

戦略的創造研究推進事業
発展研究（SORST）

研究終了報告書

研究課題
「人間との相互作用に基づくロボットの認知発達」

研究期間：平成 18 年 4 月 1 日～
平成 20 年 3 月 31 日

久保田 直行
（首都大学東京システムデザイン学部・准教授）
（注）本報告書は研究期間終了後、公開致します。

1. 研究課題名

「人間との相互作用に基づくロボットの認知発達」

2. 研究実施の概要

近年、子供のコミュニケーション能力の低下や子供がおこす殺傷事件など、人間の認知発達に関わる深刻な社会的問題の解決が期待されている。これらの社会的背景として、子供の状況知覚能力や表現能力の低下が原因としてしばしばあげられる。したがって、本研究では、さきがけ研究の成果に基づき、人間との相互作用に基づき認知発達するパートナーロボットの学習機構を提案し、人間と共有可能な状況的知覚の構成論的な方法論を確立することを目標とする。このような目標を達成するために、以下の5つの研究項目を行う。

- (1) 状況を抽出するための冗長センサを持つパートナーロボットの拡張
- (2) 進化的ロボットビジョンを用いた情報抽出
- (3) 人間との相互作用を通して得られる時空間的なセンシングデータから意図を抽出する状況的知覚システムの構築
- (4) 人間の行為モデルを模倣することにより意図的行為を学習する行為システムの構築
- (5) 構造化学習に基づく相互適応機構の実現

研究の基本的な進め方として、さきがけ研究で開発したパートナーロボットの機能を拡張し、知覚システムと行為システムを構築する。次に、認知発達を行うための構造化学習システムを構築し、人間との相互適応に関する議論を行い、ロボットの認知発達に関する議論を行う。認知発達とは広い意味で、認知構造、認知能力、認知プロセスの変化を指すが、本研究における認知発達は、知覚情報の境界を自律的に生成し、知覚情報間の関係性を洗練し続けることとする。また、その結果、知的モジュール間の相互依存関係が洗練される。すなわち、相互依存関係が洗練されることにより、注意すべき対象への即時的な反応や次に起こる事象を予測することができるようになり、認知能力が向上すると考える。したがって、本研究では、様々な知的モジュールの全体構造を議論する必要がある、この枠組みの中で議論を進めることとする。

- (1) 状況を抽出するための冗長センサを持つパートナーロボットの拡張として、カメラ画像と Laser Range Finder (LRF) の計測距離情報を融合した3次元計測を行うためのパンチルト機構を開発した。カメラからの色情報と、LRFからの距離情報を3次元空間上に統合することにより、人間を誤認識しやすい背景下でも、効率よく人間を抽出することが可能になった。さらに、Growing Neural Gases with Triangulation (GNG-T) を提案し、顔画像の3次元モデル構築手法を開発した。
- (2) 特徴情報の保持、図領域・関心領域の生成、能動知覚を行うために進化的ロボットビジョンを提案した。これは、進化的計算とロボットビジョンの技術を有機的に統合することにより実現される。次に、Growing Neural Gases を用いて、探索のための初期解候補を生成する手法を提案し、局所分散的探索による SSGA を用いて複数の人間を検出・追従する手法と、色情報に基づき物体を検出・追従する手法を開発した。さらに、同時に人間の手の位置と顔の向きを抽出・追従することにより、物体の注視対象を限定する。実験結果では、複数の物体を同時に検出するとともに、人間の手と物体の位置と速度の相関関係から把持物体を検出し、追従している。
- (3) 状況的知覚システムの構築では、知覚モジュールから得られる知覚情報の時間的パタンの集合を、教師無し分類学習に基づき空間的パターンとして分類し、人間の相互作用やコミュニケーションのパターンを抽出し、その抽出されたパターン間遷移の予測を行う手法を提案した。さらに、スパイクニューロンを用いて知覚モジュールのサンプリング間隔を制御する手法を提案した。実験結果では、人間の動作パターンを分類学習しながら、次の動作を予測するとともに、その予測された動作を抽出するための知覚モジュールが事前に選択され、効果的な知覚を実現できることを示した。
- (4) 模倣学習は、基本的にモデル観測とモデル生成（モデル学習）から構成される。本研究では、人間とロボットが相互に理解可能な手の位置の時系列変化における分節をジェスチャとして考え、人間の行為分節を学習する方法を提案した。モデル観測には定常状態遺伝的アルゴリズム (SSGA)、スパイクニューラルネットワーク (SNN)、自己組織化マップ (SOM) を用いて、時系列的な動作を分類する。また、モデル生成には時系列データを学習可能なリカレントニューラルネットワークを複数使い、モジュール構造にしたモジュラ

一型リカレントニューラルネットワーク(MRNN)を用いる。MRNNの学習では、ネットワークの学習法に隠れノードの学習に用いられる Hidden-node teaching を用い、モジュールそれぞれの分散的な学習とネットワーク全体の学習を同時に行う。学習結果から、提案手法は、MRNNの汎化性に基づき、追加的に動作を学習することができることを示した。さらに、ロボットは、人間の動作の模倣学習を行うとともに、人間はロボットの学習状況を考慮しながら、動作を経時的に教示・学習させることができることを示した。

- (5) 構造化学習に基づく相互適応機構の実現では、スパイキングニューラルネットワーク (SNN) を用いて様々な情報間の関係性を相関学習する手法を提案した。また、構造化学習の概念にしたがい、ヘブ則による学習では、ジェスチャ認識の精度や物体認識の精度にあわせて、学習係数が変化する。すなわち、分節化や記号化の精度が高いものほど、関係性の学習が加速する。実験例として、追従物体、色情報、形状情報間の関係性を学習しながら、追従している人間との対話が始めれば、さらに、発話単語とジェスチャとの関係性を追加した相関学習を行った。学習初期では、あまりジェスチャの学習が行えていないため、発話単語と色情報、形状情報間の学習が進んでいるが、ロボットは、分散的に複数の物体を追従しているため、追従物体・色情報・形状情報間の学習は、発話単語よりも速く進む。学習初期では、知覚情報にあわせて事前に設計された対話文を発話していたが、学習が進むにつれ、人間が発話した単語との関係性を学習することにより、人間の動作にあわせて、ある特定の発話単語に対応するニューロンが発火しやすくなり、相互作用した人間にあわせた発話単語を選択できるようになった。このように、相関関係の学習を通して、人間との対話や状況知覚の経験を共有することにより、コミュニケーションが円滑になることがわかる。

以上の実験結果をまとめると、ロボットは、人間のジェスチャや人間にとって理解しやすい発話単語を学習・選択できるようになるとともに、人間は、ロボットにとって認識しやすいジェスチャを提示し、ロボットの学習状況にあわせた物体の提示や発話単語の選択を行う相互適応が可能であることを示した。

本研究を通して、中心的に議論してきたことは、境界の生成と関係性の学習に基づく認知発達であり、境界を生成するためには、境界を介する二つの状態の差異と関係性が必要であるとともに、差異や関係性を学習するためには、境界を設定しなければならないという入れ子構造が常に存在する。このような問題に対処するために、本研究では、構造化学習の概念を提案し、知的モジュールの学習状態を考慮しながら、学習係数を調整することにより、複数の知的モジュールがカップリングされた学習手法を提案してきた。また、人間とロボットの対話における記号接地に関する実験結果では、対象物である図と背景である地との関係から生じる記号とパタンの対応関係の不安定さを解消するために、対話で用いられる記号が方向付けられ、限定される傾向にあることがわかった。しかしながら、パートナーロボットの認知発達を実現するためには、情動に基づく学習や自己効力感に基づく学習、三者以上の関係に基づく社会的意図理解や社会的合意形成などに関する研究も必要であり、今後、ロボットを含む認知エージェントの社会的学習に関する研究へと展開していく予定である。

本研究に関する類似研究として、赤ちゃん学から始まる人間の原初的な知覚やコミュニケーションの発達に関する研究、ロボットを用いた認知発達に関する研究などがあり、様々な観点から研究が進められている。また、国内外を問わず、ロボットの全体的な認知発達や知能化に関する研究は、思考実験や概念的なものが多く、一方で、方法論的には、一つの知的側面のみを扱った研究が多く、全体的な統合的方法論については、あまり議論されていない。全体的な方法論については、記号処理に基づく人工知能的な研究が多く、トップダウン的に記述された知識の利用に関する研究が多く、ボトムアップ的な学習を融合した双方向の学習の方法論は、ほとんど行われていない。以上、まとめると、これらの研究に共通する問題意識は、身体性に基づくパタンの記号化や行為の分節化を扱っている点であり、本研究では、境界の生成と関係性の学習を循環的に行うための方法論について議論したが、今後、「境界と関係性の科学」として、様々な観点から境界の生成と関係性の学習について多角的に議論し、方法論的に体系化を行う予定である。

3. 研究構想

近年、子供のコミュニケーション能力の低下や子供がおこす殺傷事件など、人間の認知発達に関わる深刻な社会的問題の解決が期待されている。これらの社会的背景として、子供の状況知覚能力や表現能力の低下などが原因としてしばしばあげられる。本研究では、このような社会的背景のもと、人間との相互作用に基づき認知発達するパートナーロボットの学習機構を提案し、人間と共有可能な状況的知覚の構成論的な方法論を確立することを目標とする。本研究の科学的目標は、ロボットを用いることによる人間の認知発達の構成論的な解明であり、工学的目標は、ロボットの認知発達の機構を用いて、人間とパートナーロボットが阿吽の呼吸をとるためのコミュニケーションに関する方法論の確立および、新しい学際的な分野としてのパートナーロボットに関する研究領域の確立である。このような目標を達成するために、以下の 5 つの研究項目を実施することを研究開始前に設定した。

(1) 人間との相互作用を通して得られる時空間的なセンシングデータから意図を抽出する状況的知覚システムの構築

(2) 人間の行為モデルを模倣することにより意図的行為を学習する行為システムの構築

(3) 知覚-行為循環に基づき認知発達する構造化学習システムの構築

(4) 関連性理論に基づくコミュニケーションのための相互適応機構の実現

(5) 状況を抽出するための冗長センサを持つパートナーロボットの拡張

その後、人間の認知レベルの階層性に関する議論を行い(図 1 参照)、ロボットの知覚・行為・学習に必要な方法論に関する議論を行った。この結果、研究項目 (1) を行う前に情報抽出の重要性を再認識し、進化的ロボットビジョンに関する研究テーマを追加するとともに、研究項目の全体的なバランスを考慮し、最終的な統合を行う構造化学習と相互適応機構に関する研究を一つにまとめた。以上の結果、研究項目を以下のように再設定した。

(1) 状況を抽出するための冗長センサを持つパートナーロボットの拡張

(2) 進化的ロボットビジョンを用いた情報抽出

(3) 人間との相互作用を通して得られる時空間的なセンシングデータから意図を抽出する状況的知覚システムの構築

(4) 人間の行為モデルを模倣することにより意図的行為を学習する行為システムの構築

(5) 構造化学習に基づく相互適応機構の実現

研究の基本的な進め方として、さきがけ研究で開発したパートナーロボットの機能を拡張し、知覚システムと行為システムを構築する。次に、認知発達を行うための構造化学習システムを構築し、人間との相互適応に関する議論を行い、ロボットの認知発達に関する議論を行う。

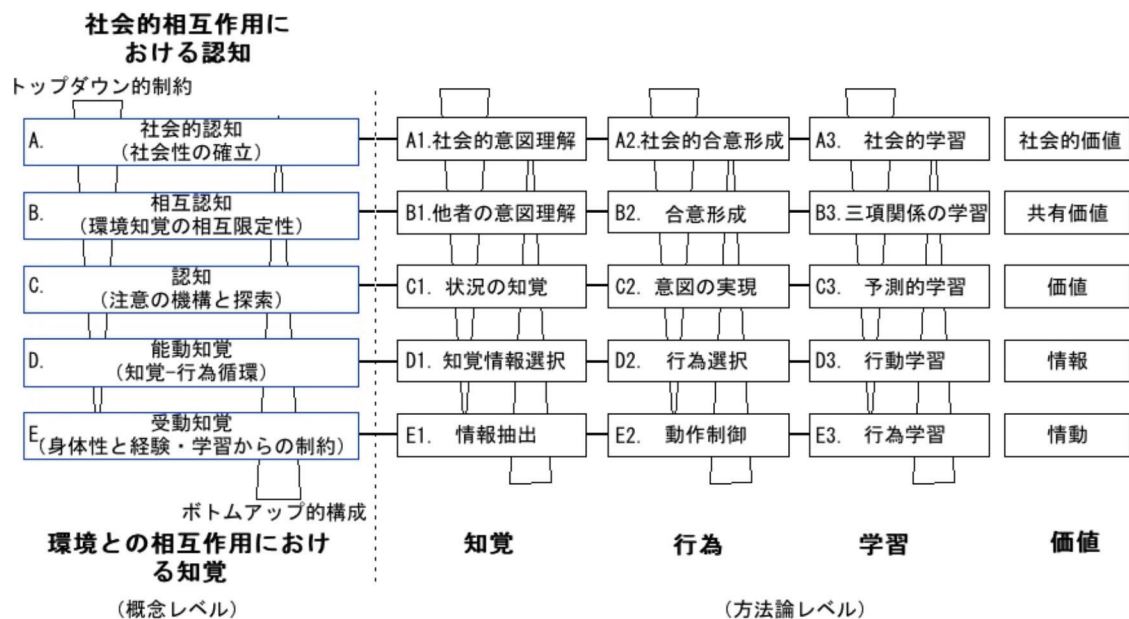


図1 社会的相互作用における認知レベルの階層性

具体的には、本研究では、さきがけ研究で提案した知覚システム、行為システム及び価値システムがカップリングされた構造化学習に関する研究成果に基づき、認知発達するロボットの

人間とのコミュニケーションに関する方法論を確立するとともに、人間の認知発達の構成論的な解明に焦点をあて、研究を行っている。構造化学習の本質は、上位からの制約情報と下位から抽出された構成情報に基づく学習の方法論であり、知的モジュールの断片的な学習ではなく、相互依存的な学習を行うことにより、様々な知的モジュールの学習状態にあわせて、同時に柔軟な学習を行うことにある。このような構造化学習に基づき、相互依存的な知的モジュールの全体構造により実現される知能を構造化知能とよぶことにする。認知発達とは広い意味で、認知構造、認知能力、認知プロセスの変化を指すが、本研究における認知発達は、知覚情報の境界を自律的に生成し、知覚情報間の関係性を洗練し続けることとする。また、その結果、知的モジュール間の相互依存関係を洗練することとする。すなわち、相互依存関係が洗練されることにより、注意すべき対象への即時的な反応や次に起こる事象を予測することができるようになり、認知能力が向上すると考える。したがって、本研究では、様々な知的モジュールの全体構造を議論する必要がある、この体系化はまだ完成していないが現状の考えを図 1 に示し、この枠組みの中で議論を進めることとする。

4. 研究実施内容

(1) 実施の内容

本研究では、図 1 において、概念的に議論される社会的相互作用における認知レベルの階層性と各階層に対応する方法論を概観し、各階層における上位層からのトップダウン的な制約情報と下位層からのボトムアップ的な構成情報、さらには、相互の関係性を明確にすることにより、構造化学習に基づくロボットの認知発達機構を実現するとともに、人間とロボットの相互適応原理を解明することである。さきがけ研究では、(E) 身体性に基づく知覚や行為 (E1, E2, E3) 及び (D) 知覚-行為循環に基づく学習の方法論 (D1, D2, D3) や知的モジュールが相互依存的に学習する構造化学習に関する議論を行った。この成果を受けて、発展研究では、研究初年度 (平成 18 年度) に (C) 認知環境と (B) 相互認知環境に基づき、人間とのコミュニケーションを介して発達する認知能力 (C1, C3, B1) や対話に基づく意思決定 (B2) に関する議論を行った。平成 19 年度の研究では、人型パートナーロボットを用いた経時的な行為の学習 (D2, C2) に関する議論を行った。この学習は、単に一つの行為の学習ではなく、過去に獲得した知覚システムや行為システムの能力に基づいているため、ライフタイム学習として学習獲得していく機構が必要であり、モジュラー型ニューラルネットワークの学習方法を提案した。一方、視知覚に基づく情報抽出 (E1) に関する研究は、認知発達を議論する上で非常に重要な課題であり、人間検出や物体検出など、CCD カメラ画像からの情報抽出を行うために、定常状態遺伝的アルゴリズムを用いた可変テンプレートマッチングに基づく進化的ロボットビジョンに関する手法を提案した。最後に、これらの手法を統合した知覚情報の関係性の学習方法を提案した。以下、本研究で行った研究の成果を項目別に説明する。

研究項目(1) パートナーロボットの拡張

状況を抽出するための冗長センサ系への拡張として、平成 18 年度にカメラ画像と Laser Range Finder (LRF) の計測距離情報を融合した 3 次元計測を行うためのパンチルト機構を開発した (図 2)。カメラからの色情報と、LRF からの距離情報を 3 次元空間上に統合することにより、人間を誤認識しやすい背景下でも、効率よく人間を検出・追従することが可能になった (図 3)。さらに、Growing Neural Gases with Triangulation (GNG-T) を提案し、顔画像の 3 次元モデル構築手法を開発した (図 4)。



図 2 開発した
パンチルト機構

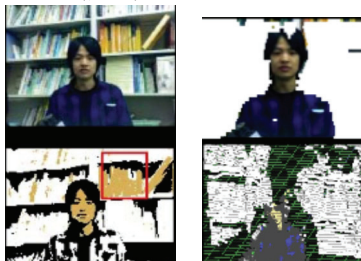


図 3 カメラ画像と
距離情報の融合結果

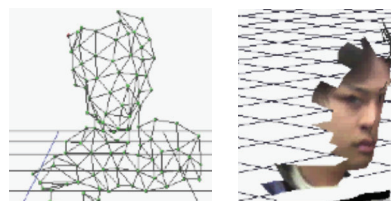


図 4 GNG-T を用いた
顔画像モデリング結果

次に、平成 19 年度には、小型化された 3 次元距離画像センサを人型ロボット Hubot に装着するとともに（図 5）、特徴点追従を高速行う手法を開発した（図 6）。これらの手法は、人間を追従・識別する上で、非常に重要な情報を抽出することができる。

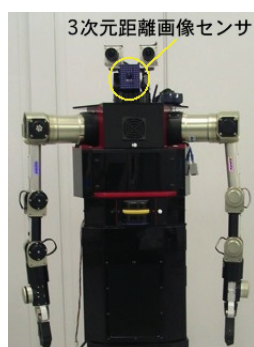


図5 3次元距離画像センサを拡張したHubot

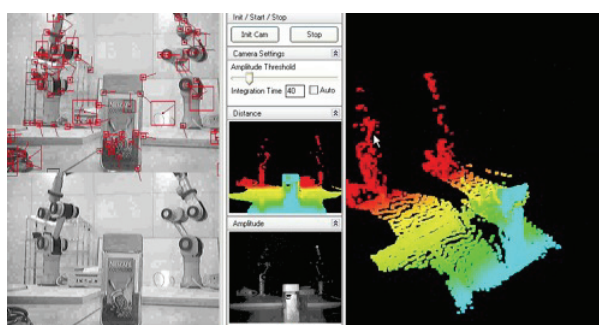


図6 特徴点追従画像処理（左）と 3 次元距離画像センサ計測（右）の結果

研究項目（２）：進化的ロボットビジョン

視知覚に関する研究では、視覚探索、随意的眼球運動（サックード）、選択的注意、図地反転知覚、バインディング問題など、様々な議論が行われているが、認知発達するロボットを構築するためには、これらの議論を同時に行わなければならない。能動知覚は、状況の知覚（C1）に基づく知覚モジュールの選択（D1）と深く関係する。図領域の抽出は視対象の視覚探索と連動しており、刺激に基づくボトムアップ的な情報抽出と行為による制約、さらには、視対象の認知結果や知識に基づくトップダウン的な抑制による相互作用に基づき、図領域が抽出される。本研究では、特徴情報の保持、図領域・関心領域の生成、能動知覚を行うために進化的ロボットビジョンを提案した。これは、進化的計算とロボットビジョンの技術を有機的に統合することにより実現される。進化的計算では、一般に、解候補はランダムに生成されるが、画像処理では、ボトムアップ的な簡単な情報処理に基づき関心領域を生成できるため、このような知識を効果的に利用する。また、時系列画像では、2 枚の連続する画像の差分情報を変化の絶対量の指標として用いることができ、進化的計算での解候補の新規生成による入れ替えや突然変異率や突然変異の範囲などを行うことにより、1 時刻前の探索結果を部分的に継承しながら、現在の画像での探索に反映させることができる。さらに、クラスタリングを併用することにより、局所探索に基づく定常状態遺伝定期アルゴリズム（SSGA）を用いて複数の追従対象を効率よく探索・追従する手法を提案した。図 7 に実験結果の一例を示す。差分抽出により、動きのある領域を中心に SSGA を用いた探索を行い、人間追従を行っている。また、誤認識しやすい背景画像と識別するために、目や口などの顔器官探索を行うことにより、追従精度を向上させている。さらには、人間追従を行っている際に、後ろを向いた場合などに対し、注視領域内の特徴色を用いた適応的テンプレートマッチングに基づく人間追従手法を提案し、柔軟に人間追従を行えることを示した（図 8）。

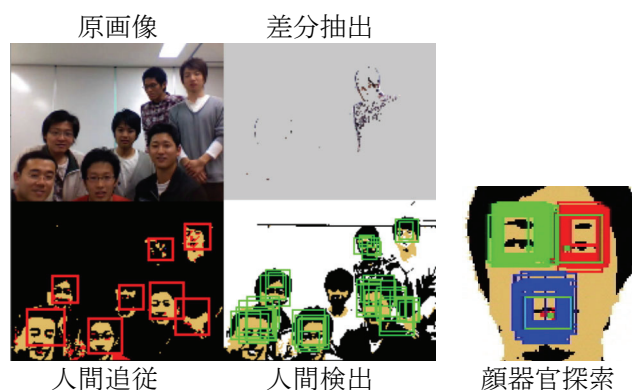


図 7 複数の人間追従と顔器官探索



図 8 適応的テンプレートマッチングに基づく人間追従

次に、Growing Neural Gases を用いて、探索のための初期解候補を効率よく生成する手法を提案し、局所分散的探索による SSGA を用いて人間及び物体を検出及び追従手法を開発した。さらに、同時に人間の手の位置と顔の向きを抽出・追従することにより、物体の注視対象を限定する。図 9 に実験結果の一例を示す。この実験結果では、複数の物体を同時に検出するとともに、人間の手と物体の位置と速度の相関関係から把持物体を検出し、追従している。

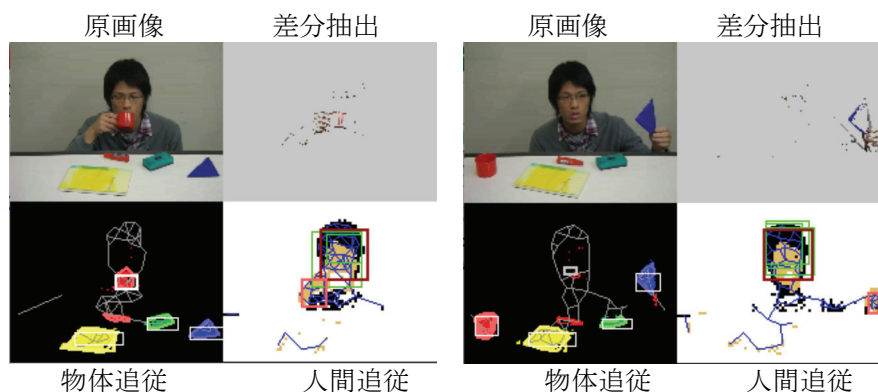


図 9 人間の注視方向や動作に基づく物体追従

研究項目(3) 状況的知覚システムの構築

ロボットが人間の行為を予測するためには、時系列的な知覚情報の集合を学習する必要がある。時系列情報の予測に関する研究の多くは、一つの知覚情報を対象とし、あらかじめ用意された時間的パタンの学習結果からその予測を行う。しかしながら、ロボットと人間のコミュニケーションに必要な知覚を考えた場合、複数の知覚情報を同時に扱う必要があり、さらに、人間の動作パターンなどは相手により異なるため、あらかじめ、知覚すべきパターンを用意することは不可能である。そのため、個々の知覚情報を別々に扱うのではなく、それらの変化し続ける時間的パタンの集合から、不変なパタンの構造を空間的に抽出し、予測する必要がある。本研究では、知覚モジュールから得られる知覚情報の時間的パタンの集合を、教師無し分類学習に基づき空間的パターンとして分類し、人間の相互作用やコミュニケーションのパターンを抽出し、その抽出されたパターン間遷移の予測を行う。さらに、スパイクニューロンを用いて知覚モジュールのサンプリング間隔を制御する(図10)。提案手法は、知覚情報の入力層、知覚情報を分類する分類層、分類したクラスターの遷移を予測する予測層、そして予測に基づき知覚モジュールを選択する選択層の四層から構成される(図11)。ここでは、構造化学習の概念に基づき、各モジュールの学習状況にあわせて、学習係数が相互依存的に変化することにより、学習が進む。

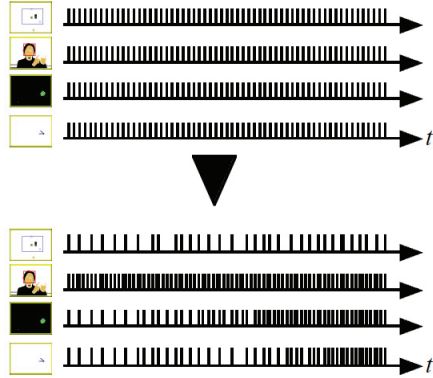


図 10 サンプル間隔の制御

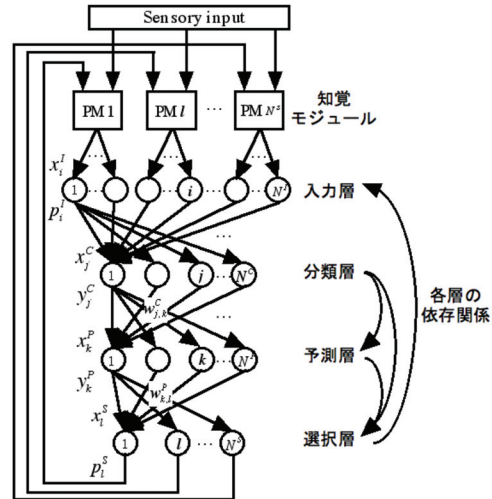


図 11 予測に基づく知覚システム

図 12 に、パートナーロボット Hubot が人間の行為を予測している様子を示す．ここでは、ロボットは人間のボールやカップを手にする行為を観察し、知覚モードの遷移を学習した．その結果、人間のボールを手にする行為（図 12(a)-(c)）に対して、(b)のように、その行為を予測したロボットは、人間より先にボールを持った腕を挙げ始めている．さらに、ロボットは予測された次の知覚モードに必要な知覚モジュールを選択しながら、必要な知覚情報のみを抽出する学習も行っている．これらの結果より、人間の動作パターンを分類学習しながら、次の動作を予測するとともに、その予測された動作を抽出するための知覚モジュールが事前に選択され、効果的な知覚を実現している．以上のように、人間と円滑なコミュニケーションを行うためには、人間の行為を予測し、その予測にあわせた行為をとる必要がある．

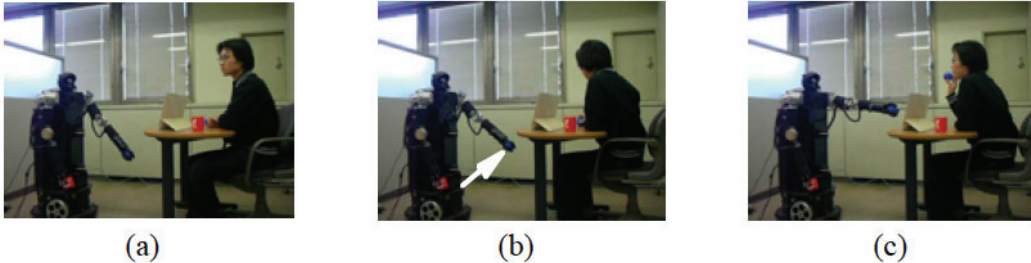


図 12 予測に基づくロボットの行為

研究項目(4) 行為システムの構築

模倣学習は、基本的にモデル観測とモデル生成（モデル学習）から構成される．本研究では、人間とロボットが相互に理解可能な手の位置の時系列変化における分節をジェスチャとして考え、人間の行為分節を学習する方法を提案した．

モデル観測には定常状態遺伝的アルゴリズム（SSGA）、スパイキングニューラルネットワーク（SNN）、自己組織化マップ（SOM）を用いて、時系列的な動作を分類する．人間追従中の顔を中心とする注視領域を生成し、この注視領域内に 81 個（ 9×9 個）のスパイキングニューロンを配置し、人間の手の動きを学習させている．また、スパイキングニューロン間の結合は興奮性を仮定し、興奮性シナプス後電位（EPSP）として、伝達されるものと考え、ヘブ則を用いて時間的に連続発火したニューロン間の結合を強化する．図 13 に赤いカップを持って、左から右に手を動かしたジェスチャの認識学習の様子を示している．学習初期では、画像処理の精度の関係上、EPSP の状態から発火にいくつかの抜けが確認されるが、学習が進むにつれ、ニューロン間の結合強度が強化され、連続した発火が可能になった（図 13(b)）．

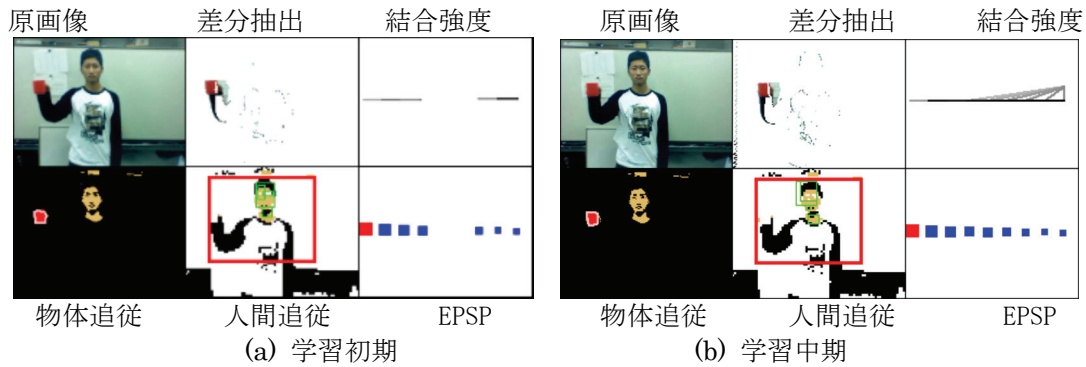


図 13 SNN の学習と発火の様子

次に、様々なジェスチャを学習させた結果を図 14 に示す．ここでは、SOM のノード数を 10 とし、EPSP の状態を入力ベクトルとし、学習を行った．結合強度の学習状態が示すように、様々な手の動きを近傍のニューロン間の時間的な発火の関係から学習が行えているのがわかる．さらに、様々なジェスチャを提示することにより、SOM が入力パターンを分類学習している様子がわかる（図 14(a)）．次に、学習後のモデル観測器を用いて、追加学習を行った（図 14(b)）．この 2 つの結果が示すように、右下から左上に手を動かす動作と中心から徐々に手を広げながら回転させるジェスチャを分類していることがわかる．

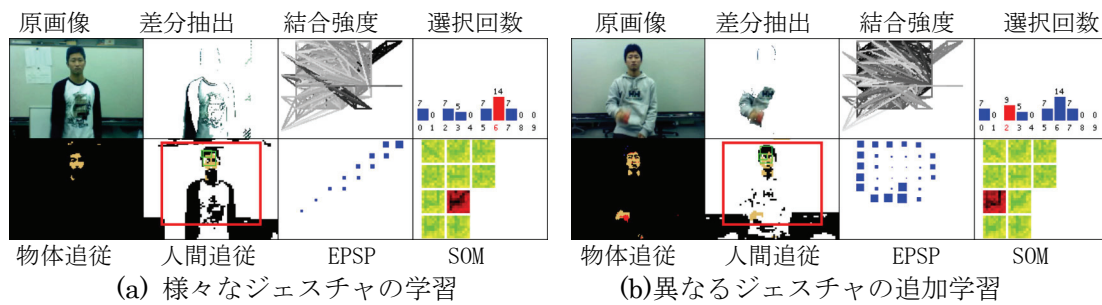
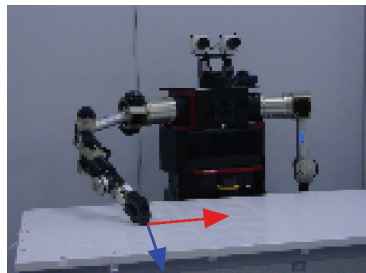
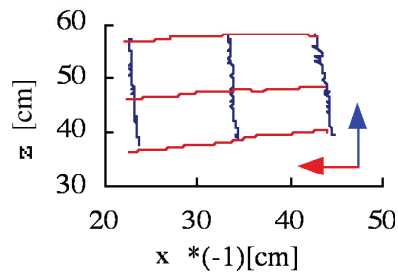


図 14 モデル観測学習の様子



(a) ロボットの動作



(b) 基本動作の学習に用いられた軌道

図 15 基本動作の模倣学習

次に、模倣学習におけるモデル生成の結果を示す．ここでは、正面に対峙した人間の手の動きを認識し、その認識結果をもとに動作を生成する．また、モデル生成には時系列データを学習可能なリカレントニューラルネットワークを複数使い、モジュール構造にしたモジュラーリカレントニューラルネットワーク(MRNN)を用いる．学習では、ネットワークの学習法に隠れノードの学習に用いられる Hidden-node teaching を使い、モジュールそれぞれの分散的な学習とネットワーク全体の学習を同時に行う．MRNN の学習実験として、卓上でロボットのアームをロボットから見て手前から奥への直交方向 3 パターンと右から左への平行方向 3 パターンの計 6 パターンを動作させた．そして、そのログデータから教師データを獲得し、学習を行った（図 15）．

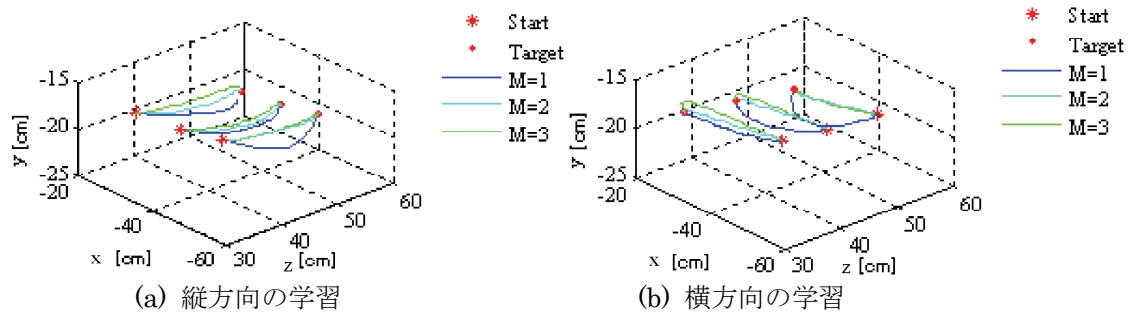


図 16 基本動作の学習結果 (M は、モジュール数を表す)

学習する軌道はランダムに選ばれ、それぞれの軌道に対する平均学習回数を 1000 回になるように学習した場合の学習結果を図 16 に示す. この実験では MRNN の出力が入力にフィードバックする閉ループ系となっている. 生成する軌道は学習した軌道とは異なる PTP(point to point)の軌道となるが、目標座標へ向かっての軌道を生成できている. モジュール数の比較を行うと、モジュール数 (M) が 1 の場合、目標座標(目標座標との差 1mm 以下)まで到達していない場合が存在するが、M=2 及び M=3 のときは比較的直線的な軌跡を描きながら、目標点までたどり着いている.

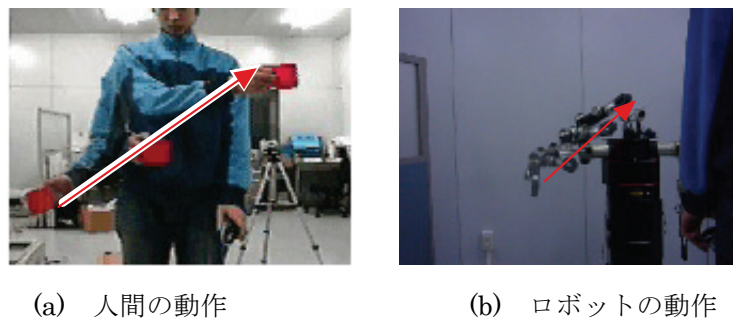


図 17 教師データには無い斜め動作の提示と模倣によるモデル生成

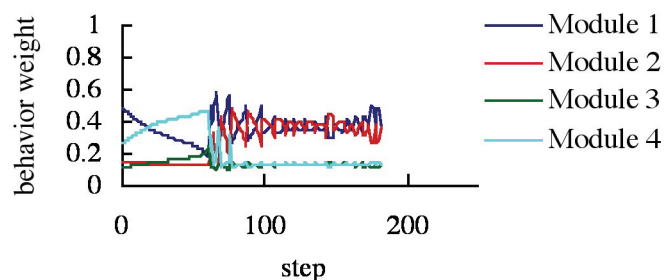


図 18 各モジュールの貢献度の変化

次に、奥行き方向を固定した面の学習（上動作×3、下動作×3、右動作×3、左動作×3）を行い、人間の動作を学習した MRNN で見まねする実験を行った. ここでは、モジュール数(M)を 4 とした. 図 17 に、人間が右下から左上に腕を動かし、それをロボットが模倣している様子を示す. 学習時には斜めの軌道を学習してはいないが、MRNN の持つ汎化能力によって軌道を生成している. ロボットの軌道生成時における貢献度の遷移を示したものを図 18 に示す. 60 ステップまでは、ロボットが模倣動作を開始するための初期位置への移動をしており、60 ステップ以降は上方向と左方向の参照ベクトルをもつモジュールを中心に用いることによって斜めの軌道を生成していることがわかる.

次に、円軌道の模倣の結果を図 19 に示す. 教師データとしては直線的な軌道のみしか与えられていないが、MRNN の汎化性によって円のような曲線の軌道を生成している. 図 20 に目標軌道列とロボットの軌道との関係及び円軌道を生成したときの各モジュールの貢献度の変化を示す. 50 ステップ程度から円軌道の生成が始まっており、貢献度が大きいモジュールは 4→1

→2→3 と遷移していることがわかる．これは、徐々に進む方向を変化させていることを意味し、すなわち、曲線を描く軌道を生成していることを示す．

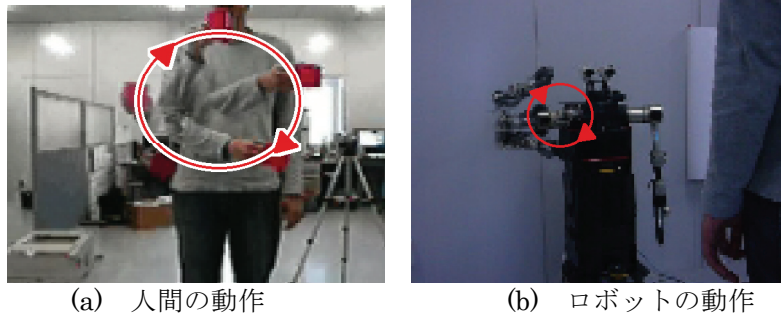


図 19 教師データには無い円運動の提示と模倣によるモデル生成

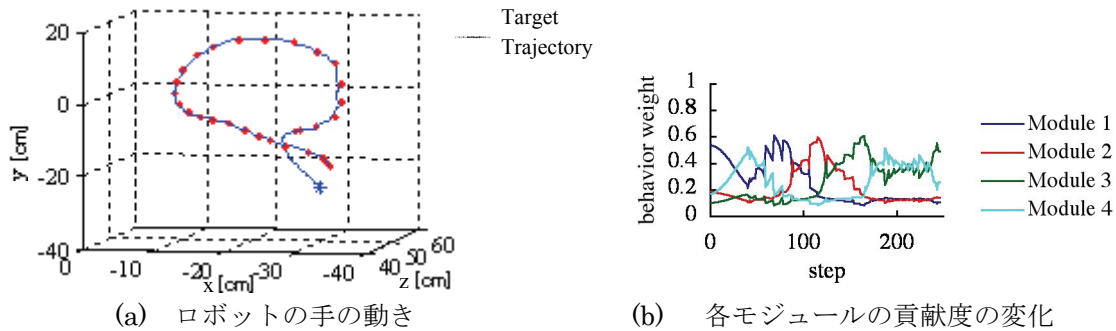


図 20 ロボットの模倣によるモデル生成

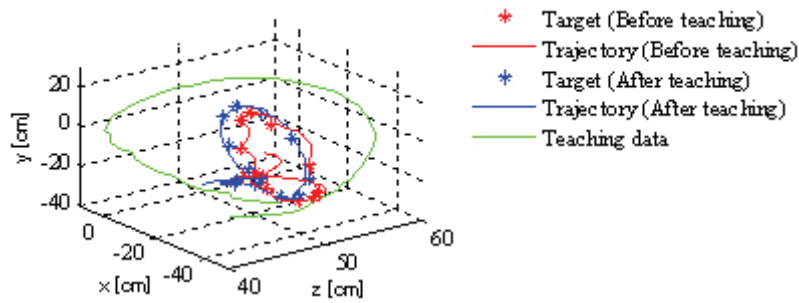


図 21 対話的な模倣学習におけるモデル生成

次に、対話的な逐次模倣学習に関する実験結果を示す．先述の奥行き方向を固定した面の教師学習データ（上動作×3，下動作×3，右動作×3，左動作×3）を用いて、平均学習回数が 100 回となるように予備学習を行った後、円軌道のモデル生成を行わせた結果を図 21 に示す．図中の赤色の線は 1 軌道あたり平均 100 回の予備学習を行った後、すぐに行った円軌道の模倣における軌道を示し、赤い星はその時の目標座標列を示す．人間は、このモデル生成の様子を観測することにより、円運動の教師データを追加提示した（図中の緑色の線）．モデル観測の円軌道とロボットが生成する軌道が異なるのは、観測範囲のスケールとロボットの可動範囲のスケールが異なるからである．ロボットはこの軌道を用いて 100 回の追加学習を行った（図 21 の緑色の線）．このように、提案手法を用いて、ロボットは、人間の動作の模倣学習を逐次的に行えるとともに、人間はロボットの学習状況を考慮しながら、動作を経時的に教示・学習させることができる．

研究項目(5) 構造化学習に基づく相互適応機構の実現

人間と相互作用しながらロボットが効率よく認知発達するためには、パタンの記号化・分節化が重要であるとともに、記号間、あるいは、分節間の関係性の学習が重要になる．言い換えると、理解しやすい記号化や分節化は、記号間、あるいは、分節間の関係性が明確になり、逆に関係性が明確になり得るような記号化や分節化が望ましい．例えば、研究項目(2)で示したように、状態遷移確率が高くなるようにクラス間境界を生成するような学習が重要である．

しかしながら、研究項目(2)では、クラスタの境界を生成するための制約が低いため、境界生成が不安定になっている。人間と共有可能なパタンの境界を生成するために最も効果的な情報は自然言語である。なぜなら、自然言語は、様々な時代背景のもと、長年に渡り、人々の間で情報を伝達しやすいように構造化されるとともに、様々な粒度でパターンを表現するために記号化がなされてきたからである。ここでは、ロボットの認知発達をパターン間や記号間の関連性の想起が洗練されることとし、スパイクニューラルネットワーク(SNN)を用いて様々な情報間の関係性を相関学習する手法を提案した。また、構造化学習の概念にしたがい、ヘブ則による学習では、ジェスチャ認識の精度や物体認識の精度にあわせて、学習係数が変化する。すなわち、分節化や記号化の精度が高いものほど、関係性の学習が加速する。実験例として、追従物体、色情報、形状情報間の関係性を学習しながら、追従している人間との対話が始めれば、さらに、発話単語とジェスチャとの関係性を追加した相関学習を行った。ここでは、ロボットは物体の把持を行わず、物体の形状情報として物体の鋭角の数や対称性や複雑さなどの指標を用い、色情報は、光源の条件などにより変化するため、10色程度とした。また、認識可能な人間の発話単語を100とし、その中から挨拶などを除き、「赤い」、「丸い」などの物体の属性と人間が持って動かしたりする行為(ジェスチャ)を表す発話単語を用いた。以上の条件のもとで、図9のように複数の物体を見せながら行った実験におけるニューロン間の結合強度の変化を図22に示す。

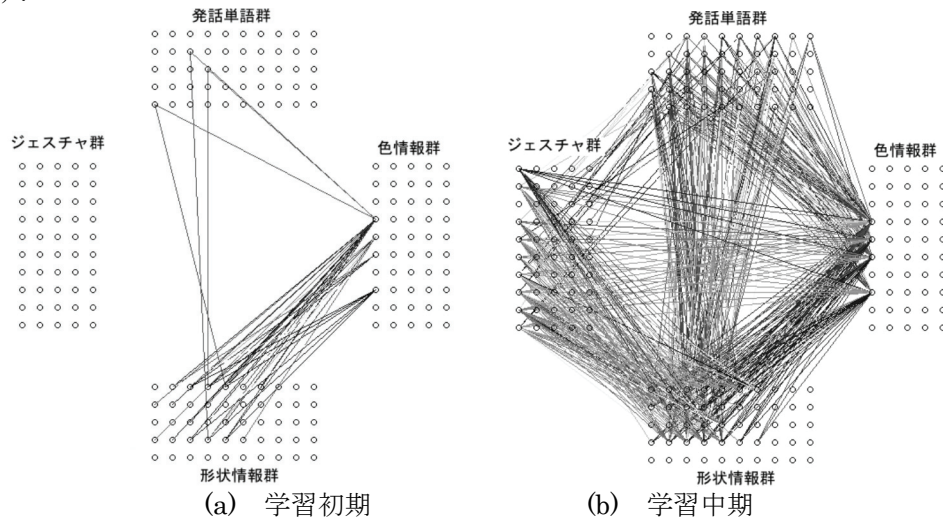


図22 SNNを用いた相関学習

学習初期では、ジェスチャの学習があまり進んでいないため、発話単語と色情報、形状情報間の学習が進んでいる(図22(a))。また、ロボットは、分散的に複数の物体を追従しているため、追従物体・色情報・形状情報間の学習は、発話単語よりも速く進む。学習が進むにつれ、様々なニューロン間の結合関係が強化された(図22(b))。学習初期では、知覚情報にあわせて事前に設計された対話を発話していたが、学習が進むにつれ、人間が発話した単語との関係性を学習することにより、人間の動作にあわせて、ある特定の発話単語に対応するニューロンが発火しやすくなり、相互作用した人間にあわせた発話単語を選択できるようになった。このように、相関関係の学習を通して、人間との対話や状況知覚の経験を共有することにより、コミュニケーションが円滑になることがわかる。

(2) 得られた研究成果の状況及び今後期待される効果

本研究では、ロボットが認知発達を行うために必要な要素技術として、時系列画像情報から、逐次更新的に知覚情報を抽出するために進化的ロボットビジョンに関する方法論を提案し、抽出された時系列知覚情報を分類学習する手法や知覚モジュールを選択する状況的知覚システムを構築した。さらには、行為システムにおける学習方法として模倣学習を提案し、人間の行為を分類学習しながら、対話的にモデル学習を行う手法を開発した。最後に、これらの手法を統合し、対話を通して知覚情報の関係性を学習する手法を開発した。実験結果では、ロボットは、人間のジェスチャや人間にとって理解しやすい発話単語を学習・選択できるようになるとともに、人間は、ロボットにとって認識しやすいジェスチャを提示し、ロボットの学習状況にあわ

せた物体の提示や発話単語の選択を行う相互適応が可能であることを示した。

本研究を通して、中心的に議論してきたことは、境界の生成と関係性の学習に基づく認知発達であり、境界を生成するためには、境界を介する二つの状態の差異と関係性が必要であるとともに、差異や関係性を学習するためには、境界を設定しなければならないという入れ子構造が常に存在する。このような問題に対処するために、本研究では、構造化学習の概念を提案し、知的モジュールの学習状態を考慮しながら、学習係数を調整することにより、複数の知的モジュールがカップリングされた学習手法を提案してきた。この研究を遂行するにあたり、大きく二つの研究背景がある。一つは、セミオーシスにおける Semiotic-Triad、ナイサーの知覚循環、生態心理学における知覚-行為循環などの考えであり、不確定さを解消するためや意図を実現するために循環することの重要性である。もう一つは、スペルベルとウイelsonによる関連性理論における相互認知環境、関連性の認知原則と伝達原則などの考えであり、認知環境共有の重要性、関連性を最大にするような認知の重要性である。これらの研究背景に関して、本研究では、人間とロボットの対話における記号接地では、パタンに対応する記号の選択や記号に対応するパタンの探索という、見かけ上、単純に見えるような問題としてではなく、図と地の関係性や部分と全体の関係性の観点から記号接地に関する議論を行った。実験結果から、対象物である図と背景である地との関係から生じる記号とパタンの対応関係の不安定さを解消するために、対話で用いられる記号が方向付けられ、限定される傾向にあることがわかった。しかしながら、パートナーロボットの認知発達を実現するためには、情動に基づく学習や自己効力感に基づく学習、三者以上の関係に基づく社会的意図理解や社会的合意形成などに関する研究も必要であり、今後、ロボットを含む認知エージェントの社会的学習に関する研究へと展開していく予定である。

本研究に関する類似研究として、赤ちゃん学から始まる人間の原初的な知覚やコミュニケーションの発達に関する研究、ロボットを用いた認知発達に関する研究などがあり、様々な観点から研究が進められている。また、国内外を問わず、ロボットの全体的な認知発達や知能化に関する研究は、思考実験や概念的なものが多く、一方で、方法論的には、一つの知的側面のみを扱った研究が多く、全体的な統合的方法論については、あまり議論されていない。全体的な方法論については、記号処理に基づく人工知能的な研究が多く、トップダウン的に記述された知識の利用に関する研究が多く、ボトムアップ的な学習を融合した双方向の学習の方法論は、ほとんど行われていない。具体的な類似研究として、リカレントニューラルネットワークを用いた谷らの研究があり、記号接地に関して、境界がどのように生成されるのかをニューラルネットワークのダイナミクスの観点から議論しているが、人間が扱う自然言語の観点からは議論されていない。また、浅田らの認知発達ロボティクスに関する研究では、強化学習を用いた行為の学習、協同注意の獲得などに関する研究を行っているが、本研究では、これらの基本的な能力の上に発達するであろう知覚情報の境界の生成や知覚情報の関連性の学習に焦点をあてている。以上、まとめると、これらの研究に共通する問題意識は、身体性に基づくパタンの記号化や行為の分節化を扱っている点であり、本研究では、境界の生成と関係性の学習を循環的に行うための方法論について議論したが、今後、「境界と関係性の科学」として、様々な観点から境界の生成と関係性の学習について多角的に議論し、方法論的に体系化を行う予定である。

5. 類似研究の国内外の研究動向・状況と本研究課題の位置づけ

本研究に関する類似研究として、赤ちゃん学から始まる人間の原初的な知覚やコミュニケーションの発達に関する研究、ロボットを用いた認知発達に関する研究などがあり、様々な観点から研究が進められている。また、国内外を問わず、ロボットの全体的な認知発達や知能化に関する研究は、思考実験や概念的なものが多く、一方で、方法論的には、一つの知的側面のみを扱った研究が多く、全体的な統合的方法論については、あまり議論されていない。全体的な方法論については、記号処理に基づく人工知能的な研究が多く、トップダウン的に記述された知識の利用に関する研究が多く、ボトムアップ的な学習を融合した双方向の学習の方法論は、ほとんど行われていない。また、人間とロボットの円滑なコミュニケーションを実現するための方法論は、自然言語理解やシナリオを用いたコミュニケーションパターンの事前設計に関する研究が多い反面、コミュニケーションを支える状況の知覚に関する研究は、ほとんど行われていない。

具体的な類似研究として、リカレントニューラルネットワークを用いた谷らの研究があり、記号接地に関して、境界がどのように生成されるのかをニューラルネットワークのダイナミ

クスの観点から議論しているが、人間が扱う自然言語の観点からは議論されていない。また、浅田らの認知発達ロボティクスに関する研究では、強化学習を用いた行為の学習、協同注意の獲得などに関する研究を行っているが、本研究では、これらの基本的な能力の上に発達するであろう知覚情報の境界の生成や知覚情報の関連性の学習に焦点をあてている。さらに、本研究では、知覚-行為循環や関連性理論、状況的知覚など様々な概念に基づき、環境との相互作用から社会的相互作用に至るまでの様々な階層におけるロボットの認知発達能力に関して議論を行うとともに、実現するための方法論の体系化を多角的な視点から行っている点が異なる。

6. 研究実施体制

氏 名	所 属	役 職	研究項目	参加時期
久保田直行	首都大学東京 システムデザイン研究科	准教授	研究の実施及び総括	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
清水俊之	首都大学東京	研究補助員(修士 1)	人型ロボットハードウェア構成の改造、「プログラミング開発補助	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
西田謙一郎	首都大学東京	研究補助員(修士 2)	パソコン型ロボットのプログラミング開発及び基礎実験の補助	平成 18 年 4 月～ 平成 19 年 3 月
島田みづほ	首都大学東京	研究補助員	実験データの収集・処理/英会話教材作成	平成 18 年 4 月～ 平成 20 年 3 月
神津大介	首都大学東京	修士 1	ロボットの制御回路の開発やプログラミング開発補助	平成 18 年 9 月～ 平成 18 年 10 月
小嶋宏幸	首都大学東京	修士 1	パートナーロボットの人間との対話システムに関するプログラミング開発及び基礎実験補助	平成 18 年 10 月～ 平成 18 年 12 月
相沢直秀	首都大学東京	学部 4	さがけライブでのデモの補助	平成 18 年 12 月
富岡有	首都大学東京	学部 4/ 研究補助員(修士 1)	模倣学習のプログラミング開発及び基礎実験補助	平成 18 年 12 月～ 平成 20 年 3 月
佐々木裕宣	首都大学東京	博士 1	人間とロボットの相互作用に基づく行動学習に関する研究	平成 19 年 3 月
増田寛之	首都大学東京	研究補助員(博士 1)	パソコン型ロボットのプログラミング開発及び基礎実験の補助	平成 19 年 4 月～ 平成 19 年 11 月

“研究に参加した研究者につき、期間の長短に関わらず院生も含め全員のお名前、所属、役職、研究項目、参加時期をお書き下さい。機構が雇用・派遣した研究者については、所属は「派遣先」、役職は「JST 研究員」とお書き下さい。

7. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要

“ワークショップ、シンポジウム、その他チーム内ミーティング（主なもの）を行った場合、

月日、名称、場所、参加人数、目的や内容などをお書き下さい。”

(2) 招聘した研究者等

氏 名（所属、役職）	招聘の目的	滞在先	滞在期間

“研究開始からこれまでに JST が招聘した外国人研究者等のお名前（所属、役職）、日本での滞在先、滞在期間、招聘の目的をお書き下さい。”

8. 発展研究による主な研究成果

(1) 論文発表（英文論文 30 件 邦文論文 0 件）

- Naoyuki Kubota, Visual Perception and Reproduction for Imitative Learning of A Partner Robot, WSEAS TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, Issue 5, Vol. 2, pp. 726-731, May 2006.
- 2. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, Cooperative Perceptual Systems for Partner Robots Based on Sensor Network, International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS), Volume 6, Number 11, pp.19-28, November 2006.
- Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, Perceptual Control Based on Prediction for Natural Communication of A Partner Robot, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.54, No.2, pp.866-877, April, 2007.
- 4. Indra Adji Sulistijono and Naoyuki Kubota, Human Head Tacking Based on Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm, Journal of Advanced Computational Intelligence and intelligent Informatics, Vol.11 No.6, Jul. 2007, pp.681-687, 2007
- Naoyuki Kubota, Toshiyuki Shimizu, Minoru Abe, Joint Attention Between a Human Being and a Partner Robot Based on Computational Intelligence, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.11, No.10, pp. 1275-1281, 2007.
- 6. Naoyuki Kubota, Shintaro Omote, and Yoshikazu Mori, Emotional Learning of A Vision-Based Partner Robot for Natural Communication with Human, Proc. (DVD-ROM) of 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 06), pp.6288-6294, Vancouver, Canada, July 16-21, 2006.
- 7. Naoyuki Kubota, Toshiyuki Shimizu, Modular Fuzzy Neural Networks for Imitative Learning of A Partner Robot, Proc. (DVD-ROM) of 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 06), pp.8179-8186, Vancouver, Canada, July 16-21, 2006.
- 8. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, The Role of Spiking Neurons for Visual Perception of A Partner Robot, Proc. (DVD-ROM) of 2006 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 06), pp.530-537, Vancouver, Canada, July 16-21, 2006.
- 9. Naoyuki Kubota, Minoru Abe, Human Hand Detection for Gestures Recognition of A Partner Robot, Proc. (CD-ROM) of World Automation Congress (WAC) 2006, ifmip_214, Budapest, Hungary, July 24-26, 2006.
- 10. Naoyuki Kubota, Hiroyuki Kojima, An Utterance System of a Partner Robot based on Interaction and Perception, Proc. (CD-ROM) of World Automation Congress (WAC) 2006, ifmip_219, Budapest, Hungary, July 24-26, 2006.
- 11. Indra Adji Sulistijono, Naoyuki Kubota, Human Clustering for a Partner Robot Based

- on Particle Optimization, Proc. (CD-ROM) of 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 06), pp. 686-691, Hatfield, United Kingdom, September 6-8, 2006.
12. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, Prediction of Human Behavior Patterns Based on Spiking neurons for a Partner Robot, Proc. (CD-ROM) of 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 06), pp. 692-697, Hatfield, United Kingdom, September 6-8, 2006.
 - Naoyuki Kubota, and Toshiyuki Shimizu, Clustering of Internal State of A Partner Robot based on Modular Neural Networks, Proc (CD-ROM) of Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2006), pp. 1032-1042, O-okayama Campus West Bldg.9 Tokyo Institute of Technology, Tokyo, September 20-24, 2006.
 14. Naoyuki Kubota, and Naohide Aizawa, Intelligent Control of Multiple Partner, Proc (CD-ROM) of Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2006), pp. 1977-1982, O-okayama Campus West Bldg.9 Tokyo Institute of Technology, Tokyo, September 20-24, 2006.
 15. Naoyuki Kubota, Yu Tomioka, and Minoru Abe, Temporal coding in spiking neural network for gestures recognition of a partner robot, Proc (CD-ROM) of Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2006), pp. 737-742, O-okayama Campus West Bldg.9 Tokyo Institute of Technology, Tokyo, September 20-24, 2006.
 16. Naoyuki Kubota, and Indra Adji Sulistijono, A Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm for Human Head Tracking, Proc (CD-ROM) of Joint 3rd International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 7th International Symposium on advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2006), pp. 2204-2209, O-okayama Campus West Bldg.9 Tokyo Institute of Technology, Tokyo, September 20-24, 2006.
 17. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, Hiroyuki Kojima, Perceptual System of a Partner Robot for Natural Communication Restricted by Environments, Proc. of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006), IROS06-170, Beijing International Convention Center, Beijing, China, October 9-15, 2006.
 18. Kenichiro Nishida, Naoyuki Kubota, Spatial-temporal Expression based on Spiking Neurons for Prediction of a Partner Robot, Proc. of The Third International Conference on Autonomous Robots and Agents (ICARA 2006), pp. 635-640, Palmerston North, New Zealand, December 12-14, 2006.
 19. Naoyuki Kubota, Yu Tomioka, Kenichiro Nishida, Human Tracking and Gesture Recognition of a Partner Robot based on Computational Intelligence, Proc. of The Third International Conference on Autonomous Robots and Agents (ICARA 2006), pp. 641-646, Palmerston North, New Zealand, December 12-14, 2006.
 20. Naoyuki Kubota, Naohide Aizawa, Intelligent Control of A Multi-agent System based on Multi-objective Behavior Coordination, Proc (CD-ROM) of 7th IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2007), pp. 184-189, Jacksonville Florida USA, June 20-23, 2007.
 21. Indra Adji Sulistijono, and Naoyuki Kubota, Evolutionary Robot Vision for Multiple Human Heads Tracking of A Partner Robot, Proceeding of 16th IEEE International Conference on Robot & Human Interactive Communication (Ro-Man2007), pp. 463-468, Jeju, Korea, August 26-29, 2007.
 22. Naoyuki Kubota, Information Extraction Based on Evolutionary Robot Vision for Partner Robots, Proc (CD-ROM) of International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2007), pp. 21-26, Sokcho, Korea, September 5-8, 2007
 23. Naoyuki Kubota, Pei Jingzhe, Yoshikazu Mori, An Emotional Model For Natural Communication of A Partner Robot, Proc (CD-ROM) of International Symposium on

- Advanced Intelligent Systems (ISIS2007), pp. 153-158, Sokcho, Korea, September 5-8, 2007
24. Naoyuki Kubota, Jingzhe Pei, Akihiro Yorita, Hiroyuki Kojima, Human Tracking and Natural Communication of Partner Robots, Proc (CD-ROM) of International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS2007), pp. 205-210, Sokcho, Korea, September 5-8, 2007
 25. Naoyuki Kubota, Yu Tomioka, Evolutionary Robot Vision for Human Tracking of Partner Robots in Ambient Intelligence, Proc (CD-ROM) of Congress of Evolutionary Computation, pp. 1491-1496, Singapore, September 25-29, 2007.
 26. Naoyuki. Kubota, Toshiyuki Shimizu, Trajectory Generation Based on a Steady-State Genetic Algorithm for Imitative Learning of a Partner Robot, Proc (CD-ROM) of Congress of Evolutionary Computation, pp. 1497-1502, Singapore, September 25-29, 2007.
 27. Indra Adji Sulistijono, Naoyuki Kubota, Evolutionary Robot Vision and Particle Swarm Optimization for Multiple Human HeadsTracking of A Partner Robot, Proc (CD-ROM) of Congress of Evolutionary Computation, pp. 1535-1541, September 25-29, Singapore, 2007.
 - Naoyuki Kubota, Yu Tomioka, Learnability in Human Gesture Recognition for a Partner Robot Based on Computational Intelligence, Proc (CD-ROM) of Congress of Evolutionary Computation, pp.2517-2522 , Singapore, September 25-29, 2007.
 29. Naoyuki Kubota, Kenichiro Nishida, Hiroyuki Masuta, The Role of Prediction in Structured Learning of Partner Robots, Proc of 2007 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp.1901-1906, Montreal, Quebec, Canada, October 7-10, 2007.
 30. Noyuki Kubota, Toshiki Ohinata, Shiho Wakisaka, Honghai Liu, Extraction of Facial Landmarks for a Partner Robot Based on Evolutionary Computation, Proc. of Computation Intelligence, Robotics and Autonomous Systems (CIRAS 2007), pp. 44-49, Massey University, Palmerston North, New Zealand, November 28-30, 2007.
 31. Naoyuki Kubota and Kenichiro Nishida, Structural Adaptation of Prediction-Based Perceptual System, International Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing, Issue 1, January, pp.19-26, 2008.

(2)口頭発表

①学会

国内 17 件, 海外 25 件

②その他

国内 0 件, 海外 0 件

(3)特許出願 (SORST 研究の成果に関わる特許 (出願人が JST 以外のものを含む))

下記の表には、SORST 研究期間内に出願した SORST 研究の成果に関わる全件数をご記入下さい。

また、別添「特許出願 年次報告.xls」には、H19 年度に出願した特許をご記入下さい。

	件数
国内出願	0
海外出願	0
計	0

(4) その他特記事項

受賞： 貢献賞，日本知能情報ファジィ学会，2007年8月30日

Recognition Award, ISIS (International Symposium on Advanced Intelligent Systems) 2007, 2007年9月

Excellent Paper Award, ISME (International Symposium on Management Engineering) 2008, 2008年3月

新聞記事掲載： 「学びの場 個性を競う」，2006年12月1日，日経新聞，日経創刊130周年特集

その他：サイエンスチャンネル「メッセージ フロム サイエнтиスト」2007年4月

9. 結び

本研究の目標として、当初、「新しい学際的な分野としてのパートナーロボットに関する研究領域の確立」を設定したが、体系化を考えるにつれ、非常に広範囲に及ぶ学問領域が含まれていることを改めて実感するとともに、中間審査のコメントを反映し、フォーカスを絞った要素研究項目を設定し直した。2年間という短い期間であったが、具体的に設定した研究項目として、「状況的知覚システムの構築」や「模倣学習による行為システムの構築」、「関連性理論に基づく相互適応機構の実現」など、当初の目的は達成できたが、提案手法の有効性などの検証を十分には行う時間が取れなかったのが残念である。しかしながら、境界の生成と関係性の学習に関する統合的な方法論に基づき、発達するロボットの学習結果が得られた意義は大きいと考えられ、今後、境界と関係性の科学に関する研究を行っていくつもりである。また、限られた研究費と研究期間の中で、人型ロボットの修理や拡張など色々行うべきことがあり、時間的な制約をかなり受けたが、結果的には、効果的にプロジェクトが運営できたと思われる。これも、研究室の学生諸氏ならびに研究補助員の協力のおかげである。最後に、戦略的創造研究推進事業では、異なる様々な分野の研究者の意見や提案を受けることができ、研究費以上に大きな収穫を得ることができた。

