

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02147

研究課題名（和文）ライフサポートシステム実現のための高分解能ミリ波MIMOイメージングアレー

研究課題名（英文）High-resolution MW-MIMO Imaging Radar for Life Support Applications

研究代表者

山田 寛喜（Yamada, Hiroyoshi）

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：20251788

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、ミリ波レーダによるライフサポートシステム、具体的には屋内人物人物の動作や1m程度の近傍の場合は衣服の内部の危険物などの検出、特に3次元イメージングが可能となるレベルのレーダシステムを構築することを目的とした。これが可能となると、人物行動認識や、ゲート付近でのウォークスルー持ち物検査などレーダの応用分野が飛躍的に拡大する。その実現のため、少ない素子数で飛躍的に空間分解能の改善が可能となる2次元仮想アレー技術を開発し、試作レーダによる実験でその有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、高分解能なミリ波イメージングレーダを実現するための理論を構築し、実験によりその高分解能性を実証した。レーダの分解能はアンテナの基本的には大きさで決まる。そのためには多数の素子が必要になり、現状では実用的なサイズ、費用で制作することは困難である。現状で実現可能なハードウェア規模では、1m先の空間分解能として10cm程度が限界である。そのハードウェア規模で約10倍の分解能（1m先の1cm幅を分離可能）を実現した。これにより、屋内程度（3-4m）の人物の大きな姿勢や、近距離（～1m）の物体の形状の映像化を可能とした。これは人物の動作や持ち物検査などへの利用が可能となる技術である。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this research is to realize life support systems using millimeter-wave radar, specifically, a radar system that can detect indoor human motion and concealed weapon detection in the near-field situation. The radar developed in this study has both receiver and receiver in a planar array, making it possible to achieve three-dimensional imaging. In our prototype radar with 12-Tx and 16-Rx elements, a spatial resolution of a few centimeters can be achieved at a target distance of 1 meter. It will be effective for motion recognition of persons and security checks in walk-throughs.

研究分野：アンテナ・電波伝搬およびレーダ信号処理

キーワード：MIMOレーダ 仮想アレー ミリ波レーダ イメージングレーダ 最小冗長アレー

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

当初、自動車レーダを主たる応用分野として開発が進められていたミリ波レーダは、MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)技術と融合することにより、比較的少ない素子数で仮想的により大きなアレー開口を実現することが可能となり、近年、その応用分野が急速に拡大している。ミリ波レーダにおいては、比較的広帯域(3~4GHz 帯域幅)のレーダが容易に実現可能であるため、通常のフーリエ変換手法を用いた場合でも5cm程度の距離分解能が実現できる。しかしながら、角度分解能はアンテナ(アレー)開口サイズに依存するため、高い角度分解能実現には、大開口のアンテナが必要となる点が問題であった。MIMOはその問題点を解決する手段となっている。

我々の身近なセンシングでは、カメラ、いわゆる光学センサが最も高分解能性を有しており、高機能性の実現が容易なセンサといえる。幼児や高齢者の見守りシステム、公共設備等での監視カメラなど、広く普及している。しかしながら、光学センサではしばしばプライバシー保護が問題となるケースもある。また、衣服の内側やカバンの中などの危険物の検出では、光学センサは透過性がないため、X線検査や金属探知機などが用いられている。これらには被爆の問題や分解能特性など解決すべき欠点がある。空港などでは、ミリ波レーダを用いたボディースキャナも実用化されているが、現状では一定時間の静止姿勢が求められるため、幅広く普及するには至っていない。

昨今、大勢の人々が集まる集会、公共交通機関等において銃や爆発物などの危険物による犯罪も増えており、それらに対応したセキュリティ対策が急務である。本研究は、そのような用途への応用も可能とする高分解能なイメージングレーダの実現を目指したものである。

2. 研究の目的

本申請テーマは、ライフサポートシステム実現のための高分解能ミリ波MIMOイメージングアレーというテーマで、MIMO技術をベースに、さらに我々が拡張した仮想アレー手法を導入することで、高い空間分解能を実現するレーダシステムを構築し、屋内程度の中近距離の人体の動きや、更には比較的近距离(~1m)の物体の高精細イメージングを目的とした。イメージング、すなわち映像として捉えることができるレベルにまでレーダの性能を高めることで、レーダ画像の可読性を高め、カメラで培われた様々な画像処理・認識技術の適用も容易となる。レーダ本来の利点であるドップラ検出、すなわち動きを直接計測や、非金属材料に対する透過性を活かすことにより、カメラ等の既存センサの不得意分野を補完するセンサの実現が可能となる。センササーフションによるより豊かで安全な生活環境実現のため、レーダ、すなわち電波応用の要素技術の一つとしての貢献を目的としている。

3. 研究の方法

(1) 2次元仮想平面アレー設計手法の確立

この研究の根幹となる部分である。通常のMIMOレーダのコンセプトでは、実現可能な仮想素子数は送信素子数×受信素子数である。例えば、現在比較的容易に実現可能なMIMOレーダは12送信素子、16受信素子であり、この場合は192素子相当のアレーが限界である。単純に2次元平面アレーに換算すると14×14素子程度が限界といえる。これでは、前出の目的を達成するイメージングレーダとしても分解能には遠く及ばない。そこで我々はPassive Arrayにおいて古くから知られている最小冗長アレー(Minimum Redundancy Array, MRA)およびカトリ・ラオ(KR)行列積仮想アレーに着目し、それらをMIMOレーダ、すなわち送信及び受信アレーからなるアンテナシステムへ応用した。前回の科研の成果では1次元アレー(リニアアレー)における最適設計法を明らかにしたが、今回の研究では、その理論を2次元アレー、すなわち平面アンテナへ拡張し、送信・受信素子数およびそれぞれの素子配置の関係を理論的に明らかにした。また、平面アレー構成時の素子数の組み合わせには自由度が存在することを明らかにした。これにより、与えられた素子数に空間分解能を最大化する配置の設計法、あるいは仮想アレー校正時の冗長度を抑えつつアンテナ専有面積を最小化(すなわち小型化)する場合の設計法等、目的に応じた最適設計を可能とした。これらの設計指針を2次元KR-MIMO仮想アレーとして確立した。

(2) 3次元ターゲットイメージングの実現

上記の設計指針をもとに、2次元KR-MIMO仮想アレーの試作を行い、その分解能特性を評価した。送受が同一位置であるモノスタティックレーダシステム系のみならず、ターゲットを複数の角度から観測可能となるマルチスタティックシステム系の構築にも取り組んだ。マルチスタティックシステム系に関しては、部材の調達等の事情により、システム設計と試作が遅れ、本格的なイメージングに関しては引き続き実験を継続している。

(3) レーダ信号の特長抽出

今回の研究では、マルチスタティック系の構築遅れがあったためレーダ信号の特長抽出に関

しては、イメージング系の構築を待たずに、従来のリニアアレー型の MIMO レーダにおける検討として検討を行った。具体的には、距離、方位、ドップラ（速度）の 4 次元および、それらの時間的変化の 4 次元データを収集し、屋内における人物様々な動きに対する波形変化の特長、畳み込みニューラルネットワーク (NCC) に基づく機械学習を行った際の動作認識精度を検討し、各次元の組み合わせを通して、ターゲットの特長を効果的に表現する次元に関して検討した。

4. 研究成果

(1) 2次元仮想平面アレー設計手法の確立

申請者が考案した KR-MIMO 仮想アレー手法を導入することにより、通常の MIMO レーダに比べ飛躍的な実効開口長、すなわち仮想素子数の増加が可能となる。送受信ともに 1 次元（リニアアレー）の場合に関しては先行研究である科研費 B(JP20H02147)において、それらの概念と理論、最適な素子配置を明らかにした。詳細は文献①を参照されたい。ここでは、送受信ともに 2 次元（平面アレー）の場合について検討し、1 次元の場合との関連を含め、その理論を明らかにした。実用上は 2 次元（平面アレー）で充分と思われるが、この理論検討により、2 次元のみならず、さらに高次元へも容易に拡張可能となることが分かり、数学的に統一された不等間隔アレーによる等間隔仮想アレー構築理論が確立された。2 次元版の理論の詳細は文献②を参照されたい。

今回の申請研究では、現時点で試作可能な規模の MIMO レーダとして、12 送信素子、16 受信素子の場合について設計した。図 1 がその実現例の一つである。送信、受信ともに 2 次元（平面）アレーであり、各アレーの水平方向、垂直方向（縦横）ともに、1 次元の MRA 配置である点に特徴がある。2 次元に拡張する際は、このように MRA 配置を組み合わせることにより、仮想アレー変換後の重畳度（同一位置に生じてしまう仮想素子数）最小となることを理論的に証明した。

図 1 の配置により生成される仮想アレーは図 2 である。同図の x , y 軸がアレーの平面アレーの横および縦方向の素子位置であり、この場合では、 $(N_x, N_y) = (169, 91)$ 素子の合計 15,379 素子相当の矩形アレーを実現している。同図の z 軸がその位置に生成された仮想素子数を表している。中央部は多数の素子（192 素子）が重複しており、その他いくつかの部分でやや重複がみられるが、多くの部分で重複、すなわち冗長が抑えられており、効率的な仮想アレー校正となっているといえる。なお、通常の MIMO レーダ信号処理では $16 \times 12 = 192$ 素子が上限である。従って、本手法により、飛躍的に素子数、開口サイズが増加することを実証した。

(2) 3次元ターゲットイメージングの実現

上記の設計に従い、2 次元 KR-MIMO レーダを試作し、そのイメージング性能を実験により検証した。具体的には、従来の MIMO レーダ配置および今回考案した配置の 2 つのレーダを試作し、その空間分解能特性を用化した。試作したレーダを図 3 に、そのイメージング結果を図 4 に示す。

図 4 はレーダ前方 1m の距離に、約 3cm 角のコーナーリフレクタをターゲットとしてイメージングを行った結果である。同図の x , y 軸が縦及び横方向に対応している（距離 1m 地点におけるレーダ開口に平行な平面）である。従来の MIMO レーダではこの距離における空間分解能は約 10cm 程度であるのに対し、KR-MIMO レーダでは 1cm という

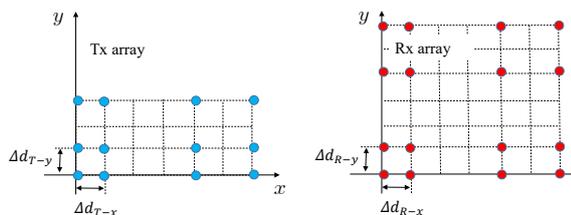


図 1: 2次元 KR-MIMO アレーの素子配置

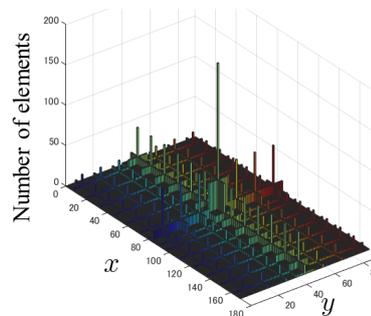
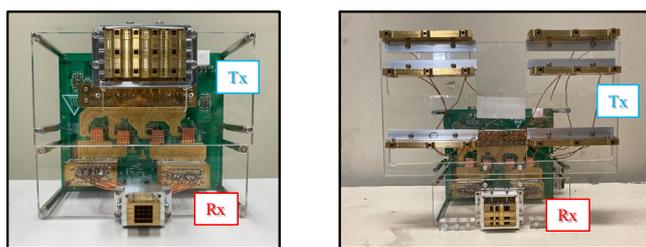
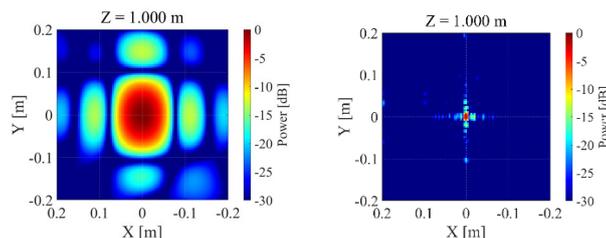


図 2: 2次元等間隔矩形仮想アレー



(a) 従来の MIMO レーダ (b) KR-MIMO レーダ

図 3: 2次元 MIMO レーダ試作機



(a) 従来の MIMO レーダ (b) KR-MIMO レーダ

図 4: イメージング結果

高い空間分解能が実現されていることが分かる。この試作機では周波数帯域幅 3GHz で動作するため、距離方向の分解能は約 5cm である。従ってターゲット距離が 2m 以内であれば、3次元空間 (x, y, z) を数 cm の分解能で映像化可能となる高分解能なターゲットイメージングが実現できていることが分かる。詳細に関しては文献③を参照されたい。

(3) レーダ信号の特長抽出

MIMO レーダにおいては、図 5 に示すように距離、方位、ドップラ (速度) の 4 次元および、それらの時間的変化の 4 次元データが得られる。これらの各次元に着目するとターゲットの動きに応じた特徴的な波形が認められる。図 6 は 2 送信、4 受信素子という簡素な構成の MIMO レーダにより得られる観測波形の例である。このようにレーダにおいては、映像、すなわち画像としてのターゲットの特長に頼ることなく、ターゲットの特長、この場合では動作特長を取り出すことができる。今回の検討では、屋内人物の動作として 10 動作を取り上げ、2 領域の組み合わせ波形画像 (速度-角度, 距離-速度, 時間-速度, 時間-距離, 距離-角度) を入力データとして畳み込みニューラルネットワーク (CNN) による機械学習により、その認識精度評価実験を行った。なお、上下方向の変動を検出するよう天頂角 (仰角/俯角) 方向とした。

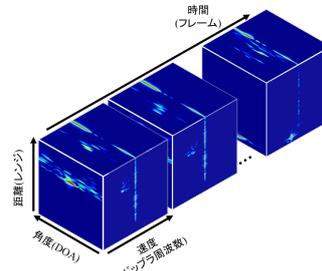


図 5: 4次元データキューブ

図 7 が被験者 7 名のデータに対して各動作合計 120 枚の画像データに対し、90 枚を教師データ、30 枚を精度検証データとして学習、分類を行った結果である。なお、教師データと検証データの偏りによる過学習を軽減するため、異なる 20 パターン

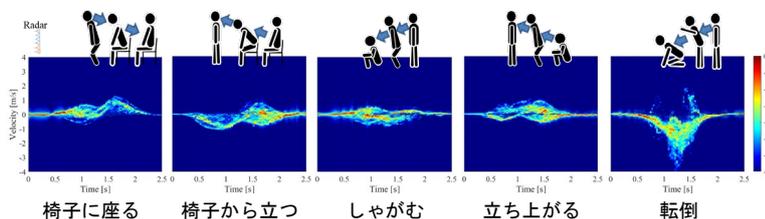


図 6: 時間-速度領域での人物の動きによる観測波形

での学習・分類を行い、全パターンの平均分類精度により評価している。この結果から分かるように動作に応じて効果的な領域の組み合わせがあることが分かる。今回の動作、アレー構成においては速度-角度領域の組み合わせが比較的有効であった。これらのデータをさらに組み合わせさせた (すなわち 6 つの組み合わせ全てを用いるなど) 検討も行った。結果としては、言うまでもなく多数のデータを組み合わせることで精度の向上を図ることができるが、少なくとも 3 領域が含まれるような 2 つの組み合わせ程度で 6 つ全ての組み合わせと同程度の認識精度が達成できることを示した。詳細は文献④を参照されたい。

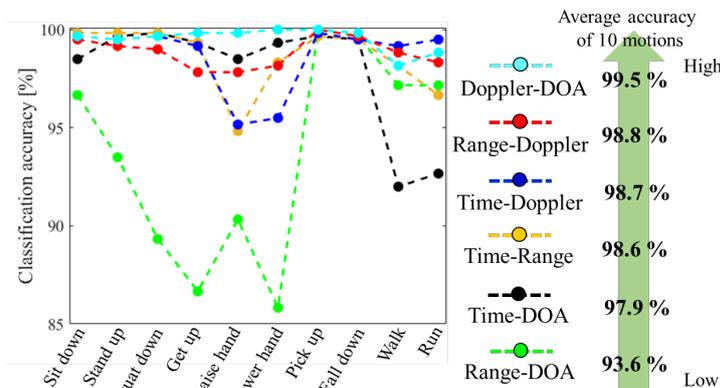


図 7: 動作分類精度

<引用文献>

- ① 山田寛喜, “ミリ波レーダによる高分解能イメージング技術”, 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J104-B, no. 2, pp. 66-82, 2012年2月.
- ② 山田寛喜, 加藤立騎, 森浩樹, “2D Virtual Array Techniques for MIMO Radar,” the 19th European Radar Conference (EuRAD2022), Sept. 2022.
- ③ 加藤立騎, 山田寛喜, 森浩樹, “Experimental study on 3D imaging using millimeter-wave non-uniform 2D-MIMO radar,” IEICE Communications Letters (ComEX), vol. 11, no. 12, pp. 760-765, Dec. 2022.
- ④ 坂上史弥, 山田寛喜, “ミリ波 MIMO レーダを用いた CNN による人物動作認識における有効な動作イメージングデータに関する検討”, 電子情報通信学会論文誌 B, vol. J105-B, no. 03, pp. 259-269, Mar. 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 坂上史弥, 山田寛喜	4. 巻 Vol. J105-B, No. 03
2. 論文標題 ミリ波MIMOレーダを用いたCNNによる人物動作認識における有効な動作イメージングデータに関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会和文論文誌B	6. 最初と最後の頁 259-269
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2021GWP0007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 坂上史弥, 山田寛喜	4. 巻 vol. 121, no. 126, AP2021-29
2. 論文標題 ミリ波MIMOレーダによる2次元イメージングとCNNを用いた高精度な人物動作識別に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 31-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 加藤立騎, 山田寛喜, 森浩樹	4. 巻 vol. 121, no. 154, SANE2021-23
2. 論文標題 ミリ波2次元MIMOレーダを用いた3次元イメージングに関する実験的検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 鈴木壱歩, 山田寛喜	4. 巻 vol. 121, no. 191, AP2021-84
2. 論文標題 ミリ波FM-CWレーダを用いた交通監視システムにおける複数ターゲットの分離識別に関する検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 64-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山田 寛喜	4. 巻 J104-B
2. 論文標題 ミリ波レーダによる高分解能イメージング技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 66 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2020JB10001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 坂上史弥, 山田寛喜, 村松正吾	4. 巻 vol. 120, no. 77, SANE2020-12
2. 論文標題 ミリ波FM-CWレーダを用いたCNNによる人物の動作分類に関する基礎検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報,	6. 最初と最後の頁 19-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 加藤立騎, 山田寛喜, 森浩樹
2. 発表標題 Experimental Study on 3-Dimensional Imaging Using MW-2D-MIMO Radar
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜
2. 発表標題 On Effective Parameter for Human Motion Recognition with MW-MIMO Radar Using CNN
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤立騎, 山田寛喜, 森浩樹
2. 発表標題 MW-2D-MIMOレーダを用いた3次元位置推定に関する実験的検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波MIMOレーダを用いた人物動作のDOAイメージングにおける高分解能化について
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤立騎, 山田寛喜, 森浩樹
2. 発表標題 ミリ波2次元MIMOレーダを用いた3次元位置推定に関する実験的検討
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木壱歩, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波FM-CWレーダを用いた交通監視システムにおける複数ターゲットの識別に関する検討
3. 学会等名 2021年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波MIMOレーダによる高分解能ターゲットイメージング
3. 学会等名 Microwave Workshop & Exhibition (MWE2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤立騎, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波2次元MIMOレーダを用いたKhatri-Rao積拡張アレー処理による3次元イメージングに関する実験的検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波レーダを用いた人物動作分類におけるイメージング分解能と分類精度について
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木壱歩, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波FM-CWレーダを用いた交通監視における複数ターゲットの分離に関する検討
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Zuxuan Zhang, 児玉侑也, 村松正吾, 山田寛喜
2. 発表標題 複素絶対値近似計算によるSAR画像復元
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽澤 帆乃佳, 山田寛喜
2. 発表標題 Impact of Signal Correlation in 2D Imaging with Khatri-Rao Product Expansion Array
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村和真, 山田寛喜
2. 発表標題 Classification Accuracy Improvement of Traffic Monitoring MW Radar by Velocity Compensation
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜, 村松正吾
2. 発表標題 Accuracy Improvement of Human Motion Recognition with MW-FMCW Radar Using CNN
3. 学会等名 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽澤帆乃佳, 山田寛喜, 森浩樹
2. 発表標題 Khatri-Rao 積拡張アレー処理を用いたMIMO 仮想アレーによる近傍界ターゲットイメージング
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山田寛喜, 羽澤帆乃佳, 森浩樹
2. 発表標題 カトリ・ラオ積を用いた2次元MIMO仮想アレーについて
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村和真, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波FM-CWレーダを用いた交通監視における ターゲット識別手法に関する検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜, 村松正吾
2. 発表標題 ミリ波FM-CWレーダを用いたCNNによる人間の動作認識に関する基礎検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 坂上史弥, 山田寛喜, 村松正吾
2. 発表標題 ミリ波MIMOレーダによる屋内人物の動作認識に関する検討
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西村和真, 山田寛喜
2. 発表標題 ミリ波FM-CWレーダを用いた交通監視におけるレーダ観測時間に関する検討
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 羽澤帆乃佳, 山田寛喜
2. 発表標題 Khatri-Rao積拡張アレー処理によるMIMO仮想アレーを用いた近傍界ターゲットイメージング
3. 学会等名 2020年度電子情報通信学会信越支部大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	村松 正吾 (Muramatsu Shogo) (30295472)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------