

# 論文の内容の要旨

論文題目 月惑星探査機の着陸運動解析と脚機構制御による転倒防止法に関する研究

氏 名 前田 孝雄

本研究では月惑星探査機の着陸時における天体との接触後における運動解析と、着陸船の緩衝機構の制御を用いた不整地上への着陸技術について検討する。

次世代の月、惑星着陸探査ミッションにおいて、これまで着陸することを避けてきた不整地、特に傾斜地に安全に着陸することを目的とし、着陸脚の緩衝機構の制御によりこれらの地形へ安全に着陸することを目指す。本研究では緩衝機構に一般的に使用されてきたアルミハニカムクラッシュブルコアやエアバッグではなく、衝撃吸収能力が制御可能な着陸脚機構、セミアクティブダンパを導入し、適切に制御することで、高い不整地適応性を得られることを示す。また、セミアクティブダンパはパッシブダンパと比較しても重量やサイズでの弱点は小さく、従来の着陸脚の減衰機構を容易に置き換え可能である。そのため、着陸脚機構以外の構造を大幅に変更することなく適用可能であり、実機への搭載可能性を考えた場合に有利であることから、次世代の探査機への応用が期待できる。

本論文では、着陸時に各脚機構の減衰特性を着陸船の姿勢に応じてそれぞれリアルタイムに制御することで、着陸船の回転運動を抑制し、安全に着陸させる手法を提案する。提案手法の特徴は着陸脚の脚単位でのリバウンド防止や衝撃力の低減を行うのではなく、各脚独立して制御することで、着陸船全体での転倒防止を行う点にある。

はじめに、制御法に関する基礎的な研究として着陸船の運動をある二次元平面内に限定し、着陸時の運動を場合分けし、各運動パターンにおける脚ダンパの減衰係数と機体の運動について考察する。さらに、傾斜地への着陸を念頭に置き、着陸船の着陸脚と天体表面が接地した状態を数学的モデルで記述し、これに基づいた運動方程式を用いて脚ダンパの減衰係数と機体姿勢の応答との関連を明らかにする。そして、得られた減衰係数と姿勢応答の関係から、着陸時において最も姿勢の変化量が小さくできる減衰係数の切替制御法について検討する。

つぎに、シミュレーションにより、傾斜地への着陸時における姿勢の乱れの低減と転倒防止、および天体表面の摩擦に対するロバスト性の観点から、提案する脚機構とその制御手法の有効性を示す。ここでは、斜面上における着陸船の運動をある二次元平面内に限定し、着陸船側面から見た運動に関してシミュレーションを行っている。シミュレータは、多剛体系の運動方程式を微分代数型で記述し、構築には拘束条件追加法を用いて作成している。シミュレータ内で想定する着陸船は、宇宙航空

研究開発機構が提案している小型月着陸実験機と同程度の大きさとし、月面で 30°程度までの傾斜地を対象に着陸時の運動解析を行っている。着陸船が天体表面で転倒するような要因として、斜面への着陸および着陸船の初期状態に乱れがある場合の着陸について解析し、両者とも提案手法を用いることで転倒を防止し、安全に着陸可能な条件の範囲を大幅に拡大できることを確認した。さらに、天体表面の摩擦も着陸船の転倒要因となるが、これに関しても、提案手法を用いることで摩擦係数の変化に対する姿勢の応答の変化を抑制し、安全に着陸することが可能であることが示している。

シミュレーションによる提案手法の有効性を確認できたため、続いて実験装置による検証を行う。本研究では新たに着陸船実験装置を製作している。実験装置は着陸脚の緩衝機構に磁性流体を用いた可変減衰ダンパを使用し、実際に想定される着陸船サイズから縮尺して製作されている。実験はシミュレーションと同様に着陸船を側面から見た状態でモデル化した二次元モデルに基づき製作している。装置は壁面にガイドレールと回転軸で固定され、機体は 3 自由度運動に拘束されている。実験装置では、制御可能な緩衝機構として、磁性流体ダンパを使用している。磁性流体ダンパは、磁性流体に磁場を印加することで、その流動特性が変化することを利用した可変減衰ダンパであり、磁場変化に対する減衰力の応答が速く、着陸時の接触の瞬間における制御に十分適用できることから選定している。着陸実験は、斜面上へ着陸を主に想定し行っている。傾斜の変化に対して、着陸船の姿勢応答が、制御の有無によりどれだけ変化するのかについて確認を行っている。提案手法を用いることで、傾斜を有する地形へ着陸において、着陸中の姿勢の変化量を低減し、より大きな傾斜角を有する地点でも着陸船が転倒せず静定できることを実験的にも示すことができた。

さいごに、提案する制御手法の三次元運動への拡張と検証を行っている。着陸脚の減衰係数制御則導出には、二次元面内を運動するモデルを用いている。これまでは、着陸船が一般的な形状として、天面から見て 4 つの着陸脚を対称に有する場合に、そのうち 2 脚が投影される側面内での運動を考えてきた。このモデル化では、最も機体幅が小さくなる面内の運動のため、この条件で着陸船の転倒防止に関する有用性を確認することで、それ以外の条件では転倒しないことがいえるためである。しかし、実際の着陸船は三次元運動を行い、斜面の傾斜方向と機体の姿勢に関して、どのような組合せにおいても着陸する必要があるため、三次元的な運動解析は必要となる。ここでは、着陸船についてマルチボディダイナミクス考え方を用いて三次元運動方程式を構築し、傾斜地への着陸を主に検討を行った。三次元運動で問題となるのは、脚の接触順が多様となる点である。二次元面内で限定して考える場合は、4 脚着陸船の 4 脚のうち、1, 2 番目と 3, 4 番目の脚は同時接触する、つまり 2 脚ずつ接触する 2-2 脚接触が前提であったが、ここでは 1-2-1 脚接触, 1-1-1-1 脚接触等のパターンも考慮した検証を行っている。シミュレーションにより、斜面の等高線方向と着陸船の正面とのなす角と、天体表面の傾斜および摩擦との関係を解析し、提案手法を用いる場合と制御をおこなわない場合とで、着陸可能な地形の条件に有意な差があることを示し、提案手法が着陸時の転倒抑制に有効であることを示した。さらに、4 脚を有する着陸船に限定せず、 $n$  脚着陸船においても同様に提案する可変減衰を用いた着陸脚機構とその制御則を適用できることについて示した。