歩行者飛び出し予測のための 2.4 GHz 帯レーダを用いた死角領域検知

佐保　賢志（ Kenshi SAHO, Ph. D.）
立命館大学　理工学部　電子情報工学科　准教授
(Associate Professor, Ritsumeikan University, Department of Electronic and Computer Engineering)
電子情報通信学会　電気学会　IEEE
受賞：電子情報通信学会貢献賞 (2025 年), 船井研究奨励賞 (2017 年), 電子情報通信学会 ITS 研究会奨励賞 (2016 年), 輻射科学研究会奨励賞 (2013 年), Best Paper Award at ISAP2012 (2012 年), 他
研究専門分野：電波工学　波動情報学　レーダ信号処理

あらまし

本研究では、車載レーダにおいて複数の周波数帯を併用することで、死角領域も含めた周囲環境の高精度モニタリングシステムの実現を目指している。本稿ではこのシステムに用いる新たな周波数帯の候補として、車載用に多く用いられる 79 GHz よりも大幅に低い周波数である 2.4 GHz 帯を検討した結果を報告する。2.4 GHz 帯において電波の回折と透過を利用し、壁面などの裏側の死角領域に存在する歩行者を検知することを狙った。実験の結果、壁面の裏側の死角内の人体による受信強度のわずかな変化が検出され、回折波に基づく検知が可能であることを示した。さらに、得られた時間-距離-受信強度の画像を畳み込みニューラルネットワーク*1 に入力し、飛び出しリスクが異なる運動の分類を実証した。特に多重反射や透過を利用できない壁面の裏に存在する歩行者に対して、回折波のみにより平均識別率 98.8%を得た。さらに生垣や建物の裏といった透過を利用可能な環境でも高い精度を確認した。以上の結果より、低周波レーダの波動伝搬を活かすことで、他のセンサでは計測出来ない死角領域の検知を実証した。

１．研究の背景

最新の自動運転及び先進運転支援の研究開発により、ドライバーから視認可能な領域の認識精度は向上しているが、建物や車両など障害物の角からの突然の歩行者飛び出しは依然重大な交通事故リスクである。死角内のモニタリングを目的とした既存の取り組みには、反射体やカーブミラーを活用する光学カメラ・ライダーによる計測系や[1]、車両と歩行者が保有するデバイスの通信を前提とする方式がある[2]。しかし、カメラによる死角領域の物体検出の問題点として、カーブミラーや路側構造物といったカメラ以外の要素に依存することが挙げられる。またデバイス間の通信によるアプローチは、歩行者が携帯電話等の通信機器を所持していない場合や、自動車が 2 台以上いない場合といった死角領域内の歩行者モニタリングが困難な状況が想定される。

これらの問題の解決に、電波を用いて計測を行うレーダが有望である。レーダは長波長ゆえの悪天候耐性と夜間動作に加え、回折や透過の利用によってカメラやライダーでは計測出来ない見通し外領域の情報も得られる利点を持つ。実際にレーダを用いて飛び出し予測を行う研究が近年散見され、24 GHz 帯や 79 GHz 帯といった車載用に用いられるレーダ帯域に基づく死角領域からの歩行者飛び出し予測の研究が行われている[3, 4]。これらの研究では、死角からの歩行者飛び出し予測を高精度で判別可能であることが示されているが、いずれの研究も歩行者周辺に存在する壁からの多重反射を利用した判別を行っている。そのため、レーダによる飛び出し予測が歩行者周辺に壁面が存在する場合の環境下に限定されている。この問題点を解決するため、回折波のみによる死角領域内の人体検出が一つの手法として挙げられる。例えば、24 GHz 帯レーダを用いた回折波のみによる死角内の人体検出の可能性を示した研究[5]がある。この研究から、車両の裏に存在する人体と、人体を模した円柱の分類が可能であることが示されたが、飛び出し等のための運動分類など実用的な状況は考慮されていない。

歩行者飛び出し予測のための 2.4 GHz 帯レーダを用いた死角領域検知

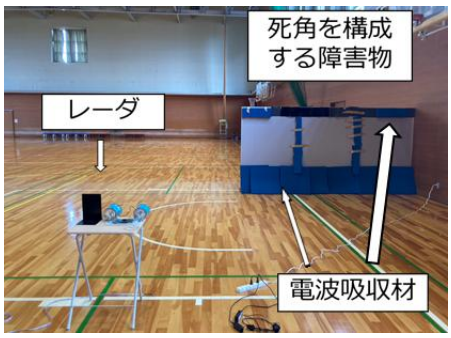
２．研究の目的

本研究の目的は、カメラ、ライダー、および 79GHz 帯レーダなどの標準的な車載センサでは直接計測できない死角領域に存在する人体を、2.4 GHz 帯のレーダ電波の回折や透過に由来する距離及び受信強度の時間的変化に基づき検知することである。2.4 GHz 帯レーダは 24 GHz 帯よりさらに低い周波数であるため、回折や透過を効率的に利用できる。しかしその反面、高い距離分解能を得ることが難しかったため、これまでに車載レーダへの活用例は無かった。本研究では 2.4 GHz 帯レーダから得られる比較的分解能の低い時間-距離-受信強度画像を入力とする畳み込みニューラルネットワークにより、飛び出しリスクの異なる歩行運動が分類可能かを調べる。死角を構成する障害物としては、透過の可能性がない完全な壁面、建物の外壁、生垣（植物で構成された塀）を対象とし、死角内の飛び出しリスクの異なる運動分類の実験検証を行う。

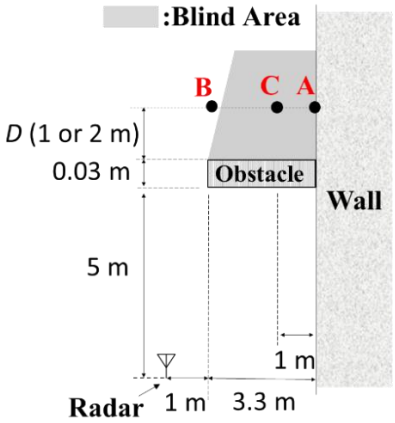
３．研究の方法

図 1 に壁面による死角の裏側の歩行運動分類実験の概観及びシステムモデルをそれぞれ示す。レーダの送信信号は 2.4–2.5 GHz の周波数変調連続波*2 であり、アップチャープのみの線形掃引を用いた。即ち、掃引帯域は 100 MHz であり、距離分解能は 1.5 m である。信号の送信間隔は 1 s とした。本研究で分類対象とする歩行運動は、その運動直後の飛び出しの可能性が異なる以下の 3 種である：

- 死角領域から可視領域への歩行(walking from Blind area to Visible area: BtoV)：直後に飛び出す可能性が高いと予想される歩行である。被験者は図 1 の A 点から B 点に向かい直進歩行した。
- 死角領域内での足踏み (Walking in Place in blind area: WiP)：死角領域内で、距離の変動はないが速度変動が大きい動作を行っていることを想定した。被験者は図 1 の C 点で足踏みを行った。
- 可視領域から死角領域への歩行(walking from Visible area to Blind area: VtoB)：死角領域内から飛び出す可能性が低いと予想される歩行である。被験者は図 1 の B 点から A 点に向かい直進歩行した。



(a) 実験の概観



(b) 実験システム

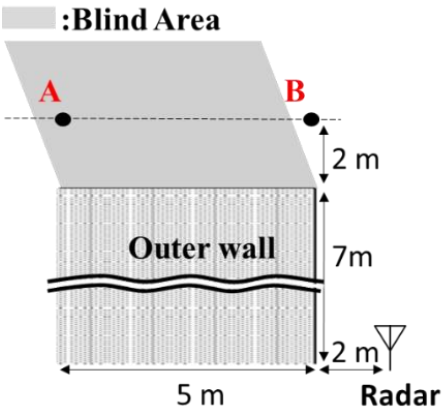
図 1　壁面により構成した死角領域実験の概要

実験環境は(i) 透過しない完全な壁面、(ii) 窓を含む外壁、(iii) 生垣の三つである。環境(i)は図 1 の通りであり、環境(ii)及び(iii)の実験の概観を図 2、3 にそれぞれ示す。いずれの環境でも周辺反射体がない場所を選定し、多重反射による受信強度が十分微弱となるようにした。環境(i)については回折が与える影響を調べるため、死角を構成する壁面から目標までの距離 D=1 m の場合と D= 2 m の場合の 2 種類の実験を行った。D =1 m の場合は比較的回折した電波が伝搬しにくい環境と考えられる。また環境(iii)における生垣は一般によく用いられるカナメモチ（広葉樹）とカイズカイブキ（針葉樹）を選び、枝葉の隙間を通ると回折が寄与することを想定した。

上述の 3 種の死角領域の歩行運動分類のための信号処理について説明する。各送信時刻における受信信号に高速フーリエ変換を適用し、縦軸に距離、横軸に送信時間をとったレンジプロファイル*3 の時間変化を作成する。得られたレンジプロファイルの時間変化を 224×224 の PNG 画像に変換し、画像認識用の畳み込みニューラルネットワークに入力した。畳み込みニューラルネットワークのアーキテクチャとして、レーダ運動認識への有効性が認められているアーキテクチャである ResNet-18 を用いた[6]。

各実験では 10 名の被験者が各歩行運動を 50 回行ったデータを取得した。即ち、各歩行運動ごとのデータ数は 500 である。このうち 350 枚を学習に用い、残りの 150 枚を精度評価のためのテスト画像とした。この分割をランダムに 10 回行い、精度評価を行った結果を平均した。

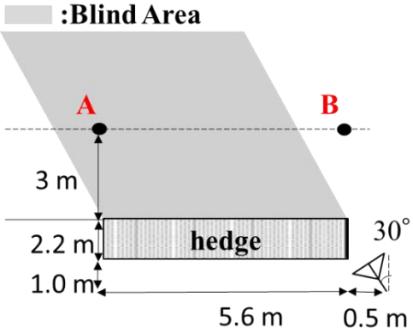
(a) 実験の概観



(b) 実験システム

図 2　環境(ii) (建物の外壁)を想定した実験の概要

(a) 実験の概観

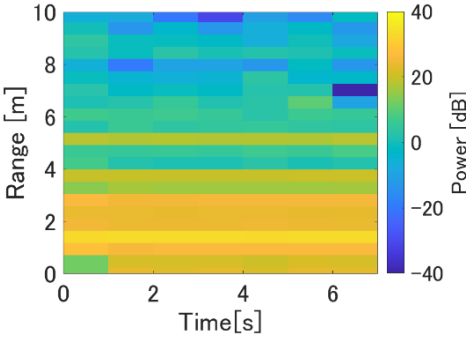


(b) 実験システム

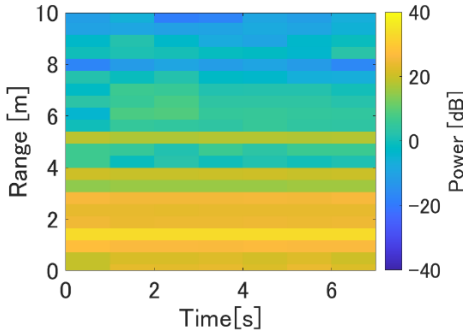
図 3　環境(iii) (生垣)を想定した実験の概要

4．研究の結果

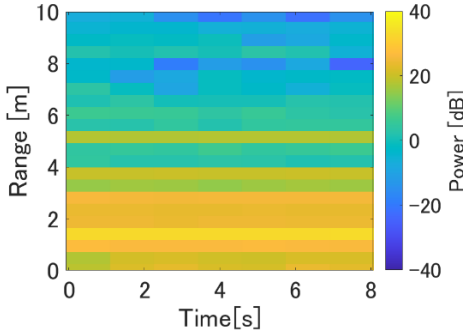
まず完全な壁面(i)において壁面から被験者までの距離が $D = 2$ m の場合における、各運動で得られたレンジプロファイルの時間変化を図 4 に示す。6 m 付近が被験者に対応するデータであるが、障害物の影響を受けており、明瞭な成分としては確認できない。また BtoV・WiP・VtoB の 3 種の運動の違いである運動方向の違いを示す距離情報の変化も明瞭には確認できない。しかし、3 種の運動で電波の反射・回折の成分が異なることに起因したわずかな違いも確認できる。このようなわずかな違いを畳み込みニューラルネットワークで学習し、歩行運動分類が可能であるかを以降で検証する。



(a) 可視領域へ近づく歩行(BtoV)



(b) 可視領域から遠ざかる歩行(VtoB)



(c) その場で足踏みする動作(WiP)

図 4　図 1 の環境における各運動のレンジプロファイルの時間変化画像の例

表 1　環境(i)において $D = 2$ m の場合の混同行列

Estimated＼True	WiP	BtoV	VtoB
WiP	99.1%	1.8%	0.8%
BtoV	0.8%	95.2%	4.2%
VtoB	0.1%	3.0%	95.0%

表 2　環境(i)において $D = 1$ m の場合の混同行列

Estimated＼True	WiP	BtoV	VtoB
WiP	98.1%	3.3%	5.1%
BtoV	0.3%	90.8%	5.4%
VtoB	1.6%	5.9%	89.5%

環境(i)において $D = 2$ m の場合の分類結果を表 1 に示す。平均識別率は 96.4%であり、高精度な分類を達成した。また、飛び出しリスクのある被検者を飛び出しリスクなしと誤判定しないことが重要であるが、その可能性は、BtoV を WiP と誤った割合は 1.8%、BtoV を VtoB と誤った割合は 3.0%と、十分に低いという結果となった。また表 2 に、$D = 1$ m の場合の分類結果を示す。平均識別率は 92.8%であり、BtoV を WiP と誤った割合は 3.0%、BtoV を VtoB と誤った割合は 3.3%であった。飛び出しリスクの高い運動を飛び出しリスクが低いと誤判別する確率は低いものの、識別率は $D = 2$ m の場合と比較して低下した。回折した電波が伝搬しにくく、受信強度が微弱となったことが要因と考えられる。しかし、回折電波しか利用できなくかつ、その電波の伝搬が比較的少ない場合でも 90%を超える精度を達成し、本手法の実用可能性を示唆する結果となった。

外壁環境(ii)の分類結果は、平均識別率 99.7%、BtoV 再現率 99.4%であった。この環境では環境(i)で利用可能な回折波に加え、窓による透過波も利用可能であったため、飛び出しリスクの分類が高精度に可能であったと考えられる。

生垣環境(iii)の結果は、カナメモチとカイズカイブキのそれぞれについて平均識別率 96.7%及び 96.9%であった。広葉樹と針葉樹のいずれにおいても 2.4

GHz 帯では透過成分による高精度な識別が可能であることを示す。一方で、回折波のみの環境(i)と比較して、多様な電波伝搬パスが考えられることから、それらも微小な違いとして検出されやすく、誤差の要因となったことが考えられる。

以上の結果から、周辺に壁などの反射物がなくマルチパスが得られない環境下にて、死角領域を構成する障害物の特性に応じた回折波及び透過波の活用により、死角領域内の人体検知が可能とわかった。また、飛び出しリスクの異なる歩行運動の分類が、畳み込みニューラルネットワークにより僅かな違いを検出することで可能と示された。

５．将来展望

本研究は、回折・透過という波動伝搬そのものに立脚して死角内の情報を抽出する枠組みの有効性を示したが、さらなる実装に向けた課題も明らかになった。第一に、距離分解能の改善である。複数アンテナ化や複数配置の合成などにより、死角の奥側でも安定して距離変化を捉えられる可能性がある。第二に、速度情報の活用である。現状は時間-距離画像に基づくが、ドップラー効果に基づき取得できる距離-速度画像を併用すれば、進行方向の非対称性をより頑健に抽出でき、レーダへ近づく動作の識別精度改善が期待できる。なおこの検討については筆者らの研究により 24 GHz 帯については有効性が示されており[4]、2.4 GHz 帯でも同様に有効と考えられる。

また長期的な展望として、本稿の結果を通常の車載レーダで用いられる周波数帯の計測と組み合わせることで、高分解能と死角領域検知の両立が可能である。この複数周波数を用いるマルチ周波数帯レーダの開発を目標とし、既に関連する研究成果を報告済み[7, 8]、あるいは報告予定である。これに加え、カメラやライダー等の他センサとの融合による誤報抑制や検知範囲拡大も検討したい。

おわりに

本研究は、2.4 GHz 帯レーダの回折・透過という物理的利点を活かし、透過の無い壁・窓のある外壁・生垣という多様な障害物下で、死角領域内の歩行者検出と飛び出しリスクに基づく歩行運動分類を実証した。今後は、分解能・速度情報・環境適応・実装の四軸で改良を重ねることで、より実用に近い路側・車載シナリオでの適用性を高め、交通の安全性向上に資する技術成熟を目指す。

なお将来展望でも言及したとおり、これらの改良のために、2.4 GHz 帯レーダシステムのみでなく、79GHz 帯などの他の周波数帯のレーダと組み合わせたマルチ周波数帯レーダを開発している。なお未発表の成果を多く含むため、マルチ周波数帯レーダについては本稿では記述しなかったが、実環境下での実験検討に基づき研究開発を続けている。

用語解説

*1 畳み込みニューラルネットワーク　画像認識に特化した深層学習モデルであり、通常のカメラ等の画像処理において顔認証や医療画像診断等に活用されている。カメラ画像とは性質が大きく異なるレーダ画像であっても、物体や運動の分類に有効であることが知られている。

*2 周波数変調連続波　時間と共に周波数が変化する信号を送信し、その反射波との周波数差に基づき対象までの距離を検出することを狙ったレーダの送信信号である。この信号を用いたレーダは FMCW (Frequency-modulated continuous wave) レーダと呼ばれ、現在の車載レーダの主流となっている。

*3 レンジプロファイル　横軸を距離、縦軸を受信強度として、どの距離に物体が検出されているかを示すレーダデータ表示法である。各送信信号ごとに得られたレンジプロファイルを、色を受信強度として描くことで図 4 の画像が得られる。

参考文献

[1] M. Peña, D. Gutierrez, and J. Marco, "Looking Around Flatland: End-to-End 2D Real-Time NLOS Imaging," IEEE Transactions on Computational Imaging, vol. 11, pp. 189–200, 2025.

[2] 和田友孝, "自動運転と運転支援のための ITS 無線通信システムとその動向", IEICE Fundamentals Review, vol. 12, pp. 248–258, 2019.

[3] Y. Xu, G. Liu, T. Jiang, "Leveraging rough-relay-surface scattering for non-line-of-sight mmWave radar sensing," IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, pp. 10964–10978, 2023.

[4] S. Hayashi, K. Saho, D. Isobe, and M. Masugi, "Pedestrian detection in blind area and motion classification based on rush-out risk using micro-Doppler radar," Sensors, vol. 21, Art. no. 3388, 2021.

[5] J. He, S. Terashima, H. Yamada, and S. Kidera, "Diffraction Signal-Based Human Recognition in Non-Line-of-Sight (NLOS) Situation for Millimeter Wave Radar," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol.14, pp. 4370–4380, 2021.

[6] Y. Lang, Q. Wang, Y. Yang, C. Hou, Y. He, and J. Xu, "Person identification with limited training data using radar micro-Doppler signatures," Microwave and Optical Technology Letters, vol.62, No.3, pp.1060–1068, 2020.

[7] 寺分琉斗, 自見圭司, 佐保賢志, "ミリ波 MIMO レーダによる多目標追尾を用いた自車位置・周辺環境推定の基礎実験", 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 124, no. 394, pp.7–11, 2025.

[8] 飯田 諒介, 斎藤 飛真, 欲賀 俊行, 佐保 賢志, "2.4GHz 帯及び 24GHz 帯レーダによる生垣の裏側に存在する歩行者検知の実験的検討", 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 122, no. 190, pp.7–11, 2022.

関連文献

1. Y. Nakaoka and K. Saho, "Classification of Dart-out Risks of Pedestrians in Tree-occluded NLOS Areas Using a 2.4 GHz FMCW Radar," The 47th PIERS (PhotonIcs and Electromagnetics Research Symposium), Accepted, 2025.
2. 飯田 諒介, 神谷 和秀, 孔 祥博, 橋本 周平, 佐保 賢志, "2.4GHz 帯レーダの回折波を用いた死角領域からの歩行者飛び出し予測の基礎実験検討", 電気学会論文誌 C（電子・情報・システム部門誌), vol. 144, pp. 404–405, 2024.
3. R. Iida, K. Kamiya, X. Kong, and K. Saho, "Prediction of Pedestrian Dart-out from Behind Hedges Using 24 GHz FMCW Radar," LSBE: The International Conference on Life Science & Biological Engineering, ID 68, 2024.
4. R. Iida, K. Kamiya, X. Kong, and K. Saho, "Classification of Rush-Out Risk of Pedestrians in Blind Area Using 2.4 GHz FMCW Radar," The 2023 International Symposium on Advanced Technologies and Applications in the Internet of Things (ATAIT 2023), pp.99–103, 2023.

この研究は、令和３年度ＳＣＡＴ研究助成の対象として採用され、令和４～６年度に実施されたものです。