

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

Mechanism Design and Action Strategy for Small Hopping Rover

○正 前田孝雄 (中央大) 正 國井康晴 (中央大) 学 新透光太郎 (中央大)

正 大槻真嗣 (JAXA) 吉川健人 (JAXA) 吉光徹雄 (JAXA)

Takao MAEDA, Chuo University, maeda@elect.chuo-u.ac.jp

Yasuharu KUNII, Chuo University Koutarou SHINDORI, Chuo University

Masatsugu OTSUKI, JAXA Kento YOSHIKAWA, JAXA Tetsuo YOSHIMITSU, JAXA

This paper describes the design of the hopping rover for the moon or Mars surface exploration. Hopping rover is one of solution for locomotion on loose and rocky terrain on the moon and planetary surface. The hopping rover can jump over an obstacles. Since the height of hopping is equal to the height which the rover can get over, the traversability of rover becomes higher than that of the small wheeled rover. In this paper, we describe the whole design of the hopping rover, design of hopping mechanism, simulator with the estimation of terrain force, action strategy, and the scientific missions.

Key Words: Space robot, Hopping, Jump, Moon exploration, Planetary exploration

1 緒言

小型の月、惑星探査ローバ、特に質量数 kg 程度のローバは、小型の着陸機にも搭載可能であり、様々なミッションでローバを展開することが可能になる [1]。小型ローバはその搭載性と引き換えに、移動性能に制約を受ける [2]。車輪の不整地走破性は、基本的にその直径に依存する。そのため、小型ローバでは段差、岩石などの障害物上の走破が困難になり、移動に制約を受けてしまうこの問題の解決策の一つに、跳躍移動の利用が考えられる。小型であるが故のローバの軽さを有効活用し、機体より大きな障害物も飛び越えることで回避可能になる。跳躍はまたスタックを回避することにも有効である。レゴリス上では車輪だけでなく優秀な懸架機構を有していないと車輪がスタックする可能性が高い。小型ローバでは複雑な懸架機構の搭載が難しく、車輪移動のみではスタックし立往生する危険をばらむ。跳躍移動によりスタック回避も可能になり、小型ローバの移動性向上に大きく寄与できる。

本論文では、小型跳躍ローバの要となる跳躍機構と、ローバ全体の設計論、並びにこれらを用いた移動戦略について議論し、JAXA の次期月着陸探査機 SLIM への搭載を目指す小型ローバの設計に関する検討についてまとめる。

2 跳躍システム

2.1 跳躍機構

一般的に考えられる跳躍機構としては、表 1 にまとめるような手法がある。また、それぞれの優位点、欠点も示す。地上アプリケーションや極めて短期の運用であれば、使用回数制限はあるが長距離跳躍が可能でガス式が優位であるが、数日を超える長期間運用を太陽光などの電気エネルギーのみの供給下で実施するためには、外部へ質量放出のない、かつ大推力を発揮できるばね式が優位になる。本研究では、月面での継続的な運用を考慮して、ばねを用いた跳躍機構について検討する。

ばね式の跳躍機構のために設計された、図 1 に示す単アクチュエータ式のエネルギー蓄積・解放機構では、モータ正転時にばねにエネルギー蓄積を行い、逆転時にはワンウェイ機構の作用で任意の位置でばねの開放を行うことができる。これにより、ばね開放用のアクチュエータが不要となり、それに付随するドライバ関連も削減可能であるため、ローバ小型化に寄与できる。

2.2 跳躍シミュレータ

ローバの跳躍動作の検証や、レゴリスとの接触を考慮して地面を蹴るための適切な跳躍載荷板を設計するため、土壌モデルを有した跳躍シミュレータが求められる。本研究では、Resistive Force Theory[10] を土壌反力推定に用いた Multibody Dynamics

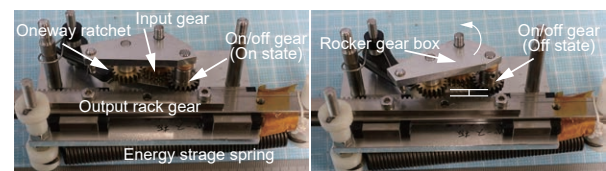


Fig.1 Single actuator hopping mechanism

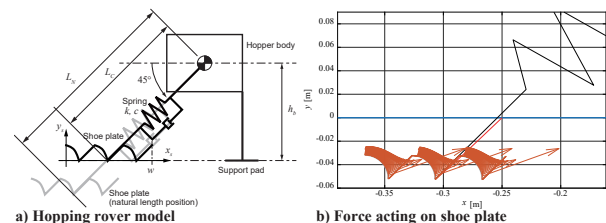


Fig.2 Hopping simulator and the force acting on the shoe plate

シミュレータを MathWorks 社の MATLAB 上に構築し検証を行っている。

図 2 に示すように、シミュレータでは時々刻々変化するローバの姿勢に合わせて載荷板に作用する反力を計算し、ローバの動的な挙動を計算することが可能である。

3 移動戦略

3.1 跳躍方位制御

跳躍ローバは機体を跳躍したい方向へ事前に向ける必要がある。一般的な車輪型ローバのように旋回する方法や、専用の旋回機構を用いる方法などが考えられる。表 2 に検討した旋回方法について示す。

設計の簡素さ並びに実施する科学ミッションへの親和性を考慮すると並行二輪あるいは方位制御用単輪を有する構成が適していると考えられる。さらに、何らかの形で車輪を用いることは、続く大型ローバが走行する際の情報の取得にも有意である。図 3 にこれら二種のコンセプトを示す。

3.2 着地

小型ローバの跳躍に際しては、エネルギーが小さいため、専用の着陸機構を有する必要はなく、機体や車輪で衝撃吸収が可能と

Table 1 Type of hopping mechanisms

種類	構造	長所	短所	使用例
ばね式	モータなどのアクチュエータではばねにエネルギーを蓄積し、短時間で開放する	ばねは繰り返し利用可能、小電力でもエネルギー蓄積可能	大きな推力を得るためには重いばねが必要、機構簡素化に工夫が必要	JPL hopper(NASA)[3], CSA hopper(CSA)[4]
ガスシリンダ式	内燃機関のようにシリンダ内部でガスや火薬を燃焼させ、その圧力がピストンを介して地面を蹴る	大推力、機構部の小型化が可能	使用回数に制限あり	Sand Flea (Boston Dynamics)[5]
ガスジェット式	スラスタからガスを噴出して移動する	質量放出により飛翔するため地面の状態に関係なく移動可能	使用回数に制限あり、レゴリス噴き上げの可能性	Jumping Scouter (JAXA)[6]
内部トルカ式	内部のリアクションホイールを回転させ、その反トルクで跳ぶ。リアクションホイールではなく、リニアな動作を用いるときはばね式と同じ	繰り返し利用可能、トルカ制御で任意の跳躍距離を達成可能、完全密閉設計が可能	大きな跳躍力を得ることが困難	MINERVA, MINERVA-II(JAXA), MASCOT(DLR)[7, 8, 9]

Table 2 Type of direction control mechanism

種類	構造	長所	短所
並行二輪	二車輪＋スキッドの構成で、長信地旋回で方位を制御	二輪で通常の走行も可能、冗長性あり	車輪用に三つのモータを要する
方位制御用単輪	一輪を回転させ、機体接地部を支点に方位を制御	構造が簡素でアクチュエータ数を削減可能	車輪を有するが移動は不可能
ターンテーブル	機体底部に転回用の機構を有する	車輪に頼らないため、スリップ・スタックの恐れなし	不整地上での確実な動作が未知、移動や姿勢復元に使用不可能
跳躍機構自身の向きを変更	跳躍機構そのものを跳躍方向と反対に向ける	任意の姿勢からでも跳躍可能	跳躍機構をあらゆる方向に向けるためには複雑な機構が必要

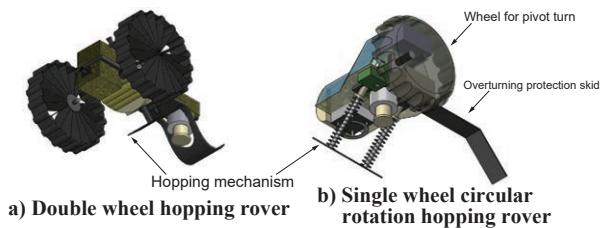


Fig.3 Artistic rendering of the hopping rovers

考えられる。一方で、跳躍時の姿勢擾乱から、着陸時に必ずしも正対しているとは限らない。横転、転覆状態に陥る可能性も十分にある。ローバはどのような姿勢で着地したとしても、次の跳躍に向けて適切な姿勢をとる必要がある。ここでは、着地の瞬間にローバが復元不可能な姿勢で静止しないこと、簡単な動作で姿勢を制御できることが求められる。先述の並行二輪型や方位制御用単輪型の場合は、車輪の回転軸と重心の距離を小さく設計することで、天地反転して着地したとしても容易に復元できる点で有利である。

4 科学ミッション

小型ローバにおいては、重量の大きな観測機器を搭載することは難しい。主なミッションは、続く大型ローバによる本格探査や、有人探査の先駆けとして、事前に放射線や土質調査を行うことを想定している。よりサイエンスに近いミッションとしては、パッシブ、アクティブな分光観測などが考えられる。観測シーケンスとして、分光や放射線情報取得にはある一定の積分時間を要することから、エネルギーがある一定充電されたら観測を行い、その間電力余裕があれば跳躍機構へエネルギー供給も行う。観測後、移動に十分なエネルギーが蓄積されると、跳躍を含め任意の距離を移動し、新たな観測に入る。また、土質探査に関しては、ベーンせん断試験機や Bevameter などを用いることが考えられるが、いずれも回転に伴い土質情報が収録されるので、ローバの跳躍前シーケンスである方向設定時に同時に土質情報を取得するなど、他の

動作と複合して短時間かつ低リソースな測定シーケンスが考えられる。さらに、跳躍動作や着地応答といった移動シーケンスも、シミュレータ結果と比較することで、土質パラメータ取得に活用できる。

5 緒言

本研究では、月、火星探査を主とした小型ホッピングローバについて、そのシステムと機構部についての検討を行い、数 kg でのミッション実現へ向けたローバ構成を提案した。また、ローバ設計最適化に必要なシミュレータについても紹介した。このような小型ローバは今後の宇宙探査で一定の役割を果たすと考えられ、また、地上用途でも即応的に先行して探査するロボットとして用いられる可能性が高く、今回の検討内容が活用できると考えている。

参考文献

- [1] 大槻真嗣, 吉光徹雄, 前田孝雄, 吉川健人, 國井康晴, 石上玄也, 久保田孝, “月惑星着陸探査のための小型ホッピングローバの提案”, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会講演集, Paper No. 3U2-04, 2016.
- [2] Masataku Sutoh, Junya Yusa, Tsuyoshi Ito, Keiji Nagatani, and Kazuya Yoshida, “Traveling performance evaluation of planetary rovers on loose soil”, *Journal of Field Robotics*, Vol. 29, No. 4, pp. 648–662, 2012. doi: 10.1002/rob.21405
- [3] Paolo Fiorini, Samad Hayati, Matt Heverly, and Jeff Gensler, “A hopping robot for planetary exploration”, In *Aerospace Conference, 1999. Proceedings. 1999 IEEE*, Vol. 2, pp. 153–158. 1999. doi: 10.1109/AERO.1999.793156
- [4] Steeve Montminy, Erick Dupuis, and Henri Champlaud, “Mechanical design of a hopper robot for planetary exploration using sma as a unique source of power”, *Acta Astronautica*, Vol. 62, No. 6, pp. 438–452, 2008. doi: 10.1016/j.actaastro.2008.01.012
- [5] Sand flea jumping robot, [Online] Available: http://www.bostondynamics.com/img/SandFlea_Datasheet_v1.0.pdf, 2017.
- [6] 加藤裕基, 渡邊恵佑, 妻木俊道, 柳瀬恵一, 本田瑛彦, “ロケット跳躍型探査ロボット jumping scouter コンセプトと跳躍精度評価”, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 5, pp. 321–330, 2016. doi: 10.7210/jrsj.34.321
- [7] Tetuo Yoshimitsu, “Development of autonomous rover for asteroid surface exploration”, In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, Vol. 3, pp. 2529–2534 Vol.3, April 2004. doi: 10.1109/ROBOT.2004.1307442
- [8] Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Atsushi Tomiki, and Yoji Kuroda, “Development of hopping rovers for a new challenging asteroid”, In *Proceedings of the 12th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 5C–01, 2014.
- [9] C Dietze, Florian Herrmann, Sebastian Kuß, C Lange, M Scharringhausen, L Witte, T van Zoest, and H Yano, “Landing and mobility concept for the small asteroid lander mascot on asteroid 1999 ju3”, In *Proceedings of the 61st International Astronautical Congress*, Paper No. IAC-10.A3.5.8, 2010.
- [10] Chen Li, Tingnan Zhang, and Daniel I Goldman, “A terradynamics of legged locomotion on granular media”, *Science*, Vol. 339, No. 6126, pp. 1408–1412, 2013. doi: 10.1126/science.1229163