

# Landing Stability and Motion Control of Multi-Limbed Robots for Asteroid Exploration Missions

著者	Marco Antonio Chacin Torres
号	51
学位授与番号	3739
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37407">http://hdl.handle.net/10097/37407</a>

	マルコ アントニオ チャシン トーレス
氏 名	Marco Antonio Chacín Torres
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成19年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
学位論文題目	Landing Stability and Motion Control of Multi-Limbed Robots for Asteroid Exploration Missions (小惑星探査用多肢ロボットの着地安定性および運動制御)
指 導 教 員	東北大学教授 吉田 和哉
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 吉田 和哉 東北大学教授 内山 勝 東北大学教授 新井 史人 東北大学助教授 永谷 圭司 助教授 久保田 孝 (宇宙航空開発機構)

## 論 文 内 容 要 旨

Near-earth objects such as asteroids have a great scientific importance for space exploration. In this respect, locomotion over such low-gravity bodies becomes essential for in-situ scientific measurements. However, this microgravity environment and rough terrain conditions on these objects impose new challenges on mobility for rovers to overcome.

Multi-limbed robot locomotion seems to work better in such environments. Such a robot would need to remain attached to the asteroid while moving over the surface. This condition requires knowledge of the forces interacting under the surface while the robot walks in grasping modes to calculate the position and force in its walking gates. Proper study of these forces will play an important role in developing new control algorithms.

This dissertation presents the analysis of the effects of multi-limbed robot locomotion that considers the reaction and friction forces at end tips in contact with the surface, and is able to land and move in a simulated microgravity asteroid surface environment.

The work is divided into six parts.  $\text{\textbackslash}chap\{intro\}$  is introductory and outlines the nature

of small solar system bodies. Also, a short literature survey that makes an overview of previous missions, dynamic modeling, gait planning and control strategies up to now is introduced.

Chapter 2 develops the dynamic equations governing the motion of general multi-limbed robotic systems. The formulation presented is used as a framework for the remaining chapters of this thesis.

Chapter 3 makes an analysis of the interrelation between the friction forces and the contact stability. This analysis plays a fundamental step towards the development of limb motions that result in maintaining the stationary state of the robot's base in the presence of internal/external wrenches. This way the robot can walk in a stable fashion remaining attached to the surface while resisting the dynamic reaction from the moving limbs.

The proposed control methods in this dissertation would be useful to improve the operational performance and efficiency for robots capable of landing smoothly and moving on an asteroid.

Chapter 4 introduces a novel standardized way to communicate among platforms, leading to the reusability of resources based on a dialect of XML. The hardware test bed including the physical structure, on-board controller, actuators and sensors are described. Also, the development of a microgravity emulator is presented in the larger context of being a test field where future asteroid exploration rovers can be tested on Earth, but still behaves as if it was in a low-gravity environment. Simple experiments are performed to show how proper selections of parameter values lead to a manipulator behavior desirable for emulating microgravity.

The proposed control methods are validated using hardware-in-the-loop simulations in Chapter 5. Experiments are performed under microgravity conditions, with a multi-limbed robot attached to the manipulator end tip. Experimental results show the difficulties in approaching another object in microgravity as it is rejected after touchdown. With proper grasping at the time of impact, it can be demonstrated that a multi-limbed robot is able to grasp the surface and hold on to it. In short, experiments show expected results and the robot moves and behaves as if it was in the emulated environment. It is demonstrated that proper knowledge of the force cone interaction with the surface will play a significant role in the future to develop proper control procedures that can allow the next generation rovers not even to land successfully, but to gain proper mobility in the microgravity environment. The arrangement of such forces will not only provide successful touchdown under the low gravity environment, which can prevent the failure of an exploration mission, but will also allow proper mobility on the surface of the asteroid to gain the capacity necessary for its scientific in-situ studies.

The microgravity emulator can be used for future robot experiments, and in particular used for identifying desirable walking patterns for legged robots.

The final chapter consists of conclusions and directions for future work.

# 論文審査結果の要旨

近年、太陽系誕生のメカニズムを解明する手がかりとして、小惑星および彗星などの小型始原天体の探査が注目を集めている。日本の「はやぶさ」探査機は2005年秋から冬にかけて小惑星イトカワの探査に成功したが、主な観測手段は、近接上空からのリモートセンシングおよびきわめて短時間のタッチダウンによるものであった。次世代の探査機には、小惑星表面を自在に動き回り、任意地点でサンプル採集や分析を行う技術が求められている。しかしながら、小惑星表面はきわめて重力が小さいため、これを実現するためには、微小重力表面を安定して移動可能な探査ロボットを開発しなければならない。これに対して、本論文は、多関節脚型ロボットを提案し、摩擦力を利用して表面に張り付くための力学を解析し、および微小重力における歩容生成のアルゴリズムを開発し、プロトタイプモデルを用いた実験によりこれらの有効性を検証したものであり、全編6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を述べている。

第2章では、微小重力環境において成立しうる表面移動方式を分析し、その結果として多関節脚型ロボットによる歩行移動がもっとも任意性が高いことを示し、歩行ロボットにおける運動学および動力学の基礎式を導出している。

第3章では、微小重力表面に安定的に把持するための力学を解析する手段として摩擦コーンに着目し、複数の脚によって生じる接触力が摩擦コーン内部で閉じていることが安定把持のための条件であることを示し、ロボットが表面に接触する際の衝撃力よりも接触による把持力の方が勝るための接触速度条件を導出している。ついで、常に複数脚が安定把持を維持しつつ歩行を継続するための、歩容生成および歩容制御アルゴリズムを導出している。これらは、本論文の理論的根幹をなすものであり、高く評価できる。

第4章では、検証実験のために開発したプロトタイプモデルの設計と開発について述べている。ソフトウェア・シミュレーションとハードウェア・モデル上への実装をシームレスに行うため、計算機プラットフォームによらない汎用的な記述言語としてSTML (Space Teleoperation Markup Language) を開発し、有効なツールとして用いている。また、微小重力環境を模擬する方法として、汎用ロボットアームを用いたハイブリッドシミュレーションを構成し、安定な実験環境の構築に成功している。これらは重要な成果である。

第5章では、プロトタイプモデルを用いた実験結果について述べており、第3章に提示された接触時の安定把持条件および安定歩容制御の有効性が実験によって検証されている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は、小惑星等の微小重力天体の表面を任意に移動探査可能な多関節脚型ロボットを提案し、表面把持および安定歩行のための力学および制御アルゴリズムを明らかにし、その有効性を実験により検証したものであり、以上の成果は、ロボット工学および宇宙探査工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。