

海馬の記憶システムにインスパイアされた 自己学習について

Self-learning inspired by hippocampus memory system

加藤 雄貴
Kato Yuki

Abstract: The hippocampus is known as the core of memory system in the brain. However, how hippocampus works is not clear. In this paper, to estimate function of brains memory system based on studies and damage examples and examine the possibilities of generating one-shot learning and making episode memory. I focus on the Papez circuit which is a circuit related to the hippocampus and memory and I estimated that part contributes to the generation of time-series information. In addition, I discuss how self-learning can be realized by combination of memory system and expressing system about pleasant and unpleasant.

概要

脳において海馬はエピソード記憶の生成に際して必要不可欠であることが知られている。しかし海馬がどのようにそれを可能にしているのかは未だ判明していない。本論では研究や損傷例から着想を得た記憶システムの機能について推定を行い、ワンショットラーニングやエピソード記憶の生成がどのように行われるかを検討する。

筆者は記憶に関わる神経回路として知られるパペッツ回路に着目し、この回路が時系列情報を生成しているのではないかと仮定している。そして、時系列にまつわる記憶システムと快不快を表現するシステムを組み合わせることによる自己学習の可能性について論じる。

1. はじめに

近年著しい発展を見せてきた人工知能の発展はその技術的な発展がひと段落し、基礎研究から応用の場へその活動範囲を移しつつある。昨年は現在の技術において出来ることと出来ないことへの啓蒙が進んだ一年であり、企業では概念実証が盛んに行われた一年であった。研究の場でも漸進的なイノベーションが進み、成熟した画像認識の分野に代わり自然言語処理の分野で更なる性能の向上がなされている。

一方で Animal-AI Olympic のような取り組みや、MineRL-Competition のような、現在の人工知能を構成する技術では困難と見られるタスクに向けた取り組みも行われている。前者は明確に AGI を射程に入れた取り組みであり、後者は AGI を目指したもので

はないものの人間のパフォーマンスには遠く及ばないという結果だった。強化学習は開かれた空間・不安定な環境に対して弱く、依然としてフレーム問題は人工知能における難題であることが再確認され、こういった問題の解決が可能な AGI の実現が期待されている。

筆者は昨年発表した論文にて、ドーパミン放出量の変動によって快や不快が表現されており、その表現モデルにおいて快は不快の解消という性質を持ち、生物は不快を解消することを行動原理としているのではないかと仮説を提案した。快という情報は一元的な情報だが、不快を発生させた事象と紐づくことで個別の情報として扱うことが可能となり、例えば喉の渇きと空腹を区別できるようになると考えられる。

しかし、このモデルを実現するためには不快の発生からその解消までの時系列を区切ること、言い換えればエピソードとしての情報を扱うことが必要となる。現在のアルゴリズムでは任意の時系列を区切るということは不可能だが、本論では脳におけるエピソード記憶の座である海馬、そして記憶に関わる回路として知られるパペッツ回路の機能を参考とすることで実現方法を検討する。

2. 海馬機能と有力な仮説

海馬は前述の通りエピソード記憶の座として知られているが、どのようにエピソード記憶を生成しているのかについては判明していない。さまざまな研究によって海馬の細胞がどのような刺激に対して反

応するかが調べられており、主流の仮説としては認知地図仮説が知られている。海馬には場所細胞と呼ばれる生物が特定の場所にいるときに発火するという性質を持つ細胞が存在することから、位置情報を保持する場所細胞がエピソードの情報も含めて取り扱うことでエピソードの記憶を可能にしているのではないかという説である。位置情報の上にエピソードが乗っかっているという形式となる。

一方で記憶インデックス仮説という別の仮説も存在する。こちらはあくまで場所細胞の機能は索引としての機能であり位置情報などのエピソード記憶を構成する情報は皮質に保存され、海馬細胞はその索引としての役割を果たしているというものである。こちらの仮説の場合、エピソードの上に位置情報が乗る形式となる。

本論で提案する時系列仮説は記憶インデックス仮説寄りの内容であり、索引としての機能を持つ海馬細胞がどのように生成されるのかについて扱う。名称にある時系列とは海馬における索引としての情報の形成に際して、パペッツ回路によって前処理が行われ、時系列としての性質が付与されると考えられるためである。パペッツ回路を含めた海馬を中心とする記憶システムは、エピソードとして特定の時系列を切り分ける機能を持ち、エピソードを索引として情報を想起させる機能を持つと考えられる。時系列仮説においては場所細胞として知られる海馬の錐体細胞は場所を表現することをその機能としているのではなく、特定の時系列を保持することをその機能としており、時系列情報と共に入力される環境の情報が連合されることで、特定の場所にいたときの時系列を持っていた細胞が場所細胞としての振る舞いを見せていたのではないかと考えられる。

3. 時系列仮説

3.1. タイムスタンプ発行を担う乳頭体

時系列仮説において重要な部位がパペッツ回路を構成する乳頭体である。乳頭体は海馬を構成する歯状回という部位に対して入力を行っており、乳頭体および乳頭体を含む回路の損傷や委縮によって見当識の障害などの記憶障害が発生することが知られている（コルサコフ症候群）。乳頭体の機能として筆者が想定しているのが、タイムスタンプを発行する機能である。

歯状回に情報が入力されるルートには嗅内皮質を介したルートと乳頭体からルートの二つがある（図1参照）。嗅内皮質を介したルートからは大脳新皮質

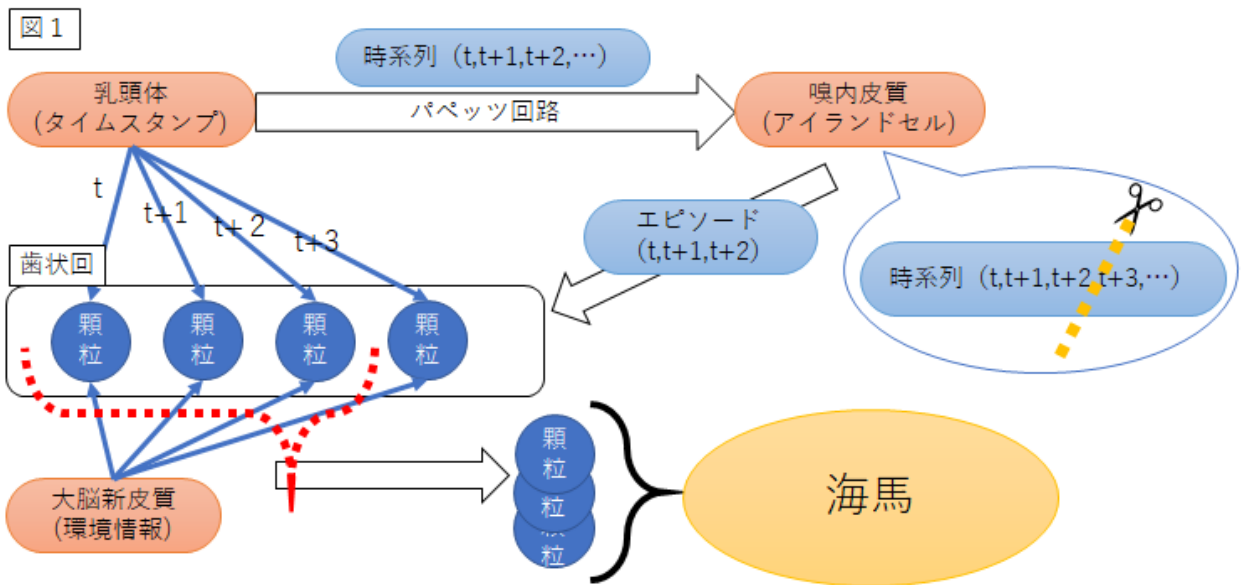
の扱う環境の情報が入力されていると考えられているが、乳頭体からの入力の役割については判明していない。しかし、乳頭体の損傷例において海馬と同様にエピソード記憶にまつわる障害を引き起こし、大脳新皮質に時間を扱う領野が見当たらないことから乳頭体側のルートは時間に関わっているのではないかと推定した。

乳頭体はその出力先として2つのルートを持ち、一つは歯状回に向けて投射し、もう一つはパペッツ回路として視床前核群に向け投射され、視床を経由し帯状回を経て海馬へと入力される。乳頭体の機能がタイムスタンプの発行だと仮定すると、歯状回ではタイムスタンプとその時の環境の情報が連合されて保存されることになる。これだけでは瞬間的な情報に過ぎないが、パペッツ回路側ではタイムスタンプとしての入力が乳頭体から連続して行われるため、情報は数珠繋ぎのような時系列としての性質を帯びることになる。

3.2. 時系列をエピソードに区切るアイランドセル

際限なく連続する時系列としての情報の入力を全て記憶することは不可能なため、連続する情報から意味のある時系列情報、すなわちエピソードを切り取ることが必要となる。そしてパペッツ回路を通じて海馬へ向かう時系列情報は海馬への入口である嗅内皮質において切り分けられ、エピソードに加工される。嗅内皮質には連続する情報から意味のある情報を区切るアイランドセルという細胞が確認されており、同細胞はその活動によって時間的に離れた出来事を連合して記憶するかどうかを制御することが出来る。ここで生じているのは、区切られた時系列に相当するタイムスタンプを持つ歯状回の顆粒細胞が連合されているということであり、顆粒細胞を取り巻く苔状線維によってエピソードを構成する時系列を持つ顆粒細胞が結び付けられて海馬内へ入力されていると考えられる。

そのため海馬の場所細胞は場所の情報を保持しているのではなく、時系列とそれに伴う環境情報を保持しており、結果として特定の時系列に場所の情報が含まれていた場所細胞が場所細胞様の活動をしていると考えられる。海馬には出来事を反映しているイベント細胞なども発見されているが、場所細胞やイベント細胞は時系列の中で経験した環境の情報という同一の原理に従って生成されている可能性がある。



3.3. 場所受容野の広さと時系列仮説

海馬で見つかっている場所細胞については海馬の腹側か背側のどちらに位置するかで表現する場所の広さに差があることが知られており、背側が 1m の狭い範囲であるのに対して腹側は 10m もの範囲をカバーすることが知られている。仮に海馬が時系列情報をキーに情報を扱っているのであれば、腹側と背側の違いはどれだけ多くの時系列を保持するかによるのではないかと考えられる。受け持つ時系列が長ければその時系列には多くの環境の情報が含まれることになり、結果として広い場所を表現することが出来る。なお、上記の通りエピソードの持つ時系列全体と個々の海馬の細胞が担当する時系列は異なるがもののエピソード単位で統合されている。

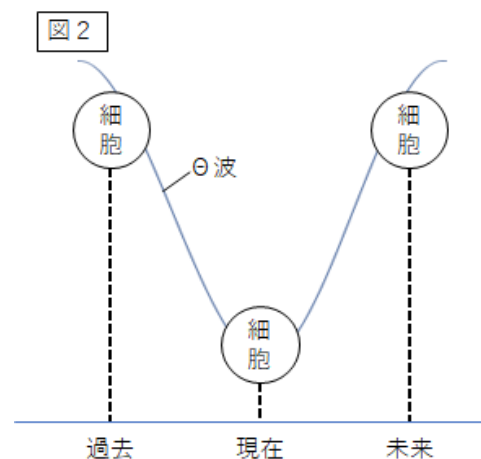
海馬はより細分化した構成単位として歯状回、CA3、CA1 という 3 つの部位によって構成される回路によって情報を扱っている。時系列仮説においてそれぞれの部位が担う機能は以下の通りとなる。歯状回は前述の通り、乳頭体からのタイムスタンプ入力と環境情報を組み合わせたメモリとして動作している。歯状回の個々の細胞はタイムスタンプとしての情報のみで時系列の性質は持たないが、嗅内皮質のアイランドセルの活動によって複数のタイムスタンプがまとめられることで時系列としての性質を持つ。

まとめられた歯状回の顆粒細胞群は貫通線維を介して CA3 に入力されるが、このとき CA3 錐体細胞は発火の際に歯状回側の情報が入力されることで、受け持った時系列を自身の発火に圧縮していると考

えられる。CA3 はいわば圧縮機能を持つ入力用のモジュールであり、対して CA1 は出力機能を持つモジュールとなる。CA1 は CA3 に含まれている情報が一部でも含まれていれば構成する細胞群全体が発火する性質を持っており、手がかり刺激から出来事を想起するエピソード記憶の性質を実現させている。

3.4. 時系列仮説による位相歳差の説明

時系列仮説は海馬の場所細胞における位相歳差という性質について説明が可能である。位相歳差とは、海馬全体で観測される θ 波のリズムに対して場所細胞の発火するタイミングが主体の状況によって変動する性質であり、発火のタイミングによって場所細胞は場所だけでなく過去から現在、そして未来という時間的な情報を表現する時間符号性を実現している。



θ 波の位相において山を起点とすると、谷の部分が現在であり起点の山にかけては過去、終点の山にかけては未来を示している。ある場所 A に選択性を持つ場所細胞 a は、エージェントが場所 A に向かう途中では θ 波の終点側で活動を行い、場所 A にいるときは谷間で活動、場所 A を通り過ぎてからは起点側で活動を行う。時間的な情報が θ 波のリズムの中に圧縮されて表現されており、活動を解析することで未来の行動などを読み取れる。

時系列仮説において歯状回の顆粒細胞は乳頭体からのタイムスタンプとその際の環境情報が入力され、海馬場所細胞は複数の歯状回顆粒細胞を受け持つことで時系列としての情報を保持する。保持する時系列の中に場所 A にいたという情報が含まれていれば場所 A に選択性を持つ場所細胞 a として活動を行うが、位相歳差を見せる場所細胞の時系列には A に向かうときや A を通り過ぎたときの情報も含まれており、そのときの情報を元に保持する時系列全体が発火した場合に位相歳差が観測されているのではないだろうか。場所 A に対して場所 A-1 (A の 1 秒前にいた場所)、場所 A+1 (A の 1 秒後にいた場所) があつたとき、場所細胞 a はこれら全体の情報を含んでいるために主体の位置に応じて連鎖発火のタイミングが変わり、それが位相歳差を実現している可能性がある。

4. 人工知能における活用

4.1. 快と不快と時系列の関係について

上記の海馬およびパペッツ回路によって行われると考えられる時系列を取り扱うシステムと快と不快を表現するシステムと考えられるドーパミン放出量の変動を組み合わせることで、エピソード記憶の生成が可能になると考えられる。時系列を区切る役割を持つ嗅内皮質のアイランドセルだがエピソードとして区切る意味のある時系列とは何かというと、それは生物が生きる中で直面する不快とその不快を解消する手段である。不快の解消を可能にする情報を選択的に取得・学習することは生存可能性の向上に寄与する。

また、冒頭の通りドーパミンによる快と不快を表現するシステムはそれだけでは報酬および罰としての瞬間的な性質しか持たないが、エピソード記憶として不快の発生からその解消までという時間的な情報の塊として扱うことで快は不快の解消としての性質を獲得し、一元的な快という情報を個別の不快の発生原因と結び付けて区別することで汎用性を獲得することが出来るのではないかと考えられる。

4.2. 学習を支える外側手綱核

学習を支えるための脳機能はいくつか存在するが、学習において中核的な働きをもたらすのが外側手綱核と呼ばれる魚類にも相同部位が確認される部位である。外側手綱核は不快な出来事に対して反応を示す神経核として知られており、その活動によってドーパミンの放出量が減退する。外側手綱核は研究から一度経験した危険な状況に対して、その手がかり刺激の段階で発火することで危険を予測するような振る舞いを見せ、これから発生し得る危険を回避するように行動を促す、能動的回避を実現する機能がある。外側手綱核は危機を回避する方法を学習している間にその活動が活発になり、学習が完了すると危機に際しても活動が平常時と同等に戻るという特徴がある。また、実験でその活動を抑制したところ能動的回避の学習が出来なくなり、パニック状態から抜け出せなくなることが知られている。

このとき外側手綱核が担っている役割は危険な出来事に先行してドーパミン出力量を減退させ、疑似的な不快を作り出しているのではないかと考えられる。生物は単純化するとドーパミン出力が亢進する環境に誘引され、減退する環境を忌避するという性質を持つ。そこでドーパミン放出量を減退させ疑似的に不快を発生させることで危険な環境下からの離脱を促すことで能動的回避を実現している。さらに実際に回避行動によって危機を回避出来た場合には外側手綱核はその活動を停止しドーパミン放出量の減退は元に戻るため、不快の解消すなわち快が発生する。

エピソード記憶を生成する海馬とパペッツ回路では危険を実際に経験したエピソードと、その危険を予測し回避したエピソードを連合させることで、どうすればその危険を回避することが出来るのかという不快の解消方法を確立し、同様の危機が発生した際にはそのエピソード記憶を活用することで危険を回避する。学習が完了した段階で外側手綱核の活動が平常時に戻るのには、危機への対処法が確立しその役目を終えたからだと考えられる。なお、外側手綱核の過活動はうつ病の発症に関連することが知られているが、本来の限定的な役割を外れて主体が疑似的な不快状態に常に置かれてしまうことがその原因なのではないかと考えられる。

これらの機能の実装により何が不快をもたらすのかという情報を定義することで、人工知能は自律的に学習を行う自己学習を実現できるのではないかと考えられる。

5. まとめ

本論で取り扱った機能は脳においては大腦辺縁系に相当する機能を有しており、そのことから本モデルを辺縁系モデルとして提案している。複数のモジュールが相互に接続することで機能するためその実装は容易ではないと考えられるが、実装を目指していきたい。

汎用人工知能の実現に際しては身体性が必要であるとの指摘が見られるが、筆者もそれに関して同意である。本モデルは身体を維持する恒常性を実現させるためのモデルだが、維持する身体に準ずるものがなければそもそも不快が発生せず、学習も行動も行われまいという点ではやはり身体を必要としている。我々人間の知能においてもそれは単独で独立した純粋な存在ではなく、あくまで生命の自己保存の性質によって長い歴史の中で培われ進化してきたものであり不可分ではないだろうか。

また、未だ解決していないフレーム問題は辺縁系モデルによって問題を回避出来る可能性がある。不快と不快の解消というエピソード記憶を自律的に学習するため、洞窟から時限爆弾とセットになったバッテリーを取り出す任務が与えられたとき、バッテリーがもたらす快（エネルギー不足という不快の解消）と爆弾のもたらす不快（爆発による損害と爆弾を持ち出さないことで爆発を回避できること）がそれぞれ別であることを区別し、壁面の色などの情報は不快とその解消というエピソードと関係がないために無視することが出来るのではないかと期待している。

現在の人工知能技術はその発展が一巡し、適用可能な領域とそうでない領域が明確になり専門家ではない一般人の間でも啓蒙が進みつつある。Alpha 基による記念碑的な勝利を皮切りに様々な分野で人間のトッププレイヤーを打ち破るまで力を付けているものの、Minecraft 上で行われたコンペティションのように開かれた空間への対応は難しく、同様に開かれた空間への対応が求められる完全自動運転もその状況は芳しくない。

手の届く範囲にある果実は全て取り尽くされたと評価される状況ではあるが、この状況は汎用人工知能が現行の技術と区別され、ネクストビッグシングとして期待される領域へと変化するタイミングでもある。辺縁系モデルを実現し一石を投じることが出来るよう今後も活動を続けていきたい。Minecraft 上での実装は汎用性が求められることに加えて不快と不快の解消という情報がステータスとして存在しているため辺縁系モデルと相性が良く、プラットフォ

ームの知名度も高いので、同環境で実装を行う機会を模索していきたい。

参考文献

- [1] 危険に対して冷静かつ適切に対処できるようになるための神経回路を発見 (参照 2020-02-12)
http://www.riken.jp/pr/press/2014/20141121_2/
- [2] 時間的に離れた 2 つの出来事の連結を調節するアイランドセルの発見 (参照 2020-02-12)
http://www.riken.jp/pr/press/2014/20140226_1/
- [3] 出来事の順序を記憶する仕組みの発見 (参照 2020-02-12)
http://www.riken.jp/pr/press/2017/20170609_1/
- [4] 脳科学辞典 (参照 2020-02-12)
<https://bsd.neuroinf.jp/wiki/脳科学辞典:索引>
- [5] Pain Relief—痛みと鎮痛の基礎知識 (参照 2020-02-12)
<http://plaza.umin.ac.jp/~beehappy/analgesia/index.html>
- [6] 海馬の基礎知識 (池谷裕二) (参照 2020-02-12)
<http://gaya.jp/research/hippocampus.htm>