

周辺監視レーダ MMR2[®] を用いたアプリケーションの開発

Application Development Using Peripheral Monitoring Radar MMR2

青柳 靖^{*1}
Yasushi Aoyagi

流 義浩^{*1}
Yoshihiro Nagare

石田 祥之^{*1}
Yoshiyuki Ishida

細田 滋^{*1}
Shigeru Hosoda

Zsolt Selmeczi^{*2}

Robert Hajdu^{*2}

〈概要〉

先進運転支援システム (ADAS: Advanced Driver Assistance System) の普及が進んでいる。特に車両の四隅に設置された周辺監視レーダを活用したアプリケーションの開発が重要である。従来の死角検知、後退時接近警報の高度化に加え、レーダが取得した物体の位置情報を活用した各種アプリケーション (車線変更意思決定支援、フリースペース検知、出会い頭接近警報、緊急車線維持など) の対応が求められている。また、この機能実現には車両ネットワークの進化に適合したソフトウェア構造が必要であり、機能の検証においては再現性を重視したダミー評価、及びシミュレーションを用いた仮想実験の対応も重要である。本稿では、当社が開発した周辺監視レーダ MMR2 を用いたアプリケーションの開発事例の紹介を行う。

1. はじめに

レーダ (Radio Detection And Ranging) は電波を利用して物体の位置や、相対速度を検知することができるセンサデバイス的一种である (表1)。近年、このようなセンサデバイスを搭載し、周辺物体を検知することで、車両の事故を未然に防ぐ先進運転支援システム (ADAS) の普及が始まっている。このためのセンサ要件としては、衝突の危険を事前に察知するため相対速度検知機能や、雨や霧、夜間など耐視界不良時への適用性がある。

表1 センサの機能比較
Comparison of sensors.

方式	RADAR	LiDAR	超音波	カメラ
相対速度検出	○	×	×	×
耐天候性 (霧, 雨)	○	×	×	△
夜間 (暗闇)	○	○	○	△

○: 適している △: 利用可能 ×: 利用不可能

我々はこれまで、レーダの優位性に着眼し、周辺監視レーダを開発してきた^{1), 2)}。本稿では第2世代レーダ MMR2 を対象としたアプリ開発を紹介する。図1に MMR2 の外観を、表2に諸元を示す。



図1 MMR2外観
Appearance of MMR2.

表2 主要諸元
Specification.

項目	仕様値 (参考)
変調方式	パルスドップラ
測角方式	Digital Beam Forming
使用周波数	24.05 ~ 24.25 GHz
外形寸法	W131 × D129 × H23 mm
外部通信 I/F	CAN-FD, HS-CAN

現在、自動車用レーダのための帯域としては、準ミリ波帯 (24.05-24.25 GHz)、ミリ波帯 (76-77 GHz, 77-81 GHz) がある。周波数帯毎の特性を表3に示す。準ミリ波帯の電波は、ミリ波帯に比べて波長が3倍程度長いため、降雨などの影響が少なく、空間伝搬損失も少なくなる。更に、塗装コーティング数、周波数帯毎のバンパの影響も、周波数が大きいほうが特性に大きな差が出てくる。特に反射率は、バンパと車体、レーダの間に生成

*1 古河 AS 株式会社 第3技術本部

*2 Furukawa Electric Institute of Technology Limited

するマルチパスに関与し、物体の検出角度誤差を拡大してしまう。このように、準ミリ波帯はバンパの塗装・材質の影響が小さいため、ロバストなセンシングが可能である。短所としては、割り当て帯域幅が200 MHzと狭いため、距離分解能が劣る。ミリ波帯の最大の長所は、広帯域が割り当てられており、高分解測距が可能である。更に、その広い帯域をレーダ毎に分割して利用する場合、相互干渉を低減することができる³⁾。

表3 レーダにおける周波数帯特性の比較
Comparison of frequency band of radar.

周波数		準ミリ波帯	ミリ波帯
		24.05 ~ 24.25 GHz	76 ~ 77 GHz
降雨減衰係数 ⁴⁾ γ (dB/km)	強い雨 10 mm/h	1.42	5.65
	弱い雨 3 mm/h	0.40	2.23
バンパ透過性 (トリプルコーティング, 往復) ⁵⁾		1 dB	7 dB
バンパ反射特性 (トリプルコーティング) ⁵⁾		-10 dB	-3 dB

本開発においては、耐候性、搭載性を重視し、準ミリ波帯を選択した。

本稿では、MMR2が実装するアプリケーションの解説を行い、それを実現するためのソフトウェア設計、及び実際の検証を説明し、更に、今後のステップとして重要な仮想検証についての取り組みを紹介する。

2. 市場に適合したアプリケーション検討

アプリケーション開発とは、車載システムに適合し、そこから得られる車両情報(車両の速度, ステアリング操舵, ヨーレート, ブレーキ, ギア, ウィンカ状態など)から、起動するアプリケーションを選択し、各条件におけるセンシング結果から要求された情報(危険有無, 物体位置・速度情報, 道路形状など)を出力するものである。

図2にレーダ単独での警告アプリケーションである車線変更意思決定支援の動作例を、図3に搭載位置及びシステム構成を示す。レーダは車両の後端左右に配置され、左右で連携することで以下に示す①~③の動作をすることでアプリケーションを構成する。

- ① レーダは車両情報を入力し、車両が所定の速度以上で走行しており、かつ、その走行路のカーブ半径が所定のRよりも大きいと判断した場合にアプリケーションが起動する。
- ② 自車両の真横から後方の隣接車線を監視し、車線変更をした場合の危険度を判断する。
- ③ 所定の危険度を越えた際に危険と判定HMI (Human Machine Interface)を通してドライバーに危険を報知する。HMIとしては、ドアミラー内のLEDや、インパネディスプレイがある。

高速道路、市街地、駐車場などの複雑な環境下において、構造物と様々なターゲットを切り分け、正確に、かつ同時に検知する必要があり、MMR2では高い速度分解能に加え、パルス

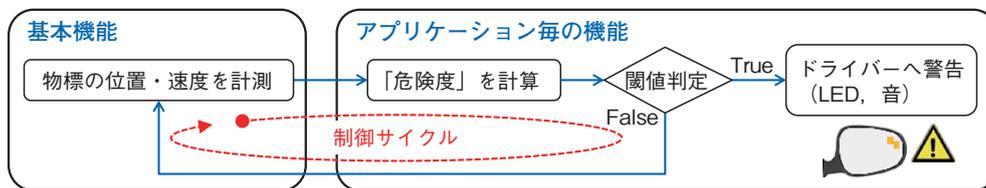


図2 レーダを用いた予防安全システムにおける基本動作
An example of basic ADAS system operation using radar.

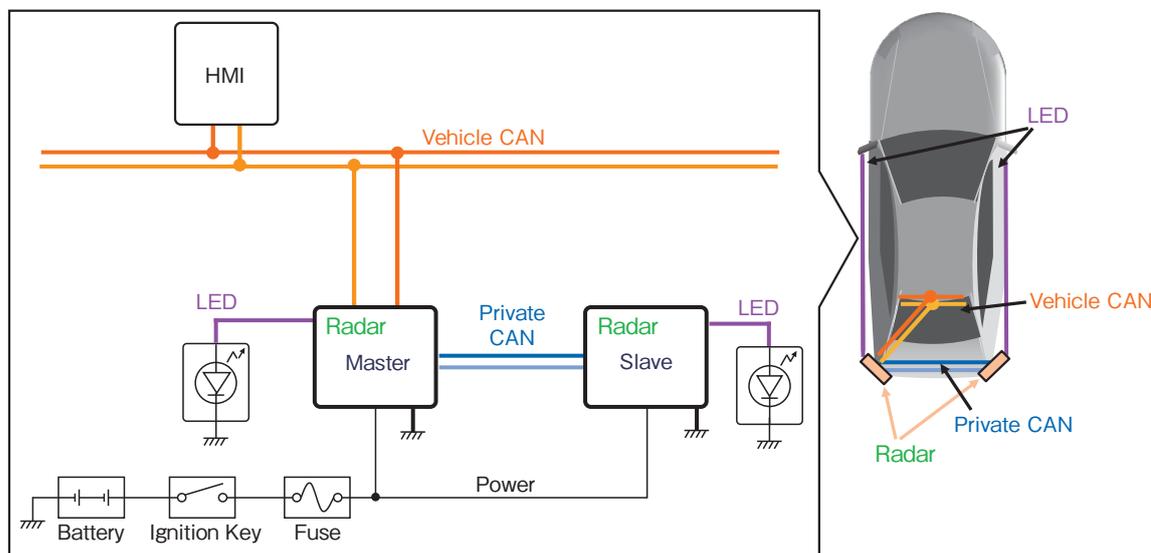


図3 車両システム構成¹⁾
Configuration of radar system.

方式を用いることによる高い分離性によりこれらを実現している。

2.1 周辺監視レーダで実現するアプリ

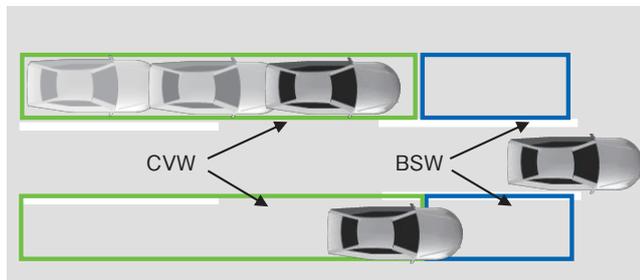
ここでは、MMR2が適用可能なアプリケーション例を紹介する。

2.1.1 後側方アプリ

車線変更意思決定支援システム (Lane Change Decision Aid System: LCDAS と略す)⁶⁾は、車線変更時の衝突の可能性を運転者に警告する(図4(a))。隣接領域に目標車両が位置することを検知する死角警報 (Blind Spot Warning) と、後方領域に目標車両が近接することを検知する接近車両警報 (Closing Vehicle Warning) の2つの機能を有する。

RCTA (Rear Cross Traffic Alert) は、駐車場などから後退する際に左右後方から接近してくる車両を検知する機能である(図4(b))。

(a)



(b)



(c)



図4 周辺監視レーダ適用アプリケーション
Adopted application of peripheral monitoring radar.

2.1.2 前側方アプリ

出会い頭接近警報, FCTA (Front Cross Traffic Alert) は、出会い頭など視界の悪い状況で、車両、自転車、歩行者などの接近物を検出する機能である(図4(c))。

2.1.3 前後側方アプリ

フリースペース検知(図5)は、車両周辺のガードレール等の形状を認識する機能である。フリースペース情報は高速道路走行中など緊急停止が難しい場面で、ドライバに心臓発作や脳梗塞といった運転継続が難しい異常が発生した際、安全に車両を路肩へ避難させるための補助情報として利用される。

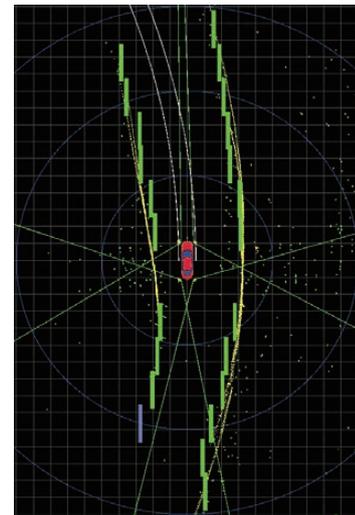


図5 フリースペース検知
Free space detection.

2.2 他センサ連携

周辺監視レーダ単独の情報ではなく、カメラなどの他センサと連携して適合するアプリがある。

緊急車線維持, ELK (Emergency Lane Keep) は、自車が車線を逸脱し、以下の危険が予測される場合に、もとの車線に自動で戻る機能である(図6は車線変更時)。

- 1) センタラインを横切ってドリフトして対向車に衝突
- 2) 追い越されている時に車線を変更して別の車両に衝突



図6 ELK 機能例
Example of ELK function.

図7に示すようにレーダ以外にも、カメラで検知した車線情報を用いて、ステアリングを操作する部分まで含まれる。MMR2は後側方における2)の危険予知の補助情報、即ち、隣接車線の所定位置に車両が接近・存在しているかを検知するセンサとして寄与する。

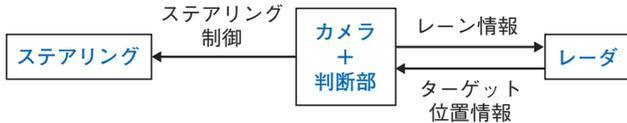


図7 ELKシステム構成図
System configuration of ELK.

3. アプリケーション開発に適したソフトウェア構造

これまで紹介してきたアプリの正確な動作のためには車速、ヨーレート、ギア情報などの車両ボディ情報の受信、及び、レーダがとらえた物体の情報などの送信といった、通信機能の適合が重要である。他方、自動車の高機能化に合わせて電子コントロールユニットECU間のデータ量が年々増加している。MMR2も使用するデータ量の増加に伴い、車載ネットワーク規格を最大通信速度が高速化し、送信データ長のサイズ変更が増えているCAN-FDに変更する必要があった。

表4に従来の主流であったHS-CANと、CAN-FDの通信仕様の比較を示す。

表4 車載ネットワーク通信仕様の比較
Comparison of specification of automotive network.

プロトコル	HS CAN	CAN FD
最大通信速度	1 Mbps	5 Mbps
送信データ長	8 bytes	64 bytes

図8に従来のソフトウェア構造を示す。MMR2では図9に示す構成とした。具体的には、AUTOSAR⁷⁾を導入し、アプリケーションをデータ処理部、機能部などに分割し、ソフトウェアコンポーネント(SW-C)に割り当て、MMR2のハードウェア依存部は、ベーシックソフトウェアのComplex Device Driver(CDD)としてドライバを製作、ソフトウェアの部品化や再利用を容易にするように対応した。AUTOSARを導入したことにより、車載ネットワーク規格が変更になった場合でも、最小限で対応が可能となった。AUTOSARの詳細な構成を図10に示す。また、高い安全性を担保するために検証では、脆弱性診断を実施した。OEMに安全な製品の提供が可能となった。

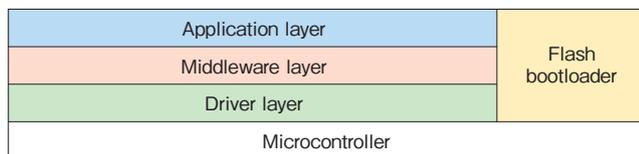


図8 従来のソフトウェア構造
Conventional software configuration.

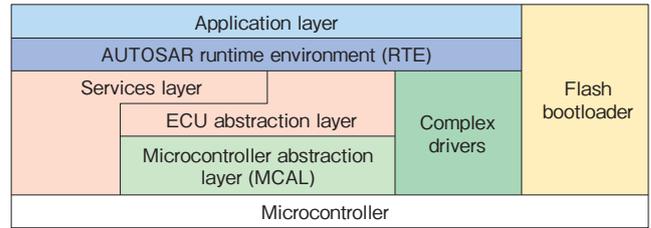


図9 MMR2で適合したAUTOSARのソフトウェア構造
AUTOSAR software configuration for MMR2.

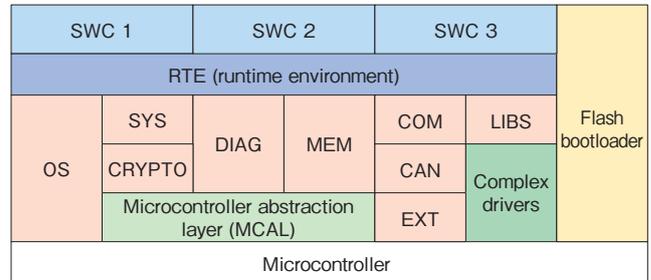


図10 AUTOSARのソフトウェア構造詳細
Detailed software configuration of AUTOSAR.

4. 検証と性能育成

レーダ開発においては、アプリケーションの成立性を確認するための実走行評価が最も重要な要素である。ドライバや検知対象物となったターゲットへの影響などを考慮して、警報の未検知、誤検知、タイミング(遅れ、揺らぎ)などを評価基準に基づき、性能育成を実施する必要がある。図11に当社で実施しているアプリケーションの性能育成フローを示す。

- ① アプリケーション仕様から想定した各種走行シナリオを策定する。
- ② フィールド試験で得られたデータを分析し、課題有無を判定し、課題がある場合にはリスト化し、データベースに登録する。
- ③ 課題をもとに対策検討を行い、動作モデルを策定し、効果・副作用を予測する。
- ④ 対策を組み込みファームウェア、パラメータを策定する。
- ⑤ 再度走行評価を行い、課題が解決するまで②からの動作を継続する。

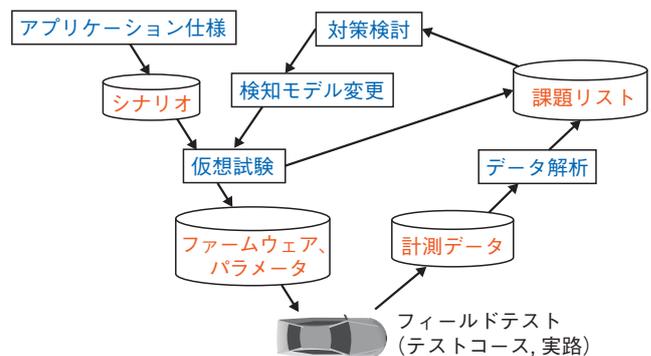


図11 アプリケーション性能育成フロー
Development flow of application.

この性能育成フローにおいては、試験の対応方法について、走行場所や、ターゲットの仕様により、いくつかの方法が存在する。実際の試験の分類を表5に示す。

以下、テストコース走行及び、バーチャルテストの取り組みについて紹介する。

表5 性能育成のための試験種別
Measurement method for function development.

分類	説明
停止状態試験	車両に搭載した状態で評価する。
テストコース走行	車線を占有できるテストコースを用いて評価する。
フィールドテスト	実際の一般道、高速道路を走行して評価する。
仮想試験	仮想空間を設定し、レーダの動作モデル、電波の反射特性をシミュレーションにて再現し、アプリケーションの成立性を仮想現実により評価する。

4.1 テストコース走行性能育成例

テストコースを用いた検証はハンガリー西部に新たに設置されたテストコースZalaZONE (AVL ZalaZONE, 面積: 250ヘクタール)⁸⁾(図12)を活用して評価をおこなっている。ADAS専用の試験コースを備え、GVT (Global Vehicle Target: 車両ダミーターゲット), UFO (Ultra-Flat Overrunable robot platform: ダミー移動用台車), 各種ダミーをはじめ、走行再現性の確保のためのステアリング操作ロボット、アクセル、ブレーキを制御するペダルロボットなど評価治具を利用できるため、再現性のある評価を実施することが可能である(図13)。



図12 ZalaZONE ADAS試験エリア
ADAS test area in ZalaZONE.



図13 評価治具の例
Example of measurement equipment.

図14, 図15は実際に実施した試験結果例である。レーダを搭載した車両、及びGVTをロボットで制御し、再現性のある状況での試験を実現した。

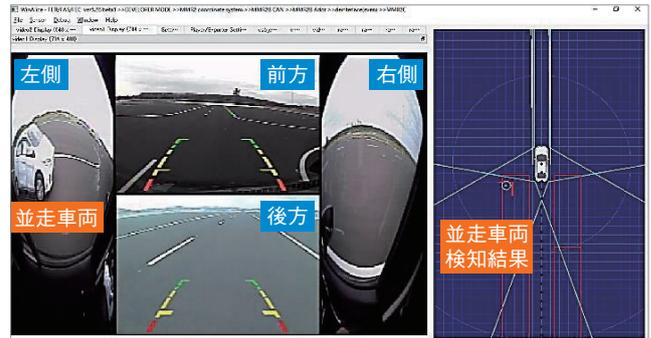


図14 ターゲットがダミーカー+UFOの場合(並走)
GVT+UFO detection results.



図15 実際の車をターゲットとした場合の、追い越され試験
Overtaking scenario test with real car target.

4.2 仮想試験の取り組み

シナリオの再現性、微妙な位置関係の影響などを調査するためには実際の評価だけでなく、シミュレーションを活用した仮想試験も重要である。MMR2においては、このシミュレーション環境で動作するレーダモデルを開発している(図16)。

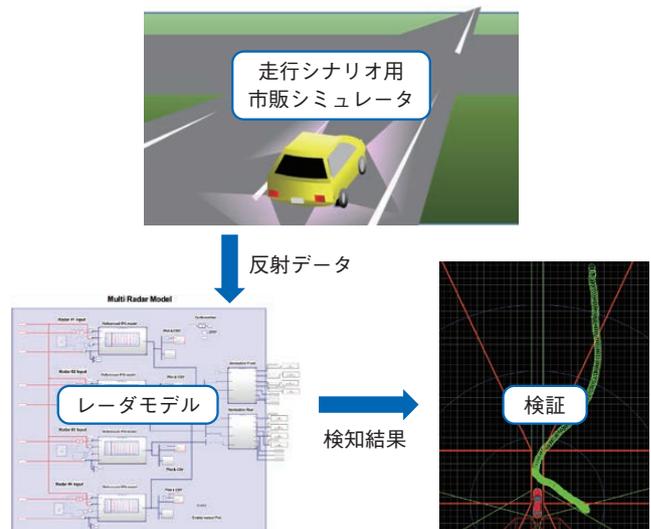


図16 シミュレーション開発フロー
Simulation development flow.

レーダモデル(図17)は市販のシミュレータと組み合わせて動作するよう設計しており、実車の測定データと同様のデータフォーマット(ポイントデータ、物標、警報出力)でシミュレーション結果を取得することが可能となっている。これにより蓄積した実車のデータとシミュレーション結果を共通のデータ解析にかけることができるため、相関関係の把握などが容易な構成となっている。

レーダモデルの内部については、アンテナ特性などの特性をはじめ、ファームウェア、パラメータも組み込み版と共通の構成とすることで、実機同等の動作をするよう設計されている。

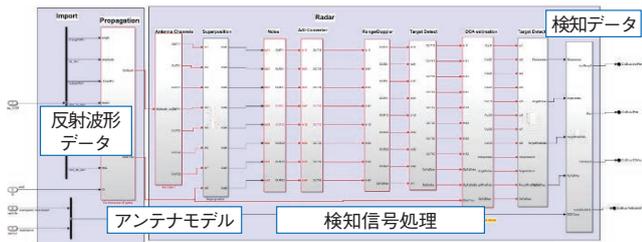


図17 レーダモデル概要
Configuration of radar model.

図18にこのレーダモデルを用いた検証フローを示す。モデルへはレーダの反射情報のほか、車速、ヨーレートなどの車両情報を入力することができ、レーダモデルはこの情報を使って実機レーダと同様に警報アプリケーションを動作させ警報判定を行う。モデルの出力は実機レーダにおいてCANで送出しているものと同じデータを出力することができる。さらに、レーダの性能検証に用いる上位ECUのモデルと接続することでセンサフュージョンのシミュレーションに活用することも可能である。

また、モデルはMATLAB/ SimulinkとC/C++の2つのバージョンを用意しており、多様なシミュレーションプラットフォームへの適合も考慮している。



図18 レーダモデルを用いた検証フロー
Verification flow using radar model.

図19はこれらのモデルを用いて実施した freespace の検知結果について、首都高C1の道路データを用いて実施したバーチャルテストと、実際の評価結果を比較したものである。結果はよく一致しており、レーダモデル、地図データが効率よく活用されていることが分かる。

現在、NCAP⁹⁾などで規定されているダミーを使ったシナリオ評価に加え、公道走行のシミュレーションが可能なシミュレータを試用し、シミュレーションの適用範囲を模索している。

レーダのフィールド検証は市街地などの複雑環境、積雪などの特殊環境など多くの条件で実施する必要があるため、実機データのみによる検証では、取得データが膨大な量となり、このような背景から、図20に示すように、シミュレーションを活用するためには、実機レーダの計測結果とシミュレーション結果の相関関係の把握を検証項目に応じて適宜行い、シナリオ等の検索、検知結果分析、誤差などの統計データに基づくデータベースを構築し、データ解析などの自動化を含んだデータ管理が必須となっている¹⁰⁾。今後は両方のデータを統合したデータベースを検証計画立案に役立て、実機を使った検証をシミュレーションで補完することを目指している。

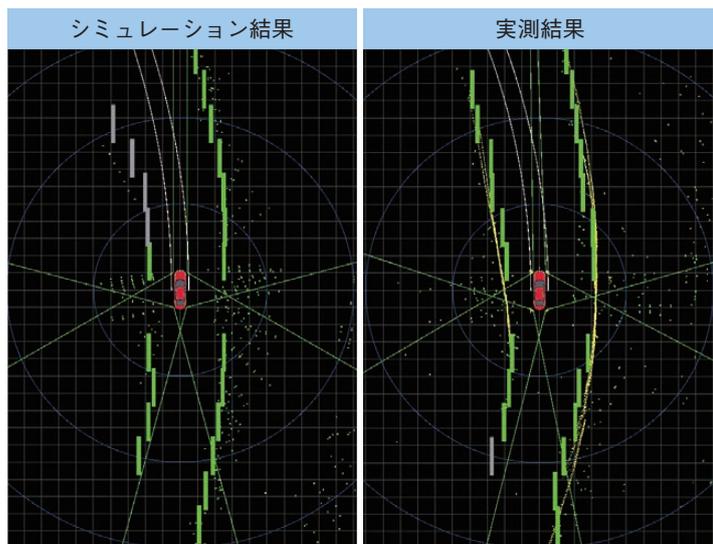


図19 首都高C1の freespace シミュレーション結果
Comparison of free space detection results in Tokyo Metropolitan Expressway C1.

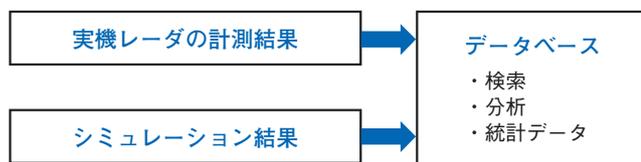


図20 実機とシミュレーションを用いたデータベース化
Database development using on-board test result and virtual test result.

5. おわりに

本稿では、周辺監視レーダMMR2を用いたアプリケーション開発についての概要を紹介した。今後、次世代ADAS、自動運転に対応するため、レーダの高信頼化、及び機能の拡大を進めていく。

※MMR2は古河AS株式会社の日本における登録商標です。

参考文献

- 1) 青柳靖: “24GHz周辺監視レーダの開発”, 古河電工時報, 第137, p. 3, 2018.
- 2) 青柳靖: “24GHz帯車両周辺監視レーダの開発”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 自動運転の実現に求められるセンシング技術及びデバイス技術, 第CI-3-5, 2019.
- 3) A. Bourdoux et al.: “Phenomenology of mutual interference of FMCW and PMCW automotive radars”, 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf), 2017.
- 4) 高田: “電波伝搬の基礎理論”, MWE, 2005 (オンライン). Available: <http://www.apmc-mwe.org/mwe2005/src/TL/TL05-01.pdf>. (アクセス日: 19 12 2022)
- 5) R. Lachner: “Development Status of Next Generation Automotive Radar in EU”, ITS Forum, 2009 (オンライン). Available: <http://www.itsforum.gr.jp/Public/J3Schedule/P22/lachner090226.pdf>. (アクセス日: 19 12 2022)
- 6) ISO: “ISO17387 :Intelligent transport systems -- Lane change decision aid systems (LCDAS) -- Performance requirements and test procedures”, 2008.
- 7) AUTOSAR organization (オンライン). Available: <https://www.autosar.org/>. (アクセス日: 19 12 2022)
- 8) Automotive Proving Ground Zala Ltd., (オンライン). Available: <https://zalazone.hu/>. (アクセス日: 19 12 2022)
- 9) 独立行政法人 自動車事故対策機構, 2022 (オンライン). Available: <https://www.nasva.go.jp/mamoru/>. (アクセス日: 19 12 2022)
- 10) 内閣府, “自動運転の安全性評価環境プラットフォームDIVP (R)のモニタ参加者募集について”, 22 11 2021 (オンライン). Available: <https://www8.cao.go.jp/cstp/stmain/20211122sip.html>. (アクセス日: 19 12 2022)