

運動誤差を考慮した電子回路小脳モデルの構築に対する一検討

A study on Construction of a Hardware Cerebellum Model Considering Motion Error

○近藤宏樹¹, 山口拓人², 佐伯勝敏³, 佐々木芳樹³*Hiroki Kondoh¹, Takuto Yamagucgui², Katsutoshi Saeki³, Yoshiki Sasaki³

Abstract : In this paper, we construct a cerebellar hardware model based on feedback error learning. As a result, it is clarified that the firing state of Purkinje cells can be changed by changing the information transfer efficiency of the parallel fibers in the proposed model when motion errors occur.

1. まえがき

我々が、自転車に乗るなどの道具を伴う運動を習得するとき、何回も試行を繰り返し習得する。これは、試行を繰り返すうちに、小脳が、人間が操作している物体のダイナミクスを獲得、すなわち、物体の内部モデルを学習したためであるといわれている。この小脳機構に倣った自律的な学習則の一つとして、川人らに提唱されたフィードバック誤差学習が存在する^{[1][2]}。

今回、フィードバック誤差学習を基に、小脳モデルを電子回路にて構築し、低自由度の制御対象に対して、単純な運動をさせた実現運動軌道を用い、小脳モデル内の平行線維モデルの情報伝達効率を変化させることで、プルキンエ細胞モデルが発火可能であるかについて検討を行った。

2. 本論

Fig. 1 にフィードバック誤差学習のブロック図を示す。図中、破線は実現運動のフィードバック信号を表している。実現運動軌道は、目標運動軌道に対して、大脳に記憶されている生体の内部モデルからの制御信号および、運動を繰り返すことで小脳で学習される小脳内の STDP モデルからの補正信号から決定する。ここで、小脳内の STDP モデルは、運動を繰り返す際に目標運動軌道と実現運動軌道から、STDP 機構によって学習される^[3]。今回、実測した目標運動軌道に対する実現運動軌道のデータをもとにしているため、制御対象およびフィードバック信号と小脳モデルは切り離している。

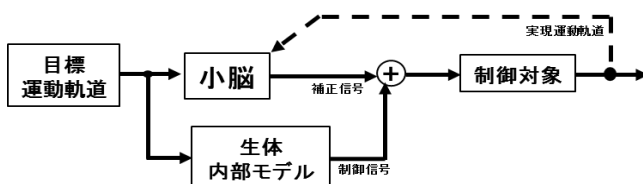


Fig. 1 Block diagram of feedback error learning

制御対象には、3Dプリンタで作成したモータ駆動の棒状の物体を使用した。目標運動軌道に対し、実現運動軌道に誤差を生じさせるため、制御対象に重りを装着して物体操作時を想定した。そして、重りなし状態の制御対象が0.38秒間で水平状態からモータによって90°回転し、垂直状態になる過程を目標運動軌道とした。

Table 1 に制御対象が目標運動を行うのにかかった時間と、その際にモータにかけた直流電流の実測データを示す。表中、重りなしは物体非操作時の制御対象、重りありは重りを装着させた際の制御対象、運動初期は、小脳モデルからの補正信号が出力がされていない状態を想定した実測データ、目標運動は、小脳モデルから補正信号が出力され目標運動を行えている状態を想定した実測データを表している。同表から、制御対象が重りを装着した、運動初期では目標運動軌道に対し、実現運動軌道には0.58秒の誤差が生じており、目標運動を行うには0.11Aの補正が必要であることがわかる。

Table 1 Experimental measurement data

	重りなし	重りあり運動初期	重りあり目標運動
電流[A]	0.47	0.47	0.58
時間[s]	0.38	0.96	0.38

Fig. 2 に Fig. 1 中の小脳モデルの構成を示す。図中、赤矢印は興奮性シナプス入力、青矢印は抑制性シナプス入力、黒矢印は登上線維(CF)モデル、緑矢印は目標運動軌道、黄色矢印はCNからの補正信号、破線矢印は実測データから生成したフィードバック信号、Input Cellは、顆粒層等を単純化したモデル、PC Cellはプルキンエ細胞モデル、CN Cellは小脳核モデル、IO Cellは下オリーブ核細胞モデル、PFはInput CellとPC Cell間に存在する興奮性シナプス入力の平行線維モデルを示している。同図は、小脳に存在し、運動学習に大きく関わっているオリーブ小脳路^[4]を元に構築した。本モデルはInput, PC, CN, IO Cellの4つのセクションで

1: 日大理工・院(前)・電子, 2: 日大理工・院(後)・電子, 3: 日大理工・教員・電子

構成しており、それぞれのセクションに存在する 18 個の Cell には本研究室で考案されたニューロンモデル^④を使用した。18 個の Cell は 90° の目標運動軌道上にある 5° ずつの空間位置と関連させており、制御対象が特定の位置に到達したとき、対応したニューロンモデルが発火することで、目標運動軌道を表現した。運動誤差が生じると、実現軌道を表している IO Cell と、目標運動軌道を表している Input Cell との間に発火時間差が生じる。その発火時間差によって PC Cell と Input Cell から PC Cell に対する興奮性入力である PF の情報伝達量が、STDP モデルによって変わり、それに伴い PC Cell から CN Cell への情報伝達量が変化し、CN Cell からの補正信号が出力され、運動誤差が修正される構成とした。

Input Cell (18 cell) PC Cell (18cell) CN Cell (18cell)

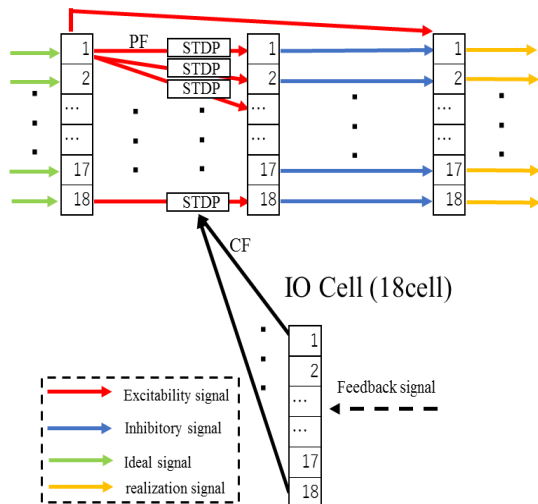


Fig. 2 Block diagram of cerebellar model

Fig. 3 に結合荷重値変化時の PC での発火波形を示す。図中、縦軸は PC Cell の電圧、横軸は時間を示している。今回は、0.7V~0.9V の範囲で、PF の情報伝達効率を決定する結合荷重値の電圧を直接入力し、PC Cell が発火可能であるか検討した。同図は、結合荷重値が 0.9V のとき PC Cell は発火しており、0.7V のとき発火していないことを示している。これより、結合荷重値が変化することで、PC Cell での発火波形が変化可能である。

以上より、今回構築した小脳モデルは、運動誤差が発生した際、PC Cell の発火状態を変化できることを示している。

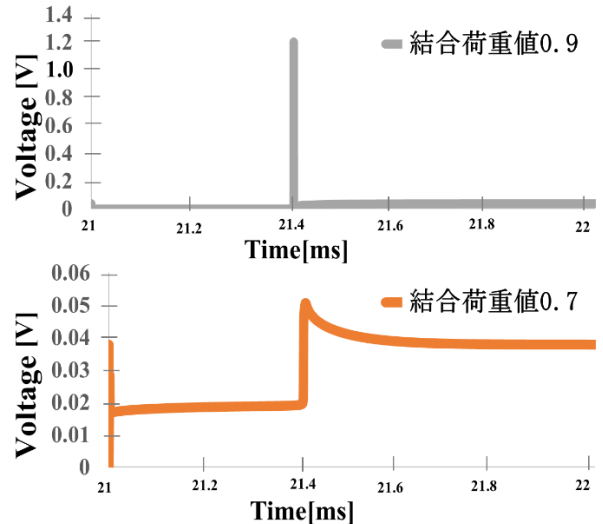


Fig. 3 PC Cell waveform

3. まとめ

今回、フィードバック誤差学習を基に、小脳モデルを電子回路にて構築し、低自由度の制御対象に対して、単純な運動をさせた実現運動軌道を用い、小脳モデル内の平行線維部の情報伝達効率を変化させることで、プルキンエ細胞部が発火可能であるかについて検討を行った。その結果、平行線維の結合荷重値を目標運動軌道と実現運動軌道の時間差から平行線維の情報伝達効率を変化させることによって、プルキンエ細胞部の発火状態を変化できることを明らかにした。

今後、小脳モデルの全体をネットワーク化し、シミュレーションを行い、学習精度について検討を行う予定である。また、今回単純化した制御対象を LWR ロボットのような人間の腕の形に近いものに変え、小脳モデルの学習精度について検討していきたい。

4. 参考文献

- [1] 川人光男, 「小脳の内部モデルと運動学習」, J. SICE, Vol. 33 No. 4 Apr. 1994
- [2] 伊藤正美, 伊藤宏司, 「生体とロボットにおける運動制御」, コロナ社, 計測自動制御学会 (1991)
- [3] Ignacio Abadia, Francisco Naveros, Richard R. Carrillo, Niceto R. Luque : "A cerebellar-based solution to the nondeterministic time delay problem in robotic control" Sci. Robot, 6 (2021)
- [4] C. I. De Zeeuw, J. I. Simpson, C. C. Hoogenraad, N. Galjart, S. K. E. Koekkoek, and T. J. H. Ruigrok. : "Microcircuitry and function of the inferior olive" Trends Neurosci. Vol. 21, No. 9, pp. 291-400 (1998)
- [5] 佐々木芳樹, 佐伯勝敏 : 「自動補正機構を有するパルス形カオスニューロンモデル」, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol. J104-C, No. 8, pp. 233-239 (2021)