

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24360101

研究課題名(和文)新しい小天体探査を可能にする次世代移動探査メカニズムの研究

研究課題名(英文)Study on Next-generation Mobility Mechanism for New Small Body Exploration

## 研究代表者

久保田 孝(KUBOTA, TAKASHI)

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：90211888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：小天体探査ロボットは、微小重力・真空環境、厳しい温度環境、未知環境など、過酷な環境下で動作することが要求され、微小重力下での移動機能、着地機能、自律探査機能、熱制御機能が課題である。そこで、ロボット表面の一部を開閉可能にし、熱放射面を角度制御できる機構とホッピング移動できる機構を有するロボットを新規に考案した。また、伸縮機構を有する跳躍型移動メカニズムを新規に考案し、ホッピング移動機構および着地機構を有するロボットを構築した。数学モデル検証および試作ロボットによる微小重力実験を行い、考案したロボットの有効性を世界で初めて確認した。その結果、将来ミッションへの実現に大きな貢献が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Small body exploration robots require some functions under the severe environment such as small gravity, vacuum space, higher and lower temperature, unknown environment. Exploration robots have some subjects such as mobility with landing, autonomous functions, and thermal control. So a new robot system with a new hopping mechanism and attitude control is newly proposed to open or close the surface of the robot body. A new mobility system with elastic mechanism is also proposed to realize hopping and landing functions. The effectiveness of the proposed robots is confirmed by some computer simulations. And also the drop tower tests were conducted by using the developed experimental robots. The valid of the proposed schemes were verified. Finally the proposed robots would contribute to the near future exploration missions.

研究分野：宇宙人工知能

キーワード：惑星探査 航空宇宙工学 制御工学 ロボット工学 人工知能 微小重力環境

## 1. 研究開始当初の背景

小惑星や彗星など太陽系に存在する小天体は、太陽系の起源を探る上で科学的に重要であると同時に、将来人類が宇宙に進出する際の鉱物資源としても着目されている。このため、現在、世界中で、小天体に探査機を送るプロジェクトが数多く計画されている。小天体表面を探査する技術を確立することは、今後の人類の宇宙活動において、実用的にも科学的にも非常に重要である。

小惑星探査機「はやぶさ」が大きさ 1km 以下の小惑星を探査して得た一番大きな知見は、その表面が一様でなかったという事実である。このような非一様性は、惑星科学史上大きな発見である。と同時に、今後の小天体探査ミッションにおいて、訪問する天体をよりよく知るためには、天体上の科学的興味の高い複数地点に何らかの方法で到着し、直接観測を行なう新しい探査システムを実現する必要にせまられた。

天体の複数の地点を詳細に調べるためには、移動ロボットによる表面探査が有効である。「はやぶさ」探査機にも、「ミネルバ」と呼ばれる小型移動ロボットが搭載されたが、ロボットの放出運用に失敗したため、ミネルバが小惑星表面に到着せず、小惑星表面での観測が出来なかった。そこで、新世代の小惑星探査ロボットの出現が望まれている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、2010年6月に地球に帰還し再突入した「はやぶさ」探査機の成功により、世界的に優位性を持ちつつある日本の太陽系小天体探査において、小天体の高度な科学観測を可能にさせるため、表面探査ロボットの新しい移動探査手法を研究し、実験により有効性の検証を行うことである。

そこで、小惑星のような重力の小さい環境において、効率的な移動メカニズム、熱制御機能、自律行動制御機能、着地機能を有する、新しい探査ロボットを構築する。

## 3. 研究の方法

本研究では、小天体表面において複数の目標地点に効率的に近づくことのできる移動メカニズムおよび探査手法の研究を行う。

まず、ホッピングによる移動メカニズム、移動中の姿勢制御手法、および着地メカニズムを考案し、理論的考察およびシミュレーションによる検討を行う。

次に、落下塔を用いた無重力実験によりその有効性を実証する。

さらに、長時間、長距離の移動探査を実現するため、探査ロボットの熱制御方式についても検討し、効率的な自律移動探査を行う戦略について検討する。

## 4. 研究成果

本研究において、微小重力環境下での、効率的な着地移動メカニズム、熱制御機能、自律行動制御機能を有する、新しい探査ロボットを構築し、落下実験により、その有効性を示した。本探査ロボットは世界に先駆けて考案したもので、類はない。この考え方をベースに、世界発の小天体探査ロボットの実現に大きな貢献を果たす研究成果が得られた。詳細を下記に示す。

(1) 小天体を探査するロボットは、微小重力環境、真空環境、厳しい温度環境、未知環境、遠隔地での動作など、過酷な環境下で動作することが要求され、微小重力下での移動機能、自律探査機能、熱制御機能が不可欠であり、かつ探査ロボット自体に重量や電力の制限を受ける。

そのため、移動機能と熱制御機能を併せ持った新しい移動メカニズムが必要であるとともに、熱を逃がすために放射面の方向を制御することが必要である。そこで、ロボット表面の一部を開閉可能にし、熱放射面を太陽方向に対して角度制御できる機構とホッピング移動できる機構を有するロボットを新規に考案した。

また考案したロボットの数学モデルを構

築し、ホッピング挙動、開閉機能、および姿勢制御機能の検証を行った。その結果、微小重力環境でホッピング移動が可能であることが分かった。さらに提案した機構を実現するために、図1に示す実験用ロボットを試作し、北海道の落下塔を用いて、ホッピング移動機能の検証を行い、微小重力下での移動の確認を行うことができた。このようなロボットは世界に類を見ず、新規性が高い。

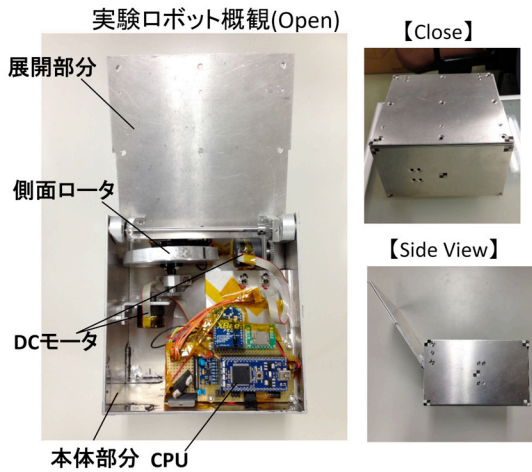


図1 考案したホッピング実験ロボット

(2) ロボット表面の一部を開閉可能にし、熱放射面を太陽方向に対して姿勢制御可能なロボットシステムにおいて、熱制御を考慮した探査行動パターンを自動生成し、その有効性を数学モデルを用いた数値シミュレーションにより検証を行った。結果を図2に示す。この成果は、世界で初めて行われたもので、長時間の探査が可能となり、今後の深宇宙探査に大きなインパクトを与える。

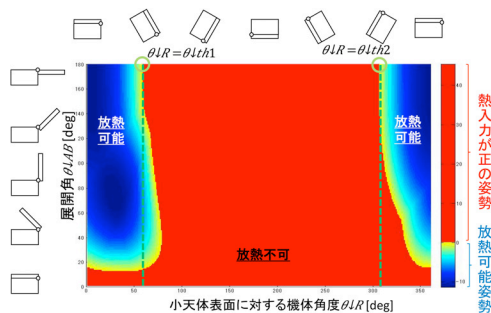


図2 熱制御手法を用いた探査行動

(3) 小天体を探査するロボットは、微小重力下での移動機能、自律探査機能、着地機能が不可欠である。そのため、移動機能と着地機能を併せ持った新しい移動メカニズムが必要である。そこで、図3に示す伸縮機構を有する跳躍型移動メカニズムを新規に考案し、ホッピング移動機構および着地機構を有するロボットを構築した。また考案したロボットの数学モデルを構築し、ホッピング挙動および着地制御機能の評価および2次元テーブルを用いた実験的検証を行った。図4に実験結果を示す。その結果、微小重力環境でホッピング移動が可能であること、再着地の際にバウンドすることなく、着地可能であることが示された。

微小重力環境での着地機構に関する研究はいくつか見られるが、探査ロボットが任意の姿勢をとって、探査ロボットのどの場所が表面に着地してもその効果が得られる点において、新規性の高いものである。ホップ移動と着地動作を同時に行うメカニズムは、今後の小惑星探査に大きな貢献を果たすものである。

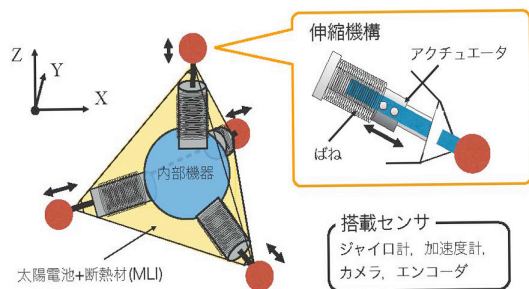


図3 跳躍型移動メカニズム

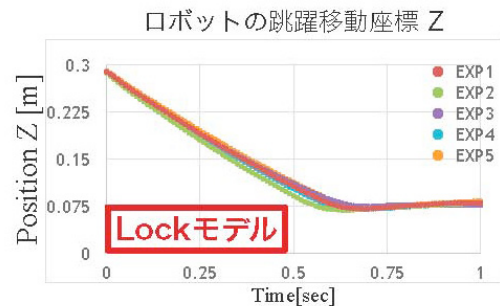


図4 着地実験の結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

- ① 久保田孝, 日本の宇宙開発(宇宙探査分野), 日本ロボット学会誌, 査読なし, Vol.32, No.5, pp.2-5, 2014.
- ② 吉光徹雄, 久保田孝, 富木淳史, 足立忠司, はやぶさ2小惑星探査ミッション搭載表面探査ローバシステム MINERVA-II, 電子情報通信学会, 信学技報, 査読あり, vol.113, no.16, pp.35-39, SANE2013-7, 2013.
- ③ 久保田孝, 世界初のチャレンジ 小惑星探査ローバ「ミネルバ」, 物理科学雑誌『パリティ』, 査読あり, Vol.27, No.8, 2012.

〔学会発表〕(計29件)

- (1) 川田和周, 久保田孝, 微小重力惑星における跳躍型探査ローバの着地制御に関する検討, 第21回ロボティクスシンポジウム, 2D1, やすらぎ伊王島(長崎県, 長崎市), (2016.3.17).
- (2) 吉光徹雄, 久保田孝, 富木淳史, 小惑星探査ローバ MINERVA-II, 第21回ロボティクスシンポジウム, 6C3, やすらぎ伊王島(長崎県, 長崎市), (2016.3.17).
- (3) Takashi Kubota, Image based Navigation for Exploration Probes, Seminar on Vision for Autonomous Vehicles and Probes, Schloss Dagstuhl, Germany, (2015.11.9-13).
- (4) Takashi Kubota, Robotics Technology for Deep Space Exploration, 2015 12th Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, Goyang City, Korea, (2015.10.28-30).
- (5) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Atsushi Tomiki, Asteroid Surface Exploration Rovers developed for Hayabusa-2 mission, 66th IAC, Jerusalem, Israel, (2015.10.12-16).
- (6) 吉光徹雄, 久保田孝, 富木淳史, Surface

Exploration Rovers onboard Hayabusa2 Asteroid Explorer, 日本ロボット学会第33回学術講演会, 3C1-03, 東京電機大学(東京都, 足立区), (2015.9.3-5).

- (7) Takashi Kubota, JAXA's Planetary Exploration Programs: Recent Low Cost Missions and Future Plans Low-Cost Planetary Mission Conference, Berlin, Germany (2015.6.8-11).
- (8) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Atsushi Tomiki, MINERVA-II rovers developed for Hayabusa-2 mission, Low-Cost Planetary Mission Conference, Berlin, Germany (2015.6.8-11).
- (9) 川田和周, 本田拓馬, 宮田洋佑, 久保田孝, 微小重力環境における展開型ホッピングローバの3次元移動に関する検討, ロボティクス・メカトロニクス講演, No.15-2, 1P2-T03, みやこメッセ(京都府, 京都市) (2015.5.17-19).
- (10) Takashi Kubota, Hayabusa 2 Mission and Current Status, AstroRecon 2015 Conference, Arizona, USA, (2015.1.6-7).
- (11) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, MINERVA Lander in Hayabusa 2 Mission, AstroRecon 2015 Conference, Arizona, USA, (2015.1.6-7).
- (12) 本田拓馬, 久保田孝, 知的行動制御を行う小天体探査ローバの移動性の検討, 日本ロボット学会第32回学術講演会, 1N2-01, 九州産業大学(福岡県, 福岡市), (2014.9.4-6).
- (13) Takashi Kubota, An Overview of Space Robotics Technology in Japan for Lunar or Planetary Exploration, International Symposium on Artificial

- Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montreal, Canada (2014.6.17-19).
- (14) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Atsushi Tomiki, Yoji Kuroda, Tadashi Adachi, Development of Hopping Rovers for New Challenging Asteroid, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montreal, Canada (2014.6.17-19).
- (15) Takuma Honda, Yosuke Miyata, Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, A New Small Body Exploration Robot with Active Thermal Control, International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Montreal, Canada (2014.6.17-19).
- (16) Yosuke Miyata, Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Progress of Research on A New Asteroid Exploration Rover Considering Thermal Control, The 2nd International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications 2013, F1A-2, Denver, USA, (2013.12.18-20).
- (17) 出村裕英, 三田肇, 阿部新助, 吉光徹雄, 久保田孝, はやぶさ2搭載ミネルバ2における紫外LEDを用いた有機鉱物検出の試み, 日本惑星科学会2013年秋季講演会, 石垣市民会館 (沖縄県, 石垣市), (2013.11.20-22).
- (18) 吉光徹雄, 久保田孝, 足立忠司, MINERVA-II surface exploration system in Hayabusa-2 asteroid explorer, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 3G04 (JSASS-2013-4590), (鳥取県, 米子市), (2013.10.9-11).
- (19) 宮田洋佑, 吉光徹雄, 久保田孝, 熱制御を考慮した小惑星探査ローバの新移動メカニズムの提案, 日本ロボット学会第31回学術講演会, 3N1-01, 首都大学東京 (東京都, 八王子市), (2013.9.4-7).
- (20) 宮田洋佑, 吉光徹雄, 久保田孝, 熱制御を考慮した小惑星探査ローバの新移動メカニズムの提案, 第13回「運動と振動の制御」シンポジウム, A19, 九州産業大学 (福岡県, 福岡市), (2013.8.27-29).
- (21) Takashi Kubota, Tetsuo Yoshimitsu, Intelligent Rover with Hopping Mechanism for Asteroid Exploration, 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, S5F-4, Istanbul, Turkey, (2013.6.12-14).
- (22) 久保田孝, ロボットによる月惑星探査日本航空宇宙学会, 第44期年会講演会, 東京大学 (東京都, 文京区), (2013.4.18).
- (23) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Atsushi Tomiki, Tadashi Adachi, Surface exploration robotics system of MINERVA-II onboard Hayabusa-2 asteroid mission, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 臼田宇宙観測所, (長野県, 佐久市), (2013,4,25-26)
- (24) 久保田孝, ロボットによる月惑星探査, 日本航空宇宙学会, 第44期年会講演会, B17, 東京大学, (東京都, 文京区), (2013.4.18).
- (25) Tetsuo Yoshimitsu, Hirohide Demura, Hjime Mita, Shinsuke Abe, Takashi Kubota, Patrick Michel, Proposal of Micro Rovers to Marco Polo-R Mission and its possibility for In-situ Analysis of Organic Matter, Int. Symposium on Astrobiological and Cosmochemical Implications of Marco Polo-R

Sampling of a Primitive Asteroid,  
Barcelona, Spain, (2013.1.16).

- (26) 久保田孝, 小天体探査ロボット日本ロボット学会第30回記念学術講演会, TSJ2012AC2G2-1, 札幌コンベンションセンター (北海道, 札幌市), (2012.9.17-20).
- (27) Tadashi Adachi, Takashi Kubota, Yoji Kuroda, Tetsuo Yoshimitsu, Advanced Robotic System of Hopping Rovers for Small Solar System Bodies, 06A-01, 11th Int. Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Turin, Italy, (2012.9.4-6).
- (28) Tetsuo Yoshimitsu, Takashi Kubota, Tadashi Adachi, Genya Ishigami, Hajime Yano, Evaluation of Simple Development Mechanism of Multiple Rovers by Microgravity Experiments using a Drop Tower, 39th COSPAR Scientific Assembly, No.G0.2-0011-12, Mysore, India, (2012.7.14-22).
- (29) 吉光徹雄, 久保田孝, 阿部新助, 黒田洋司, 足立忠司, 次世代小天体探査ローバにおける移動メカニズム, ロボティクス・メカトロニクス講演会2012, No.12-3, A2-L11, アクトシティ浜松, (静岡県, 浜松市), (2012.5.27-29).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

久保田 孝 (KUBOTA Takashi)  
宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究所・教授  
研究者番号：90211888

### (2) 研究分担者

吉光 徹雄 (YOSHIMITSU Tetsuo)  
宇宙航空研究開発機構・  
宇宙科学研究所・准教授  
研究者番号：60332152