

# 統計科学における制御理論の研究

## Research on Control Theory in Statistical Science

モデリング研究系 宮里 義彦 (Yoshihiko Miyasato)

### 1. 制御理論の背景

制御理論の歴史は伝達関数と周波数領域の評価に基づく古典制御に始まり、状態空間と時間領域の評価に基づく現代制御の時代を通過し、周波数領域と時間領域、伝達関数と状態空間の双方の評価方式と表現方式を統合したポスト現代制御の時代を経て現在に至っている。いずれの手法においても制御系を設計するに当たって、制御対象の適正なモデルを求める必要があるが、制御対象をどのようにモデリングするか、またそのモデルに含まれる不確定要因をどのように評価するかによって、適用される制御手法や達成される制御性能が規定される。従って高性能の制御系を実現するために、制御を意識したモデリングやモデルの不確定要因を考慮した制御という視点が重要で、モデリングと制御は切り離して考えられない。

### 2. 制御理論の研究

このような制御理論とモデリングの関係を考慮して、モデリングと制御を同時に行う適応学習制御を中心とした研究を行っている。特に適応制御は制御器の実時間調整のために制御系全体の安定解析が困難で、適用上の様々な制約を受けるが、その制約を緩和し適応制御の適用範囲を広げる研究を進めてきて、現在は適応制御に関連する非線形制御と線形制御の立場から、およびそれらの多体系（マルチエージェント系）への適用の立場から研究に従事している。また応用研究の分野でも、車両のセミアクティブサスペンションの制御系設計を行い、実機（高速バス）の走行試験から良好な結果を得ることが出来た。

### 3. 研究事例 I：非線形制御の立場

未知の対象を制御する場合、対象のパラメトリックモデルを求めて、モデルのパラメータの推定値を正しいと見なして制御器の設計をする（certainty equivalence の立場）。ところがその推定値は常に正しいとは限らず、またパラメトリックモデル自体も対象の近似表現の一つにすぎないので、所望の制御性能を達成するためには、対象のさまざまな不確定要因も考慮に入れて、制御系を構成しなければならない。このような問題に対して、パラメータの推定誤差を制御問題の外乱と見なして、外乱の影響を抑制する非線形適応制御系を設計する手法を開発し、パラメータが時間的に変動したり不確定要素が存在する場合でも、所望の制御性能を達成できるようになった。この手法は非線形パラメトリックモデルの一種であるニューラルネットを含む制御系の設計にも適用が可能である。同じ考え方は高次振動モードを有する複雑なシステム（非線形プロセス、柔軟構造物、弾性アームなど）のモデリングと制御にも適用可能で、低次元モデルに含まれるモデリング誤差（スピルオーバー）の影響を低減化して、実用的な有限次元（低次元）の制御器でシステムの振動抑制と制御を実現することができる。

#### 4. 研究事例 II：線形制御の立場

パラメータの上下限が規定された線形システムとして記述されるプロセスは、その上下限を端点とするポリトープの内点として表現することができる（ポリトピックモデル）。そのような対象についてはポリトープの内点を定めるパラメータをスケジューリングパラメータ（SP）と見なして、SP に応じて制御器の特性を変化させることで、より高性能の制御結果が得られる。この制御方式はゲインスケジューリング（GS）制御と呼ばれていて、制御理論においては線形行列不等式に基づく制約下における設計手順として定式化される。GS 制御は SP が正確に求められれば、ポリトープ内の変動に対してシステムの安定化と外乱抑制が達成されるが、SP が正確でないと安定性も保証されない。このような場合に、プロセスの操業データを用いて制御誤差を観測して SP を実時間で再調整する適応型の GS 制御方式を開発した。ポリトピックモデルに基づく適応制御は、制御のためのモデリングにも多大の影響を与えると思われる。

#### 5. 研究事例 III：多体系（マルチエージェント系）への適用の立場

未知パラメータを含む複数の動的システムを個々のエージェントとするマルチエージェント系に対して、適応的に速度追従型の群生行動を実現するフォーメーション制御やリーダーフォロワー型の追従行動を実現するコンセンサス（合意形成）制御の研究を行っている。フォーメーション制御においては、未知パラメータの推定誤差と群生行動に関するポテンシャル関数の誤差を等価的な外乱と見なした  $H_\infty$  制御問題の解としてフォーメーション制御機構を導出し、コンセンサス制御においては限定された通信構造に対応するネットワークグラフに着目し、未知パラメータの推定誤差とネットワーク密度に関する不確定性を等価的な外乱と見なした  $H_\infty$  制御問題の解としてコンセンサス制御機構を導出している。実際の問題としては高速道路における自動車の群制御（スマートハイウェイ）や複数のロボットマニピュレータによる協調動作、ドローンの群制御や宇宙機のランデブー問題などが該当し、これらの調和行动の実現のための基本原理を解明する研究である。

#### 6. 最後に

統計科学では、有限時間の現象を再現する開ループ的なモデルを構築することに主眼があり、制御はモデルの有効性を検証する項目の 1 つと見なされることが多い。しかし制御系を良好に動作させるには、既存モデルの統計的な当てはめに留まらず対象の物理的特性や原理にも目配りを行い、モデルと制御の総合的な考察が必要となる。それには制御科学の深い知見が必要であり、制御科学と統計科学の緊密な連係が必要不可欠である。また制御理論がこれまで取り扱ってきた時間軸上の動的システムという枠組みを越えて、より広いクラスの離散事象システム、生産システム、通信ネットワークシステム等も対象として発展していくためには、システム科学や情報科学全般も含めた横断的な研究が今後ますます重要になっていくと思われる。

### 参 考 文 献

- 宮里義彦 (2013). 適応制御の回顧と展望, 計測と制御, **52** (4), 361-367.
- 宮里義彦 (2014). 分布定数系の適応制御, システム/制御/情報, **58** (9) 365-370.
- 宮里義彦 (2017). 無限次元系の協調制御, 計測と制御, **56** (12), 925-930.
- 宮里義彦 (2018). 『適応制御』, コロナ社, 東京.