

# 拮抗駆動式 2 リンク跳躍ロボットにおける 接触モデルと跳躍動作の関係の数値解析

○松野孝博（立命館大学） 新山龍馬（東京大学） 平井慎一（立命館大学）

## 1. 緒言

自然界において一部の昆虫は、移動手段や天敵への威嚇として跳躍することが確認されている[1]。コメツキムシはその一つであり、図 1 に示す通り頭部と腹部を高速に振り上げて跳躍する。これを模した拮抗駆動式 2 リンク跳躍ロボットが提案されている[2]。本報告では、この 2 リンク跳躍ロボットについて、地面との接触条件の違いによる、跳躍動作の変化をシミュレータで検証する。

## 2. 跳躍ロボットのシミュレーションモデル

### 2.1 2 リンク跳躍ロボットの基本モデル

2 リンク跳躍ロボットの基本モデルを図 2(a)に示す。基本モデルはロボットのメインフレームを示す 2 本の剛体リンクと、リンクの上下に設置される 2 本の SMA (shape memory alloy: 形状記憶合金) で構成される。SMA は直列に接続されたフォークトモデルで表され、接続部には受動関節が設置されている。そのため、SMA はメインフレームに沿って変形する。メインフレームと地面の間に発生する接触力はペナルティー法で計算する。

### 2.2 追加部品における接触モデル

2 リンク跳躍ロボットの構成部品は図 2(a)に示す基本モデルに限定されず、用途や目的に応じて必要な部品が追加される。追加部品の一例として、ロボットを無線動作させるための無線給電装置[2]や、実在のコメツキムシを模した形状の外殻などが挙げられる。追加される部品が地面と接触する場合、跳躍の高さや方向に大きく影響するため、追加部品の接触についても考慮する必要がある。一例として、コメツキムシの形状を模した外殻を設置したときの接触モデルの設定例を図 2(b)に示す。コメツキムシの外殻は 3 つの楕円で近似する。楕円 1 はコメツキムシの頭部、楕円 2 および 3 は胸部および腹部を近似している。



図 1 コメツキムシの跳躍

楕円 1 および 2 の長軸は基本モデルにおけるメインフレームと一致させ、それぞれの短軸の長さは任意に設定する。楕円 3 は長軸とメインフレームが同一線上になるよう配置され、長軸と短軸の長さは任意に設定する。3 つの楕円と地面の間に発生する接触力をペナルティー法に従い計算する。

## 3. 接触モデルと跳躍動作・高さ

### 3.1 接触モデルと跳躍動作の関係

本節では、接触モデルの違いによる跳躍動作の変化を検証する。図 2 に示す基本モデルとコメツキムシを模した外殻を設置したモデルについて、跳躍動作を比較する。まず全モデルにおいて、ロボットの質量 216 mg, 全長 20 mm, リンクの比率 7:13, SMA の粘弾性特性をそれぞれ 50 N/m, 0.1 Ns/m, ペナルティー法に用いる粘弾性係数をそれぞれ 500 N/m, 10 Ns/m とする。SMA の駆動力は 0.3 N とし、拮抗の解放時間は 1.2 s とする。いずれのモデルにおいても、長いリンクが右側になるよう配置する。また、コメツキムシを模した外殻を設置したモデルについて、楕円 1 および 2 の短軸を 2.4 mm, 楕円 3 の長軸を 4.8 mm, 短軸を 4 mm とする。

跳躍動作のシミュレーション結果を図 3 に示す。図 3 において、ロボット本体を灰色、SMA を赤および青色、地面を黄色で示す。また、図 3(2)に楕円 1-3 で構成されるコメツキムシを模した外殻を設置したモデルの跳躍動作を示す。比較のために、図 3(1)に楕円 3 を省略したモデル、図 3(3)に基本モデルの跳躍動作を示す。まず図 3(2)より、コメツキムシを模した外殻を設置したモデルは、本体が右回転しつつ左方

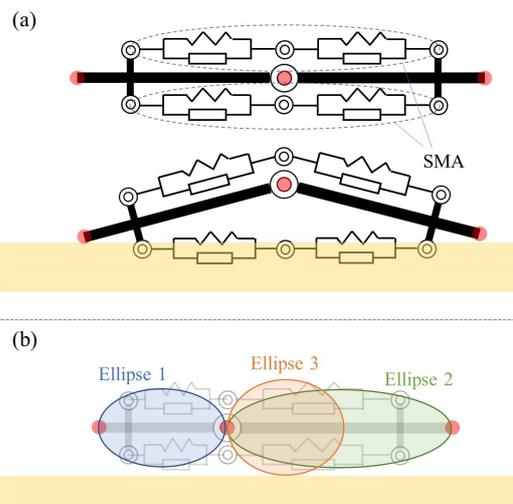


図 2 (a) 跳躍ロボットの基本モデル, (b) コメツキムシを模した外殻の接触モデル

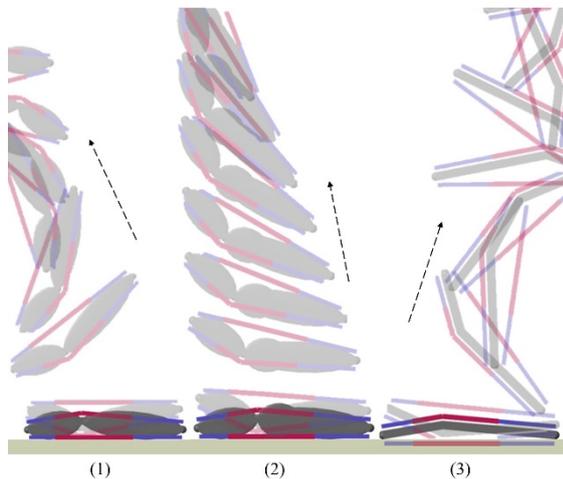


図3 接触モデルの違いによる跳躍動作の変化

向寄りに跳躍する。これは図1と比較すると、実際のコメツキムシの跳躍動作に近いことが確認できる。一方で、楕円3が省略された図3(1)では、ロボットの回転方向が左に変化する。さらに図3(3)の基本モデルでは、ロボット本体は右回転しつつ右方向寄りに跳躍することが確認できる。以上のシミュレーションより、地面との接触モデルが異なることで、跳躍の方向と回転の向きが変化することを確認した。

### 3.2 接触モデルと跳躍高さの関係

本節では、地面との接触モデルにおける粘弾性係数とロボットの跳躍高さの関係をシミュレーションから求める。この検証では図2(a)に示す基本モデルを用いる。ロボットの質量、SMAの粘弾性特性は前節と同様に設定する。またリンク長を、左側のリンクを9mm、右側のリンクを11mmとする。ロボットと地面との接触における粘弾性係数の違いによる跳躍高さの変化を検証する。

シミュレーション結果を図4に示す。図4について、横軸に弾性係数、各種線に粘性係数、縦軸にロボットが跳躍した高さを示す。まず図4に示す一点鎖線から、地面との接触について粘性係数が十分に大きい場合、弾性係数に関わらずロボットの跳躍高さが一定になることが確認できる。一方で粘性係数が小さい場合、跳躍高さは弾性係数によって大きく異なることが確認できる。ここで粘性係数が0.002 Ns/m、弾性係数が5, 100, 4000 N/mの場合について、ロボットが地面から受ける反力を図5に示す。弾性係数が小さい場合、地面との接触時間が長いものの反力が小さいため、地面から受ける力積が小さく跳躍高さも低くなる。一方で弾性係数が大きい場合、地面から受ける反力は大きいものの接触時間が短く、同様に跳躍高さが低くなる。弾性係数が100 N/mの場合、力積が最大となり跳躍高さが最高になる。

## 4. 結言

本報告では、拮抗駆動式2リンク跳躍ロボットのモデル化方法を述べ、ロボットの形状の違いによる跳躍方向の変化と、接触モデルにおける粘弾性と跳

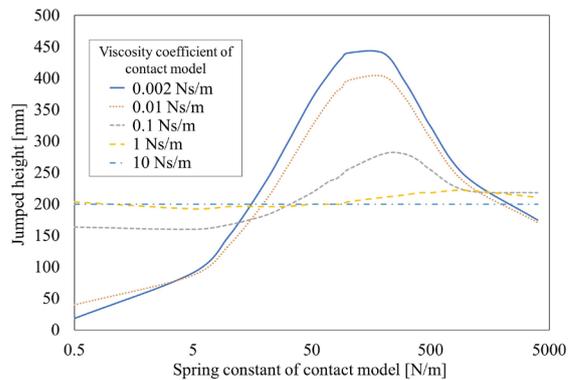


図4 接触モデルにおける粘弾性係数と跳躍高さの関係

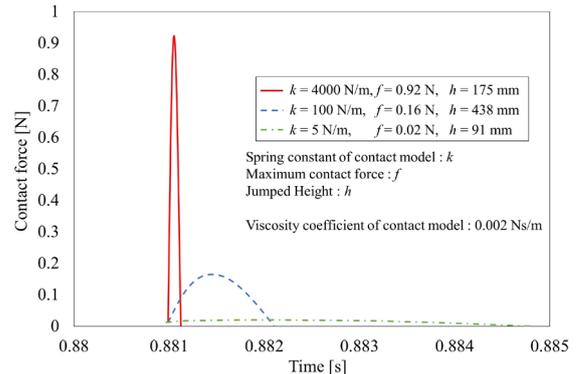


図5 接触モデルにおける粘弾性係数と接触力変化の関係

躍高さの関係について検証した。検証の結果、ロボットの形状の違いにより、跳躍時の方向やロボットの回転方向が変化することを確認した。また、接触モデルにおける粘性が十分に小さい場合、跳躍高さを最適化する弾性係数が存在することを確認した。これらの結果より、ロボットの形状を適切に設計することで、跳躍方向や跳躍時の回転方向を任意に調節できると考えられる。また、ロボットと地面の間に適切な粘弾性体を設置することで、ロボットの跳躍高さを向上できることが予想される。今後の研究において、これらについて実験的に検証を進めていく。

## 謝辞

立命館大学理工学部ロボティクス学科卒業生 Wang Zewen 氏に感謝の意を表す。また、本研究は JSPS 科研費 18H05466 ならびに 21H00333 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] F. J. Larabee, A. A. Smith and A. V. Suarez, "Snap-jaw morphology is specialized for high-speed power amplification in the Dracula ant, *Myrmica camillae*," Royal Society Open Science, Vol. 5, No. 12, Dec. 2018.
- [2] R. Kurniawan, T. Fukudome, H. Qiu, M. Takamiya, Y. Kawahara, J. Yang, and R. Niiyama, "An Untethered 216-mg Insect-Sized Jumping Robot with Wireless Power Transmission", 2020 IEEE/RSJ IROS.