

論文の内容の要旨

論文題目 Mobile Edge Computing を用いた遠隔車両制御プラットフォーム

氏 名 佐 々 木 健 吾

2015年9月に国際連合で開催されたサミットの中で、「Sustainable Development Goals (SDGs)」と呼ばれる国際社会共通の開発目標が提唱された。本博士論文では、SDGsの開発目標の1つである「任意の場所へ普遍的なアクセスを提供する交通システムの確立」を究極の目標とする。

目標とする交通システムの実現には、自動車の自律制御による自動運転（以降、自律制御）は必須の技術である。しかし、自律制御には「自車センサによる情報収集の範囲」と「車両間の制御調停」に課題があるため、自律制御だけで目標とする交通システムを実現することは難しい。

我々は上記2つの自律制御に関する課題を解決するためには、広範囲の情報収集が可能な協調運転システムが必要であると考えている。協調運転システムでは、車両同士が連携してスムーズな道路交通を実現する。しかし、現在、多く議論されている協調運転システムでは、1つの交差点のような局所的な交通制御（局所交通制御）を実現することが目的であり、渋滞情報のような広域情報を考慮することが難しい。我々は、広域情報を考慮した上で、局所交通制御を行わない限り、目標となる交通システムは実現できないと考えており、「超広範囲の協調運転システム」の構築が必要であると考えている。ここで、「超広範囲」とは東京都全体や日本全体といった規模を示す。

この「超広範囲の協調運転システム」を構築するために、我々は「Mobile/Multi-access Edge Computing (MEC)」と「遠隔制御」が必要であると考えている。「MEC」は第5世代移動体通信網にて「超低遅延通信」を実現するための主要な技術として検討されており、基地局のようなネットワーク装置に「エッジサーバ」と呼ばれる汎用的な計算装置を配置し、そのエッジサーバ上で分散処理を行う技術である。エッジサーバは、クラウドと比較してユーザ端末と近い位置から情報処理を実現できるため、ユーザ端末—計算装置間の通信遅延を抑制することができる。「遠隔制御」は、クラウドやエッジサーバのような外部装置が車両からセンサ情報を収集・解析し、車両に対して制御情報を提供することで車両の制御を実現する。遠隔制御を用いることで、制御モデルが集中制御となるため、車両間の制御の調停を容易に解決することができる。現在、クラウドから遠隔制御を行うシステム（クラウド型遠隔制御システム）や、エッジサーバから遠隔制御を行うシステム（MEC型遠隔制御システム）は提案されている。しかし、クラウド型遠隔制御システムでは「通信遅延」が、MEC型遠隔制御システムでは「エッジサーバがセンサ情報を収集できる範囲（以降、収集範囲）」が大きな課題となってい

る。以上の「MEC」と「遠隔制御」を用いて、我々は超広範囲の協調運転システムを実現することを目標とする。しかし、そこには、大きく3つの課題「プラットフォームに関する課題」、「プラットフォームの評価に関する課題」、「実通信環境への適応に関する課題」が存在する。

プラットフォームに関する課題とは、超広範囲の協調運転システムを実現するためのプラットフォームが存在しないことである。従来手法では「通信遅延」と「収集範囲」のトレードオフが課題となることに加えて、自律制御が考慮されていないため、超広範囲の協調運転システムを実現することは困難である。加えて、従来手法では、超広範囲の協調運転システムを実現するためのネットワークアーキテクチャも提案されていない。2018年時点で、通信事業者はエッジサーバの具体的な配置を決定しておらず、移動体通信網内には、「基地局」や「局舎」、「ゲートウェイ」等の様々なエッジサーバを配置可能なネットワーク装置が存在する。エッジサーバの配置は「車両—エッジサーバ間の通信遅延」、「収集範囲」および、「プラットフォーム構築に必要なエッジサーバ数（以降、エッジサーバ数）」に影響を与える。以上のことを考慮できる超広範囲の協調運転システムのためのプラットフォームを提案する必要がある。

プラットフォームの評価に関する課題とは、プラットフォームを評価する環境が存在しないことである。超広範囲の協調運転システムを実現するためには、提案するプラットフォームで安定した遠隔制御が実現できることを示す必要があり、そのためには、実車評価と同等の特性を持つテストベッドで評価を行う必要がある。

実通信環境への適応に関する課題とは、提案プラットフォームを実通信環境に適応できるか評価する環境が存在しないことである。現在、日本国内には様々な通信キャリアが存在するものの、遠隔制御を想定した通信経路の特性について調査を行った過去の研究は存在しない。また、上記テストベッドを構築、評価を行い、提案するプラットフォームが安定して動作する通信条件を示せたとしても、実通信環境に適応した場合、多くの時間帯で制御を自律制御に頼っている、超広範囲の協調運転システムを実現することはできない。そこで、キャリアの通信特性を網羅的に調査し、提案するプラットフォームが実通信環境下で、広い収集範囲と低通信遅延を両立した遠隔制御を実現できるか調査する必要がある。

本博士論文では、超広範囲の協調運転システムの実現するために「インフラ型車両制御プラットフォーム」を提案し、上記3つの課題を「プラットフォーム提案」、「テストベッド構築・評価」および、「実通信環境の測定・評価」によって解決する。

プラットフォーム提案では、多層エッジサーバによる遠隔制御と自動車による自律制御が連携するプラットフォームを提案する。提案プラットフォームは移動体通信網内に多層のエッジサーバを配置する「ネットワークアーキテクチャ」および、多層エッジサーバによる遠隔制御と自動車による自律制御を連携させた「車両制御アーキテクチャ」によって構成される。本論文の多層エッジサーバはUpper Edge Server (UpES)とLower Edge Server (LoES)の2層のエッジサーバで構成され、UpESはLoESより上位(車両から離れた位置)のネットワークレイヤに配置されるため、UpESは広範囲のセンサ情報を利用した処理を、LoESは低通信遅延環境下での

処理を実現することができる。UpES/LoESの配置は、「基地局」、「局舎」、「ゲートウェイ」、「クラウド」の間で調整可能であり、配置の変更は「車両—エッジサーバ間の通信遅延」、「収集範囲」、「エッジサーバ数」に影響を与える。これら2層のエッジサーバによる遠隔制御と自動車による自律制御を通信状態に基づいて切り換えるプラットフォームを構築する。

テストベッド構築・評価では、提案プラットフォームが安定して車両を制御できるか評価するために、2層のエッジサーバから遠隔制御可能な実車の1/10スケールのマイクロカーによるテストベッドを構築し、2種類の評価「基本特性評価」と「実通信特性評価」を行う。基本特性評価では、エッジサーバとマイクロカーの間に「定常遅延」、「バーストパケットロス」を加え、遠隔制御の通信負荷に対する特性を評価する。基本特性評価の結果、定常遅延が100ms以下で、バーストパケットロスの期間が400ms以下なら、大きな走行軌跡のずれが発生することなくエッジサーバから遠隔制御を実現できることを示す。実通信特性評価では、携帯端末とクラウドサービスの間で終日通信データを計測し、計測データの中で遅延の変化が激しい時間帯の通信遅延をテストベッド上で再現し、遠隔制御の評価を行う。実通信特性評価の結果、クラウドに配置されたUpESと基地局に配置されたLoESを切換えながら遠隔制御を行うことで、通信遅延の無い理想環境と同等の安定制御を実現できることを示す。

実通信環境の測定・評価では、まず、実通信環境を考慮した評価を行うために、様々なキャリア-クラウドサービス間の実通信データを24時間測定する。計測対象のクラウドサービスは3つ、キャリアは11である。通信計測ができれば、その実通信データを用いた提案プラットフォームの車両制御シミュレーションを行う。車両制御シミュレーションでは、UpES、LoESの配置を「基地局」、「局舎」、「ゲートウェイ」および、「クラウド」の間で変更し、「UpESによる遠隔制御」、「LoESによる遠隔制御」および、「自動車による自律制御」の制御比率（各制御が車両制御を担当した時間の割合）を導く。シミュレーションの結果、「UpESの配置を調整することでLoES-UpES間の制御比率と収容台数のトレードオフを調整できること」、「LoESの配置を調整することで遠隔制御と自律制御の制御比率とエッジサーバ数のトレードオフを調整できること」および、「UpESをクラウドに、LoESを局舎に配置することで、エッジサーバ配置のコストを抑制しつつ、広範囲の遠隔制御と低遅延な遠隔制御を両立する提案プラットフォームを実現できること」を示す。

以上より、

- 超広範囲の協調運転システムを実現可能なプラットフォームを提案する
- テストベッドによる評価から、提案プラットフォームが安全に動作する条件を確立する
- シミュレーションによる評価から、提案プラットフォームを安全に動作する条件を満たしつつ、多くの時間帯で広収集範囲のエッジサーバから遠隔制御できることを示す

ことによって、超広範囲の協調運転システムの実現可能性を示す。