

# 学習の不可能性

太田 宏之

防衛医科大学校 生理学講座

学習の定義を、運動出力の時点における何らかの報酬や罰に属する刺激に応じて感覚入力群と運動出力群の間の対応関係を調整することであるとした場合、学習にはその運動出力に至る感覚入力からの神経経路の発火パターンを参照するメカニズムが必要である。しかしながら、少なくとも神経経路局所において、過去の発火パターンは報酬や罰の時点では既に消滅しているため、学習は原理的に不可能であるといわざるを得ない。そのような原理的な不可能性を回避するため、計算論的神経科学の文脈においては過去の発火パターン全体が神経経路とは別の超越的変数に保持される。しかし、そもそも神経経路とは個々のニューロンの発火を決定するシナプス結合の加重の集合であり、それ自体が記憶を担っている。ネットワーク自体が内部に記憶を担いつつ、かつ学習時にもその記憶が自己再帰的に使われるためにはどうしたらよいか。本稿では、パースのアブダクションの逆行的作用にそのヒントを見出し、その逆行的作用が神経系において実現されている可能性を検討する。

Hebb によるシナプス結合の可塑性に関する仮説(Hebb 則)の提案、McCulloch と Pitts による神経系の論理演算能力の検証、Webos, Rumelhart らによる BackPropagation(誤差逆伝播法)の提案などによって、以後、人工ニューラルネットワークの研究は興隆を誇ってきた。特に、LTP・LTD(シナプス結合の長期増強・減弱)の発見と 2000 年前後における STDP(LTP・LTD の時間依存性)に関する多数の報告は、仮説であった Hebb 則を裏付けるに十分であり、神経系の帰納的機能が確認されたと言ってよいだろう。さらに加えて、Poo らのグループによる LTP・LTD の逆行に関する生理学的報告(Tao et al.2000;Fitzsimonds et al.1997)は、計算論的神経科学側で先行提案されていた代表的な学習モデルである BackPropagation の実在を予感させるに十分な出来事であった。しかし我々は、BackPropagation のアルゴリズムには時間的な超越性が混入している、という不備を指摘したい。

BackPropagation とは、階層型ニューラルネットにおいて、与えられた入力パターンと出力パターン間の対応関係を構築する学習モデルのひとつである。ある入力パターンに対して行った出力パターンと教師信号との誤差が逆行的に伝播し、その誤差が最小になるようにシナプス結合加重が修正される。一般に、教師信号の存在が批判される事が多いが、ここで問題にしたいのは、教師信号が与えられる時点においては、その教師信号によって更新されるべき神経経路(感覚ニューロンから運動ニューロンへ至る経路)の発火パターンは既に消滅している、という点である(問題 A)。当然のことながら記憶の想起によって教師信号が適用される対象は同定されると思われるかもしれない。しかし、そもそもその「記憶」はどこに保持されるのか(問題 B)。脳の高次領野間の相互作用やループ、また、その先に見据えられている意識を想定すれば、意味不明にもみえるこの問題であるが、神経経路局所における挙動に注目すれば、避けては通れない問題である。神経系

の原初的機能に立ち返るならば、神経系自体、複数の感覚ニューロンから複数の運動ニューロンへの対応関係をシナプス結合の強度によって規定する記憶として機能するものである(記憶 1)。一方で、BackPropagation においては、ネットワークそれ自体以外に、ネットワークの過去の全発火パターンを保持した超越的変数を別途用意してシナプス結合の調整を行う(記憶 2, 図 1)。つまり、学習の不可能性(問題 A)を回避するために、記憶を二重化し、超越化させているのである。

以上の問題 A, B を総合すると、神経経路外部の超越的な何かを仮定しない限り、学習は不可能である、と結論せざるを得ない。しかし、パースのアブダクションをヒントに、LTP の逆行性に関する知見を再解釈すれば、超越性を拙速に導入する事無く学習をモデル化できるのではないだろうか。

そもそも学習の不可能性の根本は、問題 A すなわち、結果としての現在からその原因たる過去が把握できないことにあった(注:これは一義的にはフレーム問題ではなく、状態変数のスコープの問題である)。確かに Hebb 則のような、原因となる感覚と結果である運動の関係が、経験的な反復によって強化されるという帰納的プロセスが神経系にはある。しかし、これは過去から現在へ続く順行的な場合(感覚から運動への経路における活性化した前後関係がすべからく強化される場合)であるなら可能である。一方、現在に対して過去がそもそも接続されていない状況においては、帰納的プロセスだけでは対応できない。そのような場合の推論の形式として、アブダクションがある。結果がありつつ、その結果を引き起こすことになった原因を ad hoc に推測する、という帰納・演繹の外に位置する推論の方法である。アブダクションは必ずしも正しい推論ではないが、その一つの重要な特性として、過去の多様な記憶を ad hoc に引き込む逆行的な作用がある(アブダクションの推論の妥当性は神経系の汎化機能と関係があるが、ここでは触れない)。

このアブダクションの逆行的な作用に似た神経系のメカニズムが存在する。LTP に伴って前シナプスニューロンの興奮性が PKC 依存的に増大するという報告である(Ganguly et al.2000)。PKC レベルの上昇は、細胞体での持続性 Na 電流を増加させ(Franceschetti et al.2000)、入力に対する応答性を全体的に上昇させる(Ohta et al.投稿準備中)。前シナプスニューロンの応答性の上昇は発火を促し、最終的に前々シナプス-前シナプスニューロンの間に LTP(STDP)を引き起こすと考えられ、LTP の逆行メカニズムの一つの候補として捉えられる。LTP の逆行は、個々の細胞間の局所的レベルで発生・収束する。このプロセスは超越的変数に頼らない、記憶(感覚入力側の神経経路)の自己再帰的な再利用のメカニズムのひとつと考えてよいのではないだろうか(図 2)。

記憶の時間的超越化を拒否するならば学習の不可能性が帰結される。しかし我々は、超越化か否かという二者択一ではなく、記憶自体(=神経経路)による記憶の再利用という形の不完全な超越性を提唱し、そのメカニズムの一つとして LTP の逆行を指摘したい。

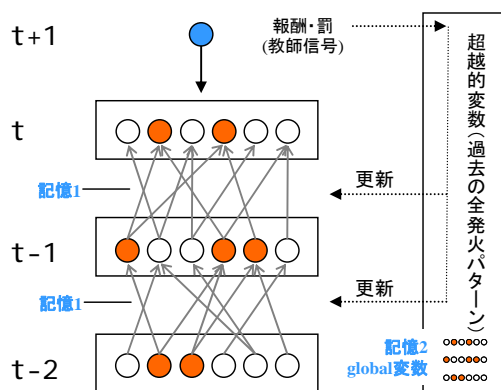


図1 超越的変数を用いた学習モデル

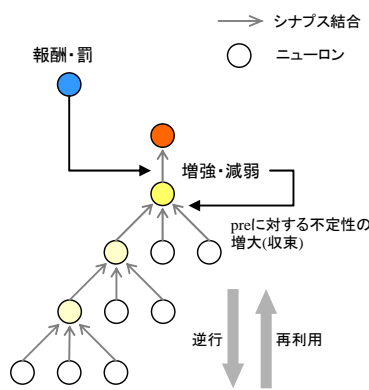


図2 逆向きの不定性の増大・収束