

ミリ波レーダによる方位・高さ検出技術の研究開発

Research and Development of Azimuth-Height Detection Technology by Array-Extended Millimeter-Wave Radar

JRCモビリティ株式会社

時枝 幸伸 石村 直敬 毛塚 直哉 西山 拓真
Yukinobu Tokieda Naotaka Ishimura Naoya Kezuka Takuma Nishiyama

要 旨

農業や建設業などに従事する労働者の人口減少を背景として、産業用モビリティ（小型移動機）の自動運転による作業支援や作業自動化の研究が進んでいる。作業支援や自動化を実現するモビリティの環境認知センサとして、分解能が優れたミリ波レーダの活用が期待される反面、高さの情報を検知できないことが活用シーンを拡大するうえでの障害となっている。不整地や構造物が存在する作業現場において、レーダの反射信号（以下、信号）は正面からだけでなく地面や上方からも到来し、正面以外の方向から到来する信号を正面の障害物から到来した信号と区別するためには高さの情報を検出する必要がある。レーダによる方位情報の取得にはアンテナを水平方向に配列するが、高さ情報の取得にはアンテナを垂直方向に配列する必要がある。方位と高さを実用的な角度分解能で検知するためには100素子程度の多数のアンテナが必要となる。このような多数の物理的アンテナを使わずに方位と高さを高い精度で検知することを目的として、当社はアンテナのアレイ拡張技術を開発し、送信用として3個、受信用として6個の実在アンテナのみにより、100素子を超える仮想アンテナを2次元配列することに成功した。この結果、水平方向・高さ方向ともに実用上十分とされる 1.0° 程度の角度検出精度を実現した。本技術はミリ波レーダによる3次元センシングを可能とし、農場、工場、室内におけるモビリティに向けたミリ波レーダの応用シーンを拡大することが期待できる。

Abstract

Research and development for autonomous driving of industrial vehicles (small mobilities) is being advanced for work support or automation, for countermeasures against the population decline of workers engaged in industries such as agriculture and construction. Millimeter-wave radar with excellent resolution is expected to be used for surrounding environment recognition to realize work support or automation; however, the inability of detecting height information obstructs expanding its potential application. In a work site where uneven ground and structures exist, reflected radar signals (signals, hereafter) arrive not only from the front but also from the ground or overhead reflectors which are impossible to be distinguished by conventional radar; therefore, detecting height information is hopeful to solve the problem by distinguishing those signals arriving from different heights. Similar to azimuth detection with a horizontal array of antennas, elevation detection can be realized by a vertical array of antennas. For detecting both azimuth and elevation with practical angular resolution, antennas should be arranged in a two-dimensional array consisting of more than 100 antenna elements. Against such unrealistic requirements, JRC Mobility (JRCM, hereafter) has developed an antenna array extension technology to synthesize a two-dimensional antenna array consisting of more than 100 elements, from only three transmitting antennas and six receiving antennas. As a result, JRCM has achieved 1.0° of angular accuracy for both azimuth and elevation which is sufficient for practical use. Enabling three-dimensional sensing, the novel technology of millimeter-wave radar is expected to expand the applications for farms, factories, offices, etc.

1. まえがき

ミリ波レーダは、小型レーダセンサであり、高い距離分解能や角度を検出できる能力から、省力化に資する産業用モビリティの「眼」としての適用シーン拡大が期待されている⁽¹⁾。高い距離分解能を生かし、構造物が多い農場、工場、室内における活用が期待されるが、従来のミリ波レーダで高さが判別できないことがミリ波レーダの活用シーン拡大における障害になっている。例えば、工場内では天井や柱を構成する鉄骨があらわになっていることが多く、天井の鉄骨フレームからの反射信号が目前にある障害物からの反射信号と同様に検知されることがある。このような場

合、レーダと自動ブレーキを搭載したモビリティは強制的に停止してしまう。また、不整地で走行する農場用モビリティも同様に、地面の凹凸が目の障害物として誤検知されると同様の事態に陥る。このような事態を回避するためには、想定していない高さから到来する不要信号を除去する必要がある。高さ方向の検出が有効である。しかし、方位と高さを検出するためには多数のアンテナを格子状に2次元配置する必要がある。アンテナの規模拡大が避けられない。例えば、当社が開発した周辺監視レーダ⁽³⁾の水平角度分解能を垂直方向にも要求すると、100素子程度のアレイが必要になるため、小型センサの回路規模として非現実的である。この問題を解決するため、当社はMIMOレーダ技術

と新技術であるアレイ拡張技術を組み合わせ、方位と高さの検出に必要とされる規模のアレイアンテナを仮想的に形成した。本稿では、開発したアレイ拡張レーダによる効果検証の成果およびレーダの適用範囲拡大に関するアレイ拡張技術の有効性について報告する。

2. 動作原理

ここではレーダが方位と高さを検出する原理を示し、現実的なミリ波レーダの回路規模で方位と高さを検出するための新技術について説明する。なお、高さ方向に対し、レーダが検出する情報は仰角であるので、以降、高さ検出を「仰角検出」として記す。

2.1 角度検出

方位角や仰角の検出は、配列した複数のアンテナで受信したレーダ信号の位相を比較することにより実現できる。レーダによる方位角検出の原理を図1に示す。本図は、アンテナの正面から右側へ θ の角度をなす方向から到来するレーダ波を受信する様子を示す。レーダ波の到来方向からアンテナに向かって伸びる線分がレーダ波の伝搬路であり、伝搬路と直交する波面(図中の青色線)におけるレーダ波の位相は同一となる。図に示すように、各々のアンテナの位置と波面との距離が異なり、すなわち各アンテナに対するレーダ波の伝搬路長が異なる。隣り合うアンテナ同士の間隔を d としたとき、隣り合うアンテナの各々の位置と波面との距離の差は $d \sin \theta$ であり、両アンテナの位置におけるレーダ波の位相差は $(2\pi d/\lambda) \sin \theta$ となる。レーダは各アンテナによる受信信号の位相を検出し、アンテナ間での位相変化の大きさから方位角 θ を検出する。

また仰角を検出するため、アンテナを垂直方向に配列し、方位角と同様に、アンテナ間の位相変化量の情報を取得する。

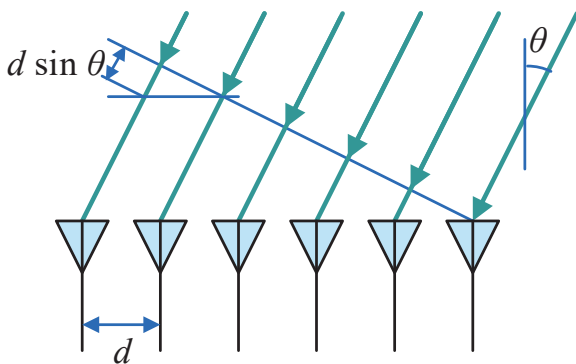


図1 レーダによる角度検出の原理

Fig.1 Principle of angle detection by radar

2.2 仮想アンテナ形成

当社の周辺監視レーダ⁽³⁾と同等の分解能で方位角と仰角を検出するためには、100素子以上(水平方向・垂直方向ともに10素子以上)で構成されるアレイアンテナが必要となるが、大きさが10 cm程度のミリ波レーダにこのような大規

模なアレイアンテナを物理的に配置することはコストや実装面積から現実的ではない。そこで当社は、MIMOレーダ技術とアレイ拡張技術を組み合わせた大規模仮想アレイアンテナを形成することにより、方位角と仰角の検出を実現した。

(1) MIMOレーダ技術

MIMOレーダ技術は、送信アンテナと受信アンテナの位置関係を利用した仮想アンテナ形成技術である。MIMOレーダの実現には、送信源となる送信アンテナごとに受信信号を成分分解する、いわゆる直交分離⁽⁴⁾が必要である。直交分離が実現できれば、受信アンテナを各々の送信アンテナの位置にコピーしたかのように仮想アンテナを形成することができる。MIMO技術による仮想アンテナ形成の概念を図2に示す。仮想アンテナの数は送信アンテナ数と受信アンテナ数の積(図2では $3 \times 6 = 18$)である。ただし、本手法のみでは必要とされる100素子の形成には遠く及ばないため、以下に説明するアレイ拡張技術を併用する。

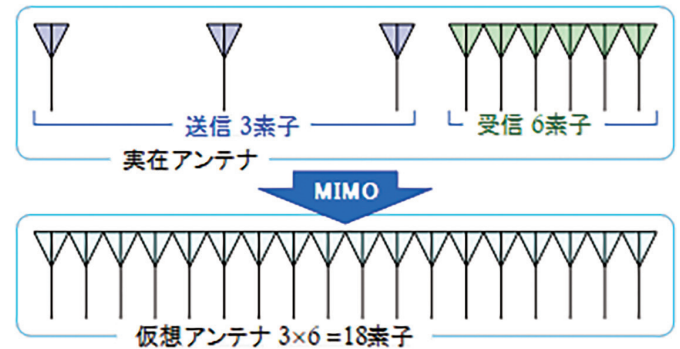


図2 MIMO技術による仮想アンテナ形成

Fig.2 Virtual antenna synthesis by MIMO technology

(2) アレイ拡張技術

アレイ拡張技術は、異なるアンテナが受信する信号の位相差を利用し、仮想アンテナを形成する技術である。受信信号の位相差に基づく仮想アレイ形成の概念を図3に示す。既述した角度検出の原理により、レーダ信号が到来する方位角および仰角が 0° ではない場合にはアンテナの配置により受信信号の位相が異なる。図3において、基準アンテナA0により受信された信号に対しアンテナA1により受信された信号の位相が a だけ進んでおり、かつA1と対称な位置にアンテナA3が存在する場合、A3により受信された信号の位相はA0により受信された信号の位相よりも a だけ遅れる。つまり、A0により受信された信号より位相が a だけ遅れた信号を作れば、仮想アンテナA3により受信される信号となる。同様に、A0とA2の各々により受信された信号の位相差から仮想アンテナA4が形成できる。図3においてA0、A1、A2は実在アンテナであり、A3、A4、A5、A6は形成された仮想アンテナである。

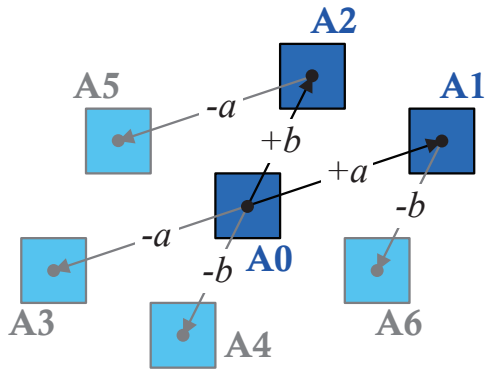


図3 受信信号の位相差に基づく仮想アレイ形成の概念
Fig.3 Concept of virtual array synthesis based on the phase difference of received signals

図3の例では、3素子の実在アンテナから7素子の仮想アンテナを形成しているが、上記の手法においては、実在アンテナの数（素子数）が多いほど高い拡張性が期待できる。具体的には、拡張後に得られる仮想アンテナの数は、実在アンテナ数の二乗である。図3においては3素子の実在アンテナにより9素子の仮想アンテナが形成されるが、重複した位置に配置されるアンテナが存在するため、7素子の仮想アンテナが形成されているとみなすことができる。

当社のアレイ拡張技術は、MIMOレーダが形成した仮想アンテナを実在アンテナとして扱うことにより、大規模なアレイアンテナの形成を可能とする。3素子の送信アンテナと6素子の受信アンテナからMIMOレーダ技術により形成された仮想アンテナは18素子である。これらの仮想アンテナからアレイ拡張技術により形成される仮想アレイアンテナの素子数は、最大で $18^2 = 324$ 素子となる。実際には、サイドローブの低減を目的として、一部の仮想アンテナの位置が重複するように設計しているため、独立したアンテナの数が理論的な上限に達することはないが、MIMOレーダ技術とアレイ拡張技術の連携により100素子を超える仮想アンテナを形成することが可能である。従前の「仮想アンテナの2次元配列」により構成される仮想アレイアンテナに対して、水平および垂直の両方向にデジタルビームフォーミング(DBF)を適用することにより方位角と仰角を検出する。この成果として、実在する3素子の送信アンテナおよび6素子の受信アンテナにより、方位と仰角を検知するために必要な100を超える有効仮想アンテナが形成できる。この実在アンテナの数は、当社製の周辺監視レーダ⁽³⁾のアンテナとおおむね同規模であり、ミリ波帯の現実的な回路規模により方位角と仰角の検知を実現する。

3. アレイ拡張レーダの開発

既述した原理に基づき、方位角と仰角を検出するレーダ(以降、アレイ拡張レーダ)を開発した。ここでは、開発したアレイ拡張レーダの仕様と信号処理について説明する。

3.1 アレイ拡張レーダの仕様

試作したアレイ拡張レーダの外観を図4に、また主な仕様を表1に示す。試作したレーダは、3素子の送信アンテナと6素子の受信アンテナを備え、MIMOレーダ技術とアレイ拡張技術の連携により仮想アンテナを形成する。原理上300素子を超える仮想アンテナが生成できるが、独立した仮想アンテナが130素子程度になるように冗長性が設定されている。このうち、 11×11 の格子状に配置される121素子の仮想アンテナをDBFに使用し、方位角と仰角を検出する。

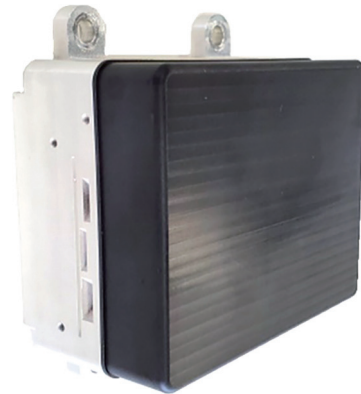


図4 アレイ拡張レーダ外観(試作機)
Fig.4 Array extension radar (prototype)

各アンテナは半波長程度の寸法の放射素子1個による単純な構成とし、広いビーム幅を確保する必要がある。レーダの視野角は、アンテナ1個の指向性で決まり、試作したアンテナのビーム幅(半値角)は $60^\circ (\pm 30^\circ)$ である。これにより、求められる $\pm 45^\circ$ の視野角を確保した。この視野角の範囲を、DBFにより角度分割し、方位角と仰角を検出する。

図4に示したアレイ拡張レーダには、アレイ拡張を実現するためのレーダ送信部とレーダ受信部が実装される。試作したアレイ拡張レーダにより受信した信号を後段のパソコンで解析し、性能を評価した。

表1 アレイ拡張レーダの主要仕様

Table 1 Main specifications of array extension radar

| 項目 | 仕様 |
|-----------|--|
| 周波数 / 帯域幅 | 79 GHz帯 / 最大3.8 GHz |
| レーダ方式 | FMCW方式 |
| 実在アンテナ数 | 送信3素子・受信6素子 |
| 有効仮想アンテナ数 | 121素子(11×11配列) |
| 仮想アレイ形成 | MIMOレーダ + アレイ拡張技術 |
| 検出距離範囲 | 10 m |
| 角度範囲(視野角) | 水平 $\pm 45^\circ$ 垂直 $\pm 45^\circ$ (正面を 0° とする) |
| 角度分解能 | 11° |
| 外形寸法(mm) | 86(W)×63(H)×43(D) |

3.2 レーダ信号処理

アレイ拡張レーダは、距離・速度・方位角・仰角を検出するため、図5に示すように、距離検出、速度検出、アレイ拡張、方位角・仰角検出の順に信号処理を実行する。

本レーダは、6素子の受信アンテナを有し、各々のアンテナが受信した信号は個別に処理される。各々のアンテナにより受信された信号はAD変換された後、個別にフーリエ変換され、障害物までの距離を検出する。この段階で抽出される情報は、距離ごとに異なる速度、方位角、仰角の信号が混在した状態にある。

距離検出の出力信号は速度検出の入力信号となり、速度情報の抽出に用いられる。速度検出は、本レーダが60 μ s間隔でレーダ信号を512回送信していることを利用している。レーダ信号を反射する物体が移動していれば、送信タイミングごとに受信信号の位相が変化するため、この位相変化を評価することにより速度が検出できる。なお、当社のレーダ方式においては、速度検出の際に信号の直交分離が同時に実行され⁽³⁾各々の受信アンテナが得た信号は送信アンテナに対応する3成分の信号に分離される。この結果出力される計18系統の信号がMIMOレーダにおける仮想アンテナの信号である。

形成されたMIMOレーダの仮想アンテナは、既述した原理に基づくアレイ拡張を実行する。アレイ拡張への入力が18系統(18素子分)であり、形成される信号成分は324(=18²)であるが、冗長成分を除いた独立成分の数を130とした。独立成分のうち、正方形の領域に形成された仮想アンテナに対応づけられる受信信号のみが方位角・仰角検出(DBF)へ入力される。その正方形の領域は、仮想アンテナが11 \times 11の格子をなす領域である。DBFはこの領域の仮想アンテナに対応づけられる受信信号を水平方向と垂直方向にフーリエ変換することにより方位角と仰角を検出する。

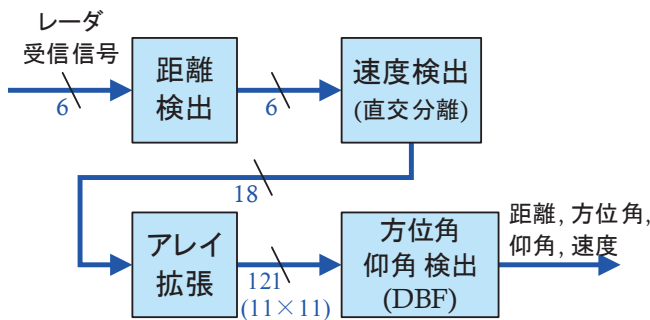


図5 アレイ拡張レーダの信号処理の流れ

Fig.5 Flow of signal processing of array extension radar

4. 評価結果

アレイ拡張レーダによる方位角と仰角の検出精度、およびレーダによる立体視(物体の姿勢検出)の能力について評価した結果、方位角と仰角はともに1.0°の高い精度を満たし、立体視の能力については人間の姿勢認識が可能であることを確認した。

4.1 方位角・仰角の検出精度

角度の検出精度は、レーダから3 mの距離にコーナ反射器を配置し、レーダの向きを変化させることにより評価した。評価結果として、方位角の検出誤差を図6に、仰角の検出誤差を図7に示す。この評価は3回実施し、結果を重ねてプロットした(1回目: n=1, 2回目: n=2, 3回目: n=3)。これらのグラフから、測定結果に再現性があり、角度検出誤差が1°以内に収まっていることが確認できた。これは、距離10 mに存在するターゲットに対し、その横断方向の位置や高さの誤差が17 cm程度以内に収まっていることを意味する。

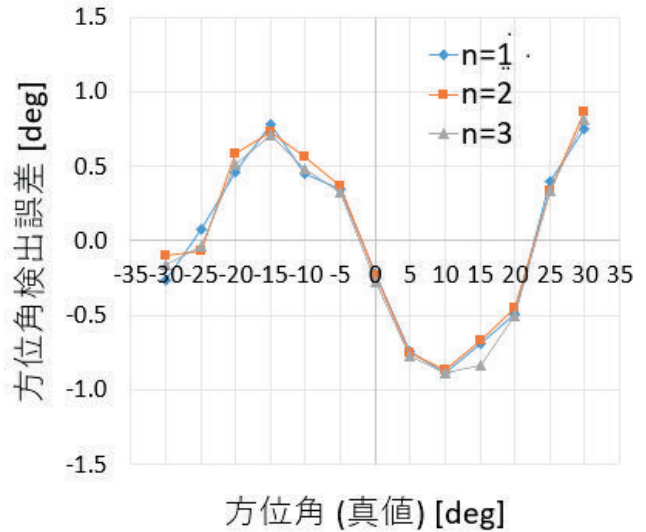


図6 方位角の検出誤差

Fig.6 Detection error of azimuth

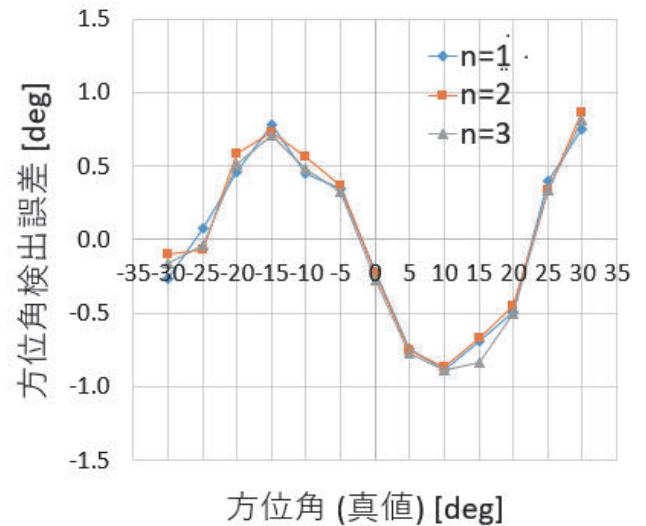


図7 仰角の検出誤差

Fig.7 Detection error of elevation

アレイ拡張レーダの正面3 mの距離で仰角10°の方向に配置したコーナ反射器を用いて観測した仰角スペクトルを図8に示す。図において、第1サイドローブの大きさは、メインローブに対し-14 dBであった。これは一様分布のアンテナと同程度のサイドローブレベルであり、仮想アレイアンテナによる指向性としては良好なスペクトルと言える。メイ

ンローブの半値角は17°であり、アンテナ開口面積から予測される分解能(11°)より大きい。これはサイドローブを抑圧するためにDBFで使用した窓関数による。半値角 $\Delta\theta_h$ に対し、測角誤差 $\delta\theta$ は、信号対雑音電力比をS/Nとすると

$$\delta\theta = \frac{\Delta\theta_h}{1.61\sqrt{2(S/N)}}$$

で与えられることから、本評価のように20 dB以上のS/Nが確保できていれば、測角誤差が1°未満となることが算出される。この算出結果は図7に示した評価結果と合致する。

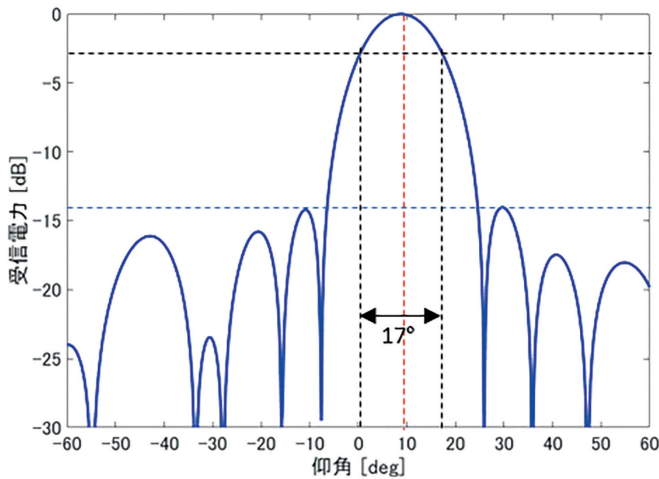


図8 アレイ拡張レーダにより観測した仰角スペクトル (反射器 正面, 距離3 m, 仰角10°)

Fig.8 Elevation angle spectrum observed by the array extension radar (front target 3 m of direction, 10° of elevation)

4.2 立体視 (物体の姿勢検出) の能力

方位角と仰角を検出する能力を利用した立体視の可能性を確認するため、開発したレーダを用いて3 m離れた位置に存在する人物の姿勢を観測した。高さ検出の能力を評価するため、人物のそばの地面に金属製の強反射体を配置し、人物の大まかな姿勢をレーダ映像により確認することに成功した。レーダにより観測された人物の映像を図9および図10に示す。図に示されるように、地面に配置した強反射体による反射信号が高さ0 mのライン上において観測され、人物による反射信号が有意の高さにおいて観測された。図9と図10を比較すると、人物の姿勢に応じて反射信号が観測される高さに変化している様子が確認できる。既述した角度の検出誤差は、この観測における人物までの距離に対し5 cm以内に相当し、レーダにより観測された映像が示す検出能力は、予測された角度精度とおおむね合致している。

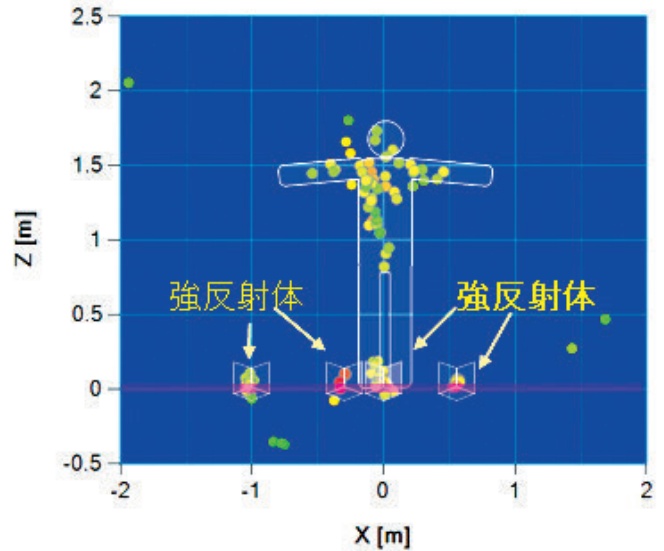


図9 レーダにより観測された人物 (両手を広げて立っている)

Fig.9 Person observed by radar (standing with outstretched both arms)

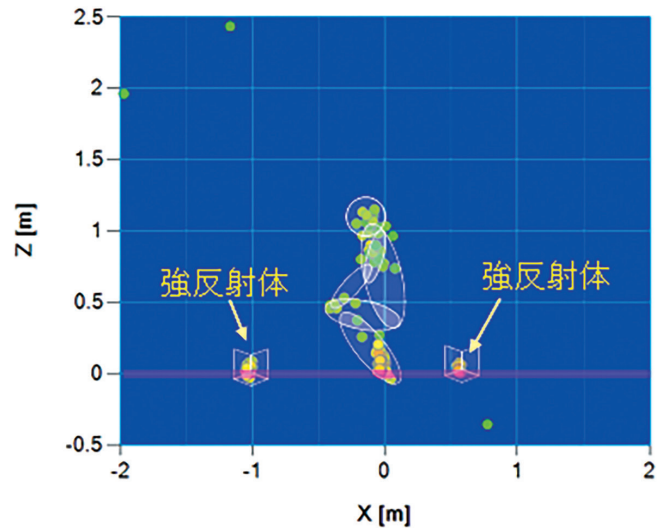


図10 レーダにより観測された人物 (中腰姿勢)

Fig.10 Person observed by radar (half-sitting posture)

5. あとがき

MIMOレーダ技術とアレイ拡張技術の組み合わせにより、3素子の送信アンテナおよび6素子の受信アンテナで構成される一般的なミリ波レーダの回路規模でありながら、方位角と仰角を検出するうえで必要とされる100素子超の仮想アンテナの形成に成功し、方位角と仰角の高精度の検出および人物の姿勢の立体視を具現化した。

本技術の実用化における課題は、信号処理の高速化をふまえた演算の負荷低減であり、具体的には、小型レーダ装置に実装するプロセッサによりアレイ拡張を実行するうえで求められる信号処理の負荷およびメモリ使用量の低減である。また、最新の信号処理プロセッサとして、フーリエ変

換アクセラレータを搭載したレーダ専用のDSPがあり、このような最新デバイスを活用するためのノウハウの獲得も重要な課題である。本技術によりミリ波レーダが仰角（高さ）の検出能力を獲得し、多種多様な構造物が共存する環境下においてミリ波レーダを広く活用することが可能となる。また、立体視の能力およびレーダによるドップラ情報をAIで識別する技術⁽²⁾により、構造物と人物の判別が可能となり、災害現場や火災現場における救援ロボットの「眼」としてアレイ拡張レーダの活躍が期待される。

特許出願 6件（うち4件は登録済み）

参考文献

- (1) “令和2年版 交通政策白書,” 国土交通省, pp. 175-186, (2020)
- (2) 時枝, 星, “ミリ波レーダを用いた物標識別の検討,” シーエムシー出版, 自動運転・運転支援の実現に向けたセンサ開発 第10章, ISBN 978-4-7813-1498-3, pp. 99-108 (2020)
- (3) 時枝, et al., “モビリティ向け周辺監視レーダの開発,” 日本無線技報 第73号, pp.74-79 (2022)
- (4) J. Li, P. Stoica, “MIMO Radar Signal Processing,” Wiley, ISBN 978-0-470-17898-0, pp. 153-155 (2009)

用語一覧

FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave
(線形周波数変調を利用したレーダ方式)

DBF: Digital Beam-Forming
(デジタルビームフォーミング: デジタル信号処理によりアンテナのパターンを形成する技術)

MIMO Radar: Multiple-Input Multiple-Output Radar
(仮想アレイを利用した電子走査アンテナを有するレーダ)

DSP: Digital Signal Processing (デジタル信号処理)