

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：15501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25820182

研究課題名(和文) 情報量評価に基づく制御 - 通信融合系の性能限界の解析と設計法の構築

研究課題名(英文) Analysis of performance limitations and development of design methods for control-communication integrated systems based on information evaluation

研究代表者

新銀 秀徳 (Shingin, Hidenori)

山口大学・理工学研究科・助教

研究者番号：60535243

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、動的システムの制御に必要な情報の最小量について調べた。フィードバック経路の信号・ノイズ比(SN比)を最悪振幅に基づいて評価し、すべての制御則に渡り最小化した。SN比の限界値を、制御対象の不安定極の積を用いて表わした。また、確率システムに対する結果を0次エントロピーと呼ばれる情報論的な量を用いることで導いた。さらに、自乗平均SN比の限界を一入出力システムに対して示した。本結果を多入出力システムのフィードバックを伴う伝送路を介した制御へと拡張し、最適な制御則を受信用および送信用オブザーバを用いて構成した。

研究成果の概要(英文)：This research has investigated the least amount of information required to control dynamical systems. The signal-to-noise ratio (SNR) of the feedback link is evaluated based on the worst-case amplitude and minimized over all control strategies. The SNR limitation is described by the product of unstable poles of the plant. The stochastic version of the limitation is obtained using an information theoretic measure called zero-order entropy. The limitation for mean squared amplitude is also provided for SISO systems. The result is extended to control of MIMO systems over channels with feedback, and the optimal control strategy is constructed based on observers for data transmission and reception.

研究分野：制御工学

キーワード：ネットワーク化制御 通信 情報理論

### 1. 研究開始当初の背景

家電製品から自動車、航空機、工場設備に至るまで、産業を支える制御技術はこれまで計算機技術との融合により大きく発展してきた。これにより、機械的な機構や電気回路として実現されていた制御器は、演算装置に実装するアルゴリズムの形態に進化することで高度化し、制御系の構築における物理的な自由度は向上した。これに続く新たな技術革新として、情報通信技術との融合により大規模システムの分散および集中制御、ネットワーク化制御、遠隔制御といった多種多様な形態をとる制御 - 通信融合系の実現と普及が期待される。

しかしながら、通信系と融合した制御系を数理モデルに基づいて解析、設計するための理論的基盤は確立していない。このため、制御目的に対して制御対象から抽出すべき本質的に重要な情報とは何か、またそれをどのように処理すれば効率的な情報伝達が実現し高度な制御性能が達成されるのかという問題を扱うための道具を持たない。この問題に対して大局的見地に立った指針が示されなければ、制御系と通信系の融合により進むシステムの複雑化に対応することができず、融合によりもたらされる制御系構築における自由度の向上、機能の拡張、高効率化といった利点を活かすことは困難な段階に達すると予想される。現状では、対応策として情報伝送を効率化するための専用通信プロトコルといった要素技術の開発が行われている。しかしながら、要素技術どうしの組み合わせや特定の対象に特化した技術のみでは、システムの全体像をとらえた設計は不可能である。このことから、通信を介する制御を支える学術的基盤が必要であると考え、性能限界の解析と設計法の提示を目的として本研究を計画するに至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、通信路を介する制御系の設計と性能限界の解析を可能にする理論的な枠組を構築することである。制御理論と通信を扱う情報理論は、それぞれ制御系および通信系という相異なるシステムを対象とする学問分野として独自に発展してきた。一方、近年の情報通信技術の発達は、制御系における信号伝送の手段として通信ネットワークの導入を可能にした。これにより制御系の構築における物理的な自由度は増し、制御技術の応用範囲は飛躍的に広がる可能性が高まっている。この技術革新を学術面で支えるには、二つの学問領域を融合した新たな理論的基盤が必要である。そのため、本研究では通信を伴う制御理論の構築と実験系の構築を試みる。

### 3. 研究の方法

通信系を対象とし、制御系特有の実時間通信で伝送される情報に対する量的評価規範

を提示するための基礎研究を行う。これは、従来の情報量は情報理論が扱う通信系の性能限界を記述するための道具としては有効であるものの、制御に必要な実時間通信を扱うことができず、新たに考え直す必要があるためである。その後、通信を介する制御系における性能限界の解明に取り組む。ここでは、制御仕様の達成に必要な通信量を、考案した道具を用いて定量的に記述することを目標とする。これと並行して、理論的限界に迫る通信制御則の構築を目指した制御系設計法の開発を行う。また、研究期間全体に渡り、応用研究として高度の遠隔通信制御を必要とする小型無人航空機に対する制御 - 通信融合系の構築を行う。

### 4. 研究成果

(1) 制御系のフィードバックを乱す要因として有界な伝送ノイズを想定し、推定と制御に必要な SN 比 (信号ノイズ比) の限界値を理論的に明らかにした。制御対象としては離散時間の線形システムを扱い、振幅の上限が既知であるノイズにより乱される伝送路を介した推定と制御について考えた。推定則と制御則については、いずれも伝送路の入口側と出口側の双方に配置することができ、時変性や非線形性、不連続性を許容するネットワーク化制御系の広い枠組みを採用した。SN 比については、ノイズと伝送路を流れる信号の振幅の上限の比として評価した。その上で、推定においては制御対象の内部状態に対する推定値の誤差の大きさを、制御においては状態そのものの大きさを抑制するために必要な SN 比の下限が、制御対象の不安定極の積の絶対値をもちいて表わされることを明らかにした。不安定極の積は制御系の性能限界を表わす重要な指標として知られており、古典制御では感度抑制限界を表わすボードの積分公式が、近年では制御や推定に必要な離散通信路のビットレート (文献 ~ ) およびガウス通信路の分散で評価した SN 比 (文献 , ) の限界が示されている。したがって、本結果は不安定極の積に対して新たなシステム論的意味を与えたことになる。また、確率システムに対する対応する結果を、0 次エントロピーと呼ばれる情報理論的な量を用いることにより導出した。さらに、SN 比を最小化するための制御則は、伝送ビット率を最小にするとして知られているもの (文献 , ) を用いることで構成できることが明らかとなった。

(2) 有界振幅ノイズを受ける伝送路を介した推定と制御に必要な自乗 SN 比の理論限界値を明らかにするとともに、オブザーバーに基づく制御系の構成方法を示した。上記(1)の成果において、SN 比を最小化するための制御則は、伝送ビット率を最小にするとして知られているものを用いることで構成できることが明らかとなった。しかしながら、こ

の制御則では送信時に行う符号化に時変で多次元の量子化を伴うため、伝送データを削減する反面、計算量を増大させるという問題がある。この問題を解決するため、安定性の条件と SN 比の評価規範に対する新たな枠組みを与え、限界値の導出とより簡易な制御則の構成を行った。具体的には、安定化に対する条件を内部状態の平衡点まわりへの収束へと緩和し、SN 比の評価規範をブロック化した系列に対する自乗値の時間平均により評価する枠組みを考案した。その上で、一入出力システムの安定化に必要な SN 比の限界値が不安定極の絶対値の積の自乗になることを明らかにした。また、SN 比を最小化するための制御則が、線形制御において一般的な状態フィードバック制御則とオブザーバを用いて構成できることを示した。さらに、本結果を多入出力システムのフィードバックを伴う伝送路を介した制御へと拡張し、SN 比の限界値が上述の値で与えられることを示し、SN 比を最小化するための制御則が受信と送信の二種類のオブザーバを併用することで構成されることを明らかにした。これらの結果から、一入出力システムでは、通信においてフィードバックがない状況下でも、制御のためのフィードバックを利用することで、フィードバックがある場合と変わらない限界を与えることが明らかとなった。

(3) 分散値が既知の確率的ノイズを受ける伝送路を介した制御について考え、分散 SN 比とレギュレーション性能の関係について調べた。上記(2)の成果では、制御対象の内部状態について平衡点近傍への収束を保証する制御則を与えている。一方で、これをいくつかの数値例に適用して応答をシミュレーションしたところ、ノイズの振幅が各時刻で限界値をとる厳しい状況下では、安定性の規範のみからは評価できない過渡的な収束特性が悪くなる例も見られた。そこで、この問題への取り組みとして、分散が既知の確率的ノイズの下でのレギュレーション性能について調べた。具体的には、伝送ゲインを指数的に変化させる制御則について、SN 比と制御性能の関係性を解析した。さらに、性能向上を目的として、オブザーバを利用した信号伝送に基づく制御則について、SN 比と制御性能の関係性を行列差分方程式の解を用いて定量化した。また、数値的な検証においては、制御性能への要求レベルを下げると要求される SN 比がガウス通信路を介した安定化に必要な SN 比の限界値(文献 [1])である不安定極の絶対値の積の自乗に近づいていく現象が観察された。

(4) 実験装置として、小型無人航空機に対する無線通信を介したフィードバック制御系を構築した。制御対象の小型無人航空機は、姿勢角を搭載センサで計測し、ラダー、エレベータ、エルロンを操作することができる。

センサーの計測値は無線で PC に送信し、PC で計算した各舵の操作量の設定値を無線で小型無人航空機に送信する仕組みになっている。

#### <引用文献>

- S. Tatikonda, Control under communication constraints, Ph.D. Thesis, MIT, September 2000.
- S. Tatikonda and S. Mitter, Control under communication constraints, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 49, No. 7, pp. 1056-1068, 2004.
- G. N. Nair and R. J. Evans, Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates, Automatica, Vol. 39, pp. 585-593, 2003.
- G. N. Nair and R. J. Evans, Stabilizability of stochastic linear systems with finite feedback data rates, SIAM Journal of Optimization and Control, Vol. 43, No. 2, pp. 413-436, 2004.
- J. H. Braslavsky, R. H. Middleton, and J. S. Freudenberg, Feedback stabilization over signal-to-noise ratio constrained channels, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 52, No. 8, pp. 1391-1403, 2007.
- J. S. Freudenberg, R. H. Middleton, and V. Solo, Stabilization and disturbance attenuation over a Gaussian communication channel, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 55, No. 3, pp. 795-799, 2010.

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 10 件)

新銀秀徳, 小河原加久治, 伝送ノイズをともしなう制御系のための時変レギュレータの設計, 計測自動制御学会 第 3 回制御部門マルチシンポジウム, 2016, 南山大学名古屋キャンパス(愛知県・名古屋市).

H. Shingun and Y. Ohta, SNR limitation for amplitude-bounded noise in control over channels with feedback, 2015 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC), 2015, Sydney (Australia).

新銀秀徳, 小河原加久治, SN 比制約をもつフィードバック制御系のためのレギュレータ設計, 第 58 回自動制御連合講演会, 2015, 神戸大学工学部(兵庫県・神戸市).

新銀秀徳, 小河原加久治, 有界ノイズをともしなうフィードバック系の SN 比解析とオブザーバにもとづく制御, 計測自動

制御学会 第 2 回制御部門マルチシンポジウム, 2015, 東京電機大学東京千住キャンパス (東京都・足立区).

菅野祐介, 小河原加久治, 新銀秀徳, ノンホロノミック拘束を受ける横力板 UAV の画像誘導制御, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015, 北海道大学工学部 (北海道・札幌市).

橋本竜一, 小河原加久治, 新銀秀徳, 横力板 UAV の低バンクかつ低旋回半径制御, 日本機械学会 2015 年度年次大会, 2015, 北海道大学工学部 (北海道・札幌市).

H. Shingin and Y. Ohta, SNR limitation for feedback control systems with amplitude-bounded noise, 2014 IEEE Multi-Conference on Systems and Control (MSC), 2014, Antibes (France).

新銀秀徳, 小河原加久治, 有界振幅ノイズの下での安定化制御, 第 57 回自動制御連合講演会, 2014, ホテル天坊 (群馬県・渋川市).

新銀秀徳, 小河原加久治, 有界ノイズを受けるフィードバック制御系に対する SN 比解析, 計測自動制御学会 第 1 回制御部門マルチシンポジウム, 2014, 電気通信大学 (東京都・調布市).

H. Shingin and Y. Ohta, Stabilization under signal-to-noise ratio constraints on feedback links with bounded noise, 4th IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems (NecSys), 2013, Koblenz (Germany).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

新銀 秀徳 (SHINGIN, Hidenori)  
山口大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号: 60535243

### (2) 連携研究者

小河原 加久治 (OGAWARA, Kakuji)  
山口大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号: 70211125

太田 快人 (OHTA, Yoshito)  
京都大学・大学院情報学研究科・教授  
研究者番号: 30160518