

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：57301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420235

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Underwater/non-underwater exploration robot systems for closed space environment with submergence

研究代表者

真部 広紀 (MABABE, Hiroki)

佐世保工業高等専門学校・一般科目・准教授

研究者番号：10249881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：探検者や科学者が挑んできた洞窟や水中洞窟の無人探査を本研究は目的とする。洞窟は閉ざされた空間環境であり、水中洞窟は開放水面がない閉鎖水面環境である。ロボットの自己位置を推定するには、形状計測と環境地図作成が不可欠である。本研究では、ロボットに搭載したLRFやソナーの計測システムを実際の洞窟・水中洞窟に適用し、3次元モデルを作成して有効性を実証した。無人探査のメリットは安全性・効率性・精密性の向上だけに止まらない。月・火星の表面に数多く発見された縦孔の底部には地下空洞が、氷衛星のエウロパ・エンケラドスの表層下には閉鎖水面環境が確認されている。将来、これらを無人探査するときの要素技術となり得る。

研究成果の概要(英文)：This research aims at unmanned exploration of caves and underwater caves that explorers and scientists have challenged. In order to localization of the robot, shape measurement and environmental map preparation are indispensable. In this research, we apply LRF/sonar measurement systems mounted on robots to caves/underwater caves, and demonstrated effectiveness by creating 3 dimensional models. The merits of unmanned exploration are not only improvement of safety, efficiency, precision. Underground caverns are preserved at the bottom of many vertical holes found on the surfaces of the Moon and the Mars. Overhead environments are surely confirmed under the ice surfaces of the Europa and the Enceladus. In the future, they can be element technologies for unmanned exploration of them.

研究分野：数学(幾何学)

キーワード：洞窟 ロボット 探査

### 1. 研究開始当初の背景

本研究グループでは、少人数で携行・運用可能な低コスト・小型軽量コンパクトな水中ロボットを開発し、藻場や絶滅危惧種沈水植物の撮影実証実験、水中考古学の海底発掘現場での水中撮影実験を行い、水中調査手段としての有効性を示してきた。

環境問題が深刻化している陸水域の地下水系、海水・淡水が地下で繋がる沿岸域のアンキアライン地下水系の水文調査が急務であるが、川・湖沼などの地表水系にくらべると遅滞している。水中洞窟系は地下水系の中でも流量が大きく、広い開放水面がほとんど無い閉鎖水面環境である。潜水作業は海・川・湖沼等の開放水面環境よりも費用対効果が悪くなるため、ダイバーの代替手段として水中ロボットが切望されている。しかしながら、開放水面を前提とする既存の水中ロボット技術・調査手法では対応できる場面は少ない。閉鎖水面環境を無人機で探査する手法が確立すれば、水循環に関係する水文地質学・地下水文学などの分野に貢献できる。

洞窟系においては、地下水に満たされている水中部分(水中洞窟)と満たされていない非水中部分(洞窟)が併存する。水中ロボットでは探査できない非水中部分は、地上移動型ロボットや飛行型ロボットのテリトリーであるが、変化に富む不整地や閉鎖空間環境に対応するには技術的課題が山積している。洞窟を無人機で探査する手法が確立すれば、洞窟学などの分野だけでなく、月や火星表面に発見された縦孔とその底部に推定される地下空洞を無人探査するロボット技術の基礎となる。水中ロボットと非水中ロボットが協同探査する手法が開発されれば、木星の衛星エウロパや土星の衛星エンケラドスなどの氷衛星表層下に広がる閉鎖水面環境を、ロボットで無人探査するための要素技術となる。

### 2. 研究の目的

閉鎖水面環境や閉鎖空間環境においてロボットを自律移動させるために、自己位置推定に必要な周辺環境のセンシングと3次元モデル・マッピング生成の技術を開発する。また、制御信号やデータ信号をロボット間で無線通信するシステムを開発する。

(1) 閉鎖水面環境に対応する水中ロボットの開発(姿勢制御、方位自律航行、水中洞窟断面形状のソナー計測)

(2) 閉鎖空間環境に対応する地上移動型ロボット・飛行型ロボットの開発(姿勢制御、自律走行、洞窟断面形状のレーザー計測)

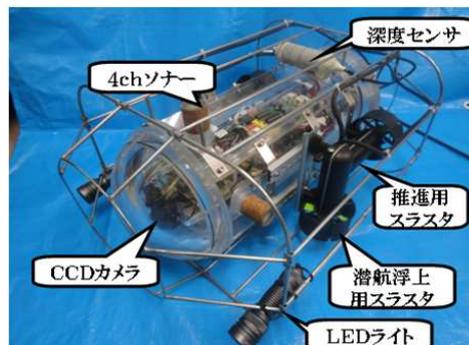
### 3. 研究の方法

上記の(1)(2)の技術開発を並行して行う。製作したロボットシステムの性能検証のために、佐世保工業高等専門学校の無響水槽、体育館や九州大学応用力学研究所の深海機器力学水槽等の屋内施設における運用実

験・評価を準備段階として、現場における実証実験によって有効性を検証する。

### 4. 研究成果

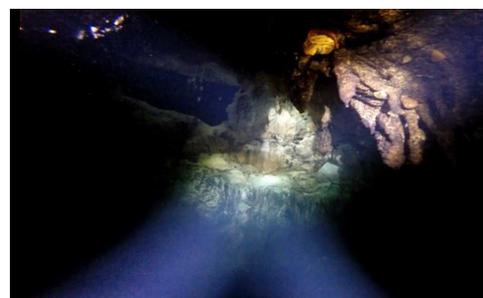
鹿児島県徳之島浅間のアンキアライン水没部「ウンブキ」、福岡県平尾台「不動洞」左洞湧泉、沖縄県宮古島平良「ピキャズ」湧泉において製作した水中ロボットの方位自律航行探査実験を行い、未知の水中洞窟を発見できた。熊本県球磨村「岩戸洞」洞外湧泉と「ウンブキ」では水中ロボットに搭載した4方向ソナー計測実験を行い、水中洞窟の概形をマッピングした。これによって、水中移動型システムの有効性を確認することができた。



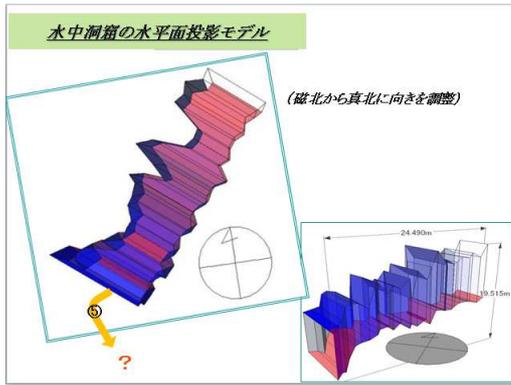
水中ロボット(外観)



「ウンブキ」水中探査実験



「ウンブキ」水中洞窟(鍾乳石)

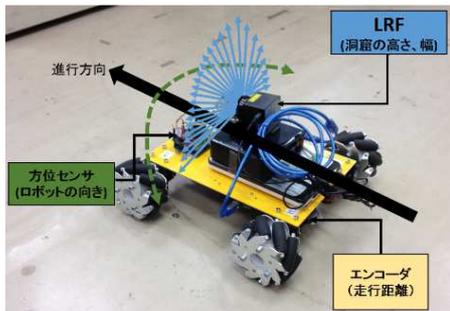


「ウンブキ」水中洞窟の4方向断面モデル



「ウンブキ」水中洞窟のマッピング

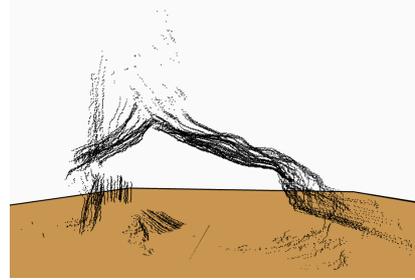
福岡県平尾台「青龍窟」主洞ホール及び下層通路、平尾台「牡鹿洞」洞口底(横穴部分)において、製作した地上移動型ロボットに搭載したレーザー測域センサーによる計測実験を行い、3次元点群モデルを作成した。これによって、地上移動型システムの有効性を確認することができた。また、長崎県西海市「七ッ釜鍾乳洞(清水洞)」、「青龍窟」主洞、「牡鹿洞」洞口(縦穴)において、ドローンの洞窟内飛行実験を行った。「牡鹿洞」洞口ではドローンに搭載したレーザー測域センサーによる計測実験を行い、3次元点群モデルを作成した。これによって、飛行移動型システムの有効性を確認することができた。



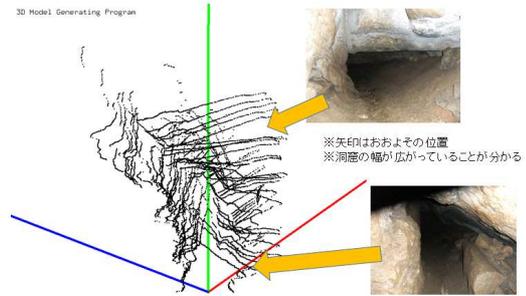
地上移動型ロボット(外観)



「青龍窟」下層通路



「青龍窟」下層通路の3次元点群モデル



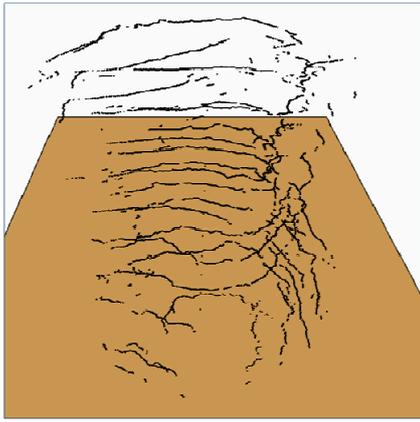
下層通路のモデルとの対応



LRFを装備したドローン



「牡鹿洞」  
洞口(縦穴部分)  
計測実験



「牡鹿洞」洞口(縦穴部分)の3次元点群モデル

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

① 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

ロボット探査の予備実験に使用する天窗・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、査読無、第53号、2016、pp.14-27

② 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、査読無、第53号、2016、pp.5-13

③ 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、査読無、第52号、2015、pp.16-21

④ 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、査読無、第52号、2015、pp.8-11

⑤ 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、査読無、第51号、2015、pp.28-33

⑥ 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、査読無、第51号、2015、pp.19-27

[学会発表] (計 8件)

① 眞部 広紀、長嶋 豊、浦田 健作、染谷 孝、山本 祐二、近藤 正義、白石 香一

ROVを援用した水中洞窟調査(短報)～宮古島平良ピキャズと平尾台不動洞  
日本洞窟学会第42回大会(苅田町平尾台大会)学術講演会、2016年8月20日、福岡県苅田町

② 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年10月31日、高知県香美郡土佐山田町

③ 久間 英樹、眞部 広紀、新部 一太郎、森内 敦、福岡久雄

3次元レーザ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、2015年10月9日、鹿児島県鹿児島市

④ 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)学術講演会、2014年9月6日、長崎県西海市

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3次元モデル生成  
日本洞窟学会第40回大会(七釜大会)学術講演会、2014年9月6日、長崎県西海市

⑥ 眞部 広紀、長嶋 豊、浦田 健作、染谷 孝、原田 明、福岡 聡紀

鹿児島県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  
日本洞窟学会第40回大会(七釜大会)学術講演会、2014年9月6日、長崎県西海市

⑦ 原田 明、長嶋 豊、眞部 広紀、川下 智幸

3Dモデリングを目指した水中洞窟探査用自律型水中ロボットの開発  
ロボティクス・メカトロニクス講演会2014 in Toyama、2014年5月26日、富山県富山市

⑧ 眞部 広紀、浦田 健作、染谷 孝、長嶋 豊

熊本県岩戸洞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  
日本洞窟学会第39回大会(東京大会)学術講演会、2013年11月17日、東京都新宿区

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

真部広紀 (MANABE Hiroki)

佐世保工業高等専門学校・一般科目・准教授

研究者番号：1 0 2 4 9 8 8 1

### (2) 研究分担者 なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

前田貴信 (MAEDA Takanobu)

佐世保工業高等専門学校・電子制御工学科・

准教授

研究者番号：9 0 2 9 0 8 3 2

長嶋豊 (NAGASHIMA Yutaka)

佐世保工業高等専門学校・その他(地域共同

テクノセンター)・特命教授

研究者番号：7 0 1 9 8 3 2 3

### (4) 研究協力者

なし