

自律走行外観検査ロボットの研究開発（第1報）

Research and development of an autonomous mobile robot for visual inspection (1st)

技術開発部 生産・加工科 鈴木健司 近野裕太 石澤満 柿崎正貴 菅野雄大
吉田英一 浜尾和秀

南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏 塚本遊 太田悟

インフラ、プラント点検の省力化のため、ロボットが指示場所へ自律的に走行し外観検査及び音源方向提示が行える研究開発を行う。自律走行はLiDAR-SLAMを利用し、2つの手法(Gmapping、Hector)で動作を確認した。外観検査は、三次元点群及びレーダ間のマッチング時評価、カメラの距離方向の歪評価、AIを用いた深度推定評価を行い、寸法精度に与える影響を把握した。音源検出は、複数のマイクロホンからの信号処理で音源定位ができた。

Key words: レーダ、REMODE、三次元、構造、AI、音源定位、自律移動、ロボット

1. 緒言

インフラの老朽化、プラントの高経年化が進み、点検及び保全が重要になってきている。しかしながら熟練者の高齢化により労働力不足^{1) 2)}に直面している現状にある。DXの進展により、目視点検だけに頼っていた点検を、各種センサ等のテクノロジーを活用することで省力化・コスト削減・作業効率化を実現できるようになってきた。

本研究開発は、外観検査、音源方向提示機能を有し、指定する必要な場所へ自律的に場内を移動し点検が行えるロボット開発を目指している。

総務省・厚生労働省・経済産業省がまとめた、「プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン」³⁾及び、スマート保安推進のための基本方針⁴⁾が示すように、担い手不足の状況下においてインフラ、プラントを維持していくうえで、ロボットによる点検は大きく期待されている。

本報告では、自律走行ロボット、外観検査のためのロボットビジョン（単眼カメラ及びレーダによる構造物の点群復元、単眼カメラを用いたAIによる構造物復元）、音源方向の提示に取り組んだ。

2. 自律走行システム

2. 1. 自律走行システムの開発課題

外観検査用ロボットの自律走行システムの開発では、プラントの配管下や狭隘環境において、ロボットに音源探査及びロボットビジョン用の外観検査用センサを搭載し、自律走行することを目標としている。

これまでの研究⁵⁾では、2次元LiDARを使用して環境地図を作成した。ランドマークの主な対象は外壁などの比較的単純な形状であったが、今回実証実験場所とする福島ロボットテストフィールド（以下、「RTF」という。）の図1に示す試験用プラントのようにパイプが入り組んだ狭い環境では、いかに環境地図を作成し、

ロボットを自律走行させられるかが課題となる。また、このような狭隘環境で自律走行させるためには、ロボットの小型化が求められる。



図1 RTFの試験用プラント

2. 2. 実験

2. 1. 1. 実験に使用するSLAM手法

これまでの研究⁵⁾で使用してきた環境地図作成アルゴリズムGmapping⁶⁾は、パーティクルフィルタベースのSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 手法である。

最もメジャーな手法であるが、タイヤの回転角から現在位置を推定するオドメトリ情報が必須で、不整地や屋外等の広範囲な環境で不向きな手法となっている。

本報告では、オドメトリ情報を必要としないスキャンマッチング系のHector SLAM⁷⁾を使用し環境地図を作成する。さらにHector SLAMで作成した地図を使って自律走行実験を行う。

2. 1. 2. 実験方法

ロボットはZMP社製の自動運転開発プラットフォームRoboCar 1/10X（以下、「ロボカー」と言う。）を使用し、Hector SLAMによる環境地図作成実験と自律走行実験を行った。実験環境の写真を図2に示す。環境地図作成はロボカーをリモコン操作して作成した。

Hector SLAMで作成した環境地図を使用する自律走



図2 自律走行の実験環境



左：障害物に衝突する様子、右：ロボットが人を回避する様子

図5 実験時の様子

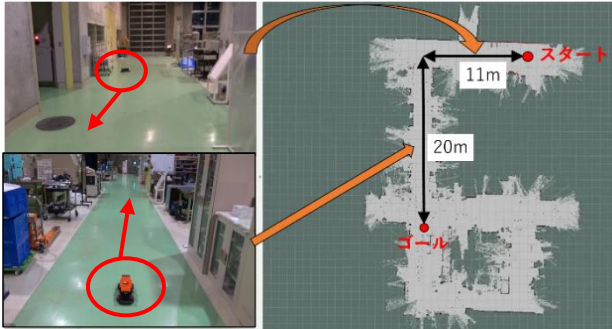


図3 環境地図による自律走行実験

行のナビゲーションについて述べる。

図3のように、スタート地点からゴール地点まで走行距離 31[m]を走行させる。ロボットの経路計画や経路追従などのナビゲーションには、ROS のナビゲーション用パッケージ `move_base` を使用した。また、ロボットの走行前方に人など動的な障害物がある場合に、ロボットの回避動作の可否を確認した。

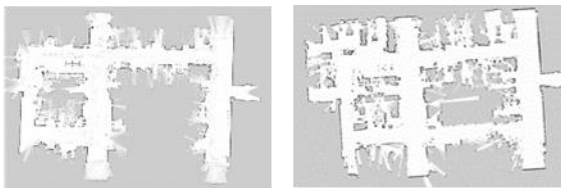
2. 3. 結果

Hector SLAM により作成した環境地図を図4 (左)に示す。Hector SLAM はオドメトリ情報を使用していないが、図4 (右) に示す Gmapping で作成した地図と同様、歪みの無い地図が作成できた。

作成した環境地図を利用し 31[m]の経路を自律走行させると、図5 (左) に示すような2次元 LiDAR 照射位置より低い障害物には衝突してしまうことが分かった。その後はゴールまで問題なく走行できた。また、図5 (右) のようにロボットの前に人が立つと止まることを確認できた。

2. 4. 考察

オドメトリ情報を用いる Gmapping では、不整地の環境ではオドメトリ情報が狂い、環境地図が作成できな



左：Hector、右：Gmapping

図4 環境地図の作成結果

い。一方、Hector SLAM は2次元 LiDAR のスキャン点群が環境地図と重なり合うように、環境地図に対するスキャン点群の相対的姿勢を計算するスキャンマッチング手法を使用している。オドメトリ情報が不要のため、オドメトリ情報の狂いによる環境地図作成への影響が無い⁸⁾。今回の環境は、

- ・平坦な路面
- ・スキャンマッチングに必要な壁などの周囲の障害物も多く存在する

ことから Gmapping、Hector SLAM 共に歪みの無い環境地図が作成できたと考えられる。今後は、より実環境に近い RTF 試験用プラントでそれぞれの SLAM 手法により、環境地図の作成を確認していく。

次に、2次元 LiDAR のみを使用した自律走行では、人などの動的な障害物は回避できるが、2次元 LiDAR 照射位置より低い障害物には衝突してしまうため、障害物回避の方法が課題である。今後は、障害物回避用1次元又は2次元 LiDAR 等をロボットに取付け、上から斜め下を測位することで、実験で認識ができなかった高さの低い障害物を認識する方法を検討していく予定である。

3. ロボットビジョン

3. 1. カメラとレーダによる三次元復元

3. 1. 1. カメラ点群とレーダ点群のマッチング

これまでの研究⁹⁾では、光学単眼カメラで復元した三次元点群 (以下、「カメラ点群」という。) に対し、レーダで測定した距離情報を事前校正によりマッチングさせることで、カメラ点群に絶対距離を与えていた。

本報告ではマッチングの自動化に向け、ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズム^{10) 11)}を用い、カメラ点群に距離情報を与える。ICP アルゴリズムとは、入力として与えられた2つの点群の各点における距離が最小となる、平行移動及び回転を推定し、位置合わせを自動で行うアルゴリズムである。ICP マッチングでは、入力する2つの点群のうち、一方を固定点群とし、もう一方の点群を移動点群とするため、固定点群は移動せず移動点群だけが平行移動及び回転する。

3. 1. 2. 実験手法

図6ように木製ブロックを組合せ、対象物を構築し、カメラとレーダそれぞれの点群を取得した。

次に、カメラ点群の前処理として、対象物正面の点のみを抽出し、抽出した点群をレーダで取得した点群（以下、「レーダ点群」と言う。）の縦横及び奥行き方向の軸に一致するように手で回転させた。図7にカメラ及びレーダ点群の三次元プロット図を示す。また、図8に前処理後のカメラ点群とレーダ点群の初期位置を示す。その後、点群の位置合わせライブラリ Libpointmatcher^{1,2)} を使用し、2段階のマッチング処理を行った。レーダ点群を固定点群とし、カメラ点群を移動点群とした。1回目では、固定点群を基準とし、移動点群を平行移動及び回転させ、両点群の大まかな位置合わせを自動で行う。2回目では、固定点群に移動点群のスケールを合わせる処理を含め、位置合わせを自動で行う。

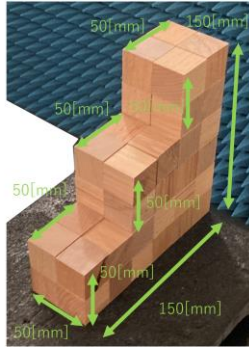


図6 対象物の寸法

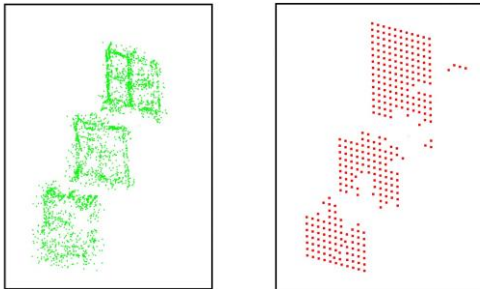


図7 カメラ点群（左）とレーダ点群（右）

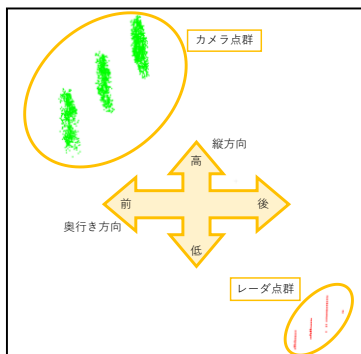
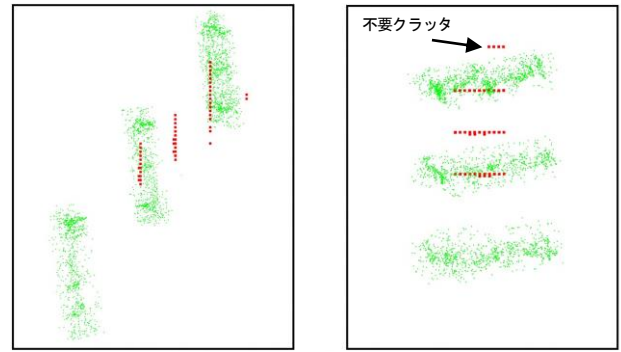


図8 前処理後の点群位置（右側側面図）

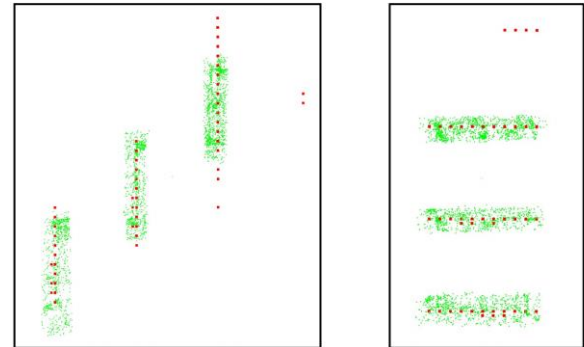
3. 1. 3. 実験結果

図9に1回目の ICP マッチング結果を示す。カメラ



左:右側側面図、右:上面図

図9 1回目のマッチング結果



左:右側側面図、右:上面図

図10 2回目のマッチング結果

及びレーダ点群を緑及び赤で色分けした。図9より、カメラ点群及びレーダ点群の大まかな位置は一致していたが、両点群のスケールは一致していないことが確認できた。なお、マッチング処理により、移動点群のカメラ点群は固定点群のレーダ点群座標系に変換される。

次に、2回目の ICP マッチング処理の結果を図10に示す。図9と同様、カメラ点群及びレーダ点群を緑及び赤で色分けした。図10より、カメラ点群及びレーダ点群が概ね一致していることが確認できた。

3. 1. 4. 考察

マッチング後のカメラ点群及び対象物について、奥行き方向のずれの程度を比較するため、マッチング後のカメラ点群（以下、「マッチ後カメラ点群」と言う。）

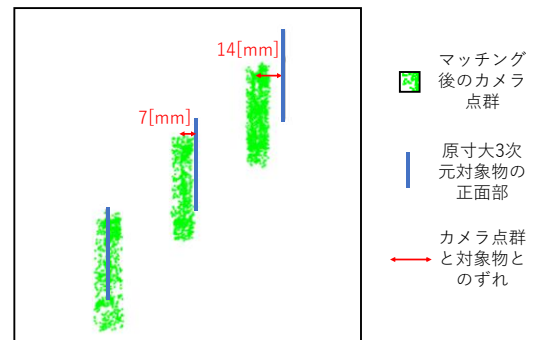


図11 3次元対象物とカメラ点群の奥行き方向の比較

に、本来あるべき位置に実スケールの対象物を重畳した図を図 1 1 に示す。実スケール対象物位置及びマッチ後カメラ点群はそれぞれ青及び緑で色分けし、図を見やすくするため実スケール対象物位置は正面部分だけを表示した。なお、カメラから最も近い対象物面がマッチ後カメラ点群の先頭面と一致するように手で対象物の位置を合わせた。

図 1 1 より、実スケール対象物の 2 段目の面に対し、マッチ後カメラ点群の 2 段目の面がおよそ 7[mm] 本来の位置より前方にずれていることが確認できる。また、3 段目の面も本来あるべき位置より前方におよそ 14[mm] のずれが生じている。したがって、マッチ後カメラ点群が 1 段上がるごとに 7[mm] 単位で本来あるべき位置よりずれていることになる。これは、マッチ後カメラ点群がレーダ点群にマッチングされた際にスケールが合わせられた結果と考えられる。対策として、本実験に用いたレーダの校正を行い、高い距離分解能が得られるレーダを用いることでこの問題は解決できると考えている。

次に、マッチ後カメラ点群及び三次元構造物の縦方向の比較を行うため、マッチ後カメラ点群及び三次元対象物を図 1 2 に示す。図 1 2 からマッチ後カメラ点群及び実スケール対象物との間の差に規則性は見出せない。抽出したマッチ後カメラ点群が縦方向に外れ値をそれぞれ多く含んでいることが要因と考えられる。

図 1 3 にマッチ後カメラ点群の縦方向の外れ値を、目視により手で除去した点群を示し、縦横方向の大きさを表示した。図 1 3 より、どの面においても縦方

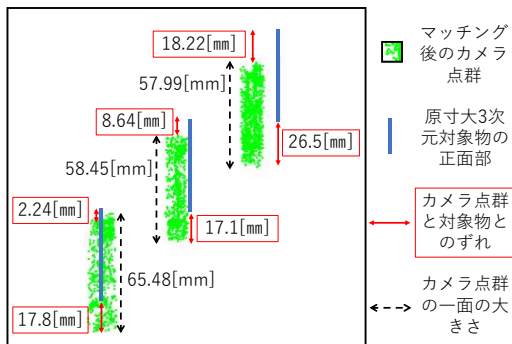


図 1 2 3次元対象物とカメラ点群の縦方向の比較

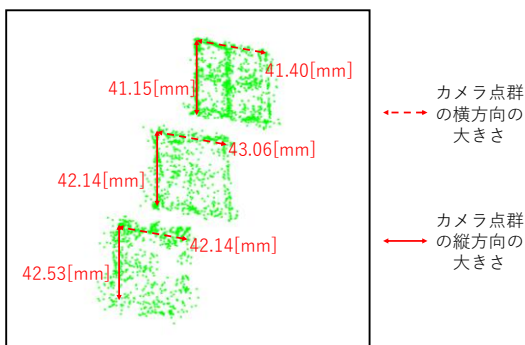


図 1 3 カメラ点群の縦横方向の寸法

向 43-2[mm] の範囲におさまっていることが確認できる。また横方向についても幅 43±2[mm] の範囲におさまっていることが確認できる。

縦横方向の大きさが 43[mm] 前後で推移していることは、本実験に用いたレーダの最小距離分解能が 43.6[mm] によるものと考えられる。つまり、レーダの距離分解能とカメラ点群の奥行き方向のスケールが一致するように、移動点群のカメラ点群全体のスケールを固定点群にしているレーダの最小距離分解能に合わせてきたため、縦横方向についても 43[mm] 前後になったと考えられる。

3. 2. カメラによる構造復元系評価

3. 2. 1. REMODE の歪み評価

これまでの研究では^{9) 13)}により、単眼カメラから対象物の三次元復元を行うには REMODE¹⁴⁾ が有用であり、復元したデータの縦、横及び対角線に歪みが生じないことを確認した。本報告では、カメラから REMODE により復元した構造物（点群）との距離を測定することにより、REMODE による平面形状復元時の奥行き方向の歪み評価を行う。

3. 2. 2. 実験手法

実験環境を図 1 4 に示す。3 軸加工機の主軸に単眼カメラ (Kayeton 製 KYT-U030-GS01M) とレーザ距離計 (BOSCH 製 GLM50-23G) を取付け、ピッチ 20[mm] のチェッカーパターンを張ったステージ上に、図 1 4 のとおり 300[mm] の間隔で円形マーカ①～④を配置した。円形マーカ①②③④の順に、カメラをステージと平行になるよう XY 平面上で走査し、REMODE による復元を行った。マーカとカメラの実距離はレーザ距離計で測定し、復元した REMODE 点群上のマーカとカメラの距離は、ROS のデータ可視化ツールである Rviz の「Measure」機能を使用して測定した。測定は同一条件で 10 回実施し、平均値及び標準偏差を算出した。

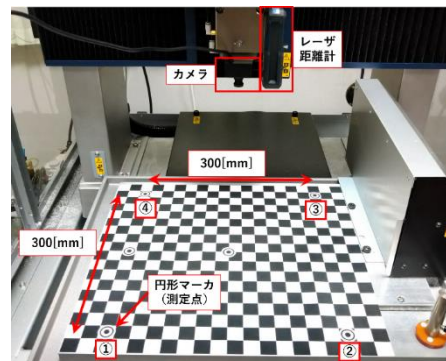


図 1 4 REMODE 歪み評価の実験環境

3. 2. 3. 結果

結果を図 1 5 に示す。各マーカ位置において、カメラと REMODE 点群の Rviz 上の距離[無単位]を赤枠、

レーザ距離計の測定値を青枠で示している。レーザ距

(n=10)

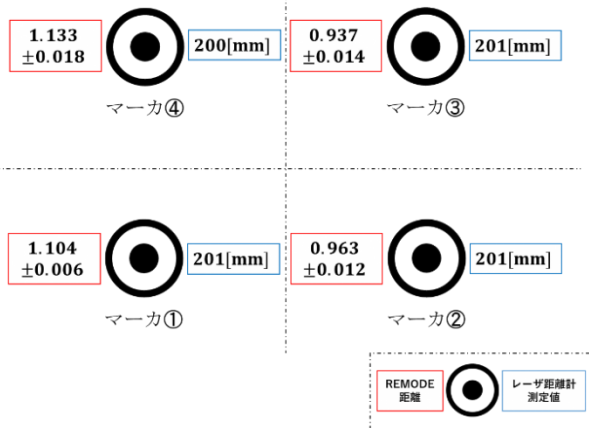


図 15 平面形状復元時の奥行き方向の距離測定

離計の測定値は①、②及び③で 201 [mm]、④で 200 [mm] とほぼ一定であるのに対し、REMODE 点群の距離は、① 1.104 ± 0.006、② 0.963 ± 0.012、③ 0.937 ± 0.014、④ 1.133 ± 0.018 と各点でばらつきがみられた。また、マーカー位置を移動するたびに、標準偏差が大きくなることが分かった。

3. 2. 4. 考察

REMODE 点群の距離にばらつきが生じた原因の一つとして、Visual SLAM アルゴリズムである SVO¹⁵⁾ の位置推定誤差が考えられる。

REMODE により復元したマーカー及びチェッカーパターン (図中黒点部) と SVO の位置推定結果によるカメラの軌跡 (図中青線) を図 16 に示す。カメラは XY 平面上を走査しているため、本来であればカメラの軌跡は平面上で正方形を描く。しかし、図 16 青線に示すように、SVO によるカメラの軌跡は直線とならず、軌跡に歪みが生じている。

REMODE は SVO の位置推定結果をもとに画像中の特徴点をマッチングし復元する。そのため、REMODE による復元時にも、SVO の位置推定誤差の影響が現れたと考えられる。

また、標準偏差の増加について、カメラの移動量が増えるにつれ SVO の位置推定誤差が累積された結果、

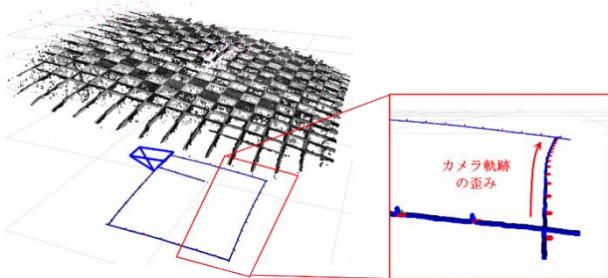


図 16 平面形状復元時の奥行き方向の距離測定

マーカー④の標準偏差が最大となったと考えられる。

その他、レンズのディストーション (歪曲収差) も REMODE 復元時の歪みに強く影響する要因と考えるが、これはカメラの校正により、画像へ補正をかけることで影響を抑えられていると考える。

3. 3. AI による深度推定

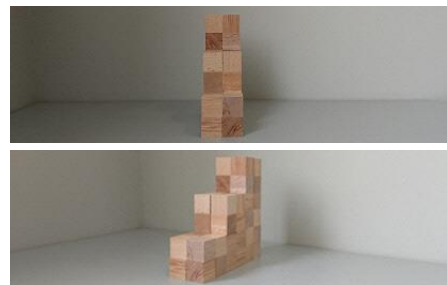
3. 3. 1. AI 深度推定モデルの比較

これまでの研究では¹³⁾では、畳み込みニューラルネットワークを用いて単眼カメラによる画像から深度を推定する手法である Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks¹⁶⁾

(以下、「FCRN」と言う。)を用いた AI 深度推定を行ってきた。本報告では新たに、教師なしの深度推定学習モデルであり、カメラ自身の動き (エゴモーション) も推定できる struct2depth¹⁷⁾ の動作と比較する。

3. 3. 2. 実験手法

対象物は図 6 と同じ木製ブロックを組み合わせたものを用い、図 17 に示す正面と斜め横からの写真を用いて深度推定を行った。



正面 (上図)、斜め横 (下図)

図 17 対象物の写真

3. 3. 3. 実験結果

図 18 は図 17 の写真に対して FCRN により深度推定を行った結果である。黄色い部分の距離は近く、紫色になるにしたがって距離が離れていることを示している。正面からの画像では対象物の段差による奥行き方向の距離の違いが確認できなかった。また斜め横からは対象物付近で距離が異なっていることが確認できるが輪郭がはっきりしない結果となった。一方、図 1

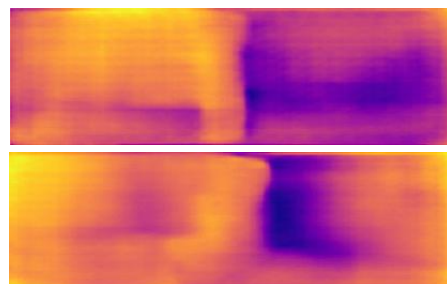


図 18 FCRN による深度推定

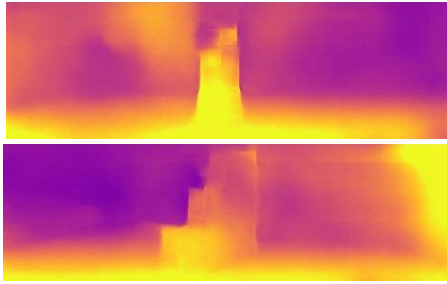


図 19 struct2depth による深度推定

9は同様の推定について struct2depth を用いて行った結果である。FCRN と比べて輪郭がはっきりしており、対象物の形状が確認できる。また、正面からの画像において、奥行き方向の距離の違いも推定できていた。

3. 3. 4. 考察

FCRN と struct2depth の推定結果を比べると struct2depth の方が正面と斜め横からの写真に対してははっきりと形状が確認できる結果となった。これは struct2depth の方が正しく距離推定できているため対象物の段差による奥行き方向の違いをうまく表現しているためと考えられる。

4. 点検のための音収集

4. 1. 音源方向の提示

本項は工場等のような複数の音源及び雑音がある状況の検査を想定する。小型ロボットに搭載するマイクロホンアレイにより、

- ・音源の方向を定位
- ・音源が発した異音を検出
- ・異常音をオペレータへ立体音響により提示

するシステムの開発を目指している。

音源定位の手法には遅延和(Delay-and-Sum, DS)法や MUSIC(MUltiple Signal Classification)法^{18) 19)}等が存在する。本報告では遅延和法と比べ定位する角度分解能の高い MUSIC 法を用いた音源定位システムを実装し、定位性能の確認を行った。

4. 2. 実験

4. 2. 1. マイクロホンアレイ

設計・製作した球形 25ch の音源定位用のマイクロホンアレイ、マイクロホンアレイの音源位置に関する座標系を図 20 に示す。マイクロホンアレイは、各マイクロホンの音孔が半径 50[mm] の球面上かつ球表面においてほぼ等密度の配置となるよう設計し、筐体は 3D プリンタ ((株) Keyence AGILISTA-3200) により造形した。

マイクロホンアレイは、(株) システムインフロンティアのサンプリングオーディオデバイス (RASP-ZX)

及びマイク (CSMIC-S1R0)、マイクケーブル (CSMIC-CABLE-150mm) により構成した。サンプリング周波数は 16kHz である。

4. 2. 2. 実験で使用する音源定位システムの概要

MUSIC法を用いた音源定位システムを python により実装した。FFT をかけた 25ch のマイク信号の空間相関行列を X とし、 X の雑音部分空間に対応する固有ベクトルを e_i 、アレイ・マンフォールド・ベクトル^{20) 21)} を $a(\theta, \varphi)$ としたとき、MUSIC スペクトル $P(\theta, \varphi)$ は、

$$P(\theta, \varphi) = \frac{a(\theta, \varphi)^H a(\theta, \varphi)}{a(\theta, \varphi)^H E_n E_n^H a(\theta, \varphi)}$$

$$E_n := [e_{N+1}, \dots, e_M]$$

で表すことができる。この時、 N は音源数、 M はマイク数を示す。MUSIC スペクトルのピークが立つ角度が音源方向を表す。本実験では、アレイ・マンフォールド・ベクトルは θ, φ とともに $5[^\circ]$ 毎に幾何計算した値を用いた。

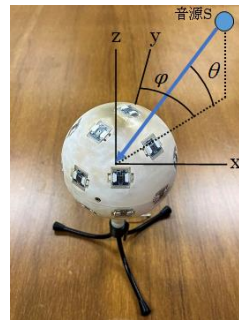


図 20 マイクロホンアレイと座標系

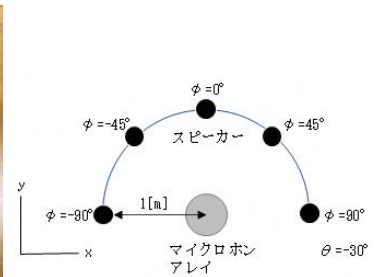


図 21 マイクロホンアレイとスピーカーの配置

4. 2. 3. 無響室における測定実験

製作したマイクロホンアレイによる MUSIC 法を用いた音源定位性能を確認するため、図 21 に示すように各 φ 位置にスピーカー (Anker SoundCore mini) を配置した際にスピーカーから発したホワイトノイズを、マイクロホンアレイで測定し音源定位を行った。この時、すべての位置において θ が約 $-30[^\circ]$ となるよう、マイクロホンアレイの高さをスピーカーより 577[mm] 高く設置した。

4. 3. 結果

マイクロホンアレイの測定データから算出した MUSIC スペクトルにおけるピーク位置の角度を表 1 に示す。アレイ・マンフォールド・ベクトルは θ, φ とともに $5[^\circ]$ 毎の値を持っており、音源定位の分解能は同様に $5[^\circ]$ 程度であることが確認できた。

また、表 1 の No. 2 のスピーカー配置から発した音の MUSIC スペクトルを図 22、アコースティックカメラ (日本音響エンジニアリング (株) SoundGraphy SG-02)

表 1 MUSIC 法による音源定位結果及び誤差

No.	配置位置[°]	定位位置[°]	誤差[°]
1	-90	-85	5
2	-45	-50	5
3	0	0	0
4	45	50	5
5	90	95	5

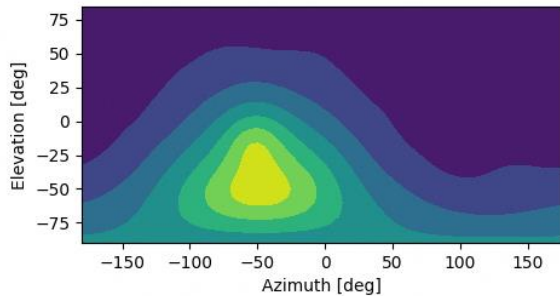
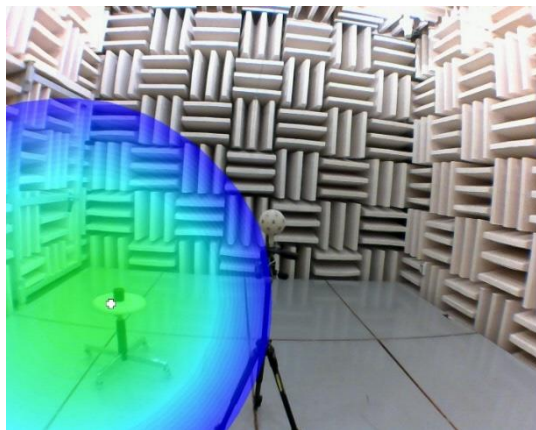


図 2.2 No. 2 での MUSIC スペクトル



白十時は最大音位置を示し青から緑に従い音が大きい
図 2.3 スピーカ No. 2 配置のアコースティックカメラの測定結果

により測定した結果を図 2.3 に示す。アコースティックカメラでもスピーカー位置にピークが出ており、製作したマイクロホンアレイにより適切に音源定位ができていたことが確認できた。

4. 4. 考察

MUSIC スペクトルの計算に用いるアレイ・マニフォールド・ベクトルは音源から各マイクロホンまでの伝達関数であり、本実験では各マイクロホン間の位相差を幾何計算した値のみを用いている。今回は無響室において実験を行ったことで良好な結果を得ることができたが、実環境ではマイクロホンアレイ球表面での音波の回折等についても考慮する必要があると考える。

手拍子の音の実測値からアレイ・マニフォールド・

ベクトルを導出する研究^{2,2)} も行われており、実測値を用いた音源定位も今後プログラムに実装していく。

5. 結言

本報告では、インフラ、プラントの点検場所へ自律走行して外観検査をするロボットの、要素技術の研究開発の取り組みを示した。

自律走行システムでは、Hector SLAM を利用し Gmapping と比べ環境地図に歪が無い事を確認した。また 2 次元 LiDAR 照射位置より低い障害物には、回避できず追突してしまう課題が分かった。

ロボットビジョンでは、カメラ点群及びレーダ点群を ICP マッチングを利用し概ね一致させられた。しかし移動点群のカメラ点群が、固定点群のレーダ点群へマッチングされスケールが合わせられるために、マッチ後カメラ点群はレーダの距離分解能に従う精度の限界が確認された。

対象物のカメラ点群を得る REMODE の奥行き方向の歪み評価を行った。カメラ姿勢推定をする SVO 軌跡に歪みが生じ、奥行き方向への歪が発生することが分かった。

AI 深度推定に、教師なしの深度推定モデル struct2depth を用い、対象物の段差による奥行き方向の違いを表現していることを確認した。

点検のための音収集では、25ch の球面マイクロホンアレイを製作し、MUSIC 法により誤差 45+5[°] 以内で方位方向の音源定位ができることを確認した。

今後は、ここで分かった課題を解決し、自律走行による外観検査ロボットに必要な機能実現に向け、研究開発を進めていく。

参考文献

- 1) 経済産業省. 2050 年までの経済社会の構造変化と政策課題について, 第 1 回 産業構造審議会 2050 経済社会構造部会 資料 4, 平成 30 年 9 月, p.3.
- 2) 経済産業省. スマート保安の促進 ~産業保安分野におけるテクノロジー化の推進~, 第 2 回 産業構造審議会 保安・消費生活用製品安全分科会 産業保安基本制度小委員会スマート保安の促進資料, 2021 年 3 月 18 日, p.1.
- 3) 石油コンビナート等災害防止 3 省連絡会議. プラントにおけるドローンの安全な運用方法に関するガイドライン Ver2.0, 2020 年 3 月.
- 4) スマート保安官民協議会. スマート保安推進のための基本方針, 令和 2 年 6 月 2 9 日.
- 5) 吉田英一, 菅野雄大 他. GPS とセンサの組み合わせによる自己位置推定システムの開発 (第 3 報), 福島県ハイテクプラザ研究報告書, 福島県ハイテクプラザ, 2020.

- 6) Giorgio Grisetti, Cyrill Stachniss, Wolfram Burgard. “Improved Techniques for Grid Mapping with Rao-Blackwellized Particle Filters”, TR0 2007.
- 7) Stefan Kohlbrecher, Johannes Meyer, Oskar von Stryk, Uwe Klingauf. “A Flexible and Scalable SLAM System with Full 3D Motion Estimation”, SSRR 2011.
- 8) 原 祥堯, “ROS を用いた自律走行”, 日本ロボット学会誌, Vol. 35 No. 4, p. 286~290, 2017.
- 9) 鈴木健司, 三浦勝吏 他. “狭隘内部空間の三次元構造復元に関する研究開発 (第2報)”, 令和2年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2020, p. 12-16.
- 1 0) “複数の点群に対する位置合わせ手法の性能比較”. 京都大学. <http://www.mm.media.kyoto-u.ac.jp/old/research/thesis/2011/b/nakai/nakai.pdf>, (参照 2021-02-09)
- 1 1) “20090924 姿勢推定と回転行列”. 広島大学. <https://www.slideshare.net/ttamaki/20090924>, (参照 2021-02-09)
- 1 2) “ethz-asl/libpointmatcher”. GitHub. <https://github.com/ethz-asl/libpointmatcher>, (参照 2021-02-09)
- 1 3) 鈴木健司, 三浦勝吏 他. “狭隘内部空間の三次元構造復元に関する研究開発”, 令和元年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2019, pp. 34-39.
- 1 4) PIZZOLI Matia, FORSTER Christian, SCARAMUZZA Davide. “REMODE: Probabilistic, monocular dense reconstruction in real time”. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2014. p. 2609-2616.
- 1 5) FORSTER Christian, PIZZOLI Matia, SCARAMUZZA Davide. “SVO: Fast semi-direct monocular visual odometry”. 2014 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA). IEEE, 2014. p. 15-22.
- 1 6) Iro Laina, Christian Rupprecht, Vasileios Belagiannis, Federico Tombari, Nassir Navab. “Deeper Depth Prediction with Fully Convolutional Residual Networks.” International Conference on 3D Vision. IEEE, 2016, p. 239-248.
- 1 7) Vincent Casser, Soeren Pirk, Reza Mahjourian, Anelia Angelova. “Depth Prediction Without the Sensors: Leveraging Structure for Unsupervised Learning from Monocular Videos.” arXiv:1811.06152.
- 1 8) 西村竜一. “5章 アンビソニックス”. 映像情報メディア学会誌. 2014, vol. 68, no. 8, p. 616-620.
- 1 9) 浅野太. “音を分ける”. 計測と制御. 2004, vol. 43, no. 4, p. 325-330.
- 2 0) 浅野太. “部分空間法”. “音のアレイ信号処理—音源の定位・追跡と分離—”. 日本音響学会. 初版第4版. コロナ社. 2019, p. 107-146.
- 2 1) 浅野太. “アレイ信号処理の基礎”. “音のアレイ信号処理—音源の定位・追跡と分離—”. 日本音響学会. 初版第4版. コロナ社. 2019, p. 1-27.
- 2 2) 奥乃博, 中臺一博. “非同期分散マイクロホンアレイのオンラインキャリブレーションと伝達関数の推定 (〈小特集〉マイクロホンアレイの新しい技術展開).” 日本音響学会誌. 2014, vol. 70, no. 7, p. 397-402.