

学 位 論 文 題 名

A Study on Hierarchical Agent System Architecture

(階層型エージェントシステムアーキテクチャに関する研究)

学位論文内容の要旨

本論文は、階層型マルチエージェントシステムの構築法を提案し、評価信号があいまいな問題に対して問題解決をはかった研究成果をまとめたものである。

本研究の目的は、自律適応型インタフェースの開発にむけて、階層型エージェントシステムの構築を提案することである。従来の Man-machine インタフェースは、ダイレクトマニピュレーションとよばれ、人間が使いやすいインタフェースの開発に重点が置かれていた。しかしこのようなインタフェースは、機械が苦手な人やお年よりのように操作方法をなかなか覚えることができない人にとっては、結局機械の使用を諦めてしまう結果となる。そのため、人間が機械の操作方法に適応していくのではなく、機械が人間に適応していく新たなインタフェースの開発が求められている。そこで、本研究では、人間の快・不快を評価信号とすることにより機械の人間への適応を試みた。評価信号が単純である必要があるため、強化学習をインタフェースに組み込むことによる適応型インタフェースの開発を行った。しかし、人間による評価信号の与え方は個人差が顕著であるため、従来の強化学習では対応できない。というのは、強化学習における報酬は、必ずシステムが満たすべき条件に正確に対応しているという前提のもとで学習が行われているからである。

本論文では、このような評価信号があいまいな問題に対して、階層型エージェントシステムを構築することにより、問題解決をはかる。提案するエージェントアーキテクチャは、人間そのものをシステムに組み込んでしまうため、従来のエージェントアーキテクチャとは大きく異なっている。提案する階層型エージェントシステムは、上位層、下位層、中間層の3層構造からなり、各層はシングルエージェントでもマルチエージェントでもかまわないが、意思決定機構を持つものとする。上位層エージェントは、大局的な学習を逐次的に行い、下位層のエージェントは局所的な学習を行うものとする。中間層は、上位層が与える評価信号が下位層の意思決定による行動と整合性が取れていないときに、整合性をはかる。階層型エージェント構造の有効性を確認するために、追跡問題において計算機実験を行った。従来の2次元格子状トーラス環境から2次元連続トーラス空間に問題を拡張し、均質なエージェント群のみと、同じ均質なエージェント群の上位層に評価信号を与えるエージェントを構築した階層型エージェントシステムの比較実験を行った。結果として、単層の均質なエージェント群よりも階層がエージェントシステムの方が有効であることが示された。次に空間的にあいまいな評価信号の問題として、経路探索を含むピアノ問題をとりあげる。従来のピアノ問題は、姿勢制御を取り扱う問題であるが、ここでは経路探索を同時に行う問題を設定した。上位層のエージェントは、自身の形状を把握していないため、これまで提案されてきた数学的手法を用いることはできない。また、下位層のエージェントも自身の形状を把握していないが、学習を通じて正確ではないが形状を把握することができる。このため、上位層のエージェントの示した方向では、エージェントが進むことができない(評価信号の空間的なあいまいさ)。これを解決するために中間層にエージェントを構築した3階層型エージェントシステムを提案し、空間的にあいまいな評価信号の問題解

決に対する有効性を示した。時間的にあいまいな評価信号の問題として、Man-machine インタフェースを取り上げる。人間を評価信号を与える上位層のエージェントとして扱う 3 階層のエージェントシステムを提案する。評価信号を与えるタイミングには個人差が顕著にみられたが、中間エージェントがこの時間のあいまいさを解決していることが実験結果により示された。これらの実験結果より、局所的、大局的な学習の必要な問題、空間的にあいまいな評価信号の問題、時間的にあいまいな評価信号を含む問題に対して提案した階層型エージェントシステムの有効性が示された。また複雑な問題に対してエージェント機構を階層型にすることにより、各階層のエージェント機構を変えるだけでシステムを変更可能であることも示すことができた。提案した階層型エージェントシステムは、あいまいな評価信号を含む問題に対してシステム設計の指針を示すことができたといえる。

以下に本論文の構成を示す。本論文は 6 章からなり、第 1 章では、本研究の背景、関連研究、提案システムの有効性について議論する。第 2 章では、階層型エージェントシステムにおけるエージェント、環境の定義を行い、エージェントアーキテクチャ、システムの構築方法について説明する。第 3 章では、マルチエージェントの標準問題である追跡問題に本システムを適用する。2 次元連続トラス空間において、4 体のハンターエージェントが 1 体の逃走するエージェントを捕獲する問題を扱う。均質な 4 体のエージェントのみの計算機実験と均質な 4 体のエージェントと 1 体の上位エージェントを構築した階層型エージェントシステムの計算機実験結果を示す。実験結果より、均質なエージェント群のみの場合では捕獲することができなかった問題に対し、階層型エージェントシステムは捕獲することができた。このことから階層型エージェントシステムの有効性を示した。第 4 章では、空間的にあいまいな評価信号を含む問題に対する階層型エージェントシステムを提案する。問題として、経路探索を含むピアノ問題を取り上げる。ピアノ問題は、姿勢制御を扱う問題で、移動物体の形状と環境が既知ならば数学的に解くことが可能であると証明されている。ここで扱うピアノ問題は、経路探索を含み、移動物体の形状および環境が未知なものとする。このため、局所的な学習と大局的な学習が必要となる。局所的な学習は下位層のエージェントが行い、衝突回避とエージェントの形状を学習する。大局的な学習は上位層が行い、経路を学習する。上位層がエージェントの形状を把握していないため、下位層のエージェントに与える評価信号があいまいなもの、すなわちエージェントが通路よりも大きい場合通行不可能な経路に対して、評価信号を与えてしまう場合がある。中間層のエージェントは、評価信号とエージェントの行動の整合がとれない場合に、整合性をとる。計算機実験を行い、空間的にあいまいな問題に対して、提案手法が有効であることを示した。さらに、上位層のエージェントの構造を変更した場合、中間層のみのエージェントの構造を変更した場合の比較実験を行い、システムが変更されても問題解決が可能であることを示す。このことから、システムの変更の容易さ、システムとしてのロバスト性を示すことができる。第 5 章では、時間的な評価信号があいまいな問題に対して、提案手法を適用する。問題として、人間をエージェントとして考える Man-machine インタフェースをとりあげる。上位層のエージェントである人間（オペレータ）が、下位層エージェントの移動ロボットの行動を観測しゴールへ導く実験を行う。オペレータが自律移動ロボットの行動を不快に感じた時に評価信号を与えるが、個人によって評価信号を与えるタイミングが異なる。このため中間層エージェントは、自律移動ロボットに対して評価信号の時間的な調整を行う。数名のオペレータに対して実験を行い、提案手法の有効性を示した。第 6 章では、論文全体を概して議論し、総括している。

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	大森 隆 司
副査	教授	和田 充 雄

学位論文題名

A Study on Hierarchical Agent System Architecture

(階層型エージェントシステムアーキテクチャに関する研究)

システム工学的視点からすると、個々人は複雑性多様性に富む複雑システムであると捉えることができる。一方理想的な福祉機器システムはそれぞれの各個人に密接に適応可能な自律適応型システムであることが望ましい。この観点から本論文は、主として個人に容易に適応可能なマン・マシンインタフェースの開発を視野に入れながら、より一般的な工学問題などの関連分野へ提案理論の展開を図った一連の研究結果をまとめたものである。適応手法として、機械学習の一手法である強化学習をベースにしているが、人間による評価信号の与え方は個人差が顕著であるため、従来の強化学習における報酬の仕様は、人間サイドからの複雑挙動を示すような報酬の提示を前提とする本課題の場合、これでは十分に対応できないことを明らかにしている。入力信号としての評価信号の示す複雑挙動に関してここでは「あいまいさ」定義し、階層構造のアーキテクチャにおいて、上位構造レベルから下位構造レベルへの流れるトップダウン情報量と、逆にボトムアップ情報量のある中間階層レベルでの差集合でこれを計量する手法を提案している。具体例として各階層がエージェントからなる 3 層階層型マルチエージェントシステムを問題向きにモデル化し、あいまいさに関しても空間的あいまいさと時間的なあいまいさの存在を明らかにしたうえで、階層型アーキテクチャの特徴を問題対応性、頑健性の両面から議論している。

内容の概要は次の通りである。まず、評価信号に整合性が取れている問題に対して、均質なエージェント群のみと、同じ均質なエージェント群の上位層に評価信号を与えるエージェントを構築した階層型エージェントシステムの比較実験を行い、階層型のエージェントシステムの有効性を示している。次に、空間的なあいまいさを持つ問題として、経路探索を含むピアノ問題をとりあげ、シミュレーション実験を通じて、中間エージェントを構築した 3 階層型エージェントシステムの有効性を示している。時間的にあいまいな評価信号の問題として、マン・マシンインタフェースを取り上げ、人間を評価信号を与える上位層のエージェントとして扱う 3 階層のエージェントシステムを提案し、個人差が顕著である評価信号のタイミングの差を、中間エージェントが解決していることを実験結果により

示している。論文の構成概観は以下の通りである。

第 1 章は、序論である。

第 2 章では、本論文で扱う問題の難しさについて関連研究と比較し、定義している。また、提案する階層型エージェントシステムにおいて、エージェント、環境の定義を行い、エージェントアーキテクチャ、システムの構築方法について詳述している。

第 3 章では、評価信号の整合性の取れている問題として、マルチエージェントの標準問題である追跡問題を取りあげ、2次元連続空間に拡張し、提案システムを適用している。環境を複雑にすることで、非階層型エージェントシステムと階層型エージェントシステムの比較を行い、階層型エージェントシステムの有効性を示している。

第 4 章では、空間的にあいまいな評価信号を含む問題に対する階層型エージェントシステムを提案している。局所的な学習と大局的な学習が必要な経路探索を含むピアノ問題をとり上げ、ここで扱う問題は、移動物体の形状および環境がともに未知なことから、上位エージェントが下位エージェントに与える評価信号が空間的にあいまいであることを明らかにしている。さらに、各エージェントの構造を変更した場合の比較実験を行っている。計算機実験を通じて、空間的にあいまいな評価信号に対して、提案手法が有効であることを示している。同時に、システムの変更の容易さ、ロバスト性についての議論、検証も行っている。

第 5 章では、時間的な評価信号があいまいな問題として、マン・マシンインタフェースを取り上げ、上位エージェントである人間が下位エージェントの移動ロボットの行動を観測しゴールへ導くタスクに対して提案手法を適用している。人が自律移動ロボットの行動を不快に感じた時に評価信号を与えるが、個人によって評価信号を与えるタイミングが異なる時間的なあいまいさの調整に、中間エージェントが有効であることを、数名のオペレータによる実機実験に基づきこれを示している。

第 6 章では、論文全体を概して議論し、総括している。

これを要するに、本論文は、複雑挙動を示すような主体に容易に適応可能な機械システム構築に関し空間的、時間的にあいまいさを含む主体側からの機械サイドへの入力信号を処理可能な階層型マルチエージェントシステムの設計論を展開したものであり、展開した理論、アルゴリズムの正当性、妥当性を種々の計算機実験及び主体としての上位エージェントを人間とした場合の実験などを通して検証した。結果としてマルチエージェント設計論、知的マン・マシンインタフェース設計分野に関する新知見を得たものあり、複雑系工学、福祉工学、情報工学の分野の進歩に寄与するところ大なるものがある。

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があるものと認める。