

火星探査に向けた UAV による広域 3D マップ作成と 走行領域推定の検討

A Study on the Creation of Wide-Area 3D Maps and the Estimation of Operating Areas Using UAVs for Mars Exploration

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

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

キーワード : SfM(structure from motion), UAV(unmanned aerial vehicle),
火星探査(mars exploration), 3D マップ作成(3D mapping)

連絡先 : 〒020-8551 岩手県盛岡市上田 4-3-5 岩手大学理工学部機械知能航空コース三好・小山研究室
加藤 良汰, Tel.: 019-621-6357, E-mail: g0325056@iwate-u.ac.jp

1. 緒言

近年, 火星をはじめとする惑星探査が活発化しており, 探査技術の高度化が求められている¹⁾. これまでの惑星表面探査では, 地表を走行する UGV(Unmanned Ground Vehicle)型探査機が主流であった. 一方, UAV(Unmanned Aerial Vehicle)型探査機は, 上空から広範囲を短時間で観測できるため, 未知領域の広域探査に優れている²⁾. 特に, NASA の火星ヘリコプター “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, 最終的に斜面への着陸時の問題により探索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の重要性が課題となった.

そこで本研究では, 広域探査を担う UAV と詳細探査を担う UGV による協調型探査システムを提案する. 本システムでは, まず UAV が UGV から離陸し, 上空から周辺地形を撮影しながら探索を行なう. その後, UAV は UGV 上へ着陸し, 取得した画像データを UGV へ送信する. UGV は受け取った画像から 3D マップを生成し, 地形勾配, 走行可能領域や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(Negative Obstacles³⁾)” を含む

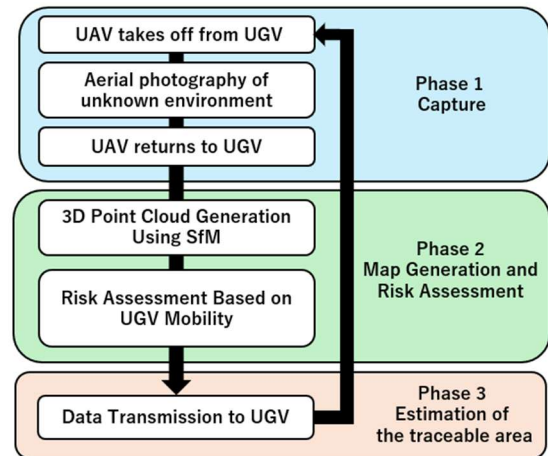


Fig.1 System flowchart

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. UGV は UAV を搭載したまま計画した経路に沿って安全な地点まで移動し, UGV が経路地へ到達した後, 再び UAV が離陸して周辺探索を行なう. 同様の手順を繰り返すことで, 未知環境における安全かつ効率的な惑星探査を実現する.

本稿では, その第一段階として, UAV で取得した画像を用いた広域 3D マップ生成と走行可能領域推定について述べる.

2. システムフロー

図 1 に本研究のシステムフローを示す. 本システムフローは大きく 3 つのフェーズ

から成る。まず、フェーズ1で UAV が未知エリアの地表を空撮し、UGV に一度帰還して動画を UGV に送信する。次に、フェーズ2において取得映像から 3D 点群データを生成し、広域 3D マップを得る。この 3D マップに対して UGV の物理的な走破性能(乗り越えられる段差や限界傾斜角など)を基準としたリスク評価を実施する。この評価により、走行難易度に応じたコストマップを生成する。最後に、このコストマップに基づいて経路計画を行なうため UGV へマップを提供する。

以上のことから、環境の不確実性に柔軟に対応し、確実に目的地へ到達する堅牢な自律航行システムを実現する。

3. 実験環境

3.1 UAVを用いた撮影

図2に本実験で使用したUAVの外観を示す。UAVにはビジョンポジショニングシステムとカメラを搭載した小型クアッドコプターTello(Ryze Tech社)を採用した。機体重量87[g]、寸法[mm]はL170×W170×H41であった。機体前方に搭載したカメラの解像度は1280×720[px]、フレーム数は30[fps]であった。本機体にはDJI社のフライトコントロール技術を搭載した。

3.2 3D マッピング

表 1 と図 3 にそれぞれ、画像解析環境と点群生成の処理フローを示す。UAV で撮影した動画から複数の静止画像を取り出し、SfM(Structure from Motion)を用いて 3D 点群データを生成した。データ生成には 3D 再構築ウェア COLMAP を使用し、可視化と解析には点群ソフトウェア CloudCompare を用いた⁴⁾。COLMAP の実行にあたっては、Command Line Interface(以下、CLI)を利用した。CLI を経由することで観測対象に応じて特徴点の抽出閾値やマッチング条件などの内部パラメーターを直接指定可能であり、特徴点の乏しい地形の画像群であっても



Fig.2 UAV for commerce

Table 1 Image processing

OS	Ubuntu 22.04
CPU	Intel Core Ultra 9 285k
GPU	NVIDIA GeForce RTX 5080 16GB GDDR7
Language	Python
3D Point Cloud	COLMAP
Visualization	CloudCompare

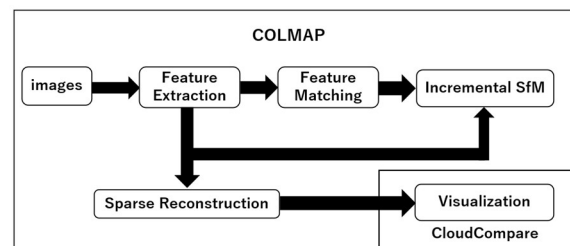


Fig.3 SfM flowchart

3Dマップの生成が可能となった。

CLIを活用して得たマッチングデータから三次元復元によりカメラの位置、姿勢のパラメーターの推定、対象環境の3次元座標の算出を同時に行ない、3Dマップを生成した。

3.3 走行可能領域推定

SfM で得た高密度点群の 3D マップの座標情報から崖の高さや傾斜角度を算出し、UGV の走行可能領域を推定した。

まず、UGV の走行可能領域を高さの基準とした姿勢補正を行なった。次に、各点の Z 座標(高さ)を抽出し、その XY 平面から Z 軸方向上向きに pixel 処理を施すことで、各 pixel が高さ情報を保持するモデルに変換した。このモデルから pixel の高さ情報を基に

崖の高さや傾斜角度を算出した。本実験では崖に注目するため傾斜角度を全て 90[deg]とした。

さらに、構築した高さ情報モデルから走行可能領域を抽出するため、Python を用いて 2 次元コストマップを生成した。マップ上の各グリッドは、UGV の走破性能に基づく 3 段階のリスクレベル走行可能領域(Safe, 緑), 注意領域(Caution, 黄), 走行不可領域(Danger, 赤)で評価した。走行不可領域は障害物, 崖や段差を表した。この走行不可領域の周囲にはコスト膨張処理を施し, 注意領域を設定した。

4. 実験結果

4.1 UAV を用いた撮影

UAV が崖や谷を撮影し, 障害物と崖の両方を危険領域としたコストマップを作成するため, 疑似的な地形を作成し撮影実験を行う。

図 4 に UAV の撮影に使用した疑似的な火星表面フィールドを示す。床面から約 0.3[m]の高さに 2 枚の木板をつなげて UGV の走行面とし, 高さの基準(Z=0)とした。2 枚の木板を水平方向にずらすことで, 崖と走行可能領域を用意した。走行面上には初期位置 A, 目的地 B と障害物 2 つを設置した。周囲には崖を模したブルーシートを設置した。全体の大きさは 3.3×2.8[m]であった。

図 5 に UAV で撮影した動画を切り出した静止画の一部を示す。フィールド上方を旋回しつつ UAV で撮影したが, 本研究で使った UAV はカメラを前方に固定しており下方の撮影に制約がある。そこで著者が UAV を把持し, 旋回飛行を模擬しつつ上方からフィールドを撮影した。

4.2 3Dマッピング

図 6 に UAV の空撮動画から作成した 3D マップの上面図を示す。CLI 設定のため何度か試行錯誤を繰り返したが, 特徴点の少ない木板や崖をはじめ, A, B, 障害物まで明



Fig.4 Simulated surface of Mars

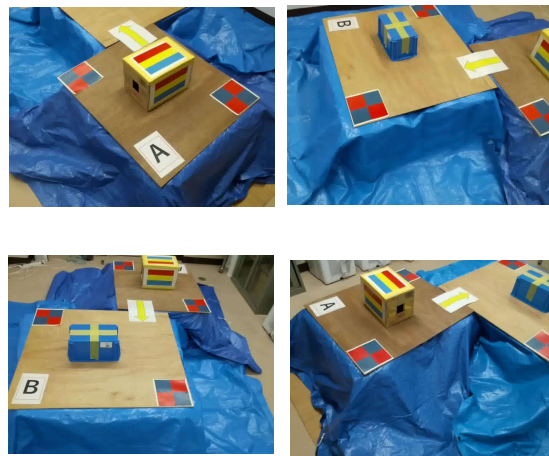


Fig.5 Captured image by the UAV



Fig.6 Experimental result of 3D point cloud image

瞭に 3D で復元したことを確認した。本研究のアプローチである CLI の有効性も確認した。

4.3 走行可能領域推定

図7と8に、作成した3Dマップの高さ情報を基に色分けした数値標高モデルと、推定したUGVの走行可能領域の図を示す。数値標高モデルに対してUGVの走破性能に基づくリスク評価を行なうことで走行可能領域を推定した。本実験では走行面 $Z=0$ を走行可能領域(緑)とし、 $\pm 100[\text{mm}]$ 以内を注意領域(黄)、それを越えた部分を走行不可領域(赤)とした。その結果、走行面上方に存在する障害物だけでなく“負の障害物”である崖も走行不可領域として正しく分類できることを確認した。

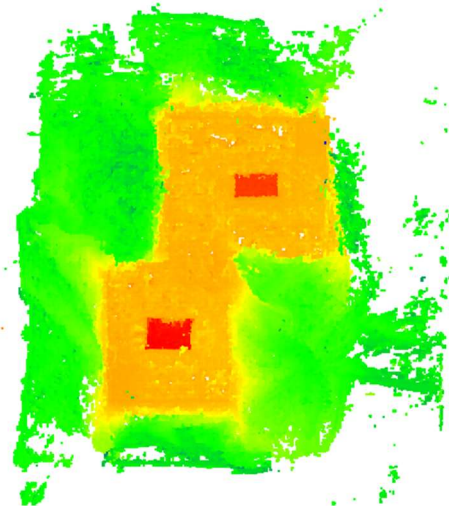


Fig.7 Height model of the 3D point cloud image

5. 結言

本稿では UAV による広域観測と UGV による局所走行を協調した自律探査システムの構築を提案し、UAV で取得した画像を用いて広域 3D マップを生成し、走行可能領域を推定した。さらに、実機実験によりその有効性を確認した。

今後は、明確な傾斜を有する地形にける走行可能領域推定、さらに複雑な地形に対応可能な推定アルゴリズムの構築、UGV 実機と連携した経路計画と障害物回避実験を行なう。これらにより、提案する広域探査を担う UAV と詳細探査を担う UGV による協調型探査システムの有効性を示す。

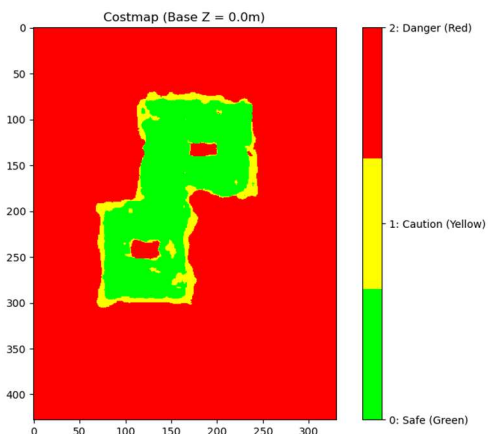


Fig.8 Traversability map from 3D point cloud image

参考文献

- 1) Sorae gaze at the stars
<https://sorae.info/space/20240126-ingenuity.html>
2024/01/26
- 2) 永井源樹, 大石修士, 正 三浦 純 : ドローンを用いた Visual SLAM に基づく 3次元地図生成学, 日本機械学会集, 2016/06/08 p. 1-2
- 3) Junxu Hou, Hong Wang, Tan Li, Eryi Dong, Tao Wang, Fengkai Kang: "Navigating the unseen: System-enhanced real-time perception and decision-making for negative obstacle avoidance in autonomous vehicles", Applied Soft Computing, 189(2026), article 114496

- 4) 小山猛, 小高健幹, 大西弘志, 萩原義裕, 三好扶, "災害時超急性期における UAV を用いた道路状況把握の予備的検討", 第26回計測自動制御学会SI部門講演会(SI2025)予稿集, 1A2-07(2025).