

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar



山田 寛喜 (Hiro Yoshi YAMADA, Dr. Eng.)
新潟大学 工学部工学科 知能情報プログラム 教授
(Professor, Faculty of Engineering, Niigata University)

電子情報通信学会 IEEE

受賞: IEEE Tokyo Chapter "Young Engineer Award" (1991年) 電子情報通信学会 学術奨励賞 (1998年) 電子情報通信学会 論文賞 (2009年) 電子情報通信学会 喜安善市賞 (2009年) 電子情報通信学会通信ソサイエティ チュートリアル論文賞 (2009年) 総務省信越総合通信局長表彰 (2015年)

研究専門分野: アレー信号処理 レーダ信号処理 アンテナ・電波伝搬 マイクロ波リモートセンシング

あらまし 安心・安全社会実現の基盤システムの一つとして、センサが果たす役割は大きい。その一例として、高齢者や幼児の見守りシステムが挙げられる。このようなシステムでは、一般に光学カメラが用いられているが、プライバシーなどの観点から、その設置が好ましくない場合も多い。そのような場合の代替システムとして、この研究では、電波を用いたセンシングシステム、すなわちレーダの応用を検討した。光学カメラのような画像とは異なり、レーダは距離および方位を推定し映像化する。このとき、距離分解能は使用する周波数帯域幅、方位分解能はアンテナアレー長により制限される。この制約の下で、如何に高分解能化するかが人物の行動追跡を実現するレーダを開発するカギとなる。

本研究では、(1) MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) アンテナに、さらにカトリ・ラオ (Khatri-Rao) 仮想アレー化技術を導入することにより、角度分解能を向上すること、その手法が距離分解能向上にも利用できること、(2) 最適な送受信アンテナ配置、(3) 追尾フィルタを用いた行動追跡の実現について検討した。本研究における実験システムは、マイクロ波帯での検討であるが、近年急速に普及が進んでいるミリ波帯においても、応用可能なものである。

1. 序論

本研究では、屋内マルチパス環境下において、人物の検出および行動追跡を行う高分解能なレーダを開発することが目的である。レーダの距離分解能は周波数帯域幅、角度分解能はアレー長 (素子数) により決まり、広帯域かつ多素子アレーであるほど高い分解能特性が実現できる。しかしながら、周波数利用の制限やハードウェアコストなどの問題により、所望の特性を実現することは必ずしも容易ではない。特にアレー長 (素子数) の制約が厳しく、現時点での実用化のためには4素子程度の受信アレーでのシステムでの実現がカギとなる。本研究では、この問題点を解決するため、送信素子を多素子化した MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) アレーレーダとすることによる実効的な開口長の増加に加え、さらにカトリ・ラオ (Khatri-Rao、以下 KR) 仮想アレー処理を導入することによる飛躍的な角度分解能特性の向上を実現し、人物の行動追跡において、その効果を実証することを主目的としている。

なお、屋内マルチパス環境下では、部屋の壁面や什器からの反射波のため、ターゲットである人物からの反射波を識別することが困難となる場合も多い。しかしながら、マイクロ波、ミリ波帯でのレーダは、人物のわずかな動きにより生じる周波数偏移、すなわち、ドップラ周波数の検出も可能である。その性質を利用し、壁面や什器からの反射波を抑圧し、人物検出精度を改善し、さらに追尾フィルタの導入により、行動追跡精度の改善を図り、5GHz 帯での 100MHz 程度の周波数幅であっても、複数人物の行動追跡を可能とするシステムが実現されることを実証する。

2. 関連研究

壁面や様々な什器のある屋内でのレーダ応用では、多数の反射波が生じ、ターゲットである人物からの反射波の識別、さらには検出自体が困難となる場合も多い。ここで検討しているマイクロ波 (あるいはミリ波) 帯のレーダは、数 cm から数 mm の波長の電波を用いるため、人物のわずかな変位においても受信信号の位相変化が生じ、それに伴うドップラ周波数の検出が可能となる。この微小なドップラ周波数偏移の検出は、

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar

様々な応用研究が報告されており[1]、本研究でも、マルチパス波抑圧において、このマイクロ・ドップラ検出を利用している。

大きな問題である角度分解能特性の改善に関しては、近年、通信分野で大容量通信を実現する方式として広く利用されている MIMO をレーダに応用した方式に着目した[2]。この方式を利用することにより、 N_t 素子の送信アンテナと N_r 素子の受信アンテナを用いたレーダにおいて、 $N_t \times N_r$ 素子相当のアレー長の角度分解能が実現される。

さて、受信のみを行うアレーアンテナにおける波源の到来方向 (Direction-of-Arrival, DOA) 推定の研究では、限られた素子数で高分解能な角度推定を行う手法として、不等間隔アレーによる様々な仮想アレー技術が研究されている。古くから知られている Minimum Redundancy Array (MRA) [3]や、近年盛んに研究されているカトリ・ラオ仮想アレー[4][5] (あるいは Co-prime array) などが代表的な研究である。しかしながら、これらの技術は、到来波が無相関 (独立な波源) であることを前提としており、単一波源からの反射波を観測するレーダにおける応用の検討はほとんどなく、さらに高度な MIMO に融合した検討はなされていない。MIMO レーダにおいては、送信アンテナの配置を含めた最適設計を行うことで、飛躍的に多素子の仮想アレーの実現が可能となることを期待できるのもといえる。

3. 研究の方法

本研究の主要な柱は、MIMO レーダの高分解能化に関する理論的研究、および本研究で構築した MIMO ドップラレーダシステムによる屋内マルチパス環境下での実証実験の2つである。以下、それぞれの主な成果を概説する。

3.1 仮想アレー手法を用いた MIMO レーダの高分解能化

アレーアンテナにおいて、多素子化および実効アレー長の拡張を実現する仮想アレー手法は、前節で述べたように、独立な波源からの無相関な到来波の分離推定を仮定している。レーダは同一の送信信号の反射

波を観測するため、一般には仮定が成立しないが、本研究で想定する動きのあるターゲットにおいては、個々のターゲットが独立な動きにより生じる独立なドップラ周波数偏移により、個々の反射波間の相関が低下する。したがって、十分な観測時間を確保すれば、仮想アレー手法の適用が可能となる。

一方、MIMO レーダは、複数の異なる送信アンテナからの反射波を利用して、仮想的に受信素子数および実効アレー長を増加させるレーダ技術である。この場合、同時送信の場合は独立な送信信号を用いるが、時分割 (交互) 送信し疑似的な MIMO を実現する場合も多い。ここで各送信信号における受信信号に着目すると、前述の仮想アレー問題と等価であることがわかる。すなわち、MIMO レーダにさらに仮想アレー技術を導入した多素子化、高分解能化が可能となるといえる[6]。

図1が送信素子数を2素子とした場合において、受信素子数を2~8と変化させたときの実現可能な仮想アレー素子数である。ここでは、生成される仮想アレーの導出では様々なレーダ信号処理手法が適用できるよう、その仮想アレーが等間隔リニアアレー (Uniform Linear Array, ULA) とする制限を加えている。

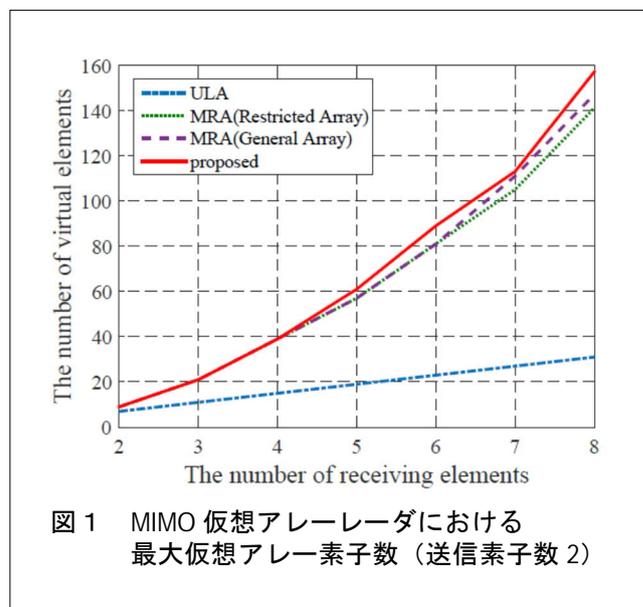


図1 MIMO 仮想アレーレーダにおける最大仮想アレー素子数 (送信素子数 2)

図1の ULA は、受信アレー自体を等間隔リニアアレーとした場合の結果であり、これが従来の MIMO レーダの結果である。この場合、送信素子数 \times 受信素子数

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar

相当のアレー長が実現される。同図の MRA (Restricted Array) および MRA (General Array) は、受信アレーを不等間隔な MRA とした場合の結果であり、Restricted array は、すべての素子が連続した ULA となる場合の最大素子数であり、General array は、生成された仮想アレーにおいて連続する ULA が最大となるよう解析した結果、すなわち、一部に欠落素子が生じることを認めたとうえで、連続する ULA 部分を抜き出したものである。この結果から分かるように、受信素子数の増加に応じて飛躍的に多くの仮想素子数が実現可能となる。これらの MRA の解析結果は、受信アレーの配置を従来研究[3]-[5]の成果を用いて選択し、送信アンテナの配置を最適化したもの、すなわち、部分的な最適化といえる。同図の Proposed は、送信、受信アンテナの全ての配置の最適化を行ったものである。送信 2 素子、受信 4 素子を超えた場合、さらに実効素子数の増加が可能となることがわかる。

表 1 は、受信素子数が 2~4 の場合の送受信素子配置および仮想素子数である。表内のアンテナ位置は送信及び受信の第一素子を原点とし、基準アンテナ間隔 (通常は半波長) を 1 として表記している。受信素子

数が 4 素子の場合、従来の MIMO レーダでは 8 素子相当となるが、MIMO レーダにおいて仮想アレー技術を導入することにより、39 素子相当、すなわち、アレー長を約 5 倍に拡張できることがわかる。表 2 は、本研究で明らかにした最適アレー配置 (Proposed) の場合の素子配置と、仮想アレー素子数である。例えば、受信素子数を 8 素子とすると、157 素子相当まで仮想素子数を増加することが可能となる。なお、この場合、従来の MIMO レーダでは 16 素子、MRA (General array) では 147 素子である。さらなる詳細に関しては、文献[7]を参照されたい。

仮想アレー技術は、アレーアンテナのように空間的に配置されたもののみならず、様々なアレーデータに対して適用可能となる。例えば、ステップ周波数レーダ、FMCW レーダでは、それぞれ周波数サンプルデータ、時系列のビート信号データが得られる。これらもアレー信号である。本研究では、この点に着目し、各素子の受信信号に対して仮想アレー技術を適用すると、周波数帯域幅を実効的に 2 倍に広帯域化できることを示した[8]。その効果に関しては次節に示す。

表 1 MIMO 仮想アレーにおける送受信アンテナ配置と仮想素子数 (受信素子数 Rx=2~4)

Rx	Location of Transmitting Array Elements	Location of Receiving Array Elements	Number of Virtual Elements
2	0 3	0 1	9
3	0 7	0 1 3	21
4	0 13	0 1 4 6	39

表 2 提案する MIMO 仮想アレーにおける送受信アンテナ配置と仮想素子数 (受信素子数 Rx=5~8)

Rx	Location of Transmitting Array Elements	Location of Receiving Array Elements	Number of Virtual Elements
5	0 21	0 2 7 8 11	61
6	0 31	0 1 4 10 12 17 0 1 8 11 13 17	89
7	0 39	0 1 10 13 15 17 21 0 8 15 17 20 21 31	113
8	0 57	0 4 5 17 19 25 28 35	157

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar

3.2 実証実験

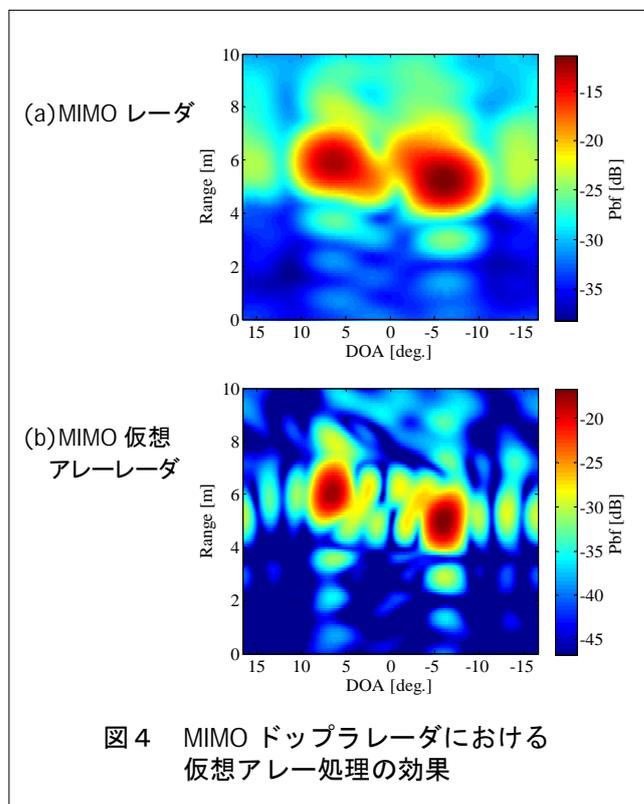
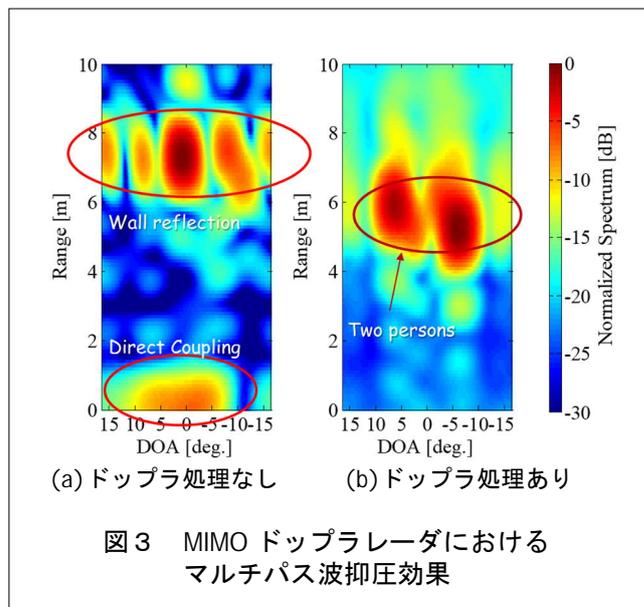
MIMO 仮想アレーレーダによる人物の行動追跡の精度向上効果を検証するため、実験系を構築し、検証実験を行った。図2に、構築した実験系の外観を示す。このシステムは、FMCW方式の2送信、4受信のMIMOレーダであり、送信は時分割（交互）送信である。送受信アンテナはパッチアンテナを用い、5GHz帯（帯域幅125MHz）とした。ここでは、以降ターゲット検出手法として、基本的なビームフォーミング法を用いた結果を示す。いうまでもなく、更なる高分解能特性の実現のため、MUSIC法などの高分解能手法の適用も可能である。



屋内における人物検出では、マルチパス波の抑圧が問題となる。図3に、MIMO ドップラレーダによるマルチパス波抑圧効果の一例として、4×8m程度の部屋に2人存在する場合の実験結果を示した。これらの図の横軸は方位、縦軸は距離である。図3(a)に、ドップラフィルタリングを施さない場合の結果を示した。ここで、距離（range）が0m付近および8m付近の強い応答は、アンテナ間のカップリングおよび壁面からの反射であり、この結果では、人物の存在を確認することは困難である。一方、ドップラフィルタリングにより静止物体の応答を抑圧した結果である図3(b)では、これらの不要応答が除去され、2人の人物の応答を明瞭に確認できる。

従来のMIMOレーダおよびMIMO仮想アレー技術を導入した場合の角度分解能の差異の一例を図4（送信2素子、受信3素子の場合）に示した。図4(a)は、

従来のMIMOレーダであり、6素子相当の角度分解能であり、図4(b)のMIMO仮想アレーレーダでは、21素子相当の角度分解能となる。同図から分かるように、仮想アレー処理により2人の人物の応答が、より明瞭に分離することが可能となっている。



MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar

本研究で開発した MIMO 仮想アレー技術の効果をより詳細に検証するため、電波暗室内におかれた 3 面コーナーリフレクタをターゲットとした場合の実験結果が図 5 である。図 5(a)が角度分解能特性であり、SIMO-2D-BF は 1 素子送信 4 素子 URA 受信の場合、MIMO-2D-BF は 2 素子送信 4 素子 URA 受信（従来の MIMO レーダ）の場合、MIMO-2D-KR-BF は 2 素子送信 4 素子 MRA 受信（MIMO 仮想アレーレーダ）の場合の結果である。角度分解能に関しては、図 4 同様に MIMO 化に伴いビーム幅が狭まり、仮想アレー化により更なる狭ビーム化が実現されることがわかる。

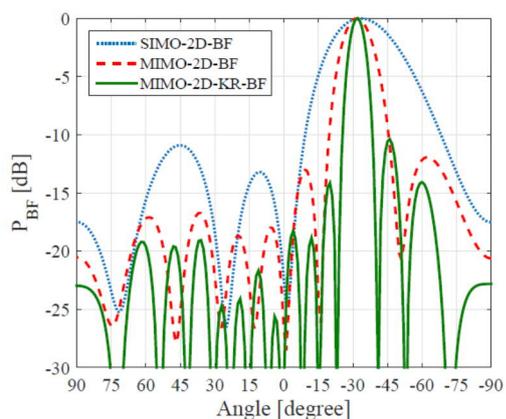
図 5(b)は、距離分解能特性を示したものであり、MIMO-2D-KR-BF においては、各素子の受信信号自体にも仮想アレー処理を施している。この処理により、実効周波数帯域幅が約 2 倍となるため、距離方向のビーム幅も狭くなっていることがわかる。これにより、距離分解能特性が改善される。

最後に人物の行動追跡結果を示す。図 6 (a), (b)のように、2 人の人物が交差するシナリオおよび 1 人が直進歩行し、もう一人が静止（直立）するという 2 つのシナリオの実験を行った。追尾においては、初期推定後の更新に関してはカルマン追尾フィルタを用いた位置推定を行っており、PC においてリアルタイムで処理されたものである。図 6(c), (d)の結果から分かるよ

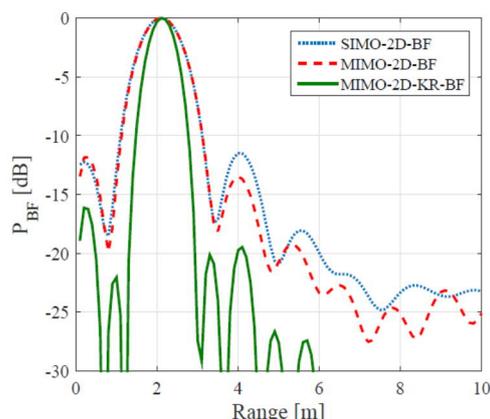
うに、2 人の人物の行動（位置）を正確に追尾できていることがわかる。静止している人物においても、わずかな動きがあるため、その微小ドップラの検出がされ、十分に屋内の複数人物推定が可能であることが実証された。なお、本システムおよび実験の詳細に関しては、文献[9][10]を参照されたい。

4. 結論と今後の展望

本研究では、特に、屋内マルチパス環境における人物の行動追跡を実現するための MIMO ドップラレーダシステムの高分解能化および実験による実証を行った。ここでは、5GHz 帯における 125MHz の実験系による検討実験を行い、その有効性を明らかにした。近年、自動運転実現に向けたミリ波レーダの開発が急速に進展し、ミリ波 MIMO レーダの幅広い応用が検討されている。本研究成果は、そのようなレーダに対しても有効な高分解能化手法である。ミリ波帯では、数 GHz という非常に広帯域なセンシングが実現可能なため、本研究で検討した人物の行動追跡は言うまでもなく、手足や腕、さらには指などの個々の部位の動きのトラッキングも実現可能となる。なお、このような高周波化では、本研究で用いた時分割送信方式による疑似 MIMO では送信タイミングの際による位相差の補正が問題となる。ターゲットのドップラ推定結果を



(a) 到来方向推定結果

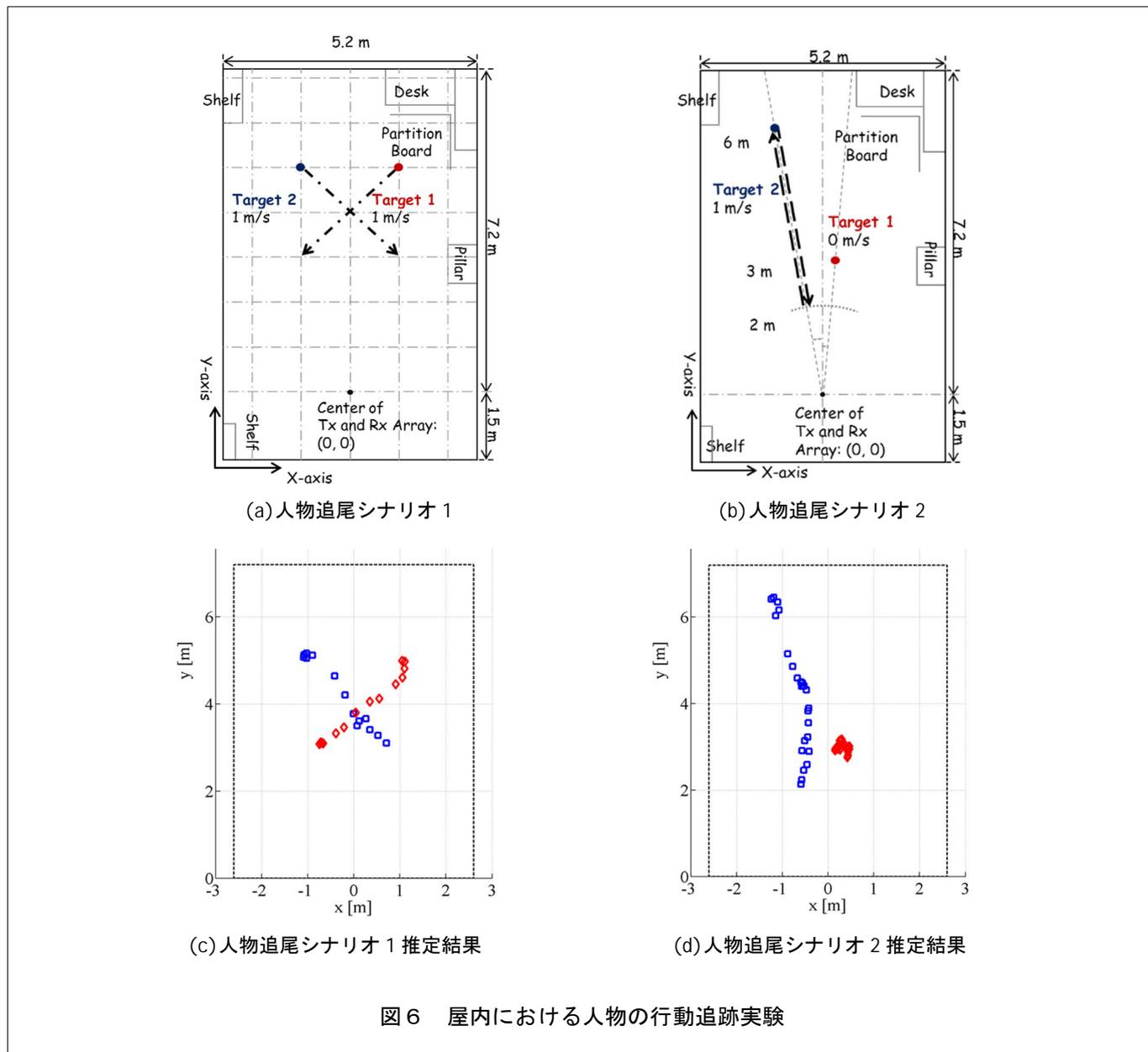


(b) 距離方向推定結果

図 5 MIMO 仮想アレー技術の角度方向および距離方向分解能特性改善効果

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar



用いることにより、その補正が可能である。どの程度の周波数、速度から補正が必要となるのかに関しては、この関連研究として検討済みである。結果に関しては、文献[11]を参照されたい。

視点を変えると、本研究で用いた 5GHz 帯の検討結果は、WiFi アクセスポイントを波源としたパッシブレダにおける人物の行動追跡の可能性を示したものとみなすこともできる。この周波数帯では、無線 LAN への干渉の恐れがあるため、アクティブなレーダ方式の実現は容易ではない。しかしながら、既存の WiFi アクセスポイ

ントからの送信信号を送信波としたパッシブなレーダ系を構築すれば、その問題が回避される[12][13]。

ここでは、見守りシステムを念頭に置いた研究を行った。各ターゲットのドップラ周波数特性の特徴など、レーダから得られる大量のデータを用いることにより、ターゲットの検出のみならず、認識・同定などの高機能なセンシングの実現も期待できる。これにより、さらに応用分野が広がるであろう。このように、電波センシング分野は、今後もますます発展していくものと期待される。

MIMO モーション・ドップラレーダによる人物の行動追跡に関する研究

Human motion tracking by using MIMO Doppler radar

参考文献

- [1] V. C. Chen, The Micro-Doppler Effect in Radar, Artech House, 2011.
- [2] J. Li and P. Stoica, MIMO Radar Signal Processing, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] A. T. Moffet, "Minimum-Redundancy Linear Arrays," IEEE Trans. Antennas and Propagat., vol. AP-16, no.2, pp.172-175, Mar. 1968.
- [4] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degree of freedom," IEEE Trans. Signal Processing, vol.58, no.10, pp.4167-4181, Aug. 2010.
- [5] W. K. Ma, T. H. Hsieh, and C. Y. Chi, "DOA estimation of quasi-stationary signals with less sensors than sources and unknown spatial noise covariance: A Khatri-Rao subspace approach," IEEE Trans. Signal Processing, vol.58, no.4, pp.2168-2180, Apr. 2010.
- [6] Y. Wakamatsu, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "MIMO Doppler radar using Khatri-Rao product virtual array for indoor human detection," IEICE Trans. Commun., Vol.E99-B, No.1, pp.124-133, Jan. 2016.
- [7] 小西, 山田, 山口, 平本, "Khatri-Rao 積麻生アレー処理を適用した MIMO レーダにおける最適素子配置に関する基礎検討", 2017 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2017 年 9 月.
- [8] 小西, 大橋, 山田, 丸山, 平本, 山口, "Khatri-Rao 積仮想アレー処理を用いた MIMO レーダによる距離および角度分解能向上に関する検討", 信学技報, vol. 117, no. 31, AP2017-29, pp. 37-42, 2017 年 5 月.
- [9] H. Yamada, Y. Wakamatsu, K. Sato, Y. Yamaguchi, "Indoor human detection by using quasi-MIMO Doppler radar," International Workshop on Antenna Technology (iWAT2015), Seoul, Korea, Mar. 2015.
- [10] 佐藤, 山田, 山口, "マルチパス環境における MIMO ドップラレーダを用いた複数人物の屋内リアルタイム行動追跡", 信学技報, vol. 115, no. 79, AP2015-32, pp. 1-6, 2015 年 6 月.
- [11] 大橋, 山田, 山口, "TDM-MIMO レーダによる移動ターゲットの DOA 推定誤差解析", 電子情報通信学会和文論文誌, Vol.J101-B, No.7 Jul. 2018(採録決定).
- [12] 山田, 馬野, 山口, "近傍の帯域制限電波源を利用した Parasitic Radar に関する基礎検討", 信学技報, vol. 115, no. 12, AP2015-15, pp. 71-75, 2015 年 4 月.
- [13] 山田, 馬野, 山口, "Wi-Fi アクセスポイントを利用した Parasitic Radar に関する実験的検討", 信学技報, vol. 115, no. 199, AP2015-61, pp. 1-6, 2015 年 8 月.

この研究は、平成 25 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 26 ~ 28 年度に実施されたものです。