

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

松山吉成 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

Experimental Analysis of Relationship between Deformed Shape and Jumping Height of Soft Circular Robot

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

Abstract—This paper describes the jumping by body deformation of circular robots. Jumping is one of the effective locomotion in the rough area where it is difficult to move by crawlers and walking mechanisms. First, we describe a principle of jumping by deforming shape. Second, we made the shapes of the robot that stored the same bending strain energy. Next, we simulate jumping from those shapes using particle modeling to evaluate the impulse from floor. Finally, we experiment with jumping of circular robots made of spring metal and compare the jumping height.

Key Words: Deformation, Jumping, Impulse, Circular Robot

1. はじめに

現在、ロボットの多くは、ボディが硬く重いため、人間と衝突した際に危害をあたえる可能性がある。そこで、柔らかく軽い素材を用いた構造をロボットに用いることで、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できる。

移動形態については、車輪・クローラー型や歩行型の研究が行われている。しかし、乗り越えることができない瓦礫や段差などの障害物が多く存在する災害現場などの不整地では、今まで以上の高い踏破性が求められている。そこで、跳躍移動を実現することにより、車輪や歩行などでは乗り越えられないロボットの高さ以上の瓦礫や段差を乗り越えて移動することができれば、活動範囲がさらに広がると考えられる。

この考えに基づき、跳躍移動を実現するロボットの研究が盛んに行われている。しかし、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バネ・空圧式アクチュエータ等の蓄積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 [1] ~ [3]。そこで、杉山らは、ゴムやバネ鋼などの柔軟なボディを持った移動と跳躍が可能なロボットを開発した [4][5]。このロボットは、形状記憶合金 (SMA) アクチュエータ [6] を用いた外殻の変形を利用して、移動と跳躍を行う。このロボットの跳躍方法は、外殻の変形により、外殻に蓄積され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という原理に基づいている。しかしながら、エネルギーと跳躍量の関係やエネルギーの放出速度などは、はっきりと解明されていない。柔軟ロボットの跳躍解析を行うには、その変形に伴う重心の移動やエネルギーの推移を評価する必要がある。実機からそれらを動的に測定することは困難である。そこで、円形ロボットのモデリングを行い、シミュレーションを行うことでそれが可能となると考えられる。

シミュレーションおよび実機実験から、蓄積エネルギーが必ずしも跳躍量と一致するとは限らない、跳躍の際の円形ロボットの变形形状により跳躍量が大きく

変化することがわかった [7]。しかし、上述の実験では、各々の变形形状で蓄積されたポテンシャルエネルギーがそれぞれ異なっていた。そこで、本論文では、円形ロボットの外殻に蓄積されたポテンシャルエネルギーが等しい变形形状を用いて、シミュレーションにより跳躍量、床反力、力積を評価する。

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。初期形状から、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 (床) 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、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ある。

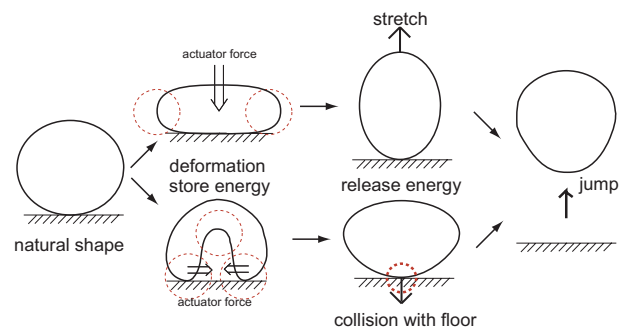


Fig.1 Principle of jumping by deforming shape

3. 形状と曲げひずみエネルギー

本節では、ロボットの外殻の形状に伴った曲げひずみエネルギーの算出方法を述べ、曲げひずみエネルギーが等しい变形形状を作成する。

3.1 曲げひずみエネルギー

ロボットの外殻の形状に伴った曲げひずみエネルギー U_{flex} を算出する。Fig.2 に線状モデルを示す。

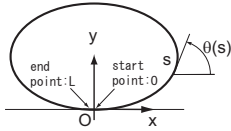


Fig.2 Model of circular robot

ここで、原点からの長さを s とすると、曲げひずみエネルギー U_{flex} は、

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

となる。ただし、曲げ剛性 $R_{flex}=1260\text{Nmm}^2$ 、直径 100mm 、周囲長 $L=314.1\text{mm}$ の円形とする。また、 $d\theta/ds$ は曲率を示す。Fig.3 に示す重力を考慮した初期形状の曲げひずみエネルギーを計算すると、 0.10Nm となった。

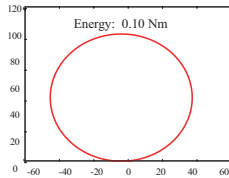


Fig.3 Bending strain energy of initial shape

3.2 等エネルギーの変形形状の選定

曲げひずみエネルギーが 0.30Nm のときの円形ロボットの外形形状を、Fig.4 に示す。(a) は、円形ロボットの下部と床との衝突による跳躍の変形形状で、円形の下部が凹んでいる。(b) は、(a) の形状を裏返した形状で、円形の上部が凹んでいる。(d) は、円形ロボットの上部の伸び上がりによる跳躍の変形形状で、柔軟な円形を床面に落とした際の变形過程から選定した。よって、床面との接地面積が他の形状よりも広く、上部が凹んでいる。(c) は、(a) と (d) の間を取った変形形状で、上部と下部が凹んでいる。外殻に蓄えられたエネルギーは、高い状態から低い状態へと遷移すると仮定すると、変形した形状に蓄えられたエネルギーから初期の円形のエネルギーとの差を用いることで跳躍が可能になると考えられる。

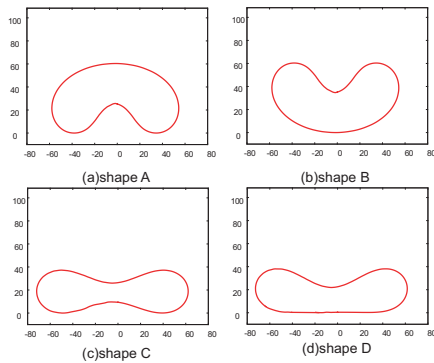


Fig.4 The shapes of circular robot (0.30 Nm)

4. シミュレーション

本節では、前節で示した形状を用いて、外殻と床のモデリングを行い、跳躍のシミュレーションにより、重心の高さを評価する。

4.1 外殻のモデリング

形状を変化させることで跳躍が可能であるかを検証するために、外力により変形する柔軟な外形骨格の変形モデルを作成する。Fig.5 に示すように、円形を 32 質点に近似する。相対角度 θ_i と相対角速度 $\dot{\theta}_i$ に依存して質点にトルクが生じる、曲げ Voigt モデルでつなぐ。

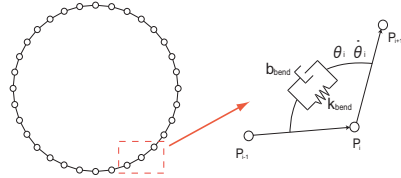


Fig.5 Bend Voigt model around shell particle

ここで、曲げ弾性係数を $k_{bend}=0.051\text{Nm/rad}$ 、曲げ粘性係数を $b_{bend}=0.6 \times 10^{-6}\text{Nm}\cdot\text{s/rad}$ とすると、曲げ Voigt モデルが変形により生じるトルク τ は以下のようになる。

$$\tau = k_{bend}\theta_i + b_{bend}\dot{\theta}_i \quad (2)$$

4.2 床のモデリング

ロボットは床と衝突、床反力により跳躍を行う。そこで、Fig.6 に示すように、質点が床より下方向に入り込んだ際に、バネとダンパー要素からなる Voigt 要素が働き、床より上側に押し戻すペナルティ法を用いる。また、質点の進入量に対して働く垂直抗力に加えて、摩擦係数をかけることで床の摩擦力も仮定したモデルを作成する。シミュレーション内では、仮想的な床として、床の弾性係数 $k_{floor}=1000\text{N/mm}$ 、床の粘性係数 $b_{floor}=1\text{N}\cdot\text{s/mm}$ 、動摩擦係数 0.5、静止摩擦係数 0.69 とする。

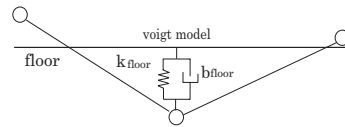


Fig.6 Model of floor

4.3 跳躍のシミュレーション結果

円形ロボットが、変形形状から瞬間的に元の円形形状に戻ることで跳躍するシミュレーションを行う。それにより得られた円形ロボットの跳躍の重心高さを Fig.7 に示す。外殻に蓄積された曲げひずみエネルギーは等しいが、跳躍量は最大で約 620mm の違いが生じることがわかる。また、(a) ~ (d) の順に跳躍量が高くなっている。そこで、次に跳躍動作中に床から円形ロボットに加えられる床反力を Fig.8 に示す。また、床反力を接地時間で積分した力積を Fig.9 に示す。(a) と (b) は、糸の拘束が開放されると瞬間的に空中に浮いた後、

地面と衝突が起きている．跳躍量が大きいほど地面との接地時間が長い．つまり，円形ロボットの变形による跳躍において，跳躍量は瞬間的に加えられる最大床反力の大きさに依存するのではなく，力積と跳躍量の順序が一致しているため床反力と接地時間の長さに依存していることがわかる．

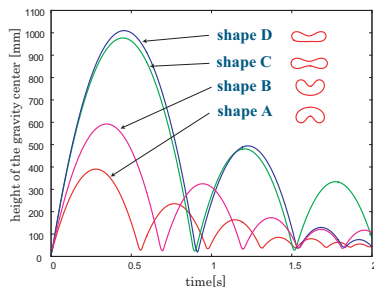


Fig.7 Height of the center of gravity

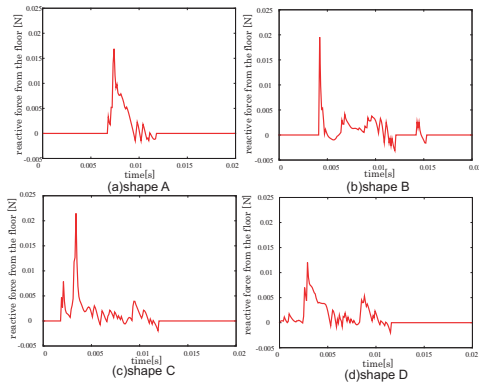


Fig.8 Reactive force from floor

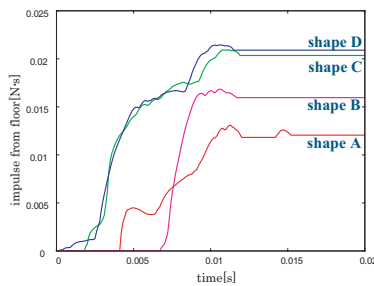


Fig.9 Impulse from floor

5. 実機を用いた実験結果

本節では，実機実験を通して，前節で述べたシミュレーション結果を検証する．また，(a)～(d)について跳躍量を計測する．幅 12mm，厚さ 0.2mm，質量 6g のバネ鋼を直径 100mm の円形にする．その円と糸を用いて，Fig.10 に示すようにそれぞれの形状を作成する．糸の張り方の特徴としては，糸が必ず一箇所で交わるようになっている．よって，ライターを用いて交わった一点の糸を切ることで，瞬間的に元の円形形状に戻るため，シミュレーションと同様の跳躍を行うことがで

きる．それぞれの形状の最高点における円形ロボットの高さを Fig.11 に示す．下端を跳躍量とすると，(a) は 420mm，(b) は 690mm，(c) は 910mm，(d) は 980mm となった．シミュレーションと実機の跳躍高さを比較すると，(b) で最大で約 90mm 低いことがわかる．また，(a) も約 30mm 低い．これは，質点モデルを用いているため床との衝突の際に質点ごとに点接触するため，実際よりも接地する面積が小さくなったためであると考えられる．実機の跳躍の様子を，CMOS + FPGA vision system[8] を用いてフレームレート 500fps，画像サイズ 512 × 1024pixel で撮影した．(a)～(d) の跳躍の様子を，Fig.12～Fig.15 に示す．

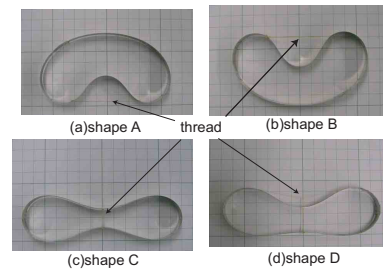


Fig.10 Initial shapes for jumping

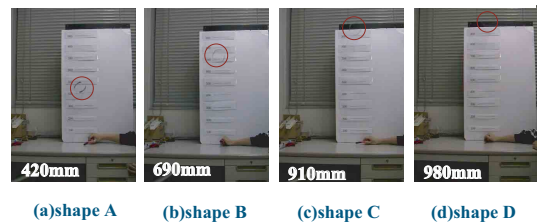


Fig.11 The max height of jumping

6. おわりに

本報告では，シミュレーションを用いて，円形ロボットの跳躍量と力積を求め，実機実験の跳躍量とシミュレーションの跳躍量の比較を行った．まず，曲げひずみエネルギーが等しい変形形状を作成した．それらの形状を用いて，質点モデルにより跳躍のシミュレーションを行った．変形により蓄積したエネルギーが等しいとしても，最大で約 2.5 倍の跳躍量の違いが生じることがわかった．これは，跳躍量が力積の大きさに依存しているため，床反力だけでなく，跳躍動作中における接地時間が重要であるためである．また，拘束の解放時に瞬間的に空中に浮いていることから，両側に開こうとする力に変換されるために，跳躍のためのエネルギー変換において損失が生じていると考えられる．さらに，実機を用いて跳躍量の測定を行った結果，大きな衝突が生じる跳躍においては実験結果よりもシミュレーション結果が低くなった．これはシミュレーションの際の質点数，ゲイン同定が問題であると考えられる．今後の課題として，線状物体モデルを用いて質点間を曲線近似したモデルを作成する．また，エネルギー損失，曲げひずみエネルギーから位置エネルギーの変換効率，外殻の振動について調べる必要がある．

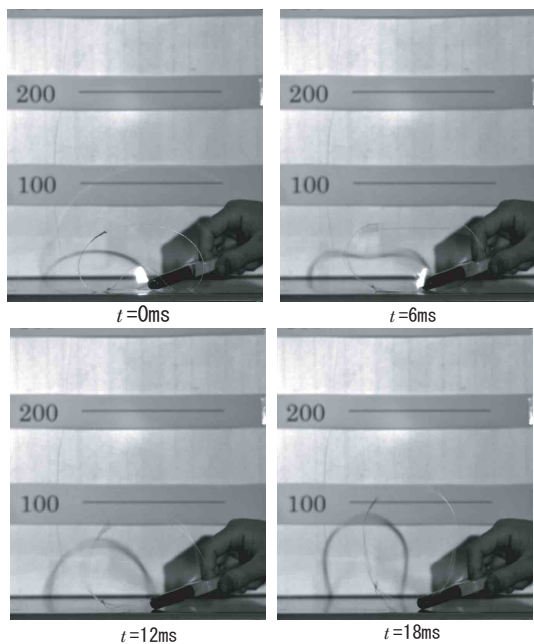


Fig.12 Motion of jumping shape A

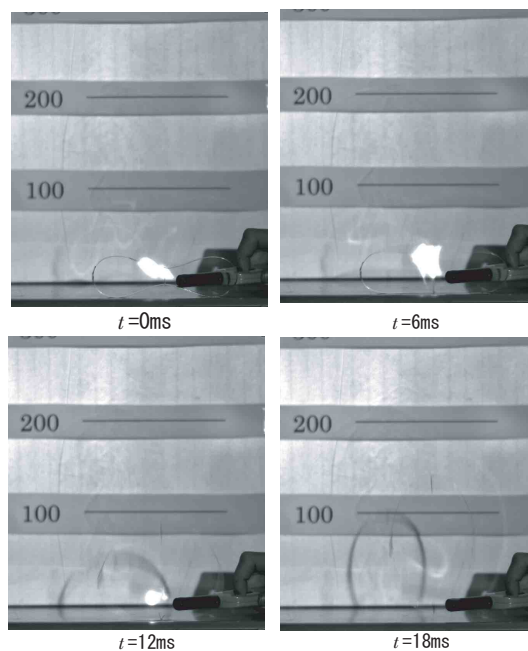


Fig.14 Motion of jumping shape C

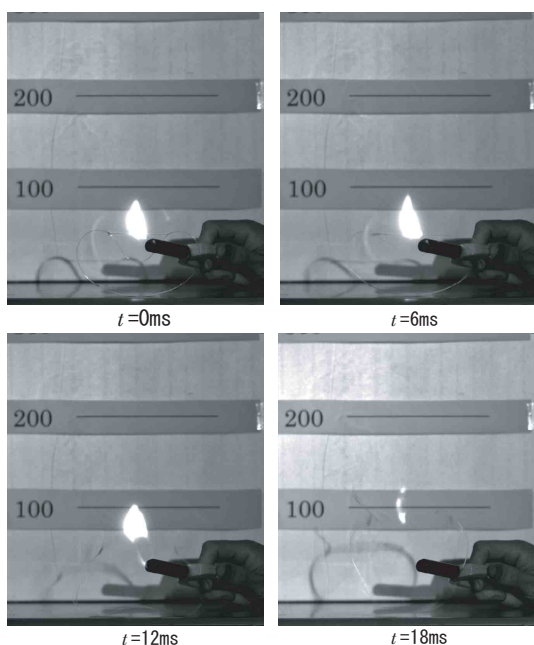


Fig.13 Motion of jumping shape B

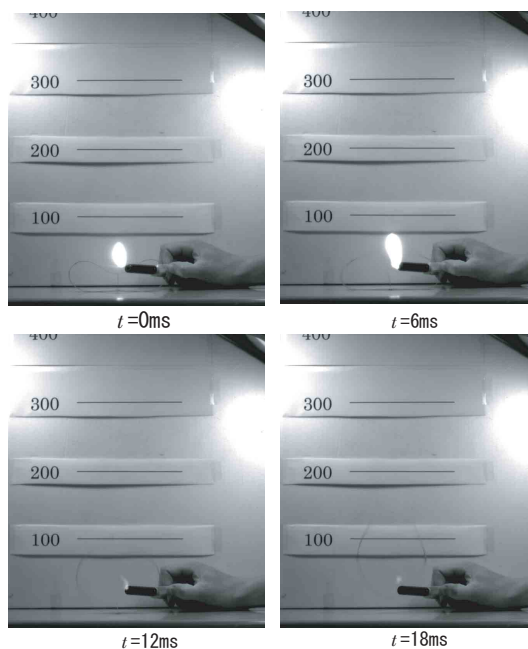


Fig.15 Motion of jumping shape D

参考文献

- [1] 中野栄二, 大久保宏樹, "跳躍ロボット全般について", 日本ロボット学会誌, vol.11, no.3, pp.342-347, 1993.
- [2] 新山龍馬, 國吉康夫, "筋駆動脚機構による跳躍・着地ロボットの開発", 第23回日本ロボット学会学術講演会, 2005.
- [3] Fumitaka Kikuchi, Yusuke Ota, and Shigeo Hirose, "Basic Performance Experiments for Jumping Quadruped", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3378-3383, 2003.
- [4] Ayumi Shiotsu, Masafumi Yamanaka, Yoshinari Matsuyama, Hisashi Nakanishi, Yoshiyuki Hara, Tatsuhiko Tsuboi, Takashi Iwade, Yuuta Sugiyama, and Shinichi Hirai, "Crawling and Jumping Soft Robot KOHARO", Proc. 36th Int. Symp. on Robotics, 2005.
- [5] Yuuta Sugiyama, Ayumi Shiotsu, Masashi Yamanaka, and Shinichi Hirai, "Circular/Spherical Robots for Crawling and Jumping", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.3606-3611, 2005.
- [6] 生田幸士, "形状記憶合金のロボット制御への応用", 日本ロボット学会誌, vol.9, no.4, pp.507-511, 1991.
- [7] 松山吉成, 平井慎一, "円形ロボットの外殻変形による跳躍の実験的解析", ロボティクス・メカトロニクス'06 講演会予稿集 CD-ROM, 2006.
- [8] 清水一弘, 平井慎一, "Matched Filter 法を用いた高速ビジョンシステム", 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.401-402, 2005.