

ドローンによる豎穴の 3D レーザースキャナ測定と SfMMV 写真測量 ～恵藤穴・こむそう穴・はる穴～

眞部 広紀**1, 久間 英樹**2, 梅木太嗣**3, 岡本 渉**4,
村上 崇史**5, 堤 紀文**6, 堀江潔**1, 大浦 龍二**1

Drone Laser Measurement and SfM/MVS Photogrammetry for Vertical Caves ; - Etoh -Ana, Komusou-Ana and Haru-Ana -

Hiroki MANABEE**1, Hideki KUMA**2, Futoshi UMEKI**3, Wataru OKAMOTO**4,
Takashi MURAKAMI**5, Norihumi TSUTSUMI**6, Kiyoshi HORIE**1, Ryuji OHURA**1

Key words: Drone, UAV, Laser Scanner Measurement, SfM/MVS Photogrammetry, Vertical Cave, 3D

Abstracts

In this paper, we discuss drone methods of laser scanner measurement, photogrammetry and 3Dmodels for using drones (UAV; Unmanned Aerial Vehicle).

1. はじめに

洞窟の複雑な立体的形状を精細に把握して表現するためには3次元モデル(3Dモデル)が適している。自然光の入らない洞窟の計測や探査プラットフォームのSLAM (Self Localization and Mapping、自己位置推定と環境地図作成)をメインテーマとする本研究グループ¹⁻¹⁶⁾にとって、TLS (Terrestrial Laser Scanner、地上レーザースキャナ) 測量による点群データ取得と3Dモデル化は主要な研究基盤である。近年、SfM多視点ステレオ(SfM/MVS :Structure from Motion/ Multi-View Stereo) 技術とドローン(UAV: Unmanned Aerial Vehicle)を使用した空中写真測量により、高低差が大きい地形の詳細な3Dモデルが簡単に作成できるようになった¹⁷⁻²¹⁾。本研究グループは豎穴(縦穴とも記す)とその周辺地形を探査・計測の対象としたドローン写真測量を進めている。

本稿では、山口県秋吉台「恵藤穴」、福岡県平尾台「虚無僧穴」「はる穴」において実施した、ドローン(画像1)を使用した写真測量と搭載スキャナ装置によるレーザー測定の実証実験と3Dモデルを紹介する。また、縦穴の側壁・底部の欠測解消についても検討する。



画像1 上左、下左 : DJI 社 Phantom4Pro(+)-Ver.2.0

上右、下右 : DJI 社 Matrice600

+ レーザー測定装置

* 原稿受付 令和元年10月31日

**1 佐世保工業高等専門学校 一般科目

**2 松江工業高等専門学校 電子制御工学科

**3 松江工業高等専門学校 電子制御工学科 5年

**4 名古屋大学 全学技術センター

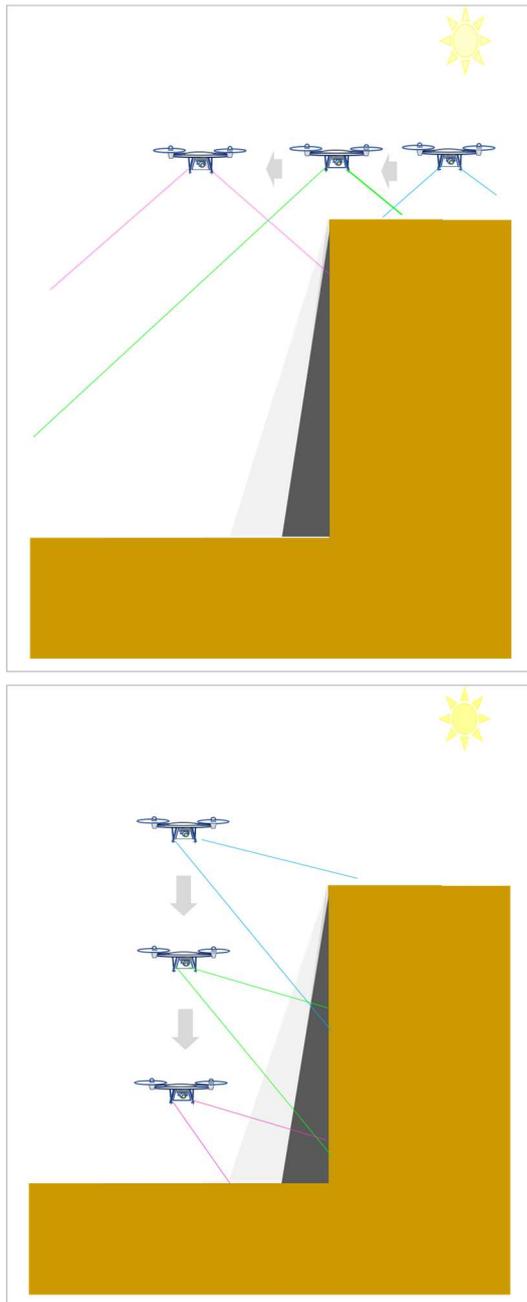
**5 美祢市教育委員会

**6 ハートランド平尾台株式会社 平尾台自然の郷

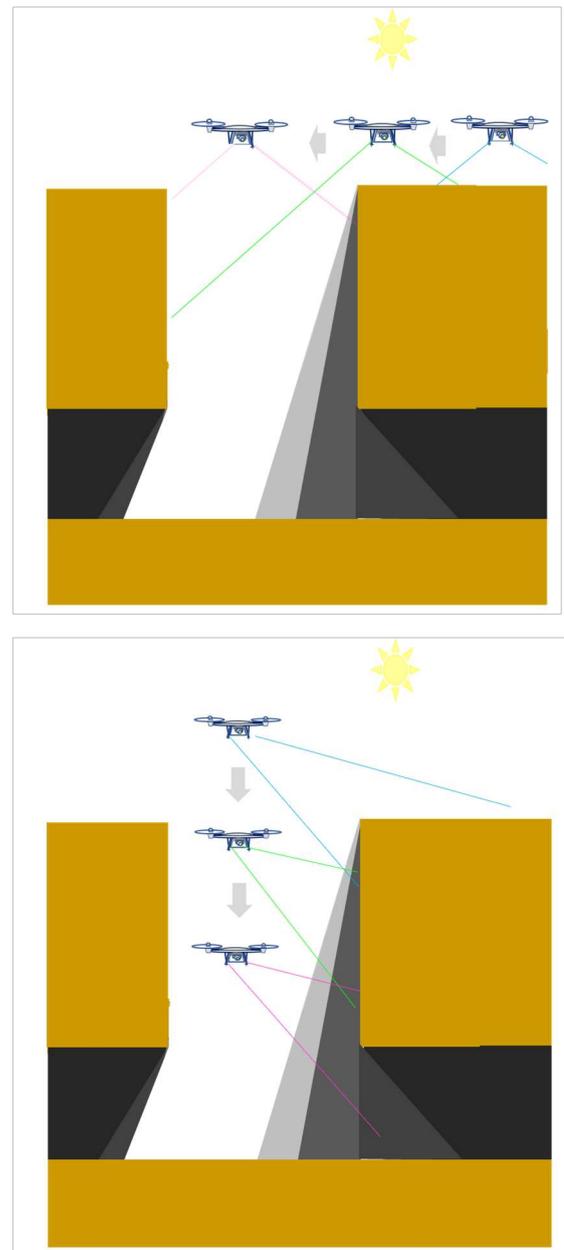
2. 背景

ドローンと SfM/MVS 写真測量技術のおかげで、地表踏査や測量が困難な山地や崖の詳細な 3D モデルを作成できるが、水平方向のスライド撮影は高低差のある場所には不十分で、垂直方向にスライドさせた撮影画像も必要になる（画像 2）。堅穴を崖に囲まれた地形または「微地形」とみなすのは自然な発想であり、山上・崖上の大規模遺跡のドローン写真測量プロジェ

クト²²⁾を進める本研究グループの調査手段・ノウハウを堅穴に利用できる。しかしながら、堅穴においてドローンを垂直方向に飛行させることは、底部への降下進入飛行を伴う（画像 3）。深く入るほど地上開度が小さくなり、GPS の測位データをもとにした制御方法は使用できなくなるため、実験では洞口の直上以上の飛行高度に設定することにした。



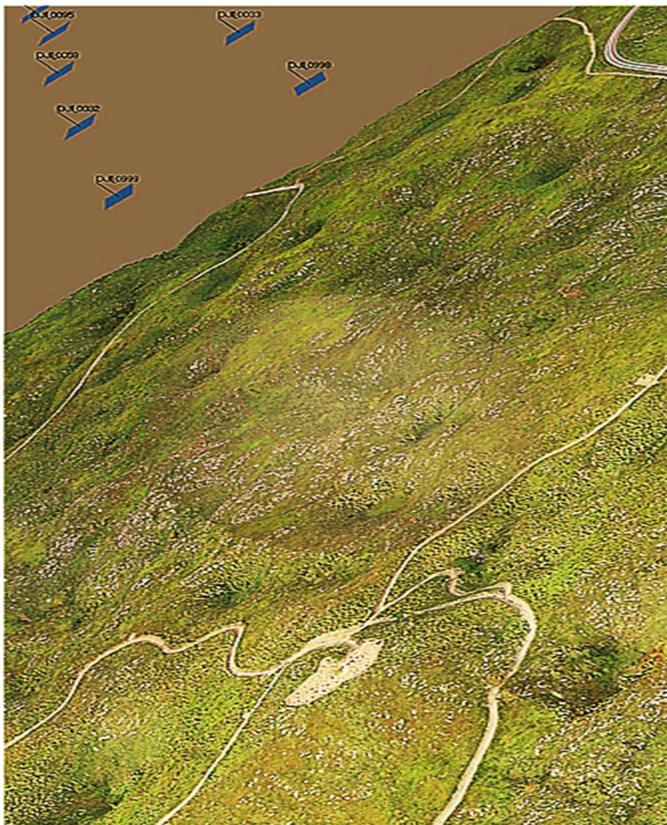
画像 2 崖の写真測量撮影模式図
上：水平方向、下：垂直方向



画像 3 堅穴の写真測量撮影模式図
上：水平方向、下：垂直方向

3. 写真測量実験

本節では、ドローンによる撮影画像データから SfM/MVS 写真測量処理で作成した 3D モデルを紹介する。カルスト地表地形の秋吉台（画像 4）、平尾台（画像 5）、「恵藤穴」のドリーネ（画像 6）では水平方向に移動する領域撮影モード、「虚無僧穴」（画像 7）をの洞口では垂直移動を伴う周回撮影モードを使用した。



画像 4 秋吉台

上：ドローンカメラ撮影

下：3D モデル（Agisoft 社 Photomodeler）



画像 5 平尾台

上：ドローンカメラ撮影

（「虚無僧穴」上空から「牡鹿洞」方向）

下：3D モデル（Agisoft 社 Metashape）



画像6 秋吉台「恵藤穴」

上：ドローンカメラ撮影

(ドリーネ斜面の「恵藤穴」洞口)

中：ドローンカメラ撮影（「恵藤穴」洞口）

下：3Dモデル (Agisoft 社 Photomodeler)



画像7 平尾台「虚無僧穴」

上：ドローンカメラ撮影

(ドリーネ斜面の「虚無僧穴」洞口)

中上：ドローンカメラ撮影（「虚無僧穴」洞口）

中下、下：3Dモデル (Agisoft 社 Metashape)

4. 検討 (その1)

洞口の口縁部に接近しても、堅穴の奥部を精細に撮影することは難しい。奥に太陽光が差し込んでいても、側壁や底部のほとんどの部分は暗いままである(画像9上)。写真測量は、環境光(太陽光)が物体に反射してカメラの撮像素子に入射して得られた画像をもとにした受動的なセンシング技術である。堅穴の底では環境光(太陽光)が入る箇所は限

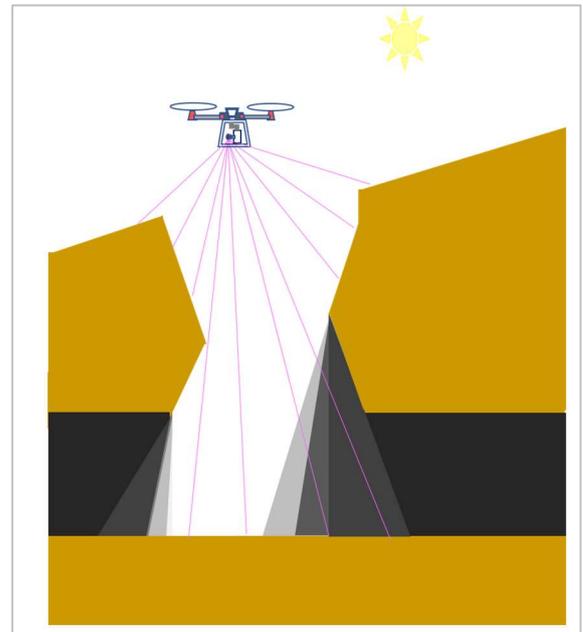


画像8 福岡県平尾台「牡鹿洞」

上：洞口口縁部から底部方向
下：底部から洞口口縁部方向

定的で、側壁や底部の計測(写真撮影)は困難である(画像9下)。まして、洞口上空に位置するドローンのカメラでは、側壁・底部のほとんどは撮影できず欠測する。その結果、洞口周辺地形と口縁部付近しか計測できない(画像7)。

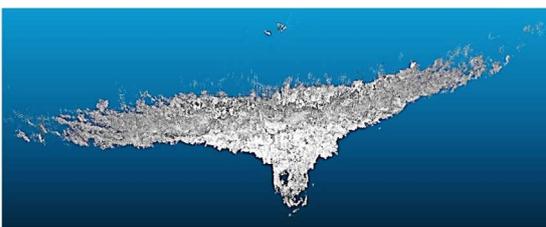
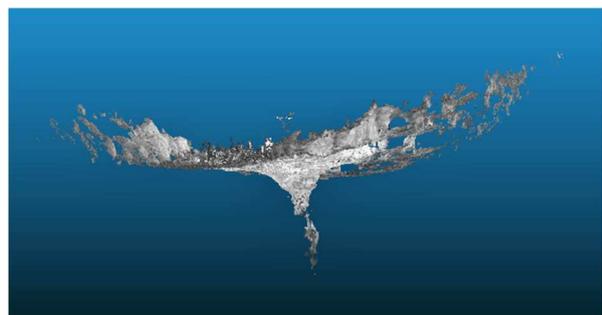
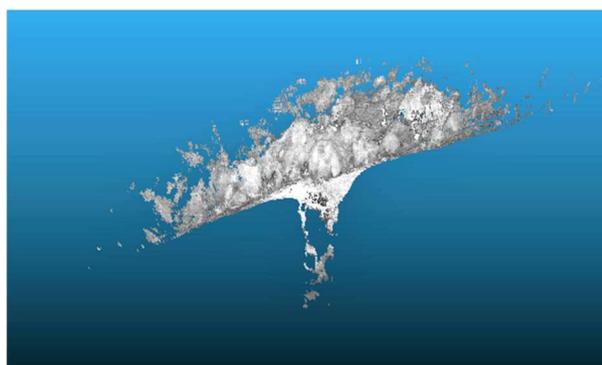
一方、レーザー測量は測定装置が発射したパルスレーザー光が物体に反射して計測装置に戻って来た時間・強度データを使用する能動的なセンシング技術である。装置本体がレーザーを照射するので、環境光の強弱の影響は少ない。縦穴上空に位置するドローンからパルスレーザー光を堅穴に照射すれば、側壁・底部からも十分な反射量を見込むことができる(画像7)。そこで、本研究グループは、堅穴のドローンレーザー測定プロジェクトを開始した。



画像9 ドローンレーザーメータ測定模式図

5. レーザーメータ測定実験

本節では、松江工業高等専門学校電子制御工学科久間研究室が実施した、レーザーメータ測定装置を搭載したUAV(ドローン DJI社製 Matrice600)の計測実験と「CloudCompare」による3D点群モデルを紹介する(画像10~13)。



画像 10 秋吉台「恵藤穴」
上：レーザー測定中
中上、中下、下：3D 点群モデル

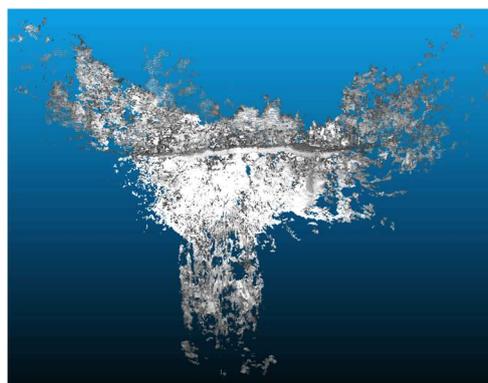
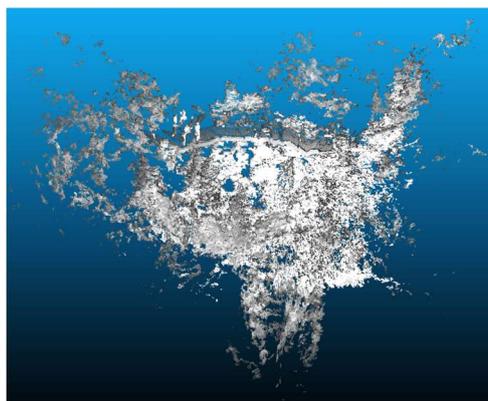
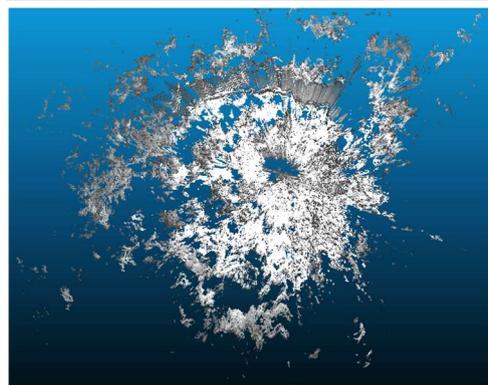
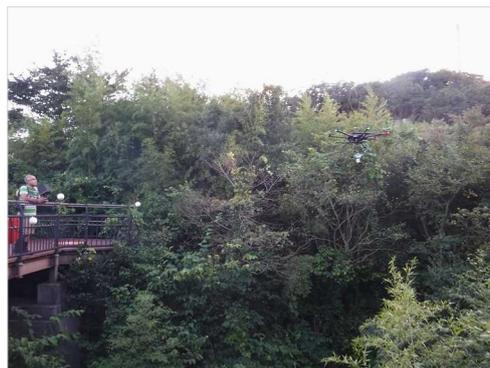
画像 11 平尾台「虚無僧穴」
上：レーザー測定中
中上、中下、下：3D 点群モデル



画像 12 平尾台「はる穴」

上：ドリーネデッキ全景（ドローン撮影：堤紀文）

下：デッキ直下の洞口



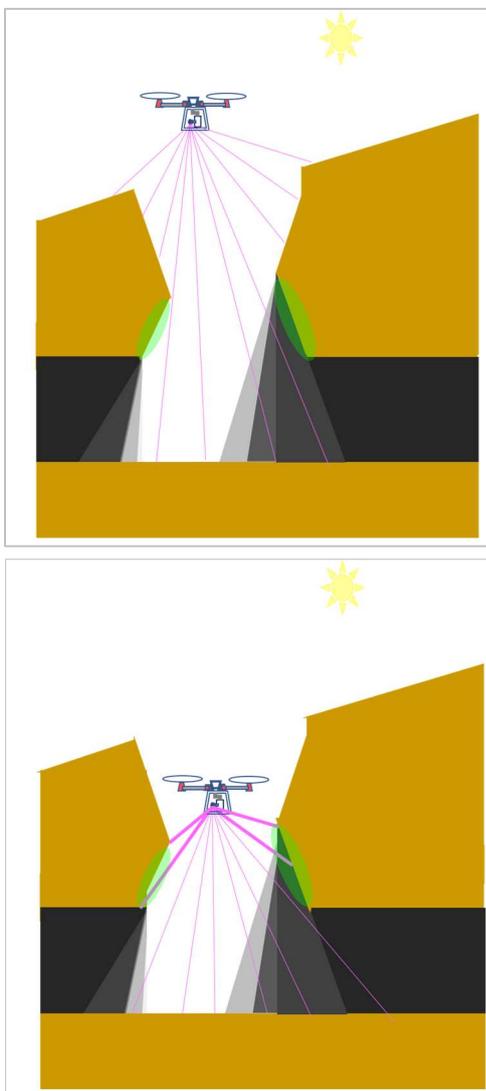
画像 13 平尾台「はる穴」

上：レーザー測定中

中上、中下、下：3D 点群モデル

6. 検討 (その2)

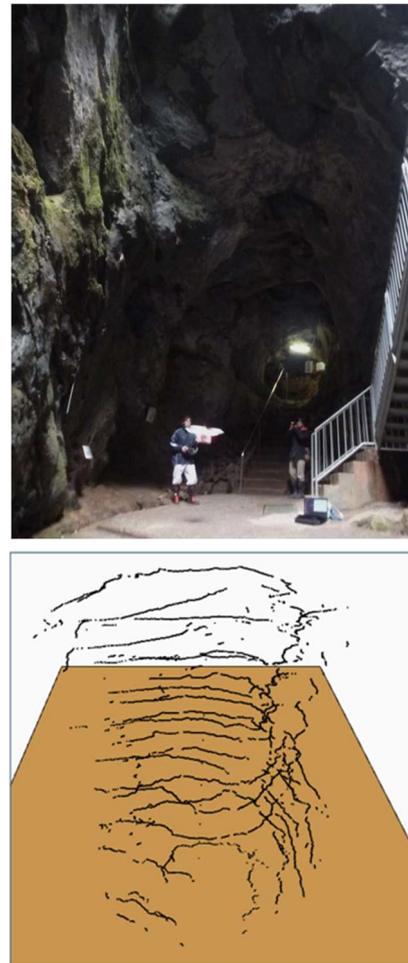
前節の3Dモデルの曲面(画像10,11,13)において、地表面の口縁部から漏斗状に穴が下方に伸びていることは、測定装置のパルスレーザー光が堅穴の深部に届いている証左である。下方に伸びている部分の曲面の空隙は、十分な量のパルスレーザー光が届いていない欠測箇所が存在することを意味する。これらの欠測箇所は測定位置を低くしていくことにより解消する見込みがある。測定装置をプラットフォームのドローンから分離しない場合は、ドローンを堅穴内に進入降下させる(画像14)。



画像14 上：上空位置の欠測箇所(緑色部分)
下：欠測箇所の解消

7. 今後の目標と課題

堅穴に深く入るほど地上開度が小さくなり、GPSの測位データをもとにした位置制御方法は使用できなくなるため、「非GPS」が前提になる。LRF搭載ドローンによる手動操縦垂直計測飛行の予備実験は佐世保工業高等専門学校電子制御工学科前田研究室が2015年(平成27年)に平尾台の「牡鹿洞」で実施している(画像15)。



画像15

上：レーザー測定中
下：3D点群モデル

堅穴内におけるドローンの垂直移動飛行を実現するために、第一段階の目標は側壁衝突予防技術（ドローンを側壁から一定距離以上に位置させる方法）とする。第二段階は、上空からの堅穴の深淺測定、第三段階はドローンのSLAMに設定する。

謝辞

実験場所として平尾台自然の郷「ドリーネデッキ」をご提供いただいた株式会社ハートランド平尾台に深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 宮本憲
水中洞窟探査ロボットの検証実験と予備調査,
佐世保工業高等専門学校研究報告第 46 号
pp.43-48 (2009)
- 2) 眞部広紀, 浦田健作, 長嶋豊他
白滝の穴水中洞窟における探査ロボットとサーベイシステムの検証実験
佐世保工業高等専門学校研究報告第 47 号
pp.39-44 (2011)
- 3) 眞部広紀, 浦田健作, 須田淳一郎
球磨山地カルストの水文地質予備調査
佐世保工業高等専門学校研究報告第 47 号
pp.45-50 (2011)
- 4) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他
岩戸洞水中洞窟におけるロボット探査と球磨カルストの水文地質予備調査
佐世保工業高等専門学校研究報告第 48 号
pp.33-44 (2011)
- 5) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他,
水中洞窟系の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 49 号
pp.51-64 (2013)
- 6) 眞部広紀, 前田貴信, 浦田健作他
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)

- 7) 前田貴信, 眞部広紀
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
佐世保工業高等専門学校研究報告第 52 号
pp.8-11 (2015)
- 8) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 染谷孝他
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
pp.19-27 (2015)
- 9) 眞部広紀, 前田貴信, 久間英樹, 新部一太郎他,
洞窟探査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)
- 10) 眞部広紀, 前田貴信, 長嶋豊, 久間英樹, 他
ロボット探査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
pp.14-27 (2016)
- 11) 眞部広紀, 長嶋豊, 浦田健作, 山本祐二, 近藤正義, 岡本渉,
宮古諸島下地島の西沿岸域におけるアンキアライン陥没ドリーネ群の予備調査
佐世保工業高等専門学校研究報告第 53 号
pp.5-13 (2016)
- 12) 眞部広紀, 前田貴信
溝ノ口洞穴におけるレーザー計測とロボット探査の予備実験
佐世保工業高等専門学校研究報告第 54 号
pp.15-20 (2018)
- 13) 前田貴信, 眞部広紀, 山下寛文, 富永敦士
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
佐世保工業高等専門学校研究報告第 54 号
pp.10-14 (2018)
- 14) 眞部広紀, 稲川直裕, 山田努, 長嶋豊
沿岸域カルストのアンキアライン水文系におけるROV調査法の検討
佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号
pp.56-65 (2019)

15) 眞部広紀, 稲川直裕, 山田努, 岡本渉, 堀江潔他,
山地カルストの洞窟水文系における

ROV と UAV を使用した調査法の検討

佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号

pp.76-92 (2019)

16) 眞部広紀, 松見豊, 岡本渉, 稲川直裕, 山田努,他
水没した陥没ドリーネのアンキアライン水文系に

おける山地カルストの洞窟水文系における

UAV-ROV 調査法の検討

佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号

pp.66-75 (2019)

17) 早川裕式,・小花和宏之

小型無人航空機を用いた **SfM** 多視点ステレオ写真
測量による地形情報の空中計測

物理探査第 69 巻第 4 号 (2016) pp297-309

18) 大崎康弘

崖海岸における小型無人飛行機 (ドローン) を
活用した侵食の実態調査

http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000647939.pdf

国土交通省関東地方整備局

19) 日外勝仁, 倉橋稔幸

UAV による斜面岩盤写真に対する

背景差分法の適用可能性について

CERI 寒地土木研究所月報第 780 号技術資料

20)日外勝仁, 角田富士夫, 倉橋稔幸

急崖岩盤斜面の地形モデル構築に適した

UAV の撮影方法等について

CERI 寒地土木研究所月報第 791 号技術資料

21) 山崎秀策, 日外勝仁, 倉橋稔幸

UAV-SfM による岩盤斜面形状の

計測・モニタリング精度の検証

CERI 寒地土木研究所月報第 793 号技術資料

22) 堀江潔, 眞部広紀, 岡本渉

三次元モデルによる古代山城比較研究試論

—佐賀県武雄市おつぼ山神籠石と

福岡県久留米市高良山神籠石—

佐世保工業高等専門学校研究報告第 55 号

pp.48-55 (2019)