

データ駆動型アプローチによるスキルベースト PID コントローラの設計

森 慎之助

(2007年10月4日受理)

Design of a Skill-Based PID Controller Using Data-Driven Approach

Shinnosuke Mori

Abstract. Recently, lots of works for representing human skills which are cultivated in long experiences have been reported. The technique for representing human skills plays an important role in various industries, for example, manufacturing systems, production systems and process systems. In this paper, a skill-based PID controller is newly proposed, which extracts skills of human experts as PID gains. This controller is designed by using a data-driven(DD) control approach. The DD approach is based on the local modeling, and recently attracted attention as a useful tool to express the nonlinear function. The effectiveness of the proposed skill-based PID control scheme is experimentally investigated by employing for a pilot-scale helicopter model.

Key words: human skill, skill-based control, PID control, mechanical systems, adaptive and learning control

キーワード：ヒューマンスキル、スキルベースト制御、PID制御、メカニカルシステム、適応学習制御

1. はじめに

生産加工プロセスなどにおいては、巧みな熟練技術を有する作業者が年々不足している傾向にあると言われている。とくに、団塊の世代の退職により、今まで培ってきた技術やノウハウなどが継承されず、システムの維持・管理が困難になる、いわゆる2007年問題が、昨今指摘されている。その一方で、熟練技術を必要とされる作業は、比較的好ましくない作業環境で行われていることが多いように思われる。したがって、このような現状を考えると、人間の熟練技術（ヒューマンスキル）を、コントローラとして実現する設計法についての考察が必要となってくると考えられる。

本論文は、課程博士候補論文を構成する論文の一部として、以下の審査委員により審査を受けた。

審査委員：山本 透（主任指導教員）、番匠谷薫、

田島俊造、前原俊信、籾元孝夫（工学研究科）

Liuらはヒューマンスキルに基づく学習制御手法を開発し、機械加工用ロボットに適用したことを報告している¹⁾。

ヒューマンスキルは一種の非線形システムとして捉えることができる。これまでに、ニューラルネットワーク²⁾を用いた非線形コントローラの設計法が、数多く提案されている³⁾⁻⁵⁾。ニューラルネットワークは脳機能に見られるいくつかの特性を計算機上のシミュレーションによって表現することを目指した数学モデルである。パターン認識、音声認識や非線形系に対する制御系設計など様々な分野において用いられている。ところで、ニューラルネットワークのようなノンパラメトリックモデルは、その内部がブラックボックスとなり、実用の妨げとなる可能性が高いと考えられる。モデリングにおいて、制御対象の高精度化も重要な要素であるが、その表現方法（例えば、数学モデル）も非常に重要な要素であると思われる。

一方、近年のコンピュータ技術の進展により、大量

のデータの記憶と高速な書き込み、読み出しおよび検索が可能となった。これにともない、新しいデータが得られるたびにデータの保存が容易になり、データベースの構築が可能となった。このデータベースを基に、要求に応じて過去に蓄積された大量のデータからその要求点に類似したものを近傍として取り出し、これらの近傍データを用いて局所モデルを作成するデータ駆動型アプローチ^{6),7)}が提案された。データ駆動型アプローチは Just-In-Time^{8),9)}, Lazy Learning^{10),11)}, Model-on-Demand¹²⁾, Memory-Based Method¹³⁾ などと呼ばれている。とくに、非線形システムに対してモデリングが行えることから、近年注目を集めている。

本論文では、ヒューマンスキルをデータ駆動型アプローチを用いて実現する新たな制御方法を提案する。具体的には、ヒューマンスキルをPID制御器で実現するものである。先にも述べたように、ヒューマンスキルは非線形性を有しているため、異なる目標値や、過渡状態・定常状態においてPIDパラメータは可変となる。ここでPID制御器としてヒューマンスキルを実現する理由は、以下の通りである。

- [1] 積分動作による区分的に一定な目標値への追従性が保証される。
- [2] PIDゲインは物理的な意味を有しているため、ヒューマンスキルをPIDゲインで抽出することで、制御工学的観点からヒューマンスキルの解釈が可能となる。

最後に、本手法の有効性を検証するために、ヘリコプタモデルに適用し、その制御結果について検討する。とくに、抽出されたPIDパラメータから、ヒューマンスキルの特徴についても言及する。

2. データ駆動型スキルベーストPIDコントローラ

本論文で構成するデータ駆動型スキルベーストPID制御系の概要を図1に示す。図中の r および y はそれぞれ、参照入力およびシステム出力を表している。また、 Δu は制御入力の差分であり、 $\Delta u = u(t) - u(t-1)$ である。データ駆動型アプローチに基づくスキルベーストPIDパラメータの調整法の手順を以下に示す。ただし、すべてオフラインで実行する。

[Step 0] スキルデータの作成

熟練技術者によるスキルデータとして、制御入力 $u^*(t)$ 、システム出力 $y^*(t)$ 、および設定目標値 $r(t)$ を収集する。

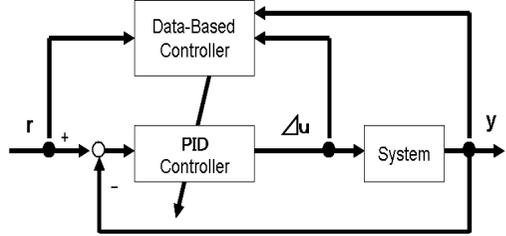


図1 データ駆動型スキルベーストPID制御系

[Step 1] 初期PIDパラメータの算出

スキルデータ $u^*(t)$ と次式のPID制御則 $u(t)$ の偏差の分散を最小とするPIDゲイン(K_P, K_I, K_D)を最小2乗法を用いて算出する。

$$\begin{aligned} \Delta u(t) = & K_P \{y^*(t-1) - y^*(t)\} \\ & + K_I \{r(t) - y^*(t)\} \quad \dots (1) \\ & + K_D \{2y^*(t-1) - y^*(t) - y^*(t-2)\} \end{aligned}$$

なお、定常データが多くなりすぎると、過渡特性を実現するPIDゲインが得られにくいことから、最小2乗法を適用する際には、定常データを適切に削除する。

[Step 2] 初期データベースの作成

スキルデータと最小2乗法を用いて算出したPIDパラメータを次式のように対にして、初期データベースを作成する。

$$\Phi(j) = [\phi(j), K(j)], \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad \dots (2)$$

ただし、 $\phi(j)$ と $K(j)$ は、次式により定義される。

$$\begin{aligned} \phi(j) := & [y^*(j), y^*(j-1), \dots, y^*(j-n_y), \\ & u^*(j-1), u^*(j-2), \dots, u^*(j-n_u), \\ & r(j), r(j-1), \dots, r(j-n_r)] \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$K(j) := [K_P(j), K_I(j), K_D(j)] \quad \dots (4)$$

ここで、 $\phi(j)$ は情報ベクトルと呼ばれ、熟練技術者を表すために必要とされる入出力データ、ならびに目標値を要素とするベクトルである。なお、 n_y 、 n_u 、および n_r はそれぞれの信号の次数を表している。ここで、各次数は $n_y=1$ 、 $n_u=2$ 、 $n_r=1$ である。

一方、 $K(j)$ は、 j 番目の情報ベクトルに対するPIDパラメータベクトルを表している。ただし、初期データベースにおけるPIDパラメータは、すべて一定である。

[Step 3] PIDパラメータの算出

データ駆動型アプローチにより、PIDパラメータを算出する。まず、次式により要求点 $\bar{\phi}$ とデータベースに保存されている情報ベクトル $\phi(j)$ との距離 d を計算する。

$$d(\bar{\phi}, \phi(j)) = \sqrt{(\phi(j) - \bar{\phi})^T (\phi(j) - \bar{\phi})} \quad \dots (5)$$

次に、すべての情報ベクトルに対して計算された距離において、その値が小さいものから K 個の情報ベクトルを近傍として選択する。さらに、要求点近傍の K 個の情報ベクトルを用いて、次式によりPIDパラメータを求める。

$$K(t) = \sum_{i=1}^k \omega_i K(i), \quad \sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad \dots (6)$$

ここで、 ω_i は、選択された近傍における第 i 番目の情報ベクトル $\phi(j)$ に対する重みであり、次式で求められる。

$$\omega_i = \frac{1/d_i}{\sum_{j=1}^k 1/d_j} \quad \dots (7)$$

ただし、 d_j は $d(\bar{\phi}, \phi(j))$ を意味している。

[Step 4] PIDパラメータの更新

熟練技術者による操作量に精度良く追従させるために、次式の最急降下法によりPIDパラメータを更新する。

$$K(t) \leftarrow K(t) - \eta \frac{\partial J(t)}{\partial K(t)} \quad \dots (8)$$

ここで、 η は学習係数を表している。また、 J は次式で定義される誤差の評価規範を表している。

$$J(t) = \frac{1}{2} \{u^*(t) - \hat{u}(t)\}^2 \quad \dots (9)$$

上式において、 $\hat{u}(t)$ は[Step3]で得られたPIDパラメータを用いて計算された制御入力である。上式は、計算により求められた制御入力 $\hat{u}(t)$ が実際のスキルデータ $u^*(t)$ との間の偏差を減少させるように、PIDパラメータを修正することを意味している。具体的に(8)式は、次式として計算される。

$$\left. \begin{aligned} K_P(t) &\leftarrow K_P(t) \\ &\quad + \eta_1 \{y(t-1) - y(t)\} \varepsilon(t) \\ K_I(t) &\leftarrow K_I(t) \\ &\quad + \eta_2 \{r(t) - y(t)\} \varepsilon(t) \\ K_D(t) &\leftarrow K_D(t) + \eta_3 \{2y(t-1) \\ &\quad - y(t) - y(t-2)\} \varepsilon(t) \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

ただし、

$$\varepsilon(t) := u^*(t) - \hat{u}(t) \quad \dots (11)$$

である。なお、(8)式のPIDパラメータの更新は、1ステップあたり M 回実行するものとする。

[Step 5] 不要なデータの削除

更新されたPIDパラメータと情報ベクトルと対にしてデータベースに格納する。また、データベース内のデータ数が多くなると計算コストが大きくなるので、必要に応じて冗長データを削除する。(9)式の評価値が十分小さくなるまで、[Step3] ~ [Step5]の手順をオフラインで繰り返す。これにより、データ駆動型スキルベーストPIDコントローラが構築される。

3. ヘリコプタモデルによる検証

3.1. 実験システムの概要

データ駆動型スキルベーストPIDコントローラの有効性を検証するために、図2に示すヘリコプタモデルに提案手法を適用する。方位角および仰角を測定するため、ロータリーエンコーダをそれぞれ設置している。本実験では仰角は一定、すなわちメインロータについては一定の入力値を与え、方位角(回転角)のデータのみを採取するため、テールロータの入力値を変化させた。データの採取は、所定の目標値および時間を設定し、ヘリコプターの機体を移動させる方法で行った。データの測定間隔は200 [ms]である。

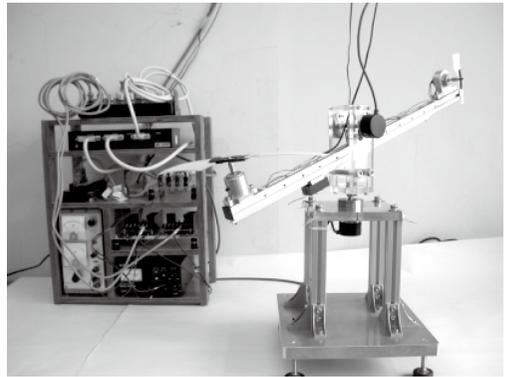


図2 実験システムの概要

3.2. 実験結果

まず、方位角の制御をジョイスティックにより操作し、その際の入力信号 $u^*(t)$ と、それに対応する出力信号(方位角) $y^*(t)$ 、ならびに目標値 $r(t)$ を採取した。その入出力データを図3に示す。上段には出力信号を、下段には入力信号を示している。

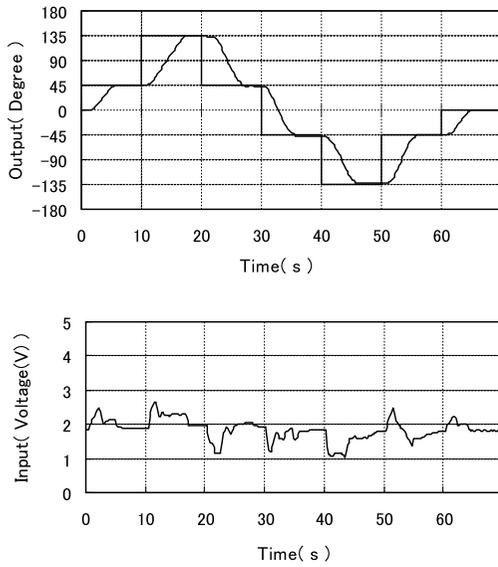


図3 熟練技術者によるスキルデータ

次に、先に示したアルゴリズムの [Step1] として、初期PIDゲインを最小2乗法により算出した。そのゲインは、それぞれ $K_p=0.132$, $K_I=0.007$, $K_D=0.158$ であった。このPIDパラメータ(固定)による制御結果を図4に示す。

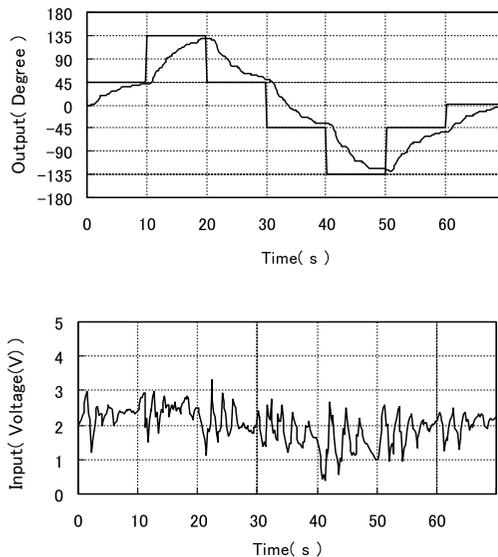


図4 初期PIDゲインによる制御結果

さらに、上述のPIDゲインと入出力データ(スキルデータ)を対にしてデータベースに格納し、データ駆動型スキルベースPID制御法を適用した。ただし、データベース中のデータ数 $N=350$ 、抽出する近

傍数 $k=10$ 、1ステップ中のPIDパラメータ更新回数 $M=1500$ 、学習係数 $\eta_1=1.0 \times 10^{-5}$ 、 $\eta_2=1.0 \times 10^{-7}$ 、 $\eta_3=1.0 \times 10^{-5}$ である。

3回(3エポック)の学習を行った時の制御結果を図5に示す。また、図6には、これに対応するPIDゲインの算出結果を示す。

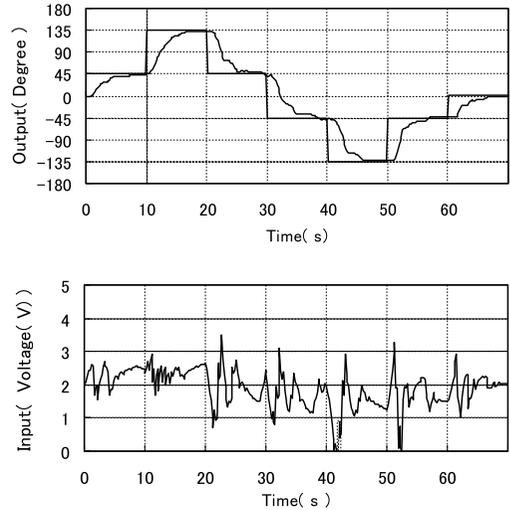


図5 提案手法による3回学習後の制御結果

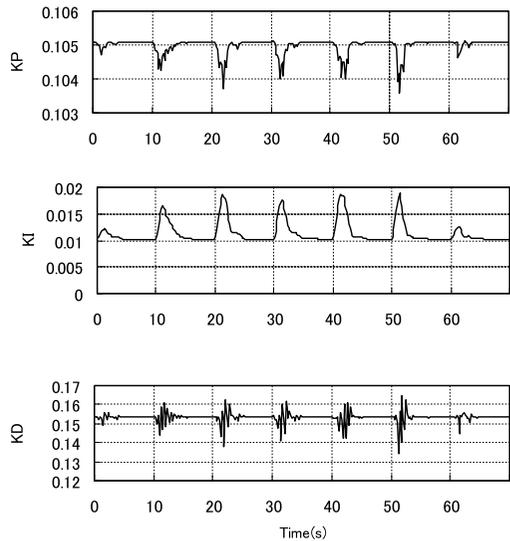


図6 図5に対応したPIDパラメータの算出

これまで、同様の考察をニューラルネットワークを用いて行ったが、望ましい制御結果を得るまでには、かなりの学習負荷が必要である¹⁴⁾。本提案手法によると、制御入力に高周波成分を含んでいるが、制御応答で、熟練技術者による制御応答と概ね同程度の制御結

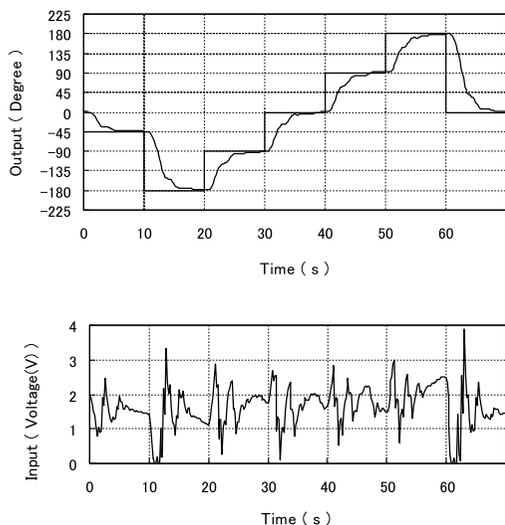


図7 未学習目標値に対する制御結果

果が得られている。このように少ない計算コスト（学習負荷）で、スキルベースコントローラが実現できることが、提案手法の大きな特徴である。

一方、図6のPIDゲインの算出結果からは、目標値変更の際に積分動作が強められ、逆に安定性を確保する意味で比例動作が弱められている様子が伺える。追従性と安定性の双方を考慮しているもので、一般的に考えて妥当であると考えられる。このように、ヒューマンスキルをPIDパラメータで抽出したことで、ヒューマンスキルを制御工学的観点から解釈することが、多少ではあるが可能となる。

最後に、未学習目標値に対する提案手法の汎化性について考察する。先ほどの3回の学習後のデータベースを基に、未学習目標値を含んだ参照信号に対する制御結果を図7に示す。また、図8には、これに対応するPIDゲインの算出結果を示す。図7から、未学習の目標値に対しても、概ね良好な制御結果が得られている。このように、コントローラとしてPID制御器を採用したことで、例え未学習であっても、区分的に一定な目標値に対する追従性が実現されている。この点も提案手法の特徴の一つである。

4. まとめ

本論文では、ヒューマンスキル（熟練技術）をデータ駆動型アプローチを用いて実現するスキルベースPIDコントローラ的设计法を提案した。さらに、本手法の有効性を検証するために、メカニカルシステムの一つであるヘリコプタモデルに適用し、その制御結果に

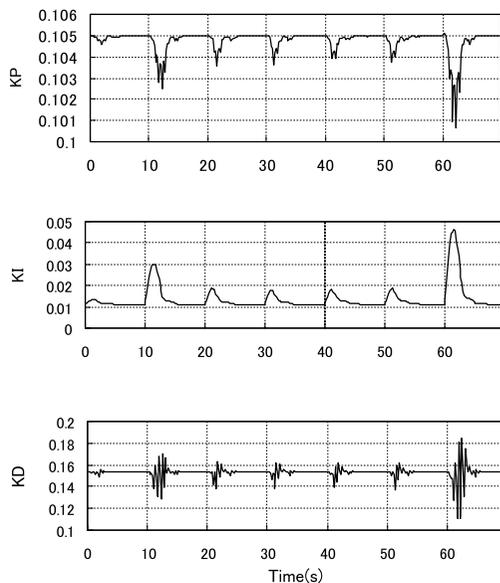


図8 図7に対応したPIDパラメータの算出

ついて検討を行った。

本手法の主たる特徴は以下のようにまとめられる。

- [1] データ駆動型アプローチにより、少ない学習負荷によって、スキルベースコントローラを実現することができる。
- [2] コントローラをPID制御器とし、ヒューマンスキルをPIDゲインとして抽出することで、制御工学的観点からヒューマンスキルの解析を行うことが可能である。
- [3] PID制御器を採用したことで、積分動作によって区分的に一定な目標値への追従性が保証され、未学習の目標値に対しても、概ね良好な制御結果を得ることができる。

ヘリコプタモデルの制御については、これまで、制御理論の有効性を検証する立場から議論されている¹⁵⁾⁻¹⁷⁾。しかし、本論文で提案したようなヒューマンスキルをコントローラとした実現やインテリジェント制御の観点からの考察は、著者の知る限りにおいて行われていない。

本論文では、ヘリコプタモデルへの適用結果を通して、データ駆動型スキルベース制御も、メカニカルシステムを制御する上で有効な制御手法の一つであることを示した。

最後に、本研究の実験装置を作製するにあたり、岡山大学工学部井上昭先生、Deng Mingcong 先生に有益なご助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) S. Liu and H.Asada: Adaptive Control of Deburring Robots Based on Human Skill Models, *Proc. of 30th Conference on Decision and Control*, pp.348-352 (1991)
- 2) S. Haykin: Neural Networks, *Macmillan College Publishing Company* (1994)
- 3) K. S. Narendra, and K. Parthasarathy: Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks, *IEEE Trans. on Neural Networks*, Vol.1, No.1, pp.4-27 (1990)
- 4) M. M. Gupta and D. H. Rao: Neuro-Control Systems Theory and Applications, *IEEE Press* (1993)
- 5) S. Omatu, K. Marzuki and Y. Rubiyah : Neuro-Control and Its Applications, *Springer-Verlag* (1995)
- 6) 太田純, 山本茂:「PID 制御器のデータベース駆動型チューニング」, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.6, pp.664-669 (2004)
- 7) K. Takao, T. Yamamoto and T. Hinamoto: Design and Experimental Evaluation of a Data-Based Self-Tuning PID Controller, *Proc. of IFAC World Congress*, Prague (2005)
- 8) A.Stenman, F. Gustafsson and L. Ljung: Just in Time Models for Dynamical Systems, *Proc. of 35th Conference on Decision and Control*, pp.1115-1120 (1996)
- 9) 劉秋宝, 木村英紀:「Just In Time モデリングの新しい手法とその圧延セットアップモデルへの応用」計測自動制御学会論文集, Vol.37, No.7, pp.640-646 (2001)
- 10) J. Zhang, Y. Yim and J. Yang: Intelligent Section of Instances for Prediction Functions in Lazy Learning Algorithm, *Artificial Intelligence Review*, Vol.11, pp.175-191 (1997)
- 11) G. Bontempi, M. Birattari and H. Bersini: Lazy Learning for Local Modeling and Control Design, *Int. J. of Control*, Vol.72, No.7-8, pp.643-658 (1999)
- 12) A. Stenman: Model on Demand Algorithms, Analysis and Applications, *PhD Thesis, Dept. of Electrical Engineering, Linkoping University* (1990)
- 13) 高尾健司, 山本透, 籾元孝夫:「Memory-Based 型 PID コントローラの設計」, 計測自動制御学会論文集, Vol.40, No.9, pp.898-905(2004)
- 14) M. Kato, T. Yamamoto and S. Fujisawa: A Skill-Based PID Controller Using Artificial Neural Networks, *Proc. of int.Conf. on Computer Intelligence for Modeling, Control and Automation*, Vienna, pp.702-707 (2005)
- 15) 井村順一, 家木浩二, 佐伯正美, 和田泰徳:「動的フィードバックによる厳密な線形化法を用いたツインローターヘリコプターモデルの基礎実験」, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.66, No.648, pp.160-167 (2000)
- 16) A. T. Kutay, A. J. Calise, M. Idan, and N. Hovakimyan: Experimental Results on Adaptive Output Feedback Control Using a Laboratory Model Helicopter, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.13, No.2, pp.196-202 (2005)
- 17) A.Inoue, M.Deng, S.Nakao, T.Harima and N. Ueki: Combined Adaptive and Non-Adaptive Attitude Control of a Helicopter, *Proc. of SICE Annual Conference*, pp.2217-2221 (2005)