

ミリ波レーダと可視カメラを組み合わせた 周辺監視センサーの開発と評価結果

ミリ波とカメラの融合による人検知性能の向上

三菱電機株式会社
株式会社熊谷組
株式会社熊谷組

○ 八十岡 興祐
畑本 浩伸
飛鳥馬 翼

1. はじめに

建設業界では無人運転化、障害物検知のためのセンサの導入を推進中であり、油圧ショベルの運転席後方などの死角領域については監視センサによる安全性向上が求められている。

現在、有力な監視センサとしてカメラが採用されているが人がしゃがんで認知不可能な状態や砂ぼこりなどの視界不良の環境により誤検知が発生している。

自動車の安全運転支援システムではカメラのほかにミリ波レーダが使用されている。当社では2003年より継続しているミリ波レーダの量産実績を活かしつつ、そのミリ波技術を応用したレーダを開発中である。また、防衛・宇宙で培った最新レーダ技術や画像認識技術などについても研究開発を実施している。

今回、建設フィールドにおいてミリ波レーダの評価試験を実施するとともに、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についても検証したので評価結果について述べる。

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。図1にミリ波レーダモジュールのブロック図を示す。

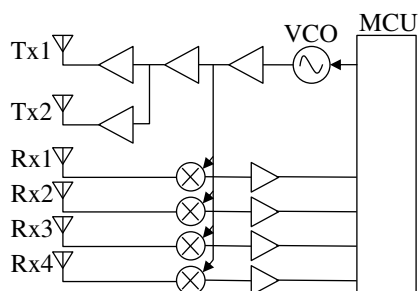


図-1 ミリ波レーダモジュールのブロック図

送受信回路のVCO (Voltage Controlled Oscillator) から発振された77GHzの高周波信号はアンテナから送信され、ターゲットにて反射した信号をアンテナで受信し信号処理部のMCUへ送られる。

2.2 原理

ミリ波レーダの原理について説明する。図2に示すようにミリ波レーダの送信周波数は高速チャープで変調している。送信波と受信波の差分をFFT (Fast Fourier Transform) 演算することにより、ビート周波数が得られる。ビート周波数は距離に相関しているのでビート周波数よりターゲットまでの距離が算出される。FFT 演算では位相情報も一緒に得られ、この位相情報より速度ドップラが求められるのでターゲットとの相対速度も算出される。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。

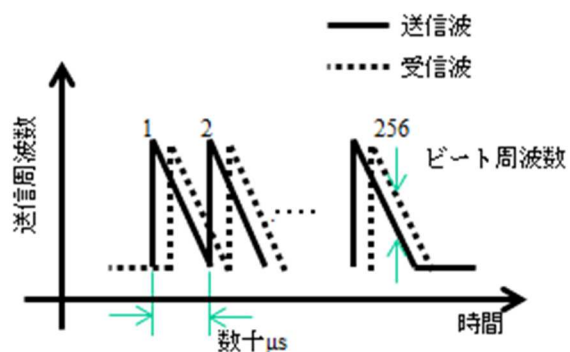


図-2 ミリ波レーダの変調波形

2.3 ミリ波レーダの特長

(1) 各センサとの比較

表1にミリ波とカメラとLiDARの比較を示す。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。電波の直進性が強いので遠くまでの距離検出が可能という点も優れており250m先の自動車を検出する評価結果が

得られている。また、降雨や降雪時の悪天候下や砂ぼこりの視界不良の環境でも検出が可能という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。

表1 各センサの特長

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

(2) ミリ波レーダによる人識別方法

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することが可能である。

図3に人が5mの位置で手を動かしている時の評価結果を示す。

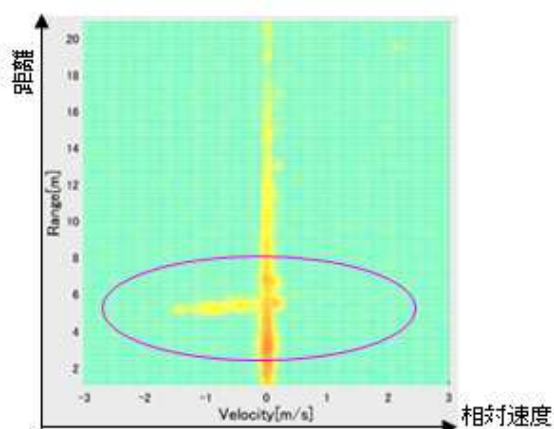


図-3 相対速度情報による人の検出

グラフは相対速度と距離を示し、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っている。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。グラフにおいて距離5mの位置に相対速度がある物体がいることがわかる。しかも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。もしこの物体が車であれば相対速度は広がることなく2m/sなどの1か所だけが検出される。このように速度方向に広がりを持っている理由として、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ためである。従って速度方向に広がりを持っている物体は人である可能性が高いので、人を識別して検知性能の向上に有効となる。

3. ミリ波レーダとカメラのフュージョン

3.1 フュージョン説明

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。しかし降雨や砂ぼこり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るので誤検知する場合がある。

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、これら両者の特長を利用したミリ波レーダとカメラのフュージョン処理を実施した。これにより人の検出性能向上が可能となる結果が得られた。

3.2 構成

図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図を示す。

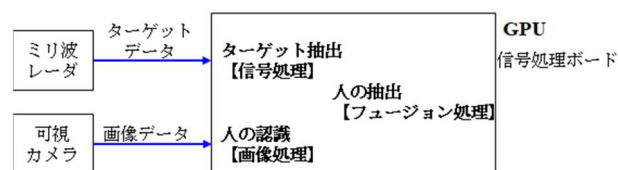


図-4 カメラとミリ波レーダを用いたシステムブロック図

カメラからは画像データが転送されてGPUの画像処理により人の認識を実施する。この時、人物の深層学習により人の様々な姿勢や角度などの画像においても人を識別可能な処理を実施する。

ミリ波レーダからはターゲットデータが出力され2項で述べたように信号処理により人や障害物などの複数ターゲットデータが抽出される。ターゲット情報としては距離・方位・相対速度・受信信号強度が得られる。

それぞれの処理結果から得られたデータは同期を取って、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。

3.3 フィールド試験概要

キャタピラー製油圧ショベル（320E）の後上部

にカメラとミリ波レーダを搭載し、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。図5に示すように搭載場所は高さ2.5m、斜め下の方向にカメラとミリ波を向けた。試験内容は人が直立状態、人が接近してくる状況、建機が旋回している状態について実施した。図6と図7に構成図を示す。



図-5 搭載状況



図-6 人の直立または接近の構成図

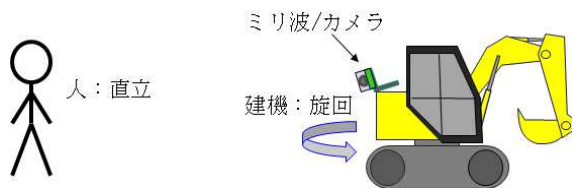


図-7 建機旋回の構成図

3.4 フィールド試験結果

(1) 人の直立状態

図6に示すように建機から5m離れた場所に人が直立した状態で評価実施した。図8にフュージョン処理した結果を示す。緑枠はミリ波とカメラの両方とも検知していることを示す。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=図8中の左青枠内)を置いている。反射物標は人ではないのでカメラでは人として検知しないが、ミリ波レーダでは障害物があると検知することが可能である。図8では青枠となっており、これはミリ波

のみが検知していることを示す。

図8の下半分はバードビューを示しており、上空から見た状態である。中心がミリ波レーダとカメラの周辺監視センサを設置した位置であり、5m前方の位置に緑の四角(人を検知した場所)、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)を方位とともに示す。

図8では人は直立しているがしゃがんだ状態でもカメラとミリ波の両方で検知している結果が得られている。

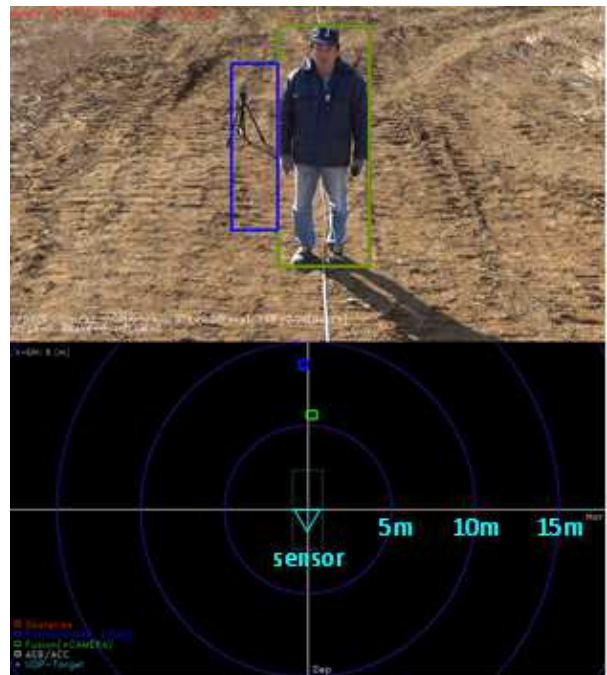


図-8 人の直立状態

(2) 人の接近

図6に示すように建機から15m離れた場所から建機に向かって人が歩いてくる評価を実施した。図9にフュージョン処理した結果を示す。接近する人を連続的にカメラとミリ波で検知していることを確認した。検知可能距離はミリ波の場合は~12m、カメラは~10mであった。ミリ波は地面等に対しても反射してターゲットとして検知をする。図10はミリ波レーダが検出した反射物を全てプロットしたものである。ところで地面等の反射物標の速度ドップラは0m/sであるが、接近する人は速度ドップラが発生する。この速度ドップラの違いにより地面と人を分離することは可能である。図11はミリ波レーダが検出した反射物について速度ドップラのある反射物のみをプロットしたものである。この結果より、ミリ波だけでも人が接近していることを認識可能であり、カメラの画像情報と合わせることでより更に人の検出精度は向上する。

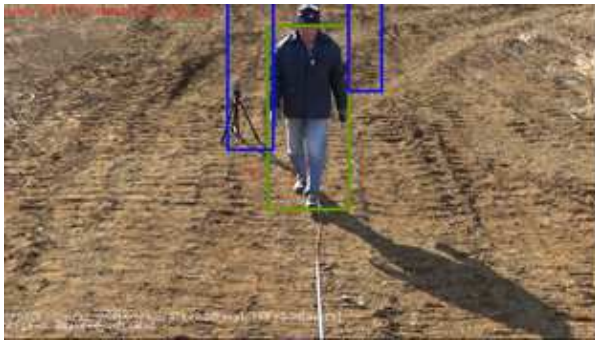


図-9 人の接近

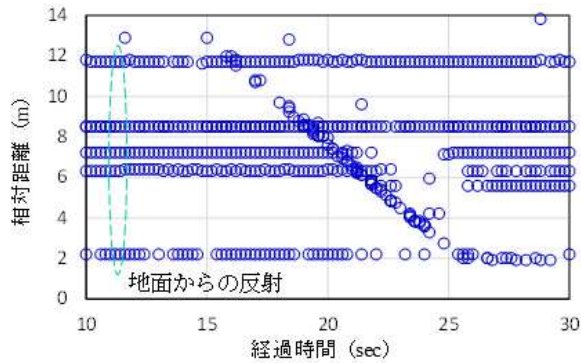


図-10 検出点を全プロット
(ミリ波レーダのみの検出結果)

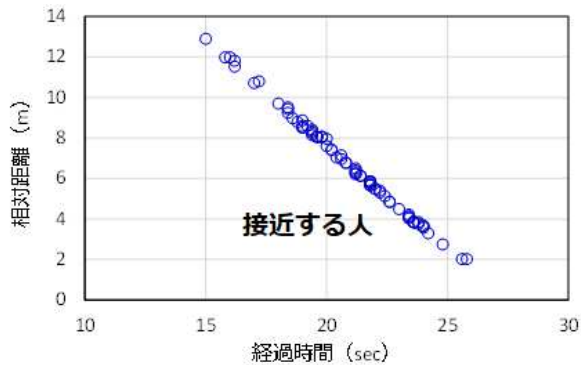


図-11 相対速度のある反射物のみを抽出
(ミリ波レーダのみの検出結果)

(3) 建機の旋回

図 7 に示すように建機を旋回させた場合の周囲の検知状況について評価を実施した。図 12 にフュージョン処理した結果を示す。人を建機から 6m 位置で直立、反射物標を 8m の位置に置いた状態において、人はミリ波レーダとカメラで検知していることを確認した。反射物標についてはミリ波で検知していることを確認した。図 13 は旋回時における検出結果をミリ波レーダのみについてプロットしたものである。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更に検出精度は向上する。



図-12 建機の旋回

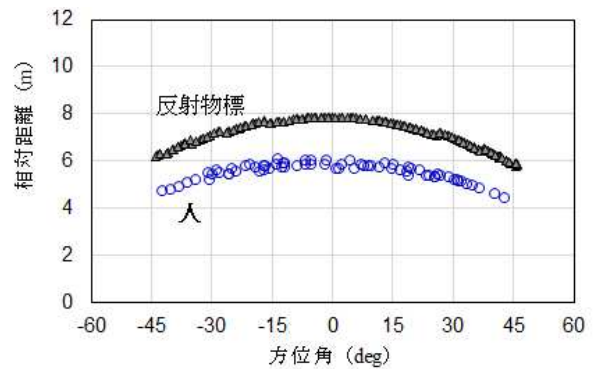


図-13 旋回時における検出結果
(ミリ波レーダのみの検出結果)

3.5 追加検討

(1) ミリ波レーダ検出性の向上方法

ミリ波レーダは特に金属物の反射について優れており、自動車の検出は人に比べて容易である。ターゲットが人の場合には検知距離は 20m 程度であれば可能だが、ヘルメットや反射ベストにアルミテープを貼ることでミリ波による検出性はさらに向上する。

(2) 人以外の障害物検知

本検討では、人の検知についてカメラとミリ波のフュージョン処理にて実施した。建設業界では人および障害物との接触事故防止が求められており、障害物としては三角コーンや大型ブロックなどが挙げられる。これらの物体についても学習させると原理的には検出は可能である。但し、相当数の画像データが必要となり、正解付け作業も必要となる。

4. むすび

未舗装路におけるフィールド試験場において、建機にカメラとミリ波を搭載して、フュージョン処理による人の検知性能を述べた。今後は様々なシチュエーションにおける評価試験の実施や最適なアンテナ設計や搭載方法などの開発を実施していく計画である。