

# 自律走行外観検査ロボットの研究開発（第3報）

Research and development of an autonomous mobile robot for visual inspection (3rd)

電子・機械技術部 電子・情報科 石澤満 三瓶史花 鈴木健司 太田悟  
機械・加工科 菅野雄大  
ロボット・制御科 清野若菜 近野裕太  
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

工業プラントのロボット巡回点検のため、外観検査機能、異音検知・音源方向提示機能を有する点検ロボットを開発した。2次元 LiDAR を搭載した走行ロボットにより、試験用プラント内を自律走行できた。また、遠隔操作装置を用い手動走行できることを確認した。外観検査は RGB カメラ及びステレオカメラにより、ダクトの三次元構造復元、寸法計測をした。点検のための音収集は、試験用プラントで走行ロボットに搭載した2つのマイクロホンアレイを用い、音源位置推定システムの精度を評価した。

**Key words:** 自律走行、ロボット、三次元構造復元、音源定位、音源位置推定

## 1. 緒言

石油、化学、電力、ガス等の産業・インフラ分野では、設備の高経年化、人材の高齢化及び高度な専門知識・技能伝承力の低下による担い手不足などの課題対応が求められている。さらに再エネなど新規設備の増加が見込まれる業界もあり、保安業務のより一層の安全性及び高効率性を実現することが求められている。これらの課題に対し、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。スマート保安官民協議会<sup>1)</sup>の中期計画では、巡回ロボットの自動走行により、画像、音、振動等の点検データを自動で取得し、異常有無の診断を行えることが掲げられており、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。

本研究開発は、今後のプラントに求められる点検ロボット実現に向け、指定する場所へ自律的に移動し、外観検査機能、異音検知・音源方向提示機能を有した点検ロボットの開発を目指している。第1報<sup>2)</sup>では、走行ロボットの自律走行に必要な環境地図の作成手法の検討、カメラから構築した三次元点群へのレーダ取得点群とのICPマッチング、カメラの姿勢推定評価、AI深度推定、25chマイクロホンアレイを用いた音源定位について報告した。第2報<sup>3)</sup>では、日光などの外乱のある半屋外環境での自律走行、外観検査のためのミリ波レーダを用いたイメージング、点検のための音収集による異常音検知及び音源方向提示について取り組んだ。

本報では、走行ロボットの自律走行及び簡易コックピットを用いた手動走行、走行ロボットに搭載したカメラによる三次元構造復元、走行ロボットに搭載したマイクロホンアレイによる音源位置推定に取り組んだ

ので、それぞれの取り組みを報告する。

## 2. 自律走行外観検査システム

### 2. 1. システム概要

#### 2. 1. 1 走行システム

走行ロボットの走行システムの動作におけるフローチャートを図1に示す。走行システムには自律走行と手動走行の2つの動作モードがある。作成した環境地図を使用し、予め設定したウェイポイントに沿った自律走行により工業プラント内を巡回し、カメラ画像によりプラント内にある配管等の設備の外観を検査するとともに、マイクロホンアレイで音源位置を推定する。異常音や外観の異常があった場合は手動走行に切り替え、後の章で述べる三次元構造復元を行う。

また、走行ロボットの外観を図2に示す。走行ロボットは、i-Cart mini をベースとし、音収集用の25ch球形マイクロホンアレイ、三次元構造復元用のRGBカメラ及びステレオカメラ、環境地図の作成や自律走行用のLiDARを搭載した。

#### 2. 1. 2 三次元構造復元システム

三次元構造復元の手法には、Visual-SLAMの一種であるDROID-SLAM<sup>4)</sup>を用いた。DROID-SLAMは、RGBカメラ、ステレオカメラ、RGB-Dカメラで動作し、他の手法と比べカメラの姿勢を保持しやすいという特徴がある。動作環境及びシステム構成をそれぞれ表1、図3に示す。今回用いたカメラは、RGBカメラ及びステレオカメラが一体となったデプスセンサユニット<sup>5)</sup>（以下、「デプスユニット」という。）である。走行ロボットの右側面にデプスユニットを搭載し、カラー画像及びデプス画像をDROID-SLAMに入力した。

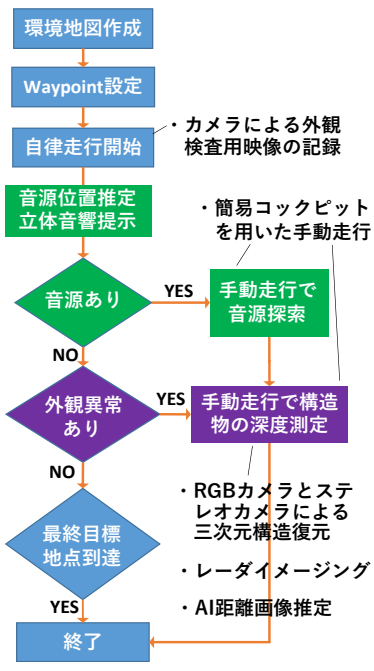


図1 動作フローチャート

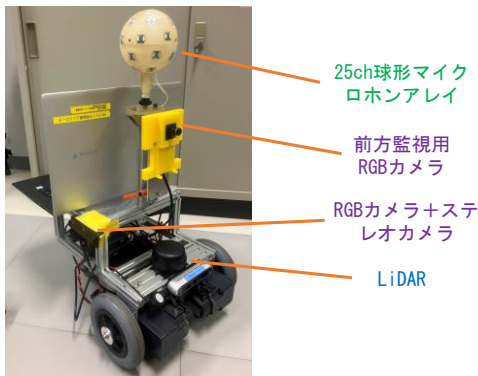


図2 走行ロボットの外観

表1 動作環境

|         |                   |
|---------|-------------------|
| OS      | Ubuntu 20.04 LTS  |
| CPU     | Core i5 13600K    |
| GPU     | GeForce RTX3070ti |
| CUDA    | 11.7              |
| PyTorch | 1.13.1            |

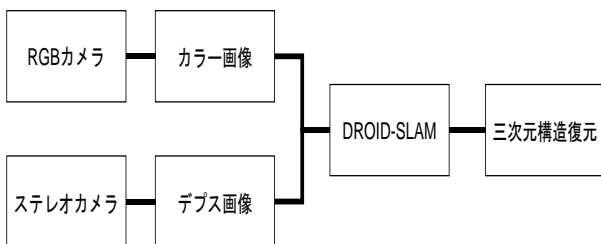


図3 三次元構造復元システムの概略図

### 2. 1. 3 音源位置推定システム

本研究では、マイクロホンアレイを用いた音源定位

及び走行ロボットの自己位置推定を用いて、異なる2つの観測点での測定結果から三角測量により音源位置を推定する。模式図を図4に示す。音源位置は以下の式により推定した。

$$\frac{y_1 - y}{x_1 - x} = \tan \beta_1$$

$$\frac{y_2 - y}{x_2 - x} = \tan \beta_2$$

$x, y$ : 音源位置の推定座標

$x_1, y_1$ : マイクロホンアレイ 1 の位置座標

$x_2, y_2$ : マイクロホンアレイ 2 の位置座標

$\beta_1, \beta_2$ : マイクロホンアレイ 1, 2 から見た音源到来方向

音源到来方向の推定には、ロボット聴覚オープンソースソフトウェア HARK<sup>6)</sup> が提供する MUSIC (multiple signal classification) 法による音源定位及び音源トラッキング法を用いた。音源定位は水平方向のみを行い、音源定位に用いる伝達関数は、水平方向  $1^\circ$  ごとにマイクロホンアレイの幾何形状から計算により求めた。推定結果は Robot Operating System (以下、「ROS」という。) のトピックとして配信することで、分散処理により異なる観測点での音源到来方向推定結果と自己位置推定結果を同期して取得し、三角測量により音源位置を推定した。音源位置の推定結果は、ROS の三次元可視化ツール RViz を用いて走行ロボットが作成した環境地図上に可視化した。

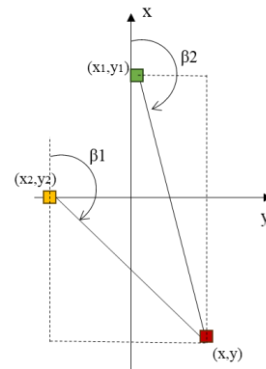


図4 音源位置推定の模式図

## 3. 自律走行における音源位置推定

### 3. 1. 実験

#### 3. 1. 1 自律走行実験

本研究では、走行ロボットがプラント内を定期巡回し、音源地図を作成することを想定し、図5(a)の福島ロボットテストフィールド (以下、「RTF」という。) 試験用プラントで自律走行実験を行った。i-Cart mini をリモコン操作して、図5(b)に示す環境地図を作成した。SLAM手法としては Gmapping を、LiDARは

Slamtec 社製 RPLIDAR A3 を用いた。

経路計画及び経路追従には ROS のナビゲーション用パッケージ move\_base を使用した。また、ウェイポイントの設定には follow\_waypoints パッケージ<sup>7)</sup>を使用した。follow\_waypoints パッケージは環境地図上でウェイポイントの位置の他、ウェイポイント上での走行ロボットの姿勢や待ち時間を設定できる。待ち時間は、走行ロボットに搭載したカメラにより、試験用プラント内のパイプ等の外観の観察ができるように、5 秒に設定した。

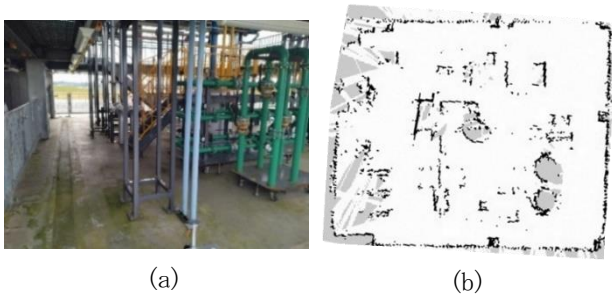


図5 RTF 試験用プラント(a)と環境地図(b)

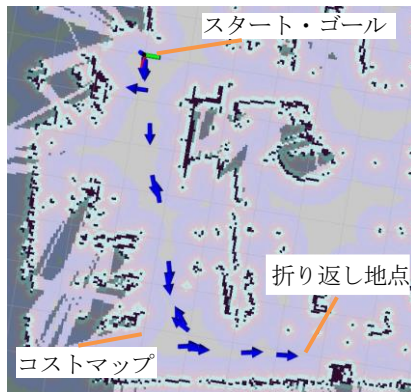


図6 環境地図とウェイポイント

さらに、図 5 (b) の環境地図を用いて、図 6 に示すように、地図中に青矢印で示したウェイポイントを 13 点設定し、往復約 12[m] の距離を自律走行することとした。また、地図上に、走行ロボットが障害物と接触しないよう、コストマップと呼ばれる、障害物周辺に設けたマージンを設定し、紫色で表示した。ウェイポイントを設定する際は、このコストマップを参考に障害物から離れた位置に設定した。

自律走行実験では、音源位置推定時に必要となる走行ロボットの自己位置推定に、走行ロボットのタイヤの回転数から走行ロボットの自己位置を推定するホイールオドメトリを使用した。

### 3. 1. 2 音源位置推定実験

実験時の地図及び配置図を図 7 に示す。本実験では音源数を 1 とし、プラント内の配管から発生するス

チーム音を想定して、敷地内に配置した直径 70mm の小型スピーカー (Anker Sound Core mini) からスチーム音を再生した。マイクロホンアレイ 1 は、25ch 球形マイクロホンアレイを走行ロボットの上部に搭載し、経路上を往復移動しながら音源定位した。マイクロホンアレイ 2 は、将来的には走行ロボットに搭載し移動しながら音源定位をすることを想定し、本実験では 8ch マイクロホンアレイを敷地内に固定して配置し、音源定位した。

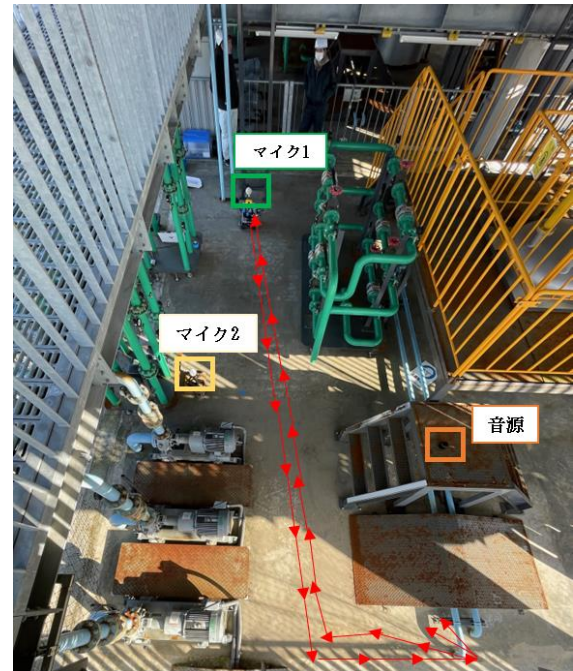


図7 実験配置図及びロボット移動経路

## 3. 2. 結果

### 3. 2. 1 自律走行実験の結果

作成した環境地図を使用し、試験用プラント内で自律走行実験を行い、図 8 に自律走行時の走行軌跡及び後述する音源位置推定結果を示す。赤線はオドメトリによる走行軌跡である。また、推定された音源位置を緑、正解音源の位置を橙でプロットした。図のように、スタート地点からゴール地点まで往復約 12[m] の距離を自律走行できることを確認できた。

### 3. 2. 2 音源位置推定実験の結果

音源位置推定の誤差を表 2 に示す。音源位置推定の計算には、マイクロホンアレイ 1 とマイクロホンアレイ 2 の音源定位結果の相対角度差が  $10[^\circ] \sim 360[^\circ]$  の範囲のデータを用いた。正解音源位置と推定位置の間の距離誤差の平均は、1.58[m]であった。また、上述範囲の推定結果 116 点の平均位置は  $(x, y) = (4.58, -1.52)$  であり、平均位置と正解音源位置の間の距離誤差は 0.64[m]であった。本研究では、走行ロボットが定期巡回時に音源地図を作成し、作成された音源地図を

もとにオペレータがロボットを手動操作により音源位置付近まで移動させ、異音等を点検することを想定しているため、位置推定誤差 1[m]以内を目標としており、本実験での平均推定位置はそれより小さな誤差となった。先行研究<sup>8)</sup>では、複数音源環境下で得られた複数の音源位置をベイズ混合ガウスモデルによりクラスタリングし、それぞれの音源位置を推定している。より正確な音源位置推定を行うためには、リアルタイムで推定された音源位置に対し、統計的処理を行いより確率の高い位置を推定する必要がある。

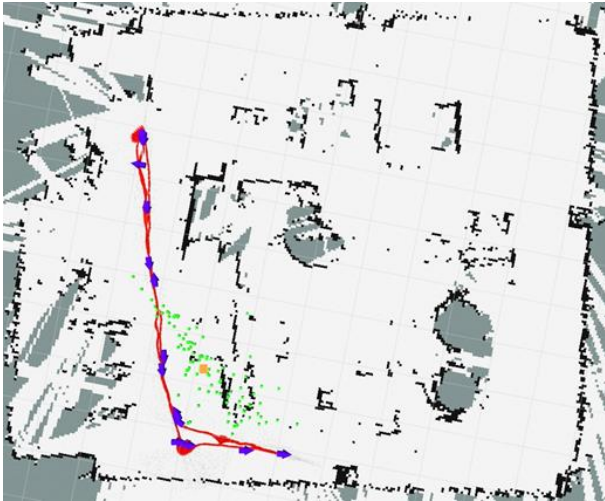


図8 自律走行時の走行軌跡及び音源位置推定結果

表2 音源位置推定結果の誤差

|                     |                           |
|---------------------|---------------------------|
| 正解音源位置              | $(x, y) = (4.3, -2.1)$    |
| 推定結果の平均位置           | $(x, y) = (4.58, -1.52)$  |
| 平均位置と正解音源位置間の誤差     | 0.64 [m]                  |
| マイクロホンアレイ 1 の音源定位誤差 | 平均: 17.1[°]<br>標準偏差: 24.9 |
| マイクロホンアレイ 2 の音源定位誤差 | 平均: 4.97[°]<br>標準偏差: 8.20 |

### 3. 3. 考察

#### 3. 3. 1 自律走行実験結果の考察

自律走行の課題として、狭いルートを通り、走行ロボットが袋小路に入った場合、障害物に囲まれた状態となるため、目標地点までの経路が生成されずスタックしてしまう課題がある。対策として、走行した経路を戻るように経路を再生成する方法が考えられる。反対に、走行ロボット周辺に障害物が少ない環境では、LiDAR を使用した地図とのマッチングができず、走行ロボットの自己位置推定の精度が低下する課題がある。対策として LiDAR とカメラなどのその他センサと併用した SLAM を用いることで、地図とのマッチング率が向上し、障害物が少ない環境でも自己位置推定が可能であると思われる。

#### 3. 3. 2 室内における音源位置の推定

予備実験として、当所の無響室及び実験棟にて音源位置推定を評価した。予備実験では、音源を環境地図上の原点に設置し、一辺 2[m] の正方形経路上をロボットが移動しながら音源定位した。結果を表3及び図9に示す。平均位置の誤差、音源定位誤差の標準偏差ともに試験用プラントでの実験結果よりも小さいことが分かる。試験用プラントでの実験時には、風速約 10[m/s]の風が吹いており、ウィンドノイズの影響で音源定位の誤差及びばらつきが大きくなったと考えられる。試験用プラントのような屋外に近い環境下では、風の影響を考慮する必要がある。また、無響室に比べて実験棟での音源定位誤差のばらつきが大きいことから、残響も音源定位精度に影響することが分かった。また、図9から、2つのマイクロホンアレイが近距離に位置する場合、及び音源に対し対角に位置する場合には、三角測量の計算精度が低下し、位置推定誤差が大きくなることが分かった。複数台のロボットを移動させながら音源位置推定を行う場合は、上述の位置関係を避けるよう制御する必要がある。

表3 音源位置推定結果の誤差（無響室、実験棟）

|                     | 無響室                       | 実験棟                        |
|---------------------|---------------------------|----------------------------|
| 正解音源位置              | $(x, y) = (0, 0)$         | $(x, y) = (0, 0)$          |
| 推定結果の平均位置           | $(x, y) = (-0.06, 0.06)$  | $(x, y) = (0.55, 0.27)$    |
| 平均位置と正解音源位置の誤差      | 0.09 [m]                  | 0.61 [m]                   |
| マイクロホンアレイ 1 の音源定位誤差 | 平均: 1.10[°]<br>標準偏差: 2.68 | 平均: -5.53[°]<br>標準偏差: 12.5 |
| マイクロホンアレイ 2 の音源定位誤差 | 平均: 0[°]<br>標準偏差: 0       | 平均: 0.53[°]<br>標準偏差: 2.69  |

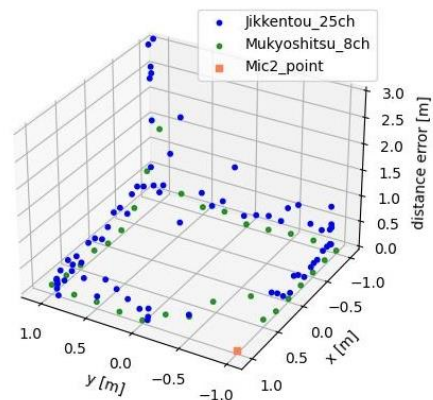


図9 ロボット自己位置と音源位置推定誤差

## 4. 手動走行における三次元構造復元

### 4. 1. 実験

#### 4. 1. 1 手動走行実験

走行ロボットの遠隔操作装置として、図10に示す簡易コックピットを製作した。図11に簡易コックピットの操作時の様子を示す。5個のモニターには、走行ロボットに搭載した2つのカメラ映像や環境地図、音源定位の結果、異音の音源地図を映すことで、走行ロボット周辺の障害物や音源位置を確認しながら手動走行が可能となる。また、ステアリング及びペダルにはROS対応のlogicool社製G29を用いた。アクセルペダルの踏み込み量に応じて走行ロボットの直進速度が増加し、ステアリング角の変化量に応じて角速度を増加させた。ただし、操作性を考慮し、ステアリング角が約 $15^{\circ}$ 以上は角速度 $0.15[\text{rad/s}]$ に一定とした。

手動走行実験では、走行ロボットを当所内の実験棟に配置し、別室にある簡易コックピットのモニターに映されたカメラ映像及び環境地図中の走行ロボットの自己位置推定結果の情報を参考に走行ロボットを遠隔操作した。図11のスタート地点からゴール地点まで約20[m]の距離を手動走行可能か検証した。



図10 簡易コックピット



図11 簡易コックピット操作時の様子

#### 4. 1. 2 三次元構造復元実験

三次元構造復元システムの精度評価のため、当所実験棟にあるダクトを三次元構造復元した。実験時の様子を図12に示す。オペレータが簡易コックピットで走行ロボットを前後方向に手動操作し、三次元点群データを取得した。

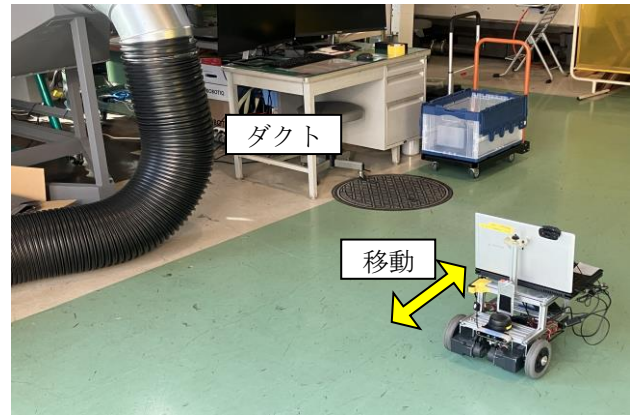


図12 三次元構造復元時の様子

### 4. 2. 結果

#### 4. 2. 1 手動走行実験の結果

図13に手動走行時の走行軌跡を示す。赤線はオドメトリによる走行軌跡である。図のように、スタート地点からゴール地点まで約20[m]の距離を手動走行できることを確認できた。

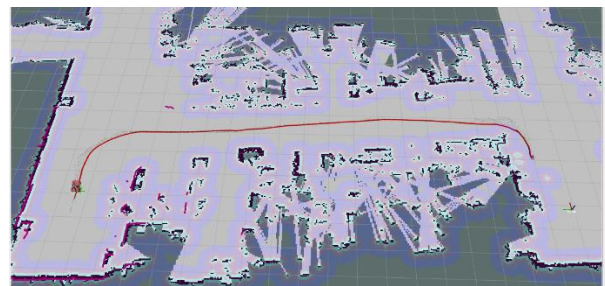


図13 手動走行時の走行軌跡

#### 4. 2. 2 三次元構造復元実験の結果

三次元構造復元結果を図14、DROID-SLAM点群(以下、「DROID点群」という。)と実寸法との寸法比較結果を表4に示す。図14左下の赤い四角錐は推定されたカメラの姿勢情報を表している。また、DROID点群の測定箇所①、②はCloudCompare<sup>9)</sup>のPoint picking機能を用い、2点間の長さ(小数第一位を四捨五入)を測定した。ダクトの直径325[mm]に対し、①、②はそれぞれ321[mm]、305[mm]だった。また、①、②の誤差は-4[mm]、-20[mm]であり、誤差率は①、②ともに7%未満であることが確認できた。

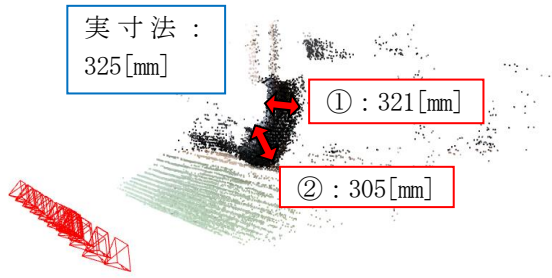


図 1 4 三次元構造復元結果

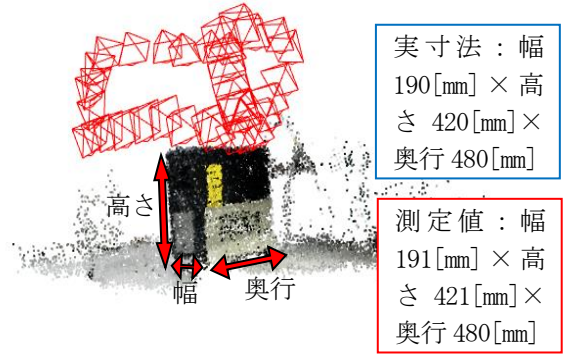


図 1 5 多視点から撮像した時の三次元構造復元

表 4 DROID 点群と実寸法との寸法比較

| 測定箇所 | 実寸法 [mm] | DROID 点群 [mm] | 誤差 [mm] | 誤差率   |
|------|----------|---------------|---------|-------|
| ①    | 325      | 321           | -4      | 1.23% |
| ②    | 325      | 305           | -20     | 6.15% |

表 5 多視点から復元した DROID 点群と実寸法との寸法比較

| 測定箇所 | 実寸法 [mm] | DROID 点群 [mm] | 誤差 [mm] | 誤差率                     |
|------|----------|---------------|---------|-------------------------|
| 幅    | 190      | 191           | 1       | $5.26 \times 10^{-1}\%$ |
| 高さ   | 420      | 421           | 1       | $2.38 \times 10^{-1}\%$ |
| 奥行   | 480      | 480           | 0       | 0%                      |

### 4. 3. 考察

#### 4. 3. 1 手動走行実験結果の考察

手動走行の課題として、簡易コックピットのモニターに映したカメラ映像は、走行ロボットの進行方向のみの映像であるため、走行ロボットの車体幅が分からず、狭いルートを走行することが困難であった。対策として、360 度カメラを使用し、俯瞰視点の映像を使用することで操作性が向上すると考えられる。

#### 4. 3. 2 三次元構造復元結果の考察

測定箇所①と比較し②の誤差が大きくなった要因として、デプスカメラの視点が制限されてしまったことが考えられる。本実験では、床からデプスユニット中心部までの高さを 240 [mm] に固定し、走行ロボットも前後移動のみとしたため、ダクト湾曲部の上下部を十分に撮像できず、ダクト湾曲部のエッジを復元しきれなかった可能性がある。追加実験として、デプスユニットを手に持ち、上下左右に視点を変えながらパソコンケースを撮像、三次元構造復元した際の結果を図 1 5 と表 5 に示す。DROID 点群と実寸法との差は、幅 1 [mm] ・高さ 1 [mm] ・奥行 0 [mm] であり、手動走行により三次元構造復元した時よりも、誤差率は小さくなった。したがって、DROID-SLAM の三次元構造復元精度を高めるには、測定対象物を全方位から撮像することが望ましいと考えられる。

## 5. 結言

本報では、走行ロボットの自律走行及び簡易コックピットを用いた手動走行、外観検査用 RGB カメラ及びステレオカメラの利用、点検のための音収集の取り組みを示した。

走行システムについては、RTF 試験用プラントにおいて自律走行実験を行った。また、当所実験棟において簡易コックピットを用いた手動走行実験を行った。走行ロボット前方のカメラ映像及び環境地図中の自己位置情報を元にスタートからゴールまでの約 20 [m] を手動走行させ、目的の場所へ向かうことができた。狭い通路での走行での走行における遠隔操作性を向上させるため、360 度カメラの利用を検討していく。

三次元構造復元システムについては、走行ロボットに搭載した RGB カメラ及びステレオカメラを用い、ダクトの三次元構造復元及び寸法計測を行った。ロボットの動作を前後移動のみとし、カメラの視点が制限された条件でも、誤差率 7 % 未満の精度で三次元点群データによる復元ができた。今後は測定対象物を全方位から撮像する手法について検討する。

音源位置推定システムについては、RTF 試験用プラントにおいて走行ロボットに搭載した 2 つのマイクロホンアレイを用い、音源位置を推定した。風の影響を受ける環境においても、平均誤差 1 [m] 以内で音源位置推定できた。風切り音や残響による音源定位誤差及びばらつきが生じたため、今後は、推定された音源位置に対し、統計的手法を適用し音源位置を推定する予定である。

## 参考文献

- 1) 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29日.
- 2) 吉田英一, 菅野雄大, 他. “自律走行外観検査ロボットの研究開発(第1報)”. 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2021.
- 3) 吉田英一, 菅野雄大, 他. “自律走行外観検査ロボットの研究開発(第2報)”. 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2022.
- 4) Zachary Teed, Jia Deng. ”DROID-SLAM: Deep Visual SLAM for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras”. Advances in neural information processing systems. 2021.
- 5) Luxonis. “OAK-D S2 DepthAI Hardware Documentation 1.0.0 documentation”. <https://docs.luxonis.com/projects/hardware/en/latest/pages/DM9098s2/>, (参照 2024-1-20).
- 6) Kazuhiro Nakadai, Hiroshi G. Okuno, and Takeshi Mizumoto.” Development, Deployment and Applications of Robot Audition Open Source Software HARK”. Journal of Robotics and Mechatronics. 2017,vol.29,No.1,p.16-25.
- 7) GitHub. “follow\_waypoints”. [http://wiki.ros.org/follow\\_waypoints](http://wiki.ros.org/follow_waypoints), (参照 2023-12-17).
- 8) 坂東 宜昭, 升山 義紀, 佐々木 洋子, 大西 正輝. 雑踏環境における音源地図の生成. 人工知能学会第二種研究会資料 AI チャレンジ研究会, SIG-Challenge-058-08.2021年,p.43-46.
- 9) Github. “GitHub - CloudCompare/CloudCompare: CloudCompare メイン リポジトリ”. <https://github.com/CloudCompare/CloudCompare>, (参照 2023-1-24).