

# ミリ波レーダと可視カメラを用いた 建機周辺監視システムに関する検討

畑本浩伸\* 八十岡興祐\*\* 飛鳥馬翼\* 竹下嘉人\*

本稿では、ミリ波レーダと車載カメラを用いたセンサフュージョンによって建機周辺の歩行者等を認識可能な周辺監視システムを想定した実験に関して報告する。ミリ波レーダは車両の安全や自動運転を実現するためのキーデバイスであり、他のセンサと比較して霧や降雨、降雪、外乱光などの環境条件の影響を受けにくい利点がある。加えて、車載カメラは人間が肉眼で見ている画像を取得し、デジタル信号処理を行うことで人、車、障害物を検知することができる。

実験は2020年2月と2021年8月に技術研究所の屋外実験ヤードで実施された。特に2020年2月の実験結果では、静止した建機近くに人がいる場合や、建機が旋回している際に人が近くで静止している場合において、周辺検知が可能であることを確認した。

キーワード：ミリ波レーダ、車載カメラ、センサフュージョン、FMCW

## 1. はじめに

近年、建設業界における労働災害は減少傾向にあるものの、国土交通省の『安全啓発リーフレット』（令和3年度版）における重機事故のデータ分析<sup>1)</sup>によると、バックホウ等の土木用重機と作業員との接触は令和元年度において43件中23件(53.5%)と、発生率が高い。事故の中で被災者と重機の位置関係に注目すると、重機の前方で重機に背を向けて作業している場合が27.3%、重機の前方で重機の方に向けて作業している場合でも22.7%となっている。合図・確認の不徹底や誤動作が事故の原因とされているが、事故の発生率を低減するためには人間による注意喚起だけでなく、カメラ、ミリ波レーダ、LiDAR (Light Detection And Ranging)、超音波センサ等のセンサを用いたICT技術による接触防止システムの構築と、現場への導入が求められる。

現状、有力な監視センサとしてカメラが利用されるケースが多い。車載カメラは人間が肉眼で見ている画像を取得し、デジタル信号処理を行うことで人、車、障害物を検知できる。しかしながら、人がしゃがんで認知不可能な状態や砂埃などの視界不良の環境では誤検知が発生する。

ミリ波レーダ<sup>2)~10)</sup>は車両の安全や自動運転を実現するためのキーデバイスであり、他のセンサと比較して霧や降雨、降雪、外乱光などの環境条件の影響を受けにくい利点がある。自動車の安全運転支援システムに注目すると、カメラのほかにミリ波レーダが使用されている。ミリ波レーダの開発は1970年代に始まっており、1990年代後半

には自動車のクルーズコントロール (ACC : Adaptive Cruise Control) として実用化され、自車線上の前方車との距離と相対速度を測定し、車間距離を一定として追従走向が可能となっている。

ミリ波レーダとカメラの特長に着目すると、ミリ波レーダが苦手とする物体認識はカメラが得意であり、速度や距離の検知はミリ波レーダの方が得意となる。ミリ波は発泡スチロールなどの反射率の低い物体は検知困難であり、複数人が並んでいる場合も検出点が1つとなる場合がある。ミリ波レーダとカメラの特長は大きくオーバーラップしておらず、両者の弱点を補うことができ、複数のセンサからの情報を統合して利用するセンサフュージョンの考えに適している。

我々は将来の建機事故低減を目的として、2020年2月及び、2021年8月に三菱電機製のミリ波レーダとカメラをバックホウの後方に設置し、技術研究所の屋外実験ヤードにおいてミリ波レーダの評価試験を実施した。そして、ミリ波レーダとカメラの両方のセンサを使用した場合の検知性能を検証した。

2章においてミリ波レーダのモジュール構成及び原理を述べ、次の3章においてミリ波レーダとカメラのセンサフュージョンについて述べる。4章において実験結果について述べた後、5章において結論と今後の方向性を述べる。

## 2. ミリ波レーダ

### 2.1 モジュール構成

ミリ波レーダモジュールはアンテナ、送受信回路及び、送受信回路の制御と信号処理を扱うMCU (Micro Control Unit) で構成される。Fig.1に、ミリ波レーダモジュールのブロック図を示す。送受信回路のVCO (Voltage

\* 土木事業本部 ICT推進室

\*\* 三菱電機株式会社 鎌倉製作所 MD製造部  
ミリ波技術課

Controlled Oscillator) から発振された 77GHz の高周波信号はパワーアンプ (Power Amplifier) を通じてアンテナから送信され、人間等のターゲットにて反射した信号がアンテナで受信される。受信信号と送信信号がミキサー (Mixer) によって掛け合わされた後、低雑音増幅器 (LNA: Low Noise Amplifier) を経由し、アナログ信号がデジタル信号へ AD 変換され、ターゲット検知のためのデジタル信号処理が実行される。

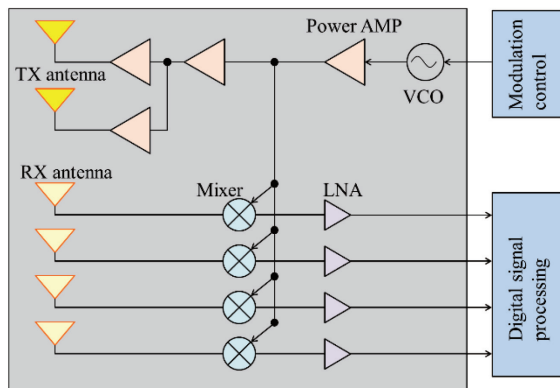


Fig. 1 ミリ波レーダモジュールのブロック図

## 2. 2 原理

ミリ波レーダには電波の伝搬時間により距離計測を行うパルス方式、三角変調した送信波と受信波のミキシングにより速度と距離を計測する FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式、2つの CW 波によるドップラー波の位相差から距離測定を行う 2 周波 CW 方式、PN (Pseudo Noise) 符号の拡散変調によって距離計測を行うスペクトラム拡散方式がある<sup>10)</sup>。

今回の実験では FMCW 方式を用いたモジュールを利用した。FMCW 方式は主に簡便なハードウェア構成で距離の高分解能化や低消費電力化が容易である。また、送受信回路が簡素にできるため、小型化・低価格化が可能となる。他のパルス方式の場合は測位精度 (距離分解能) を上げるためにはパルス幅を狭くする必要があり、超高速の AD 変換器が必要になる。また狭いパルス幅で検知距離を確保するためには送信電力を上げる必要がある。

FMCW 方式の原理について説明する。Fig. 2 に、ミリ波レーダの変調波形を示す。同図より、ミリ波レーダの送信周波数は時間と共に変化しており、高速チャープで変調している。ミキサーを通じて得られる送信波と受信波の周波数の差分をデジタル信号に変換し、FFT (Fast Fourier Transform) 演算することにより、ビート周波数が得られる。ビート周波数はターゲットとの距離に相関があり、ターゲットまでの距離が長いほど受信するまでの時間を要するため、ビート周波数は大きくなる。また、図中に示す 1~256 の各フレームの位相を算出し、位相変化量からターゲットとの相対速度が算出される。複数の反射物環境下でも短時間に正確な計測が可能である。FMCW は周波数シフト量から速度計測をしているが、そのシフト量は非

常に小さいため (送信周波数 77GHz に対して、1km/h あたり約 140Hz 増加)、全体の周波数帯域や変調特性が大きく変わらない。

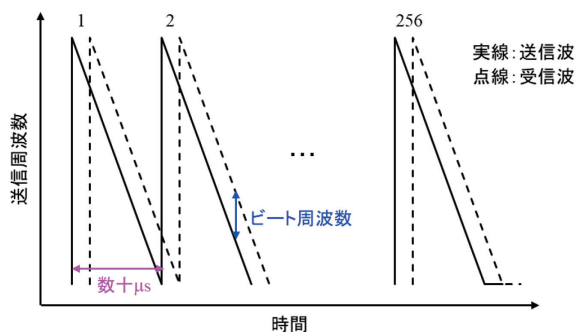


Fig. 2 ミリ波レーダの変調波形

## 2. 3 ミリ波レーダの特長

### 2. 3. 1 各センサとの比較

Table 1 に、ミリ波とカメラと LiDAR の特長を示す。同表より、ミリ波の分解能性能は他センサよりも劣るが、速度の即時検出性能が優れている。搬送周波数は 77GHz であり、セルラー通信で使用される電波よりも直進性が強く、250m 先の自動車を検出する評価結果が得られており、カメラよりも距離検出が優れている。また、カメラや LiDAR と比較して、ミリ波は降雨や降雪時の悪天候下や砂埃の視界不良の環境でも検出が可能であり、耐環境性に優れている。また、トンネル出入り口等の照度が急激に変化する環境や夜間でも明るさに左右されずターゲットを検出することが可能である。77GHz 帯は車載レーダ用に世界的に広く普及しているため、汎用部品の流用や車載ミリ波レーダ技術を応用することで建設現場への使用を容易にできる。コストに関しては、ミリ波レーダは LiDAR よりも低価格で導入しやすい。

Table 1 各センサの特長

項目	ミリ波	カメラ	LiDAR
速度 (自動追尾)	◎	○	○
距離	◎	○	◎
分解能 (物体認識)	×	◎	○
降雨 (耐環境)	◎	○	○
夜間 (耐環境)	◎	○	◎
サイズ	◎	○	×
コスト	○	○	×

### 2. 3. 2 ミリ波レーダによる人識別方法

FMCW 方式のミリ波レーダはターゲットまでの距離を正確に測定できるだけでなく、同時に相対速度を検出することも可能である。この相対速度情報を利用することにより、周囲の静止物と比較して人を識別できる。

Fig. 3 に、人が 5m の位置で手を動かしている時の実験

結果を示す。X軸は相対速度、Y軸はレーダからの距離を示し、ミリ波信号の反射強度が高い物体は赤や黄色の表示となる。周囲の壁や地面などは静止物であるので相対速度 0m/s における反射強度は高くなり赤や黄色となる。同図では、距離 5m の位置に相対速度がある物体を判別できる。この物体は相対速度が 0~-1.5m/s まで速度方向に広がりを持っている。仮にこの物体が定速の自動車であれば相対速度は広がることなく 2m/s などの 1 か所だけが集中的に検出される。速度方向に広がりが発生している理由として、人が歩く時は進行方向の速度成分以外に手や足の動きによる異なる速度成分が数多く発生することが挙げられる。つまり、速度方向に広がりを持っている物体は人間である可能性が高く、ミリ波レーダは人間を識別するシステムの検知性能向上に有効となる。

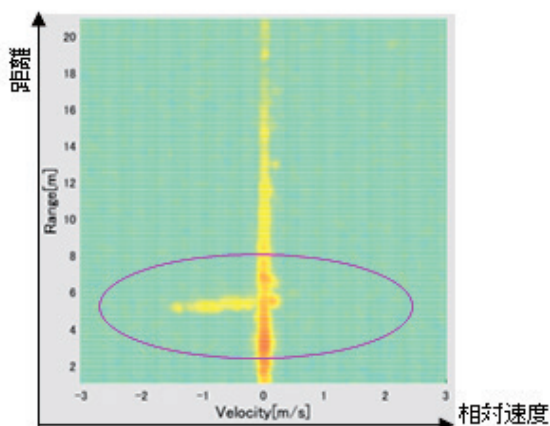


Fig. 3 相対速度情報による人の検出

### 3. ミリ波レーダとカメラのフュージョン

#### 3. 1 センサのフュージョン

建機周囲の人や障害物を検知する有力な監視センサとしてカメラが使用されており、分解能が優れているため物体認識が容易である。しかしながら、降雨や砂埃による視界不良や人が後ろ向きになっている場合などではカメラだけでは認識困難な状態となり、誤検知率が高くなる。一方、ミリ波レーダは耐環境性があるだけでなく、人の動きによる相対速度の発生によって人を認識することが可能である。そこで、カメラとレーダ両方の特長を利用したフュージョン処理の検討が行われた。これにより人の検出性能向上が可能となる。

#### 3. 2 構成

Fig. 4に、カメラとミリ波レーダをフュージョン処理するシステムブロックを示す。同図より、ミリ波レーダとカメラからのデータが転送されて GPU (Graphics Processing Unit) 搭載の信号処理ボードに入力される。カメラからの人体の様々な姿勢や角度等の画像データに対して深層学習を用いた画像処理による人物認識が行わ

れる。さらに、ミリ波レーダからは距離・方位・相対速度・受信信号強度の情報を含むターゲット情報が出力され、信号処理によって人や障害物等の複数ターゲットの抽出が行われる。

最後のフュージョン処理では、ミリ波レーダとカメラの処理結果に対して同期を取り、同時刻におけるデータについて照合している。カメラの画像情報から人の方位を算出し、ミリ波レーダのターゲット情報の方位と照合させたフュージョン処理をすることにより人の検出性が向上する。

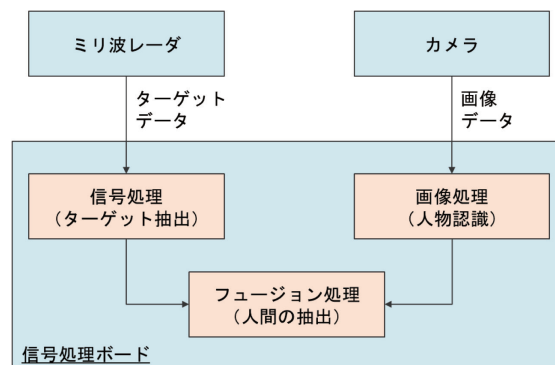


Fig. 4 カメラとミリ波レーダを用いたシステムブロック

## 4. フィールド試験

### 4. 1 フィールド試験 (2020年2月)

#### 4. 1. 1 概要

2020年2月に技術研究所の屋外実験ヤードで、バックホウ(キャタピラー製 320E)の後上部にカメラとミリ波レーダを設置し、周辺監視センサとして建機周辺における人などの検知性能を評価することを目的としてフィールド試験を実施した。



Fig. 5 センサ装置の設置状況

Fig. 5に、建機後方の設置状況を示す。搭載場所は高さ2.5m、斜め下の方向にカメラとミリ波を向けた。これは既存建機に設置可能な位置と想定している。試験は人の静止、動作(接近)時、建機動作(旋回)時、さらに周囲の土山や人の姿勢による影響を検証するための実験を実施

した。本ミリ波レーダの性能は、水平覆域 90deg で検知距離 15m である。近距離で人がしゃがんでいるとレーダで検知困難となるが、ミリ波より広角なカメラによる検知で対応可能となる。

#### 4. 1. 2 試験結果

##### (1) 人の直立状態

建機から 5m 離れた場所に人が直立した状態で評価実施した。Fig. 6 に、人が直立状態である場合のフュージョン処理の結果例を示す。同図の上半分の写真画像において、緑色の直方枠はミリ波とカメラの両方とも検知していることを示しており、緑枠の範囲は人の体格範囲のみに絞れている。また、8m の位置には金属製の反射物標（コーナリフレクタ）が置かれており、Fig. 6 では青の直方枠となっている。これはミリ波のみが反射物標を検知し、カメラは検知していないことを示す。

Fig. 6 の下半分はバードビューであり、上空から見た状態を示している。中心がミリ波レーダとカメラの周辺監視センサの設置位置であり、5m 前方の位置に緑の四角（人を検知した場所）が、8m 前方やや左側の位置に青い四角（反射物標を検知した場所）が方位とともに示される。

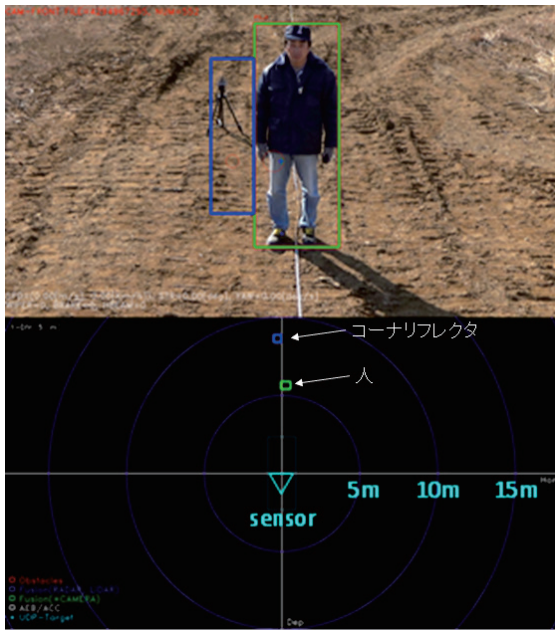
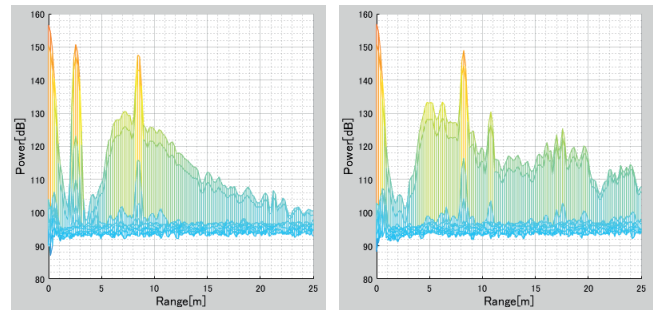


Fig. 6 人が直立状態におけるフュージョン結果例

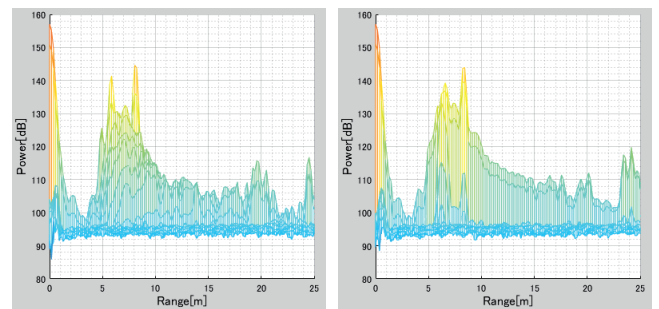
Fig. 7 に、人がセンサから 2.5m, 11m に直立で静止した場合の距離に対する受信電力例を示す。8m には反射物標が配置されている。受信電力の正規化は実施していない。0m におけるピークは送受信機間の直接波（距離 0m）である。同図(a)では 2.5m と 8m の地点に 150dB と 147dB のピークが発生している。また、同図(b)では 8m と 11m の地点に 147dB と 130dB のピークが発生している。2.5m と 11m 地点の人の電力差は 20dB 程度であり、2 乗則で無線信号が減衰する自由空間伝搬環境で高さを考慮したユークリッド距離の比は約 3.5 であり、約 10dB 分減衰が大きくな

る。電波の往復による 20dB の減衰の想定とほぼ一致する。



(a) 人が 2.5m の地点 (b) 人が 11m の地点

Fig. 7 人が直立静止状態におけるセンサからの距離に対する受信電力例



(a) 旋回時 (b) 停止時

Fig. 8 バックホウ旋回の有無の条件におけるセンサからの距離に対する受信電力例

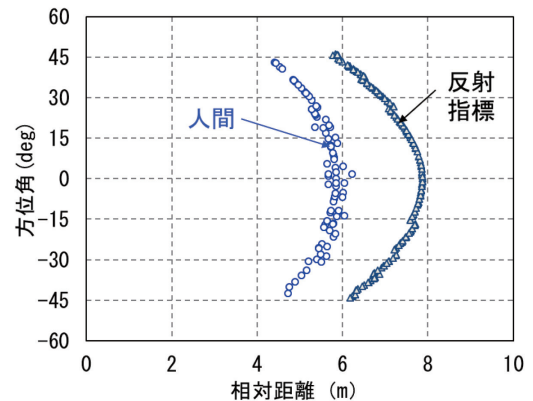


Fig. 9 バックホウ旋回時における人間と反射指標の検出例

##### (2) 建機の旋回

建機を中心にして人や反射指標などを設置した状態に対して、建機は移動せず旋回動作のみを実施した。Fig. 8 に、人がセンサから 6m に直立で静止した場合の距離に対する受信電力例を示す。8m には反射物標が配置されている。(a)はバックホウが旋回している状態（人と正対した位置）であり、(b)は停止時となっている。受信電力の正規化は実施していない。

Fig. 8 の(a)(b)ともに 6m に 140dB のピークが発生している。バックホウ旋回時も人と正対する方位では、静止時と同レベルの受信信号が得られており、建機移動時でも

ミリ波レーダは人間を検知可能となる。なお、Fig. 7 と Fig. 8 とともに、5~10m は地面からの反射波を受信しているため、広い距離で受信信号電力が高くなる。

Fig. 9 に、バックホウ旋回時における人間と反射指標の検出結果を示す。同図はミリ波レーダのみについて閾値以上の受信電力のみ抽出し、その検出点について距離と方位角のグラフにプロットしている。人と正対する距離は6mである。アンテナの多チャンネルを制御することにより±45degの範囲内を複数ビームで観測するため、旋回時にはミリ波レーダだけでも人や反射物標を検知することが可能であり、カメラ画像情報と合わせることでより更に検出精度は向上する。

ミリ波レーダの方向 (Y 方向) へのドップラー速度があると検出しやすいが、横断方向 (X 方向) はセンサ方向へのドップラー速度が 0 となるため検出が難しくなる。しかしながら、本実験では旋回時でも人からの反射強度を検出が可能という結果を得た。現場では地面の凸凹や建機自体の振動により、道路を走行する自動車と比較して計測時にセンサは大きく振動する。振動による影響としては上下に動く程度であれば測距への影響は少ない。前後に動く振動の場合は距離が変動する影響があるものの、追尾処理などにより平均化処理をすれば安定した精度の高い距離測定が可能である。

(3) 人の姿勢や背景による影響

人の姿勢や背景、周囲条件によって検出性能が低下しないかを確認する実験を行った。実際の現場環境では直立、歩行のみでなく、Fig. 10 のようなしゃがんだ場合や、不測の事態によって Fig. 11 のように倒れている場合も想定される。建設現場では土山 (土砂の山) などの平坦ではない場所が存在し、土山が背景にあると反射して障害物として検知され、作業者の検出性能に影響することも想定される。

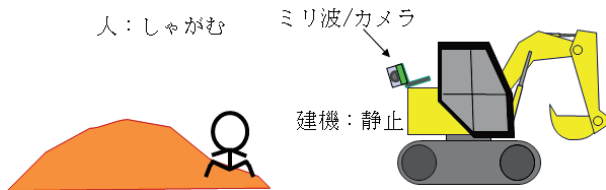


Fig. 10 しゃがんだ人の構成図

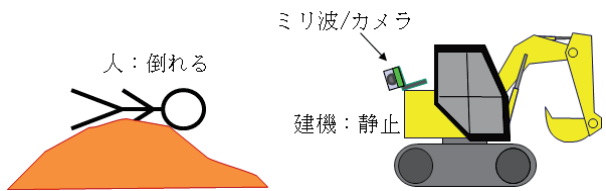


Fig. 11 土山で倒れている人の構成図

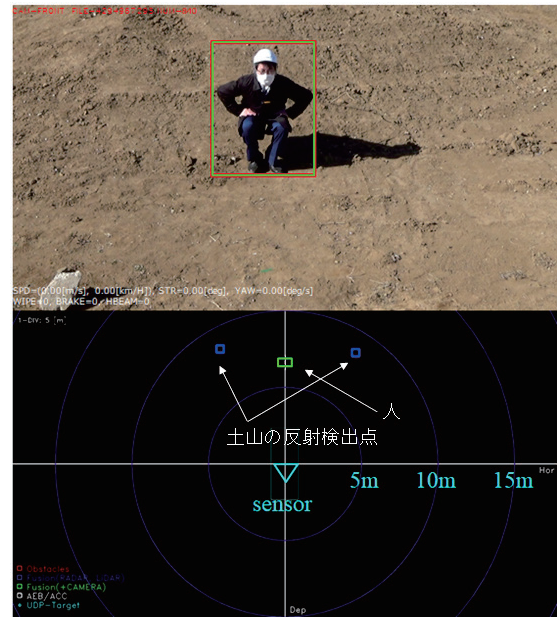


Fig. 12 土山の前でしゃがんだ人

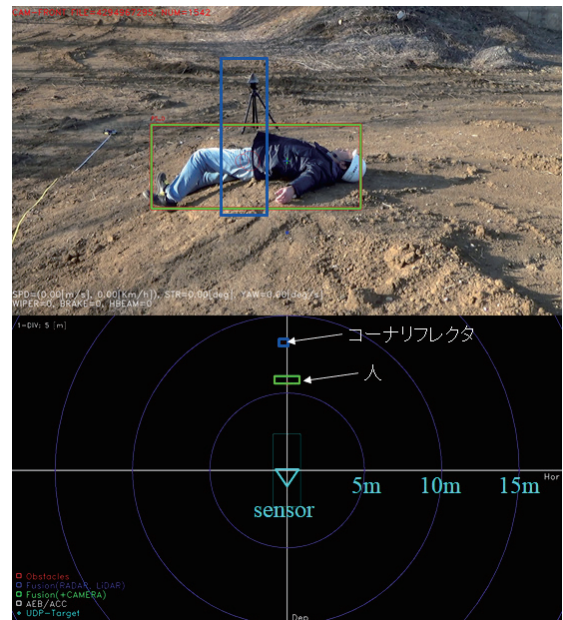


Fig. 13 土山の上で倒れている人

Fig. 12 と Fig. 13 に、作業者が土山の前でしゃがんだ状態と土山の上で倒れた状態における検出評価のフュージョン処理結果を示す。しゃがんだ状態や倒れて静止している状態でもミリ波レーダで作業者を検出できている。また、カメラについても、しゃがんでいる人、倒れた人の画像を予め深層学習させておくことにより直立以外の姿勢でも作業者を認識可能であることを確認した。なお、Fig. 12 のバードビューにおいて青い四角が表示されているが、これらは土山によるミリ波の反射検出点を示している (写真画像上では、検出点の方位が広角であることが理由で表示範囲外となっている)。

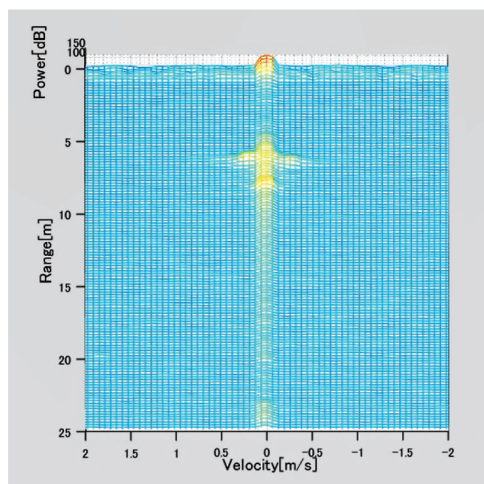


Fig.14 土山の前でしゃがんでいる場合の距離と相対速度と受信電力の検出例

Fig.14 に、土山の前でしゃがんでいる場合の距離と相対速度と受信電力の検出例を示す。X軸が相対速度であり、Y軸が距離、Z軸が受信信号電力である。同図より、Y軸で6m付近の電力が高く、人間がいることがわかる。なお、相対速度が±0.5m/s程度に広がっている。これは、しゃがんでいる状態で人間が微小振動しているためである。8m付近の電力のピークは反射指標であり、静止物であるため、相対速度の広がりほとんど見られない。

## 4.2 フィールド試験 (2021年8月)

### 4.2.1 概要

2021年8月に技術研究所の屋外実験ヤードで、改良されたミリ波モジュールの性能評価実験を実施した。2020年2月時のミリ波レーダ装置と比較して、部品点数削減によって小型化(76%減)し、アンテナの再設計によって水平覆域が140degに拡大している。

屋外実験ヤード内の遠隔操作室近くにバックホウ(コマツ製PC138US)と11tクラスのクローラキャリア(加藤製作所製IC120-2)を配置し、試験環境に応じてバックホウのみ使用した。複数の実験の内、下記の実験結果を紹介する。

- (1) 障害物等の無い環境における検知性能を確認する(基本フィールド環境)。
- (2) 鉄板等の反射物のある環境での検知性能を確認する(反射物環境)。
- (3) 砂埃を想定した擬似環境での検知性能を確認する(砂埃の擬似環境)。

Fig.15に、実験装置の概要図を示す。バックホウ後方中央付近に装置を設置している。実験で得られたデータ解析は現在も実行中であり、将来的に開示される。次項では、(1)~(3)の試験環境と結果を説明する。

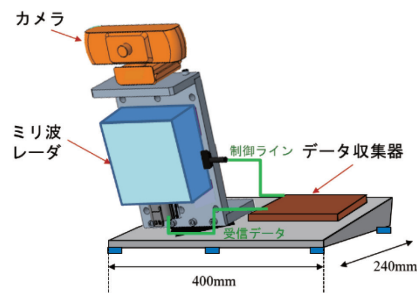


Fig.15 バックホウ後方に設置された実験装置の概要

### 4.2.2 試験環境

#### (1) 基本フィールド環境

Photo.1に、基本フィールド環境における実験写真を示す。バックホウが静止し、最大で15m離れた人間が静止した状態で検知が行われた。人はその場で直立・しゃがみ・前後移動・手を振る動作(基本動作と呼ぶ)を実施した。



Photo.1 基本フィールド環境での実験例

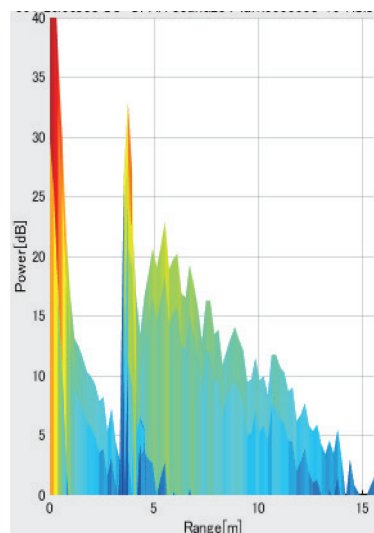


Fig.16 基本フィールド環境で人が静止時の受信電力例

Fig.16に、人が直立静止状態における距離に対する受信電力例を示す。同図より、3.5mの距離に人がいることを検出できた。また、大地反射によって5m~10mでは受信電力が高いことがわかる。



Photo. 2 反射物環境における実験例

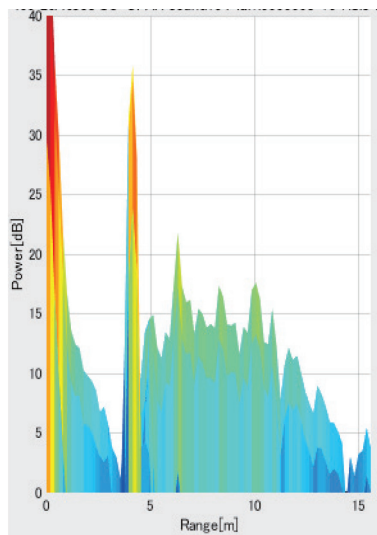


Fig. 17 反射物環境で人が静止時の受信電力例

(2) 反射物環境

Photo. 2 に、反射物環境における実験写真を示す。バックホウから離れた位置に対して、人や案山子が静止した場合と基本動作を実施した場合の検知性能を評価した。6 × 1.5m の鉄板 4 枚を利用している。Fig. 17 に、反射環境で人が静止時の受信電力例を示す。同図より、鉄板を敷いた環境でも地面の場合と同様に 4m の距離で人を検出できていることがわかる。

(3) 砂埃の擬似環境

Photo. 3 に、砂埃環境における実験写真を示す。バックホウから 4.5m 離れた位置に対して、静止した場合と基本動作を実施した場合の検知性能を評価した。バックホウ後部に取り付けられたミリ波センサー近くに砂の付着したアクリル板が設置された場合の実験を行っている。Fig. 18 に、砂埃環境で人が静止時の受信電力例を示す。同図より、アンテナに砂埃が付着する環境でも 4.5m の距離で人を検出できていることがわかる。



Photo. 3 砂埃環境における実験例

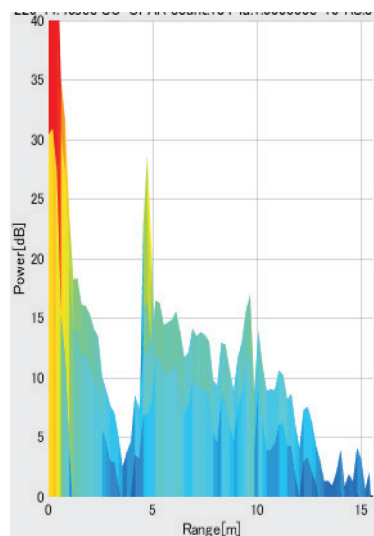


Fig. 18 砂埃環境で人が静止時の受信電力例

5. まとめ

技術研究所の屋外実験ヤードにおいて、建機にカメラとミリ波レーダを設置し、フュージョン処理による人の検知性能の確認実験を行った。ミリ波レーダは相対速度・距離の推定性能が高く、降雨環境でも利用できる特長があり、カメラとの組合せによって物体認識に必要な分解能の課題を克服することが可能である。

2020 年 2 月の実験結果より、建機が静止している場合や旋回している場合でも、ミリ波レーダを使うことで周辺の人の位置検出を行い、危険な距離の場合に警告を出すことが可能になる。このとき、人がしゃがんだりしている状態や倒れている状態でも相対速度情報を用いることでターゲットが人なのか、静物なのかを判別できる。

2021 年 8 月の実験では鉄板や、砂埃の付着したアクリル板を使い、2020 年 2 月よりも過酷な条件での実験を行った。実験データの解析は現在も実施中であり、実験環境の一部の結果のみ紹介した。実験結果のフィードバックによってミリ波レーダモジュールの更なる改良と低コスト化が近い将来に行われ、建機へと積極的にミリ波レーダが搭載される時期を期待したい。

## 謝辞

本検討を実施するにあたりご協力頂きました三菱電機株式会社の関係者各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：安全啓発リーフレット（令和3年度版）～令和2年度の事故発生状況～，2021年7月。
- 2) 堀松哲夫・一津屋正樹：実用化を迎えたミリ波レーダシステム，電子情報通信学会誌，VOL. 87，NO. 9，pp. 756～759，2004年4月。
- 3) 桐田満・鈴木拓也・丸山貴史：自動運転用高性能ミリ波レーダモジュール，三菱電機技報，VOL. 94，NO. 2，pp. 29～31，2020年2月。
- 4) 高柳優・小西響介・影目聡・亀田洋志・諏訪啓：車載レーダ向け歩行者・路側物識別方式，三菱電機技報，VOL. 95，NO. 7，pp. 19～22，2021年7月。
- 5) 山脇俊樹・山野真市：60GHz帯自動用ミリ波レーダ，富士通テン技報，VOL. 15，NO. 2，pp. 9～18，1997年11月。
- 6) 小川勝・夏目一馬：車載ミリ波レーダの開発，電子情報通信学会通信ソサエティマガジン，VOL. 12，NO. 3，2018年12月。
- 7) 石井聡・梶木淳子：歩行者検知用ミリ波レーダ，雑誌 FUJITSU，VOL. 59，NO. 4，pp. 387～392，2008年7月。
- 8) 梶原昭博：ミリ波レーダ 技術と設計，科学情報出版，2019年3月。
- 9) 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. 66～82，2021年2月。
- 10) 藤村契二：自動車用ミリ波レーダの開発動向，VOL. 79 NO. 10，pp. 977～981，1996年10月。

---

## Study on a peripheral monitoring system for construction equipment using millimeter-wave radar and visible camera

Hironobu HATAMOTO, Kosuke YASOOKA, Tsubasa ASUMA, and Yoshito TAKESHITA

### Abstract

In recent years, the miniaturization of electronic devices and the development of signal processing technology have led to the development of traffic monitoring systems using millimeter-wave radar. Millimeter-wave radar is a key device for achieving vehicle safety and autonomous driving. Compared to other sensors, it has the advantage of being less susceptible to environmental conditions such as fog, rainfall, snowfall, and ambient light. In addition to radar, in-vehicle cameras can be used to detect people, cars, and obstacles by acquiring images visible to the human eye and performing digital signal processing. In this report, we describe experiments for a peripheral monitoring system that recognizes people walking around construction equipment by using sensor fusion that combines a millimeter-wave radar and an in-vehicle camera. In February 2020 and August 2021, the experiments were performed in the outdoor experiment yard of the Research Institute of Kumagai Gumi Co. Ltd. The results of the February 2020 experiments confirm that peripheral detection is possible with high accuracy when a person is near a stationary backhoe or when a stationary person is near a backhoe while it is turning.

Key words: millimeter-wave radar, in-vehicle camera, sensor fusion, frequency modulated continuous wave (FMCW)

---