目標応答追従のためのデータ駆動制御型参照信号整形

桑 原 圭 佑*・池 崎 太 一*

定 本 知 徳*・金 子 修*

Data-driven Reference Governor for the Achievement of Desired Response

Keisuke KUWABARA*, Taichi IKEZAKI*,
Tomonori SADAMOTO* and Osamu KANEKO*

In this paper, we propose a method of shaping a reference signal so that a desired response of an uncertain linear system can be achieved. The signal shaping can be done by using the data-driven control schemes, thereby improving the closed-loop performance without knowing the model. Since the proposed method do not change any closed-loop controllers equipped with the target system, the method is useful for working plants. The effectiveness of the proposed method is shown through an experiment of using a Lego Mindstorm EV3.

Key Words: data-driven control, reference governor

1. はじめに

近年、対象の入出力データを直接用いることで制御器を設計、または制御器のパラメータを更新する、いわゆるデータ駆動制御と呼ばれるアプローチの研究が理論・応用の双方の観点から活発に行なわれている。それらの研究の代表例として Fictitious reference iterative tuning (FRIT)^{1)~3)}や Virtual reference feedback tuning⁴⁾などが挙げられる。これらの特長として1組の実験データのみを用いて制御器を更新するため、時間やコストをかけずに所望の制御器が得られる点が挙げられる。しかし、データ駆動制御の問題点として評価関数の最適化によって得られた制御器を実装した際の閉ループ系の最終的な制御性能だけでなく、安定性についても理論的な保証がないことが挙げられる。

ところで、上記のアプローチは、対象のプラントが実稼働している場合や、リアルタイム性を要求するため制御器がハードウェアとして実装されている場合などにおいては、制御器の再調整が難しく適用が困難である。このような状況において目標値応答へ追従させるアプローチとして、参照信号整形が挙げられる。リファレンスガバナ^{5),6)}は、システムの制約条件を守る範囲で参照信号を整形する機構をモデルベースで設計・実装し、目標応答を達成するために使用されている。し

かし、この手法では大規模システムなどのモデル化が困難なシステムには適用が難しく、現実的な手法とはいえない。

そこで、本論文ではデータ駆動制御の考え方に基づいて参照信号を整形し、目標応答に追従させる手法「データ駆動制御型参照信号整形」を新たに提案する。本手法は、FRIT^{1)~3)}や逆伝達関数補償法⁷⁾などの既存の手法を用いてデータのみから制御器が再設計されたと仮想的に考え、その制御器を用いた出力応答が得られるよう、調整後制御器をもとに参照信号を整形するというものである。この手法の大きな特徴の1つとして、閉ループ系の制御器を変更する必要がないことが挙げられる。通常のデータ駆動制御では入出力データを直接用いて、目標応答を達成する制御器を獲得し、システムに実装することで目標応答追従を達成する。しかし、獲得した制御器は実装した際の閉ループ系の安定性に関しては保証がないため、実装後は閉ループの不安定化や、最悪の場合事故を引き起こすことも想定される。これに対して本手法では、システムに印加する参照信号のみを整形し、閉ループ系の制御器を変更しないので、システムの不安定化を引き起こすことなく目標応答が達成できる。このように、仮想的に設計された制御器を活かしつつ、前述したような実際の制御器変更が困難な状況においても利用できるという点で有用である。さらに本論文では、得られた整形信号を印加した際の最終的な応答と目標応答との誤差解析を与える。この結果に基づき、初期実験データのみから最終的な応答改善度合いを事前に見積もることが可能となる。提案手法の有効性は Lego Mindstorm EV3 を用いた実験により示す。

本論文では、データを用いた制御器設計法を援用する形で参照信号整形を行なうという新しいアプローチを提案してい

* 電気通信大学大学院情報理工学研究科 調布市調布ヶ丘 1-5-1

* Department of Mechanical Engineering and Intelligent Systems Engineering, The University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu

(Received September 30, 2019)

(Revised February 3, 2020)

る。これは、FRIT^{1)~3)}や逆伝達関数補償法⁷⁾などの制御器を設計する既存手法とは目的が異なっている。

本論文の構成は以下のとおりである。2章では問題設定について述べる。3章ではデータ駆動制御の手法を用いて、制御器の獲得が理想的に行なわれた状況を仮定し、獲得した制御器を用いて参照信号整形を行なう手法について説明を行なう。4章では所望の出力応答を厳密に達成する参照信号が得られない状況を想定し、実際に得られる信号との誤差が最終的な応答に与える影響を考察する。5章では提案した手法の有効性を Lego Mindstorm EV3 を用いた実験で検証する。6章ではまとめと今後の課題について述べる。

[表記] 本論文では、伝達関数 $G(s)$ で表わされるシステムに入力時間信号 u を印加したときの出力を簡単のため $G(s)u$ として表わす。文脈から明らかなきは伝達関数 $G(s)$ は単に G と表記する。パラメータベクトル ρ でパラメタライズした伝達関数 $C(s; \rho)$ を $C(\rho)$ と表記する。 $\tau > 0$ が与えられたとき、ある信号 $x(t)$ の有限時間の l_2 ノルムは $\|x(t)\|_{l_2, \tau} := \sqrt{\int_0^\tau x^T(t)x(t)dt}$ と定義する。また、本論文であつかう信号は、特に明記のない限り、すべて同一の時間区間 $[0, \tau]$ 上の有限時間信号であるとする。

2. 問題設定

本論文では、Fig. 1 に示すフィードバック系について考える。制御対象は最小位相系の線形時不変 1 入出力で、その伝達関数を G と表記するが、これは未知とする。制御器 $C(\rho)$ は最小位相の線形制御器とし、パラメータベクトル ρ でパラメタライズされているものとする。本論文では、このパラメトリゼーションを援用して参照信号 r のみを変更することを考える。制御器 $C(\rho)$ 自体は変えないため、現実的に ρ を調整できる必要はないことに注意されたい。制御器 $C(\rho)$ を用いた際の閉ループ系の制御対象の入力を u 、出力を y とし、それぞれ取得可能であるとする。さらに、 r を閉ループ系に印加する参照信号であり、 T_d を r から y までの目標応答の伝達関数とする。このとき、目標とする応答は

$$y_d = T_d r \quad (1)$$

と表わされる。また、制御器 $C(\rho)$ を用いたときの閉ループ系の参照信号から出力までの伝達関数を

$$T(\rho) = \frac{GC(\rho)}{1 + GC(\rho)} \quad (2)$$

として定義する。

本論文では、1章で述べたように、対象システムが稼働している状況や制御器自身がハードウェアとして実装されてい

る状況など、閉ループ系の制御器更新が難しい状況を想定する。このような状況においても出力 y が望ましい出力 y_d に近くなるように、参照信号 r を整形することを考える。これはつぎのように定式化される。

[問題] Fig. 1 のシステムを考え、 G は未知であるとする。この閉ループ系が安定となるパラメータ ρ_0 が与えられているものとする。このとき、事前に与えられた T_d に対して、(1) 式の y_d と

$$y^* = T(\rho_0)r^* \quad (3)$$

が十分近くなるような整形参照信号 r^* を求めよ。

3. 提案手法

本章では提案手法について説明する。本手法ではデータ駆動制御によって獲得した制御器を用いて参照信号 r^* を整形する。はじめにデータ駆動制御によって制御器を獲得するため初期実験を行なう。問題 1 で述べたように事前に与えられたパラメータを用いた制御器 $C(\rho_0)$ を実装している状態で初期実験を行なう。Fig. 1 における入力 u と出力 y の時系列データをそれぞれ u_0, y_0 とする。この初期実験データを用いて、たとえば FRIT^{1)~3)}などのデータ駆動制御のアルゴリズムを用いて制御器を獲得する。これは、(2) 式で表わされる伝達関数 $T(\rho)$ が T_d に近くなるような制御器のパラメータ ρ^* を、入出力データのみを用いたオフライン最適化によって求める方法であり、詳細は文献 1)~3) を参照されたい。理想的に最適化が行なえた場合には

$$T_d = \frac{GC(\rho^*)}{1 + GC(\rho^*)} \quad (4)$$

が成り立つ。まずはじめに、(4) 式が成り立つ状況を想定し、獲得したパラメータ ρ^* を用いた参照信号整形法を述べる。

3.1 参照信号整形による目標応答追従

初期実験での応答と参照信号 r との関係は

$$y_0 = \frac{GC(\rho_0)}{1 + GC(\rho_0)} r \quad (5)$$

として表わされる。また、(4) 式が成り立つ場合、(1) 式の y_d は

$$y_d = \frac{GC(\rho^*)}{1 + GC(\rho^*)} r \quad (6)$$

を満たす。ここで、(3) 式の理想的な整形参照信号 r^* は

$$y_d = \frac{GC(\rho_0)}{1 + GC(\rho_0)} r^* \quad (7)$$

を満たすものである。ここで、(6) 式と (5) 式の差分を取ると

$$\begin{aligned} y_d - y_0 &= \left(\frac{GC(\rho^*)}{1 + GC(\rho^*)} - \frac{GC(\rho_0)}{1 + GC(\rho_0)} \right) r \\ &= \frac{GC(\rho^*) - GC(\rho_0)}{(1 + GC(\rho^*))(1 + GC(\rho_0))} r \end{aligned} \quad (8)$$

を得る。さらに、(5) 式と (7) 式の関係を用いることによって (8) 式は

Fig. 1 Closed-loop system

$$\begin{aligned} r^* - r &= \frac{GC(\rho^*) - GC(\rho_0)}{(1 + GC(\rho^*))(1 + GC(\rho_0))} \frac{1 + GC(\rho_0)}{GC(\rho_0)} r \\ &= \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{(1 + GC(\rho^*))C(\rho_0)} r \end{aligned} \quad (9)$$

として変形できる. (9) 式に (4) 式を代入することにより理想的な参照信号を

$$r^* = r + (1 - T_d) \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} r \quad (10)$$

として得ることができる. このことから以下の定理が成り立つ.

《定理 1》 問題 1 を考え, (4) 式を満たす ρ^* が得られているものとする. このとき, (10) 式の r^* を用いて得られる (3) 式の y^* は, $t \in [0, \tau]$ において $y^*(t) \equiv y_d(t)$ を満たす.

(証明) 上記の議論より明らか.

定理 1 は, (10) 式の r^* が問題の理想的な解であることを主張している. (10) 式には制御対象の伝達関数 G は含まれていないため, 参照信号 r^* を事前に計算することが可能である. (4) 式を満たす理想的な ρ^* が得られない場合の理論的な解析は, 4 章で述べる. 提案手法のアルゴリズムを以下にまとめる.

アルゴリズム 1

Step1

制御器 $C(\rho_0)$ を実装しているシステムで初期実験を行ない, 入出力データ u_0, y_0 を取得する.

Step2

データ駆動制御の手法を用いて目標応答達成する制御器 $C(\rho^*)$ を獲得する.

Step3

(10) 式を用いて, r^* を計算し, 制御器 $C(\rho_0)$ を実装しているシステムに印加する.

3.2 前置補償器による目標応答追従

前節では, データ駆動制御によって獲得した制御器情報 $C(\rho^*)$ を用いて, 目標応答を出力するように r を整形する手法について説明した. しかし, 前節のように r^* を整形する手法では, 初期実験で用いた有限時間長の r を整形しているため r^* もこれに依存した有限時間長の信号となり, 長時間運転を想定する場合には不向きである. このことから, r^* は事前に整形するのではなく, **Fig. 2** のように前置補償器をシステムに付加するほうが都合がよい. そこで, (10) 式を r についてまとめると

$$r + (1 - T_d) \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} r$$

Fig. 2 Closed-loop system with filter

$$= \left(1 + (1 - T_d) \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} \right) r \quad (11)$$

となることから, 前置補償器 F は (11) 式のような伝達特性をもつフィルターとして実装すればよい. このように前置補償器を付加することにより, より扱いやすくなる.

このフィルターの意味について考える. 簡単な計算により, フィルターの伝達関数は

$$\begin{aligned} F &= 1 + (1 - T_d) \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} \\ &= T_d \left(1 + \frac{1}{GC(\rho_0)} \right) \\ &= \frac{T_d}{T(\rho_0)} \end{aligned} \quad (12)$$

のように変形できる. つまり, この前置補償器 F を $C(\rho^*)$ を用いて設計することは, システムの入出力データのみを用いて $\frac{T_d}{T(\rho_0)}$ となるような前置補償器を設計していることに相当している.

(注意) 提案法は $C(\rho^*)$ が与えられたうえで望ましい参照信号を求めるものである. そのため, たとえばデータから閉ループ系を同定してその逆モデルに基づき参照値整形を行なうアプローチとは立場が異なるものであるが, 実用上の観点から, $C(\rho^*)$ の同定も含めたうえで提案法の上記手法に対する優位性を以下で簡潔に議論する. 閉ループ同定に基づくアプローチでは $T(\rho_0)$ を同定するため, $C(\rho^*)$ の同定に比べ次数が異なるため調整または同定にかかるパラメータ数も異なり, 次数の大きい $T(\rho_0)$ の同定計算に時間が掛かってしまう. また, $T(\rho_0)$ の次数が大きい場合は同定入力としての r に必要とされる PE 性が高くなってしまう. さらに, $T(\rho_0)$ の逆システムを用いて前置補償器 F を構成する際にノンプロパーにならないように $T(\rho_0)$ の次数を留意しなくてはならないといった問題点もある. これに対して, 提案法は $T(\rho_0)$ に比べて次数もパラメータ数も少ない $C(\rho^*)$ を求めており, $C(\rho^*)$ を求めるための計算時間が少なくなることが期待できる. また, 初期実験での参照信号 r も自由に設定し印加できるのであれば $C(\rho^*)$ を同定するためにはより低い次数でよく, r に要求される励起能力が低くなることが期待できる. さらに, 前置補償器 F を構成する際に $C(\rho_0)$ と $C(\rho^*)$ の構造が同じ, または, $C(\rho_0)$ の相対次数が零であるなら, F のプロパー性を留意しなくてよい点で優位性があるものと期待できる.

4. 制御器の誤差による影響

前章ではデータ駆動制御が理想的に行なわれた (すなわち (4) 式を厳密に満たす ρ^* が獲得できた) との仮定のもと, これを用いて, 実際の制御器を変更するかわりに参照信号を整形することで目標応答を達成できることを述べた. しかし, 実際のシステムの入出力データにはノイズが印加されていること, また, パラメータベクトル ρ の空間に (4) 式を厳密に満たす ρ^* が存在するとは限らないため, (4) 式は厳密には満たされない. そこで, 本章ではデータ駆動制御によって獲得

した制御器と本来獲得したい理想的な制御器に誤差が存在していると仮定し、その影響について考えていく。

データ駆動制御によって獲得した制御器を $C(\rho^*)$ 、理想的な制御器を C_d とする。このとき、 C_d を実装したシステムの伝達特性は

$$T_d = \frac{GC_d}{1+GC_d} \quad (13)$$

と表わされる。ここで、 $C(\rho^*)$ と C_d の間に誤差があるとす。この誤差を Δ とし

$$C_d = C(\rho^*) - \Delta \quad (14)$$

とする。このとき、(12) 式の F を実装した際の Fig. 2 における r から y までの伝達特性は

$$\begin{aligned} T(\rho_0) \left(1 + (1-T_d) \frac{C_d + \Delta - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} \right) \\ = T(\rho_0) T_d \left(1 + \frac{1}{GC_d} \frac{C_d + \Delta}{C(\rho_0)} \right) \\ = T(\rho_0) T_d \left(1 + \frac{1}{GC(\rho_0)} + \frac{1}{GC(\rho_0)C_d} \Delta \right) \\ = T_d + S_d S_0 G \Delta \end{aligned} \quad (15)$$

となる。(15) 式中、 $S_d := 1 - T_d$ であり、 $S_0 := 1 - T(\rho_0)$ である。ここで、 T_d 、 S_d 、 S_0 、 G は Δ に依存しないことに注意されたい。したがって、データ駆動制御によって獲得した制御器 $C(\rho^*)$ が理想的な制御器 C_d に近づくほど、 Δ に対して 1 次のオーダーで T は T_d に近づくことがわかる。

つぎに、以下の評価関数について考えてみる。

$$J = \|y_d - T(\rho_0)r^*\|_{l_2, \tau} \quad (16)$$

この評価関数を変形すると以下ようになる。

$$\begin{aligned} J &= \|y_d - T(\rho_0)r^*\|_{l_2, \tau} \\ &= \left\| y_d - T(\rho_0) \left(1 + (1-T_d) \frac{C(\rho^*) - C(\rho_0)}{C(\rho_0)} \right) r \right\|_{l_2, \tau} \\ &= \left\| y_d - \left(T_d y_0 + (1-T_d) \frac{C(\rho^*)}{C(\rho_0)} y_0 \right) \right\|_{l_2, \tau} \end{aligned} \quad (17)$$

このように、初期入出力データを使って、評価関数 J の計算を行なうことができる。この評価関数が初期実験での評価関数の値 $J = \|y_d - T(\rho_0)r\|_{l_2, \tau}$ と比べて値が十分小さければ、良好な応答特性が得られるといえる。このことは、得られた整形参照信号を印加する前に良好な応答の把握ができることを示している。また、パラメータ ρ の獲得時において文献 8) で提案されている Virtual Internal Model Tuning を用いることで、(17) 式の評価関数を最小化するような制御器 $C(\rho^*)$ を獲得することができ、その制御器を用いて (10) 式を計算することにより目標応答を達成するような参照信号 r^* を得ることができる。

5. 実機実験による検証

本章では、前章で提案したデータ駆動制御型参照信号整形の

Fig. 3 Lego Mindstorm EV3

Fig. 4 Input data of initial experiment

有効性を実験を通して検証する。実験装置として Lego Mindstorm EV3 を用いた位置決め制御系に対して適用した。実験で使用した Lego Mindstorm EV3 の台車系を Fig. 3 に示す。台車にはタイヤが 4 つ取り付けられており、その内前方の 2 つのタイヤにはモーターが内蔵されている。また、台車の前面には赤外線距離センサが取り付けられており、このセンサによって壁までの距離を取得できるようになっている。制御対象への入力 u は下限値 -100% から上限値 100% で表わされるモータへのトルク指令値、出力 y は台車の移動距離とした。サンプリングタイムは 0.016 秒で実験時間は 20 秒間とした。

はじめに、初期実験では参照信号 r として 0.2 m 移動するステップ信号を印加した。そして、コントローラは以下の

$$C(\rho) = \rho(1) + \rho(2) \frac{1}{s} + \rho(3) \frac{s}{0.1s + 1} \quad (18)$$

で表わされる、PID 制御器を用いた。ただし、制御器の初期パラメータは $\rho_0 = [89.5 \ 54.6 \ 3.0]$ として初期実験を行なった。Fig. 4 および Fig. 5 にこのときの初期入力データ u_0 、初期出力データ y_0 を示す。Fig. 5 に示すように、(18) 式の制御器を用いた閉ループ系の応答は、目標値には収束するものの、オーバーシュートが発生している。また、評価関数の値 $J = \|y_d - T(\rho_0)r\|_{l_2, \tau}$ は $J = 1.4814$ となった。このデータをもとに、提案手法であるアルゴリズム 1 を適用して

Fig. 5 Output data of initial experiment

Fig. 8 Output data with data-driven reference governor

Fig. 6 Updated reference signal by data-driven reference governor

Fig. 7 Input data with data-driven reference governor

所望の出力応答を達成する参照信号を求める。ここでは、目標として、オーバーシュートがなく初期実験より立ち上がりの早い応答となるように目標伝達関数を

$$T_d = \frac{16}{s^2 + 8s + 16} \quad (19)$$

とした。アルゴリズム 1 のステップ 2 では、データ駆動制御の手法を適用しパラメータ ρ^* を獲得する。本実験では FRIT^{1)~3)} を適用し、獲得したパラメータは $\rho^* = [469 \ 8.6 \ 19.9]$ となっ

た。また、(17) 式で示した評価関数の値は $J = 0.7712$ となった。つぎにステップ 3 に基づき r^* を求めた。この信号を Fig. 6 に示す。この整形された参照信号 r^* を初期実験と同じシステムに対して印加する。 r^* を印加した際の入力 u^* 、出力 y^* を Fig. 7, Fig. 8 にそれぞれ示す。この結果から、制御器を変更せず、参照信号を整形することによって目標応答に追従にしていることがわかる。

6. おわりに

本論文では、データ駆動制御の考え方に基いて参照信号を整形することによって、制御器を変更せずに目標応答追従を行なう手法を提案した。また、提案手法の有効性を実機実験で確認した。今回は 1 入出力のフィードバック系に限定した手法を提案したが、今後の課題として多入出力の制御系への適用があげられる。また、3 章の注意で述べた本手法の優位性に関する理論的な解析も今後の課題としてあげられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費基盤研究 (B)16H04384 の補助を受けている。

参考文献

- 1) 相馬, 金子, 藤井: 一回の実験データを用いた制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ—Fictitious Reference Iterative Tuning の提案, システム制御情報学会論文誌, **17**-12, 528/536 (2004)
- 2) O. Kaneko: Data-driven controller tuning: FRIT approach, IFAC Proceedings Volumes, **46**-11, 326/336 (2013)
- 3) 金子 修: データ駆動型制御器チューニング—FRIT アプローチ, 計測と制御, **52**-10, 853/859 (2013)
- 4) M.C. Campi, A. Lecchini and S.M. Savaresi: Virtual Reference Feedback Tuneing: A Direct Method for the Design of Feedback Controllers, Automatica, **38**-8, 1337/1346 (2002)
- 5) A. Bemporad: Reference governor for constrained nonlinear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, **43**-3, 415/419 (1998)
- 6) E.G. Gilbert, I. Kolmanovsky and K.T. Tan: Nonlinear control of discrete-time linear systems with state and control constraints: A reference governor with global convergence properties, Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control, 144/149 (1994)
- 7) 森本, 平尾, 市田, 佐藤, 加賀, 小川: 逆伝達関数制御法を用い

たレーザ加工機の位置決め制御, 精密工学会誌, **67-4**, 602/606 (2001)

- 8) 池崎, 金子: 閉ループ系出力データに基づく制御器パラメータチューニングの新しいアプローチ, 電気学会論文誌 C, **139-7**, 780/785 (2019)

=====

[著 者 紹 介]

桑 原 圭 佑

2018 年電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業, 同年同大学大学院情報理工学研究科機械知能システム工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る. データ駆動制御に関する研究に従事.

池 崎 太 一 (学生会員)

2018 年電気通信大学情報理工学部知能機械工学科卒業, 同年同大学大学院情報理工学研究科機械知能システム工学専攻博士前期課程入学, 現在に至る. データ駆動制御に関する研究に従事.

定 本 知 徳 (正会員)

2011 年東京工業大学理工学研究科機械制御システム専攻修士課程卒業, 同年住友重機械工業 (株) 入社, 2013 年東京工業大学情報環境学専攻博士課程に進学, 2015 年同研究科博士課程修了. 2015~2016 年スウェーデン王立工科大学客員研究員. 2016 年東京工業大学工学院システム制御系の CREST 研究員, 2016~2018 年特任助教. 2018 年より電気通信大学大学院機械知能システム学専攻の助教となり, 現在に至る. システム制御情報学会, IEEE の会員.

金 子 修 (正会員)

1994 年長岡技術科学大学大学院工学研究科修了. 同年から 96 年まで石川島システムテクノロジー (株) 勤務, 99 年大阪大学基礎工学研究科博士後期課程単位取得退学, 同年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 2007 年同助教, 2009 年金沢大学理工学研究域准教授を経て, 2015 年電気通信大学大学院情報理工学研究科教授, 現在に至る. 2008 年システム制御情報学会論文賞・砂原賞, 2012 年計測自動制御学会論文賞, 2015 年同学会制御部門パイオニア技術賞を受賞. 博士 (工学). 制御理論とその応用の研究に従事. 日本機械学会, IEEE の会員.

=====