

実世界情報システムプロジェクト ～VR研究グループ 原・津村研究室

情報システムにおける相互干渉 / 協調の制御理論的解析～

津村 幸治 原 辰次

情報理工学系研究科システム情報学専攻

概要

本研究では人と情報システムの相互作用 / 協調動作の制御理論的解明と、それを実現する高性能の適応 / 学習制御、および高速計算手法の導出を主目的としている。本報告ではこのうち前者の問題に焦点をあてる。まず「協調」の意味について議論し、その数理的定義を提案する。その上で、協調制御の一形態を、制御系を流れる信号の情報量に関する、制約付き安定化問題に帰着させ、本問題に対する最適制御器を導出する。最後に本問題設定、導出された最適制御器の意義について議論する。

1 背景

人が情報システムと共存し、それを自在に活用するというのが、実世界情報システムの目指すところである。人と情報システムが共存するシステムに関する課題は多いが、本研究では特に、マスターレイブに代表されるような、人の運動に機械が干渉するシステムの問題について考える。

このような人 / 機械系に関する研究は古くから行われており、部分的には注目すべき結果が得られているが、実用、理論の両面において、未だ多くの課題が残されているといえる。本課題の困難な点は、1つにはメカニズムとして各システムの協調動作という点について不明な部分が多いということ、2つ目には、高度の協調動作を実現する

システムの構築方法が不明であること、3つ目には、現実にシステムを構築・運転する上で、大きな計算量を必要とする、などに存在する。

1つ目の問題は、これまで「協調動作」の明確な定義が乏しく、そのため数理的議論が進まないといった事情が存在する。「協調動作」という言葉自体は非常に広い意味を包含しており、動作の低級レベルから、状況判断や割り込みといった処理を含む高級レベルに至るまで、「協調」と表現される動作は多岐にわたる。このような「協調動作」の全てについて解析することは、議論の散漫を招き、意義ある結果の導出を困難なものとする。「協調」の意味の多様性を踏まえつつも、本研究の第一年度として、本報告では特に低級レベルの動作に注目し、「協調」を制御理論的に明確に定義することからはじめる。これをもとに数理的解析の進展を図るものとする。

2つ目の問題に関しては、未知の対象とのフィードバック系には適応、学習制御が不可欠であるが、本研究では相互干渉、協調動作という観点でこれを見直し、整合するメカニズムを追及する。

3つ目の問題に関しては、適応、学習制御のメカニズムを実装する際には、概して大きな計算量が必要となるが、本研究ではこれを軽減する最適化計算アルゴリズムについても調べる。

そして最終的には、「協調動作」の定式化、制御系の構造、および最適化計算法が、互いに整合したもものとして結実することを目指す。

本研究課題は、超ロバスト計算原理プロジェクト

ト・グループCの研究課題の一つとも関連しており、2つのプロジェクトを結びつける研究と考えることができる。

2 目的

本研究の第1年度として先にあげた3つの課題のうち、最もはじめに着手すべき問題として、課題1:「協調」の定義、およびそれに基づく制御系のあるべき構造について」の解決を試みる。

ここで想定する対象のシステムは、マスターレイブに代表される、力学を基本とした人/機械系である。「協調」という言葉で表現される動作をする人/機械系は、2つのサブシステムが信号をやり取りするフィードバック系の、1つのカテゴリであると考えられる。ここで重要なことは1章で述べたように、一般的なフィードバック系の中で「協調」という言葉で表現される動作の定義が必要となる。ここでは高位の割り込みや状況判断を伴わない、低級レベルの制御動作に限定して、以下議論を進める。

2つのサブシステムが「協調」している状況とは、共通のタスクを達成するのに、各々にとっては無駄な動作を行なわないものと定義する。無駄な動作を行わないためには、互いに相手の行動について、1) 推定可能、ないしは、2) 観測可で、よく理解されている必要がある。また 1), 2) の状況は、A) 事前情報の知識、B) オンラインでの信号のやりとり、により達成されるものと考えられる。

1)-A), 2)-B) の2つに共通する概念は、2つのサブシステム間で交わされる信号の情報量である。前者においては、その最小化問題、後者においては、それに制限がある場合のタスク最適化問題に帰着されることがわかる。より具体的には、1)-A) の状況で「協調動作」とは、相手の行動は事前情報に基づき予想され、制御系が運転している間は、2つのサブシステムの間で冗長な信号のやり取りが行われぬものと考えられる。より少ない情報のやり取りで、如何にして1つのタスクを共同で、効率よく達成することができるのかを追求するとき、本問題は信号の情報量最小化問題に

帰着される。一方 2)-B) の場合で、2つのサブシステムに分割して考慮する、分散制御としての意義を持たせているものは、その間で交わされる情報量の制限である。なぜなら、これが無制限であるならば、1つの拡大システムと見做すこと同等であり、分散制御としての意義が失われるからである。つまりこの場合「協調動作」とは、情報量に制限がある場合のタスク最適化と考えられる。ただし 2)-B) の状況で考えなければならないもう一つの側面は、2つのサブシステムにとって相手が不確かなシステムであり、オンラインで推定するという状況である。この場合は、適応/学習型の制御機構が組み込まれる必要がある。適応/学習型制御機構に関しては、本研究の次のステップで考慮することとする。

以上の議論から、協調動作を行う制御系を分類するには、制御系に流れる信号の質について調べる必要がある。ここで信号の質とは、制御系が安定性や与えられた仕様を満足するのに、やりとりする信号がどの程度有用な情報が無駄なく含んでいるかということである。

上記考察から以下では、制御系に流れる信号の情報量に着目し、最小の情報量を達成する制御系を求めることを考える。

3 問題設定と主結果

制御系の中を流れる信号の情報量を計量することを考える。ここでは信号の量子化と符号化を考え、符号の単位時間あたりの平均符号長をもってして、対応する信号の情報量とする。この上で次の状況を考える。

制御対象、制御器、量子化器、符号器、復号器からなる制御系を考える。制御対象は離散時間線形時不変システムとする。その出力から制御器への入力までが、離散値化と符号化を施されるとする。また途中ノイズが混入し、制御系は常に励起された定常状態にあるものとする。

その上で次の制約付き安定化問題を考える。問題「平均符号長に関する制約を満足する上で、与えられた制御対象を安定化する制御器を求めよ。」

近年、通信容量が有限であるような結線を含む制御系の、システム同定 [7]、状態推定 [3],[4]、安定化 [9],[10],[2],[6],[8] に関する興味深い研究結果が幾つか報告されている。しかしノイズに代表される外生信号により、定常的に励起される系に関する安定化問題の結果は未報告である。ノイズを含まない状況設定に従う問題は、基本的には状態変数空間の離散値化による量子化誤差の問題に帰着される。一方本問題は、エントロピーを基本とする情報理論と密接に関係している。以下では本問題を解決することを考える。

次の結果を得た。

主結果「

- 1) 量子化幅に応じてある許容誤差値が計算される。
- 2) 制約付き安定化問題の可解性が、制御対象の不安定極、不安定零点、および 1) の許容誤差を用いて判定できる。
- 3) 制御対象の不安定極、不安定零点の数、大きさに応じて、必要最小限の情報量が増大する。

」

制御対象に不安定極、不安定零点が存在するとき、安定化のための制御器の構造は複雑となり、交わされる信号の情報量も大となる。不安定極や不安定零点をもつ制御対象は従来より、制御の困難な系として認識されてきた [5]。本結果より、通信する信号の情報量の軽減という観点からみても、同様に制御の困難な系であると、示されたこととなる。

4 課題

前章では、制御対象から制御器へ送られる信号に課せられる制約を考慮した。しかし 2 つのサブシステムの間で交わされる信号の情報量を議論するには、本来はフィードバック系の 2 つの結線中に流れる信号の制約を、同時に考える必要がある。つまり制御対象と制御器の間の 2 つ結線の双方に、量子化器、符号器、復号器が挿入され、2 つの信号の情報量を考慮するという状況である。

そこで次の問題を提示する。

問題「制御対象と制御器の結線中の、2 つの信号の符号長に関して課された制約を同時に満足する、安定化制御器を求めよ。」

残念ながら本問題は現時点では未解決である。理由は次にある。

- 1) 本問題はある信号のエントロピー最小化問題に帰着される。
- 2) 問題 1) は 3 つのプラントの同時安定化可能性問題と関連している。
- 3) 3 つのプラントの同時安定化可能性問題は、一般的な可解性判定条件が得られない [1]。

以上の理由により現時点では、本問題の求解が直接は困難であるということが出来る。本問題に対する妥当な副問題を考えるなど、何らかの解決が望まれるところであり、今後の研究課題となっている。

5 考察

本報告では、2 章で考えた「協調動作」のありうる状況 1)-A) に対応し、2 つのシステムの間で交わされる信号の情報量に着目し、それを最小にする制御器を求める問題を考え、その解を与えた。このようなフィードバック系を、本研究の主目的である人/情報システム系に置き換えてみれば、次のように解釈できるであろう。つまり、人と機械が共同し、何らかの制御動作を行う上で、人の制御動作に機械が過剰に干渉する力を加えず、必要最小限の補助をするシステムであると考えられる。また同時に、人の制御動作、タスクの動作そのものが、不安定極や不安定零点を含む複雑なシステムで表記されるものであれば、人を補助する機械の動作も複雑にならざるを得ず、双方の間で交わす信号が複雑になると解釈することができる。

1, 2 章にも述べたように「協調動作」はより一般的な概念であり、1)-A) の状況はその一部に過ぎないが、本結果により「協調動作」のある一面を、解析的に論ずる土台が構築されたのではない

かと考える．同じ観点に立った他の問題として，2つの与えられたシステムの間には緩衝システムを挿入し，緩衝システム内に流れる情報量を軽減するという問題も考えられる．この場合緩衝システムは，人と機械の間の，よりよいインターフェースとして解釈される．

一方，今後に残された課題も多い．例えば状況2)-B)で考えなければならない点は，2つのサブシステムに対する不確かさの導入である．今回の報告は，完全に制御対象が既知であるとした場合の結果であるが，それが未知の場合には，ロバスト制御や適応化を考慮する必要がある．また本報告では，制御仕様として安定性のみを考慮した．しかし協調動作がより意味を持つのは，制御性能をも考慮した場合である．今後これらの点について，解析を進める予定である．

6 まとめ

人と情報システムが相互干渉する人/情報システム系は，数理モデルとして2つの作用素がフィードバック系を構成するシステムとして表現できるが，ここでは狭義の「協調」という動作を，与えられた仕様を達成するのに交わされる情報量に制限があるもの，もしくは最小値を達成するもの，として定義した．その上で，フィードバック系の結線中を流れる信号の情報量に関する制限付きの安定化問題を設定し，その解析解を求めた．得られた結果から，制御対象の不安定極，不安定零点の存在が，交わされる情報量の下限を定めていることが判明した．今後は不確かさを含んだシステムの協調や，より高度の制御系として適応制御，学習制御に関して，理解を深めていく予定である．

参考文献

- [1] V. Blondel and M. Gevers. The simultaneous stability question of three linear systems is undecidable. *Math. Control, Signal, and Systems*, 6:135–145, 1994.
- [2] R. W. Brockett and D. Leberzon. Quantized feedback stabilization of linear systems. *IEEE Trans. Automat. Control*, AC-45-7:1279–1289, 2000.
- [3] D. F. Delchamps. Extracting state information from a quantized output record. *Systems & Control Letters*, 13:365–372, 1989.
- [4] D. F. Delchamps. Stabilizing a linear system with quantized state feedback. *IEEE Trans. Automat. Control*, AC-35-8:916–924, 1990.
- [5] J. C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum. *Feedback Control Theory*. Macmillan, New York, 1992.
- [6] N. Elia and S. K. Mitter. Stabilization of linear systems with limited information. *IEEE Trans. on Automatic Control*, AC-46-9:1384–1400, 2001.
- [7] M. Gevers and G. Li. *Parametrization in control, estimation and filtering problems: Accuracy aspects*. Communications and control engineering series. Springer-Verlag, Berlin, 1993.
- [8] G. N. Nair and R. J. Evans. Stabilization with data-rate-limited feedback: tightest attainable bounds. *Systems and Control Letters*, 41:49–56, 2000.
- [9] W. S. Wong and R. W. Brockett. Systems with finite communication bandwidth constraints – part I: State estimation problems. *IEEE Trans. Automat. Control*, AC-42-9:1294–1299, 1997.
- [10] W. S. Wong and R. W. Brockett. Systems with finite communication bandwidth constraints – II: Stabilization with limited information feedback. *IEEE Trans. Automat. Control*, AC-44-5:1049–1053, 1999.