

拮抗駆動式 2 リンク跳躍ロボットの 跳躍シミュレーション

○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

自然界における一部の昆虫は、不整地の走破や天敵からの逃避に、跳躍移動を用いる。これらの昆虫は小型軽量にも関わらず、高い走破性能を有することが確認されている[1]。これらの昆虫から着想を得た高い走破性を有する小型跳躍ロボットが提案されており、その一つに図1に示す2リンク跳躍ロボットが挙げられる[2]。ロボットの中央の関節に対し、その上下に2つのSMA (shape memory alloy: 形状記憶合金) アクチュエータが設置されている。ロボットは自然状態で2つのリンクが水平であり、SMAを拮抗駆動式させることで、高速で地面を叩き、結果として高い跳躍を実現する。本報告では、拮抗駆動式2リンク跳躍ロボットの跳躍動作をシミュレーションする。シミュレーションを用いてSMAの駆動方法による跳躍高さの差異や、リンクパラメータ変更による跳躍特性の変化について考察する。

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モデル

2リンク跳躍ロボットのモデルを図2に示す。ロボット本体は2本の剛体リンクと関節で構成される。関節には実際のロボットと同様の弾性要素を加える。地面との接触点は、ロボット両端および中央の関節部の3か所に設ける。接触力はペナルティー法に従い計算する。

2.2 SMA のモデル化とパラメータ

SMA は図2に示すように、2つのフォークトモデルを受動関節で直列に接続してモデル化する。実機のSMAは、図1に示す通りリンクに沿った曲げ変形が生じる。提案するモデル化方法は、実際のSMAと同様にリンクに沿った曲げ変形が可能である。ま

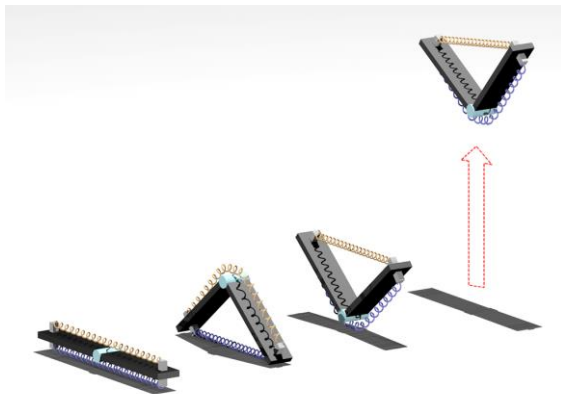


図1 拮抗駆動式 2 リンク跳躍ロボット

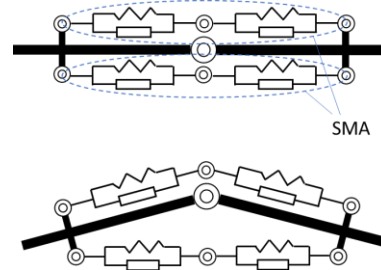


図2 2リンク跳躍ロボットモデル

たロボットのリンク長を変更した場合にも、SMAのリンクに沿った変形を実現するため、リンク長に応じてSMAモデルの受動関節位置を調節する。SMAのばね定数と減衰係数は、単位ひずみあたりの力 k [N]と単位ひずみ速度あたりの力 ζ [Ns]で定義する。

2.3 SMA の駆動方法

次にSMAの駆動方法について定義する。SMAの発生力は任意の時刻 t に、任意の力を直接出力できると仮定する。また、SMAの最大発生力を f とする。時刻 $t = 0$ において、上下のSMAの力は0とする。下側のSMAにおいては、時刻 t_1 に力 f を出力し、 $t = 0$ から t_1 の区間は線形補間する。上側のSMAにおいては、時刻 $t = 0$ から $t_1/2$ まで発生力を0とし、その後、時刻 t_1 に力 f を出力する。 $t = t_1/2$ から t_1 の区間を線形補間とする。このときロボットの姿勢は、図3に示す上に凸の三角形になる。時刻 t_1 以降は、上側のSMAは力 f を維持し、下側のSMAは時刻 t_2 で発生力を0とする。SMAの力の均衡が崩れ、ロボットの姿勢が下に凸の三角形に急激に変化したとき、中央の接触点が地面を叩き、ロボットが跳躍する。

3. 跳躍シミュレーション結果

3.1 シミュレーションセットアップ

前述のシミュレーションをMATLAB/Simulink®のSimscape™で行う。本報告ではロボット中央の関節の弾性係数を $3.4 \mu\text{Nm/rad}$ とする。SMAの弾性係数を

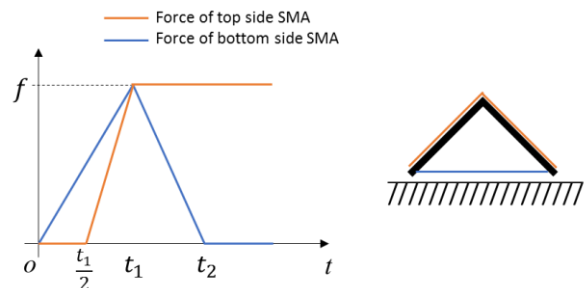


図3 SMAの駆動方法と跳躍直前の姿勢

$k = 500 \text{ N}$, 減衰係数を $\zeta = 1 \text{ Ns}$ とする. ペナルティ一法のための地面の弾性係数を 50 N/m , 減衰係数を 0.1 Ns/m , 摩擦係数を 1 とする.

3.2 SMA 駆動方法による跳躍高さの変化

SMAの駆動方法の変化による跳躍高さの差を検証する. 図3に示す t_1 について5通りの値0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 sで跳躍高さを検証する. なお, t_2 はすべて1.2sとする. 跳躍高さのシミュレーション結果を表1に示す. 表1より, t_1 を小さくし t_2 との間の時間を長く設けることで, 跳躍高さが高くなることを確認できる. よって, 拮抗駆動式の2リンク跳躍ロボットは, 時間をかけて拮抗状態を解放することで高く跳躍すると考えられる. また, $t_1 = 0.4$ における跳躍の動作を図4に示す. 動作を開始するとロボットは平坦な形状から上に凸の三角形に変形していく. 0.4 sで三角形の高さは最大となり, 再び平坦な形状へ近づいていく. その後0.9 sで下に凸の三角形に変形しロボットが跳躍する.

3.3 リンク長による跳躍特性の変化

跳躍ロボットのリンク長と跳躍高さ・水平方向の移動距離の関係について計算する. ロボット左側のリンク長を l_1 , 右側のリンク長を l_2 とする. 左側リンク長 l_1 を10 mmから4 mmまで0.25 mmずつ減らし, 跳躍高さや水平方向の移動距離を比較する. なお, l_1 と l_2 の和が常に20 mmになるように l_2 を設定する. また, この検証では $t_1 = 0.2 \text{ s}$, $t_2 = 1.2 \text{ s}$ とする.

跳躍高さや移動距離のシミュレーション結果を図5に示す. まず l_1 と l_2 が等しく10 mmのとき, 跳躍高

表1 SMAの駆動方法による跳躍高さの変化

t_1 [s]	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2
h [mm]	215.8	215.5	215.0	213.3	11.8

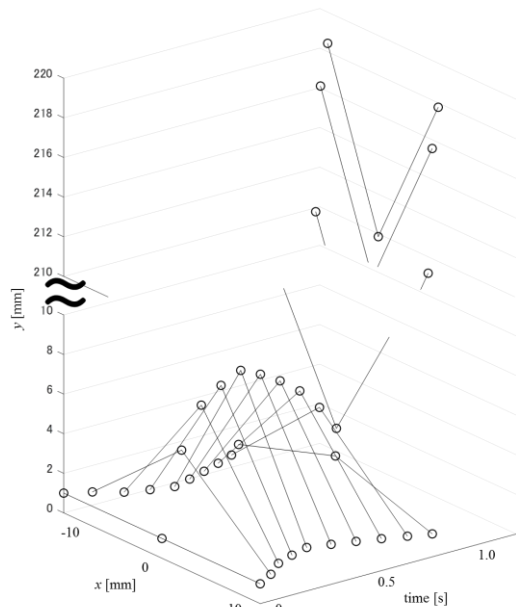


図4 ロボットの跳躍動作

さが最も高く, そして水平方向の移動が無いことが確認できる. ここから, l_1 が短くなるにつれて跳躍高さが減少するとともに, 水平方向の移動距離が増加し, $l_1 = 7.5 \text{ mm}$ の時に最長となることを確認できる. 以降は高さ・移動距離ともに減少する. ただし, $l_1 = 5.75 \text{ mm}$ のとき, 跳躍の特性が大きく変化する. これは, ロボットが跳躍する瞬間の地面との接触位置が大きく変わるためである. $l_1 = 6.0 \sim 10 \text{ mm}$ のとき, ロボット中央の接触点が地面と接触するのに対し, $l_1 = 4 \sim 5.75 \text{ mm}$ ではロボット右端が接触する. 以上より, 2リンク跳躍ロボットはリンク長を適切に設計することで, 跳躍高さ, あるいは水平方向の移動距離を最大にすることができる. ただしこれらは, 地面との接触により大きく変化するため, 実際と近い接触条件をシミュレーションに反映させる必要がある.

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提案し, SMAの駆動方法と跳躍高さの関係, リンク長と跳躍特性の関係を検証した. まず, SMAの駆動方法に関して, 時間をかけて拮抗状態を解放することで, 高く跳躍できることを示した. 次に, リンク長においては, 左右のリンク長が等しいとき跳躍高さが最も高くなることを確認した. また, 左右のリンク長が異なる場合, 長いリンクの方向へ跳躍し, 水平方向の移動距離が最大となるリンク長比率が存在することを示した.

謝辞

本研究はJSPS 科研費19H05337の助成を受けたものである.

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. (to appear)

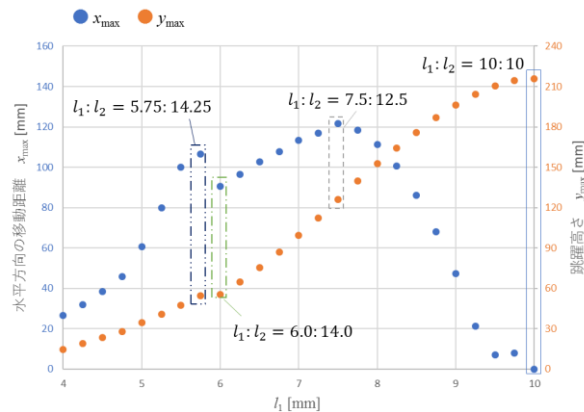


図5 リンク長による跳躍特性の変化