

## 論文の内容の要旨

### 1 申請者

防衛大学校 吉本 雄大

### 2 論文題目

インターネットを介した車両の経路追従制御におけるデジタルツインコンピューティング実用化に向けた伝送遅延による遠隔走行制御特性劣化の改善に関する検討

### 3 論文の内容の要旨（博士:2,000字程度）

通信ネットワーク技術と情報処理技術の高度化に伴い、自律制御、または遠隔制御の自動走行車が注目されている。自律分散制御の走行車は走行車に搭載されたセンサーで収集した情報を走行車内部で処理する。これに対して遠隔制御走行車では、外部の制御用サーバがインターネット等を介して走行車を制御する。安全上の観点から緊急停止機能は車体に搭載する必要があるが、その他の制御機能をサーバに集約することで車両の機能を簡素化できる。そのため、多数の走行車を自律制御する場合は遠隔制御システムの方が経済的である。遠隔制御サーバとしては、モバイルエッジサーバまたはクラウドサーバを利用できる。エンドユーザに近い位置に配置されるモバイルエッジサーバの場合、低遅延通信を実現することが可能であるがサーバ1台当たりでカバーできる範囲は狭い。クラウドサーバの場合、高度な演算処理能力を用いて広範囲の制御端末を一元的に制御することができる。広範囲の多数の車両を効率的かつ経済的に制御するには、クラウドサーバによる集約的な制御が有効であると考えられる。しかし、クラウドサーバの場合、走行車との間の伝送遅延が大きくなる可能性が高いため、安全な遠隔走行制御を達成することが困難になる。

近年、現実空間の状態をコンピュータ上で高度に再現するデジタルツインという概念を多様な分野で応用することが期待されている。デジタルツインの利点は対象の現在の状態の監視や未来の状態の予測を高度に実施できることである。具体的な応用として、デジタルツインによる高精度なシミュレーションによって設計段階の工業製品や建築物の特性を事前に確認することができるようになる。また、患者の臓器のデジタルツインを作成することで現在の体内の症状を具体的に把握したり、将来的な症状の進行を考慮した最適な治療計画を立案することができるようになる。デジタルツインを走行車遠隔制御に活用する場合、制御器は実際の制御対象の状態を直接参照せず、デジタルツイン上で模擬した結果を参照して制御信号を送信することができる。これによって、クラウドサーバによる伝送遅延の影響を低減した遠隔制御を実現できる可能性が考えられる。また、デジタルツインの適用によって一元的な

走行車協調制御だけでなく、走行環境の変化に応じた最適な経路探索、車体の整備計画等を含めた統合的な走行車遠隔制御アプリケーションを実現できる可能性が考えられる。

本研究の目的はクラウドサーバによる走行車遠隔制御システムの実現である。具体的には、クラウドサーバによって小型の無人走行車を遠隔制御するシステムを想定している。この目的を達成する基礎的な取り組みとして、本論ではデジタルツインを活用した小型走行車の遠隔経路追従制御システムを提案した。提案システムでは、クラウドサーバと走行車との間の伝送遅延およびその変動の影響を低減するため、デジタルツインとジッタバッファを活用する。デジタルツインによる走行経路の予測結果は実際の走行車と完全に一致するとは限らない。そのため、一定周期で送信されるフィードバック情報を用いて予測結果に生じた誤差を補正する。これらによって、クラウドサーバによる遠隔経路追従走行の安定性を改善することができる。

提案システムの有効性を評価するため、以下 3 種類の検討を行った。まず、提案システムの適用による走行車遠隔制御の改善を確認した。提案システムの有無による走行車の経路追従特性を比較するため、仮想的な走行車と様々な伝送遅延特性を再現できるネットワークエミュレータを用いたシミュレーションを実施した。その結果、提案システムでは通信ネットワークによる伝送遅延とその変動が大きい場合でも安定した走行制御を達成できることを確認した。次に、提案システムにおいてデジタルツインの精度が及ぼす影響を評価した。走行車のデジタルツインモデルの誤差が大きい程、実際の走行状態に対する予測結果の乖離が大きくなる。シミュレーションによる定量的評価および実際の小型ラジコン車を用いた実験によってモデルの誤差による走行経路の悪化を評価した。その結果、走行速度またはステアリング角の挙動に関するデジタルツインモデルの誤差の許容範囲が明らかになった。その許容範囲は、走行車とデジタルツインモデルとの比率をとった場合 0.9 から 1.1 までとなる。最後に、提案システムにおけるジッタバッファ機能の最適化方法を検討した。クラウドサーバによる遠隔制御においては、伝送遅延変動特性が突発的に劣化する可能性を考慮する必要がある。提案システムにおいてジッタバッファによる制御信号バッファリング時間の最適化は、より安定した走行車遠隔制御のために必要であると考えられる。その具体的な方法を提案するとともに、その有効性をシミュレーション評価によって確認した。

上記の検討は実際の伝送遅延を模擬したケーススタディである。これらによって、小型走行車の遠隔走行制御において提案システムが有効であることを確認するとともに、デジタルツインを活用する上での要求条件を明らかにした。

#### 4 キーワード（5 個程度）

クラウドサーバ、遠隔制御、小型無人走行車、デジタルツイン、伝送遅延