

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：23604

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14105

研究課題名（和文）車輪の沈下を有効に利用したロボット群の協調による不整地軟弱走行の実現

研究課題名（英文）Development of Multiple Robots using Deep Sinkage of the Rover Wheel for Traveling Loose Surface

研究代表者

藤原 大佑 (Daisuke, Fujiwara)

国立諏訪東京理科大学・工学部・助教

研究者番号：90868184

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,600,000円

研究成果の概要（和文）：月・惑星探査において、複数台の小型の車輪ロボットによる探査が計画されている。しかし、車輪型ロボット単体では惑星表面の軟弱地盤ですべりと沈下により走行悪化に陥る。複数のロボットによる探査はお互いの協力により、走行悪化の改善が可能となる。本研究では、軟弱地盤上において積極的な車輪沈下・支持を利用した移動をロボット同士の結合伸縮移動による協力で実現した。提案する結合伸縮移動は台数の増加に伴い、軟弱地盤上で滑りを抑制できるという可能性を示唆した。さらに、結合部の設計を見直すことで方向転換についても実現をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

機能が制約された小型ローバによる月・惑星表面上の軟弱地盤走行においては、お互いが助け合いながら移動することが求められる。しかし、これまで不整地軟弱地盤上において移動体同士が協力しながら走破性を向上する方法は明らかでなかった。本研究では小型ローバによる結合伸縮移動を起案し、その移動が実現可能なメカニズムを提案した。さらに、走行実験より提案手法は走破性を向上できる可能性を示唆できた。以上、本成果は不整地軟弱地盤上におけるロボット同士の協力による走破性改善例の一例として貢献したといえる。

研究成果の概要（英文）：To reduce payload cost, some organizations have plans to an exploration using multiple small and wheel-typed rovers. However, a wheel-typed rover is easy to become stuck on the loose surface of the lunar/planet's surface. The multiple rovers can collaborate with each other. However, its method has remained unclear, especially on the loose surface. This study proposes a collaborative method, in which multiple rovers use its supporting forces and inching locomotion. From the experimental results, this method could improve climbing ability. Furthermore, this study developed the connection mechanism with rotational function, and this mechanism realized rotational inching. This enables the rover to move in a diagonal direction with low slip.

研究分野：ロボティクス・メカトロニクス

キーワード：軟弱地盤走行 複数台の移動ロボット 車輪沈下を利用した移動 月惑星探査ロボット 伸縮移動ロボット テラメカニクス 群ロボット

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

惑星探査ではロボット単体による狭い「点」での探査に代わりシンプルな群ロボット集団による「面」でのより広域で効率的な探査が着目されている。群ロボットに関する研究は古くから行われ、多くの研究例があるが、宇宙探査においてロボット単体の構造としては制御と構造の簡素さから車輪型が想定されている。車輪型を搭載した群ロボットに関してはこれまでに **Ep-Face Connector** や **CKBots** などがある。一方で惑星表面の軟弱地盤を車輪型で走行するのは難しくロボット単体では車輪のすべりと沈下により走行悪化に陥り立往生してしまう。車輪型ロボット単体の登坂性能の限界は **17-20 度**といわれている。そのため、群ロボットでは単体では走破できないところをロボット同士の協力により走行悪化を回避しながら移動することが求められる。しかし、車輪型ロボットの不整地軟弱地盤走行の難しさから、車輪を搭載した群ロボットの具体的な軟弱地盤上での走行事例はいまだなく、その走行性能は把握されていないのが現状であった。

そこで、本研究では、車輪型ロボットの中でも特に滑りを抑制しながら移動を行うことが可能な尺取り虫型の移動に着目した。この移動は、構成要素（車輪同士）の協力による移動である。本研究では、この手法を車輪同士の協力という枠組みから車輪沈下を利用したロボット同士の協力という枠組みへと捉えなおし、軟弱地盤における群ロボット同士の協力方法に応用できないかと考えた。

2. 研究の目的

本研究では、これまで走行性能が高いと把握してきた車輪沈下・支持を利用した移動を群ロボット同士の協力的な移動に適用し、群ロボットの協力的な不整地軟弱地盤走行の実現を目指した。具体的には、ロボット群において任意のロボットを地盤に対して支持させ、特に支持が必要な場合には支持ロボットの車輪を地盤に対して深く沈下させる。その後支持ロボットの支持を利用しながら移動ロボットを尺取虫のように伸縮動作によって移動させる移動や転回移動を実現する。これにより、軟弱地盤上において車輪を搭載した群ロボットによる柔軟で自由な移動が可能となり、本手法が群ロボットの不整地軟弱地盤上での走行事例の一つになることを期待した。

3. 研究の方法

(1) 結合と伸縮移動が可能なテストベッドの設計

基本となるローバは群ロボットの単体としてよく想定されるスタビライザを搭載した 2 輪の小型ローバとする。小型ローバのスタビライザをリニアアクチュエータで構成することで伸縮可能な構造とし、さらにスタビライザの先端が他のローバと結合することで提案する協力した移動を可能とする仕様とする。ローバのサイズは、最近の月面探査で用いられる小型ローバを参考にし、L:150×W:150×H:100 mm, 質量 500 g 程度を目指す。まずは、垂直登坂移動に限定して開発を行う。

(2) 平面地盤における動作テスト及び斜面登坂実験

設計したテストベッドを用いて、まずは平面軟弱地盤上において複数台の移動ロボットが結合し伸縮移動が可能か確認する。また、同時に分離も可能か検討する。さらに、車輪支持力は台数の増加に応じて増加すると想定し、移動台数とスリップ率との関係を走行実験より把握する。

(3) 横断性能の検証

(2) までは垂直登坂の検証であったが、探査ミッションでは斜面を横に移動する横断性能も求められる。そこで、垂直登坂と同様の試験を横断斜面でも実施し、台数と横滑りの関係を把握する。

(4) 転回移動機構の追加

さらなる柔軟な移動を実現するために、転回機能を追加する。具体的には、スタビライザとして搭載されたリニアアクチュエータ部に回転方向への自由度を与え、リニア部の回転とアクチ

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】

ユエータの伸縮が同時にできる仕様とする．これにより，滑りを抑えながらダイレクトな斜め方向への方向変更を複数台が結合しながらでも可能な仕様とする．

4. 研究成果

(1) 結合と伸縮移動が可能なテストベッドの設計

図1 (a) (b) に示すように，2 輪型ローバのスタビライザに伸縮ユニットを搭載し，さらにその先端に磁石を搭載した形とした．サイズは，L : 210×W : 220×H : 110 mm とし，質量は約 490 g となった．図1 (c) のようにスタビライザとローバ先頭部が接続可能である．そして，図1 (c) に示すように，伸縮移動は1 台ずつ行い，スタビライザの伸縮と移動する機体の車輪回転を同時に行うようにした．移動している機体以外はその移動機体を支持するため，その支持力は台数が増加とともに増加可能であり，滑りの抑制が期待される．

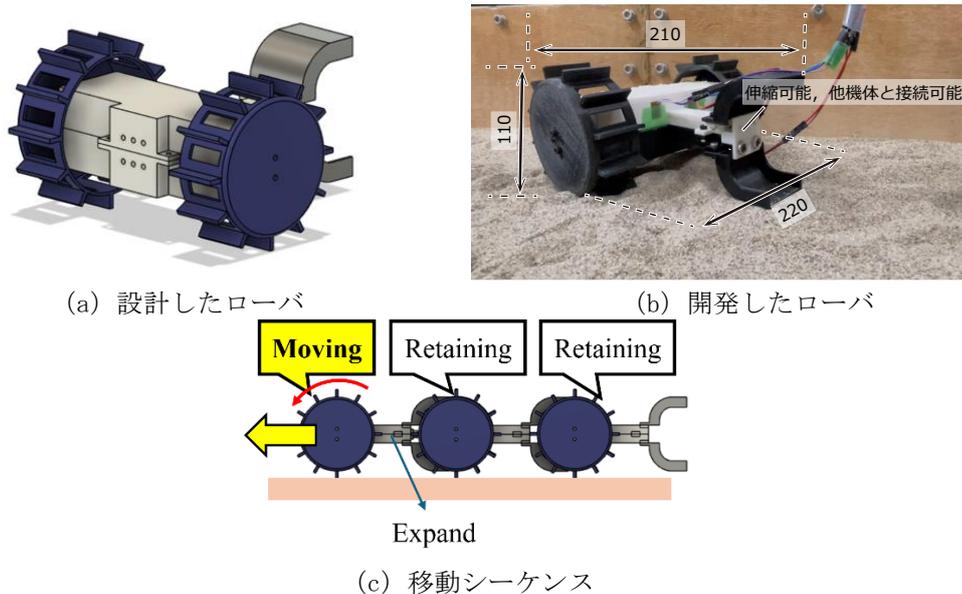


図1 開発したテストベッド

(2) 平面地盤における動作テスト及び斜面登坂実験

平面にて移動ロボットが結合して伸縮移動可能な試験土壌（珪砂5号）上で確認を行った．また，分離動作についても可能な確認し，動作が可能であると把握した．

その後，斜面上で走行試験を行った．また，走行試験と並行して簡易的に通常走行時の駆動力や伸縮移動時の車輪支持力と斜面上でのローバのけん引負荷の関係の考慮を行った．考慮の結果，通常走行と比較して，伸縮移動では台数が増加すると支持力が増加する傾向にあることを把握した．走行試験では，移動方法は通常の回転走行と伸縮移動の2種類とし，台数とスリップ率の関係把握した．通常走行では，台数に関わらず，斜度20度を超えると走行が悪化する結果となり，台数が増加しても滑り抑制効果は限定的であった．これは通常走行では台数の増加に伴い移動する個体も増加するためであり，台数が増加しても滑り抑制効果が限定的であったと考える．一方，伸縮移動では，台数の増加に伴い滑り抑制効果が確認できた．図2に斜度25度における実験結果を示す．また，図3は3台で実験しているときの実験の様子を示す． R_p は移動量の減少率を示し，台数の増加に伴い R_p の減少が抑制されていることが把握できる．

以上の結果は，単体もしくは少ない台数では走破が難しい斜面（斜度25度以上の高斜度）であっても，伸縮結合を行い複数台で移動を行うことで，滑りが大きく減少可能であることを示唆しており，これは提案手法の有効性を支持している．また，提案手法では台数は任意に増加可能であるため，さらに多数のローバを利用することで安定が向上することも推察できる．結合状態に関しては，当初沈下等により位置のズレにより，分離等の問題を懸念したが，今回の実験状態では大きな問題とはならなかった．これについては，今後の段差や凹凸のある地盤での試験時に検討をすることとした．

さらに，これに垂直登坂実験では実験の過程で，これまであまり重要視してこなかった伸縮時の駆動条件に関して見直しを行った．具体的には，伸縮速度 v_l と車輪の回転速度 v_w の関係である．この検証の結果， $v_l < v_w$ の関係で伸縮移動を行うと大きく滑りを抑制可能であるという知見も

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

併せて得ることができた。

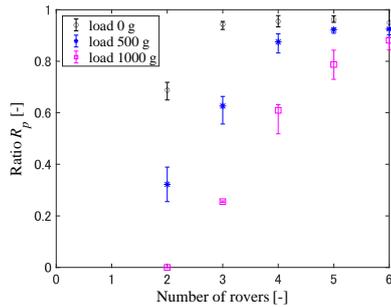


図2 移動量の減少率と台数の関係（斜度 25 度）

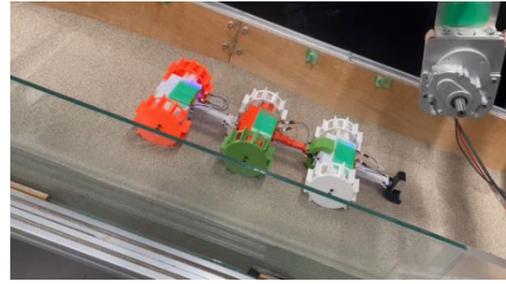


図3 実験の様子

（3）横断性能の検証

垂直登坂に引き続き、横断性能についても検証を行った。台数が増加すると支持力が増えるため、横断時にも滑りの抑制効果が期待されると考え、台数と滑り量の関係の把握を行った。斜度は 30 度とし、斜面を横方向に横断する実験を行った。評価指標としては、斜面下方向への横滑り量とした。図 4, 5 に実験結果を示す。図 4 より、横断試験に関しては想定とは異なり、台数が増加するほど横滑り量が増加する結果となった。これはこの構成で横断走行した場合には、少ない台数で移動した方が良いことを示している。提案手法では、移動ロボットは状況に応じて任意の台数で結合しながら移動することがコンセプトである。したがって、この試験の結果から、直列に接続した構成での横断走行時には、少ない台数で移動する構成の変更が必要であることが示された。

（4）転回移動機構の追加

提案手法では各ロボットは直列に接続する仕様であった。結合した状態でも旋回や転回移動による柔軟な移動を実現するためスタビライザに回転の自由度を与えることで、その実現を狙った。図 6 に改良版の移動ローバを示す。リニアアクチュエータ部が回転可能で、併せて車輪の差動を利用してステアを切ることができる。さらに、結合伸縮時にステアリングと伸縮動作を同時に行うことで、結合時でも方向の変更を可能とした。この設計仕様にて垂直登坂時に、斜度 30 度付近で転回移動を行った結果、斜め方向にダイレクトに移動が可能であると把握できた。また、この移動は滑りを抑制できることも把握した。

さらに、ステアリングを切った移動は横断時に有効であると推察されるため、ステアリング機能を使用した結合伸縮移動による横断試験を改めて実施した。結果を図 7 に示す。結果より、横すべり量はステアリングを切ることで抑制されるものの、台数の効果はないことを再度把握した。

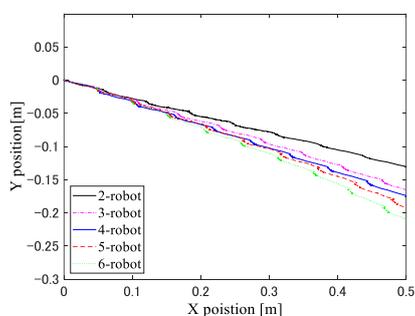


図4 横滑り量と台数の関係（斜度 25 度）

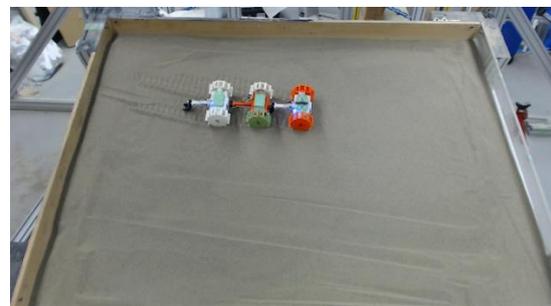


図5 実験の様子

【1 研究目的、研究方法など (つづき)】



図6 旋回機能を追加したテストベッド

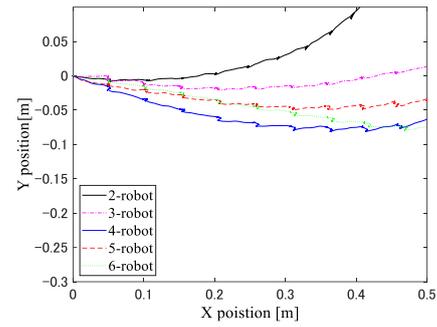


図7 横滑り量の変化 (斜度 30 度)

以上一連の成果より、現状の仕様では垂直登坂時と横断走行時には台数の構成を変更する必要があるが、提案したローバの仕様とその結合伸縮移動は、特に高斜度での垂直登坂を実施する時に滑りを抑えた移動ができる可能性を示した。また、リニアアクチュエータ部に回転の自由動を与えると旋回移動もできる可能性を示唆した。よって、本研究の成果は、不整地軟弱地盤上における小型ローバが協力することで走破性を向上する事例の一つに貢献できたと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 藤原大佑、藤村寛太、飯塚浩二郎
2. 発表標題 伸縮型スタビライザを登載した2輪型ロボットの協働による軟弱地盤登坂に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会(2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 藤村寛大、藤原大佑、飯塚浩二郎
2. 発表標題 結合伸縮機能を用いた車輪型群ローバの協調移動法による軟弱地盤登坂に関する研究
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原大佑, 何青澤, 飯塚浩二郎
2. 発表標題 意図的なスリップ現象を利用した車輪型伸縮移動ローバのスリップ抑制
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会(2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤村寛大、藤原大佑、飯塚浩二郎
2. 発表標題 結合伸縮機能を搭載した群ローバの協調移動法による軟弱登坂性能の検証
3. 学会等名 第44回テラメカニクス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原大佑, 飯塚浩二郎
2. 発表標題 意図的なスリップを利用した伸縮移動ローバの転回移動性能の検証
3. 学会等名 第44回テラメカニクス研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kanta Fujimura, Daisuke Fujiwara, Kojiro Iizuka
2. 発表標題 Proposal of Swarm Rovers' Collaborative Locomotion with Expansion and Contraction Mechanism for Driving a Loose Slope
3. 学会等名 16th European-African Regional Conference of the ISTVS (2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Fujiwara, Qingze, He, Kojiro Iizuka
2. 発表標題 Suppressing the Reduction of the Traveling Displacement on Loose Soil for Rovers with Function of a Wheel-Walking
3. 学会等名 16th European-African Regional Conference of the ISTVS (2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Daisuke Fujiwara, Kojiro Iizuka
2. 発表標題 Study on the Traveling Performance in the Diagonal Direction for the Wheel-Walking Rover
3. 学会等名 2023 International Conference on Control, Robotics Engineering and Technology (CRET 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 藤原大佑, 飯塚浩二郎
2. 発表標題 伸縮型スタビライザを搭載した二輪小型ローバの不整地軟弱地盤における走行性能の実験的検証
3. 学会等名 第23回 公益社団法人 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤村寛大, 飯塚浩二郎, 藤原大佑
2. 発表標題 結合伸縮機能を用いた群ローバの軟弱地盤登坂性能に関する研究
3. 学会等名 第43回テラメカニックス研究会
4. 発表年 2022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
---------	---------