

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 28 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420184

研究課題名(和文) 不規則な遅れを伴う通信回線を介したバイラテラル制御による遠隔制御システムの開発

研究課題名(英文) Development of Bilateral control for tele-operation system using communication networks with random delay

研究代表者

澤田 祐一 (SAWADA, Yuichi)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：80273548

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：伝送遅れの分布が対数正規分布となると仮定し、その影響が直接出るマスター側およびスレーブ側の観測データにおけるランダム遅れ項をテーラー展開により加法的観測雑音項として書き換える手法を本研究テーマにおいて開発した。観測システムにおけるランダム遅れ時間過程をテーラー展開により加法的観測雑音に書き換える手法を適用することで、平均遅れ時間周りで展開することが可能となった。この手法に基づき状態推定器を設計することで、ランダムな伝送遅れを伴う通信路を介したバイラテラル制御系の構成が可能となった。バイラテラル制御系に搭載する状態推定器としては、開発した状態推定機を適用し有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)：This research is concerned with synthesis and analysis of tele-operation systems using communication networks with random delay. The effect of the random delay of the networks can be rewritten into the additive observation noise representation by using the Taylor expansion method to the observation system. The probability density function of the random delay in communication networks is assumed to be log-normal distributions. Introducing this expression, state estimation problem of tele-operation system with random delay of the communication networks is considered as a state estimation problem based on the nonlinear observation system with additive random delay noise. In this research, the bilateral control system using proposed state estimation method based on the observation data with random delay is considered. Two proposed state estimator is used for the reduction of effect of random delay in the communication networks. The proposed system shows good performance in this research.

研究分野：機械制御

キーワード：バイラテラル制御 ネットワーク ランダム伝送遅延 確率システム 対数正規分布

## 1. 研究開始当初の背景

現代の社会では、未だ人手によってしか為し得ない内容の作業が多くあるが、作業環境が危険を伴う場合や極めて遠方である場合には、作業者が直接現場へ足を運ぶことは現実的でない。もし、通信回線を介した遠隔操作型のコンピュータによって必要な技能を遠隔地に提供できるならば、経済効率は向上し人的負担も軽減される。軽量物の作業に限定すれば軽量のコンピュータを使用でき、消費エネルギーや運搬コストも抑えられるため、遠隔操作軽量コンピュータの研究開発は我が国の将来にとって非常に有用である。通信路を介したコンピュータ等の遠隔制御に関する研究は、Spong 他等によって精力的に行われ、この分野の重要度は増している。

この分野での研究は、一定時間の遅れのみを想定した場合や、不規則な遅れ時間であってもガウス分布や離散的なマルコフ過程でモデル化された遅れ時間を想定したものである。一方で、LAN やインターネットなどの通信ネットワークにおける不規則な伝送遅れはの確率分布は、正規分布や単純なマルコフ過程では不十分であることは明らかであり、実際の不規則伝送遅れの分布に合わせた遠隔操作システムの確立が必要である。

## 2. 研究の目的

本申請者は、図 1 に示す LAN のような不規則な遅延と情報の欠落を伴う通信回線を介して機械的柔軟性を有する軽量コンピュータ（柔軟コンピュータ）と力覚提示装置を接続した遠隔操作システムを研究対象として、その安定性と制御系設計に関する研究を進めてきた。このような構成を取ったシステムに対し、一定伝送遅れ時間を伴う通信路を介した柔軟コンピュータのバイラテラル制御に関して、リャプノフの安定理論に基づいた制御系の設計法が有効であり、その制御系の性能は数値シミュレーションおよび実験により示されている。

これに対し、LAN やインターネットに代表されるデジタル通信回線（以下、通信路）を介して遠隔地にあるコンピュータなどの機械装置を操作する場合、次のような問題が発生する。(i) 不規則な通信遅れの影響が不規則外乱としてフィードバック系に作用し、滑らかな操作が困難となる。(ii) 力覚提示装置に現れる反力にも、不規則伝送遅れの影響が外

乱として現れ、滑らかな操作感が得られなくなり、細かな感触が分からない。これらの問題は、遠隔操作における操作性の悪化や誤操作を招く原因となる。LAN やインターネットなどの通信ネットワークにおける不規則な伝送遅れは、遅れ時間の分布を実際に計測すると対数正規分布となることが報告されている。この知見に基づけば、不規則な伝送遅れの影響を受ける遠隔操作システムは、ある一定の伝送遅れ時間を伴い、かつ対数正規分布に従う不規則外乱を観測雑音として受ける非線形確率システムとして定式化することができる。

また、通信路上での障害によって一時的な情報パケットの不着が発生した場合、伝送情報の欠落が引き起こされる。これに対しては、通信路を離散時間システムとして取り扱い、制御対象（スレーブ側）および操作系（マスター側）を連続時間システムとした連続-離散時間システムとして定式化し、パケットの不着を考慮した状態推定器を用いることで推定精度を大きく低下させることなく不規則な遅れ時間による雑音の影響除去が行えると考えている。

本研究では遠隔操作を可能にするためフィードバック経路に不規則な伝送遅れと情報の欠落を伴う通信路を介したマスター・スレーブ型制御（バイラテラル制御）システムを構築することが目的である。通信路を介した制御システムに関する研究は、今現在多くの研究者が取り組んでいるが、遅れ時間に関して対数正規分布を理論的に導入しこれに基づく確率システム理論的アプローチを行っているものではない。特に、本研究では不規則な遅れ時間の影響を時間軸ではなく、加法的な雑音として取り扱うことを試みている。さらに、伝送情報の欠落に関しては、集合論的なアプローチを考えており、これにより情報欠落に起因する影響を軽減できる可能性が高い。

## 3. 研究の方法

通信路の不規則な遅れ時間の分布が対数正規分布に従うことを前提に、図 1 にあるような構成のシステムの数学モデルを確立する。通信路に対する入力を  $y_i(t)$ 、通信路の遅れ時間を  $\tilde{T} + \Delta T(t, \omega)$  とする。ただし、 $\tilde{T}$  は平均遅れ時間、 $\Delta T(t, \omega)$  は対数正規分布を持つ不規則な遅れ時間、 $\omega$  は不規則性を表すパラメータである。このとき、通信路の出力を  $y_o(t)$

とすると

$$y_o(t) = y_I(t - \tilde{T} - \Delta T(t, \omega))$$

と表すことができる。これを、 $t - \tilde{T}$ まわりでテイラー展開を行うことで、不規則な遅れ時間を伴う通信路の出力を、 $y_I(t - \tilde{T})$ と $\Delta T(t, \omega)$ に関する加法的な非線形項群に分けて近似的に記述することができる。これは、不規則な遅れ時間に起因する非線形な観測雑音を伴う非線形観測システムであると見なすことができる。本研究は、この考え方の下に、不規則な遅れ時間の影響を受けにくい非線形フィルターの設計を、確率システム理論に基づいて行う。理論の検証は、主に数値シミュレーションによって行う。まず初めに、基本的なアプローチが正しいことを示すため、通信路越しに対象となるシステムの状態量を、不規則伝送遅れを伴う通信路を介して伝送し、この表現に基づいて設計した状態推定フィルターにより、通信路の向こう側に位置するシステムの状態を正しく推定することができるかを検証する。

また、不規則な伝送遅れの確率密度関数をいくつかの分布例を用いてフィルターの動作を検証する。さらに、使用するフィルターの形式によって、推定精度がどのように変化するかを見る。

バイラテラル制御に関しては、設計した非線形フィルターを不規則伝送遅れを伴う通信路の両側に置き、双方向で不規則な遅れ時間の影響が小さくなるようなバイラテラル制御システムを構築し、その動作と安定性について検証する。

#### 4. 研究成果

通信路に発生する不規則伝送遅れの遅れ時間の変化を表す不規則過程に関する数学的記述方法と、不規則遅れ時間を伴う通信路を介した制御対象の状態推定法についての研究を実施した。通信路に関する不規則伝送遅れの確率分布は対数正規分布となることが報告されているが、簡単化のため初めに、不規則遅れ時間のモデルとして正規性白色雑音で近似した場合と、確率ロジスティック方程式の解過程を用いた場合についてのみを考えた。

正規性白色雑音で不規則な伝送遅れを近似した場合において、制御対象としてマス-バネ-ダンパー系を考え、そのマスの変位を不規則伝送遅れを伴う

通信路を介して観測するシステムの場合を考えた。不規則な伝送遅れを伴う通信路を通して伝送された観測データに基づいて、対象となるシステムの状態を推定する拡張カルマンフィルタを設計し、その性能評価を行った。不規則な伝送遅れを伴う観測システムは、不規則な伝送遅れに起因する状態量依存の観測データを伴うシステムに書き換えることができるが、因果律が崩れないように制約を設けた。設計した拡張カルマンフィルタは、不規則な伝送遅れを伴う通信路の向こう側にあるシステムの状態を高精度で推定できることを数値的に示した。

次に、確率的ロジスティック方程式の解過程を用いた場合には、その解過程の確率分布がガンマ分布となることから、これを対数正規分布の近似分布とできることを利用し、これを不規則伝送遅れ過程のモデルととして利用することができると考えた。これと、対象となるシステムとを結合した拡大システムとして定式化した後、即システムの不規則伝送遅れ項をテイラー展開により状態量依存の加法的雑音表現に変換した非線形システムを得た。これに対する拡張カルマンフィルタを設計し、性能評価を行った。確率的ロジスティック方程式の解過程を伝送遅れ時間のモデルに使用した場合、拡張カルマンフィルタは、不規則な伝送遅れ時間を表す確率過程の平均的な遅れ時間に対応するシステムの状態を推定できることが分かった。状態推定結果は、伝送路が平均遅れ時間と同等の一定遅れ時間を伴う伝送路を通して送られた状態量と等価の状態量の推定値を与える。

次に、非線形フィルタの1つであり拡張カルマンフィルタのように非線形関数の微分を必要としないunscented Kalman フィルタ(UKF)に基づく状態推定器を設計し、その性能を評価した。バイリニアの形で加法的に印加される観測雑音項を単なる観測雑音項とみなしてUKFを適用しその性能を評価した。結果は、非常に良く推定ができており、UKFによりバイリニアでかつ対数正規分布を持つ観測雑音を伴うシステムにおいて、UKFによる状態推定が有効であることが明らかとなった。また、その際に推定される状態は、平均遅れ時間だけ過去の状態となることも理論的に明らかにした。単にランダム遅れによる雑音の影響を低減させるために状態推定

を行う場合には、推定結果がどの時刻における真の状態に最も近いのか不明確であるが、本手法を用いた場合では、ランダム遅れプロセスの平均値である平均遅れ時間だけ遅れた時刻の状態を推定することが保障される。

これまでに検証してきた不規則伝送遅れを伴う通信路を介したシステムの状態推定を行う非線形フィルタを、バイラテラル制御系の観測システムとして導入し、その性能を評価した。マスターシステムから送られた指令信号がスレーブ側に到達したときに、不規則な伝送遅れによる信号の乱れが顕在化することから、導入した不規則な遅れ時間項を加法的な観測雑音項として書き換えたものに基づき状態推定器を設計した。スレーブ側から送られたスレーブシステムの状態情報が不規則伝送遅れにより乱されるため、同じ考え方で設計された状態推定器によりランダム伝送遅れの影響を最小化するようにしてスレーブシステムの状態推定値を得る。これにより、ランダムな伝送遅れを伴う通信路を介してバイラテラル制御系が構成した。状態推定器としては、カルマンフィルタ、拡張カルマンフィルタおよび Unscented カルマフィルタが使用できることが明らかとなっている。バイラテラル制御系に搭載する状態推定器として、ランダムな伝送遅れ系の雑音処理に有効であり設計法も明確になっているカルマンフィルタを適用し、1リンク柔軟アームに対し本手法の有効性を確認し、ランダムな伝送遅れを伴う通信路を介してもバイラテラル制御ができることを確認した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件) ①Masaharu Yagi, Kengo Kimura and Yuichi Sawada  
Bilateral Control System of Flexible Master-Slave Arms with Random Delay Using Kalman Filter,

Proceedings of the 47th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, Honolulu, 2014

[学会発表] (計 3 件)

①澤田 祐一, 不規則な時間遅れを伴う観測システムを通じたシステムの状態推定, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 東京, 2014

② Masaharu Yagi, Yuichi Sawada  
State Estimation for Networked System with Random Delay Using Kalman Filter, The 45th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory and Its Applications, 沖縄, 2013

③ Masaharu Yagi, Yuichi Sawada  
State Estimation for Networked System with Random Delay modeled by Stochastic Logistic Equation using Extended Kalman Filter, 第 57 回システム制御情報学会研究発表講演会, 京都, 2013

[図書] (計 0 件)

[産業財産権] ○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

なし

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

澤田 祐一 (SAWADA, Yuichi)

京都工芸繊維大学 機械工学系 教授

研究者番号: 8 0 2 7 3 5 4 8

##### (2) 研究分担者

なし

##### (3) 連携研究者

なし