

学位論文題名

A Study on Heterogeneous Agents Systems Learning Organized Behavior

(非均質エージェント系における組織的行動学習に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、多様な工学的要求に対して、より複雑な工学的システムの実現が期待されている。これらの工学的システムの構築・再構築にあたっては、工学的システムのモジュール性が重要視される。工学的システムのモジュール性は、分散計算理論や分散人工知能等、多岐にわたる分野において様々な観点から研究が行なわれてきている。これらの研究に対し、ここ数年は、分散人工知能と比較して、各分散モジュールの行動により一層の重点をおいた、マルチエージェント系と呼ばれる分野が注目を集めている。マルチエージェント系の研究においては、分散モジュールはエージェントと呼ばれ、それらの行動が工学的システムの性能に多大な影響を及ぼす。したがって、マルチエージェント系に基づく工学的システムの構築に際しては、エージェントの行動、さらにそれらの行動間の関係をどのようにして設計するかが重大な問題となる。すなわち、各エージェントには、工学的システムに与えられる目的に対して合理的であり、かつエージェント間で無矛盾な行動が要求される。このような行動はしばしば組織的行動と呼ばれ、マルチエージェント系において主要な研究課題のひとつである。組織的行動を実現するためのアプローチは多数存在するが、それらのうちいくつかは機械学習的な方法論を採択している。機械学習は、工学的システムの構築という観点から、多くの研究者の注目を集めるものであり、マルチエージェント系においても有効なことが示されつつある。これらの研究の大多数は均質なエージェント群を前提にした研究であるが、各エージェントの専門化による分業が工学的システムの性能や問題解決効率に与える影響を考慮すると、非均質なエージェント群という前提も必要になる。また、非均質なエージェント群において、各エージェントの行動間の関係、すなわち相互作用を定義することは、均質エージェント群と比較して、多くの困難な点を生じるため、非均質なエージェント系において組織的行動を実現することは容易ではない。そのため、非均質なエージェント系によって工学的システムを構築するためには、機械学習的な方法論の導入が有効と考えられる。そこで本論文では、非均質なエージェントによって構成されるマルチエージェント系を対象とし、そのような系で構成される工学的システムにおいて、エージェント群が組織的行動を自律的に形成するような学習法の構築を目的としている。また、エージェント間の相互作用については、エージェント間の通信でその実現を試み、非均質エージェント系に生じる相互作用の困難さに対しては、通信プロトコルをエージェントが学習によって自律的に形成するようなアプローチを採択している。さらに、構築した学習法について、エージェントの非均質性と環境の性質、形成される組織的行動との関係について検討を行ない、組織的行動の評価について論述している。

本論文は6章から構成されており、第1章では序論として、本研究の背景・目的、さらに

本論文の構成・概要について言及している。

第2章では、本論文において最も重要な概念であるマルチエージェント系と組織的行動について従来からの研究を概観している。マルチエージェント系に関する研究は、多様な観点から多くの研究者によって行なわれているが、本論ではそれらを、エージェントの非均質性・分散性、学習・適応能力、相互作用の形式、環境の性質等の観点から分類し、工学的システムの構築にあたってマルチエージェント系に要求される項目を明らかにしている。一方、マルチエージェント系における組織的行動の種類と重要性についても概観し、組織的行動は大きく2つのカテゴリに分類できること、またエージェントの再帰的予測によって組織的行動の形成が可能なことを明らかにしている。さらに、組織的行動と環境の性質との関係について取り上げ、組織的行動の分類は環境の性質に依存することについて言及している。

第3章では、第2章における議論に基づいて、本論文の主題を明らかにしている。本論文では、各エージェントの専門化による分業という観点から、非均質エージェント系における組織的行動の学習を主題とする。このエージェント系に関する理論展開に先立って、エージェントの非均質性と組織的行動について定義を行ない、エージェント間の相互作用として、それをエージェント間の通信で実現するアプローチについて言及している。これらの定義にしたがって、本論でとりあげる非均質エージェントと、エージェント間の相互作用としての通信を内包した非均質エージェント系について定式化を行なっている。さらに、この定式化に基づき、強化学習と遺伝的学習の双方の長所を合わせ持つ、ハイブリッドな機械学習手法のひとつであるクラシファイアシステムを非均質エージェントに実装することで、エージェント間の通信プロトコル、ならびにエージェント系の組織的行動の学習を試みている。また、組織的行動がエージェントの再帰的予測によって形成可能な事実に基づき、エージェントの反復的な行動選択によって組織的行動の学習を実現する手法について論述している。

第4章と第5章では、第3章で展開した非均質エージェント系が学習する組織的行動について、計算機実験による実験的検証を行なっている。組織的行動が2つのカテゴリに分類可能なこと、それらが環境の性質に依存するという議論を踏まえて、2つのカテゴリのそれぞれを第4章と第5章でとりあげている。第4章では、組織的行動の2つのカテゴリのうちのひとつとして、協調的な組織的行動に着目し、エージェント間に共通の目的を与えるような環境が協調的な組織的行動を誘発することに言及している。また、共通の目的を与える環境として、マルチエージェント研究における標準的な問題のひとつである Pursuit Problems を対象として、エージェントの非均質性と組織的行動との関係について議論している。さらに、エージェント間の相互作用を実現する要因としての、エージェント間の通信プロトコルに関しても検討を行ない、通信プロトコルが具備すべき性質について論じている。

一方の第5章では、第4章とは対照的に、競合的な組織的行動に着目し、エージェント間で独立の目的を与えるような環境が競合的な組織的行動を導くことを議論している。さらに、エージェント間で独立の目的には、多数の同一な目的が与えられる場合と、対照的な目的が与えられる場合があることに言及している。また、独立の目的を与えるような環境として、多数の同一な目的と対照的な目的の両者を内包する問題である Multiple Predator-Prey Problems を定義し、環境の性質と組織的行動との関係について検討している。さらに、競合的な組織的行動の学習が要求する性質について議論している。

第6章では、本研究の結論として得られた結果を総括している。

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 島 公 脩

学 位 論 文 題 名

A Study on Heterogeneous Agents Systems Learning Organized Behavior

(非均質エージェント系における組織的行動学習に関する研究)

近年、種々の分野で人工物に自律的な機能を付与しようとする研究が盛んであり、進化的計算工学の分野では、マルチエージェント系と呼ばれる分野が注目を集めている。特に、マルチエージェント系の応用分野である自律ロボット工学分野においては、マルチエージェント系としての多数のロボット群の組織的行動、すなわちロボット群全体として統制のとれた行動をどのようにして実現するかが最も主要な研究課題のひとつとして認識されている。このような研究課題に対して、従来から機械学習や進化的手法の導入等の様々な観点から多様な研究が行なわれている。これらの研究の多くは、各エージェントが均質であるという前提のもとで行なわれているが、自然界は均質ではなく、非均質なエージェント系で構成されているという事実があり、すでに別の目的のもとで構築されたエージェントを再利用してマルチエージェント系を構成する場合、そのマルチエージェント系は一般に非均質なエージェント系となることが知られている。また、非均質なエージェント系を人工物として実現することは、例えば、各エージェントの専門化による分業の実現等の興味深い性質を持った組織的行動を実現する可能性がある。さらに、これらの興味深い性質がマルチエージェント系の能力の向上に多大に影響することが期待される。

本論文は、世界を非均質なエージェント系と捉え、そのような非均質エージェント系において、学習という観点から各エージェントが自律的に組織的行動を創発するための理論構築、および実装方法の提案を行ったものであり、その主要な成果は次の3点に要約される。

1. 自律的なマルチエージェント系において組織的行動を実現するための要件として、各エージェントが相互に行動を予測すること、およびこのような相互予測には再帰的な性質があることを導き、これが各エージェントの学習によって実現可能であることを明らかにしている。さらに、非均質エージェント系において学習すべき組織的行動が、2つのカテゴリ、すなわち協調的な組織的行動と競合的な組織的行動に分類できること、およびこれらの組織的行動の分類が、エージェント系が達成すべき目的に依存することを明らかにしている。
2. 非均質エージェント系について定式化を行ない、これによって、エージェントの非均質性から導かれる、組織的行動学習に必要な諸条件を明らかにしている。すなわち、各エージェントの行動の再帰的な相互予測を制御するための条件、および効用関数の導入による、エージェント間の局所的相互作用の自律的形成のための条件を示している。
3. 展開した理論を実装するためのメカニズムとして、強化学習と進化的手法に基づいた学習機構を、それぞれの非均質エージェント内に構築し、種々の計算機実験を行なっている。その結果として、合目的かつ効果的な組織的行動が創発されるために重要となる諸要素、すなわち各非均質エージェントが持つ非均質な機能と、非均質エージェント間の関係について検討し、有

益な知見を得ている。また、均質なエージェント系と非均質なエージェント系とを比較した結果として、エージェントの非均質性が専門化による分業という性質を導くことを明らかにしている。さらに、マルチエージェント系が活動する環境が動的な変化を伴う場合でも、協調的な組織的行動、および競合的な組織的行動が創発することを確認している。

以上のように本論文は、非均質マルチエージェント系において合目的な組織的行動を実現するための理論構築、およびその実装メカニズムを提案し、マルチエージェント設計工学上有益な新知見を得ており、ロボット工学、精密工学、情報工学の進歩に寄与するところ大である。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のあるものと認める。