

交通運輸技術開発推進制度
令和6年度業務実績説明書

3次元イメージングレーダーによる
セキュリティ検査システムの研究開発

令和7年3月

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所電子航法研究所

国立大学法人 三重大学

アルウェットテクノロジー株式会社

I. 研究開発成果の要約

作成年月	令和7年3月
研究課題名	3次元イメージングレーダーによるセキュリティ検査システムの研究開発
研究代表者名	米本 成人
研究期間	令和4年11月25日～令和7年3月31日
研究の目的	<p>公共交通機関の安全性向上のために、セキュリティ検査技術に対する需要は高まっている。しかしながら、既存のセキュリティ検査システムは被験者を静止させて計測する必要がある事から、検査に時間がかかり、交通流の多い場所での導入が難しい。</p> <p>本研究開発では、改札、エスカレータなどのように、人と人の間隔を比較的広く取ることができる場所において、人流の動きを止めずに検査を行うことができる、3次元イメージングレーダーを用いたセキュリティ検査システムを開発することを目的とする。</p>
研究成果の要旨	<p>ミリ波3次元イメージングレーダーを用いたセキュリティ検査システムの開発を行った。全体システムの設計を行い、3次元イメージングレーダーの撮像性能を向上させるとともに、送受信アンテナをコンパクトに配置して低コストで開発することができる試作機を構築した。得られたレーダーデータから3次元イメージを生成する映像化ハードウェアを開発した。3次元イメージから視点の異なる2次元画像を生成し、それを判別して危険物を抽出する危険物判定システムを構築した</p> <p>また、空間分解能を所望の画角に調整する電波レンズを利用した波面再構成技術を開発した。試作した電波レンズを用いて、送受信アレイとの間で画角等の空間解像度を調節するためのアルゴリズムを開発して、その有効性を検証した。</p> <p>さらに、エスカレータにおける人流の中で、イメージングレーダーを用いたリアルタイム撮影・検査実験を行い、判定する総合評価試験を行った。</p>
知的財産権 取得状況	なし
研究成果発表実績	論文発表：国内 1件、海外 8件 口頭発表：国内 6件、海外 8件 その他：IEC Preliminary Work Item 2件

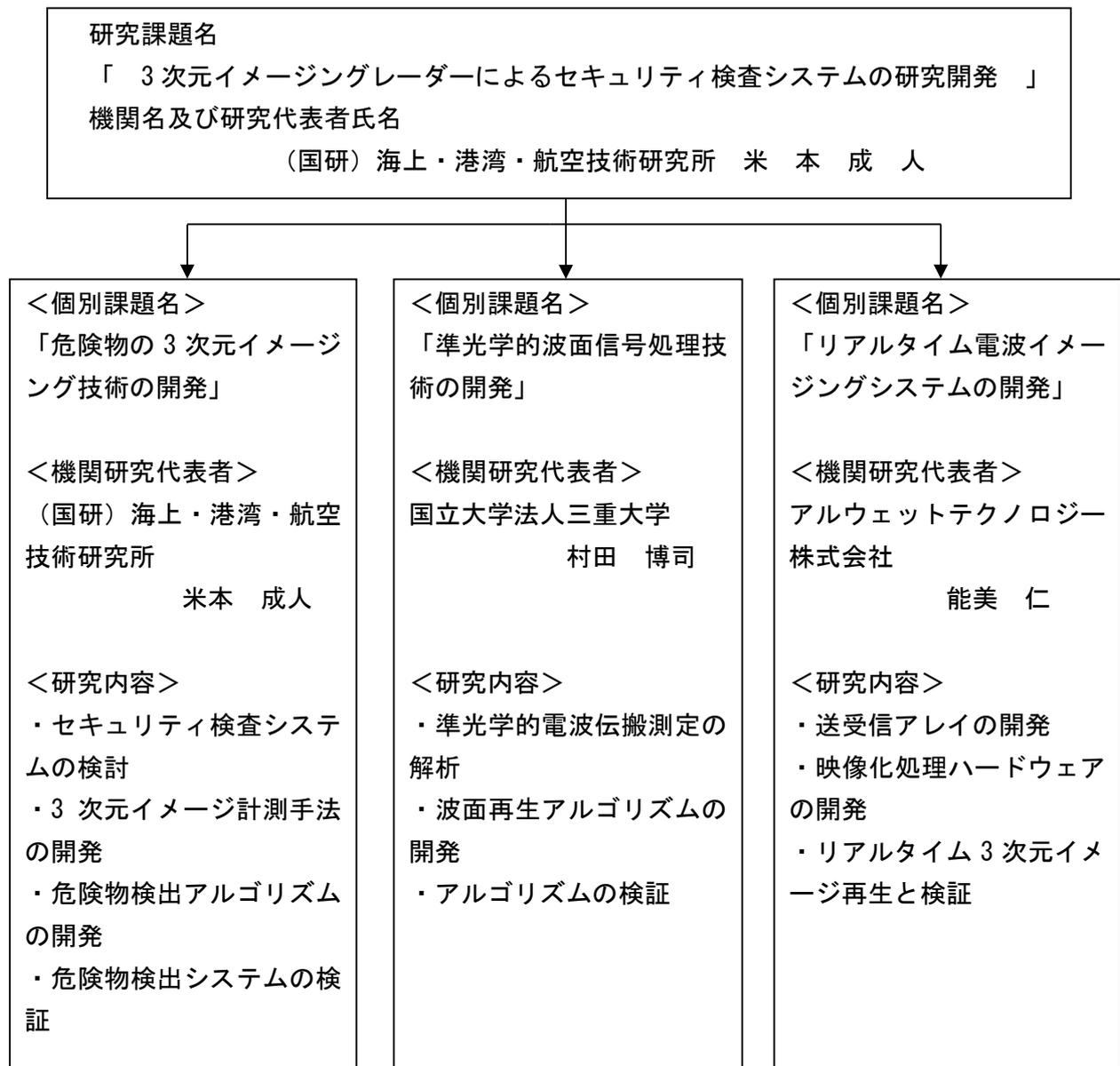
II. 研究開発の目的と実施体制

(1) 研究開発の目的

公共交通機関の安全性向上のため、セキュリティ検査の実施に対する需要は高まっているが、既存のセキュリティ検査システムは被験者を静止させて計測する必要がある事から、検査に時間がかかり、交通流の多い場所での導入が難しい。本研究開発では、改札、エスカレータなど、人々の間隔を比較的広くとれる場所において、人流の動きを止める事無く検査を実施することができる「3次元イメージングレーダーを用いたセキュリティ検査システム」を開発することを目的とする。

(2) 研究実施体制

本研究は、(国研)海上・港湾・航空技術研究所を総括研究機関とし、国立大学法人三重大学、アルウェットテクノロジー株式会社と共同して実施した。担当機関の研究実施の流れを示すチャートは以下の通りである。



III. 研究開発の成果

1. 序論

2018年の新幹線内殺傷事件や2021年の京王線刺傷事件など、鉄道車内等の公共交通機関を標的とした重大犯罪が発生している。現状は警備員を増やすなどの対策を行っているところではあるが、多数の人物が行きかう中で包丁等の危険物を着衣に隠しているような場合においては、少数の警備員に限られた範囲を巡回するだけでその危険物を検出することは難しい。他方で、古くからハイジャック等の危険にさらされている航空業界では、国際ルールとして、厳重なセキュリティ検査を実施している。このような検査を、取り扱う乗客数が桁違いに多い鉄道などの他の交通機関に導入するには、セキュリティ検査による乗客の滞留、渋滞等が発生することで、現状の利便性を著しく損なってしまう。これらの状況から、セキュリティ検査の導入に慎重になっている場合が多い。これらのセキュリティ検査を現状の人の流れを妨げることなく実施することができれば、航空以外の交通機関においても乗客の安全を確保することができる。

本研究では、電波による3次元イメージングレーダー（映像化）技術を活用して、人の流れを妨げることなく、着衣等に隠された電波の反射強度の高い物体を映像化し、迅速なセキュリティ検査を可能とするシステムの開発を行う。駅の改札や階段、エスカレーター等、他の目的により人流が自動的に整列される場所を利用して、複数の人物が重なり合って陰が発生しないようにレーダーを配置して、一人ずつ撮影を行うシステムを構築する。通常の人流の速度では、数秒でレーダーの撮影範囲を通過してしまうことから、人の動きによる映像のぼけを抑制するため、1枚の画像の撮影時間を短縮する。また、複数のレーダーを用いて、前後等、異なる方向からの映像取得を行うことで、複数の映像から再構成して、包丁などの危険物を所持している人物の検出率を向上させることを目的とする。

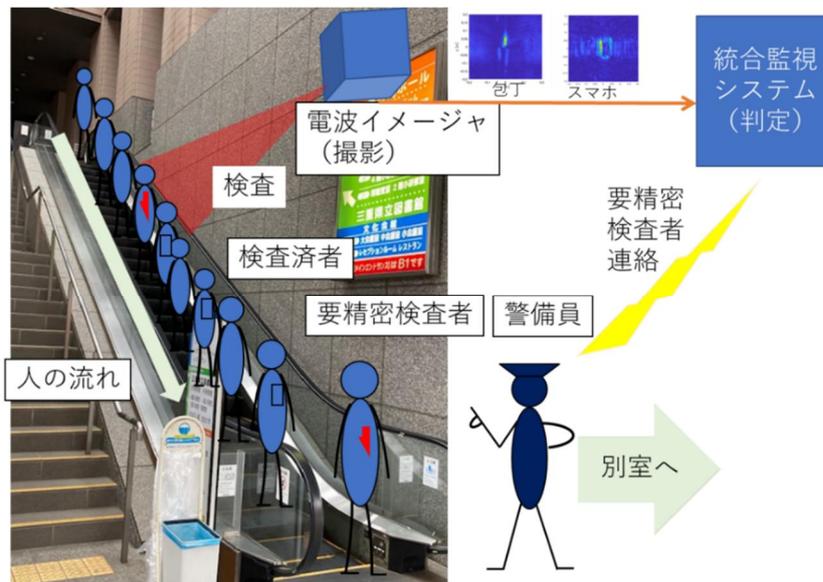


図1-1 3次元イメージングレーダーを用いたセキュリティ検査システムのイメージ図

2. 危険物の3次元イメージング技術の開発（電子航法研究所）

本研究開発で構築するセキュリティ検査システムの動作イメージを図2-1に示す。3次元レーダーを用いて、被験者の所持品に関する情報をレーダー画像として取得して、その画像を判定して、危険物の所持の可能性を計算する。所持する物体のレーダーへの映り方は、物体の姿勢に大きく依存すること

から、レーダーと被験者の相対的な位置や角度を変えて、死角の無いように撮影することが望ましい。また、現在運用されている様々な機器は1回の測定で判定している事から誤検知、未検知が多いため、セキュリティ検査の効率化が出来ていない。よって、撮影から判定までの一連の動作を高速に短時間で実行し、同一人物を複数回計測し、精度を向上させる必要がある。

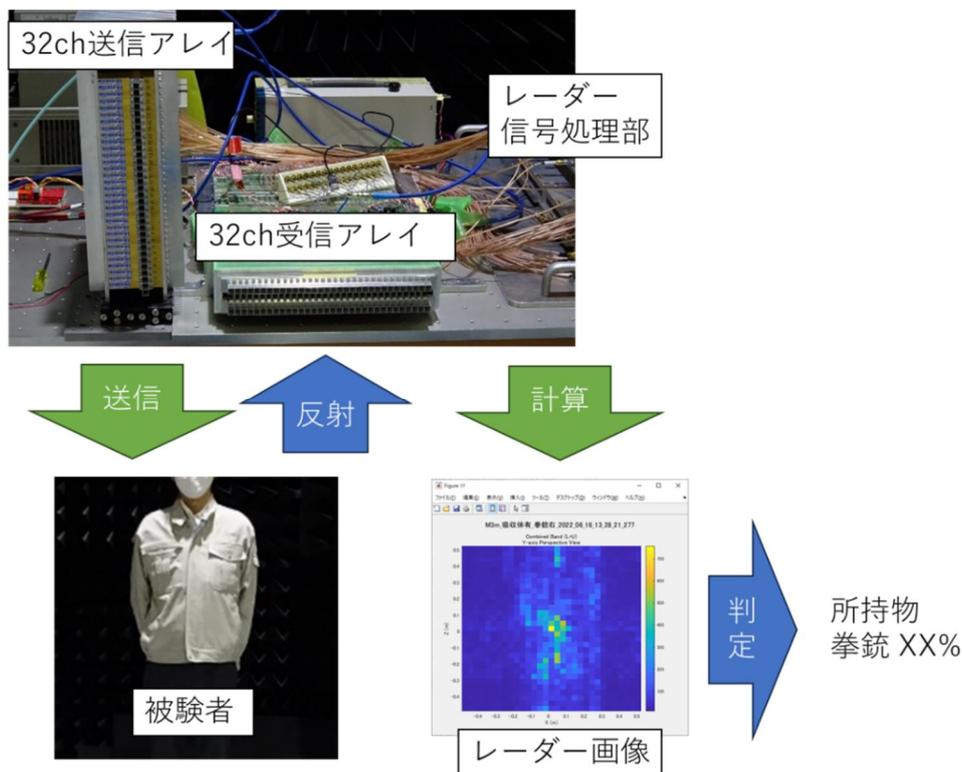


図2-1 3次元イメージングレーダーによる危険物検出の仕組み

レーダーは、機器から放射された電波が物体にあたって反射することで、その戻ってくる反射波を計測し、電波が物体に反射して往復する間の時間を測定し、それに電波の伝搬速度（光速 c ）を乗じて距離を計測するシステムである。レーダーの検知性能は、レーダーのアナログ特性と信号処理の合成で定まる。1個の送受信機を用いて計測する場合を考えると、物体からの反射電力 P_r は、測定対象物の1空間あたりのレーダー断面積を σ とすると、レーダー方程式

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

で計算される。ここで、 P_t は送信機の送信電力、 G_t は送信アンテナの利得、 G_r は受信アンテナの利得、 λ はFMCWの中心周波数の波長、 R は物体までの距離である。この受信電力が、受信機のノイズフロアに対して十分（約10dB程度）高くなる信号を検出して、物体の有無を判定している。

2次元レーダーは、レーダーの測距機能に加えて、アジマス方向（水平面での角度方向）を変化させて計測することで、極座標形式のレーダー画像を得ることができる。もっとも簡便な方式はアンテナ、あるいはレーダーそのものを機械的に回転させる方式であり、原始的ではあるが、現在でも航空用レーダー等で利用されている古典的な手法である。また、機械的に電波の放射方向を回転させる代わりに電子走査を行うことも、軍用の防空システム等では一般的に用いられている方式である。電子走査の場合は、送信信号の放射方向を物理的に変えるフェーズドアレイアンテナを用いる方式、固定の電波放射に対して、複数の受信機で受信される反射波の位相を用いて計算によって指向性を変えるデジタルビームフォ

ーミングがある。短距離の計測であれば、送信電波の発生電界を一定の方向に集中させる必要がないため、デジタルビームフォーミングが多用されている。

3次元レーダーについては、機械的にアジマス方向とエレベーション方向（垂直向きの角度方向・仰角あるいは俯角）を走査する方法がもっとも簡便であり、現在でも気象レーダー等で利用されている方式である。しかしながら、機械走査を用いる場合は、例えばエレベーションを少し変えてアジマスを一週回し、エレベーションを少し変えてアジマス1周を繰り返すため、3次元データを取得するのに膨大な時間を必要とする。そこで、本3次元レーダーとしてはデジタルビームフォーミングを採用することとした。3次元レーダー画像を生成する原理を図2-2に示す。

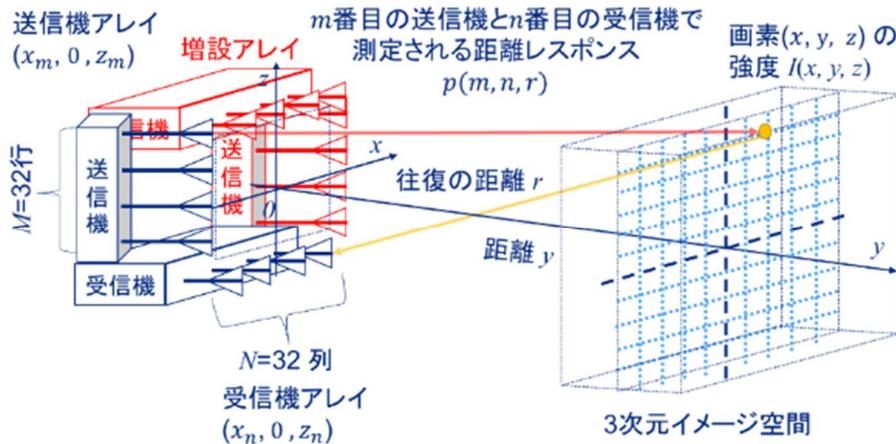


図2-2 3次元FMCWレーダイメージャーの原理図

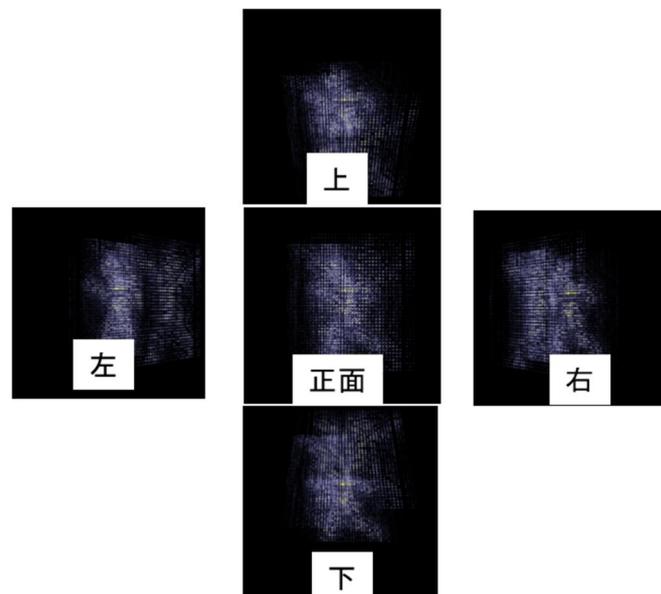


図2-3 レーダー画像と危険物検出・判定結果の例

本研究開発では、1つの3次元レーダー画像から、異なる視点の2次元画像をリアルタイムに作り出すアルゴリズムを開発した。このアルゴリズムを用いて5つの視点に対する画像（図2-3）を作成して危険物検定・反転評価実験を行った。図2-4に判定評価実験結果の一例を示す。物体単体においては危険物判定が可能であることを実証した。

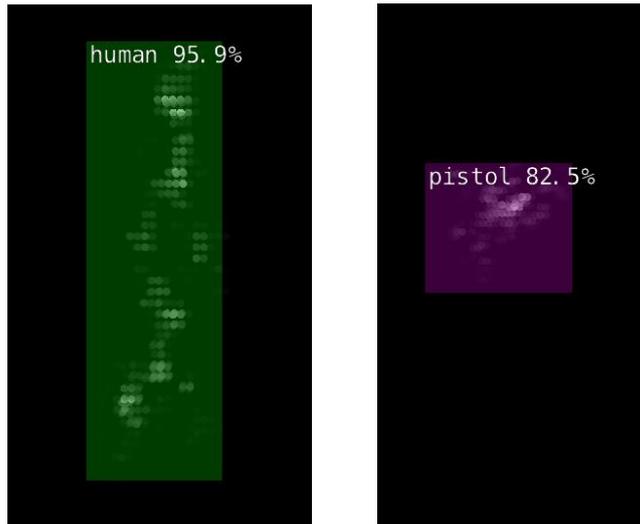


図 2-4 レーダー画像と危険物検出・判定結果の例

3. 準光学的波面信号処理技術の開発（三重大学）

ミリ波レーダーをベースとして、画角を調整可能なイメージングシステムを構築するため、誘電体レンズによる波面変換特性を解析した。ミリ波のような周波数がかかなり高い電波に対しては、準光学的電磁波伝搬解析手法が有効である。そこで、光学レンズ設計等において多用されているフーリエ光学（近軸領域での光波回折・波面変換解析）の手法を用いて、ミリ波帯誘電体レンズの回折公式、波面変換解析法を導出して、イメージング画像生成のためのアルゴリズムを追究した。

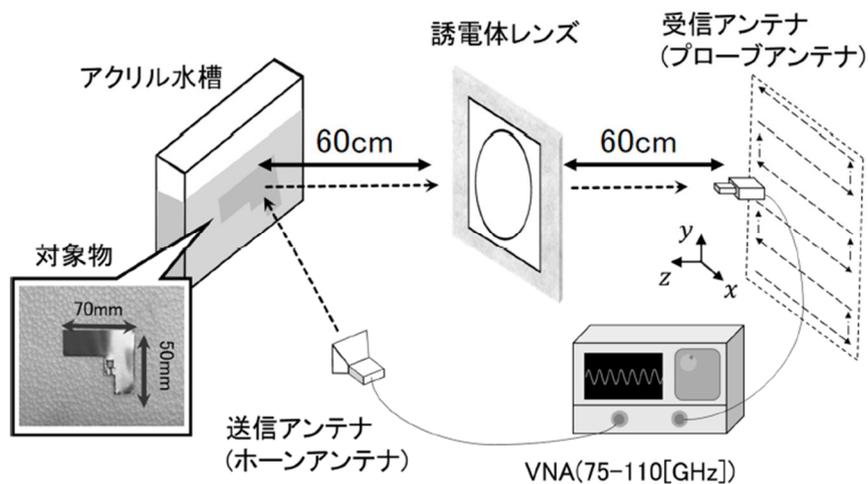


図 3-1 誘電体レンズを用いた 3 次元イメージング評価実験系

図 3-1 に、誘電体レンズを用いた 3 次元イメージング実験系の構成を示す。レンズは、ミリ波に対して透明で誘電損失が小さい PTFE（テフロン）を用いた平凸形状のものであり、直径が 250 mm あるいは 500 mm、焦点距離が 600 mm 程度のもの試作して使用した。ミリ波信号の周波数を掃引しながら受信平面でプローブアンテナの位置を精密に移動させることで、対象物で反射されて誘電体レンズで変換された 3 次元データを得ることができる。これをイメージング画像生成のためのアルゴリズムで変換・処理することで、対象物の 3 次元データを得た。

実際に生成・取得した3次元像の例を図3-2に示す。水槽に生理食塩水を入れると、ターゲットと水槽の映像が見られるが、3次元イメージングを用いることで奥行きが異なって画像化されることが示され、3次元レーダイメージングの有用性が検証された。さらに、条件を変えた種々の実験を行い、距離の異なる複数の物体や着衣等に隠された危険物も明瞭に映像化できることを示した。

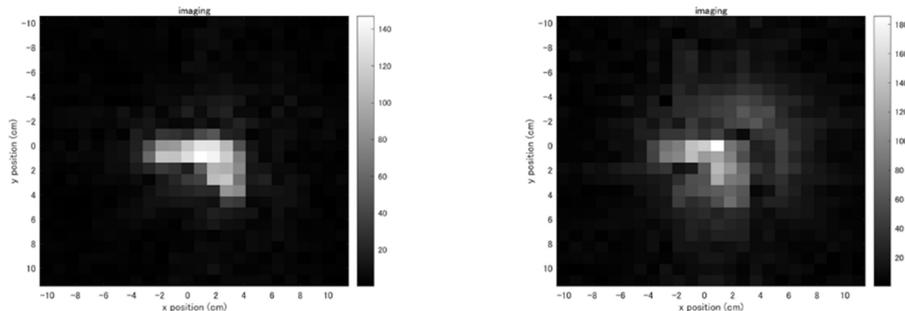


図3-2 誘電体レンズを用いたミリ波イメージング結果
(左：水槽に水を入れない場合、右：水槽に生理食塩水を入れた場合)

4. リアルタイム電波イメージングシステムの開発（アルウェットテクノロジー株式会社）

リアルタイムでミリ波3次元イメージングを可能とするためのミリ波送受信システムと信号・映像処理システムを開発した。送受信システムでは、送受信アレイ基板の端部に配置した導波管にマイクロストリップラインで給電するためにフィンラインを採用した。フィンライン部は厚さ0.1mm程度になっており、送受信アレイ基板の3層以降の層を切削して製造する。アルミ切削で構成された導波管ブロックでフィンライン部の上下を挟み込み、その先にアンテナを取り付けて使用する。フィンラインは16アンテナを並べた構造とし、上側がテーパ部、下側がマイクロストリップラインであり、ICの送受信機をマイクロストリップラインに繋げ、テーパ部をホーンアンテナに繋がる導波管で挟み込むことで、空間に放出する。一枚の回路基板上に32chの送受信機を配置するため、受信機は8個、送信機は11個のデバイスを実装することとした。電源や周辺回路を配置して構成した基板を収納する筐体設計を行った。TX、RX筐体は共通に、筐体前部に基板を挟み、フィンラインを収納し、導波管に変換するフィンライン導波管変換部で構成する。また、上部にはFPGAの熱を冷やす必要が生じた時のために、ヒートシンクが取り付けられる構造とした。上記TX筐体を縦2個、RX筐体を横2個に配置し、各アンテナの間隔4.5mmを維持したまま連結してモジュールを構成する。製造した送受信アレイを図4-1に、ミリ波信号・映像処理システムを図4-2に示す。



図4-1 送受信アレイ 外観写真

映像化ハードウェアを用いた可視化像の例を、図4-3に示す。想定通りの可視化像が得られており、映像化ハードウェアの良好な動作を確認した。これらの送受信システムと映像化システムを用いて、実際の利用が想定される公共空間（博物館のエスカレータ）において、フィールド実証試験を実施した。

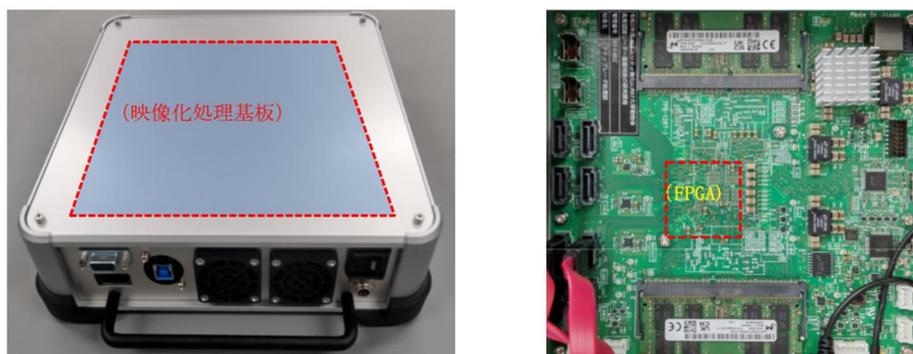


図4-2 映像化ハードウェアの外観と映像化処理基板

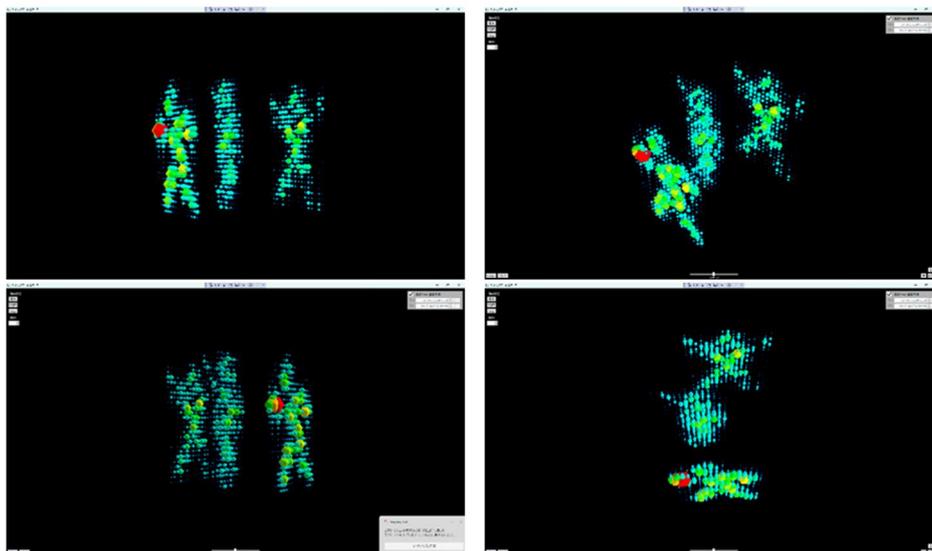


図4-3 映像化ハードウェアを用いて生成した画像の例

5. セキュリティ検査システムの総合評価

開発したミリ波イメージングシステムを用いて、実際の公共空間でフィールド実験を行った。開発したシステムは、階段型あるいは水平型のエスカレータに沿って設置して、人流を計測することにより、有効に機能すると考えられる。そこで、エスカレータが設置されている公共空間として、三重大学と連携協定（博学連携協定）を締結している三重県総合博物館においてフィールド試験を行った。

イメージングシステムの送受信アレイをエスカレータの最上段位置から3m程度の位置に設置して、エスカレータからの人流中における人物の映像化を試みた。評価実験の結果、エスカレータを流れる通常の人流を再現して、1段あたり1名の場合、2名の場合のどちらの場合においても、レーダー画像がリアルタイムに映像化され、個々の歩行する人物に対して数十枚の映像が取得できることを示した。

画像判定についても、リアルタイムに処理を確認することができた。人物の検出については良好な結果を得ることができた。今後は、人物と物体の分離精度の向上のために、信号処理手法の改善が必要であることが示された。



図5-1 エスカレーターにおける実証実験

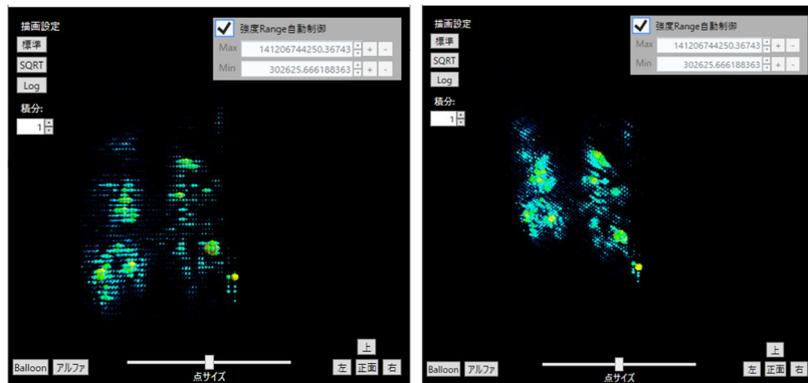


図5-2 生成した画像（エスカレーター1段辺り2名搭乗している場合）



図5-3 判定結果の例

6. 結論

公共交通機関の安全性向上に資するため、本研究開発では、3次元イメージングレーダーを用いたセキュリティ検査システムの開発を実施した。

まず、危険物検出の3次元イメージングの技術の開発として、セキュリティ検査システム全体の設計を行い、3次元レーダー画像から視点を変えて映像化するソフトウェアを構築した。昨年度構築

した画像判定の結果の分析を行い、教師データの見直しを行った。また、物体判定のアルゴリズムを交換し、新しい学習済みのモデルを用いて、画像判定を行った。また、レーダー測定、画像生成、画像識別迄を連続して処理するシステムソフトウェアを構築した。

次に、準光学的波面信号処理技術の開発として、誘電体レンズを用いた2次元フーリエ変換による2次元イメージング手法を検討し、また、計算される時間軸を加えて3次元に拡張する波面再生アルゴリズムについて検討を行った。背後に人体を模擬した水槽を配置して計測を行ったところ、拳銃部分と水槽部分を明瞭に分離できる空間分解能が得られることが示された。また、距離の異なる物体や着衣等に隠された危険物も明瞭に映像化できることを示した。

さらに、リアルタイム電波イメージングシステムの開発として、送信信号の信号純度を高める工夫を施し、各種ハードウェアを簡単に設定するためのソフトウェアを構築した。3次元イメージングレーダーとして、測定部、映像化ハードウェアを用いて動作試験を行った。解析ポイント数とデータサイズによるが、解析領域サイズを小さくすると最速500枚毎秒、実用的な解析領域サイズを用いる時も50枚毎秒で3次元レーダー画像が生成できることを示した。

最後に、三重県総合博物館のご協力の元、各種総合評価試験を実施した。エスカレータを流れる通常の人流を再現して、1段あたり1名、2名の場合それぞれについて、レーダー画像がリアルタイムに映像化されて、個々の人物に対して数十枚の映像が取得できることを示した。

7. 知的財産権取得状況

取得無し

8. 研究成果発表実績

1) 論文発表 海外 1件

[1] A. Setiawan, S. Sato, N. Yonemoto, H. Nohmi, and H. Murata, "Dielectric Lens-Based Millimeter Wave Imaging for Concealed Object Detection in Security Applications," IEICE Trans. Electron., Vol.E108-C, No.2, pp.86-91, Feb. 2025.

2) 口頭発表 海外 8件、国内 6件

[1] A. Setiawan, N. Yonemoto, H. Nohmi, and H. Murata, "Experimental Investigation of Millimeter-Wave 3D Image Projection Using Dielectric Lens for Security Application," 20th European Radar Conference (EuRAD 2023), EuMC/EuRAD07-9, 17-21(21) September 2023, Berlin, Germany.

[2] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, K. Morioka, N. Miyazaki, and M. Sato, "Improvement of Depth Resolution by Dual-band integration for 3D MIMO Radar for Security Inspections", International Conference on Antenna Measurement and Applications (CAMA2023), November 15-17, Genoa, Italy.

[3] H. Murata, A. Setiawan, S. Sato, H. Nohmi, N. Yonemoto, "Challenge for Millimeter-Wave Imaging System for Remote Security Inspection," IDW 2023, PRJ5-3L, December 6-8(7), 2023, Niigata, Japan.

[4] S. Sato, A. Setiawan, N. Yonemoto, H. Nohmi, and H. Murata, "Millimeter-Wave Imaging Technique Using Dielectric Lens for Security Application," Midland Student Express 2023 Spring, AP-S/MTT-S Nagoya, 17 April 2023.

[5] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, K. Morioka, N. Miyazaki, and M. Sato, "Non-metallic object detection by 3D MIMO radar for security inspections", 2024 4th URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC), Gran Canarie, Spain May 19 -24, 2024.

- [6] H. Nohmi, I. Shirai and A. Nohmi, “3D Vibration Imaging Radar (3D-VirA) for Infrastructure Monitoring”, IEEE Conference on Antenna Measurement and Applications, Da Nang, Vietnam, 8-10 October 2024.
- [7] N. Yonemoto, A. Kohmura, S. Futatsumori, K. Morioka, and Y. Makita, “Wide-Band RCS Measurement for Calibration of the Metallic Sphere for the MIMO Radars”, IEEE Conference on Antenna Measurement and Applications, Da Nang, Vietnam, 8-10 October 2024.
- [8] H. Murata, A. Setiawan, S. Sato, H. Nohmi, and N. Yonemoto, “3-Dimensional Imaging Using Millimeter-Wave Radar Technique for Remote Security Inspection,” The 31st International Display Workshops (IDW 2024), PRJ8-3, 4-6(6) December 2024, Sapporo Convention Center, Sapporo, Japan.
- [9] 米本成人、河村暁子、ニッ森俊一、森岡和行、宮崎則彦、佐藤正彦、“3次元MIMOミリ波レーダの3次元イメージの奥行き方向分解能”、電子情報通信学会マイクロ波研究会、信学技報、vol. 123, no. 115, MW2023-44, pp. 94-99, 室蘭工業大学、室蘭市、2023年7月20-21(20)日。
- [10] A. Setiawan, S. Sato, N. Yonemoto, H. Nohmi, and H. Murata, “Millimeter-Wave Three-Dimensional Imaging Using Dielectric Lens for Security Application,” 電子情報通信学会マイクロ波研究会、信学技報、vol. 123, no. 115, MW2023-45, pp. 100-105, 室蘭工業大学、室蘭市、2023年7月20-21(20)日。
- [11] 米本成人、“セキュリティ検査応用のための3Dミリ波イメージャ”、マイクロ波ワークショップ、FR5A-3、パシフィコ横浜、横浜市、2023年12月2日。
- [12] 米本成人、河村暁子、ニッ森俊一、森岡和行、宮崎則彦、佐藤正彦、“セキュリティ検査用レーダシステムの標準サンプルのレーダ断面積の統計分析” 電子情報通信学会マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会、信学技報、vol. 123, no. 351, MWPTHz2023-87, pp. 64-69, 京都大学、京都市、2024年1月22-23(23)日。
- [13] 佐藤秀, Arie Setiawan, 米本成人, 能美仁, 村田博司：“誘電体レンズを用いたW帯3次元イメージング像の生成・分離,” 電子情報通信学会総合大会, C-2C-24, 広島大学, 東広島市, 2024年3月5-8(7)日。
- [14] 米本成人、河村暁子、ニッ森俊一、森岡和行、牧田芳男、“ミリ波レーダイメージャの較正に使用する金属球のRCS精密計測” 電子情報通信学会マイクロ波テラヘルツ光電子技術研究会、信学技報、vol. 124, no. 351, MWPTHz2024-49, pp. 177-181, 小樽市民会館、小樽市、2024年7月11-12(12)日。
- 3) その他（研究内容報告書、機関誌発表、プレス発表等）
- 国際標準化提案 2件
- [1] IEC TC103 WG6, Proposal of Preliminary Work Item IEC IS 63385-2 Ed.1, TRANSMITTING EQUIPMENT FOR RADIOCOMMUNICATION -SHORT RANGE RADER TECHNOLOGIES AND THEIR PERFORMANCE STANDARDS - Part 2: Transmitting waveforms with plural modulation schemes for short-range radar systems, 2023年11月提案、採択、2024年8月失効
- [2] IEC TC103 WG6, Proposal of Preliminary Work Item IEC IS 63385-2 Ed.1, TRANSMITTING EQUIPMENT FOR RADIOCOMMUNICATION -SHORT RANGE RADER TECHNOLOGIES AND THEIR PERFORMANCE STANDARDS - Part 2: Aggregated EIRP evaluation of coded FMCW waveform transmissions from plural transmitters in a MIMO radar, 2024年10月提案、採択