

B-11 神経免疫相互作用に着想を得た マルチエージェントシステム型ニューラルネットワークの提案

Proposal of Neural Network composed of Multi-Agent System Inspired by Neuroimmune Interaction

5335 柚木開登

指導教員 山本哲也

1. 本研究の意義・目的

大規模なニューラルネットワークの学習には、本来的に豊富な計算資源を必要とするが、今日では、クラウドコンピューティングの発展によって、低いコストで大規模なモデルの構築・学習が可能となっており、その結果として多様な製品開発・サービスに機械学習の導入が広がっている。

一方で、このようなクラウド依存な機械学習は、その性質上、他の製品開発に流用可能性がある大量の学習データを集約するため、悪意の第三者、あるいはプラットフォーム企業そのものによって盗取される可能性が否定できない。特に近年では「個人に最適化された情報」への需要から、学習データに顔写真・年齢・性別・信条・趣味嗜好を含めたあらゆる個人情報が含まれることが多く、その流出リスクは大きい。

さらに、2013年のアメリカ国家安全保障局(NSA)による大量監視プログラム発覚以降、EUの一般データ保護規則をはじめとして世界各国が巨大IT企業を意識した個人情報保護に係る規制を強めており、機械学習における個人情報の扱いは変革が迫られている。

上述した課題を解決すると期待されるのが、連合学習(Federated Learning; FL)である。連合学習では、学習データを集約するのではなく、ローカルな学習データを保有する各ノードが、個々に学習を行い、その結果得たパラメータ差分を他のノードと通信し平均化することで大規模な学習済みモデルを構築する。これによって、プライバシーを含んだ学習データは通信されず個人情報がノード内に保護される。

連合学習の実用化に際しては、従来データセンターで学習されていた大規模なニューラルネットワークを計算資源に乏しい利用者側の計算機環境(エッジ環境)に投入する必要があるため、「モデルの軽量化」及び「環境内計算資源の有効利用」の両方面のアプローチが重要である。前者に対しては、不要なシナプスを除去するPruning(剪定, 刈り込み), 後者に対しては複数の不均一計算資源へのニューラルネットワークの分散化といったアイデアが提案されているものの、両アプローチを兼ね備えたモデルは提案されてこなかった。

そこで本研究では、モデルの軽量化および分散化を兼ね備えたモデルを構成することを目的に、神経免疫相互作用を考慮した複数の自律行動主体(エージェント)で構成されるニューラルネットワークを検討を行う。

2. 提案モデル

2.1 複数のエージェントによるニューラルネットワーク

本提案は、

● Neuro-Agent;

神経細胞をモデル化したエージェントであり、情報の受容、処理、転送などを担当する。それぞれのNeuro-Agentは、情報を受け取るための複数の入力 x_i ($i = 1, 2, 3, \dots, m$)と、内部変数 b を持ち、これを処理して別のNeuro-Agentに情報を送信するための出力 y を生成する。この時の内部処理は式(2.1)に示す通り、標準的な人工ニューロンと同等に活性化関

数 ϕ を用いた変換である。

$$y = \phi\left(\sum_{i=1}^m x_i + b\right) \quad (2.1)$$

● Synapse-Agent;

神経回路における接触構造であるシナプスをモデル化したエージェントであり、Neuro-Agent間の情報の伝達を担当する。それぞれのSynapse-Agentは、入力 u を受け取り、それを変換した値 v を出力する(式(2.2))。この出力は別のNeuro-Agentの入力 $x_i, i \in \mathbb{N}^+$ として使用される。

$$x = w \cdot y \quad (2.2)$$

ここで、式中の w は、そのSynapse-Agentの重みを示し、これとNeuro-Agentの内部変数 b を誤差逆伝播法を用いて更新することで、ニューラルネットワークが学習される。

● Glia-Agent;

神経細胞の補助細胞であるグリア細胞(Glia-Cell)の機能を模倣したエージェント。Glia-Agentは、Neuro-AgentとSynapse-Agentによって構成されるニューラルネットワークに対して、シナプスの刈り込みを行い、パラメータ削減による学習の効率化・高速化を試みる。

2.2 神経免疫相互作用に基づく相互調節モデル

神経系と免疫系は独立したシステムではなく神経免疫相互作用(Neuroimmune Interaction)と呼ばれる相互調節機構を持つ。殊に生体の脳機能発達においては、神経細胞からのシグナル伝達に拠ってグリア細胞(microglia)が神経回路の刈り込みを行うことが確認されている。本モデルではこれをNeuro-AgentとGlia-Agent間の相互作用として組み込んだ。

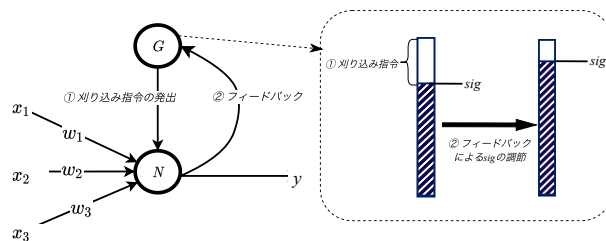


図 2.1 Neuro-Glia 相互調節機構

図 2.1 に示すように Glia-Agent と Neuro-Agent は 1:1 で接続され、適宜 Glia-Agent の内部変数 sig を更新していくことで刈り込みの制御を行う。

Glia-Agent から Neuro-Agent への作用：刈り込み命令の発出

シナプスの刈り込み命令は Glia-Agent の内部変数 sig を閾値に用いて確率的に実行される。Neuro-Agent は刈り込み命令を受け取ると、自身に接続された最も重みが 0 に近い Synapse-Agent を削除する。また、刈り込み指令を発出した Glia-Agent は $sig = 1.0$ に更新し、グリアネットワークへの伝播を行う。詳しくは 2.3 節で述べるが、これに拠って時空間的に集中した過度な刈り込みが抑制される。

Neuro-Agent から Glia-Agent への作用： sig の更新

Neuro-Agent はまず、 $miniBatchSize$ の間に隣接する Neuro-Agent の出力値と比較し、自分が外れ値であった回数を変数 cnt にカウントする。次に、 cnt を用いて自身の活動頻度 $freq$ を計算する。

$$freq = \frac{cnt}{miniBatchSize} \quad (2.3)$$

最後に $freq$ を用いて、Glia-Agent の内部変数 sig を更新する。 sig の更新式は式 (2.4) に示す通りである。ただし、わかりやすさのため式中で Glia-Agent のプロパティには G 、及び Neuro-Agent のプロパティには N の添字を付してある。

$$sigG \leftarrow sigG - \alpha \left[\frac{2}{1 - \beta \exp(freq_N - 0.01)} - 1 \right] \quad (2.4)$$

式 (2.4) は、Neuro-Agent の活動頻度 $freq$ が高いほど刈り込みを抑制し、逆に $freq$ が小さいほど刈り込みがされやすくなるように sig を更新する。

2.3 グリアネットワークによる過度な刈り込みの抑制

ASD や統合失調症などの神経免疫疾患の報告からシナプスの刈り込みが脳の高次機能維持・発現の要因である可能性が示唆されている。これは同時に、グリア細胞による過度な刈り込みを抑制するシステムの存在が仮定するものであり医学的解明が急がれる。我々はこのシステムの在処として、グリア細胞同士のネットワークであるグリアアセンブリ (Glia-Assembly) であると仮定し、ある Glia-Agent が刈り込み指令を下した際に、そのエージェントの sig を他の Glia-Agent に伝達し影響させ過度な刈り込みを抑制させる Glia-Agent 同士のネットワーク；グリアネットワークを模倣・実装した。グリアネットワーク上において sig は伝播距離 (ホップ数) に応じて減衰定数 A だけ減衰していく。なお、複数の距離が与えられた場合、最も近い $Glia - Agent$ の影響を優先する。例えば、図 2.2 の g_2 の場合、 $g_0 \rightarrow g_1 \rightarrow g_2$ と $g_0 \rightarrow g_2$ の経路では後者の経路のみを考えることになる。

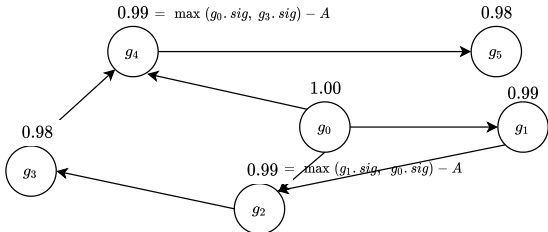


図 2.2 グリアネットワークでの sig の伝播のあり方

3. 計算機実験

計算機実験として $6 \rightarrow 8 \rightarrow 8 \rightarrow 8 \rightarrow 1$ の 5 層全結合ニューラルネットワークを用意し、6bit の入力の上位 3bit のいずれかに 1 が入っているかどうかの判別のタスクを行った。その他のパラメータは以下に示す通りである (表 3.1)。

表 3.1 パラメータ一覧

パラメータ	値
学習率 η	0.5
ミニバッチサイズ $miniBatchSize$	100
初期抑制信号値 sig	0.5
初期シナプス数 $Mill$	182
減衰率 A	0.01
チューニングパラメータ α	0.01
チューニングパラメータ β	$6 \ln(3)$

計算機実験の結果得られた学習曲線及びシナプス数の変化及び、刈り込み後のネットワークを図 3.2 及び図 3.1 に示す。

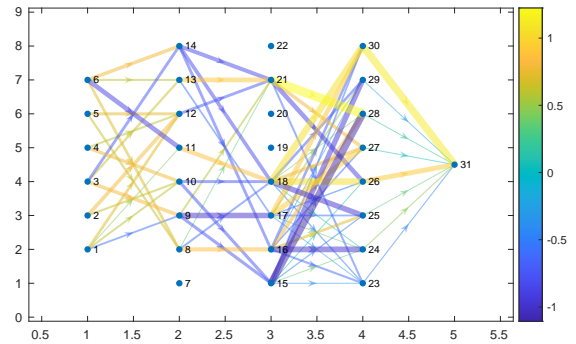


図 3.1 学習曲線

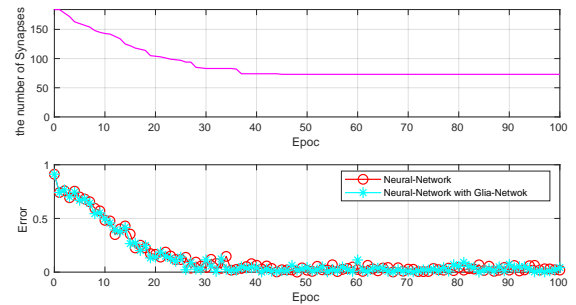


図 3.2 シナプス量の変化と学習曲線

Glia-Agent 及びグリアネットワークによる刈り込みを実行した結果、最終的なシナプス数は 182 から 72 に推移した。また、この時の学習曲線は刈り込みを行わない場合と比較してほとんど同一の曲線を描き、精度の悪化が認められない。従って、60 % のシナプスの削減が精度を維持したまま行われたと評価できる。

4. 結論

神経免疫相互作用に着想を得て全体の管理者のいないニューラルネットワークの学習パラメータの削減を実装し、学習精度を落とさない適切な刈り込みを行うことができた。興味深いのはシナプス数の減少曲線が、生体の脳で行われるオーバーシュート型シナプス形成と同様に、指数関数的な減少を見せていることである。曲線のあり方が今後どのように影響するのか、あるいはグリアネットワークの構造が曲線にどのように影響するのかなど、各パラメータの在り方については今後の課題とする。

参考文献

- [1] Roy, Abhijit Guha, et al. "Braintorrent: A peer-to-peer environment for decentralized federated learning." arXiv preprint arXiv:1905.06731 (2019).
- [2] 藤田茂, et al. "分散処理システムのエージェント指向アーキテクチャ." 情報処理学会論文誌 37.5 (1996): 840-852.