

通信の不安定性を考慮した遠隔操作ロボット制御方式の実装と評価

2022TC074 河部修輔

指導教員 宮澤元

1 はじめに

本研究では、通信の不安定性を考慮した遠隔操作ロボットの制御方式を実装し、その有効性を評価する。具体的には、アプリケーションの実行位置をクラウドとロボット単体で切り替える機構を実装する。

無線通信を介したロボット制御では、通信遅延やパケット損失などの通信品質の変動が、制御性能や自己位置推定の安定性に大きな影響を及ぼす。従来、クラウド計算資源を活用することで高性能な処理が可能となる一方、通信品質が低下した場合には処理遅延や制御破綻が生じる問題がある。また、通信品質に基づいて処理の実行位置を切り替える場合、瞬間的な通信変動に反応すると切り替えが頻発し、かえって制御の不安定化を招く恐れがある。

本研究では、通信品質を時間推移的に観測し、直近の通信状態に基づいて判断を行うことで、不要な切り替えを抑制しつつ、実行位置を動的に切り替える制御方式を提案する。本手法により、通信不安定環境下においても、安定したロボット動作の実現を目指す。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- 通信品質の変動を考慮し、アプリケーションの実行位置を動的に切り替える制御方式を提案した。
- すべての履歴データを用いず、直近の通信状態に基づく軽量の切り替え機構を設計・実装した。

2 背景

近年の自律走行ロボットでは通信品質の変動を考慮し、処理をローカルとクラウド間で切り替える計算オフロード手法が提案されている。Liao らは、通信遅延や計算資源を考慮した最適化により、オフロード先を適応的に決定する手法を示した [1]。これらの手法は、高性能な計算資源を有効活用できる点で有用である一方、最適化や学習に基づく処理を前提とする場合が多い。

一方、ロボットの遠隔操作や SLAM においては、通信品質が短時間で変動する環境下での運用が想定され、即時的

な応答性や処理の継続性が強く要求される。このような環境では、すべての履歴データを用いた学習や最適化よりも、直近の通信状態といった部分的な情報を時間推移的に用いて動的に切り替える手法が有効であると考えられる。

3 設計

自律走行ロボットにおいて通信品質の変動に応じて処理の実行位置を切り替える制御方式を設計した。切り替えシステムは図 1 のような形で通信品質を元に切り替えを行う。通信状態は一定周期で観測し、遅延や通信成功率などの指標を用いて評価する。瞬間的な変動に過度に反応しないよう、直近の複数時刻の通信状態を用いて時間推移的に判定を行う。判定結果に基づき、処理はサーバーかローカルで実行される。これにより、不要な切り替えを抑制しつつ、通信不安定環境下における安定した制御を実現する。

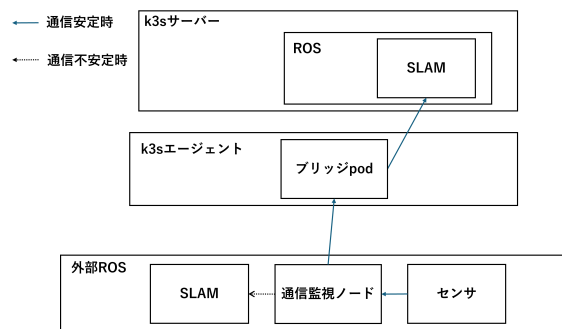


図 1. システム構成図

4 実装

クラスタ管理基盤として実装を行い、クラウド側処理をサーバー上に配置した。センサの実行や通信監視はクラスタ外で動作し、取得したセンサデータをクライアントを経由してサーバーへ送信する構成とした。通信状態は ping により RTT およびパケットロス率として取得し、時系列

的に蓄積された直近の通信品質に基づいて、処理の実行位置を動的に切り替える。また、連続した通信劣化が検出された場合のみ切り替えを行うことで、切り替え頻発を抑制する実装とした。

5 実験評価

本研究では、提案した動的切り替え機構の有効性を検証するため、通信品質が変動する環境を想定した実験を行った。表 1 のような実験環境で実験を行った。クラスタ管理基盤に k3s を使用し自己復旧機能を活用。ロボットの動作や通信には k3s とともに ROS を活用した。

実験では、RTT およびパケットロス率の時間推移、処理実行位置の切り替え回数、および処理の継続性を評価指標として測定した。比較対象として、固定的にクラウド処理を行う静的構成を用いた。

図 2 に静的構成における通信品質と処理実行位置の推移を示す。図の見方としては、青の塗りつぶしがクラウドの SLAM 利用、オレンジの塗りつぶしがローカルの SLAM 利用、青の折れ線グラフが実際の RTT の変動、オレンジの折れ線グラフが閾値を表している。通信品質の一時的な悪化に対して頻繁な切り替えが発生した。一方、図 3 に示す動的構成では、通信品質を時間推移的に評価することで切り替え頻度が抑制され、安定した処理継続が実現されていることが分かる。実際の実験環境を以下に示す。

表 1. 実験環境

項目	内容
OS バージョン	Ubuntu24.04
ROS ディストリビューション	Jazzy Jalisco
SLAM	SLAM Toolbox
クラスタ管理基盤	k3s
エッジデバイス	Raspberry Pi5

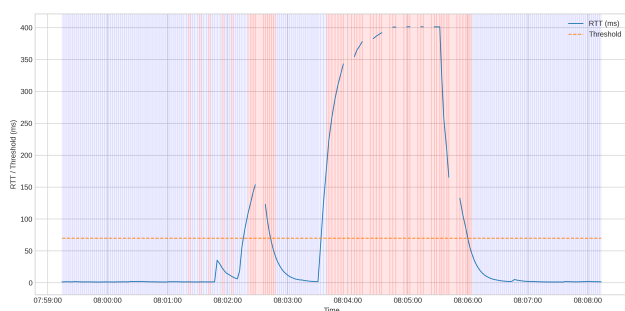


図 2. 静的システムの通信品質と処理実行位置の推移図

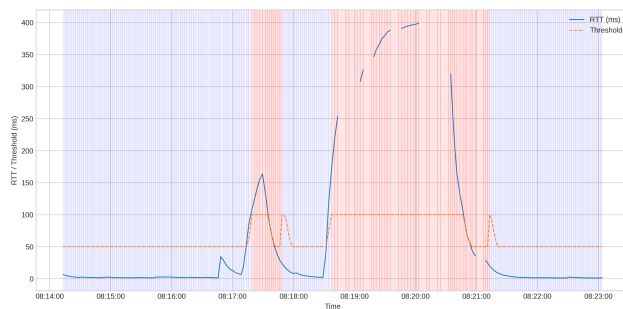


図 3. 動的システムの通信品質と処理実行位置の推移図

6 考察

実験結果より、提案手法は通信品質の悪化時に処理をロボット側へ切り替えることで、処理遅延や通信断による影響を抑制できることが確認された。また、通信品質を時間推移的に評価し、連続した劣化が観測された場合のみ切り替えを行うことで、瞬間的な通信変動による不要な切り替えを抑制できた。一方、閾値設定によって切り替え応答性が変化するため、環境に応じたパラメータ調整が今後の課題である。更に、今回はパケットロスを使用したが SLAM の map データを用いて切り替えを行うことでより SLAM に沿ったシステムの実現を目指したい。

7 終わりに

本研究では、通信品質を直近の情報として時間推移的に扱うことで、切り替え頻発を抑制しつつ安定した処理継続が可能であることを示した。今後の課題として、オフロード対象アプリケーションの特性に応じた切り替え指標の導入が挙げられる。例えば SLAM を対象とする場合、RTT やパケットロス率に加えて、地図更新頻度や自己位置推定の安定性、マップデータの変化量などの情報を切り替え判断に利用することで、より SLAM の動作状況に即した実行位置制御が可能になると考えられる。これにより、通信状態と処理内容の双方を考慮した、より実運用に適した動的オフロード制御の実現が期待される。

参考文献

- [1] Liao, Z., Peng, J., Xiong, B., Huang, J., “Adaptive offloading in mobile-edge computing for ultra-dense cellular networks based on genetic algorithm”, *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, Vol. 10, No. 15, 2021. DOI: 10.1186/s13677-021-00232-y.