

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。そこで本研究では、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

このような課題に対し、近年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。そのため、本研究では通信状態の即時的な変化に着目し、軽量かつ実装容易な切り替え機構を用いた制御方式を検討する。

3 設計

本研究では、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、処理は遠隔側またはロボット内部で実行され、通信品質が悪化した場合でも処理の継続性が保たれる。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。

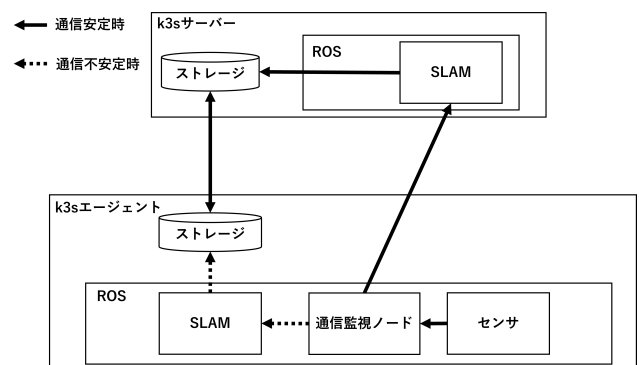


図 1. システム構成図

4 実装

本研究では、クラスタ管理基盤として k3s を用い、クラウド側処理を k3s サーバー上に配置した。ロボットは k3s

エージェント外で動作し、取得したセンサデータを k3s エージェントを経由して k3s 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。

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。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、処理の不安定化が確認された。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、通信変動下においても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 バージョン	Jazzy
SLAM	SLAM Toolbox
エッジデバイス	raspberrypi5

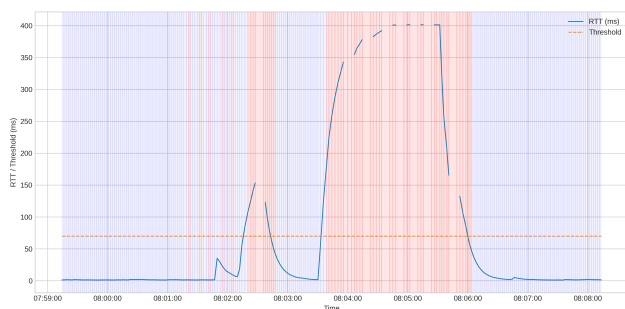


図 2. 静的システムの実験図

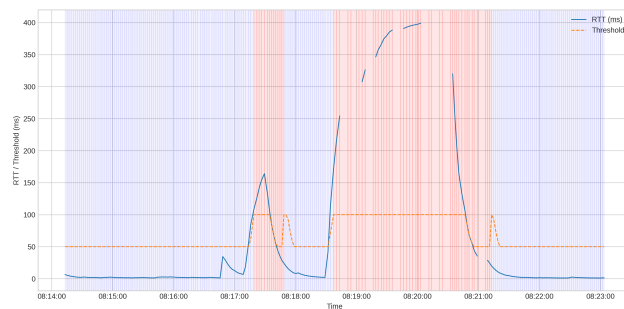


図 3. 動的システムの実験図

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。

7 終わりに

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提案し、クラウドとロボット単体の実行位置を動的に切り替える機構を実装・評価した。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。本手法は、通信環境が不安定な実運用環境において、柔軟かつ実用的な制御方式として有効であると考えられる。

以下の参考資料を参照した。

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.
- [2] Rancher Labs, “k3s: Lightweight Kubernetes”, <https://k3s.io/>, 2019.