



安全運転支援システム向け24GHzミリ波レーダ

24-GHz Band Radar for Driving Safety Support Systems

東 篤司*
Atsushi Higashi

岸 正樹
Masaki Kishi

森中 諒太
Ryota Morinaka

東田 宣男
Nobuo Higashida

白永 英晃
Hideaki Shiranaga

木戸 智
Satoshi Kido

交通事故の低減を目指し、路（インフラ）・車協調による安全運転支援システムを開発してきた。本システムの一例として、交差点に進入して右折する車両に対して、横断歩道上の歩行者の存在情報を提供し、ドライバに注意喚起するサービスがある。このたび、当社は、インフラ側の歩行者用センサとして24GHzのミリ波レーダを製品化し、2018年3月から出荷を開始した。本稿では、優れた環境性能に加え、高い歩行者検知精度と広い検知エリアを実現したミリ波レーダについて紹介し、実交差点での評価結果について報告する。

We are striving to develop driving safety support systems to reduce traffic accidents. One function of this system is to provide information on the presence of pedestrians on a crosswalk to a vehicle turning right at an intersection and call attention to the driver. We have developed a 24-GHz band radar to detect pedestrians as a roadside sensor, and started shipping it in March 2018. The radar features robustness against changes in weather and sunshine conditions, high performance in pedestrian detection, and a wide detection area. This paper introduces the radar and shows the result of a field test.

キーワード：路車協調、安全運転支援システム、歩行者用センサ、ミリ波レーダ

1. 緒 言

国内の交通事故死者数（平成29年3,694人）は年々減少傾向にあるが⁽¹⁾、政府目標である「2020年までに交通事故死者数2,500人以下」を達成するためにはさまざまな対策が求められる。特に、交通事故のおよそ半数が交差点で発生しており⁽²⁾、中でも見通しの悪い交差点では、車両に搭載されたセンサを用いて危険を回避する自律型の安全運転支援システムだけでなく、車両とインフラ設備が情報交換する協調型のシステムが必要である。当社はこれまで、交通事故の未然防止を支援するため、路（インフラ）・車協調による安全運転支援システムを開発してきた⁽³⁾。本システムの一例として、交差点に進入して右折する車両に対して、**図1**のように路側のセンサで検知した横断歩道上の歩行者・対向車の存在を無線装置から情報提供するシステムが、各都道府県警察により運用されている。本システムに対応した車載機を搭載した車両のドライバは、画面表示・警告音で注意喚起を受けることができる。当社は、既に発売している無線装置や車両用センサに加え、インフラ側の歩行者用センサとして24GHzのミリ波レーダを世界で初めて製品化し、2018年3月から出荷を開始した。

当社が開発したミリ波レーダは、天候や日照変化に強く、独自の歩行者検知アルゴリズムを搭載することで、横断歩道全体とその周辺の歩行者待機エリア*¹に存在する歩行者

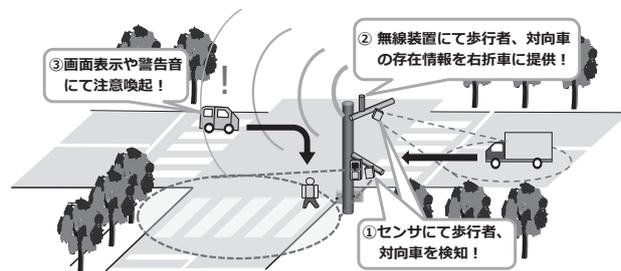


図1 路・車協調型の安全運転支援システムのイメージ

（自転車に乗った人を含む）を高い精度で検知することが可能である。また横断歩道近辺の歩行者灯器柱などに設置でき、直近の歩行者待機エリアから40m超の大規模な横断歩道全体までカバーする広い検知エリアを実現した。

本稿では、開発したミリ波レーダ式歩行者用センサについて紹介し、実交差点での性能確認実験の結果を報告する。

2. ミリ波レーダ式歩行者用センサ

開発したセンサの仕様を表1にまとめ、センサユニットの外観を図2に示す。

表1 歩行者用センサの仕様

変調方式	FMCW
電源電圧	90~110V (AC)
消費電力	20W (Typ.)
周波数帯	24.05~24.25GHz
送信電力	20mW
温度範囲	-20~50℃
寸法	265×265×147mm
重量	7kg以下 (取付け金具を除く)



図2 センサの外観図

2-1 FMCW式ミリ波レーダの原理

レーダ方式には、FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 方式を採用した。本方式は、周波数変調された送信波と対象物体からの反射波の周波数差(ビート周波数)を検出することで物体までの距離を測定できる。また、対象物体の速度の有無に依らない検出方式であり、ターゲットとなる歩行者が、歩いているときと立ち止まっているときのいずれの状態でも検知可能である。しかし横断歩道近辺に存在する電柱などの静止物体からも強い反射波を受信するため、後述する検知アルゴリズムの開発においてはこの課題への対策が重要であった。

2-2 特長

当社が開発した歩行者用センサの特長を以下に示す。

(1) 優れた環境性能

ミリ波レーダは、電波を使用したセンサであり昼/夜の日照条件や寒暖差での性能差は発生しない。また天候による電波伝搬特性への影響も少ないため晴/雨/雪/霧等の天候条件の変化にも強く、ドライバが視認しにくい環境下で効果を発揮する。

(2) 高い歩行者検知精度

開発した歩行者検知アルゴリズムでは、反射波の特徴情報の解析から歩行者を追跡してその動きを推定する機能を搭載することにより、歩行者以外の反射体が多く存在する実交差点においても歩行者を高い性能で検知可能である。

(3) 広い検知エリア

ミリ波レーダにとって、直近の領域をカバーしつつ、検

知可能な距離を伸ばすことは両立し難い課題であったが、複数系統のアンテナと24GHz送受信回路、それらを活用する信号処理技術の開発により、図3のように横断歩道近辺の歩行者灯器柱に取付けて、センサ直下に近い歩行者待機エリアをカバーしつつ、歩道長40m超の広い検知エリアを実現している。本特性により、大小さまざまな規模の横断歩道に適用可能であり、高い設置の自由度を有している。

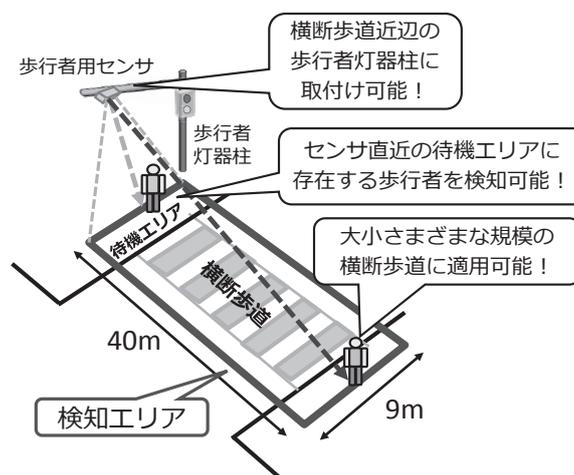


図3 歩行者用センサの設置イメージ

3. 構成

ミリ波レーダのブロック図を図4に示す。本章では、広い検知エリアを実現した①「アンテナ」、②「24GHz送受信回路」、及び処理基板上で動作し、高い検知性能を実現した③「歩行者検知アルゴリズム」について説明する。

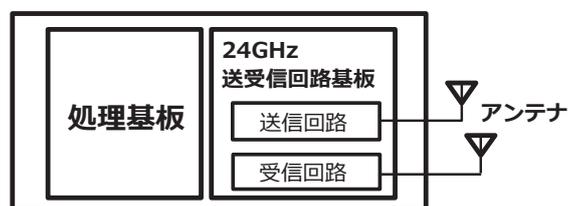


図4 ミリ波レーダのブロック図

3-1 アンテナ

アンテナは非フッ素系の低誘電率、低損失基板上にアンテナ素子パターンを形成し、同一基板上に送信2系統/受信4系統を構成している。利得は水平、垂直方向とも高利

得、広角度の指向性を有し、検知エリアは横幅9m、奥行長40m超を可能としている。特にセンサから下向きに近い角度の高利得特性により、検知エリア端から短いセットバック距離での設置を実現しており、大小様々な規模の横断歩道への対応が可能である（図3参照）。

物体からの反射波を4系統の受信アンテナで受信し系統間の位相差を検出することで物体の方向推定を行う。物体の距離検出結果と合わせると横断歩道平面上での座標位置の特定が可能である。受信アンテナの系統間距離が方向推定の際のグレーティングローブ^{*2}発生に影響するため、アンテナ素子配置の物理的制約条件とも合わせ4アンテナ間距離を不等間隔で最適化することでグレーティングローブによる検知誤りを低減している。

送信、受信アンテナ間の不要結合があると受信ノイズの上昇により物体検知精度が劣化するため、結合低減が重要である。アンテナ間結合は距離を離せば改善する一方、センサ寸法の増大に繋がる。内部配置の最適化による距離確保と結合を抑える基板構造、パターン形状の工夫によりアンテナ間距離を最小としセンサ全体の小型化を実現している。

3-2 24GHz送受信回路

24GHz送受信回路の構成を図5に示す。アンテナと同様に低損失基板上に送信2系統/受信4系統の回路を構成している。

送信部では、まずVCO^{*3}が24GHzの連続波を生成し、PLLシンセサイザ^{*4}によりVCOの制御電圧を周波数変調（時間経過で線形的に周波数増加）することで24GHzのFMCWチャープ信号が出力される。このチャープ信号は後段のVGA^{*5}により温度変動等によるレベル変動を抑えた後、PA^{*6}により必要なレベルまで増幅される。その後、フィルタで自帯域以外の不要波を除去した上でチャープ信号を送信する。

受信部では、受信した物体からの反射波に対し帯域外の不要波を除去した後、LNA^{*7}にて信号レベルの増幅を行う。レベルが増幅された受信信号はMixer^{*8}にて送信信号と掛け合わされ、送信信号と受信信号の周波数の差（ビート周波数）になって出力される。このビート信号はA/Dコンバータ^{*9}にて、アナログ信号からデジタル信号に変換され、後段の信号処理部に送られる。ビート信号は比較的低周波数であり1/fノイズ^{*10}による感度劣化の回避が重要となる。本回路ではノイズ低減用フィルタの挿入と共にチャープ掃引時間の高速化によりビート周波数を1/fノイズ帯と離すことで感度への影響を排除している。受信系統は高ダイナミックレンジ性能を実現しており、遠方物体からの微弱反射信号に対する低ノイズ性及び車両などの金属類からの高レベルの反射信号に対する高線形性を有している。

回路側での送信、受信系統間の結合低減では、送受信回路エリアで部品配置及び基板内配線を分離しかつ電波シー

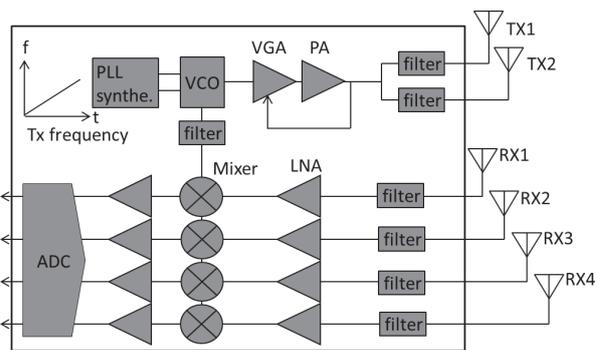


図5 24GHz送受信回路ブロック図

ルド機構を付加することで50dB以上の信号分離を実現している。

3-3 歩行者検知アルゴリズム

歩行者検知アルゴリズムについて紹介する。車両などの金属類と比較して1/1000ほどの微弱な電波を返す歩行者は、歩行者以外の反射体が多く存在する実交差点にて、他物体からの反射波に埋もれやすく、検知するには新たな技術が必要であった。そこで、(1) 静止物除去処理、(2) 時系列フィルタ^{*11}を用いた歩行者追跡ロジックを考案した。

(1) 静止物除去処理

静止物除去処理では、信号柱などの静止物の特徴を解析することで微弱な歩行者の反射波だけを取り出す。これにより、静止物の誤検知を防ぐと同時に、強い反射波を返す静止物に埋もれている、静止物近くに立つ歩行者だけを抽出することが可能である。本処理の実験結果を4-1節に後述する。

(2) 歩行者追跡ロジック

歩行者追跡ロジックでは、静止物除去処理を適用後、反射波の強さが閾値以上の物体の位置座標を観測値として抽出する。次に、この観測値を入力情報とし、時々刻々に動作する時系列フィルタを適用する。このとき時系列フィルタは、図6に示すような状態遷移図に従い、状態を変化させる。「歩行者候補状態」は、時系列フィルタの誤差分布を収束させることを目的とした状態であり、本状態のときは「歩行者なし」として出力する。また「歩行者状態」は、追跡対象を歩行者として認識した状態である。歩行者候補状

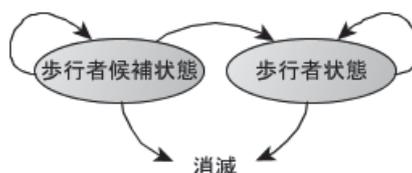


図6 追跡対象の状態遷移図

態から本状態に遷移する条件は、歩行者らしさを表す特定の規定を満たした場合とした。また、歩行者候補状態、歩行者状態において一定時間以上連続で観測値が得られない場合、時系列フィルタの追跡を消滅させることとした。

本ロジックの適用により、通過車両などの動く物体からの反射に埋もれた歩行者、及びその後ろに存在して一時的に隠れてしまった歩行者の検知が可能である。

4. 実交差点での性能確認実験

開発した歩行者用センサを用いて、大阪市内の実交差点にて性能確認実験を行った。図7左は、設置環境を表したイメージ図である。センサは信号灯器柱のアーム上の、高さ約4mの位置に設置した。また、リファレンス用にアーム上にカメラを設置し、そのカメラから撮影した交差点の風景を図7右に示す。図7右中の枠は検知エリアを表示している。

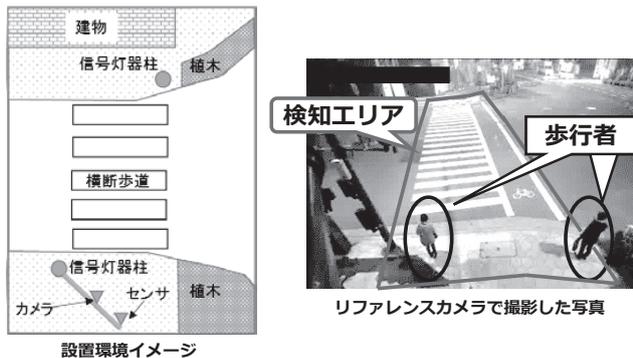


図7 設置環境イメージ図と交差点風景

4-1 静止物除去処理の性能確認

静止物除去処理の性能を確認するため、図7右の瞬間について処理を適用し、処理適用前と後の結果を図8に示す。

図中の色の濃淡は、横断歩道内とその周辺に存在する物体からの電波の反射の強さを表しており、色が濃いほど反射が強いことを意味する。図8左の静止物除去処理を適用する前は、四角枠で囲んだ①～④の物体からの強い電波の反射が確認できる。一方で図8右の処理適用後は、①～④の物体からの反射を除去しつつ、丸枠で囲んだ歩行者からの電波の反射だけを抽出できていることがわかる。

4-2 歩行者検知結果

実交差点における歩行者の検知結果を図9、10に示す。図9、10左は、リファレンスカメラで撮影した写真であり、枠で囲んだ検知エリア上の歩行者の存在状況を示している。図9、10右は、各図左の時間にセンサで歩行者を検知した結果を○印として表示させたものである。図9の結

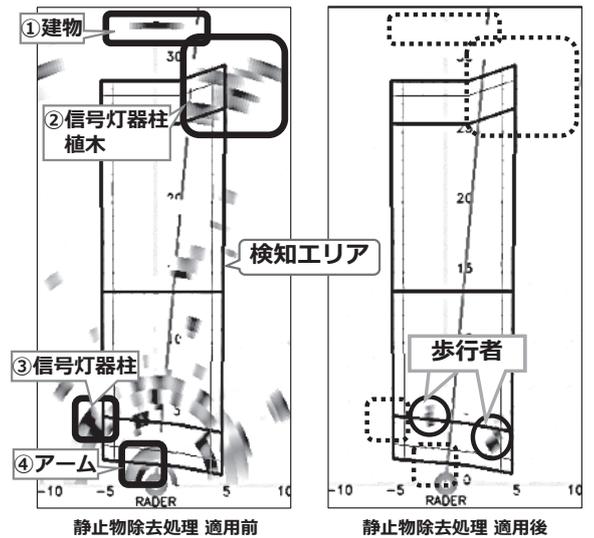


図8 静止物除去処理の適用結果

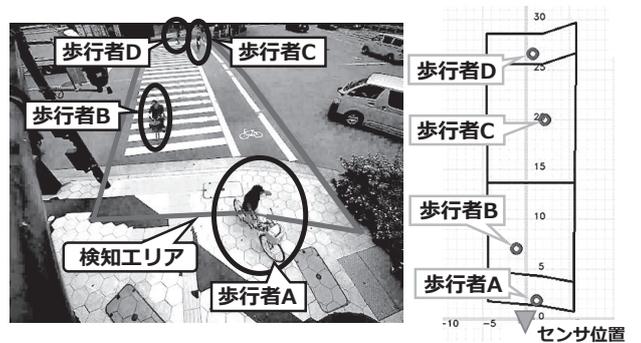


図9 歩行者の検知結果例1

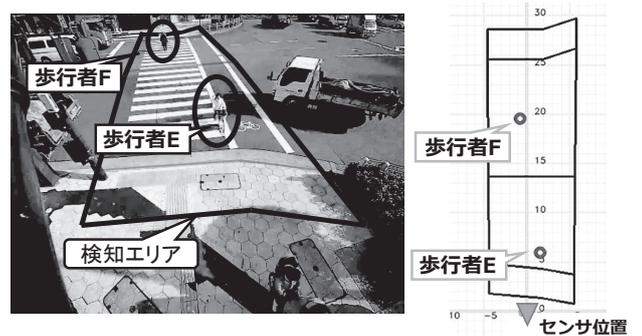


図10 歩行者の検知結果例2

果から、センサ直近を通過する速度の速い歩行者A、及び横断歩道を挟んで向かいの歩行者待機エリアに侵入する歩行者Dも検知できていることが確認できる。また図10の結果から、強い反射を返す左折車付近に存在する歩行者E、及び、さらに遠くの歩行者Fも検知可能であることがわかる。

4-3 検知精度評価

次に本実験環境における検知精度評価の結果を示す。評価は、歩行者同士のすれ違いや、歩行者と通過車両の交錯、自転車に乗った速度が速い人など、実交差点で発生する特徴的なシーンを含んだ長時間データを使用して性能を確認した。また、前述の通りミリ波レーダは日照変化に影響を受けないため、本実験では天候変化の耐性を確認することとし、晴/雨の天候ごとで評価を実施した。評価指標には以下を用いた。

未検知時間率 = 未検知時間 / 歩行者の総存在時間

誤検知時間率 = 誤検知時間 / センサの検知時間

実験結果を表2に示す。

表2 実験結果

評価指標	天候	晴	雨
未検知時間率		0.5%	0.3%
誤検知時間率		0.4%	0.2%

表2の結果から、歩行者以外の物体が存在する実環境でも天候に依らず高い検知性能を実現できることが確認できた。なお、晴れと雨の場合における検知結果の差は交通流の違いによるものであり、センサの性能によるものではないことを確認している。

5. 結 言

環境性能に優れ、且つ高い歩行者検知性能と広い検知エリアを有したミリ波レーダ式の歩行者用センサの開発を行い、実交差点にて評価を実施して高い検知性能を確認した。今後は、本開発で培った技術を高速道路での合流支援や自動運転技術に活用するなど、新たなアプリケーションへの対応を目指す予定である。

6. 謝 辞

本稿は、大阪府警察のご指導の下、一般社団法人UTMS協会にて実施した活動をまとめたものである。技術検討や実験環境の提供などについて、ご協力いただいた大阪府警察、UTMS協会に感謝する。

用語集

※1 歩行者待機エリア

歩行者が横断待ちする横断歩道周辺の領域。

※2 グレーティングローブ

電波信号の位相の 2π 毎の周期性に起因して発生する物体の真の到来方向とは異なる偽の推定結果。

※3 VCO

Voltage Controlled Oscillator : 電圧制御発振器。制御電圧で発振周波数を変化させることが可能な発振器。

※4 PLL (Phase Locked Loop) シンセサイザ

基準周波数となる入力信号とVCOからの出力信号の位相を同期させる回路。

※5 VGA

Variable Gain Amplifier : 可変利得増幅器。制御電圧で利得を制御可能な増幅器。

※6 PA

Power Amplifier : 送信信号を必要なレベルまで高める高出力な増幅器。

※7 LNA

Low Noise Amplifier : 低雑音増幅器。微弱な受信信号にできるだけノイズを加えることなく信号レベルを高める増幅器。

※8 Mixer

混合器。2つの異なる周波数の信号を入力して、それらの周波数の和と差の周波数信号が出力される回路。

※9 A/D (Analog to Digital) コンバータ

アナログ信号をデジタル信号に変換する回路。

※10 1/fノイズ

半導体素子から周波数に反比例して発生する低周波数帯(数十kHz以下)のノイズ。

※11 時系列フィルタ

誤差のある観測値を用いて、ある動的システムの状態を推定あるいは制御するための手法。

参 考 文 献 -----

- (1) 警察庁交通局交通企画課、「平成29年中の交通事故死者数について」
 - (2) 警察庁交通局、「平成29年中の交通事故の発生状況」
 - (3) 谷口裕一、大田利文、小林雅文、浦山博史、是枝義輝、「電波活用安全運転支援システム」、SEIテクニカルレビュー第184号 (2014年1月)
-

執 筆 者 -----

東 篤司* : 情報ネットワーク研究開発センター
博士 (工学)



岸 正樹 : 住友電工システムソリューション(株)



森中 諒太 : 住友電工システムソリューション(株)



東田 宣男 : 住友電工システムソリューション(株)
主席



白永 英晃 : 情報ネットワーク研究開発センター
プロジェクトリーダー



木戸 智 : 住友電工システムソリューション(株)
課長



*主執筆者