

学 位 論 文 題 名

Distributed Autonomous Agents
for Aquatic Wigglable Robot

(水上蛇行ロボットののための自律分散エージェントの設計)

学位論文内容の要旨

本論文は水上で蛇行しながら移動するロボットの実現のために分散制御型の自律エージェント群からなるシステムの設計、実機製作、及び実環境における実験結果に関するものである。

ソフトウェア、ハードウェア領域に関わらず、最近の人工物設計においては、生物のそれと同様、自律適応的に行動可能な人工物、すなわち「自律機械」の実現可能性が大きなパラダイムとなっている。それゆえ、自律機械は生物のおかれている実環境と同様、時変性や不連続性、ノイズを含む複雑な実環境への適応可能性の具備をも要求される。こうした複雑系に適応可能なシステムとしては、その構造の冗長性ゆえにタスクの遂行性や耐故障性を持つものとして自律分散システムが有効視されているが、モデル化が困難な実環境下で有効にはたらくシステムの制御法は提案されていない現状にある。

このような人工物設計論の代表として1986年にブルックスによって提案された包摂定理(SSA)が知られる。SSAは複雑な環境下で単純なタスクから複雑なタスクへと、その実現レベルを無限に拡張可能であるが、この場合も環境の認知方法や、とり得る動作パターン、制御構造といったものは設計者により予め与えられるために、設計時に与えられていない環境との入出力関係、すなわち環境との相互作用のとり方は実行出来ないことが指摘されている。ゆえに、よりボトムアップなレベルからの制御の自由度をもつ必要があり、この点においてもシステムを分子レベル、すなわち全ての構成源であるアトムから構成する分散システムとしての観点が有効な可能性となる。またプリミティブなレベルからのシステム構築も考慮すれば、アトムは均質構造であることがより望ましい。

以上の認識の下、本研究では自律機械の実現のために、最低限の環境認識や行動実行、情報処理が可能なロボットの構成要素をエージェントとし、均質なエージェント群を機械的に結合した複数エージェント構成体をロボットとするアプローチにより、実環境でのタスク実現が可能となる動作パターンを、各エージェントが環境との積極的な相互作用に基づく学習過程を経て獲得するようなエージェントの構築方法を模索したものである。またそのために本研究では実環境として水環境を設定し、実機エージェントには作動的なスクリュ等は装備せず、隣接されたエージェントとの結合部にヨーイング動作のモータを配し、複数体の連結時のみ蛇行運動が可能なものとしている。ここで、水環境の設定は、波や流れ、慣性力といった動的で予測不可能な実環境特有の難しさが顕著に見られる典型的な例であることと、動作の際の摩擦や発熱といった物理的影響を強く受けず、制御の本質に純粹に焦点を当てやすいという理由に基づいている。上述の議論の下に、設計・構築されたエージェントを、目標物接近という最も基本的なタスクの実現実験に適用することで、自律分散エージェントの設計理論としての有用性と妥当性を検証した結果を本論文ではまとめており、以下にその概略を示す。

第1章は序論であり、本研究の背景、現状の問題点、研究目的と研究方法、ならびに本論文の構成について述べている。

第2章では水環境でのタスク実現のためのエージェントの行動の獲得方法の構築を行っている。その方法は実験検証との相補的なアプローチであり、徐々に複雑なタスクの達成を目的としている。本研究でのメカ的ロボットの設計はエージェント一体の設計となる。つまり、エージェントの視点から

ロボットの制御法を構築する必要がある。水環境でのロボットの動特性の事前のモデル化は困難であるが、ある物体が同様に動作する結果としては高い再現確率で同様の状態への遷移が認められ、不連続で時変的な動作中にも普遍項成分（これをコンテキストとする）の存在が確認できる。そのためコンテキストをセンシングし、学習することで水環境での再現性のある行動獲得が実現することが期待される。したがって本研究ではエージェント同士が試行錯誤的に動作を行い、また、その結果変化した状態をセンシングする、という過程を繰り返す、タスク達成に有効とされた行動に評価を行うことで徐々に行動パターンを固定化することを行動獲得の手段としている。具体的にはこの手段を実現するエージェントのための行動制御法を、適応振動子法(AOM)として提案している。AOMは過去の長期にわたる出力成分や隣接したエージェントからの情報、すなわち環境情報の時空間的変動成分を入力することで次期の出力を決定する仕組みとする。これは環境との積極的な相互作用の手段を様々な後天的に実現しうるものであり、具体例として、行動学習においては種々の学習法をAOMに実装することで物理的に意味を持つ動作パターンが創発される。本研究では特にスカラー評価の利便性と時系列予測の可能性から強化学習法が導入されている。まず単純に目標物へ到達する動作パターンの創発のためにAOMにはモデルフリーな手法としてAHCが実装され、その妥当性が議論されている。これは状態のみへの評価による不確実さから、理論・実測の両面において理想行動の獲得には収束時間を要するとの見解が得られたため、状態と行動のセットに評価を行うQ学習(QL)が実装され、この結果として実時間内での収束性などの知見を示している。ここまでの成果により、構築システムには水環境での目標物到達タスクの十分な再現遂行能力が見られたため、次に一部エージェントの故障時のタスク遂行性の検証を行っている。これはAOMへ同様にQLを実装することで試みられ、損失機能の補完性を確認している。また、環境の動的変動により同一の観測状態において複数の行動の選択が必要となる状況でのタスク遂行性について実験を行っている。ここではAOMが環境変動時に環境の新規性を検知した場合、新たに追学習を行う仕組みを、一つの実装例としてQLに基づくSwitching-Q(SQ)とする手法により実行し、既得機能の再利用性や追加学習性などの創発を見ている。すなわちAOMはSQとして用いることにより、環境変動や故障時にも目標物到達が可能な複数エージェントの制御法となりうることを示されている。

第3章では理論検証のために行われた実機実験について記述している。

まずはじめに構築された実験系が説明されている。ここでは開発された実機エージェントの設計仕様が説明され、次に理論検証を行う前段階までの動作試験について述べている。実験はまず最も基本的な目標物接近タスクについて、AHCとQLによる結果が再現性などと共に示され、次に故障設定時のタスク達成のための行動獲得実験について示されている。その後は行動学習後に環境に変化が生じた際の同タスクの実現実験として、SQによる障害物回避行動の獲得結果が示されている。

第4章では実験結果の解析とそれに基づく議論を行っている。まず、自律分散システムでの行動学習実現の仕組みについて、学習後の再現実験における選択行動履歴を基に解析が行われ、障害物回避を含め、エージェント毎での局所相互作用に基づく行動学習の結果、ロボット全体として秩序のある動作パターンが環境内の動特性も含めて獲得された理由を、選択される行動の順序関係が時間的空間的に固定化されたためと述べている。さらに、最終的に提案手法AOMについて、自律分散エージェントのための制御法として理論的、実験的に確認された10の性質について挙げ、これらの実現度を評価する式を定義し、定義に基づくAOMの実現度が示されている。

第5章は結論を述べたものである。

すなわち、本論文は実環境でのロボットの設計問題において、特に水環境を前提として、複数の同一エージェント群から構成される自律分散システムを考慮し、そのためのエージェントの制御法の構築と実機エージェントの開発を行い、実験に基づく理論検証により、構築されたロボットが水環境における目標物接近タスクのために、一部エージェントの故障時や環境変化時を含め、タスク遂行に必要な蛇行運動を獲得可能な方法論であることを実験を通して明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	嘉数 侑 昇
副査	教授	大森 隆 司
副査	教授	大内 東
副査	教授	和田 充 雄
副査	助教授	横井 浩 史

学 位 論 文 題 名

Distributed Autonomous Agents for Aquatic Wiggable Robot

(水上蛇行ロボットのための自律分散エージェントの設計)

最近，進化計算研究や人工生命研究に触発され，人工物研究分野においてもその具備すべき諸機能を自律適応的に獲得可能な人工物，すなわち理想的「自律機械」の実現に向けたパラダイムシフトが顕著である．自律機械に求められる基本性質には，時変性や不連続性を含み動的に変動するような実環境への適応機能の具備もあり，これに応え得るべき有力なメソドロジのの一つとして Brooksにより提案された抱摂定理(SSA)が知られている．しかしSSAはその名が示すように自律のための抱摂関係が，予め設計者により設定された自律システムであり柔軟性に欠ける点が指摘されている．モデルレス制御法でもあるSSAは陰的に小規模な変動を前提としており動的環境変動には無力である．動的環境変動にも対処し得るような，より柔軟性の高い自律機能を持つ人工物設計メソドロジの出現が待たれる所以である．

以上に述べたような分野を取り巻く現状を打破すべく，本学位請求論文は水上蛇行ロボットを人工物インスタンスとして代表させ，その制御メソドロジとしてここで新たに提案する「適応振動子法(Adaptive Oscillator Method; AOM)」を理論開発し，シミュレーションや水上における実験を通して，開発したメソドロジの正当性を議論し評価したものを纏めたものである．

ここでは水上が実環境としてセットされている．水環境は典型的な動的作業空間として非線形性や不確定性を顕著に有し，また一方で発熱や摩擦等の影響をそれほど受けない理想的なプラットフォームと見なせる．また自律機械としての水上蛇行ロボットは，それ単体のみでは物理的に機能し得ない左右への揺動のみの運動機能と，感覚機能，学習機能とが埋め込まれた，エージェントと呼称されるユニット群から構成されている．結果として水上蛇行ロボットは，分散エージェント群から構成されている．換言すれば，ここで言う自律機械の設計法とは，人工生命における創発現象のアナロジーとして，ホモジニアスな要素群の物理的相互作用を前提に，その環境適応度を評価基準に，機能獲得をさせようとするものである．このような設計法では従来の古典的制御の概念

はもはや放棄されている。

ところで提案されているAOMでは、相対運動中の環境情報として、高次の遅れ項、すなわちある期間までの過去の行動の影響や周囲のエージェントの状態を行動決定要因として導入し、さらに行動決定の動機付けとしてエネルギー維持のはたらきを考慮することにより、自律分散システムにおける効率的な行動獲得が行われる枠組みとしている。物理的な意味合いとしてAOMは、システム全体として多様な振動モードを発生させ、それらの中でより環境内での運動に適した共振状態を探索し、それにより適応動作を実現することに相当する。

本学位請求論文では、提案するシステムの変動環境への適応性の検証のために、水上での目標物接近をタスクとするタスク達成行動の獲得実験を行っている。具体的には、基本となる目標物接近タスクの他に、一部のエージェントの故障をシステムの内的な環境変化とした際の同タスク、さらに外的な環境変化として障害物がある場合の同タスクにおける行動の獲得可能性などが検証されている。また、得られた行動に対し、自律分散システムとしての学習メカニズムの解析を行い、最終的にAOMの持つ特性について議論している。

以下に本論で得られた主要な成果をまとめる。

1. 自律分散エージェント向けの行動決定法の枠組みとしてAOMの構築を行ったこと。本手法は構成要素であるエージェントに基づくボトムアップ的なアプローチであり、他のエージェントや環境との積極的な相互作用を可能とする。
2. AOMを種々の変動環境におけるタスク達成実験において使用し、結果として適応性の高い行動の獲得可能性を示したこと。これは、AOMのもつ環境変化への適応性を示すだけでなく、分散エージェント構成によるシステムのタスク遂行性、耐故障性、柔軟性も同時に表す。
3. 既得機能再利用型の追加学習機構を提案したこと。一旦獲得した機能を再利用しながら不足機能を追加学習することは学習効率の向上に寄与する。AOMにこの機構を付加することにより、さらなる適応性の向上を実現している。
4. 自律分散システムにおける行動獲得のメカニズムの解析を行ったこと。これは複雑系において現象論的理解に留まっていた大域的挙動でのアトラクタ形成メカニズムに実験的な裏付けになりうる。

これを要するに著者は、自律機械の設計分野において、動的環境変動にも対応可能でかつ工学タスクをも解決可能とする運動機能を、創発的に獲得可能とする、分散エージェントに基づいた自律機械構築論を展開し、さらに複雑系における大域的挙動でのアトラクタ形成メカニズムに実験的解析を行うなど、ロボティクス、制御工学、設計工学、および複雑系工学に貢献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あるものと認める。