

## 森林における正確なビジュアルマッピングと

### 自己位置推定のための人工マーカー

## Artificial Markers for Accurate Visual Mapping and Localization in Forest

○藤岡与周

○Yoshichika Fujioka

八戸工業大学

Hachinohe Institute of Technology

キーワード：草刈 (Brush-Cutting), RGB-D SLAM (RGB-D SLAM), 自律移動ロボット (Autonomous Mobile Robot), 人工マーカー (Artificial Markers), 新聞紙 (Newspaper)

連絡先：〒031-8501 青森県八戸市大字妙字大開 88-1

八戸工業大学工学部工学科システム情報コース 藤岡与周

TEL: 0178-25-8063 FAX: 0178-25-1691 E-mail: fujioka@hi-tech.ac.jp

### 1. まえがき

真夏の炎天下や斜面等における刈り払い機等を用いた草刈作業は、多くの労力が必要であるとともにも危険性が高い。これに対し、小型移動ロボットに草刈機能を備えた草刈ロボットは、このような問題を大幅に改善できる[1]-[8]。

しかし、果樹園や森林などにおける草刈り作業をロボットに自動で行わせる場合は、GPSなどのGNSS (Global Navigation Satellite System)の電波が樹木の枝葉による減衰あるいはマルチパス等の影響を受けやすく、草刈ロボットの正確な位置情報の利用が困難であることが多い。そこで、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)による自己位置推



図1 樹木の生い茂る場所の例

定と地図作成の同時実行により、草刈ロボットの正確な位置情報の把握や樹木等の障害物回避を行うことが有用であると考えられる。

これまでに3次元計測が可能なRGB-Dカメラを用いたSLAMを用いて、森林内における3次元地図作成の実験を行ったところ、草刈ロボットが移動して同じ場所に戻ってきた際にそこを同じ場所として認識するループクロージング処理が、数十mの移動後だと失敗することが多かった。この問題に対し、(1)小さいループ状の経路を密に含む移動経路と(2)人工物をマーカーとして森林内に置くことにより、数十mの移動距離でもループクロージングが成功することを明らかにしている[8]。この実験の際には事務用椅子を人工マーカーとして用いたが、計測された3次元情報では椅子の形状が曖昧なものであった。この曖昧さはSLAMによる3次元地図作成の精度低下につながるものと考えられる。

そこで本稿では、図1に示すような森林内における3次元地図作成に適する人工マーカーの特徴について、数種類のマーカーを用いて比較し調べることを目的としている。

## 2. 実験方法

実験機材の写真と主な諸元を図2と表1に示す。草刈ロボットの移動を模擬するため屋外用の台車を用いており、人手でこれを押し歩いてRGB-Dカメラ画像を得る。ノートパソコンにはLinux OSの一つであるUbuntuをインストールしている。当初Windows 10上で利用できるLinux環境にUbuntu[9]-[10]をインストールして試したが、RGB-DカメラとのUSBインターフェースの実質的速度が低くなり処理が間に合わないことから、USB3.1接続の外部SSD上にUbuntu 20.04 LTSをインストールしこれから直接Ubuntuを起動するようにした。また、ROS Noetic[11]とRTAB-Map[12]-[13]をインストールし、RGB-D SLAMの実験環境を整えた。

実験場所は図3に示すように八戸工業大学第二駐車場となりの林の中であり、概ね



図2 RGB-D SLAM 実験台車

表1 RGB-D SLAM 実験台車の主な諸元

RGB-D カメラ	Intel RealSense D455
カメラ地上高	143cm
ノート PC	HP ProBook 650 G5 CPU: Core i5-8265U RAM: 16GB USB 3.1(Gen 1)
ソフトウェア	Ubuntu 20.04 LTS ROS: Noetic SLAM: RTAB-Map
ポータブル電源	Bluetti EB705 716Wh, AC 800W
屋外用台車	アルミ製前輪自在四輪ハウスキャリー アルミス AK-46 タイヤ直径 200mm 底面を上にし重ねた野菜コンテナ 2 段の上にノート PC やカメラ等を設置

表2 実験に用いたマーカー

ID	マーカー
A	木に新聞紙
B	木に A3 コピー用紙
C	木に黄色画用紙
D	野菜コンテナ 4 段
E	カラーコーン
F	木の特徴的な模様

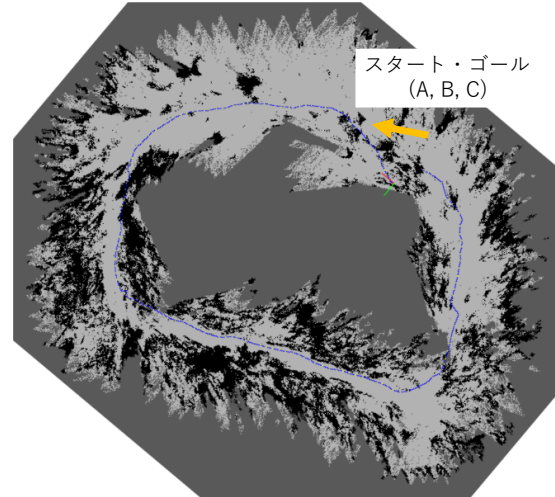


図4 2次元マップ例 (青線: 移動経路)



図3 実験場所

18m×23m の範囲を四角く反時計回りに1周する経路とした。できるだけ樹木の間を通る経路としたため、実際の移動経路は図4内の青線に示すような経路となった。この経路を1周し戻ってきた場所で、そのスタート地点とゴール地点が同一の場所であると認識するループクローリングが成功するかしないかにより、人工マーカーの効果の評価することとした。なお、人工マーカーを用いない場合はループクローリングが成功しないように経路を選んでいる。

実験に用いるマーカーは、表2に示す6種類とした。新聞紙(A)、コピー用紙(B)、黄色画



図5 人工マーカー(A) 木に新聞紙(豊富なテキストチャ)

用紙(C)はいずれも木に巻き付けるタイプの人工マーカーの例として選んでいる。草刈作業の邪魔にならず、かつ背丈の高い草があっても発見が容易となるように、木に巻き付けるタイプの人工マーカーとして選ばれている。これらはいずれも半透明の養生テープで木に巻き付けている。

図5に示す(A)の新聞紙は、豊富なテキストチャを有するマーカーの例として選んだ。図2に示す実験機材を用いて建物内でRGB-D SLAMの動作テストを行ったところ、壁面が





図6 人工マーカー(B) 木に A3 コピー用紙 (横) (単一色・幅広い)



図8 人工マーカー(D) 野菜コンテナ 4 段 (横方向に単一色)



図7 人工マーカー(C) 木に黄色画用紙 (縦) (単一色・幅狭い)



図9 人工マーカー(E) カラーコーン (横方向に単一色)

単色塗装の場所はうまく対応点がとれず、ループクローリングに失敗した。この際にあり合わせの新聞紙を壁面に取り付けて再度テストしたところループクローリングに成功したため、森林内でも何かの役に立つのではと考えて選んでいる。

図6に示す(B)のコピー用紙は、逆に新聞紙のようなテクスチャが全くないマーカーの例

として選んだ。木に巻き付けるため、木の表面のテクスチャが豊富であることから、白いコピー用紙がどのように RGB-D SLAM で利用できるかを調べるために選んでいる。ここで、A3 コピー用紙を横に貼り付けており、その脇の木の見える部分が狭くなるように巻き付けている。

図7に示す(C)の色画用紙は、目立つ色をマーカーとして利用した場合の効果について調べるため、一例として黄色を選んでいる。コピー用紙とは逆に縦長に貼り付けており、黄色画用紙の脇の木の部分が少し広く見えるようにしている。



図 1 0 マーカー(F) 木の特徴的な模様

図 8 に示す野菜コンテナ 4 段(D)と図 9 に示すカラーコーン(E)は、いずれも地面に人工マーカーを置く場合の効果を調べるために選んでいる。野菜コンテナは目立つ色のオレンジや黄色のコンテナを重ねている。たまたまオレンジ色と黄色のコンテナを利用できたため、オレンジと黄色を交互になるように積んでいる。

また、カラーコーンは工事現場や駐車場などで注意を喚起するための資材の例として選んでいる。できるだけ目立つように、赤のカラーコーンに白のリング模様がついたものを利用している。コピー用紙(B)や黄色画用紙(C)と同様に、野菜コンテナ(D)やカラーコーン(E)も横方向に単一色のマーカーである。

図 1 0 に示す木の特徴的な模様(F)は、森林内にある目印として利用できそうなものの一例として選んでいる。

新聞紙(A)、コピー用紙(B)、黄色画用紙(C)をマーカーとして利用する場合のスタート・ゴール位置と、野菜コンテナ(D)、カラーコーン



図 1 1 スタート・ゴール地点の 3 次元マップ ((A, B, C)マーカーなし、ループクロージング失敗)

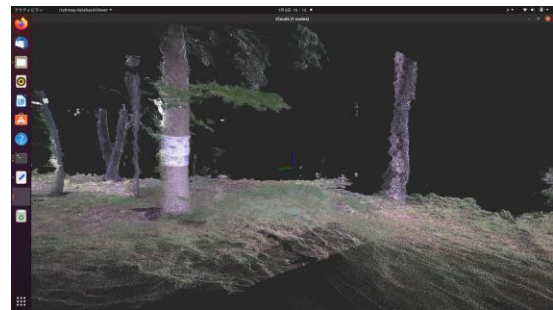


図 1 2 スタート・ゴール地点の 3 次元マップ ((A) 木に新聞紙、ループクロージング成功)

(E)、木の特徴的な模様(F)をマーカーとして利用する場合のスタート・ゴール位置は、実験場所の都合により図 3 に示すように少し異なる場所に設定している。

### 3. 実験結果

人工マーカー(A)、(B)、(C)のスタート・ゴール地点における、これらマーカーを利用しない場合の RGB-D SLAM 実験結果の 3 次元マップを図 1 1 に示す。同一の木がずれた場所に別の木として認識されており、また地面も傾き高さも少しずれてかさなっており、ループクロージングが失敗した。

そこで、図 5 に示すように新聞紙を人工マーカー(A)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、図 1 2 の 3 次元マップに示すようにループクロージングが成功し、同一の木はそれ





正面3D画像



背面斜め上からの  
3D画像

図 1 3 人工マーカースの 3 次元計測結果  
(A) 木に新聞紙

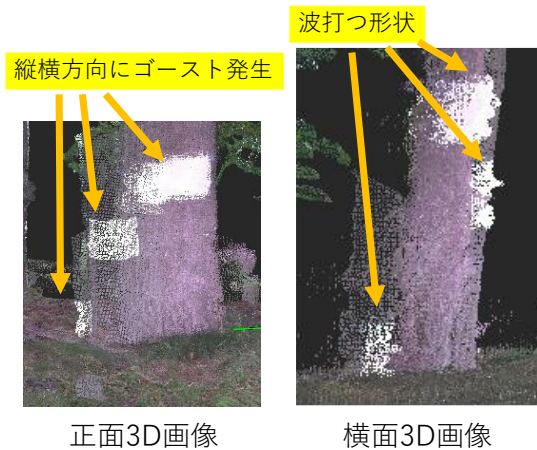


図 1 4 人工マーカースの 3 次元計測結果  
(B) 木に A3 コピー用紙

それぞれ一本の木として認識されるとともに、地面も連続したものとして認識されている。特に新聞紙を巻き付けた部分は、図 1 3 に示すように木の幹の曲面がよく再現されている。新聞紙の豊富なテクスチャにより新聞紙表面の多くの対応点を正確に求めることができるため、高精度な SLAM の実現に有用であると考えられる。

A3 コピー用紙を人工マーカース(B)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、ループクロージングは成功した。A3 コピー用紙部分の 3 次元計測結果を図 1 4 に示す。コピー用紙の部分は木の幹の曲線に沿った形状ではなく、前後に波打つ形状と認識されている。これは、

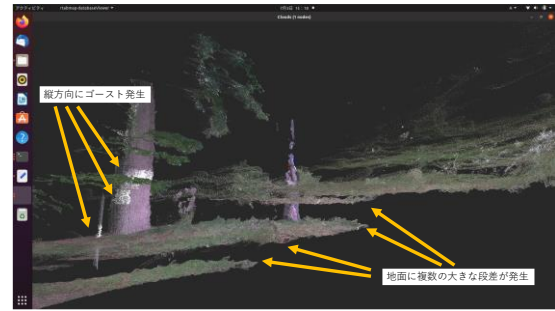


図 1 5 スタート・ゴール地点の 3 次元マップ (B) 木に A3 コピー用紙、ループクロージング成功)

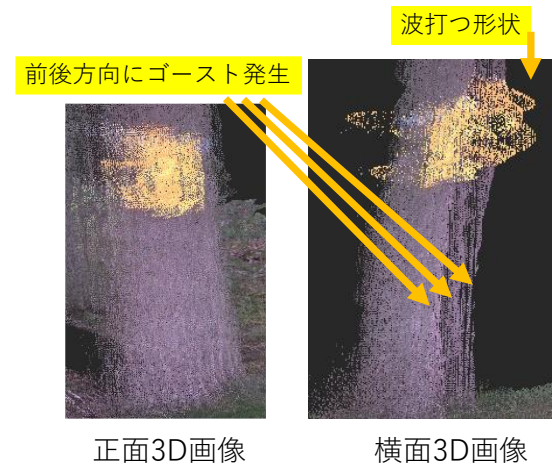


図 1 6 人工マーカースの 3 次元計測結果  
(C) 木に黄色画用紙

コピー用紙の部分は単一色でほとんどテクスチャがないため対応点を求めるのが困難であったためと考えられる。

また、コピー用紙を巻き付けた木を含めて、縦横方向にゴースト状の虚像が 3 次元マップ上に生成されている。特に縦方向のゴーストの影響のためか、図 1 5 に示すように地面に段差が発生している。これらは、ループクロージングが複数回成功したものの、A3 コピー用紙のどこを対応させるかが毎回異なったため、位置がずれたゴーストが発生したものと考えられる。

黄色画用紙を人工マーカース(C)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、ループクロ

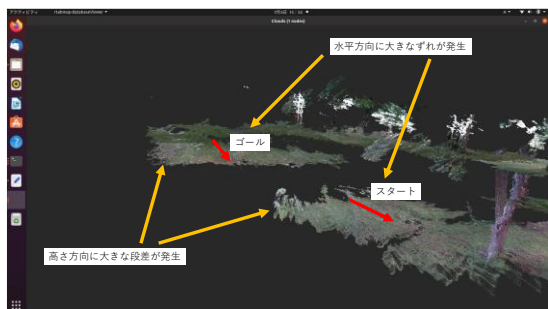


図 1 7 スタート・ゴール地点の 3 次元マップ ((D, E, F) マーカーなし、ループクロージング失敗)

ージングは成功した。黄色画用紙部分の 3 次元計測結果を図 1 6 に示す。A3 コピー用紙と同様に、画用紙表面は波打つ形状として認識されている。また、前後方向に複数のゴーストが発生している。コピー用紙ほど大きなゴーストが発生していない理由として、黄色画用紙を縦方向に貼り付けたため、その脇の木の表面のテクスチャが対応点としてより多く利用されたものと考えられる。地面の段差は発生していないが、この前後方向のゴーストは SLAM 精度を低下させる要因になるものと考えられる。

マーカー(D)、(E)、(F)のスタート・ゴール地点における、これらマーカーを利用しない場合の RGB-D SLAM 実験結果の 3 次元マップを図 1 7 に示す。スタート地点とゴール地点の位置や方向が大きくずれるとともに、高さ方向にも大きな段差が発生しており、ループクロージングは失敗している。

野菜コンテナ 4 段を人工マーカー(D)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、ループクロージングは成功した。野菜コンテナ部分の 3 次元計測結果を図 1 8 に示す。形状が不鮮明であり、特に前後方向は波打つ形状や飛び出す形状がみられる。

カラーコーンを人工マーカー(E)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、ループクロージングは成功した。カラーコーン部分の 3 次元計測結果を図 1 9 に示す。形状が不鮮明で

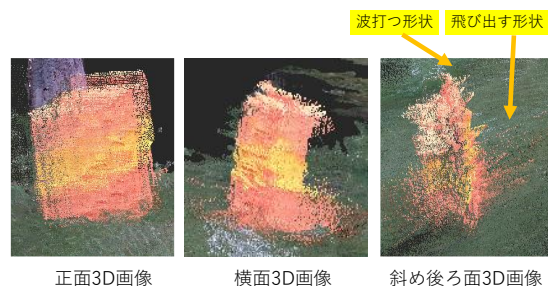


図 1 8 人工マーカーの 3 次元計測結果 ((D) 野菜コンテナ 4 段)

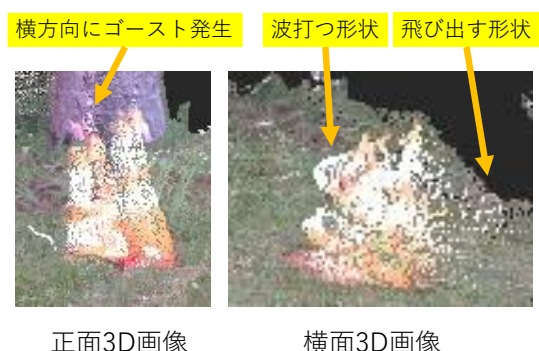


図 1 9 人工マーカーの 3 次元計測結果 ((E) カラーコーン)

あるとともに横方向のゴーストが発生しており、また前後方向に波打つ形状や飛び出す形状がみられる。縦方向にゴーストがないのは、赤いカラーコーンに取り付けられたリング状の白い模様が縦方向の位置ずれを防いでいるものと考えられる。

木の特徴的な模様をマーカー(F)として利用し RGB-D SLAM 実験を行った結果、ループクロージングは成功した。木の特徴的な模様部分の 3 次元計測結果を図 2 0 に示す。新聞紙を人工マーカーとして利用した場合と同様に、木の幹の形状をよく反映した計測結果となっている。これは、木の表面に豊富なテクスチャがあるためと考えられる。ただ、どの樹木にもこのような特徴的な模様があるわけではないため、必要に応じて人工マーカーの設置が必要となると考えられる。

以上をまとめた結果を表 3 に示す。今回実験

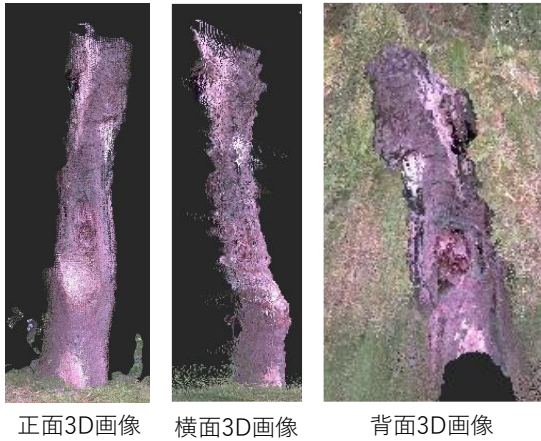


図 2 0 マーカーの 3 次元計測結果(F) 木の特徴的な模様)



図 2 1 地面に落ちている枝の例

した 6 種類いずれのマーカーを用いた場合でもループクロージングは成功した。しかし、マーカー部分の 3 次元計測結果は、新聞紙 (A) と木の特徴的な模様(F)以外はゴーストの発生や波打つ表面形状などのため、SLAM の精度低下の原因になるものと考えられる。これらは単一色の人工マーカーを用いたために発生したと考えられるため、新聞紙等のような豊富なテクスチャを有する人工マーカーが高精度な RGB-D SLAM に有用であると考えられる。

#### 4. むすび

今回の屋外での実験では、実験台車の移動中に、図 2 1 に示すような地面に落ちている枝などにタイヤがぶつかり、カメラが急に大きく揺れることが度々発生した。この際、RGB-D SLAM ソフトウェアのモニタ上にはワーニングが表示されており、おそらく画像フレーム間のずれ

表 3 各マーカーの実験結果

ID	ループクロージング	正確な形状	計測結果の特徴等
A	○	◎	豊富なテクスチャにより良好な計測結果
B	○	×	ぼやけている、前後に波打つ形状、縦横方向にゴースト発生、大きな地面段差発生
C	○	△	ぼやけている、前後に波打つ形状、前後方向にゴースト発生
D	○	△	ぼやけている、前後に波打つ形状、前後に飛び出す形状
E	○	×	ぼやけている、前後に波打つ形状、前後に飛び出す形状、横方向にゴースト発生
F	○	◎	豊富なテクスチャにより良好な計測結果、いつも使えるとは限らない

が大きくなったものと考えられる。また、その場所の 3 次元マップには地面の段差が発生することが多い。森林内では枝が落ちることは珍しくないため、このような急なロボットの姿勢変化があっても移動ロボット上のカメラは安定した方向の撮影ができるスタビライザー等の仕組みが必要と考えられる。



## 参考文献

- [1] 藤岡: “自動草刈ロボットシステムの構成”, 計測自動制御学会東北支部第 302 回研究集会資料, 302-8, (2016.6)
- [2] 藤岡: “エンジン負荷に応じた草刈ロボットの動作計画”, 計測自動制御学会東北支部第 309 回研究集会資料, 309-4, (2017.6)
- [3] 藤岡. 松山: “Visual SLAM を用いた山林における草刈ロボットの動作計画”, 情報処理学会東北支部研究報告, vol.2017, (2017.12)
- [4] 藤岡: “遠隔操作草刈ロボットのカメラ配置”, 計測自動制御学会東北支部第 316 回研究集会資料, 316-8, (2018.6)
- [5] 藤岡: “斜面草刈のための遠隔操作ロボットの構成”, 計測自動制御学会東北支部第 323 回研究集会資料, 323-2, (2019.6)
- [6] 小田 一品, 藤岡 与周: "不整地での自動草刈ロボットの Visual SLAM 精度向上", 令和 2 年度情報処理学会東北支部研究会, pp.1-4, (2020.12).
- [7] 藤岡 与周: "3 次元カメラを用いた自動草刈りのための 3 次元計測", 計測自動制御学会東北支部第 333 回研究集会, 333-7, pp.1-6, (2021.6).
- [8] 小田 一品, 藤岡 与周: "少ない画像特徴環境下での自動草刈ロボットの SLAM 自己位置推定安定性向上", 令和 3 年度情報処理学会東北支部研究会, pp.1-9, (2021.12).
- [9] <https://jp.ubuntu.com/> (2023 年 7 月 6 日閲覧)
- [10] <http://old-releases.ubuntu.com/releases/> (2023 年 7 月 6 日閲覧)
- [11] <http://wiki.ros.org/noetic> (2023 年 7 月 6 日閲覧)
- [12] <http://wiki.ros.org/rtabmap> (2023 年 7 月 6 日閲覧)
- [13] <http://introlab.github.io/rtabmap/> (2023 年 7 月 6 日閲覧)