

エピソード的未来思考における意味記憶の役割 — 並列分散処理モデルによる検討 —

The Role of Semantic Memory in Episodic Future Thinking: Computational Exploration with PDP Model

伊藤 友一^{†‡}, 上野 泰治^{†‡}, 北神 慎司[†], 川口 潤[†]
Yuichi Ito, Taiji Ueno, Shinji Kitagami, Jun Kawaguchi

[†]名古屋大学, [‡]日本学術振興会

Nagoya University, Japan Society for the Promotion of Science

ito.yuichi@nagoya-u.jp

Abstract

The purpose of the present study is clarifying the mechanism underlying episodic future thinking, which refers to the ability to imagine future events possibly happening in a specific time/location/context. Given that episodic future thinking involves generating event predictions from previous internal predictions, we hypothesized that the function of successive event prediction is one of underlying mechanisms on episodic future thinking. We trained a parallel-distributed processing model to predict the next event in the training sequence. After training, the model took the acquired knowledge to repeatedly self-generate event sequences (i.e., the model predicted the next event, and this prediction formed the input of the next trial which in turn will trigger the next prediction). As a result, self-generated event sequences captured the episodic future thinking of normal participants and that of patients with semantic dementia when the model's connectivity was damaged. The patient model self-generated event sequences in deviated contexts from main one. Simultaneously, internal representation about input information no longer represented the semantic similarity of the input patterns (i.e., degradation of semantic memory) in the damaged model. That is, the semantic memory supported self-generation of future events predictions in a coherent context.

Keywords — memory, semantic memory, mental simulation, episodic future thinking

1. はじめに

人間は、将来経験すると思える出来事に自己を投影し、まさに今体験しているかのようにイメージできる。この認知機能は、エピソード的未来思考 (episodic future thinking; 以下, 未来思考) と呼ばれている [1]。未来思考は、エピソード記憶・意味記憶といったシステムに支えられていることが、心理学や神経科学によって解明されてきた [2]

[3]。しかし、それらの記憶システムが具体的にどのようにして未来思考を支えているのか、その背景にあるメカニズムは未解明である点が多い。そこで、本研究では、これらの記憶システムと未来思考の関係について、系列的イベント予測という観点から説明を試みた。

未来思考は一種のメンタルシミュレーションであるが [4]、メンタルシミュレーションには、イベントの系列的イメージ生成という側面がある [5]。例えば、明日レストランで夕食を取る場面についてイメージするとしよう。そのとき、「店に到着して、ウェイターに迎えられ、テーブルに案内され、メニューを受け取り、飲み物を注文する」というように、妥当なイベント系列が順番にイメージされるだろう。これらは基本的に順番が前後する (例: 店に着く前にウェイターに迎えられる) ことはないし、前イベントと無関係の事を突然イメージすることもない。言い換えると、未来思考には、あるイベントの次に何が起き得るかという知識が必要である。この知識とは、いわゆるイベント・文脈のスキーマ的知識と呼ばれるものであり [6]、イベント・文脈の意味情報と同義ともみなされる [7]。また、このスキーマ的知識の獲得には、エピソード記憶が必須である。なぜならば、あるイベントの次に何が起きうるかという知識は、日頃経験するイベントに対して、その次のイベントを予測する、という日常的な体験(過去のエピソード体験)・学習の結果だからである [8]。このように系列的イベント予測という側面に注目すると、未来思考とエピソード記憶・意味記憶の関係

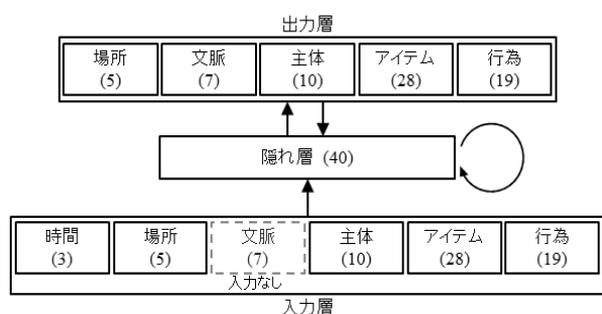


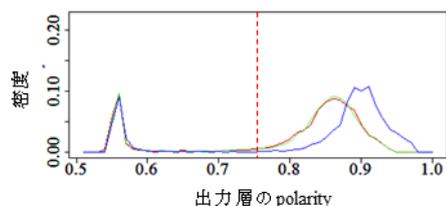
図 1. モデルの構造。() はユニット数。

は説明が可能である。そこで、本研究は、並列分散処理モデルに系列的イベント予測という機能を学習させ、モデルを分析することで、未来思考の鍵となる背景メカニズムと、意味記憶がいかにして未来思考を支えるかを明らかにした。

2. 方法

系列予測モデルの先行研究を参考に [6], 3 層の単純再帰型ネットワークモデルを作成した。入力層は、時間/場所/文脈/主体/アイテム/行為の情報を以って一つのイベント入力として表現するため、6 つの下位層で構成されていた。モデルは、系列的イベント予測能力を獲得するために、入力されたイベントから次の入力イベントを予測するようにトレーニングされた (系列予測課題)。このため、出力層は入力層とほぼ同じ構造をもつように構成された (時間以外の情報を出力するように 5 つの下位層で構成された, 図 1 参照)。トレーニングの際、文脈とは明示的に外界から与えられるものではないため、文脈入力層は、実際には情報の入力を受け取らないようにした。それに対して、文脈出力層にはターゲットとなる出力パターンが決められていた。これは、現在経験しているイベントがどのような文脈に当たるのかを、イベント系列や他の入力情報に基づいて「解釈」することがモデルに求められたということを意味している。学習に用いられたイベント系列はランダムではなく、「子供時代に (時間)/自宅 (場所)/食事中に (文脈)/自分が (人物)/フォークを (アイテム)/口に運ぶ (行為)」といったイベントの次に「子供時拭う」といったイベント情報が入力されるなど、

(a) 健常者モデル



(b) SDモデル

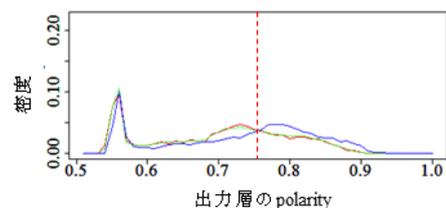


図 2. 出力層の polarity (熟知度の指標)。

(a)健常者モデル, (b)標準偏差 0.1 のガウスノイズを与えた重度意味認知症モデル。

現実に則した統計的制約が組み込まれた。より具体的には、数試行の間は場所や文脈、人物、アイテムは維持されるが、行為は毎試行変化するようになっていた。主体は 70% の確率で変化し、主体が変化した場合は 40% の確率で文脈が変化し、文脈が変化した場合は、40% の確率で場所が変化した。また、学習セットは子供・青年・大人という 3 時代に分けられ、各時代に特異なイベント情報が学習セットに存在するようにした (エピソード記憶のテストのため, 図 2 参照)。

3. 結果と考察

統計的な構造をもったイベント系列を予測する課題では、同じ入力に対して異なる出力が求められることがある。したがって、系列予測課題学習の結果として、どんなイベントが次に入力され得るかが決定論的ではなく、確率的に予測されるようになる。そこで、系列予測課題の学習が十分に行われたかどうかを評価するために、モデルによる出力ベクトルパターンと、ターゲット生起確率ベクトルパターンとの狭角について cosine を算出した [9]。その結果、cosine の値は 0.95 であり (狭角が 0° のとき cosine は 1 となる), 両ベクトル方向が非常に近いことが示された。すなわち、モデル

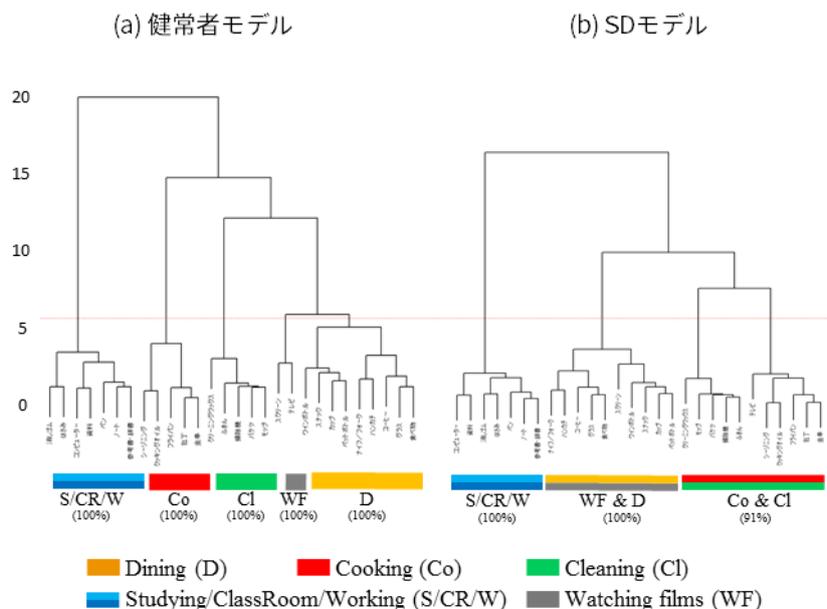


図 3. アイテムのクラスター分析結果。

(a)健常者モデル, (b)標準偏差 0.1 のガウスノイズを与えた意味認知症モデル。

は系列予測能力を獲得していたと言える。

次に、各時代に特異なイベントを入力し、その入力に対してモデルの出力層ユニットがどの程度極値 (0 か 1) に近い値を出しているかを測定した。これは polarity または stress と呼ばれ、入力に対するモデルの熟知度としてみなされている指標である [10]。その結果、子ども時代、青年時代に特異なイベント入力より、大人時代に特異なイベント入力に対してより強い熟知度を示すという、親近性効果 (エピソード記憶の指標) が確認された (図 2a)。

さらに、意味記憶が獲得されているかどうかを検討するために、イベント入力毎の隠れ層の状態をクラスター分析した。その結果、意味的な類似性が高いアイテムが呈示されたイベントでは (例: カップとグラス)、隠れ層の活性化状態がよく似ており、いわゆるカテゴリー的知識 (意味記憶) の獲得が確認された (図 3a)。

このように、エピソード記憶と意味記憶に支えられた系列的イベント予測能力を獲得したモデルに、未来思考という認知機能の再現を試みた。人間の未来思考を模すため、モデルにイベントの連続的な自己生成を行わせた。すなわち、あるイベ

ント入力に対するモデルの出力 (次のイベント予測) を、そのまま次の入力イベントパターンとし、また出力を次の入力とする、という手続きを繰り返した。結果 (図 4a), モデルはある程度一定の文脈 (例: 食事) でのイベント系列自己生成を行い、一般的な未来思考と一致する振る舞いを示した [2] [11]。

最後に、モデルの隠れ層出力にノイズを与えたところ、意味記憶に障害を持つ意味認知症 (semantic dementia) 患者に見られる乖離パターンが確認された。すなわち、エピソード記憶は比較的保たれていたが (図 2b, c), 意味記憶は崩壊していた (図 3b, c)。この損傷モデルにイベントの連続的自己生成を実行した結果、頻りに文脈を変えながらイベント系列を自己生成することが確認され (図 4b, c), 意味認知症患者の未来思考パターンの再現にも成功した [2]。

これらの結果を総合して考えると、未来思考は系列的イベント予測という認知過程に支えられており、この認知過程を通じて、意味記憶は文脈に即した未来のイベント系列の生成を支えていることが明らかとなった。

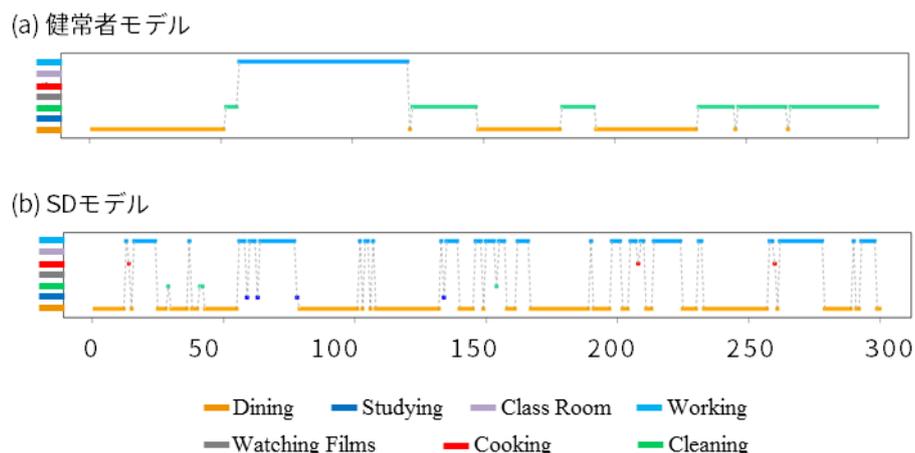


図 4. イベントの自己系列生成時の文脈推移。

(a)健康者モデル, (b)標準偏差 0.1 のガウスノイズを与えた重度意味認知症モデル。

4. 参考文献

- [1] Atance, C. M., & O'Neill, D. K. (2001). Episodic future thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), 533–539.
- [2] Irish, M., Addis, D. R., Hodges, J. R., & Piguet, O. (2012). Considering the role of semantic memory in episodic future thinking: evidence from semantic dementia. *Brain*, 135(7), 2178–2191. doi:10.1093/brain/aws119
- [3] Schacter, D. L., Addis, D. R., & Buckner, R. L. (2007). Remembering the past to imagine the future: the prospective brain. *Nature Reviews. Neuroscience*, 8(9), 657–661.
- [4] Buckner, R. L., & Carroll, D. C. (2007). Self-projection and the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(2), 49–57.
- [5] Rumelhart, D. E., & McClelland J. L., & the PDP Research Group (1986) *Parallel distributed processing: Explorations in the microstructure of cognition (Vol. 2)*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [6] Botvinick, M., & Plaut, D. C. (2004). Doing without schema hierarchies: a recurrent connectionist approach to normal and impaired routine sequential action. *Psychological Review*, 111(2), 395–429.
- [7] Berntsen, D., & Bohn, A. (2010). Remembering and forecasting: The relation between autobiographical memory and episodic future thinking. *Memory & Cognition*, 38(3), 265–78.
- [8] Schapiro, A. C., Rogers, T. T., Cordova, N. I., Turk-Browne, N. B., & Botvinick, M. M. (2013). Neural representations of events arise from temporal community structure. *Nature Neuroscience*, 16(4), 486–92.
- [9] Elman, J. L. (1990). Finding structure in time. *Cognitive Science*, 14(2), 179–211.
- [10] Plaut, D. C. (1997). Structure and Function in the Lexical System: Insights from Distributed Models of Word Reading and Lexical Decision. *Language and Cognitive Processes*, 12(5-6), 765–806.
- [11] Addis, D. R., Wong, A. T., & Schacter, D. L. (2008). Age-related changes in the episodic simulation of future events. *Psychological Science*, 19(1), 33–41.