

# モビリティ向け周辺監視レーダの開発

## Development of Surround-Monitoring Radar for Mobility

JRCモビリティ株式会社

時 枝 幸 伸      津 田 和 俊      星    将 広      矢 野 邦 哲  
Yukinobu Tokieda    Kazutoshi Tsuda    Masahiro Hoshi    Kuniaki Yano

### 要 旨

農場や工場での省力化の手段として、また、山間部での移動手段として小型車両（以下モビリティ）の自動走行の実現が期待されている。モビリティの自動走行の実現に対して、ミリ波レーダは高精度で距離を検知することができ、瞬時に広い角度範囲を見渡せることから、環境認知センサとして期待される。ミリ波レーダは、距離、方位角および瞬時速度の検出が可能で、衝突危険性の検知に適したセンサである。さらに、屋外において逆光や降雨の影響を受けるカメラやLidarと異なり、周囲光や天候の影響を受けにくいことが長所である。モビリティ向けの環境認知センサとして、当社は79 GHz帯の周辺監視レーダを開発した。周辺監視レーダは、Multiple-Input Multiple-Output（以下MIMO）方式およびデジタルビームフォーミング（以下DBF）による方位角検出、79 GHz帯の利用による高い距離精度および速度精度により環境認知を実現する。モビリティ向け環境認知用センサとしてのレーダ機能について、果樹が整列する農場で果樹列に挟まれた狭い通路を利用した評価実験を実施し、典型的なモビリティの走行環境において、周辺監視レーダが通路や人物の検知に十分な能力を有することを確認できた。その評価結果から、当社の周辺監視レーダはモビリティの環境認知への貢献が期待できる。

### Abstract

Autonomous driving for small vehicles (mobility) is expected to be realized for labor-saving in farms, factories, etc., as well as for transportation in mountainous areas. As for autonomous driving for mobility, millimeter-wave radar is expected as an environmental recognition sensor because of its ability of detecting the distance with high accuracy and of monitoring wide angular range instantly. Millimeter-wave radar is suitable for detection collision hazards because of its measurement capability of distance, azimuth, and instantaneous speed. Advantageously, the radar is hardly disturbed by ambient light and weather conditions, unlike cameras and lidar easily affected by backlight and rainfall outdoors. For an environmental recognition sensor for mobility, JRC Mobility has developed a surround-monitoring radar on the 79 GHz band. The radar realizes environmental recognition by azimuth detection with multiple-input multiple-output (MIMO) technology, digital beamforming (DBF), and by high accuracy of distance and speed due to 79 GHz band. Regarding the radar function as an environmental recognition sensor for mobility, JRC Mobility conducted an experiment in a farm field with rows of fruit trees including narrow passages in between. Throughout the experiment of detecting passages and persons, sufficient capability has been confirmed in the typical evaluation condition for mobility use. Based on the evaluation results, the surround-monitoring radar is expected to contribute to environmental recognition for mobility.

## 1. まえがき

センシング技術の進展により「移動」のあり方が大きく変わろうとしている。例えば、過疎地の交通手段としてモビリティを活用することが検討され、一部では自動運転も視野に入れ、各地で実証実験が実施されている<sup>(1)</sup>。さらに、農場や工場においても、無人モビリティによる省力化の研究が進んでいる。無人の自動走行（自動運転）の実現に向け、レーダは周囲の衝突危険を検知するセンサ、いわゆる、環境認知センサとしての有効性が期待されている。

環境認知は自動運転<sup>(2)</sup>の構成要素である「認知」「判断」「制御」における「認知」に該当し、いわば人間の目にあたる重要な機能である。環境認知においてミリ波レーダが期待される理由として、1台のセンサで距離、方位角、速度の全てが検出できる点が挙げられる。距離と方位角の検知により物標の正確な現在位置が、また距離と速度の検知により衝突の危険性が判断できることから、ミリ波レーダはモビリティ向けの環境認知に適している。

狭路や混雑環境を走行するモビリティへ適用するため、周辺監視レーダには 密集する構造物や壁際にいる人物を正確に検知する能力が求められる。この要求を満たすためには、距離や速度の高精度な検出性能、および狭い空間内における複数物標の正確な検知性能が必要である。当社は、これらの性能要件を満たす周辺監視レーダを開発した。本稿では、当社が保有する周辺監視レーダの技術説明、および農場で実施した評価実験の結果を紹介し、モビリティ向け環境認知における当社の周辺監視レーダの有効性について報告する。

## 2. 周辺監視レーダの技術説明

当社が開発した周辺監視レーダは、MIMO方式およびDBFの採用により、アンテナの方向を機械的に変化させることなく広い角度範囲を監視できるミリ波レーダである。本レーダは79 GHz帯における広い周波数帯域の電波を活用し、高い距離分解能を実現できるため、物標が密集した近

距離の監視に適している。また、使用する電波の波長が非常に短いため、図1に示すような手のひらに乗るサイズを実現した。



図1 周辺監視レーダ

Fig.1 Surround-monitoring radar

本レーダは、低速で移動するモビリティへの適用を想定し、近距離における広い視野角の領域を細かく監視することを目的として設計している。方位角は、3個の送信アンテナと4個の受信アンテナを使用したMIMO方式により検出する。本レーダは物標の相対速度を検出できるため、大きな構造物の近傍をゆっくり歩く人物の検知も可能である。本レーダの主な仕様を表1に示す。

表1 周辺監視レーダの主な仕様

Table. 1 Main specifications of surround-monitoring radar

項目	仕様
周波数 / 帯域幅	79 GHz帯 / 最大3.5 GHz
レーダ方式	FMCW方式
方位角検出方式	符号化MIMO方式 + DBF
アンテナ数	送信3個・受信4個
監視距離範囲	最大20 m
相対速度検出範囲	0 ~ 30 km/h (前進および後退)
検知角度範囲	±60度 (正面を0度とする)
データ出力間隔	100 ms
外形寸法	100(W)×90(H)×27(D) mm
質量	230 g

### 2.1 レーダ信号処理

本レーダが検出する情報には「距離」「速度」「方位角」があり、モビリティにおいては、距離情報と速度情報を衝突危険性の判断に、また、距離情報と方位角情報を物標の現在位置の特定に用いる。

周辺監視レーダの信号処理は図2に示す順に実行される。本レーダはFMCW方式を採用し、送信信号と受信信号の周

波数の差により物標までの距離を検出する。距離を検出した際に、波長より小さい微小距離に対応する位相情報が取り出される。取り出された位相情報を用いて移動速度を検出する。速度検出後、複数のアンテナにより受信された信号が集められ、DBFにより方位角を検出する。

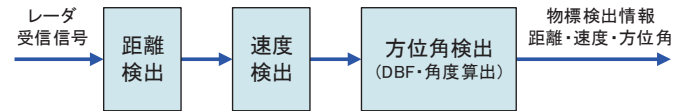


図2 周辺監視レーダにおける信号処理の流れ

Fig.2 Signal processing flow of surround-monitoring radar

### 2.2 速度検出

本レーダは1回の検知動作において512回のレーダ信号を送受信する。物標が動いている場合、信号の送受信が繰り返される間に物標までの距離がわずかに変化するため、受信信号の位相が変化する。本レーダは、送受信の繰返し間隔における受信信号の位相変化を算出し、物標の相対速度を検出する。本レーダが512回のレーダ信号を送受信する時間(速度検出に要する時間)は約47 msである。速度検出に要する時間を  $T$  とすれば、検出できる速度の分解能は、 $\Delta v = c/2f_0 T$  ( $c$  は電波の伝搬速度、 $f_0$  は周波数) となり、本レーダが0.15 km/hの分解能で速度を検出できることが示される。この分解能は人間の歩行速度よりも十分に小さいため、わずかな人の動きも検出することが可能である。一例として、構造物の傍らにいる人の手足に動きがあれば、その人物を検出することができる。

### 2.3 方位角検出

DBFによる方位角の検出能力はアンテナの数によって決定されるため、一般的に高精度な方位角検出には多数のアンテナが必要となる。本レーダは、MIMO方式によって多数のアンテナを使用した場合と同等の性能を実現する。MIMO方式は、送信アンテナと受信アンテナの位置関係を利用し、信号処理により仮想的にアンテナ数を増やすレーダ方式である。信号処理が仮想的に生成した仮想アンテナ素子により構成されるアレイアンテナ(仮想アレイアンテナ)が受信した信号は、DBFにより角度成分に変換され、これらの角度成分を評価することによって物標の方位角が決定される。

本レーダのMIMO方式は、図3に示すように、疎らに配置された3個の送信アンテナと、密に配置された4個の受信アンテナを用いる。受信アンテナにおいて受信されたレーダ信号は、直交分離処理<sup>(3)(4)</sup>により、送信アンテナに対応する信号成分に分離される。分離された信号を並べることにより、半波長間隔で置かれたアンテナの配列と等価な信号列(仮想アレイアンテナ)が形成される。一般的に、送信アンテナの数が  $N$  個、受信アンテナの数が  $M$  個の場合、MIMO方式により形成される仮想アンテナの数はこれらの積である  $NM$  個となり、実在するアンテナよりも多くの素子

で構成されるアレイアンテナを形成する効果がある。送信アンテナが3個、受信アンテナが4個の本レーダは、12個のアンテナで構成される仮想アレイアンテナを形成する。なお、本レーダにおけるMIMO方式の実現方法はミリ波レーダの主流であるFMCW方式との相性が良く、また上述した速度検出と同時に仮想アレイアンテナを形成できるという利点を有する。

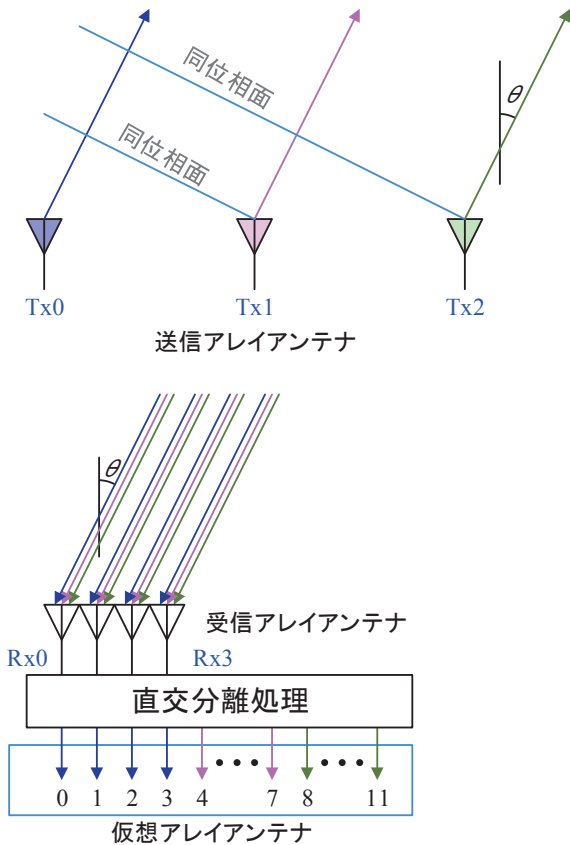


図3 MIMO方式による仮想アレイアンテナの形成

Fig.3 Synthesis of virtual array antenna by MIMO radar technology

方位角検出は、仮想アレイアンテナが受信した信号をDBFにより離散的な方位角に対応した信号に分離することから始まる。本レーダでは、DBFで分離される方位角は正面付近で10度程度で分解されている。このような粗い方位角を補間することによって物標の方位角を正確に算出することができる。例えば、物標からの反射信号が20 dBのS/Nであった場合、算出される角度は1度以内の精度となり、物標の正確な方位を特定することができる。

### 2.4 モビリティの環境認知への適用

周辺監視レーダを用いたモビリティの環境認知システムは図4のように構成される。モビリティには前後にレーダが搭載され、レーダが検知した物標の反射点情報が環境認知処理部で統合される。統合の際、クラッタ除去、クラスタリング、物標識別などの処理が実行され、その処理結果が環境認知結果情報として判断部へ伝送される。伝送された環境認知情報は、判断部が操舵/加速/減速の判断に用いる。

判断結果は制御部に送られ、自動走行を実現する。

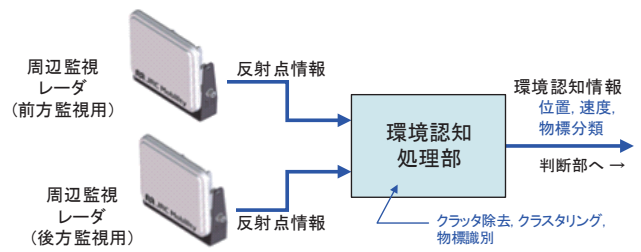


図4 周辺監視レーダを用いたモビリティの環境認知システム

Fig.4 Environmental recognition system for mobility using surround-monitoring radar

## 3. 評価結果

小型モビリティへの適用を想定し、果樹列に挟まれた狭路を有するブドウ農場において探知性能を評価する実験を、長野県高山村の佐藤農園殿の協力のもとで実施した。農場には2.5 m間隔で果樹列が並び、枝や葉の間の通路は約2 mの幅である。各果樹列における植樹間隔は0.8 mである。地面には高さ10 cm程度の草が生えている。

果樹列間の通路において周辺監視レーダを搭載した台車を手押しで移動しながら、レーダが通路や人物を検知する性能を評価した。この台車をレーダが装備されるモビリティであると想定し、地上高0.6 mの前面に周辺監視レーダを設置した。評価実験を実施した農場の様子を図5に、評価実験環境のイメージを図6に示す。本評価実験では、果樹列の外からの通路間口の検知性能を、果樹列間の通路内においては果樹や人物の検知性能を評価した。さらに、地面からのレーダ反射(クラッタ)を観測した。なお、周辺監視レーダの帯域幅設定は2 GHzとした。



図5 評価実験を実施した農場  
Fig.5 Experimental farm field

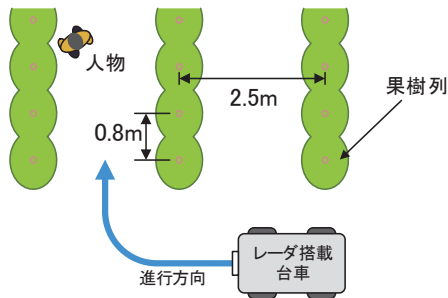


図6 評価実験環境のイメージ

Fig.6 Illustration of experimental farm field

### 3.1 通路間口の検知

周辺監視レーダを搭載した台車から見た農場の様子を図7に示す。また、周辺監視レーダを搭載した台車が果樹列の外から通路間口に向かって手押し旋回している時にレーダが検知した出力データを図8に示す。図8において、複数の果樹列および幅が約2 mの通路間口が正確に検知されている様子が示されている。なお、図中の反射点の色は受信電力レベルを示し、色が濃くなるほど受信電力が大きいことを示す。また、レーダから見て左右60度を超える灰色の網掛け部分は広角領域(監視対象外の領域)を示す。このデータは、周辺監視レーダが通路間口を正確に検知できることを示し、モビリティが自律的に通路に進入するために重要な能力を有することを意味する。



図7 旋回中の台車から見た果樹列の様子

Fig.7 Rows of fruit trees observed from the cart while turning

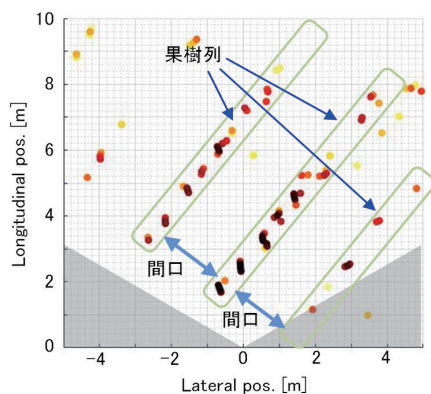


図8 果樹列の外においてレーダが検知した通路間口の出力データ

Fig.8 Radar data of opening of passages detected from outside rows of trees

### 3.2 果樹列および人物の検知

レーダが果樹列間の通路内にある状態では、レーダは通路を正確に捉えることができた。従来技術である位相モノパルス方式を用いると、このような状況では左右の果樹の反射信号による像が互いに重なり、その中央に偽像が発生しやすくなるが、本レーダはDBFの効果により偽像の発生がなく、果樹列間の通路を正確に捉えている。

人物検知評価実験の様子を図9に示す。また、この状況においてレーダが検知した出力データを図10に示す。レーダからの距離が7 m程度までの範囲では、果樹列とその間の通路が明確に識別されている。果樹の脇に立つ人物は、図10の矢印で示すとおり、受信電力が大きな複数の反射点として検知されている。なお、レーダから7 m程度までの範囲を超える領域において通路が塞がっているように見える部分は、レーダの電波が地面で反射することによるクラッタが検知されているものである。クラッタの除去については第3.3節で説明する。



図9 人物検知評価実験の様子

Fig.9 Human target of detection in the experiment

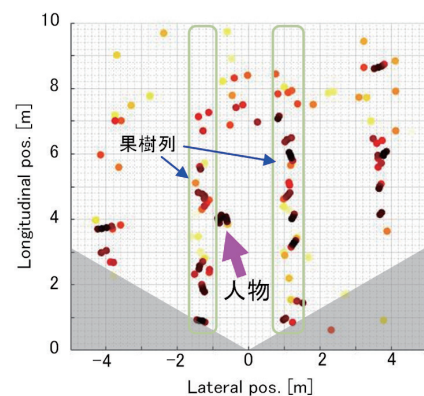


図10 レーダが検知した果樹列間の通路と人物の出力データ

Fig.10 Radar data of passages and person between rows of trees

レーダが検出する速度情報により、人物を明確に検知することができる。通路を歩行する人物の検知評価実験の様子を図11に示す。さらに、この状況でレーダが速度情報により検知した移動体(人物)の出力データを図12に示す。

図12において、移動していない（速度ゼロの）物標における反射点を灰色で表示している。図に示すとおり、人物のみが4 km/h程度の速度で移動する物体として観測され、静止体（果樹列）と識別されている。本レーダの速度検出の分解能は0.15 km/hであり、わずかな動きでも検知することが可能である。距離と速度の両者を検出できる本レーダは、モビリティにおける衝突危険性の判定に有効である。



図11 通路を歩行する人物の検知評価実験の様子  
Fig.11 Human target of detection walking in the passage

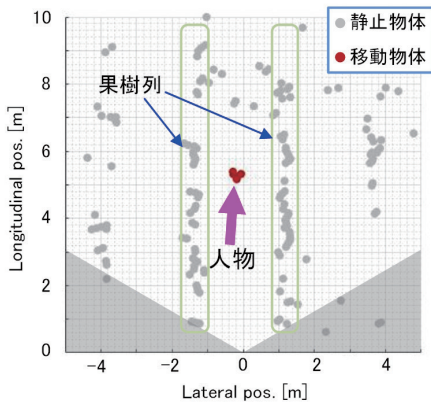


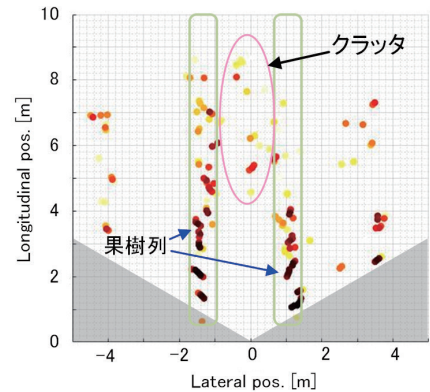
図12 速度情報により検出した移動体（人物）の出力データ  
Fig.12 Radar data of a moving object (person) detected by speed information

### 3.3 クラッタ除去

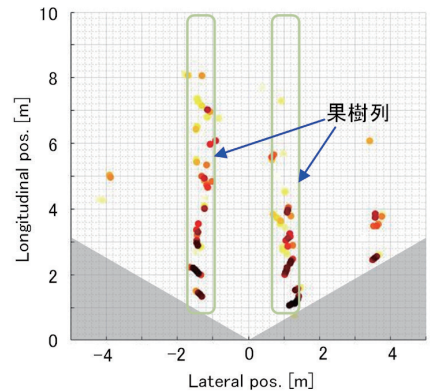
図12において、レーダから7 m程度までの範囲を超える領域では、レーダの電波が地面で反射することに起因するクラッタが検知されている。クラッタは正確な物標検知の妨げとなるため除去する必要がある。クラッタは図4に示す上位の環境認知処理部にて除去される。本実験では、環境認知処理部におけるクラッタの除去を試行し、評価した。

クラッタの除去には追尾フィルタを用いた。追尾フィルタは、100 ms間隔で出力されるレーダ信号を複数用い、距離と速度の観測データを平滑化する過程でクラッタを判別し除去する。距離と速度の観測データは、 $\alpha$ - $\beta$ フィルタを用いて平滑化した。図13に示すように、追尾フィルタを適用した結果、クラッタは除去され、果樹列が明確に検知され

ている。農場のように地面に凹凸がある場合には地面からの反射信号が強く、クラッタが現れやすいが、上述の方法によりクラッタの除去が可能であることを確認した。



(a) クラッタ除去前のレーダ出力データ  
(a) Radar data before clutter removal



(b) クラッタ除去後のレーダ出力データ  
(b) Radar data after clutter removal

図13 追尾フィルタによるクラッタ除去効果  
Fig.13 Effect of clutter removal by target tracking filter

## 4. あとがき

本稿では、当社が開発した周辺監視レーダが、高い距離分解能力および方位角検出能力により物標の位置を正確に特定できることを示した。第3節で示した実験環境のように、レーダ電波を反射する物標が周囲に多数存在し、かつ狭い場所であっても、周辺監視レーダが環境認知の機能を有効に果たすことを確認した。特に着目すべき点は、通路の両側に果樹が植えられている状況下で通路を確実に識別できる点であり、これは同一距離の地点に複数の物標が存在しても正しい測角ができるDBFの効果である。また、速度情報を用いることにより、レーダ電波を反射する物標が周囲に多数存在するような環境でも移動体を明確に識別できるため、モビリティの衝突危険性の判定に有効である。以上の評価実験結果により、周辺監視レーダが、様々な分野においてモビリティの「目」として機能することが大いに期待できる。

今後、様々なフィールドで評価を重ね、さらに広範な条件下において信号処理パラメータの最適設定を可能とすることが課題である。本レーダは、建設機械のような高速旋回するモビリティへの適用も想定している。この場合、本稿で示した追尾フィルタによるクラッタ除去に加え、高速旋回時のクラッタ除去と物標検知を両立させる必要がある。追尾フィルタの性能改善を図り、周辺監視レーダの適用範囲を拡大することが今後の重要な課題である。

当社が開発した周辺監視レーダは高分解能で速度情報を抽出できるため、車両や構造物と人物との識別<sup>(3)</sup>、速度情報に基づく危険度の検知への応用が可能である。さらに、侵入者検知などのセキュリティ分野への応用も大いに期待できる。

特許出願 4件 (うち1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) 児島, et al., “自動運転の高度化を支える知能化技術,” 日立評論, Vol. 99, No. 05, pp. 504-505 (2017)
- (3) 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)
- (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方式: 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)

MIMO方式: Multiple-Input Multiple-Output  
(方位角検出のため仮想アレイアンテナを形成するレーダ方式)

位相モノパルス方式  
(2個のアンテナで受信された信号の位相差から到来方向を推定する測角方式)

クラッタ  
(地面など、探知対象外の物体からの不要なレーダ反射信号)

クラスタリング  
(人物や車両など個別の物標に対応する複数の反射点情報をまとめる信号処理)