

記号接地問題における地とは何か：視覚的物体の同一性の分析

What is the “ground” of the symbol grounding problem?

日高 昇平[†]

Shohei Hidaka

[†]北陸先端科学技術大学院大学

Japan Advanced Institute of Science and Technology

shhidaka@jaist.ac.jp

Abstract

記号接地問題において、最大の問題の一つは、地 (Ground)あるいは非地とは何かという問題である。本研究では、Harnad のいう「中国語-中国語辞書による中国語の学習」という構造(メタ復号問題)が、“地”の候補たる感覚情報にも存在するため、記号と地(非記号)という二分法に意味がないことを論じる。これに対し、本研究は、情報の伝達経路における変換に拠らず推論が可能な性質を、メタ復号問題の解の候補として提案する。異なる2時点の複数の点の同一性を論じることで、視覚的オブジェクトの一種が変換群の可換性により特徴づけられることを示す。これにより“感覚器を通した情報を地”とする素朴な定式化を超えて、本質的な意味発生の定式化を論じる。

Keywords — Symbol grounding problem, Chinese room argument, meta decoding problem, homomorphism

1. 記号接地問題

記号接地問題とは、記号がいかによりによって意図された意味に結び付けられるのかを問う問題である。ここでの記号とは、狭義には音声的な言語単位(e.g., 発話や文字による単語、文など)を指す。一方、記号接地問題における「地」である意味として何を指すのかは、論者によって大きく意見が分かれるところだろう。意味の定義については後ほど述べるとして、それが何であろうと、「接地」の比喻によって捉える意味の一つの側面は、記号のように恣意的で不安定なものを、ゆるぎなく安定しているはずの大地(Ground)に結び付けるという含意があると思われる。

そうしたゆるぎない意味の源泉(～それを要素として意味が構成されるもの)として、多くの研究では感覚・知覚によって与えられるデータ(認識論の用語ではセンスデータあるいは感覚所与)を前提として議論を構成している。一方で、古典的な記号処理による人工知能(AI)研究を典型的には指して、これらの記号処理

では意味を表現しえないとする。Harnad (1990) [1]は、こうした記号処理を「中国語を中国語-中国語辞書をもって学習する」ようなものだとし、記号と非記号的表象の間の結合(grounding)が必要だと論じた。

2. 記号=離散, 地=連続でよいのか

こうした記号と非記号的な意味あるいは地の二分法は、記号処理的 AI と並列分散処理的なコネクショニズム(McClelland & Rumelhart, 1978 [2])を象徴として、1980年代から2000年代初頭までは離散的・論理的な情報処理と、連続的・分散的な処理の違いとして理解されてきた面がある。

しかし、近年の人工知能や統計的な情報処理モデルの発展では、こうした垣根はほとんど意味のないものとなってきている。つまり、古典的な論理的・離散的な処理や、逆にすべてが連続的な関数であるコネクショニズムという二項対立に代わり、離散的な確率変数(典型的には多項分布に従う)と、連続的な確率変数を共に共存させた、階層的な確率モデルなどが登場している。こうした柔軟な統計的モデリング手法は、確率論・統計学の観点から統一的に定式化される。近年有用性が顕著に認められる深い階層を持つニューラルネットワークなども、その複雑性など数理的に解明すべき性質は残されているものの、やはり統計的なモデリングの一種であると言える。

したがって、少なくともこうした技術的な観点から言えば、離散的な変数を記号とよび、連続的な変数を地・意味と呼ぶことにはほとんど意味がない。あるいは、ある変数が「感覚所与」「意味」であり、また別な変数が「記号」であるというラベルを設計者が与える事では、記号接地問題の本質に迫ることにはならない(記号接地を問いとせず、特定課題を解く処理機械を作るのが目的なら、それでよいかもしれない)ことも明らかである。

3. 地とは何か：メタ復号問題への転換

よって、我々は改めて記号接地問題における「記号」とは何か、「地」とは何かを問いなおす必要があるのではないだろうか。

より具体的に言えば、例えば網膜に投影された視覚像が、「感覚情報」(地)であるとはどういうことだろうか。前述した通り、人間の“設計者”が、「この神経細胞の活動は外界の視覚的なパターンを伝える情報である」というラベルを生得的に与えているのであれば、記号接地問題は本質的に既に解けている。つまり、こうしたラベルの付与は、何を意味(あるいはその構成要素)とすべきか、その方針を明示的に与えることに他ならない。逆説的に言えば、あえて記号接地問題における記号と地とは何かを問う立場に在るということは、こうした一切のラベルを前提とせず、しかし、視覚野の神経細胞が「視覚パターン」を伝達していることをいかに知るか、という問題である。これは、Harnad (1990) [1]が「中国語を中国語・中国語の辞書で学ぶ」とした記号処理問題と全く同型である。つまり、離散的な対象であろうと、連続的な対象であろうと、「認知的に閉じた」主体(ラベルを付与されず、自ら意味を見つけ出す主体)からは、やはり「神経細胞の間のやりとり(中国語・中国語の辞書)から、神経細胞が何を意味しているか(中国語)を見出す」のは本質的に同型の問題となっている。

日高 (2016) [3]は、これと本質的に同型の主張である Searle (1980) [4]の中国語の部屋論法への一つの解答として、メタ復号による解を提案している。日高 (2016)は、中国語の部屋の思考実験が、Shannon の通信モデル(Shannon, 1948) [5]と本質的に同型であることを指摘した上で、通信モデルの拡張を試みた。この試論において、メタ復号問題とは、「符号・符号の観察だけから、符号を信号に変換する復号規則を推定する問題」である。標準的な通信モデルでは、信号に符号を割り当てる符号器が、受信者に与えられることを前提として復号を行う。しかし、拡張したモデルでは、この符号器を所与とせず、通信路を経て変換された符号の観測だけでその復号規則を復号することを要求するため、メタ復号問題と呼ぶ。すでに挙げた「中国語を中国語辞書で学ぶ」、「神経細胞を神経細胞の活動でラベル付けする」の命題が、いずれも本質的にメタ復号問題の一種であると捉えることができる。

Harnad は「中国語だけによる中国語学習」から意味が生まれる事はないとして、それとは異なる非記号的な「地」を求めた。しかし、非記号的な「地」

の候補であったはずの感覚器・神経系自体も、「中国語だけによる中国語学習」と同じメタ復号問題としての構造をもつため、それは本質的な解になりえない。従って、本稿では、発想を全く変えて、メタ復号問題そのものを解くことが可能であるか模索する。

4. メタ復号問題としての視覚的物体同定

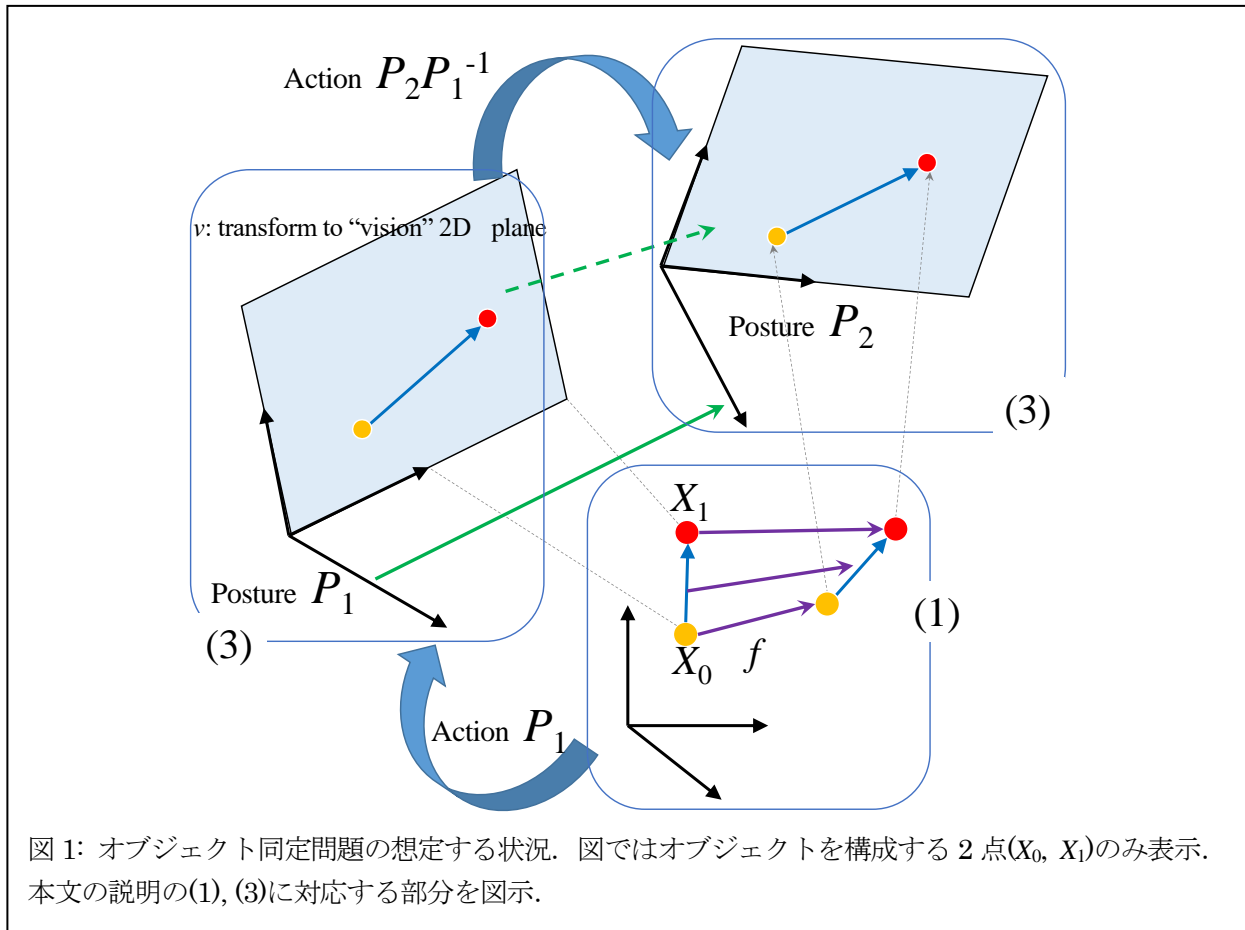
本稿では、メタ復号問題の一種として、「視覚的な情報要素の集まりで、なんらかの視覚的単位(オブジェクト)を構成できるか」という問題を例にとり考えていきたい。ここで考えるオブジェクト同定問題とは、ある空間上の点群がデータとして与えられ、それ自体にはラベルを与えられず、またそのデータが生成された過程も不明な時に、点群のどの部分集合が“意味のあるまとまり”である視覚的オブジェクトを構成するかを推定する問題である。

既存の機械学習などによるオブジェクト認識モデルと対比してこの問題の特徴を挙げよう。まず、多くのオブジェクト認識モデルは、認識器を構成するために、画像などのデータを準備し、それを学習する必要がある。また、教師あり学習と呼ばれる手法では、これに加えて、そうした画像のうち、少なくとも部分的にはどの画像の部分領域が特定の物体に対応するか、といった教師信号(ラベル)を与えて、それに対応する特徴を学習によって特定するというプロセスを経る。本稿で考えるオブジェクト同定問題では、通常のオブジェクト認識モデルと異なり、議論の単純化のため画像ではなく疎らな点群でデータを表現するという違いはあるが、これは本質的な違いではない。そうしたデータの形式・複雑性を除き、本質的な違いとして、オブジェクト同定問題では、一切の学習データを用いず、また教師信号なども与えないことが顕著な特徴として挙げられる。これは、オブジェクト同定問題の目的が、画像からの物体認識そのものではなく、物体認識という事例を通じて、「(画像あるいは点群という)符号だけから復号器を復号する」というメタ復号可能性の問題を論じる点にあるからである。

具体的に、本稿ではオブジェクト同定問題を以下の通り定義する(図1を参照)。

(1) ある時点 0 において、3次元ユークリッド空間上に N 点があり、そのうち M 点が、ある変換 f で、同空間上の別な配置へと移る。変換後の座標系に相当する時点をも 1 とする。

(2) 視覚的オブジェクトとは、ある変換で同時に



移される点の部分集合であると定義する。(1)の例では、変換 f で移される M 点と、同一変換で布置を変えない残り $N-M$ 点が、二つの異なるオブジェクトである。

(3) 観測者はある時点 0 の N 点を、ある座標系(線形変換 P_0)から観測し、また次の時点 1 の N 点を別な座標系(線形変換 P_1)から観測する。観測結果は、いずれの時点でも 3 次元座標系から、網膜の 2 次元座標系へと移る線形変換 v によって得られる 2 次元点群データとして与えられる。

(4) 本問題において“観測者”に与えられるのは、2 つの時点での視覚像である 2 次元点群データのみで、他の情報、すなわち、元の 3 次元点群、変換 f 、観測者中心座標系を与える変換 P_0, P_1 は、未知であるとする。

(5) “観測者”に与えられた 2 時点の 2 次元点群データのみから、 N 点のうちどの部分集合がオブジェクトを構成しているのか推定せよ。

この視覚的オブジェクト同定問題において、“観測者”は 2 つの時点における網膜像という極めて限られた情報源しか持ち合わせておらず、自分が各時点でどのような姿勢をとっていたか(観測者中心座標系の変化)すらも未知である。これは、視覚野の神経細胞の 2 時点での同一性だけが辛うじて与えられているものの、他

の体性感覚野や運動野などの他の領域の情報と連合して問題を解くことができない、つまり、「視覚情報だけに閉じた認知主体」を想定する事を意味している。また、この問題におけるオブジェクトの定義は、「なんらかの変換によって同時に変換される点の部分集合」であることは問題の前提として与えられるが、それがどのような変換であるか、という何をもって意味とすべきかという定義自体を推定する問題となっている。加えて、物体自体の変換のみならず、自分自身の姿勢変化によっても視覚像が変化するため、未知なる観測者の姿勢変換と、未知なる物体の変換を切り分ける必要もある。

5. 準同型写像の存在による物体同定

こうした、通常で想定されている物体認識問題よりも極めて限定された状況において、それでも視覚的物体という「意味」を見つけ出すことは可能だろうか。

結論から言えば、可能である。現在、著者はこのオブジェクト同定問題を中心として、メタ復号問題のプロトタイプの数理的な構造の解析を進めている。この進行中の研究の現段階の成果として、オブジェクト同定問題において、各未知なる写像が構成する準同型写

像の存在(図1では緑の破線矢印で示す写像の存在に対応する)を検証する事で、与えられる2時点の視覚像だけで任意の部分点集合のオブジェクト性を判定可能であることが分かっている。ただし、本来3次元空間上の構造が2次元空間へと縮退しているため、判別のつかないような特異なケースも含まれているが(こうした同値類の構造も数理的には明らかになっている)、そのようなケースを同値とみなすような認識器であるということを認めれば、本質的にオブジェクト性を問うためには、符号(ここでは点集合の変換群)のパターンマッチをする必要がない。

この結論は驚くべきものである。通常の機械学習の枠組みでは、特徴空間上の類似性(教師なし学習)か、あるいは判別したい事例のラベル(教師あり学習)のいずれかを、認識器の設計が与える必要がある。そしてこうした情報を基礎に、オブジェクトを認識するのが一般的であるが、上記のオブジェクト同定問題では、パターンそのものの定義は、トップダウン的(モデルの設計)にもボトムアップ的(学習データの選択)にも与えられておらず、それ自体を見つけ出す問題となっている。一方で、オブジェクト同定問題の数理では何も前提がないかという、そうではない。特定のパターンの類似性やラベルを明示的に与える代わりに、そうした関係が「存在する」ということを前提に推定の枠組みを構築している。つまり、それがどのような変換であるかは未知ではあるが、何らかの変換があり、それに関して、準同型写像(ここでは、線形力学系の間の準同型)が構成可能なものである、というある種の数学的な構造の存在を、オブジェクト性推定器の構築の基礎に置いている。事例的に言えば、「丸い形をしているのがりんごだよ」などと教えるのではなく、「どんな形をしているか、どんな動きをしているかわからないが、複数の可能な情報の経路で一貫した性質を持っているのが何らかの物体だ」といった、オブジェクトに内在する整合性を抽象化した命題を基礎において、オブジェクトを推定していることに対応する。

6. 中-中辞書による中国語の学習可能性

このオブジェクト同定可能性は記号接地問題にとってどのような意味を持つのだろうか。第一に、対象となる現象がいくつかの条件を満たす場合、「中国語-中国語辞書による中国語の学習」が可能であることを示唆している。これは、Harnad (1990)の立場から見た記号接地問題の研究に対して、大きな立場をパラダイ

ムの変化を迫るものになる可能性がある。すなわち、Harnad は「中国語だけによる中国語学習」から意味が生まれる事はあり得ないとし、それとは異なる確固たる“実在”の代理としての「地」を求めた。しかし、すでに述べたとおり、非記号的な「地」の候補であったはずの感覚器・神経系自体も、同じメタ復号問題としての構造をもつため、それは本質的な解になりえない。

従って、本研究の採ったアプローチは、メタ復号問題を避けて、記号なるものと非記号・地なるものを前提とし、それらの結合を問題にするのではなく、メタ復号問題を直接的に解くことが可能であるかを模索する道である。メタ復号問題としての性質を有する理想化された模型であるオブジェクト同定問題では、未知なる「オブジェクト性=未知なる変換の下で同一視できる点の部分集合」を意味とし、限定的で認知的に閉じた主体の立場からこれを推定可能であるかを問う。

7. 自律性と意味の単位

第二に、メタ復号問題の解は、本質的に自律性、あるいは主体性という概念と意味の発生の関係を示唆している。自律性や主体性は、その概念を明確に定義するのが容易ではない。例えば、一見似ている指標として、確率的な独立性が挙げられる。例えば、外気温と、それによらず体温を一定に保つ恒温動物の対応を二つの変数としてとれば、2つの変数は確率的独立であるとみなせるかもしれない。逆に、無生物の温度は外気温に従属的に変わるだろう。従って、確率的独立な変数を持つ何かを“自律的な主体”と言ってもよいのだろうか。しかし、これは必ずしもその主体のすべてが、それ以外と確率的に独立であることを意味しない。むしろ、「体温を保つ」などの機能(ホメオスタシス)は、積極的に外界との相互作用をすることによって実現されていると言える(e.g., 外界の温度が低いなら、発熱しなければ一定の体温を保てない)。つまり、確率的独立性だけでは自律性を記述する事は難しい。

多くの生物の最小の“意味”を持つ構成単位である細胞を定義する一つの手立ては、それを覆う膜の内と外という区別によるものである。タンパク質や RNA, DNA などが単体、あるいはその特定の集合だけでは、機能を果たせず、生物としての“意味”を持つことができない。一方で、細胞は、それらの基礎的な構成物が有機的に関連し合い、互いの“意味”を積み出す単位として働いている。この意味で、細胞は生物として

の最小の意味を持つ単位と言えらる。当然ながら、その細胞意味論の機序の解明は容易ではないものの、少なくとも細胞生物学には、膜という比較的容易に定義できる明らかな単位があり、細胞膜で覆われた細胞は、ある種の自律性を持つと言ってよいだろう。

では、認知的な主体における「膜」とはどのようなものか。すでに述べた通り、“身体”や“感覚器”を外界とのインターフェイスとしてラベルづけするのは本質的な定義にはならない(一時的に、仮にそう定義するという手法はあり得る)。なぜなら、認知的な主体において、“身体”の感覚は、“身体でないもの”を含んで変化しうるし(ボディーイメージの変化の神経基盤研究として入来らの研究がある)、また感覚モダリティもある程度の可塑性を持つことが知られているためである。こうした、物体への名づけによってその「膜」を定義することが難しい認知的な主体の自律性はいかに論じるべきだろうか。

これに対する一つの答えは、本稿で論じたオブジェクト同定問題に含意されている。紙面の都合でオブジェクト同定問題の数理についての詳しい説明は別の機会に譲り、ここで端的に言うならば、オブジェクトを構成する部分集合を検討する際に、点集合の満たすべき方程式が導出される。この方程式は、もし点集合が同じオブジェクトであれば満たすべき内在的な制約を反映したもので、どの点だけでも定義できず、互いが互いを制約する形で表現できる。その方程式の表現する全体性に加えて、その方程式が“内なるデータ”(4節の定式化では視覚平面上のパターン)だけから表現できるという点が、その範囲のものを「自己」として定義しうる性質を表している。つまり、あるデータに閉じて(e.g., 視覚平面上の点群)いながら、しかし、それらの内的な整合性によって、それを越えた“非自己”を推論する事も可能である。こうした“自己”と“非自己”の区別の発生、そして“自己”に閉じた情報だけから“非自己”の情報を得られる点(意味の発生)で、自律性を本質的に捉えるための基盤となっている可能性がある。

謝辞

本研究は科学研究費補助金若手研究A 16H05860の補助を受けた。

参考文献

- [1] Harnad, S. (1990). The symbol grounding problem. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 42(1-3), 335-346.
- [2] Rumelhart, D. E., McClelland, J. L., & PDP Research Group. (1987). *Parallel distributed processing* (Vol. 1). Cambridge, MA: MIT press.
- [3] 日高昇平. (2016). 情報の伝達から理解へ. *人工知能学会論文誌* 31(6), AI30-H_1.
- [4] Searle, J. R. (1980). Minds, brains, and programs. *Behavioral and brain sciences*, 3(3), 417-424.
- [5] Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27 (3): 379-423