

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22800091

研究課題名（和文） 確率的アプローチに基づいた月惑星探査ロボットの自律移動システムに関する研究

研究課題名（英文）Mobility and Autonomous Systems for a Lunar/Planetary Exploration Rover based on a Stochastic Approach

研究代表者

石上 玄也（ISHIGAMI GENYA）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・宇宙航空プロジェクト研究員

研究者番号：90581455

研究成果の概要（和文）：

本研究では、探査ロボットが「より安全でより正確な自律移動システム」の実現を目指し、不確定性を考慮したロボットの挙動解析モデルの構築、および未知環境におけるロボットの自律移動システム（環境認識、最適経路計画、航法誘導）についての研究開発を行った。さらに、ロボットテストベッドへ同システムを実装し、フィールド実験によってその有用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：

In this research project, a statistical mobility prediction method for an exploration rover traveling in uncertain terrain has been elaborated. This method explicitly considers uncertainty of the terrain physical parameters, and employs models of both vehicle dynamics and wheel-terrain interaction mechanics. Additionally, an autonomous mobility framework for a rover, including a terrain mapping, a path planning, and its navigation has been developed in this research. The validity of the framework has been confirmed through field experiments with a rover test bed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011 年度	1,160,000	348,000	1,508,000
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：月惑星探査、移動ロボット、自律システム、経路計画、動力学、テラメカニクス

1. 研究開始当初の背景

月や火星などの惑星表面を自律移動する探査ロボットは、科学的な探査ミッションを成し遂げるために必要不可欠な技術として認識されている。月面上や火星表面は未知の環境であるとともに、砂や岩石によって覆われているため、探査ロボットが砂地においてスタックしてしまうことや、障害物への衝突、あるいはロボット本体の転倒といったことが懸念される。そこで、ロボットに搭載されたセンサシステムを用いて、ロボット周囲の地形環境や走行地面のパラメータ（摩擦や粘

着力など）を計測することより、ロボットの挙動予測や、走行すべき経路の計画を行い、実際の走行時のリスクを事前に回避する。

しかしながら、搭載センサによる計測値は、誤差や分散を含んでしまう。例えば、想定される地面の摩擦係数と実際の数値との誤差や、走行土壌によっては、その値は不均一であると考えられる。また、地形環境（地形の起伏や傾斜）についても、搭載センサの精度や使用環境によって計測値に不確実性が生じ、結果として取得情報の信頼性が著しく劣化する。

このような、走行環境における不確定性は、探査ロボットの挙動予測や、経路計画などの自律移動システムの各要素に対しても不確定性を与えてしまい、より安全でより正確な走行を実現する上での障害となるが、これまでの研究において、このような問題に対する明確な解決手法は提示されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、このような不確定性を含む環境において、探査ロボットがより安全でより正確に自律移動を実現することを目的とし、不確定性を考慮したロボットの挙動解析モデルの提案、および探査ロボットの自律移動システムの構築を目指す。

(1) 不確定性を考慮した挙動解析モデル

砂地上におけるロボットの走行力学は、主にテラメカニクスと呼ばれる分野において盛んに研究がなされてきた。車輪やクローラ（履帯）といった走行システムと、不整地上との力学的な相互関係から力学モデルを構築し、車体全体の挙動を予測するアプローチである。しかし、従来の研究では、同モデルに入力する地面のパラメータ（摩擦や粘着力）が既知であると仮定し、実際のパラメータ値との誤差や分散、すなわち不確定性は考慮されていなかった。そのため、予測解析されたロボットの位置や姿勢などの状態値が、入力パラメータの不確定性にどの程度影響するかは議論されていなかった。

一般に、不確定性解析はモンテカルロ法などを用いて網羅的に数値計算を行うことによって、解析結果の確率分布を得ることが可能であるが、解析モデルが複雑になるに従って計算コストが膨大になってしまうという欠点があった。

研究代表者は、これまでの研究において、砂地上における車輪力学の体系的なモデル化を行っており、さらに同モデルを用いた探査ロボットの動力学シミュレータを構築してきた。そこで本研究では、研究代表者が構築した探査ロボットの動力学シミュレータに、SRSM（Stochastic Response Surface Method）と呼ばれる、確率的な近似計算手法を融合することによって、入力パラメータの不確定性を考慮し、かつ計算コストの低減が可能な挙動解析モデルの構築を目指す。

(2) 探査ロボットの自律移動システム

移動ロボットの経路計画については、非常に多くの研究がなされており、様々な評価関数を用いて、現在地から目的地までより安全な（あるいは最短な）経路を計画する手法が提案されている。

経路計画を行う際に必要となる地形情報

は、ロボットの搭載カメラあるいはレーザ距離計によって計測可能であるが、得られる情報はいずれも不確定性を含んでいる。従来の経路計画アルゴリズムの基幹である評価関数は、走行地面の不確定性を考慮していないため、数値計算上は安全と思われる経路を実際にロボットが走行した際に、想定外の挙動を示す可能性があることが懸念される。

本研究では、このような地形環境情報の不確定性を考慮した、環境情報取得と地図生成、経路計画を含む自律移動システムの構築を目指す。

3. 研究の方法

各研究テーマの研究計画・方法を以下にまとめる。

(1) 不確定性を考慮した挙動解析モデル

本研究では、研究代表者が構築した動力学モデルとSRSMを融合する。SRSMとは、任意の解析モデルに対して不確定性を含むパラメータを入力し、その出力値を統計学的に等価な近似モデルによって計算するアプローチである。

図1に示すように、本手法ではまずSRSMにおける解析モデルとして、探査ロボットの動力学モデルを用いる。入力値を走行地面の不確定性パラメータ、出力値をロボットの挙動（位置や姿勢、車輪の滑り）として、動力学計算を行う。得られた結果をもとに、SRSMを用いた確率的近似計算を行うことによって、入力パラメータの不確定性を考慮した挙動解析が可能となる。

さらに、テストベッドを用いた走行実験を実施し、実験における走行結果が、解析結果から得られる確率分布の中に収まることを確認し、提案するモデルの妥当性を評価する。

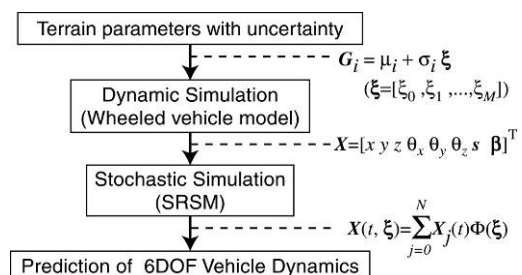


図1：確率的アプローチに基づく挙動解析フロー

(2) 探査ロボットの自律移動システム

本研究において構築する自律移動システムは下記の要素から構成される。

① 地形環境取得システム

一般に未知環境の3次元形状を取得する方法として、複数のカメラを用いたステレオ視によるものと、レーザ距離計(LRF)による計測に大別できる。本研究では、図2に示すように、2次元スキャン型レーザ距離計をジンバル上に搭載することによって、地形の3次元計測を実施する。さらに、ロボット近傍の地形をより詳細に表現できる地図構築手法について検討する。

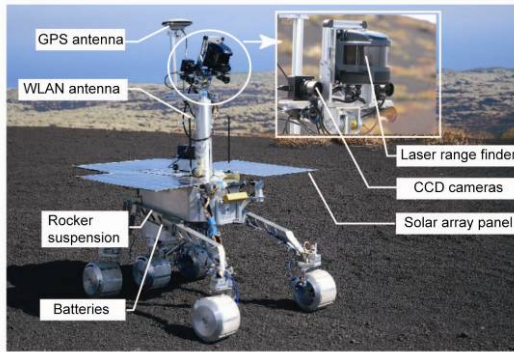


図2: 探査ロボットテストベッド
(右上図: レーザ距離計による地形計測システム)

② 経路計画

経路計画アルゴリズムは、経路長さ、地形の傾き、地形の凹凸の指標からなる関数を用いる。それぞれの指標に相対的な重み付けをすることによって、走行距離を重視した経路、あるいは緩やかな地形を優先する経路の生成が可能であるが、地形情報の不確実性に加え、重み係数の恣意性を考慮する必要がある。そこで、本研究では、重み係数を網羅的に変化させ、複数の経路を同時に生成する。次に、各経路を定量的に評価することによって、より安全な走行経路を抽出するアルゴリズムを構築する。



図3: ビジュアルオドメトリ検証用小型テストベッド

③ 航法誘導

ロボットは、上記アプローチによって得られた最適経路を沿うように走行しなければならない。その際、ロボットの位置や姿勢を正確に計測することが必要である。本システムでは、車輪の回転角度に基づいて走行距離を

算出するホイールオドメトリと、カメラ画像の時間差分を用いたビジュアルオドメトリを併用することによって、自己位置推定を行う。特徴点の少ない未知環境でのビジュアルオドメトリについて詳細検討を行うため、図3に示す小型ロボットテストベッドを開発する。

以上の自律移動システムを本研究において構築するとともに、ロボットテストベッドを用いたフィールド試験によって、提案手法の有用性の実証を行う。

4. 研究成果

本研究課題における主な研究成果を以下にまとめる。

(1) 不確実性を考慮した挙動解析モデル
不整地走行ロボットの動力学モデルと、SRSM (Stochastic Response Surface Method) という確率的な近似計算アプローチを融合し、不確実性環境下におけるロボットの挙動解析モデルの構築を達成した。

土壌パラメータ(粘着力、摩擦係数)の不確実性がロボットの走行軌跡や車輪のスリップ率に与える影響について解析および評価を行った。一例として、不確実性パラメータがロボットの走行軌跡に与える影響を解析したものを図4に示す。最も確率の高い走行軌跡が実線により図示されるとともに、入力値の不確実性に起因した確率楕円を同時に提示している。さらに、実験から得られたテストベッドの走行軌跡と計算結果を比較することによって、提案手法の正当性を確認した。また、計算コストに関しても、従来のモンテカルロ法などの計算手法に比べ、提案するモデルが計算コストの低減(最大で約98.5%減)に寄与することを確認した。

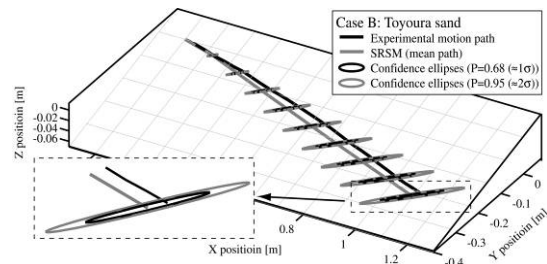


図4: 不確実性を考慮した挙動解析結果
(斜面横断時のロボットの走行軌跡)

(2) 探査ロボットの自律移動システム
自律移動システムの研究開発について、レーザ距離計(LRF)を用いた3次元地形計測システムを開発した(図2)。このシステムは複

数のジンバル回転軸を有しているため、用途に応じたスキャン方法が可能であることを実証した。

地形計測システムから得られる情報に基づき、グリッド地図 (Digital Elevation Map, DEM) の作成手法とそのインターフェースの開発をおこなった。DEM の生成に関して、従来、矩形型グリッドが用いられていたが、本研究では新たに扇型グリッドを用いた円柱座標系での地図生成を構築した。フィールド実験により、提案する地図生成手法が、従来のアプローチと比べ、ロボット近傍の環境をより詳細に表現できることが実証された。

また、同地図を用いて、任意の目的地までの経路を生成するアルゴリズムの構築、ならびに、経路生成関数における重み係数を網羅的に変化させ、複数の経路を同時に生成するアルゴリズムを構築した。実験結果の一例として、複数の経路生成と、定量的評価に基づいた最適経路抽出を図5に示す。以上の手法により、地形情報の不確実性および重み係数の恣意性を緩和した最適経路計画が可能となった。

ロボットが最適経路を実際に走行する際の航法誘導について、ホイールオドメトリおよびビジュアルオドメトリによる自己位置推定を実装し、長距離の走行試験によって実用性を確認した。特に、図3に示した小型テストベッドを用いて、未知環境におけるビジュアルオドメトリの検討に着手した。加えて、推定された自己位置の真値を得るための手法として、探査ロボット搭載のGPSと電子基準点とを用いた基線ベクトル解析による高精度位置計測 (～数 cm) を実現した。

3次元地形情報取得、同地形情報に基づくローバの走行経路計画、目的地までのローバの航法誘導、の一連のフレームワークの開発と実装を行い、不整地試験フィールドにおいて、探査ロボットの長距離・半自律走行を達成した (図6)。

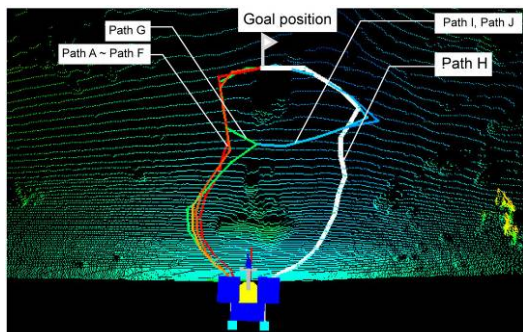


図5：地形計測および経路計画実験結果 (障害物回避, Path Hが最適経路)

今後の展望として、開発したレーザ距離センサシステムを用いて地形情報を長距離にわたって取得し、これらの時系列データから自己位置推定をおこなうスキャンマッチングの検討を進めている。また、カメラによって取得されるテクスチャ情報と LRF による地形形状を融合することによって、より信頼性の高い自律移動システムの確立が期待できる。

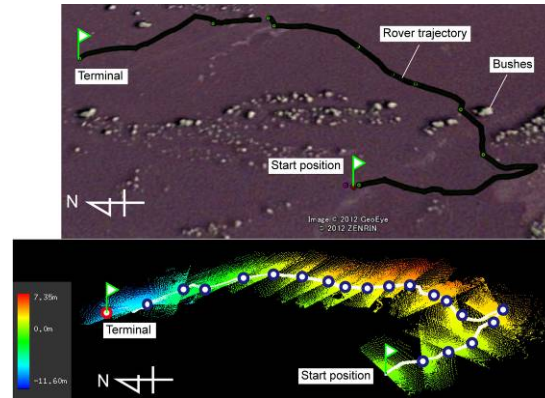


図6：自律移動システム実証実験結果 (地形計測, 経路計画, 航法誘導)

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)

- ① 大槻真嗣, 石上玄也ほか, “自立移動ロボットによる火山地域の探査活動”, 日本惑星科学会誌, Vol. 21, No. 2, pp.111—120, 2012 (査読有).
- ② G. Ishigami, K. Nagatani, and K. Yoshida, “Path Planning and Evaluation for Planetary Rovers Based on Dynamic Mobility Index,” Proc. of the 2011 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 601—606, 2011, (査読有), (DOI: 10.1109/IROS.2011.6094768).
- ③ K. Nagatani, A. Ikeda, G. Ishigami, K. Yoshida, and I. Nagai, “Development of a Visual Odometry System for a Wheeled Robot on Loose Soil Using a Telecentric Camera,” Advanced Robotics, Vol. 24, No. 8-9, pp. 1149-1167, 2010 (査読有).
- ④ G. Ishigami, G. Kewlani, and K. Iagnemma, “Statistical Mobility Prediction for Planetary Surface Exploration Rovers in

Uncertain Terrain,” Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.588—593, 2010 (査読有), (DOI: 10.1109/ROBOT.2010.5509300).

[学会発表] (計 15 件)

- ① K. Otsu, M. Otsuki, G. Ishigami, and T. Kubota, “Advanced Visual Odometry for Planetary Exploration Rover,” Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space 2012, Turin/Italy, September 6th, 2012.
- ② G. Ishigami, M. Otsuki, and T. Kubota, “LIDAR-based Terrain Mapping and Navigation for Planetary Exploration Rover,” Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space 2012, Turin/Italy, September 4th, 2012.
- ③ G. Ishigami, M. Otsuki, and T. Kubota, “Path Planning and Navigation Framework for a Planetary Exploration Rover using a Laser Range Finder,” The 8th International Conference on Field and Service Robots, Matsushima/Japan, July 18th, 2012.
- ④ 大津恭平, 大槻真嗣, 石上玄也, 久保田孝, “自然地形におけるビジュアルオドメトリのための特徴点抽出手法に関する検討”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, アクトシティ浜松, 2012 年 5 月 29 日
- ⑤ 石上玄也, 久保田孝ほか, “火星複合探査計画 MELOS における探査ローバの工学的検討”, 第 12 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2012 年 1 月 5 日.
- ⑥ 大槻真嗣, 石上玄也ほか, “移動探査ローバのフィールド走行試験”, 第 12 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2012 年 1 月 5 日.
- ⑦ T. Kubota, M. Otsuki, T. Shimada, G. Ishigami, et al., “Field Tests on Intelligent Exploration for Planetary Rover,” 2011 PERC Planetary Geology Field Symposium, Kitakyushu, November 6th, 2011.
- ⑧ T. Kobayashi, G. Ishigami, K. Nagatani, and K. Tateyama, “Load Distribution Control of a Six-Wheeled Robotic Vehicle in Rough Terrain,” The 17th Int. Conf. of the Int. Society for Terrain-Vehicle Systems, Blacksburg/VA, September 22nd,

2011.

- ⑨ 石上玄也, “探査ローバの走行特性に基づいた経路計画と経路評価手法の提案”, 第 21 回アストロダイナミクスシンポジウム, 宇宙科学研究所, 2011 年 7 月 26 日.
- ⑩ 石上玄也, 大槻真嗣, 久保田孝, “テラメカニクスに基づいた弾性車輪および剛性車輪の力学モデルの提案”, 日本機械学会 第 12 回運動と振動の制御シンポジウム, メルパルク長野, 2011 年 6 月 29 日.
- ⑪ 大槻真嗣, 石上玄也, 成田伸一郎, 若林幸子, “柔軟構造を持つ惑星探査ローバの沈下と振動の同時抑制方法の提案”, 日本機械学会 第 12 回運動と振動の制御シンポジウム, メルパルク長野, 2011 年 6 月 29 日
- ⑫ 小林泰三, 石上玄也ほか, “砂質不整地を走行する車輪型移動ロボットの荷重等分配制御に関する研究”, 日本機械学会 第 12 回運動と振動の制御シンポジウム, メルパルク長野, 2011 年 6 月 29 日
- ⑬ M. Otsuki, G. Ishigami, et al., “Experimental Study on Mobility and Navigation for Exploration Rover in Natural Rough Terrain,” The 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa/JAPAN, June 9th, 2011.
- ⑭ G. Ishigami, M. Otsuki, T. Kubota, and K. Iagnemma, “Modeling of Flexible and Rigid Wheels for Exploration Rover on Rough Terrain,” The 28th Int. Symp. on Space Technology and Science, Okinawa/JAPAN, June 8th, 2011.
- ⑮ 石上玄也, 大槻真嗣, 久保田孝, “探査ローバ搭載 LRF による 3 次元地形計測実験,” 第 11 回宇宙科学シンポジウム, 宇宙科学研究所, 2011 年 1 月 6 日.

[その他]

アウトリーチ活動: 探査ロボットのデモンストラーション (東京大学博物館, 宇宙科学研究所など).
教育広報用資料: JAXA 宇宙科学研究所 DVD 第 14 巻「The ROVER 今, 宇宙は, 探査ロボットの時代へ」製作協力

6. 研究組織

(1)研究代表者

石上 玄也 (ISHIGAMI GENYA)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 宇宙航空プロジェクト

研究員

研究者番号：90581455

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

大槻 真嗣 (OTSUKI MASATSUGU)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 助教