

STDP回路を複数接続用いた小脳型運動学習モデルにおける正の運動誤差補正に対する一検討 A Study on Positive Motion Error Correction of Cerebellar Motor Learning Model Using Multiple Connections of STDP Circuit

○森下 樹¹, 山田 泰史², 山口 拓人³, 佐伯 勝敏⁴

*Itsuki Morishita¹, Hirofumi Yamada², Takuto Yamaguchi³, Katsutoshi Saeki⁴

Abstract: When we learn to exercise with tools, we improve by repeating the exercise. The cerebellum is involved in the motor learning of living organisms and corrects motor errors. In this paper, the error input section of the cerebellum model was changed to connect multiple STDP circuits. Then, we performed a simulation assuming motion errors. As a result, it is shown that it was possible to reduce the number of times it took to complete correction of motion errors.

1. まえがき

小脳は生体の運動学習に関わっており、この機構を使用した学習則の一つとしてフィードバック誤差学習がある¹⁾。我々が道具を使用する運動を行う際、運動試行を繰り返すことにより運動が上達し、小脳によって運動誤差が補正されていく。そして最終的には道具を自身の体と同等に扱うことが可能になると考えられている。

我々はこのことに着目し、先行研究において、DCモータで構成された産業用ロボットの運動を対象とした小脳型運動学習モデルを構築し、運動誤差の補正についての検討を行った²⁾。しかし、現状のモデルでは誤差の補正完了までに必要となる試行回数が多くなってしまいう問題点があった。

今回、誤差の補正を行うために、モデルの誤差入力部に着目した。複数の STDP 回路を時定数回路に inputs するよう変更し、実際の動作を仮定したシミュレーションにて検討を行った。

2. 本論

Figure.1 に今回使用した小脳モデルのブロック図を示す。図中の入力層、下オリーブ核、プルキンエ細胞、小脳核は制御対象の軌道上で 5° ほどの空間座標とそれぞれ関連している他励振ニューロンモデルである。赤い矢印は後段のニューロンモデルを発火させる興奮性シナプス、青い矢印は後段のニューロンモデルの発火を抑制させる抑制性シナプスをそれぞれ示している。入力層と下オリーブ核はそれぞれ制御対象の目標運動軌道信号と実際に動いた実現運動軌道信号を発火により表している。制御対象が特定の空間座標に到達したときにそこに関連されているニューロンモデルが発火する。この二つの発火の時間差が目標運動と実現運動の運動誤差になる。

入力層—プルキンエ細胞間は興奮性シナプスによっ

て接続されている。その間には 2 つのニューロンモデルの発火時間差に応じて結合荷重値を変化させる STDP 回路を使用しており、運動誤差によって結合荷重値が増減する。本モデルでは結合荷重値の初期値 0.9V から、変化した値に伴った動作を行い、運動誤差を補正するための運動補正発火信号を出力する。

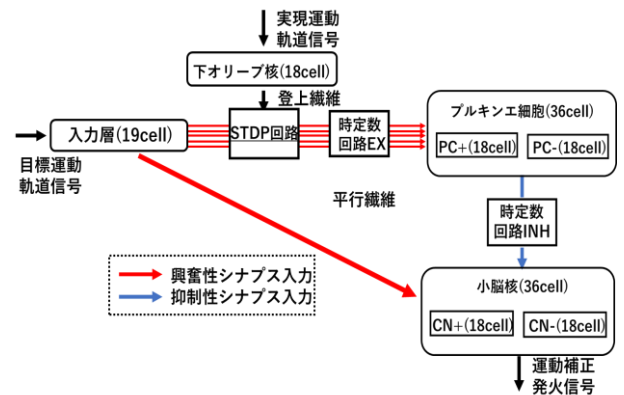


Figure.1 Block diagram of cerebellum model

Figure.2に STDP回路と時定数回路 EX の接続のブロック図を示す。各空間座標において複数の STDP 回路と一つの時定数回路 EX を接続し既存の小脳モデルよりも誤差の影響が大きく出るように改良をした。

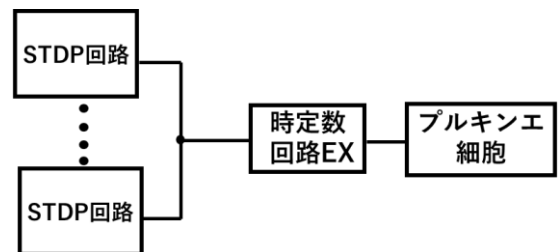


Figure.2 Block diagram of error input section

次に小脳モデルを含む小脳型運動学習モデルについて述べる。小脳型運動学習モデルのブロック図は Figure.3 に示す。本モデルでは制御対象が運動時に誤差が発生した場合、小脳モデルから運動補正発火信号が出力される。この信号が発火信号変換部で運動補正パ

1: 日大理工・学部・電子, 2: 日大理工・院 (前)・電子, 3: 日大理工・院 (後)・電子, 4: 日大理工・教員・電子

ルス信号に変化する. この運動補正パルス信号は PWM 信号生成部で出力した PWM 信号を補正し, 運動誤差の修正を行う.

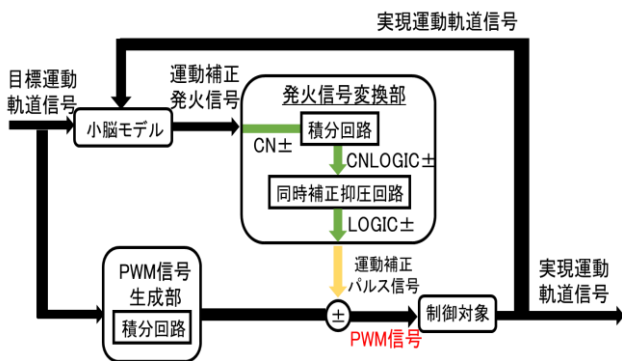


Figure.3 Block diagram of cerebellar motor learning model

今回, 誤差入力部を変更した小脳型運動学習モデルに制御対象が動作時に生じる運動誤差を与え, 運動試行を繰り返すことで運動誤差の補正の様子について検討を行った. 目標運動として制御対象が $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ を定速で 360ms かけて運動する信号, 実現運動として $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ を 954ms かけて運動する信号をそれぞれ与えた. 結合荷重値がすべて初期値の 0.9V の時を 1 回目とし, 試行を繰り返すことで結合荷重値が変化し, 出力の PWM 信号が変化する. 補正後の PWM 信号のパルス幅 1ms の増減につき運動誤差が 6.6ms 増減するものとした. 目標運動と実現運動との運動誤差が 0ms 以下になった段階で, その空間座標での補正が完了したものとし, そこまでにかかった試行回数と誤差の補正の様子について確認を行った. なお, 今回の試行では $0^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の区間において補正の様子を確認している.

Figure.4に各試行回数で出力された PWM 信号を示す. 図中, 横軸は時間, 縦軸は PWM 信号の電圧を示している. 各パルスは左から $5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ と相関しており, 運動誤差に応じて立下りのタイミングが変化する.

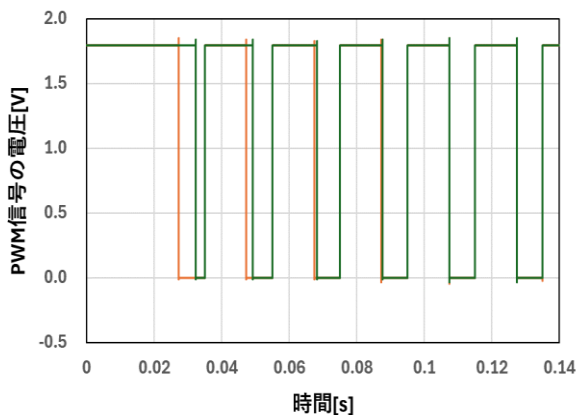


Figure.4 PWM signal

同図は, 手前の空間座標から順に補正が始まっていることを示している.

Figure.5 に運動試行回数に対する運動誤差の補正の特性を示す. 図中, 横軸は試行回数, 縦軸は運動誤差を示している. また, 実線は改良後の結果, 破線は改良前の結果をそれぞれ示している. 同図は, 試行 2 回目から運動誤差の補正が始まり, 8 回目で 30° までの空間座標における運動誤差が 0ms 以下になり, 補正が完了したことを示している. また, 改良前の結果と比較すると, 改良前は補正完了まで 14 回かかっていたのに対し, 改良後は 8 回まで減少している.

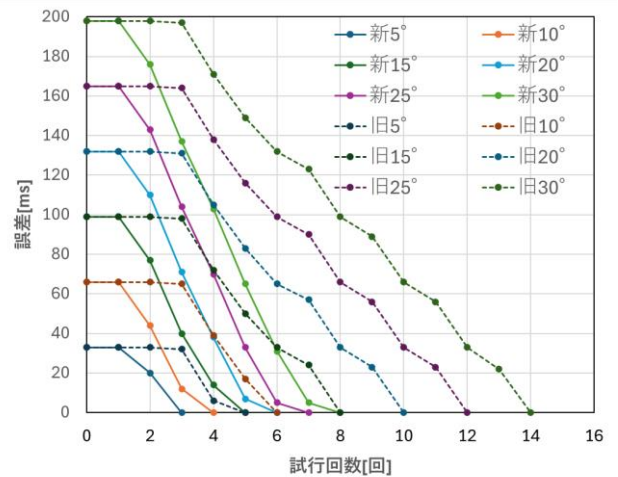


Figure.5 Characteristics of motion errors

3. まとめ

今回, 誤差の補正を行うために, モデルの誤差入力部に着目した. 複数の STDP 回路を時定数回路に入力するよう変更し, 実際の動作を仮定したシミュレーションにて検討を行った.

その結果, 本モデルは先行研究と比較して, 正の運動誤差の補正完了までにかかる試行回数の減少が可能であることを明らかにした.

今後は, 90° までの動作でのシミュレーションの実施, 小脳モデルの負の運動誤差の入力部分にも今回の接続を適用し, さらなる学習速度の向上について検討を行っていく予定である.

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 (1994)
- [2] 近藤宏樹, 山口拓人, 佐伯勝敏: 「電子回路小脳モデルの出力パルス補正信号に対する一検討」, 令和5年度日本大学理工学部学術講演会予稿集, M-30, pp. 734-735 (2023)