

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

小倉 貴志

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

小倉 貴志
名古屋大学大学院工学研究科
2019年

目次

第1章 序論	1
1.1 ネットワークを介した遠隔制御システム	1
1.2 伝送誤りによる制御品質劣化の低減手法	2
1.2.1 制御を考慮したネットワーク・通信アプローチ	2
1.2.2 ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチ	3
1.3 本研究の目的	5
1.4 本論文の構成	6
第2章 ネットワーク化制御システム	9
2.1 はじめに	9
2.2 システムモデル	9
2.2.1 制御モデル	10
2.2.2 伝送誤りモデル	12
2.2.3 伝送誤りに対する動作と影響	13
2.3 従来制御器の設計手法	14
2.3.1 伝送誤りを考慮しないLQ制御器	15
2.3.2 伝送誤りを考慮しない H_{∞} 制御器	16
2.3.3 伝送誤りを入力のON/OFFと捉えたLQ制御器	18
2.3.4 伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器	19
2.4 まとめ	22
第3章 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	23
3.1 はじめに	23
3.2 伝送誤りの影響と白色ガウス雑音外乱	24

3.2.1	諸元	24
3.2.2	制御品質比較	27
3.2.3	考察	33
3.3	伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた制御器の妥当性	33
3.3.1	諸元	33
3.3.2	制御品質比較	34
3.3.3	考察	40
3.4	伝送誤りの特性を用いた外乱によるモデル化	40
3.4.1	状態情報の伝送誤りがシステムに与える影響	40
3.4.2	操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響	41
3.5	まとめ	45
第4章	伝送誤りに堅牢な制御器の設計手法	47
4.1	はじめに	47
4.2	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 H_∞ 制御器	48
4.2.1	設計手法	48
4.2.2	$\mathbf{W}_e^{(p_u)}(s)$ の選定	49
4.3	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 H_∞ 制御器	52
4.3.1	設計手法	53
4.3.2	$\mathbf{H}_w(s)$ の選定	54
4.4	伝送誤りに対する制御品質比較	56
4.4.1	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 H_∞ 制御器の評価	56
4.4.2	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 H_∞ 制御器の評価	61
4.4.3	安定性に関する考察	70
4.5	まとめ	77

第 5 章 総括	79
5.1 本論文のまとめ	79
5.2 今後の展望	81
付 録 A H_∞ 制御器の解法	83
付 録 B 回転型倒立振子の状態空間表現	87
業績一覧	103

目 次

2.1	単一制御ループのシステムモデル	10
2.2	状態方程式モデル	11
2.3	バースト的な伝送誤りモデル	13
2.4	LQ 制御器の設計ブロック線図	16
2.5	H_∞ 制御器の設計ブロック線図	18
2.6	伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器の設計ブロック線図	20
2.7	伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の設計ブロック線図	22
3.1	回転型倒立振り子	26
3.2	LQ 制御器と H_∞ 制御器のステップ応答	28
3.3	伝送誤り率に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)	30
3.4	白色ガウス雑音外乱の分散値 (σ^2) に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($p = 0.1$)	31
3.5	伝送誤り率に対する LQ 制御器と μ は RMSE が最小となるものを選択した白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)	32
3.6	伝送誤り率に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)	37
3.7	白色ガウス雑音外乱の分散値 (σ^2) に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($p = 0.1$)	38

3.8	伝送誤り率に対する LQ 制御器と μ は RMSE が最小となるものを選択した白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)	39
3.9	状態情報の伝送誤りに起因する推定状態誤差 $\mathbf{w}_x[k]$ (アームの角度)($p_u = 0, p_x = 0.3$)	42
3.10	操作情報の伝送誤りに起因する操作情報の誤差 ($p_u = 0.3, p_x = 0$) . . .	43
4.1	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 H_∞ 制御器の設計ブロック線図	50
4.2	伝送誤りに起因する操作情報誤差の時系列データ ($p = 0.5$)	51
4.3	操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響の振幅密度スペクトル ($p = 0.5$)	52
4.4	伝達関数 $\mathbf{W}_e^{(p=0.5)}(s)$ のゲイン	53
4.5	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 H_∞ 制御器の設計ブロック線図	55
4.6	伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較	58
4.7	伝送誤り率に対する伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較	60
4.8	提案制御器 1($\mathbf{K}_{p2}(s)$) の周波数特性 ($p = 0.3$)	61
4.9	$ \mathbf{U}(f) $ と $\bar{\mathbf{U}}(s)$ のゲイン	63
4.10	提案制御器 2($\mathbf{K}_{p3}(s)$) の周波数特性	63
4.11	伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較	65
4.12	伝送誤り率に対する伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較	67

4.13	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 H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) と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 H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$) と制御性能比較	69
4.14	操作情報のバーストな伝送誤りが与える影響の振幅密度スペクトル ($\bar{p} = 0.1$)	72
4.15	バーストな伝送誤りに対する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 H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p3}(s), \gamma = 100, 500$) 制御性能比較 ($\bar{p} = 0.1$)	73
4.16	ランダムな伝送誤りに対する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 H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p3}(s), \gamma = 100, 500$) 制御性能比較	74
4.17	伝送誤り率によるステップ応答の変化	75
4.18	伝送誤り率による目標値信号とステップ応答の差分	76
A.1	一般化プラントを持つフィードバック制御システム	84

表 目 次

3.1 回転倒立振子の物理パラメータ	26
3.2 シミュレーション諸元	26

第1章 序論

1.1 ネットワークを介した遠隔制御システム

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の実現を可能とした。この通信ネットワークを介した遠隔制御システムをネットワーク化制御システムという [1–4]。このネットワーク化制御システムにおける通信ネットワークとしては、Internet、無線通信、Ethernet や電力線通信などの利用が想定されており、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つ [5–9]。このような利点から、Factory Automation、スマートグリッド、自動運転やインテリジェントビルディングなどの応用が期待されている [10, 11]。特に、Factory Automation において、生産工場内の制御システムへのネットワークの導入は、リアルタイムの制御、計測、データ収集が可能となり、生産能力の向上に繋がると考えられる。また、このネットワークに無線通信を用いることで有線通信では必要な通信ケーブルを除去できるため、配線コストの削減、通信ケーブル欠損のリスクの排除、移動体や回転体など複雑な動作をする機器の制御の容易化、生産機器の増減への対応性や多様な生産機器の一括管理が可能となる。これらの多く利点から産業分野におけるネットワーク化制御システムの需要が高まっている [12–14]。

しかし、制御システムへのネットワークの導入は、単に利点を生むだけではなく、通信の不完全性を原因とする問題を生む。ネットワークとして無線通信を用いた場合、雑音、干渉、フェージング等を原因とする情報の誤り（ビット誤り）が発生し、その誤りを含む情報は破棄される可能性がある。Ethernet を用いた場合には、キューあふれやネットワークの混雑による衝突によって伝送情報が損失してしまう可能性がある。このようにネットワークを用いることで、伝送情報の破棄や損失、つまり、

伝送の失敗(伝送誤り)が発生する．この伝送誤りは，制御システムにとって，目的の動作や処理を行なうために必要であった情報の損失・破棄であるため，制御品質の劣化の原因となる．ネットワーク化制御システムの産業分野での実現や更なる応用領域の拡大のためには，この伝送誤りによる制御品質の劣化を低減することが必要である [15, 16].

1.2 伝送誤りによる制御品質劣化の低減手法

ネットワーク化制御システムは，従来のネットワークの存在を考慮していない制御システムと比べて，制御工学の側面を有することはもちろんのこと，ネットワーク・通信工学の側面も有する．そのため，伝送誤りによる制御品質の劣化の低減を実現するために，「制御を考慮したネットワーク・通信アプローチ」と「ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチ」といった制御・通信両面からのアプローチが取られている [17–19].

1.2.1 制御を考慮したネットワーク・通信アプローチ

制御を考慮したネットワーク・通信アプローチは，伝送誤りの発生自体を減らすことで制御品質の劣化を低減するアプローチである．このアプローチとして，制御レイヤの情報を利用した最適受信機 [20, 21]，適応変調方式 [22]，適応誤り訂正符号 [23, 24] や Hybrid automatic repeat request 方式 [25] が提案されている．文献 [26–28] は，ネットワークにより伝送される情報量を削減することによって，混雑による衝突を回避し，伝送誤りの発生を減らすアプローチである．また，情報源符号化・量子化の観点から，伝送される情報量の削減を目指すアプローチもある [29–32]．情報伝送での電力割当に制御の情報を利用することで最適化を行う手法 [33–36] の提案がなされている．複数機器の制御においては，制御の品質に応じた Carrier sense multiple access 方式 [37–40]，Time division multiple access 方式 [41–43] やワイヤレスセンサーネットワークの構築に適した無線規格である IEEE802.15.4 に基づくアプローチ [44, 45] が提案されている．さらに，ダイバシティ技術 [46–49] の提案もなされている．

しかし，これらの提案は，ネットワーク化制御システムの課題の完全な解決を行っているわけではない．例えば，これらの提案は，伝送誤りの発生自体を減らし，制御品質の劣化を低減するが，伝送誤りを完全になくすることができない．また，すでに稼働しているシステムに対しての適用を検討する際，その既存システムが用いている通信規格に対して，いくつかの提案はその規格に沿わず，適用には通信規格・装置の変更が必要となる可能性がある．これらの問題点から，制御を考慮したネットワーク・通信アプローチの検討のみでは，ネットワーク化制御システムの課題を解決するのに十分ではないといえる．そのため，次に述べるネットワーク・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．

1.2.2 ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチ

ネットワーク・通信を考慮した制御アプローチは，伝送誤りが制御システムに与える影響を減らすことができる，伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計をするアプローチである．このアプローチを，制御器の設計における伝送誤りの捉え方により，次の三つに分類する．

1. 入力 of ON/OFF [50–69]
2. マルコフジャンプシステムの状態遷移 [70–80]
3. 伝送遅延 [81–84]

まず，最も代表的な捉え方として，一つ目の伝送誤りを入力の ON/OFF として捉える設計がある．この設計では，伝送誤りの発生時には，その伝送された情報が入力されないのである，つまり，入力が OFF になると考える．この入力の ON/OFF をベルヌーイ分布に従う確率変数を用いてモデル化し，その確率変数を含んだ確率システムに対して制御器の設計を行なう．二つ目のマルコフジャンプシステムの状態遷移では，伝送誤り発生時と非発生時といった複数のシステムを定義し，そのシステム間を遷移するマルコフジャンプシステムを用い，設計を行なう．その際，伝送誤りの発生はこのマルコフジャンプシステムの状態の遷移として捉えられる．三つ目の，伝送

遅延としての捉え方は，伝送誤りを長い伝送遅延として捉え，その遅延の影響を低減可能な制御器の設計を行なう．

これらの設計手法は，伝送誤りによる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．以下に，各先行研究が用いた安定の種類とそれぞれの条件・特性を示す．

1. 漸近安定：システムの状態が十分な時間経過により平衡点へ収束する [54, 64, 71, 76, 77]
2. 指数安定：漸近安定の収束速度が指数関数によっておさえられる [60, 70, 82]
3. 二乗平均安定：システムの状態の期待値が十分な時間経過により平衡点へ収束する [50–53, 55–58, 62, 65–69, 80]
4. 二乗指数安定：二乗平均安定の収束速度が指数関数によっておさえられる [59, 63, 72, 81, 84]
5. 確率安定：システムの状態の絶対値平均が発散しない [61, 73, 74, 78, 79, 83]

安定化は制御工学で最も重要かつ一般的な目標である．しかし，伝送誤りによる制御品質の劣化は不安定化のみではない．安定を保った上での応答特性の劣化も問題である．ここで言う応答特性とは，過渡特性や定常特性を指す．例えば，製造ラインのロボットアームの制御を考える．この制御システムの情報伝送をネットワークを介して行い，伝送誤りが発生すると仮定する．この伝送誤りによりロボットアームが制御不能になる，つまり，不安定化することは大きな問題である．しかし，制御不能にならなくとも，伝送誤りによりロボットアームが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可能性がある．これは，製造ラインの生産性を低下させ，産業上大きな問題であるといえる．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2点の改善を図れる制御器の設計手法について検討が必要である．

1.3 本研究の目的

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，はじめに，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．

1.4 本論文の構成

本論文は、以下のように構成されている。

2章では、ネットワーク化制御システムの概要について述べる。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説明する。また、伝送誤りが発生する原因、発生モデル、発生時のシステムの動作、その影響について説明する。従来の制御器として、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_∞ 制御器の設計手法・操作情報の算出方法を説明する。これら2つの制御器の違いは、設計において伝送誤りの影響と制御器内で発生する外乱をモデル化した白色ガウス雑音外乱を考慮しているかいないかである。また、伝送誤り入力のON/OFFと捉えたLQ制御器[64]、伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器についても従来制御器として設計手法・操作情報の算出方法を中心に説明する。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の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。まず、伝送誤りの影響と制御器内で発生する外乱をモデル化した白色ガウス雑音外乱の関係について議論する。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を評価することで、制御器内で発生する外乱をモデル化した白色ガウス雑音外乱として伝送誤りがシステムに与える影響のモデル化の妥当性について議論する。その後、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を評価することで、伝送誤りの影響を白色外乱としてモデル化することの妥当性を評価する。最後に、制御対象から制御器へフィードバックされる情報の伝送誤りがシステムに与える影響は、制御対象内で発生する外乱への依存性があり、制御器から制御対象へ伝送される情報の伝送誤りがシステムに与える影響は、制御器から制御対象へ伝送される情報信号の特性に依存することを示す。

4章では、本論文で提案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扱う。この手法は、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外乱によるモデルを利用する。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」、「伝送誤り率を必要としない制御内容への依存性を用いた手法」の2つの手法を提案する。各手法同士の比較や伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器との制御品質の比較を行なうことで、それぞれの手法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。

最後に、5章にて総括として本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 ネットワーク化制御システム

2.1 はじめに

本章では、本論文で扱うネットワーク化制御システムについて述べる。ネットワーク化制御システムとは、制御システムの情報交換をネットワークを介して行うシステムである。一般に、ネットワーク化制御システムは、複数の制御器と制御対象がネットワークを介して情報交換を行うシステムであるが、本論文では、制御器の設計手法に関する検討に主眼を置くため、制御器と制御対象を1対1で対応付けたシステムとして定義する。このシステム内において、制御器から制御対象へ、および、制御対象から制御器への両方の情報伝送をネットワークを介して行い、その情報伝送において伝送誤りが確率的に発生するシステムを本論文では対象としている。確率的に発生する伝送誤りを定義し、そのモデル、伝送誤り発生時のシステムの動作とシステムへの影響について述べる。最後に、次章において、伝送誤りが外乱としてシステムに与える影響の特性について議論する際に用いる従来の制御器について設計手法、操作情報の算出と制御器の構造について述べる。

2.2 システムモデル

本論文では、図 2.1 に示す単一の制御ループのネットワーク化制御システムを扱う。このシステムは、制御器、制御対象が一定のサンプリング間隔でサンプリング・情報の伝送を行なう時間駆動システムであると想定している。ここで、サンプリング間隔を T_s 、時刻 $t = kT_s (k = 0, 1, 2, \dots)$ での制御対象の内部状態、つまり、制御対象の振る舞いを表す変数 (状態情報と呼称する) を $\mathbf{x}[k]$ 、制御器が生成した制御対象を操作する量を表す変数 (操作情報と呼称する) を $\mathbf{u}[k]$ とする。状態情報は N_x 次元

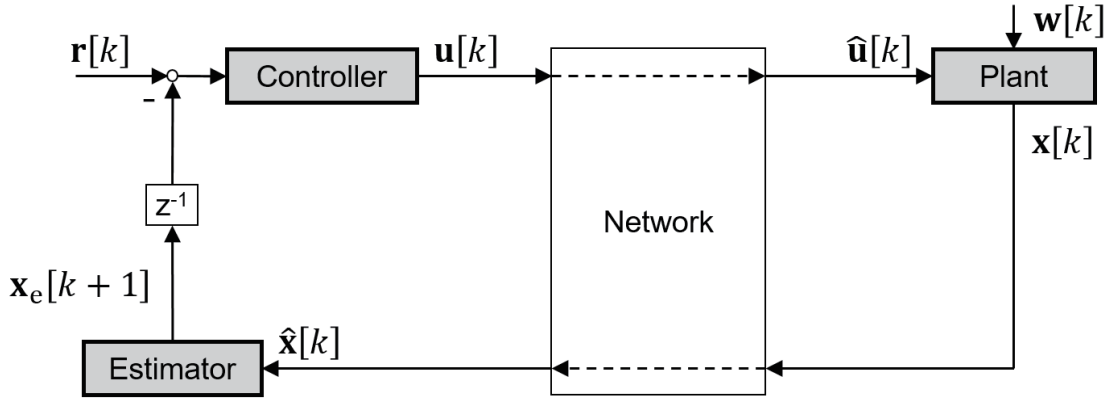


図 2.1: 単一制御ループのシステムモデル

のベクトル，操作情報は N_u 次元のベクトルとする．図 2.1 中の \mathbf{z}^{-1} は遅延演算子を表す．

本システムの動作としては，以下の手順をサンプリング周期 T_s ごとに繰り返す．制御器側では，制御器が T_s 秒毎に入力される目標値 $\mathbf{r}[k]$ と推定器により推定された状態情報 $\mathbf{x}_e[k]$ との差分に対し，操作情報 $\mathbf{u}[k]$ を算出し，その操作情報を制御対象側へ伝送する．制御対象側では，制御対象のすべての状態が観測可能であるとし，状態情報 $\mathbf{x}[k]$ を T_s 秒毎に制御器側へ伝送する状態フィードバックを想定する．各情報の伝送は，パケットとして行われると想定し，ネットワーク通過後の状態情報と操作情報をそれぞれ $\hat{\mathbf{x}}[k]$ ， $\hat{\mathbf{u}}[k]$ としている．

2.2.1 制御モデル

本論文における制御対象は，線形時不変システムであるとする．制御対象は，以下の線形な状態方程式でモデル化する [85]．

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\hat{\mathbf{u}}[k] + \mathbf{w}[k] \quad (2.1)$$

図 2.2 に，状態方程式モデルを示す．このモデルでは，ある時刻での状態情報 $\mathbf{x}[k]$ とネットワークを通過した操作情報 $\hat{\mathbf{u}}[k]$ と $\mathbf{w}[k]$ の線形な可算により次サンプルでの状態情報 $\mathbf{x}[k+1]$ が決定されるモデルである．ここでの， \mathbf{A} ， \mathbf{B} は，制御対象によっ

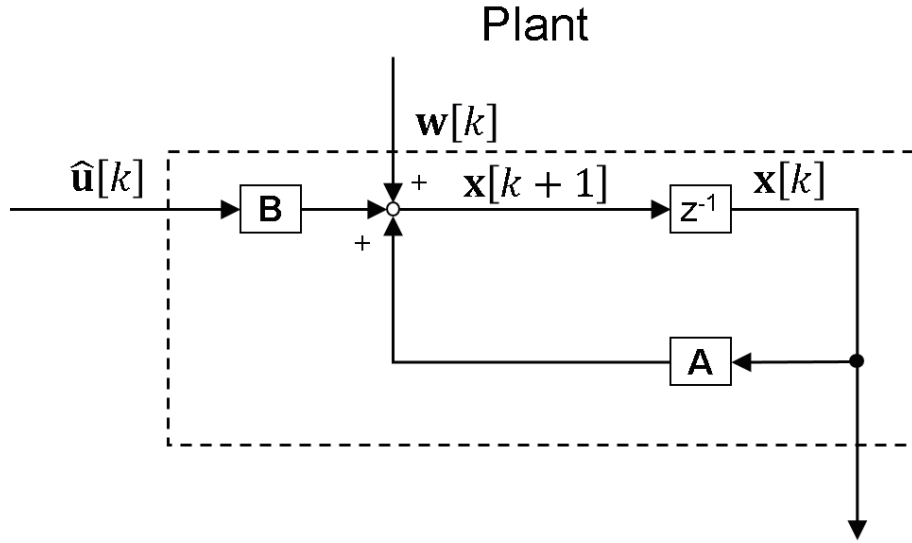


図 2.2: 状態方程式モデル

て決定される係数行列であり， \mathbf{A} は $N_x \times N_x$ 行列， \mathbf{B} は $N_u \times N_x$ 行列である．また， $\mathbf{w}[k]$ は， N_x 次元のベクトルの制御対象内で発生する観測雑音などをモデル化した白色ガウス雑音外乱 (平均 0，相互相関行列 $\sigma^2 \mathbf{I}$) である．ここで， \mathbf{I} は $N_x \times N_x$ の単位行列であり， $\mathbf{w}[k]$ の各要素が独立である．

推定器では，フィードバックされた $\hat{\mathbf{x}}[k]$ から $\mathbf{u}[k+1]$ の計算に必要な $\mathbf{x}_e[k+1]$ を計算する．ネットワーク化制御システムのための推定器の設計は，文献 [86–88] にあげられるように，制御器の設計と並び重要な研究課題である．文献 [86] では，ネットワークが情報の伝送の成否を確認する Acknowledgement を用いない User datagram protocol のような通信プロトコルを利用する場合，または，ネットワークが Acknowledgement を用いる Transmission control protocol のような通信プロトコルの利用する場合のそれぞれに対し，推定器の一種である Kalman filter の設計手法の提案を行っている．本論文では，制御器の設計手法に主眼を置くため，User datagram protocol のような通信プロトコルをネットワークが利用していると想定し，式 (2.1) の状態方程式に基づく簡易な推定器を用いる．推定器での状態推定は以下の式に従い行われる．

$$\mathbf{x}_e[k+1] = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}[k] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k] \quad (2.2)$$

User datagram protocol のような通信プロトコルをネットワークが利用していると想定するため、操作情報の伝送の成否は推定器(制御器側)では知り得ない。そのため、状態の推定には操作情報は常に伝送成功したと仮定した推定を行っている。

制御器では、目標値 $\mathbf{r}[k]$ と推定器により推定された状態情報 $\mathbf{x}_e[k]$ との差分を入力とし、操作情報を算出する。

$$\mathbf{u}[k] = g(\mathbf{r}[k] - \mathbf{x}_e[k]) \quad (2.3)$$

ここで、 $g(\cdot)$ は制御器の操作情報を算出する関数である。制御器の設計や関数の構造など詳細は本章の 2.3 節以降で述べる。

2.2.2 伝送誤りモデル

本論文のシステムでは、情報の伝送はパケットにて行われると想定している。ネットワークに無線通信を用いた場合、雑音、干渉、フェージングなどを原因としてパケット内のビットに誤りが発生することがある。この誤りを検出した場合、そのパケットを破棄する。一方、ネットワークに Ethernet を用いた場合には、キューあふれや通信の衝突により伝送パケットが消失することがある。また、ネットワークでは伝送遅延が発生する。時間駆動システムを想定している本論文のシステムでは、一サンプリング間隔内の遅延は無視でき、一サンプリング間隔以上の遅延は、パケットが消失したとみなすことができる。これらのパケットの破棄・消失により操作情報や状態情報が失われることを本論文では伝送誤りと定義し、その発生モデルとして以下の 2 つの確率的なモデルを用いる。

ランダムに発生する伝送誤りモデル

簡易な伝送誤りの発生モデルとして、時不変なネットワークを想定し、ある確率でランダムに伝送誤りが発生するモデルがある。操作情報と状態情報の各伝送誤り率を p_u , p_x とする。本論文では、主にこのランダムに発生する伝送誤りモデルに対しての堅牢性を議論をする。

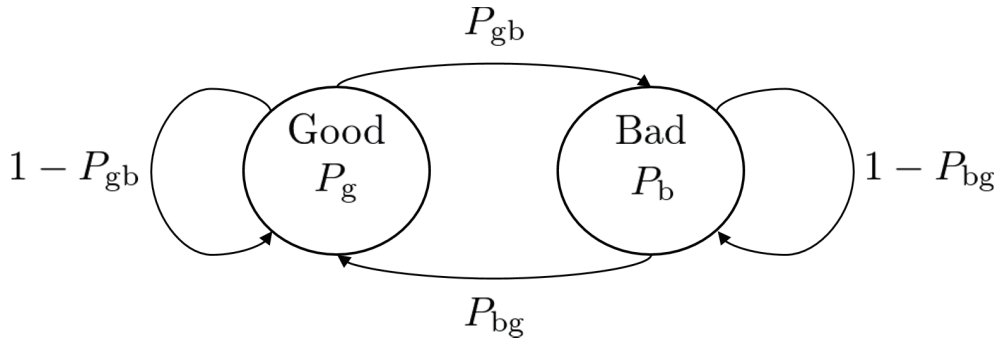


図 2.3: バースト的な伝送誤りモデル

バースト的に発生する伝送誤りモデル

工場内などの無線通信路の振る舞いは、干渉、経路損失、フェージングなどの確率現象により時変である。つまり、ネットワークの状態が悪い場合には、連続（バースト）的に伝送誤りが発生することがある。このバースト的に発生する伝送誤りを図 2.3 に示すマルコフモデルを用いて表現する [89–91]。ここで、 P_{gb} は 'Good' 状態から 'Bad' 状態への遷移確率、 P_{bg} は 'Bad' 状態から 'Good' 状態への遷移確率を表す。本論文では、ネットワーク状態が良い場合に対応する 'Good' 状態での伝送誤り率は $P_g = 0$ 、ネットワーク状態が悪い場合に対応する 'Bad' 状態での伝送誤り率は $P_b = 1$ とする。このモデルにおける平均伝送誤り率 \bar{p} は、各状態の遷移確率を用い以下のように表現できる。

$$\bar{p} = \frac{P_{gb}}{P_{gb} + P_{bg}} \quad (2.4)$$

このモデルにおいて、平均バースト誤り長 \bar{l} は、 P_{bg} の逆数によって定義される。本論文では、 \bar{p} と \bar{l} を用いてネットワークの状態を表す。

2.2.3 伝送誤りに対する動作と影響

ネットワーク化制御システムにおける、操作情報の伝送誤りが発生した際のシステムの動作は、ゼロ入力とホールド入力に大別される。文献 [92] では、ネットワークの状態や制御対象によって、ゼロ入力がいよい場合とホールド入力がいよい場合の両

方が存在していることが示されている．本論文では，多くの先行研究が数学的な解析の容易さからゼロ入力を採用していることに習い，操作情報の伝送誤りに対しゼロ入力を用る．これを式で表すと，以下の通りである．

$$\hat{\mathbf{u}}[k] = \begin{cases} \mathbf{u}[k] & \text{if received successfully} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

状態情報の伝送誤りの発生した際は，推定器への入力に変化する．伝送誤りが発生した際は，本来入力される状態情報 $\mathbf{x}[k]$ の代わりに 1 サンプル前の推定された状態情報 $\mathbf{x}_e[k]$ を用いるものとする．この動作を式で表すと，以下の通りである．

$$\hat{\mathbf{x}}[k] = \begin{cases} \mathbf{x}[k] & \text{if received successfully} \\ \mathbf{x}_e[k] & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.6)$$

各情報の伝送誤りがシステムに与える影響としては，「送信した情報」と「実際にシステム内で用いられた情報」との差と考えることができる．例えば，操作情報の伝送に対して，制御器は $\mathbf{u}[k]$ を算出し制御対象へ送信する．しかし，この伝送において伝送誤りが発生した場合，制御対象への入力として用いられるのは $\hat{\mathbf{u}}[k] = 0$ である．この差により制御対象が制御器の意図した動作行えず，制御の品質が劣化する要因となる．

2.3 従来制御器の設計手法

本節では，まずネットワークを介した情報の伝送を想定していない，つまり，伝送誤りを考慮しない H_∞ 制御器と LQ 制御器について，その設計手法や操作情報の算出について述べる．この 2 つの制御器の違いとして， H_∞ 制御器が制御対象内で発生する外乱をモデル化した加法性の雑音外乱を設計に考慮した設計である点，LQ 制御器はそれを考慮しない設計である点が本論文において重要な違いである．また，先行研究のネットワーク化制御システムのための制御器の設計手法として，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器，伝送誤りの影響を入力 ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64] について述べる．

次章にて，本節で示す 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。

2.3.1 伝送誤りを考慮しないLQ制御器

LQ制御では、制御対象内で発生する外乱をモデル化した加法性の白色ガウス雑音外乱を設計に考慮しないため、設計される制御器はその影響を抑制することはできない。LQ制御は、式(2.7)に示す時間領域における状態情報と操作情報の大きさの重み付け加算を設計の評価関数として用いる制御器の設計である [93]。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} (\mathbf{x}[k]^T \mathbf{W}_Q \mathbf{x}[k] + \mathbf{u}[k]^T \mathbf{W}_R \mathbf{u}[k]) \quad (2.7)$$

設計では、白色ガウス雑音外乱 $\mathbf{w}[k]$ を考慮しないため、この影響は抑制はできない制御器が設計される。ここで、 \mathbf{W}_Q 、 \mathbf{W}_R は設計パラメータである重みであり、それぞれの可算の評価の重要度を決める。制御器 \mathbf{K}_l は、この評価関数 J を最小とするように設計され、

$$\mathbf{K}_l = (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{W}_R)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) \quad (2.8)$$

で与えられる。ここで、 \mathbf{A} 、 \mathbf{B} は状態方程式で与えられる行列であり、 \mathbf{P} は以下の離散時間リカッチ方程式の解である。

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} - (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{B})(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B} + \mathbf{W}_R)^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{A}) + \mathbf{W}_Q = 0 \quad (2.9)$$

この設計をブロック線図にて示すと図 2.4 となる。本論文で対象とするシステムモデルは、可制御・可観測を満たしていることから、状態推定器による状態フィードバックにおける制御と観測の分離定理が成立し、制御器の設計において推定器については考慮する必要はない [94]。この定理は、本論文でのすべての制御器の設計についていえる。

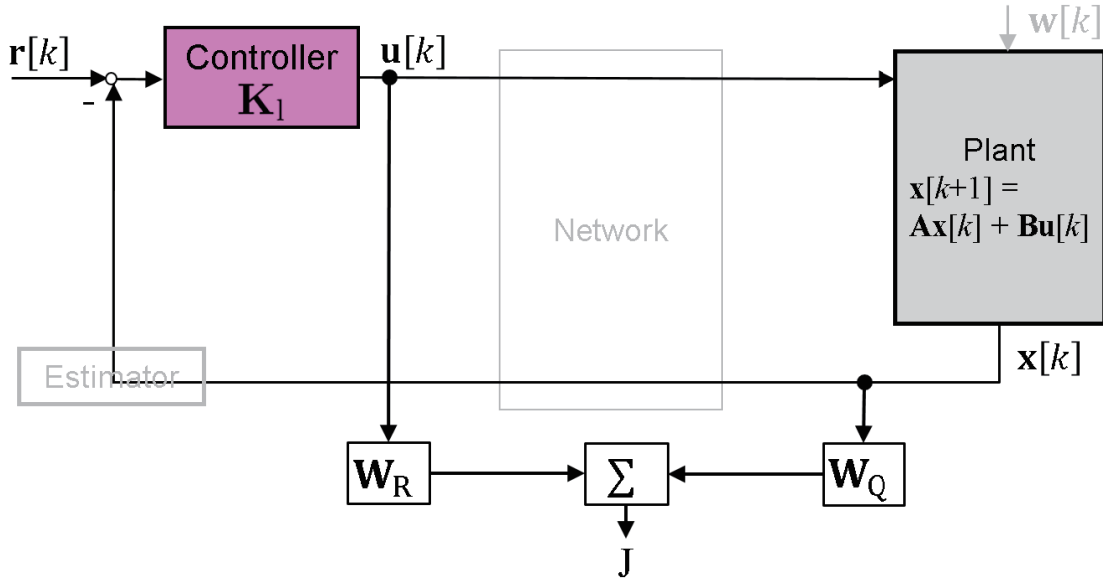


図 2.4: LQ 制御器の設計ブロック線図

制御器の操作情報の算出を以下の式 (2.10) に示す.

$$\mathbf{u}[k] = \mathbf{K}_1(\mathbf{r}[k] - \mathbf{x}_e[k]) \quad (2.10)$$

この \mathbf{K}_1 は, $N_x \times N_u$ 次元の行列なるので, 操作情報 $\mathbf{u}[k]$ の算出は, フィードバックゲイン \mathbf{K}_1 に目標値 $\mathbf{r}[k]$ と式 (2.2) に示す推定された状態情報 $\mathbf{x}_e[k]$ の差分の掛け合わせとなる.

2.3.2 伝送誤りを考慮しない H_∞ 制御器

H_∞ 制御では, 制御対象内で発生する外乱をモデル化した加法性の白色ガウス雑音外乱を設計に考慮し, その影響を抑制可能な制御器の設計を行う. H_∞ 制御は, ある伝達関数の H_∞ ノルムを設計の評価関数とする制御器の設計である. H_∞ 制御では, 一般に, 入出力の周波数特性を整形することで外乱に対する堅牢性を持つ制御器の設計を行う [95]. H_∞ ノルムとは, ある安定な伝達関数 $\mathbf{G}(s)$ に対して, 以下の式で定義されるものがある.

$$\|\mathbf{G}(s)\|_\infty = \sup_{0 \leq \omega \leq \infty} \bar{\sigma}\{\mathbf{G}(j\omega)\} \quad (2.11)$$

$\bar{\sigma}(\cdot)$ は、最大特異値を示す．また、 H_∞ ノルムの物理的な意味として、システムへの入力パワーと出力パワーの比の上限値とも解釈できる．

図 2.5 に白色ガウス雑音外乱 $\mathbf{w}[k]$ の影響を抑制できる H_∞ 制御器の設計ブロック線図を示す．この設計では、二つの評価入力端子 (\mathbf{R} , \mathbf{w}) から二つの評価出力端子 z_1, z_2 までの伝達関数の H_∞ ノルムを最小とする制御器 $\mathbf{K}(s)$ を設計する．それぞれの評価入力端子は、目標値に対する周波数特性を評価するための評価入力端子 \mathbf{R} 、白色ガウス雑音外乱 $\mathbf{w}[k]$ に対する周波数特性を評価するための評価入力端子 \mathbf{w} である．評価出力端子 z_1, z_2 は、制御器に入力される信号 (\mathbf{R} と制御対象の出力 \mathbf{X} の差分) と制御対象の出力 \mathbf{X} にそれぞれの周波数特性を決める $\mathbf{W}_s(s)$, $\mathbf{W}_t(s)$ で重み付けした出力である．出力への重み付けをする伝達関数 $\mathbf{W}_s(s)$ と $\mathbf{W}_t(s)$ は設計パラメータであり、また、 α は想定する $\mathbf{w}[k]$ の大きさを設定する設計パラメータである．評価入力端子 \mathbf{R} , \mathbf{w} から評価出力端子 z_1, z_2 ($\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2]^T$) までの伝達関数の H_∞ ノルムは、

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}}(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (2.12)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ \mathbf{W}_t(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}}(s) = \begin{bmatrix} -\alpha\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ -\alpha\mathbf{W}_t(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

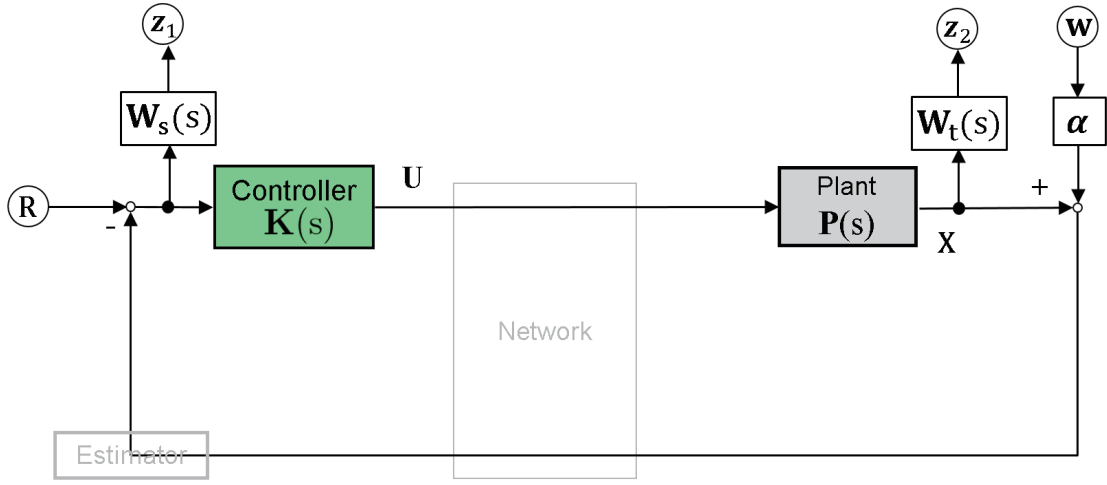
である．また、

$$\mathbf{S}(s) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}(s)]^{-1} \quad (2.15)$$

$$\mathbf{T}(s) = \mathbf{P}(s)\mathbf{K}(s)[\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}(s)]^{-1} \quad (2.16)$$

であり、 $\mathbf{P}(s)$ は制御対象の伝達関数である．この H_∞ ノルムを最小とする制御器の詳細な解法については付録 A に述べる．

この H_∞ 制御では、連続時間の伝達関数の制御器 $\mathbf{K}(s)$ を設計する．しかし、本論文で扱うシステムモデルは離散時間モデルである．そのため、 $\mathbf{K}(s)$ をサンプリング

図 2.5: H_∞ 制御器の設計ブロック線図

間隔 T_s で双一次変換を用いて離散化する [96]. 離散化された制御器の伝達関数 $\mathbf{K}(z)$ を状態空間表現へ変換することで式 (2.17) の係数 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ が得られる.

$$\begin{aligned}\mathbf{h}[k+1] &= \mathbf{A}_c \mathbf{h}[k] + \mathbf{B}_c (\mathbf{r}[k] - \mathbf{x}_e[k]) \\ \mathbf{u}[k] &= \mathbf{C}_c \mathbf{h}[k] + \mathbf{D}_c (\mathbf{r}[k] - \mathbf{x}_e[k])\end{aligned}\quad (2.17)$$

ここで, $\mathbf{h}[k]$ は制御器の状態変数である. H_∞ 制御器は, 外乱に対する堅牢性を有するために, 制御器が状態変数を持つ単純なゲインより複雑な制御器構造である必要がある.

2.3.3 伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器

伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器の設計手法は先行研究 [64] にて提案されている. 設計ブロック線図を図 2.6 に示す. この設計では, 状態情報と操作情報の大きさの重み付け加算の期待値を設計の評価関数として用いる制御器設計である.

$$J_p = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} E \left[\sum_{k=0}^{N-1} (\mathbf{x}[k]^T \mathbf{W}_Q \mathbf{x}[k] + r_k \mathbf{u}[k]^T \mathbf{W}_R \mathbf{u}[k]) \right] \quad (2.18)$$

ここで、 \mathbf{W}_Q , \mathbf{W}_R は設計パラメータである重みであり、それぞれの可算の評価の重要度を定める．図 2.6 の r_k , v_k それぞれ確率変数であり、

$$\text{Prob}(r_k = 0) = p_u, \text{Prob}(r_k = 1) = 1 - p_u \quad (2.19)$$

$$\text{Prob}(v_k = 0) = p_x, \text{Prob}(v_k = 1) = 1 - p_x \quad (2.20)$$

である．ここで、 p_u は操作情報の伝送誤り率、 p_x は状態情報の伝送誤り率である．

User datagram protocols のような通信プロトコルを用いた Acknowledgement を持たないシステムに対し、制御器のゲイン $\mathbf{K}_{\text{lq}}^{(p)}$ は評価関数 J_p を最小とするように設計され、

$$\mathbf{K}_{\text{lq}}^{(p_u, p_x)} = (\mathbf{B}^T(\mathbf{P}_2 + p_u p_x \mathbf{P}_1)\mathbf{B} + \mathbf{W}_R)^{-1}(\mathbf{B}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}) \quad (2.21)$$

となる．ここで、 \mathbf{P}_1 , \mathbf{P}_2 は以下の連立離散時間リカッチ方程式の解である．

$$\mathbf{P}_1 = (1 - p_u)\mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{B}(\mathbf{B}^T(\mathbf{P}_2 + p_u p_x \mathbf{P}_1)\mathbf{B} + \mathbf{W}_R)^{-1}(\mathbf{B}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A}) + p_x \mathbf{A}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{A} \quad (2.22)$$

$$\mathbf{P}_2 = \mathbf{A}^T \mathbf{P}_2 \mathbf{A} - \mathbf{P}_1 + p_x \mathbf{A}^T \mathbf{P}_1 \mathbf{A} + \mathbf{W}_Q \quad (2.23)$$

リカッチ方程式内に伝送誤り率が存在しており、伝送誤り率毎に異なる制御器のゲインとなり、伝送誤り率毎に安定化する制御器の設計を行なう設計であるといえる．

操作情報の計算式は式 (2.10) と違いはなく、

$$\mathbf{u}[k] = \mathbf{K}_{\text{lq}}^{(p_u, p_x)}(\mathbf{r}[k] - \mathbf{x}_e[k]) \quad (2.24)$$

となる．

2.3.4 伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた \mathbf{H}_∞ 制御器

この制御器設計では、操作情報の伝送誤りであれば制御対象への入力、状態情報の伝送誤りであれば推定器(制御器)への入力に対して影響を及ぼす一般の白色外乱と捉える．この白色外乱を設計に用いるため、それぞれに対する評価出力端子を加

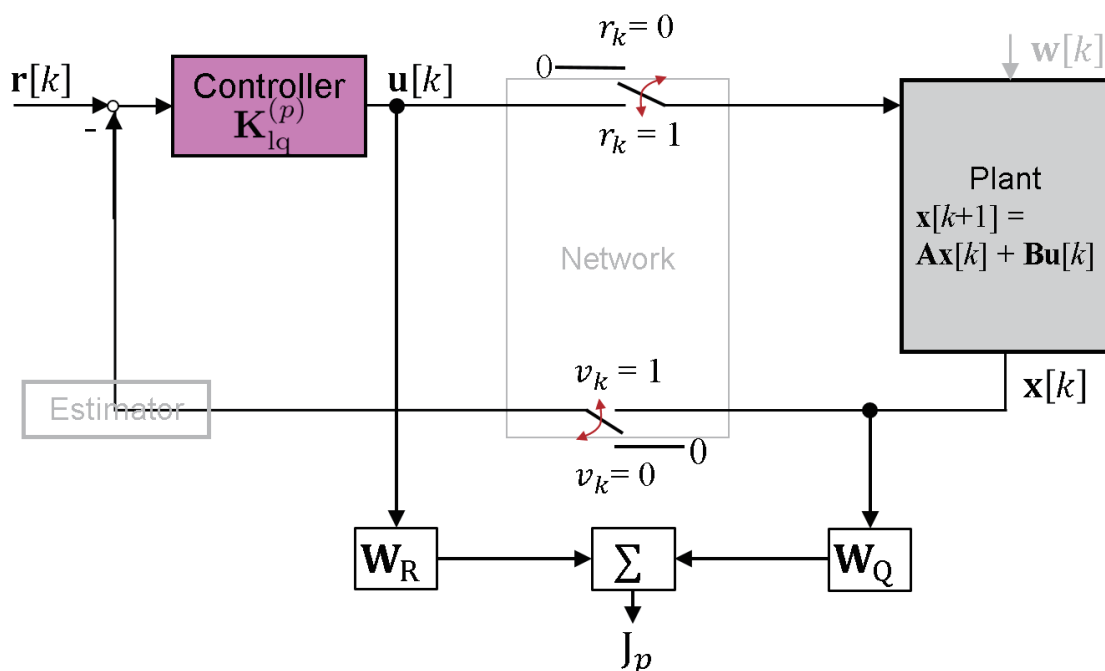


図 2.6: 伝送誤りを入力 ON/OFF と捉えた LQ 制御器の設計ブロック線図

えた設計をここでは説明する．設計のブロック線図を図 2.7 に示す．図 2.5 との違いは，伝送誤りの影響を全周波数で一定のゲインである一般の白色加法性の外乱として設計に組み込むための評価入力端子 w_u , w_x を加えた点である． w_u は操作情報の伝送誤りの影響， w_x は状態情報の伝送誤りの影響に関する評価入力端子である．この制御器も各評価入力端子 R , w , w_u , w_x から各評価出力端子 z_1 , z_2 ($\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2]^T$) までの H_∞ ノルムを最小とする制御器 $\mathbf{K}_{p1}(s)$ を設計する．この場合の設計指標である H_∞ ノルムは，

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_x}(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (2.25)$$

となる．ここで， $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s)$ ， $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}}(s)$ $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}_u}(s)$ ， $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}_x}(s)$ はそれぞれ，

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ \mathbf{W}_t(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}}(s) = \begin{bmatrix} -\alpha\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ -\alpha\mathbf{W}_t(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}_u}(s) = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s)\mathbf{P}(s) \\ -\mathbf{W}_t(s)\mathbf{S}(s)\mathbf{P}(s) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{W}_x}(s) = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ -\mathbf{W}_t(s)\mathbf{T}(s) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

ここで， $\mathbf{W}_s(s)$ ， $\mathbf{W}_t(s)$ は設計パラメータである．また，

$$\mathbf{S}(s) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}_{p1}(s)]^{-1} \quad (2.30)$$

$$\mathbf{T}(s) = \mathbf{P}(s)\mathbf{K}_{p1}(s)[\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}_{p1}(s)]^{-1} \quad (2.31)$$

であり， $\mathbf{P}(s)$ は制御対象の伝達関数である．この制御器設計では， w_u ， w_x に対して，その入力の周波数領域での特徴を決める伝達関数を掛けた設計とはなっておらず，これは w_u ， w_x の信号が全周波数にわたって一定ゲインを持つ一般の白色外乱（入力信号）であることを意味している．この H_∞ ノルムを最小とする制御器の詳細な解法については付録 A に述べる．

この制御器における操作情報の計算は，式 (2.17) と同様の形であるが，制御器の係数行列 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ が異なる．この制御器も連続時間の伝達関数 $\mathbf{K}_{p1}(s)$ で設計されるため，この $\mathbf{K}_{p1}(s)$ をサンプリング間隔 T_s で双一次変換を行い，その離散時間の伝達関数を状態空間表現へ変換することで，制御器の係数行列 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ を得る．

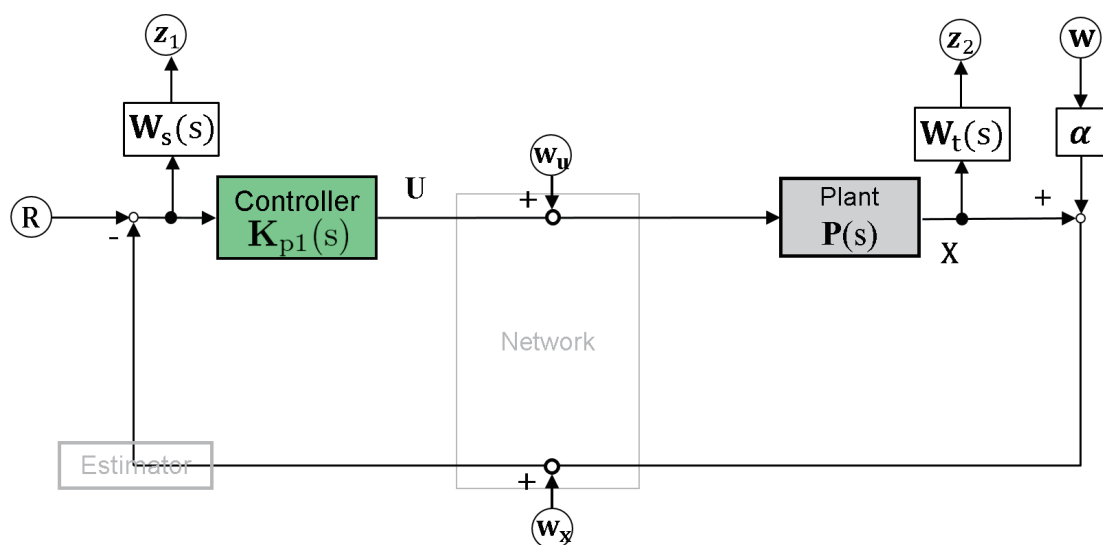


図 2.7: 伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の設計ブロック線図

2.4 まとめ

本章では、本論文で扱うネットワーク化制御システムについて述べた。本論文で扱うシステムは、制御器と制御対象が一对一で存在する制御システムにおいて、その制御器と制御対象の間にネットワークが存在し、このネットワークを介した情報の伝送に確率的に伝送誤りが発生する。この伝送誤りの定義、発生モデル、発生時のシステムの動作とシステムへの影響について述べた。また、従来の制御器として、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_∞ 制御器の設計手法・操作情報の算出方法を説明した。これら 2 つの制御器の違いは、設計において伝送誤りの影響と制御器内で発生する外乱をモデル化した白色ガウス雑音外乱を考慮しているかないかである。また、伝送誤り入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64]、伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器についても従来制御器として設計手法・操作情報の算出方法を説明した。2 つの LQ 制御器は、次章での 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。次章では、伝送誤りがシステムに与える影響の外乱によるモデル化を行うため、これらの制御器を用いたシステムの伝送誤りに対する制御品質を評価する。

第3章 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

3.1 はじめに

本章では，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について議論する．

伝送誤りが意図しない動作の原因として制御品質を劣化させる点は，外乱が制御品質を劣化させる点と同様である．そこで，伝送誤りが制御システムに与える影響は，制御対象内で発生する観測雑音などをモデル化した白色ガウス雑音外乱としてモデル化することができるのかを明らかにする．そのため，この白色ガウス雑音外乱を設計に考慮してその影響を抑制できる H_∞ 制御器と，白色ガウス雑音外乱を設計に考慮しない LQ 制御器の比較を行う．具体的には，それぞれの制御器を用いたシステムの伝送誤りに対する制御品質を比較評価する．

さらに，前章で述べた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の評価により，この制御器の妥当性を検証する．この検証結果より，伝送誤りの影響は白色外乱によるモデル化が妥当性であるのかを明らかにする．

その後，伝送誤りがシステムに与える影響は，送信した情報と実際に用いられた情報との差である点に着目し，各情報の伝送誤りの影響がどのような特徴をもつ外乱とモデル化できるのかを明らかにしていく．

3.2 伝送誤りの影響と白色ガウス雑音外乱

本節では、伝送誤りが制御システムに与える影響は、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としてモデル化することができるのかを明らかにする。そのため、白色ガウス雑音外乱を設計に考慮する H_∞ 制御器と、白色ガウス雑音外乱を設計に考慮しない LQ 制御器をそれぞれ用いたシステムの伝送誤りに対する制御品質の比較評価を行なう。この H_∞ 制御器が LQ 制御器よりも伝送誤りに対して優れた堅牢性を示すのであれば、伝送誤りが制御システムに与える影響は、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と類似した影響を制御システムに与えると考えられる。つまり、伝送誤りが制御システムに与える影響のこの白色ガウス雑音外乱によるモデル化が妥当であるといえる。この比較評価は、計算機シミュレーションにより行なう。まず、シミュレーションの諸元について述べ、その後、制御品質の比較結果を示す。

3.2.1 諸元

制御対象には、劣駆動システムの代表例である、図 3.1 に示す回転型倒立振子を用いる（状態空間表現は付録 B 参照）。この回転型倒立振子は、産業用ロボットアームや自立安定一輪車型ロボットや二足歩行ロボットといった移動・回転を含んだ複雑な動作をするロボットへの応用が可能であり、ネットワーク化制御システムの産業応用分野に適したベンチマークである。また、表 3.1 に示すリアルテック社製 RTC05 [97] に基づく物理パラメータを用いる。サンプリング間隔 T_s は、 10^{-2} 秒とし、式 (2.1) の \mathbf{A} , \mathbf{B} は以下で与えられる。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1.01 & 0 & 1.00 \times 10^{-2} & 7.46 \times 10^{-5} \\ -3.27 \times 10^{-4} & 1 & -1.09 \times 10^{-6} & 9.96 \times 10^{-3} \\ 1.11 & 0 & 1.01 & 1.49 \times 10^{-2} \\ -6.53 \times 10^{-2} & 0 & -3.27 \times 10^{-4} & 9.93 \times 10^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -4.32 \times 10^{-4} \\ 2.16 \times 10^{-4} \\ -8.64 \times 10^{-2} \\ 4.32 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

操作情報 $\mathbf{u}[k]$ は、アームを駆動させる DC モータへの入力電圧 $v_{in}[k]$ からなる $N_u = 1$ 次元ベクトルであり、 $\mathbf{u}[k] = [v_{in}[k]]$ である。また、状態情報 $\mathbf{x}[k]$ は、振り子の角度 $\phi[k]$ と角速度 $\dot{\phi}[k]$ 、アームの角度 $\theta[k]$ と角速度 $\dot{\theta}[k]$ の $N_x = 4$ 次元ベクトルであり、 $\mathbf{x}[k] = [\phi[k] \ \theta[k] \ \dot{\phi}[k] \ \dot{\theta}[k]]^T$ である。

回転型倒立振子の制御内容は、アームを回転させる DC モータへの入力電圧を与えることで、振り子の倒立を保ちつつ、アームを指定した角度(目標値)に一致させることである。振り子が転倒しないという点で制御の安定性を測ることができ、アームの角度で目標値への追従性(応答特性)を測ることができる。この指定したアームの角度 $\Theta[k]$ を目標値として与える。すなわち、 $\mathbf{r}[k] = [0 \ \Theta[k] \ 0 \ 0]^T$ 。 $\Theta[k]$ は、

$$\Theta[k] = \begin{cases} \pi/2 & (n-1)T \leq kT_s < nT/2 \\ 0 & nT/2 \leq kT_s < nT \end{cases} \quad (3.3)$$

周期 $T = 10$ 秒の矩形波信号とする ($n = 1, 2, \dots$)。初期状態は、振り子が直立し、アームが静止した状態 ($\mathbf{x}[0] = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$) とし、振子の振り上げについては考慮しない。また、推定器により計算される $\mathbf{x}_e[k]$ 、ならびに、 H_∞ 制御器の状態変数 $\mathbf{h}[k]$ はすべての要素がゼロを初期状態とする。操作情報、状態情報の各伝送誤り率は等しいとする ($p_u = p_x = p$)。その他の諸元を表 3.2 に示す。回転型倒立振子を線形化可能な振子の角度範囲を $\pm\pi/6$ であるとし、1 回のシミュレーション内において、振り子の角度が $\pm\pi/6$ の範囲を一度でも超えたら振り子が転倒したと判断し、転倒した試行は平均性能を評価する上で含めない。

制御品質の評価指標として、安定性と追従性を用いる。制御対象がある状態内であることを安定と定義し、本論文で用いる回転型倒立振子の場合では、振り子の転倒しない状態を安定であると定義する。そのため、安定性を振子の転倒率により評価する。また、追従は理想的な動作に対する追従度と定義する。本論文では、伝送誤り・白色ガウス雑音外乱のない場合の動作を理想的な動作と定義し、それぞれがある場合のアームの角度の二乗平均平方根誤差 (RMSE) を追従性として評価する。この追従性は応答特性を評価する指標である。

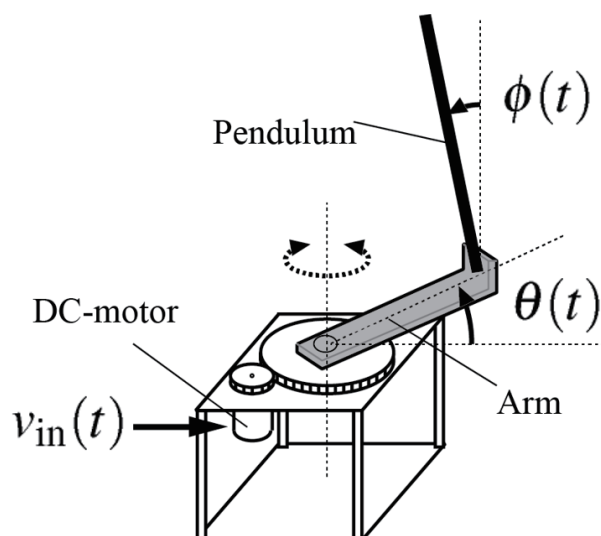


図 3.1: 回転型倒立振子

表 3.1: 回転倒立振子の物理パラメータ

振り子の質量	0.016[kg]
振り子の長さ	0.20[m]
アームの長さ	0.20[m]
アームの中心回りの慣性モーメント	0.0048[kgm ²]
モータトルク直流抵抗	8.3[Ω]
モータトルク定数	0.023[Nm/A, Vs/rad]
ギア比 (アーム : DC-モーター)	7.5 (120:16)
重力加速度	9.81[m/s ²]

表 3.2: シミュレーション諸元

サンプリング間隔 T_s	10[ms]
シミュレーション時間	1000[s]
試行回数	1000[回]
伝送誤り率 ($p_u = p_x = p$)	$10^{-2} \sim 10^0$
白色ガウス雑音外乱 $\mathbf{w}[k]$ の分散 (σ^2)	$10^{-10} \sim 10^0$

H_∞ 制御の設計パラメータは,

$$\mathbf{W}_s(s) = \frac{0.1s + 10}{s + 0.5} \cdot \text{diag}\{10, 2, 0.5, 0\} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{W}_t(s) = \frac{s + 100}{0.05s + 10} \cdot \text{diag}\{10, 2, 0.5, 0\} \quad (3.5)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \mu \cdot \text{diag}\{1, 1, 1, 1\} \quad (3.6)$$

と選定した．ここで， $\text{diag}\{\boldsymbol{\zeta}\}$ は，主対角上にベクトル $\boldsymbol{\zeta}$ の要素を持つ正方対角行列を表す． μ は，任意の定数であり，設計時の白色ガウス雑音外乱の大きさに対応する設計パラメータである．この選定は，比較対象である LQ 制御器とアームのステップ応答を揃えることを最も重要視した選定となっている．これら $\mathbf{W}_s(s), \mathbf{W}_t(s)$ が高い次数の伝達関数になることは，設計する制御器の高次数化に繋がるため，アームのステップ応答が揃う最も低次数な伝達関数をそれぞれ選定している．また，LQ 制御の設計パラメータである， $\mathbf{W}_Q, \mathbf{W}_R$ は以下のように選定した．

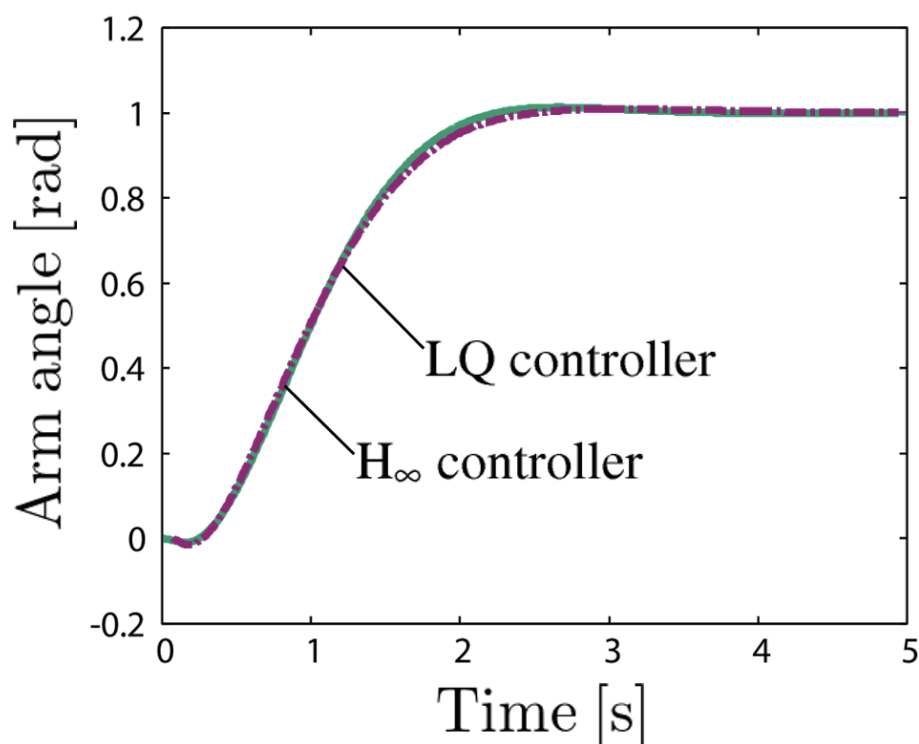
$$\mathbf{W}_Q = \text{diag}\{800, 2.5, 6, 0.6\} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{W}_R = 0.1 \quad (3.8)$$

図 3.2 にステップ応答を示す．

3.2.2 制御品質比較

図 2.1 のシステムに対して $\mu = 1$ で固定した H_∞ 制御器と LQ 制御器を用いた際の伝送誤りに対する制御品質の比較として，図 3.3(a) に安定性の比較，図 3.3(b) に追従性の比較を示す．両図における，紫の破線が LQ 制御器，緑の実線が H_∞ 制御器の結果を示している．また，白色ガウス雑音外乱の分散値は $\sigma = 10^{-6}$ としている．図 3.3(a) の横軸は伝送誤り率であり，右に行くほど伝送誤りの発生しやすい厳しい通信を想定した結果となっている．また，縦軸は振子の転倒率であり，上に行くほど振子の転倒が発生しやすく，低い安定性を示す．図 3.3(b) の横軸は，図 3.3(a) の横軸と同様である．図 3.3(b) の縦軸は，アームの角度の RMSE であり，上に行くほ

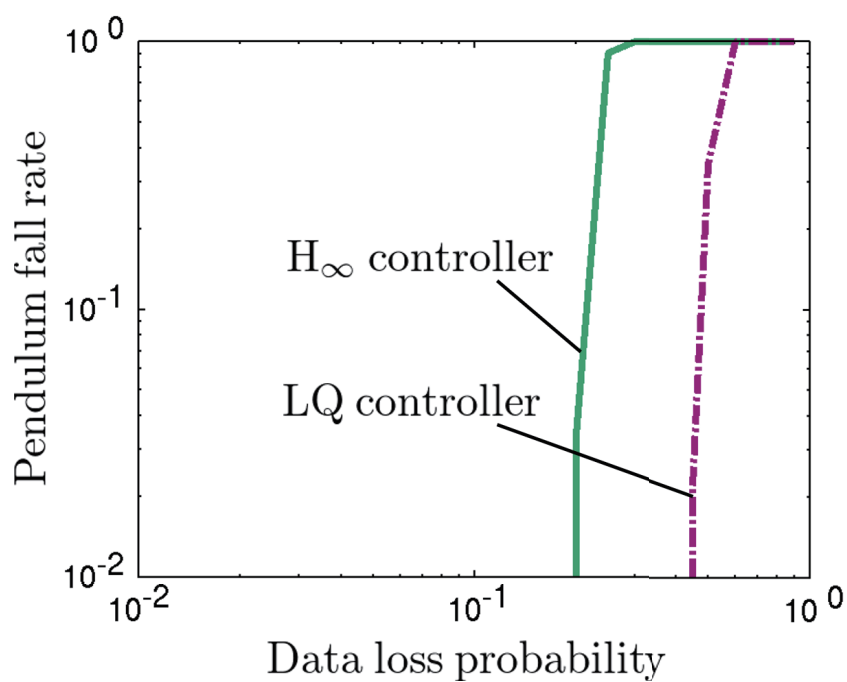
図 3.2: LQ 制御器と H_∞ 制御器のステップ応答

ど角度誤差が大きく、低い追従性を示す。図 3.3(a) において、 H_∞ 制御器の転倒が発生し始める伝送誤り率が LQ 制御器の転倒が発生し始める伝送誤り率より小さいため、安定性に関しては、 H_∞ 制御器が劣ることがわかる。また、図 3.3(b) より、どの伝送誤り率においても H_∞ 制御器のアームの角度誤差が大きく、追従性においても H_∞ 制御器が劣ることがわかる。

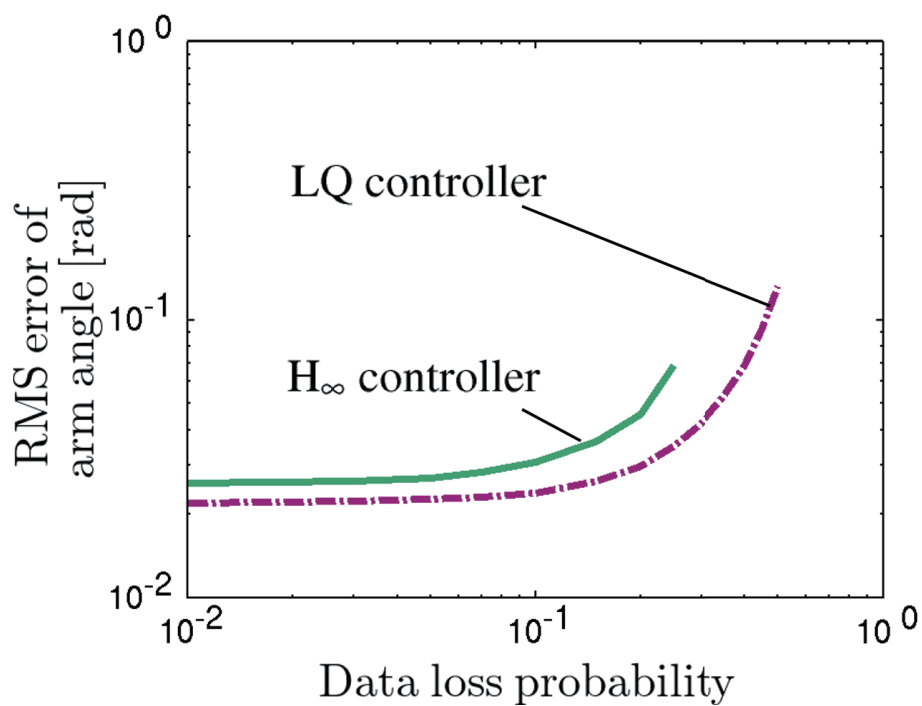
また、図 3.4(a) に白色ガウス雑音外乱の大きさ (分散値: σ^2) に対する安定性の比較、図 3.4(b) に追従性の比較を示す。横軸に分散値を示している。設計パラメータ等は、先と同様である。伝送誤り率 p は 0.1 としている。図 3.4(a) では、伝送誤りの影響もあり、 H_∞ 制御器が低い安定性を示しており、また、図 3.4(b) においては、高い分散値ではその影響が支配的となり両制御器の性能に差は生じないが、低い分散値では伝送誤りの影響により H_∞ 制御器が低い追従性を示している。これより、たとえば白色ガウス雑音外乱の大きさが小さい場合においても H_∞ 制御器の性能が低く、先の結果が白色ガウス雑音外乱の影響によるものでなく、伝送誤りに影響によるもの

であるとわかる.

μ に対する検討も行った. 各伝送誤り率に対して, $10^{-2} \sim 10^2$ まで μ を変化させ, 最も追従性が優れた μ を選択し, その際の安定性の比較を図 3.5(a), 追従性の比較を図 3.5(b) に示す. 図 3.5(b) と図 3.3(b) を比較すると, 追従性に対して μ を最適化したことにより, 追従性の若干の向上が見られるが, $p = 10^{-1}$ 以上の伝送誤り率では LQ 制御器より低い追従性を示している. 安定性に対しても LQ 制御器と比較し, 伝送誤りに対して低い性能を示していることが図 3.5(a) よりわかる.

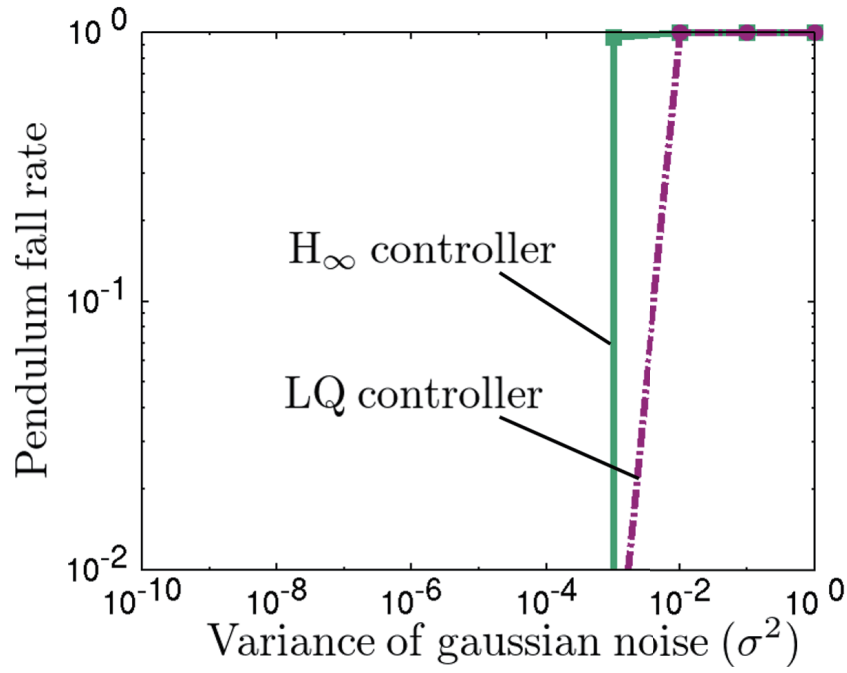


(a) 安定性比較

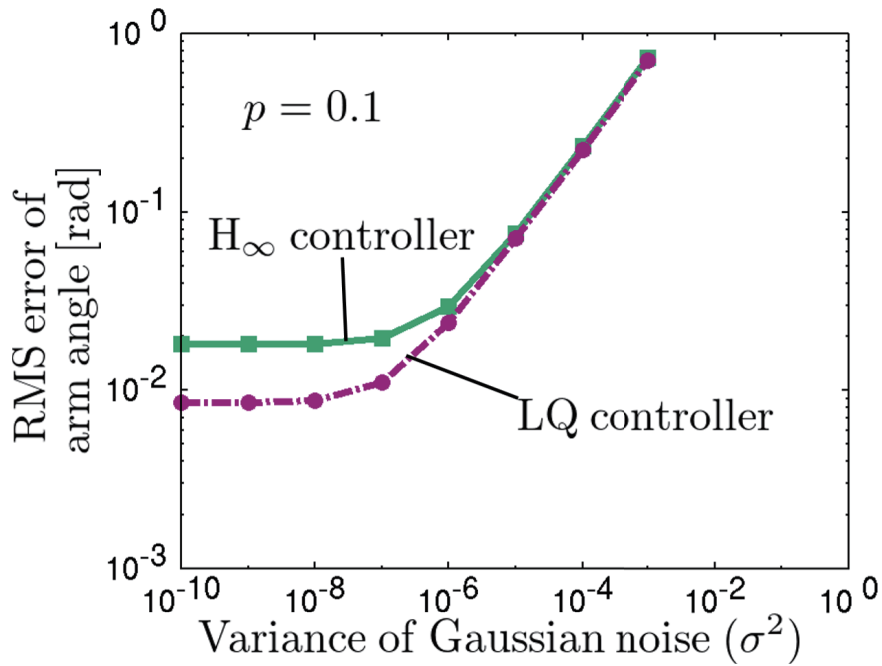


(b) 追従性比較

図 3.3: 伝送誤り率に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)

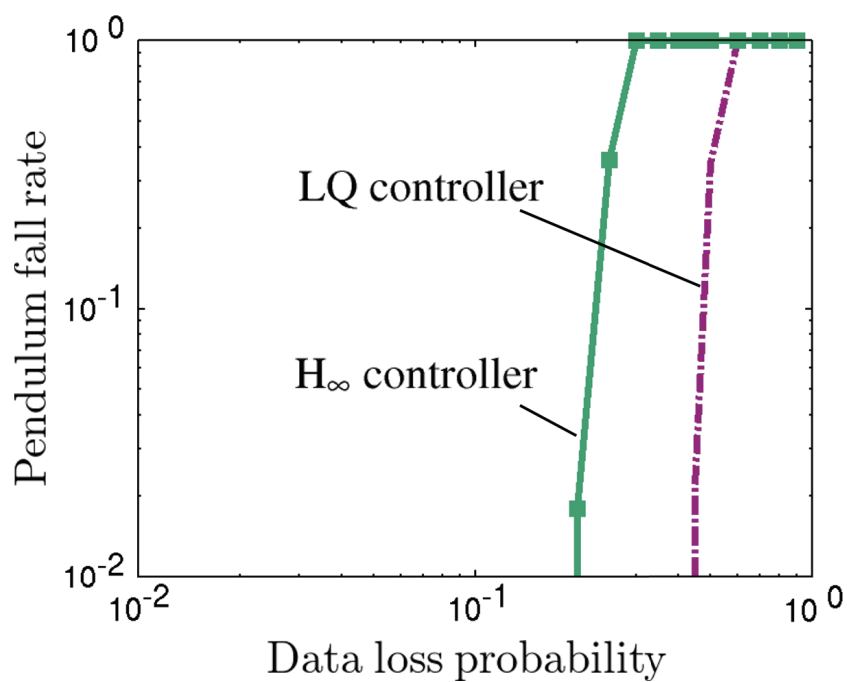


(a) 安定性比較

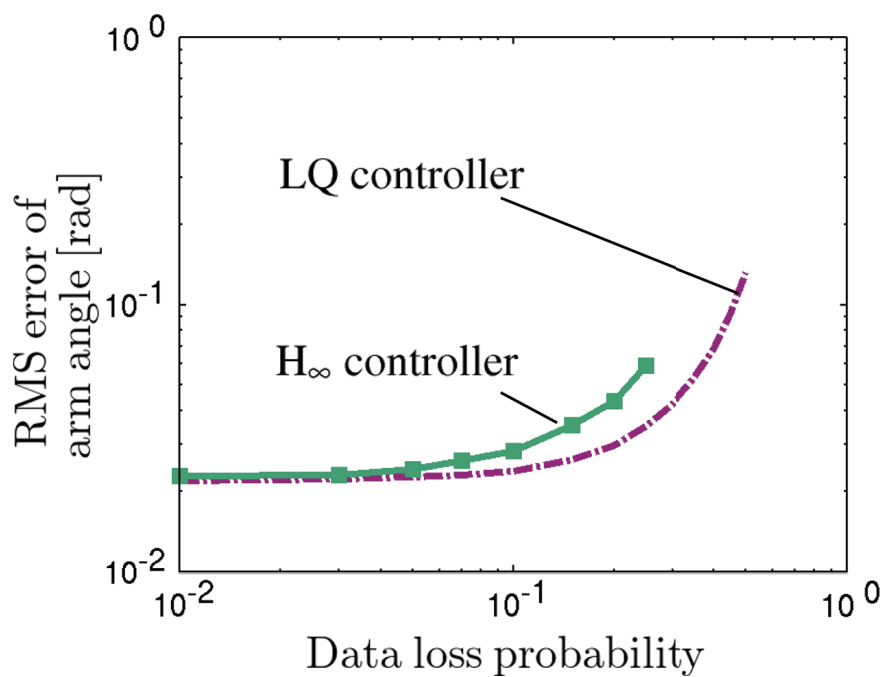


(b) 追従性比較

図 3.4: 白色ガウス雑音外乱の分散値 (σ^2) に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($p = 0.1$)



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 3.5: 伝送誤り率に対する LQ 制御器と μ は RMSE が最小となるものを選択した白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)

3.2.3 考察

これら全ての結果は，伝送誤りに対しては H_∞ 制御器が LQ 制御器より低い制御品質であることを示している．よって，白色ガウス雑音外乱の影響を抑制できる H_∞ 制御器では，伝送誤りによる制御品質の劣化を低減できないといえる．つまり，制御対象の出力に加わる白色ガウス雑音外乱のみを考慮した設計では，伝送誤りによる制御品質劣化の抑制には不十分であり，白色ガウス雑音外乱によるモデル化の妥当性が低いと考察できる．ここで，操作情報の伝送誤りであれば制御対象への入力，状態情報の伝送誤りであれば推定器(制御器)への入力に対して影響を及ぼ点に着目する．次節より，これらの各情報の伝送誤りの影響を伝送誤りを一般の白色の加法性の外乱と捉えた設計に導入した H_∞ 制御器について検討を行う．

3.3 伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた制御器の妥当性

本節では，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器を用いたシステムの伝送誤りに対する制御品質の評価を行なう．前節では，制御対象の出力に加わる白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の評価を行い，伝送誤りによる制御品質の劣化の低減には不十分であることを示した．本節で評価する制御器は，制御対象の出力に加わる白色ガウス雑音外乱に加え，各伝送誤りの影響を一般の白色の加法性の外乱として捉えて設計を行う．この評価から，伝送誤りの影響を一般の白色外乱としてモデル化が妥当であるのかを明らかとする．前節でも用いた，白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器，LQ 制御器との制御品質の比較により評価を行なう．

3.3.1 諸元

制御対象には，前節の節 3.2 と同じく表 3.1 に示す回転型倒立振子を用いる．回転型倒立振子の制御内容やアームの角度の目標値等も前節と同様である．また，推定器により計算される $\mathbf{x}_e[k]$ ，ならびに， H_∞ 制御器の状態変数 $\mathbf{h}[k]$ はすべての要素がゼロ

を初期状態とする．操作情報，状態情報の各伝送誤り率は等しいとする ($p_u=p_x=p$)．その他の諸元も表 3.2 に示すとおりである．制御品質の評価指標として，安定性と追従性を用い，安定性を振子の転倒率，追従性を伝送誤り・白色ガウス雑音外乱のない利用的な動作とそれらがある場合のアームの角度の二乗平均平方根誤差 (RMSE) により評価する．

H_∞ 制御の設計パラメータは，

$$\mathbf{W}_s(s) = \frac{0.1s + 10}{s + 0.5} \cdot \text{diag}\{10, 2, 0.5, 0\} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{W}_t(s) = \frac{s + 100}{0.05s + 10} \cdot \text{diag}\{10, 2, 0.5, 0\} \quad (3.10)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \mu \cdot \text{diag}\{1, 1, 1, 1\} \quad (3.11)$$

と選定した．また，LQ 制御の設計パラメータである， \mathbf{W}_Q ， \mathbf{W}_R は以下のように選定した．

$$\mathbf{W}_Q = \text{diag}\{800, 2.5, 6, 0.6\} \quad (3.12)$$

$$\mathbf{W}_R = 0.1 \quad (3.13)$$

と選定した．この選定は，比較する制御器間のアームのステップ応答を揃えるためであり，このステップ応答を揃えることで比較条件としている．

3.3.2 制御品質比較

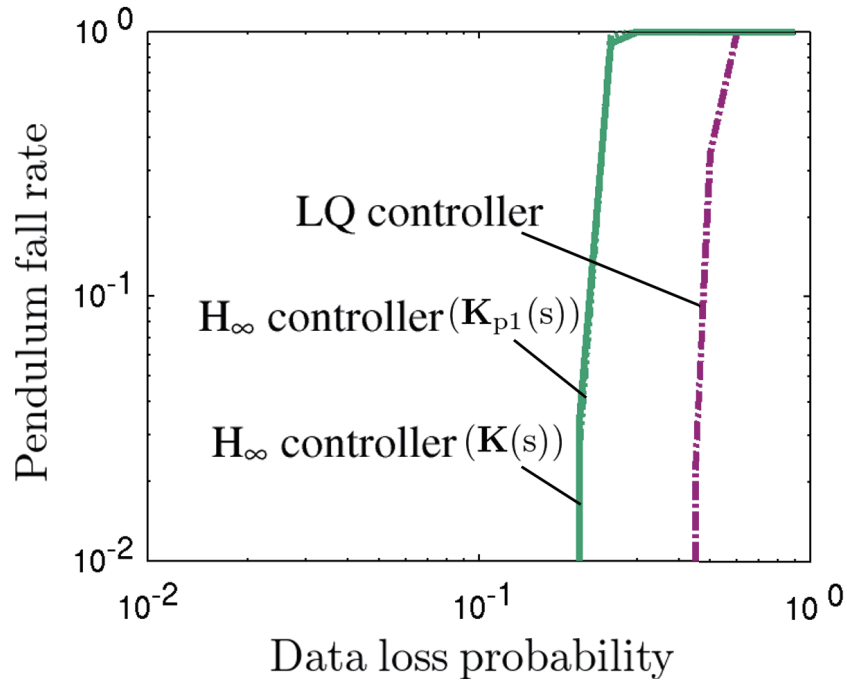
図 2.1 のシステムに対して白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{pl}(s)$) の伝送誤りに対する制御品質の比較として図 3.6(a) に安定性，図 3.6(b) に追従性を示す．この図における H_∞ 制御器の μ は 1 である．両図における，緑の実線が白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器で緑の破線が伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の結果を示している．また，白色ガウス雑音外乱の分散値は $\sigma = 10^{-6}$ としている．図 3.6(a) の横軸は伝送誤り率であり，右に行くほど伝送誤りの発生しやすい厳

しい通信を想定した結果となっている．また，縦軸は振子の転倒率であり，上に行くほど振子の転倒が発生しやすく，低い安定性を示す．図 3.6(b) の横軸は，図 3.6(a) の横軸と同様である．図 3.6(b) の縦軸は，アームの角度の RMSE であり，上に行くほど角度誤差が大きく，低い追従性を示す．図 3.6(a) において，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器と白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器の特性が同等であることが分かる．また，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の転倒が発生し始める伝送誤り率が LQ 制御器の転倒が発生し始める伝送誤り率より小さいため，安定性に関しては，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器が劣ることがわかる．また，図 3.6(b) より，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器が白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器に対して若干のアームの角度誤差の減少が見られるものの，LQ 制御器の角度誤差よりは大きく，追従性においても H_∞ 制御器が劣ることがわかる．

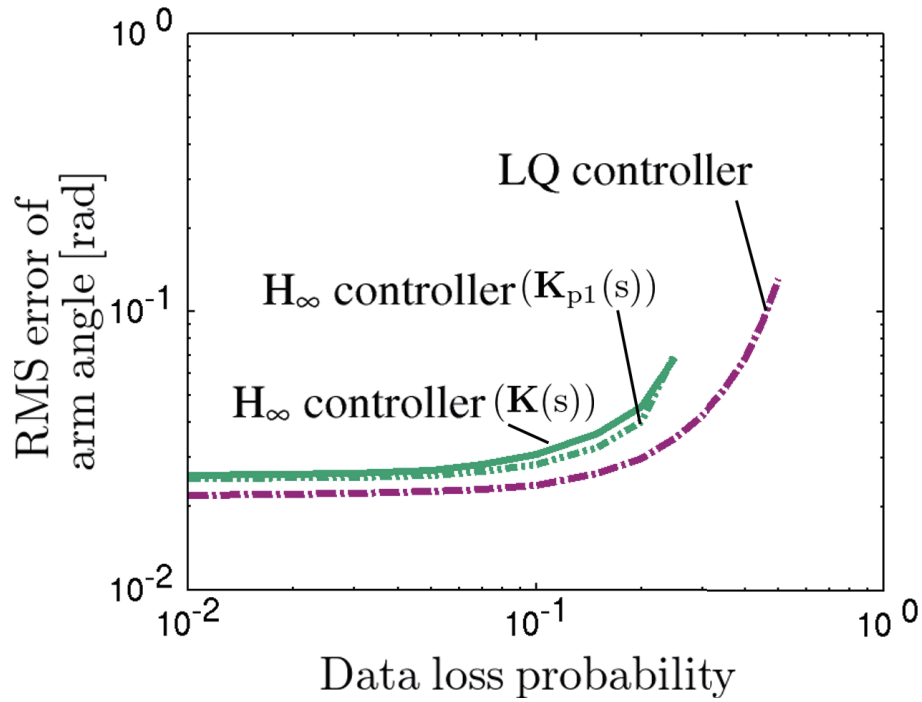
また，図 3.7(a) に白色ガウス雑音外乱の大きさ (分散値: σ^2) に対する安定性の比較，図 3.7(b) に追従性の比較を示す．横軸に分散値を示している．伝送誤り率 p は 0.1 としている．図 3.7(a) では，伝送誤りの影響もあり，両 H_∞ 制御器が低い安定性を示しており，また，図 3.7(b) においては，高い分散値ではその影響が支配的となり両制御器の性能に差は生じないが，低い分散値では伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器が白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器に対して若干のアームの角度誤差の減少が見られるものの LQ 制御器の角度誤差よりは大きく，LQ 制御器に比べ低い追従性を示している．これより，たとえ白色ガウス雑音外乱の大きさが小さい場合においても H_∞ 制御器の性能が低く，先の結果が白色ガウス雑音外乱の影響によるものでなく，伝送誤りに影響によるものであるとわかる．

μ に対する検討も行った．各伝送誤り率に対して， $10^{-2} \sim 10^2$ まで μ を変化させ，最も追従性が優れた μ を選択し，その際の安定性の比較を図 3.8(a)，追従性の比較を図 3.8(b) に示す．図 3.8(b) と図 3.6(b) を比較すると，追従性に対して μ を最適化したことにより，追従性の若干の向上が見られる．また，白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器に対しては，図 3.6(b) と同様に若干の追従性の向上が見られるが， $p = 10^{-1}$ 以上の伝送誤り率では LQ 制御器より低い追従性を示している．安定性に関しても白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器に対しては同程度の性能を示しているが，LQ 制御器に対しては，低い性能を示していることが図 3.8(a)

よりわかる.

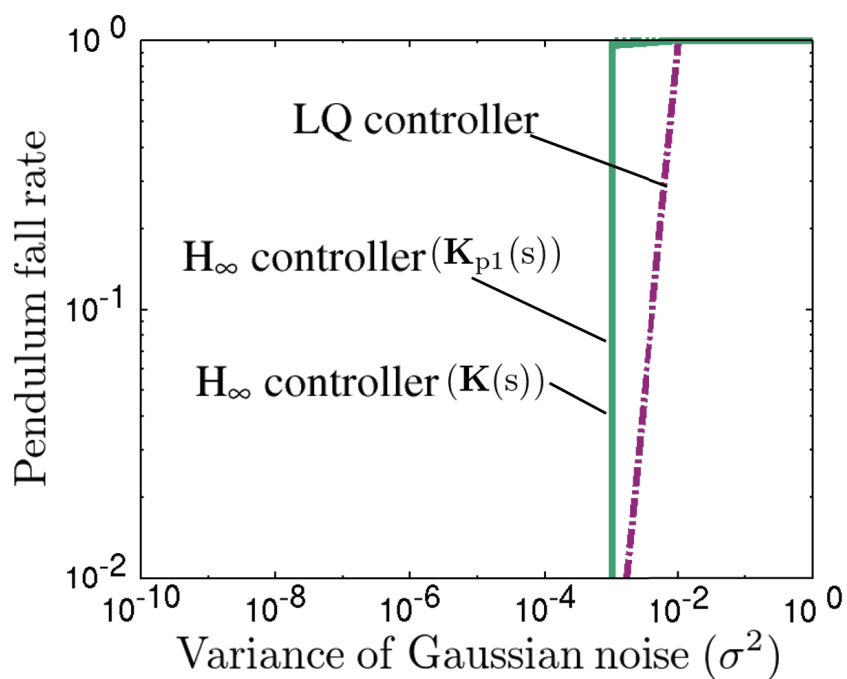


(a) 安定性比較

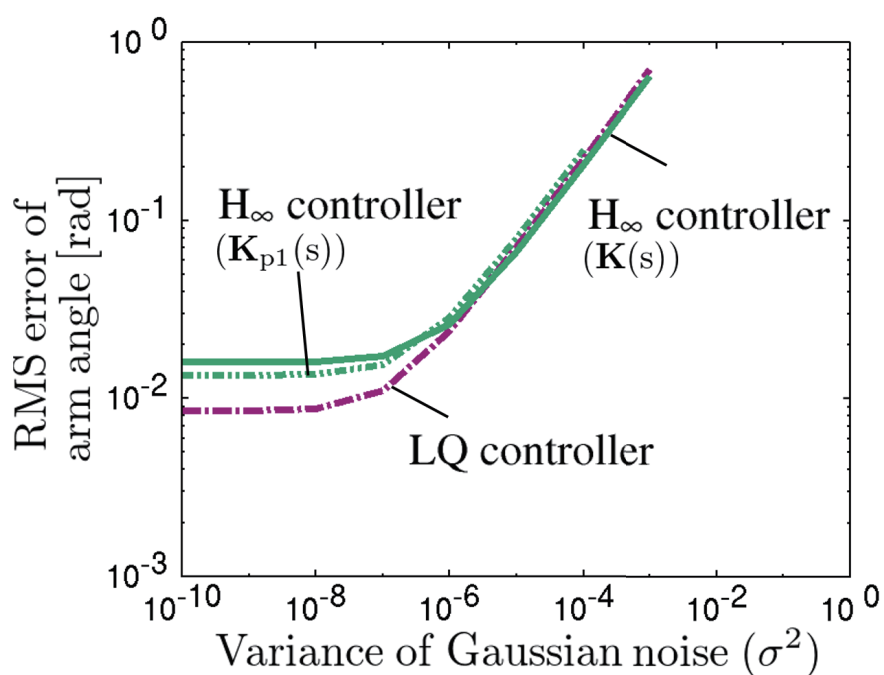


(b) 追従性比較

図 3.6: 伝送誤り率に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($\mathbf{K}_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)

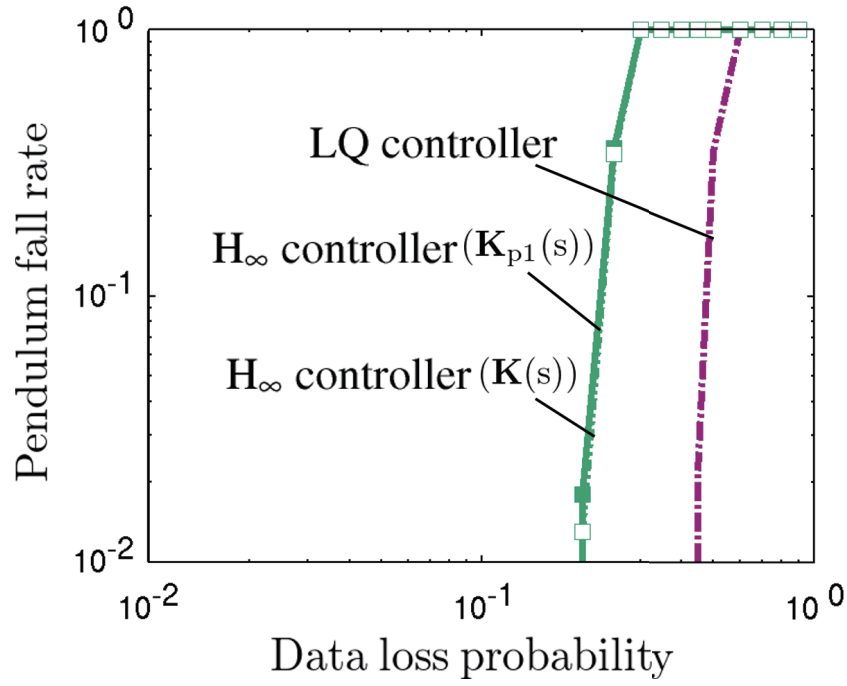


(a) 安定性比較

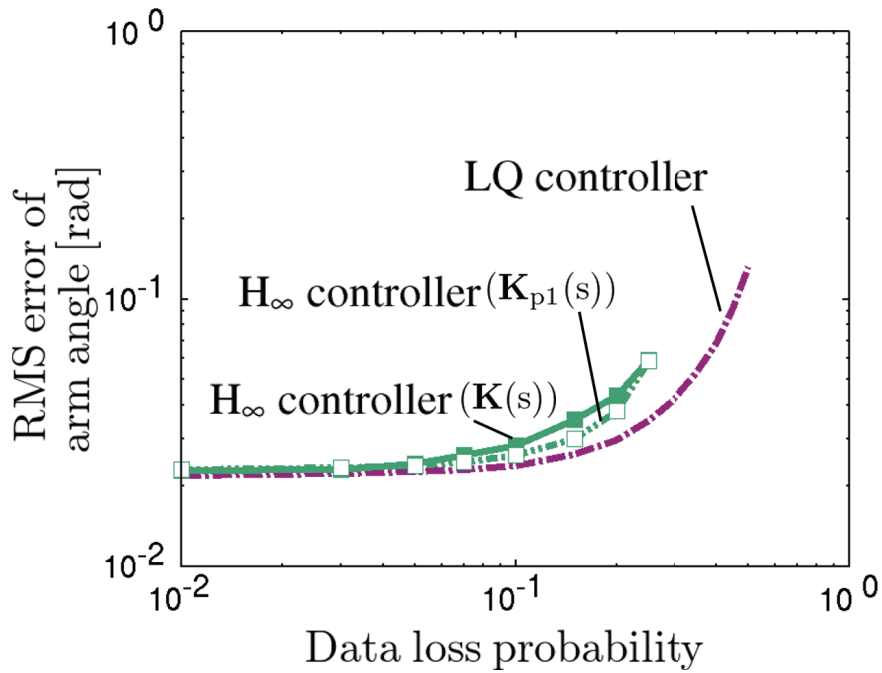


(b) 追従性比較

図 3.7: 白色ガウス雑音外乱の分散値 (σ^2) に対する LQ 制御器と $\mu = 1$ の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($K(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($K_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($p = 0.1$)



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 3.8: 伝送誤り率に対する LQ 制御器と μ は RMSE が最小となるものを選択した白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器 ($K(s)$) と伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 ($K_{p1}(s)$) の制御品質比較 ($\sigma^2 = 10^{-6}$)

3.3.3 考察

制御対象内で発生する観測雑音などをモデル化した白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器と比較し、伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器は、若干の追従性の向上がみられた。これにより、伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えることにある程度の妥当性がみられるといえる。しかし、LQ 制御器と比較すると、すべてのケースにおいて伝送誤りの影響を一般の白色外乱の制御性能が劣る結果となった。この結果、および、前節の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器に関する結果から、伝送誤りがシステムに与える影響を白色ガウス雑音外乱のような全周波数で一定の電力を持つ外乱とモデル化し、制御器を設計することは、伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計として不十分であるといえる。言い換えると、全ての伝送誤りがシステムに与える影響が白色ガウス雑音外乱のような全周波数で一定の電力を持つ外乱としてのモデル化の妥当性が低いと考察できる。次節からは、伝送誤りがシステムに与える影響が送信した情報と実際に用いられた情報との差である点に着目し、各情報の伝送誤りの影響がどのような特徴を持つ外乱としてモデル化することができるのかを明らかにしていく。

3.4 伝送誤りの特性を用いた外乱によるモデル化

3.4.1 状態情報の伝送誤りがシステムに与える影響

2章でも述べたように、伝送誤りがシステムに与える影響は、「送信した情報と推定器において実際に用いられたの情報誤差」として定義できる。この定義に基づき、ある時刻 k での状態情報の伝送誤りに起因する推定状態誤差 $\mathbf{w}_x[k]$ を表現すると

$$\mathbf{w}_x[k] = \mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k] \quad (3.14)$$

となる。本論文におけるシステムモデルにおいて、ある時刻 k での伝送誤りに着目した場合、推定器に入力される状態情報 $\hat{\mathbf{x}}[k]$ は $\mathbf{x}_e[k]$ となる。そのため、この $\mathbf{w}_x[k]$

は,

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_x[k] &= \mathbf{x}[k] - \hat{\mathbf{x}}[k] = \mathbf{x}[k] - \mathbf{x}_e[k] = \\ &= \mathbf{A}\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k-1] + \mathbf{w}[k-1] - (\mathbf{A}\mathbf{x}[k-1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k-1]) = \mathbf{w}[k-1] \end{aligned} \quad (3.15)$$

ただし, 時刻 $k-1$ では状態情報は伝送誤りを考慮していない. 式 (3.15) から $\mathbf{w}_x[k]$ は, $\mathbf{w}[k]$ であることがわかる. つまり, 状態情報の伝送誤りに起因する推定状態誤差は, $\mathbf{w}[k]$ が制御対象外で再度加わった外乱とモデル化することができる. 本論文での $\mathbf{w}[k]$ は, 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を想定しているため, 3.3 章の白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器と伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器を比較した際, 白色ガウス雑音外乱と同様の全周波数で一定の電力を持つ外乱を考慮した後者の H_∞ 制御器に若干の制御品質の向上がみられたと考えられる. 前章での制御品質評価の用いた諸元での, 操作情報の伝送誤り率 $p_u = 0$, 状態情報の伝送誤り率 $p_x = 0.3$ とした, LQ 制御器を用いたシステムにおける $\mathbf{w}_x[k]$ (アームの角度) の例を図 3.9 に示す.

3.4.2 操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響

前述のとおり, 状態情報の伝送誤りがシステムに与える影響 $\mathbf{w}_x[k]$ は, 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 $\mathbf{w}[k]$ であることを明らかにした. ここからは, 操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響 $\mathbf{w}_u[k]$ の特性を明らかにする. 定義に基づき, ある時刻 k での操作情報の伝送誤りに起因する操作情報の誤差 $\mathbf{w}_u[k]$ を表現すると以下ようになる.

$$\mathbf{w}_u[k] = \mathbf{u}[k] - \hat{\mathbf{u}}[k]. \quad (3.16)$$

本論文におけるシステムモデルでは, 操作情報の伝送誤りに対する動作としてゼロ入力を用いており, その際の $\mathbf{w}_u[k]$ は,

$$\mathbf{w}_u[k] = \mathbf{u}[k] - \hat{\mathbf{u}}[k] = \mathbf{u}[k] - 0 = \mathbf{u}[k] \quad (3.17)$$

となり, $\mathbf{u}[k]$ そのものになることがわかる. 前章での制御品質評価の用いた諸元での, 操作情報の伝送誤り率 $p_u = 0.3$, 状態情報の伝送誤り率 $p_x = 0$ とした, LQ 制

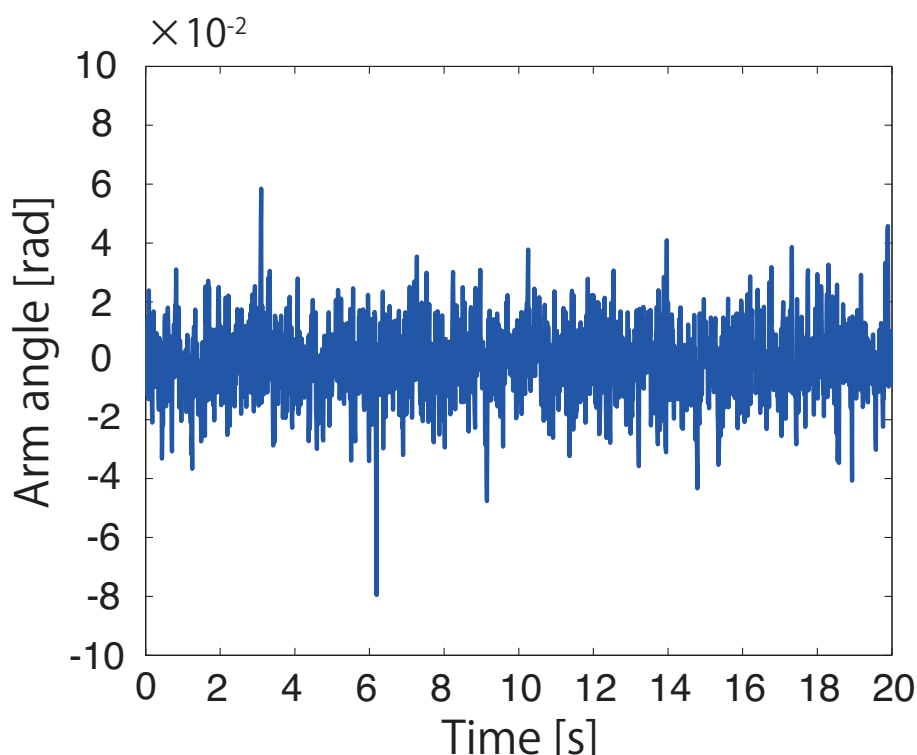


図 3.9: 状態情報の伝送誤りに起因する推定状態誤差 $\mathbf{w}_x[k]$ (アームの角度)($p_u = 0, p_x = 0.3$)

御器を用いたシステムにおける $\mathbf{w}_u[k]$ の例を図 3.10 に示す．操作情報 $\mathbf{u}[k]$ は目標値 $\mathbf{r}[k]$ の特性に強く依存する．ネットワーク化制御システムの応用領域を鑑みると，目標値がインパルスやガウス雑音，または，まったく変動のない一定値の信号といった全周波数領域で一定の電力を持つ信号とはならず，ステップ関数やランプ関数のような時間的に意味のある変動をする信号になると考えられる．そのため， $\mathbf{w}_u[k]$ の周波数特性が全周波数領域で一定の電力になるとは考えづらい．

さらに， $\mathbf{w}_u[k]$ の周波数領域での特性を明らかにするため，目標値信号を前節等の数値例で用いた周期信号 (周期 T) である場合について検討を行う．式 (2.5) を確率変数を用い制御対象に入力される操作情報 $\hat{\mathbf{u}}[k]$ を以下のように再定義する．

$$\hat{\mathbf{u}}[k] = P_k \mathbf{u}[k] \quad (3.18)$$

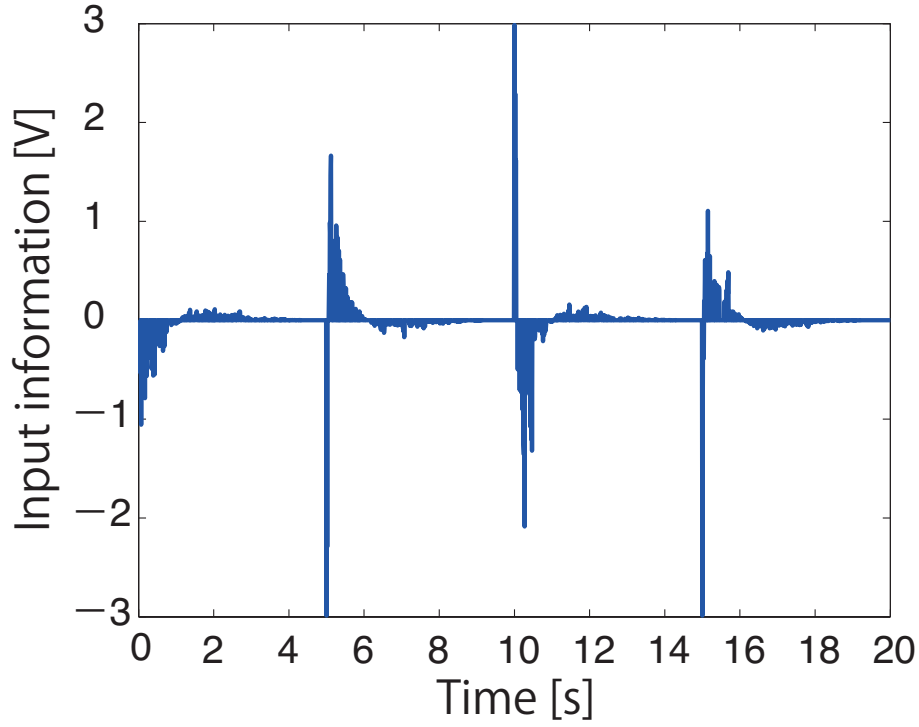


図 3.10: 操作情報の伝送誤りに起因する操作情報の誤差 ($p_u = 0.3, p_x = 0$)

この P_k は, $P_k \in \{0, 1\}$ で, 操作情報の伝送誤り率 p_u で特徴付けられ,

$$\text{Prob}(P_k = 0) = p_u, \text{Prob}(P_k = 1) = 1 - p_u \quad (3.19)$$

再定義した $\hat{\mathbf{u}}[k]$ を用い $\mathbf{w}_u[k]$ を表現すると,

$$\begin{aligned} \mathbf{w}_u[k] &= \mathbf{u}[k] - \hat{\mathbf{u}}[k] \\ &= \mathbf{u}[k] - P_k \mathbf{u}[k] = (1 - P_k) \mathbf{u}[k] \end{aligned} \quad (3.20)$$

となる. この $\mathbf{w}_u[k]$ は, N_u 次元のベクトルであり, そのうち n ($n=0, 1, 2, \dots, N_u$) 番目の成分に着目する. この n 番目の成分を $w_{u,n}[k]$ のとし, その自己相関関数 $\mathbf{R}_{w,n}[k, \tau]$ をとる.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{w,n}[k, \tau] &= E[w_{u,n}[k]w_{u,n}[k + \tau]^T] \\ &= E[(1 - P_k)(1 - P_{k+\tau})u_n[k]u_n[k + \tau]^T] \\ &= p_u^2 u_n[k]u_n[k + \tau]^T \end{aligned} \quad (3.21)$$

$u_n[k]$ は, $\mathbf{u}[k]$ の n 番目の成分である. この $u_n[k]$ は, 一般に目標値が周期信号であるならば, 同様の周期を持つ周期信号となる. この自己相関関数の時間平均を評価する.

$$\begin{aligned}\overline{R_{w,n}[\tau]} &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=-T/2}^{T/2} R_{w,n}[k, \tau] \\ &= p^2 \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{k=-T/2}^{T/2} u_n[k] u_n[k + \tau]^T \\ &= p^2 R_{u,n}[\tau]\end{aligned}\tag{3.22}$$

ここで, $R_{u,n}[\tau]$ は, $u_n[k]$ の自己相関関数である. 式 (3.22) をフーリエ変換することで, $w_{u,n}[k]$ の電力密度スペクトル $S_{w,n}(f)$ が得られる.

$$S_{w,n}(f) = \mathcal{F}[p^2 R_{u,n}[\tau]] = p^2 S_{u,n}(f)\tag{3.23}$$

ここで, $S_{u,n}(f)$ は, $u_n[k]$ の電力密度スペクトルである. 電力密度スペクトルと振幅密度スペクトルの関係より, $w_{u,n}[k]$ の振幅密度スペクトル $|W_{u,n}(f)|$ は,

$$|W_{u,n}(f)| = \sqrt{S_{w,n}(f)} = p |U_n(f)|\tag{3.24}$$

となる. ここで, $|U_n(f)|$ は $u_n[k]$ の振幅密度スペクトルである. 操作情報の伝送誤りの影響 $w_{u,n}[k]$ の振幅密度スペクトルは, 伝送誤りのない操作情報信号の振幅密度スペクトルの伝送誤り率倍となることがわかり, $|W_{u,n}(f)|$ は $|U_n(f)|$ に依存することがわかる.

3.5 まとめ

本章では、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について議論した。

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ため、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を考慮した H_∞ 制御器、白色ガウス雑音外乱の影響を考慮していない LQ 制御器の伝送誤りに対する制御品質の比較評価を行なった。この比較としては、白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器が LQ 制御器の制御性能より劣る結果となった。これより、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した。

伝送誤りが制御システムに与える影響の白色外乱によるモデル化の妥当性を検討するため、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の比較評価を行った。伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器は、制御対象内で発生する白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器より若干の追従性の向上がみられるものの LQ 制御器には劣る結果となった。これより、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、十分であるとはいえない。

伝送誤りがシステムに与える影響が送信した情報と実際に用いられた情報との差である点に着目し、状態情報・操作情報の各情報の伝送誤りを起因とする情報誤差の特性を明らかとした。状態情報の伝送誤りに起因する推定状態誤差は、制御対象内で発生する外乱と同等の影響を与える特性を持つ外乱としてモデル化することができることがわかった。先の制御品質の比較で、伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器が白色ガウス雑音外乱のみを考慮した H_∞ 制御器より若干の制御品質の向上が見られたのはこの特性のためであった。一方で、操作情報の伝送誤りに起因する情報誤差は、その振幅密度スペクトルが、伝送誤りのない操作情報信号の振幅密度スペクトルに依存する特性を持つことがわかった。ネットワーク化制御システムにおいて、操作情報が強く依存する目標値信号が、白色ガウス雑音のような全周波数で一定の電力を持つとは考えづらいため、操作情報の伝送誤りに起因する操作情報の誤差は、白色ガウス雑音のような全周波数で一定の電力を持つ外乱とし

てモデル化することの妥当性が低いといえる。

これより，本章で用いた2つの H_∞ 制御器の設計では，操作情報の伝送誤りに起因する誤差の考慮が不十分であったといえる．そのため，次章からは，操作情報の伝送誤りに着目し，その影響を外乱としてモデル化し，そのモデルを取り入れた伝送誤りによる制御品質の劣化が低減できる，つまり，伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計手法について述べる．

第4章 伝送誤りに堅牢な制御器の設計手法

4.1 はじめに

本章では，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，この劣化を低減可能である伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計手法を提案し，その有用性を明らかとする．具体的には，

1. 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
2. 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つ手法の提案を行なう．これらの設計は，前章において明らかとした，操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響が白色ガウス雑音のような全周波数で一定の電力を持つ外によりモデル化できない点を考慮した設計となっている．これらの制御器の伝送誤りによる制御品質の劣化に対する堅牢性を明らかとするため，2章で示した，伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器や伝送誤りを入力 of ON/OFF として捉えた LQ 制御器との比較を行なう．

4.2 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 H_∞ 制御器

本節では、伝送誤りに起因する操作情報の誤差の時系列データを用い、その影響を解析し外乱としてモデル化、そして、モデルを制御器の設計に利用する手法について述べる。時系列データの解析は、各伝送誤り率毎の伝送誤りに起因する操作情報の誤差の時系列データを計算機シミュレーションにより取得し、周波数解析を行なう。

4.2.1 設計手法

設計のブロック線図を図4.1に示す。図2.7との違いは、 $\mathbf{W}_t(s)$ の代わりに $\mathbf{W}_e^{(pu)}(s)$ を用い、 z_2 で評価する信号を \mathbf{X} から \mathbf{U} に変更したことである。前章で示した伝送誤りに起因する操作情報の誤差の影響が白色雑音のような全周波数で一定の電力を持つ外乱ではない点を考慮し、操作情報の信号を直接設計で評価し、その入出力特性を直接整形することで、伝送誤りの影響の低減を図る設計となっている。この $\mathbf{W}_e^{(pu)}(s)$ は、伝送誤りの影響を抑えるための設計パラメータの伝達関数であり、各伝送誤り率毎の伝送誤りの時系列データ解析に基づき選定する。具体的な選定については、次節で述べる。 $\mathbf{W}_e^{(pu)}(s)$ を操作情報の伝送誤りの影響の大きい周波数で大きなゲインをもつ伝達関数とすることで、各入力からの \mathbf{U} までの周波数特性が $[\mathbf{W}_e^{(pu)}(s)]^{-1}$ となる制御器を設計できる。これにより、伝送誤りの影響を外乱として低減を期待する。この場合の設計指標である H_∞ ノルムは、 \mathbf{R} , \mathbf{w}_u , \mathbf{w}_x の3つの評価入力から評価出力 $z_1, z_2 (\mathbf{Z} = [z_1 \ z_2]^T)$ までの伝達関数で、

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_x}(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (4.1)$$

となる。ここで、 $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s)$, $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s)$, $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_x}(s)$ はそれぞれ、

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ \mathbf{W}_e^{(pu)}(s)\mathbf{T}_a(s) \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}_{w_u}}(s) = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s)\mathbf{P}(s) \\ -\mathbf{W}_e^{(p_u)}(s)\mathbf{T}_a(s)\mathbf{P}(s) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}_{w_x}}(s) = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_s(s)\mathbf{S}(s) \\ -\mathbf{W}_e^{(p)}(s)\mathbf{T}_a(s) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで、 $\mathbf{W}_s(s)$, $\mathbf{W}_t(s)$ は設計パラメータである。また、

$$\mathbf{S}(s) = [\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}_{p2}(s)]^{-1}, \quad (4.5)$$

$$\mathbf{T}_a(s) = \mathbf{K}_{p2}(s)[\mathbf{I} + \mathbf{K}_{p2}(s)\mathbf{P}(s)]^{-1} \quad (4.6)$$

であり、 $\mathbf{P}(s)$ は制御対象の伝達関数である。この制御器設計では、この H_∞ ノルムを最小とする $\mathbf{K}_{p2}(s)$ を設計する。この H_∞ ノルムを最小とする制御器の詳細な解法については付録 A に述べる。

この制御器における操作情報の計算は、3.3 節における式 (2.17) と同様の形であるが、制御器の係数行列 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ が異なる。この制御器も 3.3 節同様、連続時間の伝達関数 $\mathbf{K}_{p1}(s)$ で設計されるため、この $\mathbf{K}_{p2}(s)$ をサンプリング間隔 T_s で双一次変換を行い、その離散時間の伝達関数を状態空間表現へ変換することで、制御器の係数行列 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ を得る。

4.2.2 $\mathbf{W}_e^{(p_u)}(s)$ の選定

$\mathbf{W}_e^{(p_u)}(s)$ は、対角成分のみを持つ伝達関数行列であり、その選定を以下の手順で行なう。

1. 計算機シミュレーションにより、各伝送誤り率毎の
伝送誤りに起因する操作情報の誤差の時系列データを取得
2. この時系列データの各成分毎 ($w_{u,n}[k]$) に自己相関関数を求め、
その自己相関関数をフーリエ変換することで、電力密度スペクトルを算出
3. 電力密度スペクトルから振幅密度スペクトルを算出し、
この振幅密度スペクトルのみを利用し、伝達関数 $\mathbf{W}_{e,n}^{(p_u)}(s)$ を算出

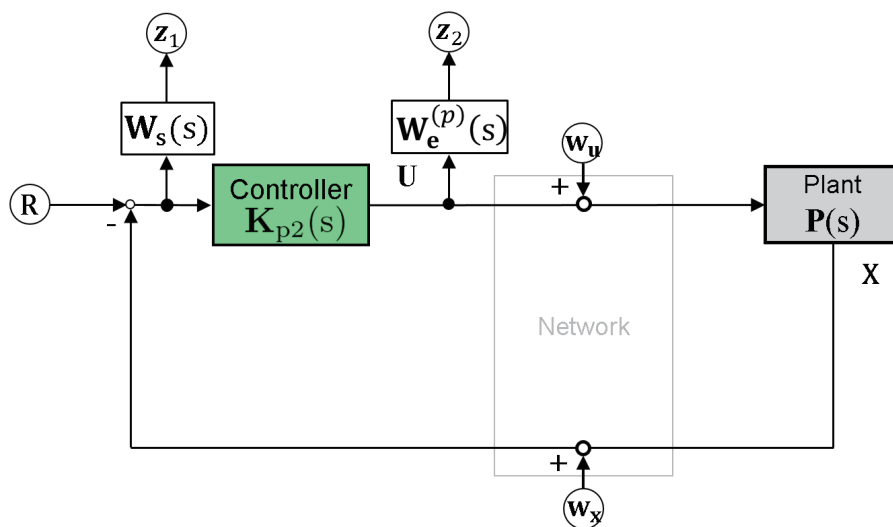
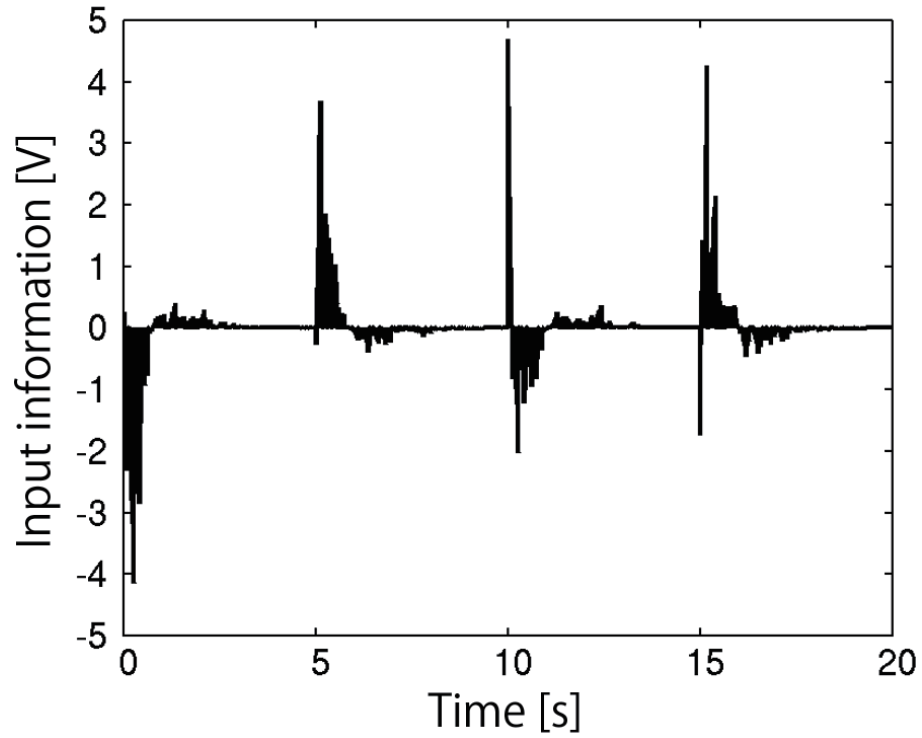


図 4.1: 伝送誤りがシステムに与える影響の時系列解析を用いた H_∞ 制御器の設計ブロック線図

4. 全成分 ($n=1, 2, \dots, N_u$) の伝達関数 $W_{e,n}^{(p_u)}(s)$ を算出し,
それらを対角成分として持つ伝達関数行列 $W_e^{(p_u)}(s)$ を選定

H_∞ 制御器の設計では，設計パラメータ (伝達関数) のゲインのみを用いるため，伝達関数 $W_e^{(p_u)}(s)$ の選定には振幅密度スペクトルのみを利用する．

選定の例を以下に示す．図 4.2 に，計算機シミュレーションにより取得した，操作情報の伝送誤りのみ発生するシステム (状態情報の伝送誤りは発生しない) での LQ 制御器を用いた際の，伝送誤りに起因する操作情報の誤差の時系列データ例を示す．この場合では， $N_u = 1$ ，つまり， $n=1$ である．この時系列データの振幅密度スペクトルを図 4.3 に示す．今回，LQ 制御器を用いた振幅密度スペクトルを例として示したが，振幅密度スペクトルの形状は目標値信号，および，制御対象の周波数特性に強く依存し，他の制御器 (白色ガウス雑音外乱を考慮した H_∞ 制御器等) を用いた際の振幅密度スペクトルの形状が大きく変化することはない．この振幅密度スペクトルに基づき， $W_e^{(p_u=0.5)}(s)$ を MATLAB の Signal Processing Toolbox にある "freq" 関数を用いて選定した．その際，振幅密度スペクトルの低周波領域の二つのピークを同様

図 4.2: 伝送誤りに起因する操作情報誤差の時系列データ ($p = 0.5$)

に持つようにし，高周波部分は低周波に比べて大きなゲインを持つように選定した．

$$W_e^{(p_u=0.5)}(s) = \frac{0.0049s^4 + 0.0027s^3 + 0.02s^2 + 0.008s + 0.012}{s^4 + 0.018s^3 + 3.95s^2 + 0.044s + 2.16} \quad (4.7)$$

$W_e^{(p_u=0.5)}(s)$ のゲイン特性を図 4.4 に示す．また， $p_u = 0.3$ の場合の $W_e^{(p_u=0.3)}(s)$ を以下に示す．

$$W_e^{(p_u=0.3)}(s) = \frac{0.002s^4 + 0.001s^3 + 0.0072s^2 + 0.003s + 0.0042}{s^4 + 0.0055s^3 + 4.17s^2 + 0.012s + 2.407} \quad (4.8)$$

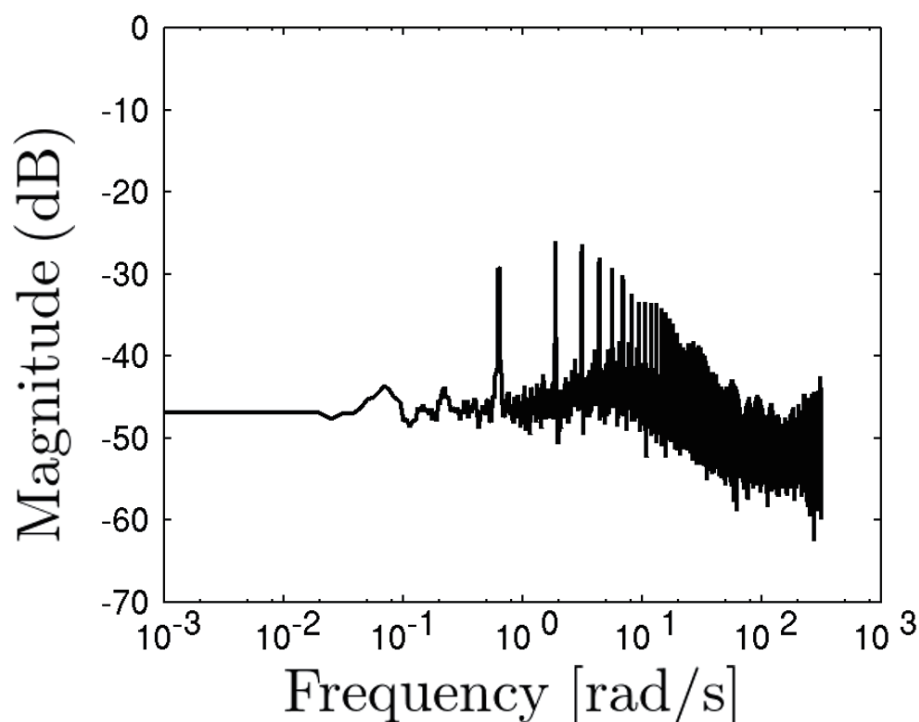


図 4.3: 操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響の振幅密度スペクトル ($p = 0.5$)

4.3 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 H_∞ 制御器

前節では、伝送誤りの影響の時系列データを用い、その影響を外乱としてモデル化し、そのモデルを取り入れる H_∞ 制御器について述べた。この設計手法では、各伝送誤り率毎の伝送誤りがシステムに与える影響の時系列データの取得が必要であった。伝送誤り率毎の影響を設計に用いることで、伝送誤りによる不安定化と応答性能の劣化へ対応を図ったが、ネットワークの状況が変動し、伝送誤り率が一定とならないシステムに対しては、取りうる全ての伝送誤り率に対し設計を行ない、それらを切り替える必要がある。この要求は、制御器やシステム全体の複雑化の要因となり、産業応用に対する問題となり得る。

そこで、本説では 3.4 節で明らかとした、操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響が式 (3.24) に示す制御内容に対する依存性を持つことを利用し、伝送誤り率

4.3. 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 H_∞ 制御器 53

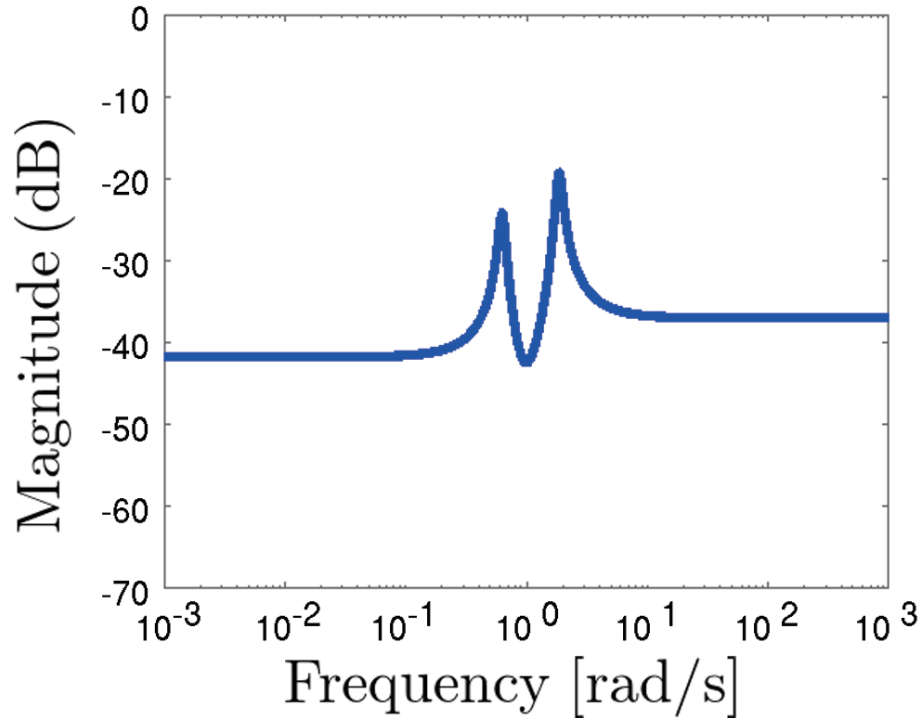


図 4.4: 伝達関数 $\mathbf{W}_e^{(p=0.5)}(s)$ のゲイン

を必要としない設計手法を提案する．この手法では，伝送誤り率毎の計算機シミュレーションによる時系列データ取得・解析，設計は不要となる．

4.3.1 設計手法

設計のブロック線図を図 4.5 に示す．図 4.5 に示すように，伝送誤りの影響を外乱として設計に導入するための外部入力を w_u ，その周波数特性を特徴づける伝達関数 $\mathbf{H}_w(s)$ として，制御内容への依存性を利用し選定を行う．具体的な選定は後述する． \mathbf{R} は，目標値に対する周波数特性を評価するための外部入力である． $\mathbf{W}_x(s)$ は，各外部入力 \mathbf{R} ， w_u から制御器に入力される信号に重みをかける伝達関数であり，その出力を評価出力 \mathbf{z}_1 とする．また， \mathbf{z}_2 は制御器の出力 \mathbf{U} を評価する評価出力であり， $\mathbf{W}_u(s)$ による周波数領域での特徴をつける． $\mathbf{K}_{p3}(s)$ が設計するコントローラの伝達関数であり， $\mathbf{P}(s)$ は制御対象を表す伝達関数である．

この設計では，外部入力 \mathbf{R} ， \mathbf{w}_u から評価出力 z_1, z_2 までの伝達関数の H_∞ ノルムを最小とする制御器を設計する．この制御器設計での H_∞ ノルムは，

$$\left\| \begin{array}{c} \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) \\ \mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s) \end{array} \right\|_\infty \quad (4.9)$$

ここで， $\mathbf{Z} = [z_1, z_2]^T$ ． $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s)$ ， $\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s)$ は，

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{R}}(s) = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_x(s)\mathbf{S}(s) \\ \mathbf{W}_u(s)\mathbf{T}_a(s) \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\mathbf{G}_{\mathbf{Z}\mathbf{w}_u}(s) = \begin{bmatrix} -\mathbf{W}_x(s)\mathbf{P}(s)\mathbf{S}(s)\mathbf{H}_w(s) \\ -\mathbf{W}_u(s)\mathbf{P}(s)\mathbf{T}_a(s)\mathbf{H}_w(s) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

であり，

$$\mathbf{S}(s) = (\mathbf{I} + \mathbf{P}(s)\mathbf{K}_{p3}(s))^{-1} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{T}_a(s) = (\mathbf{I} + \mathbf{K}_{p3}(s)\mathbf{P}(s))^{-1}\mathbf{K}_{p3}(s) \quad (4.13)$$

と定義する．この H_∞ ノルムを最小とする制御器の詳細な解法については付録 A に述べる．

設計される制御器 $\mathbf{K}_{p3}(s)$ は，連続時間の伝達関数である．そのため， $\mathbf{K}_{p3}(s)$ をサンプリング間隔 T_s で双一次変換を用いて離散化する．離散化された制御器の伝達関数 $\mathbf{K}(z)$ を状態空間表現へ変換することで係数 $\mathbf{A}_c, \mathbf{B}_c, \mathbf{C}_c, \mathbf{D}_c$ が得られる．

4.3.2 $\mathbf{H}_w(s)$ の選定

この設計において， $\mathbf{H}_w(s)$ の選定に，操作情報の伝送誤りが与える影響の推定を利用する．式 (3.24) を再度以下に示す．

$$|\mathbf{W}_{u,n}(f)| = p_u |\mathbf{U}_n(f)| \quad (4.14)$$

4.3. 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 H_∞ 制御器 55

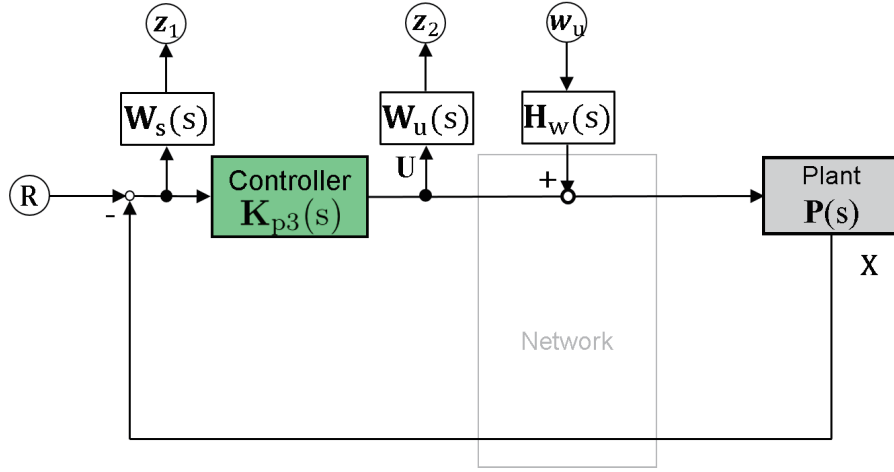


図 4.5: 伝送誤りがシステムに与える影響の制御内容への依存性を用いた H_∞ 制御器の設計ブロック線図

この式より, $|W_{u,n}(f)|$ は $|U_n(f)|$ の定数倍 p であることから, $|W_{u,n}(f)|$ は $|U_n(f)|$ に依存することがわかる. この依存性を利用し, $H_w(s)$ を以下のように選定する手法を提案する.

$$H_w(s) = \gamma \bar{U}(s) \quad (4.15)$$

$\bar{U}(s)$ は, 各 $|U_n(f)|$ ($n=1, 2, \dots, N_u$) を覆うゲインの伝達関数を対角成分に持つ伝達関数行列である. $|U_n(f)|$ は, 目標値信号, 制御対象, 伝送誤りが発生しない場合に実現したい制御性能を得られる制御器から解析的に算出可能であり, このスペクトルから $\bar{U}(s)$ を選定する. 式 (3.24) より $|W_{u,n}(f)|$ は, $|U_n(f)|$ 以上になることはないため, $|U_n(f)|$ を覆うゲインを持つ伝達関数 $\bar{U}_n(s)$ を対角成分に持つ $\bar{U}(s)$ を用いることで伝送誤り率に依存しない選定が行える. ここで, $|U_n(f)|$ でなく $\bar{U}_n(s)$ を用いのは, 各 $|U_n(f)|$ を直接用いると伝達関数が高次元になり設計される制御器の高次元化に繋がるため, それを避けるためである. 連続した伝送誤りにより伝送誤りの影響がシステム内に蓄積しある時間では $|U_n(f)|$ を超えること, または, 異なるスペクトル分布の影響が出ることも考える. しかし, それら全ての影響を解析的に算出することは, 解析すべきパターン数が膨大に存在するため現実的ではない. そのため, 設計の余裕度 (ゲインのマージン) として 1 以上の任意の定数 γ を導入する.

4.4 伝送誤りに対する制御品質比較

本説では、計算機シミュレーションにより提案制御器である、「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 H_∞ 制御器」と「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 H_∞ 制御器」の伝送誤りに対する堅牢性を評価する。この確認は、2.2.2 節で述べた伝送誤りの影響を一般の白色外乱と捉えた H_∞ 制御器(設計パラメータ μ は RMSE により最適化した数値を用いる)、同じく 2.3.1 節で述べた伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64] の制御品質の比較評価により行う。表記の簡易化のため、「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 H_∞ 制御器」を提案制御器 1, 「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 H_∞ 制御器」を提案制御器 2 と表記する。

制御対象には、図 3.1 に示す回転型倒立振子を用い、物理パラメータは表 3.1 と同様である。操作情報、状態情報の各伝送誤り率は等しいとする ($p_u=p_x=p$)。白色ガウス雑音外乱の分散値を $\sigma^2 = 10^{-6}$ とする。その他のシミュレーション諸元は 3.1 と同様である。

4.4.1 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

H_∞ 制御器の評価

2.2.2 節で述べた伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器、2.3.1 節で述べた伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64] と伝送誤りに対する制御品質の比較を行なうことで、提案制御器 1 の有効性を確認する。

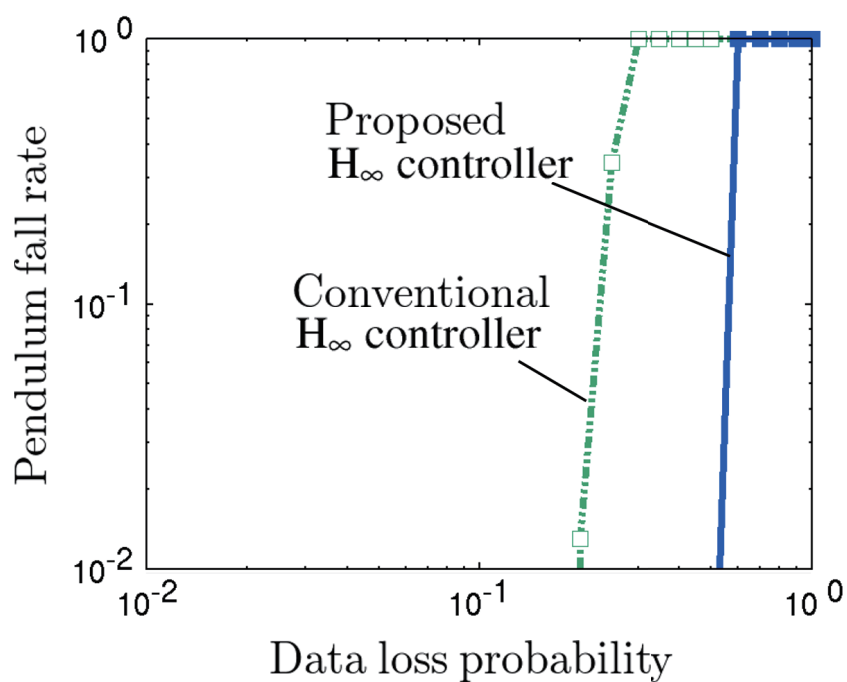
伝送誤りの影響低減効果の確認

提案制御器 1 と 2.2.2 節で述べた伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の比較評価を行うことで、伝送誤りによる制御品質の劣化の低減効果を確認する。提案制御器 1 の設計パラメータを

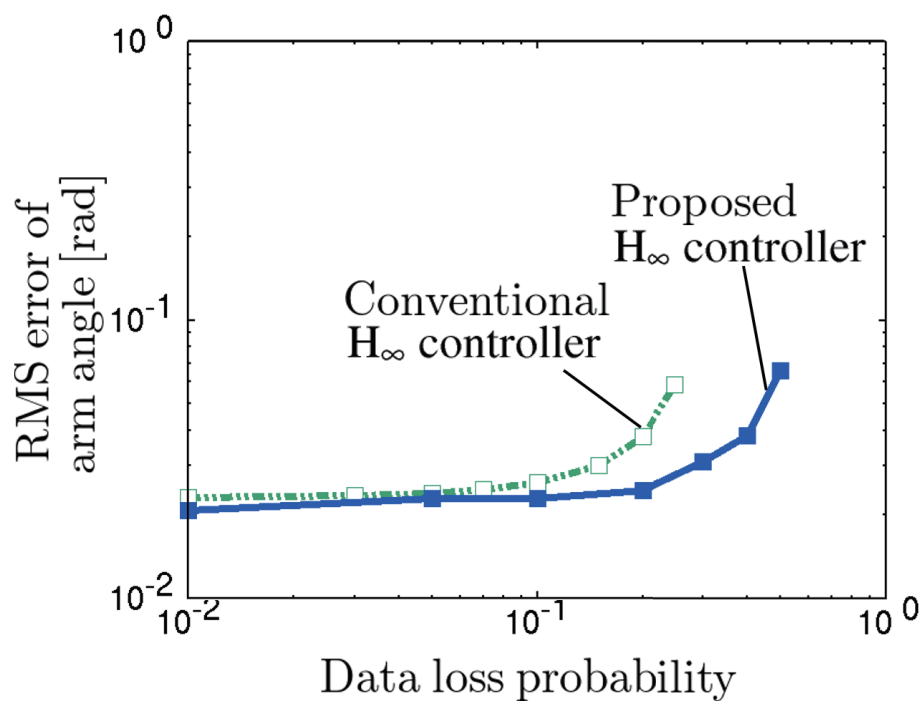
$$\mathbf{W}_s(s) = \frac{0.1s + 10}{s + 0.5} \cdot \text{diag}\{10, 2, 0.5, 0\} \quad (4.16)$$

と選定した．伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器のパラメータは前章と同様である．この選定は， $p = 0.01$ での提案制御器 1 と比較する制御器間のアームのステップ応答を揃えるためであり，このステップ応答を揃えることで比較条件として用いる．

図 4.6(a)，図 4.6(b) に本章で述べた提案制御器 1 と 2.3.1 節で述べた伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器（従来制御器）の比較を示す．図 4.6(a) に安定性の比較，図 4.6(b) に追従性の比較を示す．両図における，青の実線が提案制御器 1，緑の破線が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器の結果を示している．図 4.6(a) の横軸は伝送誤り率であり，右に行くほど伝送誤りの発生しやすい厳しい通信を想定した結果となっている．また，縦軸は振子の転倒率であり，上に行くほど振子の転倒が発生しやすく，低い安定性を示す．図 4.6(b) の横軸は，図 4.6(a) の横軸と同様である．図 4.6(b) の縦軸は，アームの角度の RMSE であり，上に行くほど角度誤差が大きく，低い追従性を示す．図 4.6(a) において，提案制御器 1 の転倒が発生し始める伝送誤り率が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器の転倒が発生し始める誤り率より大きいため，安定性に関しては，提案制御器 1 が優ることがわかる．また，図 4.6(b) より，どの伝送誤り率においても伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器のアームの角度誤差が大きく，追従性においても提案制御器 1 が優れることがわかる．これより，提案制御器 1 が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_{∞} 制御器よりも伝送誤りによる制御品質の劣化をより低減できており，伝送誤りに対して堅牢な制御器であるといえる．



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 4.6: 伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較

伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器との比較

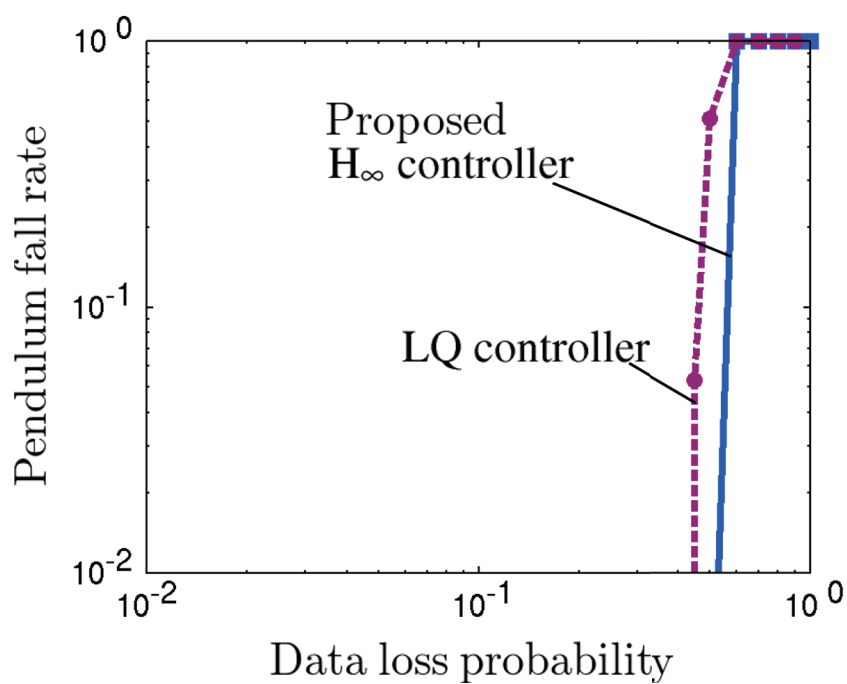
提案制御器 1 と伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器の比較評価を行うことで、本提案の有効性を確認する．提案制御器 1 の設計パラメータは前述と同様のものを用いる．伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器の設計パラメータである、 \mathbf{W}_Q , \mathbf{W}_R は以下のように選定した．

$$\mathbf{W}_Q = \text{diag}\{800, 2.5, 6, 0.6\} \quad (4.17)$$

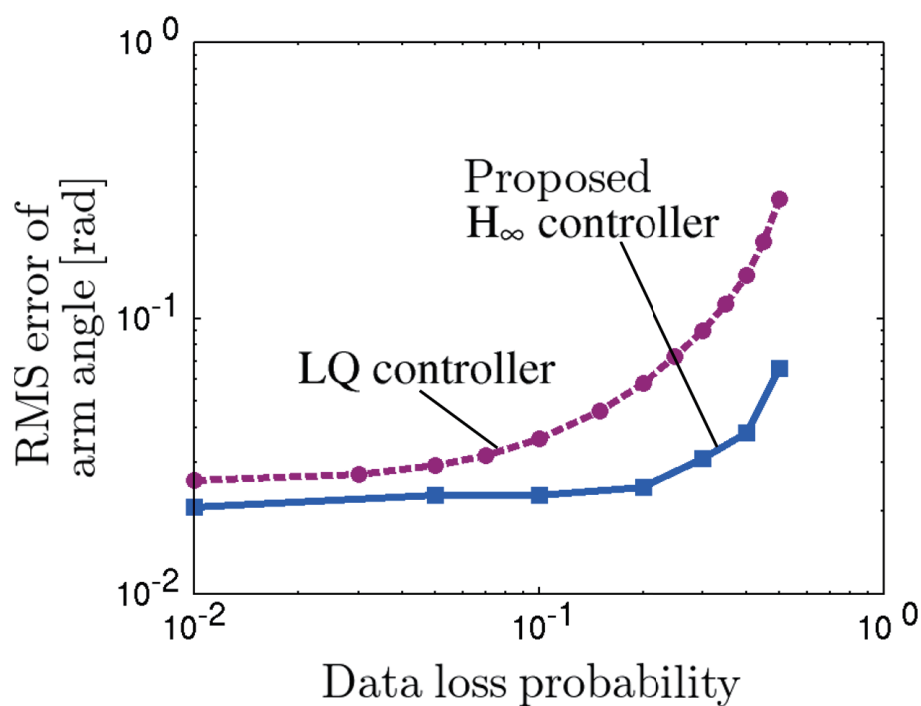
$$\mathbf{W}_R = 0.1 \quad (4.18)$$

この選定は、 $p = 0.01$ での提案制御器 1 と $p = 0$ での LQ 制御器のアームのステップ応答を揃えるためであり、このステップ応答を揃えることで比較条件として用いる．

図 4.7(a), 図 4.7(b) に本章で述べた提案制御器 1 と 2.3.1 節で述べた伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器の比較を示す．両図における、青の実線が提案制御器 1、紫の破線が伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器の結果を示している．図 4.7(a) において、提案制御器 1 の転倒が発生し始める伝送誤り率が伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器の転倒が発生し始める誤り率より大きい．ため、安定性に関しては、提案制御器 1 が優ることがわかる．また、図 4.7(b) より、どの伝送誤り率においても伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器のアームの角度誤差が大きく、追従性においても提案制御器 1 が優れることがわかる．これより、提案制御器 1 が伝送誤りを入力 of ON/OFF と捉えた LQ 制御器よりも伝送誤りによる制御品質の劣化をより低減できており、伝送誤りに対して堅牢な制御器であるといえ、本提案の有効性が確認された．



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 4.7: 伝送誤り率に対する伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較

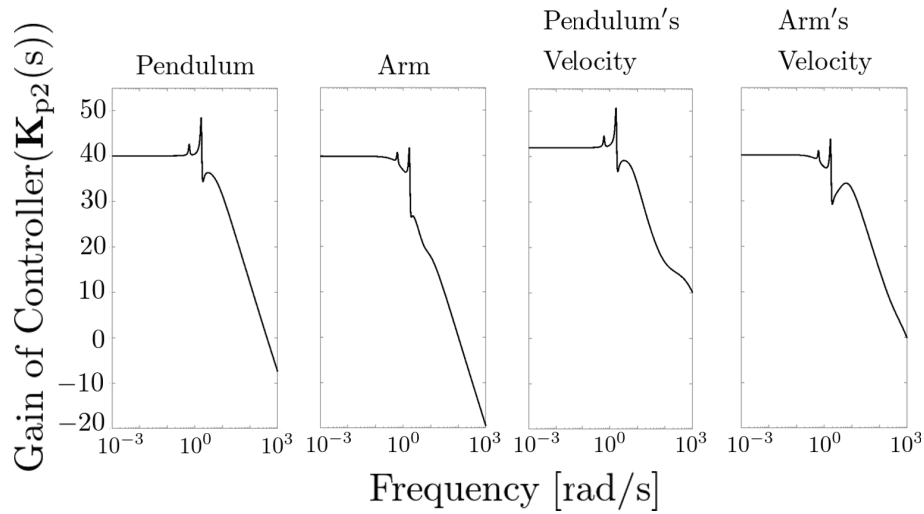


図 4.8: 提案制御器 1($K_{p2}(s)$) の周波数特性 ($p = 0.3$)

図 4.8 に、 $p = 0.3$ の提案制御器 1 のゲイン特性を示す．制御器の各入力 (各状態情報) に対する周波数応答を示している．伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器は、各伝送誤り率に毎に一定ゲインの周波数特性を持つ．一方で、提案制御器では、伝送誤りの影響が大きい周波数でゲインが大きくなっていることが確認でき、これにより伝送誤りの影響を低減できていると考察できる．

4.4.2 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 H_∞ 制御器の評価

伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器、伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64] や提案制御器 1 などとの伝送誤りに対する比較評価を行うことで、提案制御器 2 の有効性を確認する．

伝送誤りの影響低減効果の確認

提案制御器 2 が、伝送誤りの影響を低減できることを示すため、伝送誤りを白色外乱と捉えた H_∞ 制御器との比較を行なう．制御品質比較に用いる目標値信号、制御対象と伝送誤りが発生しない場合に実現したい制御性能を得られる制御器として

従来制御器 [64] (設計パラメータは前章式 (4.17), (4.18)) を用い, $|U(f)|$ を算出し図 4.9 に示す. 提案制御器 2 では, 前節で述べたように, このゲイン $|U(f)|$ を覆うように $H_w(s)$ を選定する. 4 次の伝達関数による近似で選定した $\bar{U}(s)$ を以下に示し, そのゲインを同じく図 4.9 に示す.

$$\bar{U}(s) = \frac{0.003s^4 + 0.82s^3 + 44s^2 + 8.1s + 0.04}{s^4 + 15s^3 + 61s^2 + 56s + 15} \quad (4.19)$$

$$\gamma = 100 \quad (4.20)$$

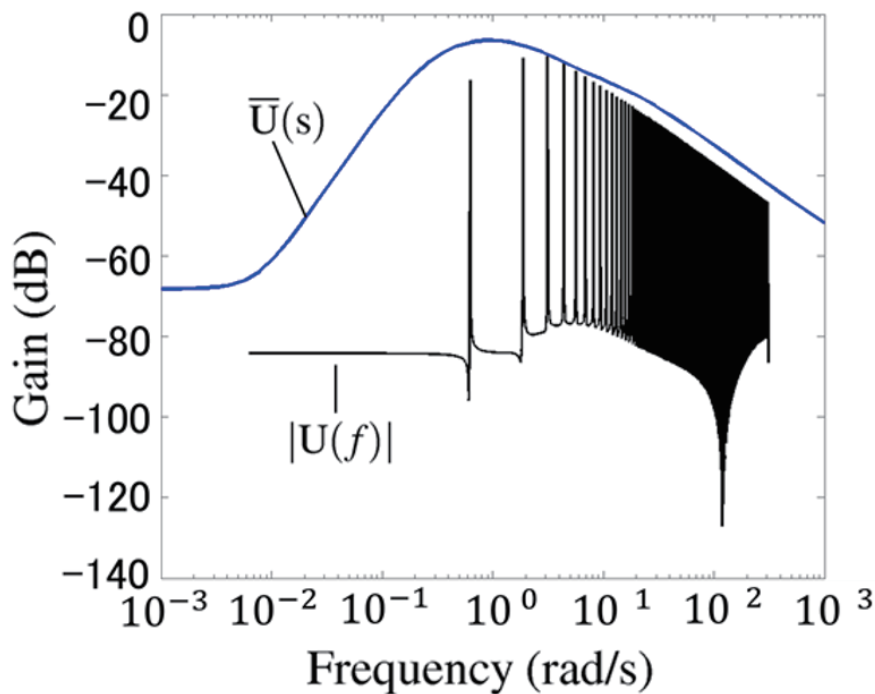
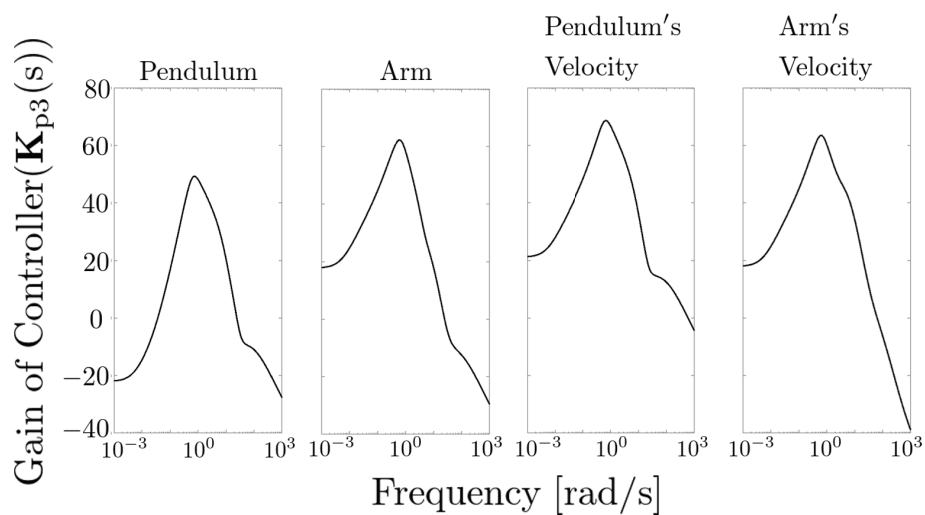
また, 本節で述べた提案制御器 2 の設計手法におけるその他のパラメータを以下に示す.

$$\mathbf{W}_s(s) = \frac{s + 10}{s + 0.5} \cdot \text{diag}\{30, 1.5, 1, 25\} \quad (4.21)$$

$$\mathbf{W}_u(s) = 1 \quad (4.22)$$

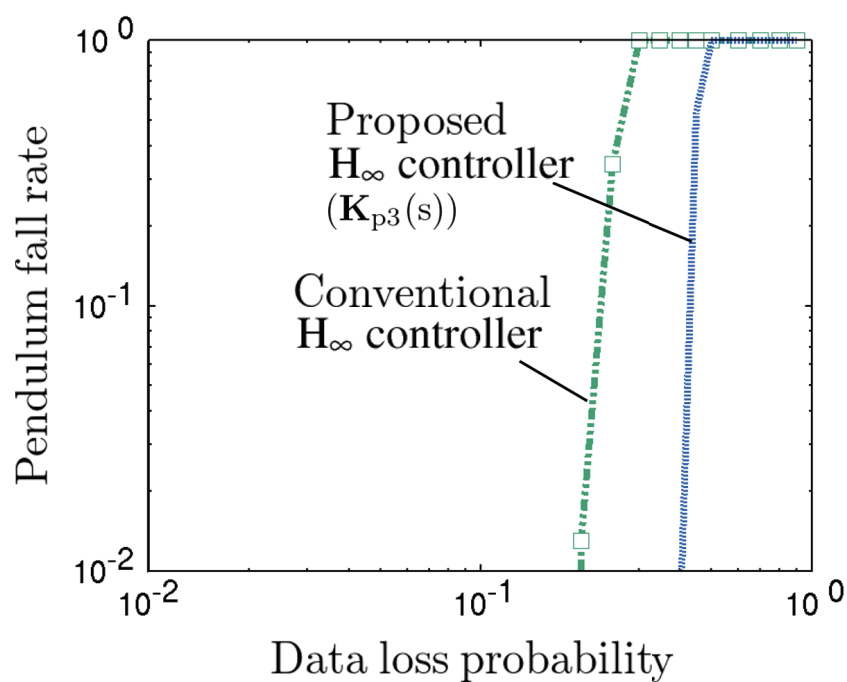
伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の設計パラメータは前章と同様である. この選定は, 比較する制御器間のアームのステップ応答を揃えるためであり, 揃えることで比較条件として用いる. 図 4.10 に, 提案制御器 2 の周波数特性 (ゲイン) を示す. 制御器の各入力 (各状態情報) に対する周波数応答を示している.

2.3.1 節で述べた伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器 (従来制御器) の比較を示す. 図 4.11(a) に安定性の比較, 図 4.11(b) に追従性の比較を示す. 両図における, 青の破線が提案制御器 2, 緑の破線が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の結果を示している. 図 4.11(a) の横軸は伝送誤り率であり, 右に行くほど伝送誤りの発生しやすい厳しい通信を想定した結果となっている. また, 縦軸は振子の転倒率であり, 上に行くほど振子の転倒が発生しやすく, 低い安定性を示す. 図 4.11(b) の横軸は, 図 4.11(a) の横軸と同様である. 図 4.11(b) の縦軸は, アームの角度の RMSE であり, 上に行くほど角度誤差が大きくなり, 低い追従性を示す. 図 4.11(a) において, 提案制御器 2 の転倒が発生し始める伝送誤り率が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器の転倒が発生し始める誤り率より大きいため, 安定性に関しては, 提案制御器 2 が優ることがわかる. また, 図 4.11(b) より, どの伝送誤り率

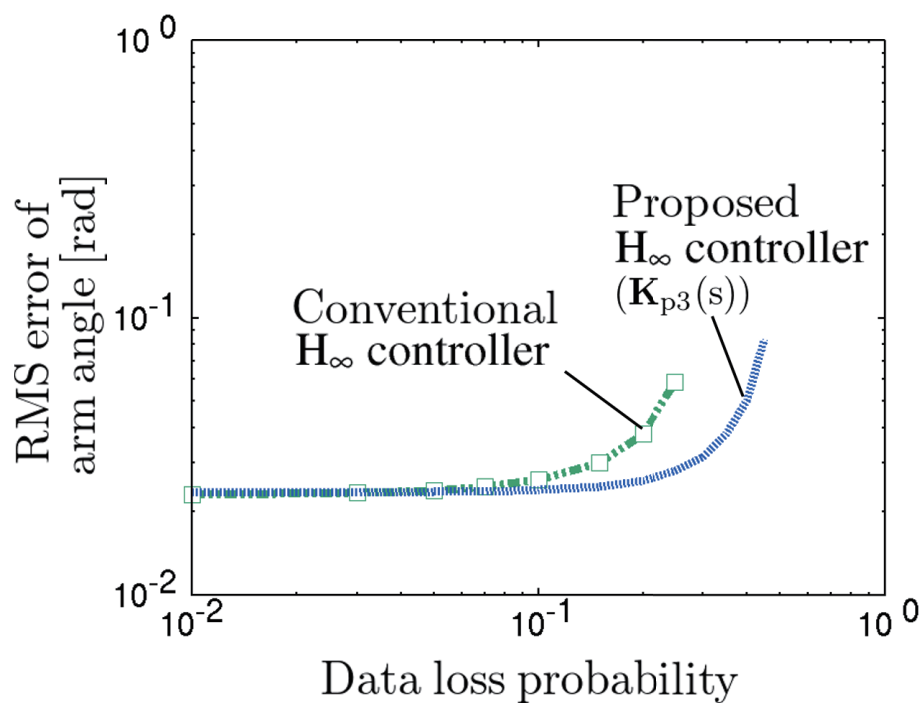
図 4.9: $|U(f)|$ と $\bar{U}(s)$ のゲイン図 4.10: 提案制御器 $2(K_{p3}(s))$ の周波数特性

においても伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器のアームの角度誤差が大

きく，追従性においても提案制御器2が優れることがわかる．これより，提案制御器2が伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器よりも伝送誤りによる制御品質の劣化をより低減できており，伝送誤りに対して堅牢な制御器であるといえる．



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 4.11: 伝送誤りの影響を白色外乱と捉えた H_∞ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較

伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器との比較

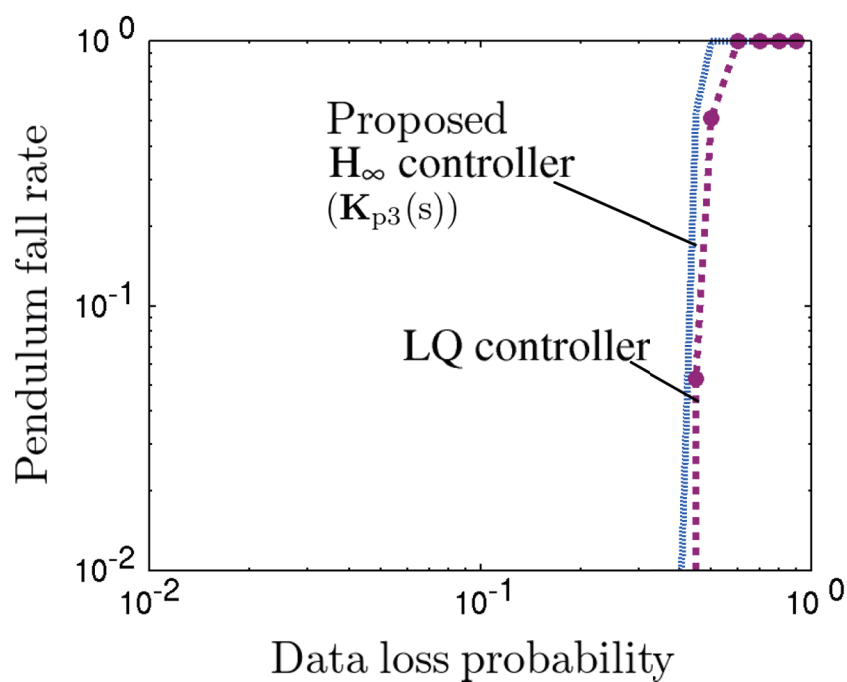
提案制御器 2 と伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器 [64] との比較を行なう．前節と同様に，アームのステップ応答を揃えた比較とするため， \mathbf{W}_Q , \mathbf{W}_R は以下のように選定した．

$$\mathbf{W}_Q = \text{diag}\{800, 2.5, 6, 0.6\} \quad (4.23)$$

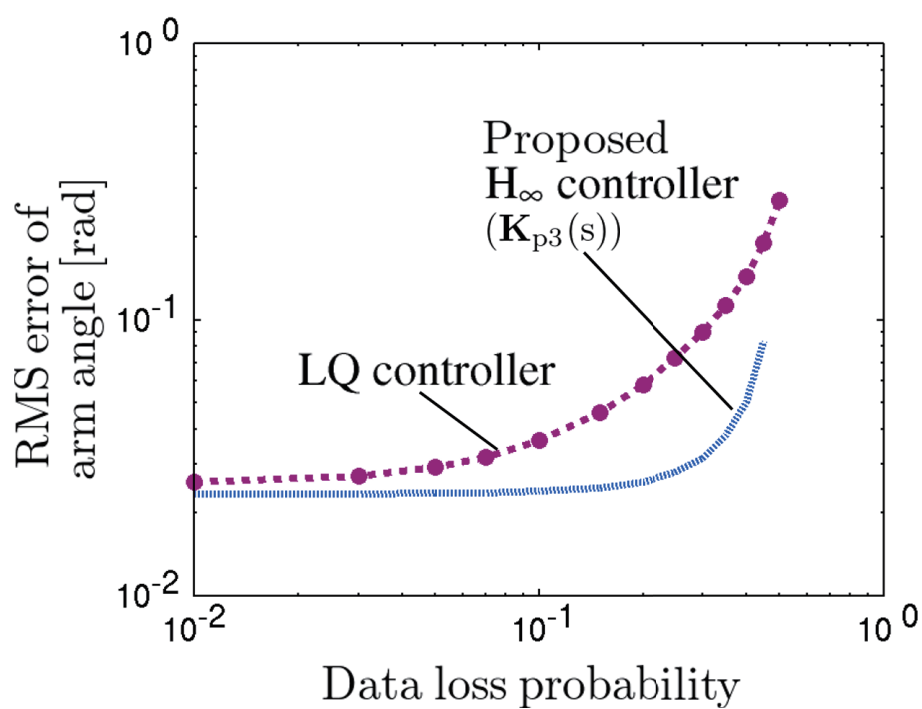
$$\mathbf{W}_R = 0.1 \quad (4.24)$$

提案制御器の設計パラメータは，先と同様である．これらのパラメータは， $p = 0$ の LQ 制御器と提案制御器のステップ応答を揃えるための選定である．

図 4.12(a), 図 4.12(b) に提案制御器 2 と 2.3.1 節で述べた伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器の伝送誤りに対する制御品質の比較を示す．青の破線が提案制御器 2，紫の破線が LQ 制御器の結果を示している．図 4.12(a) から，提案制御器 2 の安定性が LQ 制御器の安定性に劣ることがわかる．しかし，図 4.12(b) から追従性については，提案制御器 2 が優ることが分かる．追従性能が向上できており，本提案の目論見であった応答特性の向上が確認できる．安定性に関する議論は，後述する．



(a) 安定性比較



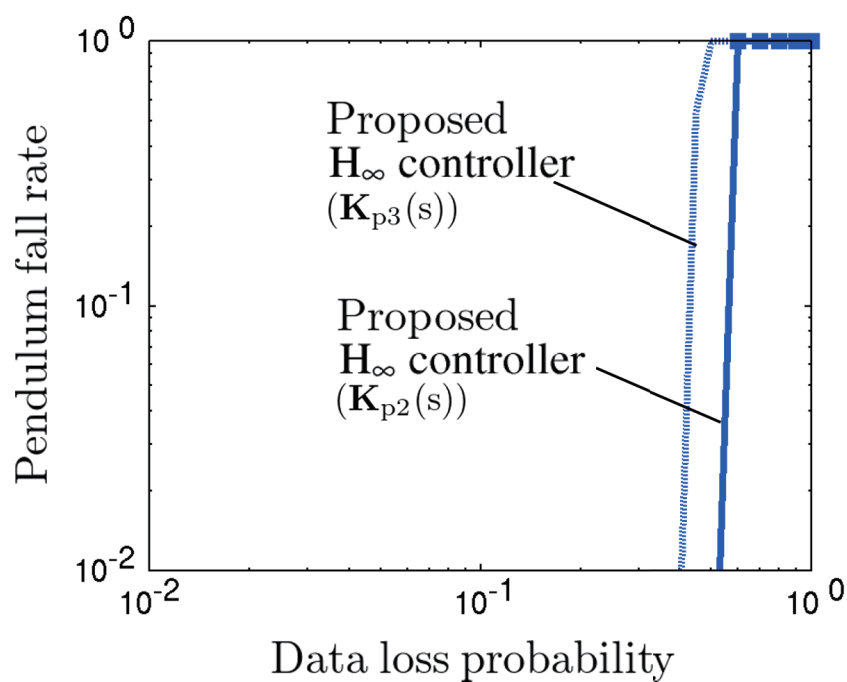
(b) 追従性比較

図 4.12: 伝送誤り率に対する伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器と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 H_∞ 制御器の制御性能比較

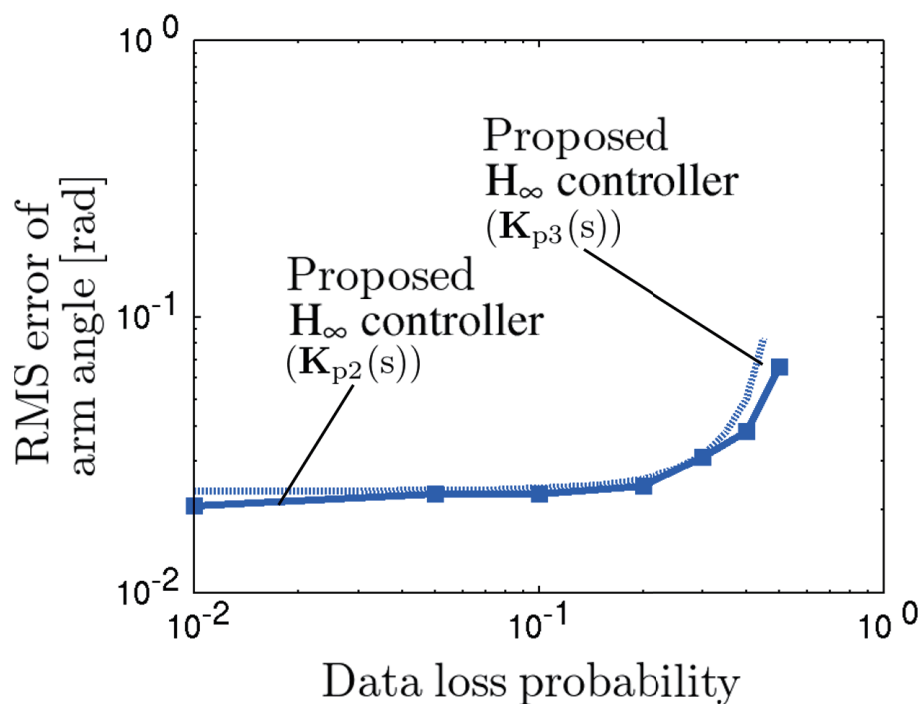
提案制御器 1 との比較

提案制御器 2 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$) と提案制御器 1 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) との比較を行なう．提案制御器 2 の設計パラメータは，先と同様であり，提案制御器 1 の設計パラメータは前節で用いたものと同様である．これらのパラメータは， $p = 0.01$ での提案制御器 1 とのステップ応答を揃えるための選定である．

また，図 4.13(a)，図 4.13(b) に本章で述べた提案制御器 2 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$) と提案制御器 1 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) の伝送誤りに対する制御品質の比較を示す．青の破線が提案制御器 2 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$)，青の実線が提案制御器 1 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) の結果を示している．図 4.13(a) から，提案制御器 2 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$) の安定性が提案制御器 1 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) の安定性に劣ることがわかる．しかし，図 4.13(b) から追従性については，提案制御器 2 ($\mathbf{K}_{p3}(s)$) が転倒が発生しない低い誤り率では，提案制御器 1 ($\mathbf{K}_{p2}(s)$) と同等であることがわかる．



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 4.13: 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 H_∞ 制御器 ($K_{p2}(s)$) と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 H_∞ 制御器 ($K_{p3}(s)$) と制御性能比較

4.4.3 安定性に関する考察

提案制御器 2 が，提案制御器 1 や伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器と比べて，安定性が劣る結果となった．安定性が劣った原因として，以下の 2 点について検討を行う．

1. 連続した伝送誤りがシステムに与える影響は， $|U(f)|$ とは異なる振幅密度スペクトルとなる点，
2. 提案制御器 1 や伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器のステップ応答が伝送誤り率により変化する点．

一点目については，提案制御器 2 では，以下の式に従い，伝送誤りがシステムに与える影響の推定を行っていた．

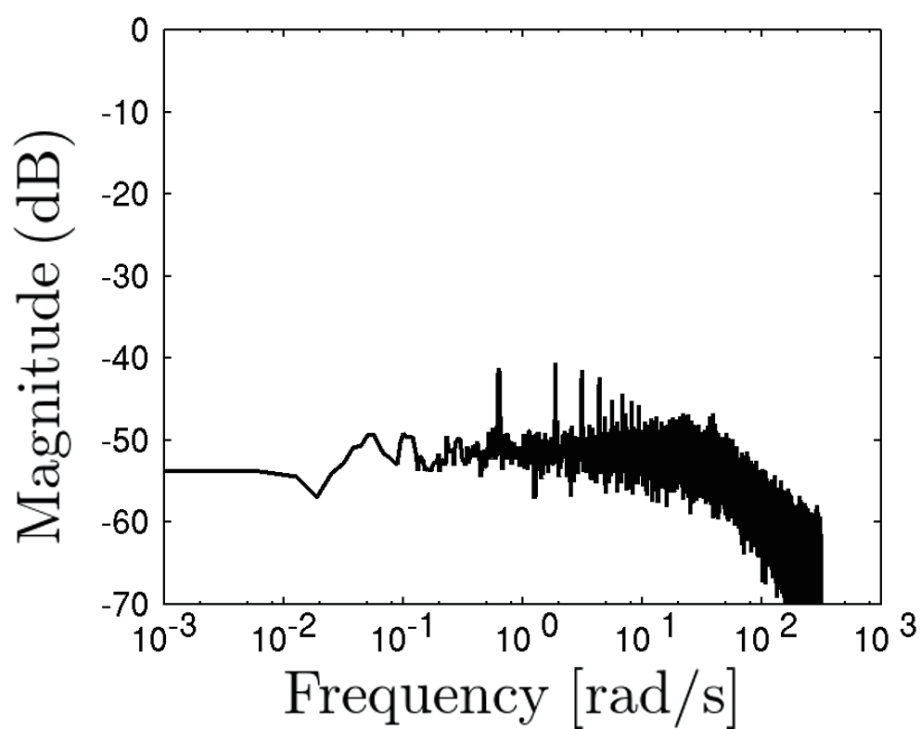
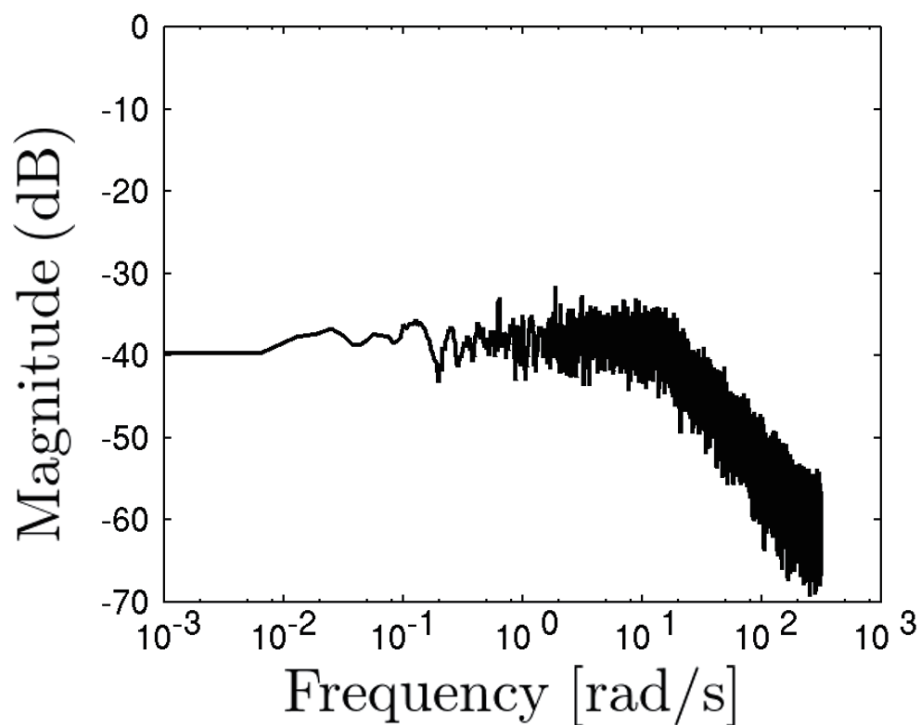
$$\mathbf{w}_u[k] = \mathbf{u}[k] - P_k \mathbf{u}[k] = (1 - P_k) \mathbf{u}[k] \quad (4.25)$$

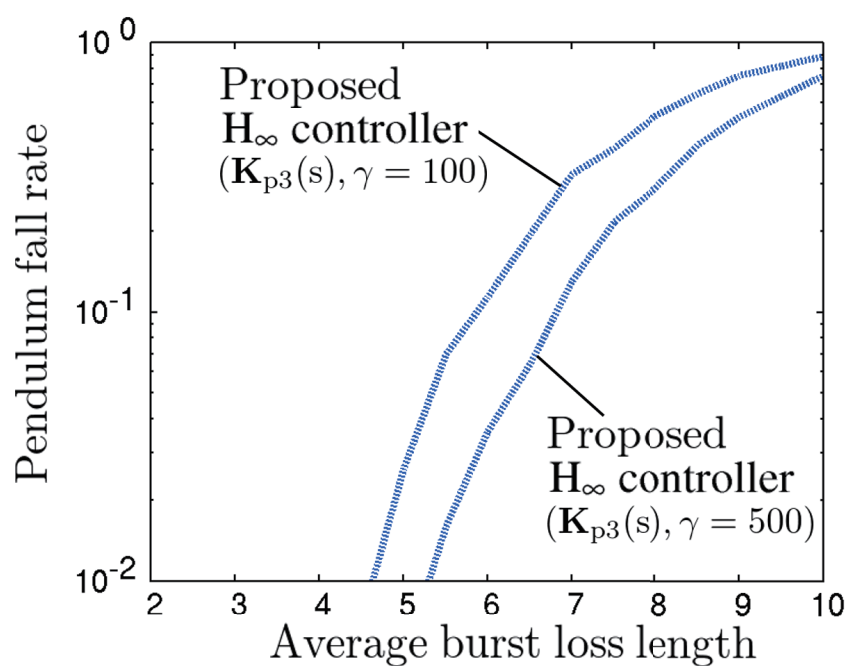
上式から，この推定では，ある時刻 k での伝送誤りのみの考慮となっていることがわかる．高い伝送誤り率では， $k-1$ 以前から連続的な伝送誤りに発生している可能性が高い．この $k-1$ 以前からの連続的な伝送誤りがシステムに与える影響の振幅密度スペクトルは，式 (3.24) の $|U(f)|$ とは異なる．この振幅密度スペクトルの変化と安定性の劣化の関係を検討する．

この連続した伝送誤りが発生するモデルとして，2.2.2 章で示したバーストに発生する伝送誤りモデルを用いたシステムについて検討を行う．図 4.14(a)，図 4.14(b) に計算機シミュレーションにより取得した，LQ 制御器を用いたシステムにおいて白色ガウス雑音外乱の分散値 $\sigma = 10^{-6}$ での平均バースト誤り長 \bar{l} が 2 と 5，平均伝送誤り率 $\bar{p} = 0.1$ での，操作情報の伝送誤りがシステムに与える影響の振幅密度スペクトルを示す．平均バースト誤り長が長くなる，つまり，連続した伝送誤りが発生しやすい状況になることで，振幅密度スペクトルの形状が， $10^{-3} \sim 10^1$ [rad/s] の周波数領域で大きくなっていることが確認でき，これより連続した伝送誤りがシステムに与える影響の振幅密度スペクトルが図 4.9 とは異なると推測できる．そこで，この連続した伝送誤りに対応するための設計パラメータとして導入した，式 (4.15) の γ を変化させたバーストな伝送誤りに対する制御品質の比較を評価する． γ を大きくす

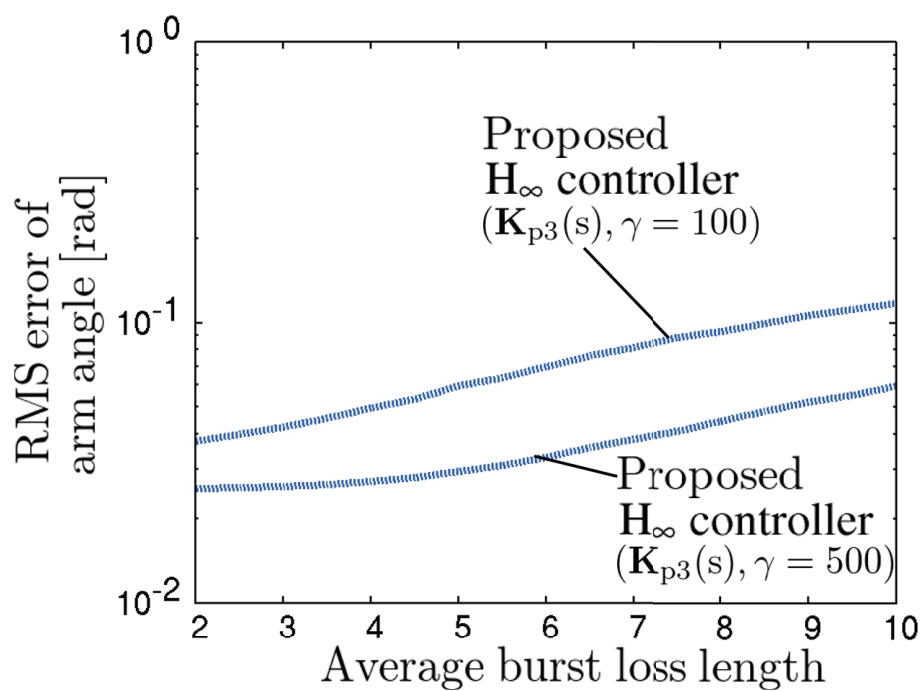
ることは、大きな影響の外乱を想定することにあたり、一般に外乱に対して保守的な制御器の設計を行っているといえる。安定性の評価を図 4.15(a)、追従性の評価を図 4.15(b) に示す。両図の横軸は、平均バースト誤り長 \bar{l} であり、右に行くほど連続した伝送誤りが発生しやすいネットワークを想定したシステムである。 γ を大きくすることでバーストな伝送誤りに対して堅牢性、特に安定性の向上することがわかる。

しかし、ランダムな誤りに対する γ の違いによる制御品質の比較を示した、図 4.16(a)、4.15(b) では、 γ を大きくしたことによる堅牢性の向上、特に安定性の向上がみられない。これより、連続した伝送誤りによる振幅密度スペクトルの変化が安定性の劣化の原因ではないといえる。

(a) 平均バースト誤り長 ($\bar{l} = 2$)(b) 平均バースト誤り長 ($\bar{l} = 5$)図 4.14: 操作情報のバーストな伝送誤りが与える影響の振幅密度スペクトル ($\bar{p} = 0.1$)

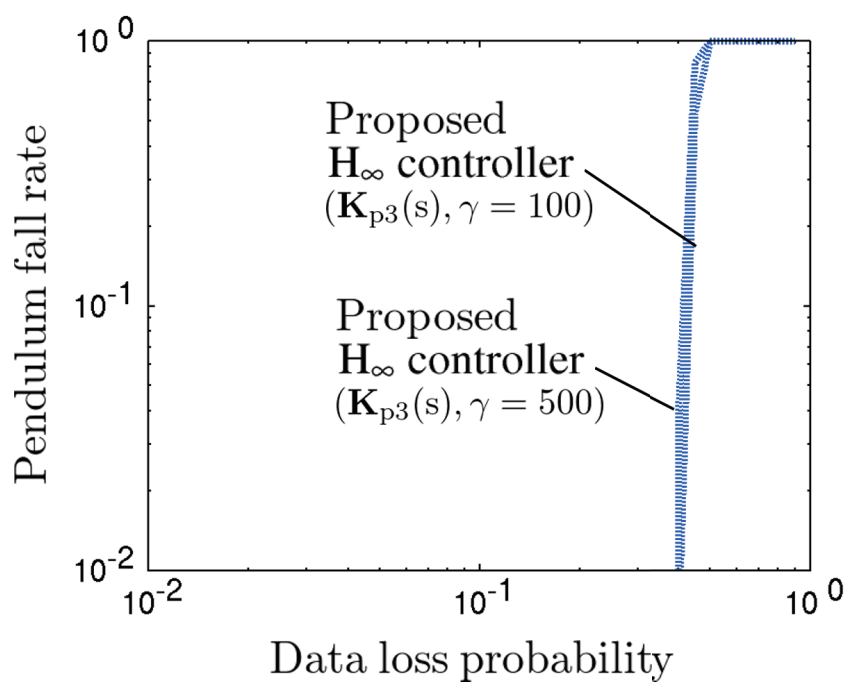


(a) 安定性比較

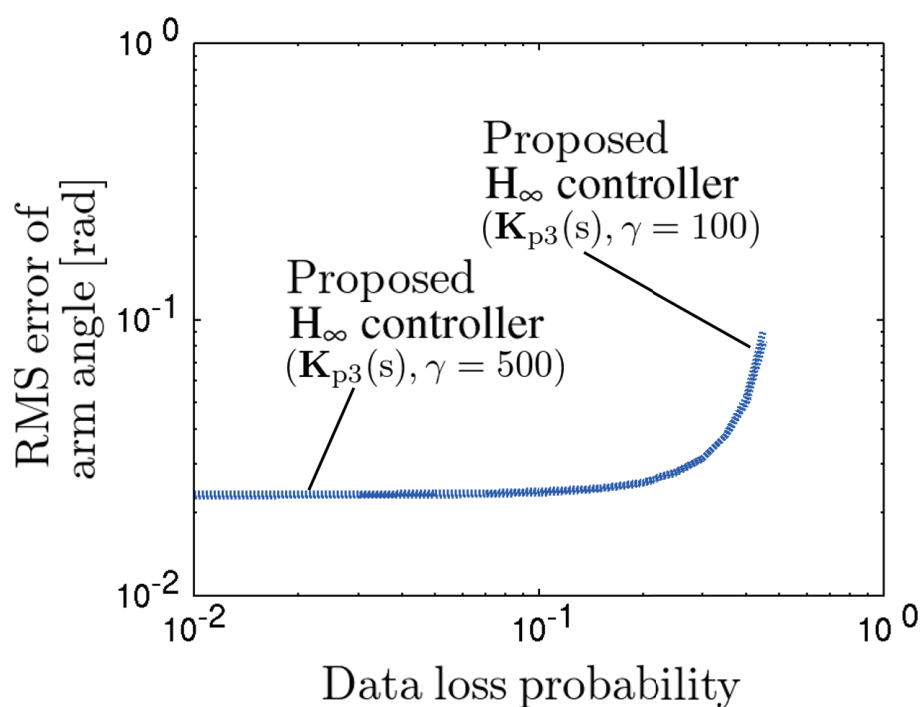


(b) 追従性比較

図 4.15: バーストな伝送誤りに対する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 H_∞ 制御器 ($K_{p3}(s), \gamma = 100, 500$) 制御性能比較 ($\bar{p} = 0.1$)



(a) 安定性比較



(b) 追従性比較

図 4.16: ランダムな伝送誤りに対する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 H_{∞} 制御器 $(K_{p3}(s), \gamma = 100, 500)$ 制御性能比較

二点目については，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 H_∞ 制御器より安定性が優れた2つの制御器(提案制御器1や伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器)が，設計に伝送誤り率を用いる点について検討を行う．

設計に伝送誤り率を用いる2つの制御器設計では，ステップ応答が伝送誤り率毎に異なる特徴を持つ．例として，伝送誤りを入力の ON/OFF と捉えた LQ 制御器のステップ応答の変化を図4.17に示す．各伝送誤り率毎の目標値信号とステップ応答のアーム角度についての差分を図4.18に示す．伝送誤り率が高くなっていくと，伝送誤り率を設計に用いる2つの制御器は目標値とステップ応答の差分が大きくなっていることがわかる，つまり，伝送誤り率を設計に用いる2つの制御器では，ステップ応答を犠牲にし，安定性の向上(担保)を図っていることがわかる．一方，伝送誤り率を用いない提案制御器2は，ステップ応答が伝送誤り率に対して不変であり，安定性が劣る結果となるといえる．これより，ステップ応答は安定性に対して，ある限界を与えているのではないかと考えられる．このステップ応答と安定性の限界については，議論・検討の余地を残すが，今後の展望とする．

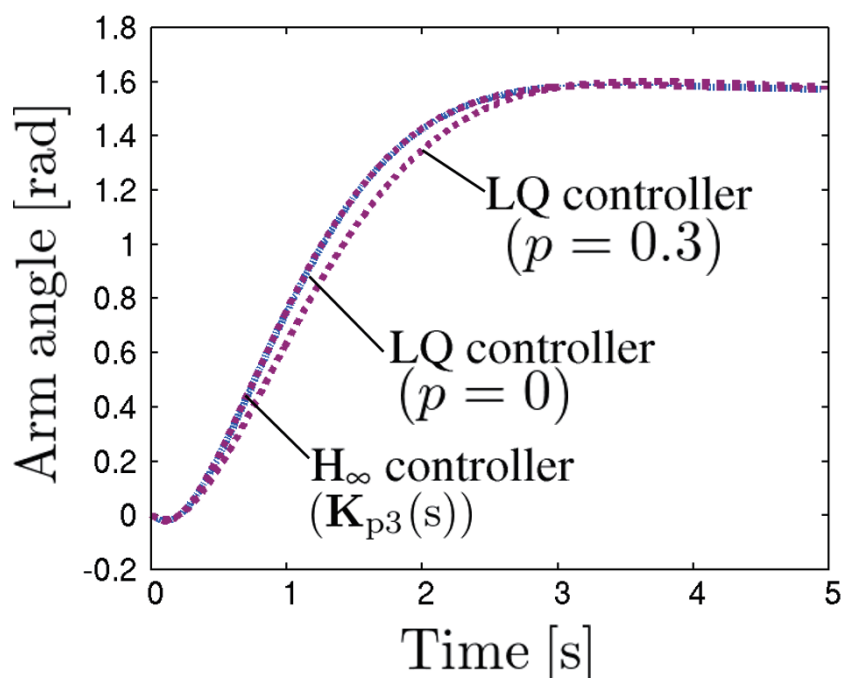


図 4.17: 伝送誤り率によるステップ応答の変化

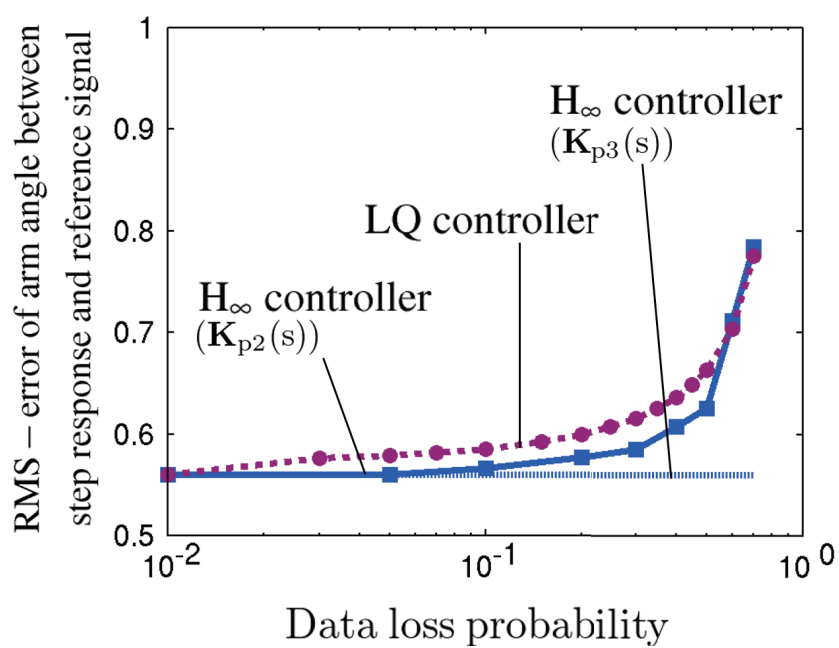


図 4.18: 伝送誤り率による目標値信号とステップ応答の差分

4.5 まとめ

本章では，伝送誤りの影響を外乱として捉えた設計手法を提案し，その有用性を明らかとした．まず，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設計手法を提案し，従来の伝送誤りを入力 of ON/OFF として捉えた LQ 制御器との比較により不安定化とともに応答特性の劣化の低減が行えることを明らかとした．上述の手法が，伝送誤り率毎にデータを取得・解析・設計を行なう必要がある点を問題視し，伝送誤り率を必要としない設計手法である，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設計手法を提案した．この制御器は，応答特性の劣化の低減は可能であったが，伝送誤りを入力 of ON/OFF として捉えた LQ 制御器や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 H_{∞} 制御器に比べ，安定性が劣る制御器であった．その原因が，「伝送誤り率を設計に用いる制御器 (伝送誤りを入力 of ON/OFF として捉えた LQ 制御器，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 H_{∞} 制御器) は，伝送誤り率が高くなる毎にステップ応答を緩やかにすることで安定性を担保している点」であると明らかにした．この安定性とステップ応答の関係については，議論・検討の余地を残すが，今後の展望とする．

第5章 総括

5.1 本論文のまとめ

本論文では，伝送誤りによる制御品質劣化を低減を不安定化に加え応答特性の劣化と捉え，この劣化を低減する伝送誤りに対して堅牢な制御器の設計手法を解明を目的とし，伝送誤りの影響を外部から制御システムに悪影響を及ぼす入力である外乱として捉える設計手法の提案を行った．本研究では 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と手法の有用性の明確化を行った．本論文の検討は，システムの安定化のみを要求とするシステムだけでなく，応答特性の要求も有するシステムへのネットワーク化制御システムの応用を可能とし，応用領域の拡大に貢献する．

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た．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と述べた．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・不足点を指摘した．その中で，制御面の制御器の設計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た．

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した．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た．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た．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 [64]、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した。

3章では、伝送誤りが制御システムに与える影響を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った。3.2節では伝送誤りが制御システムに与える影響を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りモデル化することの妥当性を検討した。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した。3.3節では、伝送誤りが制御システムに与える影響を一般の白色外乱によりモデル化することの妥当性を検討した。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した。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した。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した。

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、各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た。

5.2 今後の展望

本論文では、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、そのモデルの特徴を用いた制御器の設計手法の有効性について検討した。この検討により、システムの安定化のみを要求とするシステムだけでなく、応答特性の要求も有するシステムへのネットワーク化制御システムの応用を可能とし、応用領域の拡大に貢献するものが、以下の点を検討することでさらなる応用領域の拡大や応用領域の限界を明確化できると期待される。

本論文の今後の展望としては、まず、4.3節で述べた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。これにより、ネットワーク化制御システムの応用領域の限界を明確化できると期待する。

また、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、文献 [98,99] などで行われている。本論文を踏まえた統合的な最適化として、1章で紹介した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。これにより、さらにシステム全体でさらなる伝送誤りに対する堅牢性を向上することが期待され、応用領域の拡大に寄与できると考える。

最後に、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に関しては、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さらなる適用領域の拡大には必要不可欠であると考え。

付 録 A H_∞ 制御器の解法

本章では，標準 H_∞ 制御問題について述べ， H_∞ 制御器の解法のひとつであるリカッチ方程式に基づく解法である [100] について述べる．

標準 H_∞ 制御問題では，制御対象の伝達関数，入出力の周波数特性を整形する伝達関数を含めた一般化プラントと呼ばれる次式の入出力をもつ伝達関数 $\mathbf{G}'(s)$ を用いた図 A.1 のフィードバック制御システムについて考える．

$$\begin{bmatrix} z_g \\ y_g \end{bmatrix} = \mathbf{G}'(s) \begin{bmatrix} w_g \\ u_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}'_{11}(s) & \mathbf{G}'_{12}(s) \\ \mathbf{G}'_{21}(s) & \mathbf{G}'_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_g \\ u_g \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

ここで， $w_g \in R^{m_1}$ は評価入力端子であり，目標値信号や外乱など制御システムに外部から加えられる入力を表し， $z_g \in R^{p_1}$ は評価出力端子であり，目標値との制御対象の状態の差分や制御器の出力など制御したい出力を表す．また， $u_g \in R^{m_2}$ は制御器の出力， $y_g \in R^{p_2}$ は制御器への入力である． $\mathbf{K}'(s)$ が設計する制御器であり， $u_g = \mathbf{K}'(s)y_g$ であるため， w_g から z_g までの伝達関数は，

$$\mathbf{G}'_{z_g w_g}(s) = \mathbf{G}'_{11}(s) + \mathbf{G}'_{12}(s)\mathbf{K}'(s)(\mathbf{I} - \mathbf{G}'_{22}(s)\mathbf{K}'(s))^{-1}\mathbf{G}'_{21}(s) \quad (\text{A.2})$$

となる．標準 H_∞ 制御問題とは，一般化プラント $\mathbf{G}'(s)$ に対して， $u_g = \mathbf{K}'(s)y_g$ によりシステムを内部安定化し，かつ，ある正数 ξ に対して，

$$\left\| \mathbf{G}'_{z_g w_g}(s) \right\|_\infty < \xi \quad (\text{A.3})$$

を満たす制御器 $\mathbf{K}'(s)$ を求める問題である．ただし，一般化プラント $\mathbf{G}'(s)$ を

$$\mathbf{G}'(s) \Rightarrow \left[\begin{array}{c|cc} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 & \mathbf{B}_2 \\ \hline \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_{11} & \mathbf{D}_{12} \\ \hline \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_{21} & \mathbf{O} \end{array} \right] \quad (\text{A.4})$$

状態空間表現により定義した際に，以下の4つの仮定が成立するものとする．

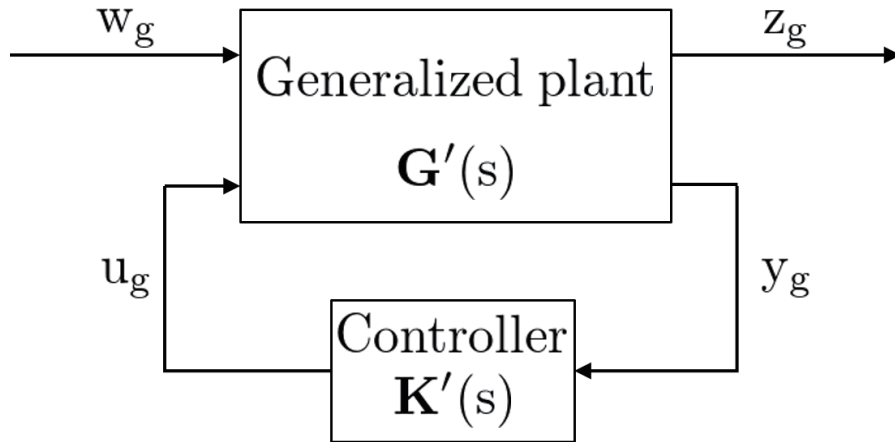


図 A.1: 一般化プラントを持つフィードバック制御システム

1. $(\mathbf{A}_1, \mathbf{B}_2)$ は可安定, かつ, $(\mathbf{C}_2, \mathbf{A}_1)$ は可検出.
2. \mathbf{D}_{12} は列フルランク, かつ, \mathbf{D}_{21} は行フルランク.
3. すべての ω に対して, $\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 - j\omega\mathbf{I} & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{C}_1 & \mathbf{D}_{12} \end{bmatrix}$ が列フルランク.
4. すべての ω に対して, $\begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 - j\omega\mathbf{I} & \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{C}_2 & \mathbf{D}_{21} \end{bmatrix}$ が行フルランク.

次に, H_∞ 制御器の解法のひとつであるリカッチ方程式に基づく解法について説明する. 仮定 1~4 のもとで, $\|\mathbf{G}'_{z_g w_g}(s)\|_\infty < \xi$ を満たす制御器 $\mathbf{K}'(s)$ が存在するための必要十分条件は,

- 式 (A.5) を満たす, $\mathbf{X}_g \geq 0, \mathbf{Y}_g \geq 0$ が存在し, $\lambda_{\max}(\mathbf{X}_g \mathbf{Y}_g) < \xi^2$ を満たす,

である. ここで, $\lambda_{\max}(\cdot)$ は行列の最大固有値を表し,

$$\mathbf{X}_g = \text{Ric}(\mathbf{H}_X), \mathbf{Y}_g = \text{Ric}(\mathbf{H}_Y) \quad (\text{A.5})$$

$\text{Ric}(\cdot)$ は, 代数型リカッチ方程式の解である. また,

$$\mathbf{H}_X = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_2 \mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1 & \mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T / \xi^2 - \mathbf{B}_2 \mathbf{B}_2^T \\ -\mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_1^T \mathbf{D}_{12} \mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1 & -(\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_2 \mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1)^T \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{H}_Y = \begin{bmatrix} (\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{21}^T \mathbf{C}_2)^T & \mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 / \xi^2 - \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2 \\ -\mathbf{B}_1 \mathbf{B}_1^T + \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{21}^T \mathbf{D}_{21} \mathbf{B}_1^T & -(\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{21}^T \mathbf{C}_2) \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

である。この時、制御器 $\mathbf{K}'(s)$ は、

$$\left[\begin{array}{c|cc} \hat{\mathbf{A}}_1 & \hat{\mathbf{B}}_1 & \hat{\mathbf{B}}_2 \\ \hline \hat{\mathbf{C}}_1 & \mathbf{O} & \mathbf{I} \\ \hat{\mathbf{C}}_2 & \mathbf{I} & \mathbf{O} \end{array} \right] \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{B}}_1 &= \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{21}^T + \mathbf{Y}_g \mathbf{C}_2^T \\ \hat{\mathbf{B}}_2 &= \mathbf{B}_2 + \mathbf{Y}_g \mathbf{C}_1^T \mathbf{D}_{12} / \xi^2 \\ \hat{\mathbf{C}}_1 &= -(\mathbf{D}_{12}^T \mathbf{C}_1 + \mathbf{B}_2^T \mathbf{X}_g)(\mathbf{I} - \mathbf{Y}_g \mathbf{X}_g / \xi^2)^{-1} \\ \hat{\mathbf{C}}_2 &= -(\mathbf{C}_2 + \mathbf{D}_{21} \mathbf{B}_1^T \mathbf{X}_g / \xi^2)(\mathbf{I} - \mathbf{Y}_g \mathbf{X}_g / \xi^2)^{-1} \\ \hat{\mathbf{A}}_1 &= (\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{D}_{21}^T \mathbf{C}_2) + \mathbf{Y}_g (\mathbf{C}_1^T \mathbf{C}_1 / \xi^2 - \mathbf{C}_2^T \mathbf{C}_2) + \hat{\mathbf{B}}_2 \hat{\mathbf{C}}_1 \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

で表される状態空間表現を伝達関数に変形することで得られる。 H_∞ 制御では、 $\|\mathbf{G}'_{z_g w_g}(s)\|_\infty < \xi$ を最小とする制御器を設計する。つまり、上述の必要十分条件を満たす、 ξ の最小値を見つける必要がある。この最小値は、一般に解析的に求めることができない。そのため、最小値の発見には二分探索法が用いられる。

付 録 B 回転型倒立振子の状態空間表現

本章では，制御対象として用いた回転型倒立振子の状態空間表現を導出する．

連続時間における振り子の角度，角速度，角加速度をそれぞれ $\phi(t)$, $\dot{\phi}(t)$, $\ddot{\phi}(t)$ ，アームの角度，角速度，角加速度を $\theta(t)$, $\dot{\theta}(t)$, $\ddot{\theta}(t)$ ，アームの DC モータへの入力電圧を $v_{in}(t)$ とする．振り子の棒の質量と長さを $m_p[\text{kg}]$, $2l_p[\text{m}]$ ，アームの長さを $r_a[\text{m}]$ ，アームの慣性モーメントを $J_a[\text{kgm}^2]$ ，重力加速度を $g[\text{m/s}^2]$ ，DC モータの電機子抵抗と $R_m[\omega]$ ，トルク定数を $K_m[\text{Nm/A, Vs/rad}]$ ，アームとモータのギア比を K_g とする．

本論文における回転型倒立振子の制御目的は，アームを回転させる DC モータへの入力電圧を与えることで，振り子の倒立を保ちつつ，アームを指定した角度 (目標値) に一致させることである．そのため，振り子が倒立した $\theta(t) = 0$ 近傍では， $\sin \theta = 0, \cos \theta = 1$ と線形近似できるため，線形近似された回転型倒立振子の運動方程式は次式で表される [97]．

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \\ \ddot{\phi}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_c \begin{bmatrix} \phi(t) \\ \theta(t) \\ \dot{\phi}(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} + \mathbf{B}_c \begin{bmatrix} v_{in}(t) \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$$\mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ g \frac{J_a + m_p r_a^2}{l_p J_a} & 0 & 0 & \frac{r_a K_g^2 K_m^2}{R_m l_p J_a} \\ -\frac{m_p r_a g}{J_a} & 0 & 0 & -\frac{K_g^2 K_m^2}{R_m J_a} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{r_a K_g K_m}{R_m l_p J_a} \\ \frac{K_g K_m}{R_a J_a} \end{bmatrix} \quad (\text{B.2})$$

これより，離散時間の状態空間モデルは，サンプリング周期を $T_s[\text{s}]$, $\phi[k] = \phi(kT_s)$, $\dot{\phi}[k] = \dot{\phi}(kT_s)$, $\theta[k] = \theta(kT_s)$, $\dot{\theta}[k] = \dot{\theta}(kT_s)$, $v_{in}[k] = v_{in}(kT_s)$, とすると，以下の通り

である [101].

$$\begin{bmatrix} \phi[k+1] \\ \theta[k+1] \\ \dot{\phi}[k+1] \\ \dot{\theta}[k+1] \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \phi[k] \\ \theta[k] \\ \dot{\phi}[k] \\ \dot{\theta}[k] \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} v_{\text{in}}[k] \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

$$\mathbf{A} = e^{\mathbf{A}_c T_s}, \quad \mathbf{B} = \int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}_c \tau} \mathbf{B}_c \, d\tau \quad (\text{B.4})$$

ここで，指数行列関数 $e^{\mathbf{A}_c T_s}$ は，以下のように定義される．

$$e^{\mathbf{A}_c T_s} = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\mathbf{A}_c^i T_s^i}{i!} \quad (\text{B.5})$$

参考文献

- [1] L. Zhang, H. Gao, and O. Kaynak, “Network-induced constraints in networked control systems—a survey,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.9, no.1, pp.403–416, Feb. 2013.
- [2] X.-M. Zhang, Q.-L. Han, and X. Yu, “Survey on recent advances in networked control systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.12, no.5, pp.1740–1752, Dec. 2016.
- [3] Y. Ke-You and X. Li-Hua, “Survey of recent progress in networked control systems,” *Acta Automatica Sinica*, vol.39, no.2, pp.101–117, Feb. 2013.
- [4] J. Baillieul and P.J. Antsaklis, “Control and communication challenges in networked real-time systems,” *Proc. of the IEEE*, vol.95, no.1, pp.9–28, Jan. 2007.
- [5] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi and X. Yonggang, “A survey of recent results in networked control systems,” *Proc. of the IEEE*, vol.95, no.1, pp.138–162, Jan. 2007.
- [6] D. Zhang, P. Shi, Q.-G. Wang, and L. Yu, “Analysis and synthesis of networked control systems: a survey of recent advances and challenges,” *ISA transactions*, vol.66, pp.376–392, Jan. 2017.
- [7] C. Carrizo, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “Predictive control for performance improvement of a feedback control system using cyclostationary channels,” *IEICE Trans. Fund.*, vol.vol.E98-A, no.4, pp.1000–1005, 2015.

- [8] S. Zampieri, “Trends in networked control systems,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol.41, no.2, pp.2886–2894, July 2008.
- [9] F.-Y. Wang, D. Liu, S.X. Yang, and L. Li, “Guest editorial: Networking, sensing, and control for networked control systems: Architectures, algorithms, and applications,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., C*, vol.37, no.2, pp.157–159, Aug. 2007.
- [10] L. Zhang, H. Gao, F. Lewis, and O. Kaynak, “Guest editorial advances in theories and industrial applications of networked control systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.9, no.1, pp.303–305, Feb. 2013.
- [11] K.-D. Kim and P.R. Kumar, “Cyber–physical systems: A perspective at the centennial,” *Proc. of the IEEE*, vol.100, no.13, pp.1287–1308, May 2012.
- [12] “Verification project of wireless communication technologies to accelerate factory iot,” <https://www.nict.go.jp/press/2017/01/17-1.html>.
- [13] P. Park, S.C. Ergen, C. Fischione, C. Lu, and K.H. Johansson, “Wireless network design for control systems: A survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.20, no.2, pp.978–1013, Dec. 2017.
- [14] N. Xia, H. Chen, and C. Yang, “Radio resource management in machine-to-machine communications—a survey,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol.20, no.1, pp.791–828, Firstquarter 2018.
- [15] A. Willig, K. Matheus, and A. Wolisz, “Wireless technology in industrial networks,” *Proc. of the IEEE*, vol.93, no.6, pp.1130–1151, June 2005.
- [16] M.S. Mahmoud and M.M. Hamdan, “Fundamental issues in networked control systems,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol.5, no.5, pp.902–922, Sept. 2018.
- [17] R.A. Gupta and M.-Y. Chow, “Networked control system: Overview and research trends,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.57, no.7, pp.2527–2535, July 2010.

- [18] Y.-Q. Xia, Y.-L. Gao, L.-P. Yan, and M.-Y. Fu, “Recent progress in networked control systems-a survey,” *International Journal of Automation and Computing*, vol.12, no.4, pp.343–367, Aug. 2015.
- [19] L.G. Bushnell, “Networks and control,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol.21, no.1, pp.22–23, 2001.
- [20] K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “Maximum likelihood receiver using state observer for wireless feedback control systems,” *IEICE Trans. Fund.* (Japanese Edition), vol.J96-A, no.11, pp.745–755, Nov. 2013.
- [21] K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “A cross-layer optimized receiver design for wireless feedback control systems,” *IEEE Trans. Commun.*, vol.66, no.1, pp.320–329, Sept. 2018.
- [22] H. Li and J. B. Song and Q. Zeng, “Adaptive modulation in networked control systems with application in smart grids,” *IEEE Commun. Lett.*, vol.17, no.7, pp.1305–1308, July 2013.
- [23] S. Hattori, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “ON-OFF error control coding scheme for minimizing tracking error in wireless feedback control systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.11, no.6, pp.1411–1421, Dec. 2015.
- [24] Y. Miwa, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “Adaptive channel coding scheme based on selection of control information for wireless feedback control,” *IEICE Trans. Fund.* (Japanese Edition), vol.J100-A, no.7, pp.259–267, July 2017.
- [25] T. Futatsugi, C. Sugimoto, and R. Kohno, “A study on HARQ error-controlling scheme for the wireless control of medical equipment,” *Proc. 2012 6th Int. Symp. Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*, pp.1–4, March 2012.

- [26] Y. Zhao, G. Liu, and D. Rees, "Packet-based deadband control for internet-based networked control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.18, no.5, pp.1057–1067, Sept. 2010.
- [27] C. Peng, Q. Han, and D. Yue, "To transmit or not to transmit: A discrete event-triggered communication scheme for networked Takagi-Sugeno Fuzzy systems," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol.21, no.1, pp.164–170, Feb. 2013.
- [28] M. Nagahara, D.E. Quevedo, and J. Ostergaard, "Sparse packetized predictive control for networked control over erasure channels," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.59, no.7, pp.1899–1905, July 2014.
- [29] S. Tatikonda and S. Mitter, "Control over noisy channels," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.49, no.7, pp.1196–1201, July 2004.
- [30] M. Trivellato and N. Benvenuto, "State control in networked control systems under packet drops and limited transmission bandwidth," *IEEE Trans. Commun.*, vol.58, no.2, pp.611–622, Feb. 2010.
- [31] U. Premaratne, S.K. Halgamuge, and I.M.Y. Mareels, "Event triggered adaptive differential modulation: A new method for traffic reduction in networked control systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.58, no.7, pp.1696–1706, July 2013.
- [32] U. Premaratne, S.K. Halgamuge, and I.M.Y. Mareels, "Traffic reduction in packet switched networked control systems using deadband error modulation," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.62, no.8, pp.4038–4043, Aug. 2017.
- [33] K. Gatsis, A. Ribeiro, and G.J. Pappas, "Optimal power management in wireless control systems," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.59, no.6, pp.1495–1510, June 2014.
- [34] M. Nourian, A.S. Leong, and S. Dey, "Optimal energy allocation for Kalman filtering over packet dropping links with imperfect acknowledgments and energy har-

- vesting constraints,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.59, no.8, pp.2128–2147, Aug. 2014.
- [35] Y. Sadi and S.C. Ergen, “Optimal power control, rate adaptation, and scheduling for uwb-based intravehicular wireless sensor networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.62, no.1, pp.219–234, Jan. 2013.
- [36] K. Gatsis, A. Ribeiro, and G.J. Pappas, “Optimal power management in wireless control systems,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.59, no.6, pp.1495–1510, June 2014.
- [37] M. Fujiwara and S. Hara, “A modest CSMA for control over wireless,” *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Communication Systems (ICCS)*, pp.373–377, Nov. 2012.
- [38] H. Ye, G.C. Walsh, and L.G. Bushnell, “Real-time mixed-traffic wireless networks,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.48, no.5, pp.883–890, Oct. 2001.
- [39] M. Tabbara and D. Nesic, “Input-output stability of networked control systems with stochastic protocols and channels,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.53, no.5, pp.1160–1175, June 2008.
- [40] B. Tavassoli, P. Jabejdar-Maralani, and N. Rezaee, “Tuning of control systems over CSMA networks,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.56, no.4, pp.1282–1291, April 2009.
- [41] S.X. Ding, P. Zhang, S. Yin, and E.L. Ding, “An integrated design framework of fault-tolerant wireless networked control systems for industrial automatic control applications,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.9, no.1, pp.462–471, Feb. 2013.
- [42] L. Orihuela, F. Gomez-Estern, and F.R. Rubio, “Scheduled communication in sensor networks,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.22, no.2, pp.801–808, March 2014.

- [43] Y. Wang, S.X. Ding, D. Xu, and B. Shen, “An H_∞ fault estimation scheme of wireless networked control systems for industrial real-time applications,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.22, no.6, pp.2073–2086, Nov. 2014.
- [44] J. Araujo, J. M. Mazo, A. Anta, P. Tabuada, and K.H. Johansson, “System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.10, no.1, pp.175–184, Feb. 2014.
- [45] Y. Uematsu, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “A study on multiple access schemes for wireless control over the IEEE 802.15.4 beacon-enabled mode,” *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp.1–6, March 2017.
- [46] K. Park, J. Kim, H. Lim, and Y. Eun, “Robust path diversity for network quality of service in cyber-physical systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.10, no.4, pp.2204–2215, Nov. 2014.
- [47] R. Uchida, H. Okada, T. Yamazato, and M. Katayama, “Spatial diversity scheme with multiple-transmit/receive antennas and relay terminals for reliable wireless control,” *IEICE Trans. Commun. (Japanese Edition)*, vol.vol.J91-B, no.5, pp.585–594, May 2008.
- [48] T. Kondo, K. Kobayashi, and M. Katayama, “A wireless control system with mutual use of control signals for cooperative machines,” *IEICE Trans. Fund.*, vol.E95-A, no.4, pp.697–705, April 2012.
- [49] A. Tanaka, K. Kobayashi, H. Okada, and M. Katayama, “A study on the reduction of synchronization error using a relay of predictive control information in wireless control of multiple plants,” *Proc. IEEE/SICE Int. Symp. System Integration (SII)*, pp.150–154, Nov. 2013.
- [50] J. -te. Yu and L. -C. Fu, “An optimal compensation framework for linear quadratic Gaussian control over lossy networks,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.60, no.10, pp.2692–2697, Oct. 2015.

- [51] O.C. Imera, S. Yuksel, and T.Basar, “Optimal control of LTI systems over unreliable communication links,” *Automatica*, vol.42, no.9, pp.1429–1439, Sept. 2006.
- [52] B. Sinopoli, L. Schenato, M. Franceschetti, K. Poolla, and S. Sastry, “Optimal linear LQG control over lossy networks without packet acknowledgment,” *Asian Journal of Control*, vol.10, no.1, pp.3–13, Jan. 2008.
- [53] E. Garone, B. Sinopoli, A. Goldsmith, and A. Casavola, “LQG control for mimo systems over multiple erasure channels with perfect acknowledgment,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.57, no.2, pp.450–456, Sept. 2012.
- [54] Q. L. Han, Y. Liu, and F. Yang, “Optimal Communication Network-Based H_∞ Quantized Control with Packet Dropouts for a Class of Discrete-Time Neural Networks with Distributed Time Delay,” *IEEE Trans. Neural Netw., Learn. Syst.*, vol.27, no.2, pp.426–434, Feb. 2016.
- [55] A. Mazumdar, S. Krishnaswamy, and S. Majhi, “ H_∞ -optimal control over erasure channel,” *IFAC-PapersOnLine*, vol.50, no.1, pp.349–354, July 2017.
- [56] Z. Tang, J. H. Park, and T. H. Lee, “Dynamic output-feedback-based H_∞ design for networked control systems with multipath packet dropouts,” *Applied Mathematics and Computation*, vol.275, pp.121–133, Feb. 2016.
- [57] F. Yang, Z. Wang, D. W. C. Ho, and M. Gani, “Robust H_∞ control with missing measurements and time delays,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.52, no.9, pp.1666–1672, Sept. 2007.
- [58] F. Yang and Q.L. Han, “ H_∞ control for networked systems with multiple packet dropouts,” *Information Sciences*, vol.252, pp.106–117, Dec. 2013.
- [59] W. W. Che, J. L. Wang, and G. H. Yang, “ H_∞ Control for Networked Control Systems with Limited Communication,” *European Journal of Control*, vol.18, no.2, pp.103–118, March 2012.

- [60] H. Dong, Z. Wang, F. Yang, D. W. C. Ho, and H. Gao, "Robust H_∞ fuzzy output-feedback control with multiple probabilistic delays and multiple missing measurements," *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol.18, no.4, pp.712–725, Aug. 2010.
- [61] Z. Wang, B. Shen, H. Shu, and G. Wei, "Quantized H_∞ Control for Nonlinear Stochastic Time-Delay Systems With Missing Measurements," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.57, no.6, pp.1431–1444, June 2012.
- [62] S. Wen, Z. Zeng, T. Huang, and G. Bao, "Observer-based H_∞ control of a class of mixed delay systems with random data losses and stochastic nonlinearities," *ISA Transactions*, vol.52, no.2, pp.207–214, March 2013.
- [63] Z. Wang, F. Yang, D. W. C. Ho, and X. Liu, "Robust H_∞ control for networked systems with random packet losses," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B, Cybern.*, vol.37, no.4, pp.916–924, Aug. 2007.
- [64] L. Schenato, B. Sinopoli, M. Franceschetti, K. Poolla, and S.S. Sastry, "Foundations of control and estimation over lossy networks," *Proc. of the IEEE*, vol.95, no.1, pp.163–187, Jan. 2007.
- [65] N. Elia and J.N. Eisenbeis, "Limitations of linear control over packet drop networks," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.56, no.4, pp.826–841, April 2011.
- [66] D. Wu, J. Wu, and S. Chen, "Robust control for discrete-time networked control systems," *Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2010 8th World Congress on, pp.3532–3537, July 2010.
- [67] C. Tan, L. Li, and H. Zhang, "Stabilization of networked control systems with both network-induced delay and packet dropout," *Automatica*, vol.59, pp.194–199, Sept. 2015.
- [68] C. Tan and H. Zhang, "Necessary and sufficient stabilizing conditions for networked control systems with simultaneous transmission delay and packet dropout," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.62, no.8, pp.4011–4016, Aug. 2017.

- [69] X. Liang, J. Xu, and H. Zhang, "Optimal control and stabilization for networked control systems with packet dropout and input delay," *IEEE Trans. Circuits Syst. II Exp. Briefs*, vol.64, no.9, pp.1087–1091, Sept. 2017.
- [70] J. Wang and H. Yang, " H_∞ control of a class of networked control systems with time delay and packet dropout," *Applied Mathematics and Computation*, vol.217, no.18, pp.7469–7477, May 2011.
- [71] J. Bai, R. Lu, H. Su, and A. Xue, "Modeling and H_∞ control of wireless networked control system with both delay and packet loss," *Journal of the Franklin Institute*, vol.352, no.10, pp.3915–3928, June 2015.
- [72] S. Jiang and H. Fang, " H_∞ static output feedback control for nonlinear networked control systems with time delays and packet dropouts," *ISA Transactions*, vol.52, no.2, pp.215–222, March 2013.
- [73] D. Wang, J. Wang, and W. Wang, " H_∞ controller design of networked control systems with Markov packet dropouts," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., Syst.*, vol.43, no.3, pp.689–697, May 2013.
- [74] T. Liu, H. Zhang, Q. Chen, and H. Yn, " H_∞ control for networked control systems with limited information," *Journal of the Franklin Institute*, vol.349, no.5, pp.1915–1929, June 2012.
- [75] P. Seiler and R. Sengupta, "An H_∞ Approach to Networked Control," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.50, no.3, pp.356–364, March 2005.
- [76] B.L. Reed and F.S. Hover, "JLS-PPC: A jump linear system framework for networked control," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.25, no.3, pp.924–939, May 2017.
- [77] B. Rahmani and A.H. Markazi, "Variable selective control method for networked control systems," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol.21, no.3, pp.975–982, 2013.

- [78] H. Ishii, “ H_∞ control with limited communication and message losses,” *Systems & Control Letters*, vol.57, no.4, pp.322–331, April 2008.
- [79] L. Qiu, F. Yao, G. Xu, S. Li, and B. Xu, “Output feedback guaranteed cost control for networked control systems with random packet dropouts and time delays in forward and feedback communication links,” *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol.13, no.1, pp.284–295, Jan. 2016.
- [80] F.-L. Qu, B. Hu, Z.-H. Guan, Y.-H. Wu, D.-X. He, and D.-F. Zheng, “Quantized stabilization of wireless networked control systems with packet losses,” *ISA transactions*, vol.64, pp.92–97, Sept. 2016.
- [81] X. Li and S. Sun, “Robust H_∞ Control for Networked Systems with Random Packet Dropouts and Time Delays,” *Procedia Engineering*, vol.29, pp.4192–4197, 2012.
- [82] D. Yue, Q. L. Han, Qing and, J. Lam, “Network-based robust H_∞ control of systems with uncertainty,” *Automatica*, vol.41, pp.999–1007, March 2005.
- [83] W. W. Che, J. L. Wang, and G. H. Yang, “ H_∞ control for networked control systems with time delay, data packet dropout and disorder,” *Neurocomputing*, vol.179, pp.211–218, Feb. 2016.
- [84] Z. Hu, F. Deng, M. Xing, and J. Li, “Modeling and control of it ô stochastic networked control systems with random packet dropouts subject to time-varying sampling,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.62, no.8, pp.4194–4201, Aug. 2017.
- [85] N.J. Ploplys, P.A. Kawka, and A.G. Alleyne, “Closed-loop control over wireless networks,” *IEEE Control Syst. Mag.*, vol.24, no.3, pp.58–71, June 2004.
- [86] L. Schenato, “Optimal estimation in networked control systems subject to random delay and packet drop,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.53, no.5, pp.1311–1317, June 2008.

- [87] Y. Mo and B. Sinopoli, “Kalman filtering with intermittent observations: Tail distribution and critical value,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.57, no.3, pp.677–689, March 2012.
- [88] E.R. Rohr, D. Marelli, and M. Fu, “Kalman filtering with intermittent observations: On the boundedness of the expected error covariance,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.59, no.10, pp.2724–2738, Oct. 2014.
- [89] M. Ji, Z. Li, and W. Zhang, “Quantized feedback stabilization of discrete-time linear system with markovian jump packet losses,” *Neurocomputing*, vol.158, pp.307–314, June 2015.
- [90] K. Fukawa, H. Suzuki, and Y. Tateishi, “Packet-error-rate analysis using markov models of the signal-to-interference ratio for mobile packet systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol.61, no.6, pp.2517–2530, July 2012.
- [91] P. Sadeghi, R.A. Kennedy, P.B. Rapajic, and R. Shams, “Finite-state markov modeling of fading channels-a survey of principles and applications,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol.25, no.5, pp.57–80, Aug. 2008.
- [92] L. Schenato, “To zero or to hold control inputs with lossy links?,” *IEEE Trans. Autom. Control*, vol.54, no.5, pp.1093–1099, May 2009.
- [93] N.J. Ploplys, “Wireless feedback control of mechanical system,” Master thesis, Dept. of Mechanical Engineering, University of Illinois, Champaign, IL, 2003.
- [94] K. Zhou, J.C. Doyle, K. Glover, et al., *Robust and optimal control*, Prentice hall New Jersey, 1996.
- [95] 足立修一, MATLAB よる制御工学, 東京電機大学出版局, 1999.
- [96] 萩原将文, デジタル信号処理, 森北出版株式会社, 2001.
- [97] リアルテック, “回転型倒立振子 (RTC05),” [Online]. Available: <http://www011.upp.so-net.ne.jp/realtec/rtc05.pdf>.

- [98] Z. Lu and G. Guo, “Communications and control co-design: a combined dynamic-static scheduling approach,” *Science China Information Sciences*, vol.55, pp.2495–2507, Nov. 2012.
- [99] X. Cao, P. Cheng, J. Chen, and Y. Sun, “An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol.9, no.1, pp.439–450, Feb. 2013.
- [100] K. Glover and J.C. Doyle, “State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H_∞ -norm bound and relations to relations to risk sensitivity,” *Systems & control letters*, vol.11, no.3, pp.167–172, 1988.
- [101] G. F. Franklin and J. D. Powell and M. L. Workman, *Digital control of dynamic systems*, second edition, Addison-Wesley, 1980.

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なる御指導および御助言，御討論をいただきました主査の名古屋大学未来材料・システム研究所教授 片山正昭先生に深く感謝いたします。日頃から研究結果に対して適切な御助言をいただき，充実した研究活動を送ることができました。ご多忙の中，常に暖かく見守って下さったことに心から御礼申し上げます。

また，本研究に対して多大なる御指導，御鞭撻を賜りました副査の名古屋大学教養教員院教授 山里敬也先生に心から感謝致します。日頃の研究活動において厳しくも暖かいご指導をいただき，そのことが研究を遂行していく上で大きな励みとなりました。厚く御礼申し上げます。

本論文を御査読くださいました名古屋大学大学院工学研究科教授 道木慎二先生，大阪市立大学大学院工学研究科教授 林和則先生，名古屋大学未来材料・システム研究所准教授 岡田啓先生に厚く御礼申し上げます。ご多忙のところ本論文を御査読下さり，また大変有益な御助言を賜り心より御礼申し上げます。

さらに本研究に対して，名古屋大学未来材料・システム研究所助教 小林健太郎先生には多くの御指導および的確な御助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。

また，岡山理科大学 荒井伸太郎先生には，研究に対する御指導のみならず，学会発表の場でも御一緒にいただき，人脈形成や情報収集を通して有意義な学会活動を行うことができました。心より御礼申し上げます。

現在は退職なされました技術職員鬼頭良彦氏，また事務補助員石川愛子氏，白石栄里子氏をはじめ，本研究の遂行を支えて下さいました片山研究室の諸氏に深く感謝致します。特に，木下雅之君には，学部4年生から6年間，片山研究室で苦楽をともにし，共に切磋琢磨できる仲間であってくれたことに心から感謝致します。

これまでの人生において経済面，精神面において大きな支えとなってくれた両親

と弟に深く感謝致します。

最後に、常に僕を支え続けてくれた土平愛さんに心からの感謝と愛を捧げます。

業績一覧

(丸印は本論文に関係のある文献・発表を表している)

I. 論文

論文題目	公表の方法及び時期	著者
① H-infinity Control Design Considering Packet Loss as a Disturbance for Networked Control Systems	IEICE Transactions on Fundamentals, vol.E100-A, No.2, pp.353-360 (2016)	T. Ogura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
② Influence of Packet Loss on Wireless Feedback Control Systems as a Disturbance	IEICE Communications Express, Vol.8, No.7, pp.1-6 (2019)	T. Ogura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama

※ IEICE: 電子情報通信学会

II. 国際会議

論文題目	公表の方法及び時期	著者
1. A note on the Influence of Packet Loss and Acknowledgment on Wireless Control Systems with H-infinity Control	International Symposium on EcoTopia Science (ISETS), November 27-29, Nagoya(Japan), no.P-6-4 (2015)	T. Ogura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
② A study on H-infinity Controller Design Considering the Influence of Packet Loss as a Disturbance	Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), October 23-26, Firenze(Italy), pp.6013-6018 (2016)	T. Ogura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama

※ IEEE 米国電気電子学会

III. その他

論文題目	公表の方法及び時期	著者
1. ロバスト制御系と最適制御系におよぼす無線通信路誤りの影響	電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会, 口頭発表 A-5-4, p.42 (2014)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
2. パケットロスがロバスト制御系と最適制御系に与える影響	電子情報通信学会 技術研究報告, RCC2014-8, pp.33-38 (2014)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
3. パケットロスを設計に取り入れた H_{∞} 制御システムの特性評価	電子情報通信学会 技術研究報告, RCC2014-65, pp.1-6 (2015)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
4. パケットロスがフィードバック系に与える影響をモデル化した H_{∞} 制御に関する一検討	電子情報通信学会 技術研究報告, RCC2015-49, pp.49-54 (2015)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭
5. 操作情報のパケットロスを外乱として取り入れた H_{∞} 制御に関する一検討	電子情報通信学会 総合大会, A-17-2, p.235 (2016)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭

論文題目	公表の方法及び時期	著者
6. H-infinity control for reducing of packet loss as a disturbance in wireless feedback control systems	Cambodia-Japan Joint Workshop on Ambient Intelligence and Sensor Networks (2016)	T. Ogura, K. Kobayashi, H. Okada, M. Katayama
⑦. パケットロスが与える影響を入力端外乱として考慮した制御器設計に関する一検討	電子情報通信学会 技術研究報告, RCC2018-30, pp.31-36 (2018)	小倉貴志, 小林健太郎, 岡田啓, 片山正昭

IV. 受賞歴

1. 平成 25 年度 電子情報通信学会 東海支部 卒業研究発表会,
最優秀卒業研究発表賞, 2014 年 3 月
2. 電子情報通信学会 東海支部, 平成 25 年度学生研究奨励賞, 2014 年 6 月
3. 電子情報通信学会 高信頼制御通信研究専門委員会, ベストポスター賞,
2016 年 12 月
4. IEEE 名古屋支部, 2017 年国際会議研究発表賞, 2017 年 4 月