慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	包括的な力学モデルに基づく月惑星探査ロボットの走行システム設計に関する研究
Sub Title	Experimental approach for comprehensive wheel-soil interaction mechanics and statistical design method for mobility system of planetary exploration robot
Author	石上, 玄也(Ishigami, Genya)
Publisher	
Publication year	2015
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2014.)
JaLC DOI	
Abstract	本研究は, 優れた不整地走破性能を有するロボット走行システムの実現を目的とし, 不整地走行における車輪力学モデルの構築および走行システムの最適設計手法にそれぞれ取り組んだ。本研究の成果は主に, 統合的な車輪試験装置・ 車輪実装型センサシステムを開発し, 従来の実験系では不明であった車輪の力学現象に対して, 極めて精密な現象理解に迫ることが可能となったこと, また, 計算コストの低い車輪の最適設計手法を示したこと, これら研究について, 招待講演や表彰を受けたことに集約される。 In this research project, a comprehensive wheel test apparatus that employs an in-wheel sensor system and a particle image velocimetry technique has been developed. The test bed achieves a precise observation of wheel-soil interaction mechanics including wheel pressure, wheel sinkage, soil flow, and wheel dynamic behavior, which were not well clarified by classical experimental approaches. This research also proposed a method that provides the most feasible wheel size for off-road traction. The method finds a wheel radius and width that maximizes wheel traction performance, with less computational cost. These outcomes were presented in more than twenty five papers/books (incl. domestic conference) and in an invited talk at an international conference.
Notes	研究種目：若手研究(B) 研究期間：2012～2014 課題番号：24760222 研究分野：移動ロボット, テラメカニクス
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_24760222seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２７ 年　 ６ 月　 １ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：２４７６０２２２

研究課題名（和文）包括的な力学モデルに基づく月惑星探査ロボットの走行システム設計に関する研究

研究課題名（英文）Experimental Approach for Comprehensive Wheel-Soil Interaction Mechanics and Statistical Design Method for Mobility System of Planetary Exploration Robot

研究代表者
石上　玄也（ISHIGAMI, GENYA）

慶應義塾大学・理工学部・講師

研究者番号：９０５８１４５５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は，優れた不整地走破性能を有するロボット走行システムの実現を目的とし，不整地走行における車輪力学モデルの構築および走行システムの最適設計手法にそれぞれ取り組んだ．本研究の成果は主に，統合的な車輪試験装置・車輪実装型センサシステムを開発し，従来の実験系では不明であった車輪の力学現象に対して，極めて精密な現象理解に迫ることが可能となったこと，また，計算コストの低い車輪の最適設計手法を示したこと，これら研究について，招待講演や表彰を受けたことに集約される．

研究成果の概要（英文）：In this research project, a comprehensive wheel test apparatus that employs an in-wheel sensor system and a particle image velocimetry technique has been developed. The test bed achieves a precise observation of wheel-soil interaction mechanics including wheel pressure, wheel sinkage, soil flow, and wheel dynamic behavior, which were not well clarified by classical experimental approaches. This research also proposed a method that provides the most feasible wheel size for off-road traction. The method finds a wheel radius and width that maximizes wheel traction performance, with less computational cost. These outcomes were presented in more than twenty five papers/books (incl. domestic conference) and in an invited talk at an international conference.

研究分野：移動ロボット　テラメカニクス

キーワード：テラメカニクス　最適化設計　車輪実装型センサシステム　粒子画像流速計測法　確率的アプローチ

１．研究開始当初の背景

月面や火星表面を移動する探査ロボットの走行システムには，激しい熱サイクルや放射線，真空といった厳しい環境条件に加え，重量やエネルギー効率の観点から，金属製の剛体車輪を用いることが一般的である．このような「硬い車輪と柔らかい不整地」の力学は，テラメカニクスと呼ばれる分野において研究が行われてきた．研究代表者はこれまでの研究において，砂地上における剛体車輪の力学モデルの構築と実験による検証，ロボットの動力学モデルへの応用などを精力的におこなっており，探査ロボットの車輪力学解析の分野において研究成果を挙げてきた．

車輪力学モデルに関するこれまでの研究を俯瞰すると，剛体車輪あるいは弾性車輪の不整地上での力学特性を，同一のモデルによって包括的に表現できる解析モデルは提案されていなかった．そこで研究代表者は，これまでの研究成果を発展させ，剛体車輪・弾性車輪を網羅できる力学モデルの初期提案をおこなった．同モデルは車輪と地面の相対的な剛性を考慮したモデルであり，計算コストが低いという利点があるが，現時点では数値シミュレーションのみの成果であり，実験による詳細な検証が必要であった．

また，探査ロボット全体の開発においても，ロボットの重量やサイズ，利用可能なエネルギーなどの制約条件を満たしつつ，優れた不整地走破性能を有するロボットの走行システムを設計すること，すなわち，不整地走行に適した設計パラメータを算出することも重要な課題となっている．従来の研究例では，遺伝的アルゴリズムによって最適な設計パラメータ（例えば，車輪直径や車輪幅）を導出する手法が提案されてきた．しかし，この手法は，設計パラメータの種類が増加するに従って計算コストが増大してしまうことや，走行地面の不確定性を許容できないこと，あるいは，車輪の力学モデルが簡易的なものになってしまうことが問題となっていた．

２．研究の目的

上記のような研究背景から，本研究課題では，月面や火星表面を走行する探査ロボットの走行システムについて，車輪を用いた移動方式に注目し，優れた不整地走破性能を有する走行システムを実現することを目的とする．

本研究目的の達成のために，以下の研究課題に取り組む．

(1) 不整地走行における包括的な車輪力学モデルの構築と実験によるモデルの検証：車輪の力学特性（力，トルク，加速度や振動）を統合的に計測できる車輪試験装置を製作し，さらに，走行実験に基づいて提案する力学モデルの検証をおこない，包括的な車輪力学モデルの確立を目指す．

(2) 走行システムの最適設計手法:確率的アプローチをロボットの走破性能評価関数に適用することにより，走行システムの最適設計を効率的かつ解析的に行う手法の確立を目指す．

３．研究の方法

主な研究方法を以下にまとめる．

(1) 不整地走行における包括的車輪力学モデルの構築および実験によるモデルの検証

①車輪の力学特性を高精度で計測できる実験装置の開発

不整地上，特に砂地上を走行する車輪の力を計測するための軸力覚センサ，車輪の駆動トルクを計測するための電流センサ，沈下量計測のためのレーザ変位計などを搭載した，車輪走行試験装置（図 1）を開発した．同試験装置ならびに以下②③のシステムを用いた車輪走行実験の結果に基づき，車輪力学モデルの修正を行った．

②車輪実装型センサシステムの開発

上記(1)-①を遂行するうえで，車輪と砂との接触領域における物理現象を詳細に捉えることが重要と考え，車輪実装型センサシステム（図 2）の開発をおこなった．車輪の表面にシート型圧力センサおよび光センサを付加することによって，車輪と砂の接触部位での車輪ラジアル方向の圧力分布，ならびに車輪の沈下量を計測するというアプローチを採用した．

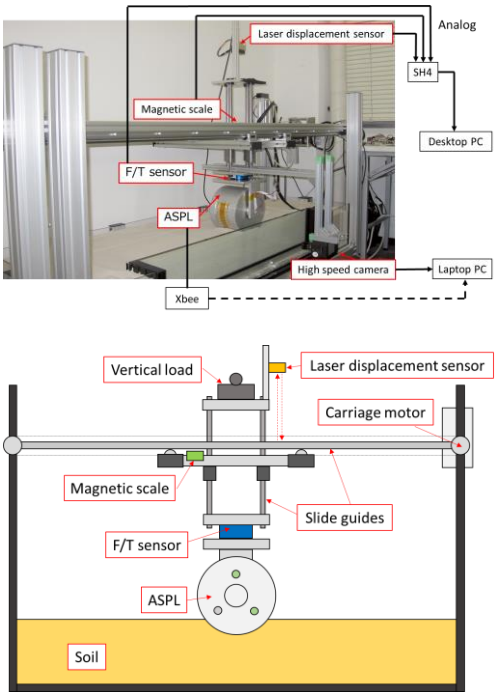

図 1：車輪走行試験装置

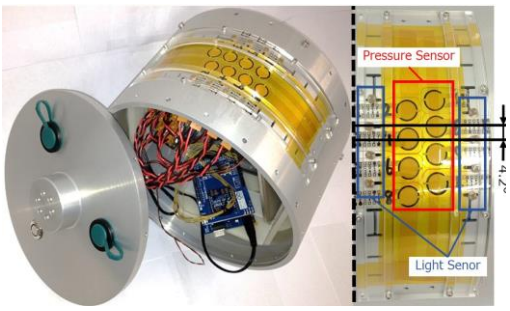

図 2：車輪実装型センサシステム

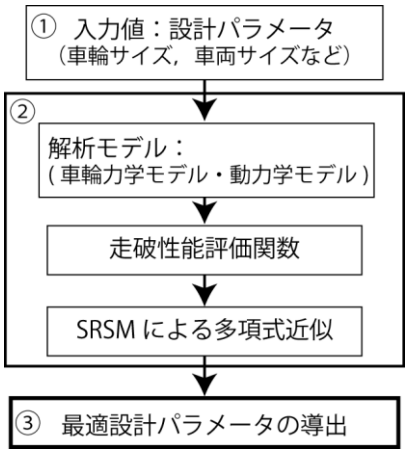

図 3：最適設計フローチャート

③粒子画像流速計測法による砂の流れ計測

粒子画像流速計測法（Particle Image Velocimetry, PIV）を用いることによって，車輪が転動する際の車輪下部の砂の流れを計測し，砂のせん断変形領域や排土領域を捉え，本研究において目指す車輪力学のモデル化に応用する．図 1 に示すように，試験装置側面部に設置した高速度カメラは車輪の並進・垂直の動きと同期するため，車輪に対する砂の相対的な流れを計測することが可能となっている．

(2) 走行システムの最適設計手法

①車輪の最適化設計手法

本研究において提案する最適設計手法のフローチャートを図 3 に示す．まず，走行システムの設計パラメータ群について，不確定性を含むパラメータとして定義する．次に車輪力学モデルおよびロボットの動力学モデルを解析モデルとして定義し SRSM と呼ばれる手法に基づいて，ロボットの走破性能評価関数を多項式近似する．さらに，得られた多項式を用いて設計パラメータの最適解を計算する．以上のアプローチによって，複雑な最適化計算アルゴリズムを経ることなく，高速かつ解析的に設計パラメータ群の最適値を求めることが可能となる．

②移動ロボットの走破性能の実験的評価と設計評価関数の導出

障害物乗り越えや斜面走行の際のロボットの姿勢安定性と車両パラメータとの力学的な関係性を明らかにするために，移動ロボットのサスペンション長さ，重心位置と走破性能の関係性を実験的かつ解析的に明らかにする．

実験では，研究代表者が有するロボットテストベッドのサイズを基準として，各車両パラメータを変化させた際のロボットの挙動を解析した．

４．研究成果

(1) 不整地走行における包括的車輪力学モデルの構築および実験によるモデルの検証

本研究課題においては，①の車輪走行試験装置により，砂地上を走行する車輪の 3 軸の力・モーメント，車輪モータが発生するトルクといった従来の装置においても計測可能な諸物理量に加え，本試験装置では，磁気エンコーダ，レーザ変位計を導入することによって，高精度かつ高分解能な車輪の運動計測を達成した．これに加え，②において開発した車輪実装型センサシステムは，センサ取り込み装置，電源，通信機器を全て車輪内部に搭載した自立センサシステムであり，多様な走行条件下において車輪の圧力分布および接触状態を精密に計測することが可能となった（図 4）．さらに，③の PIV を用いることによって，車輪前方部，下部，後方部における砂の流れを解明することができた（図 5）

本研究の開発項目(1)-①②③により，従来の実験系では不明であった車輪の力学現象に対して，極めて精密な現象理解に迫ることが可能となるとともに，多様な条件下での実験データから，従来の車輪圧力分布モデルの改善点ならびに修正モデルを提示した（図 6）．

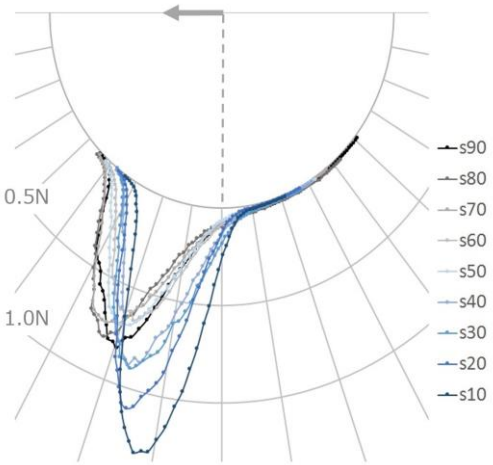

図 4：車輪実装型センサシステム
圧力分布計測実験結果
（車輪の滑りの違いにより分布範囲が異なる）

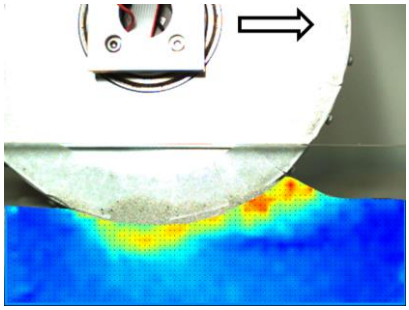

図 5：PIV による砂の流れ場計測
（赤色：砂の移動が顕著，青色：砂が静止状態）

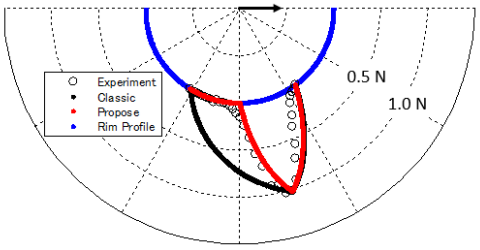

図 6：車輪圧力分布の修正モデル
（丸プロット：実験結果，黒線：従来モデル，
赤線：提案モデル，）

また，車輪の力学特性を高精度で計測できる試験装置およびセンサシステム，砂の流れを可視化する PIV といったアプローチを統合した車輪走行試験装置は，本研究課題の主要な成果である．同装置は，国内の大学・研究機関にも参考・利用されており，当該学術分野への一定の寄与が認められると考える．

以上の成果は，国内・国際学会において発表するとともに，雑誌論文への投稿も実施した．さらに，ロボティクス系の国際学会ワークショップにおいて招待講演をおこない，シミュレータ開発の際のキーファクタとして，従来モデルの問題点，将来の力学モデル構築における要点について，本研究の成果に基づいて報告した．

(2)　走行システムの最適設計手法

①の車輪の最適化設計手法について，SRSM と呼ばれる近似計算アプローチと車輪力学モデルを融合させ，車輪の最適設計問題を高速かつ解析的に解き明かす手法を構築した．図 3 の設計フローチャートに基づき，最適化設計ソフトウェアを構築した．砂地走行における車輪の性能として，走行効率，旋回効率，車輪沈下量といった走行性能指標（Mobility Index）を導入し，それらの組み合わせから最適な車輪形状の数値を導出することが可能となった（図 7）．この成果は国内学会にて報告し，一定の評価を得た（オーディエンス表彰）．

②においては，研究代表者が有するロボットテストベッドを改修し，砂地走行において車輪直径と同じ高さの障害物を乗り越える際のロボットの姿勢安定性と車両パラメータとの力学的な関係性を実験的に明らかにした

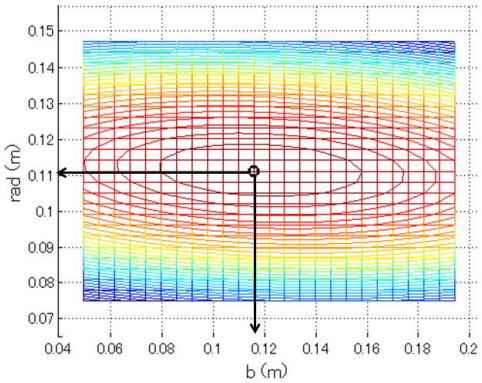

図 7：車輪最適設計結果（最適な車輪半径，幅が
等高線プロット上に示される）

図 8：障害物乗り越え実験の一例

（図 8）．実験では，障害物の迎え角を変化かせ，乗り越え時のロボットの姿勢変動をモーションキャプチャカメラによって計測し，車両パラメータ（ホイールベース，重心高さ）と姿勢変動の関係性を実証した．さらに，斜面走行時のサスペンション機構の開発にも取り組み，これら不整地走行性能と設計パラメータ（リンク長，車輪サイズ，重心位置）との関係性を明確化し，最適設計に至る評価関数を定式化した．

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）

① Mori, D,. Ishigami, G., "Excavation Model of Soil Sampling Device based on Particle Image Velocimetry," Journal of Terramechanics, (Accepted), doi:10.1016/j.jterra.2015.02.001（査読あり）

② 石上玄也，"粒子画像計測法を用いた機械と土壌の相互力学現象の解明," 日本機械学会誌トピックス Vol. 117 (1147) p. 45, 2014.（査読なし）

〔学会発表〕（計 20 件）

① 白井孝幸，椿洋輝，石上玄也, “不整地走行に伴う砂粒子の力学的影響を解析する車輪実装型センサシステムの開発”，第 20 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 2014 年 12 月 12 日，加計学園創立 50 周年記念館，岡山県岡山市

② 森大輝, 石上玄也, “PIV 解析に基づいた土壌掘削メカニズムの解明と力学モデルの構築”，第 14 回建設ロボットシンポジウム, , 2014 年 8 月 28 日，中央大学後楽園キャンパス，東京都文京区

③ T. Shirai, G. Ishigami, "Accurate Estimation of Wheel Pressure-Sinkage Traits on Sandy Terrain using In-wheel Sensor System," Proc. of the 12th Int. Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2014), 8a-2, 2014 年 6 月 19 日, McGill University, Montreal, Canada

④ D. Mori, G. Ishigami, "Soil Interaction Model of Hemispherical Sampling Device based on PIV Analysis," Proc. of the 12th Int. Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2014), 9a-2, 2014 年 6 月 19 日, McGill University, Montreal, Canada

⑤ T. Kobayashi, G. Ishigami, S. Ozaki, M. Sutoh, "Current Status and Prospects of Terramechanics-based Simulation Techniques for Planetary Rover Locomotion," Proc. of the 12th Int. Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS 2014), 11b-3, 2014 年 6 月 19 日, McGill University, Montreal, Canada

⑥ G. Ishigami "Rough Terrain Mobility: key issues and approaches for dynamics simulation of rough terrain mobile robot" Proc. of the 2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Workshop/Tutorial), Invited Talk at Workshop on Modelling, Estimation, Perception and Control of All Terrain Mobile Robots, 2014 年 6 月 1 日, Hong Kong Convention and Exhibition Centre, China.

⑦ 石上玄也, “不確定性解析を応用した砂地走行に最適な車輪パラメータの導出手法”，日本機械学会 第 13 回運動と振動の制御シンポジウム, A28, 2013 年 8 月 29 日，九州産業大学，福岡県福岡市

⑧ 石上玄也, “不確定性環境における移動ロボットの確率的アプローチに基づいた挙動解析手法”，第 18 回計算工学講演会，D-7-2, 2013 年 6 月 20 日，東京大学生産技術研究所，東京都目黒区

⑨ 村上遼，石上玄也，久保田孝，岡宏一, “不整地走行における車輪型ローバの車両パラメータと姿勢変化に関する実験的考察”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2A1-R13, 2013 年 5 月 24 日，つくば国際会議場，茨城県つくば市

〔図書〕（計２件）

① Nagatani, K., Ishigami, G., Okada, Y., "Chapter 50: Modelling and Control of Robots on Rough Terrain," Siciliano, B., Khatib, O., (Eds.)"The Second Edition of the Springer Handbook of Robotics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg (印刷中).

② Yoshida, K.,Nenchev, D., Ishigami, G., Tsumaki, Y., "Chapter 16: Space Robotics," pp. 541-573, Macdonald, M., and Badescu, V., (Eds.) "The International Handbook of Space Technology," Num. of Page 731, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014.

〔その他〕

報道関連情報：

① 研究キャリア応援マガジン[インキュビー] 2014. 春号 vol.25，2014 年 3 月 1 日
② テクニカルショウヨコハマ 2014　産学連携ワークショップ「ロボティクス研究開発と実社会へのスピンオフ」，2014 年 2 月 7 日
③ 週刊 ロビ「火星で活躍することを夢見て開発が続く「Cuatro」」

アウトリーチ活動：

① 青少年のためのロボフェスタ 2014, 神奈川県（青少年のためのロボフェスタ運営委員会)　　神奈川県立神奈川総合産業高等学校，2014 年 11 月 23 日～24 日
② 第 15 回火星ローバーコンテスト in 千葉 審査員　2013 年 12 月 14 日
③ JAXA 宇宙教育センター連携プログラム「宇宙ロボットの研究開発　～ローバのプログラミングと走行実験を通して～」三重県伊賀市立阿山中学校, 2012 年 10 月 29 日～30 日

ホームページ等

http://www.srg.mech.keio.ac.jp

６．研究組織

(1)研究代表者

石上　玄也（ISHIGAMI Genya）
慶應義塾大学・理工学部・機械工学科・講師
研究者番号：90581455