

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月11日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22700202

研究課題名（和文） 概念表象の異なる認知主体によるシンボルコミュニケーションを通じた共通理解の獲得

研究課題名（英文） Symbol Sharing among Robots Which Have a Different Concept Representation

研究代表者：高橋 淳二（TAKAHASHI JUNJI）

筑波大学・システム情報系・研究員

研究者番号：20456685

研究成果の概要（和文）：この研究では、新規対象物を定義することのできる実機ロボットシステムとそのようなロボット同士が円滑なコミュニケーションをとるために会話の仕方を更新していくアルゴリズムを構築した。実機ロボットシステムは、ビジョンデータを元に対象物の未知・機知の判定と、新規概念生成・ラベル付けを行う機能を持つ。コミュニケーションの円滑化では、シンボル共有できた情報からお互いの概念表象を推定し合い、相手の表象をモデル化することが可能である。

研究成果の概要（英文）：I developed a robot system which has an ability to define an unknown objects as a new concept based on its own subjective view and a communication method among the robots for improving their communication quality and efficiency during their communication. The robot system judges a observing object as unknown or known, and if it is unknown the robot generates a new concept class and labels it. The communication method makes it possible for robots to estimate and modelize the concept representation of others.

## 交付決定額

（金額単位：円）

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合 計       |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2010 年度 | 2,600,000 | 780,000 | 3,380,000 |
| 2011 年度 | 500,000   | 150,000 | 650,000   |
| 総 計     | 3,100,000 | 930,000 | 4,030,000 |

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：知能ロボット、異種ロボットコミュニケーション、写像推定

## 1. 研究開始当初の背景

自律知能ロボットシステムは、その適応範囲を拡大することで発展してきた。知能は、認識と意識決定という二つの演算プロセスで実現されるが、適応範囲の拡大は認識プロセスが先行する。特に物体認識では、画像の自動分類技術の必要性から、対象物に固有な不変量や特徴量の設計が重視されていた。続いて、分類作業に強い影響を持つ不変量や特徴量自体を大多数の対象画像から自律的に選択し、それに基づき分類を行う手法が自己

組織化マップ（SOM）を中心に研究された。しかし、SOM を用いた分類手法では、新たなカテゴリを学習すると過去に学習したカテゴリの分類精度が劣化するという、追加学習の問題があった。これに対し、追加学習可能な ISOM やニューラルガスに基づいた SOINN などの、登場により、新規対象物を自律的に定義しカテゴリの追加が可能な知能システムが実現されている。ISOM や SOINN では、センサデータの解釈方法を更新することに大きな特徴がある。しかし、センサデータの再

解釈によりロボット個体での適応能力の向上は見込めるが、問題もある。つまり、センサデータの解釈方法を変更すると客観性が保たれず他のロボットとのコミュニケーションに支障をきたすという問題である。従って、知能ロボットが認識においての高度な学習力を実現すると同時に、その能力を最大に活かすために他のロボットとのコミュニケーションの仕方も学習・更新する能力が必要である。

かつて、ロボット同士の会話研究として、シンボル共有問題が考究されたことはあった。しかし、これはロボットシステムや動作プログラムは同一であるという強い制約条件の下で、ラベルの対応付けを行っていたに過ぎなかった。ロボット構成の異なるもの同士や、センサ解釈の変更を許すようなロボット同士を対象とするような、異種認知主体間の知識共有の問題が考究されたことはない。

異種認知主体間の知識共有の問題をロボットを用いて定量的に表現することで、ヒューマンロボットインタラクション (HRI) の研究や、或いは、人同士のコミュニケーション方法について、新たな視点を与えることができると期待される。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は大きく分けて二つある。一つ目は、最小限の事前知識のみで新奇事象への適応範囲を拡大可能な自律知能ロボットシステムを実現することである。知能ロボット自体が新奇事象を定義し、それを有意なセンシングパタンの集合として概念化し、シンボルを生成する能力を備えることで、古典的人工知能研究で問題視されていた記号接地問題は解決可能である。しかしながら、新奇事象を定義し、概念化する過程では必然的に認知主体 (知能ロボット) の主観が介入することは避けられない。ここで、知能ロボットの主観には、そのロボットの学習履歴やそのロボットのシステム構成、またそのロボットの設計者の思想などが反映されている。したがって、ロボットによって概念の範疇や概念の表現の仕方が異なるため、ロボット同士のコミュニケーションに支障をきたす。

そこで、二つ目の目的として、このようなロボット同士がシンボルコミュニケーションを通して、互いの概念の齟齬をすり合わせ、共有概念を増加させていくことが可能な会話戦略を開発する。図1に異なる表象を持つロボット同士のコミュニケーションの模式図を示す。共有視野内の同じリングを見ていても、リングの表現形、ラベルはそれぞれ異なり、共有認知できていない。そこで、視野に対象物が一つしかないタイミングを利用して、幾つかの対象物のラベルの共有を行う。そして、既に共有できたシンボルとそれ

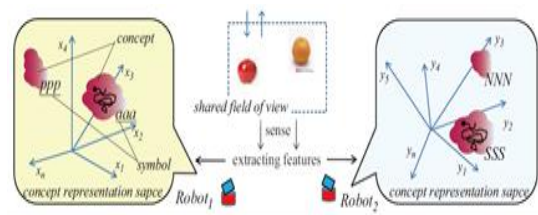


図1：異なる表象を持つロボット同士のコミュニケーション

を説明付ける特徴量の関係から、相手側の特徴空間 (概念空間) を自身の概念空間で説明付けることを行う。このように、単体学習と他者理解学習を同時に行い、適応範囲を逐次拡大可能な知能を実現する。

## 3. 研究の方法

大きく分けた二つの目的それぞれについて個別に課題を解決し、最後にそれらを統合させるといった方法をとる。

(1) 安定した外界認識を実現する自律知能ロボットシステムの知覚アーキテクチャの開発では、外界環境知覚のためのビジョンセンサ系とセンサデータを処理する画像処理アルゴリズムを構築する。ビジョンを用いた環境認識システムで、安定した外界認識を実現するには画像を取得・処理するフレームレート (fps) が重要である。ここでは、30fpsを目標としたビジョン系の構築を行う。

画像処理アルゴリズムは、画像・映像判定プロセスと概念生成プロセスから成る。取得したビジョンデータから対象物の色情報、形状情報を特徴量として抽出する。ある一つの対象物は特徴空間上でポイントクラウドとして表現される。幾つかの対象物を学習させ、これをそのロボットの経験に基づいて形成された概念クラスターとする。

次に判別・認識を行うプロセスを作成する。ビジョンセンサから取り込んだ対象物の特徴ベクトルを特徴空間上にプロットする。この時、先に学習した概念クラスターとのユークリッド距離を算出し、距離に基づいた判別・認識を行う。

ここで、どの概念クラスターからも距離がある閾値以上離れている特徴ベクトルは未確認対象物とする。未確認対象物の特徴ベクトルの軌道は記憶しておき、ある時間以上の長期に渡って、特徴ベクトルがある距離範囲内に収まっている場合、それを新規概念として、概念クラスターを生成する。これを概念形成プロセスとする。

ここまでのプロセスは基本的に閾値処理によって処理を分岐させるといった単純なものであるが、対象物認識、新規対象物の概念化を行う処理系のミニマルモデルとして必要十分である。

(2) 概念表象空間が異なる知能ロボット

同士でのシンボル共有化では、アルゴリズム開発・検証を行う上でまず、センサ解釈の異なるロボットシステムが必要になる。(1)で開発する知覚アーキテクチャを備えたロボットがそれにあたる。概念表象をロボット同士で異なるものにするために、各ロボットはそれぞれ違った特徴空間にセンサデータをプロットする。まずは、第一段階として、簡単のため色空間を、RGB系、CMY系、HSV系と明示的に異なるロボットを用意し、概念表象が異なるロボットとして扱う。RGB-CMY間は直行変換であり、変換行列で表現することができる。RGB-HSV間は数式で厳密に定義されているが、変換写像は非線形となる。

次に第二段階として、個々のロボットの学習履歴に応じて、表象空間表現が変容してゆくように知覚アーキテクチャを改良する。つまり、(1)のビジョンデータからの特徴抽出において、記憶済みの概念クラスターの並び方によって、抽出される特徴量が変更するような仕組みを組み込む。記憶によって認知的偏りが生じる仕組みは、認知処理の演算負荷を低減させるための戦略であり、人の脳内でも行われていることである。実際にどのような処理が人の脳内で行われているか、や、どのような処理が有効であるかについての一般的な解はない。ここでは、概念クラスター間のクラス内分散を小さく、クラス間分散を大きくするための手法として、主成分分析を用いて特徴空間の変換を行う。このようにすることで、個体としての認知能力の向上という当然の理由により概念表象の異なるロボットが生成される。

続いてシンボルの共有化では、上記で開発したロボットを用いて、図2に示すような実験系を構築する。簡単のため背景を黒くし、黒以外の色領域を対象物体として検出する。ロボットのそれぞれの視野は共有されており、各々のロボットが独自の概念空間上に対象物を表象している。図3に、対象物画像と、それに対して各ロボットが違ったラベル付けを行っている様子を示す。この状態から、ラベルとそれを説明する特徴量について相互に通信し、お互いのラベルが共有されるまでシンボル共有化を行う。

シンボル共有化の課題は、(1)の知覚アーキテクチャを備えたロボットの開発を前提としているが、ロボットシステム開発に遅れが生じる場合は、数値シミュレーションを用いてシンボル共有化のアルゴリズム開発を行う。

#### 4. 研究成果

視野内の対象物認識と、もし未知であれば新規概念カテゴリを生成しラベリングと、を同時に行う知覚アーキテクチャを開発した。図4に知覚アーキテクチャの概要を示す。



図2 シンボル共有化の実験環境

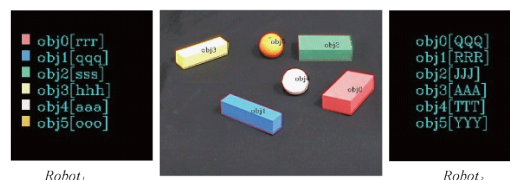


図3 各ロボットのラベル付け

この知覚アーキテクチャに基づき最も簡易な特徴として、RGB、CSV、HSVの色特徴を抽出するプログラムを開発し、3体のロボットに実装した。Robot1とRobot3とが図2に示すような配置で概念生成・対象物認識を実行している様子を図3に示す。図3中の「obj0」などのラベルは、実験者が確認するためのものであり、各ロボットには知らされていない。つまり、Robot1が[rrr]とラベリングした対象物がRobot3にとってどのラベル付けされた対象物であるかは不明である。

この実験初期段階では、ラベルの対応が取れた対象物が一つもないためシンボル共有化はできない。次に、共有視野から全ての対象物を取り除き、対象物を任意の一つずつ選び、共有視野に入れては出すということを繰り返す。視野内に対象物が一つしかない場合、ロボットはその対象物についてのラベルが相手にとってどのラベルに相当するかをお互いに行うことができる。ラベルの対応付け作業では、同時にラベルに対応する概念クラスの特徴ベクトルの情報も交換する。これを

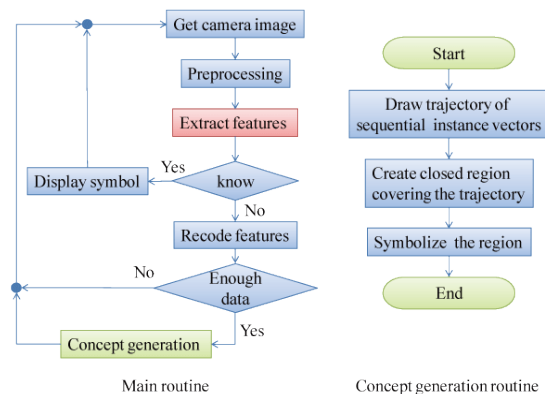


図4 物体認識と概念生成を一括して行う知覚アーキテクチャ



繰り返す、共有化された対象物の個数がある一定数を越えた時点で、複数の対応する概念クラスの特徴ベクトルの関係から、ロボットは自身の表象空間と相手側の表象空間との間の変換写像を算出可能となる。

図5に4つ共有されたシンボルを元に、Robot2がRobot1との間の変換写像を計算し、未共有であった相手側のラベルが自身にとってどのラベルに相当するか推定した結果が示されている。

同様の実験を Robot1 (RGB 色表象空間) と Robot3 (HSV 色表象空間) とで行った結果を図6に示す。図6から、対象物を同時に見ながら直接シンボル共有を行ったラベルについては正しい対応関係が得られているが、変換写像の算出後に推定されたラベルでは、全く対応が取れていないことが分かる。これは、RGB から HSV への変換写像が非線形写像であるのに対して、変換写像を算出するアルゴリズムが線形写像の計算にしか対応していないためである。

そこで、変換写像の計算アルゴリズムを非線形関数の回帰を得意とするニューラルネットワークを用いて構築した。構築した計算アルゴリズムを数値シミュレーションにて評価した。シミュレーションでは 30 のラベルの対応情報を学習データとして、ニューラルネットワークを学習させ、学習データを含む 100 のラベルについて写像精度の評価を行っている。図7 (左) に Robot3 の HSV 色表象空間上に変換された Robot1 の対応ラベルをプロットしたグラフを示す。なお RGB から HSV への変換写像には定義式があり、それを用いて変換された対応ラベルを真値として同時にプロットしている。図7 (右) にエラー率の度数分布表を示す。ニューラルネットワークを用いた方法では、誤差 15% の範囲に 80% のラベルがプロットされていることが分かる。

ロボットシステムの構築では、コンパクトで 160 度の画角を有するカメラ GoPro HD と画像グラバ VGA2USB (Epiphan Systems Inc.) を用いてビジョン系を構成している。単純な画像取り込みでは、ほぼ 30fps の処理速度を達成しているが、処理アルゴリズムが複雑になると、10fps 程度まで処理速度が落ちてしまう。これは、画像取り込み毎に HOST 接続が必要な USB ポートを使っていることが原因であると考えられる。高速化のためには、IEEE1394 カメラ等の CPU 負荷の影響を受けないビジョン系を利用する必要がある。

本研究では、認知の問題と伝達の問題は同時に取り扱うべき問題であるとし、その定量表現を目指した。この思想はダン・スペルベルの関連性理論に非常に近い。この理論では、関連性の高さに基づき、認知バイアス、文脈効果等の認知と伝達に関わる現象を統一的に示すことに成功している。関連性の高さを

情報エントロピーなどを用いて定量表現することができれば、関連性理論を定量的表現することができ、本研究をさらに発展させることができると考えられる。

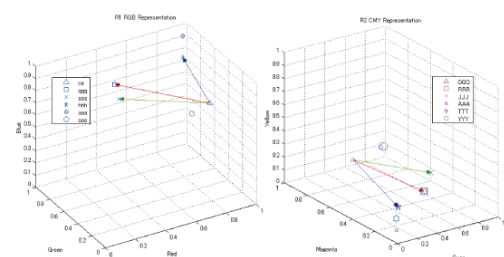


図5 RGB 色空間表象を持つ Robot1 と CMY 色空間持つ Robot2 のシンボル共有によって得られたラベルの対応関係

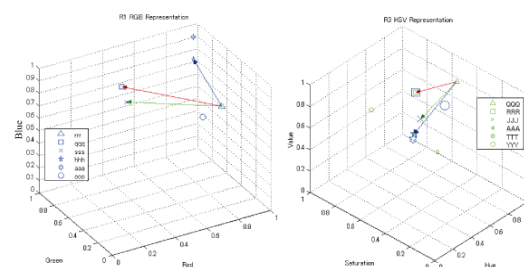


図6 RGB 色空間表象を持つ Robot1 と HSV 色空間持つ Robot3 のシンボル共有によって得られたラベルの対応関係

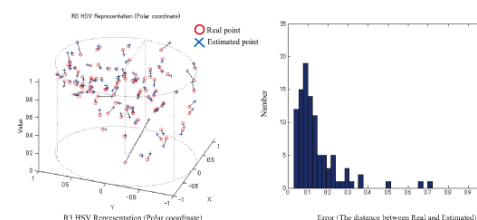


図7 Robot3 の HSV 表象空間に表象された Robot1 の概念ベクトル

## 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計1件)

高橋 淳二、“複数ロボット概念表象間の写像推定に基づく相互理解.” 第16回創発システム・シンポジウム(2010年8月6日、インテック大山研修センター、富山県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

高橋 淳二 (TAKAHASHI JUNJI)

筑波大学・システム情報系・研究員

研究者番号：20456685