

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04376

研究課題名（和文）自己位置推定技術とロボット技術を活用した建築環境把握システムの開発および実証実験

研究課題名（英文）Development and Demonstration of a Building Environment Measuring System Utilizing Self-Localization and Robotics Technologies

研究代表者

仁田 佳宏 (Nitta, Yoshihiro)

足利大学・工学部・教授

研究者番号：10318834

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地上走行ロボット(UGV)と飛行ドローン(UAV)、MEMSセンサおよび自己位置推定技術(SLAM)を活用することで、建物内の環境情報を空間として把握する環境把握システムの開発、実用化を目的として行っている。まず、温度成層を乱すことなく3次元的に温度分布を把握する目的で、ドローンによるシステムと提案するUGVと飛行船によるシステムを比較し、提案システムにより、効率よく空間的に温度分布を把握できることを確認している。次に建物屋内の現況把握を目的として、深度カメラを用いた3次元測量システムを提案している。本研究の成果は校舎を対象とした実証実験により有用であることを確認している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、コロナ禍を受けて、重要性が増してきている建物内の環境情報を効率よく把握することを目的として、自動的に屋内環境を空間として把握できる計測システムの実用化を行っている。本研究の成果により、大空間についても、空間的に屋内環境を把握でき、新築建物の性能検査だけでなく、デジタル図面がないような建物についても現況調査をデジタルデータとして行える。また、自己位置推定技術(SLAM)を用いることで、建物内を3次元デジタル測量データとして提供することも可能である。そのため、種々の情報をデジタルデータとして把握できるため、建設DXにも寄与できると考えている。

研究成果の概要（英文）：This research aims to develop and implement an environmental awareness system that can automatically map indoor environments by utilizing Unmanned Ground Vehicles (UGVs), drones, MEMS sensors, and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. Firstly, to achieve a three-dimensional understanding of temperature distribution without disturbing the boundary layer, we compared a system using drones with the proposed system using UGVs and airships. Our results confirmed that the proposed system can efficiently map spatial temperature distribution. Secondly, to grasp the current conditions inside a building, we proposed a three-dimensional surveying system employing multiple depth cameras. The effectiveness of our research has been verified through demonstration experiments conducted in school buildings.

研究分野：建築構造

キーワード：UGV 環境計測 温度分布 MEMSセンサ ロボット 飛行船 SLAM 点群データ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

マルチローターなどの Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を用いることで、従来は把握できなかった高所の情報が、MEMS センサーを用いることで、従来は計測が難しかった種々の情報が、容易にかつ簡便に収集できるようになりつつある。気象観測や防災の分野においては、GPS や GNSS を使用した自律移動可能な UAV を活用し、温湿度、種々のガス濃度など有用な環境情報を取得するとともに、画像も取得するようなシステムが数多く提案され実用化されている。建築分野においても、老朽化建物の外壁検査や震災後の被災状況把握などに、UAV が既に実用化されている。しかし、建物屋内への適用については、GPS や GNSS の使用が困難であるため、自律移動が難しく、屋内での UAV による計測の実適用は少なく、開発段階のものがほとんどである。一方で、UAV は水平方向および鉛直方向を多面的に移動可能なため、空間的に様々なデータを取得できる可能性があり、建物屋内の状況把握に対して、活用次第では大きな可能性を持っている。そこで、本研究では、自律移動が容易な Unmanned Ground Vehicle (UGV,地上走行ロボット) と UAV を協調させた建物内の環境情報を自動的にかつ空間として把握できる環境把握システムの開発、実用化を行う。

2. 研究の目的

本研究は、建物内を 3 次元的に計測し、空間的に屋内環境を把握することを目的として、Unmanned Ground Vehicle (UGV,地上走行ロボット) と Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を協調させた建物内の空間的な環境把握システムを開発し、実用化する。既往の研究においても UAV を用いた屋内計測はあるものの、自律移動できるものは少なく、また効率よく多点計測しているものは少ない。また、多くの研究は、UAV としてマルチローターを用いており、環境計測においては常にドローンのローターからの気流を考慮する必要があり、鉛直方向の多点計測は難しい問題点がある。そこで、本研究では、マルチローターのように常にローターの稼働を必要としない無人飛行船を用いることで、鉛直方向の多点計測を可能とする。さらに、比較的、自律移動が容易な UGV と常に浮遊している無人飛行船 (UAV) をケーブルにより繋げることで、マルチローターでは難しい屋内の UAV の自律移動を実現する。また、UGV および無人飛行船に MEMS センサーを搭載させることで、建物内に計測器を設置することなく、多点計測が可能となると考えられる。また、あわせて安価な深度カメラを複数台用いた建物屋内の現況の 3D 化についても提案する。

本研究の UGV と UAV を協調させた、空間環境把握システムを実現することができれば、建物屋内の環境情報を 3 次元的に把握できるため、設備機器などのリニューアルに対して有用な情報収集システムとなり得ると考えられる。

3. 研究の方法

本研究では、建物屋内の環境を空間として把握することを目的として、Unmanned Ground Vehicle (UGV,地上走行ロボット) と Unmanned Aerial Vehicle (UAV) を協調させることで空間的な環境状況把握が行えるシステムの実用化を行う。UGV と UAV の協調による計測システムの開発においては、安全性および空気成層への影響を考慮して飛行船と UGV によるシステムを構築し、屋外での利用例が多いマルチローターと比較することで、有用性を検討する。また、建物屋内の現況について把握する目的で、安価な深度カメラを用いた 3D モデル化システムについても検討



Fig.1 UGV と無人飛行船の協調による空間環境把握システム

を行う。検討においては、複数台の深度カメラを用いて、深度カメラの台数、配置方法について検討を行い、有用な 3D モデル構築のためのシステムを開発する。提案する UGV と UAV を協調させた、空間環境把握システム有用性は大学校舎を対象とした実証実験により確認する。

4. 研究成果

4-1. UGV と無人飛行船の協調による空間環境把握システムの開発

温度環境を 3 次元的に計測するシステムについて検討することを目的として、UGV と無人飛行船による温度計測システムを開発する。開発する UGV と無人飛行船の併用による計測システムを Fig.1 に示す。提案する計測システム的主要構成要素は、MEMS 温度センサー、差動二輪駆動型 UGV、LiDAR、IMU、Ubuntu 搭載 PC および無人飛行船となる。ただし、差動二輪駆動型 UGV は、ゲームパッドにより手動での操作も可能である。MEMS 温度センサーは、1 個約 3g であり、I2C を使用しており、一本のケーブルで 4 個まで接続可能である。そのため、浮揚荷重 200g の無人飛行船でも、十分揚重可能である。また温度計測は、UGV の操作に用いるゲームパッドを用いて、計測を開始する。LiDAR は、YDLIDARTG-30 を用いており、スキャン角度 360 度、レンジ距離 0.05 ~ 15m である。開発する空間環境把握システムは、温度計測を行うとともに、自動で温度計測位置を把握し、図面上に明示することを目的として、Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) 技術を活用する。SLAM を行う際には、UGV の動きや位置が重要であり、UGV の位置を如何に把握するかが作成されるマップの精確性に大きく影響をする。温度計測を実施する建築物は、新築から老朽化したものまで、種々様々な建築物が想定されるうえ、床面についても、絨毯、フローリング、鏡面仕上げまで様々なものがあり、摩擦環境も大きく異なることが考えられる。そのため、UGV の動きを把握するために、一般的に用いられる駆動モーターの回転数などをもとに動きを推定するホイールオドメトリの利用は難しいと考えられる。また、屋内となるため、GPS などの使用も難しい。よって、上記の 2 点を踏まえ、SLAM として、ホイールオドメトリと GPS などを必要としない LiDAR のみを必要とする Hector SLAM を用いる。ただし、本研究では、UGV の動きを把握するため、IMU を使用している。

開発した UGV と無人飛行船の併用による計測システムの有用性を検証する目的で、温度計測およびマッピングを足利大学 8 号館 4 階の廊下部分を対象に行う。検証実験では、水平方向に 7 か所、鉛直方向に床面から 500mm、1000mm、1500mm および 2000mm の 4 か所について行う。マッピング結果を Fig.2 に、温度計測結果を Fig.3 に示す。Fig.2 のマッピング結果から、SLAM により、柱や戸口を含めてほぼ正確にマッピングされており、温度計測箇所についてもほぼ正確

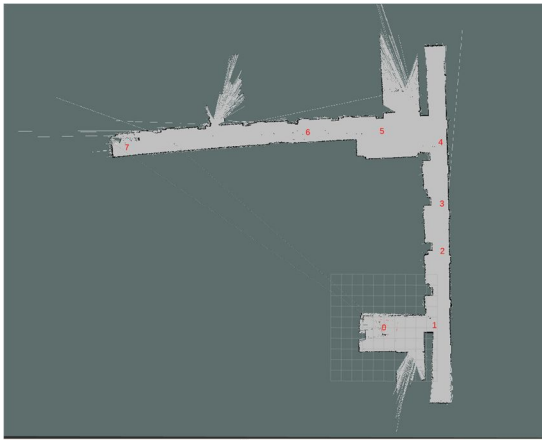


Fig. 2 マッピング結果および温度計測位置

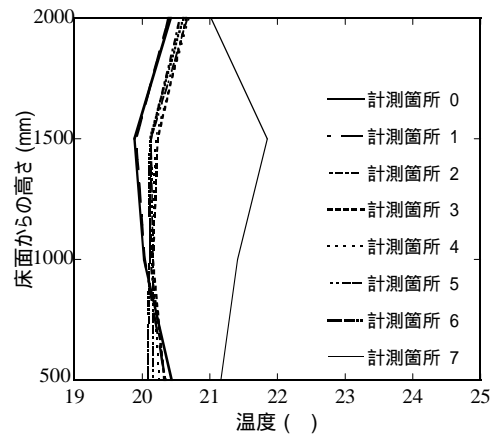
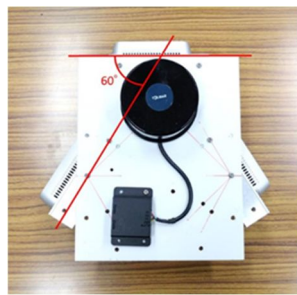


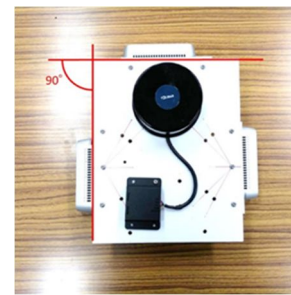
Fig. 3 温度計測結果



(a) 正面のみ



(b) 正面と左右に 60°に設置



(c) 正面と左右に 90°に設置

Fig.4 深度カメラの設置状況

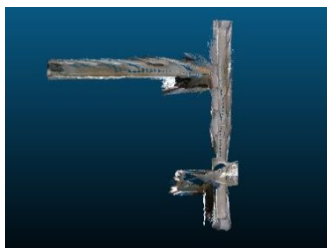
にマッピングされていることを確認している。Fig.3 より、片面が全面窓であり、太陽光が多く当たる計測箇所 7 については、他の計測箇所より高めの温度を示しており、妥当な温度計測結果となっている。これらの結果より、開発した UGV と無人飛行船を併用する計測システムを用いることで、簡便に 3 次元空間として温度計測を行い、計測箇所を平面図にマーキングできることを確認している。

4-2. 深度カメラを用いた建物屋内の現況把握

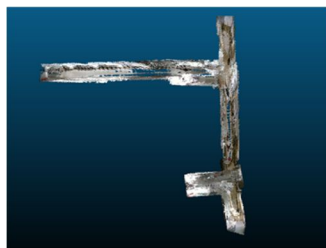
構造物屋内の設備の設置状況など、現況をヴィジュアル的に把握することを目的として、Visual SLAM を用いて、3D マッピングを行うシステムを構築する。構築するシステムでは、Visual SLAM として、深度カメラからの画像データを基に、3次元表示の点群モデルを作成可能な RTAB-Map のアルゴリズムを用いる。また、深度カメラの位置を把握する目的で、トラッキングカメラも使用している。ここで、深度カメラの台数や配置の方法により、点群モデルの完成度が異なることが考えられることから、深度カメラの設置状況の異なる次の 3 ケースについて検討を行う。

- (a) 正面のみに設置
- (b) 正面と正面から左右に 60°の位置に設置
- (c) 正面と正面から左右に 90°の位置に設置

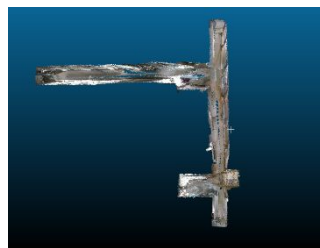
各ケースの深度カメラの設置状況を Fig.4 に、作成した各ケースの点群モデルを Fig.5 に示す。Fig.5 より、各ケースにおいて点群モデルを作成した構造物の縦幅および横幅については、多少の誤差はあるものの、ほぼ正しく測れており、構造物の全体像としては、大きな差異なく作成できていることが確認できる。また、点群モデルにより、構造物内の現況を把握できることが確認



(a) 正面のみ



(b) 正面と左右に 60°に設置



(c) 正面と左右に 90°に設置

Fig.5 作成した点群モデル



(a) 正面のみ



(b) 正面と左右に 60°に設置



(c) 正面と左右に 90°に設置

Fig.6 作成した点群モデル(側面)

できる。また、作成した点群モデルにより、構造物内の現況を把握できることが確認できる。ただし、全体像における廊下の直線性については異なる結果が見受けられる。特に、ケース(b)では、Fig.5 の図中縦方向の廊下中央部に歪みが生じており、直線性が損なわれている部分がある。この要因として、左右の深度カメラ画像と正面の深度カメラ画像が重なっているため、部分的に歪みが生じているためと考えられる。

次に各ケースについて、部分的な詳細を確認する目的で、Fig.5 の図中縦方向の廊下下部の側面を Fig.6 に示す。Fig.6 から、1 台の深度カメラのみでは視野が狭いため、深度カメラ側面部分の情報量が少なく、疎な密度の点群モデルとなっている。それに対し、3 台の深度カメラを用いることで、情報量が多くなり密な点群モデルが作成できている。3 台の深度カメラを使った結果の Fig.6(b)と Fig.6(c)を比較すると、側面の深度カメラを 90°よりも 60°にした方が奥行きをはっきりと再現できている。

以上の結果から、深度カメラを用いることで、構造物屋内の現況を詳細に把握可能となることが明らかになり、複数台の深度カメラを用いた提案システムにより、密な点群モデルが作成できることを確認している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 保坂賢、仁田佳宏
2. 発表標題 SLAMを活用した温度計測
3. 学会等名 第20回建設ロボットシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 仁田佳宏、齋藤宏昭
2. 発表標題 UGV による屋内温度計測
3. 学会等名 第23回建築の自動化シンポジウム
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------