍を行う。本論文では、この地面からの反力を地面反力と表す。地面のモデルを図3に示す。ペナルティ法を用いて、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力を発生する [11]。地面の弾性係数を k_{ground} 、地面の粘性係数を b_{ground} と仮定する。質点の地面への進入量を d_j 、質点の y 軸方向への速度を $\dot{d}$ とすると、地面反力の大きさ f_{ground} は、

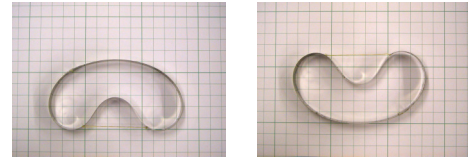
$$f_{ground} = k_{ground} d_j + b_{ground} \dot{d}_j \quad (14)$$

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ずることで地面の摩擦力を仮定する。摩擦係数を μ と仮定すると、 P_j に生じる摩擦力の大きさは μf_{ground} となる。

4. 跳躍の解析

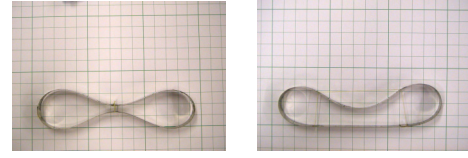
4.1 変形形状と曲げひずみエネルギー

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。シミュレーション内では、このばね鋼のパラメータを使用する。まず、SMA アクチュエータを用いて変形



(a) cap shape

(b) cup shape



(c) peanut shape

(d) dish shape

Fig.4 Initial shapes for jumping

できる可能性のある形状の中から、特徴的な 4 種類の形状を選定した。それらの変形形状をばね鋼と糸を用いて作成する。糸は 1 箇所だけ交わるようになっており、その一点を瞬間的に切る事で、元の円形に戻り跳躍を行う。作成した形状を図4に示す。4 形状とも外殻に蓄積されている曲げひずみエネルギーは等しい。各形状の特徴に応じて、cap, cup, peanut, dish shape と名付ける。図4に示す cap shape では、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を行う。図4に示す cup shape では、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を行う。図4に示す peanut shape では、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を行う。図4に示す dish shape では、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。ここで、ばね鋼のヤング率は 206 GPa であるので、曲げ剛性は $R_{flex} = 6.9 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2$ となる。式 (13) より、自然状態における円形の曲げひずみエネルギーは $U_{flex} = 4.4 \times 10^{-2} \text{ Nm}$ となる。よって、変形形状の外殻に蓄積している曲げひずみエネルギーは $U_{flex} = 16.0 \times 10^{-2} \text{ Nm}$ となる。

4.2 跳躍実験とシミュレーションの結果

蓄積している曲げひずみエネルギーが等しい図4の4形状について、跳躍を実験的に調べる。各形状の最高点における円形ロボットの高さを図5に示す。円形の重心の高さを跳躍量とすると、cap shape は 480 mm, cup shape は 670 mm, peanut shape は 970 mm, dish shape 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、跳躍量は蓄積したポテンシャルエネルギーのみならず、外殻の変形形状に依存することが分かる。

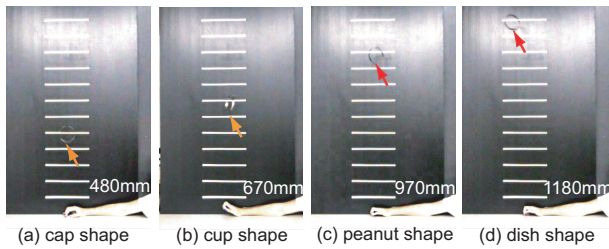


Fig.5 Effect of initial deformed to jumping height

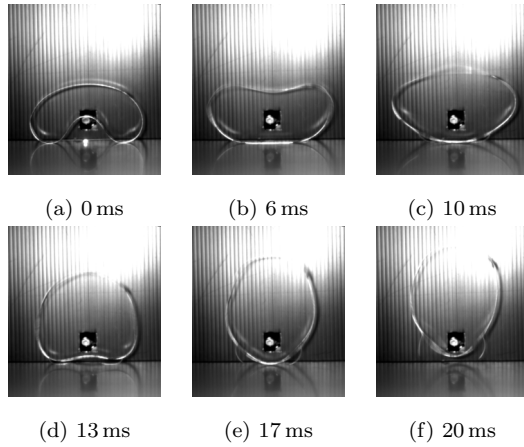


Fig.6 Successive images of cap shape jumping

次に、各変形形状からの跳躍の様子を図 6 から図 9 に示す。ただし、跳躍の様子は高速度カメラを用いて 1000 fps で撮影する。図 6 に cap shape の跳躍を示す。跳躍の際の特徴は、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方向に反り返る。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。cap shape では、この 2 回目の叩きつけの後を最終的な踏み切りとする。図 7 に cup shape の跳躍を示す。跳躍の際の特徴は、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。図 8 に peanut shape の跳躍を示す。跳躍の際の特徴は、3 ms で底面が地面を叩きつける。その後、上面が上方方向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。図 9 に dish shape の跳躍を示す。跳躍の際の特徴は、円形の上面が上方方向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。これらの図より、各変形形状に応じて異なった跳躍過程となっていることがわかる。したがって、各変形形状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。

図 4 で示した各変形形状からの跳躍シミュレーション

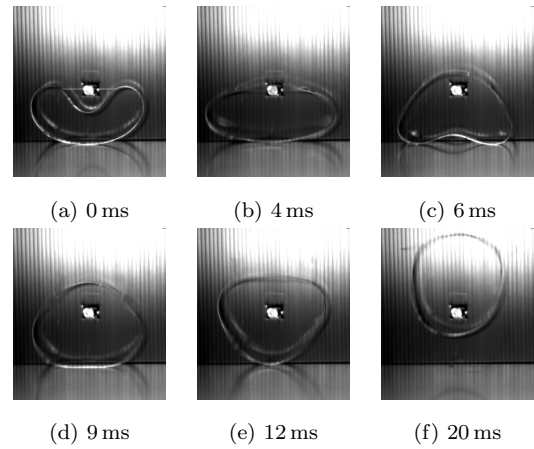


Fig.7 Successive images of cup shape jumping

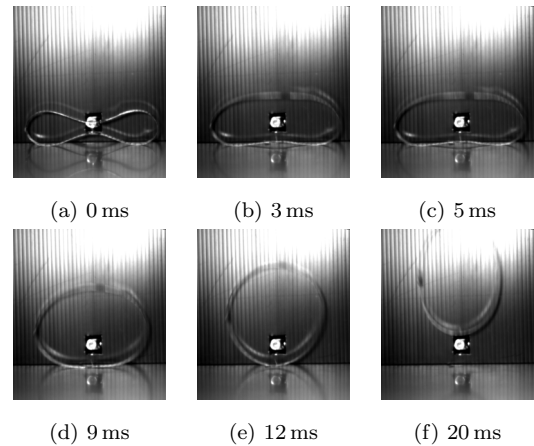


Fig.8 Successive images of peanut shape jumping

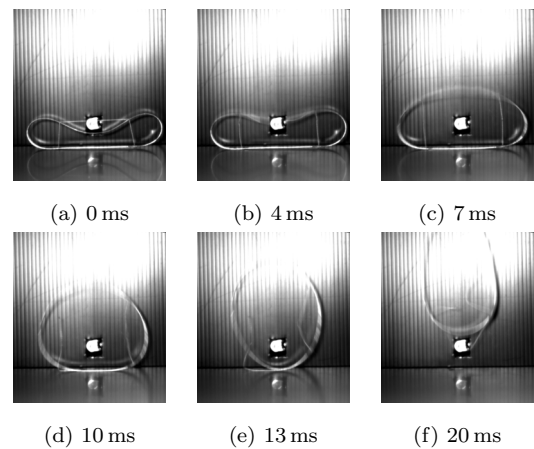


Fig.9 Successive images of dish shape jumping

を行う。本実験で用いるばね鋼の外殻を 64 個の質点に分割し、モデル化を行う。シミュレーション内の外殻のパラメータを実験に用いた外殻から算出すると、各質点の質量 0.074g 、曲げ弾性係数 $k_{\text{bend}} = 0.1417\text{Nm/rad}$ となる。実験的に同定した結果、曲げ粘性係数 $b_{\text{bend}} = 0.00002\text{Nm/(rad/s)}$ を得た。

Table 1 Jumping height

	experiment [mm]	simulation [mm]
(a) cap	480	457
(b) cup	670	669
(c) peanut	970	980
(d) dish	1180	1171

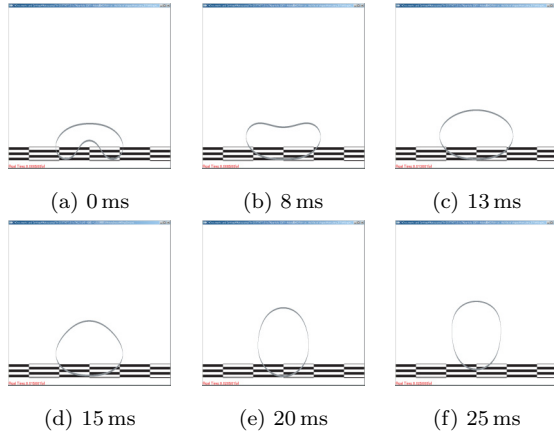


Fig.10 Successive images of the cap shape jumping by simulation

跳躍の実験はメラミン化粧板の机上で行った。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 $k_{\text{ground}} = 1.0 \times 10^6 \text{ N/m}$ 、地面の粘性係数 $b_{\text{ground}} = 1.0 \times 10^3 \text{ N/(m/s)}$ 、動摩擦係数 0.3、静止摩擦係数 0.5 と仮定した。また、地面の弾性係数は設定した値よりも桁数が大きくなるにつれて、跳躍量の増加がなくなり計算が不可能となる。表 1 に実機実験とシミュレーションの最大跳躍量の結果を示す。ただし、ここで示す跳躍量は外殻の最高点における地面からの重心の高さとする。外殻に蓄積される曲げひずみエネルギーは同じである。しかし、図 4 に示す cap shape の跳躍量は 457 mm で、dish shape の跳躍量は 1171 mm と約 2.5 倍の跳躍量の違いが生じる。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、cap shape の場合に誤差は最大で、4.8 % となる。次に、cap shape のシミュレーションによる跳躍の様子を図 10 に示す。実機実験とシミュレーションの結果を比較すると、跳躍動作中の変形形状がほぼ一致していることが分かる。他の変形形状についても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。

4-3 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。各変形形状からの跳躍の際の地面反力を図 11 に示す。図 11-(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。図 11-(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る時に大きな地面反力が生じる。図 11-(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事が分かる。図 11-(d) に dish shape の跳躍時の地面反力を示す。他の変形形状と異なり大きな地面反力が瞬間的に生じていない。また、dish shape は等しい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事が分かる。

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。計算結果を図 12 に示す。図 12-(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。図 12-(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している。図 12-(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。図 12-(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。蓄積された曲げひずみエネルギーが等しい 4 種類の変形形状を比較すると、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が一番大きい。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、理論式と同様に力積の大きさが影響する事が分かる。

4-4 変形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、円形柔軟口ポットの上面と底面の変形形状が跳躍に与える影響を検討する。これまでの研究で、底面が接地した変形形状が跳躍に有利である事が分かった。しかし、変形形状が跳躍にどのような影響を与えることで跳躍量の向

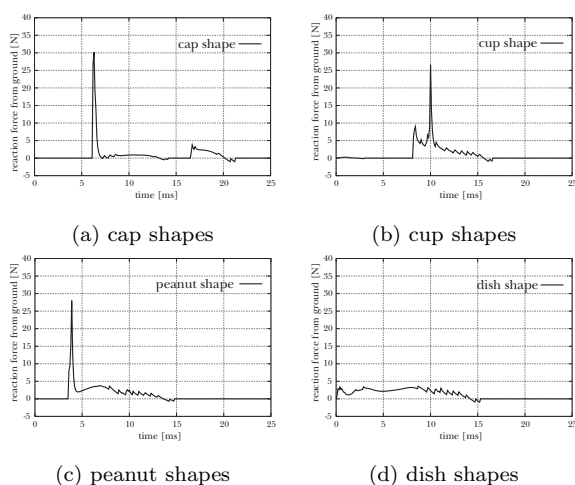


Fig.11 Reaction force from ground

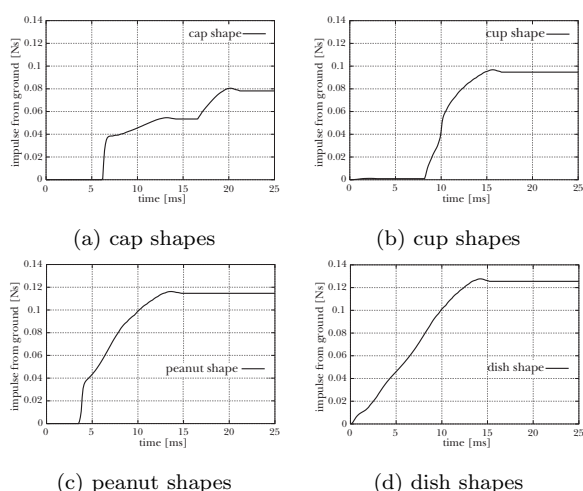


Fig.12 Impulse from ground during jumping

上に繋がるか不明である。そこで、変形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、形状の特徴を上面と底面に分けて考える。まず、同じ曲げひずみエネルギーで、上面と底面の特徴の組み合わせを組替えた計 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。

4.4.1 変形形状の選定と特徴

変形形状の上面と底面の形状の特徴を、円弧の場合は凸、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。まず、図 4-(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変形形状を作成する。図 13 に $U_{flex} = 16.0 \times 10^{-2} \text{ Nm}$ の場合の変形形状を示す。shape A, B, C, D はそれぞれ cap, cup, peanut, dish shape と同じ形状である。次に、各形状の特徴を示す。

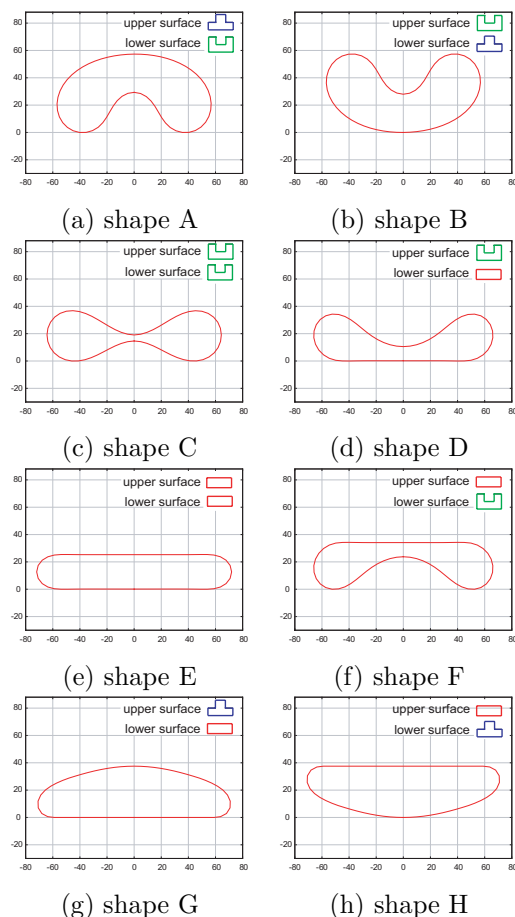


Fig.13 Initial shapes for jumping

図 13-(a) は上面が凸、底面が凹である。図 13-(b) は上面が凹、底面が凸である。図 13-(c) は上面と底面が凹である。図 13-(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。図 13-(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。図 13-(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。図 13-(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。図 13-(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。

4.4.2 変形形状と接地時間・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を接地時間とする。求めた力積を接地時間で割ることで、外殻の接地状態での平均地面反力を求める。表 2 に、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

Table 2 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)

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、平均地面反力が大きい順に shape C, shape B, shape D, 次に大きい形状は shape H, shape F, shape E が大きくなっている。ここで、shape C, shape B, shape D の上面の形状に着目すると、上面の変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、上面の変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ことが分かる。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で比較すると、shape G, shape E, shape D の接地時間は 3~4ms 程度長くなっている。ここで、shape G, shape E, shape D の底面に着目すると、底面の変形状は平面である。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ことが分かる。

図 14 に跳躍時の接地時間と平均地面反力の関係を示す。この時、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が、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の特徴により、跳躍量が最大となったと考えられる。

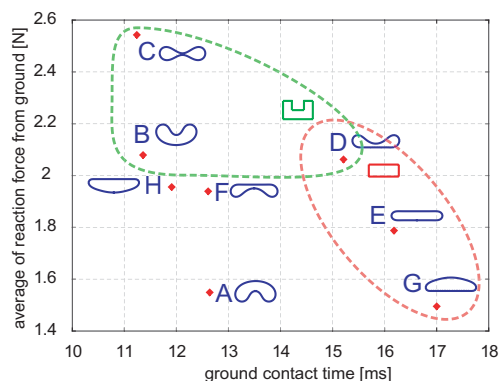


Fig.14 Relationship between ground-contact time and average of friction force during jumping

Table 3 The error of the jumping heights between theoretical solutions and simulation results

shape	I_{react} [kgmm/s]	t_1 [ms]	h_1 [mm]	h_2 [mm]	error %
A	20.0	21.2	58.2	477.1	4.4
B	23.8	16.6	51.6	676.5	1.1
C	28.3	14.8	53.0	956.6	2.5
D	31.3	15.2	54.9	1167.9	0.3
E	28.8	16.2	61.2	991.2	1.0
F	24.3	15.4	53.3	712.7	0.1
G	25.5	17.0	61.8	779.4	0.2
H	23.5	14.2	50.2	668.2	2.1

4.5 力積と跳躍量の関係

本章までにシミュレーションにより算出した力積 I_{react} 、拘束を解放してから地面を踏み切るまでの時間 t_1 、踏み切る瞬間の外殻の重心高さ h_1 を式 (11) に代入し、最高点における跳躍量 h_2 を算出する。その算出した跳躍量と表 2 のシミュレーション結果を比較する。比較した両者の誤差を表 3 に示す。その結果、shape A で最大 4.4 % の誤差が生じた。外殻の底面が地面を叩きつける跳躍は、瞬間的に大きな地面反力が生じるため、時間積分する際に誤差が生じると考えられる。しかし、外殻の底面が地面と広く接地した shape D, shape E, shape G の跳躍量の誤差は 1 % 以内となった。よって、式 (11) は妥当であり、跳躍量は力積、踏み切るまでの時間、踏み切る瞬間の重心の高さによって決定される。

5. おわりに

本報告では、最初に柔軟な外殻の変形を利用した跳躍の原理について述べ、跳躍量の算出式を立てた。次に、ばね鋼を用いて 4 種類の変形状を作成した。それらを用いた跳躍実験より、円形ロボットの跳躍量を

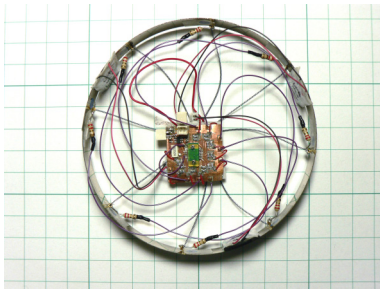


Fig.15 Circular soft robot with built-in battery

測定した。次に、シミュレーションを用いて跳躍量、地面反力、力積を求めた。さらに、計 8 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事が分かった。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、力積は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。加えて、跳躍量は力積、踏み切るまでの時間、重心の高さによって決まることを証明した。以上より、外殻の変形形状に応じて、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、当研究室で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 [12] を図 15 に示す。駆動回路と Li-Po 電池の質量は合わせて、約 5 g となる。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。

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。

文献

- [1] Armour, R., Paskins, K., Bowyer, A., Vincent, J., and McGill, W., "Jumping robots: a biomimetic solution to locomotion across rough terrain", *Bioinspir.*, 2, S65-S82, 2007.
- [2] 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.
- [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, 482-490, 2003.
- [4] 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.
- [5] Ashley, S., "Artificial Muscles", *Scientific American*, October, pp.34-41, 2003.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Moore, M., and Wilhelms, J., "Collision detection and response for computer animation" *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics*, pp.289-298, 1988.
- [12] 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.