

修士論文要旨 (2021 年度)

リンクを用いた跳躍機構が荷重履歴に及ぼす 跳躍効率向上への影響に関する研究

Study on the effect of the jumping mechanism using the link on the load history to improve the jumping efficiency

電気電子情報通信工学専攻 服部 晃玖

1. はじめに

日本の探査ロボットにおいて開発背景として MIN-ERVA を始め、軽量でありかつ小型のローバの開発を行う傾向にある。MENERVA に関してもさらに小型化が進んだマイクロロボットなどが考えられている。その理由としては、コスト面や海外とのローバの差別化や、多種のロボットを運用するなどがあげられる。軽量化に関しては搭載重量内に複数台の探査ロボットやローバを乗せることが可能となり、数による探査範囲が拡大することや、探査システムのリスクが分散化されたり、探査システムの多機能化などがあげられる。また他国の打ち上げなどの際に搭載スペース次第で空いていれば、一緒に搭載できる可能性も挙げられる。

探査ロボットにおいては惑星に存在するレゴリスや岩、クレータなどが存在する不整地を走行することが求められる。ローバの移動機構とし、車輪型、クローラ型、脚型などがあげられる。また欠点を担う複合型なども近年では開発されている。しかし小型化にすると車輪型のローバにおいては、乗り越えられる障害物も相対的に小さくなり、サスペンションがない場合、乗り越え能力は望めない。またセンサの設置位置が低くなり視野が狭くなり、障害物認識や経路の破綻が起こる。これらの課題を解決、実現するため、本研究室では小型ホッピングローバを提案している。このローバはホッピングすることにより移動するということを目的としている。

2. 目的

本研究は砂地におけるばねを用いた跳躍機構の跳躍効率を目的とする。直動の機構とリンクを用いた機構を比

較し、荷重履歴が異なることで、砂の形状を崩さずに跳躍し跳躍効率が向上するかという事を目的としている。また跳躍の際に地面からどのような反力が返されているのかを確認することで、跳躍効率に影響があるのかを言うことを目的としている。

3. 提案機構

4. 実機モデル

4.1 直動型跳躍機構

Fig3.3 に直動型の跳躍機構を示す。



図 1: Straight Leg Hopper

5. 非線形型跳躍機構

Fig3.4 に非線形型の跳躍機構を示す。

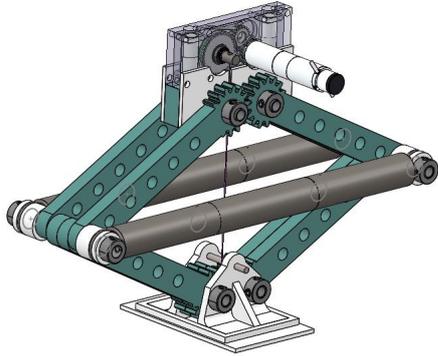


図 2: Pantograph Leg Hopper

6. シミュレーション

6.1 線形モデルの 2 階微分方程式

Fig3 に 2 質点の線形モデルを示す. それぞれの運動方程式は以下のように示すことができる. また力の向きは鉛直上向きを正としている.

$$(接地中) \quad m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = k_1(x_2 - x_1 + l_0) - m_1 g$$

$$(接地中) \quad m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_1(x_2 - x_1 + l_0) - k_2 x_2 - c_2 \frac{dx_2}{dt} - m_2 g$$

$$(接地中以外) \quad m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = k_1(x_2 - x_1 + l_0) - m_1 g$$

$$(接地中以外) \quad m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -k_1(x_2 - x_1 + l_0) - m_2 g$$

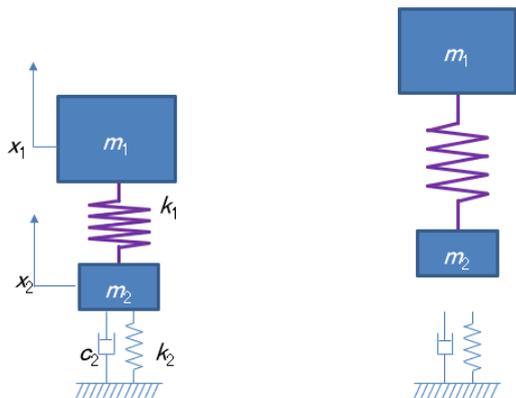


図 3: Model of Linear Hopper

ここで m_1 :上部の重量, m_2 :下部の質量 [kg], k_1 :跳躍機構のばね定数 [N/m], k_2 :地面表現であるバネマスダンパ

のばね定数 [N/m], c_2 :地面表現であるバネマスダンパのダンパ係数 [N·s/m], l_0 :ばねの自然長 [m] とする.

6.2 非線形モデルの 2 階微分方程式

Fig4 に 2 質点の非線形モデルを示す. それぞれの運動方程式は以下のように示すことができる. また力の向きは鉛直上向きを正としている.

$$(接地中) \quad m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F - m_1 g \quad (5)$$

$$(接地中) \quad m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -F - k_2 x_2 - c_2 \frac{dx_2}{dt} - m_2 g \quad (6)$$

$$(接地中以外) \quad m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F - m_1 g \quad (7)$$

$$(接地中以外) \quad m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -F - m_2 g \quad (8)$$

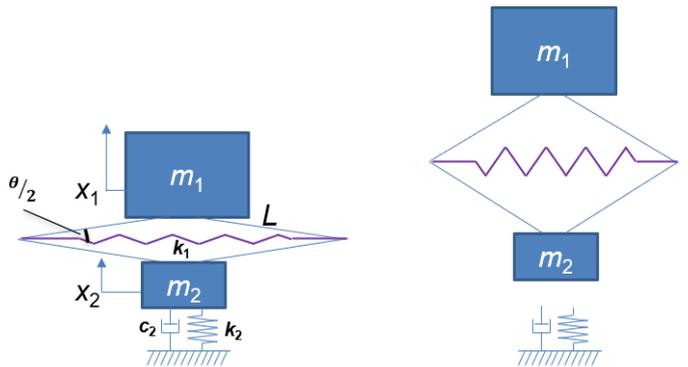


図 4: Model of Linear Hopper

ここで m_1 :上部の重量, m_2 :下部の質量 [kg], k_1 :跳躍機構のばね定数 [N/m], L :リンクの長さ [m], $\theta/2$:リンクとばねのなす角度 [rad], k_2 :地面表現であるバネマスダンパのばね定数 [N/m], c_2 :地面表現であるバネマスダンパのダンパ係数 [N·s/m] とする.

6.3 地面の損失エネルギーに関して

損失エネルギーに関して Fig.5 に示す. 直動型の損失エネルギーは図の青色の部分で、非線形型に関しては赤色の部分である。ここから分かるように非線形型は砂地において強い力で押さないために直動型と比較したときに損失エネルギーがとても小さいことが分かる。しかし非線形型は力を分解しており、機構側でわずかではある

が損失エネルギーが存在する。なので地面がとても固い場合であれば直動型の方は機構側で損失するエネルギーがない分高く跳躍することが可能だと考えられる。

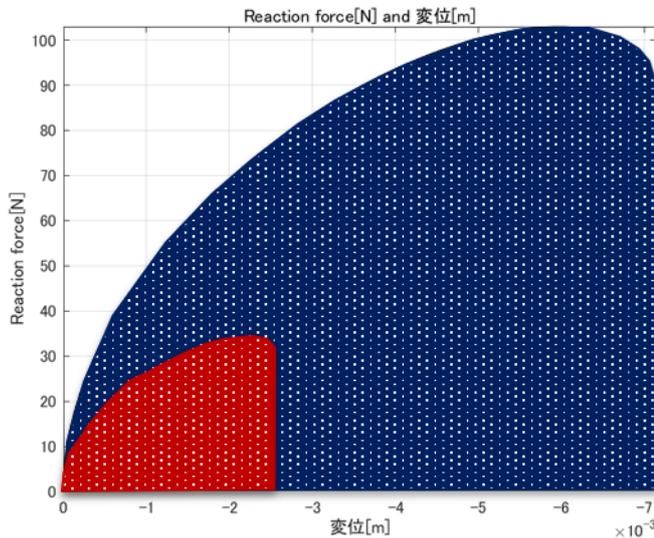


図 5: 損失エネルギー

7. 実験説明

ここでは実験の説明をする。実験では中央大学の3号館3908号室の砂場を使って実験を行う。また砂場の砂の種類は珪砂5号を用いる。モーションキャプチャで跳躍機構がどの程度跳躍したかを測定する。また砂の硬さを変えてそれぞれどういった反力が得られるのかも反力センサを用いることで測定する。直動型は密詰めと緩詰で跳躍力に差があり、非線形型は密詰めも緩詰めも跳躍力に直動型ほど大きな差は見られなかった。また非線形型跳躍機構の方が跳躍力が全体的にあることが分かったこれは非線形型はリンクを介してばねの力を地面に伝えるため弱い力が地面に伝わる。そのため砂が密詰め、緩詰めのどちらの時も砂を散逸させないでエネルギーを失わず跳躍できるという事があると考えられる。また線形型は砂を散逸させながら跳躍するためエネルギーが地面で失われてしまうという事が考えられる。

7.1 反力履歴と累計力積

反力履歴と累計力積に関してはどちらもシミュレーションとおおよそ一致していることが分かった。また累計力積が直動型・非線形型どちらに対しても後半下がってき

ているのは反力センサの値の跳躍しているときの値も力積として求めてしまっているのが原因だと考えられる。

7.2 直動型

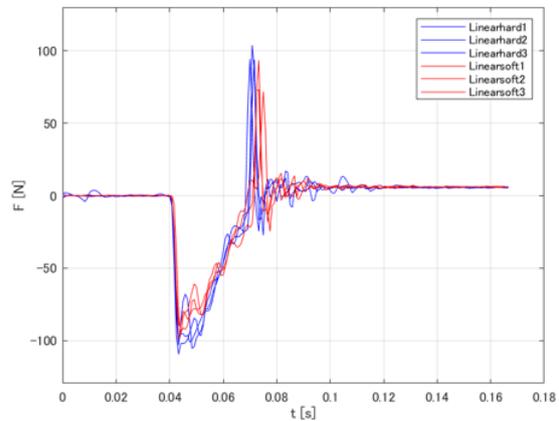


図 6: 反力履歴

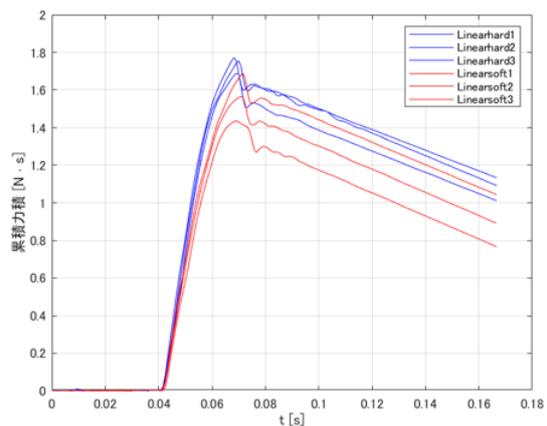


図 7: 累計力積

直動型は密詰めと緩詰めの時の反力を比較したときに若干ではあるが密詰めの方が最大の反力値が大きい傾向があることが分かる。これは密詰めであることから地面が散逸せず、反力としてパッドに返している。一方緩詰めに関しては地面を多少ではあるが散逸させているために、反力が小さくなっていると考えられる。累計力積は非線形型よりも直動型の方が差が密詰めと緩詰めの時を比較すると明らかである。これは砂が緩詰めの時にばねの張力から得る力が砂を散逸させてしまうことで、反力が少なくなるからだと考える。

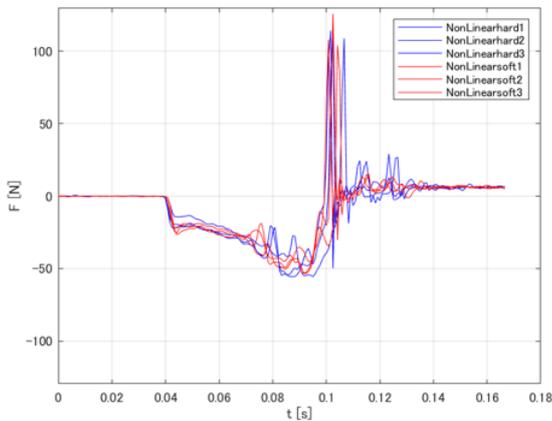


図 8: 反力履歴

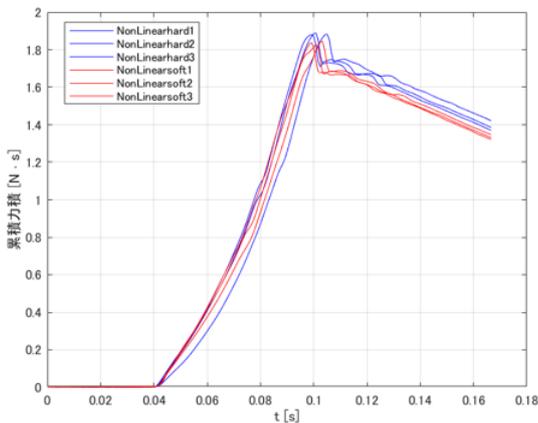


図 9: 累計力積

7.3 非線形型

非線形型は密詰め、緩詰めと比較したときに反力履歴に関してはそこまで変わっていないように見える。非線形型は、リンクを用いることによってばねから得られる張力を変えている。そのため直動型に比べパッドにかかる力が弱く密詰めに限らず緩詰めに対しても地面を散逸させない可能性がある。そのため密詰め及び緩詰めに対する反力履歴に差がないと考えられる。また累計力積は弱い力で砂を散逸させずに長い間踏み込んでいるために地面の反力の累計力積が大きいと考えられる。

8. おわりに

今回はシミュレーションと実機実験どちらからも非線形跳躍機構が不整地に対して優位だということが分かった。なぜなら地面へ加える力が小さく砂を散逸させずにしっかりと踏み込むことができる。また地面がくずれて

いかないために長い間踏み込むことができる。その結果累計力積が大きくなり跳躍距離が高まる。また非線形型の損失エネルギーは直動型と比較してとても小さいエネルギーだということが分かった。また実機の反力履歴と累計力積がおおよそ一致しており、これからシミュレーションの整合性が取れていることが分かる。そこから地面への損失エネルギーをシミュレーションで見えていたが、妥当性のあるものと言える。

参考文献

- [1] "The Mars Exploration Rovers: Spirit and Opportunity" <https://mars.nasa.gov/files/resources/MER10-YearAnniversaryLithograph.pdf>
- [2] <https://www.nasa.gov/jpl/nasa-robot-plunges-into-volcano-to-explore-fissure>
- [3] Tetsuo Yoshimitsu: "HOPPING ROVER "MINERVA" FOR ASTEROID EXPLORATION", 2006
- [4] H.J.Eisen: "Sojourner Mars Rover Thermal Performance", SAE Transactions, Vol. 107, Section 1: JOURNAL OF AEROSPACE (1998), pp. 697-707 (11 pages)
- [5] Brian H. Wilcox and Ross M. Jones: "The MUSES-CN Nanorover Mission and Related Technology"
- [6] R.A.Lindemann, D.B.Bickler, B.D.Harrington, G.M.Ortiz, C.J.Voothees: "Mars exploration rover mobility development" Volume: 13, Issue: 2, June 2006, pp19-26
- [7] Mirko Kovac and Martin Fuchs and André Guignard and Jean-Christophe Zufferey and Dario Floreano: "A miniature 7g jumping robot", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008, 373-378
- [8] Chi Zhang, Wei Zou, Liping Ma, Zhiqing Wang: "Biologically inspired jumping robots: A comprehensive review" Robotics and Autonomous Systems, Volume 124, February 2020, 10336
- [9] Zhihui Miao, Jixue Mo, Gang Li: "Wheeled hopping robot with combustion-powered actuator" Journal of Advanced Robotic Systems, January-February 2018: 1714
- [10] Zachary Batts Joohyung Kim: "Untethered One-Legged Hopping in 3D Using Linear Elastic Actuator in Parallel (LEAP)" ISER 2016: 2016 International Symposium on Experimental Robotics pp 103-112
- [11] Zachary Batts, Joohyung Kim, and Katsu Yamane: "Design of a Hopping Mechanism Using a Voice Coil Actuator: Linear Elastic Actuator in Parallel (LEAP)"
- [12] <http://global.parrot.com/jp/products/jumping-sumo/>
- [13] <https://www.jpl.nasa.gov/universe/archive/un0012.pdf>
- [14] https://www.nasa.gov/audience/foreducators/robotics/imagegallery/r_frogbot.jpg.html
- [15] Fan Zheng, Xiaohong Chen, Yuanxi Sun, Junzhan Hou: "Design and Experimental Evaluation of a Single Actuator Continuous Hopping Robot Using the Geraed Symmetric Multi-Bar Mechanism", Appl. Sci. 2019, 9(1), 13
- [16] 前田 孝雄, 國井 康晴, 新通 光太郎, 大槻 真嗣, 吉川 健人, 吉光 徹雄 "小型ホッピングローバのための跳躍機構と移動戦略の検討", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演集, 2P2-A11, 2017
- [17] https://www.onosokki.co.jp/HP-WK/c_support/newreport/dampingfactor/dampingfactor_2.htm