

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420820

研究課題名(和文) 探査機の動的安定着陸システムの研究

研究課題名(英文) Study on dynamically stabilized landing system of spacecrat

研究代表者

橋本 樹明 (Tatsuaki, Hashimoto)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：70228419

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：探査機が月や火星などの天体に着陸する際に、残留水平速度がある場合や斜面・岩などの存在する不整地へ着陸する場合においても転倒しない着陸システムについて研究を行った。探査機の着陸脚と天体表面の動的モデルを構築し、数値シミュレーションにより探査機の動的挙動を解析した。その結果から、着陸脚をセミアクティブに制御する方法を提案した。すなわち、伸縮式着陸脚の減衰係数を可変にすることができるデバイスを追加し、探査機の角速度と着陸脚の伸縮方向の符号の積に応じて当該脚の減衰係数を増減させるという方式である。本方式により耐転倒防止能力が大幅に上がることを数値シミュレーションおよび着地実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：Moon or Mars landing system of a spacecraft by which the spacecraft does not turnover even when its horizontal velocity is remained and/or the surface is rough terrain such as a steep slope or existing rocks is studied. Dynamical model of landing legs of a spacecraft and surface of celestial body is established and the dynamical motion of the spacecraft is analyzed using numerical simulations. Based on the results, new semi-active control scheme of the landing legs has proposed. That is, a device which can alter damping factor of a flexible landing leg is introduced and the damping factor is controlled following the product of the sign of angular velocity of the spacecraft and expanding speed of the leg. Numerical simulations and landing experiments confirmed that the proposed control scheme improves anti-turnover performance very much.

研究分野：宇宙機制御工学

キーワード：着陸脚 セミアクティブ制御 磁性流体 転倒防止 減衰係数

1. 研究開始当初の背景

探査機を天体へ着陸させる場合、なんらかの衝撃吸収機構が必要となる。アポロ月面探査機など従来の探査機の多くでは、アルミハニカムがクラッシュすることにより着地衝撃を吸収するパッシブな着陸脚が使用されていた。そのため、斜面や岩などの障害物がある場所への着陸においては、十分に衝撃が吸収できない、あるいは探査機が転倒するという問題があった。そのため、着陸地点は平坦な場所に限定されており、探査可能地域の制約になっていた。一部の火星探査機では、エアバッグによって探査機全体を包む着陸方式も採用しているが、大きくバウンドするため着陸地点誤差が大きい、着地方向が定められないため搭載機器の設計が難しい、システムが大型化するという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では、探査機が着陸する際の動的挙動を解析し、着陸脚へのアクティブ制御デバイスの導入や探査機の制御によって、その動的安定性を確保することを目的とする。すなわち、不整地への着陸、探査機に水平速度の残留成分がある場合、探査機の重心が高い場合など、従来の探査機では転倒してしまうような条件においても、制御によってこれを安定化することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 探査機と地面の特性をモデル化し、数値シミュレーションにより、様々な条件での着陸時の探査機挙動を解析した。
- (2) 探査機挙動解析をもとに、着陸脚の特性をアクティブに制御することにより、耐転倒性を高めることができることを示した。その際、着陸脚の減衰係数のみを変えるセミアクティブ制御による方法を考案し、その有効性を数値シミュレーションで示した。
- (3) 制御則の有効性を確認するため、2次元2脚の実験モデルを製作し、岩盤および砂地への着地実験を行い、数値シミュレーション結果と比較した。
- (4) 探査機挙動解析および脚の制御則を3次元モデルへ拡張し、3脚以上のN脚の場合について数値シミュレーションを行った。また、3次元モデルでの着地実験を行った。
- (5) 耐転倒性をさらに向上させるため、画像を用いた探査機の水平速度の高精度推定法について研究を行った。

4. 研究成果

(1) 土質力学の論文等を調査し、着陸脚(2脚)および地面の特性を図1、図2のようにバネとダンパ(減衰装置)により表現した。これを用いて着陸シミュレーションを行い、サーベイヤ探査機が計測した実際の月面着陸時のデータと比較するなどして、モデルの有効性を確認した。

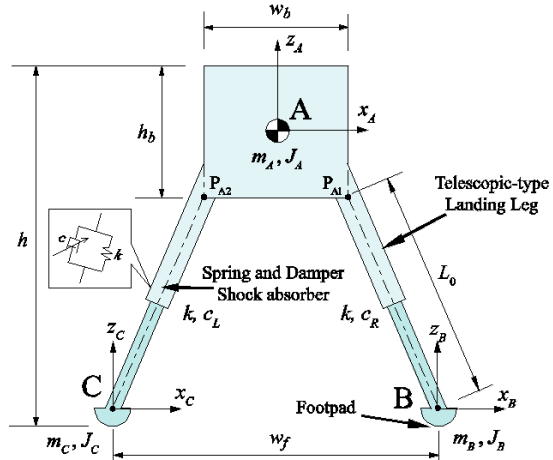
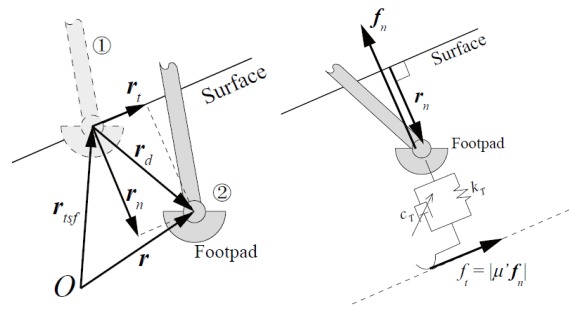


図1 着陸脚の力学モデル



(a)地面への進入 (b)地面反力  
図2 天体表面の力学モデル

(2) 図1、図2のモデルをもとに、探査機挙動の理論的解析および数値シミュレーションを行った。その結果、着陸脚の減衰係数(図1の  $c_L, c_R$ )を可変にすることにより、地面反力を制御できることがわかった。

すなわち、例えば斜面に着陸する場合、最初に着地する(山側に接地する)側の脚の減衰力を弱める(脚を「軟らかく」することにより地面反力を抑えることができ、これにより谷側に倒れようとする転倒モーメントを抑制する。反対に、谷側に着地する脚については、減衰力を強めて(脚を「硬く」して)地面反力を強め、山側に倒れようとする転倒モーメントを増強して、転倒を防止する。なお、山側に着地する脚についても、そのバネ性によって、最も脚が縮んだ後は脚が再び伸びることによって谷側に倒れる転倒モーメントを生じてしまうため、減衰力を強めて脚の伸張を低減させる必要がある。

このような動作を、斜面の傾き方向、探査機の水平方向残留速度などが異なる条件において、常に有効となる制御則について検討した。必要なセンサ情報を最小限にすべく、様々な制御則について検討を行った。その結果、図3のように、着陸脚の伸縮方向(脚の長さを計測するセンサがあれば良い)と探査機の回転角速度(通常探査機に搭載されているジャイロを使用できる)のみの情報に基づ

いて各脚の減衰係数を変えることにより、理想的な動作が実現できることがわかった。制御則は、各センサ情報の符号の組み合わせ（図3の4種類）に応じて減衰係数を最大か最小の2値に変更するのみで良いので、簡単な論理回路のみで実現できる。

この直感的に求めた制御則の妥当性は、ラグランジェ法により求めた一般化運動方程式の時間微分と各パラメータの感度解析より、理論的にも適切であることを証明した。

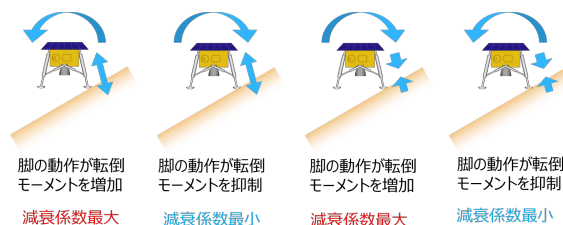


図3 脚の減衰係数制御則

(3) 制御則の有効性を確認するため、図4の2次元2脚の実験モデルを製作し、岩盤および砂地への着陸実験を行った。減衰係数を可変にするデバイスとして、印加電圧により高速に減衰係数を制御できる磁性流体ダンパを調達し、これを実験装置に組み込んだ。

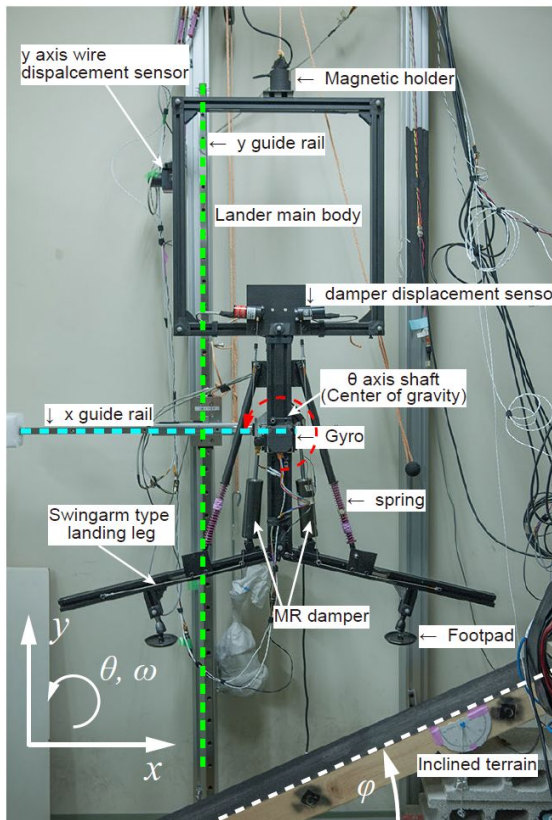


図4 2脚着陸実験装置

実験の結果、制御が無い状態では傾斜角 20 deg の斜面では必ず転倒するのに対して、提案する制御を行うと全く転倒しない。傾斜角 25 deg では、提案する制御則でも転倒する場

合が多いが、転倒しないケースもあった。転倒の有無は、地面の特性によっても異なるが、着陸脚の減衰係数を制御することにより、明らかに特性が改善されていることが確認できた。

(4) 2次元(2脚)の数値シミュレーションおよび着地実験において提案する制御則の有効性が示せたため、これを3次元モデルへ拡張することとした。一般的にN脚の構成を考え、脚iについての制御則を導出した。Nを無限大にすると、連続脚、すなわちエアバッグなどの衝撃吸収装置を模擬することも可能となる。

探査機の角速度については、脚iと探査機の重心を通る面を考え、角速度ベクトルのこの面に垂直な成分(つまり面内の回転角速度)を用いることとした。また、脚の伸縮については、当該脚iの伸縮情報をそのまま用いた。2脚の場合と同様、この角速度と伸縮速度の符号の積に応じて脚iの減衰係数を切り替えると、制御則が3次元に拡張できる。

これを用いて、様々な水平速度、地面の傾斜角に応じたシミュレーションを行った。その結果、2次元と同様、提案する制御の有効性が示された。(図5)

なお、この解析の過程で、斜面方向と脚配置との位相関係により、耐転倒性が異なることが判明した。つまり、着陸時に探査機の位相角(ロール角)を地面に対して制御することができれば、さらに耐転倒性を上げることができる。また、位相角を制御できない場合はその最悪値で設計することになるが、当然ながらこれは脚数Nに依存する。脚数が多くなるほど、この位相角依存性が小さくなるが、一方で脚数が多くなると山側に着地する脚数が大きくなり、制御によって低減させても地面反力は大きくなる。従って、最適脚数

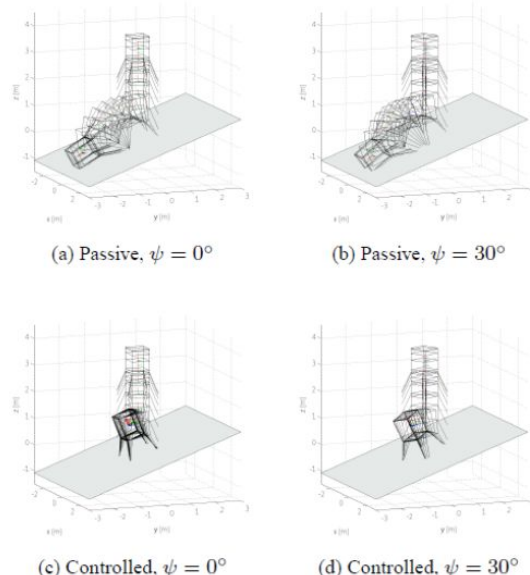


図5 3次元着地シミュレーションの例

が存在することになる。本研究で用いたパラメータを使用すると、4脚が最も大きな斜面まで転倒しないことが示された。これは、これまでの探査機の多くが常識的に4脚を使用していることを理論的に正当化するものであり、意義深い。

3次元での制御則を検証するため、探査機のスケールモデルを作成し(図6)3次元での着地実験も実施した。市販の磁性流体ダンパでは大きすぎるため、ダンパも自作した。しかし装置の製作に時間を要し、研究期間の最終時期となったため、パラメータの調整が十分でなく、これまでのところ、制御あり/なしの優位な差が出ていない。今後の課題と考えている。

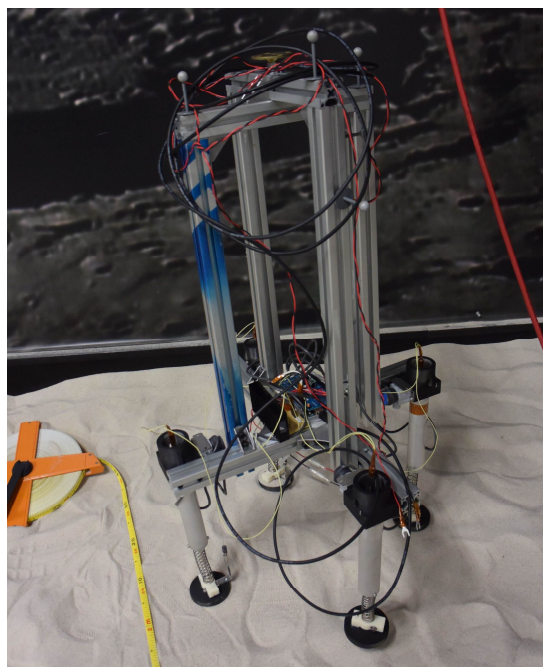


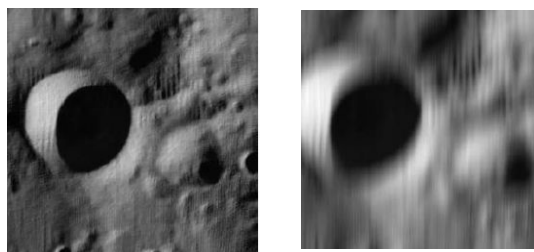
図6 3次元着陸実験装置

なお、本研究によって得られた知見および数値シミュレーションの手法、3次元実験装置などはそのまま実際の探査機プロジェクトに応用可能である。実際、本研究の連携研究者は、JAXAで検討中の火星衛星サンプルリターンミッションにおける着地ダイナミクスの検討等に参画しており、本研究の成果が活用されている。

(5) 本研究では、主には着陸脚の減衰係数を制御することにより耐転倒性を向上させることを試みてきたが、その限界についてもわかってきた。さらに耐転倒性を向上させるためには、探査機の水平速度の残留成分を低減する必要があるため、画像を用いた水平速度の高精度推定法について研究を行った。

1枚の画像に写っている対象物体のブレ(図7)から、ケプストラム変換を用いて相対速度を検出した。現在の着陸機で使用されている着陸レーダの速度検出精度は数十 cm/s 程度であるため、画像による速度検出を用い

てこれを改善することにより、さらに耐転倒性が向上すると考えられる。



(a) 原画像 (b) ブレ画像

図7 生成した模擬ブレ画像の例

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

Takao Maeda, Masatsugu Otsuki, Tatsuaki Hashimoto, Susumu Hara, Attitude stabilization for lunar and planetary lander with variable damper, Journal of Guidance, Control and Dynamics, AIAA, 査読有, Vol. 39, No. 8, pp1790-1804, 2016

前田 孝雄, 大槻 真嗣, 橋本 樹明, 脚機構にセミアクティブダンパを用いた着陸船の転倒防止制御, 日本機械学会論文, 査読有, Vol.80, No.816, p.DR0235, 2014 DOI:10.1299/transjsme2014dr0235

[学会発表](計 14 件)

眞下泰輝, 宇宙機のための単一劣化画像を用いた横方向速度推定, 第22回ロボティクスシンポジウム, 安中, 群馬, 2017.3.15~16

眞下泰輝, 月惑星着陸航法におけるぶれ画像を用いた速度推定法に関する検討, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 北海道 2016.9.6~9

橋本樹明, セミアクティブ制御を有する着陸機構, 第60回宇宙科学技術連合講演会, 函館, 北海道, 2016年9月6日~9日

Tatsuaki Hashimoto, Semi-actively controlled landing legs for a spacecraft, 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, 26-30 September 2016

Takao Maeda, Experimental Validation of Semi-Active Landing Gear for Touchdown with Attitude Disturbance, AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition 2016, Long Beach Convention

Center, Long Beach, California, U.S.A,  
13-16 September 2016

前田孝雄、月惑星着陸船の運動解析と脚減衰力制御による転倒防止法、第 14 回運動と振動と制御シンポジウム、宇都宮、栃木、2015 年 6 月 22 日～24 日

前田孝雄、着陸機構にセミアクティブダンパを有する月惑星着陸船の転倒防止制御と三次元運動解析、第 58 回宇宙科学技術連合講演会、長崎、2014 年 11 月 12 日～14 日

T. Oya, Movable lander with novel pulley suspension mechanism, The 12th International Conference on Motion and Vibration Control, Sapporo, Hokkaido, Aug 3-7. 2014.

Takao Maeda, Simulation and Experimental Validation on Touchdown Dynamics of Lunar-Planetary Lander with Controllable Landing Gear, The 12th International Conference on Motion and Vibration MOVIC2014, Sapporo, Hokkaido, August 3-7, 2014.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isas.jaxa.jp/home/hashimoto-lab/research.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 樹明 (HASHIMOTO, Tatsuaki)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授  
研究者番号：7 0 2 2 8 4 1 9

### (2) 研究分担者：なし

### (3) 連携研究者

大槻 真嗣 (OTSUKI, Masatsugu)  
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教  
研究者番号：5 0 3 4 8 8 2 7

前田 孝雄 (MAEDA, Takao): 平成 28 年度  
中央大学・理工学部電気電子情報通信工学科・助教  
研究者番号：0 0 7 6 1 1 4 9

### (4) 研究協力者

眞下 泰輝 (MASHIMO, Taiki)  
前田 孝雄 (MAEDA, Takao)  
大谷 智宏 (OYA, Tomohiro)  
佐野 俊太 (SANO, Syunta)