

## 学位論文題名

Study on ODE-type Smith Predictor for Nonlinear  
Control Systems with Time Delay

(時間遅れを持つ非線形制御系のODE型スミス補償器に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

This research discusses the stability analysis of networked control systems (NCSs) with time delays. In an NCS, the presence of time delays in the transmission may severely affect the performance of the closed-loop system and prevent the successful application of established nonlinear control methodologies.

In recent times, with the development and popularization of network communications, networked control systems (NCSs) which implement control functionality over data communication networks have also attracted increasing attention. An NCS which also called ICCS (Integrated Communication and Control System) is a control system in which the control loop is closed through a real-time network. The main advantages of NCSs in practical applications are their high speed, low cost, and ease of installation. While, due to the distributed structure and limited bandwidth, communication networks (Internet) suffer from unavoidable problems related to the transmission delays (sensor-to-controller and controller-to-actuator delays) and packet dropouts; therefore, including a communication network in a feedback control loop makes it difficult to adopt typical control system designs.

The predictive control approach is effective for NCSs with long time delays. In predictive control, a data buffer is inserted at the receiving end-point of each link to allow for a long delay. The data buffers absorb fluctuations in the delay, which is suitable for NCSs with random time delays. The Smith predictor method is commonly used for the predictive control of systems with time delays. In 1957, Otto Smith invented this method, a type of predictive feedback controller, to compensate for long actuator delays in a single input and single output linear system. This method has since been commonly used in chemical process control and many other applications. However, Smith predictor's major limitation is that, it fails to recover the stabilizing property of a nominal controller for the plant without delay, when the plant is unstable.

The outline of the dissertation is as follows. In chapter 1, we describe the research problem and related research issues of NCSs and present the main contributions and outline of this dissertation. In Chapter 2, we first discuss the linear smith-predictor via backstepping method. A detailed discussion of nonlinear system with constant delay is also presented along with predictive control method. Chapter 3, we show an extension of the proposed predictive method for nonlinear system with time constant delay. We analyzed and stabilized the NCSs with time-varying delay. And in chapter 4, the actuator delay and the sensor delay should be considered together. Finally, conclusions and future research directions are presented in chapter 5.

This dissertation analyzed nonlinear NCSs with delay(constant delay, time-varying delay and sensor delay). And, we have proposed a nonlinear ODE-type Smith predictor which includes another linear

time-variant Smith predictor for stabilizing the error dynamics of the nonlinear Smith predictor. The proposed method can reduce the computational cost, whereas the original nonlinear Smith predictor must solve an integral equation at each time. It is expected that the proposed nonlinear prediction control method can be applied to networked control systems with large transmission delays.

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 下 裕  
副 査 教 授 小野里 雅 彦  
副 査 教 授 金 井 理

## 学 位 論 文 題 名

### Study on ODE-type Smith Predictor for Nonlinear Control Systems with Time Delay

(時間遅れを持つ非線形制御系のODE型スミス補償器に関する研究)

本学位論文では、伝送遅れを含む、ネットワークを経由する非線形制御系の安定化制御則の構成について研究している。このような制御系における伝送時間遅れの存在は、安定性を含む制御性能の悪化を招き、従来の非線形制御理論では対処し難い問題であった。

近年、ネットワーク技術の発展に伴い、ネットワークを経由して遠隔コントローラから制御対象を制御する NCS (Networked Control System, ICCS と呼ばれる) が注目を浴び始めている。NCS は実時間ネットワークを経由して制御ループを構成するものである。NCS を実際に用いる場合の利点として、高速大容量・低コスト・設置が容易であることがあげられる。分散制御系につきまとう問題として、ネットワーク (特に Internet) の遅延の影響・帯域制限によるパケット欠落があり、しばしば従来の制御理論の直接的導入が難しい要因となった。予測制御は大きい伝送遅れを含む制御系の構成に有効であり、スミス補償器による予測制御は従来から使われている。Smith により、まず安定な SISO 線形制御対象に対して、伝送遅れを補償する機構が提案され、化学プラント制御などに用いられてきた。現在に至るまで、制御対象が不安定な場合の拡張、Krstic らによる backstepping 解釈、非線形系への拡張などの研究がなされてきた。

Krstic らの非線形スミス補償器の問題は、コントローラ内で遅れ時間分のシミュレーションを毎時刻において行わなければならないことである。本研究はその点を改善するものであり、遅れ時間分のシミュレーションを無限次元ではあるが内積計算に置き換えることができることを示している。本研究では、予測誤差システムを予測軌道に沿って線形化し、線形化された時変システム (Linear Time-Varying System; LTV システム) の遅れ補償器と非線形の軌道に沿った常微分方程式 (Ordinary Differential Equation; ODE) 型の未来予測器を合成することで目的を達成している。このため、線形時変システムに対してスミス補償器の理論を拡張する必要がある、その拡張もあわせて本研究で行っている。

本学位論文の構成は以下のようになっている。まず、第 1 章で NCS の問題設定を行い、第 2 章で遅れ時間が固定の場合の新しいタイプの非線形スミス補償器の構成法を示している。その中で用いる LTV システムに対するスミス補償器の拡張も第 2 章で論じられている。第 3 章では第 2 章の結果を遅れ時間が変動する場合について拡張している。遅れ時間が変動する場合は、両方向の伝送遅れを別々に扱わなければならない。そこで第 4 章では、観測信号が伝送されるパスの遅れ時間の対処を遅れを伴う場合のオブザーバ問題として定式化し、LTV システムに対してオブザーバ構成法を構成している。最後に第 5 章で結論を述べている。

これを要するに、本学位論文は伝送遅れを含むネットワークを経由する非線形制御系の安定化制御則の新しい構成を提案し、計算コストの削減を実現したものである。よって、制御理論・制御技術に寄与するところ大であり、博士(工学)の学位を授与するに値するものと認める。