

車載レーダ向け歩行者・路側物 識別方式

高柳 優*
Yu Takayanagi
小西響介†
Kyosuke Konishi
影目 聡*
Satoshi Kageme

亀田洋志‡
Hiroshi Kameda
諏訪 啓*
Kei Suwa

Pedestrians and Roadside Objects Classification Method for Automotive Radar

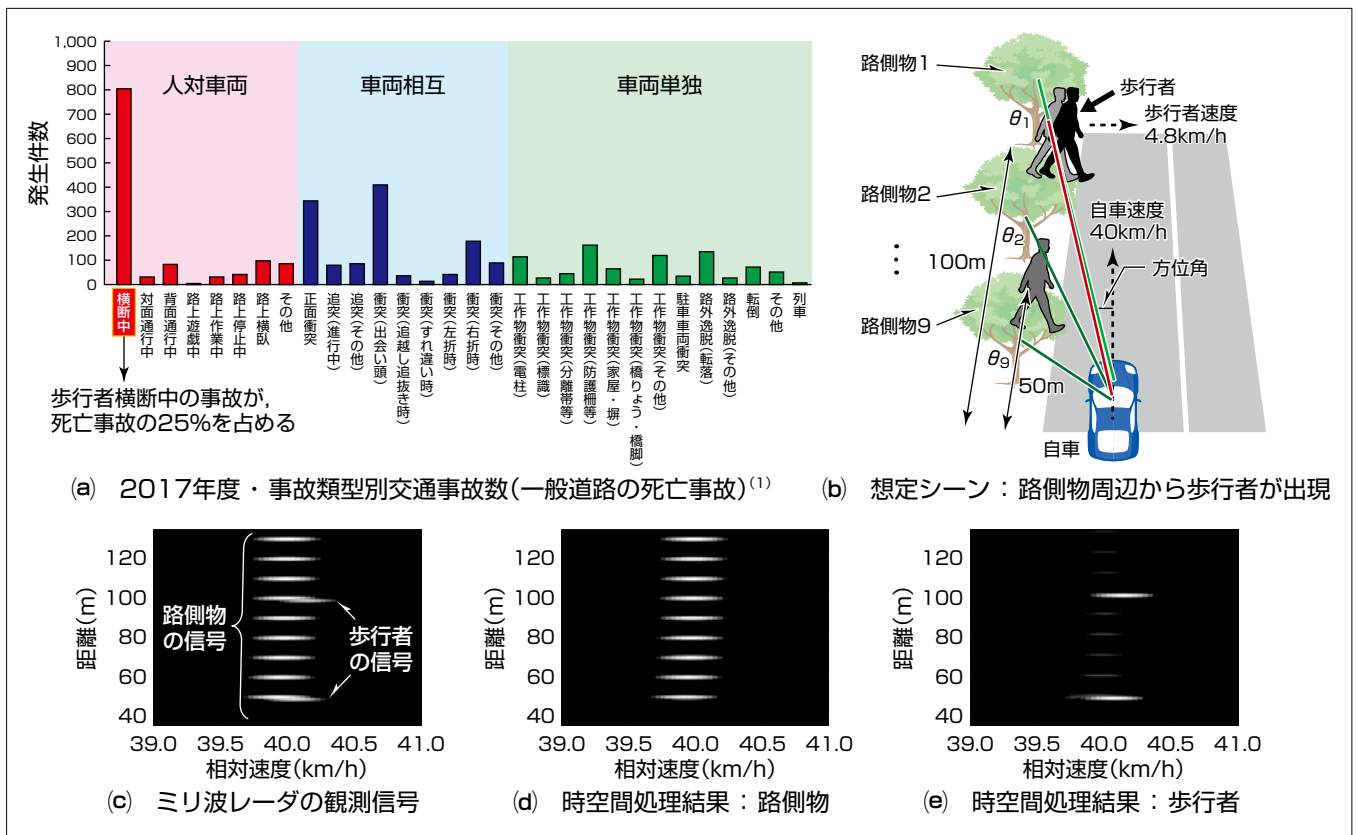
要 旨

2021年3月、自動運転レベル3(条件付運転自動化)が商用化された。2040年頃と言われるレベル5の完全自動運転の実用化に向けて、センサ性能の向上は重要な課題の一つである。例えば、一般道路での死亡事故全体の25%を占める横断中の歩行者と車の事故⁽¹⁾を回避するためには、路側から現れた歩行者を早期に検知できるセンサが必要である。夜間や悪天候下でもこれを実現するセンサとしてはミリ波レーダが有望であるが、現在実用化されているミリ波レーダでは分解能が低く、歩行者の早期検知は極めて困難である。

そこで、三菱電機では、安全かつスムーズな自動運転を

実現するために、ミリ波レーダの角度分解能の向上と、高分解能なミリ波レーダのための信号処理技術の開発に取り組んでいる。

今回、ミリ波レーダで、路側から横断を始める歩行者を周囲の路側物の中からいち早く検知・識別するための、時空間処理による信号識別方式と、識別した歩行者の信号に対して遅滞なく追尾を開始するための分離目標向けLMBフィルタ(Labeled Multi-Bernoulli filter)を応用した追尾開始方式を開発した。これらの方式によって、横断中の歩行者と車の事故低減への貢献が期待される。



ミリ波レーダによる横断歩行者の早期検知方式

図(a)は2017年度の一般道路の死亡事故発生件数である。横断中の歩行者と車の事故が最も多く、全体の25%を占めている。このような事故を回避するためには、図(b)のように路側から歩行者が横断を開始する場面で、歩行者をいち早く検出して追尾することが必要になる。このような場面で観測されるミリ波レーダの信号は図(c)に示すようになり、歩行者の信号は路側物からの反射信号に埋もれて検出が困難である。時空間処理を適用することによって、図(d)と図(e)に示すように、路側物と歩行者の信号を分離することが可能になる。

1. ま え が き

近年、自動運転の技術は目覚ましい勢いで進化を遂げており、2021年3月には自動運転レベル3が商用化され、レベル5の完全自動運転も2040年頃までには実用化が始まるとみられている。完全自動運転に向けては、まだクリアすべき技術課題も多く、中でもセンサ性能の向上は重要な課題の一つである。例えば、一般道路での死亡事故全体の25%を占める横断中の歩行者と車の事故を回避するためには、路側から現れた歩行者を早期に検知できるセンサが必要である。夜間や悪天候下でもこれを実現するセンサとしてはミリ波レーダが有望であるが、現在実用化されているミリ波レーダでは分解能が低く、歩行者の早期検知は極めて困難である。このような課題認識の下、当社では、安全かつスムーズな自動運転を実現するために、ミリ波レーダの角度分解能の向上を進めるとともに、高分解能なミリ波レーダのための信号処理技術の開発に取り組んでいる。

本稿では、角度分解能の高いミリ波レーダを用いて、路側物と歩行者の信号を識別して歩行者を検知する信号識別方式及び検出された歩行者の信号に対して遅滞なく追尾を開始する追尾開始方式について、それぞれ、方式と計算機シミュレーションによる評価結果例について述べる。

2. 歩行者・路側物の信号識別方式

路側物と歩行者の信号を識別する方式について述べる。想定する場面として、図1に示すように、50mと100m先の路側物(樹木等)の間から歩行者が横断を開始する状況を考える。自車速度は40km/hとし、表1に想定するレーダ諸元を示す。また、路側物9点を10m間隔で並べて、歩行者はどちらも道路を横断する方向に4.8km/hで移動するものとした。このような場面で、従来のミリ波レーダで観測される観測信号は図2に示すようなものになる。図2の縦軸はレーダから目標物までの距離、横軸は目標物の相対速度を表している。図2から、路側物の相対速度は40km/h付近で、距離によってわずかに異なることが分かる。また、歩行者の相対速度も距離によって異なり、50m先の歩行者の相対速度と、120m先の路側物の相対速度はほぼ一致している。つまり、相対速度の情報だけから路側物と歩行者を分離・識別することは不可能であるということがこの図から分かる。

そこで、路側物の相対速度と方位角の関係を利用することを考える⁽²⁾。路側物と自車の相対速度 $v_{obj}(\theta_t)$ (m/s)は、自車の速度 v_{car} (m/s)と、自車の移動方向に対する路側物の位置の方位角 $\theta_t(^{\circ})$ と式(1)の関係を満たす。

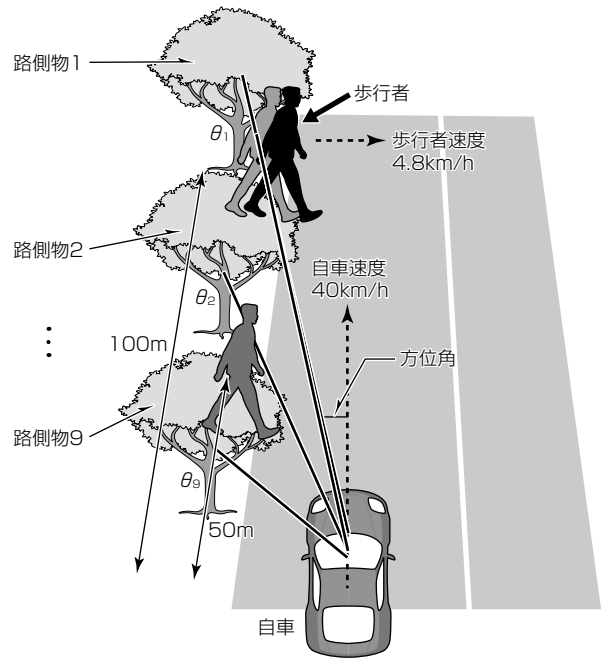


図1. 想定する場面

表1. レーダ諸元

パラメータ	設定値
MIMO方式	時分割
変調方式	FMCW
中心周波数	76.5GHz
帯域幅	200MHz
サンプリング周波数	20MHz
チャープ変調時間	50μsec
速度分解能	0.071km/h

MIMO : Multiple-Input Multiple-Output
FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave

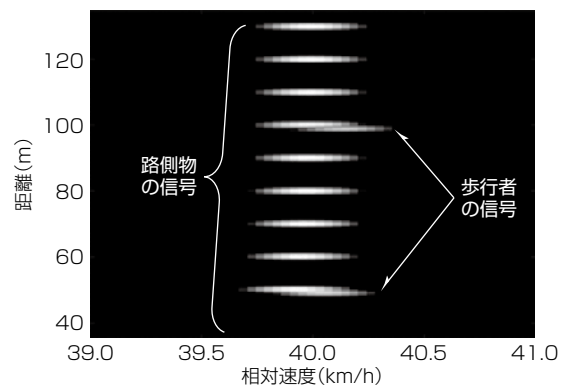


図2. ミリ波レーダの観測信号

$$v_{obj}(\theta_t) = v_{car} \cos \theta_t \quad \dots \dots \dots (1)$$

一方、歩行者の相対速度は、歩行者の速度分が加算される。例えば、歩行者の速度を自車の進行方向に対して直角に(道路を横断する方向に) v_{ped} (m/s)とすると、自車との相対速度は路側物の相対速度に対して $v_{ped} \sin \theta_t$ (m/s)だけ加算された値になる。

$$v_{ped}(\theta_t) = v_{car} \cos \theta_t + v_{ped} \sin \theta_t \quad \dots \dots \dots (2)$$

図3に、受信信号の相対速度と方位角の関係を示す。路側物の方位角は1〜4°付近に分布しており、方位角と相対速度が式(1)の関係を満たす曲線に沿って現れている。また、歩行者の信号は、この曲線から外れたところに発生していることを確認できる。式(1)の関係は自車速度によって一意に決まるため、自車速度が既知であれば、方位角-相対速度の図上で路側物の信号が現れる場所を特定できる。開発方式では、この関係を利用して路側物と歩行者の信号を識別する。

図4と図5に、開発方式によって分離・識別された路側物と歩行者の信号をそれぞれ示す。図4は、受信信号の中

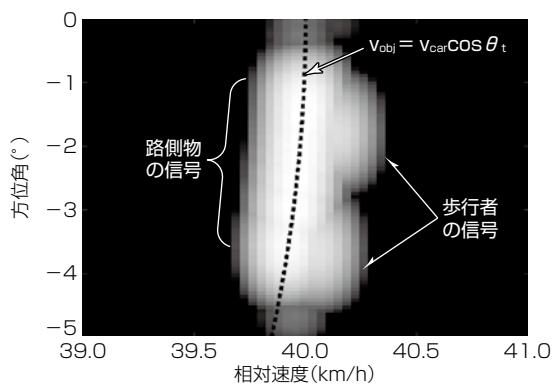


図3. 相対速度と方位角の関係

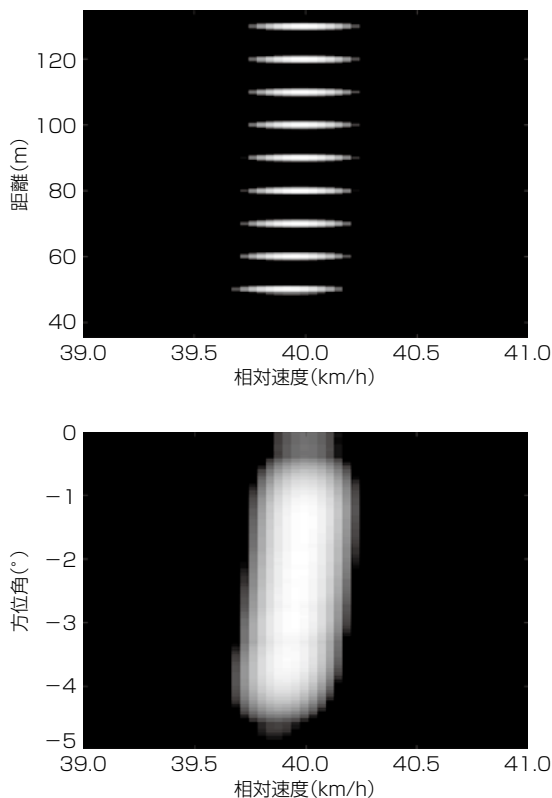


図4. 路側物の信号

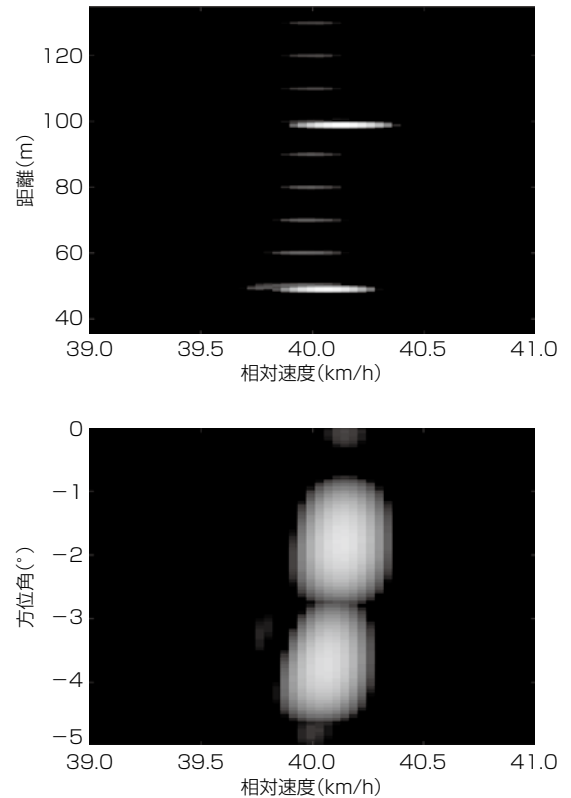


図5. 歩行者の信号

で、方位角-相対速度関係が式(1)の関係を満たすものを抽出した結果である。一方、図5は、受信信号から図4に示す静止目標信号を時空間処理によって差し引いた結果である。図4を図2及び図3と比較すると、路側物の信号が正しく抽出され、歩行者の信号が消滅していることが確認できる。また、図5を図2及び図3と比較すると、路側物の信号が抑圧され、歩行者の信号が残っていることを確認できる。このように、時空間処理によって歩行者の信号を検出することが可能になる。

なお、図5では、路側物の信号が若干消え残っている様子も観察されるが、これは路側物の反射強度を相対的に大きく設定したことに起因している。路側物の反射は歩行者よりも大きい傾向があるため、検出段階では路側物も検出されることは不可避である。この問題は追尾処理を工夫することで解決する。

3. LMBフィルタによる歩行者・路側物の追尾開始方式

路側物付近から現れる歩行者を検出したら、周囲に残った路側物の信号と歩行者の信号を素早く識別して遅滞なく追尾を開始する必要がある。そこで、より少ない観測回数で路側物と歩行者を識別して個別に追尾を開始するために、分離目標向けLMBフィルタを用いた追尾開始方式を開発した。

追尾開始が最も難しいのは、路側物のすぐ脇から歩行者が出現するようなケースである。開発方式では、このような場合に備えて、近接する路側物と歩行者を早期に追尾開始するために分離目標向けのLMBフィルタ⁽³⁾を用いる。分離目標向けのLMBフィルタでは、1個の目標(第1目標)から別の目標(第2目標)が分離出現する過程をモデル化した状態遷移モデルを用いる。第1目標及び第2目標が存在する場合/存在しない場合の計4状態間の遷移を予測する機能を設けたことで、従来のLMBフィルタに比べて少ない観測回数で子目標の出現が推定可能になる。路側物周辺から出現する歩行者を追尾する場合、路側物が第1目標、歩行者が第2目標に該当する。さらに、開発方式ではドップラー速度の観測値も入力として、二次元位置及びドップラー速度の合計三次元の状態空間内で、目標の個数を推定する。これによって、静止している路側物の近傍から移動している歩行者が出現した際に、路側物と歩行者の相対距離が車載レーダの位置分解能以内であっても、ドップラー速度の違いによって歩行者の追尾開始が可能になる。

開発方式の性能を100試行のモンテカルロシミュレーションによって評価した。観測時間0.00~3.00秒のうち、第1目標(路側物)は時刻1.00秒に観測領域内に現れ、第2目標(歩行者)は時刻2.00秒に第1目標の周辺から現れるとする。また、観測間隔は0.05秒とし、分解能は0.73m(距離)、0.0078rad(方位角)、0.115km/h(ドップラー速度)とした。各目標の検出確率は0.75とし、誤検出確率は 1.0×10^{-7} とした。なお、比較対象として従来方式のLMBフィルタ⁽⁴⁾の性能も併せて評価した。

シミュレーション評価の結果として、各時刻での目標個数推定値(100試行平均)を図6に示す。追尾開始性能としては、目標個数推定値の増加が早いほど望ましい。時刻1.00秒に出現する第1目標(路側物)に関しては、従来方式と開発方式の結果に相違はなかった。これは、どちらの方式も追尾開始する過程が同一であることに由来する。一方、時刻2.00秒に出現した第2目標(歩行者)に関しては、従来方式よりも開発方式の追尾開始時間が短縮している。目標個数推定値が1.98を超えるまでの時間(100試行中98回で追尾開始するまでの時間)で比較すると、従来方式の0.8秒に対して、開発方式は0.25秒で0.55秒短縮した。この結果から、従来方式に比べて、分離目標向けLMBフィルタが、路側物周辺から出現する歩行者に対する追尾開始に優れていることが確かめられた。

これによって、分離目標向けLMBフィルタによって路側物周辺から出現する歩行者の追尾開始性能が向上することを示した。今後は、実験データによるこの開発方式の検証、及び3目標以上を対象とする方式拡張の検討を行う。

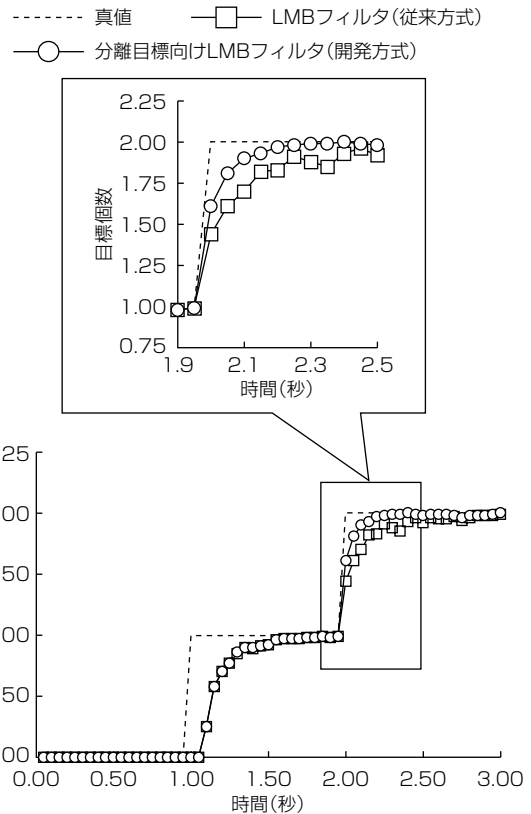


図6. シミュレーション評価結果

4. むすび

角度分解能の高いミリ波レーダを用いて、路側物と歩行者の信号を識別して歩行者を検知し、遅滞なく追尾を開始するための信号処理方式について述べた。時空間処理によって路側物の周辺から4.8km/hで横断を開始する歩行者と路側物の信号を分離し、分離目標向けLMBフィルタによって追尾を開始する。計算機シミュレーションによる評価の結果、100m先で路側から現れる歩行者と路側物を識別・検知し、100試行中98回について、0.25秒で追尾を開始できることを確認した。

参考文献

- (1) 警察庁交通局：平成29年中の交通死亡事故の発生状況及び道路交通法違反取締り状況等について(2018)
<https://www.e-stat.go.jp/stat-search/file-download?statInfId=000031674176&fileKind=2>
- (2) 一般財団法人 日本自動車研究所：ITS車載機器標準化のための要素機能と試験方法に関する調査研究【車両周辺障害物の電波反射特性に関する調査研究】(2005)
<http://www.jari.or.jp/Portals/0/ja/kankohbutsu/hokoku/its/hyojyun/abstract/archi87.htm>
- (3) 小西響介, ほか：LMBフィルタによる小型分離目標検出アルゴリズム, 2017年電子情報通信学会 通信ソサイエティ大会, B-2-13(2017)
- (4) Reuter, S., et al.: The Labeled Multi-Bernoulli Filter, IEEE Trans. on Signal Processing, 62, No.12, 3246~3260 (2014)