

インフラレーダーシステム技術の開発 Development of Infrastructure Radar System Technology

研究代表者

中川 洋一 パナソニック株式会社
Yoichi Nakagawa Panasonic Corporation

研究期間 平成 26 年度～平成 30 年度

概要

協調型の運転支援により歩行者事故の削減を目指す取組みとして、高分解能ミリ波レーダーを路側センサーに適用する研究開発の成果を報告する。交差点等で利用するこのミリ波レーダー技術は、天候や時間に依らず、歩行者や自転車等の検知機能を高精度に実現できる。これまで、本技術の実用化を促進するため、高分解能レーダーに対応した検知処理ソフトウェアを開発しつつ、激しい雨や吹雪といった厳しい気象条件における検証等を推進してきた。また、実証実験としては、79 GHz 帯レーダーの試作装置を公道の交差点に設置し、横断歩行者に対する検知性能評価を実施している。

1. まえがき

自動走行システムを実現するためには、従来の自動車単体での運転支援技術（自律型）の更なる高度化にくわえ、車と車、インフラ、歩行者等をつなぐ高度な無線通信技術を活用した運転支援技術（協調型）の早期実用化が不可欠である。SIP 自動走行システム「ICT を活用した次世代 ITS の確立」においては、公道での実証等を通じて、車車間・路車間・歩車間通信でやりとりする情報やインフラレーダーで収集する情報等を組合せたシステムを開発し、ICT を活用した高度な安全運転支援システムの実現を図る。

本研究開発課題は、アウトカム目標とする交通事故死者数 2500 人以下/年の達成に向けて、交差点等の様々な交通環境や気象・環境条件で、信頼性高く対象物の検知・識別を行うことが可能なインフラレーダーシステムを実現し、交通事故死者数削減に寄与することを目的とする。交通事故死者数削減を志向し、ヒトや自転車といった小さな対象物を検知可能な 79GHz 帯高分解能レーダーを路側設置センサーに用いて、自動走行支援システムとして実用化するため、検出信頼性、耐干渉性及び耐環境性に優れたミリ波レーダーセンシング技術の開発と安全運転支援に資する路車協調システム技術の開発に取り組んだ。

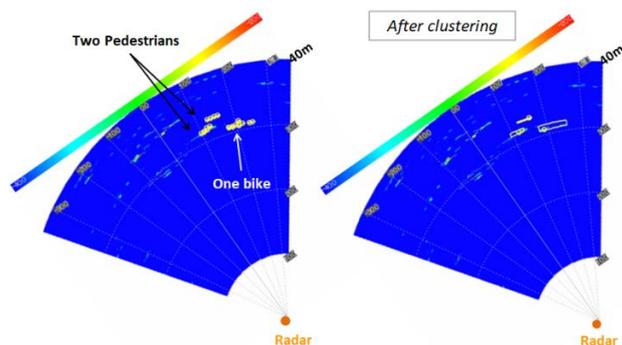
尚、本研究開発は、SIP「自動走行システム」における研究開発「ICT を活用した次世代 ITS の確立」の一部として実施されたものである。

2. 研究開発内容及び成果

本研究開発では、交差点の路側センサーとして高分解能な 79GHz 帯レーダーの特徴を活かしたソフトウェア技術を開発し、歩行者や自転車等の検知性能を評価するだけでなく、車載レーダーが存在する条件でのシステム共存や激しい降雨等の悪天候における機能検証を実施した。また、複数の路側レーダーを統合して取得データをリアルタイムに周囲の車両等へ伝送する試験装置を開発した。尚、研究開発の初期段階から実用化を見据え、悪天候時の検出性能劣化やデータ処理時間の制約等の実使用条件においてシステムが機能する範囲を明確にしていくことを基軸に取り組んできた。

本研究開発の主要要素技術であるミリ波レーダーの検知アルゴリズムは、ソフトウェアとして実装されるのが一般的である。この検知ソフトウェアは、レーダーデバイスが出力するメッシュ状セルの走査データから候補セルとその測定値（距離、角度、ドップラー周波数及び電力）を抽出するフィルタリング部、多数の候補セルをターゲット毎

にグループ化するクラスタリング部、そして時系列なデータフレーム間に対応させるトラッキング部等で構成される。検知結果の出力は、レーダーシステムを利用するアプリケーションに依るが、位置や速度または移動軌跡、さらにはターゲットの数やその種別といった情報となる。図 1 は、歩行者と自転車が近接する実際のシーンにおいて、79GHz 帯の高分解能レーダーが出力する走査データをクラスタリング処理した検知データの例である。



(a) 候補セル抽出 (b) 歩行者・自転車クラスタリング

図 1 ターゲット検出のためのレーダーデータ処理

2.1 レーダー検出信頼性向上技術の開発

横断歩行者の識別や四輪車と二輪車を判別して検知可能なミリ波レーダーの識別信号処理技術の開発、及び大型車等に対して複数レーダーデータを統合する交差点死角対策技術の開発を実施した。

路側設置時の 79GHz 帯レーダーとして、模擬市街路における歩行者識別性能等の実験評価を実施しており、レーダー識別処理に機械学習アルゴリズムを適用することで直進する四輪車と二輪車に対して判別率 95%以上を達成している。また、複数のミリ波レーダーデータを統合し、検知対象物の位置や速度等の情報を周囲の車両等へリアルタイムに伝送する路側システム試験装置を開発した。さらに、合流支援等に必要となる車間距離推定のため、前後方向のレーダーデータを用いた統合クラスタリング技術も開発した。

ここでは、レーダーエコーの特性から車両を判別する手段として、機械学習方法の一つである SVM (Support Vector Machine) を用いた識別信号処理技術について説明する。識別処理に用いる特徴としてミリ波レーダーのセル走査データから算出する情報は、主にレーダーエコーの電力や

ドップラー周波数、セル分布に関連する物理量である。例えば、クラスタ内におけるエコー電力のピークやドップラー周波数の平均等であり、これらの特徴量がターゲットの判別に利用される。いずれの特徴量についても、歩行者と車両の差異は比較的大きく、乗用車とオートバイの差異は相対的に小さくなる。すなわち、精度の良い車種判別を実現するためには、その特性差が強調されるような特徴量を選定することが必要となる。

表1は、乗用車とオートバイが直進する条件で、テストコースにおいて測定したレーダーデータに対する判別性能の評価結果を示している。開発目標である95%以上の正判別率を達成しているが、乗用車とオートバイの間では2~3%の割合で誤判別が発生している。レーダーから近い距離範囲での誤判別が多い傾向にあり、これはオートバイのクラスタが相対的に大きくなることに起因している。

表1 乗用車とオートバイの判別性能評価結果

評価ターゲット	データ数	判別性能		
		乗用車	オートバイ	歩行者 他
乗用車	600	96.7%	2.8%	0.5%
オートバイ	400	2.0%	97.0%	1.0%

次に、交差点の対角に複数のレーダーセンサーを設置し、交差点全域をカバレッジとするための路側システムについて、特徴や機能の概略を説明する。この複数センサーシステムは、大型車両によって生じるオクルージョンの回避やセンサーの近傍に生じるブラインド範囲の補完に有効である。また、複数センサーのデータ統合を実現するため、センサー間での時間同期を確保しつつ、レーダーデバイスが出力する生データをリアルタイムに伝送して集約している。一般道の交差点では、横断する歩行者や自転車運転者の死角となるような状況が、事故発生の要因となっている。交差点の対角に設置したレーダーを同時に動作させる本システムは、オクルージョンを避けつつデータサンプルを増やすことで、検知精度を改善できる(図2)。

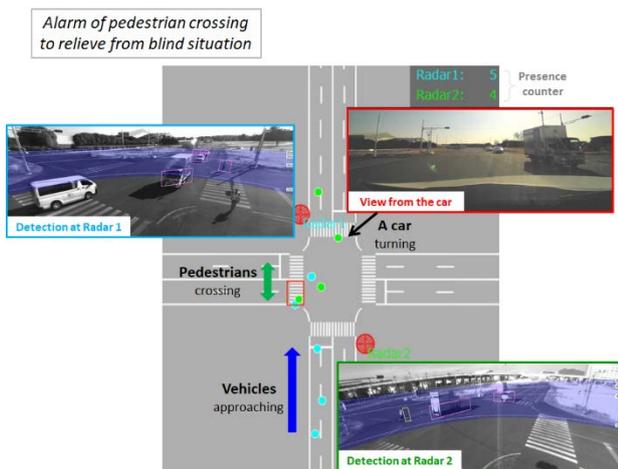


図2 交差点対角に設置した複数レーダーの同時動作検証

さらに、合流支援のアプリケーションでは、本線を走行する車両の位置や速度にくわえて、車間距離も合流車両には必要な情報となってくる。そこで、道路上の一定範囲を、両端に位置する2台のレーダーが前後方向から走査するようにした複数レーダーシステムを検討した。本システムでは、走行車両の前方と後方の各レーダーが同時に取得す

るセル走査データを、統一されたグリッドマップ上で統合してクラスタリング処理を実行している。(図3)。

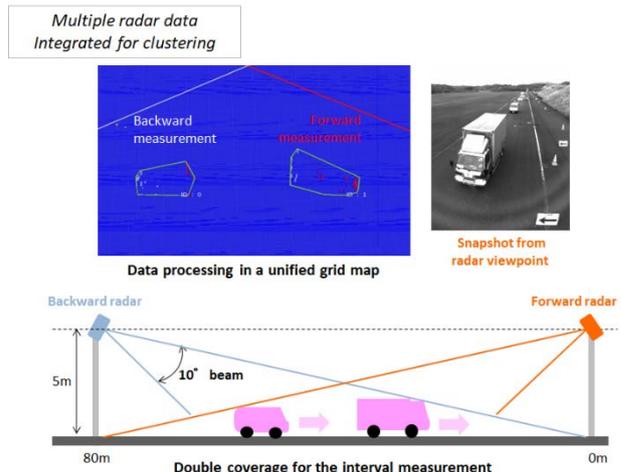


図3 複数レーダーデータの統合クラスタリングに関する基礎検討

2.2 システム間干渉低減技術の開発

路側レーダーとしての耐干渉性能の実証実験、ミリ波レーダー間の干渉低減システム技術の開発、及び汎用的な車載レーダーとの干渉実験を実施した。

はじめに、79GHz帯ミリ波の伝搬シミュレーション解析及び車両反射等に依る干渉発生を検知方法を開発した。ミリ波レーダー間の相互干渉は、動作周波数や測定時間および伝搬空間上のアンテナビーム方向が、全て一致した場合に発生する。そこで、動作周波数等をパラメータとして最も厳しい干渉発生時を含む諸条件の実験データを得るために、屋内試験設備における干渉実験を実施した。ここでは、レーダー送信波の伝搬経路を変化させる可能性がある反射体として実車両を用いた実験を実施し、車体からの反射波が干渉源となるような条件でのデータ取得を実施した(図4)。

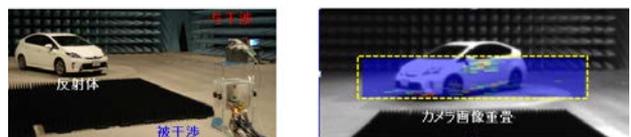
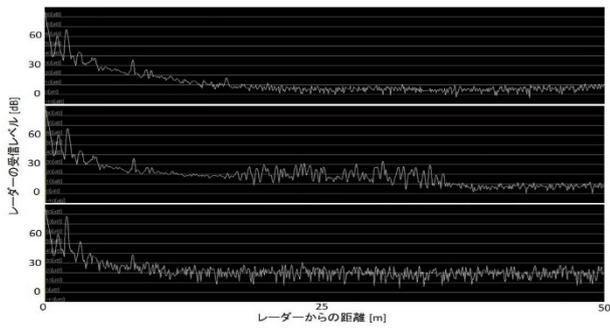


図4 実車両を用いた干渉実験(左)、車体反射による干渉伝搬経路の実測例(右)

次に、車載想定レーダーに対する路側設置レーダーの耐干渉性能を実証すると共に、相互干渉を低減するためレーダー動作の中心周波数を可変する等のアプローチについて有効性を検証した。具体的には、被干渉側の路側レーダーとして符号化パルス方式を、対する車載レーダーとして高速チャープ方式(fast FM-CW方式)を使用するシナリオを選択し、運用周波数帯が重複してアンテナビームも対向する条件で干渉発生時の受信特性を解析した(図5)。交差点に設置する場合、広い距離範囲で高い分解能を確保して検知精度を確保する必要があることから、最大検知距離と分離分解能に優れるパルス圧縮型のレーダー方式が有効と考えられる。結果として、車載レーダーからの干渉信号が、路側レーダーのノイズフロアを変動させる現象は観測されたが、実使用時の離隔距離では影響の無いレベルであることを確認した。



上段：干渉無し、中段：符号化パルスが与干渉、
下段：高速チャープが与干渉

図5 干渉発生時のレーダー受信特性
(距離 2m 条件の距離プロファイル測定例)

2.3 耐環境性能補償技術の開発

79GHz 帯ミリ波レーダーとしての耐環境性能の実証実験、降雨環境等における検出性能補償技術の開発、及び積雪寒冷地等の実フィールドにおける性能実証を行った。はじめに、降雨や降雪といった気象条件を模擬できる専用試験施設において、79GHz 帯ミリ波を用いたレーダー伝搬特性を把握する基礎実験を実施した。その上で、誤検知率 10%以下を実現可能な時間雨量の条件を明確化すると共に、レドムへの着雪による感度劣化量を実測により把握している。また、雨滴エコー等の背景ノイズを抑圧するソフトウェア処理技術を開発した。さらに、暴風雨や豪雪地における吹雪といった悪天候の実環境において、誤検知等を発生させず安定したレーダー動作を実証した。くわえて、79GHz 帯レーダーを用いた伝搬基礎実験の解析結果に基づき、降雨強度に対する伝搬減衰特性をモデル化することにより、レーダーシステムの無線回線設計に反映している。これにより、例えば、降雨強度 50mm/h で回線マージン+10dB が確保できる距離は 32m、同様に 100mm/h では 27m といったような激しい降雨時におけるカバレッジの推定も可能になる (図 6、図 7)。

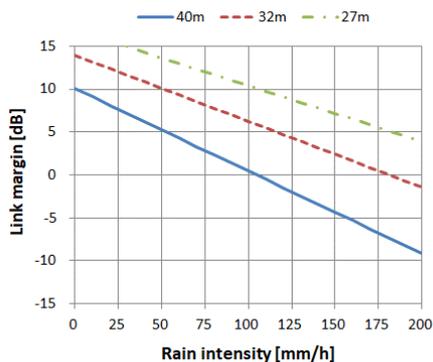


図6 降雨強度に対するレーダー回線マージンの推定値

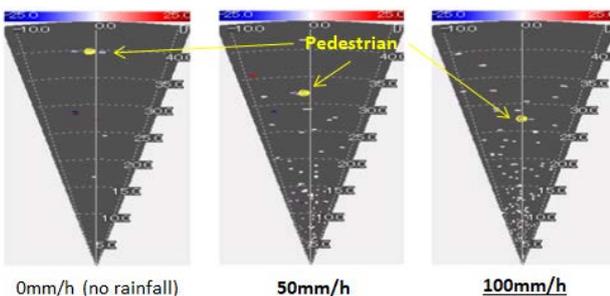


図7 激しい降雨環境下での歩行者検知検証

以下では、豪雪地において実施した 79GHz 帯ミリ波レーダーのフィールド実験結果について説明する。フィールドには単路の路側に支柱を仮設し、79GHz 帯レーダーの試作装置一式をレーダーユニットが地上高 5m となるように取り付けました。その上で、レーダー検知のソフトウェアには、通過する様々な車両の台数をカウントする機能を実装することで、車両カウンターとしての計測精度を検証している (図 8)。また、大型車両の後ろを走行する乗用車等を逃さずに検知するため、レーダーの送信電波が車両の後方より照射されるように設置角度を調節した。



(a) レーダー試作装置の外観 (b) レーダー視点の映像例
図8 降雪フィールドにおける路側レーダー実験

レーダー計測精度の検証には、吹雪等の厳しい気象条件が含まれる連続 24 時間のデータをいくつか選定している。表 2 には、大雪の日とみぞれや吹雪の日の各データに対する車両カウントの精度検証結果を示している。若干の過カウントと未カウントが発生しているが、いずれの場合も 99%以上の検知精度が得られている。

表2 降雪環境における車両カウント精度の検証結果

気象条件	車両数	過カウント	未カウント	誤報
大雪 [※]	4,598 台	1 台	1 台	無
みぞれ/吹雪 ^{※※}	2,930 台	4 台	0 台	無

※ 積雪量 210 mm/日

※※ 積雪量 80 mm/日、最大風速 14 m/s

詳細に解析すると、大型車両を 2 台と過カウントする場合や車間を詰めて走行する 2 台の車両を 1 台としてカウントしてしまう場合が発生している。このような事象の発生は、降雨または降雪といった気象条件に起因するのではなく、大型車両の過検知を抑圧することが近接する車両の分離性能とトレードオフになることに帰着する。つまり、トラック等の過検知を抑えるようにパラメータを調整すると、互いに近接する複数車両の未検知が増える傾向となる。尚、車両が 2 分以上通過しない時間帯を全て抽出して同様の機能検証を実施したが、いずれのデータにおいても誤報は発生していない。

2.4 路車協調技術の開発と公道実験の推進

79GHz 帯レーダーによる自動走行支援のための情報生成に関する実証実験、及び情報提供のための無線通信技術との連携に取組むと共に、安全運転支援を想定した路側センサーとしての公道実験を推進した。

平成 28 年度には、小型且つ広視野角の 79GHz 帯レーダ

一試作機を導入し、公道実験に向けた事前検証を完了した。また、路側センサーが出力する位置、速度等のメッセージセットを検討すると共に、79GHz帯レーダーと700MHz帯通信機をつなげる試験装置を開発し、路車協調技術としての有効性を検証した。

具体的には、高速道路の合流部支援を利用シーンに想定した上で、合流部に進入する車両を路側設置の79GHzレーダーが高精度に測定して、動的情報データとしてリアルタイムに更新する技術開発を行った。実証実験としては、日本自動車研究所所有のテストコースにおいて、路側レーダーのセンシング情報を走行車両に無線伝送する路車協調システムとしての機能試験を実施した。路側の試験装置は車線毎の車両位置や速度等が100ms周期で送信するように動作して、車側の運転支援アプリケーションが加減速を判断することで、実験車両が無理なく合流できることを確認した(図9、図10)。

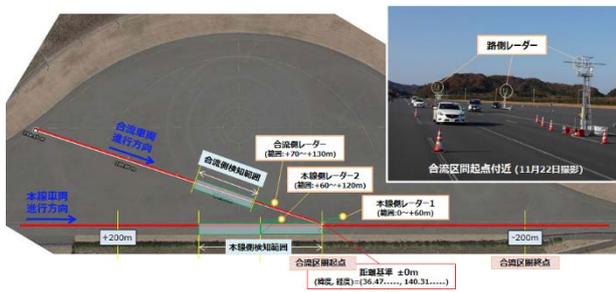


図9 路車協調試験時のテストコースにおける路側レーダーの設置条件

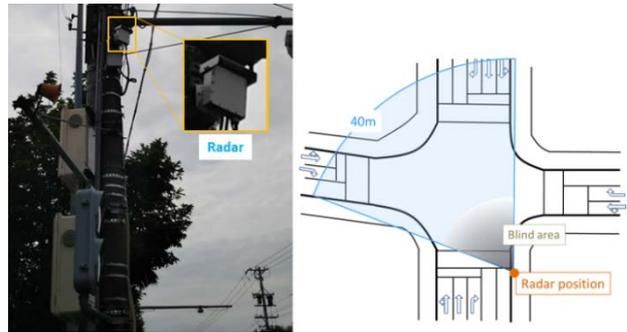


図10 車側における路側検知情報の活用例(左)、路側レーダーの検知データ例(右)

平成30年度には、降雨時を含む公道の交差点環境において、横断歩行者・自転車の検知率95%、誤報率2%を、データ更新周期100ms以下の条件で達成することができた。すなわち、一般道路の実交差点に79GHz帯レーダー試作機を設置して、横断歩道の歩行者検知等に関する長期的な技術検証を実施している。検証実験のフィールドは、日本の公道では一般的な片側2車線の幹線道路に対して片側1車線の道路が交差する地点であり、道路幅が狭いにも関わらず交通量が多い環境である。

図11には、歩行者に対する検知範囲と各車線の位置関係を示しており、水平面の視野角は $\pm 35^\circ$ に設定した条件でレーダーを運用した。尚、レーダーアンテナの垂直面ビーム幅が 10° 程度のため、レーダー設置点から地上面での距離15m程度の近傍はブラインド範囲となる。

表2には、遠方の横断歩道を検知エリアとした場合についての評価結果サンプルを示している。ここでは、レーダー検知ソフトウェアにおいて検知保持時間の最適化を行うことで、これら検知率が約95%、誤報率は約1%という性能を確保している。また、詳細なデータ解析を行った結果、誤報発生は交差点内で大型車両が発生させるマルチパス散乱が主な要因となっている。



(a)ミリ波レーダーの設置状況 (b)対象交差点の俯瞰図
図11 一般道路における実証実験システムの構成

表2 横断歩行者の検知精度評価結果

歩行者・自転車	評価時間(フルム数)	検知率	誤報率
存在有り	165秒(3300)	95.5%	-
存在無し	402秒(8040)	-	1.1%

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取組

これまでの開発技術を実用化する取組みとしては、具体的な利用シーンを想定し、関係機関と連携した79GHz帯レーダーの路側センサーとしての公道実験を推進してきた。特に、一般道路に関する警察庁や都道府県警との連携のみならず、高速道路の路側センサーとしての応用展開に関しても関係機関への提案活動も行っている。また、全研究期間を通じて、将来の海外展開を見据えた国際標準化の活動や開発技術の知的財産化への取組みに注力してきた。具体的な取組みの現状は以下の通りである。

- 関係機関への技術提案を通じて公道実験の実施場所を選定し、一般道路の交差点に79GHz帯レーダーを設置してデータ取得及び歩行者検知等の試験を開始している。
- 高速道路の逆走対策技術に関するフィールド検証試験に公募、参画した結果として、逆走車を検知する路側センサーの現地展開技術の一つとして選定されている。特に、積雪寒冷地においては吹雪のような厳しい気象条件にも対応可能であることを実証している。
- ITSの安全支援を実現する無線通信技術の標準化としては、ITS情報通信システム推進会議に参画し、ITU-Rへの寄書や会合に継続して対応している。
- 機械学習適用による歩行者・車両判別や複数レーダー統合等の精度改善に関する技術から歩車間通信との連携システムまで、実使用時を想定したインフラレーダーシステム全般の特許出願に取組んでいる。

今後は、将来の自動運転に必要なとされる一般道路の交差点や高速道路の合流部等における協調システムの普及を目指して、警察庁をはじめとするITS関係機関と幅広く連携して研究開発成果の事業化に取組む。図12にはインフラレーダー技術の出口検討状況を記しており、今後の取組み方針は以下の通りである。

- 一般道路の信号無交差点を含む広範囲での自動運転支援の実現を目指し、都道府県警や自動車メーカー、電力会社等の産官連携を強化するために、SIP第2期プロジェクト等への参画を検討する。
- 高速道路に対しては、国土交通省国土技術政策総合研究所の自動運転を支援する情報提供等に関する共同研究

に参画する。具体的には、高精度な速度計測が可能なミリ波レーダーの特長が活かされる合流支援に向けた路側センサーの仕様検討等に取り組む。

- 本研究開発成果をアウトカム目標である交通事故削減に結びつけていくために、実際に発生した歩行者事故の分析結果等に基づいた具体的な対策シナリオの検討等を行っていく。発展させたミリ波レーダーデータへの深層学習適用等、路側センサーとして高度化する技術開発を継続し、関連する特許出願等を行っていく。



図 12 インフラレーダー技術の出口検討状況

4. むすび

以上のように、最新のミリ波レーダー技術を交差点等の路側センサーに適用するための研究開発とその応用展開に取り組んできた。

高分解能レーダーで取得される散乱エコーのクラスタリング技術を開発し、交差点全域をカバレッジとする複数レーダーシステムの検証を実施した。また、降雨強度が 50mm/h を超えるような条件や大雪の環境において、79GHz 帯レーダーの検知機能を実証してきた。さらに、公道の交差点環境において、横断歩行者・自転車の検知率 95%、誤報率 2%を、データ更新周期 100ms 以下の条件で達成している。

これまでミリ波レーダーは、光学系センサーの普及状況に比べると、特徴量の視覚的な把握が難しいこともあって、その利用は限られてきた。しかし近年、様々な分野で自動化・省人化の要請が高まっており、環境変動にロバストで速度計測に優れるというミリ波の特長を活かした応用事例が増えつつある。

既に、高解像度なセンシングデータをローカルで処理するエッジコンピューティングにより、多種センサーが統合・フュージョンされて、高度な機能をリアルタイムに実現できるようになっている。特に ITS の分野では、交通流量に基づく最適な経路推定やより高度なデータ解析による危険予測の研究開発が推進されており、センシングデータの活用が盛んになることは間違いない。

一方、このようなデータの取得（センシング）と分析（コンピューティング）を支える通信基盤としては、機器の設置やネットワークの更新が容易な無線通信の役割がより重要になる。現状、走行車両を安全支援に係わるような信頼性への要求が高い情報伝送には、ITS 専用無線が利用されている。さらに、5G 通信では低遅延化によってリアルタイム性の向上が見込まれているため、より強固なネットワークに車両や歩行者が繋がると期待される。

不幸な交通事故の回避や深刻な交通渋滞の緩和という社会課題を解決していくために、情報処理や無線通信の公共インフラを進化させる取り組みが求められている。

【査読付発表論文リスト】

- [1] 中川 洋一 他、“ICT を活用した次世代 ITS の開発（自動運転）”、自動車技術、(2015 年 12 月 1 日)
- [2] 劉 偉傑 他、“Pedestrian Recognition Using 79GHz Radars for Intersection Surveillance”、13th European Radar Conference (2016 年 10 月 7 日)
- [3] 林 俊光 他、“A study of infrastructure radar technologies using 79GHz band on V2I application for merging support at highway junction”、第 24 回 ITS 世界会議 (2017 年 10 月 30 日)

【取得特許リスト】

- [1] 堀端 研志 他、アンテナ装置、日本、2017 年 3 月 23 日、2018 年 5 月 11 日、第 6337171 号
- [2] 劉 偉傑 他、物体検出装置および物体検出方法、米国、2016 年 3 月 21 日、2018 年 10 月 16 日、US10101446
- [3] 劉 偉傑 他、物体検出装置および物体検出方法、米国、2016 年 9 月 14 日、2019 年 4 月 30 日、US10274593

【国際標準提案・獲得リスト】

- [1] APT Wireless Group (AWG)、APT REPORT ON “The Usage of ITS in APT Countries”、提案：2017 年 4 月 3 日、修正提案：2017 年 9 月 25 日、採択：2018 年 4 月 13 日
- [2] ITU-R SG5 WP 5A、NEW REPORT ON “Intelligent Transport Systems (ITS) Usage in ITU Member States”、提案：2017 年 5 月 22 日、修正提案：2017 年 11 月 6 日、採択：2018 年 11 月 19 日

【報道掲載リスト】

- [1] “Panasonic Presents the Latest Highlights in Automated and Connected Vehicle Technologies and ITS Big Data Solutions”、Business Wire、2015 年 10 月 10 日
- [2] “SIP が自動走行システムでシンボ、AI 活用も視野に”、日経コンピュータ、2016 年 10 月 5 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

- [1] <https://www.youtube.com/watch?v=ReexhHCdAMs>
- [2] <http://www.sip-adus.go.jp/rd/>