

符号化効率性によるネッカーキューブの立体知覚の計算論的説明

An Computational Account for Three-dimensional Perception of the Necker Cube Based On Encoding Efficiency

日高 昇平[†], 高橋 康介[‡]
Shohei Hidaka, Kohske Takahashi

[†]北陸先端科学技術大学院大学, [‡]立命館大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Ritsumeikan University

概要

ネッカーキューブ(NC)に代表される曖昧図形の知覚は、知覚心理学の古典的な研究題材でありながら、しかし、その知覚の機序は多くが未解明のまま残されている。本研究は NC とそれに類する曖昧図形を対比することで、従来の視覚の計算論的モデルではこれらの知覚を説明困難であることを論ずる。これに対し、知覚を符号化とし、その効率性の高い符号として知覚像をとらえる日高・高橋(2021)のモデルで NC 等の立体知覚の性質を説明できることを示す。

キーワード：曖昧図形 (ambiguous figure), ネッカーキューブ (necker cube), 対称性 (symmetricity), 群 (group), 圏 (category)

1. 曖昧図形の曖昧さ

いわゆる曖昧図形と呼ばれるものの代表的な一つとしてネッカーキューブ(Necker cube)[1]と呼ばれる平面図形 (図 1a)がある。ネッカーキューブは一義的には平面図形であるが、それに対して我々は典型的には立方体のような立体図形を知覚する。以下、平面図形としての視覚データと呼ぶときに「ネッカー平面図」とよび、それに対し我々が典型的に知覚する立体的図形を「ネッカー立体図」と呼ぶ。

ネッカーキューブは以下の少なくとも3つの異なる意味で曖昧である。

1. ネッカー平面図をある平面への射影として持つ立体図形は無限に存在し、どれが“正しい”立体図形か曖昧である。(原像推定の曖昧さ)
2. 知覚されるネッカー立体図形には、互いに奥行き方向の鏡映変換によって得られる2種類があり、ある瞬間にそのどちらが知覚されるかは曖昧である。(知覚像の曖昧さ)
3. ネッカー平面図は、平面図形そのものとしての知覚像も可能である。2次元以上(3, 4, 5, ...次元)の図形としての知覚が可能である点で曖昧である。(図形を構成する次元の曖昧さ)

こうした少なくとも3種類の原理的な曖昧さを持つネ

ッカー平面図に対し、実際には我々は、3次元空間上(次元の曖昧さの解消)にある、特定の立方体を知覚する(原像推定の曖昧さと知覚像の曖昧さの解消)。

しかし、コッファーマンキューブ(図 1b; Kophfermann cube)と呼ばれる[2]、ネッカー平面図に類似したもう一つの平面図形と比べることで、こうした立体的な知覚像の生起が必ずしも自明ではないことがわかる。コッファーマンキューブに対して、我々は典型的には1種類の平面図形(六角形)を知覚する。

わずかに線分のパターンが異なるだけの2つの図形に対し、我々の知覚系は全く異なる応答をする。この一対の知覚現象は明確に以下のことを指し示すように思われる。

1. “正しい原像”は必ずしもない。
2. 場合によって知覚可能な像の数は増減する。
3. 場合によって知覚される図形の次元も変わる。

このような知見を考慮すれば、一見して“場合によって”知覚される像が変わることを示唆しており、曖昧図形の知覚は場当たりの現象のようにも思われる。

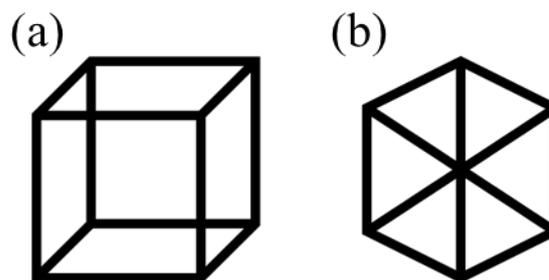


図1: (a) ネッカーキューブ、(b) コッファーマンキューブ

2. 従来の知覚に関する理論の限界

一見場当たりの見える曖昧図形の知覚を系統的に説明することは可能だろうか。まず、従来の計算論的神経科学の枠組みを振り返り、その枠組みでの曖昧図形の知覚の説明は困難であることを指摘する。

Marr [3]以来、もともと外界にあると想定される3次元構造の反射光が特定の網膜像を作る物理的な過程を「順光学」と呼び、その逆に対応する推定の過程を「逆光学」と呼ぶ。この思想の根底には、「原像は(特定の制約を満たす)3次元構造物であり、外界では順光学が適切な物理過程として作用する」という“事前知識”を知覚系がもつという考え方がある。

一般に、ネッカーキューブの原像推定の曖昧さ(1.)で述べた通り、ある与えられた網膜像に対応する3次元構造は無限に存在し、この意味で不良設定問題である。したがって、逆光学過程では、真の逆は存在せず、疑似逆像の一つを構成することになる。このとき、前述の知覚系のもつ事前知識を利用し、その事前知識の下で最も尤もらしい3次元像(疑似逆像)を、原像であると推定する。

しかし、こうした計算論的神経科学の枠組みには根本的な問題もある。それは、我々は生まれて此の方、一度も“網膜の外を見たことがない”にもかかわらず、どのようにその外の世界の“事前知識”を獲得するのか、という問題である。また、第二に、コッファーマンキューブのように、平面的な知覚が優位な現象を、ネッカーキューブを説明するのと同じ“3次元構造を前提とする”数理モデルによって説明が可能か、という問題がある。

3. 符号化効率性による説明

こうした従来の数理的モデルの枠組みの問題点を踏まえ、日高・高橋[4]は、新たな曖昧図形の知覚の数理的な説明を与えた。この説明では、従来の視覚の計算論的神経科学で主流の考え方であった、知覚を「逆光学」とする考え方を捨て、知覚を「ある種の効率性の高い符号化」とみなす。この枠組みでは、「原像に関する事前知識」は要求されず、知覚としての符号化の効率性のみが推定原理として用いられる。以下、この説明枠組みを、符号化効率性による説明とよぶ。

符号化効率性による説明では、図形の対称性が高いほど、同じデータを再現(復号)するのに、記憶するデータが少なく済むことから、図形の対称性を一つの効率性の指標と捉える。ある平面図形の対称性は、それを不変にする変換が構成する群(単位元、逆元、結合律をもつ演算をもつ数学的構造)のサイズ(位数)によって特徴づけることができる。また、そもそも群の基礎となる「図形」の種別も、ある種の符号の効率化によ

って定まると考える。こうした符号化の効率化の過程は、ベクトル空間に埋め込まれた点、線、グラフ、およびそれらのなす群を、圏論的モデルによって統合的に記述する。圏論的には、符号化の効率性を定めることは、適切に定義された圏に対して随伴関手を定めることに対応する。

4. 符号化効率性による予測

符号化効率性による説明は、ネッカーキューブが立方体として知覚されることが最も効率的であり、かつその平面像がそれより非効率的であること予測する。さらに、コッファーマンキューブに対しては、平面像が十分に効率的であり、立体像まで拡張する必要がないことを予測する。

序論で述べたこうした基本的な立体性知覚の生起に加えて、ネッカーキューブの立体像がちょうど2つで、コッファーマンキューブの平面像がちょうど1つあることもモデルから予測される。

5. 変換群構造と符号化効率性

本研究で提案するネッカーキューブの立体性知覚の計算論的モデルは、符号化の効率性の指標として群のサイズに着目している。これに類する考え方は、今井・天野[5]のパタン認知の先駆的な研究でも提案されている。彼らの一連の研究では、なぜ変換群の構造がパタン認知に本質的であるか十分な正当化はなされていない。これに対し、本研究の仮説では、変換群の構造が、視覚のデータの符号化というより大きな枠組みの一つの最適化の過程として現れると位置づける。

今後の主な課題として、ネッカーキューブに限らない一般の線画に関して最大の対称性をもつ知覚像の予測を与える計算モデルを構築することが挙げられる。

謝辞

本研究は科研費 JP 20H04994 および JST さきがけ JPMJPR20C9 の補助を受けて行われた。

文献

- [1] Necker, L.A. (1832). LXI. Observations on some remarkable optical phenomena seen in Switzerland; and on an optical phenomenon which occurs on viewing a figure of a crystal or geometrical solid. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 1, 329-337. doi: 10.1080/14786443208647909.

- [2] Hoffman, D. (2003). *Visual intelligence: How we create what we see*. New York: W. W. Norton & Company. (ホフマン, D. 原 淳子・望月 弘子 (訳) (2003). *視覚の文法：脳が物を見る法則* 紀伊國屋書店)
- [3] Marr, D. (1982). "Vision". W. H. Freeman & Co Ltd.
- [4] 日高昇平 & 高橋康介 (2021). "なぜネッカーキューブはあの立体に見えるのか?". *認知科学*, 28(1), 25-38.
- [5] 今井 四郎・天野 要 (1998). 変換と写像の概念に基づくパターン認知論 *応用数理*, 8, 30-45. doi: 10.11540/bjsiam.8.1_30