周波数領域型学習アルゴリズムを用いた力制御に関する一評価†

下 中 賢*・真 鍋 哲 也*・山 田 孝 行*・藪 田 哲 郎*

An Evaluation on Force Control Using Learning Control Algorithm in Frequency Domain

Ken SHIMONAKA*, Tetsuya MANABE*,
Takayuki YAMADA* and Tetsuro YABUTA*

This paper presents comparison between a frequency domain learning control algorithm and a time domain learning control algorithm using a force control servo system with one degree of freedom. Results show that the frequency domain learning control guarantee a uniform convergence.

Key Words: learning control, frequency domain, time domain, force control

1. はじめに

学習制御は、内山¹⁾により先駆的な研究が行われ、有本²⁾らにより理論的な解析が進められるなか、様々な学習制御方法が提案された。それらは、主に、時間領域型主体のアルゴリズムとして検討されてきた。その中で、美多³⁾は、学習制御方法の周波数領域における解析を行っている。提案された学習則の特徴は、学習オペレータとしてフィルタを用いていることである。鈴木⁴⁾は、線形近似系に対するパルス伝達関数を用いた解析によってマニピュレータに対する離散時間学習制御系の安定性についてシステム論的に検討を行っている。また、山本⁵⁾は、一般の線形時不変系に対し、学習の収束性について周波数領域における解析を行い、高周波成分を多く含む滑らかでない目標軌道関数に対する学習の収束性について興味深い結果を示している。著者らは、周波数領域型主体のアルゴリズムに興味をもち、周波数領域における入力更新を行うために、離散フーリエ変換を用いた局所線形化システムに基づく学習制御方法を提案し、シミュレーションによりその有効性を確認してきた^{6)~8)}。美多、鈴木、山本らの方法は、学習オペレータを設計する際に制御対象に関する情報が必要であるため、制御対象が未知パラメータを含んでいる場合や制御対象の特性・物理量が変化した場合には、再度、学習オペレータを設計し

直す必要がある。これに対し、本論文で用いた学習制御方法の特徴は、アルゴリズム的には、制御対象の先見情報を必要とせず、制御対象の局所内部モデルを実際の入出力情報から獲得して、自律的な学習オペレータの決定を行えることにある。また、周波数領域型の特徴としては、各周波数成分の誤差を一様に抑制するため、学習回数に従って一様な収束を期待できることである。本論文では、周波数領域型の学習制御アルゴリズムの特徴を解明するために、ロボットの基盤技術である力制御サーボ系を対象にして、時間領域型学習制御アルゴリズムとの比較を行った。

2. 周波数領域型学習制御方法

時間領域型と周波数領域型アルゴリズムの定義は、制御対象への制御入力の更新方法に着目して、制御入力の更新を時間領域において行うものを時間領域型、周波数領域で行うものを周波数領域型と定義する。著者らの提案する周波数領域型学習アルゴリズムを SISO 離散時間システムに応用した場合について簡単に説明する。

Fig. 1 に本学習制御法のブロック線図を示す。初期入力

Fig. 1 Block diagram of Learning Control

† 第 10 回日本ロボット学会学術講演会で発表 (1992・10)

* NTT(株) フィールドシステム研究開発センタ 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

* NTT Telecommunication Field Systems R & D Center, Naka-Gun, Ibaraki

(Received January 20, 1993)

(Revised May 26, 1993)

u^1 および u^2 を与え、そのときの目標軌道 y_d に対する誤差 e^1 および e^2 を獲得する。ただし、添え字は試行回数を示しており、 u^1 は 1 回目の試行時の入力データ列を示している。入力・出力に離散フーリエ変換を行い、次の試行における入力をつぎの更新式(1)式より求める^{9)~9)}。

$$U^{k+1} = U^k + A^k E^k \quad (1)$$

ただし、

$$A^k = \text{diag} [\dots, -(U_i^k - U_i^{k-1})\theta_i / (E_i^k - E_i^{k-1}), \dots] \\ (i=0, 1, 2, \dots, N-1) \quad (2)$$

$$U^{k+1} = [U_0^{k+1}, U_1^{k+1}, \dots, U_{N-1}^{k+1}]^T \in C^N$$

$$U^k = [U_0^k, U_1^k, \dots, U_{N-1}^k]^T \in C^N$$

$$E^k = [E_0^k, E_1^k, \dots, E_{N-1}^k]^T \in C^N$$

U^{k+1} は $k+1$ 回目の試行における入力 u^{k+1} の離散フーリエ変換、 U^k も同様に k 回目の試行における入力 u^k の離散フーリエ変換、 θ_i は安定な誤差減少を得るためのゲイン、 A^k は k 回目の学習オペレータ、 E^k は k 回目の試行における目標軌道追従誤差 e^k の離散フーリエ変換である。次の入力 U^{k+1} に離散フーリエ逆変換を行い時間領域における実際の制御入力 u^{k+1} を求め実際の試行を行う。

3. 1 自由度力制御サーボ系

Fig. 2 に 1 自由度力制御サーボ系の概略を示す。サーボモータは、減速機を介して対象物と接触し、接触力 F は、力センサにより測定される⁹⁾。また、Fig. 3 に 1 自由

Fig. 2 Experimental setup

Fig. 3 Block diagram of Control system

度力制御系に適用したブロック線図を示す。制御則は、(3)式の構造を有するもので、学習制御で得られるフィードフォワード項と比例制御から構成されるフィードバック項から構成される。 $F_d(l)$ は与えられた力の l 時刻目の目標軌道値、 $F_s^{k+1}(l)$ は試行 $k+1$ 回目の力センサの l 時刻目の出力値、 k_{fb} はフィードバックゲイン、 $e^{k+1}(l)$ は目標軌道と力センサの出力との差であり、 $v(l)$ を制御対象への入力とした。

$$v(l) = u^{k+1}(l) + k_{fb} e^{k+1}(l) \\ = u^{k+1}(l) + k_{fb} \{F_d(l) - F_s^{k+1}(l)\} \quad (3)$$

4. 誤差収束性の比較

前章で示した周波数領域型学習アルゴリズムの特徴を解明するために 1 自由度力制御サーボ系を用いて、時間領域型学習制御と周波数領域型学習制御における誤差の収束性について実験値により比較を行った。

4.1 周波数領域型学習制御による実験

まず最初に、本方法を Fig. 2 に示す 1 自由度力制御サーボ系に対して適用したときの実験結果について示す。実験は、力センサが対象物に接触して 0.5 kg となったときにサーボを開始して、与えられた目標軌道に追従するように制御を行った。対象物はアルミ合金の板を用いた。目標軌道の最終接触力は 1.5 kg である。サンプリング数は $N=256$ 、試行は 30 回行った。また、各試行時の学習ゲイン θ は、対象システムのバンド幅を考慮して、遮断周波数 10 Hz の FIR フィルタと等価になるように設定した。Fig. 4 に目標軌道と試行 3 回目までの実験結果を示す。また、Fig. 5 に各試行における誤差のパワースペクトルを示す¹⁰⁾。学習過程が進むにつれて誤差の高周波数成分が減少して行くのがわかる。

4.2 時間領域型学習制御との比較

今回、比較に用いた時間領域型学習制御は、文献 1) で

Fig. 4 Learning result (experimentation)

提案されている時間進み型学習制御である。時間進み型学習制御の入力更新式は、次式で定義される。

$$u^{h+1}(t) = u^h(t) + \gamma e^h(t+h) \quad (5)$$

ただし、 γ は正定数学習ゲイン、 h は時間進め量である。また、目標軌道とフィードバックループについては、周波数領域型アルゴリズムと同一条件を用いた。Fig. 6 に両者の誤差減少の様子を示す。時間領域型の場合、試行初期では誤差が減少しているように見えるが最終的には誤差増加傾向を示している。これに対して周波数領域型では、試行回数が増加しても安定した収束状態を維持している。Fig. 7 に時間領域型の各試行に対する誤差のパワースペクトルを示す。先程の Fig. 5 および Fig. 7 を見

てわかるように、時間領域型では、試行回数が増加しても誤差の高周波数成分が残留している。これに対して周波数領域型では、試行回数の増加に伴い誤差の高周波数成分が減少する傾向にある。以上の結果から時間領域型の試行後期における誤差の増加傾向は、周波数領域における誤差の高周波数成分の残留が影響していることがわかる。また、周波数領域型の場合は、周波数領域において学習オペレータ A^k を毎回自律的に更新し、かつ学習ゲイン θ により、誤差の原因となる高周波数成分をカットしているため安定した誤差の収束状態を維持することができると考えられる。

5. ま と め

本論文では、周波数領域型の特徴を解明するために 1 自由度力制御サーボ系を用いて、時間領域型学習制御との比較の観点から実験を行った。その結果、周波数領域型学習制御方法の場合、試行過程が進んでも誤差の高周波数成分が残留せず安定した誤差の収束状態を維持することがわかった。

最後に、本研究を進めるにあたり、ご指導頂いたフィールドシステム研究開発センタ涌井所長ならびに同センタ光通信線路研究部川瀬部長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 内山 勝：試行による人工の手の高速運動パターン形成，計測自動制御学会論文集，14-6，706/712 (1978)
- 2) 有本 卓：ロボットの力学と制御，システム制御情報学会編，朝倉書店，162/191 (1990)
- 3) 美多，加藤，青木：反復制御とロボットアームの軌道制御への応用，計測自動制御学会論文集，21-11，87/94 (1985)
- 4) 鈴木，安江，大熊，内川：ロボットマニピュレータの離散時間学習制御法，日本ロボット学会誌，8-2，179/187 (1990)
- 5) 山本 裕：線形系に対する学習制御の収束条件について，計測自動制御学会論文集，24-12，1331/1333 (1988)
- 6) T. Manabe and F. Miyazaki: Learning Control based on Function Iteration Method, Proc. of 1990 Japan-U. S. A Symposium on Flexible Automation, Kyoto, 631/634 (1990)
- 7) T. Manabe and F. Miyazaki: Learning Control based on Local Linearization by using DFT, Proc. of 1991 IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robot and Systems, Osaka, 639/646 (1991)
- 8) T. Manabe, T. Yamada and T. Yabuta: Learning Control based on Local Linearization by using DFT in the consideration of Linearization Errors, Proc. of 1992 IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems '92 Kobe, Kobe, 47/52 (1992)
- 9) 山田，ほか：非線形力制御サーボ系のむだ時間補償，計測自動制御学会論文集，24-1，98/100 (1988)
- 10) 下中，真鍋，山田，藪田：周波数領域型学習アルゴリズムを用いた力制御実験，第 10 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，165/166 (1992)

Fig. 5 Power spectrum of the error at each trial stages (experimentation)

Fig. 6 Comparison of convergence rates of Time domain type and Frequency domain type

Fig. 7 Power spectrum of the error at each trial stages of Time domain type