

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：12102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2017

課題番号：26590173

研究課題名(和文) 対属性仮説に基づく結合問題の解決と多次元情報統合過程のモデル化

研究課題名(英文) Solving the binding problem and modeling the integration process of multidimensional information based on the no-triplet hypothesis

研究代表者

森田 昌彦 (MORITA, Masahiko)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：00222349

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：人間はさまざまな情報から総合的に認知や判断を行うが、「脳において別々に処理される異種情報がどのように統合されるのか」という問題(結合問題)は、組み合わせ爆発の問題を伴うため、基本的ながら未解明である。本研究では、「2属性ずつ統合された複数の脳内表現に基づいてさまざまな処理が行われる」という対属性仮説の検証実験と、それに基づく多次元情報統合のモデルの構築、およびその応用を行った。その結果、視覚情報処理に関して対属性仮説を強く支持する結果を得た。これによって組み合わせ爆発問題を解消できるだけでなく、応用上も有用であることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：How different kinds of information or attributes are integrated in the brain is one of the most fundamental open questions, which is computationally difficult because it involves the combinatory explosion problem. We hypothesized that only pairs of attributes are integrated at a time, and that unified representations of three or more attributes are not formed except for a limited number of very familiar cases. In this study, we obtained strong evidence for this hypothesis, and developed a paired-attribute model based on the hypothesis. We also showed that this model is useful in some applications.

研究分野：神経情報処理

キーワード：視覚特徴統合 バインディング問題 対属性モデル 刺激反応学習

1. 研究開始当初の背景

人間はさまざまな情報から総合的に認知や判断を行うが、その過程をよく反映する一般的な数理モデルは知られていない。その根本には、「脳において別々のモジュールで処理される異種情報がどのように統合され、それがどう処理されて認識や行動に至るのか」という結合問題（バインディング問題、結び付け問題）が、神経科学的にも計算論的にも未解決であるという状況がある。

結合問題に対する解として、これまで同期発火説や双方向説などが提案されてきたが、否定的な生理学的・心理学的知見があるという以前に、計算論的に破綻している。例えば、同期発火説はおばあさん細胞と等価な同期検出器を要するし、双方向説が主張するように低次視覚野を介して高次領域同士が結合するだけでは、特徴同士の対応関係はわかるが、その対応関係に応じた処理ができない。

我々は、これまで視覚特徴統合に関する研究を行ってきたが、従来研究の前提である「すべての属性（色、形、運動方向など）が統合された一つの表現が作られる」ことを疑問視し、「二属性ずつ結びついた表現が複数作られ、それらに基づいて認識や記憶が行われる」という対属性仮説を提唱した[引用文献①]。この仮説によれば、例えば『落下している赤いリンゴ』は、『赤いリンゴ形』+『下方向に動く赤』+『下方向に動くリンゴ形』として表現され、その状態で記憶される。逆にこの3つの表現が活性化されれば、「赤いリンゴが落ちている」と認識されことになる。この仮説が正しければ、組み合わせ爆発という計算論的困難が解消されることになる。

しかし、これまで証拠を示すことができたのは、「視覚系で対属性表現が用いられている場合がある」という“弱い”仮説だけで、「非常に見慣れた一部の視覚物体を除いて、3属性以上が単一の表現に統合されることはない」という強い仮説（no-triplet 仮説）の検証はされていなかった。これは、物体の認識や記憶には必ずしも全属性の統合が必要ではないからであり、新たな検証実験のパラダイムが必要であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、視覚における対属性仮説の妥当性を実験的に検証すると共に、その一般化を図ることである。これらを通じて結合問題の理論的困難さを解決すると共に、人間の情報統合過程を反映した多次元情報統合の数理モデルを構築することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 視覚特徴統合における対属性仮説の検証

刺激反応連合課題を用いた新たな実験パラダイムを構築し、被験者実験を通じて仮説の妥当性を検証する。その基本となる実験は以下のようなものである。

まず、図1の左側のような8通りの刺激図

形を用意する。これらは2種類の形・色・テクスチャ特徴を組み合わせたものである。これを2つずつ、右側に示す4つの反応キーに対応づける。このとき、一番上の2つの刺激は、形と色のみでテクスチャに関係なく反応キーが決定される。同様に2段目の刺激は形とテクスチャ、3段目の刺激は色とテクスチャによってそれぞれ反応キーが決まる。このように、2つの属性の情報があれば正しく反応できる場合を「2属性条件」と呼ぶ。これに対し、最下段の刺激は、正しく反応するためには3つの属性すべて情報が必要となるため、このどちらかの刺激が提示された場合を「3属性条件」と呼ぶ。

実験の1試行では、8個のうち1つの刺激が画面に提示され、被験者はできるだけ速くかつ正確に反応キーを押すことが求められる。間違ったキーを押した場合や、制限時間を超えた場合にはブザー音が鳴る。89試行を1ブロックとし、これを何ブロックか繰り返して正答率や反応時間を測定する。

この実験をベースに、刺激の種類や提示方法を変えた実験をいくつか実施した。

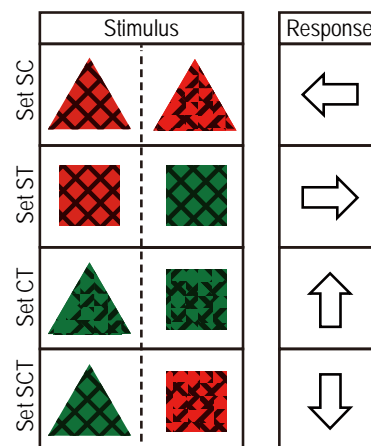


図1 刺激と反応の対応関係

(2) 個人の嗜好関数の計測と分析

視覚特徴統合以外の情報処理においても対属性仮説が成り立つかどうかを調べるために、さまざまな入力のコマンドに対する人間の好み全体を定量化した「嗜好関数」の計測と分析を行った。

具体的には、服装のカラーコーディネートを対象とし、4つの要素につき各4色、全体で256通りのコーディネートのすべてについて各被験者の好みを1対比較とElo-rating（チェスなどの対戦型ゲームにおける各プレイヤーの実力を現す数値の算出法）を用いて定量化する。得られたデータを用いて、評価値の妥当性の検証および嗜好関数に関するさまざまな分析を行った。

(3) 情報統合に関する対属性モデルの応用

組み合わせ爆発は視覚情報統合に限らず多次元入力さまざまな問題で生じる。これに対して、従来は線形モデルで対応する場合が多かったが、2次元ずつ統合した情報をベース

にして処理する対属性モデルの考え方は有効だと考えられる。

具体的には、この考え方を取り入れた選択的不感化ニューラルネット (SDNN, 図 2) を用いて、パターン識別能力の向上や多次元連続状態行動空間における強化学習の効率化を図った。

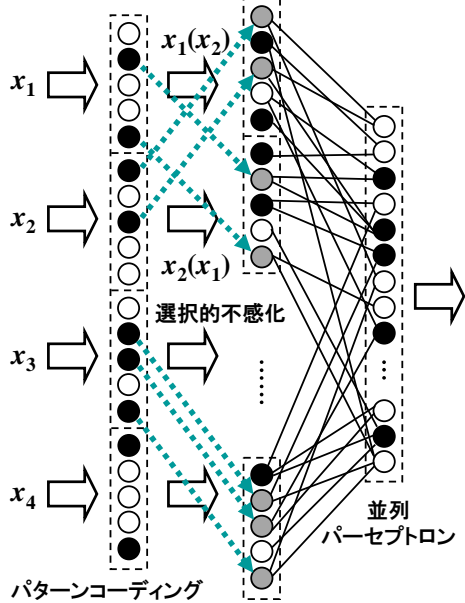


図 2 選択的不感化ニューラルネット

4. 研究成果

(1) 視覚特徴統合における対属性仮説の検証

3つの属性からなる8種類の刺激と4つの反応キーとを連合する課題について、学習曲線及び反応時間を調べたところ、反応が3属性の組合せで決まる場合(3属性条件)の方が、2属性のみで決まる場合(2属性条件)に比べて学習及び反応がより難しいこと、属性を空間的に分離して提示するときよりも学習が難しいことが明らかになった。この結果は、全属性を統合した物体表現ではなく、注意によって2属性ずつが結合した表現が反応と連合されるというモデル(図3)を支持する。このことは、3属性以上が直接結合した表現は、長期的な学習なしには作られないことを強く示唆しており、対属性仮説の大きな根拠となるものである。この成果は、有力な国際論文誌 *Scientific Reports* (2015年の *Impact Factor* = 5.228) に発表した[雑誌論文②]。

また、同様の刺激反応連合学習の実験において、異なる属性を別々の窓に表示すると反応選択時間が長くなった一方で、2属性ずつ組み合わせると3つの窓に提示したときには有意な差は出なかった。また、提示方法に関係なく、3属条件の方が2属性条件よりも学習と実行が難しかった。さらに、何度も繰り返し見た刺激(習熟刺激)を用いて同様の実験を行ったところ、3属性条件でかつ3つの属性を同一窓に提示した場合には習熟刺激の方が非習熟刺激よりも短時間で反応するこ

とができしたが、2属性条件または3属性を2属性ずつ分離提示した場合には習熟刺激と非習熟刺激の差は見られなかった。この結果は、同じ刺激を何度も繰り返し見た場合のみ3属性が直接統合されるが、それ以外については3属性を統合した脳内表現は作られないことを示しており、対属性仮説を強く支持するものである。この成果は、一部を国際会議[学会発表⑥]で発表した後、国際学術雑誌に論文投稿した(現在査読中)。

さらに、上記の実験において3属性うち「模様」を「位置」に変えたところ、3属性条件は2属性条件より難しいという点に変化はなかったが、位置を入れ替えたときのみ他属性を入れ替えたときより再学習が容易であった。この結果は、対属性仮説が普遍的に成り立つことを示す一方、「位置」は特別な属性であり、他の2属性が位置を媒介に統合された後で反応と連合される過程を修飾している可能性を示唆するものである。これらの成果は、国内外の学会で発表した後[学会発表①②④⑤]、*Vision* 誌に論文発表し[雑誌論文①]、日本視覚学会鶴飼論文賞を受賞した。

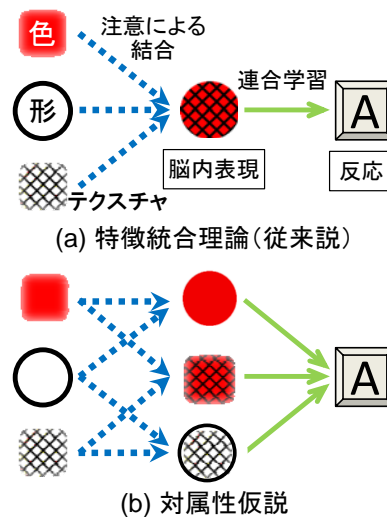


図 3 多属性刺激と反応の連合過程

(2) 個人の嗜好関数の計測と分析

服装のカラーコーディネートの評価に関する被験者実験の結果、提案した方法で一定回数以上の選択をしてもらえば、ほぼ妥当な評価値が得られることがわかった。また、得られた評価値を元に分析を行ったところ、個人の嗜好関数は要素ごとの好みの線形和(線形モデル)では十分に表現することができず、二つの要素の組ごとの好みの和(対属性モデル)によってよりよく表現されることを明らかにした。この結果は、人間の価値判断においても対属性仮説が成り立つ可能性を示唆している。この成果は国内学会で発表した[学会発表③]。

但し、その後より多数の被験者で実験した結果、嗜好関数の形にはかなりの個人差があり、線形モデルで説明できる人もいるという興味深い事実が判明した。これについては今

後更に研究を深めていく予定である。

(3) 情報統合に関する対属性モデルの応用

選択的不感化ニューラルネット (SDNN) は、各入力変数をパターンとして分散的に表現 (パターンコーディング) した上で、2 つずつ選択的不感化という手法で統合してから並列パーセプトロンに入力するという構造をもつ (図 2)。SDNN は関数近似器として非常に優れた性能をもち、特に連続状態空間での強化学習における価値関数近似に非常に適している。本研究では、SDNN を改良し、状態変数だけでなく行動値も連続的な場合の Q 学習に応用する方法を提案した。ベンチマーク課題を用いたシミュレーション実験の結果、提案手法が既存の手法よりも優れていることが示された[雑誌論文④]。また冗長入力があっても学習性能が低下しないだけでなく、入力の冗長性を利用してノイズの影響を受けにくくすることもできることを明らかにした[雑誌論文③]。

<引用文献>

- ① Masahiko Morita, Shigemitsu Morokami, Hiromi Morita. Attribute pair-based visual recognition and memory. PLoS ONE, Vol. 5, No. 3, e9571, 2010.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 藤井佑実子, 森田昌彦, 森田ひろみ. 刺激の位置を含む複数属性と反応のマッピング学習, *Vision*, 査読有, Vol. 29, No. 4, pp. 129-144, 2017.
<http://www.visionsociety.jp/VISION/vol29/no4/VISION290401.pdf>
- ② Takuya Ishizaki, Hiromi Morita, Masahiko Morita. Feature integration in the mapping of multi-attribute visual stimuli to responses, *Scientific Reports*, 査読有, Vol. 5:9056, 2015.
DOI: 10.1038/srep09056
- ③ Takaaki Kobayashi, Takeshi Shibuya, Masahiko Morita. Q-learning in continuous state-action space with noisy and redundant inputs by using a selective desensitization neural network, *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 査読有, Vol. 19, pp. 825-832, 2015.
DOI: 10.20965/jaciii.2015.p0825
- ④ 小林高彰, 澁谷長史, 森田昌彦. 選択的不感化ニューラルネットを用いた連続状態行動空間における Q 学習, *電子情報通信学会論文誌(D)*, 査読有, Vol. J98-D, pp. 287-299, 2015.

http://search.ieice.org/bin/pdf.php?lang=J&year=2015&fname=j98-d_2_287

[学会発表] (計 8 件)

- ① 藤井佑実子, 森田ひろみ. 色, 形, 位置の組み合わせと反応の連合方式の検討, 日本視覚学会 2018 年冬季大会, 2018.
- ② Yumiko Fujii, Masahiko Morita, Hiromi Morita. Transfer of Multi-Attribute Stimulus-Response Mappings, *APCV2017*, 2017.
- ③ 板持茜, 森田昌彦. カラーコーディネートに対する個人の嗜好関数の計測と分析, 第 12 回日本感性工学会春季大会, 2017.
- ④ Yumiko Fujii, Hiromi Morita. Mapping of combinations of spatial attributes to responses, *ICP2016*, 2016.
- ⑤ Yumiko Fujii, Masahiko Morita, Hiromi Morita. Integrated representations of shape, color and location in stimulus-response mapping, *APCV2015*, 2015.
- ⑥ Mizuki Furutate, Masahiko Morita, Hiromi Morita. Effects of separate presentation of visual attributes on stimulus-response mapping, *APCV2015*, 2015.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://volga.esys.tsukuba.ac.jp/demo/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森田 昌彦 (MORITA, Masahiko)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 00222349

(2) 研究分担者

森田 ひろみ (MORITA, Hiromi)
筑波大学・図書館情報メディア系・准教授
研究者番号: 00359580

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

石崎 琢弥 (ISHIZAKI, Takuya)
藤井 佑実子 (FUJII, Yumiko)
古館 美月 (FURUTATE Mizuki)