

小型土工ロボットによる 月面着陸拠点構築シナリオ

石上 玄也

(慶應義塾大学 理工学部)



はじめに | これからの月探査と利用について

- **国際宇宙探査協働グループ (ISECG)**

- 各国宇宙機関での月～火星探査シナリオ検討
- Global Exploration Roadmap (GER)



- **海外動向**

- 米国：アルテミス計画
 - 2024年 有人月面探査
 - 2028年 月面拠点建設
 - CLPS (民間による商業月輸送)
- 欧州：ESA主導での構想
- 中国：月南極に拠点構築

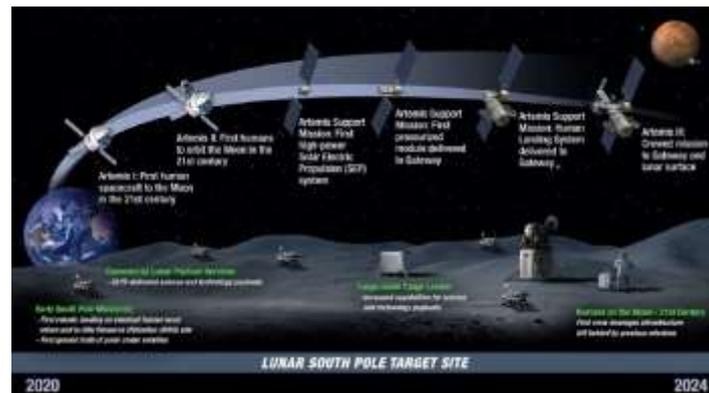


Image courtesy: NASA

- **国内動向**

- 月探査関連：SLIM, LUPEXなど.
- 将来月拠点構想, 有人と圧ローバ
- スターダストプログラム, 宇宙産業ビジョン, など

今後さらに月探査・利用が高まる機運にあり、
月面インフラ構築が必要となる。

はじめに | 月面インフラ構築

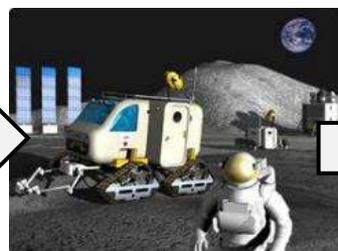
Image courtesy: JAXA



Uncrewed scientific exploration (water ice)



Crewed mission w/ lunar gateway (Precursors)



Crewed mission w/ pressurized rovers



ISRU, industrialization, & commercialization

月面のインフラ構築はフェーズアップの基軸

着陸地点

輸送路

エネルギー

通信

格納・居住

環境制御・生命維持システム

月面インフラ構築シナリオのOpen issue

「いつ・何を・どのような順で、どのように構築するか？」

※アルテミス計画文書, ISECG/GERなどにも“Construction”の文言が明記されていない。

まずは、**月面着陸拠点**が必要ではないだろうか？

なぜ着陸拠点か？

着陸成功率の飛躍的な向上

- 重力天体着陸は多くの失敗事例がある（**成功率は4割**）。
- 斜面や凹凸地形，岩石乗り上げ，航法誘導系，推進系の誤作動，構造系の不具合など



月着陸の高精度化

- センサ・処理・制御課題が**複合的に関連**している。
- 着陸機高機能化→重量増によってペイロード（輸送量）が制限されるのは好ましくない。



高頻度の月面輸送の実現

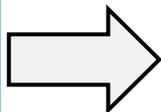
- 月の科学&月を利用した科学，月利用，将来の月面居住構築・有人探査などを**促進**する。
- 月面への大量輸送時代が到来するという時代背景ニーズに即したシナリオとなる。
- 着陸拠点構築を進めることは，**日本のプレゼンス獲得**においても肝要である。

月面着陸拠点構築 | いつ・どのように？

Image courtesy: JAXA



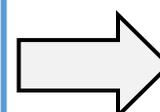
Uncrewed scientific exploration (water ice)



Crewed mission w/ lunar gate (Precursors)



Crewed mission w/ pressurized rovers



ISRU, industrialization, & commercialization

月面特有の制約

輸送コスト

土質の不確定性

低重力

エネルギー

極限環境

小型軽量ロボットによる未踏地域での土工作业

小型軽量ロボット
(cf. 地球 = 数トンの建機)

現地調査戦略の構築
(cf. 地球 = 経験則)

低重力環境での
小型ロボットによる作業

高効率・レジリエント
な土工作业

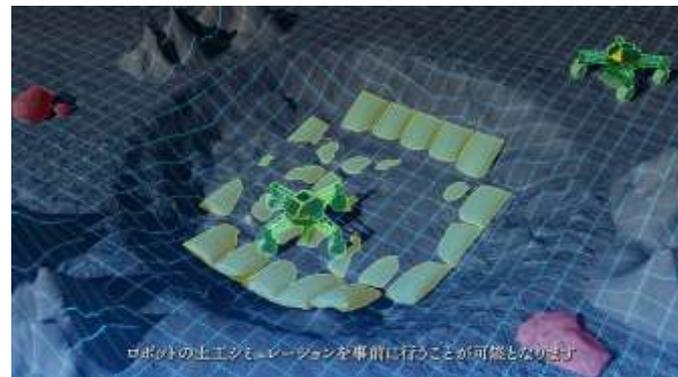
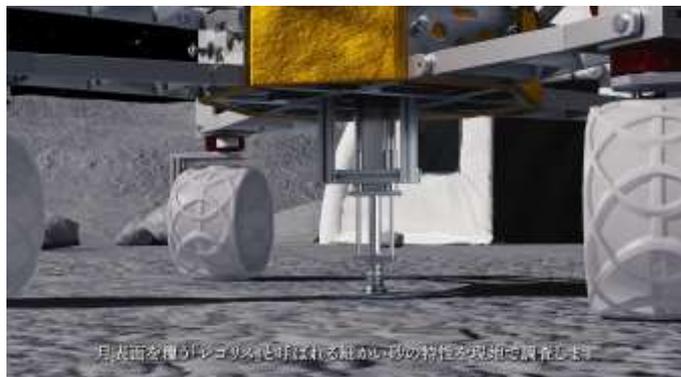
調査

設計

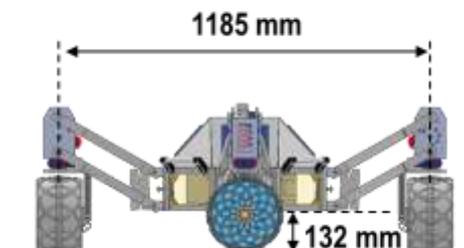
施工



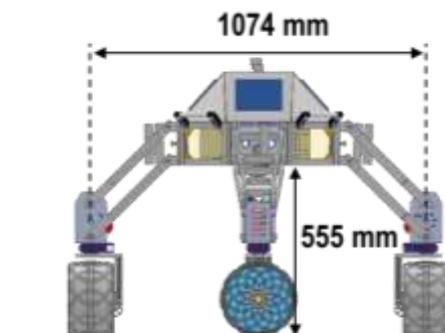
小型土工ロボットによる作業シナリオ



小型土工ロボットプラットフォーム試作機



Lowest Position



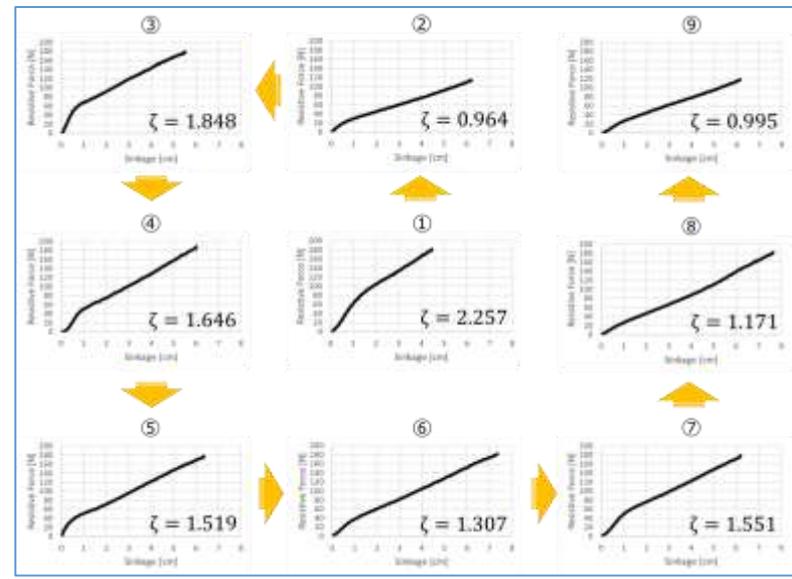
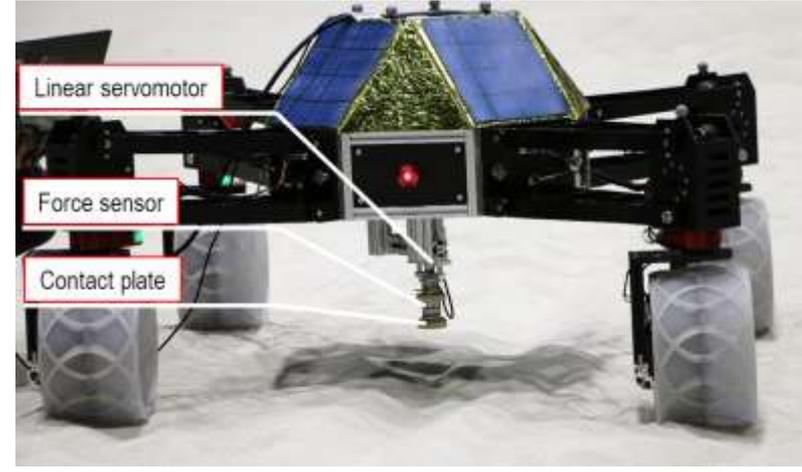
Highest position



- 約50～70 kg, アクティブサスペンション, 計12自由度
- スマートモータの活用により, 計算機は搭載していない.
 - 上位層の制御は, クラウド (オペレータ) 側で実行している.
- 本体中空構造: ツール搭載や輸送スペース
 - 土質調査や土工用のツールとロボットの機械電気結合機構として, **RoTFaM (Robotic Tool Fasten Mechanism)** も開発している.

小型土工ロボットによる作業 | 土質調査

- RFTと呼ばれる力学モデルに基づいて、土質の機械的パラメータ（Scaling Factor）をその場で同定する。
- SFが分かれば同地点での土工作業の見積もりが可能となる。
- 土質の不確定性を調査地点計画に反映させる手法（Informative path planning）も構築中である。



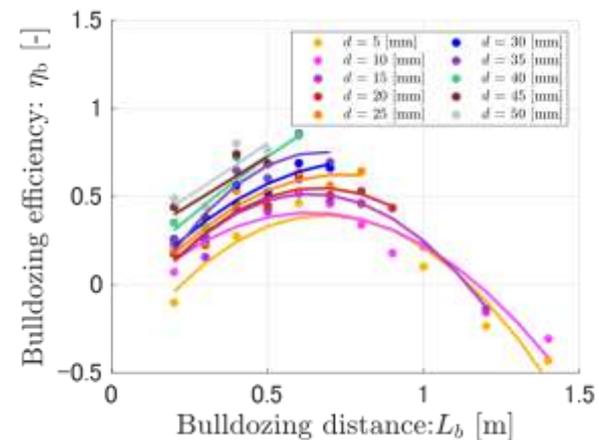
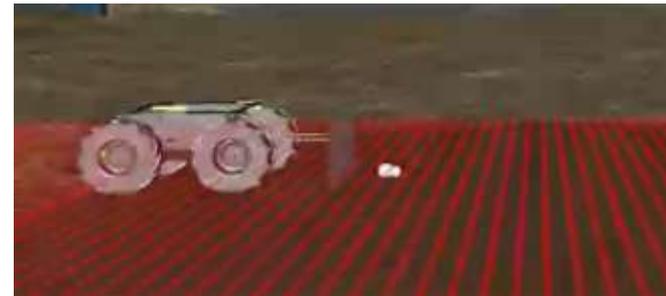
(Morita & Ishigami, ISTVS2022)

小型土工ロボットによる作業 | 小型排土ロボット

約50 kg程度の小型ロボットによる排土作業

→排土抵抗による車両ピッチ角の大きな変動

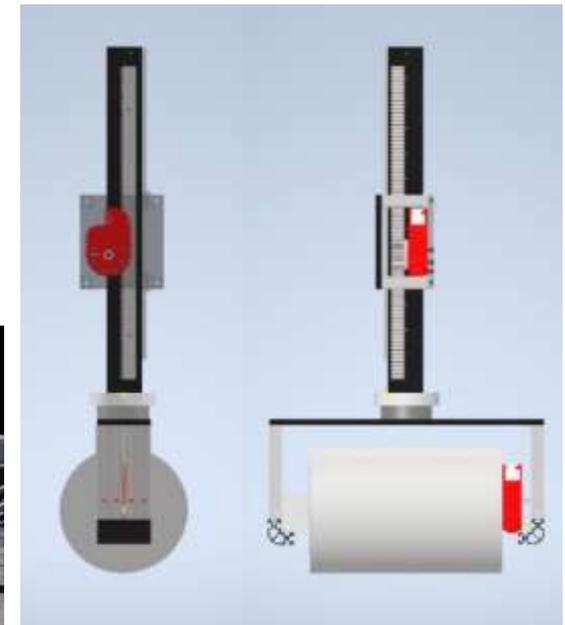
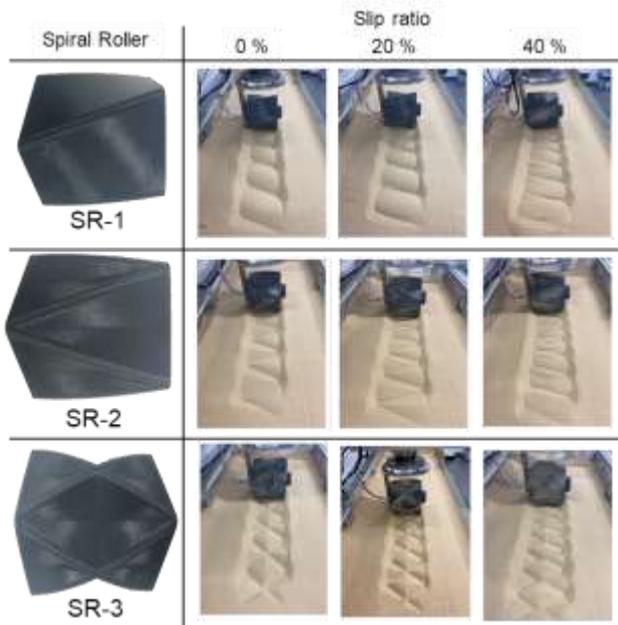
- 変動抑えるためのブレード高さの能動的な制御
- 所望の土工量を得るための排土距離・排土回数の最適化
- Sim2Realなどを用いた機械学習ベースでの制御ポリシーの獲得を検討中



小型土工ロボットによる作業 | 小型転圧ロボット

小型軽量ロボットによる転圧作業 = 十分な転圧荷重が得られない。

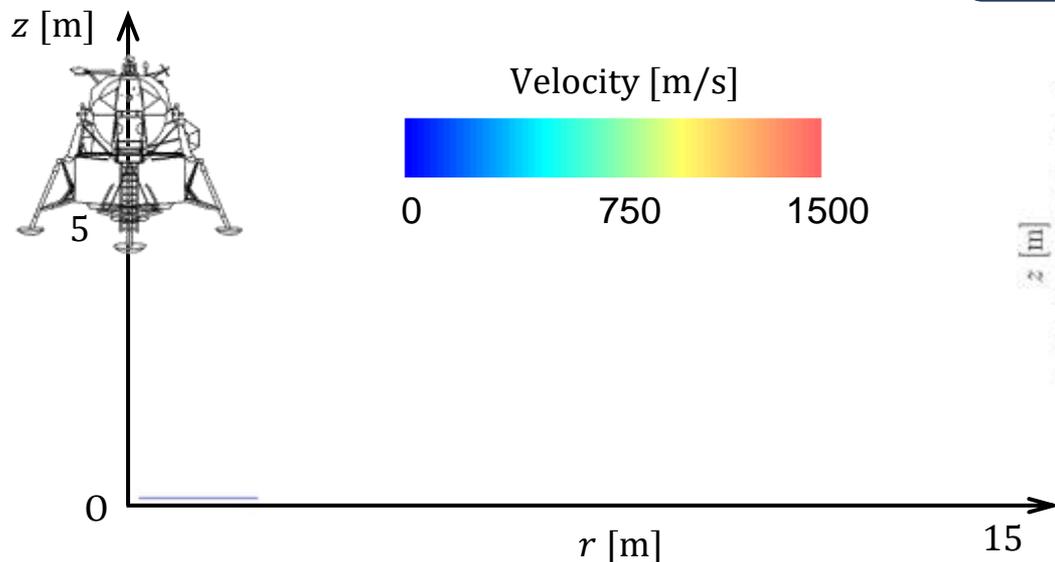
- 非平滑胴ローラによる転圧実験
- 荷重コンプライアンス制御を転圧制御
- Sim2Realなどを用いた機械学習ベースでの制御ポリシーの獲得を検討中



小型土工ロボットによる作業 | レゴリス飛散解析

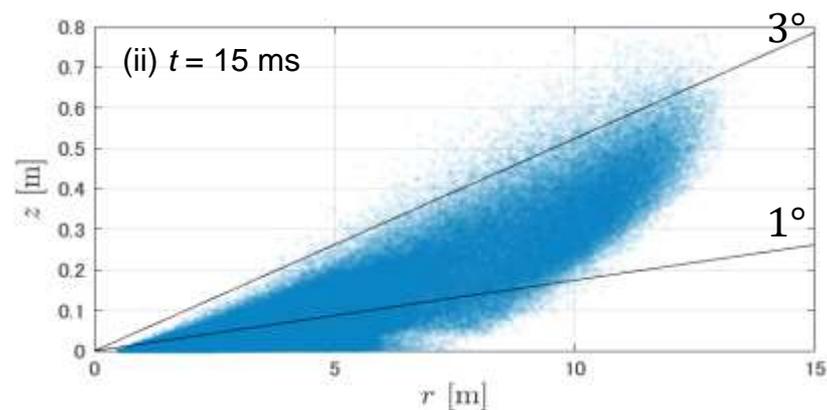
CFD-DEM連成解析を用いたレゴリス飛散シミュレーション

- 月レゴリスの圧密目標値の取得を最終目的としている。
 - レゴリス焼結に際してもレゴリスを事前に圧密させておく。
- 着陸機のスラストによる飛散（粘性浸食）
 - 着陸スラスト噴射によるレゴリスへのせん断応力 $>$ レゴリスの内部せん断応力



Apollo LMDE

- Particle vel. 300 ~ 2000 m/s (Blownlee et al., 1972)
- Particle ejection angle 1 ~ 3° (Immer et al., 2011)



(Yamaguchi & Ishigami, to be submitted)

まとめ | 小型土工ロボットによる月面着陸拠点構築シナリオ



月面インフラ：いつ・何を・どのような順で、どのように構築するか？

→ 「2030年代初頭・まずは着陸拠点を・小型ロボットで」

小型軽量ロボットによる未踏地域での土工作业

AIを駆使した低重力環境での高効率・レジリエントな土工作业



**月面大型輸送機により安全な着陸の実現
地球・月圏エコシステムの実現へのキー技術**