

# 柔軟円形ロボットの外殻変形による跳躍の力学的エネルギー解析

立命館大学 ○松山 吉成, 平井 慎一

## Mechanical Energy Analysis of Jumping by Body Deformation of Soft Circular Robot

○Yoshinari MATSUYAMA and 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 is to investigate the effect of the initial shape of deformation of a circular shell made of spring metal. A simulation of a model is in good agreement with the observations. Then, we analyze the mechanical energies of a circular robot as it jumps.

### 1 緒言

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]。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、バネ鋼などの柔軟なボディを SMA アクチュエータで変形することで跳躍を行うロボットを開発した [2]。シミュレーションおよび実機実験から、跳躍のための初期形状により跳躍量が大きく異なることがわかった。また、この跳躍量の差は跳躍動作における力積が関係していることがわかった [3]。そこで、本論文では跳躍動作におけるエネルギーの推移と損失を評価する。

### 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。アクチュエータにより、柔軟な外殻を変形することで、外殻にポテンシャルエネルギーを蓄積する。変形した形状から元の円形に戻ろうとする際に、蓄積したエネルギーを一瞬で放出する。その時、地面に力を加えてその反力により跳躍する。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と衝突することにより跳躍する方法が考えられる。

### 3 形状と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 のバネ鋼 (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では、 $R_{flex} = 695.25 \text{ Nmm}^2$  となり、 $U_{flex} = 0.0437 \text{ Nm}$  となる。バネ鋼と糸を用いて、 $U_{flex} = 0.1597 \text{ Nm}$  で形状が異なる変形形状を 4 種類作成する。Fig.2 に 4 種類の初期形状

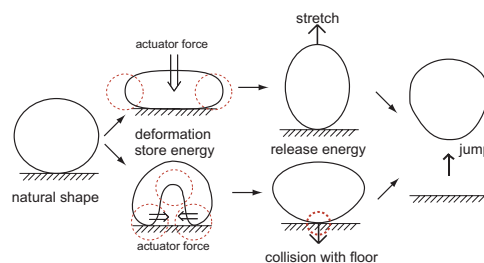


Fig.1 Principle of jumping by deforming shape

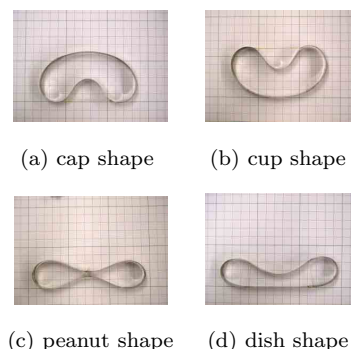


Fig.2 Initial deformation shapes tested for jumping capability

を示す。その形状から、それぞれ cap, cup, peanut, dish shape と名づける。糸は必ず 1 箇所でお互いにつながっており、その一点をライターで切ると一瞬で元の円形に戻り跳躍を行う。Fig.3 に cup shape, Fig.4 に dish shape を用いた跳躍の様子を示す。

### 4 シミュレーションによる跳躍の解析

本節では、particle-based modeling を用いて、外殻の変形による跳躍のシミュレーションを行う。実機実験とシミュレーションの跳躍量を比較する。その後、シミュレーションによりエネルギーの推移を評価する。

#### 4.1 実験とシミュレーションの跳躍量の比較

Table 1 に実機とシミュレーションの跳躍量の結果を示す。外殻に蓄積された曲げひずみエネルギーが等しくても、cap shape と dish shape で最大で約 2.5 倍の跳躍量の差が生じている。このことから、跳躍の際の変形形状により跳躍量が大きく変化することがわかる。また、実機とシミュレー

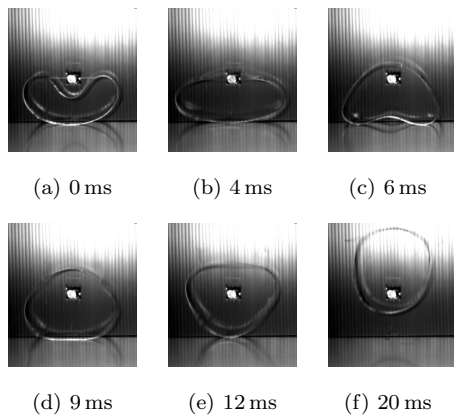


Fig.3 Successive images of the cup shape jumping

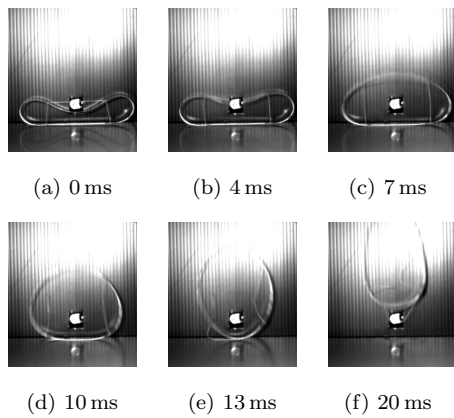


Fig.4 Successive images of the dish shape jumping

シヨンの跳躍量の結果がほぼ一致している．したがって、このモデルが妥当であると考えられる．

#### 4.2 エネルギーの推移

Fig.5 に各々の変形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示す．cap shape と cup shape は床との衝突により、全体のエネルギーが約 0.06 Nm 減少している．一方、peanut shape と dish shape は、全体のエネルギーの減少は少なく、跳躍の初期の運動エネルギーが大きい．次に、各々の変形形状における変換率を Table 2 に示す．円形ロボットの外殻変形により蓄積され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．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、変形形状からの跳躍のエネルギー損失が小さいことがわかる．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わかる．

### 5 結言

本報告では、バネ鋼を用いて 4 種類の変形形状を作成した．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、シミュレーションを用いて跳躍量、力学的エネルギーを求めた．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とシミュレーションからも確認した．次に、力学的エネルギーの推移を評価した．外殻に蓄積された曲げひずみエネルギーが、運動エネルギーに変換され、

Table 1 Height jumped

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

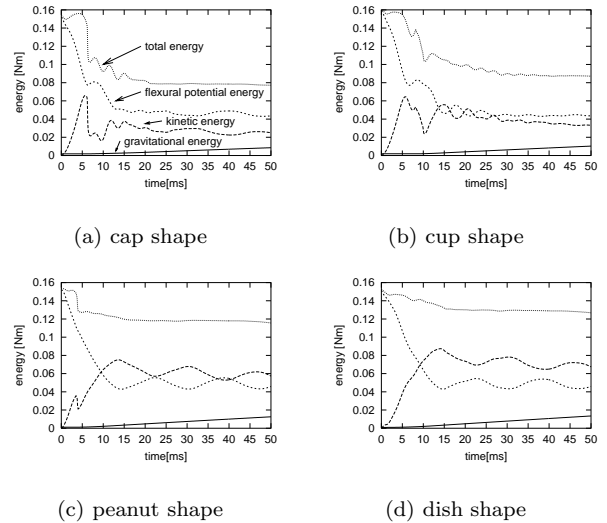


Fig.5 Kinetic and potential energies of a circular robot during jumping

Table 2 Conversion of flexural potential energy into gravitational energy

(a) cap	(b) cup	(c) peanut	(d) dish
25.1 %	36.7 %	53.8 %	64.3 %

最終的に位置エネルギーへと変換している．その結果から、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がわかった．また、最高点における位置エネルギーへの変換率からも、エネルギー損失が大きいたことがわかった．したがって、外殻の変形形状により、跳躍動作における変換効率が大きく異なることがわかった．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．

### 参考文献

- [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] 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.
- [3] 松山吉成, 平井慎一, "柔軟円形ロボットの外殻変形形状と跳躍量の関係の実験的解析", 第 24 回日本ロボット学会学術講演会予稿集 CD-ROM, 2006.