

学位論文題名

A Study on Mimic Reactive Architecture  
for Autonomous Agents

(擬似刺激反応型自律エージェントの設計手法に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、多岐にわたる分野において、自律的に情報を収集し処理を行うエージェント技術、すなわち、自律エージェント技術が注目されている。そこに要求されることは、対象とする世界の多様な状況下において時変性、あいまいさ、雑音などの不確定性や複雑性、可塑性を含む問題の解決機能である。ロボットはその応用分野の一つである。そのようなエージェントを構築するために様々な方法が提案されてきた。かつては、古典的人工知能論に基づき、対象とする世界を抽象化し処理する熟考型設計論が用いられていたが、対象とする世界が実世界であるロボットにおいては、その処理の複雑さのために十分な適応性の実現が困難であることが指摘されている。現在、広く用いられている設計論が、行動規則を人間が設定する反応型設計論と呼ばれるものである。しかし、設計段階で想定した限られた状況にしか適応できず、十分に自律的であるとは言い難いのが現状である。

より高度な自律機能実現のためには、アフォーダンス理論に見られるように、その行動の可能性は行動主体であるロボット自身が置かれた環境をよりよく理解し、自己の能力を最大限に発揮可能な制御構造を自身で自律的、自発的に構築することが必要不可欠である。つまり、反応型設計論が持つエージェントの生存性を重視した制御機構と熟考型設計論がもつ高度な情報処理機構との有機的な連携を可能とする新しい設計論の構築こそが課題である。以上の認識に基づいて、本研究では、新しい設計手法 Mimic Reactive Architecture(MRA)を提案し課題へのアプローチを図っている。MRA は擬似的環境情報という概念を導入し、反応型設計論の持つ即応性を最大限に利用し、エージェントの生存性を確保しつつ、複雑な処理機構との有機的な連携を可能にする設計論である。

本論文は自律エージェントそのものが、必要な情報を取捨選択し、試行錯誤と経験により問題解決の方針を自律的に発見するような総合的な自律エージェント設計理論を構築し、種々の応用問題への適用を通して、構築した理論の有用性と妥当性を検証した成果をまとめたものである。論文は7章より構成されており、以下にその概略を示す。

第1章は、本研究の背景、目的、課題について論じ、自律的な行動主体構築に必要な基本要素について説明している。まず、本論が対象とする実体を持ったエージェントであるロボットについて概観をのべている。つぎに、学習に重点をおきながら自律エージェントの行動原理、性質及び対象とする環境について議論を展開している。

第2章は、前章で説明した自律エージェント構築のために現在提案されているアーキテクチャについて論じている。本章は、4節から構成されている。第1節では、デカルト主義的なトップダウンアプローチから、各要素間の相互作用による機能創発を期待するボトムアップアプローチへのパラダイムシフトについて論じている。以降の3節では、ボトムアップアプローチである反応型設計論、トップダウンアプローチである熟考型設計論、そしてそれらを組み合わせ合わせた方法論について論じている。

第3章は、6節から構成され、前述した課題に対してMRAを提案し、検証している。第1節では、提案手法の概要について説明している。本提案手法は、情報の流れに注目した手法である。すなわち、従来、環境-エージェント間という一つの情報の流れしか、考慮されていないのに対し、

提案手法では、情報の流れを複数設定することを可能にし、その流れが有機的に結合することで、従来手法のもつ利点を損なうこと無く、より高度な適応性の実現が可能であることを述べている。第2節では、従来手法及び提案手法について定式化を行い、提案手法を詳解している。第3節以降では、提案手法を多足歩行ロボットに適用し検証している。相互作用の多様性、即応性の観点から評価問題としての歩行の妥当性について言及し、ロボットに実装した制御構造について示している。そして、4節から6節において、実験結果の考察を行い、情報の流れの多重化による拡張性の向上、行動の妥当性を明らかにしている。

第4章では、前節で述べたMRAの拡張手法である、Learning Gimmicks(LG)について説明している。LGは、通常の学習手法の実装系とは異なり、学習対象がMRAを構成するエージェントへの入力刺激である点が特徴である。これについては、第2節、及び第3節で論じており、前章では設計者によってあたえられていた擬似的環境情報をエージェント自ら獲得することの重要性を指摘している。すなわち、後天的におかれた状況を再認識し、設計者が想定していない状況への対処を可能にするために学習によりルール of 駆動条件を自己生成可能であることが、より高い目的達成能力の実現につながることを述べている。そして、第4節以降では、前章同様、多足歩行ロボットに実装し検証を行い、MRA+LGにより経験から自己の行動調整のために必要な環境情報生成を通して、自律性の向上が可能であることを明らかにし、設計論としての有効性を証明している。

第5章では、制御構造のより自律的な生成手法であるGate Growth(GG)について述べている。GGは、ゲート群ネットワークの生成文法を進化的に学習することで、実機上の限られた資源を有効に利用し、より自由度の高い制御構造の生成を目指している。本章は10節から構成されている、第1節では本章全体を概観している、第2節では進化手法によりロボットの制御機構を自動的かつ自律的に生成する進化ロボティクスについて触れ、提案手法の目的を明確にしている。第3節、第4節では、進化をロボット構築のどの段階で行うべきかについて、デバイス内部及び外部でおこなうことの特徴について論じ、種々の進化アルゴリズムについて説明している。続く第5節では、EHW手法の適用対象のデバイスについて説明を行い、第6節では、進化ハードウェアアプローチについての実装例をあげている。そして、第7節以降において提案手法について詳説している。第7節では提案手法について概観し、第8節、第9節で、自律移動ロボットの行動生成に適用し、環境との相互作用を通して制御機構の自律的かつ高速な生成が可能であることを証明している。そして第10節において本章の結論を述べている。

第6章では、環境中での経験を通して自律エージェント自身が必要な制御構造を獲得することの重要性を中心に本論文を要約している。そして、第7章では結論を述べている。

すなわち、本論文はエージェントの設計において、必要な要素とは何かについて概観し、その結果、情報の流れの多様化するために擬似的な環境刺激を用いた手法を提案している。そして、実験を通してその有効性、有用性を明らかにしている。更に、より自律的な制御構造生成を目的として、生存性を重視した学習手法を提案し、同じく実機による実験において試行錯誤と経験によりロボットのパフォーマンスが向上することを示している。また、より自由度の高い自律的制御構造生成手法を提案し、実験をとおり提案した設計論が制御目標や最適化対象が陽に記述されないような問題に対しても、有効な制御構造が自律的に獲得可能であることを明らかにしている。

# 学位論文審査の要旨

主査 教授 嘉数 侑 昇  
副査 教授 大内 東  
副査 教授 宮本 衛 市  
副査 教授 和田 充 雄

学位論文題名

## A Study on Mimic Reactive Architecture for Autonomous Agents

(擬似刺激反応型自律エージェントの設計手法に関する研究)

近年、多岐にわたる分野において、対象とする世界の多様な状況下において時変性、あいまいさ、雑音などの不確定性や複雑性、可塑性を含む問題の解決機能をもつ自律エージェント技術が注目されている。ロボットはその応用分野の一つである。そのようなエージェントを構築するために様々な方法が提案されてきた。現在、処理の複雑さのために十分な適応性の実現が困難な古典的人工知能論に基づく熟考型設計論から、行動規則を人間が設定する反応型設計論へと主流が移っている。しかし、設計段階で想定した限られた状況にしか適応できず、十分に自律的であるとは言い難いのが現状である。より高度な自律機能実現のためには、アフォーダンス理論に見られるように、その行動の可能性は行動主体であるロボット自身が置かれた環境をよりよく理解し、自己の能力を最大限に発揮可能な制御構造を自身で自律的、自発的に構築することが必要不可欠である。本論文は、反応型設計論が持つエージェントの生存性を重視した制御機構と熟考型設計論がもつ高度な情報処理機構との有機的な連携を可能とする新しい設計論の構築を課題としている。本論文は、自律エージェントそのものが、必要な情報を取捨選択し、試行錯誤と経験により問題解決の方針を自律的に発見するような総合的な自律エージェント設計理論として Mimic Reactive Architecture(MRA)を提案し、種々の応用問題への適用を通して、構築した理論の有用性と妥当性を明らかにしている。以下、その主要な成果は、つぎの4点に要約される。

1. 実体をもったエージェントとしてロボットについて概観し、デカルト主義的なトップダウン的设计論から、各要素間の相互作用による機能創発を期待するボトムアップ的设计論へのパラダイムシフトについて論じている。そして、学習に重点をおきながら自律エージェントの行動原理、性質及び対象とする環境について議論を展開し、対象環境の複雑性から、学習能力を用いた自律的な行動主体構築手法の必要性を明らかにしている。
2. 従来の単一的エージェント設計ではより複雑な行動設計が困難であるとの観点から、疑似的環境情報という概念を導入し、複数の情報処理ストリームをもち、それぞれの処理を有機的に連携させることで、より高度な適応性の実現を図るあたらしいエージェント設計論として MRA を提案している。そして、提案手法を多様な相互作用及び即応性を必要とする歩行ロボットに適用し、情報ストリームの多重化による拡張性の向上、行動の妥当性を明らかにしている。
3. 複雑な環境下では、行動主体自身による必要な制御構造の自律的な獲得が必要であることを

明らかにしている。すなわち、後天的におかれた状況を再認識し、設計者が想定していない状況への対処を可能にするために学習によりルール of 駆動条件を自己生成可能であることが、より高い目的達成能力の実現につながることを述べている。そのような課題に対して、MRA の拡張手法として Learning Gimmicks(LG)を提案している。そして、多足歩行ロボットへの実装をとおり、通常の学習手法の実装系とは異なり、学習対象が MRA を構成するエージェントへの入力刺激とすることで自己の行動調整のために必要な環境情報生成が可能となり、自律性の向上につながることを明らかにし、設計論としての有効性を確認している。

4. 進化手法によりロボットの制御機構を自動的かつ自律的に生成する進化ロボティクスについて触れ、ロボット構築における進化ハードウェアアプローチの有用性、及び、問題点について議論している。そして、実機上の限られた資源を有効に利用しゲート群ネットワークの生成文法を進化的に学習することで、より自由度の高い制御構造の実現を図る Gate Growth(GG)を提案し、自律移動ロボットの行動生成に適用し、環境との相互作用を通して制御機構の自律的かつ高速な生成を確認し、その妥当性を確かめている。

これを要するに、本論文は擬似的な環境刺激という概念を導入し、自律エージェント自身の試行錯誤と経験により、必要となる制御機構の自律的生成を可能とする設計手法を提案し、ロボット設計等の具体的課題を通して、自律エージェント設計問題に対する種々の新知見を得ており、情報工学、ロボット工学、知識工学の進歩に寄与するところが大きい。よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。