

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K20255

研究課題名（和文）ユーザ参加型センシングを用いた体感品質学習による知的異種無線統合システム

研究課題名（英文）QoE-driven Heterogenous Wireless Systems with Crowdsensing and Learning

研究代表者

須藤 克弥（Katsuya, Suto）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：70821867

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、4K/8K映像配信や動画解析AIサービスにおいて安定した体感品質を提供するため、複数の無線システムを効果的に利用する方法を確立することである。特に、スマートフォンをセンサとして活用し、物理層からアプリケーション層までの通信品質ビッグデータを構築し、ユーザの要求に即した通信特性を達成するための映像伝送方式やマルチパス通信方式を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、ユーザの通信品質や映像品質をリアルタイムで収集し、サイバー空間で通信状況把握やネットワーク制御が可能となるデジタルツイン型制御方式を確立したことである。また、本研究の社会的意義としては、今後需要が一層増加する4K/8K映像配信や動画解析AIなど次世代サービスに向け、体感品質を保証しつつ周波数利用効率の高い無線通信を確立したことであり、6Gの実現に寄与するものである。

研究成果の概要（英文）：This research project aims to develop heterogenous wireless network control methodology that can provides stable QoE for 4K/8K video streaming and video analysis AI services. Specifically, we propose novel video streaming and multipath communication methods that make a decision by using communication quality bigdata.

研究分野：無線ネットワーク

キーワード：異種統合無線 体感品質学習 ユーザ参加型センシング 深層学習 映像伝送 マルチパス通信

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

遠隔医療や超高臨場感など動画通信サービスは社会に必要不可欠なものとなりつつある。実際、2020年までに動画通信トラフィックは3倍に増加し、全体の75%以上になることが予測されている。他方、セルラー網や無線LANなど各種無線システムの通信大容量化が進んでいるが、周波数資源は限られており、独立したシステム運用は近い将来限界に達する。そこで、ユーザの要求に即した通信特性を提供可能な無線システムを選択することで、周波数資源を効率的に利用する異種無線統合システムの実現が望まれている。

従来研究では、パケットロス率や遅延など通信品質（QoS: Quality of Service）を基に無線システムを選択する手法が検討されてきた。しかし、ユーザが実際に感じる体感品質（QoE: Quality of Experience）は物理層からアプリケーション層までの複数レイヤの通信品質に影響されるものであり、ネットワーク層の通信品質をもとにした従来研究の性能改善効果は限定的であった。今後需要の増加が見込まれる4K/8K映像ストリーミングの映像品質や動画画像解析の推定精度を大きく損なう可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ユーザ参加型センシング技術によってユーザ端末の無線・ネットワーク・アプリケーション特性をエッジサーバが収集し、収集した情報を基に異なる物理特性を持つ無線システムを効果的に切り替えて、体感品質を保証する手法を確立することである。この目的を達成するために、アプリケーション特性、ネットワーク特性、物理特性の多次元相関構造を解析する学習モデルの研究を行う。これにより、体感品質を反映していない従来手法から一歩進んだ独自性の高い異種無線統合システムを実現できる。本研究の学習モデルは、他の無線通信技術に応用できるため、当該分野に大きな波及効果もたらすことが期待できる。

3. 研究の方法

本研究では、ユーザ端末がリアルタイムで観測した情報を利用し、各種無線システムの無線環境把握とユーザの体感品質推定を行い、異なる無線システムを効率よく利用する異種無線統合システムの検討を行う。まずは、体感品質に影響を与える各種通信品質を特定するために、複数レイヤの通信品質を統合的に収集するデータベースシステムを構築する。体感品質保証に重要な通信特性を特定した上で、具体的なケースでの映像伝送方式やマルチパス通信方式を設計する。提案手法の評価には商用の電波伝搬シミュレータやフリーのネットワークシミュレータを用いる。

4. 研究成果

(1) ユーザ参加型センシングによる体感品質学習用データベース

本研究の基盤となるユーザ参加型センシングによるデータベースシステムを開発した。データ収集の負荷を最低限にするため、軽量なメッセージングプロトコルであるMQTT（Message Queue Telemetry Transport）を採用し、各端末のアプリケーション品質、ネットワーク品質、無線品質、位置情報を定期的に収集する。また、subscribeメッセージにより通信先の通信品質を取得し、ユーザ間で相互の通信品質を認識することが可能である。

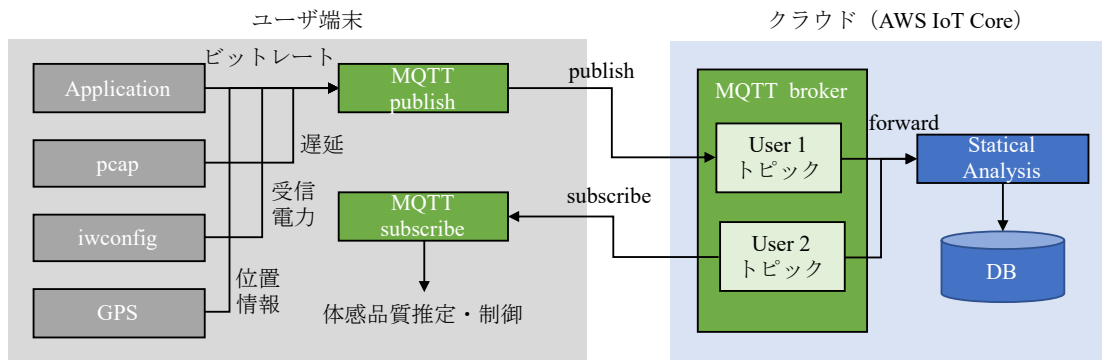


図 1 MQTT を用いた体感品質学習用データベース構築システム

(2) 深層学習を用いた観測信号の空間補間技術

ユーザ参加型センシングでは、観測周期が十分でない場合やユーザが移動しないエリアにおいて通信品質を観測できない問題がある。通信品質情報の内、物理的な無線品質情報（受信電力など）はトラヒックなど他のユーザの通信状況に左右されず、場所依存の特性を有するため空間補間技術により未観測地点の特性を推定することが可能である。空間補間の従来研究では、Kriging や IDW (Inverse distance weighting) が検討されているが、一定密度以上の観測がない場合精度が著しく低下する問題がある。そこで本研究では、畳み込みニューラルネットワークを用いた空間補間手法を提案する。図 2 に提案モデルの一例を示す。3 層の畳み込みニューラルネットワークで構成され、それぞれが空間補間、スムージング、データ補正の機能を有する。本モデルを用いて空間補間した結果を図 3 に示す。真の電波マップと比較して細かい受信電力の変化には追従できていないが、大まかな受信電力の変動を推定できていることが分かる。この例では、空間補間した電波マップと真の電波マップの二乗平均平方根誤差 3.37dB を達成しており、Kriging と同程度の精度であることを確認している。

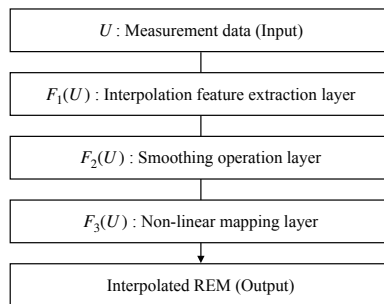


図 2 畳み込みニューラルネットワークを用いた空間補間モデル

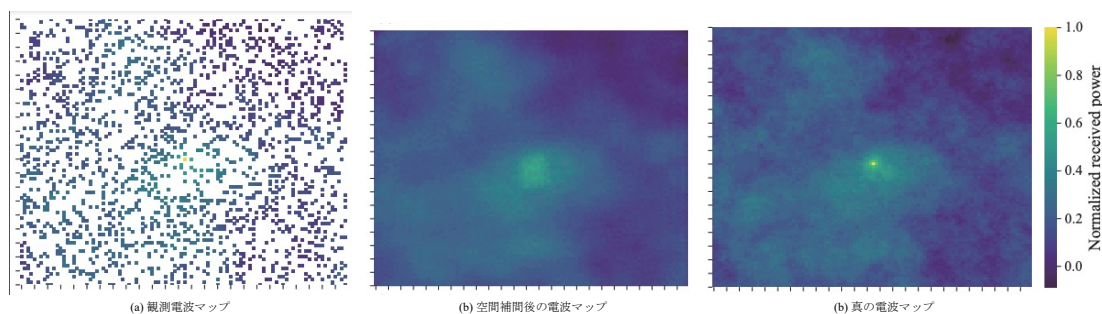


図 3 電波マップの空間補間例

(3) 体感品質保障のための映像伝送方式

遠隔監視や遠隔操作など即時性が求められる映像伝送において、体感品質を保証するための映像伝送方式を提案した。従来研究では、通信品質やアプリケーション品質に基づいてユーザがビットレートを決定する映像制御方式と映像品質に応じて基地局が無線資源を動的に割り当てる通信制御方式がそれぞれ独立に検討されてきたが、無線資源を効率よく活用し安定した体感品質を提供することは困難であった。そこで本研究では、図 4 に示す基地局介入型映像伝送方式を提案した。本システムでは、基地局が各ユーザの移動情報を基に予測した無線品質を活用し、それぞれに適した配信解像度と帯域を割り当てる。また、GPU と超解像 AI を具備し、低解像映像を超解像することで受信者の映像品質を向上する。超解像 AI として、高精細な超解像が可能である FRVSR (Frame-Recurrent Video Super-Resolution) をベースに遠隔監視や遠隔操作に求められる即時性に対応可能な shallow neural network を構築した。

4 台の自動車がそれぞれ異なる電波環境で映像伝送する実験をシミュレーションにより評価した。従来手法では、ユーザが遅延とパケットロス率を基に解像度を決定し、基地局が解像度と無線品質に応じて帯域を割り当てている (図 5)。無線環境が優れている Vehicle 1 では、高い解像度に制御され、それに応じて無線資源も優先的に割り当てられる。Vehicle 4 では、無線環境が劣悪なためフレームロスが発生し低い解像度に制御されるが、それでも 250 秒付近までフレームロスが改善せず、その後も細かな無線品質の変化によってフレームロスが発生している。他方、提案手法では、基地局が適切な解像度と資源割り当てを決定するため、フレームロス発生率を大幅に改善できている。以上より、体感品質を高精度に保証可能な映像伝送方式を確立できた。

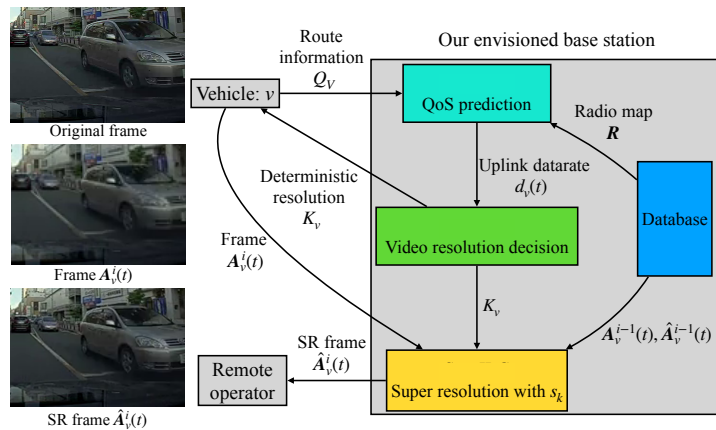


図 4 基地局介入型映像伝送方式

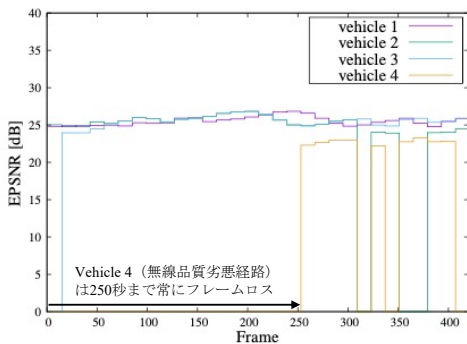


図 5 従来手法の映像品質

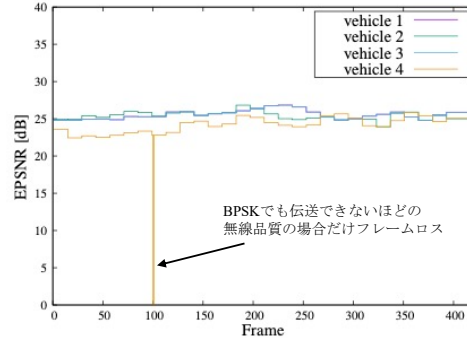


図 6 提案手法の映像品質

(4) 体感品質保障のためのマルチパス通信方式

LTE と無線 LAN で構成される異種無線システムにおいて映像伝送の体感品質を保証するためのマルチパス通信方式を提案した。代表的なマルチパス通信方式の一つとして MPQUIC (Multipath QUIC) の標準化が IEFT (Internet Engineering Task Force) で進んでおり、2021 年 9 月に提案された draft-lmbdhk-quic-multipath-00 では、周期的な PING による RTT (Round Trip Time) に基づいたパス選択方式が検討されている。一方、映像伝送の体感品質を劣化する要因はバースト的に発生するパケットロスであり、LTE と無線 LAN で構成される異種無線システムにおいては、無線 LAN のカバレッジ端や局所的な遮蔽による低信号対雑音比領域で体感品質が大幅に低下することがわかっている。この特徴に着目し、本研究では、電波マップを用いた電波環境認識によりパス選択する制御方式を提案した。具体的には、映像フレーム遅延の統計値と将来の移動経路の受信電力予測値を入力としてファジー論理により、LTE か無線 LAN を選択する。RTT は経路の導通を確認するためには有意であるが、実際の映像がどの程度の遅延で伝送できているかを判定できないため、受信者側で観測した遅延情報をフィードバックする。また、映像フレーム遅延は過去の統計情報であるため、将来の体感品質がどの程度になるか見積もることは難しい。そこで、移動地点の平均的な受信電力情報を電波マップから参照し、電波環境の局所的な劣化を起因としたパケットロス率を見積もり、予測されるパケットロス率が大きい場合に LTE 網に切り替えるように動作する。

4 台の追走する自動車が無線 LAN と LTE を介して映像を伝送する実験環境をシミュレーションにより評価した。図 7 は、draft-lmbdhk-quic-multipath-00 で提案された MPQUIC の遅延特性を示している。1.5 秒から 3.5 秒付近まで各車両が無線 LAN のカバレッジ端になり、RTT に基づくパス選択では LTE に切り替わるまで 0.5 秒程度継続的にパケットロスが発生していることが分かる。他方、提案手法は、電波マップを用いて将来の電波環境劣化を予測し、当該地点に到着する前に LTE を使うように制御されており、パケットロスが発生しないことが分かる (図 8)。本研究により、体感品質を保証可能なマルチパス通信方式を確立できた。

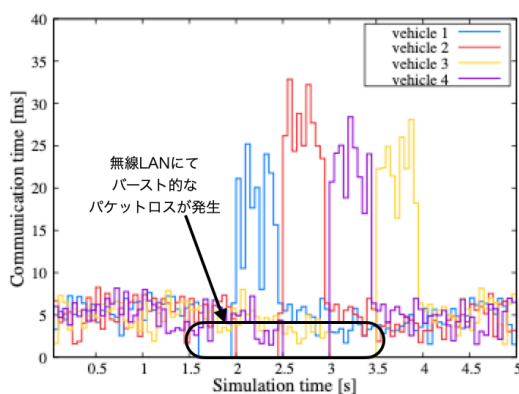


図 7 従来手法の遅延特性

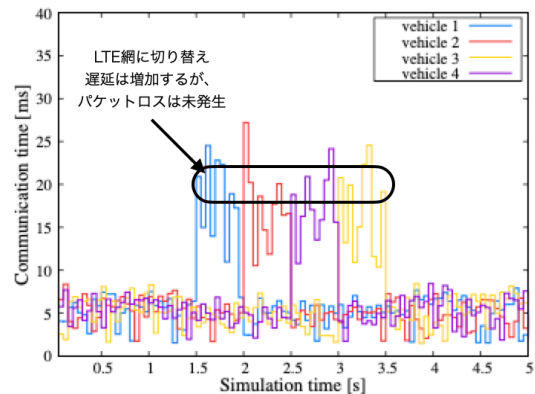


図 8 提案手法の遅延特性

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Katsuya Suto
2. 発表標題 Deep Learning and Its Applications to Radio Map Construction (Tutorial)
3. 学会等名 The 4th International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Katsuya Suto
2. 発表標題 How We Recognize Radio Environment with Deep Learning (Tutorial)
3. 学会等名 IEICE SmartCom Virtual Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須藤克弥
2. 発表標題 [チュートリアル] 電波伝搬推定における深層学習の基礎と応用
3. 学会等名 PIF・PN研究会共催チュートリアル講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 須藤克弥
2. 発表標題 [依頼講演] 電波環境イメージングの現状と将来展望
3. 学会等名 IEICE SR研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加藤耕平, 須藤克弥
2. 発表標題 車両遠隔監視における基地局介入型映像伝送手法
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 寺内健, 須藤克弥, 若生将史
2. 発表標題 無線給電センサネットワークにおける統計的チャネル品質に基づいたタイムスロット割り当て手法に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会SR研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Kato, Katsuya Suto, and Koya Sato
2. 発表標題 Deterministic Video Streaming with Deep Learning Enabled Base Station Intervention for Stable Remote Driving System
3. 学会等名 IEE ICC'21 workshop on Time-sensitive and Deterministic Networking (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeru Terauchi, Katsuya Suto, Masashi Wakaiki
2. 発表標題 Harvest-Then-Transmit-Based TDMA Protocol with Statistical Channel State Information for Wireless Powered Sensor Networks
3. 学会等名 IEEE VTC'21-spring (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Riku Hashimoto and Katsuya Suto
2. 発表標題 SICNN: Spatial Interpolation with Convolutional Neural Networks for Radio Environment Mapping
3. 学会等名 ICAIIC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Katsuya Suto
2. 発表標題 Crowdsensing based Spectrum Database for IoT with Intelligence
3. 学会等名 Northeast Asia Conference 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2021年度スマート無線研究会研究奨励賞受賞 https://www.uec.ac.jp/news/prize/2022/20220304_4237.html

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------