

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420346

研究課題名(和文) モーション・ドップラセンシングによる人物の動きの検出・同定に関する基礎研究

研究課題名(英文) Human motion detection and estimation by using motion-Doppler sensing

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：この研究は、主にWiFi帯でのMIMOドップラレーダを構築し、屋内マルチパス環境下での人物位置推定の実現を主目的として実施されたものである。WiFi帯での屋内人物位置推定は、壁面等による強いマルチパス波の存在のため実現困難であった。本研究ではLinear FM方式のMIMOドップラレーダシステムを構築し、人物の動きに伴う微小なドップラ周波数成分を取り出すことにより、明瞭に人物の検出および2次元位置推定が可能となることを示した。さらにMIMOレーダ方式とカトリ・ラオ処理を併用した仮想アレー手法を提案し、少ない素子数で、数倍規模の仮想アレー処理を実現した。これにより角度分解能特性が改善された。

研究成果の概要(英文)：The main objective in this research was a realization of human detection in multipath indoor environment by using MIMO Doppler radar. The indoor human location estimation has been considered as a serious problem because of strong multipath by the wall and so forth. In this research we constructed the MIMO Doppler radar based on Linear FM, and demonstrated that micro-Doppler effect caused by the motion of human can be clearly detected and extracted. This enable us to discriminate human echo and multipath echo. In addition, we proposed a new virtual array technique based on the MIMO and Khatri-Rao processing. This technique can further enhancement of effective array length hence angular resolution can be improved.

研究分野：アンテナ・電波伝搬工学およびレーダ信号処理

キーワード：MIMOレーダ ドップラレーダ 2次元位置推定 仮想アレー 到来方向推定 人物検出 マルチパス伝搬  
移動物体検出

## 1. 研究開始当初の背景

モーション・センシング技術は、人やモノの動きを計測し、計測した動きを認識・理解してサービスを提供しようというものであり、近年、注目を集めている技術である。モーション・センシングには、様々なアプローチがあるが、現在、活発に研究されている技術は文献①などで詳細されているように、加速度センサを直接人物に取り付けるなどという直接的なものが多い。それに対して、本研究では電波センサ・レーダを利用したリモート（遠隔）な計測・動作の同定による人にやさしいライフサポートシステム/見守りシステムの開発を目的としている。

昨今、急速な高齢化・核家族化の進行に伴い、独居老人の孤独死防止や幼児見守りなど、社会生活の安心・安全の確保が急務となっている。現在、赤外センサや光学映像（カメラ）が用いられているが、監視領域やプライバシーなどの点で、それぞれのセンサ共に問題を抱えている。電波は見通し外伝搬・壁透過などの性質を有し、さらにドップラ周波数変動の検出が容易であることから、動きの検出に適している。これは赤外センサや光学映像の欠点を補完し得るものである。同種の検討として壁透過レーダの研究（文献②、③）が進められているが、ライフサポートシステム応用に関しては、まだ研究の途に就いたところである。本研究では、家庭などの生活空間でのライフサポートシステムに特化し電波によるリモートなモーション・センシングの計測限界と動作同定の可能性を明らかにする。

## 2. 研究の目的

先に挙げた問題点を解決するため、本研究では、主に以下の課題を解決することを目的とした。

(1) モーションの検出および動作の同定（分類）のためには、動作に特徴的なドップラ周波数分布の解明が不可欠である。本研究では、まず 2.4/5GHz およびより高周波数帯での人物の様々な動作のドップラ周波数変動の角度特性の影響とその特徴を解析する。

(2) マルチパスリッチな環境におけるドップラ周波数応答の検出では、屋内の壁面や床などの反射・散乱によるクラッタ抑圧が鍵となる。ターゲットの分離には、各周波数帯で許容される周波数リソースに応じた最適設計が必要である。ここでは、ドップラ周波数に着目したフィルタリングによる複数人物の分離と、各ドップラ周波数応答の分離推定を目標として研究を進めた。

(3) ドップラ周波数応答における特徴量の解析において、その分離検出・識別に一定の目

途が立った段階で、単なる動作の識別・分類だけでなく、その結果を生かした新たなアプリケーション・サービスの創生を検討する。

## 3. 研究の方法

人の行動などの微小なドップラ周波数変動の検出を目的とした電波センサ（レーダ）システムでは、周波数帯および帯域幅によるターゲット応答（人物の反射散乱特性）、電波伝搬、アンテナ、さらにはシステム運用方法を含めた統合的な解析・最適化を行う必要がある。そこで本研究では、MIMO システムのレーダ実験系を構築し、主に WiFi 帯における人物の動きに伴うドップラ周波数分布の測定実験を行い、その基本性質を解明する。具体的には以下の項目に関して取り組んだ。

### (1) 有効なアンテナ配置の検討

アンテナ素子の増加は、ハードウェアの複雑さ、コストも増加をもたらす。そこで本研究では MIMO レーダ構成を採用することで、仮想的にアンテナ素子数（アレー長）の増加をもたらすとともに、さらに Khatri-Rao アレーと呼ばれる仮想アレー生成手法を導入することによる更なる素子数の増加を図った。これらの最適配置の理論解析を行い、実験による実証を行う。

### (2) 屋内マルチパス環境における人物の検出および追跡

屋内でのセンシングでは、100MHz 程度の周波数帯域幅で実現できる距離分解能では、距離分解能での人物ターゲットの分離が困難であるばかりでなく、部屋の壁面等からの強いマルチパスが存在するため、人物からの弱い応答がマスキングされる。これらを回避するには、人物の動きに伴うマイクロドップラの検出が有効である。人物推定に適したパルスフォーマットを明らかにし、MIMO レーダのテストベッドによる実証実験を行っている。

### (3) 人物のモーションドップラ特性の解明

人物の動きに伴うドップラは様々な情報をもたらす。ここでは、ドップラを明確化するため中心周波数 10GHz、帯域幅 1GHz の FMCW 方式による SISO レーダシステムを構築し、様々な動きのドップラの、距離-ドップラ特性等を描画し、ドップラからの動きの情報を取り出すことを試みる。

## 4. 研究成果

本研究では、2 送信 4 受信、あるいは 2 送信 3 受信の Linear FM (LFM) 方式を用いた MIMO ドップラレーダを構築（図 1）し、その方式でのレーダ特性の理論解析および実験を通して、屋内マルチパス環境下での人物の検出・同定に関する検討を行った。

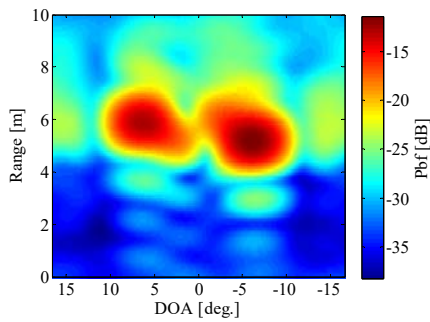
以下に研究の方法に沿って、各々の成果を示す。



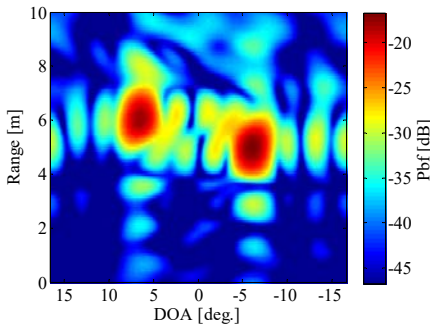
図 1. 5GHz 帯 2x4 MIMO ドップラレーダシステム

(1) 有効なアンテナ配置の検討

MIMO レーダは、容易に実効開口長の増加をもたらすレーダ方式として知られている。具体的には、適切に送信素子間隔を設定した  $N$  素子送信,  $M$  素子等間隔アレー受信による MIMO レーダでは,  $NM$  素子等間隔アレー (ULA) に相当する分解能が実現できる。本研究では、これに Khatri-Rao (KR) 仮想アレー技術を組み合わせることで、飛躍的に素子数の増加が可能であることを示し、その際のアレー配置の指針を明らかにした。具体的には受信アレーを Minimum redundancy array とし、KR 変換時に、仮想素子が重複しない様、送信間隔を定めればよい。これにより例えば 2 送信 3 受信 MIMO レーダで 21 素子 ULA に相当する分



(a) 2 送信 3 受信 MIMO



(b) 2 送信 3 受信 KR-MIMO

図 2. MIMO および KR-MIMO による人物推定

解能の実現が可能である。図 2 が 2 送信 3 受信 MIMO レーダにおいて、2 人の人物推定を行った実験結果である。同じ受信データにおいて、KR-MIMO 処理を施すことにより、角度分解能特性が著しく改善されることが分かる。このように信号処理手法のみで角度分解能特性の改善が可能であること実証した。

(2) 屋内マルチパス環境における人物の検出および追跡

WiFi 帯での屋内センシングでは、壁面等の強いマルチパスのため、反射の弱い人物などの検出は、極めて困難である。ここでは、人物の動きに伴うマイクロドップラの検出 (ドップラ周波数が 0Hz である静止ターゲットの除去) による人物 (動きのあるターゲット) の抽出を行った。図 3 に本手法の適用の有無によるイメージング結果の差異を示した。図 4 は、さらに抽出された人物ターゲットに対してカルマンフィルタに基づく追尾を行った結果である。ここではリアルタイムでの追尾処理を可能とするシステムを構築した。

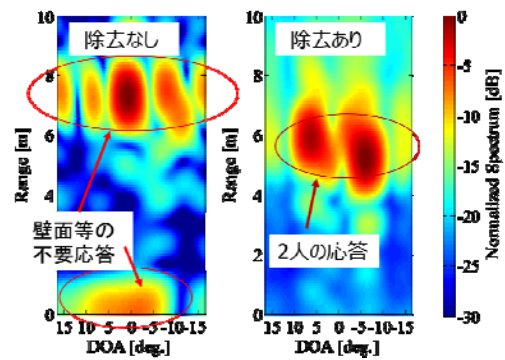


図 3. ドップラによる人物の抽出 (壁などのマルチパス除去)

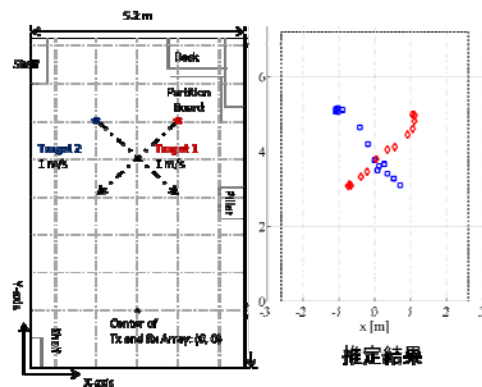


図 4. 2 人の人物追追尾実験結果

(3) 人物のモーションドップラ特性の解明

動きの推定手法としては STFT (短時間フーリエ変換) がよく用いられる手法である。ただし、この手法では近接した複数のターゲットが存在した場合、各々の応答の分離が困難となる問題が存在する。この研究で構築した

MIMO ドップラレーダは、角度および距離方向の2次元推定が可能であるため、STFT（時間-周波数特性）に加え、時間-距離特性、距離-ドップラ周波数特性など、様々な次元からターゲット特性を捉えることができる。図5が電波暗室内の人物（腕のみを振っている／行進している）の距離-ドップラ周波数特性の一例である。このように動きの速さと空間的な広がりの特徴を端的に表現できる。図6が屋内で歩行する人物と転倒する人物の応答の一例である。2次元レーダイメージでは、その分解能特性のため、ターゲット自身の細かな動きを認識することは困難であるが、個々のドップラ特性を見ると距離5m~2.5mまでこちらに向かってくる人物が存在すること、および4m付近の応答が負のドップラをもって変化急激に変化していることが分かる。こちらはレーダから遠ざかる方向に転倒した人物である。このように動きに伴う情報を明瞭に取り出すことが可能であることを実証した。これは光学カメラなどの既存のセンサが苦手とするセンシングであり、ドップラを直接推定できる電波センサが最も威力を発揮する部分である。

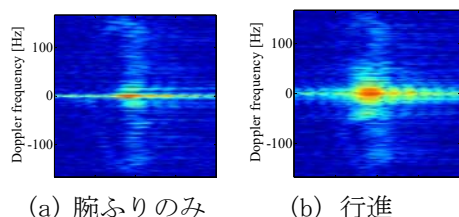


図5. 人物の距離-ドップラ周波数応答

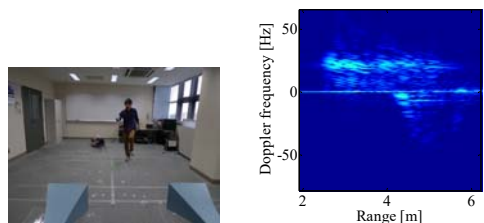


図6. 転倒および歩行する人物の距離-ドップラ周波数応答

なお、中心周波数が高くなるほど、ドップラ周波数は高くなるため、積極的なドップラセンシングを行う場合、高周波センサを利用することが効果的である。自動車レーダで利用されているミリ波システムでは、技術基準適合証明のみ（無線免許不要）で利用可能であるため、幅広い普及が期待される。

ミリ波におけるシステム設計に関する理論検討も行った。その結果、この研究で用いた交互送信方式のMIMOでは、早い速度のターゲットに対しては、送信タイミングの違いによる角度推定誤差が生じることを明らかにした。人物レベルの動き出れば、最低なLFM信号の変調率、送信パルス周期を選択すれば、ある程度、バイアス問題の会費が可能である

が、本質的な問題解決には、さらなる検討が必要であることを明らかにした。そのような問題を解決するレーダ信号処理手法の開発が今後の課題である。

#### <引用文献>

- ① 野間春生, “モーション・センシング技術で医療分野も安心・安全に,” 日経エレクトロニクス, 2012年6月25日号.
- ② Special Issue on Remote Sensing of Building Interior, IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, vol. 47, no. 5, May 2009.
- ③ PC watch, “MIT、Wi-Fi電波で壁の向こうを見通す技術を発表”, [http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20130701\\_605899.html](http://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/20130701_605899.html)

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 21 件)

- ① 小西 順平, 大橋 卓, 山田 寛喜, 丸山 貴司, 平本美智代, 山口 芳雄, “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, 査読無, vol. 117, no. 31, AP2017-29, pp. 37-42, 2017年5月.
- ② S. Ohashi, H. Yamada, Y. Yamaguchi, “On Direction-of-Arrival Estimation with Khatri-Rao Transform Virtual-Array by Using Sparse Signal Reconstruction,” Proc. International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP2016), 査読有, pp. 1016-1017, 2016年10月.
- ③ 大橋 卓, 山田 寛喜・山口 芳雄, “スパース信号処理による Khatri-Rao 変換仮想アレーを用いた到来方向推定に関する基礎検討”, 信学技報, 査読無, vol. 116, no. 142, AP2016-40, pp. 19-24, 2016年7月.
- ④ 山田 寛喜, 大橋 卓・山口 芳雄, “レーダ・アレー信号処理のためのスパース信号処理入門”, 信学技報, 査読無, vol. 116, no. 43, AP2016-23, pp. 39-44, 2016年5月.
- ⑤ S. Umano, H. Yamada, Y. Yamaguchi, “Experimental Study on Parasitic Radar Using Wi-Fi Access Point for Indoor Human Detection,” Proc. 2016 Vietnam-Japan International Symposium on Antennas and Propagation (VJISAP216), 査読有, 2016年3月.
- ⑥ 福島 真也・山田 寛喜・辻 宏之・山口芳雄, “レンジドップラ推定を利用したマルチスタティック FM-CW レーダによる人物位置推定時の虚像抑圧に関する基礎検討”, 信学技報, 査読無, vol. 115, no.

- 450, AP2015-196, pp. 31-36, 2016年2月.
- ⑦ Y. Wakamatsu, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "MIMO Doppler Radar Using Khatri-Rao Product Virtual Array for Indoor Human Detection," IEICE Trans. Communications, 査読有, Vol. E99-B, No. 1, pp. 124-133, Jan. 2016年1月. DOI:10.1587/transcom.2015ISP0029
- ⑧ 馬野 聡士, 山田 寛喜, 山口 芳雄, "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, 査読無, vol. AP2015-61, pp. 1-6, 2015年8月.
- ⑨ 佐藤 耕平, 山田 寛喜, 山口 芳雄, "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, 査読無, vol. 115, no. 79, AP2015-32, pp. 1-6, 2015年6月.
- ⑩ 山田 寛喜, 馬野 聡士, 山口 芳雄, "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, 査読無, vol. 115, no. 12, AP2015-15, pp. 71-75, 2015年4月.
- ⑪ H. Yamada, Y. Wakamatsu, K. Sato, Y. Yamaguchi, "Indoor Human Detection by Using Quasi-MIMO Doppler Radar," International Workshop on Antenna Technology (iWAT2015), 査読有, 2015年3月.
- ⑫ H. Yamada, S. Shirai, and Y. Yamaguchi, "Wideband DOA Estimation Technique for Correlated Sources," Proceedings of the 2014 International Conference on Antennas and Propagation (ISAP2014), 査読有, pp. 27-28, 2014年12月.
- ⑬ S. Fukushima, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Human Motion Estimation For Two Moving Target Using Range-Doppler Filter," Proceedings of the 2014 International Conference on Antennas and Propagation (ISAP2014), 査読有, pp. 173-174, 2014年12月.
- ⑭ Y. Ishiyama, H. Yamada, Y. Cui, Y. Yamaguchi, "Study on Calibration of the Array Antenna Using a Web Camera," Proceedings of 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IEEE iWEM 2014), 査読有, 2014年11月.
- ⑮ S. Fukushima, H. Yamada, H. Kobayashi, Y. Yamaguchi, "Human Motion Estimation Using Range-Doppler Response," Proceedings of 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IEEE iWEM 2014), 査読有, 2014年11月.
- ⑯ Y. Wakamatsu, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "MIMO Doppler Radar Using Khatri-Rao Product Virtual Array for Human Location Estimation," Proceedings of 2014 IEEE International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition (IEEE iWEM 2014), 査読有, 2014年11月.
- ⑰ 若松 洋介, 山田 寛喜・山口 芳雄, "Khatri-Rao 積仮想アレーを用いた MIMO ドップラレーダによる屋内人物位置推定に関する検討", 信学技報, 査読無, vol. AP2014-79, pp. 39-44, 2014年8月.
- ⑱ H. Yamada, S. Shirai, T. Nishimura, Y. Ogawa, T. Ohgane, Y. Yamaguchi, "DOA Estimation of Correlated Wideband Signals by using Multi-band EM Algorithm," Proceedings of 2014 IEEE AP-S/USNC-URSI Symposium, 査読有, pp. 802-805, 2014年7月.
- ⑲ H. Yamada, S. Shirai, Y. Yamaguchi, T. Nishimura, Y. Ogawa, T. Ohgane, "Wideband DOA Estimation Technique for Correlated Sources by using Extended EM Algorithm," Proceedings of the 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2014), 査読有, pp. 51-52, 2014年5月.
- ⑳ Y. Wakamatsu, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Development of MIMO Doppler Radar for Human Motion and Location Estimation," Proceedings of the 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2014), 査読有, pp. 143-144, 2014年5月.
- 21 Y. Ishiyama, H. Yamada, Y. Yamaguchi, "Experimental study on array calibration using a Web camera," Proceedings of the 2014 Asian Workshop on Antennas and Propagation (AWAP2014), 査読有, pp. 151-152, 2014年5月.

[学会発表] (計 9 件)

- ① 大橋 卓, 山田 寛喜, 山口 芳雄, "交互送信疑似 MIMO レーダによる移動ターゲットの DOA 推定誤差に関する検討", 2017年電子情報通信学会総合大会(名城大学, 名古屋市), B-1-170, 2017年3月25日.
- ② 西森 健太郎, 佐藤 健斗, 本間 尚樹, 山田 寛喜, 牧野 秀夫, "MIMO センサによる行動パターン推定の基礎検討", 2016年電子情報通信学会総合大会(九州大学・福岡市), BS-1-13, pp. S26, 2016年3月17日.
- ③ 若松 洋介, 山田 寛喜, 山口 芳雄, "Khatri-Rao 積仮想アレーを用いた MIMO ドップラレーダによる複数の人物を対象とした屋内位置推定に関する検討", 2015年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 2015



年10月3日.

- ④ 福島 真也, 山田 寛喜, 小林 弘一, 山口 芳雄, “レンジ・ドップラレーダを用いた複数の人物の動作検出に関する実験的検討”, 2015年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 2015年10月3日.
- ⑤ 佐藤 耕平, 山田 寛喜, 辻 宏之, 山口 芳雄, “MIMO ドップラレーダを用いた屋内における複数人物のリアルタイム行動追跡に関する実験的検討”, 2015年電子情報通信学会総合大会(立命館大学・びわこ草津キャンパス), BS-1-5, 2015年3月23日.
- ⑥ 石山 優, 山田 寛喜, 山口 芳雄, “KR変換を用いた広帯域DOA推定の分解能特性に関する検討”, 2014年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 4A-2, p.51, 2014年10月4日.
- ⑦ 佐藤 耕平, 山田 寛喜, 山口 芳雄, “屋内における人物の行動追跡に関する実験的検討”, 2014年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 4B-4, p.55, 2014年10月4日.
- ⑧ 若松 洋介, 山田 寛喜, 山口 芳雄, “MIMO ドップラレーダにおけるMUSIC法を用いた屋内人物位置推定”, 2014年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 4D-3, pp.62, 2014年10月4日.
- ⑨ 福島 真也, 山田 寛喜, 小林 弘一, 山口 芳雄, “レンジ・ドップラレーダを用いた人物の動作検出, 抽出に関する実験的検討”, 2014年電子情報通信学会信越支部大会(信州大学工学部・長野市), 4D-4, pp.63, 2014年10月4日.

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 研究分担者

辻 宏之 (TSUJI, Hiroyuki)  
情報通信研究機構・経営企画部企画戦略室・プランニングマネージャー  
研究者番号: 80358952

### (3) 連携研究者

西森 健太郎 (NISHIMORI, Kentaro)  
新潟大学・自然科学系・准教授  
研究者番号: 90500611