

氏 名	谷 口 忠 大
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学位記番号	工 博 第 2601 号
学位授与の日付	平成 18 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工学研究科精密工学専攻
学位論文題目	環境との相互作用に基づく自律適応系の構成論的研究

(主 査)  
論文調査委員 教授 榎木哲夫 教授 門内輝行 教授 富田直秀

### 論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、人間と共生する環境下で適応的に振舞うための自律ロボットの行動制御系を自律適応系とみなし、その設計論について論じている。すなわち、ロボットが環境や人との相互作用を通してその内的表象を組織化し、またそれを外部の刺激信号と連合させることによって、他者との相互作用に必要となる記号の獲得を行うプロセスについて構成論的に明らかにしている。具体的には、自律適応系が環境に働きかける際の相互作用のダイナミクスを、自らの利用可能なセンサ入力・モータ出力の情報のみを使って学習するための計算論モデルの提案を行っており、環境概念と同時に汎化行為概念を外部からの教師信号なしに累増的に獲得するための機構を双シエマモデルとして構築している。さらに本モデルを、脳神経科学からのスパイクタイミング依存のシナプス可塑性に関する知見と結合させることで、対象それ自体ではない聴覚の刺激信号が、その対象自体によって以前に引き出されたことのある特定の反応を生み出すことができるようになることをモデル上で実証することで、記号論的コミュニケーションモデルへの拡張について言及している。本論文は5部構成で全10章からなり、第Ⅰ部の1～2章では本研究の背景として、自律系内部での記号の適応的組織化に関する研究の必要性についてまとめている。第Ⅱ部の3～4章では本論文の主テーマである双シエマモデルの主要機能の一つである動的環境との身体的相互作用を通じた知覚表象生成の側面について、つづく第Ⅲ部の5～6章では双シエマモデルのいま一つの主要機能である汎化行為概念の学習について論じている。第Ⅳ部の7～8章では脳神経科学からの知見との融合によるロボット内部での記号創発について論じている。第Ⅴ部の9～10章はまとめと展望からなる結論である。各章の詳細は以下の通りである。

第1章は序論であり、ロボットに代表されるような自律系としての行動主体が環境や人との相互作用を通してロボット内部に内的表象を組織化することの重要性について述べている。

第2章では、人工知能、心理学、言語学、記号論を始めとするさまざまな分野における関連研究の動向について、本研究の動機と背景とともにまとめている。

第3章では、本論文の主テーマである双シエマモデルについて、環境の変化に対して構築中の内的表象を適応的に分化させることで累増的に環境に関する概念を獲得するための機構について明らかにしている。例として運動パターンが変化する動的対象を顔ロボットが追跡する課題を取り上げ、知覚シエマの均衡化と分化により対象物を視野内に留めおくように追跡するための知覚対象の表象生成が可能になることを示している。

第4章では、双シエマモデルにより獲得される知覚表象の粒度とロボットの身体パラメータとの間の依存関係について明らかにし、時間的・空間的精度の異なる身体特性をもつロボットにとって適切な粒度の表象が内部に自律的に生成されることを構成論的に実証している。すなわち顔ロボットの身体特性として、カメラ視角と行動周期の空間的・時間的パラメータを変化させた場合に、それぞれの身体特性に依存した表象が生成されることを確認し、各々の身体特性の連続的な変化に対して、シエマ分化を最も活性化身体パラメータにピーク値が存在することを明らかにしている。

第5章では、環境ダイナミクスの変化に依存しない汎化行為概念を、双シエマモデル上での強化学習によってセンサ空間

上でのアトラクタとして獲得できることを示している。すなわち台車上に設置された平板上の球の制御課題を例題として、直接は観測できない台車の走行状態の違いを平板制御のための環境ダイナミクスの変化として位置づけ、各々の環境ダイナミクスに対応する行為概念が獲得できることを示し、さらに知覚シエマ分化の機構と組み合わせることで、過去の学習環境以外の新規な環境におかれた場合にも過去に獲得した行為概念を再利用することで汎化能力を実現できることを実証している。

第6章では、強化学習シエマモデルを提案し、第3章での知覚シエマによる環境概念の獲得と同様に、行為概念の累増的獲得が可能になることを示している。すなわち、前章と同じ例題に対して、平板中心への位置制御に加え、平板上での球の周回運動制御という複数の行為概念を学習させる課題を設定し、これらの学習課題を、外部からの報酬の与え方により間接的に教示する設定のもとでの実験を行っている。そして与えられる報酬の変化を自発的に認識し、行為シエマを分化させることで、ロボットのおかれる環境や他者の行動意図の変化に適応できる複数行為概念の累増的獲得が可能になることを示している。

第7章では、双シエマモデルにおける分化プロセスを非線形な系に拡張するべく正規化ガウスネットワークを用いたシエマモデルを提案し、シエマの選択と生成を仮説検定に基づいて行い、時変の非線形制御対象に対する時間・空間的モジュール分割が可能になることを示している。長さが変化する単振子の振り上げ制御タスクを例として、既に提案されているMOSAICとの比較実験から、獲得概念の累増性と安定性の上で性能の改善が見られることを実証している。

第8章では、大脳新皮質や海馬で発見されているスパイクタイミング依存のシナプス可塑性とシエマモデルを結合し、獲得されたシエマ内部に生成される主観的誤差と外的刺激としての聴覚情報を連合させることで、報酬系を含む環境の変動の兆候を外的刺激の中に自律的に読み取り、シエマの切り替えに要する時間遅れを改善した効率的なシエマ選択が可能になることを示している。さらに、対象それ自体ではない聴覚刺激信号が、その対象自体によって以前に引き出されたことのある特定の反応を生み出すことができるようになることを実証することで、記号論的コミュニケーションモデルへの拡張の可能性について言及している。ここでは、小型自律移動ロボットへの音声刺激を用いた複数の報酬系のもとでの行動獲得シミュレーション実験により実証している。

第9章では議論と考察を、終章の第10章では結論を述べている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、ロボットが環境や人との相互作用を通してその内的表象を組織化し、またそれを外部からの刺激信号と連合させることによって、他者との相互作用に必要となる記号の獲得を行うプロセスについて構成論的に明らかにしている。具体的には、自律適応系が環境に働きかける際の相互作用のダイナミクスを、自らの利用可能なセンサ入力・モータ出力の情報のみを使って学習するための計算論モデルの提案を行っており、環境概念と同時に汎化行為概念を外部からの教師信号なしに累増的に獲得するための機構を双シエマモデルとして構築している。さらに本モデルを、脳神経科学からの知見と結合させることで、対象それ自体ではない聴覚の刺激信号が、その対象自体によって以前に引き出されたことのある特定の反応を生み出すことができるようになることをモデル上で実証することで、記号論的コミュニケーションモデルへの拡張について言及している。本論文の主要部分をまとめると以下のようなようになる。

論文は5部構成で、第Ⅰ部は1章と2章からなり、本研究の背景として、自律系内部での記号の適応的組織化に関する研究の必要性についてまとめている。つづく第Ⅱ部は3章と4章からなり、本論文の主テーマである双シエマモデルについて、その主要機能の一つである動的環境との身体的相互作用を通じた知覚表象生成の側面についてまとめている。3章では環境の変化に対して構築中の内的表象を適応的に分化させることで累増的に環境に関する概念を獲得するための機構について明らかにしている。つづく4章では、双シエマモデルにより分化を経ながら獲得される表象の粒度とロボットの身体パラメータとの間の依存関係について明らかにし、時間的・空間的精度の異なる身体特性をもつロボットにとって適切な粒度の表象が内部に自律的に生成されることを構成論的に実証している。第Ⅲ部は、5章と6章からなり、双シエマモデルのいま一つ的主要機能である汎化行為概念の学習について論じている。5章では、環境ダイナミクスの差異に依存しない汎化行為概念を、双シエマモデル上での強化学習によってセンサ空間上でのアトラクタとして獲得できることを示している。つづく6章

では、報酬設計の変更を社会的相互作用の一形態と位置づけ、外部からの報酬の与えられ方の変化を自発的に認識し、ロボットのおかれる環境や他者の行動意図の変化に適応できる複数行為概念の累増的獲得が可能になることを示している。第Ⅳ部は、7章と8章からなり、脳神経科学からの知見との融合によるロボット内部での記号創発について論じている。7章では、双シエマモデルにおける分化プロセスを非線形な系に拡張した正規化ガウスネットワークを提案し、小脳の計算論的モデルとして既に提案されている MOSAIC との比較実験から、獲得概念の累増性と安定性の上で性能の改善が見られることを示している。つづく8章では、スパイクタイミング依存のシナプス可塑性とシエマモデルを結合し、自律系内部に獲得された表象と、外的刺激としての聴覚情報を連合させ、より効率的な適応行動の生成が可能になることを示している。最後の第Ⅴ部はまとめと展望である。

以上要するに、本論文は、環境と相互作用を行う適応的な社会ロボットが具備すべき自律適応系の設計論について、システム工学ならびに記号論の観点から追究するものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成18年1月24日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。