

(論文内容の要旨)

本論文は、ロボットと身体をもつエージェントに自然な相互行為をさせるために必要となる自律学習機能の実現を目的とし、相互行為のための基本的な情報処理機構、相互行為学習のための一般的な情報処理機構、相互行為学習アルゴリズム、相互行為情報処理機構を用いたロボットの実現、相互行為情報処理機構に関連するいくつかの発展的課題について論じており、全9章から構成されている。

第1章では、ロボットに代表される身体を持つエージェントが人間と自然な相互行為ができるようにするためには、身体を持つエージェント自体に自律学習機能をもたせることが必要であることを指摘している。この課題に関する研究を核心部分の研究、応用、発展的課題の3つに区分し、身体性のあるエージェントの相互行為制御のための汎化アーキテクチャEICAという概念を導入し、EICAを漸次複雑化することによる段階的な研究方法論を提唱している。また、ロボティックス、データマイニングなど本研究で視野に入れている関連研究分野を示し、評価に用いる相互行為の構想、使用機材、実験環境を示し、本論文の構成を示している。

第2章では、本研究の研究領域である人間同士の相互行為における非言語コミュニケーション、人間・ロボットの相互行為における非言語コミュニケーションを俯瞰した上で、人間と相互行為をするロボットのアーキテクチャに焦点を当て、従来研究を反射的なアーキテクチャ、ハイブリッドアーキテクチャ、人間・ロボット相互行為特有のアーキテクチャに分類した上で、サーベイし、従来研究の到達点と限界について論じている。

第3章では、身体を持つエージェントが人間と自然な相互行為できるようにするための最重要課題が意図のモデル化であることを指摘し、意図を相手と双方向的に相互行為を通して定式化すべきものであるという考えを示している。その上で、自律性と相互行為の組み合わせについて論じるときに必要な基本概念を導入し、時系列を考慮した身体的相互行為と相互行為を通じた意図形成に関する仮説を提示し、さらに、これらの仮説を満足するための9個の要件を示した。これらの理論的考察に基づき、身体性のあるエージェントの相互行為制御のための汎化アーキテクチャEICAを導入し、その具体化としてEICAのなかで最も原始的な相互行為システムLOEICA、自律学習能力を有する相互行為システムLiEICAの概念を述べている。

第4章では、自律学習能力を有しない原始的な相互行為システムLOEICAを取り上げて、そのアーキテクチャとアルゴリズムの詳細を示している。LOEICAは、低レベルの即応的なモータープランと意図性を反映した高レベルのプロセスから構成され、その上に多様な相互行為を実現できるようになっている。ここで重要な役割を果たすのは、高レベルのプロセスから出力される行為情報を統合する行為統合器である。LOEICAによるシステムに一貫する行動をさせるためのパラメータ調整をするための教師付学習アルゴリズムとして、FPGAと呼ぶ遺伝アルゴリズムを開発した。

このアーキテクチャを用いて、非言語的な相互行為によって、人間の経路指示に対して適切な応答を返しつつ協調的に平面内の移動を行うTalkBackとロボットの視線制御系を構成して評価実験を行い、自然な相互行為が実現できることを確認した。

第5章では、自律学習能力を有する相互行為システムLiEICAのアーキテクチャを示している。このアーキテクチャは具体性の高い行為を扱う層を下位層、抽象的な行為を記述する層を上位層とする多層構成であり、上位層の記述から行為層の情報を作り出す前向き処理と、センサー層の情報から上位層の記述を作り出す後向き処理から成る。ミラートレーニングアルゴリズムによって前向き処理から後向き処理を学習できるようにすることにより相互行為においてパートナーの意図推定を行う。階層的な処理を行うためにDown-Up-Down挙動生成アルゴリズムが用いられる。

第6章では、第5章で導入したLiEICAの各部のアルゴリズムを詳述している。LiEICAの学習プロセスは、相互行為のバブリング、相互行為の構造学習、相互行為中の適応の3段階から構成される。第1段階の相互行為のバブリング、頑健な変化点検出RSSTと頻出パターン発見アルゴリズムMCFull, MCIncから構成される。モータープリミティブはすでに与えられているものと仮定し、これらのパターンを生成するためのコントローラを生成する。第2段階は、前段階で生成された基本行為を用いて、新しい相互行為制御層を生成し、確率ネットワークによる相互行為制御プロセスを組み込む学習サイクルを所定の条件が満たされるまで繰り返す。第1段階と第2段階の学習プロセスは模倣学習に対応し、オフラインで実行される。第3段階は、オンライン学習であり、学習システムは、モデルを用いて後向きに解釈を行う理論と前向きにシミュレーション行った結果の比較結果を教師信号として、パートナーと相互行為を行いながらモデルを適応させる。これらのアルゴリズムは実装され、有効に機能することが確認されている。

第7章では、対象物の指示や対象物への説明する説明者と説明を受ける聞き手の間の相互行為のシナリオと、人間による経路誘導のシナリオを題材とする人間同士の相互行為をモーションキャプチャシステムと生体センサによって計測・記録することにより構築したコーパスに基づいて、LOEICAとLiEICAの評価を行い、LiEICAの方がよりよい視線制御ができること、経路誘導に関わるジェスチャの87%、行為の83%を学習できることを示した。

第8章では、相互行為情報処理機構に関連するいくつかの発展的課題について論じている。第一の研究では、自律学習機能の構成要素として開発したRSSTアルゴリズムを用いて、相互行為の自然さを客観的に計量する手法を開発した。第二の研究では、意図検出のための相互行為知覚アルゴリズムを開発し、人間の意図的なふるまいを、意図的でない振る舞いとノイズから分離することにより、滑らかな2次元描画を行うことのできる方式NaturalDrawを開発した。第三の研究では、人間とかなり身体性の異なる小型の非ヒューマノイドロボットに非言語的なフィードバックを生成するLOEICAによるコントローラを組み込み、人間との間の相互行為を分析し、人間に共通する一貫したジェスチャ使用があること、人間がロボットに適応する仕方に法則性が見られること、ロボットの動きによるフィードバックは人間との相互行為に有効かつ自然であることを見出した。

第9章は結論であり、本論文の成果を総括し、残された課題を示している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ロボットと身体をもつエージェントに自然な相互行為をさせるために必要となる自律学習機能の実現を目的とし、相互行為のための基本的な情報処理機構、相互行為学習のための一般的な情報処理機構、相互行為自律学習アルゴリズム、相互行為情報処理機構を用いたロボットの実現、相互行為情報処理機構に関連するいくつかの発展的課題について論じたものであり、得られた主要な成果は以下の通りである。

1. 身体性のある自律的なエージェントが時系列の上で相互行為を通して自然な意図形成ができるようにするための要件について検討を行い、多層性、即応性、漸進的な適応性、漸進的な進化、意図の多層表現、他者の意図推定、他者の意図知覚のための独立した機構、相互行為プロトコルの学習機構、自律行為と相互行為の統合の9個の条件が必要であることを導き、エージェントの相互行為制御の基礎となる汎化された理論的枠組みとしてEICAを示した。9個の要件のうちの一部だけを満足する最も原始的なLOEICA、自律学習機能をもつLiEICAなどの身体性のあるエージェントの相互行為の学習制御機構は、EICAを具体化したものとして位置づけられる。

2. 即応的なモータープランと、意図性を反映した高レベルのプロセスから構成されるLOEICAの枠組みを用いて、自然な相互行為を実現できることを示した。LOEICAの中心となるのは、競合するプロセスからの出力を調整する行為統合器である。複数の並行プロセスを統合してエージェントとして一貫性のある行動を実現するパラメータを学習するために、FPGAと呼ぶ遺伝アルゴリズムを開発した。評価実験は、非言語的な相互行為による協調的な2次元経路誘導と、ロボットの視線制御を題材として行われた。経路誘導に関しては、ロボットが人間に対して動きによる適切なフィードバックができることが分かっただけでなく、詳細な分析によって、人間のロボットへの適応の法則性など興味深い知見を得た。ロボットの視線制御に関しては、LOEICAを用いた制御方式が対照された

制御方法よりも人間に近い行動を生成できることが実験的に示された。

3. 相互行為のバブリング、相互行為の構造学習、相互行為中の適応の3段階から構成される自律学習機能を持つ相互行為システムLiEICAを開発し、その有効性を示した。LiEICAは、多層構成であり、Down-Up-Down挙動生成アルゴリズムに基づいている。頑健な変化点検出アルゴリズムRSST、対象時系列の特性を考慮できる頻出パターン発見アルゴリズムMCFull、MCInc、相互行為構造学習アルゴリズムISL、相互行為適応アルゴリズムIAAが開発された。RSST、MCFull、MCIncについては、性能評価実験を行い、いずれも先行研究で提案されているアルゴリズムと比較して、性能面で優れていることを確認した。自律学習システム全体については、シミュレートされたロボットと実ロボットの両方に実装して、評価を行った。前者では、自律学習機能が有効に働き、目標とする相互行為との誤差が時間とともに減少することを確認した。

後者では，説明のための相互行為と経路誘導のための相互行為の2つの題材のいずれにおいても，LOEICAよりも優れた相互行為を実現できることを確認した．

4．意図の自然なコミュニケーションとその応用に関して，本研究で開発したRSSTアルゴリズムを用いた相互行為の自然さを客観的に計量するための手法の開発，意図検出のための相互行為知覚アルゴリズムを応用して，意図的な振る舞いを，ノイズおよび意図的でない振る舞いから分離することにより，人間にとって自然で高品質の2次元描画を支援するシステムNaturalDrawを開発し，実験によって有用性を確認した．

以上の成果は，学術上，情報学上寄与するところが大きいのによって，本論文は博士（情報学）の学位論文として価値あるものと認める．

また，平成21年8月27日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた．