

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12612
 研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）
 研究期間：2017～2019
 課題番号：16KK0124
 研究課題名（和文）協調型自動運転実現のための無線環境学習型高度車両無線ネットワークの研究（国際共同研究強化）
 研究課題名（英文）Radio Environment Recognized Wireless Vehicle Network for Cooperative Automated Driving(Fostering Joint International Research)
 研究代表者
 藤井 威生 (Fujii, Takeo)
 電気通信大学・先端ワイヤレス・コミュニケーション研究センター・教授
 研究者番号：10327710
 交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,800,000円
 渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：本国際共同研究では、車両に備えた無線端末の通信状況を送受信端末の位置情報とともにクラウド上に集約し、位置情報に紐づけた無線信頼度および電波伝搬モデルの自己組織的な構築を行うことにより、不確定性の高い車両無線ネットワークの通信性能をあらかじめ保証する機能を備えることで、無線通信がアシストする自動運転に必要な、高信頼・低遅延・大容量通信を必要とする高度車両無線ネットワークの実現を目標として研究を行った。米国カリフォルニア州に6ヶ月間滞在し、UC Berkeleyのテストコースで車両間通信を使ったスペクトラムデータベース構築実験を行い、データを活用した高信頼化に関する検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、無線通信が持つ宿命である電波環境の不確定性を、個人端末や車両に設置した無線機でやり取りされる通信の状態をデータベース化することで予測し、その予測値に基づき信頼性を担保した通信をできるようにする検討を行った。特に自動運転に活用が期待される車両ネットワーク向け通信は、高信頼・低遅延・大容量通信が求められるなどその要求条件が厳しく適用効果が大きい。本研究成果は、このような不確定性の高い無線通信環境を、通信状況のビックデータを用いて把握することで、無線通信の信頼性改善に役立てる研究であり、車両間通信のみでなく様々な無線通信の高信頼化、効率化に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, we have targeted high reliability, low latency and high capacity advanced wireless vehicle network for cooperated automated vehicles. Here, unstable communication quality of wireless vehicle networks is predicted by using self-organized wireless reliability prediction and wireless propagation modeling by gathering communication status of wireless terminal installed on each vehicle to cloud. I visited UC Berkeley and Toyota InfoTechnology Center USA for six moth. The measurement campaign of vehicle to vehicle communication on the test course at UC Berkeley for preparing spectrum database. By using the measurement data, highly reliable wireless vehicle networks are realized.

研究分野：移動通信

キーワード：車両無線ネットワーク 無線環境データベース 電波伝搬モデル化 自動運転

1. 研究開始当初の背景

本研究の基課題となる科研費基盤研究(B)「クラウドセンシングによる自己組織型電波伝搬モデル構築に関する研究」では、スマートフォンなど世界中に存在する多数の無線端末を無線観測装置として活用し、クラウドに集約した情報を基に無線環境データベースを構築し、自己組織的な電波伝搬モデル構築技術の確立を目指している。このような無線環境のデータベース化技術は、送信機が固定配置されたテレビ放送の電力マップなどの研究が報告されているが、基課題のように、送受信共に移動環境で実観測情報をクラウドに集約・統計化して、観測に基づき自己組織的に高精度な電波伝搬モデルを構築する取り組みは世界初である。一方で、社会に活用される技術とするには、具体的な無線アプリケーション上への展開を行い、実用化に向けた取り組みが必要となる。そこで、本国際共同研究では、無線通信の不確定性の懸念から現時点で無線技術の活用が進んでいない分野として「協調型自動運転システム」への応用に着目した。車両が協調的に連携動作して自動運転する協調型自動運転システムは、無線通信の不確定性が予測できないことが実用化へのボトルネックとなっている。そこで、実現のためのブレークスルー技術として、「協調型自動運転のための無線環境学習型高度車両無線ネットワークの研究」に取り組む。

2. 研究の目的

本国際共同研究では「協調型自動運転実現のための無線環境学習型高度車両無線ネットワークの研究」として、車両に備えた無線端末の通信状況を送受信端末の位置情報とともにクラウド上に集約し、位置情報に紐づけた無線信頼度および電波伝搬モデルの自己組織的な構築を行うことにより、不確定性の高い車両無線ネットワークの通信性能をあらかじめ保証する機能を備えることで、無線通信がアシストする自動運転に必要な、高信頼・低遅延・大容量通信を必要とする高度車両無線ネットワークの実現を目標とする。本研究では、以下の三つの課題に分け、着実な研究進捗を図る。課題A：車両観測データ収集による車両間電波伝搬の自己組織的モデル化の検討、課題B：無線環境自己学習機能を用いた高度車両間無線ネットワークの検討、課題C：協調型自動運転における高度車両間ネットワークの有効性検証。これらの課題を通して基課題技術の社会への貢献と継続した国際連携体制の構築を行う。

3. 研究の方法

本国際共同研究では、本研究課題を実現するため、車の自動運転技術に関する世界的研究拠点である UC Berkeley および車両のネットワーク化に関する研究で世界をリードするトヨタの米国 IT 研究子会社 Toyota InfoTechnology Center USA を海外連携先として選定した。これらの機関は、自動運転技術の世界的拠点である米国サンフランシスコ周辺のベイエリアにあり、自動運転のアカデミア研究で世界をリードする UC Berkeley (UCB)、産業界とのつながりの深い Toyota ITC-USA (Toyota) と申請者(UEC)の三者共同研究体制とすることで、米国のアカデミア・産業界と連携した研究開発を目指すものである。本研究体制を活用して最大限の研究成果を引き出すため、研究課題を三つに分けて研究に取り組んだ。

課題A：車両観測データ収集による車両間電波伝搬の自己組織的モデル化の検討

車載無線機での無線環境を統計化し、送受信が移動する環境での自己組織的電波伝搬モデル化の検証を実施、自動運転を考慮した車両配置や情報量と情報信頼度の関係を明確化した(UEC-UCB 連携)。

課題B：無線環境自己学習機能を用いた高度車両間無線ネットワークの検討

自己組織的な電波伝搬モデル化により、車両間の通信信頼度予測が可能となった場合に、学習機能を用いて、要求された通信品質を満足した車両間無線通信ネットワークの実現を図った(UEC-Toyota 連携)。

課題C：協調型自動運転における高度車両間ネットワークの有効性検証

課題A・Bを統合して協調型自動運転が十分に実現できるかどうかの検証を実施した(全機関連携)。

これらの実現のため、2018年3月20日～2018年9月30日の半年間米国カリフォルニア州バークレーに滞在し、相互に連携しての共同研究を実施した。拠点を UC Berkeley に置き、週に1～2回のペースで Toyota InfoTechnology Center USA を訪問することで、効率的な研究開発を進めた。当初は理論検討を中心に行う計画であったが、運良く UC Berkeley の敷地内の実験用テストサイトを使えることになり、1週間にわたる実測も行うことができ、そのデータを活用した実験を実施した。帰国後にもこのデータを利用した応用研究に複数取り組み、2019年11月～12月には現地を再訪してそのデータに関するディスカッションを行った。

4. 研究成果

本研究はスマートスペクトラムという周波数管理のコンセプトをベースに高度車両間無線ネットワークでどのように環境認識し、どのように環境認識結果を活用するかという視点で実施した。スマートスペクトラムは、現在システム毎に固定的に割り当てが行われている周波数資源を、電波環境の観測、モデル化、データベース化、管理を一体的に扱うことで、環境に適応したダイナミックな周波数利用を行う考えである。これにより、複数のシステムの周波数共用や、通

信需要に応じて電波資源を柔軟に割り当てるのが可能となり、将来の無線通信の持続的発展に寄与するものとして検討を進めている。スマートスペクトラムでは、場所依存の電波環境の把握から一体的なスペクトラム管理を実現するため、階層型のスペクトラムデータベースをその基盤とする。本スペクトラムデータベースは階層化されたスペクトラムマネージャと相互連携して動作する。上位階層は、電波規制機関（日本では総務省）が周波数利用ポリシーを入力できるような構成とし、グローバルな視点からの周波数の緩やかな管理ができる仕組みを持つ。これにより、ダイナミックな周波数利用でも、災害時の緊急通信のように最優先での帯域確保が必要な業務や、電波天文のように宇宙からの微弱電波を観測する研究での用途など、観測結果からの自律的な利用が難しい業務への配慮も可能となる。一方、下位階層は狭い地域で管理されるデータベースから構成され、周辺の電波状態を個人無線端末やセンサを使って集めることで、実電波環境の把握を行い極限までの周波数共用を実現するものである。

スマートスペクトラムは、無線通信全般の持続的な発展を目指したコンセプトであるが、多様な要求を持つ無線通信への需要と、多様なシステムおよび環境での利用が考えられる IoT への応用は効果的であると考えられる。特に、Vehicle to Everything (V2X) への応用は、多数の車両を使った良質な電波環境情報の集約が可能であり、協調型の自動運転のように通信信頼性が求められる、かつセンサ情報集約などの大容量データ通信が必要となるアプリケーションへの貢献が期待できる。将来のスマート社会を担うインフラとして、V2X に対する期待は高まっており、Connected and Autonomous Vehicle (CAV) として、通信機能を持つ自動運転に関する研究が世界的に着目されている。関連して最新技術の様々な研究発表がなされているが、無線通信特有の環境依存の誤りの影響をしっかりと考慮している研究は少なく、通信品質が実用展開へのボトルネックとなる懸念も大きい。そこで、本研究ではスマートスペクトラムのコンセプトを基に、あらかじめ場所に依存する通信信頼性を把握することで、通信システムの適切な選択や自動運転制御のマージン設計に活かすことを考える。例えば、図1のように、交差点の角に電波遮蔽の原因となるビルが建っている環境を考える。このような環境は、交差する道路に車両が存在した場合でも、車両同士の存在がわからない恐れがある見通しの悪い交差点の環境でもあり、人間が運転する際の事故増加要因の一つである。一方、無線通信では直接見えない環境でも電波が届けば通信が成立するため、車両の存在がわかる可能性もあるが、遮蔽による電波の減衰が大きく、その存在がわからない可能性もある。これは、交差道路の車両の存在が直前までわからないことになり、自動運転時の速度制御や交差点における優先制御に大きな影響をおよぼしてしまう。見通しの悪い交差点は事故原因の一つとして考えられているが、CAV の世界では電波の見通しの悪い交差点も事故原因となる懸念を持つ。そこで、本研究では、スペクトラムデータベースの活用を考える。

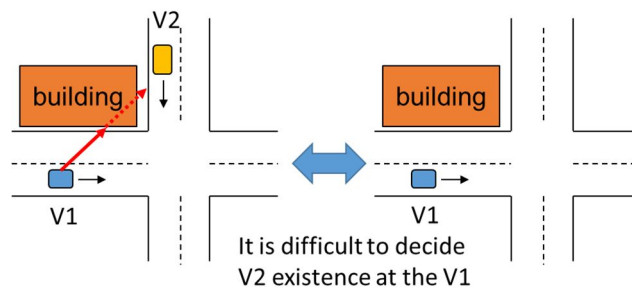


図1 電波の見通しの悪い交差点の例

スペクトラムデータベースの構築手順と活用例を図2に示す。ここでスペクトラムデータベースには、過去の通信履歴を活用して、送信位置、受信位置、受信電力、パケット誤りの状況などを記録して、位置情報に紐づけて蓄積される。これらの蓄積結果を統計化することで、送信位置および受信位置が把握できれば、送受信間の通信信頼性が計算できることになる。V2X の通信は位置情報や車速などを記録したパケットを定期的にブロードキャストすることで車両相互の位置情報などを把握する仕組みがあるため、このパケットの受信記録を元に受信電力のマップやパケット誤り率のマップを作成することが可能となる。このように一般端末の通信を活用したデータ収集をクラウドセンシングと呼び、ここでは無線環境情報を集約することからスペクトラムクラウドセンシングと呼んでいる。

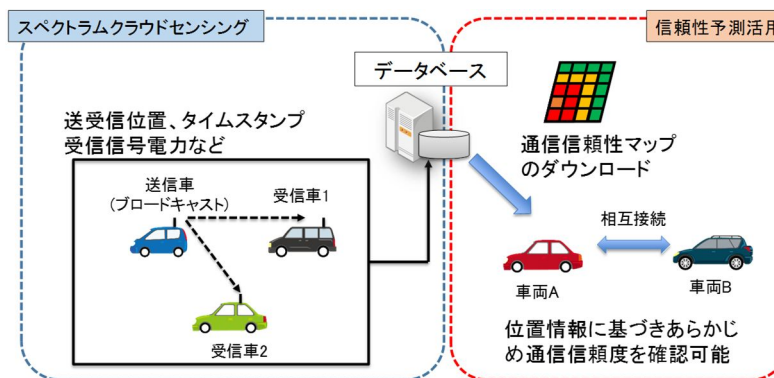


図2 スペクトラムデータベースの構築と活用

本研究では、はじめに基本的な実証を行うために、共同研究先の一つである UC Berkeley, California PATH 研究所敷地内でデータ取得実験を実施した。ここでは、V2X の車載器(OBU: Onboard Unity)を活用し、通信ログから電波環境のデータベース構築を行い、受信信号電力のマッピングを行った。ここでは、無線 LAN 標準規格を基に設計された V2X の標準である IEEE802.11p に基づく、Dedicated Short Range Communication(DSRC)プロトコルを採用した OBU 搭載の車両を 3 台準備し、5.9GHz 帯で実験を行った。実験は図 3 に示すテストコースを持つ米国 Richmond にある California PATH 研究所敷地内で行った。ここでは、周回コースの中央に建物が複数存在する loop 1 と、樹木と草地となっている loop 2 でそれぞれ平均受信電力のマッピングを行った。本実験ではエリア内に 3 台の車両を 2 日間に渡って走行させ、パケット交換時に得られた電波強度情報を集約してデータベースに登録し、5m×5m のメッシュで平均値を取得することで電波環境マップを構築した。交差点上の送信ポイント 1-A, 2-A、交差点から 30m ほど離れた送信ポイント 1-B, 2-B を送信メッシュとした平均受信電力のマッピングを図 4 に示す。双方のループの大きさはほぼ同じであるが、図より、loop 2 は遮るものがない環境のため、ループの内側を通るパスを持つ伝搬でもさほど平均受信電力が劣化しないが、loop 1 では建物の影響で、ループの内側を通ると大きな減衰が発生することが確認できる。ここで示したように周辺環境による電波伝搬の影響はスペクトラムデータベースの活用で事前把握が可能となるため、信頼性を考慮したアプリケーション動作に貢献できることを確認した。

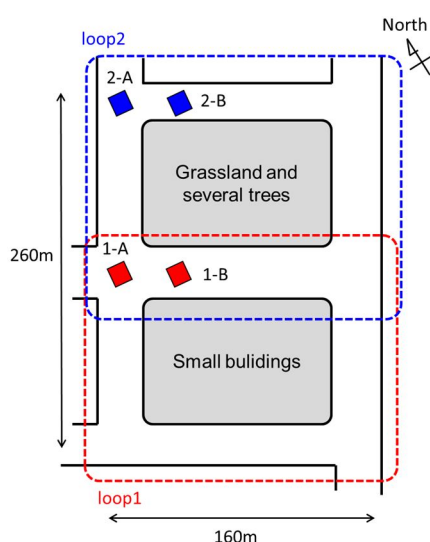


図 3 実験サイト

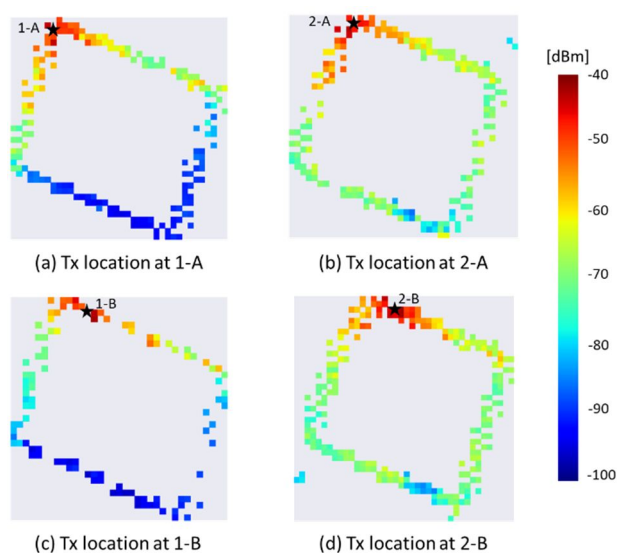


図 4 平均受信電力マップ

本研究課題では実験で取得したデータを使ってその統計化や活用手法について、多数の研究を実施した。ここでは、その一例として、複数の送信車両が混在した場合の、隠れ端末などを考慮したパケット到達率の予測手法についての検討を紹介する。ここでは、V2V に注目し、協調型自動運転の実現を目指し、スペクトラムデータベースを活用したパケット到達率(PDR: Packet Delivery Rate)のマッピングについて着目する。スペクトラムデータベースに基づく PDR は車両間通信で相互に通信したデータが届いたかどうかを統計的に記録することで生成が可能である。しかし、この方法では、作成したタイミングと実際に使用するタイミングで車両密度や相対位置が変化するため、実際に利用する際の PDR 推定の精度が低下する問題があった。そこでここでは、車両の位置と車両密度を利用することで、パケット衝突をスペクトラムデータベースに蓄積されているデータを考慮して解析的に推定し、スペクトラムデータベースで統計化された PDR マップを補正することで、相互のキャリアセンスが失敗することに起因する隠れ端末による PDR の低下を考慮した PDR 予測ができる手法を提案した。本提案手法ではパケット衝突を考慮していない PDR と隠れ衝突は発生しない確率を掛け合わせることで PDR を補正する。よってメッシュ C_{Tx} にある送信車両から C_{Rx} にある受信車両へのパケット衝突を考慮した PDR は式(1)で求められる。

$$PDR'(C_{Tx}, C_{Rx}) = PDR_{C_{Tx}, C_{Rx}} \times PH(C_{Tx}, C_{Rx}), \quad (1)$$

ここで、 $PDR_{C_{Tx}, C_{Rx}}$ はメッシュ C_{Tx} にある送信車両から C_{Rx} にある受信車両へのパケット衝突を考慮していない PDR、 $PH(C_{Tx}, C_{Rx})$ はメッシュ C_{Tx} にある送信車両から C_{Rx} にある受信車両へのパケットが隠れ衝突しない確率である。 $PH(C_{Tx}, C_{Rx})$ は現時点での周囲の車両位置と、隠れ端末による衝突発生を加味して、数式により導出している。

本手法の有効性を検証するため、C++言語を利用したコンピュータシミュレーションによって評価した。図5はシミュレーションシナリオの概要図を表している。道路幅は5m、道路長は215mである。図6にパケット衝突を考慮していないPDR($PDR_{No-Collision}$)のマップ、図7にシミュレーション結果から求めたパケット衝突を考慮したPDR($PDR_{Simulation}$)のマップ、図8に提案手法によりPDを計算により補正したPDR($PDR_{Proposed}$)の推定結果を元にしたマップを示した。これら3つの手法を比較すると、図6に示す衝突を考慮しないPDRマップの結果は、衝突の影響をシミュレーションにより模擬している図7に示すPDRマップと比較して、推定されたPDRに大きなずれが生じていることが確認できる。一方、提案したスペクトラムデータベースのPDRマップに計算によるパケット衝突の影響を加味する補正を行った図8に示す提案手法のPDRマップは、シミュレーションによる結果とほぼ同じPDRマップを再現できており、本手法の有効性が確認できる。

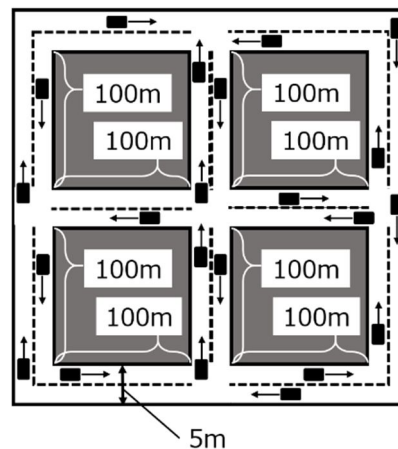


図5 シミュレーションシナリオ

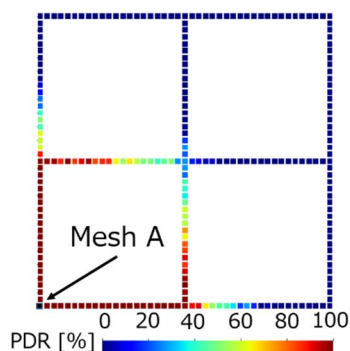


図6 送信車両がメッシュAにある時の $PDR_{No-Collision}$ のマップ

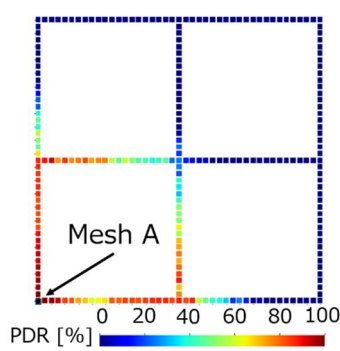


図7 送信車両がメッシュAにある時の $PDR_{Simulation}$ のマップ

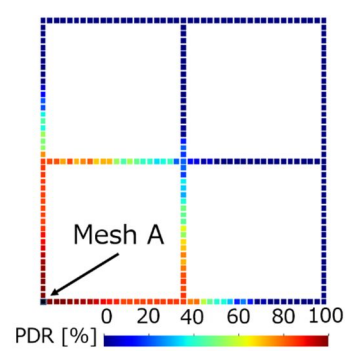


図8 送信車両がメッシュAにある時の $PDR_{Proposed}$ のマップ

このように、スペクトラムデータベースの活用により、従来は正確な予測が不可能であった無線通信の不確定性を低減し、信頼性が重視される協調型自動運転実現への大きな基盤技術となる可能性を示した。また、本技術は自動運転にとどまらず今まで無線通信の活用が難しかった高信頼無線通信の実現や、保守的な伝搬モデルで行われてきた周波数共有の効率を改善させるなど様々な応用が考えられるため、本研究の成果を基に、引き続き研究に取り組む予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii	4. 巻 8
2. 論文標題 Modeling the Kriging-Aided Spatial SpectrumSharing over Log-Normal Channels	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 749 - 752
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LWC.2018.2890644	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Koya Sato, Kei Inage, and Takeo Fujii	4. 巻 7
2. 論文標題 On the Performance of Neural Network Residual Kriging in Radio Environment Mapping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 94557-94568
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2019.2928832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takeo Fujii
2. 発表標題 Smart Spectrum Management for V2X
3. 学会等名 IEEE DySPAN 2018（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Koya Sato, and Takeo Fujii
2. 発表標題 Power Control exploiting Spectrum Database for V2V Communication Systems
3. 学会等名 SmartCom 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 片桐啓太, 小野瀬圭太, 佐藤光哉, 稲毛 契, 藤井威生
2. 発表標題 モデル分類器を用いた高精度電波環境推定手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会SR研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Katagiri and Takeo Fujii
2. 発表標題 Demo: Highly accurate prediction of radio environment for V2V communications
3. 学会等名 IEEE DySPAN 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keita Katagiri, Keita Onose Koya Sato, Kei Inage, Takeo Fujii
2. 発表標題 Highly Accurate Prediction of Radio Propagation using Model Classifier
3. 学会等名 IEEE VTC2019-Spring (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 片桐啓太, 藤井威生
2. 発表標題 車車間通信向け高精度電波環境推定手法の検討
3. 学会等名 電子情報通信学会SR研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	シェラドバー スティーブン (Shladover Steven)	カリフォルニア州立大学バークレー校・California PATH研究所・Program Manager	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	アルトウンタシュ オヌル (Altintas Onur)	トヨタIT開発センターUSA・Network Division・Fellow	