

データ駆動制御のこれまでの流れと最新の研究動向

金子 修*

*電気通信大学 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
*The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, Japan
*E-mail: o.kaneko@uec.ac.jp

キーワード：データ駆動制御 (data-driven control), データ駆動予測 (data-driven prediction), 目標応答 (desired response).
JL 0003/24/6303-0129 ©2024 SICE

1. はじめに

本特集の主題でもある「データで駆動するシステム制御—理論と応用の新展開と最前線—」について、冒頭のこの総論の目的は、データ駆動制御のこれまでの流れと最新の動向について簡単な解説をすることである。

まず、データ駆動制御のアウトラインを図1に示す。制御系を設計するには、システム同定¹⁾などにより対象の動特性の法則を表わす数式モデルを作成し、それに基づいた設計をすすめることが通常の合理的な手段である。これが図1における中心の縦矢印の流れである。一方で、図1において、対象の数式モデルを介さずに、データを直接用いることで制御系を更新したり(図1におけるA)、データに直接基づいて設計する(図1におけるBやC)アプローチが活発に研究されてきている。これらがいわゆるデータ駆動制御とよばれるアプローチである。実際に、本会誌でも関連する特集号²⁾が刊行された2013年以降、ここ近年でデータ駆動制御に関する多くの研究成果が発表され、他学会の解説記事³⁾や論文特集号⁴⁾でも、そのようすを見ることができ、国際会議でも関連するOS企画や講演が活発になされるようになり、たとえば、2023年7月に横浜で開催されたIFAC World Congressにおいても、非常に多くの関連セッションが生まれ、データ駆動制御に関連する多くの最新の研究成果を聴講することができた⁵⁾。このように、ここ近年急速に、データ駆動制御は制御系設計の一つの分野として確立しつつあるといえよう。一方でこのような学際的な動きとともに、たとえば、実際の応用としては、本特集号における中谷先生や洪水様の事例紹介のように、医療福祉や建設機械などの応用において、的確な状況でその有用性を示すべく実応用例も見受けられるようになってきた。また、本特集号における川田先生

の事例紹介にも見られるように、データ駆動制御を基幹技術の一つとして導入すべく企業教育にとりいれようという動きもある。

このデータ駆動制御の発展の動機には、まずは、モデルに基づく制御のアプローチでは太刀打ちできない場面、すなわち、モデルを求めることが何らかの理由で非常に困難である場合への対応の必要性が挙げられる。この困難さの理由にも、本質的に動特性が複雑すぎて同定をすることが困難である、という理由から、理想的な同定実験を行うことがコスト・時間・人的リソースの関係でむずかしい、さらには、装置の安全上、PE性の高い理想的な同定入力を印加することができない、などさまざまな理由が挙げられる。いずれにせよ、同定を行うことがむずかしいときの一つの突破口や活路としての立場として、データ駆動制御が発展してきた側面がある。これらに加えて、データがもつ情報を数式モデルに圧縮せずにそのまま制御系設計に反映させたいという動機も挙げられる。これには、モデル化にはデータが不十分な場合でも、目標とする制御系設計に活かす必要がある状況への対応も含まれる。これらの例としては、リアプノフ方程式を用いて安定か否かをしらべたいとき、モデル化を経ずにデータからリアプノフ方程式を解いて安定性を解析するといった方法も提案され、それにより大規模ネットワーク系の制御における入力ノードを決める問題への応用など興味深い展開もみられる。この詳細は本特集号の東先生・坂野先生の解説を参照されたい。このように、データを直接的に制御系設計に活かすことで、新たな方法や発見の期待という点も動機の一つとして考えられる。

このような背景のもと、本特集ではデータ駆動制御に関連した最新の研究動向と、今後の発展につながるであろう研究の主題、そして、実応用で発揮されたデータ駆動制御の適用事例により構成している。そのための導入として、この解説ではこのデータ駆動制御のこれまでの流れと最新の研究動向について簡潔に解説を行う。ここでは、一つの分類の例として図1における右の矢印Aのように、粗いノミナルモデルや事前情報などから何らかの制御器が設計されており、そのうえで制御器の性能を維持する・更新するというアプローチと、左の矢印BやCのように、モデルを介さずにデータに直接基づいた設計のアプローチにわけて解説する。

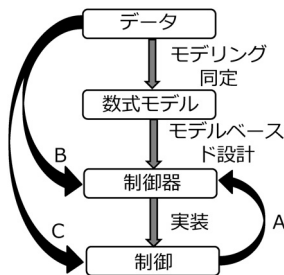


図1 データ駆動制御のアウトライン

2. データを直接用いた制御器更新・調整

データを直接用いた制御という点で、とくに更新や調整という観点からの流れをみてみよう。典型的なセッティングとして図 2 のようなフィードバックループ系^(注1)を考える。最も古いものは PID 制御器の更新でよく知られたジググラニコラス法⁶⁾ や限界感度法⁷⁾ であろう。前者は、得られたステップ応答データの傾きや遅れからあらかじめつくられた対応表をもとに C のパラメータを決定する方法であり、後者は発散直前の応答になるまで制御器をハイゲイン化することで、そのときの振動周期とゲインからパラメータを決定する方法である。このように、データを直接もちいた制御器更新法であるものの、そこには設計者・使用者の定性的指標や主観の方針がこめられており、その方法も何回もくり返し行うものとなっている。このような問題に対して、与えられた目標応答との二乗誤差を最小化することで応答性能の向上という目標を素直に表現し最適化する方法が Iterative Feedback Tuning (IFT) として提案されている⁸⁾。制御目標をそのまま実現した最も素直なデータ駆動制御器更新法であるが、唯一の欠点として、非線形最適化を実行する際に必要な多数回の実験が挙げられる。ただし、素直であるがゆえに、収束性や安定性など多くの理論解析や応用例も報告されている。IFT の考え方を多入出力系に拡張した方法の一つとして非対角要素の干渉低減化に着目した Correlation based Tuning (CbT)⁹⁾ も提案されている。

さて、IFT における多数回の実験を回避する方法として、2000 年代初頭に Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT)^{10), 11)} と Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT)¹²⁾ がそれぞれ独立に提案された^(注2)。どちらも机上の仮想的な閉ループ系を導入することで、最初の一回の実験データで所望（に近い）制御器への更

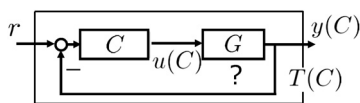


図 2 可調整制御器をもつフィードバック制御系

(注1) ここでは制御対象は未知で、制御器が可調整パラメータをもち、入力や出力、閉ループ伝達関数はこのような制御器の関数ということで $u(C)$, $y(C)$, $T(C)$ として表記する。

(注2) VRFT では、目標とする応答伝達関数 T_d に対し、 $T_d = \frac{GC_d}{1+GC_d}$ を満たす望ましい制御器 C_d に直接着目し、 $C_d = C$ 、つまり、 $1 = \frac{C}{C_d}$ を満たす C を求めるために、この条件を入力データ u_0 の上で考えた $u_0 = \frac{C}{C_d} u_0$ 、すなわち、 $u_0 = \frac{C}{C_d} u_0 = \frac{CG}{C_d G} u_0 = C \frac{1}{C_d G} y_0 = C \left(\frac{1}{T_d} y_0 - y_0 \right)$ の最左辺と最右辺を等式とした条件を満たす C を最適化で求めている。一方の FRIT では、 $T_d = T(C)$ とする望ましい閉ループ系の実現のために $1 = \frac{T_d}{T(C)}$ に着目し、この条件を出力データ上で考えた $y_0 = T_d T(C)^{-1} y_0$ 、すなわち、 $y_0 = T_d (C^{-1} u_0 + y_0)$ を満たす C を最適化で求めている。

新を獲得している点で似てはいるが、VRFT が開ループ系、FRIT が閉ループ系を最適化しているという本質的相違点をはじめとして、最適性を保証するプレフィルタも VRFT は中域特性を、FRIT は低域特性を強調、PID 制御器に対しては前者は最小二乗法で可能な一方で後者は非線形最適化を要するなど、いくつかの相違点もある¹³⁾。そのため、おのおのの特長を反映した状況や目的に応じて使い分ければよいと考えられる。制御仕様を目標応答への追従性能の向上とすれば、通常の線形時不変システムに関する方法論としては確立されており、VRFT は仮想参照信号とプレフィルタの生成、FRIT は擬似参照信号の生成さえできれば、どのような制御系においても適用は可能である¹³⁾。多入出力系に対しても、アルゴリズム表記の煩雑さや最適化における計算機負荷の問題に目をつむれば、同様な理論的保証のもとで適用可能である。また、プロセス制御系などで避けるべき過大な入力を考慮した E-FRIT も提案され実用例が報告されている¹⁴⁾。

これらは 2000 年～2010 年代前半に提案された方法であるが、この近年に提案された新しい手法をいくつか紹介する。まず、状況を二自由度制御系に限定した場合の方法として、応答特性のみを改善するのであればフィードフォワード制御器を修正すればよいという事実に着目した Estimated Reponse Iterative Tuning (ERIT) が提案されている¹³⁾。これは、フィードバック制御器部分を変えなければ、フィードフォワード制御器を変更した後の応答が初期データと制御器のみで表現できるという事実を用いて、この変更後の応答が目標応答になるようにフィードフォワード制御器を求めるものである。ところが、この考え方自体を通常の一自由度制御系にそのまま適用すると、どうしても対象のモデル G が評価関数に含まれてしまう。そこで、内部モデル制御の考え方をを用いて、 G を目標応答モデル T_d とそれを実現する理想的制御器 C_d で表現することで対象のモデルを消しさり、結果として既知情報のみから目標応答を実現する制御器を求める Virtual Internal Model Tuning (VIMT)¹⁵⁾ が提案され、いくつかの拡張が行われている。また、VRFT で必要とされるプレフィルタを目標応答伝達関数として選んだ場合と等価とはされているが¹⁶⁾、独立なアイデアにより提案された Data-Driven Closed-Loop Update Tuning (DD-CLUT)¹⁷⁾ という方法も興味深い。そして、FRIT、および、それをもとに導出されたデータ駆動予測^(注3)と、同様な考え方を周波数領域で展開した方法として Virtual Time-response based Iterative Gain Evaluation and Redesign (V-Tiger) も提案されており¹⁸⁾、メカトロニクス系の制振問題など、周波数領域で考えるべき制御仕

(注3) データのみから制御器実装時の応答を予測する方法であり、詳細は文献 13) または本特集の著者の解説を参照されたい。

様に関して、威力を発揮する方法として期待される。

さて、扱われる制御問題の拡張や適用可能な制御対象の拡張という点でも有用な成果が出されている。まず、制御問題の拡張という点において、制御系設計上、もっとも考えるべきは安定性の保証である。しかし、データ駆動制御では、安定性を図る拠り所である数式モデルの情報をもたないため、未解決な問題である。ただし、近年、安定余裕に着目することで安定性を保証するデータ駆動制御が提案されている。詳細は本特集号の種村先生の解説をご参照されたい。さらに、プロセス制御系において重要とされる、外乱印加時においても一定値に制御量を保つ定値制御問題も実用上大きな意義をもつ。この問題については、一般化最小分散制御にもとづいた方法が提案されており、詳細は本特集号の増田先生の記事を参照されたい。そして、近年のセキュリティリスクへの対応に関連した研究も行われている。データ駆動制御では、データそのものが知らないうちに何らかの変更をされると（毒化）、思ったような性能をもつ制御器を得ることはできない。このような毒化を検知したり耐えうる方法論が必要であるが、それを考えるための攻撃手段としての毒化に関する研究も報告されている^{19), 20)}。

制御対象の拡張という点では、理論的裏付けは線形時不変な制御対象であることに依存しており、対象が非線形な場合には何らかの方策を取らねばならない^(注4)。ここで、非線形系や時変系など、多彩な動特性に応じて対応するには、一組ではなく多数の、もっといえば、データベースなどに格納されている大量のデータを用いることで対応することも、メモリの大量化や計算機の性能が発展してきた現在においては、一つの有用な活路であるといえる。このようなことを背景とした、データベース駆動型のアプローチも近年活発に研究され、本来の目標応答と近いデータをいくつかピックアップし、そのオンライン学習に基づいた制御器パラメータのチューニングなどが提案され、いくつかの実用例も報告されている²³⁾。最新の展開も含めた詳細は、本特集号の木下先生・脇谷先生・山本先生の解説を参照されたい。

本章の最後に、モデルベースド制御との関係について触れておこう。データ駆動制御といえど、やはり数式モデルとは切り離すことはできない。実際に、制御器の更新の場合には、事前情報や何らかのノミナルなモデルをもとに設計した制御器が活用されている。また、更新法が性能を発揮するという理論的保証の裏には数式モデルの性質を活用している。このようにモデルベースド制御とデータ駆動制御は表裏一体の立場で各々が補完されて活用されるべきである。この方面の最近の興味深い研究として、ベイズ最適化を用いて近似モデルを活用しつつ

データから制御性能を改善する方法が提案されている。詳細は、本特集号の藤本先生の解説を参照されたい。

3. データを直接用いた制御器設計

さて、前章で述べたような更新や調整をメインとした方向性の研究とは別に、図1のBやCのように、1990年前後からデータから直接的に制御器を設計しようとする研究もなされている。この流れの研究はしばらくは見受けられなかったが、2020年前後から復刻しきわめて活発に研究されている分野でもある。まず、1990年代に、データと数式モデルの直接的関係に着目したいくつかの研究がなされている。具体的には、Ho-Kalmanの実現をもとにした、インパルス応答と最小実現された状態空間の $\{A, B, C\}$ 行列との関係から、最適レギュレータの状態フィードバックゲインとカルマンフィルタのゲイン、すなわちLQG制御器をインパルス応答データから構成する方法が報告されている^{24), 25)}。また、文献26)では、リカッチ方程式の解から導出される離散時間最適レギュレータのゲインをニュートン法により逐次的に解くアルゴリズム²⁷⁾を、入出力データで記述することで直接的に最適ゲインを求める方法を提案し、出力フィードバックの場合にまで拡張している。なお、データ駆動制御で扱うような未知のシステムに対する最適制御のアプローチは、強化学習の一つである方策（制御ゲイン）反復とも対応しており、制御と強化学習を関連付ける領域として、近年も興味深い理論的成果が多く出されている。詳細は本特集号の定本先生の解説を参照されたい。

一方で、数式モデルと解軌道の双対的な関係に着目した研究も報告されている。もっとも双対的な面を強調した方法は、文献28)で提案された入出力データ配列で表現されるデータ空間に基づくモデルレスアプローチであろう。これは図1のCに相当するアプローチである。たとえば、1次の離散時間系の差分方程式表現は $y(t+1) + ay(t) = bu(t)$ と表わされ、数式モデルの係数 $\{1, a, -b\}$ をたてに並べた列ベクトルは、この時間区間で関連するデータを $[y(t+1) \ y(t) \ u(t)]$ とした行ベクトルの零化空間に属するともとらえられる。このことが全時間区間で成立すると考えれば、この行ベクトルを適切な数だけスタックしたデータ空間で動特性が記述できる。このアイデアに基づき、与えられた目標軌道を実現するために、ある時刻 t の時点で得た適切なサイズのデータ空間行列から、次の $t+1$ で入力すべき操作量を計算することで、完全に数式モデルレスな制御方式を実現したものがデータ空間に基づくモデルレスアプローチである。

別の観点からの双対的なアプローチとして、ビヘイビアアプローチ²⁹⁾に基づく方法がある。ビヘイビアアプローチとは、システムがとりうる軌道（ビヘイビア）に着目することでさまざまなシステム理論やシステム設計を従

(注4) 非線形系の場合でも、あるクラス（入出力データ間の写像が全単射の場合）では理論的な保証の上で制御器更新が可能なが示されている。詳細は文献21), 22)を参照されたい。

来よりも俯瞰的にとらえようという試みであり、軌道そのものを構成する変数も入力と出力を区分けをせずに、外部環境と動特性の情報をやりとりする変数としてとらえている。ただ、ビヘイビアアプローチのほとんどの研究では、軌道を直接とらえるのではなく、微分（または差分）方程式の集合により解軌道 w を $R(\sigma)w(t) = 0$ と表わすことで、軌道を制約する作用素 $R(\sigma)$ に焦点を置くことでシステム解析を行っている^(注5)。そのような中でも、文献 30) では、作用素ではなく解軌道そのものに焦点を当てることで、データ駆動制御やシミュレーションの方法を提案している。また、2005年に発表された文献 31) では、先述の作用素 $R(\sigma)$ を特定するために、データ系列 $\{w(1), w(2), \dots, w(N)\}$ から構成されたハンケル型のブロック行列に対する左零化因子が $R(\sigma)$ に相当することに着目し、システムの数式モデルを特定すべきデータ行列の条件は何か、ということはこのデータ行列のランク条件として明らかにしている。このことが、論文タイトルにもある PE 性という、システム同定でもなじみの深い動特性を励振するための信号の性質、という言葉を用いて述べられており、のちに Willems の fundamental lemma と呼ばれる補題となっている。さて、その後 2010 年代の終わりごろ、その Willems の fundamental lemma をもとにした Data-informativity という概念のもとでのデータ駆動制御のためのシステム制御理論が提唱される^{32), 33)}。たとえば、 $\{x(t), u(t)\}$, $t = 0, 1, 2, \dots, N$ という入力と状態の有限データが得られたとき、それぞれ

$$\begin{aligned} X_- &:= \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \dots & x(N-1) \end{bmatrix} \\ U_- &:= \begin{bmatrix} u(0) & u(1) & \dots & u(N-1) \end{bmatrix} \\ X_+ &:= \begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \dots & x(N) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

のようにデータ行列を定義すると、これに適合する数式モデルの集合は $D := \begin{bmatrix} X_+^T & X_-^T & U_-^T \end{bmatrix}^T$ として

$$\begin{bmatrix} -I & A & B \end{bmatrix} D = 0$$

を満たす行列の組 $\{A, B\}$ の集合である。ここで、データ D があるシステム論的性質に対して Informative であるとは、 D に適合する任意の $\{A, B\}$ から作られる数式モデルで表わされるシステムがその性質の条件を満たすものになっているときをいう^(注6)。このような観点から、可制御性³²⁾、可観測性^{36), 37)}、状態空間の相似変

^(注5) たとえば通常の離散時間伝達関数 $G(z) = N(z)/D(z)$ をもつシステムの入力と出力 $\{u(t), y(t)\}$ は、 $w(t) := [y(t) \ u(t)]^T$ とまとめて、 $\sigma w(t) = w(t+1)$ で定義されるシフトオペレータ σ を用いることで、 $[D(\sigma) - N(\sigma)]w(t) = 0$ と表わされる。このとき、軌道を制約する作用素は $R(\sigma) := [D(\sigma) - N(\sigma)]$ である。

^(注6) 文献 32) や 33) をはじめほとんどの関連する研究は状態と入力データを扱っているが、文献 34), 35) では入出力データに関する Informativity も扱っている。

換³⁷⁾、リアプノフ方程式³⁸⁾、状態フィードバック³⁹⁾、オブサーバ⁴⁰⁾、LQR³²⁾、 H_∞ 制御³⁵⁾、消散性⁴¹⁾、モデル予測制御⁴²⁾、暗号化制御⁴³⁾ など、モデルベース制御でよく知られたシステム解析や制御系設計を fundamental lemma または Informativity の観点からとらえたさまざまな研究がここ 3~4 年の間で報告されている。数式モデルとその解軌道としてのデータとの間の双対的な関係を鑑みれば、ひとたび Informativity という概念でとらえなおすことができれば、このような多くの研究が現れることは自然な流れでもあろうし、従来の制御理論でもそうであったように、今後も Informativity に関するさまざまな研究展開が期待できる。このあたりの俯瞰的解説や各種の関連文献は文献 3) に詳しく述べられている。また、Data-informativity に基づく離散事象システムのスーパーバイザ制御も発表されており⁴⁴⁾、Informativity という考え方がさまざまなシステム理論を包含する形で、今後、俯瞰的な形で展開することも期待される。

4. おわりに（編集前記にかえて）

以上、関連研究のすべてを網羅できているとはいえないかもしれないが、データ駆動制御のこれまでの流れと最近の研究動向について簡潔にまとめてみた。

データ駆動制御の理論と応用の双方の観点から最新の研究動向や今後の展望をまとめておくことが本学会が対象とする分野に属する読者にとって有意義であるという考えから、以降に続く本特集号では、関連する最新の解説や事例紹介で構成している。本特集号が、データ駆動制御のアプローチになじみのない読者にとって、覗いてみる、触れてみる、そして、研究の方向性の一つ、または、技術開発の活路の一つとして考えてみるもののきっかけになれば幸いである。

(2024 年 1 月 19 日受付)

参考文献

- 1) L. Ljung: System Identification for the Users, Prentice-Hall (1998)
- 2) データ駆動制御 —新機軸と新潮流—, 計測と制御, **52**-10 (2013)
- 3) Data-Driven Control, Part1, Part 2, *IEEE Control Systems Magazine*, **43**-5-6 (2023)
- 4) 「データと学習による制御」論文特集号, 1, 2, 3, システム制御情報学会論文誌, **36**-11-12, **37**-1 (2023, 2024)
- 5) H. Ishii, Y. Ebihara, J. Imura, and M. Yamakita eds.: Proceedings of 22nd IFAC World Congress, *IFAC Papers On-Line*, **56**-2 (2023)
- 6) J. G. Ziegler and N. B. Nichols: Optimum Setting for Automatic Controllers, *Trans. ASME*, **64**-8, 759/768 (1942)
- 7) K. L. Chien, J. A. Hrones, and J. B. Reswick: On the Automatic Control of Generalized Passive Systems, *Trans. ASME*, **74**-2, 175/185 (1952)
- 8) H. Hjalmarsson, M. Gevers, S. Gunnarsson, and O. Lequin: Iterative Feedback Tuning: Theory and Applications, *IEEE Control Systems Magazine*, **18**-4, 26/41 (1998)
- 9) A. Karimi, L. Mišković, and D. Bonvin: Iterative Correlation-Based Controller Tuning, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **18**-8, 645/664

- (2004)
- 10) G. O. Guardabassi and S. M. Savaresi: Virtual Reference Direct Method: An Off-Line Approach to Data-Based Control System Design, *IEEE Transaction on Automatic Control*, **45**-5, 954/959 (2000)
 - 11) M. C. Campi, A. Lecchini, and S. M. Savaresi: Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT): A Direct Method for the Design of Feedback Controllers, *Automatica*, **38**-8, 1337/1346 (2002)
 - 12) S. Souma, O. Kaneko, and T. Fujii: A New Method of a Controller Parameter Tuning Based on Input-Output Data - Fictitious Reference Iterative Tuning-, *Proceedings of the 8th IFAC Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*, 789/794 (2004)
 - 13) 金子 修: データ駆動制御入門, 計測・制御セレクションシリーズ 7, 計測自動制御学会編, コロナ社 (2024)
 - 14) 加納, 増田, 小河, 滝波, 吉井, 大寶: 化学プロセス産業における E-FRIT の展開, 計測と制御, **52**-10, 898/903 (2013)
 - 15) T. Ikezaki and O. Kaneko: A New Approach of Data-Driven Controller Tuning Method by Using Virtual IMC Structure -Virtual Internal Model Tuning, *13th IFAC Workshop on Adaptive and Learning Control Systems, IFAC PapersOn-Line*, **52**-29, 344/349 (2019)
 - 16) 佐藤, 藤本: DD-CLUT と準最適な VRFT の等価性について, 計測自動制御学会論文集, **58**-6, 314/316 (2022)
 - 17) 三上, 増田: 安定性を考慮した閉ループ更新式に基づくデータ駆動制御器調整法, 電気学会制御研究会, CT-20-88 (2020)
 - 18) M. Kosaka, A. Kosaka, and M. Kosaka: Virtual Time-Response Based Iterative Gain Evaluation and Redesign, *21st IFAC World Congress, IFAC PapersOnLine*, **53**-2, 3946/3952 (2020)
 - 19) A. Russo and A. Proutiere: Poisoning Attack against Data-Driven Control Methods, *Proceeding of American Control Conference*, 3234/3241 (2021)
 - 20) T. Ikezaki, O. Kaneko, K. Sawada, and J. Fujita: Poisoning Attack on VIMT and its Adverse Effect, *Artificial Life and Robotics*, <https://doi.org/10.1007/s10015-023-00914-7> (2023)
 - 21) M. Campi and S. Savaresi: Direct Nonlinear Control Design: The Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) Approach, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **51**-1, 14/26 (2006)
 - 22) O. Kaneko: Fictitious Reference Iterative Tuning of Internal Model Controllers for a Class of Nonlinear Systems, *Proceedings of IEEE Multi Conference on Systems and Control 2015*, 88/94 (2015)
 - 23) 山本 透 編著, 金子, 脇谷, 木下, 大西, 久下本, 小岩井: データ指向型 PID 制御, 森北出版 (2020)
 - 24) R. E. Skelton: The Data-Based LQG Control Problem, *Proceeding of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, 1447/1452 (1994)
 - 25) K. Furuta and M. Wongsaisuan: Discrete-Time LQG Controller Design Using Plant Markov Parameters, *Automatica*, **31**-9, 1325/1332 (1995)
 - 26) Y. Kawamura: Direct Construction of LQ Regulator Based on Orthogonalization of Signals: Dynamical Output Feedback, *Systems and Control Letters*, **34**-1-2, 1/9 (1998)
 - 27) G. A. Hewer: An Iterative Technique for the Steady State Gains for the Discrete Optimal Regulator, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **16**-4, 382/384 (1968)
 - 28) M. Ikeda, Y. Fujisaki, and N. Hayashi: A Model-Less Algorithm for Tracking Control Based on Input-Output Data, *Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications*, **47**-3, 1953/1960 (2001)
 - 29) J. C. Willems: From Time Series to Linear Systems, Part I. Finite Dimensional Linear Time Invariant Systems, Part II. Exact Modelling, Part III. Approximate Modelling, *Automatica*, **22**, 561/580, 675/694, **23**, 87/115 (1986, 1987)
 - 30) I. Markovskiy and P. Rapisarda: Data-Driven Simulation and Control, *International Journal of Control*, **81**-12, 1946/1949 (2008)
 - 31) J. C. Willems, P. Rapisarda, I. Markovskiy, and B. L. De Moor: A Note on Persistency of Excitation, *Systems and Control Letters* **54**-4, 325/329 (2005)
 - 32) H. J. Van Waarde, J. Eising, H. L. Trentelman, and M. K. Camlibel: Data Informativity: A New Perspective on Data-Driven Analysis and Control, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **65**-11, 4753/4768 (2020)
 - 33) C. De Persis and P. Tesi: Formulas for Data-Driven Control: Stabilization, Optimality, and Robustness, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **65**-3, 909/924 (2020)
 - 34) T. Sadamoto: On Equivalence of Data Informativity for Identification and Data-Driven Control of Partially Observable Systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **68**-7, 4289/4296 (2023)
 - 35) T. Steentjes, M. Lazar, and P. Van den Hof: On Data-Driven Control: Informativity of Noisy Input-Output Data with Cross-Covariance Bounds, *IEEE Control Systems Letters*, **6**, 2192/2197 (2022)
 - 36) J. Eising, H. L. Trentelman, and M. K. Camlibel: Data Informativity for Observability: An Invariance Based Approach, *Proceedings European Control Conference*, 1057/1059 (2020)
 - 37) Y. Tanaka and O. Kaneko: Equivalent Transformations in the Data-Informativity Framework and Its Applications: Homological Algebraic Approach, *Proceedings 23rd International Conference on Control, Automation and Systems (IEEE Xplore)*, 60/65 (2023)
 - 38) I. Banno, S. Azuma, R. Ariizumi, T. Asai, and J. Imura: Data Informativity for Lyapunov Equations, *IEEE Control Systems Letters*, **7**, 2365/2370 (2023)
 - 39) J. Berberich, A. Koch, C. W. Scherer, and F. Allgöwer: Robust Data-Driven State-Feedback Design, *Proceedings of American Control Conference*, 1532/1537 (2020)
 - 40) R. Adachi and Y. Wakasa: Design of Full State Observer Based on Data-Driven Dual System Representation, *IEICE Transactions on Fundamentals*, **E106**-A-5, 736/743 (2023)
 - 41) H. J. van Waarde, M. K. Camlibel, P. Rapisarda, and H. L. Trentelman: Data-Driven Dissipativity Analysis: Application of the Matrix S-Lemma, *IEEE Control Systems Magazine*, **42**-3, 140/149 (2022)
 - 42) J. Berberich, J. Köhler, M. A. Müller, and F. Allgöwer: Data-Driven Model Predictive Control With Stability and Robustness Guarantees, *IEEE Transactions on Automatic Control*, **66**-4, 1702/1717 (2020)
 - 43) A. B. Alexandru, A. Tsiamis, and G. J. Pappas: Towards Private Data-Driven Control, *Proceedings of 59th IEEE Conference on Decision and Control*, 5449/5456 (2020)
 - 44) T. Ohtsuka, K. Cai, and K. Kashima: Data-Informativity for Data-Driven Supervisory Control of Discrete-Event Systems, *Proceedings of 62nd IEEE Conference on Decision and Control*, 6917/6922 (2023)

[著者紹介]

かねこ おさむ
金 子 修 君 (正会員)



1994 年長岡技術科学大学大学院修士課程修了。1999 年大阪大学基礎工学研究科博士後期課程単位取得退学, その後同大学助手, 金沢大学准教授などを経て, 2015 年電気通信大学教授, 現在に至る。博士(工学)。システム制御に関する研究に従事。2012 年本学会論文賞, 2015 年本学会制御部門バイオニア技術賞, 2008 年システム制御情報学会論文賞, 2021 年電気学会学術振興賞・著作賞など受賞。