

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*

眞部広紀**1、前田貴信**2、浦田健作**3、
井手雄太**4、市丸智裕**4

**Preliminary Experiments of Moving Measurement using Laser Range Finder
in Seiryu-kutsu Cave, Hirao-dai Karst Plateau**
Hiroki MANABE, Takanobu MAEDA, Kensaku URATA,
Yuta IDE · Tomohiro ICHIMARU

Key word: Cave, Measurement, Laser Range Finder, Three-dimensional Modeling

Abstracts

In this paper, we discuss the methods of cave morphometry; manned and unmanned exploration with laser range finder measurement system for three-dimensional modeling, and show the preliminary experiment in Seiryu-kutsu limestone cave; hall and passage like a lava tube, Hiraodai Plateau, Fukuoka Prefecture, Japan.

1. はじめに

地球の表面と比較すると、地下に関する情報は地表に近い浅深度領域においても地表に及ばない。しかしながら、洞窟は例外的な地下への‘窓’であり、様々な学術分野が重層するフィールドである。凹凸・屈曲・分岐・狭窄・高低差など、不整地的・微地形的な障壁を包含する暗黒世界への往還は困難を極めるため、殆どの洞窟は未知・未踏領域として残されている。近年、月面や火星表面においても巨大な洞口地形(縦穴とその底部に推定される横穴)が発見されている。これらの地球外洞窟は、隕石や宇宙線から防護された拠点居住空間として利用可能であり、開発の期待が高まっている。NASA や JAXA では、ロボット探査とそれに続く有人探査を計画している¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾。洞窟外にいる研究者に代わって、未知の極限環境の科学探査ミッションを行う RSA(Remote-controlled Scientist Agent 遠隔操作型科学者代理ロボット)への期待は大きく、技術開発と実証が急務である。

本研究グループでは探検技術とロボティクスを基幹テーマとする洞窟探査の総合研究プログラムを立ち上げ、システム開発と実験・実証を継続してきた。地球上の洞窟内部は、大気などが充満する非水中領域と、水などが充満する水中領域が存在するため、形態計測の手法や移動プラットフォームの研究は、非水中領域と水中領域のプロジェクトを並行して進めている⁹⁾。現在、非水中領域プロジェクトは科学研究費「基盤研究 C(一般)」採択課題『水没によって閉鎖された空間環境を探索する水中・非水中複合ロボットシステム』の一部により、LRF(Laser Range Finder レーザー測域センサー)による洞窟内部空間の断面計測、環境地図・3次元概形モデル作成を研究している¹⁰⁾¹¹⁾。また、実証試験用フィールドの予備調査と選定は、日本洞窟学会や地元関係機関と連携した支援体制を構築して行っている。

探査ミッション要素の検証を目的として、平成 24 年(2012 年)3 月と平成 26 年(2014 年)1 月・8 月・9 月に、福岡県平尾台カルスト北東部の青龍窟主洞「洞口ホール」と「下層通路」において予備実験を実施した。本稿では、地上移動型ロボット・飛行ロボット・ウェアラブルを想定した模擬プラットフォームの洞窟内移動、LRF 計測、3次元概形モデルの作成について報告する。

* 原稿受付 平成 26 年 11 月 28 日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**2 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

**3 大阪経済法科大学 地域総合研究所

**4 佐世保工業高等専門学校 専攻科 2 年

2. フィールド

平尾台は福岡県北東部(北九州市小倉南区,行橋市,田川郡香春町, 京都郡苅田町・みやこ町)にまたがる面積約 12km²の石灰岩カルストであり、横穴・斜洞・縦穴・岩溝など、様々な形状・サイズの洞窟が 200 以上確認されている¹²⁾。青龍窟は平尾台の北東端に位置し、地下川の侵食によって形成された複雑な洞窟通路が、長さ 1500m以上、高度差 50m以上にわたって立体的に繋がる空間構造をもつ¹³⁾。主洞「洞口ホール」は最大断面径約 10 数 m の横穴貫通洞であり、東側と西側に 2 つの洞口がある。「洞口ホール」東側半分の洞床は比較的平坦であり、プラットフォームの移動や計測用の基線設定など、実験環境を構築しやすく、形状が溶岩チューブに類似している。以上の点から、青龍窟を実証実験用フィールドとして選定した。

フィールド実験の準備のために、現場の現状確認・記録を目的として、平成 24 年度 3 月に「洞口ホール」の先行予備調査と LRF 計測のシミュレーションを行った。作業用ヘルメットに LRF (北陽電機社製 UTM-30LX レーザー安全規格クラス I) を固定し、ヘルメットを被る計測作業者を移動プラットフォームとした。計測データのロギングにはパッド式の携帯端末を使用した。LRF の有効出力距離が「洞口ホール」の平均断面径よりも小さいため、計測作業者は右側洞壁近くに沿って東洞口と西洞口間を往復し、洞窟の片側半分ずつに分割して計測することにした。自然光が遮蔽された中央部付近においては、LRF が洞壁からのレーザー反射光を感知・識別しやすく、良好に計測できることを確認した。



写真 1 青龍窟「洞口ホール」

右上：東洞口 右中：東洞口奥左下 中下：西洞口 右下：中央部付近



3. 移動プラットフォーム

接地移動する地上移動型ロボットは積載量が大きく大容量のバッテリーなどを搭載可能であり、長時間安定して運用できるメリットがある。一方、縦穴や不整地度が大きい横穴においては、接地しない垂直方向に移動可能な空中移動型ロボットが有利になる。どちらの方式も相補的な利点があるため、ロボットのシステム構成と実装面を考慮して、両方の研究を並行して進めることにした：

[地上移動型ロボット班]

- ・横穴洞窟の形状を計測するシステム
- ・収集した計測データから
3次元概形モデルを生成するプログラム

[空中移動型ロボット班]

- ・飛行ロボットに搭載可能な小型軽量計測システム
- ・3次元環境地図

平成26年度1月に「洞口ホール」において、プラットフォーム移動予備実験と LRF 計測予備実験を行った。地上移動型ロボット班が製作したプラットフォーム(ローバー型ロボット)は、電源系統の不具合のため駆動力が上がらず、所期の高低差は走破できなかった。空中移動型ロボット班の回転翼型プラットフォーム(マルチコプター)は「洞口ホール」天井部に開口する未調査支洞への接近飛行に成功したが、支洞に進入した際に開口部テラスに着床した。
※9月の実験時に回収作業を行った。



写真2 移動プラットフォーム

上：ローバー型 下：回転翼型

4. LRF 計測

現有の LRF の有効出力距離範囲内で一括計測を行うために、断面径が「洞口ホール」より半分以下の横穴洞窟が実験フィールドとして必要になった。

「洞口ホール」の「下層通路」は、緩く蛇行する平均断面径約5mの横穴であることから、追加の実証実験用フィールドとして「下層通路」を選定した。

現場の計測に向けて、地上移動型ロボット班と空中移動型ロボット班はシステムの製作を行い、平成26年度8月・9月に「洞口ホール」と「下層通路」において、LRF計測の予備実験を行った。

4.1 地上移動型ロボット班

ロボットには、洞窟内部空間の横断面(高さや幅)を計測する距離センサー(LRF)、ロボットの向きを計測する方位センサー、ロボットの走行距離・洞窟の奥行きを計測するエンコーダーの3種類のセンサーを搭載した(写真3)。センサーの計測データはロボットに搭載した小型PCによって統合管理される。各センサーの制御は小型PCとマイコンの両プログラムを連携させて実行されるロボットは無線モジュールを通じて操縦者側のPCに制御される(図1)。合わせて、3次元概形モデル生成用プログラムの開発を行った。

先行実験として、LRFのみでデータ収集を行うため、計測システムを搭載したロボットを使用して、以下の手順で実験した：

- (1) プログラムの起動
- (2) データ(距離、方位、奥行き)の取得回数の設定
- (3) 操縦者側PCのキーボード操作により
ロボットの操縦および各種データの取得
- (4) (3)を(2)で設定した回数を反復
- (5) 計測データの保存(csv形式)

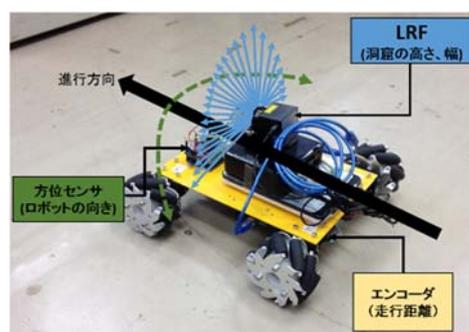


写真3：ロボット外観

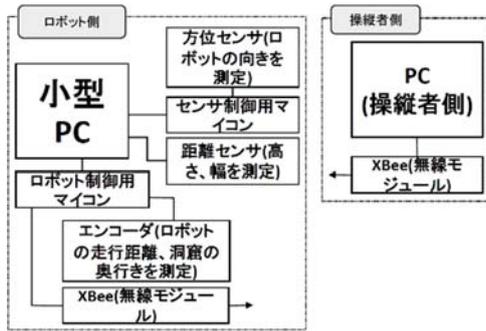


図1:システム構成図

「下層通路」においてロボットを一定間隔で水平移動させ、LRFで計測した。このデータをもとに下層支洞の3次元概形モデルをリアルタイムで作成した(図2, 3)。

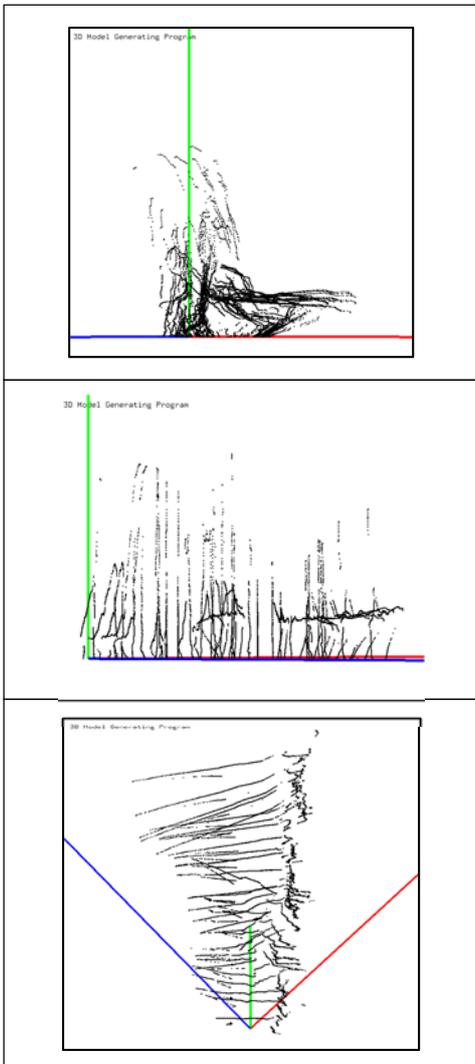


図2 青龍窟「下層通路」3次元概形モデル(三面図)
上(正面図) 中(側面図) 下(上面図)

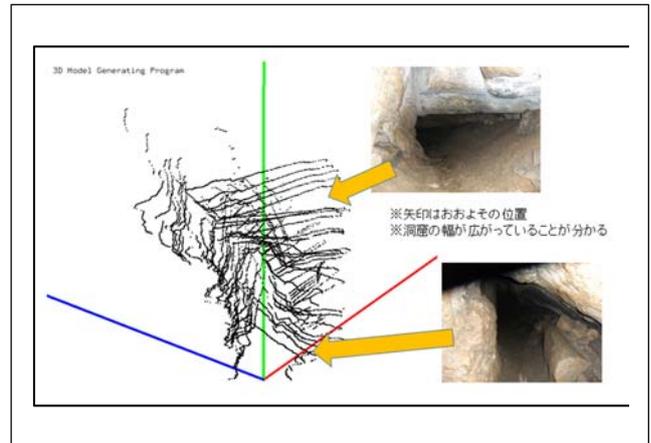


図3 青龍窟「下層通路」3次元概形モデル(鳥瞰図)

4.2 空中移動型ロボット班

運用の簡便性からマルチコプターを基盤とし、センサーとしてLRF・デジタルコンパス・気圧センサー等を搭載する(図4)。PCから無線モジュールXbeeを通じてArduinoマイコンに合図を送ると、各種センサーが計測を行い、データを取得する。計測システムの核となるLRFは、2次元平面で物体までの距離を測定する。距離・測定ステップ数・移動間隔から測定対象の概形を算出し、PC上でリアルタイムに描画する。通常、LRFからのデータ収集はUSBケーブルを介してPCで行われるが、大きさや重量の問題で飛行ロボットに搭載することはできない。そのため、超小型マイコンによるLRF制御の実現を目指した。

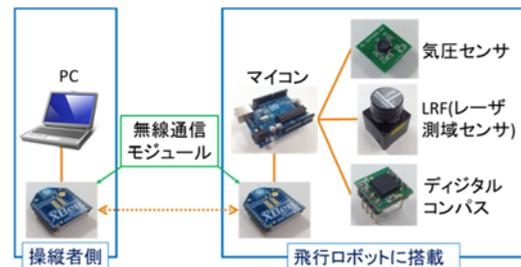


図4:システム構成図

「下層通路」においてLRFを一定間隔で水平移動させ、壁面や天井までの距離を計測した。データから3次元環境地図をリアルタイムで作成し、「下層通路」を3次元概形モデルで再現した(写真4, 図5)。



写真 4: 青龍窟「下層通路」

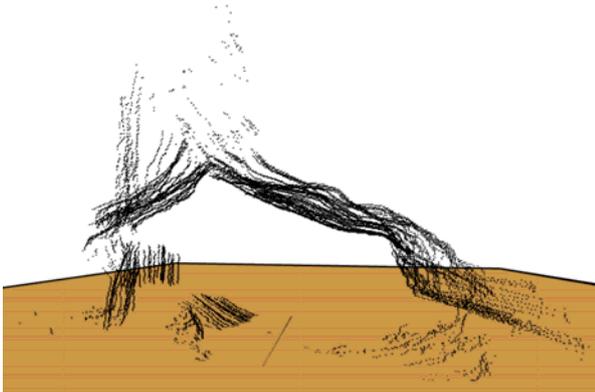


図 5: 青龍窟「下層通路」の 3次元概形モデル

8. まとめと課題

横穴洞窟(非水中領域)の LRF 計測システムと 3次元概形モデル生成用プログラムの開発を行った。福岡県平尾台青龍窟の実験計測によって、洞窟の 3次元概形モデルをリアルタイムで作成した。

直近の課題として、移動プラットフォームについては、傾きセンサーやカメラの導入、ロボットの防水加工や各種機器の配置・搭載方法(固定方法)を検討する。計測方法については、センサーの死角領域の解消、計測点の間隔距離を計測するシステムの開発が挙げられる。現有の LRF の有効出力距離よりも最大断面径が大きい「洞口ホール」を一括計測するため、有効出力距離の大きい機種への換装を検討する。画像については、全センサーのデータを反映させた 3次元概形モデルの生成、ポイントクラウド(点群)モデルからワイヤーフレームモデルやサーフェスモデルへの変換処理が挙げられる。

9. 今後の展開

現有の LRF 計測システムで計測可能な横穴洞窟には、長崎県西海市の七釜鍾乳洞群(清水洞、龍王洞、測ヶ洞など)、同県五島市の溶岩チューブ群(野穴(のあな)、井坑(いあな)、先不知井坑(さきしらずのいあな)¹⁴⁾¹⁵⁾がある。また、縦穴洞窟の候補地として、平尾台カルストの牡鹿洞¹²⁾、井坑の天窗(skylight)が挙げられる。これらの計測と 3次元概形モデルのリアルタイム生成の実験を行う。

非水中領域プロジェクトの目標である、縦穴洞窟へのアプローチ、縦穴探索、横穴探索の連続ミッション実現に向けて、ミッション要素の研究・実証を行う。

謝辞

青龍窟の予備調査と計測実験を実施するにあたり、苅田町教育委員会並びに平尾台自然観察センターにご理解いただきました。感謝申し上げます。

本研究は本校電子制御工学科のご支援のもとに進めることができました。感謝致します。本校電子制御工学科の長川幸司君をはじめ本校サイエンス部の有志学生や OB の皆さんには、実験資材の仮組みテスト、機材運搬、回収作業等で大変お世話になりました。ありがとうございました。

参考文献

- 1) J.W.Ashley et al.:
Lunar pits: Sublunarean voids and the nature of Mare emplacement,
42nd Lunar and Planetary Science Conference #2771.
Lunar and Planetary Science Institute, 2011
- 2) Junichi Haruyama, et al.:
Lunar holes and lava tubes as resources for lunar science and exploration,
in *Moon: Prospective Energy and Material Resources*,
Ch. 6, pp. 140 -164, ed. by Viorel Badescu,
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.
- 3) W. Whittaker,
**Technologies Enabling Exploration of Skylights,
Lava Tubes and Caves,**

NASA Innovative Advanced Concepts
(NIAC) Phase I, 2011-2012

National Aeronautics and Space Administration
GRANT NUMBER: NNX11AR42G

4) 春山純一, 久保田孝, 河野功, 大槻真嗣, 今枝隆之介,
月惑星の縦孔・地下空洞探査: その意義,

第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集 2F02,
2013 年

5)河野功 他

月惑星の縦孔・地下空洞探査:

宇宙ロボットによる探査戦略,

第 57 回宇宙科学技術連合講演会講演集 3F03,
2013 年

6)河野功, 春山純一 他

月惑星の縦孔・地下空洞探査を実現する宇宙ロボット技術,
電子情報通信学会

宇宙航行エレクトロニクス研究, 2014 年

7) 河野功, 春山純一, 香河英史, 神澤拓也,
加藤裕基, 中島真理,

月惑星の縦孔・地下空洞探査システムの研究,

第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 2K17,
2014 年

8) 杉浦さゆり, 大槻真嗣, 久保田孝,

電力供給を考慮した月惑星縦孔探査に関する研究,

第 58 回宇宙科学技術連合講演会講演集 1H05,
2014 年

9) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝,

原田明,福岡聡紀:

徳之島浅間湾屋のウンブキ水中洞窟における

ロボット探査とソナーによる形態計測の予備実験

佐世保工業高等専門学校研究報告

第 51 号, pp19-27, 2014 年

10)眞部広紀, 前田貴信, 井手雄太, 市丸智裕,

地上移動型ロボットを使用した洞窟計測システムの開発
と三次元モデル,

第 40 回日本洞窟学会学術講演会(七釜大会)

講演要旨集 pp19-20, 2014 年

11) 眞部広紀, 前田貴信, 市丸智裕, 井手雄太,

飛行ロボットを用いた洞窟測量に関する基礎研究

—小型計測システムの開発と 3 次元環境地図作成—,

第 40 回日本洞窟学会学術講演会(七釜大会)

講演要旨集 pp20-21,2014 年

12) 横田直吉退職記念出版会編
平尾台の石灰洞,

日本洞窟協会, 1982 年

13) 浦田健作,

洞窟調査. 苅田町教育委員会編:

等覚寺修験道遺跡群調査概報

—福岡県京都郡苅田町等覚寺所在遺跡群の調査報告—

苅田町文化財調査報告書第 27 集, pp64-79, 1996 年

14) 川原 歴:

富江熔岩燧道の研究,

地球, vol. 2, pp. 664-673, 1924

15) 松本徂夫他:

長崎県福江島富江半島熔岩トンネル

—とくに地質・形態および二次鉱物生成物について—,

洞窟研究, no. 4, 山口ケイビングクラブ,

秋吉台科学博物館, 1971