

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：32201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04439

研究課題名（和文）自己位置推定技術の活用による建築現場のための無人搬送車の開発および実証実験

研究課題名（英文）Development of automatic guided vehicle for construction site by utilizing SLAM

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） 1,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自己位置推定と環境地図の作成を行う自己位置推定技術(SLAM)を活用したナビゲーションシステム及び無人搬送車の実用化を目的として、行っている。まず建築現場ではホイールオドメトリの情報を利用することが難しいことから、LiDARと慣性計測装置(IMU)のみから2次元地図を作成する安価なシステムとカメラと2次元地図の結果を活用により3次元地図を作成する安価なシステムを提案した。また、地図作成のためのマーカーを用いたナビゲーションアルゴリズムも提案している。本研究の成果は校舎を対象とした実構造物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、建築現場での労働力不足を補うことを目的として、建築資材を搬送する無人搬送車の実用化を目的として行っている。建築現場は、施工中であるため、レイアウトを表す地図がないため、無人搬送車を自動走行させることが難しい箇所のひとつである。そこで、建築現場にセンサ情報のみからSLAMを用いて地図を作成するとともに、地図作成のためのマーカーを用いたナビゲーションアルゴリズムも提案した。本研究の成果は、建築現場への無人搬送車の導入において有用であると考えており、建築現場の省人化に寄与すると考えている。

研究成果の概要（英文）：This research develops and proposes a navigation algorithm of mobile indoor automation ground vehicle (AGV) in construction site. The navigation methodology with AR markers for making a map of the construction site is presented and demonstrated in detail. In the navigation algorithm, the mobile indoor AGV can make 2D or 3D map inside the building construction site. From the driving test, it has seen that the navigation algorithm with AR marker is essential to control the attitude of the UGV and drive autonomously. The proposed navigation algorithm is very important to drive AGV autonomously inside building construction site.

研究分野：建築構造およびICT施工

キーワード：AGV 建築現場 自己位置推定 SLAM Visual SLAM

## 1. 研究開始当初の背景

近年、建築・土木分野では、労働人口の減少が問題となっており、建設現場では、省人化による生産性向上を目的に、情報通信技術(ICT)やロボット技術を活用した施工システムおよび施工手法の開発が急務となっている。土木分野では、ICT 技術やロボット技術による「i-Construction」が進められており、ドローンによる測量、マシンガイダンスやマシンコントロールを活用した ICT 建機など種々様々な自動化技術が開発され、実用化されている。特に、マシンガイダンスやマシンコントロールなどに代表される技術は、GPS や GNSS を活用し、建機の自動走行や無人化施工を可能とし、省人化による生産性向上に大きく貢献している。建築分野においても、ICT 技術やロボット技術の活用が行われ、鉄骨建方、建築現場内における資材搬送ロボットや清掃ロボットなどが開発され、使用されつつある。しかし、建築現場は屋内であることから、GPS や GNSS などの使用が困難であり、建機やロボットの自己位置の推定が難しいため、開発中や試用段階の技術や手法が多く、実用化されたものはまだ少ないのが現状である。そこで本研究では、この課題に対処するため、自己位置推定技術を活用した建築現場のための無人搬送車の開発および実用化を行う。

## 2. 研究の目的

本研究では、高層建築物などの建築現場におけるロボット技術を活用した施工システムの確立を目的として、自己位置推定と地図の作成を行う SLAM 技術を活用した無人搬送車を開発し、実用化する。既往の研究や適用例における建築施工現場の無人搬送車は、磁気テープの敷設など専用の設備を必要とするものや内壁工事終了後の仕上げ工事時のみ使用可能なものがほとんどであり、専用の設備を設置することなく外壁工事などの施工初期段階から、使用可能な無人搬送車は、ほとんどないのが現状である。本研究で開発、実用化を行う自己位置推定技術(SLAM)とマーカーを複合したナビゲーション手法を活用することで、大掛かりな専用の設備を設置することなく外壁工事などの施工初期段階から無人搬送車の使用が可能となる。あわせて、CAD などのデジタル図面と SLAM による地図の比較による地図の正確性についても検討を行う。

本研究の自己位置推定技術(SLAM)を活用したナビゲーション手法および無人搬送車を実用化出来れば、ロボットが建築施工現場内を自律走行できるため、仕上げ材の据え付けや耐火被膜の塗布などロボットを活用し技能者と協調して行う各種工事が増え、省人化による生産性向上に大きく寄与できる。また、正確な SLAM による地図を作成出来れば設計図面と比較することで施工状況を把握できるようになり生産性向上に寄与できると考えている。

## 3. 研究の方法

本研究では、生産性向上および省人化を目的として、SLAM 技術を活用した無人搬送車の実用化を行う。SLAM 技術を活用した無人搬送車の開発にあっては、まず安価なデバイスを用いた地図作成のための SLAM システムを開発する。次に運動性能を考慮して、メカナムホイールを用いた無人搬送車の小型試作モデルを作成し、SLAM の実施や利便性について検討する。また、SLAM 技術に基づいて地図を作成するためには、地図のない状態で如何に無人搬送車を自律移動させるかも重要となるため、地図のない状態におけるナビゲーションアルゴリズムについても提案する。

提案したナビゲーションアルゴリズムと SLAM 技術を活用した無人搬送車の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. SLAM を実現する安価なシステムの提案

本研究では、Fig.1 に示す 2 種類のマッピングデバイスによるシステムを構築している。2 種類のシステムともに、レーザーにより 2 次元の距離計測を行う LiDAR、画像処理を活用して画像取得と 3 次元的に空間把握を行う深度カメラ、マッピングデバイスの姿勢や位置を把握するための IMU の 3 つの要素で構成されており、コストは約 15 万円程度となっている。ここで、IMU は具体的には、水平 2 方向および鉛直方向の加速度、ロール、ピッチおよびヨー方向の回転方向速度を計測している。Fig.1(a)のシステムは、LiDAR に Slamtec 社製 Slamtec Mapper を、深度カメラに Intel 社製 RealSense D435i を使用する。2 次元地図は、Slamtec Mapper 内の IMU を使用した Slamtec 社の独自の SLAM アルゴリズムを用いて作成している。Fig.1(b)のシステムは、LiDAR に北陽電機社製 LiDAR URG-04LX-UG01 を、IMU に Sparkfun 社製の IMU 9DoF Razor IMU M0 を、深度カメラに Intel 社製 RealSense D435i を使用する。SLAM は、オドメトリを必要としない Hector SLAM を用いる。3 次元地図については、どちらのシステムについても、Visual SLAM のひとつである Rtabmap を用いて、点群データとして作成する。

### 4-2. 2 次元地図の検討

施工現場となる構造物屋内の測量およびレイアウト把握を目的として、SLAM による地図の作成を試みる。SLAM による地図の作成については、Slamtec mapper による地図と Hector SLAM と URG-04LX-UG01 による地図の 2 つについて検討する。ただし、どちらの SLAM についても、オドメトリ情報については使用していない。実際の測量結果となる CAD 図面と Slamtec mapper による地図を比較したものを Fig.2 に示し、Hector SLAM と URG-04LX-UG01 による地図との比較を Fig.3 に示す。Fig.2 および Fig.3



(a) Slamtec Mapper

(b) URG-04LX-UG01

Fig.1 SLAM を実現するシステム

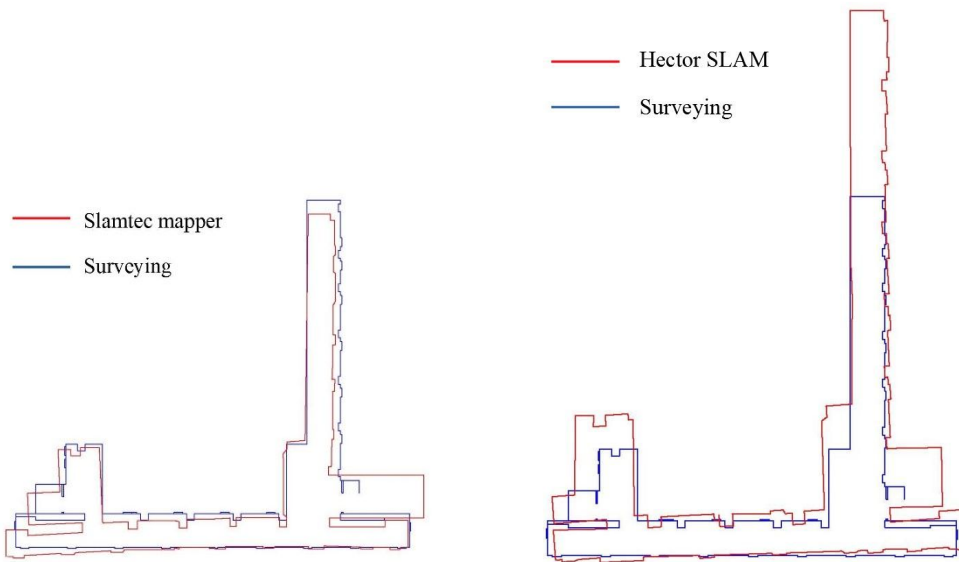
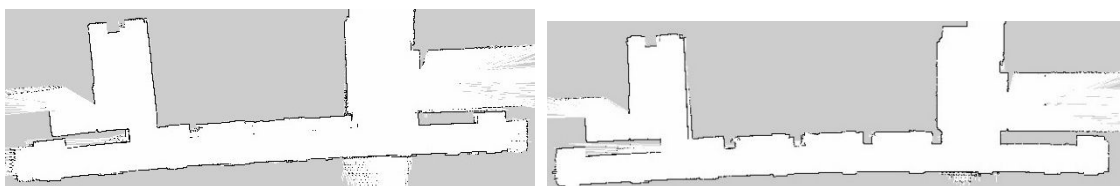


Fig.2 Slamtec mapper によるマッピング結果

Fig.3 URG-04LX-UG01 によるマッピング結果



(a) 低速

(b)適切な速度

Fig.4 移動速度の相違による比較

より、レイアウトを示す概形はほぼ正しくマッピングされているものの、廊下部分の長さを正しく測れていないことが確認できる。Slamtec mapper により作成された地図では実際の廊下の長さの約 0.96 倍であり、Hector SLAM と URG-04LX-UG01 により作成された地図では約 1.5 倍となっている。この理由として、廊下は形状の変化が乏しく特徴点が少ないため、地図において計測点を正確に把握することが難しく、計測点を柱や扉口を基に推定しているため、長さを正しく把握できていないと考えられる。また、SLAM を作成する際の移動速度の影響を考慮する目的で、Slamtec mapper を用いて検討を行っている。移動速度の相違による地図の比較結果を Fig.4 に示す。Fig.4 から、移動速度によっては、構造物屋内の概形は捉えられるものの、柱などの要素のマッピングが難しく、適切な移動速度があることが確認できる。

以上の結果から、施工状況の把握については、SLAM は有用な方法となり得ると考えられる。ただし、廊下など特徴点が少ないかつ長大となる箇所については、施工状況の把握は可能となるものの、設置位置の確認についてはさらなる改善が必要であることを確認している。

#### 4-3.3 次元地図の検討

施工状況の把握を目的として、Visual SLAM による点群データによる 3 次元地図の作成を試みる。

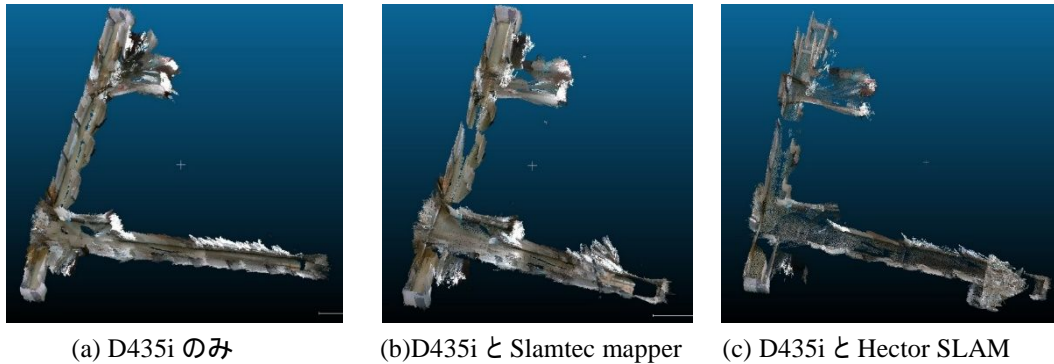


Fig.5 Visual SLAM による 3 次元地図

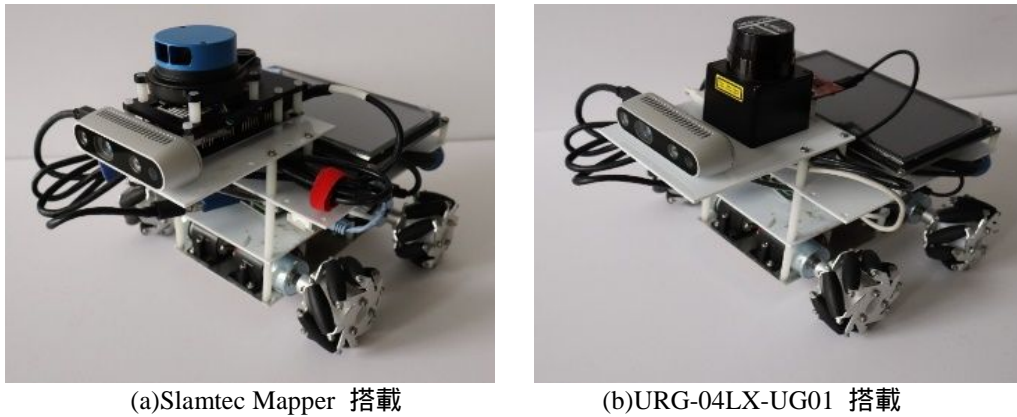


Fig.6 試作した無人搬送車

Visual SLAM による 3 次元環境地図の作成については、Rtabmap によるアルゴリズムを用いる。検討では、Fig.6 (a)に示す RealSense D435i のみを用いる場合、Fig.6 (b)に示す RealSense D435i と Slamtec mapper を用いる場合、Fig.6 (c)に示す RealSense D435i と Hector SLAM および URG-04LX-UG01 を用いる場合の 3 つを比較する。Fig.6(a)と Fig.6(b)および Fig.6(c)の比較から、SLAM の結果を活用して推定したシステムの姿勢、移動速度を用いることで、より正確な点群モデルが作成できることを確認している。また、Fig.6(b)と Fig.6(c)の比較から、SLAM による 2 次元地図からシステムの姿勢、移動速度を推定するため、より正確な地図を作成できる Slamtec mapper を用いた方が、正確な 3 次元地図が作成できることが確認できる。

以上の結果から、Visual SLAM は、屋内全体を 3 次元デジタルデータで再現できるため、施工状況の把握に対して、有用な方法となり得る。

#### 4-4. SLAM を搭載した無人搬送車の開発

施工現場においては、施工前の資材や施工のための機材などが置かれており、無人搬送車の走行路の幅を広く確保できない場合がある。また、施工が進むにつれ、壁面などが立ち上がり、旋回のためのスペースを十分に確保できない場合も存在する。そのため、省スペースで旋回出来る必要性がある。そこで、施工現場に適した無人搬送車の小型模型を試作する。試作した無人搬送車は、全方向に移動可能で、省スペースでの旋回が可能となるようにメカナムホイールを採用している。無人搬送車のメインボードは、ロボット用の OS として実用性の高い ROS を使用できるように、Intel 製 CPU を搭載している UP ボードを用いている。また、SLAM および Visual SLAM によるマッピングを行うことを目的に、2 次元マッピングのためのセンサーとして LiDAR を、3 次元マッピングのためのセンサーとして Depth Camera を搭載している。LiDAR としては、Slamtec 社製 Slamtec Mapper、北陽電機社製 URG-04LX-UG01 の 2 種類を入れ替えてつかうこととする。さらに、SLAM および Visual SLAM を行う際には、無人搬送車の姿勢や動作を把握することが必要であるため、無人搬送車の姿勢や動作を把握できる IMU も搭載している。試作した無人搬送車を Fig.6 に示す。

#### 4-5. マーカーを用いたナビゲーションアルゴリズムの提案

SLAM による地図作成前に、施工現場において、無人搬送車を自律移動させることを目的として、GPS や SLAM のナビゲーションを使用しない簡便なナビゲーションアルゴリズムを提案する。提案するナビゲーションアルゴリズムは、AR マーカーを用いており、全方向移動可能な無人搬送車は、直進して走行していても、路面の影響などにより、左右どちらかの片側に由った楕円軌道となる場合があることから、直進走行のためのアルゴリズムも提案する。提案するナビゲーションアルゴリズムは、AR マーカーを用いた直進走行のアルゴリズムと、右左折、回転、停止などの各コマンドを明示する AR マーカーによる部分の 2 つからなる。直進走行のためのアルゴリズムでは、Fig.7 に示すように、常に無人搬送車に搭

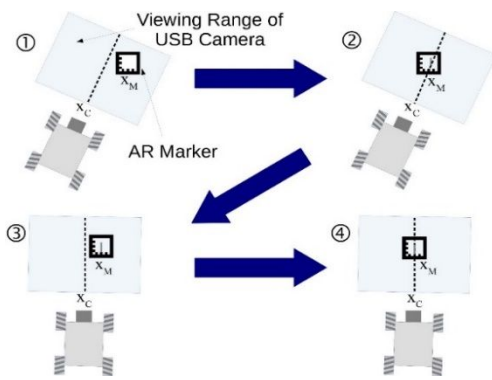


Fig.7 AR マーカーを用いた姿勢制御

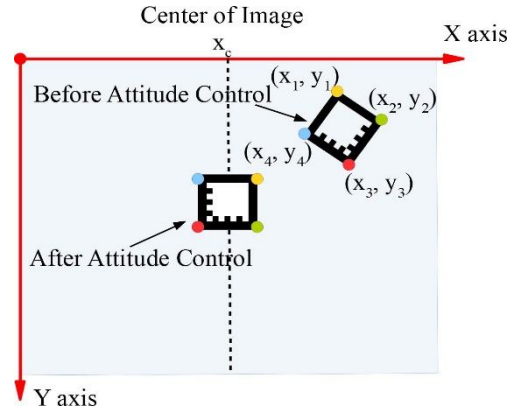


Fig.8 姿勢制御の概略図

載した USB カメラの撮影画像の中心かつ撮影画像の座標軸と平行になるように無人搬送車を姿勢制御しながら直進する。具体的には、Fig.8 に示すように、撮影画像中の AR マーカーの左上の頂点座標を  $(x_1, y_1)$ 、右上の頂点座標を  $(x_2, y_2)$ 、右下の頂点座標を  $(x_3, y_3)$ 、左下の頂点座標を  $(x_4, y_4)$  とおく。まず姿勢制御を行う位置も重要であることから、AR マーカーの画像内のサイズを基に姿勢制御を行うこととし、式 (1) を基に AR マーカーのサイズを測定する。

$$L = 0.5 \times (x_2 - x_1 + x_3 - x_4) \quad (1)$$

次に、式 (2) および式 (3) を基に、AR マーカーの  $x$  軸方向の位置および  $x$  軸方向に対する傾きを算出する。

$$x_M = 0.25 \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4) \quad (2)$$

$$y_{dif} = 0.5 \times (y_1 + y_4) - 0.5 \times (y_2 + y_3) \quad (3)$$

姿勢制御では、AR マーカーは常に画像内の中央かつ  $x$  軸方向に対して平行となるように、無人搬送車の位置の制御を行う。そこで、AR マーカーが式 (4) に示すように閾値  $\gamma$  を超えた際に式 (5) および式 (6) を満たすように姿勢制御を行う。

$$L > \gamma \quad (4)$$

$$|x_c - x_M| \leq \alpha \quad (5)$$

$$|y_{dif}| < \beta \quad (6)$$

ここで、 $\alpha$  および  $\beta$  は閾値を表す。

$x_c - x_M$  が正の値を示す場合は、無人搬送車を右側に、負の値を示す場合は無人搬送車を左側に、式 (4) を満たすように移動させる。また、 $y_{dif}$  が負の値の場合は反時計回りに、正の場合は時計回りに、式 (5) を満たすように回転させる。

コマンド制御では、AR マーカーの種類より、個々の AR マーカーに紐づけされたコマンドを、式 (4) が満たされた際に実行する。

AR マーカーによるナビゲーションの実行性を検討する目的で実験を行い、提案するアルゴリズムでナビゲーション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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Derbew Yenet Bogale, 仁田佳宏, Mohamad Najib Albebrawi, 張天, 石田正美
2. 発表標題 Manufacturing UGV for Data Collection inside the Building
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会（北陸）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Derbew Yenet Bogale, Yoshihiro Nitta, Yorimasa Kuba
2. 発表標題 Developing UGV for Construction Site
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 仁田佳宏, D.Y. Bogale, 張天, 久芳頼正
2. 発表標題 点群データの建築物メンテナンスへの活用
3. 学会等名 2020年度ロボテクス・メカトロニクス講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 張天, 仁田佳宏, 石田正美
2. 発表標題 SLAMを用いた建築物屋内の測量
3. 学会等名 日本建築学会大会学術講演会（関東）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y.Nitta, D.Y.Bogale, Y.Kuba and Z.Tian
2. 発表標題 Evaluating SLAM 2D and 3D Mapping of Indoor Structures
3. 学会等名 International Symposium on Automation and Robotics in Construction (国際学会)
4. 発表年 2020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