

自律走行外観検査ロボットの研究開発（第2報）

Research and development of an autonomous mobile robot for visual inspection (2nd)

電子・機械技術部 電子・情報科 石澤満 三瓶史花 柿崎正貴 鈴木健司 吉田英一 浜尾和秀
機械・加工科 菅野雄大
ロボット・制御科 近野裕太 清野若菜
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・音源方向呈示機能を有した点検ロボットの開発を行う。2次元LiDARを搭載したロボットにより、試験プラント内の環境地図を作成し自律走行できることを確認した。外観検査はミリ波レーダイメージングにより実験対象物の幅計測を行った。点検のための音収集は、シミュレーション上で異常音検知を実現し、オペレータへの立体音響呈示のシステム精度評価を行った。

Key words: 自律走行、ロボット、レーダ、異常音検知、立体音響、スマート保安

1. 緒言

エネルギープラントの石油、化学、電力、ガス等の産業・インフラは、設備の高経年化、人材の高齢化及びその長期的な不足、技術・技能伝承力の低下などの課題対応が求められている。これらの課題に対し、経済産業省は産業保安力を強化するため、スマート保安官民協議会¹⁾を設置し、産業保安力の重要性和取り組みの方向性を官民で共通認識化している。協議会のスマート保安アクションプランには、

- ・ロボット巡回による監視データ自動取得（高圧ガス保安部会）
- ・管内走行等検査ロボットの活用（ガス安全部会）
- ・現場での点検業務を高度化できるドローン・ロボットの活用が期待される（電力安全部会）

とあり、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中期計画として掲げられている。

さらに、未来のプラントの姿の仮説²⁾には、「人間主体のプラントオペレーションから、ロボティクス活用による無人オペレーションを行うプラント設計」になっていくことが予想されている。先のエネルギープラントに求められる保安技術要素は、エネルギープラント以外にも利用できるものと考えられる。

本研究開発は、今後のプラントに求められる前述項の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・音源方向呈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³⁾では、ロボットの構成要素の取り組みとして、2種類のSLAMから作成した環境地図の比較、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マイクロホンの音源定位実現を報告した。

第2報の本報では、外光が射し込む建屋内の自律走

事業名「チャレンジふくしま「ロボット産業革命の地」創出事業」

行、外観検査のためのミリ波レーダ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呈示に取り組んだ。次章ではそれぞれの取り組みを報告する。

2. 自律走行システム

2. 1. 実験方法

2. 1. 1. 環境地図の作成

図1の福島ロボットテストフィールド(以下、「RTF」という)試験プラント棟において、図2に示すi-Cart miniをリモコン操作して、試験プラント棟の環境地図を作成した。SLAM手法としてHector SLAM及びGmappingを利用した。

地図作成の実験では、i-Cart miniに搭載した北陽電機(株)製2次元LiDARのURG-04LX-UG01を使用した。このLiDARは屋内用で測距距離が最大4[m]の仕様である。



図1 RTF試験プラント棟

2. 1. 2. 自律走行実験

作成した環境地図を使用し、試験プラント棟内で自律走行実験を行った。経路計画及び経路追従にはRobot Operating System(以下、「ROS」という。)のナ

ビゲーション用パッケージ move_base を使用した。



図2 i-Cart mini

また、図3に示すように、LiDAR 照射位置より低い位置にあるグレーチング等の障害物は、地図に表示されないためロボットと衝突する可能性がある。そのため、グレーチングを避ける経路となるように、複数の目標地点（以下、「ウェイポイント」という。）を設定し、グレーチングを避けながら自律走行が可能であることを実験により確認した。ウェイポイントの設定には ROS パッケージの `cirkit_waypoint_manager`⁴⁾ を使用した。`cirkit_waypoint_manager` は、ROS で使用される様々なセンサデータの可視化ツール RViz で表示した地図上に、ウェイポイントに設定する位置にカーソルを合わせ、マウスをクリックすることでウェイポイントを設定する。

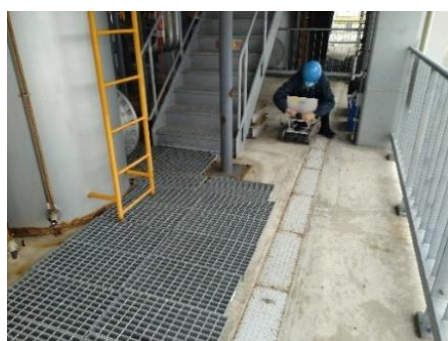


図3 プラント棟内のグレーチング

2. 2. 実験結果

2. 2. 1. 環境地図作成の実験結果

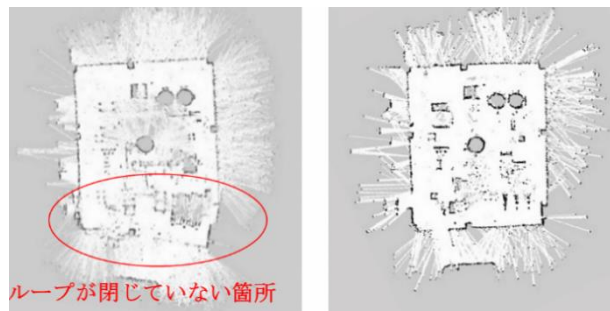
図4に屋内用 LiDAR を用い作成した試験プラント棟の環境地図を示す。図4左の Hector で作成した地図は歪みが生じループが閉じない箇所があった。

ループ⁵⁾とは、以前通った場所を再び通る経路のことであり、今回の実験では、以前通った場所との位置が一致しない（ループが閉じない）現象が生じた。一方、図4右の Gmapping では、ループが閉じた地図を作

成できた。

2. 2. 2. 自律走行の実験結果

屋内用 LiDAR 及び Gmapping で作成した図4右の環境地図を使用して自律走行実験を行ったが、太陽光の外乱の影響で自己位置推定に失敗し、ゴール地点まで自律走行できなかった。



左: Hector、右: Gmapping

図4 環境地図の作成結果

そこで屋外にも対応する Slamtec 社製高照度 LiDAR の RPLiDAR A3 を使用し、Gmapping で作成した環境地図を図5に示す。この LiDAR は測距距離が最大 25[m] で広範囲を測距できるため、歪みのない地図が作成できた。図5の環境地図を用いスタート地点からゴール地点まで自律走行できることを確認できた。

また、図5のようにグレーチングを回避する経路上にウェイポイントを10点設定した。図6にロボットがグレーチング周辺に設定したウェイポイントに沿い、自律走行している様子を示す。図6のようにウェイポイントに沿った走行によりグレーチングを回避することができた。

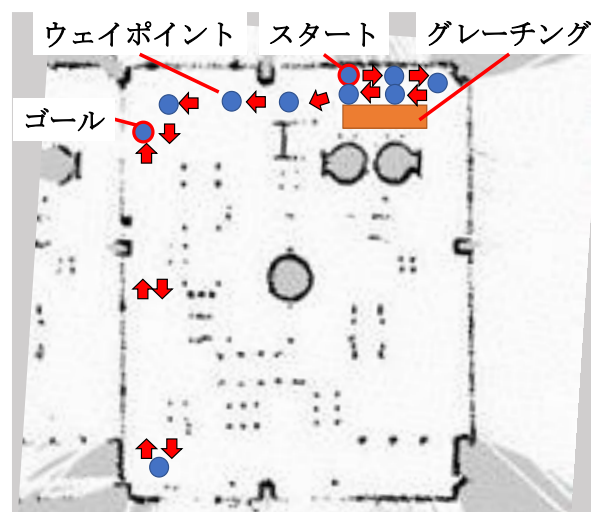


図5 環境地図とウェイポイント

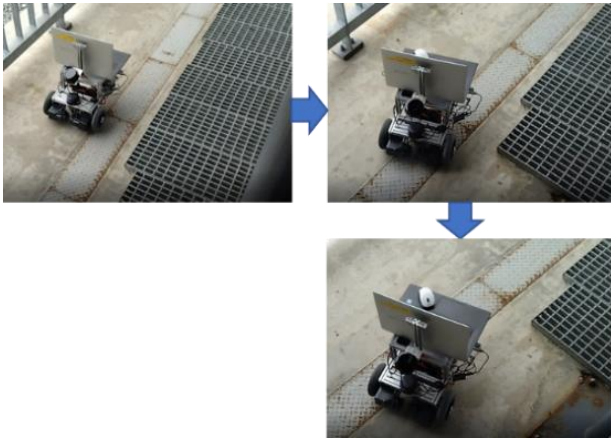


図6 ウェイポイントに沿った自律走行の様子

2. 3. 考察

2. 3. 1. 環境地図作成結果の考察

2次元 LiDAR を搭載したロボットで Hector 及び Gmapping の SLAM 手法による試験プラント棟の環境地図作成実験の結果、Hector による地図には歪みが生じたが、Gmapping では歪みの少ない地図が作成できた。

地図の歪みの原因として、ロボットに搭載した屋内用 LiDAR は測距距離が最大 4[m] と測定範囲が短かったことにより、マッチングポイントが少なく、スキャンマッチングでロボットの自己位置が正しく推定できなかったことが考えられる。また、Gmapping はパーティクルフィルタをベースとした SLAM アルゴリズムのため、ループ閉じ込みと呼ばれる機能が働き、ループを閉じることができる。ループ閉じ込みは、ロボットが周回して同じ場所に戻ってきたことを検出し、ループを閉じることにより、地図を修正する機能⁵⁾である。今回、ループ閉じ込みが機能したことにより、歪みの無い地図を作成することができたと考えられる。

2. 3. 2. 自律走行実験結果の考察

自律走行実験の結果、RTF 試験プラント棟内を自律走行できた。また、2次元 LiDAR 照射位置より低いグレーチング等の障害物は 10 点のウェイポイントを設定することで回避できた。

しかし、障害物の位置が変更された場合には対応できない課題もある。

今後は、環境地図作成用の 2次元 LiDAR の他に、地面付近を斜め上から測距する 2次元 LiDAR を追加し、上記のグレーチングのような障害物を認識する方法、Visual SLAM による 3次元地図を作成する方法で、ロボットが 2次元 LiDAR 照射位置より低い障害物を回避する自律走行を実現する予定である。

3. ミリ波レーダ用いたイメージング

3. 1. 合成開口レーダ (SAR : Synthetic Aperture Radar)

既報^{3) 6)}では、単眼カメラから得られた特徴点 (以下、「カメラ点群」と言う。) 及びレーダから得られた点群 (以下、「レーダ点群」と言う。) との位置合わせを行ってきた。レーダ点群は、対象物の影による点の抜け、虚像の点群を含むことがあり、カメラ点群との位置合わせに誤ったレーダ点群との位置合わせを生じてしまうことがある。本報では、レーダ点群に代え、レーダ生データを用い SAR 画像化して、点群とは違うデータを得た。SAR とは、電波の送受信を行いながらレーダを移動させ、仮想的にアンテナ開口長を増やし高分解能化する技術である。

併せて、SAR 画像から対象物の寸法を計測した。

3. 2. 実験方法

図 7 に実験のイメージ図を示す。図 7 のとおり、対象物からレーダまでの距離 R を 200[mm] とした。そして、レーダを x 方向に 0.5[mm] 毎に移動させ x 方向のアンテナ開口長⁸⁾ D_x を 200[mm] とした。また、図 8 のとおり、40[mm] 四方のヒートシンクを対象物とした。

次に、レーダデータの可視化アルゴリズムである Simplified-2D-mmWave-Imaging⁷⁾ により SAR 画像化した。本実験では、 y 方向にレーダを移動させないため、 y 方向のアンテナ開口長 D_y は 7.59[mm] である。なお、 x 方向の分解能 δ_x は式 (1) により得られる。このときレーダ波長 λ は 3.8[mm] である。

$$\delta_x = \frac{\lambda R}{2D_x} \quad (1)$$

最後に、SAR 画像から x 方向の対象物の寸法を計測し、実寸法との比較を行った。

3. 3. 実験結果

図 9 はレーダから対象物までの距離 200[mm] における xy 平面の画像であり、 x 方向のイメージ分解能は式 (1) より 1.9[mm] である。図 9 の縦軸が -100~100[mm] の範囲でプロットされているが、プログラムの都合によるものである。したがって、図 9 赤枠内のみを評価対象とし、図 10 に切り抜き画像を示す。また、図 10 切り抜き画像を 3次元表示したものを図 11 に示す。図 11 より赤い部分ほど反射強度が高く、青い部分ほど反射強度が低いことが確認できる。 x 方向の寸法は 25.54[mm] であり、実寸法との誤差は、-14.46[mm] だった。

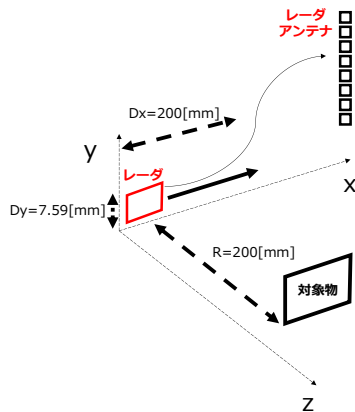


図7 実験イメージ図

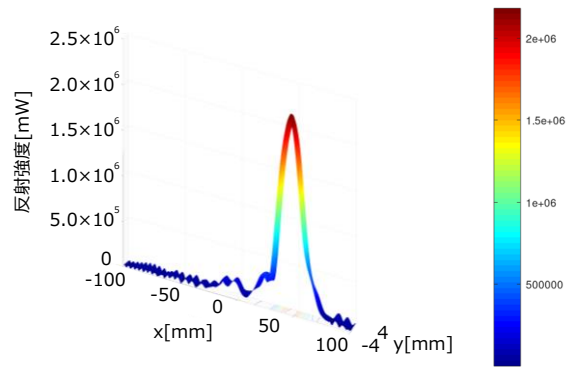


図11 SAR画像の反射強度の3次元表示

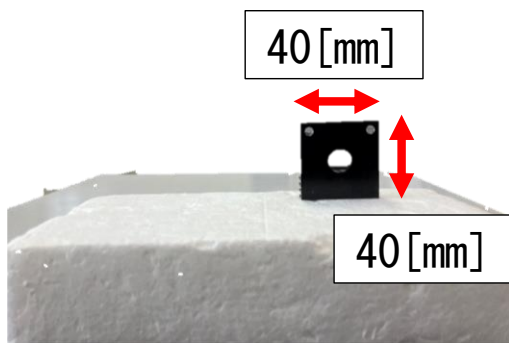


図8 対象物の寸法

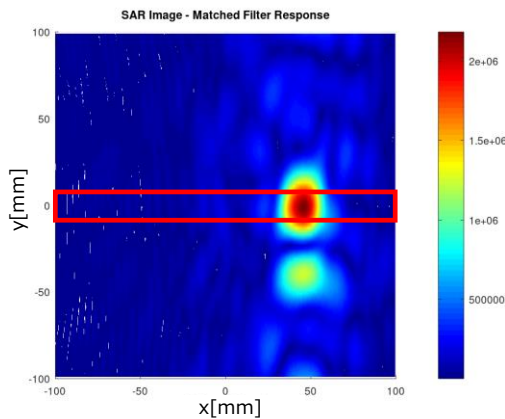


図9 SAR画像

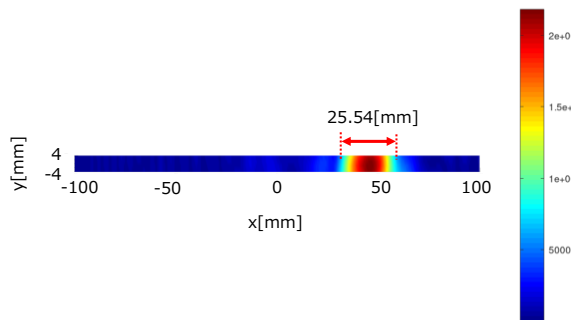


図10 SAR画像の切り抜き画像

3. 4. 考察

実寸法との誤差が出た要因に、次の2つが考えられる。1つ目は、ヒートシンクの両端での反射強度が弱くなってしまい、信号対雑音のSN比が低下したことによる影響である。これまでの研究でも物体の両端、角部分では反射強度が弱くなり、反射点に曖昧さが多くなることが確認できている。2つ目は、レーダ距離測定の影響による影響である。レーダで測定した距離値は誤差を含んでおり、実際の距離よりも約80[mm]遠方に反射点が出力されることもある。今回は、レーダからの距離200[mm]のデータをSAR画像化したのが、距離値の誤差を含めた280[mm]のデータをSAR画像化する必要があると考えることができる。

SAR画像はz方向の寸法を持っているため、SAR画像とカメラ点群との位置合わせを行うことで、カメラ点群にスケールを与えることも可能であると考えられる。

今後は、自律走行ロボットにレーダを搭載し、距離測定誤差を含めたSAR画像の再構成に取り組む。あわせてSAR画像とカメラ点群との位置合わせに取り組む。

4. 点検のための音収集

4. 1. 音源方向の定位及び異常音検知

4. 1. 1. 試作システム

音を放つ複数の装置がある環境において、ある一つの音源から異常が発生した場合に、異常音検知に併せてその異常音の方向の定位も行うことを目指し、図12に示すシステム構成とした。

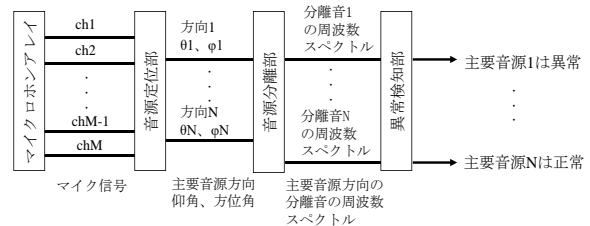


図12 システム概要

取音環境における主要な音源方向の情報を音源定位部で取得し、その情報を基に音源分離を実施、分離した音源毎に異常検知を実施する。

マイクロホンアレイには、半径 50[mm]、マイクロホン数 25 個、各マイクロホンが球面上にほぼ等密度間隔となるよう配置された図 1 3 に示す球状マイクロホンアレイを用いた。

音源定位部及び音源分離部は、MUSIC 法^{3) 9)} による音源定位、最小分散無歪ビームフォーマ¹⁰⁾ による音源分離を行うことができるシステムを実装した。

異常検知部については、近年、製品の画像から異常箇所検知を行う手法として、既存の学習済みモデルを特徴量抽出器として用い異常検知する手法¹¹⁾ が報告されており、本報告では当該手法を異常音検知に適用した。

4. 1. 2. 実験方法

Python のライブラリである PyRoomAcoustics を用いた計算機シミュレーションにより実験を行った。

マイクロホンアレイの座標系を図 1 3 に示す。音源数は 2 とし、音源位置を図 1 4 に示す。マイクロホンアレイ正面を仰角 θ 及び方位角 ϕ が 0 度とした場合、音源 1 が仰角 -45 度、方位角 -90 度、音源 2 が仰角 45 度、方位角 90 度、マイクロホンアレイから 1[m] の距離となるよう設定した。

異常検知部は、Python のライブラリである Anomalib 内の Padim を用いて作成した。入力するデータは、上記条件でシミュレーションした際に計算される混合音に MUSIC 法を適用し、算出される音源方向の情報を基に最小分散無歪ビームフォーマにより分離した音の周波数スペクトル画像とした。

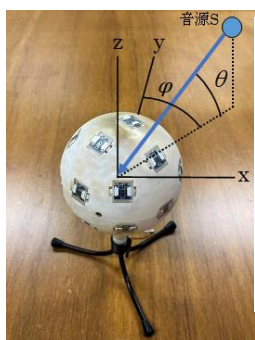


図 1 3 マイクロホンアレイ

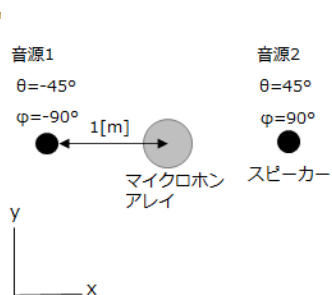


図 1 4 マイクロホンアレイとスピーカーの配置

音源データには DCASE 2020 Challenge Task 2 Development Dataset の Slider データを用いた。

異常検知部の学習には、Slider データ内の train データに含まれる 10 個の正常音を図 1 4 に示す音源 1 及び音源 2 として、順列組み合わせ (${}_{10}P_2$) で 90

組の混合音を作成し、その分離音を入力として用いた。

推論時には、Slider データ内の test データに含まれる 5 個の異常音を図 1 4 に示す音源 1 に、4 個の正常音を音源 2 に使用して計 20 組の混合音を作成し、その分離音を入力として用いた。混合音を算出する際は残響が無い設定とし、音源定位及び音源分離時のステアリングベクトルは予め幾何計算したものを用いた。

4. 1. 3. 実験結果

異常音を含んだ混合音データの音源定位結果例を図 1 5 に示す。この定位結果をもとに音源分離を行い、分離した音毎に異常検知部により異常を推論した。

他人受入率 (FAR)、本人拒否率 (FRR) で評価を行った結果、FAR は 0 [%]、FRR は 10 [%] となった。

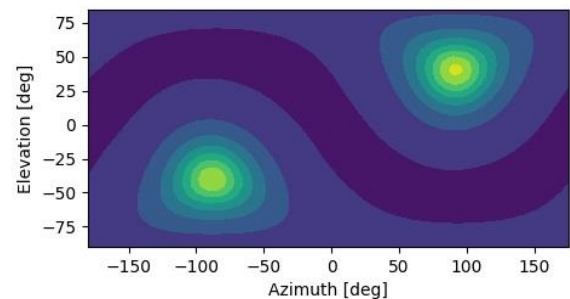


図 1 5 音源定位結果

4. 1. 4. 考察

FAR は 0 [%] であり、今回試作したシステムは音の異常について適切に検知することができることを示している。一方、FRR は 10 [%] であり、これは正常音として分離した音の一部誤って異常だと検知されていることを示す。この原因の一つとして、音源分離部で異常音と正常音とを分離しきれておらず、正常音に異常音が混入してしまっていることが考えられる。

今後は、他の音源分離手法についても比較・検討していきたい。また、現在は無響状態での計算機シミュレーションを行っているが、現実環境では反射音等による残響音の影響が大きいため、それらのパラメータも含めた実騒音環境下での実験等を行っていくことにする。

4. 2. オペレータへの立体音響呈示

4. 2. 1. 高次アンビソニクスによる立体音響再生システム

高次アンビソニクスの技術を用いて、マイクロホンアレイで取得した音を立体音響で再生するシステムを構築した。アンビソニクスとは、3次元空間における音波の到来方向パターンを、球面調和関数を用いて展開することにより、ある空間の受音点における音場を別の空間の聴取点に再現する方式である¹²⁾。

4. 2. 2. 実験方法

システム構成を図16に示す。本システムでは、マイクロホンアレイとして ZYLIA ZM-1 を使用した。マイクロホンアレイに入力された 19 チャンネルの信号を Digital Audio Workstation (以下「DAW」という。) ソフトウェアで受け取る。DAW ソフトウェア内には VST プラグイン「ZYLIA Ambisonics Converter」及び「IEM Plug-in Suite」¹³⁾ を挿入し、入力信号を 3 次アンビソニクスにエンコードした後、バイノーラル信号にデコードし、ヘッドホンに 2 チャンネル信号を出力するシステムとした。バイノーラル方式とは、ヘッドホンを用いて両耳の入り口部分で音圧を再現し立体音響として再生する方式である¹²⁾。バイノーラル信号にデコードする処理とは、目的とする信号のフーリエ変換に対し、音源から左右の外耳道入り口までの音の伝搬特性である頭部伝達関数を乗じて逆フーリエ変換することを指す¹²⁾。これによりヘッドホンで再生する左右の出力信号が得られる。

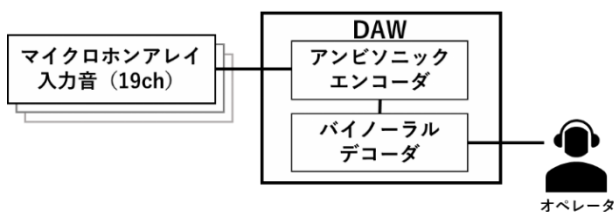


図16 システム構成図

立体音響再生システムの性能を評価するため、多チャンネルスピーカーアレイ再生システムの音像定位実験¹⁴⁾を参考に、水平方向及び仰角方向について音像定位実験を行った。水平方向の刺激音の位置は被験者の耳の高さの水平面の円周上 360°]において正面を含む 30°]間隔の 12 条件とした。仰角方向の刺激音は真正面から背面までの 180°]の範囲を 30°]間隔の 7 条件とした。刺激音はシミュレーションで作成した。2 秒間のピンクノイズ (サンプリング周波数 48[kHz]、モノラル) をアンビソニックエンコーダーで想定する方向にパンニングし、3 次アンビソニック信号にエンコード、バイノーラル信号にデコードして再生信号とした。聴覚健全な成人男女 8 名が被験者となり実施した (うち男性 5 名)。水平方向は、時計の 12 時を 0°]として、何時の方向から刺激音が聞こえたかを 12 択で回答させた。仰角方向は、正面を 0°]、天頂を 90°]、背面を 180°]としてどの方向から刺激音が聞こえたかを 7 択で回答させた。提示する条件は水平方向 12 問の次に仰角方向 7 問とし、提示する方向の順番はランダムとした。

4. 2. 3. 実験結果

水平、仰角方向の結果をそれぞれ図17、図18に示す。全被験者の平均定位誤差は水平方向が 48.8°]、仰角方向は 53.0°]であった。標準誤差の平均は水平方向が 13.4°]、仰角方向は 13.8°]であった。図17より、水平方向は正面付近の定位誤差が大きく、特に 0°]方向の提示に対し、背面 180°]と知覚した被験者が多かった。また、左右の耳の真横である 90°]及び 270°]方向の提示が最も被験者間のばらつきが小さく、そこから遠ざかるにつれてばらつきが大きくなる傾向となった。図18より、仰角方向は斜め後方 120°]及び 150°]方向の定位誤差が小さい傾向にあるものの、全方向において被験者間のばらつきが大きく、再現精度に課題が残る結果となった。

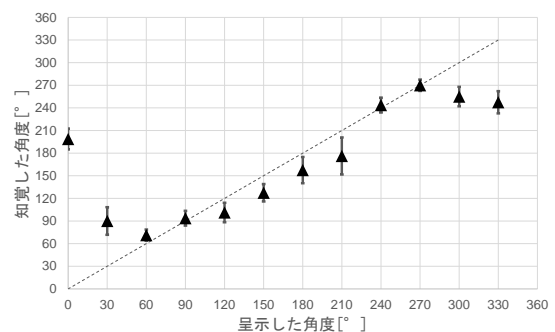


図17 実験結果 (水平方向)

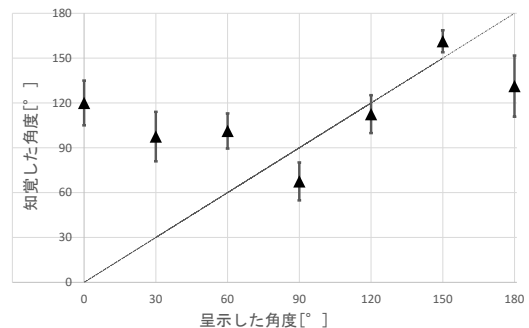


図18 実験結果 (仰角方向)

4. 2. 4. 考察

バイノーラル信号へのデコードに用いる頭部伝達関数は、頭部や耳介の形状による音の伝搬特性を表しており、個人差があることが知られている¹⁵⁾。水平方向の頭部左右に位置する音像の定位には、両耳間時間差 (ITD) や両耳間レベル差 (ILD) が寄与している¹⁶⁾。一方で正面方向及び仰角方向の音像定位には、耳介の形状に起因する周波数特性 (耳介ノッチ) が寄与している。耳介ノッチには個人差があるため、他人の頭部伝達関数を用いると、前後誤判定、上昇角誤差、頭内定位が生じることが先行研究から明らかになっている¹⁷⁾。今回の実験で用いたバイノーラルデコーダに使用

されている頭部伝達関数は、ダミーヘッドにより測定されたもの¹⁸⁾であり、被験者の形状と異なるために、特に仰角方向で定位誤差が大きくなったと考えられる。今後はヘッドホン再生時に使用する頭部伝達関数を見直すとともに、ラウドスピーカを用いた立体音響再生システムの構築を併せて行い、性能を比較することとする。

5. 結言

本報では、プラント点検のための自律走行、外観検査用ミリ波レーダの利用、点検のための音収集の取り組みを示した。

自律走行システムでは、RTF 試験プラント棟で環境地図作成及び自律走行実験を行い、屋外環境下でロボットが自律走行できることを確認した。今後は環境地図にない障害物回避方法を検討していく。

ミリ波レーダを用いたイメージングでは、一次元 SAR を行い、対象物幅の寸法計測をした。対象物の反射強度が山形になることから誤差を生じた。対象物との距離誤差を見直し、SAR 画像の構築を進めていく。

点検のための音収集では、25ch マイクロホンで音源方向の定位が行えた。2方向の音源に異常音を混合させ、25ch マイクロホン配置で異常音検知の計算機シミュレーションを行い、異常音検知ができた。他音響分離手法の比較、実環境下の異常音検知を進めていく。

高次アンビソニックスマイクロホンの立体音響再生システムを構築し、オペレータによる方位方向及び仰角方向の音像定位の官能評価を行った。仰角方向に誤差が生ずる傾向にあった。ヘッドホン利用時の頭部伝達関数を見直すと共にラウドスピーカによる立体音響再生を実施する。

今後は、本報で生じた課題を解決すると共に、音源探査用マイクロホン及びロボットビジョン用センサをロボットに搭載し、プラントの指定する場所へ自律的に移動し、異常音検知・音源方向呈示、外観検査ができる点検ロボットを目指していく。

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) 三菱総合研究所. 産業保安の国際展開に向けた研究会報告書, 2022年3月25日, p.23-26.
- 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1報)”. 福島県ハイテクプラザ試験研究報告書, 2021.
- 4) GitHub. “CIR-KIT/cirkit_waypoint_manager”. https://github.com/CIR-KIT/cirkit_waypoint_manager, (参照 2023-2-17).
- 5) 友納正裕. “SLAM 入門”. オーム社, 2018, p.20-21.
- 6) 石澤満, 三浦勝吏, 浜尾和秀. “カメラ点群とレーダ距離点群との ICP 位置合わせ利用の一考察”. 情報処理学会 第21回情報科学技術フォーラム, 2022.
- 7) “Simplified 2D mmWave Near-Field Imaging”. Github. <https://github.com/meminyanik/Simplified-2D-mmWave-Imaging#simplified-2d-mmwave-imaging>, (参照 2022-02-01)
- 8) Muhammet Emin Yanik, Dan Wang, Murat Torlak. “Development and Demonstration of MIMO-SAR mmWave Imaging Testbeds”. I EEE, 2020, vol.8, p.126019-126038.
- 9) 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-. (社)日本音響学会編, (株)コロナ社, 2011, p.107-146.
- 10) 戸上 真人. “古典的な音源分離方法～ビームフォーミング～”. Python で学ぶ音源分離 機械学習実践シリーズ. 高橋隆志編, (株)インプレス, 2020, p.157-215.
- 11) Defard, T, Setkov, A, Loesch, A, Audigier, R. PaDiM: a Patch Distribution Modeling Framework for Anomaly Detection and Localization. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2011.08785>
- 12) 安藤彰男. 音場再現. コロナ社, 2014, 208p.
- 13) Institute of Electronic Music and Acoustics. IEM Plug-in Suite. <https://plugins.iem.at/> (参照 2023-02-16)
- 14) 西村正治, 宇佐川毅, 伊勢史郎, 梶川喜延. “音場再現への展開”. 新版アクティブノイズコントロール. コロナ社, 2017, p.199-218.
- 15) 渡邊貫治. 立体音響研究のための公開頭部伝達関数 (HRTF) データベースとその動向. 日本音響学会誌. 2022年, 78 巻, 8 号, p.449-456
- 16) 公文誠. 耳介による音源方向推定. パイオメカニズム学会誌. 2009年, vol33, No.4, p.243-249.
- 17) 飯田一博. 頭部伝達関数の個性. 日本音響学会誌. 2017年, 73 巻, 3 号, p.181-188.
- 18) Institute of Electronic Music and Acoustics. “Plug-in Descriptions” IEM Plug-in Suite. <https://plugins.iem.at/docs/plugindescriptions/#binauraldecoder> (参照 2023-02-16)