

劣悪な通信環境下において 動作継続性を維持する遠隔ロボット通信方式

角ヶ谷将太¹ 相川雄也¹ 浦野健太¹ 米澤拓郎¹ 河口信夫^{1,2}

概要：近年、ロボットの遠隔操作の需要は拡大を続け、医療における遠隔作業支援や災害対応など、多様な分野で活用されつつある。さらに、建設現場や土木作業など、人の立ち入りが困難または危険な環境においても、遠隔操作技術の活用が期待されている。遠隔操作にはさまざまな操作形態があるが、本研究では、操作者が移動経路を入力し、ロボットがその経路に沿って移動する操作形態に着目する。このような経路入力型の操作は直感的な指示が可能である一方、経路情報が逐次的に生成・送信される構造を持つため、パケット損失により経路の一部が欠落すると追従に必要な情報が不足しやすく、通信品質の影響を受けやすいという課題を有する。特に、劣悪な通信環境においてはパケット損失により制御情報が欠落し、ロボットの追従が停止したり、本来の経路から逸脱する問題が生じる。パケット損失に対する要因分析や手法に関する先行研究は存在するものの、パケット損失時においても操作の継続性を維持する手法は十分に確立されていない。そこで本研究では、劣悪な通信環境下における遠隔操作の継続性を確保するため、経路情報に新たな waypoint を逐次追加しながら送信する通信方式を提案し、既存手法との比較評価を行った。評価実験の結果、提案手法はバーストのパケット損失区間における空間的連続性および、時間的継続性、さらに追従品質においてベースライン手法を上回る結果を示した。また、劣悪な通信環境下においても入力経路に沿った確実な追従が行われ、遠隔操作の継続性維持が確認された。

A Communication Method for Maintaining Control Continuity in Remote Robot Operation under Severe Network Degradation

SHOTA TSUNOGAYA¹ YUYA AIKAWA¹ KENTA URANO¹ TAKURO YONEZAWA¹
NOBUO KAWAGUCHI^{1,2}

1. はじめに

遠隔ロボット操作は、危険環境や遠隔地における作業を可能にする基盤技術であり、災害対応、医療、産業分野などにおいて広く応用されている [2], [3], [4]。これらのシステムでは、操作者の入力を通信ネットワークを介してロボットに伝達し、その応答をフィードバックとして受け取り操作が成立する。遠隔操作においては、操作者が直感的に対象を制御できる操作性の高さが重要である。操作性が低い場合、意図した動作の実現が困難となり、作業効率や安全性の低下につながる [5], [6]。このような操作性の観点

から、本研究では操作者が視覚的に経路を直接指定でき、操作中に経路を逐次的に生成・修正でき、直感的な操作が可能となる経路入力型の操作形態に着目する。

しかしながら、実環境における通信ネットワークではパケット損失が避けられず、これが遠隔操作の安定性に直接的な影響を与える。特に無線通信を用いたネットワーク化制御では、過酷な環境における伝搬損失や干渉により、バースト的なパケット損失が発生し得る。このような通信制約下での制御問題は、Networked Control Systems (NCS) の分野においても広く議論されており、パケット損失が制御性能に与える影響が体系的に整理されている [7], [8]。また、通信負荷を低減するためにイベント駆動型制御も提案されているが、入力が到達しない期間における動作継続性の確保は十分ではない [9]。Liu らは平均パケット誤り率

¹ 名古屋大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Nagoya University

² 名古屋大学 未来社会創造機構
Institutes of Innovation for Future Society, Nagoya University

0.6のような劣悪な通信劣化条件において、大規模なパケット損失により制御が逸脱し、最終的にシステム停止に至る可能性を示している [10]。このような環境では、制御入力やセンサ情報が断続的に欠落するため、ロボット動作の継続的維持が困難となる。本研究では、このような環境においても、ロボットが受信済み情報に基づいて追従動作を停止せず継続できる性質を動作継続性と定義する。特に本研究で対象とする経路入力型の操作形態では、生成された経路が逐次的に送信されるため、パケット損失が発生すると経路の一部が欠落する。特にバースト的なパケット損失や通信途絶が生じた場合には、連続した経路区間の欠落により追従に必要な情報が不足する。その結果、動作の停止や不連続な挙動が生じ、動作継続性が著しく低下する。

これまで、パケット損失環境下における遠隔操作手法に関する研究は数多く行われてきた。例えば、モデル予測制御 (Model Predictive Control: MPC) や機械学習を用いた手法により、将来状態の推定や適応的な制御が試みられている [11], [12], [13], [14]。しかしこれらは入力が継続的に到達する状況を前提としており、バースト的なパケット損失が発生した場合には制御更新が行えない。一方で、通信の観点からは、メッセージの到達率を向上させるための手法が広く利用されている。ここで、本研究では送信されたメッセージが欠落なく受信側に到達する性質を、通信品質に関する指標として通信の完全性と呼ぶ。例えば MQTT は、QoS (Quality of Service) レベルを選択し、メッセージの到達保証の度を調整できる。高い QoS レベルを選択した場合、通信の完全性は向上するが、再送処理に伴う遅延の増大というトレードオフが生じる [15]。

本研究では、高いパケット損失率またはバースト的なパケット損失により、制御入力の到達が断続的に失われる通信状況を劣悪な通信環境と定義する。このような状況に対して、経路を逐次的に送信する操作形態への対処手法は十分に検討されていない。そこで本研究では、経路入力型の操作形態を用いた劣悪通信環境下でロボットが停止せず、入力経路に沿った追従動作の継続性維持を目的とする。そのために、本研究では経路情報に新たな waypoint を追加しながら送信する手法によって、各送信が単独でも意味を持つ通信方式を提案する。本手法では、各送信は未受信区間の先頭からの部分列として構成されるため、パケット損失が発生した場合でも後続の送信によって欠落情報を補完可能である。これにより、再送や将来状態の予測に依存せず、受信済みの情報のみを用いて動作継続性を維持できる。従来手法が通信の完全性や連続的な入力到達を前提とするのに対し、本手法は劣悪な通信環境下においても追従動作を継続可能とする点に特徴がある。本研究では、このような経路に基づく追従動作を行う移動ロボットを対象とし、ロボット側での経路補完や経路計画を行わず、受信した経路情報のみに基づいて追従を行う構成を前提とする。これ

は、通信方式そのものが動作継続性に与える影響を明確に評価するためである。本研究の主な貢献は以下のようにまとめられる。

- 経路情報への新たな waypoint の逐次追加送信により、空間的連続性を維持し、入力経路に沿った確実な追従が可能な通信方式を提案した。
- 受信済みの経路情報のみの逐次消費によって、パケット損失中における追従の停止を抑制し、追従の時間的継続性の維持を可能とした。
- パケット損失を伴う通信環境下において評価を行い、提案手法は空間的連続性、時間的継続性、さらに追従品質において、ベースライン手法を上回るスコアを達成し、通信量の増加というトレードオフを伴いつつも、その有効性を示した。

2. 関連研究

2.1 パケット損失に対する制御的アプローチ

遠隔操作システムにおいては、操作者の入力を逐次的に送信し、ロボットの状態を更新する方式が一般的である。このような逐次入力型の枠組みにおいては、パケット損失が制御性能に直接的な影響を与えるため、これらを補償するための制御手法が多数提案されてきた。また、日本国内においても、ネットワーク遅延環境下における遠隔ロボット制御や、通信遅延補償に関する研究が行われている [1]。古典的には、バイラテラル制御における遅延の影響を低減するための手法が提案されており [16], [17]、遅延環境下でも安定性を維持するための理論的枠組みが構築されている。また、制御構造の違いによる性能比較や実験の評価も行われており [18]、遅延条件下における制御特性の理解が進められている。さらに近年では、モデル予測制御を用いた手法により、将来の状態を予測しながら制御入力を決定して、遅延の影響を緩和するアプローチが提案されている [11]。また、予測経路に基づく制御や [12]、深層学習およびニューラルネットワークを用いた遅延補償手法も報告されている [13], [14]。加えて、遅延が操作性能に与える影響の定量化も行われており、通信条件と制御性能の関係が明らかにされている [5]。これらの手法は、軽度のパケット損失が存在する状況において、制御性能の改善に有効である。しかしながら、多くの手法は制御入力が大きく欠落しない状況を前提として設計されている。そのため、バースト的なパケット損失により入力が長時間更新されない場合には、ロボットは新たな制御指令を得られず、動作が停止または不安定化する可能性がある。したがって、通信欠落が発生する状況においても、より冗長かつより補償性の高い手法が求められる。

2.2 通信およびパケット設計に基づくアプローチ

パケット損失の課題に対しては、通信路上で情報到達率

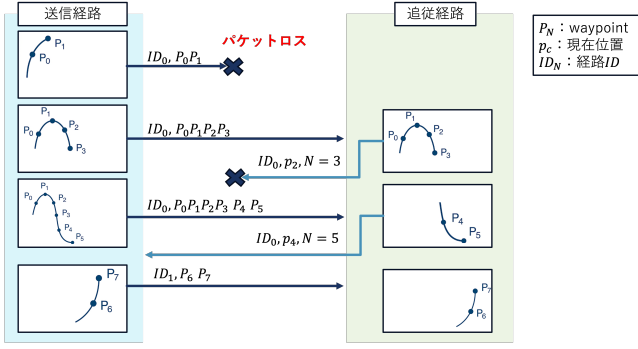


図 1 提案手法の概略図

を向上させるアプローチも広く研究されている。代表的な例として、MQTT に代表されるメッセージ指向プロトコルでは、QoS の設定により配送保証レベルを制御可能であり、QoS1 や QoS2 を選択し、通信の完全性を高められる。しかし、これらの設定では再送処理が行われるため、遅延やジッタの増大というトレードオフが生じる [15]。さらに、ネットワーク化制御 (Networked Control Systems : NCS) の分野では、packetized predictive control (PPC) が提案されている [19] この手法では、単一の packets に複数の予測制御入力を含め、パケット損失時にも一定期間の動作継続を可能とする。その後、PPC の理論的拡張や性能改善が進められている [20], [21]。また、冗長な情報伝送により損失耐性を向上させる手法として、Multiple Description Coding に基づく制御も提案されている [22]。しかし、これらの手法は過去に送信した制御入力を再送する機能を持たないため、パケット損失により欠落した制御入力はその後も補完されない。その結果、バースト的なパケット損失が発生した場合には、経路の一部が欠落した状態が継続し、意図した動作の再現が困難となる。以上より、従来手法は再送に伴う遅延増大、あるいは欠落情報の未補完といった課題を有している。したがって、通信の完全性に依存せず、欠落した過去情報を補完しながら動作継続性を確保する手法が求められる。

3. 提案手法

3.1 手法概要

劣悪な通信環境においては、パケット損失の発生は不可避である。したがって、本研究ではパケット損失の発生を前提とし、欠落した情報を待ちながら、受信済みの waypoint を逐次消費して追従継続を可能とする通信方式を提案する。

提案手法では、通信の完全性に依存せず、受信される経路を構成する waypoint 列の空間的連続性を維持して、入力経路を確実に追従する構造を採用する。従来の制御入力を逐次的に送信する方式では指示の欠落により動作が停止しやすく、信頼性のある通信に基づく方式では再送や確認応答により遅延が増大し、継続的な操作が困難となる。こ

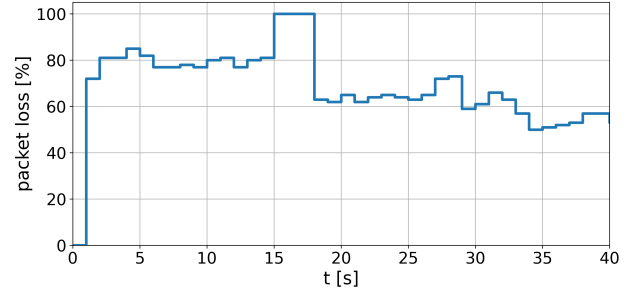


図 2 使用したパケット損失シナリオ

れに対し、本手法では、再送に依存しない通信環境を前提とした上で、経路情報に新たな waypoint を逐次追加して送信する。さらに、ロボット側から得られる受信確認情報に基づき、受信済み区間を送信対象から除外し、未受信部分の先頭から、そこに新たに生成された waypoint を追加した経路を送信する。

図 1 に示すように、提案手法では移動経路を waypoint 列として表現し、前回までの送信内容に新たな waypoint を追加しながら送信する。また、受信確認が得られた後は、受信済み区間を除外し、未受信部分の先頭から、そこに新たに生成された waypoint を追加した経路を送信する。これにより、一部の packets が欠落した場合でも後続の送信によって情報が補完され、空間的連続性が維持される。また、受信済みの waypoint のみを用いた追従により、新たな waypoint が未受信である間も動作が停止せず、時間的継続性が維持される。また、ロボットはどこまで追従したかを表す現在位置 p_N を内部状態として保持し、受信済みの経路の範囲内で追従を継続する。このように、受信側での waypoint の連続性が維持される結果、ロボットは経路上の点を飛び越えず追従できる。さらに、受信済みの情報のみを用いた追従継続によって、パケットロス発生時でも停止を伴わない追従が可能となる。これらにより、入力経路に沿った確実かつ継続的な追従が維持される。

3.2 経路送信モデル

本手法における経路とは、操作者の入力に応じて逐次生成される waypoint 列である。各 waypoint には、生成順を表す整数値の index を付与する。すなわち、 i 番目に生成された waypoint を p_i と表し、 i をその waypoint の index と呼ぶ。この index は waypoint 列上の順序を表す識別子であり、ロボットの位置座標そのものではない。このとき、経路は以下の waypoint 列として表される。

$$P = \{p_0, p_1, \dots, p_N\}, \quad p_i = (x_i, y_i) \quad (1)$$

このとき、各時刻 t における送信内容は、開始インデックス s_t および最新インデックス n_t を用いて、以下の部分経路として定義される。

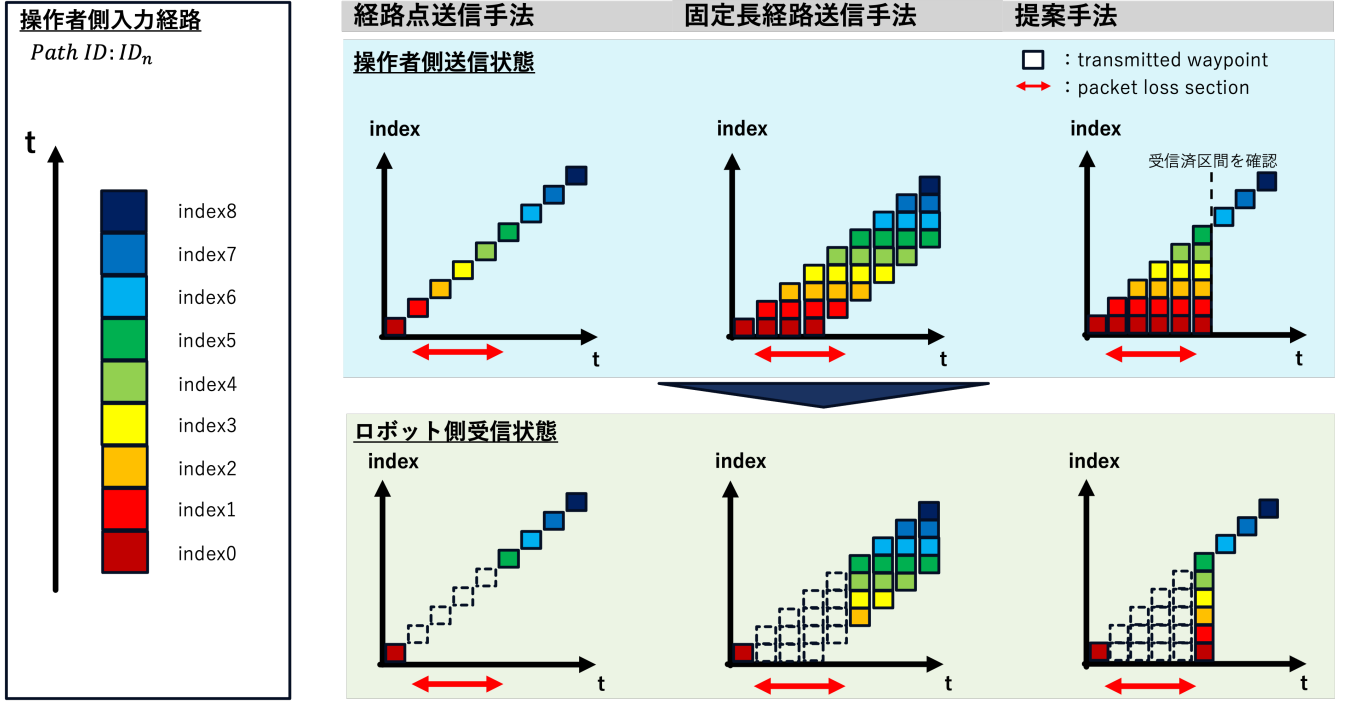


図 3 各通信方式における送信構造とパケット損失発生時の waypoint 受信状態の比較

$$P^{(t)} = \{p_{s_t}, p_{s_t+1}, \dots, p_{n_t}\} \quad (2)$$

ここで、 p_i は index i を持つ waypoint であり、位置座標 (x_i, y_i) を表す。各経路には識別子 ID_n が付与される。この識別子により、異なる経路間の混在を防ぐとともに、新規経路の開始や切り替えの明確な区別が可能となる。各時刻 t における送信内容は、式 (2) で表される部分経路として構成される。すなわち、各時刻における送信データは、受信確認が得られていない区間の先頭から最新点までの部分経路として構成される。受信確認が未取得の段階では、送信データは経路の先頭から最新点までを含む。一方、受信確認が得られた後は、受信済み区間を除外し、未受信部分から最新点までを含む部分経路として構成される。

3.3 逐次追加による経路更新

劣悪な通信環境では、送信された制御情報の一部の欠落により、動作の停止や不連続が生じるという課題がある。特に、逐次的に送信される制御入力に依存する方式では、各送信が独立に必要となるため、単一の欠落が動作全体に影響を及ぼす。この課題に対して、到達した後続の送信によって必要な情報を補完できる構造が求められる。本手法では、同一の経路識別子 ID_N において、式 (2) で定義されるように、各送信において前回までの送信内容に対して新たな waypoint を追加してこの要件を満たす。図 1 左に示すように、各送信では、前回までに送信された経路の末尾に、新たに生成された waypoint を末尾に追加する。したがって、各送信は、受信確認が得られていない区間の先頭から現在の最新 waypoint p_{n_t} までの区間を含む。受信

確認が未取得の段階では、この区間は経路の先頭から最新 waypoint までに一致する。一方、受信確認が得られた後は、送信開始位置 s_t が更新され、受信済み区間を除いた未受信部分から最新 waypoint までを含む構造となる。各送信は、その時点で未受信である区間の先頭を起点として、新たに生成された経路点を末尾に追加する形で構成される。したがって、同一の未受信区間に対しては、後続の送信ほど新たに追加された waypoint を含むため、より長い経路情報を含み、欠落した情報を後続送信によって補完できる。この構造により、各送信が独立に意味を持ち、後続の送信による情報の補完が可能となる。その結果、動作継続性が確保される。

また、経路情報に新たな waypoint を追加する際に、送信データサイズが増加し、遅延に繋がるという課題がある。この課題に対して、送信データのバイナリ化および座標の量子化を導入し、通信量の削減を図る。その結果、1 回の送信あたりのデータサイズは抑制され、waypoint の追加に伴うデータサイズの増大を軽減している。これにより、送信遅延の増加に伴って追加される waypoint 数が増加し、データサイズの増大を通じてさらに遅延を増大させる悪循環を抑制できる。また、本方式は確認応答や再送制御に依存せず、受信済み情報に基づいて状態更新を行うため、遅延の増大や通信停滞の影響を受けにくい。

3.4 受信側処理

受信側では、受信した経路情報を内部バッファに保持し、その中から未追従の部分を逐次消費して動作を生成する。

表 1 実験における主要パラメータ

分類	パラメータ	値
共通条件	waypoint のサンプリング周期	110 ms
	追従速度	0.4 m/s
固定長経路送信手法	1 送信あたりの waypoint 数	50
	経路開始点のシフト点数	3
提案手法	1 回の更新で追加する点数	3

ロボットは、どこまで追従したかを表す現在位置 p_c を内部状態として保持し、この位置に基づいて未追従の経路のみを対象として追従を行う。これにより、既に追従済みの区間の再送を防ぎ、経路に沿った一貫した動作が維持される。このとき、未受信の情報を待機せずに、受信済みの範囲のみを用いて即座に追従を行う。図 1 に示すように、途中の送信パケットが欠落しても、後続送信が到達すれば内部バッファが更新され、未追従部分へ反映される。これにより、通信の遅延や欠落が発生しても、受信済み情報の範囲で動作の継続性が維持される。また、ロボット側は受信した経路を構成する waypoint 列のうち、どの位置まで受信したかを表す情報 (N) を操作者側に送信する。操作者側はこの受信確認情報に基づき、受信済み区間を送信対象から除外し、未受信部分の先頭から、そこに新たに生成された waypoint を追加した経路を送信する。これにより、後続送信による欠落情報の補完可能性を維持しつつ、既に受信済みの区間の重複送信を抑制できる。

4. 評価実験

4.1 実験条件

本システムでは、経路に基づく追従動作を行う移動ロボットを対象とする。ロボットはローカルでの経路補完や経路計画、将来状態の予測を行わず、受信した経路情報のみに基づいて追従を行うものとする。そのため、新たな経路情報が到達しない場合には、ロボットは次の目標位置を得られず、追従が停止する。この設定により、通信方式そのものが動作継続性に与える影響を分離して評価する。

本実験は研究室ネットワーク上に構築した環境で実施した。UI およびロボットは、同一計算機上で独立したプロセスとして構成し、同一ネットワーク上で通信を行う。本手法では、再送による通信の完全性ではなく、受信済み情報のみを用いた動作継続性の維持を目的としている。そのため、通信には再送を伴わない条件を構成可能な通信基盤として WebRTC のデータチャネルを用いた [23], ?。通信経路上のパケット損失が発生し得る環境を再現するため、Linux のネットワークエミュレーション機能である tc netem を用いた。これにより、通信の両方向に対して時間変化を伴うパケット損失を付与し、劣悪な通信環境を再現した。

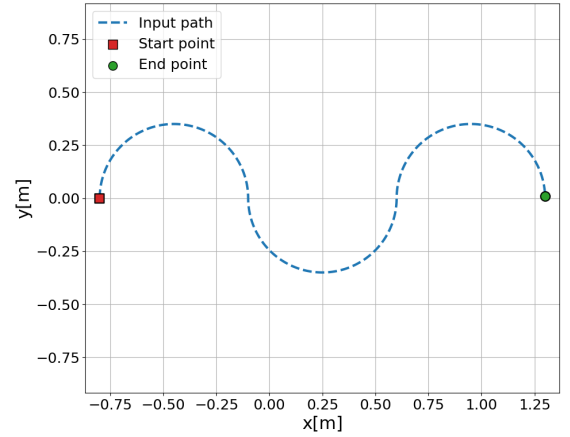


図 4 実験で用いた入力経路

4.2 実験手順

本研究では、実測に基づく損失シナリオをベースとしつつ、バースト的なパケット損失が追従挙動に与える影響を評価対象とした。そのため、通信条件として、図 2 のような時間変化を伴うパケット損失を通信経路の両方向に付与した。

本シナリオは、実環境における劣悪な通信状況を模擬するため、山間部において iperf3 を用いて計測した通信ログに基づき構成したものである。iperf3 は UDP 通信において、各時間区間ごとに送信されたパケット数 N_{tx} と受信されたパケット数 N_{rx} を対応付けて記録し、その差分から損失パケット数を算出する。算出結果は「Lost/Total Datagrams」(損失パケット数/送信パケット数) として出力され、本研究ではこの値を用いて、各 1 秒区間におけるパケット損失率を以下の式で算出する。

$$\text{Loss Rate} = \frac{N_{tx} - N_{rx}}{N_{tx}} \quad (3)$$

詳細な計測手順については、まず事前に TCP による帯域測定を行い、通信可能な上限帯域を把握した。次に、得られた帯域値を基準として、その前後を含む複数の送信レートで UDP 通信を行い、各条件におけるパケット損失率の時系列データを取得した。その結果、低送信レート条件ではパケット損失はほとんど観測されなかった一方、実環境の通信品質制約下では、送信レートの増加に伴い損失率も増加した。特に、高送信レート条件では平均して 60% 以上の高い損失率が継続的に観測された。本研究では、平均して 60% 以上の損失率が継続的に発生する状況を劣悪な通信環境とみなし、その際に取得した損失率の時系列データを評価シナリオとして採用した。さらに、バースト的なパケット損失の影響を明確に評価するため、取得した損失率の時系列データを基に、一定時間においてパケット損失率が 100% となる区間を付与した。これにより、バースト的なパケット損失の影響を評価可能であり、かつ実測に基づく損失特性を反映したロスシナリオを構成した。

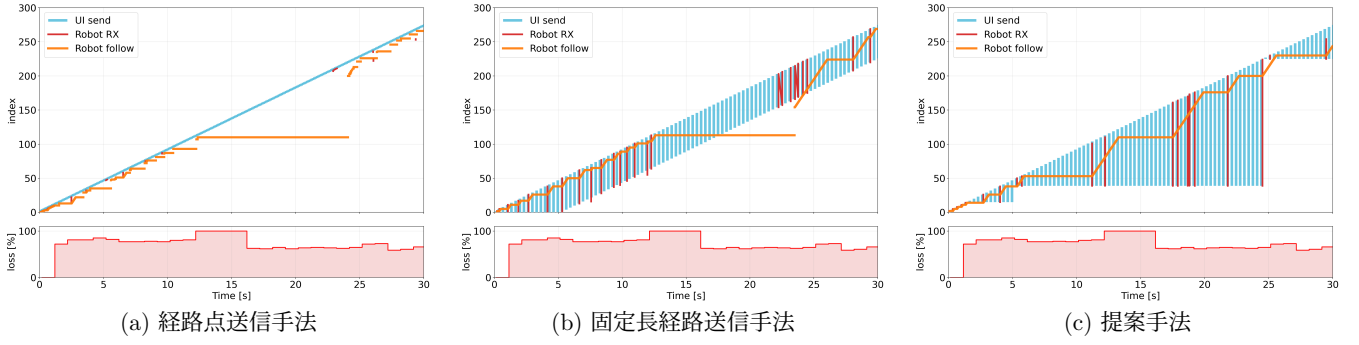


図 5 パケット損失環境下における各通信方式の進捗 index の時間変化

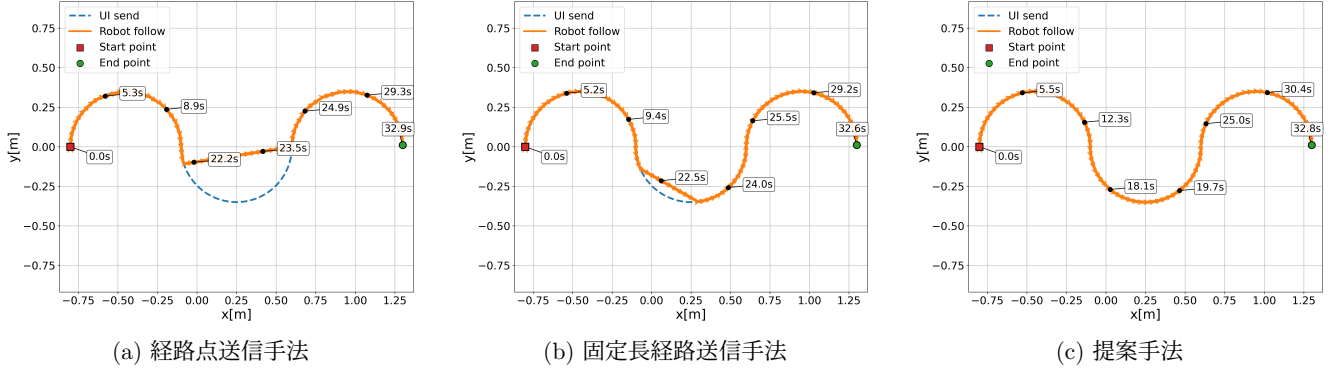


図 6 各通信方式におけるロボットの追従軌跡

実験では、このシナリオに従ってパケット損失率を時間的に変化させ、netem を用いて通信経路に付与した。このとき、1 秒ごとに確率的にパケット損失を発生させると、試行ごとに損失の発生タイミングが変化してしまい、評価結果にばらつきが生じる。そこで、本実験では損失の発生パターンを固定するため、各時刻における損失率および適用タイミングに基づいてシード値を定め、乱数系列を一意に決定した。これにより、同一損失シナリオの下では、パケット損失の発生タイミングが毎回一致するようにした。以上により、試行間でのパケット損失挙動の変動を防ぎ、通信条件の再現性を確保した。

比較対象は、waypoint を逐次的に 1 点ずつ送信する経路点送信方式、一定区間の waypoint 列を隣接送信間で重複を持たせながらスライド送信する固定長経路送信手法、および経路情報に新たな waypoint を逐次追加して送信する提案手法とした（図 3）。各手法において、操作入力により生成される経路、通信プロトコル、およびパケット損失条件は共通とした。本実験で用いた入力経路を図 4 に示す。経路を構成する waypoint 列は操作入力に基づき、一定のサンプリング周期で逐次生成される。本研究では、シミュレータ上の 1 座標単位を 1m として設定した。したがって、図中の座標値は [m] 単位として解釈される。本実験では、この waypoint 列を全方式で共通に用いて、通信方式の差異のみが結果に与える影響を評価可能とした。

一方で、各方式では送信単位が異なるため、それに伴っ

て送信タイミングも異なる。経路点送信手法では、サンプリング周期に従って生成された各点を逐次送信する。固定長経路送信手法では、1 回の送信で用いる点数と、送信区間の開始インデックスをシフトする点数をあらかじめ設定する。一定数の点が蓄積された時点で、設定された点数に基づく部分経路を送信する。その後は、送信開始位置をシフトした位置を新たな基準とする。そこから設定された点数分の点が新たに蓄積されるたびに、部分経路として送信する。したがって、送信タイミングは、新たに蓄積された点数に基づいて決定される。

提案手法では、新たに生成された点を既存の経路に追加し、入力 waypoint 列の先頭から最新点までを含む経路を送信する。一定数の点が蓄積された時点で最初の送信を行い、その後は、一定数の点が新たに追加されるたびに、経路を更新して再送信する。したがって、送信タイミングは、新たに追加された点数に基づいて決定される。各方式における主要パラメータを表 1 に示す。実験では、UI 側で経路を生成し送信を開始すると同時に、設定したパケット損失を通信経路に適用した。ロボットは受信したデータに基づいて逐次追従を行い、その挙動および進捗を記録した。得られたログおよび軌跡をもとに、各方式の挙動を比較した。

4.3 評価

本研究では、劣悪な通信環境下における遠隔操作の継続性を評価するため、ロボットの追従挙動および進捗の観点

から各通信方式を比較した。本研究では空間的連続性、時間的継続性、および追従の確実性に着目する。本研究では、受信済み waypoint 列において、現在の追従位置から連続した waypoint が維持される性質を空間的連続性、動作が時間的に途切れず維持される性質を時間的継続性と定義する。さらに、ロボットが欠落区間を飛び越えたり経路から逸脱したりせず、与えられた経路に沿って移動できる性質を追従の確実性と定義する。受信される waypoint 列の空間的連続性が維持される場合、経路の一部欠落に起因する経路の逸脱が抑制されるため、追従の確実性も高まる。本研究では、これらの性質を可視化および定量指標の両面から評価する。評価には、ロボットの追従軌跡に加え、waypoint 列上でロボットがどの waypoint まで到達したかを表す追従 index を用いる。追従 index は、ロボットが現在追従している waypoint の index であり、値が大きいほど入力経路上を先の waypoint まで進んでいることを示す。本研究では、この追従 index の時間変化を可視化して、追従の停滞や不連続な進行を評価する。index の連続的な増加は、空間的連続性が維持されている状態を示す。index の停滞は新たな waypoint が得られないために生じる追従の停止を示している。また、不連続な変化が生じる場合には、パケット損失によって経路の一部が欠落し、その後に受信した waypoint に直接向かう挙動の発生を示す。この結果、ロボットは本来の経路の一部を経由せずに移動してしまい、追従の破綻が生じる。さらに、軌跡の可視化により、ロボットの移動が連続的に維持されているか、あるいは経路からの逸脱が生じているかを確認する。

加えて、これらの挙動を定量的に評価するため、空間的連続性、時間的継続性、通信特性、追従品質およびバースト的なパケット損失に対する耐性の観点から指標を定義した。本研究では、評価は一定周期でサンプリングされた時系列データに基づいて行い、評価に用いるサンプル数を N とする。また、 T_{burst} をバースト的なパケット損失が発生している時間区間に対応する評価サンプル集合と定義する。式 (2) で定義される送信内容に基づき、時刻 t における受信済み waypoint の集合を $R(t)$ 、現在の追従インデックスを $p(t)$ とする。また、 $L(t)$ を、 $p(t)$ の直後から連続して利用可能な waypoint 数と定義し、以下で表す。

$$L(t) = \max\{k \geq 0 \mid p(t) + i \in R(t), i = 1, \dots, k\} \quad (4)$$

まず、空間的連続性は、Burst Continuous Waypoint Count (BCWC) により評価する。これは、バースト的なパケット損失区間において現在の追従位置の直後から連続して利用可能な waypoint 数 $L(t)$ の平均として定義される。この値が大きいほど劣悪な通信環境時において、空間的継続性が高く維持されることを示す。

$$\text{BCWC} = \frac{\sum_{t \in T_{\text{burst}}} L(t)}{|T_{\text{burst}}|} \quad (5)$$

次に、時間的継続性は、追従停止がどの程度抑制されているかを表す指標であり、Burst Stop Time Ratio (BSTR) により評価する。ここで BSTR は、バースト的なパケット損失区間における停止時間の割合を表す。これはバースト的なパケット損失が発生している時間区間における $L(t) = 0$ の割合として算出される。この値が小さいほど、バースト的なパケット損失発生時における追従停止が抑制されていることを示す。

$$\text{BSTR} = \frac{\sum_{t \in T_{\text{burst}}} \mathbf{1}(L(t) = 0)}{|T_{\text{burst}}|} \times 100 \quad (6)$$

次に、通信特性の観点から、Waypoint Loss Rate (WLR) および Total Transmitted Data (TTD) を定義する。WLR は生成された waypoint のうち最終的に一度も受信されなかった割合を表す。ここで、 R_{unique} を、全評価期間において一度でも受信された waypoint 集合、 G を生成された waypoint の集合とする。この値が小さいほど、生成された waypoint が欠落せず受信されていることを示す。

$$\text{WLR} = \left(1 - \frac{|R_{\text{unique}} \cap G|}{|G|}\right) \times 100 \quad (7)$$

TTD は送信されたデータ量の総和を表す指標である。ここで、 M を送信パケット数、 s_k を第 k パケットのデータサイズとする。この値が大きいほど通信量が多いことを示す。なお、本研究では $1 \text{ kB} = 1024 \text{ bytes}$ として換算を行った。

$$\text{TTD} = \sum_{k=1}^M s_k \quad (8)$$

さらに、追従品質は目標経路に対する誤差の Trajectory Error RMSE (RMSE) により評価する。理想経路上の位置を $\mathbf{p}_t = (x_t, y_t)$ 、対応するロボット位置を $\mathbf{p}_t^* = (x_t^*, y_t^*)$ とすると、RMSE は以下で定義される。この値が小さいほど、経路に対する高精度な追従の実現を示す。

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \|\mathbf{p}_t - \mathbf{p}_t^*\|^2} \quad (9)$$

なお、各指標は各実験試行において、時系列データに基づく平均値として算出する。すなわち、BCWC, BSTR, RMSE などの指標は、各試行内で時系列平均化された値である。表 2 に示す値は、これらの試行ごとの指標値を複数試行にわたって平均したものであり、(図 7) はそれらを可視化したものである。

さらに、バースト的なパケット損失に対する耐性を評価するため、Continuous Tracking Burst Loss Length (CT-BLL) を定義する。CT-BLL は、バースト的なパケット損失

表 2 各手法における性能比較

手法	BCWC	BSTR [%]	WLR [%]	RMSE [m]	TTD [KB]
経路点送信手法	0.100 ± 0.087	95.25 ± 0.95	61.93 ± 5.85	0.054 ± 0.051	11.719 ± 0.000
固定長経路送信手法	2.183 ± 2.546	80.75 ± 5.39	22.53 ± 4.87	0.147 ± 0.103	22.688 ± 0.000
提案手法	3.470 ± 2.446	74.75 ± 4.79	0.00 ± 0.00	0.005 ± 0.000	23.361 ± 6.177

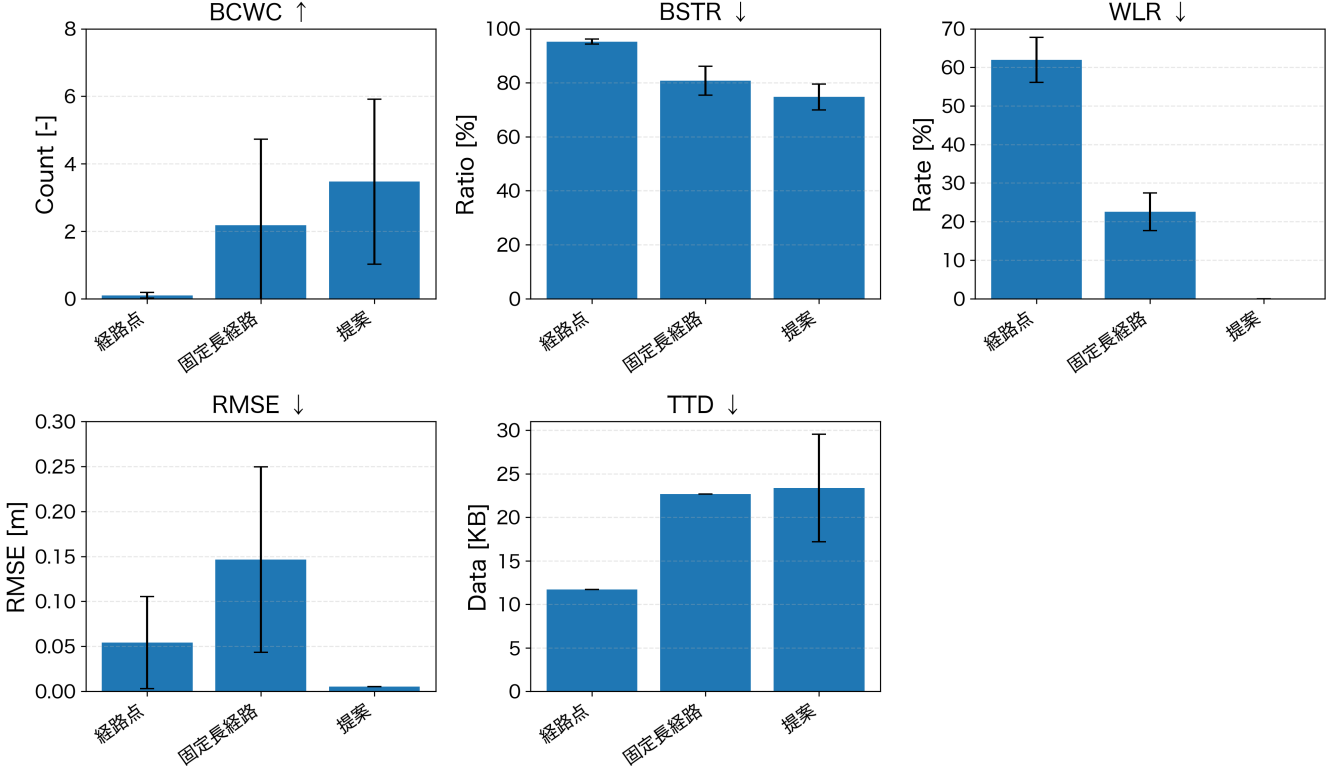


図 7 各通信方式における BCWC, BSTR, WLR, RMSE, TTD の比較

長を段階的に変化させた実験において、追従が一度も途切れることなく維持された最大のバースト的パケット損失長である。ここで、 $C(\tau)$ はバースト的パケット損失長 τ において追従が連続に維持される場合に 1、不連続となる場合に 0 をとる指示関数である。本研究では、バースト的パケット損失長を 0~4 秒の範囲で変化させて評価を行った。

$$CT - BLL = \max \{ \tau | C(\tau) = 1 \} \quad (10)$$

この指標により、各手法が許容可能なバースト損失の範囲、すなわち想定外の長さの損失に対しても追従の連続性を維持できるかどうかを評価できる。以上の可視化結果および定量指標をもとに、各通信方式におけるバースト的パケット損失区間での空間的連続性、時間的連続性、追従の確実性、追従品質、通信特性およびバースト的パケット損失に対する耐性を比較評価した。

4.4 結果

各通信方式におけるロボットの追従挙動および進捗の可視化結果を図 5、図 6 に示す。図 5 において、水色線は送

信された waypoint の index、赤線はロボット側で受信された waypoint の index、橙線はロボットが実際に追従した waypoint の index を示す。また、縦線は各送信に含まれるインデックス範囲を表しており、送信単位の違いを可視化している。図 6 は、各通信方式におけるロボットの移動軌跡を示しており、理想経路と実際の追従軌跡の比較により、経路からの逸脱や欠落の有無を可視化している。

経路点送信手法では、図 5 において、パケット損失が発生した区間において index の停滞が見られ、ロボットの追従が停止する挙動が確認された。また、通信回復後には index の不連続な増加が生じ、図 6 においても、経路の一部を経由しない移動が観測された。固定長経路送信手法では、図 5 において、経路点送信手法と比較して追従の継続性は一定程度改善された。しかし、パケット損失が発生した区間においては index の停滞が見られ、さらに一部の区間では index の不連続な変化が生じた。図 6 においても、waypoint の一部が欠落し、経路から逸脱する移動が確認された。一方、提案手法では、図 5 において、パケット損失が発生した区間においても進捗は連続的に増加しており、追従の停滞はほとんど見られなかった。また、図 6 におい

表 3 各手法における連続追従可能な最大バーストロス長

手法	CT-BLL [s]	備考
経路点送信手法	0	バースト発生直後に不連続化
固定長経路送信手法	2	2 秒超で不連続化
提案手法	4	評価範囲内では不連続なし

でも、大きな逸脱は見られず、経路に沿った移動が維持されていた。

続いて、各手法の定量評価結果を表 2 に示す。表中の値は、各実験試行における指標の平均値と標準偏差 (mean $\pm$ std) を表している。まず、バースト的パケット損失区間における空間的連続性を表す BCWC において、提案手法は 3.470 を示した。経路点送信手法 (0.100) と比較して約 35 倍、固定長経路送信手法 (2.183) と比較しても約 1.6 倍に向上した。パケット損失環境下においても連続して利用可能な waypoint 数が多いことが確認された。次に、バースト的パケット損失区間における時間的継続性を表す BSTR において、提案手法は 74.75% を示した。経路点送信手法 (95.25%) および固定長経路送信手法 (80.75%) より低い値となった。この結果より、提案手法ではバースト的パケット損失が発生した区間においても、追従停止が相対的に抑制されていることが確認された。さらに、WLR は提案手法において 0.00% を示し、全ての waypoint が最終的に受信されていることが確認された。また、RMSE は 0.005 を示し、経路点送信手法 (0.054) および固定長経路送信手法 (0.147) と比較して、10 倍以上小さい値となった。一方で、TTD は提案手法において 23.361 KB であり、ベースライン手法と比較して増加していた。さらに、バースト損失に対する耐性を評価するため、各手法の CT-BLL を比較した (図 3)。経路点送信手法では、短時間のバースト的パケット損失でも追従の不連続が観測されたため、CT-BLL は極めて小さい値となった。固定長経路送信手法では、2 秒のバースト的パケット損失までは追従の連続性が維持されたが、それを超える条件では不連続が観測されたため、CT-BLL は約 2 秒となった。一方、提案手法では、実験した最大のバースト的パケット損失長である 4 秒においても追従の不連続は観測されなかった。

4.5 考察

経路点送信手法では、各送信が単一の waypoint に対応するため、パケット損失が発生すると対応する waypoint は失われ、後続の通信による補完も行われず、このため、一度欠落した waypoint は二度と届かず、結果として WLR が 61.93% と高い値を示す。また、追従に必要な waypoint が連続して存在しないため、利用可能な waypoint 列は断片化し、BCWC は 0.100 と極めて小さい値に留まる。この断片化は追従の継続を阻害し、BSTR が 95.25% と高い値

となった原因と考えられる。さらに、欠落した区間を補完できないため、通信回復後には受信された最新の waypoint へ直接遷移する挙動が生じ、経路の一部を経由しない不連続な追従が発生する。そのため、RMSE の増加につながったと考えられる。

固定長経路送信手法では、送信ごとに一定長の waypoint 列を含み、隣接する送信間に冗長性が存在する。この冗長性により、単発のパケット損失に対しては、後続の送信によって欠落した waypoint が部分的に補完される。しかし、この冗長性は送信ごとに固定長であるため、補完可能な waypoint はあらかじめ設定された範囲に制限される。すなわち、想定したバースト的パケット損失長に対しては耐性を持つものの、それを超える長さのバースト的パケット損失が発生した場合には、欠落した waypoint を補完できない。この制約は CT-BLL に現れており、固定長経路送信手法では 2 秒までのバースト的パケット損失に対しては連続性が維持されるが、それを超えると追従が不連続となる。また、WLR は 22.53% と依然として一定量の欠落が残存し、また利用可能な waypoint 列も部分的に途切れるため、BCWC は 2.183 に留まった。同様に、waypoint の枯渇が発生する時間が存在するため、BSTR が 80.75% と高い値を示した。

これに対し提案手法では、未受信区間を含む waypoint 列に新たな waypoint を逐次追加して送信し、時間方向に冗長性を持たせる。この構造により、後続の送信が過去の欠落を包含するため、パケット損失が発生しても、欠落した waypoint は後続の通信によって補完される。その結果、全ての waypoint が最終的に受信され、WLR は 0.00% となった。また、ロボットは受信済みの waypoint 列のうち、連続して利用可能な範囲を逐次消費して追従を行う。そのため、新たな waypoint が未受信である間も動作が停止しない。この性質により、バースト的パケット損失区間においても連続して利用可能な waypoint が保持され、BCWC は 3.470 と最も高い値を示した。また、BSTR は 74.75% となり、経路点送信手法および固定長経路送信手法より低い値を示した。その結果、操作者からは追従が途切れず継続しているように観測されると考えられる。さらに、waypoint の欠落が補完されることで、経路の飛び越しが抑制され、入力経路に沿って確実に追従する。RMSE は 0.005 と極めて小さい値を示しているが、これは位置ずれではなく、入力に対して追従する構造上、時系列的にわずかに遅れて追従するため非ゼロ値であると考えられる。一方で、本手法は未受信区間を繰り返し含むため、同一の waypoint が複数回送信され、TTD は 23.361 KB と増加した。一般に送信データ量の増加はパケット損失率や遅延の増大につながるが、その条件下においても、BCWC, BSTR, WLR, RMSE の各指標において大幅な改善が得られた。これは、本手法の動的冗長性が、通信損失の影響を上回る効果を持

つことを示している。また、評価範囲内において追従の不連続は観測されず、明確な CT-BLL は評価範囲上限値の 4 となった。これは、未受信区間を含む waypoint 列を逐次追加して送信する構造により、後続の送信が過去の欠落を包含するため、バースト的パケット損失長に依存せず欠落した waypoint を補完可能であることに起因すると考えられる。すなわち、本手法は固定長手法のように事前に設定された補完範囲に依存した耐性の上限を持たない。

以上より、提案手法は、送信データ量が増加するトレードオフを伴うものの、過去に欠落した waypoint を後続の送信によって補完可能とする構造により、受信 waypoint の連続性を維持し、追従の確実性を確保する。これにより入力経路から逸脱せず追従するという遠隔操作に必要な条件を満たす。さらに、バースト的なパケット損失が発生した場合でも、新たな waypoint が未受信である間は、受信済みの waypoint に基づいて追従を継続するため、操作者からは動作の停止が抑制され、全体として追従が継続しているように観測される。このようなユーザ視点での時間的継続性の維持は、従来手法との差分として特に重要な特徴である。また、補完可能な範囲が事前の設定に制約されないため、想定を超えるバースト的パケット損失が発生した場合においても、追従の停止が抑制され、経路からの逸脱は生じない。すなわち、本手法は、内部的な受信 waypoint の空間的連続性および追従の確実性の維持を満たしつつ、ユーザが知覚する動作の継続性も維持されやすい。そのため、本手法では劣悪な通信環境下においても動作継続性を維持した遠隔操作を実現可能であると考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、劣悪な通信環境下においても、ロボットが経路から逸脱せず、継続的な追従を可能とする通信方式を提案した。提案手法では、経路情報に新たな waypoint を逐次追加しながら送信することで、後続送信による欠落情報の補完を可能とした。さらに、ロボットの追従挙動および進捗の観点から各通信方式の比較評価を行った。提案手法では、バースト的なパケット損失時においても追従が継続され、経路に沿った移動の維持を確認した。一方で、提案手法では waypoint を逐次追加して送信する構造上、送信データ量が増加する傾向がある。この通信量の増加は、通信負荷の増大を通じて、パケット損失率の悪化につながる可能性がある。本研究ではバイナリ化および量子化により通信量削減を行ったが、動作継続性と通信効率の両立にはさらなる改善が必要である。

また、本研究の評価はシミュレーション環境上での検証に留まっており、実環境における有効性については未検証である。今後は、遅延や帯域制約を含む、より現実的な通信環境における評価を行うとともに、実機ロボットを用いた検証を通じて、提案手法の実用性を明らかにする予定で

ある。

謝辞 本研究の一部は、株式会社エフ・シー・シー及び内閣府 SIP3 (JPJ012495) に支援いただきました。

参考文献

- [1] 村上俊之, 「ネットワークベースロボットシステムにおける通信遅延補償」, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), vol. 129, no. 7, pp. 674–677, 2009.
- [2] P. Farajiparvar, H. Ying, and A. Pandya, “A Brief Survey of Telerobotic Time Delay Mitigation,” *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, 578805, 2020.
- [3] P. F. Hokayem and M. W. Spong, “Bilateral Teleoperation: An Overview,” *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 22, no. 1, pp. 5–22, 2006.
- [4] T. B. Sheridan, *Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control*, MIT Press, 1992.
- [5] C. Cundar, M. S. Erden, and H. I. Bozma, “Quantifying the Effects of Network Latency for a Teleoperated Robot,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 118709–118721, 2023.
- [6] S. B. Kamtam, Q. Lu, F. Bouali, O. C. L. Haas, and S. Birrell, “Network Latency in Teleoperation of Connected and Autonomous Vehicles: A Review of Trends, Challenges, and Mitigation Strategies,” *Sensors (MDPI)*, vol. 24, no. 12, article 3957, 2024.
- [7] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, “A Survey of Recent Results in Networked Control Systems,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 138–162, 2007.
- [8] A. S. Matveev and A. V. Savkin, *Control over Communication Networks: Modeling, Analysis, and Design*, Springer, 2018.
- [9] W. P. M. H. Heemels, K. H. Johansson, and P. Tabuada, “An Introduction to Event-Triggered and Self-Triggered Control,” in *Proc. IEEE Conference on Decision and Control*, 2013.
- [10] X. Liu, M. C. De Gennaro, and K. H. Johansson, “Effects of Wireless Packet Loss in Industrial Process Control Systems,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 4, no. 2, pp. 245–253, 2017.
- [11] K. Hatori, T. Tsuji, and M. Kaneko, “Obstacle Avoidance during Teleoperation of Mobile Robots Using Model Predictive Control,” *Advanced Robotics*, 2023.
- [12] Y. Zhang, J. Li, and H. Gao, “Predicted Trajectory Guidance Control Framework for Teleoperation,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 11, pp. 11962–11972, 2022.
- [13] L. Wang, Y. Chen, and X. Li, “Deep Learning-Based Delay Compensation Framework for Teleoperation,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 138541–138553, 2021.
- [14] M. Kim, J. Lee, and S. Park, “Neural Networks for Control in Delayed Teleoperation Systems,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 31, no. 10, pp. 4218–4229, 2020.
- [15] OASIS, “MQTT Version 5.0,” 2019.
- [16] R. J. Anderson and M. W. Spong, “Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 5, pp. 494–501, 1989.
- [17] G. Niemeyer and J. J. E. Slotine, “Stable Adaptive Teleoperation,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 152–162, 1991.
- [18] A. Prakash, M. Tavakoli, and R. V. Patel, “Experimental Comparison Study of Control Architectures for Bilateral Teleoperators,” *IEEE Robotics and Automation Letters*,

vol. 7, no. 2, pp. 3500–3507, 2022.

- [19] Y. Zhao, J. Sun, and J. Chen, “Packet-Based Control for Networked Control Systems,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 54, no. 12, pp. 2874–2880, 2009.
- [20] D. E. Quevedo, E. I. Silva, and G. C. Goodwin, “Packetized Predictive Control over Erasure Channels,” in *Proc. American Control Conference*, pp. 1003–1008, 2007.
- [21] M. Nagahara, D. E. Quevedo, and J. Østergaard, “Sparse Packetized Predictive Control for Networked Control over Erasure Channels,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 59, no. 7, pp. 1899–1905, 2014.
- [22] J. Østergaard, D. E. Quevedo, and A. Ahlén, “Multiple Description Coding for Packetized Predictive Control,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, no. 5, pp. 1377–1382, 2013.
- [23] 三浦勝吏, 「WebRTC を活用した低遅延遠隔操作システムの構築及び評価」, 福島県ハイテクプラザ 南相馬技術支援センター, 令和 4 年度試験研究報告書, 2023.