

無窮洞におけるレーザー計測とロボット探査の予備実験*

前田貴信**1, 眞部広紀**2, 山下寛文**3, 富永敦士**4

Preliminary Experiments for Laser Measurement and Robotic Exploration in

Mukyu-Do, Ruin of Shelter, Sasebo, Nagasaki Prefecture, Japan*

Takanobu MAEDA**1, Hiroki MANABE**2, Hirohumi YAMASHITA**3, Atsushi TOMINAGA**4

Key words: Laser measurement, Robotic Exploration, Tuff, Ruin of Shelter, Mukyu-Do

Abstracts

In this paper, we demonstrate laser measurement for a ruin of shelter (artificial tuff cave).

1. はじめに

近年、月探査衛星 SELENE(かぐや)と USA の LRO、火星探査衛星 MRO の地形カメラ画像データの解析により、月や火星に巨大な縦孔地形が発見されている¹⁻⁷⁾。USA の GRAIL 衛星による月重力分布データ解析から、縦孔から帯状に続く低密度(質量欠損)領域が検出されている^{8,9)}。2017年に SELENE(かぐや)の月レーダーサウンダーデータの解析から、縦孔から続く長大な空洞反射の特徴が検出され¹⁰⁾、地下空洞(横穴)が存在する可能性が大きくなった。地下空洞は隕石衝突や放射線や紫外線から防護された天然のシェルターであり、内部温度が非常に安定していると考えられている。将来的な月基地候補地として有利な条件が推定されることから、縦孔・地下空洞探査への期待が高まっている¹¹⁾。

本研究はロボットに搭載した洞窟内部形状のレーザー計測システム開発を目的として開始され、福岡県平尾台の石灰洞「青龍窟」「牡鹿洞」においてロボットの洞内移動やレーザー測域センサー計測や3次元モデル作成の実証実験を行ってきた^{12,13)}。NASA や JAXA が地球外洞窟のロボット探査に向けて動き出したことをきっかけに、地球外天体の縦孔・地下空洞におけるロボット移動やレーザー計測を想定した探査シミュレーションも研究対象に含めた¹⁴⁻¹⁶⁾。

本稿では、防空壕遺構「無窮洞」(長崎県佐世保市

城間町3-2)における、小型移動ロボット搭載のレーザーイメージングユニット(LiDAR)を使用した形状計測と3次元モデル作成の事例を報告する。「無窮洞」は凝灰岩の岩盤を旧宮村国民学校の教員と生徒が手作業で掘削して作り上げた防空壕である。幅約5m、奥行き約20mの主洞は教室仕様に、主洞の前後を遠回りにつなぐ副洞は書庫室・倉庫・調理場・避難路・便所を備えた回廊仕様になっていて、「無窮洞」全体では生徒600人程度が避難できるとされている¹⁷⁾(図1, 2)。



図1 「無窮洞」入口

* 原稿受付 平成29年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**2 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**3 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科(学生)

**4 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科(学生)



図2 「無窮洞」内部

2. 計測方法

水平全方位 360° で計測ポイントから壁面までの距離を測定することにより横断面の形状を計測する(図3上)。この計測を各水平面で行い、横断面を積み重ねて3次元形状を得る(図3下)。

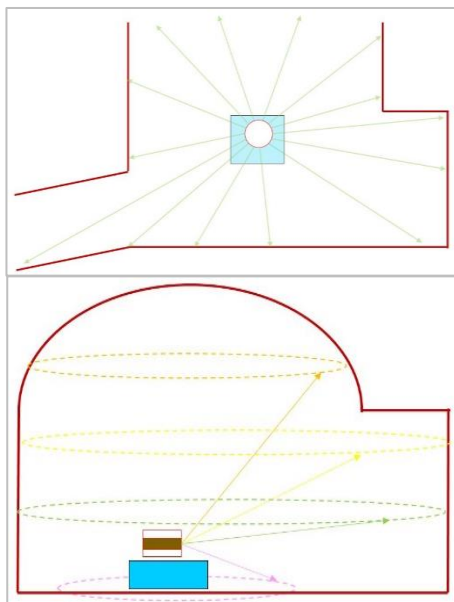


図3 上 横断面計測、下 横断面の積み重ね

次に、別の計測ポイントに移動して同様の計測を行い、3次元形状を得る。このプロセスを繰り返して、「無窮洞」全体をカバーした3次元形状を得る。

3. 計測システムの構成

上記の計測方法を実現するために、センサーを搭載したプラットフォーム(ロボット)と端末(ノートPC)で計測システムを構成した:

センサーには水平全方位 360° が高精度計測可能な、Velodyne 社レーザー測域センサー(Laser Range Finder)「全方位 LiDAR イメージングユニット VLP-16」を使用し、計測ポイント間の移動に使用するプラットフォームは NEXUS Robot 社「New Tracked Mobile Tank Robot (10022)」(寸法:310×300×110mm、アルミ合金製で重量 4.3 kg)を使用した(図4)。12V Ni-MH 充電電池と 12VDC モータ(動力: 17W)が駆動するクローラーにより、最大:0.3 m/s の速度で移動できる。このロボットにコントローラーとして Arduino 互換機を搭載した。カメラ映像モニタリング・操縦用制御信号送信・計測データ受信記録と可視化のために、端末として 13.3 インチモニター of ノート PC を使用した(図5)。

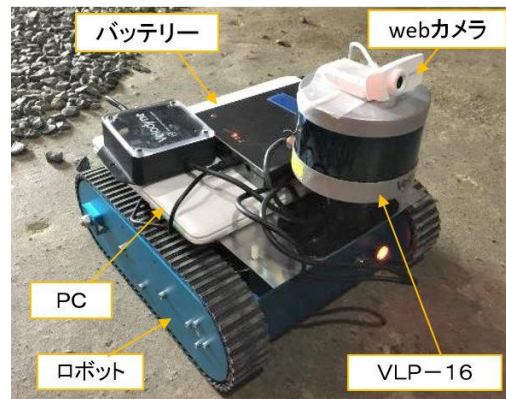


図4 レーザーセンサー搭載ロボット(外観)



図5 端末用ノートPC

4. 計測

内部コントローラーにロボットの動作プログラムを記憶させ、0.2m/s の速度でロボットを移動させた。VLP-16 により水平全方位 360° と垂直視野 30° で壁面の 3 次元形状を測定した (図 6、図 7)。



図 6 「無窮洞」の計測

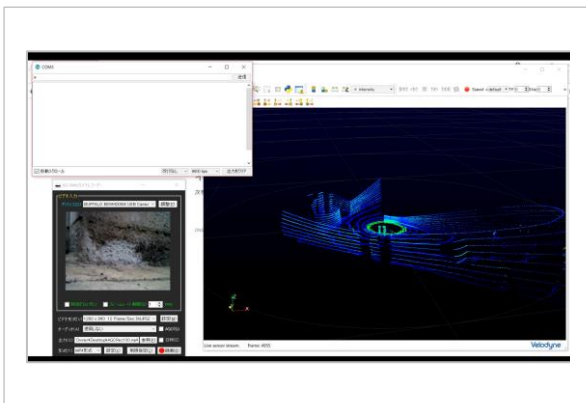


図 7 端末用ノート PC モニター画面

左下：web カメラ映像(ロボットの正面にある教卓・教壇)
中央～右：可視化ソフト「ParaView」の 3D モデル(主洞教室)

5. 3次元モデルの作成

計測データの中から特徴的なものを選び出し (図 8)、位置と向きを補正して重ね合わせて一つの 3 次元モデルを構築した (図 9)。



図 8 計測データ例

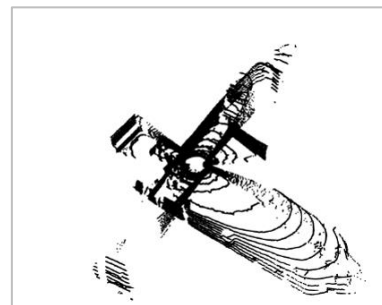


図 9 計測データ例の重ね合わせ

このプロセスを「無窮洞」全体にわたって実行して、全体 3 次元モデルを作成した。全体 3 次元モデルの平面投影図(図 10(b))と「無窮洞」案内パンフレットの平面図(図 10(a))を比較すると、「無窮洞」の平面的な形状をほぼ正確に計測していることがわかる。

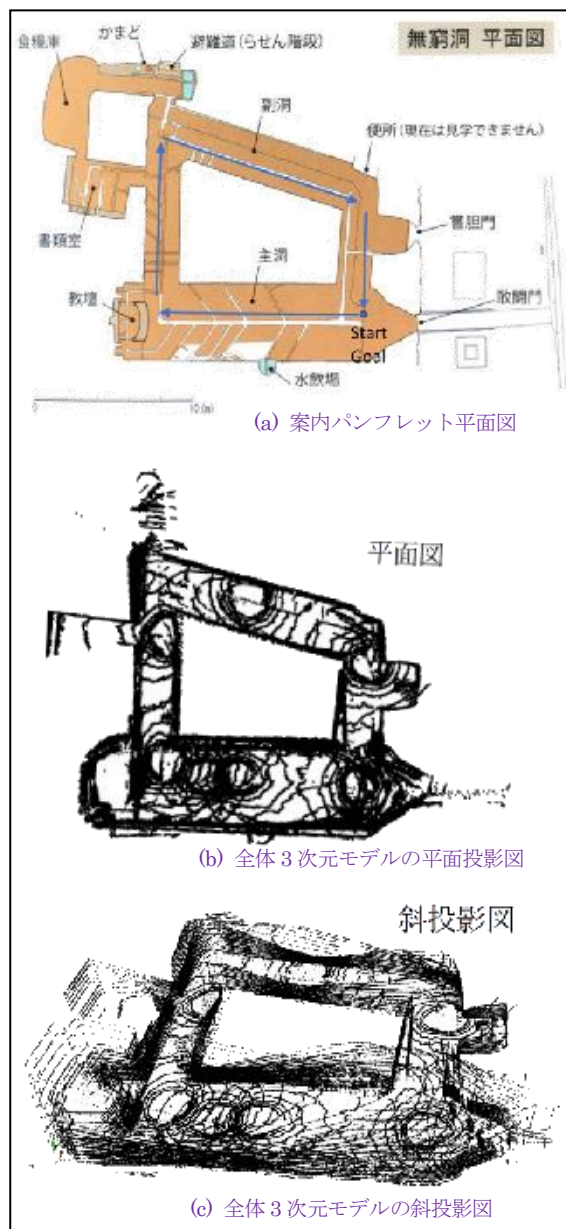


図 10 全体 3 次元モデルの比較検証

図 10(c)のような斜投影図は画面上で視点変更できるので、あたかも内部を移動しているような映像(ケイブスルー映像)を表示することもできる。

6. まとめ

防空壕遺構「無窮洞」を使用して、レーザー測域センサー搭載移動ロボットによる洞窟形状計測システムと 3 次元モデル作成の手法が有効であることを確認することができた。

7. 今後の展開

現有の LiDAR の重量が大きいことに加えて、専用の PC やバッテリーの搭載が不可欠であり、充分な不整地走破性も必要になることから、パワーが大きいロボットプラットフォームを準備している。

本格的な洞窟調査に向けた準備として、「無窮洞」を無線遠隔操縦もしくは自律的に移動して計測する。各計測ポイントの 3 次元モデルを自動的に重ね合わせ、全体 3 次元モデルの生成するシステムを確立する。さらに、SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)を用いて 3 次元環境地図を構築しながら洞窟内部を自律移動するシステムを開発する。

全体 3 次元モデルの精度と解像度(精細さ)を向上させて、学術調査の基盤資料に供する。

「無窮洞」計測実験は、本研究グループが JAXA の UZUME 計画と連携して立ち上げた『洞窟計測探査シミュレーションプログラム』のキックオフプロジェクトである。鹿児島県曾於市の凝灰岩洞窟「溝ノ口洞穴」予備計測実験、長崎県福江市の溶岩トンネル「井坑(+野坑)」予備調査と並行して進めている。

謝辞

本研究は科学研究費補助金(基盤 C(一般) 課題番号)『地球外の縦孔・地下空洞を含む洞窟地形の計測システムと 3 次元モデルの活用』(代表 眞部)の補助の一部により進めました。

「無窮洞」の計測実験を実施するにあたり、無窮洞顕彰保存会の方々に大変お世話になりました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) J. Haruyama, et al.
Possible lunar lava tube skylight observed by SELENE cameras,
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 36, L21206,
2009,
- 2) J. Haruyama, et al., 2010,
NEW DISCOVERIES OF LUNAR HOLES IN MARE
TRANQUILLITATIS AND MARE INGENIUM.
41st Lunar and Planetary Science Conference (2010) #1285
- 3) J. Haruyama et al., 2012, In: V. Badescu, (Eds.),
Moon-Prospective Energy and Material Resources, Springer,
pp.139
- 4) G. E. Cushing, T. N. Titus, J. J. Wynne, and P. R. Christensen
THEMIS observes possible cave skylights on Mars
GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 34, L17201,
doi: 10.1029/2007GL030709, 2007
- 5) G.E. Cushing,
CANDIDATE CAVE ENTRANCES ON MARS
Journal of Cave and Karst Studies, v. 74, no. 1, p. 33–47.
DOI: 10.4311/2010EX0167R
- 6) G.E.Cushing, C.H. Okubo, and T.N. Titus,
Atypical pit craters on Mars: New insights from THEMIS,
CTX, and HiRISE observations
2015, Journal of Geophysical Research: Planets 120(6),
1023-1043, DOI: 10.1002/2014JE004735
- 7) 後藤祐紀; 郭哲也; 春山純一; 三宅互,
火星エリシウム山麓における縦孔陥没地形リスト
JAXA-RM-16-008, pp1-19(2016)
- 8) Sood et al.
Detection of Buried Empty Lunar Lava Tubes
Using GRAIL Gravity Data,
2nd Intl. Planetary. Caves Conf., 20-23 October, (2015) #9016,
- 9) Chappaz et al. ,
Evidence of large empty lava tubes on the Moon using GRAIL
Gravity ,
Geophysical Research Letters 43, DOI: 10.1002/2016GL071588.
2017
- 10) T. Kaku et al.
Detection of Intact Lava Tubes at Marius Hills on the Moon by
SELENE (Kaguya) Lunar Radar Sounder,
Geophysical Research Letters (2017)
DOI: 10.1002/2017GL074998
- 11) 春山純一, 河野功,
UZUME 計画 : An Introduction and Overview
第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集 (2017) #1B08
- 12) 眞部広紀, 前田貴信, 浦田健作, 井手雄太, 市丸智裕,
平尾台カルスト青龍窟における
レーザー測域センサーを使用した移動計測の予備実験,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 51 号 pp.28-33 (2015)
- 13) 眞部広紀, 前田貴信, 久間英樹, 新部一太郎,
浦田健作, 染谷孝, 春山純一,
洞窟探索のためのレーザー計測と 3 次元モデルについて
佐世保工業高等専門学校研究報告第 52 号 pp.16-21 (2015)
- 14) 久間英樹, 眞部広紀, 新部一太郎, 森内敦史, 福岡久雄,
3 次元レーザースキャナを用いた洞窟の形状測定,
第 59 回宇宙科学技術連合講演会講演集(2015) #3D03
- 15) 新部一太郎, 久間英樹, 眞部広紀,
竜溪洞の 3 次元レーザー測量による詳細マッピングと
データ展開の可能性,
日本洞窟学会第 41 回大会(高知大会)学術講演会 (2015)
- 16) 眞部広紀, 前田貴信, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝,
久間英樹, 新部一太郎, 長谷川均, 岡本渉, 春山純一
ロボット探索の予備実験に使用する
天窓・溶岩チューブ洞窟の類似地形について
佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号 p pp14-27 (2016)
- 17) 佐世保市 HP,
<https://www.city.sasebo.lg.jp/kikaku/bunkak/documents/526.pdf>