



複数のミリ波レーダによる車両追跡機能の実装と評価

Vehicle Tracking with Multiple Millimeter Wave Radar

白永 英晃*
Hideaki Shiranaga

東 篤司
Atsushi Higashi

持田 英史
Eiji Mochida

東田 宣男
Nobuo Higashida

小河 昇平
Syohei Ogawa

葉若 秀樹
Hideki Hawaka

路上事故の削減や、渋滞の緩和のため、道路上の車両を検知するインフラセンサの需要が世界的に高まっている。インフラセンサとしては、広域にわたる道路を走行する車両を検知し、追跡を行うために、複数のセンサを設置し、それらが連携することが求められる。当社はこのようなニーズに対応するため、複数のインフラミリ波レーダを連携させるための機能を開発し、実道路に設置して実験を行い評価した。本稿では、開発した機能と評価結果について報告する。

For reducing traffic accidents and congestion, the need for infrastructure sensors is increasing worldwide. In order to cover a large area, multiple infrastructure sensors are deployed and work together to detect and track vehicles. We have developed a system and detection algorithm to integrate multiple infrastructure millimeter radars. In this paper, we present the features of the system and the results of field tests.

キーワード：安全運転、渋滞緩和、ミリ波レーダ

1. 緒言

自動運転時代の到来に向け、安全で円滑な交通環境を目指し、高速道路やその合流部での車両の検知や、一般道路での車両や歩行者を検知するセンサの需要が高まっている。そのなかでインフラセンサは、ドライバーから見えない領域での車両や歩行者の動きや、事故などの情報を収集し、先読み情報として提供する役割を果たすことが求められている。

センサとしては、ミリ波レーダ型、カメラ型、Lidar型などが用いられているが、その中でミリ波レーダは、表1のように天候や明暗の変化への耐性に優れ、定期的な清掃の必要性が少なく保守の負担が軽微であることから、インフラセンサとして適している。

当社は、高いアンテナ設計技術と、対象物を検知する独自のアルゴリズムを活かして、広い検知範囲と高い検知精度を実現し、2018年3月から歩行者検知用のインフラミリ波レーダの製品出荷を開始している。

さらに当社は、インフラミリ波レーダの小型化や低コスト化を行うとともに、高速道路などの広いエリアをカバーするために、図1のように、複数のミリ波レーダを設置して連携させる取り組みを行ってきた。この連携機能により、複数のミリ波レーダが検知情報を共有することで、広いエリアの検知が可能になり、各ミリ波レーダの検知エリア間を跨いで走行する車両の追跡も可能になる。当社はこのような機能を開発し、実道路にて実験を行った。本稿では、開発した機能と評価結果について報告する。

表1 インフラセンサの比較

項目	ミリ波レーダ	カメラ	Lidar
検知距離	○	△	△
距離精度	○	△	○
速度精度	○	△	△
形状把握	×	○	△
耐候性	○	×	△
保守性	○	△	△
コスト	○	○	△

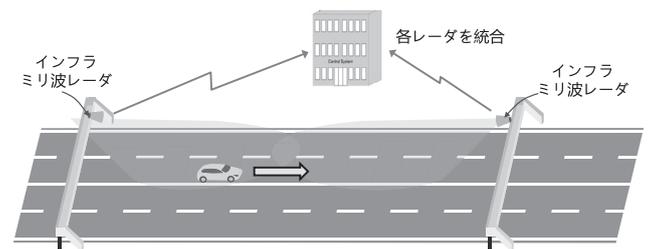


図1 複数のインフラミリ波レーダの連携

2. ミリ波レーダの仕様

開発したミリ波レーダの構成、仕様、外観を、それぞれ図2、表2、写真1に示す。本章では、ミリ波レーダの原理と、当社のミリ波レーダの特長について説明する。

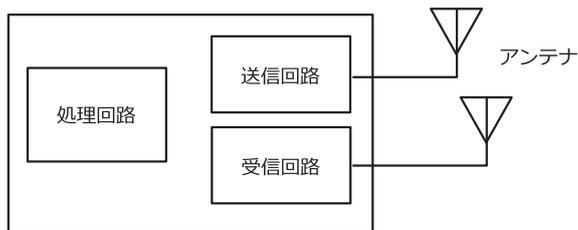


図2 ミリ波レーダの構成

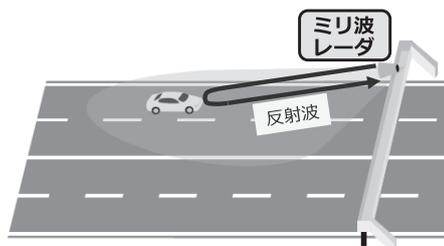


図3 ミリ波レーダによる車両検知の例

表2 インフラミリ波レーダの仕様

変調方式	FMCW
電源電圧	90~220V (AC)
消費電力	25W以下
周波数帯	76.0~77.0GHz
帯域幅	1GHz以下
送信電力	10mW
温度範囲	-25~65度
寸法	245×245×50mm
重量	3.5kg以下 (取付け金具を含む)

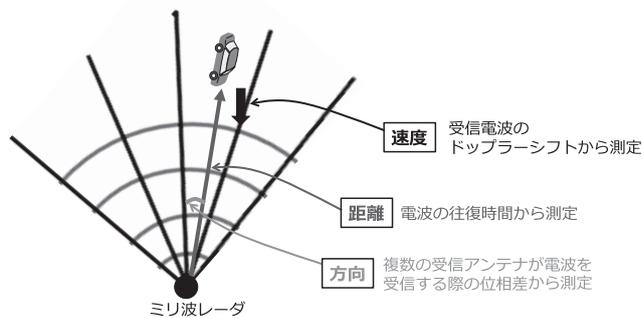


図4 ミリ波レーダによる物体計測の原理

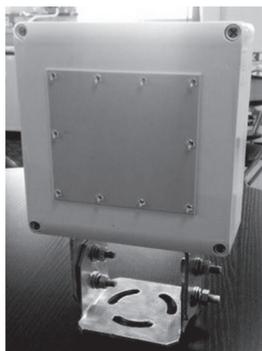


写真1 ミリ波レーダの外観

2-1 ミリ波レーダの原理

インフラミリ波レーダは、図3のように路上のガントリーやポールなどに設置したレーダから電波を送信し、対象物体から受信した反射波を解析する。レーダ方式には、FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) を採用した。本方式は、図4のように、対象物体からの反射波受信までの時間を測定し、対象物体の距離を算出する。また、ミリ波レーダ内に配置される複数の受信アンテナが反射波を受信する際の時間差から生じる位相差をもとに、対象物体の方向を算出する。さらには、受信した電波のドップラーシフトをもとに、対象物体の速度を検出する。このようにして得た対象物体の位置（距離と方向）と速度の時系列データから、対象物体の種別（車両、歩行者、固定物など）も、検知アルゴリズムを用いて判別する。

2-2 特長

ミリ波レーダの一般的な特長を(1)に、当社が開発したミリ波レーダの特長を(2)(3)に示す。

(1) 優れた耐環境性能と保守性

ミリ波レーダは、昼/夜の明暗の差の影響を受けず、天候による電波伝搬特性への影響も少ないため、雨/雪/霧等の悪天候にも強い。また、カメラ型センサなどの光を検知するセンサでは、それらのレンズ面が汚れると性能が劣化するため、定期的な清掃を必要とするが、ミリ波の場合は筐体が汚れても透過性能への影響は少ないため清掃作業は不要で、保守性にも優れている。

(2) 高い検知精度

当社が開発した検知アルゴリズムでは、反射波から対象物の特徴情報を解析することにより車両と歩行者を分別したうえで、追跡してその動きを推定する機能を搭載した。これにより、電波が一時的に大型の物体に遮断された場合にも、推定機能により補完し追跡が可能となり、対象物を連続的に高い精度で検知可能である。

(3) 広い検知エリア

当社のアンテナ設計技術により、対象とする道路形状に合わせた検知エリアを形成することが可能である。また、受信アンテナの配置と、検知アルゴリズムの組み合わせにより、受信した反射波のノイズを軽減させる処理を行うことで、小さな受信レベルの反射波からでも検知できるようにしている。このようなアンテナ設計技術と検知アルゴリズムにより、広い検知エリアを実現している。

3. 複数レーダの連携機能

この章では、当社が開発した車両検知アルゴリズムと、それを拡張して、複数のレーダを連携させて広いエリアの車両を検知し、さらに複数のミリ波レーダの検知エリアを跨いで走行する車両の追跡を行えるようにした連携検知アルゴリズムや、複数レーダの連携を実現するための仕組みについて紹介する。

3-1 車両検知アルゴリズム

筆者らは、対象物を検知するアルゴリズムとして、時系列フィルタ^{*1}を用いた追跡ロジックを考案した。追跡ロジックでは、まず反射波の強さが閾値以上の物体の位置と速度を「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5**に示す状態遷移図に従い状態を変化させる。「車両候補状態」は、「観測値」が抽出された場合にはじめに遷移する状態であり、時系列フィルタの誤差分布の収束を待つ。「車両検知状態」は、追跡対象を車両として認識した状態であり、誤差分布が収束して車両らしさを表す条件を満たすと本状態に遷移する。このときに、個別の車両IDを付与する。また、車両候補状態、車両検知状態において一定時間以上連続して「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。

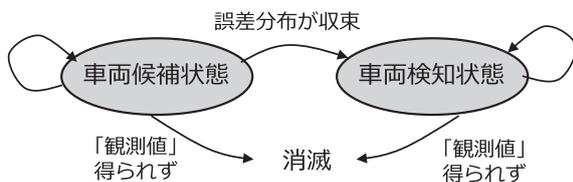


図5 追跡対象の状態遷移図

本ロジックを適用することで、大型車などからの強い反射波により、小型車からの相対的に弱い反射波が埋もれてしまった場合や、大型車などの後ろに隠れてしまい、一時的に電波が遮断されてしまう場合にも、車両の検知を継続することが可能である。さらには、車両からの反射波を再び受信できるようになった際には、「車両検知状態」を継続する時間内であれば、同じ車両IDを維持するので、その車両が隠れる前と同一の車両であるとの認識（紐づけ）を行うことが可能である。

3-2 複数レーダの連携

高速道路などの広いエリアを複数のミリ波レーダがカバーする方法として、各レーダを個別に動作させ、各レーダが検知した車両データを後処理により統合する方法が考えられる。しかしこの方法では、各レーダの検知エリアが重なる箇所において異なる検知結果を得た場合に、どちら

のレーダの検知結果を採用するか判断ができなくなる。また、違法な走行をする車両などを追跡したい場合に、各レーダが個別に動作していると、検知した車両を紐づけることが難しくなる。

そこで筆者らは、複数のレーダが、前項における反射波の強さが閾値以上の物体の位置と速度をそれぞれ抽出し、それらの情報を、1つに統合した仮想的な大きなマップ上にプロットした。そのうえで、**図5**に示す状態遷移フローも複数レーダ間で統合し、あたかも単一のレーダのように車両検知アルゴリズムを動作させ単一の検知結果を出力させるようにした。このようにすることで、各レーダの検知エリアが重なる箇所での検知アルゴリズムをシームレスに繋げられ、さらには各レーダの検知エリアを跨いで走行する車両の追跡も可能とした。

このように、複数レーダからのデータを一つの車両検知アルゴリズム上で統合させるためには、複数のレーダが同じ時刻に基づいて動作させる必要がある。そこで、**図6**のように複数のレーダがNTP (Network Timing Protocol) サーバから時刻情報を取得することで、時刻を同期させた。なお、このような連携機能は、**図1**のように各レーダからの情報をサーバやエッジなどに集約することで実現できる。

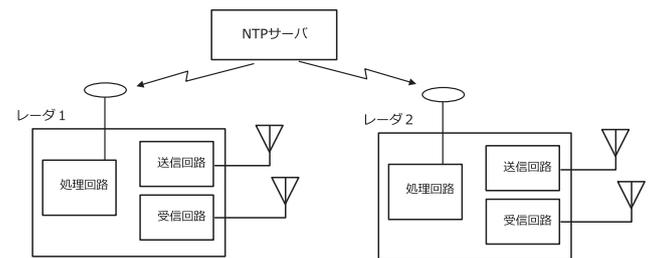


図6 レーダ間の時刻同期

4. 実道路での性能評価実験

開発したミリ波レーダと連携機能を用いて、兵庫県内の実道路にて性能評価実験を行った。

4-1 実験環境

図7は、実験時の機器設置状態を表した概略図である。約400m離れた2つの歩道橋の上に、ミリ波レーダを向かい

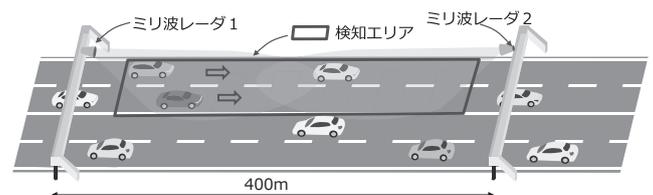


図7 実験時の機器設置

合わせて仮設し、それらの間の、レーダ直下部を除く片道2車線上の車両を検知対象とした。レーダの設置位置は、路面から約7mの高さである。

写真2の左に設置した機器を、同右に検知対象の道路の写真をそれぞれ示す。写真2左のように、ミリ波レーダとカメラを併設し、カメラ映像からカウントした車両台数と、ミリ波レーダが検知した車両台数とを比較することにより、ミリ波レーダの検知精度を検証した。検知エリアは、写真2右の台形で囲った枠内（2式のレーダの各直下付近を除く約350mの区間）とした。

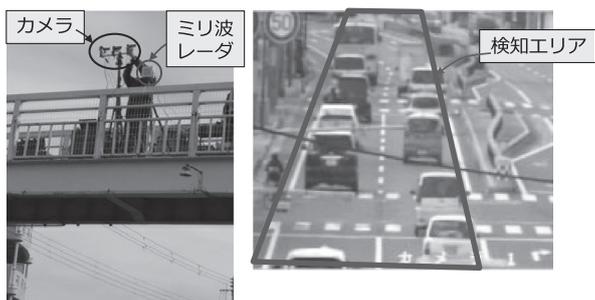


写真2 設置した機器と検知対象の道路

4-2 検知した車両の追跡

本実験により得たミリ波レーダによる車両検知結果を、カメラ映像と比較した例を図8に示す。この図では、検知エリアのうち上流側（図7におけるミリ波レーダ1に近い側）の約50m分の区間を示している。ミリ波レーダは、検知した車両に対して順にIDを付与する。図8の区間では、6台の車両が走行しているが、そのすべてをミリ波レーダが検知し、それぞれの車両IDを付与している。

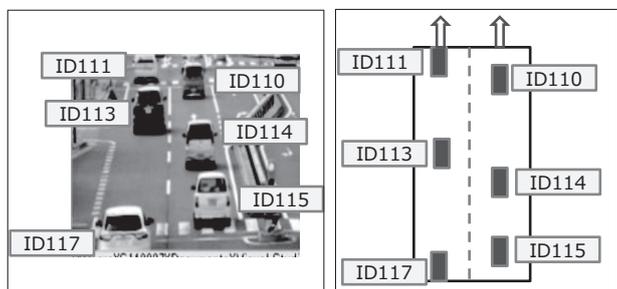


図8 カメラ映像とミリ波レーダの検知結果

これらの車両は、数十秒後にはミリ波レーダ2が検知する領域に入るが、走行の間に車両間隔に変動があるにもかかわらず、図9に示すように同一のIDの車両として追跡できていた。（図9は、ミリ波レーダ2に近い側の約50mの区間であり、図8とはカメラ映像とミリ波レーダの検知結果ともに進行方向と左右が逆であることに注意）

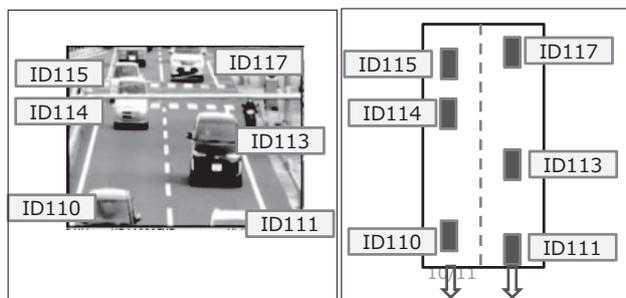


図9 2式のミリ波レーダによる車両の追跡

4-3 検知精度の評価結果

本実験において、検知精度の評価指標は以下を用いた。

- (a) ミリ波レーダが検知した60秒間の車両台数
- (b) 実際の60秒間の車両台数

$$\text{検知精度} = (1 - |(b-a)/b|) \times 100 [\%]$$

上記の式における (b) の実際の車両台数は、併設したカメラ映像をもとに手動でカウントしたものである。

この指標を用いて、9分間に検知エリアを通過した全4,585台の検知精度を評価した結果を図10に示す。

開発した複数レーダの連携機能により、検知精度の平均が95.9%と、高い精度を得ることができた。また、2式のレーダの検知エリアを跨いで走行する車両については、右折や左折により検知エリアから抜けてしまう車両などを除き、すべて同一車両であることを認識でき、非常に高い追跡機能の実現できていることを確認できた。

一方で、実際には車両が存在するがミリ波レーダが検知できない場合（未検知）と、車両が存在しないのにミリ波



図10 検知精度の評価結果

レーダが車両ありと判断する場合（過検知）もそれぞれ見られた。その主な原因は次の（ア）（イ）である。これらへの対策が、今後の主な課題である。

（ア）交差点を横切る車両の未検知

写真3のように、交差道路から進入した交差点を横切る車両については、現状の当社の検知アルゴリズムでは最適化していないため未検知となる場合が多い。



写真3 交差点を横切る車両

（イ）隠れていた車両が現れた際の過検知

当社の検知アルゴリズムでは、大型車の陰に小型車が一時的に隠れた場合も、前述のように追跡が可能である。また、写真4のように、隠れていた車両からの反射波が再び受信できるようになった場合に、その車両が隠れる前の車両と同一の車両であると紐づけることも可能である。しかしながら、隠れている間の走行状態（速度や車線など）の変動が大きい場合には、同一車両の紐づけができずに新たな車両と認識し、結果としてダブルカウントしてしまう場合がある。



写真4 隠れ状態から現れる車両

5. 結 言

耐環境性能と保守性に優れ、且つ高い検知性能と広い検知エリアを有するインフラミリ波レーダを複数用いて、よ

り広いエリアの車両検知をするために、複数レーダの連携機能を開発した。実道路での実験結果から、より広いエリアでの高い車両検知精度と、優れた車両追跡性能を有することが確認できた。今後は、実験から得られた課題への対策を行い、安全で円滑な交通環境実現を支援する各種アプリケーションへの応用を行う計画である。

用語集

※1 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) 東篤司、岸正樹、森中諒太、東田宣男、白永英晃、木戸智、「安全運転支援システム向け24GHzミリ波レーダ」、SEIテクニカルレビュー第194号（2019年1月）

執筆者

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



東 篤司：情報ネットワーク研究開発センター
主査
博士（工学）



持田 英史：情報ネットワーク研究開発センター
主席
博士（工学）



東田 宣男：住友電工システムソリューション(株)
主席



小河 昇平：情報ネットワーク研究開発センター
主査



葉若 秀樹：研究企画業務部



*主執筆者