

マルチコプター（ドローン）を活用した縦穴洞窟の形状計測*

前田貴信** 眞部広紀***

Virtual Cave Shape Measurement System using Multicopter "Drone"

Takanobu MAEDA, Hiroki MANABE

Abstracts

Using a multicopter "drone" was proposed to measure the shape of the vertical cave. The measurement equipment which tried weight saving was mounted on the multicopter. A result of the measurement at a actually vertical cave "Ojikado" was shown in this paper.

Key Words: vertical cave, multicopter, 3D mapping, LRF, compact measurement system

1. はじめに

最近、「ドローン」と称されるラジコン飛行機が報道などで取り上げられて話題になっているが、有効活用した場合のメリットは計り知れない。例えば地域紹介などプロモーションビデオ撮影用として、火山噴火口の様子や災害現場の空撮による調査観測など¹⁾、従来は危険性、2次災害の恐れなどから撮影・調査が困難な場所での運用が可能となった。また、移動式の防犯カメラとして、さらには離島などへの物資輸送用としてなど、様々な用途が考案され注目を浴びている。筆者らも2年前からいわゆるドローン、正式にはマルチコプターを用いた洞窟の内部形状を計測システムの開発に取り組んでいる²⁾。図1に実際に使用したマルチコプター(dji社 phantom)の写真を示す。洞窟の調査は、地理学や地質学のみならず、生物学、水文学、気象学などにおいても注目されている。さらに最近では、月や火星に存在が確認されている洞口(縦穴および連結する横穴)を調査し、それら天体での生命やその痕跡を探る研究対象として、地球外天体の洞窟調査への期待も高まっている³⁾⁴⁾

これまでに、ローバー型移動ロボットによる洞窟形状の計測・調査作業は行ってきたが⁵⁾、人やロボットが移動できない高所にある横穴や、縦穴洞窟の形状調査は困難であるため、このような洞窟内を計測するためには、移動に接地を要さず、かつ垂直方向に移動可能なマルチコプターが有利であると考えたためである。

この縦穴洞窟の計測は国内外において初の試みで、実現できれば洞窟調査および関連する研究の発展に、大きく貢献することになる。本稿では、専攻科生および卒業研究生が実施したマルチコプターに搭載が可能な小型形状計測システムの開発と計測実験に関して報告するとともに、マルチコプターの有効な活用法である計測の手法について述べる。

2. マルチコプター搭載用小型計測装置の開発

2.1 洞窟形状の計測調査の有用性とその方法

洞窟調査において重要な事は、基本図として使用可能な測量図を作成することである。これは、その後の調査を円滑に進め、かつ遭難や転落等の事故を未然に防ぐためである⁶⁾。従来、人の手作業で行われていた洞窟内部の計測をより安全に行い、かつ人が進入しにくい箇所での計測を実現するために筆者らは研究を実施してきた。その手法は、レーザ測域センサ(Laser Range Finder, LRF)と呼ばれる、レーザ光を利用した測量機器で行う。レーザ測域センサ(以下、LRF)は、1回の計測でセンサ内のレーザ発振器からレーザ光を扇型に一定角度ごとに走査(スキャン)し、その



図1 計測装置を搭載したマルチコプター

* 原稿受付 平成27年10月21日

** 佐世保工業高等専門学校 電子制御工学科

*** 佐世保工業高等専門学校 一般科目

走査平面内にある物体までの距離とレーザの照射された方向の角度値を、1回または連続して出力する、光走査型距離計測センサである。この LRF を用いることで、センサの計測面内にある物体の距離・形状に関する平面距離画像を作成することができる。使用する LRF (北陽電機 URG-04LX-UG01, 図 2) は、走査時間 100ms に最大 240 度を走査することで周囲の形状を計測する。このような特徴から、LRF は測量だけでなくロボットの搭載してロボットの安全確保と経路判断など広く用いられている。図 3 に LRF による周辺形状の計測例を示す。周辺形状の外形は計測できているが、レーザ光の性質により手前にある物体の後方にある物体は死角となり計測できない。しかしカメラ映像と画像処理による計測に比較し、洞窟内のような暗い空間でも形状を計測できるメリットがある。そこで、平成 25~26 年度に専攻科生 2 名 (市丸智裕, 井手雄太, 平成 27 年 3 月卒) が特別研究でローバ型移動ロボット (車輪駆動の移動ロボット) で横穴の洞窟調査と平行して、マルチコプターに搭載して縦穴の洞窟の形状計測を実現させるシステムの開発に取り組んだ。

2. 2 計測装置の軽量化・無線化

一般にマルチコプターは搭載重量 (ペイロード) が低く、計測用の装置も必然的に小型軽量である必要が



図 2 レーザ測域センサ URG-04LX-UG01

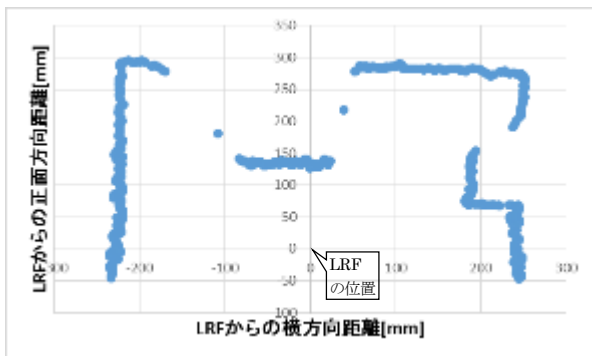


図 3 LRF による周辺形状計測例

ある。マルチコプターに搭載するセンサは、前述の LRF だけではなく、マルチコプターの高度を計測する気圧センサ (高度により気圧が変化することを利用)、およびマルチコプターの向き・進行方向を把握するためのジャイロコンパス (地磁気を計測) が必要である。気圧センサはマルチコプター高度を変えてその高度での形状を計測するために、ジャイロコンパスはマルチコプターの向きを考慮してレーザ測域センサで取得した形状の角度を補正するためである。

さらに、これらを制御しデータを取得するマイコン、マイコンやレーザ測域センサ用の電源が必要である。また、レーザ測域センサ URG-04LX-UG01 は仕様上パソコンの USB ポートに接続して利用するため、小型の Windows パソコンと電源も必要となる。図 4 に検討した計測装置の構成図を示す。実際には、図 1 のようにマルチコプターの上部に LRF, それ以外は下部の脚部に取り付ける。

市販されている LRF でもっとも軽量の URG-04LX-UG01 ですらその重量は 140g で、これだけでもマルチコプターには負担がかかるが、同等の機能を持ちつつ軽量の LRF が存在せず、これ以上は軽量化できないため、これ以外のものを極力軽量で実現できるように、部品の選定を行った。

- ・レーザ測域センサ URG-04LX-UG01 140g
- ・Arduino UNO (センサ)
- ・prote type shield (Arduino 用汎用基板)
- ・気圧センサ
- ・ジャイロコンパス 以上合計 50g
- ・スティック PC Diginous PC 80g
- ・モバイルバッテリー (PC 用) 94g
- ・USB ケーブル×2 50g
- ・その他, 取り付け板, 針金など

以上の重量は合計 404g であった。一方、マルチコ

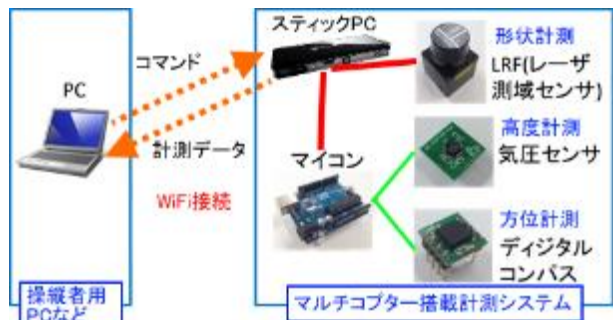


図 4 マルチコプター搭載計測システム

プターPhantom のペイロードは約 400g と、上記のシステムの重量は搭載できる重量を僅かにオーバーしている。しかし、実際に搭載して飛行実験を実施したところ、飛行時間はカタログスペック 23 分に対して 15 分程度、操縦性に関しては、操縦に熟練した学生によると、降下時に注意を要するが十分操縦できる、ということであった。そこで、まずはこのシステムで実際に計測を行ない、実用性を検証した。

3. マルチコプターを用いた計測実験

3. 1 縦穴洞窟での計測

前述のシステムの完成が専攻生の特別研究論文提出よりも後であったため、当別研究発表会終了後の平成 27 年 2 月、北九州市・平尾台にある牡鹿洞と呼ばれる縦穴洞窟で計測実験を行った。平尾台には 200 以上の洞窟（鍾乳洞）が存在し、牡鹿洞は観光用に開放されている、長さ約 400m、高低差約 50m の洞窟である⁷⁾。図 5 にマルチコプターで上空から撮影した牡鹿洞入り口、および図 6 に内部で撮影した洞窟の様子を示す（この時、カメラを搭載していたため、計測システムは重量の関係で搭載していない）。また、マルチコプターが洞窟内を飛行している様子を図 7 に示す。



図 5 牡鹿洞・洞口上空（マルチコプター撮影）



図 6 牡鹿洞内部（マルチコプター撮影）

計測はマルチコプターを気圧センサによる高度計測で 1m ずつ上昇させて LRF で周囲の形状を計測した。その際、LRF は全周を計測できないため（最大で 240 度）、マルチコプターを 180 度旋回させ同じ高度で 2 回計測し、後ほど合成し 360 度計測ということにした。

3. 2 計測結果と 3D 表示

計測した結果をグラフ化したものを図 7 に示す。図では、気圧センサで計測した洞窟の底面より 9m 地点での洞窟形状を示し、縦穴を水平に輪切りにした図になっている。比較できる図がないため、洞窟形状を正確に計測できたか評価できないが、幅約 9m 奥行き最大で 6m のやや横長の形状であることがわかる。

ただし、図中には破線枠で示す不規則な点があり、形状が不完全である。以下、その原因を示す。

a 部分…計測原点＝マルチコプターの場所に点が集中している。これは、マルチコプターからの距離が 0m と計測したデータが複数存在しており、LRF の測定距離 4m を越えたためと推測される。

b, c 部分…マルチコプターを 180 度旋回させ 360 度分の計測を行ったが、旋回は操縦者の目測で行ったために正確に 180 度回転せず、かつマルチコプターそのものも旋回動作時に位置がずれた可能性がある。そのため、デジタルコンパスによる正確な方位をもとにグラフ化すると、未計測の範囲（b 部分）と計測範囲が重なった範囲（c 部分）が存在している。

d 部分…計測データのズレが生じている。これは洞窟表面の状態によって生じる誤差と考えられる。

以上のように、計測が不完全ではあるが、洞窟の概形はわかると考え、1m ずつ高度を変化させて計測し

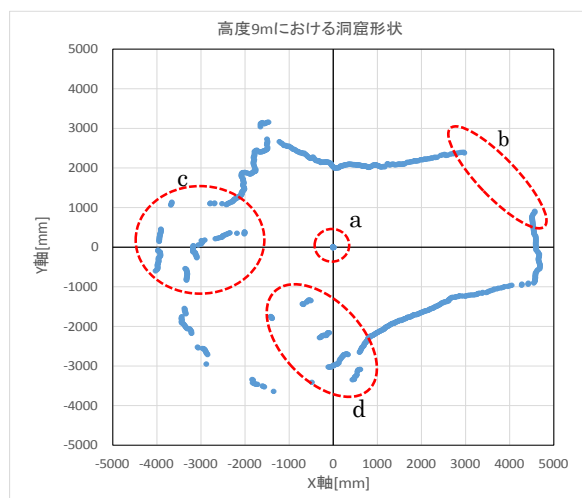


図 7 洞窟形状の計測例（底面から 9m）

た洞窟の形状を、3D表示したものを図8に示す。左図はほぼ真横方向から、右図は斜め上方から見た洞窟の形状である。隠線処理などの立体表示に適した処理を施さずに点を描画しただけであるため、おおまかにしか洞窟の形状を見ることはできないが、パソコンの画面上で視点を動かして見ることができるなど、平面上の地図では見ることができない操作が可能である。

4. 今後の課題とまとめ

前章の a～d 部分の改善、表示方法の工夫などはすでに平成 27 年度の卒業研究にて対応を検討しているため、詳細は次報にて紹介する。そのほか、一般に屋外であれば、GPS により現在地の座標および高度を知ることが簡単にできるが、地下や洞窟内など GPS 衛星からの信号を受信できない場所ではこの手法が利用できない。そのため、マルチコプターが計測した位置のずれが計測結果に影響する。そこで、例えば計測した LRF の距離データから点群マッチングによる自己位置推定を行う必要がある。最終的には SLAM(Simultaneous Localization And Mapping)と呼ばれる 3次元環境地図構築を行ない⁸⁾、洞窟の詳細な測量図作成を目指す。

本稿では、マルチコプターを活用した洞窟形状の計測に関して、計測システムの製作および実験結果の評価と課題を述べた。課題を解決することにより、洞窟形状の計測にとどまらず、マルチコプターの有効活用として、提案できるものと考えている。

参考文献

- 1) 井上公, 内山庄一郎, 鈴木比奈子, 自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術, 防災科学技術研究所研究報告 第 81 号, pp.40-53, 2014
- 2) 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—, 日本洞窟学会第 40 回大会(七釜大会)プログラム・講演要旨集, pp.20-21, 2014
- 3) 徳山工業高等専門学校, 月の縦孔・溶岩チューブ探査機「Diana」
- 4) 新井真由美, 火星地下居住構想とラン藻の活用, Int. J. Microgravity Sci. Appl., Vol.30, No.2, pp.105-110, 2013
- 5) 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生成, 日本洞窟学会第 40 回大会(七釜大会)プログラム・講演要旨集, pp.19-20, 2014
- 6) 荻田町教育委員会, 荻田町文化財調査報告書 第 27 集, 等覚寺修験道遺跡群 抜刷, pp.64-65, 1996
- 7) 平尾台自然観察センター HP, <http://www.hiraodai.jp/hnoc/index.html>
- 8) 倉爪亮・戸畑享大・村上剛司・長谷川勉: CPS SLAM の研究—大規模建造物の高精度三次元幾何形状レーザ計測システム—, 日本ロボット学会誌, vol.25, No.8, pp.61-98, 2007

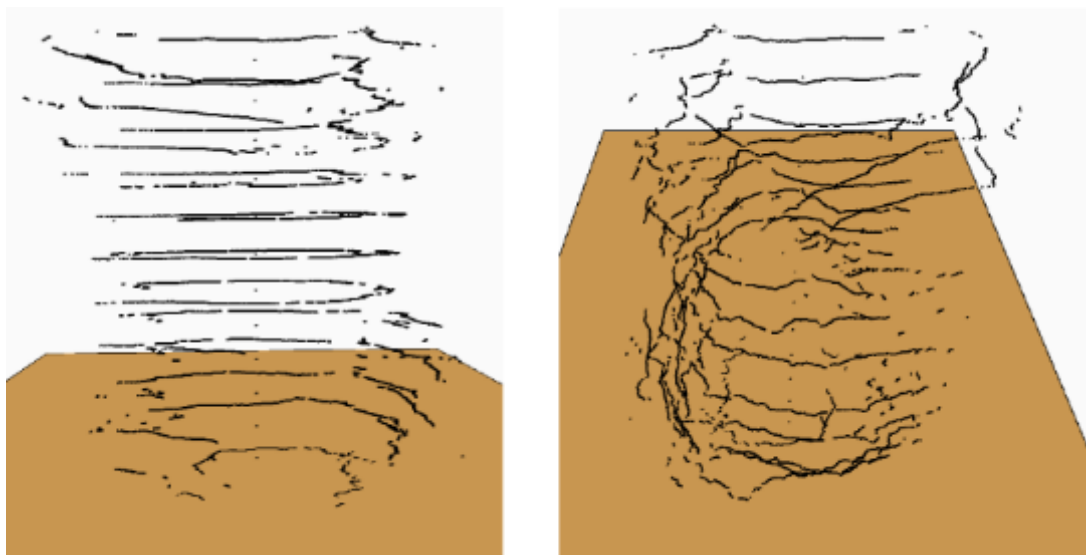


図8 マルチコプター搭載計測システムによる縦穴洞窟の形状を3Dで表示した例