

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：33934

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22360359

研究課題名(和文)自律月面ローバの研究

研究課題名(英文)Research on Autonomous Lunar Exploration Rover

研究代表者

中谷 一郎 (NAKATANI, Ichiro)

愛知工科大学・工学部・教授

研究者番号：40150049

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円、(間接経費) 4,170,000円

研究成果の概要(和文)：近い将来、我が国が実施を目指している月面の科学探査に備えて、月面ローバの研究・開発を行った。

月面全体をおおう、レゴリスと呼ばれる粉状の細かい粒子に対応するために接地面積を大きくする弾性車輪を提案し、また点在する障害物を乗り越えながら急な斜面を登攀するサスペンション機構を開発した。ローバおよび搭載マニピュレータを地球から遠隔操作するに当たり、運用者の負担を軽減し、かつ効率的な運用を確保するために、新たにセミ自律方式を提案した。

実験的に機能を確認するためのローバ・モデルとして、LUBOTシリーズを1号機から3号機まで試作し、さまざまな環境で走行実験を繰り返して性能を確認した。

研究成果の概要(英文)：Research on lunar rover technology for the scientific exploration of the moon has been conducted in preparation for Japan's possible lunar project expected to be realized in the near future.

Elastic wheels have been shown to be very effective in negotiating the lunar regolith, composed of powder-like fine particles, which covers lunar surface. Also, several types of suspension mechanism have been proposed to tackle the obstacles which are scattered on the steep slopes of the lunar mountains. For remotely controlling a lunar rover and on-board manipulator, a new scheme of what we call a semi-autonomous control system has been proposed which alleviates a burden on the operators on the ground and also enhance the efficiency of the remote operation of the rover system.

A series of rover models which we call LUBOT(LUAr roBOT) has been developed to confirm the above mentioned mechanisms and remote control scheme and their effectiveness has been confirmed.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：ローバ 月面探査 遠隔制御 ローバ用マニピュレータ セミ自律制御

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙技術の展開は、通信・放送・気象・資源探査など、実利的な明確な目標をもつものは、すでに国の手を離れ、今や「開発」ではなく、「利用」のフェーズに入っている。一方、月・惑星探査は、経済効果を超越してより大きい括りとしての「人類のフロンティアの拡大」という、本質的な側面を持つ。現在活躍中の宇宙基地の次のステップとして、人類は近地球の宇宙空間を遠く離れて、月・火星に向かおうとしている。

(2) 1960年代以降、米ソが先鞭をつけた月探査に関しては、近年、ヨーロッパ、日本、中国、インドなどの各国で、技術開発が進んでいる。わが国は、地上のロボット技術分野では、世界のトップクラスにあるが、宇宙ロボットに関しては、現状では欧米の宇宙先進国に引き離されるだけでなく、中国、インドなどの新興国の追い上げが急速に進んでいる。我が国も、その研究・開発を加速することが喫緊の課題であると思われる。

2. 研究の目的

(1) 月面の科学探査を行うために必要な、移動型の探査ロボット(以後「ローバ」と呼ぶ)の基本的な課題を検討して、近い将来の我が国の月プロジェクトに資することを目的とする。

(2) 月のクレータ中央丘(標高2000mクラス)の急斜面に登攀し、頂上付近のサンプルを採取して、麓に持ち帰り、着陸船にサンプルを渡して分析を行うというミッション(「JAXA 月面ロボットチャレンジ」の設定課題ミッション)を達成する。

(3) 月面を蔽うレゴリスと呼ばれる粉状の細かい砂の上をスタックすることなく走行し、かつ点在する岩石や小クレータなどの障害物を乗り越えることのできる走行系およびサスペンション系を開発する。

(4) 月面でサンプルを採取するためのローバ搭載用の小型、軽量、省消費電力のマニピュレータの技術を確立する。

(5) 月面ローバおよびマニピュレータの遠

隔操縦方式を開発する。地球局で遠隔操作するオペレータの負担を軽減し、かつ運用の効率化を図るための月面探査ローバの自律方式の確立を行う。

3. 研究の方法

(1) 月面探査を行う上で、現実のミッションに則した要求仕様の検討を行う。宇宙ミッションの要求仕様は、大学では、なかなか現実のプロジェクトに立脚した形とはなり難い。なぜなら、大学では、私たちは、とすれば、論文としての先端性および学術性を追求するあまり、実ミッションへの応用を必ずしも最優先にはし難いという「象牙の塔」の閉鎖性の陥穽に陥りがちだからである。

(2) 上述の大学研究における宇宙技術研究の「象牙の塔の閉鎖性の陥穽」を回避するために、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が2010年に実施したコンテスト形式の「月面ロボットチャレンジ」というキャンペーンに参加し、日本の宇宙開発の実施担当機関の設定するミッション要求に準拠して月面探査ローバの仕様を検討することとした。このコンテストの募集対象は、大学、研究所、企業などに所属し、月探査の研究・開発に興味をもつ研究者・技術者であった。月面探査ローバの詳細な仕様の検討、多くの代替案に関する評価を実施し、それに基づく概念設計を行ってコンテストに参加した。幸い、選考過程で2大学の一つに採択された。

(3) 上記コンテストに採択された結果、JAXAと共同研究を実施した。期間は2010年度、2011年度にわたる2年間であった。その過程で、JAXAの月面探査ミッションに関して直接担当者と議論する機会を得た。また、月面ローバの仕様の策定結果および、それに基づく試作モデルの性能評価などで、大学とは異なる視点からの議論を重ね、宇宙開発実施機関の側からの情報を得ることができた。

(4) ローバモデルの基本的な走行機構およびサスペンション機構は、[理論解析] [数値シミュレーションの実施] [モデルの試作] [走行実験] [理論解析に戻る]、というル

ープを循環する形で行った。この過程で、ローバ・モデルは改良を重ねて、大きく分類すると3種類の試作を行った。これらは、LUBOT-1号機~3号機と命名した。(LUnar roBOTの略称である。)1号機および3号機には、マニピュレータのモデルを搭載した。

(5) 月面ローバおよび搭載マニピュレータを地球局から遠隔制御するに当たり、セミ自律方式を実装し、上記モデルで試験を繰り返し実施した。

(6) 宇宙開発に関する一般の関心が高く、パブリック・アウトリーチの一環として、多くの展示会などに、ローバモデルを展示した。

4. 研究成果

(1) 月面を蔽う粉状のレゴリスの上を走行する方式として車輪(図1、左)と履帯(図1、右)は一長一短があり、走行環境により選択する必要がある。

今回は、クレータの中央丘(標高2000mクラス)の登攀を対象として、両方式の比較検討の結果、軽量性、機構の簡易性で勝る弾性車輪方式を採用した。この方式は、急斜面でのレゴリスに対しては、車輪が変形することにより接地面積を広くとることができて、スタックを防ぐのに有効であることを確認した。また、平坦な地形にさしかかったときの高速性でも、車輪方式がすぐれていることを確認した。

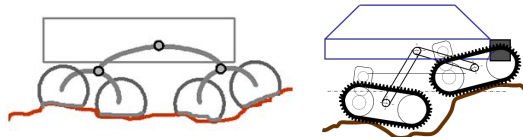


図1 車輪方式(左)と履帯方式(右)の例

(2) 月面の急斜面のレゴリス上を走行する際、点状の障害物を乗り越えるための、さまざまなサスペンション方式の検討を実施した。多くの候補の中から、新しい方式として、8輪の前進・後退対象タイプのロッカー・ボギー方式、6輪のパンタグラフ・サ

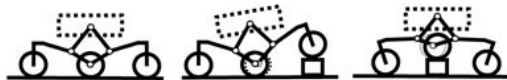
スペンション方式、クロス・ボギー・サスペンション方式を有力な方式として選定し、検討を実施した(図2(a)~(c))。なお、パンタグラフ・サスペンション(図2(b))とクロス・ボギー・サスペンション(図2(c))は、側面図は似ているが、後者では、中央の車輪がダブルになっていて、独立なリンクで支えられているので、まったく異なる機能をもつ。



(a) LUBOT-1号機で用いた前進・後退対称ロッカー・ボギー・サスペンション。



(b) LUBOT-2号機で用いたパンタグラフ・サスペンション。



(c) LUBOT-3号機で用いたクロス・ボギー・サスペンション。

図2 LUBOT-1~3号機のサスペンション方式

(3) 図2(c)に示すパンタグラフ・サスペンション方式は、前進・後退が対称だけでなく、機構の安定性の観点からも優れていて、かつ新規性が高いので特許の申請を行った。これは、月・惑星探査だけでなく、地上でのカート、車椅子などにも応用が期待される。また、パンタグラフ・サスペンションの大きな特徴の一つは、障害物を乗り越える際に、サスペンション系が大きく変形しても、前輪-中輪の距離(図3における d_1) および後輪-中輪の距離(図3における d_2) が一定であることにある。このため、図3に示すように、この2つの車輪対を、そのままスプロケットに置き換えて、履帯方式にすることが可能である。ただし、この場合は中央スプロケットを2つに分けて、前部の履帯用と後部の履帯用に使い分ける。中央の2つのスプロケットの軸は共通とし、共通のモータで駆動する。これは、従来、NASAおよび中国のローバが採用してきたロッカー・ボギーと比して優れた特徴である。本方式の場合、8つのスプロケットに対してわずか2個のモータで駆動が可

能で、小型・軽量化にきわめて有利である。パンタグラフ・サスペンションと履帯を組み合わせた方式に関して数値シミュレーションを実施するとともに、ブレッドボードモデルを試作し、その実用性を確認することができた。

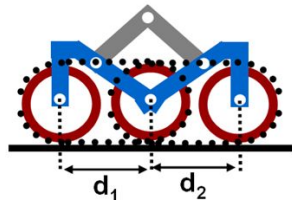


図3 パンタグラフ・サスペンションにおける車輪間の距離 d_1 および d_2

(4) 月面ローバに搭載して、資料採取を行うためのマニピュレータに関するさまざまな方式を比較検討した。その結果、図4に示すような、4自由度のスカラタイプが有利であるとの結論に至った。

このスカラタイプ・マニピュレータの主な特徴は、以下のとおりである。

小型・軽量、

動作が直観的に理解し易く、操作が容易、

ナビゲーション用のカメラを上部に設置することで、ローバ操縦用のカメラとマニピュレータ操作用のカメラを兼用とすることができる。

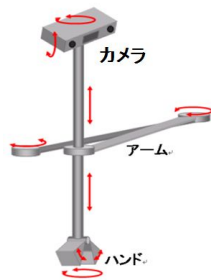


図4 ローバ搭載用スカラ型マニピュレータ

(5) 月面ローバの地球局からの遠隔制御方式として新たに、セミ自律方式を提案し、試作した。地球局と月面の間往復の電波伝搬遅れ時間は3秒以下であり、マスタースレーブによる制御と完全自律制御の中間に相当するセミ自律方式が有利であることを示した。

この方式の概要は以下のとおりである。地球

局にいるオペレーターには、月面ローバに搭載された、カメラ画像が送られてくる。オペレーターは、モニタ画面上の2次元画像上の、目標点(ターゲット)を、カーソルを用いて指定する(図5参照)。こうして得られたターゲットの2次元位置情報を、ローバに搭載したコンピュータが3次元情報に変換して用いる。この変換は、ローバの近傍を傾斜した平面で近似して、カメラの姿勢を基にカメラの光軸方向と地面の交点として求めることによる。

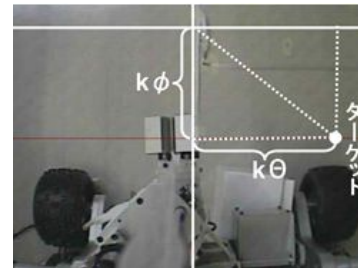


図5 セミ自律運用のモニタ画面の例
(マニピュレータのハンド制御の例)

この手法は、走行するローバの遠隔操縦の場合は、最終目標点の途中で、何点かの間目標点をオペレーターが設定し、中間目標点をターゲットとすることによる。現在地点から、ターゲットに至る走行経路が近似的に傾斜した平面上にあるとみなすことが可能な近傍に、中間目標点を設定することにより、上記のセミ自律運用が可能となる。

本方式は、また、マニピュレータの把持対象のある目標点への、手の制御にも利用可能であることを示すことができた。把持対象はマニピュレータ手の到達範囲にあることが前提となるので、ターゲットは、ローバと近似的に同一平面上にあることが可能である。

セミ自律制御方式を用いることにより、オペレーターの負担を大きく減らすとともに、電波伝搬遅れによる運用効率の低下を軽減することができる。

(6) 上記各項目(1)~(5)における検討結果を実験的に確認するためにローバモデルの試作、改良を繰り返し実施した。試作モ

デルは大小合わせて 10 種類を超えた。その中でマイルストーンとなる主な試作機は、3 種類に集約される。図 6 は LUBOT-1 ~ LUBOT3 と名付けた試作モデルを示す。これらは、それぞれ、図 3 (a) ~ (c) に対応する。

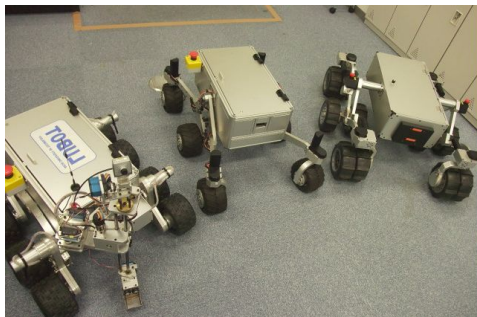


図 6 試作した、LUBOT-1 号機（左）、同 2 号機（中）および 3 号機（右）

(7) さまざまな条件下での走行試験を繰り返した。特に、図 6 に示した LUBOT-1 号機 ~ 3 号機に関しては、砂丘でのフィールド試験を 3 回、実施し、機能・性能の確認を行った。試験場所は、できるだけ月面のレゴリスや斜面に似た地形を実現するために、静岡県中田島砂丘を選定した。その結果、良好な機能・性能を確認することができた。

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 4 件)

中谷一郎、「月面探査ローバ用パンタグラフ・サスペンション」、愛知工科大学紀要、査読有、11 巻、2013、pp23-28

Kojiro Iizuka, Ryuya Sasaki, Takeshi Kubota, Atsuro Nishitani, Ichiro Nakatani, "Development of a Small, Lightweight Rover with Elastic Wheels for Lunar Exploration", Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol.24, No.6, 2012, pp1031-1039

中谷一郎、片山雄二、森康夫、「月面探査ローバの検討」、愛知工科大学紀要、査読有、8 巻、2011、pp21-28

〔学会発表〕(計 5 件)

飯塚浩二郎、佐々木竜也、久保田武志、西谷篤郎、中谷一郎、「軟弱地盤における小型月面ローバ用車輪の性能評価」、日本機械学会、第 12 回・運動と振動のシンポジウム、2006
中谷一郎、所誠矢、西田信一郎、片山雄二、森康夫、「セミ自律方式の月面探査ローバの提案」、日本機械学会 2011 年度年次大会

飯塚浩二郎、佐々木竜也、久保田武志、西谷篤郎、中谷一郎、「月惑星モバイルローバに有効な小型車輪の検討」、日本機械学会 2011 年度年次大会

中谷一郎、西田信一郎、片山雄二、森康夫、「月面探査ローバモデル "LUBOT" の開発」、日本機械学会 2012 年度年次大会

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：車輪型移動車

発明者：中谷一郎

権利者：愛知工科大学

番号：特許 513051416

出願年月日：2013 年 3 月 1 日

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中谷 一郎 (NAKATANI Ichiro)

研究者番号：40150049

愛知工科大学・工学部・電子制御-ロボット
工学科・教授

(2) 研究分担者

大西 正敏 (ONISHI Masatoshi)

愛知工科大学・工学部・電子制御-ロボット
工学科・教授

研究者番号：50410882

茅根 直樹 (CHINONE Naoki)

愛知工科大学・工学部・電子制御-ロボット
工学科・教授

研究者番号：60410883

奥山 圭一 (OKUYAMA Keiichi)
愛知工科大学・工学部・電子制御-ロボット
工学科・教授
研究者番号：30442461
(H24～25 連携研究者
九州工業大学 大学院 先端機能システム
工学研究系・教授)

(3)連携研究者

吉光 徹雄 (YOSHIMITSU Toshio)
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・
准教授
研究者番号：60332152