

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01397

研究課題名（和文）多角的な接触力学情報を統合したフィールドロボット動力学シミュレータの創出

研究課題名（英文）Hardware-in-the-loop simulator for field robot dynamics with multiple machine-terrain interaction mechanics

研究代表者

石上 玄也（ISHIGAMI, Genya）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90581455

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ロボットと不整地環境との接触情報を実機にて模擬するハードウェア・イン・ザ・ループ・シミュレータ（HILS）について、特に、車輪型移動ロボットならびに排土作業ブレードを対象としたHILSを構築するとともに、基盤となる接触力学モデルの洗練化を達成した。HILSの実証実験によりその有用性を確認するとともに、シミュレータモデルの減衰係数がHILSの高忠実度に大きく寄与することが、車輪走行・排土作業という異なる2つの実験対象から明確となった。本研究によって、不整地移動ロボティクス含め同様の接触問題をHILSによって解明する際の知見を得ることが出来たと考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：本研究のHILSでは接触時間が継続し、かつ対象物体が粘弾性・塑性変形する不整地を取り扱っている。このような現象に対してHILSを適用した事例は見当たらない。また、HILSを安定かつ高忠実度を実現するための要点を明らかにしており、これらは先駆的な研究成果であるといえる。

社会的意義：不整地移動車輪、排土作業ブレードという異なる接触現象においても本研究において開発したHILSの有用性を明らかにしており、砂地上における類似の接触問題に対しても適用可能であることを示唆しており、例えば、建設車両、軟弱地盤移動体をはじめとしたフィールドロボットシミュレータへの援用が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research has developed a hardware-in-the-loop simulator (HILS) for field robots involved in mechanical interaction with sandy terrain. The study mainly focuses on the two different interaction mechanics on sandy terrain: robotic wheel and bulldozing blade. The research found that the HILS for such rough terrain mechanics becomes stable and possesses high-fidelity by using appropriate damping coefficient in simulation models used in the HILS. The contributions of this research are as follows: 1) development of the HILS for the rough terrain robotics, 2) verification of the HILS for different types of mechanical interaction, and 3) clarification of the key parameter for the stable and high-fidelity HILS.

研究分野：フィールドロボティクス，テラメカニクス

キーワード：ハードウェアインザループシミュレータ ロボティクス 動力学 ハイブリッドシミュレータ テラメカニクス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

建設施工、災害対応、インフラ点検、あるいは宇宙探査などで作業する不整地走行フィールドロボットの設計開発ならびに運用において、動力学シミュレータはこれらロボットの動的な挙動を仮想空間内において再現・解析できる有用な CAE ツールとなっている。

本研究では、このような動力学シミュレータの高精度化に関して、その主な学術的課題となっている「外環境との接触力学」に注目した。フィールドロボットを対象とした場合、外環境は粘弾性あるいは塑性変形をする不整地（土砂、泥濘など）であり、複雑な接触現象が伴う。機械と不整地との接触現象については、様々な力学モデルがこれまで提案されているが、モデルの適用範囲の制約、パラメータの入念な調整といった課題は解決されていない。すなわち、これらの接触問題が、フィールドロボットの動力学シミュレータを高精度化するうえでの最たる課題であると言える。このような課題解決のアプローチとして、従来ハードウェア・イン・ザ・ループ・シミュレータ (Hardware-In-the-Loop Simulator, 以下, HILS) が用いられてきた。過去の HILS の事例では、ロボットと対象物体との接触問題が「点接触」「短時間」「非塑性変形」として扱っており、上述のような不整地走行ロボット、すなわち「面接触」「長時間」「塑性変形」といった問題への HILS 適用例が見当たらなかった。フィールドロボット用の HILS が達成できれば、高精度・高忠実度なシミュレータが実現可能となるとともに、接触問題の現象理解やモデル化においても学術的価値の高い成果が創出できると考えた。

2. 研究の目的

上記のような背景から、本研究は、フィールドロボット用ハードウェア・イン・ザ・ループ・シミュレータを開発し、フィールドロボットの動力学シミュレータの高精度化・高忠実度化を目指したものである。本研究において開発する HILS の特筆すべき点は、ロボットと不整地（主に砂）との接触情報を実機にて継続的に計測しながら動力学シミュレーションを実行する点にある。研究代表者のこれまでの成果であるセンサ実装型車輪、砂の流れ解析、車輪実験装置などを活用・援用することによって、本研究課題を円滑に推進し、高精度・高忠実度な HILS を実現することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究において開発した HILS の構成図を図 1 に示す。同システムは、これまで研究代表者のグループが構築した実験装置を改修したものである。HILS では、まず、実験環境（ハードウェア）において、任意のタイムステップにおける接触力学情報を計測する。同情報をもとにソフトウェア側において対象問題の動力学モデルに基づいた運動方程式を解くことにより、次時刻のハードウェアの並進速度情報を計算する。この速度情報をもとにハードウェアが動作し、次時刻での接触力学情報を取得する。このプロセスをリアルタイムで繰り返すことによって、ハードウェアとソフトウェアが同一ループ状に組み込まれたシステムとなる。

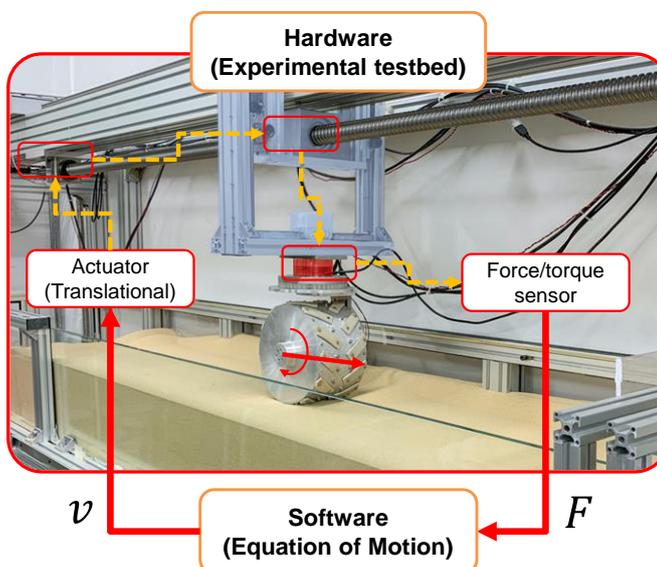


図 1：不整地用 HILS

本アプローチの基本的概念は従来型 HILS と相違ないが、前述のとおり、面接触・長時間・塑性変形を伴う現象となるため、ソフトウェア側でのパラメータチューニング、ハードウェア側での現象理解が重要課題となっている。よって、本研究課題の HILS 構築に際しては、車輪力学現象の理解、シミュレータ構築といった点にも取り組んだ。また、HILS 開発においては、車輪走行および排土作業を対象とした検証をおこなった。

4. 研究成果

(1)車輪力学現象の理解：これまで研究代表者のグループにおいて開発していたセンサ搭載型車輪をベースとした実験をおこなうとともに、粒子画像流速測定法を用いて砂地走行車輪側方における砂の流れを精緻に捉え、せん断流れに関する現象理解と定式化を行った (図 2)。また、

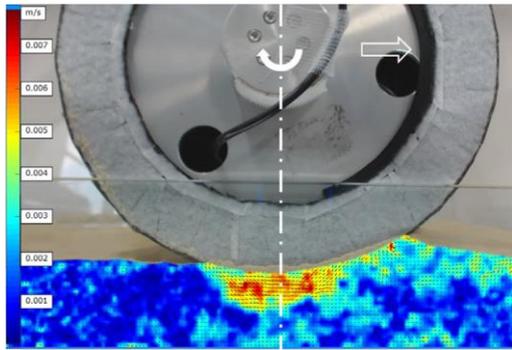


図 2：車輪下部のせん断流れ



図 3：カメラ内蔵車輪による車輪直下の砂の流れ撮像

車輪内部にカメラと搭載したインホイールカメラ車輪を開発し、横滑り状態における車輪直下の砂の動きを捉えるという先駆的な成果を創出した(図 3)。これら実験検証から、砂地走行におけるせん断帯形成過程や砂地と車輪との境界におけるせん断速度のスリップ依存性が明らかとなり、特にこれら知見は HILS 開発の際の減衰係数設定の力学的な根拠として援用することができた。

(2)シミュレータ環境の構築と海外連携：研究代表者グループにおいて開発していた動力学シミュレータに加え、商用ソフトウェアを用いて、代表的なフィールドロボットの対象事例として、車輪型移動体、着陸システムのシミュレーション環境を構築し、多数の解析を実施した(図 4)。さらに、同ソフトウェアを開発している海外企業の技術者ならびに接触モデルを構築した海外大学の教授の両名に、研究代表者の所属機関に来訪して頂き、技術交流セミナー(参加者 20 名弱)を実施するとともに、本研究の発展を見越し海外大学との連携を視野に入れた議論をおこなった。加えて、HILS 実験装置では多様な接触物体(例：不整地地面の砂の種類を変更するなど)を容易に扱えないといった将来的な問題を解決すべく、仮想的な実験方法として個別要素法に基づく解析ソフトウェアを導入した(図 5)。

(3)HILS の開発と検証(車輪)：HILS 開発においては、上述 3(1)の知見をもとに、時間同期問題やシステムの安定化問題について解決を試みた。システムの減衰係数を変えた場合(図 6a)、様々なけん引負荷を車輪に与えた場合(図 6b)、砂地上に埋没した車輪の走行(図 6c)などを検証事例とし、概ね実現象に忠実な結果が得られた。本成果の特筆すべき点として、接触現象が連続的に発生しつつ接触対象が変形する「車輪と砂」という接触力学現象に対しても、HILS を実現しその有効性の示している点である。加えて、車輪走行の加減速状態や定常走行状態に応じてシステムの減衰係数を可変とすることによって、HILS の忠実度が向上するという点も見出した。

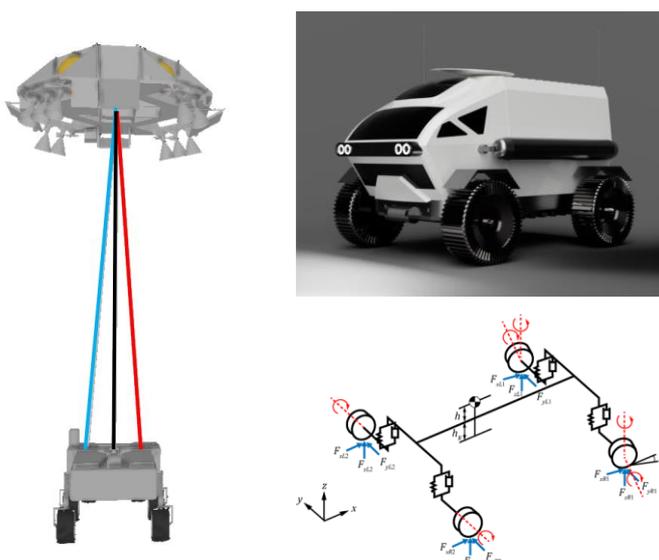


図 4：(左) スカイクレーンのシミュレーションモデル (右) 車輪型移動車両のシミュレーションモデル

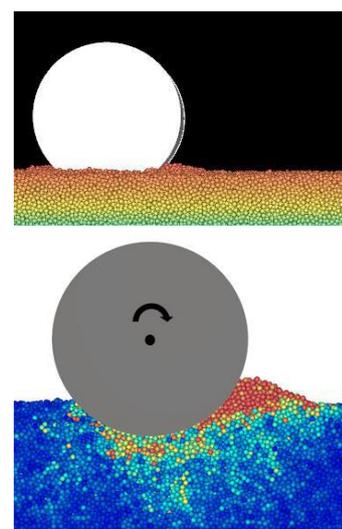


図 5：個別要素法解析事例

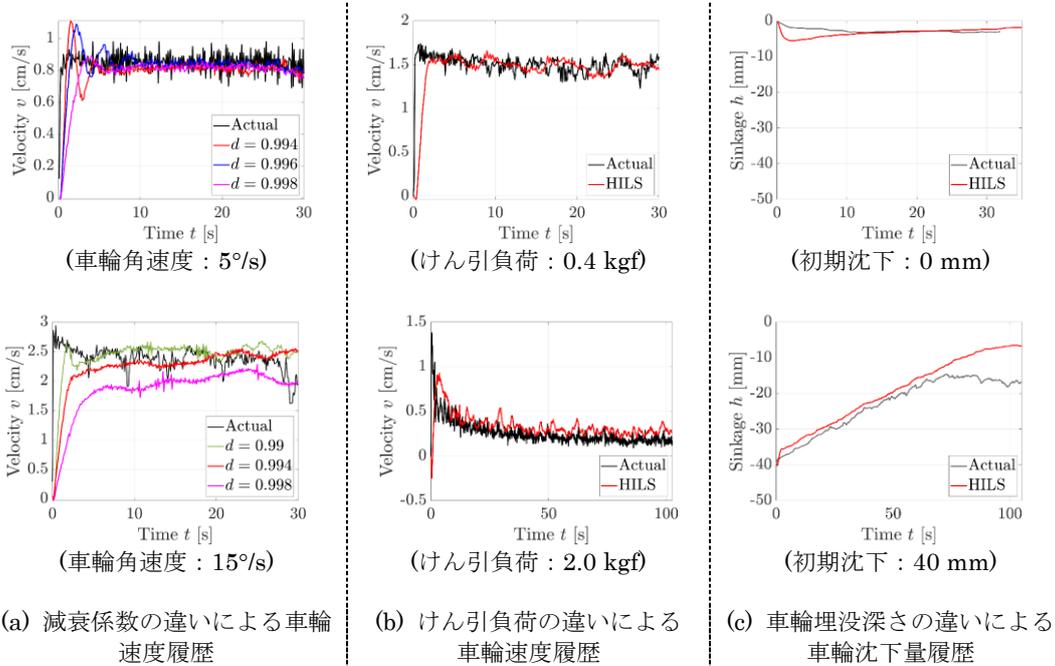


図 6：車輪 HILS の検証結果

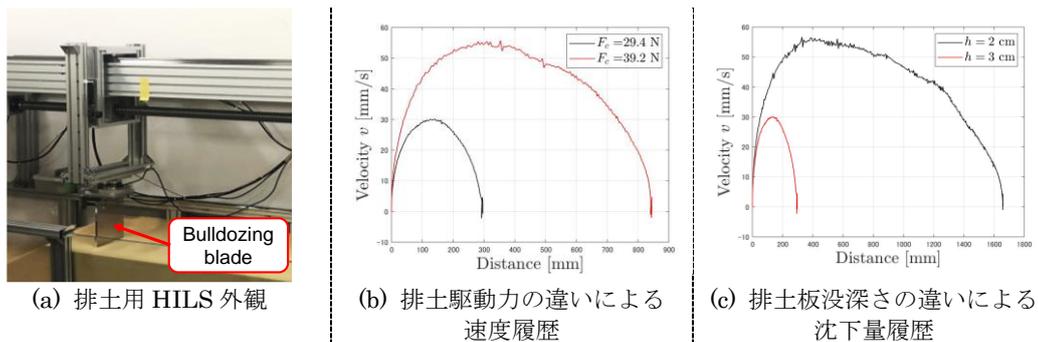


図 7：排土作業 HILS の検証結果

(4)HILS の検証 (排土)：上記 3(3)において得られた HILS の知見を援用し、対象システムを建設車両 (排土作業) としての HILS の検証をおこなった。車輪実験装置において車輪部分を排土板に換装 (図 7a) し、建設車両を模擬したシステムへの駆動力 (図 7b)、砂への排土板の貫入量 (図 7c) などを変化させ実験を実施した。結果として、駆動力に応じて排土距離が延びるとともに、排土板貫入量に応じて抵抗が増加し排土距離が短くなるものが HILS によって再現され、車輪以外の対象問題においても、本研究において開発した HILS の有用性が確認できた。

(5)まとめと今後の展望：本研究課題全体として、当初よりエキストラサクセスと位置付けていた移動ロボットを用いた走行実験と HILS との比較は、ロックダウンなどによりスケジュールを再調整しており、2021 年度以降の実施となっている。また HILS を介した力学モデルのパラメータに関するオンラインチューニングという発展研究にも着手している。HILS 関連では国際学会での発表に加え、HILS の根幹をなす力学モデルに関する原著論文、シミュレータに関する学会発表などの成果がある。機械と土質の接触力学現象に対して HILS を適用するといった本研究のコンセプトについて、車輪ならびに排土板という対象問題においても実証され、またシミュレータの減衰係数が HILS の高忠実度に大きく寄与することも明確となり、今後、同様の問題を HILS によって解明する際の大きな知見を得ることが出来たと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Horiko Shota, Ishigami Genya	4. 巻 91
2. 論文標題 Experimental study on wheel-soil interaction mechanics using in-wheel sensor and particle image velocimetry part II. Analysis and modeling of shear stress of lightweight wheeled vehicle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Terramechanics	6. 最初と最後の頁 243 ~ 256
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsumura Ryota, Ishigami Genya	4. 巻 93
2. 論文標題 Visualization and analysis of wheel camber angle effect for slope traversability using an in-wheel camera	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Terramechanics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 石上玄也
2. 発表標題 多角的なアプローチによるテラメカニクス研究とフィールドロボットへの活用
3. 学会等名 第 5 回 オーガナイズド・テラメカニクス・ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Genya Ishigami
2. 発表標題 Towards an Accurate Analysis of Landing and Roving Technologies for Planetary Exploration
3. 学会等名 Workshop on Planetary exploration robots: Challenges and opportunities, 2020 IEEE/RSJ International Conference on Robots and Systems (IROS2020)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryota Matsumura, Genya Ishigami
2. 発表標題 Experimental Analysis of Camber Angle Effect on Slope Traversability of Wheeled Mobile Robot
3. 学会等名 Proceedings of the Joint 10th Asia-Pacific Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kotaro Hirota, Genya Ishigami
2. 発表標題 Dynamic Simulation of Sky Crane Landing System for Mars Exploration Rover
3. 学会等名 Proceedings of the 32nd International Symposium on Space Technology and Science (ISTS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naho Yashiro, Genya Ishigami
2. 発表標題 Simulation Analysis on Steering Characteristics for Vehicle Design of Manned Pressurized Lunar Rover
3. 学会等名 Proceedings of the 20th ISTVS International and 9th Americas Regional Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sora Ishikawa, Genya Ishigami
2. 発表標題 Towards High-fidelity Analysis on Wheeled Mobile Robot on Soft Terrain using Hardware-in-the-loop Simulator
3. 学会等名 Proceedings of the 20th ISTVS International and 9th Americas Regional Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野城菜帆, 石上玄也
2. 発表標題 月面有人と圧ローバの旋回特性解析に基づいた操縦安定性向上のための車両設計指針の提案
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------