

# 柔軟円形ロボットの外殻変形による跳躍の解析

松山吉成 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

## Analysis of Circular Robot Jumping by Body Deformation

\*Yoshinari MATSUYAMA (Ritsumeikan Univ.), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

**Abstract**—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. We simulate the jumping of eight initial deformed shapes. We showed the shape of upper surface is related to the average reaction force from the ground. In addition, the shape of lower surface is related to ground contact times. Then, the jumping height is related to the impulse from the ground.

**Key Words:** Jumping, Deformation, 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、多くの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期待されている。近年、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 [1, 2, 3, 4, 5]。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。しかし、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積を発生することが困難である。

そこで、当研究室では、パネ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して跳躍を行うロボットを開発した [6]。この外殻変形による跳躍について、シミュレーションと実機実験から、外殻に蓄積された曲げひずみエネルギーが等しくても跳躍のための変形形状により跳躍量が大きく異なることが分かった。そして、跳躍量は床反力のピーク値ではなく、力積が影響していることが分かった [7]。

本論文では、particle-based modeling を用いて、円形柔軟ロボ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上に繋がるか不明である。そこで、跳躍時に床に与える力が変形形状とどのような関係があるか細かく調べるために、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、SMA アクチュエータを用いて変形できる可能性のある形状の中から、上面と底面の特徴の組み合わせを組替えた 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床反力を評価する。さらに、地面から外殻に与えられる力積と跳躍量の関係を示す。

### 2. 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 Fig.1 に示す。初期形状から、外力やアクチュエータの発生力

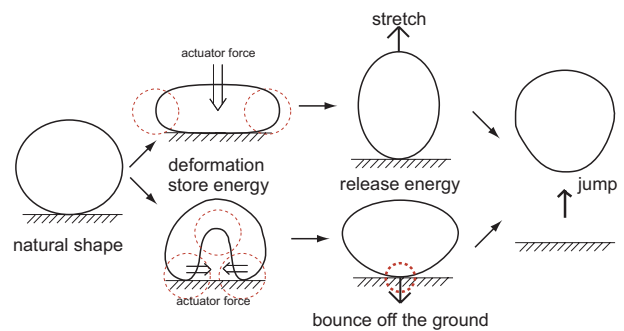


Fig.1 Principle of jumping by body deformation

により、柔軟な外殻を変形させることで、ポテンシャルエネルギーを蓄積し、元の形状に戻ろうとする際に一瞬で放出することで、外界（地面）に力を加えてその反力により跳躍する。変形形状によって、底面が地面に接地した状態で伸び上がるように跳躍する方法とロボットの底面が地面を叩きつけることにより跳躍する方法がある。

### 3. 形状と曲げひずみエネルギー

#### 3.1 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った曲げひずみエネルギーの総和  $U_{flex}$  を算出する。ここで、円形上の 1 点を原点として、その原点からの周囲長の長さを  $s$ 、その点における水平面となす角度を  $\theta(s)$ 、周囲長を  $L$ 、曲げ剛性を  $R_{flex}$  とすると、 $U_{flex}$  は、

$$U_{flex} = \int_0^L \frac{1}{2} R_{flex} \left( \frac{d\theta(s)}{ds} \right)^2 ds \quad (1)$$

となる。ただし、 $d\theta(s)/ds$  は曲率である。ここで、幅 12 mm、厚さ 0.15 mm のパネ鋼 (SUP3) を用いて、直径 100 mm の円形の外殻を作成した。その外殻の自然状態 (円形) では、ヤング率 206 GPa と断面二次モーメントより算出すると  $R_{flex} = 6.9 \times 10^{-4} \text{ Nm}^2$ 、 $U_{flex} = 4.4 \times 10^{-2} \text{ Nm}$  となる。

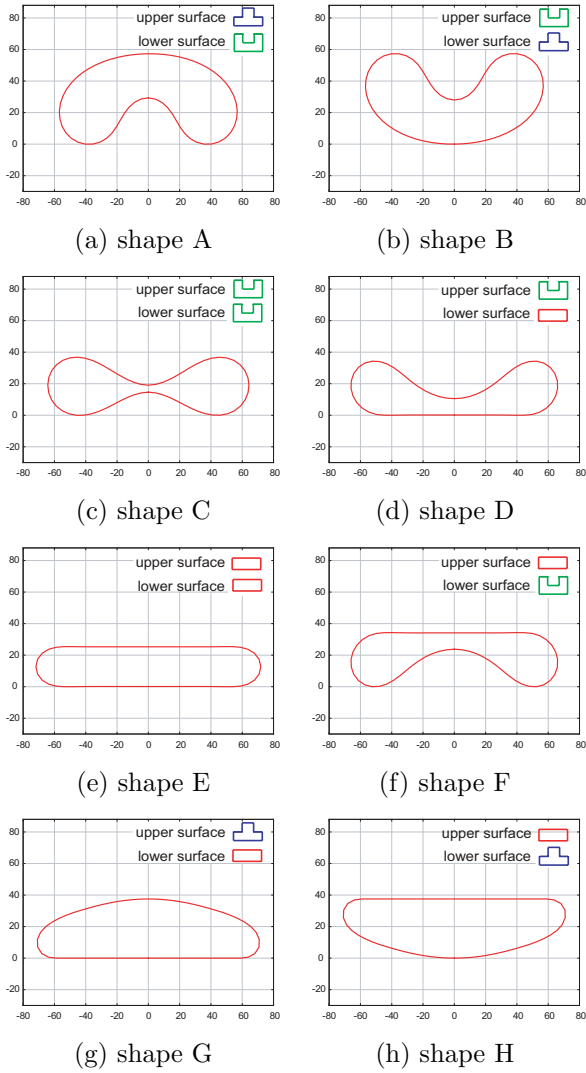


Fig.2 Initial shapes for jumping

### 3.2 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．3個の特徴の上面と底面の組み合わせは、9通りある．ただし、上面と底面が凸の場合は円となるので跳躍しない．そこで、SMA アクチュエータを用いて変形できる可能性がある形状を作成する．その中から、曲げひずみエネルギーが等しく、8通りの特徴を持った変形形状を作成する．ここで、 $U_{flex} = 15.5 \times 10^{-2} \text{ Nm}$  の場合の変形形状を Fig.2 に示す．上面が凸、底面が凹の shape A は、円形の底面を地面に叩きつけて跳躍する．上面が凹、底面が凸の shape B は、shape A を反転した形状で反り返っている両端を地面に叩きつけて跳躍する．上面と底面が凹の shape C は、底面を地面に叩きつけた後、上面が勢いよく伸び上がることで跳躍する．上面が凹、底面が平面の shape D は、底面は接地したままで上面が勢いよく伸び上がることで跳躍する．上面と底面が平面の shape E は、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．上面が平面、底面が凹の shape F は、底面を地面に叩きつけた

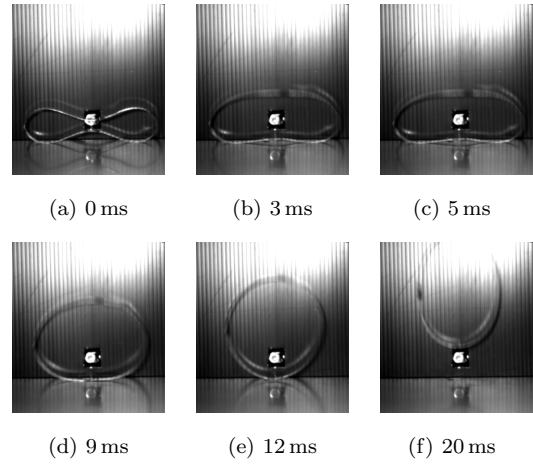


Fig.3 Successive images of the shape C jumping

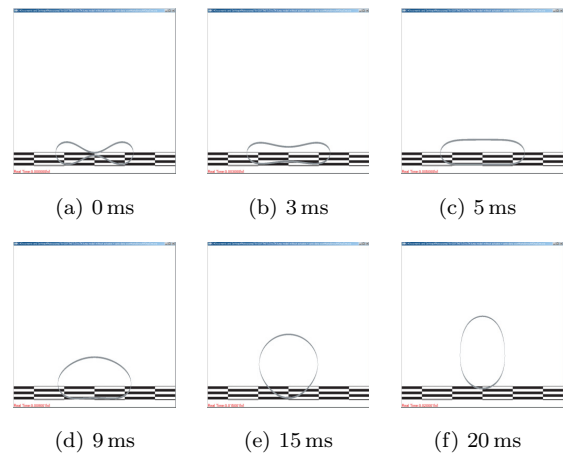


Fig.4 Successive images of the shape C jumping by simulation

後、上面が伸び上がることで跳躍する．上面が凸、底面が平面の shape G は、底面が上面を押し上げることで跳躍する．上面が平面、底面が凸の shape H は、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. シミュレーションによる跳躍の解析

本節では、particle-based modeling[8]を用いて、円形の外殻のみによる変形形状からの跳躍シミュレーションを行う．外殻のモデルのパラメータは、幅 12 mm、厚さ 0.15 mm のバネ鋼 (SUP3) で直径 100 mm の円形の外郭から算出、同定した結果を用いる．シミュレーション結果より、上面と底面の変形形状と接地時間、平均床反力の関係を調べる．また、地面から外殻に与えられる力積と跳躍量の関係を調べる．Fig.3 に shape C の実機実験を、Fig.4 に shape C のシミュレーションによる跳躍の様子を示す．実機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．そこで、シミュレーションのみで検討を行う．

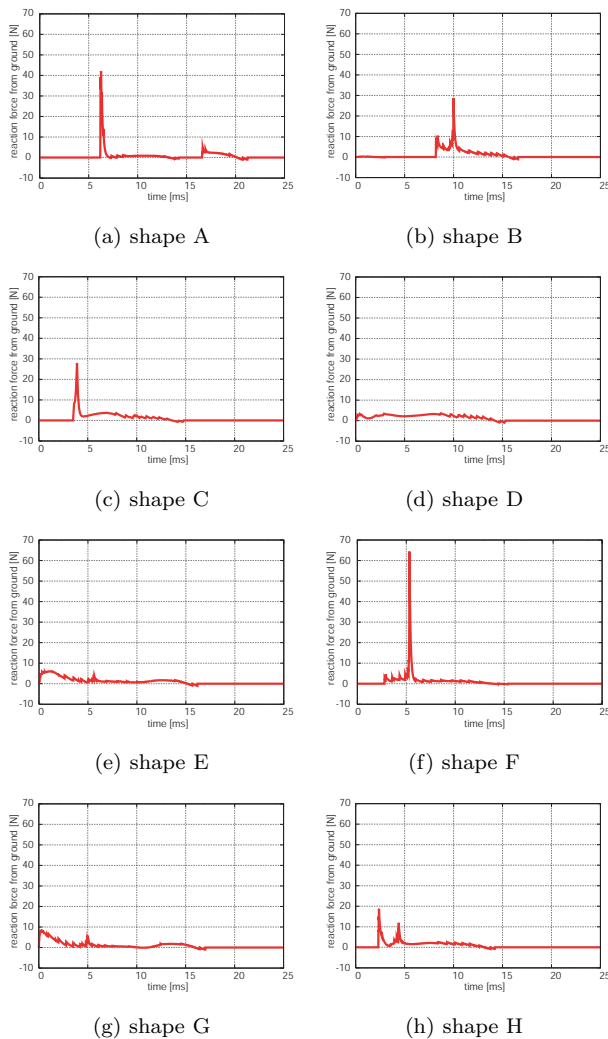


Fig.5 Reaction force from ground

#### 4.1 変形形状と接地時間・平均床反力の関係

シミュレーションにより算出した床反力を Fig.5 に示す. 底面の形状が凹の shape A, C, F と底面の形状が凸の shape B, H は, 地面に接した衝撃力が瞬間的に働き, その後外殻が正味に発揮した推力となっている. 外殻の跳躍動作中の床反力を時間積分して, 力積を求める. 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床反力を求める. 各形状の跳躍量, 平均床反力, 接地時間のシミュレーション結果を Table 1 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, 平均床反力の各値の順位を示す. 平均床反力の結果より, 平均床反力が大きい順に shape C, B, D, 次に大きい形状は shape H, F, E が大きくなっている. ここで, shape C, B, D の上面の形状に着目すると, 上面の変形形状は全て凹である. また, shape H, F, E の上面の形状に着目すると, 上面の変形形状は全て平面である. 従って, 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床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, E, D である. 各形状に

Table 1 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)

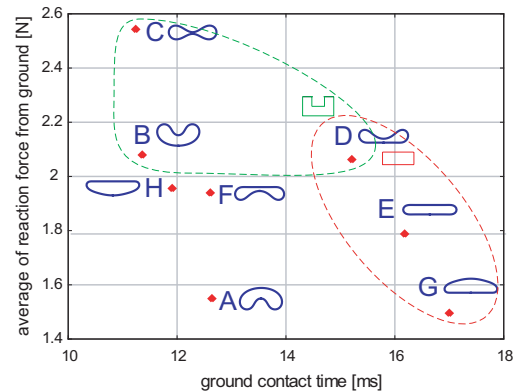


Fig.6 Relationship between ground-contact time and average of friction force during jumping

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, E, D の接地時間は 3~4 ms 程度長くなっている. ここで, shape G, E, D の底面に着目すると, 底面の変形形状は平面である. 従って, 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.

次に, 跳躍時の接地時間と平均床反力の関係を Fig.6 に示す. この時, shape C, B, D は床反力が大きく, shape G, E, 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, B は接地時間が, shape G, E では平均床反力が跳躍量の制限因子となるが, shape D は平均床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. 以上より, 平均床反力と接地時間によって跳躍量が決まると考えられる.

#### 4.2 力積と跳躍量の関係

床から外殻に与えられる力積は, 平均床反力と接地時間の積より算出する. シミュレーションにより算出

した各形状の力積と跳躍量の関係を図.7に示す。

ここで、床からの力積がすべて  $y$  軸方向の運動量に変換されたと仮定すると、跳躍量  $h$  は、

$$h = \frac{Ft^2}{2gM^2} \quad (2)$$

となる。ただし、床からの力積を  $Ft$ 、重力加速度を  $g$ 、質量を  $M$  とする。本研究で用いたバネ鋼の質量は 6.5g である。外殻に床から与えられる力積と跳躍量の間係式を図.7に点線で示す。求めた関係式とシミュレーションの結果がほぼ一致している。従って、各形状の跳躍動作中の力積がわかれば跳躍量を推定できる。

## 5. おわりに

本報告では、円形ロボットの外殻が変形した形状からの跳躍について、シミュレーションを用いて解析を行った。まず、8個の形状を作成して、円形の上面と底面の変形形状の特徴を示した。次に、シミュレーションを用いて、跳躍時の接地時間と平均床反力を求めた。その結果、上面の形状は平均床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床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、力積は平均床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、平均床反力と接地時間の割合が重要であることが分かった。最後に、力積と跳躍量の関係から力積が跳躍量に直接的に決定する要因であることが分かった。今後は、実際にアクチュエータを用いて変形過程を含めた跳躍を実現する。

- [1] 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.
- [2] Ashley, S., "Artificial Muscles", *Scientific American*, October, pp.34–41, 2003.
- [3] Hirai, T., Uddin, Z., Zheng, J., Yamaguchi, M., Kobayashi, S., Watanabe, M., and Shirai, H., "Quick and large electrostrictive deformation

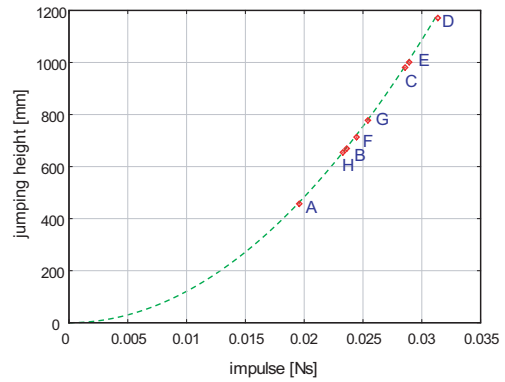


Fig.7 Relationship between ground-impulse and jumping height during jumping

of non-ionic soft polymer materials", *Smart Structures and Materials 2003, Proc. SPIE*, Vol. 5051, pp.198–206, 2003.

- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Matsuyama, Y., and Hirai, S., "Analysis of Circular Robot Jumping by Body Deformation", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1968–1973, Rome, April, 2007.
- [8] 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.