

# 特徴の統合によるオブジェクト構成の計算論に向けて Toward Computational Theory of Object Construction by Feature Integration

日高 昇平<sup>†</sup>  
Shohei Hidaka

<sup>†</sup>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

In a noisy physical world, nothing is a purely deterministic being as often idealized so in theory. The Shannon's model of information transmission idealizes such a noisy world, and construct a pair of encoder and decoder which realizes an ideal one-to-one map with an arbitrarily small error.

Extending this theory to a set of ideal one-to-one maps that are compositional, we obtain *compositional* or *core* information theory. It states the limit for the exponent rate for the number of differentiable signals per use of the channel under the constraint of the compositionality of the maps. This extended theory is supposed to characterize information integration for a multi-modal or multi-component system.

To test this theoretical prediction, we analyze human bodily movements in which whole-body movements reflect complex dynamics of the multiple body parts interacting with each other. The core information of the bodily movements successfully capture the reasonable bodily components, which are supposed to be connected from the physical and control theoretical point of view. This result suggests the possibility to build a computational theory of "object" perception, on the basis of the core information.

**Keywords — Object, Multivariate Information Theory**

## 1. オブジェクト認知

我々は、ものごとを個々の特徴の断片のリストとしてではなく、一体としての“オブジェクト”としてみることが多い。また意識上では、例えば視覚的なオブジェクトの形や輪郭だけを色などの特徴と分離して知覚することができない、という主観的な経験を誰しも共有していると思われる。しかし、一方、初期視覚野では、線分の方向や色あるいは局所的な動きなどの視覚的特徴が、分散的なフィルターとして表現されていることが知られている。これは、視覚的なオブジェクトが初期には特徴ごとに情報処理されていることを意味するため、意識的な体験で感じられる現象学的なオブジェクトとの乖離は、これまでの知覚研究の重要な問題の一つと考えられてきた(Treisman & Gelade, 1980; 横澤, 2014)。

Treisman & Gelade (1980)の特徴統合理論では、注意によって課題や文脈に応じた特徴が結合されるとし

たが、注意による特徴の統合以前の段階でも、“illusory conjunctions”と呼ばれる必ずしも正確ではないものの何らかの形で特徴が結合されているとすることで現象学的な体験との理論的整合性を保っている。しかし、こうした前注意的な“オブジェクト”の構成がいかに実現されているかは未だ不明な点が多い。

## 2. 情報統合～合成可能関数の構成

本研究では、単なる特徴の列挙とは本質的に異なり、特徴の統合によって構成される“オブジェクト”認知の計算理論を目指し、その基礎となる議論を展開する。ここでの目的は、個別の特徴に関する情報の“統合”の数理的な定式化につながる論拠を確かめることである。これを考える前に、そもそも情報とは何か再考しておこう。

Shannon (1948)の確立した情報理論によれば、情報とは1対1対応の関数の「実現」である(日高, 2016)。ここで、「実現」には、雑音にさらされた実世界では何一つとして誤差のないものは存在しないにもかかわらず、それらを使って、理想的な1対1対応の関数を構成する、という含意がこめられている。図1(a)は、集合 $X$ から集合 $Y$ への理想化された1-1対応関数の一例を示している。“現実”には、あらゆるものは確率的なゆらぎをもっており、集合 $X$ の一つの要素を伝達しようとするとき、雑音の影響で複数の要素へと変化しうる(確率変数とみなせる)(図1(b)の中列)。このとき、集合 $X$ の要素の抽出の仕方(符号化)と、雑音の影響後の要素の潜在的な部分集合を $Y$ の一つの要素に割り当てる関数(復号)を適切に選べば(図1(b))、実質的に理想的な1対1対応関数(図1(a))と同等とみなせる関数が構成できる。こうして構成した関数において1回の通信(雑音のある通信路)あたりどの程度の要素数が識別可能であるかを Shannon 情報量と呼ぶ。

この情報理論における通信の定式化は、1つの集合の個々の要素を他の集合の要素に対応づけるときに現実のシステムが満たすべき量的な制約を明らかにしており、情報の“統合”の最も基礎的な例と位置づけら

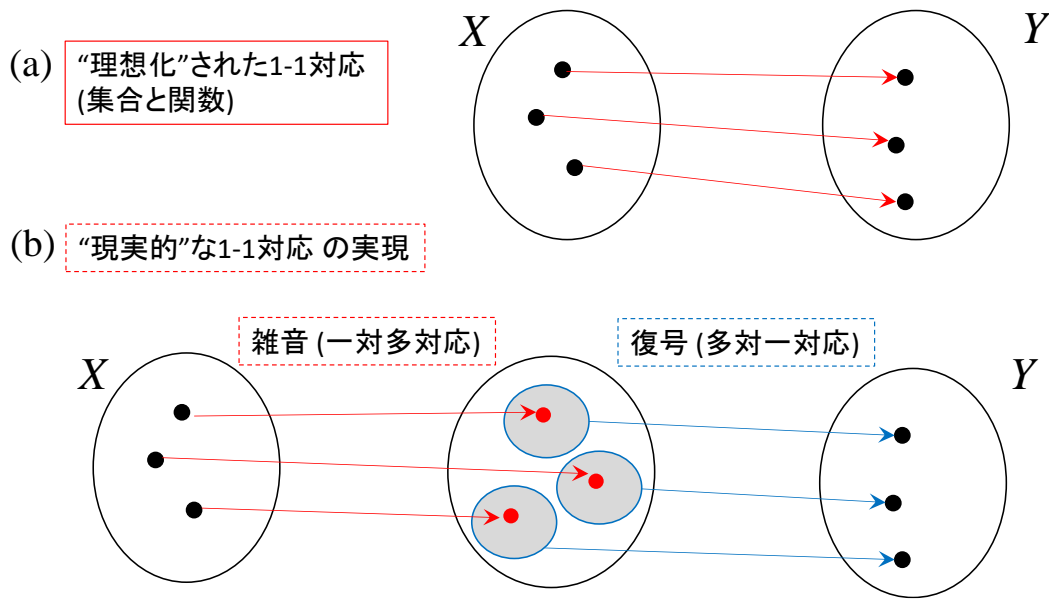


図1 : (a)理想化された 1 対 1 関数と(b)その実現。

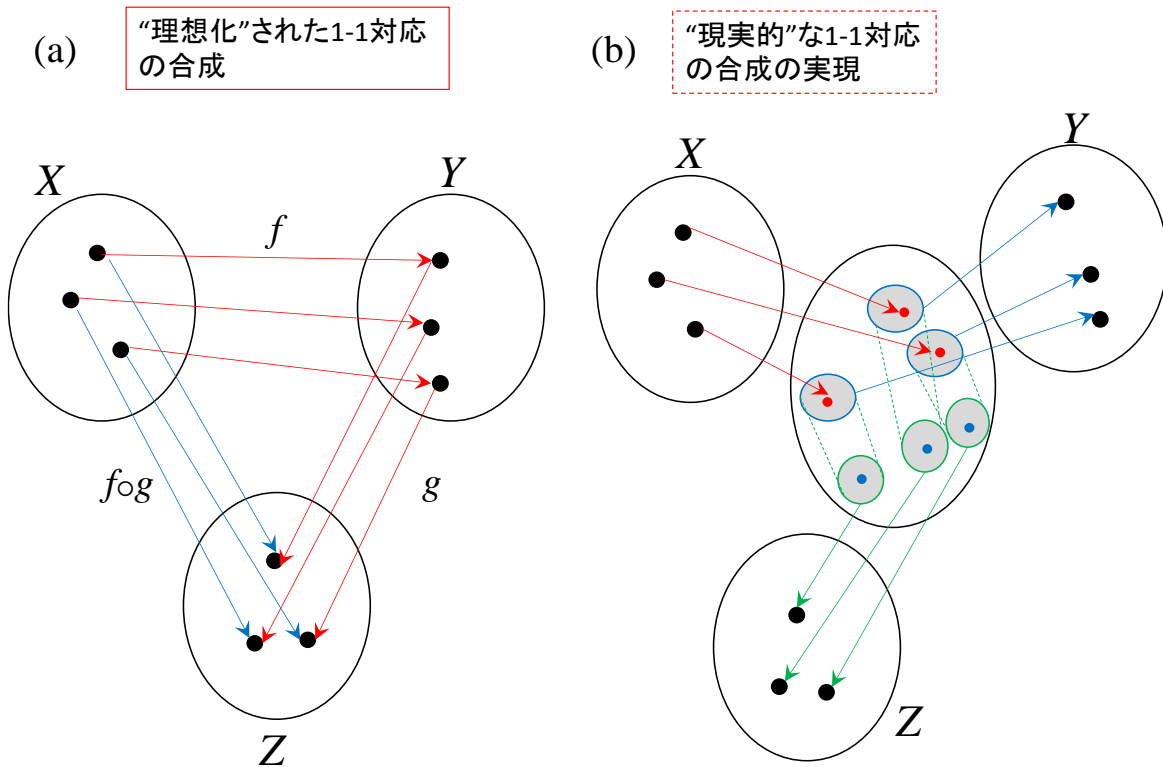


図2 : (a)理想化された 1 対 1 関数の合成と(b)その実現

れるだろう。この定式化を基礎として、我々の求めるのは、一つの 1 対 1 関数の構成ではなく、多数の集合間の複数の関数をいかに「とりまとめる」かである。本研究では、複数の関数の操作として最も基礎的と位置づけられる「関数の合成」<sup>1</sup>を、情報統合の一つの定

<sup>1</sup> 集合と関数を含むより一般化された対象をとりあ

式化の候補として考える。

関数の合成をより具体的に考えるために、三つの集合  $X, Y, Z$  とその間の 1 対 1 対応関数を考えよう(図2)。

つかう数学の一分野である圏論において、圏を構成する最も基礎的な要素は、対象、射、恒等射、そして射の合成である(Awodey, 2010)。

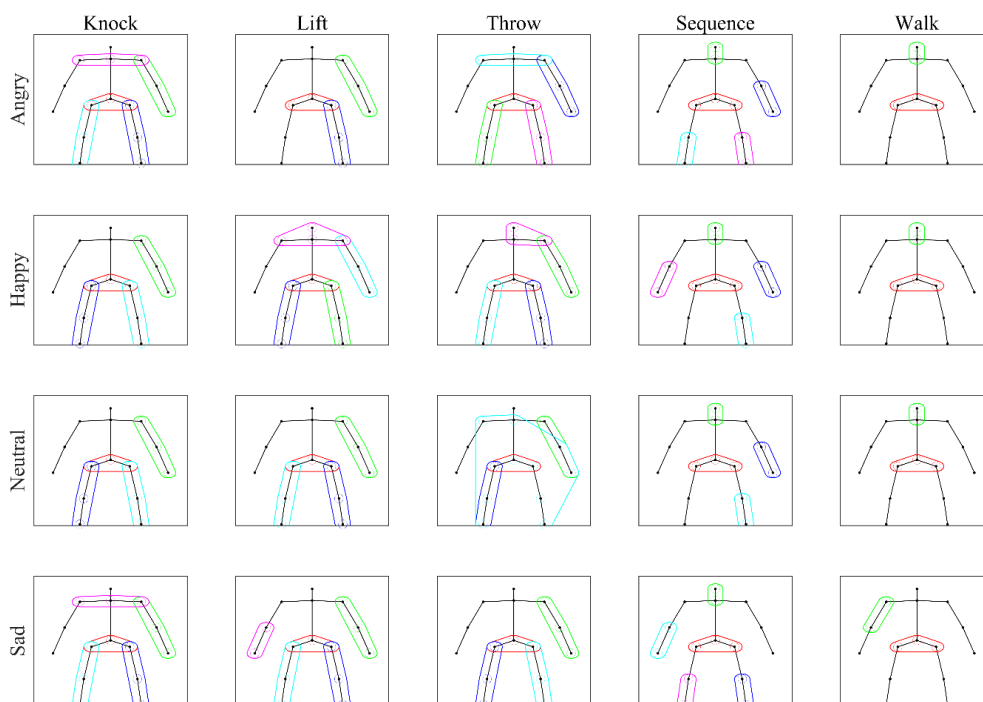


図 3: 4 種類の情動的文脈における 5 種類の動作ごとに推定された局所最大コア情報をもつ身体の部分集合(色つきの閉包で囲まれた各点).

基礎的な例として、図 2(a)は、集合  $X$  から  $Y$  への関数  $f$  と集合  $Y$  から  $Z$  への関数  $g$  が、集合  $X$  から  $Z$  への合成関数  $f \circ g$  と等価である、という理想化された関数合成の一例を示している。理想化された世界において、こうした関数の合成はいとも簡単に行われるが、これを雑音のある現実世界で構成するのはそう簡単ではない。一つの関数の場合(図 1(b))と同じく、雑音が存在するため、確率  $P(Y, Z | X)$  によって表現できる通信路において、集合  $X$  から  $Y$  への関数と、集合  $X$  から  $Z$  への関数を、それぞれ別に構成したとしても、必ずしも集合  $Y$  と  $Z$  の間に対応がつくことを保証しないためである(図 2(b)の中央の集合図における赤い点を含む部分集合と青い点を含む部分集合の間の対応(点線)が問題となる)。

### 3. 合成可能関数の情報理論

こうした議論から、ある一つの変数から他のすべての個々の変数(every variable)を特定できる、という特別な条件を満たす新たな情報理論の定式化が必要である。こうした定式化の一部(特殊なケース)は、ネットワーク情報理論(El Gamal & Kim, 2011)として理論化されているが、理論的には未解明な部分も多い。本研究では、予想を含む暫定的な理論として、多変量(ハイパーグラフィカル)情報理論を提案する。この理論では、

関数の合成可能性を、一つの変数から他のすべての個々の変数が特定可能である条件により定義し、この意味での合成可能関数の構成における識別可能な信号数(レート)をコア情報量と定義する。2 変数の特殊なケースでは、Shannon 情報量(相互情報量)と一致し、一般に確率変数の集合  $\mathcal{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$  とその任意の分割の集合  $\pi_{\mathcal{X}} := \{(\pi_0, \pi_1) : \pi_0 \neq \emptyset, \pi_1 \neq \emptyset, \pi_0 \cup \pi_1 = \mathcal{X}, \pi_0 \cap \pi_1 = \emptyset\}$  に対し、以下のように定義される。

$$\omega(\mathcal{X}) := \min_{(\pi_0, \pi_1) \in \pi_{\mathcal{X}}} I(\pi_0; \pi_1).$$

ただし、 $I(X; Y)$  は変数  $X$  と  $Y$  の相互情報量である。この  $\omega$  は、3 変数まで通信に合成可能性を加えることで導出でき、4 変数以降で同様の議論が成立するかは現時点では不明であるため一般化に関する予想を含む。また  $\omega$  の計算には潜在的に変数の数  $N$  の指数関数的に増加する組み合わせ上の最小化が含まれているが、相互情報量の劣モジュラ性を利用する事で多項式時間で計算することが可能である(Hidaka & Oizumi, submitted)。

### 4. コア情報量による“オブジェクト”同定

こうして定義されたコア情報量  $\omega$  によって、“オブジェクト”を特定可能かを調べるために、人の動きの時系列データ(Ma et al., 2006)を分析した。このデータに

は4種類の感情的な文脈(angry, happy, sad, neutral)と5種類の行為(knock, lift, throw, walk, この4つの連続動作である sequential)が収録されている。手の動作の場合、5回の動作をする間の身体の15か所に付けられたマーカーの3次元座標が時系列データとして得られている。この多変量時系列データに対し、局所線形力学的な影響を除くためベクトル自己回帰モデルを適用し、その残差共分散行列(45 x 45 次元)を、局所最大コア情報量の探索対象とした。

このデータのその代表的な一例(被験者 5)に対して、 $\omega$ が最大となるマーカーの部分集合を示したのが図3である。いずれの行為・感情的文脈の場合も、主に腰、四肢、頭部などが局所的に高いコア情報量をもつ部分集合として特定される結果となった。この結果は、直感的な我々の“オブジェクト”の理解にも一致する。このように事前情報なしで、こうした体の分節化が動きの相関構造のみから可能である点は、オブジェクト性と関連する特徴のコア情報量による検出可能性を示唆していると考えられる。

## 謝辞

本研究は平成28年度科学研究費補助金若手研究A 16H05860 の助成を受けて行われた。

## 参考文献

- [1] Awodey, S. (2010). *Category Theory*. Oxford University Press.
- [2] El Gamal, A. & Kim, Y-H (2011). *Network Information Theory*. Cambridge University Press.
- [3] Hidaka, S. and Oizumi, M. (submitted). Fast and exact search for the partition with the minimal information loss.
- [4] Ma, Y., Paterson, H. M., Pollick, F. E. (2006). A motion capture library for the study of identity, gender, and emotion perception from biological motion, *Behavior Research Methods*, 38, 1, 134-141.
- [5] Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication, *Bell System Technical Journal*, Vol. 27, pp. 379-423.
- [6] Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A

Feature-Integration Theory of Attention. *Cognitive Psychology*, 12, 97-136.

- [7] 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).
- [8] 横澤 一彦 (2014). 統合的認知. 21 (3), 295-303.