円形ロボットの外殻変形による跳躍の実験的解析

Experimental Analysis of Jumping by Body Deformation of Circular Robot

○学 松山 吉成 (立命館大) 正 平井 慎一 (立命館大)

Yoshinara MATSUYAMA, Ritsumeikan University
Shinichi HIRAI, Ritsumeikan University

This paper describes a new jumping method 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 investigate elastic strain energy of deformed shapes. Next, we simulate jumping of the shapes using particle modeling. Finally, we experiment with jumping of circular robots made of spring metal.

key words: Deformation, Jumping, Circular Robot

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。これまで、様々な移動形態のロボットが開発されている。それらの多くは、ボディが硬く重いため、人に危害をあたえる可能性がある。そこで、柔らかい素材を用いた構造のロボットの実現が期待されている。

従来、車輪・クローラー型や歩行型の研究が行われてきた。しかし、災害現場などの不整地では、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ため、さらに高い踏破性が求められている。そこで、移動形態の一つとして、跳躍移動が有効であると考えられる。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、活動範囲がさらに広がる。

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] を用いた外骨格の変形を利用して、移動と跳躍を行う。外殻とアクチュエータが軽く柔軟であるため、ロボット自体が小さく、軽く、シンプルな機構で壊れにくい構造である。また、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と考えられる。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つ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らが可能となると考えられる。

本論文では、円形の外殻変形が元の形状にもどる力を利用して跳躍を行う新しい跳躍方法の実験的解析を行う。まず、形状変化による跳躍の原理を述べる。次に、ボディの形状と曲げひずみエネルギーについて述べ、質点モデルを用いてシミュレーションを行う。さらに、実機を用いた跳躍量と跳躍の様子をシミュレーションと比較する。

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図 1 に示す。(a) の初期形状から、(b) のように外力やアクチュエータの発力により、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 (c) のように、外界 (床) に力を加えてその反力により跳躍する。

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 U_{flex} を算出する。図 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 $R_{flex} = 600 \text{ Nm}^2$ 、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。図 3 に示す初期形状の曲げひずみエネルギーを計算すると、 $33.1 \times 10^{-4} \text{ Nm}$ となった。

Fig.3 Elastic strain energy of initial shape

外殻の形状と曲げひずみエネルギーを図4に示す。(a)～(h)の順に曲げひずみエネルギーが大きくなっている。(a)は、円形の下部が接地した形状である。(b), (c), (e)は、円形の上部と下部の二点を押さえた形状で、二点の距離が順に短くなっている。(d)(h)は下部が内側に凹んだ形状で、(h)のほうが凹み量が多くなっている。(f)は下部が凹んだ形状で、上部が左右非対称になっている。形状とエネルギーを比較すると、初期形状である円形が他の変形した形状と比較するとエネルギー状態が一番低いことがわかる。(h)の外殻が内側に入り込んだ形状に蓄積されているエネルギーは、初期形状である円形に蓄えているエネルギーの約4倍大きいことがわかる。(c)～(h)に示す形状のように、内側に凹んだ部分があると、その部分の曲率が大きくなり、形状全体として持つ曲げひずみエネルギーは大きくなる。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 Elastic strain energy depending on shapes of circular robot

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ことを検証するために、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。図5に示すように、質点間を相対角度 θ_i と相対角速度 $\dot{\theta}_i$ に依存してトルクが生じる、曲げ Voigt モデルでつ

Fig.5 Bend Voigt model around shell particle

ここで、曲げ弾性係数を k_{bend} 、曲げ粘性係数を b_{bend} 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することで、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 $b_{floor}=1\text{Ns/mm}$ 、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

図7に、シミュレーションによる円形ロボットの重心高さを示す。(a) から (h) の順に初期状態の曲げひずみエネルギーが大きくなっているが、跳躍量は外殻の上部が凹んでいる (b), (c), (e), (g) の形状が残りの形状よりも跳躍量が多い。また、下部が内側に入り込むような形状の (a), (d), (f), (h) は、エネルギーが大きくなるにしたがって跳躍量の増加が見られる。また、(b) と (d) を比較すると、エネルギーの差が $34.9 \times 10^{-4} \text{Nm}$ と (d) のほうが蓄えているエネルギーが大きい跳躍量は、最高点で (b) のほうが 470mm 高い。これと同様に、(g) と (h) についても、エネルギーの差は小さいが跳躍量を見ると 503mm の差が生じている。以上の結果より、初期形状が接地している場合、上部が凹んでいる場合に高い跳躍が可能になっていることがわかる。これは、力積の考え方より、柔軟物体は床から反力と接地時間の積を加えられているため、地面に接した状態のほうが、接地している時間が長いことによって力積が大きく加えられていると考えられる。

Fig.7 Height of the center shape

5. 実機を用いた実験結果

本節では、前節で述べた shapeG のほうが shapeH よりも跳躍量が大きくなることを実機を用いて検証する。また、shapeE, F についても計測する。幅 12mm, 厚さ 0.2mm, 質量 6g のバネ鋼を直径 100mm の円形にする。その円に糸を通して、図 8 に示すようにそれぞれの形状を作成する。跳躍の際は、ライターを用いて交わった一点の糸を切ることで跳躍する。それぞれの形状の最高点における円形ロボットの下端を跳躍量とすると、shapeE では 718mm, shapeF で 502mm, shapeG では 950mm, shapeH で 540mm となった。シミュレーション結果と同様に、質量が小さい時は、shapeH よりも shapeG のほうが跳躍量が大きかった。

Fig.8 Initial shape for jumping

シミュレーションでの跳躍の様子を、図 9 に示す。実機の跳躍の様子を、CMOS + FPGA vision system[7] を用いてフレームレート 500fps, 画像サイズ 512 × 1024pixel で撮影した。shapeE~H の結果を、図 10~図 13 に示す。shapeE, G, H については、跳躍後に縦に長い楕円、横に長い楕円と形状を変化させながら跳躍した。shapeF の形状については、形状が左右対称でないために床から反力を受けた際に、斜め方向に跳躍できるのではないかと考えていたが、シミュレーションで跳躍中の x 方向への重心の移動量は 5mm だった。実機による移動量は 30mm であった。また、shapeF については楕円の長手方向が、shapeE と異なり反時計回りに回っていることがわかる。これは、シミュレーションと実機どちらも似た形状変化を示した。

Fig.9 Motion of jumping soft robot

6. おわりに

本報告では、円形ロボットの跳躍について実験的解析を行った。まず、外力やアクチュエータによる外殻の変化による跳躍の原理を述べた。次に、外殻の形状と曲げひずみエネルギーを算出することで、曲率が大きくなる凹んだ形状のエネルギーが大きいことを示した。また、その形状を用いて、質点モデリングを用いたシミュレーションにより、外殻に蓄えられた曲げひずみエネルギーの差が跳躍量に直接的に関係するのではなく、エネルギーの放出方向と地面との接地状態によることを示した。さらに、実機を用いて跳躍量の測定と跳躍の様子をシミュレーションと比較したことにより、実際の跳躍とシミュレーションの検証した。円形ロボットの跳躍は、単純なエネルギーの変化だけで説明することが困難である。今後の課題として、エネルギーの放出方向を調べるために、力積を評価する。また、床と衝突する際のエネルギー損失などを調べる必要がある。そこで、線状物体モデルを用いて、エネルギーの遷移を詳しく検証する。

Fig.10 Motion of jumping shape E

Fig.13 Motion of jumping shape H

Fig.11 Motion of jumping shape F

Fig.12 Motion of jumping shape G

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] 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.