

平成 22 年 12 月 31 日現在

研究種目：若手研究(B)  
研究期間：2008～2009  
課題番号：20700188  
研究課題名（和文） ロボットの行為に基づいた言語の学習モデル  
研究課題名（英文） Behavior-oriented Acquisition of Semantic Concepts

研究代表者  
杉田 祐也 (Sugita Yuuya)  
独立行政法人理化学研究所・動的認知行動研究チーム・研究員  
研究者番号：70469906

## 研究成果の概要（和文）：

我々の柔軟な認知的能力は記号的心的表象によって支えられている。特に、既知の経験の再利用による未知の状況への対応には、記号的表象が欠かせない。本研究は、記号的表象の知覚運動経験に基づいた獲得の計算プロセスを提案した。特に、高度に抽象化・構造化された心的表象と、具体的かつ連続的な知覚運動経験の橋渡しとして、ロボットの身体として与えられる**知覚運動レベルの類似性**が有効に働くことを実験的に示した。この結果に基づいて、いくつかの既存の認知発達理論を再検討し、それらの新しい計算論的解釈を展開した。

## 研究成果の概要（英文）：

This study examines the mechanisms in the human mind that are involved in the shift from unrelated rote knowledge acquired by learning examples of objects or events into a flexible conceptual system by which we can conceive something not experienced as a recombination of the examples. Although many researchers have suggested that compositional symbolic concepts should be sensorimotor grounded, how this may be accomplished remains unclear. This study bridges the gap by reconsidering “structural alignment” hypothesis from a constructivist view. Proposed sub-symbolic learning model emits “structural alignment” of behavioral concepts based on given **sensorimotor similarity** of robot’s behavioral patterns and can recognize and re-generate previously unseen behavioral patterns in terms of the recombination of known patterns.

## 交付決定額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,900,000 | 870,000   | 3,770,000 |
| 2009年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,400,000 | 1,020,000 | 4,420,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：経験の概念化・意味の合成性・学習の計算モデル・ニューラルネットワーク・認知発達

## 1. 研究開始当初の背景

1950年代に始まった認知科学の手法による知性の研究は、人間の知的活動を**心的表象上の記号処理**として捉えることで大きな成功を収めている。しかし、それと同時に、心的表象と実世界における**知覚運動経験との乖離**という困難な問題を発生させた。この困難は、概念や言語の発達・学習にかかわる認知現象を論じる際に、特に強く顕在化する。なぜならば、これらの場面では、連続的で具体的な知覚運動経験と、離散的で抽象化された記号的心的表象との間のギャップを橋渡しするメカニズムが要求されるからである。Karmiloff-Smith の領域固有的な心的表象系の知覚運動経験に基づいた獲得についての理論や、Johnson と Lakoff による言語の意味を支える概念構造を論じるイメージスキーマ理論、Tomasello の言語経験に基づいた言語の獲得を論じる使用基盤理論などは、この困難を解決しようとする試みである。これらの理論が提案する発達・学習の捉え方は革新的であり、従来理論が説明することができなかった認知現象を探求する糸口を与えている。しかし、これらの理論を適切に解釈する計算論的な枠組みが存在しなかったため、計算論的な曖昧さが残った。特に、**記号（として表象さえる概念）の生成原理**を記号操作として論じることはできないので、厳密な議論が妨げられてきた。

## 2. 研究の目的

**合成的な心的表象の知覚運動経験に基づいた獲得の背後にある計算論的過程を提案**することが、本研究の目的である。合成的な表象とは、再利用可能な部分から構成されている表象である。過去の経験を合成的な表象として保持することができれば、それを組み替えて未経験の事態に柔軟な対応をすることができる可能性がある。そのためには、知覚運動経験を解釈するための構造についての知識、すなわち**役割-述語構造**が必要である。たとえば、「ボールを投げる」行為を、対象物である「ボール」と、操作である「投げる」の組み合わせとして解釈することができなければ、「ボールを投げる」ことによって得た「投げる」のスキルと、他の物体に転用することができない。

本研究は、先に述べた認知理論と同様に、この構造の起源を知覚運動経験に求めた。したがって、この理論的前提によって生じる見かけ上の矛盾「**経験を解釈するための構造を**

**経験から獲得する**」の解消が本研究のもっとも重要な論点となる。

## 3. 研究の方法

### (1) 実験手続きの概要

ロボットと物体との相互作用を概念化学習するためのニューラルネットワークモデルを提案し、それを用いた認知ロボット実験を行った。実験タスクは Meltzoff が言語獲得前の乳児を対象に行った物体操作行為の模倣実験に基づいている。計算機上でシミュレートしたロボットは、提示された物体との相互作用の例を認識し、新しい環境中で同じ相互作用を再生することを求められる。ここで注意すべきは、乳児は日常生活を通じて行為の表象系を獲得しているのに対し、ロボットは一切の表象系を持っていない点である。したがって、本ロボット実験では、表象の獲得が実験手続きに含まれる。

仮想ロボットが模倣すべき36種類の行為は、2つのタイプ (**move-to, orient-to**)、6種類の色つき物体、5種類の角度オフセットの組み合わせである。**Move-to** タイプの相互作用では、ロボットは指定された物体に向かって移動し物体の近くで停止することが求められる。**Orient-to** タイプの相互作用では、ロボットは停止したまま指定された物体の方向に振り向くことが求められる。このタイプの相互作用は角度オフセットにより修飾され、ロボットが振り向くべき方向をずらされる。これら、36種類の相互作用の一部を教示した。注意すべきは、ロボットに教示したのは各相互作用の例であり、背後にあるタイプ・目標物体・角度オフセットの組み合わせ的な構造を与えていない点である。学習後に未教示のものを含むすべての種類の相互作用を提示し、その模倣の成功率の分布を得た。教示した相互作用の分布に依存して、達成できる汎化の傾向の変化を観察した。

### (2) ロボットと実験環境

仮想ロボットは、センサとして胴体上部中央に視野120度のカラーカメラを、アクチュエータとして胴体の左右に2つの車輪を駆動するモータを持ち、図1(a)のような2つの色つき物体が存在する環境で行動する。したがって、ロボットが提示された相互作用を再現するためには、正しい物体と選択的に作用する必要がある。ただし、カメラからの情報は一次元のピクセル列状(図1(b))に表現されており、また、特定の物体を抽出するメカニズムは与えていない。ロボットは、模倣実現の前提として、ピクセル列から特定の物体だけに注目するメカニズムも学習によって獲得することが求められる。

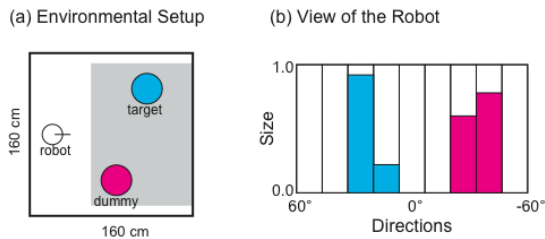


図1 ロボットが行動する環境(a)と、視覚センサの入力フォーマット(b)

### (3) 学習モデル

学習に用いたニューラルネットワークは、センサモータネットワーク(stm-net)とメタネットワーク(meta-net)の2つの部分から成る(図2)。stm-netは、VI層に入力された視覚情報を車輪の回転速度に変換してMO層に出力するフィードフォワードネットワークである。ただし、通常のネットワークと異なり、VR層とMO層との間の結合強度がmeta-netの出力によって制御される二次ネットワーク(second-order network)である。meta-netはPB層に入力として、生成すべき種類の相互作用をコードした概念ベクトルを取り、stm-netの二次結合の結合強度を出力する。この結合強度はロボットの行動開始時に決定され、相互作用が終了するまで変化しない。この概念ベクトルを切り替えることで、複数の異なる相互作用を1つのネットワークで生成することができる。

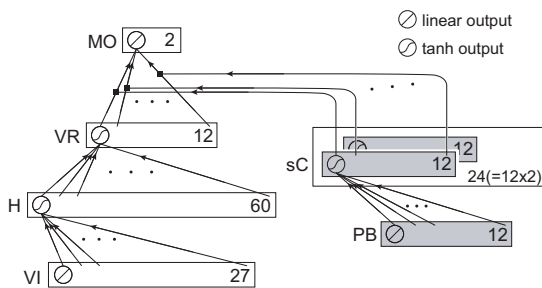


図2 学習モデルのアーキテクチャ

学習アルゴリズムは通常の誤差逆伝播法に基づいている。最適化パラメタは、(二次結合以外の)結合強度だけでなく、教示データに含まれる各相互作用に対応する概念ベクトルも含まれる。したがって、結合強度は教示された全て相互作用に共通の情報がコードされ、各相互作用の概念ベクトルにそれぞれに固有の情報がコードされる。学習後に、未教示の相互作用を模倣する際には、その相互作用に対応する概念ベクトルを提示された例に基づいて計算する。アルゴリズムは学習と同様であるが結合強度は変更されない。つまり、学習によって得た相互作

用全般についての情報をうまく再利用して、新しい相互作用を認識・生成する能力が試される。

## 4. 研究成果

### (1) センサモータ経験に基づいた合成的概念表象の獲得の実現

36種類中21種類の相互作用を学習することによって、全ての相互作用を模倣することに成功した。学習モデルは、相互作用の組み合わせ的な構造を生得的な知識として持つておらず、また、合成的構造を明示的に教示されていないにもかかわらず、未知の相互作用を既知の相互作用の組み換えとして、汎化的に認識・生成することができた。この結果は、学習モデルが教示例に基づいて合成的な概念表象を自己組織化的に獲得したことを示唆する。

### (2) 機能合成的な非記号的概念表象の発見

組合せ的な汎化の背後にある非記号的メカニズムを、概念ベクトル空間に発見できた。図3に概念空間の上位4つの主成分を示す。一般的な合成的表象が各概念の内部構造を記述するのに対し、本研究で自己組織化された概念空間では、各概念間の**規則的關係**として**合成性**が機能的に実現されている。図3(a)のy軸に沿って、各タイプごとの概念のクラスタが発見できる。また、orient-toタイプのクラスタ内に、x軸に沿って角度オフセットに応じた連続的な並びを発見することができる。図3(b)には、各ターゲット物体ごとにクラスタが見られ、また、それらは色の連続性を保存した順序に配置されている。これらのことから、タイプ・ターゲット・オフセットのそれぞれ概念要素がコンテキスト独立に表象されていることが分かる。この概念ベクトル間の規則的配置によって裏付けられた要素表象の独立性によって、任意の複合概念を合成することが可能となっている。

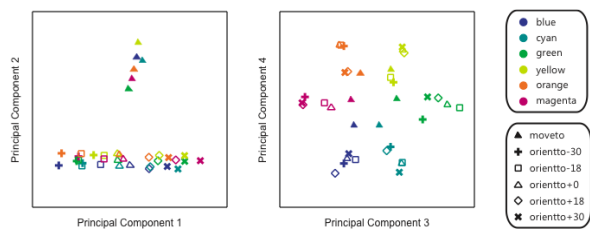


図3 自己組織化された概念構造

### (3) 類似性と合成性をつなぐ計算論の提案

合成性を概念間の関係性に帰着したことにより、同じく概念間の関係性である類似性とのつながりを議論する基礎ができた。概念空間では、相互作用をコードするベクトル間の距離が、相互作用の類似性を表現している。たとえば、図3においてmoveto-blueは、moveto-greenよりもmoveto-cyanに近くに配置されている。

より少ない種類の相互作用を教示した実験では、同様の類似性表現が得られるが、規則的な配置は

得られない。たとえば、moveto-blue と moveto-cyan の位置関係と、orientto-blue と orientto-cyan の位置関係が異なったものになり、コンテキスト独立な要素概念は得られない。

これらの結果から、**合成的表象の獲得を規則的な幾何学的配置の成立として解釈することができる**。規則的配置の成立は、各概念ベクトルの連続的な移動によって実現できるので、類似性から合成的への遷移の背後にある可能な連続的過程が明らかになった。

#### (4) 認知発達理論の再解釈

表象書換え理論においては、丸暗記的な知識の表象(Level-I)から、操作可能な構造化された表象(Level-E1)への書き換えメカニズムの候補として、また、イメージスキーマの2つ側面である「経験を解釈するための構造」と「経験に基づいて獲得される構造」を矛盾なく両立させるための原理の候補として、合成性の起源としての類似性というアイデアは有効である。

また、Gentner と Markman は、類似性の理解がアナロジーに基づいた問題解決を促進するという現象を説明するための structural alignment モデルを提案している。このモデル自体は合成的表象を前提としているが、本研究で得られた非記号的メカニズムの下で解釈することができ、その場合には合成的表象を前提する必要がない。このように、本研究は**従来の認知モデルを整合的に関連付ける計算論的視点**を提供することに成功した。

#### 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 2 件)

- ① Sugita, Y. & Tani, J. A sub-symbolic process underlying the usage-based acquisition of a compositional representation: Results of robotic learning experiments of goal-directed actions. In *Proc. of the 7th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL 2008)*, pp. 127-132, 2008, 査読有り.

- ② Sugita, Y. & Tani, J. Acquiring a functionally compositional system of goal-directed actions of a simulated agent. In *Proc. of the 10th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB 2008)*, pp. 331-341, 2008, 査読有り.

[学会発表] (計 2 件)

- ① Sugita, Y. A sub-symbolic process underlying the usage-based acquisition of a compositional representation: Results of robotic learning experiments of goal-directed actions. *the 7th IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL 2008)*, Aug. 9-12(2008), California.
- ② Sugita, Y. Acquiring a functionally compositional system of goal-directed actions of a simulated agent. *The 10th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior (SAB 2008)*, Jul. 7-12(2008), Osaka.

[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]

特になし。

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

杉田 祐也 (Sugita Yuuya)

独立行政法人理化学研究所・動的認知行動研究チーム・研究員

研究者番号: 70469906

##### (2) 研究分担者

なし。

##### (3) 連携研究者

なし