

報告番号	甲 第 12924 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 ネットワーク化制御システムにおける伝送誤りに堅牢な制御器の設計手法の解明
(Clarification of design methods of controllers with robustness to transmission errors in networked control systems)

氏 名 小倉 貴志

論 文 内 容 の 要 旨

情報通信技術の発展は、通信ネットワークを介した遠隔制御システムである「ネットワーク化制御システム」の実現を可能とした。ネットワーク化制御システムは、ネットワークの存在を考慮していない従来の制御システムと比べ、システムの構造の柔軟性の向上やシステムの設置・管理の費用削減といった利点を持ち、産業分野での需要が高まっている。しかし、制御システムへのネットワークの導入は、制御システムが目的の動作や処理を行うために必要であった情報の損失・破棄といった、情報の伝送の失敗(伝送誤り)の問題を生む。この伝送誤りにより制御の品質は劣化するため、この劣化を低減することがネットワーク化制御システムのさらなる応用領域拡大には解決すべき課題である。

この課題を解決する一つ的手段として、「制御を考慮したネットワーク・通信アプローチ」が挙げられる。このアプローチでは、伝送誤りの発生自体を減らすことに主眼を置く。しかし、伝送誤りを完全に無くすことが不可能である点、また、あるアプローチでは既存のシステムが用いている通信規格に沿わず、通信機器・規格の変更を必要となる可能性がある点からネットワーク・通信アプローチのみの検討では、不十分である。そのため、「ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチ」の検討が必要不可欠である。ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチでは、伝送誤りが制御システムに与える影響を減らすことに主眼を置く。このアプローチの先行研究では、制御システムの不安定化を問題視し、伝送誤りが発生するシステムに対しても安定化を図れる制御器の設計を提案している。しか

し、伝送誤りにより安定を保った上での応答特性の劣化も大きな問題である。例えば、製造ラインのロボットアームが伝送誤りにより目的の角度まで意図した時間内に到達せず、作業が迅速に行えないことは、生産性の低下につながる。そのため、伝送誤りにより応答特性の劣化を低減する必要がある、ネットワーク化制御システムの産業応用領域拡大には必要である。

本研究では、伝送誤りによる制御品質の劣化を不安定化に加え応答特性の劣化と捉え、この二点の劣化を低減が可能な伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計手法の解明を目指す。この伝送誤りによる不安定化と応答特性の劣化の改善を図る制御器の設計手法として、 H_∞ 制御理論に基づいた伝送誤りが制御システムに与える影響を外乱として捉えた新たな手法を提案する。本研究での外乱とは、制御システムの外部からシステムに悪影響を及ぼす（乱れを生じさせる）入力であると定義する。伝送誤りが制御システムに与える影響を外乱と捉え、 H_∞ 制御理論の入力(外乱)から制御対象の状態等の出力までの応答特性を設計で考慮可能である特徴を利用することで、伝送誤りによる不安定化に加え応答特性の劣化の改善ができる制御器の設計が可能であると期待できる。本研究では以下の2点について検討を行なう。

1. 伝送誤りが制御システムに与える影響の外乱によるモデル化。
2. 伝送誤り制御システムに与える影響を外乱として捉えた制御器の設計手法の提案、その有用性の明確化。

1. については、 H_∞ 制御理論では、外乱の影響を抑制・低減する制御器を設計する際には、その外乱の特性を正しく捉え、その特性を用いた設計をすることで外乱に対して堅牢な制御器が設計可能となる。そのため、伝送誤りが制御システムに与える影響を外乱として捉えた制御器が伝送誤りに対して堅牢な制御器となるためには、まず伝送誤りが制御システムに与える影響は、どのような外乱としてモデル化できるのかを明らかとする必要がある。これらを明らかとするため、まず伝送誤りが制御システムに与える影響と白色外乱との関係を検討する。その後、伝送誤りの特徴を利用し、外乱によるモデル化を行う。

2. については、1.で明らかとした特性を利用した H_∞ 制御理論に基づく伝送誤りが制御システムに与える影響を外乱として捉えた制御器の設計手法を提案する。伝送誤りに対する制御品質について評価を行ない、伝送誤りが制御システムに与える影響を外乱として捉えた制御器が伝送誤りによる不安定化に加え応答特性の劣化の改善が可能であるのかを明らかとする。

本論文は以下のように構成されている。

1章では、本研究の背景である、ネットワークを介した遠隔制御システムについて、ネットワークを導入したことによる利点や応用領域を述べる。その後、制御システムへのネットワーク導入により生じる問題点、また、伝送誤りによる制御品質劣化の低減がネットワーク化制御システムの課題である点を述べる。その課題に対する先行研究を通信、制御の両面から示し、それらの問題点・不足点を指摘する。その中で、制御面の制御器の設計に

において伝送誤りによる不安定化に加え応答特性の劣化を改善できる制御器の設計手法の必要性を述べ、その設計手法の提案に必要な検討事項について述べる。

2章では、ネットワーク化制御システムの概要について説明する。本論文で対象とする、システムの全体的な構成・動作を説明し、制御対象やネットワークが用いる通信プロトコルの種類、そして、推定器・制御器の動作について述べる。また、伝送誤りが発生する原因、発生時のシステムの動作、その影響について述べる。2.2節では、伝送誤りを考慮しないLQ制御器、伝送誤りを考慮しない H_{∞} 制御器、伝送誤り入力のON/OFF と捉えたLQ 制御器、伝送誤りを白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器の4つの従来制御器について設計手法・操作情報の算出方法を説明する。これら2つの H_{∞} 制御器の伝送誤りに対する堅牢性を評価することで、伝送誤りが制御システムに与える影響と白色外乱の関係について議論を行う。2つのLQ制御器は、上述の H_{∞} 制御器の伝送誤りに対する堅牢性を評価するための制御性能基準を与える制御器として用いる。また、本論文で提案する制御器の設計手法の有効性評価にも用いる。

3章では、伝送誤りが制御システムに与える影響が持つ特性について議論し、その影響の外乱によるモデル化を行う。3.2節では伝送誤りが制御システムに与える影響の制御対象内で発生する外乱をモデル化した白色ガウス雑音外乱によるモデル化の妥当性を検討する。伝送誤りを考慮しない H_{∞} 制御器の伝送誤りに対する制御品質がLQ 制御器よりも低いことから、伝送誤りの影響は制御対象内で発生する白色ガウス雑音外乱とモデル化には妥当性が低いことを明らかとする。3.3節では、伝送誤りが制御システムに与える影響の一般の白色外乱によるモデル化の妥当性を検討する。伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器の伝送誤りに対する制御品質は、白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_{∞} 制御器よりも若干向上するため、伝送誤りがシステムに与える影響の一般の白色外乱によるモデル化には幾分かの妥当性があることを示す。しかし、伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器はLQ制御器と比較し低い制御性能となるため、伝送誤りの影響を白色外乱としてみなすことに幾分かの妥当性があるものの、十分ではないことを示す。3.4節では、制御対象から制御器へフィードバックされる状態情報の伝送誤りがシステムに与える影響が、制御対象内で発生する外乱への依存性があることを示し、一方で、制御器から制御対象へ伝送される操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響は、操作情報信号に依存することを示す。

4章では、3章で明らかとした伝送誤りがシステムに与える影響の特性を利用する伝送誤りの影響を外乱として捉えた設計手法について説明した。この設計手法として、「伝送誤りがシステムに与える影響の時系列解析を用いた手法」、「伝送誤りがシステムに与える影響の制御内容への依存性を用いた手法」の2つの手法を提案した。先の手法は、伝送誤り入力のON/OFF と捉えたLQ 制御器より伝送誤りによる不安定化に加え応答特性の劣化の改善が可能であること示した。2つ目の伝送誤りがシステムに与える影響の制御内容への依存性を用いた手法では、1つ目の手法の問題であった、事前に伝送誤りが与える影響のデータの取得を必要とし、伝送誤り率毎に設計を行なう点を問題視し、その問題を解決する手法となっている。この制御器は、伝送誤りによる応答特性の劣化の低減に関しては、十分な

性能を得られるが、安定に対して他の制御器より劣る性能となることを明らかとし、その原因として、伝送誤りに対する安定性は、ステップ応答と関係があることを示す。

5章では、本論文の総括と今後の展望について述べる。本論文の今後の展望としては、まず、安定性に関する考察において明らかとした安定性とステップ応答の関係性の明確化が挙げられる。ステップ応答に対する立ち上がり時間やオーバーシュートなどの過渡特性と伝送誤りによる不安定化の関係をより明確化し、定式化することで、設計するネットワーク化制御システム自体の性能限界を知ることができると予想する。もう一点、通信との統合的な最適化が挙げられる。制御と通信の統合的な最適化は、先行研究においても検討が行われている。本論文を踏まえた統合的な最適化として、制御の情報を用いた伝送誤りを減らす誤り訂正符号や最適受信器を用い、その際の伝送誤りが制御システムに与える影響の外乱によるモデル化を行い、設計に用いるといった統合的な最適化が可能であると考えられる。また、本論文で提案した設計手法を用いたネットワーク化制御システムの実現性の観点では、より複雑な動作(目標値信号)を要求するシステムへの対応が今後の展望として挙げられる。本論文中では、一定周期、一定振幅の矩形波という比較的単純な信号を目標値としていたが、実際の制御システムでは、周期や振幅の変動を含む信号が目標値となることもある。そのような変動を含む信号を目標とするシステムへの提案設計手法の適応性の検討、もしくは、適応が可能な新たな設計手法が実現性の観点からは必要不可欠であると考えられる。