

火星探査に向けた UGV による局所地形検証と経路生成システムの検証 Verification of a Local Terrain Assessment and Path Planning System Using UGVs for Mars Exploration

○木村 光汰*, 加藤 良汰*, 小山 猛*, 三好 扶*
○Kota KIMURA*, Ryota KATO*, Takeshi KOYAMA*, Tasuku MIYOSHI*

*岩手大学大学院
*Graduate School of Iwate University

キーワード : UGV (unmanned ground vehicle), 経路計画 (path planning), 2D LiDAR (2D light detection and ranging), 火星探査 (mars exploration)

連絡先 : 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工学学部機械知能航空コース三好・小山研究室
木村 光汰, Tel.: 019-621-6357, E-mail: g0325064@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 火星表面探査に関する研究開発が進んでいる. これまでは地表を走行する UGV (Unmanned Ground Vehicle) 型探査機が主流であり, NASA の Curiosity や Perseverance などによって地質調査やサンプル採取が行われてきた⁽¹⁾⁽²⁾. 一方, 上空から広範囲を短時間で観測できる UAV (Unmanned Aerial Vehicle) 型探査機は, 未知領域の広域探査に優れている. 特に, NASA の火星探査 UAV “Ingenuity” は, 2021 年に人類史上初となる地球外惑星における制御された動力飛行に成功し, UAV による惑星探査の有効性を示した. しかし, Ingenuity は斜面への着陸時に地面特徴の取得が困難となり活動を停止しており, 火星地形における安全な移動や着陸が課題となっている⁽³⁾.

そこで本研究では, 詳細探査を担う UGV と広域探査を担う UAV による協調型探査システムを提案する. 本システムでは, UAV が UGV から離陸して上空から周辺地形を撮影し, 取得した画像から広域 3D マップを生成する. その後, UAV

は UGV 上へ着陸して画像データを共有し, UGV 側で地形勾配や走行可能領域, 登坂性能を考慮したコストマップを作成する. これにより, 崖や谷などの“負の障害物”を含む危険地形を事前に把握し, 安全な経路地を含む経路計画を行なう. さらに, UGV に搭載した 2D LiDAR (2D light detection and ranging) を用いた局所的な障害物検知を併用することで, UAV のみでは捉えきれない障害物を補完する. UGV は計画した経路に沿って移動し, 到達後に再び UAV が離陸して探索を行なうことで, 未知環境における安全かつ効率的な探査を実現する.

本稿では, UAV による広域 3D マップと走行可能領域推定に基づき, UGV による最適経路生成とその自律移動について, シミュレーションと実機を用いて検証する.

2. 提案するパイプライン

図 1 に提案する UGV のパイプラインを示す。本パイプラインでは、まず UAV から受け取った地図を入力として、UGV が目的地までの経路計画を実施する。生成した経路に基づいて UGV が自律移動を開始し、移動中は搭載した 2D LiDAR により周辺環境をリアルタイムで計測する。

2D LiDAR を用いることにより、地図上に存在しない障害物を検知した場合には取得した障害物の情報を地図に反映し、経路を再生成することで障害物を回避する。同時に LiDAR による SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)を実施し、走行中に環境地図を逐次更新する。

UGV が目的地へ到達後、再び UAV が離陸して周辺環境の探索を行い、同様の処理を繰り返すことで未知環境における継続的な探査を実現する。

3. シミュレーション

3.1 実行環境

表 1 に本研究におけるシミュレーション環境を示す。ROS2 Humble を用いた環境においてシミュレーションソフトとして Gazebo11 を使用し RViz2 による可視化を行った。プログラム言語には Python を用い、自律移動フレームワークとして Nav2, 自己位置推定および環境地図生成には slam_toolbox を使用した。

3.2 既知地図における検証

事前に取得した地図情報のみを用いて、UGV が目的地まで到達可能か検証した。

図 2 にシミュレーションで使用した地図を示す。本地図は UAV により取得した俯瞰地図を想定したものであり、白色領域を走行可能領域、黒色領域を障害物や崖などの走行不能領域として設定した。経路計画アルゴリズムには A*ベースの SmacPlanner2D を使用した。

図 3 にシミュレーション結果を示す。地

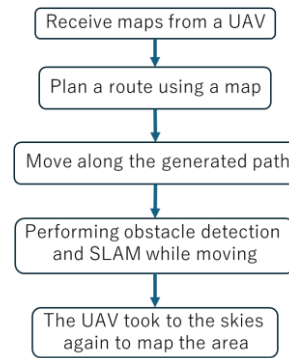


Fig.1 UGV pipeline

Table 1 Simulation environment

| | |
|-------------|---|
| PC | Dell Inc. Vostro 3546 |
| CPU | Intel® Core™ i3-4005U CPU @ 1.70GHz ×4 |
| GPU | Mesa Intel® HD Graphics 4400 (HSW GT2) |
| OS | Ubuntu 22.04 |
| Environment | ROS2 Humble |
| Language | python |
| Package | Navigation2 slam_toolbox |

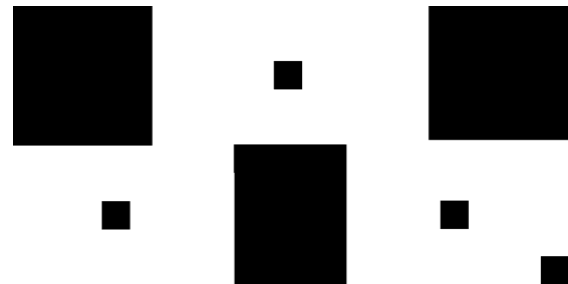


Fig.2 Temporary map with obstacles

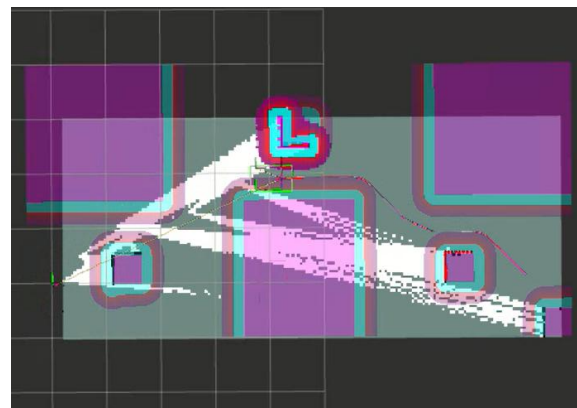


Fig.3 Simulation result using the temporary map

図上において障害物領域を回避する経路を生成し、UGV はその経路を追従して目的地まで移動できることを確認した。これにより、既知地図に基づく経路生成と経路追従動作が正常に行えることを確認した。

3.3 未知障害物における検証

既知地図に存在しない未知障害物が存在する環境において、UGV が障害物を回避しながら目的地へ到達可能か検証した。

図 4 に障害物情報を一部除去した地図を示す。図 4 を既知地図とし、図 2 を未知障害物の存在する地図とする。シミュレーションでは走行中に LiDAR を用いて未知障害物を検知し、検知した情報を地図に反映することで経路再生成を行なった。

図 5 に未知障害物を反映した地図を示す。走行試験を実施した結果、障害物を回避し、目的地への到達可能であることが確認できた。走行中に LiDAR SLAM による環境地図生成を行ない、検知した障害物情報を地図に逐次反映していることを確認した。

これにより、UAV から獲得した広域地図による経路生成と UGV による局所的な障害物検知を組み合わせることで、地図情報に変更が生じた環境においても自律走行が可能であることを確認した。

4. 実機実験

4.1 実験システム

図 6 と表 2 にそれぞれ、実機検証に用いた UGV の外観と仕様を示す。UGV は前輪に 8 インチハブモーター、後輪にキャスターを備えた四輪車両である。

制御用処理装置として Raspberry Pi 4 Model B を搭載し、環境認識用センサーとして 2D LiDAR(YDLIDAR X3)を搭載した。システムは ROS2 Humble を用いて構築し、Raspberry Pi と外部 PC による分散処理構成とした。LiDAR により取得した点群データを ROS2 通信により外部 PC へ送信し、

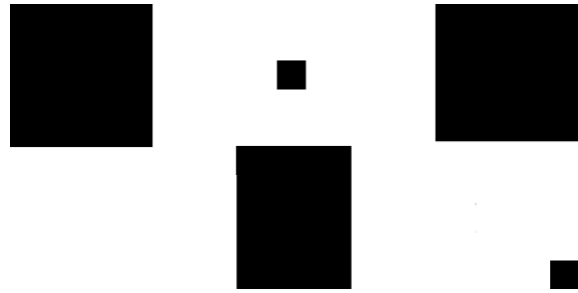


Fig.4 Temporary map without obstacles

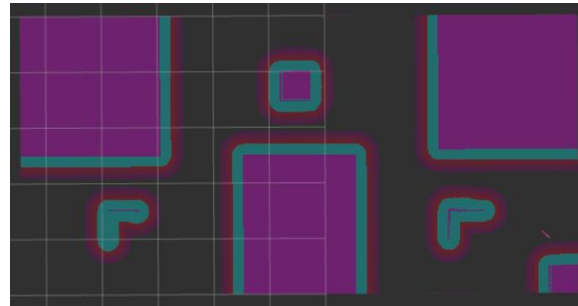


Fig.5 Simulation result added obstacles

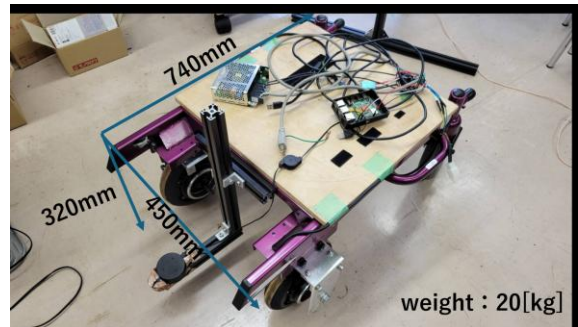


Fig.6 The developed UGV

Table 2 Specification of the UGV

| | |
|---------------|--|
| Size(L×W×H) | 740×450×320[mm] |
| Weight | 20[kg] |
| Motor | 8-inch brushless wheel hub motor |
| Energy source | Switching Power Supply (DC 24V) |
| On-board PC | Raspberry Pi 4 Model B |
| Sensor | YDLIDAR X3 |
| OS | Ubuntu 22.04 |
| Environment | ROS2 Humble |
| Package | ydlidar_ros2_driver Navigation2 slam toolbox |
| Host PC | Dell Inc. Vostro 3546 |

slam_toolbox による自己位置推定と環境地図生成を実施した。自律移動に用いた Nav2 により生成した速度指令を Raspberry Pi に送信してモーターを制御した。

4.2 動作確認実験

構築したシステムを実機 UGV に実装し、基本動作確認を行なった。

実験では、外部 PC で生成した速度指令 (cmd_vel) を Raspberry Pi が正常に受信し、左右独立駆動モーターで実行可能か検証した。

実験の結果、速度指令に応じてモーターが正常に駆動することを確認した。これにより、ROS2 通信を介した制御系と実機への速度指令反映が可能であることを確認した。図 7 は実験の様子であり右側の地図上に LiDAR で検知した障害物と実機 UGV の位置が反映されているのが分かる。

今後は、2DLiDAR を用いた未知障害物回避機能を追加し、シミュレーションと同条件での自律走行実験を実施する。

5. 結言

本研究では、火星探査における安全な自律移動の実現を目的として、UAV により獲得した広域地図と UGV による局所障害物検知を統合した自律ナビゲーションシステムを構築した。シミュレーションにおいて既知環境における経路生成と目的地到達が可能であることを確認し、未知障害物を含む環境においても障害物の認識、回避と目的地到達を達成した。実機実験では速度指令に基づくモーター制御が正常に動作することを確認した。

今後は、未知障害物環境における完全自律走行実験を実施するとともに、火星地形を想定した不整地環境への適用を進め、本システムの有効性を検証する予定である。

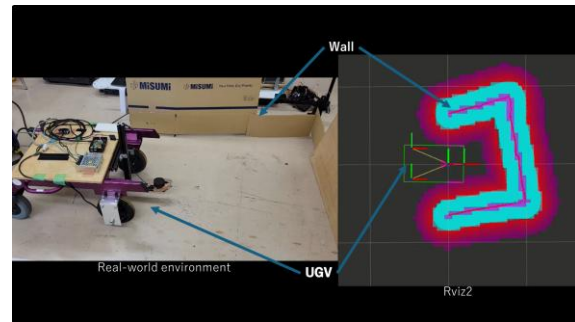


Fig. 7 Functionality testing using an actual UGV

参考文献

- 1) 宇宙理工学委員会 国際宇宙探査専門委員会, 火星探査計画の科学探査タスクフォース中間報告書, https://www.isas.jaxa.jp/home/rikou/kokusaitansa/documents/tf/2019/MarsTF_20190214.pdf (参照日 2026 年 5 月 18 日)
- 2) 火星 2020:パーシビアランス・ローバー - NASA サイエンス, <https://science.nasa.gov/mission/mars-2020-perseverance/> (参照日 2026 年 5 月 18 日)
- 3) NASA が初めて別の世界で航空機事故調査を行う [NASA ジェット推進研究所 (JPL)], <https://www.jpl.nasa.gov/news/nasa-performs-first-aircraft-accident-investigation-on-another-world/> (参照日 2026 年 5 月 18 日)