

氏名	長田 利幸
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	博 1 2 1 1 号
学位授与の日付	令和 8 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科 設計工学専攻
学位論文題目	Studies on Bilateral Control of Flexible Master-Slave System with Kalman Filters for Compensating Communication Failures (通信障害補償のためのカルマンフィルタを用いたフレキシブルマスタースレーブシステムのバイラテラル制御に関する研究)
審査委員	(主査) 教授 澤田 祐一 教授 射場 大輔 教授 増田 新

論文内容の要旨

本論文は、伝送遅延とパケット欠落を伴う柔軟スレーブマスタースレーブアームのバイラテラル制御系におけるデータ補完とランダム遅延に対する補償に関して、制御に必要な情報が十分に伝送できない場合においても、バイラテラル制御系が十分な精度で動作するためのデータ補完方法を確立することが目的である。5章から構成される。第1章は序論であり、第2章ではランダムな伝送遅延とパケット欠落を伴う柔軟マスタースレーブシステムに対するバイラテラル制御系を連続時間システムとして定式化し、パケット欠落時のデータを過去のデータで置き換えた場合のアルゴリズムと性能評価について記述している。第3章では、データ伝送時に遅延が無くランダムなパケット欠落が存在する柔軟スレーブマスタースレーブアームシステムにおいて、離散時間カルマンフィルタの時間更新プロセスを利用した予測によりパケット欠落時のデータ補完を行う方法について述べている。第4章では、一定遅延とランダムなパケット欠落が存在する通信を介した柔軟マスタースレーブアームシステムにおいて、遅延とパケット欠落双方の補償を離散時間カルマンフィルタにすべて統合したものを提案し、その性能を評価している。第5章では、結論を述べている。

通信回線を介したバイラテラル制御では、通信環境により必然的に伝送遅延やパケット欠落がランダムに発生するため、その対処が必要であることから、本研究ではパケット欠落に対するデータ補完を通信回線の向こう側に存在するシステム(マスターアームもしくは柔軟スレーブアーム)の状態推定を行うためのカルマンフィルタに統合したシステムを開発した。第1に、過去のデータに基づいてデータ補完を行う方法、第2にカルマンフィルタの時間更新プロセスに統合して予測補完する方法、第3に伝送遅延による予測とパケット欠落に対する補完を状態推定のためのカルマンフィルタに統合したものを提案した。また、その性能を数値シミュレーションにより実施し、最終的にはパケットの欠落率が50%に達した劣悪な通信環境においても極端正の劣化を起さずに柔軟マスタースレーブアームに対するバイラテラル制御が行えることを示した。

論文審査の結果の要旨

本論文では、伝送遅延とランダムなパケット欠落を伴う通信回線を介した柔軟マスタースレーブアーム系のバイラテラル制御による遠隔操作系における欠落したパケットのデータ補完および伝送遅延に対する処理を、制御対象である柔軟スレーブアームおよび剛体マスターアームに対する状態推定のためのカルマンフィルタに統合し、一括で処理できるシステムを開発した。また、これを用いてバイラテラル制御を用いた遠隔操作系が安定的に動作することを数値シミュレーションにより示した。

特に、パケット欠落現象が離散的な現象であることから、カルマンフィルタを離散時間システムとして記述し、これにパケット補完アルゴリズムを、統合するというユニークなアプローチを示し、その性能が非常に高いことを示した。パケット欠落は、本来データが届くはずの時刻にデータが存在しないことから、カルマンフィルタの状態推定において、観測データによる推定精度を上げるためのデータ更新ができないため、この場合には時間更新プロセスのみを動作させこの出力（事前予測）を推定状態量の代わりとして利用することを提案した。これにより、パケットの欠落率が50%に達してもデータを補完できることが示された。

通信回線においては、パケット欠落のみならず伝送遅延も起こることから、パケット欠落の補完アルゴリズムを統合したカルマンフィルタに対し、さらに伝送遅延に対する処理も統合した。この場合、伝送遅延は一定の遅れであることを仮定してはいるが、その遅れ時間が基地である場合は時間更新に伝送遅れ時間を繰り込み、時間更新を予測処理として動作させることで統合することに成功している。また、この伝送遅延およびパケット欠落に対する補完処理を統合したカルマンフィルタを用いることで、一定遅延とパケット欠落を伴う通信回線を介しての柔軟マスタースレーブアームの遠隔操作が行えることを示した。

本研究で提案された手法は、電波状態の悪い無線 LANなどを介した場合の遠隔制御に応用が可能であり、その重要性は高いと思われる。

本論文は、下記2編の査読付き論文および国際会議論文に基づいており、既に公表されている。また、2編とも本申請者が筆頭である。

査読付き論文：

Toshiyuki NAGATA and Yuichi SAWADA, "Packet Loss Compensation Method Based on Prior Estimates for Bilateral Control of Stochastic Flexible Master-Slave System with Communication Failure," SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Volume18, No.1, 1-15, (2025).

査読付き国際会議論文：

Toshiyuki NAGATA and Yuichi SAWADA, "Bilateral Control of Flexible Master-Slave System with Transmission Delay and Data Loss," 2022 International Symposium on Flexible Automation (ISFA2022), 349-356, (2022).