

学位論文題名

Design of the Mechanism for Emergent Perceptibility of Autonomous Agents

(自律エージェントのための創発的知覚発現メカニズムの設計)

学位論文内容の要旨

本論文は自律エージェントの構築を目的として、環境知覚の発現メカニズムの設計法の提案を試み、その有効性を実験的検証により示したものである。

自律エージェントとは自らのセンサー情報を頼りに環境の状況を認識し、判断しながら与えられたタスクの遂行を目的として、自らの行動を決定可能な処理系を意味する。自律エージェント構築はロボット工学や人工知能工学の分野の中心課題の一つであり、その課題は環境情報に基づく状況の知覚の問題と知覚した結果に応じた行動選択の問題に集約される。特に知覚の問題はフレーム問題、シンボルグラウンディング問題、主観的状況理解の欠如の問題、身体性の問題などを内包しており、知覚のメカニズムの欠如がエージェントの自律化を妨げる最大の要因であることが明らかにされてきた。また、知覚メカニズムはエージェント全体のダイナミクスと整合性がとれた状態で構築される必要があるゆえ、予め与えることは困難であり、後天的に獲得される必要がある。しかしながら、その獲得メカニズムに関する有効な方法論は未だ示されていないゆえに、創発的にこれを探究する必要がある、その具体的な方法論の構築が待たれている。

これらの要請に対して本論文では、知覚メカニズムを創発的に発現可能な設計法の構築を提案している。本方法論には、(1) タスクや環境の変化に対して特別のセンサーを準備する必要が無い、(2) 環境の知覚方法を予め付与する必要が無い、(3) エージェントの機構的制約やタスクの内容または環境の様相を予め知っている必要が無い、などの利点が期待される。

本方法論を実現するために、環境知覚は、エージェントの自律性を保証するために、主観的かつ経験的に獲得される自己尺度に基づく環境情報のグラウンディングを基本理念として構築されている。また、主観的な環境知覚を実現するために、創発的な知覚発現メカニズムの設計法を提案し、自律エージェントの行動決定問題において方法論の特性を明らかにした。そこでは、(1) 環境情報を用いたエージェントの状態表現(シンボルグラウンディング)、(2) エージェントの状態表現に基づく自己の状況認識(主観的状況理解)、(3) 環境観測および状況判断メカニズムの獲得(知覚方法の後天的獲得)、(4) タスクおよびエージェントの機構的制約に適合した行動決定(身体性の獲得)、(5) 自己尺度の獲得(自律性の保証)など従来、自律エージェント構築の妨げとなっていた問題の解決といった利点が示されている。本論文はこれらの成果をまとめたもので、6章より構成されている。

1章は、自律エージェント構築に関連する既往の研究について述べ、本研究の目的と背景を示している。

2章は、自律エージェント構築における根本的問題であるデカルト的知覚の問題の様相

を明らかにしている。デカルト的知覚の問題はフレーム問題、シンボルグラウンディング問題、主観的状況理解の欠如の問題、身体性の問題により構成されることが示されており、既往の研究のアプローチ法とその詳細が明らかにされている。

3章は、デカルト的知覚の問題を抜本的に解決するために必要となる枠組みが模索されており、非デカルト的設計法による問題解決の枠組みが提案されている。非デカルト的設計法の枠組みを構築するために、認知心理学において提唱されているアフォーダンス理論の視点が利用可能であることを導き、フレーム問題と主観的状況理解の欠如の問題を解決するために必要となる枠組みの構築可能性を明らかにした。さらに、シンボルグラウンディング問題と身体性の問題の解決するためには、アフォーダンス理論に基づく枠組みの中でも、環境情報に立脚しエージェントの知覚した情報構造を再構成可能とするような手法の必要性、すなわち、学習よる行動選択の基準となる環境情報を自己尺度として獲得するメカニズムの必要性が示されている。

4章は、提案した設計法の枠組みと具体的メカニズムを数理論的記述により明らかにしている。上記要件、すなわち、エージェント自らが経験的に獲得する尺度に基づいて環境を知覚するメカニズムの必要性を満足する枠組みとして、能動的環境観測の問題、内部モデルによる環境知覚の実現、行動の集合論的枠組み、エージェントの意思決定回路の実現、の4項目に集約されることが導出されている。さらに、本枠組みに基づいた具体的メカニズムは、能動的環境観測系、知覚モデル系、行動集合系、3つの系間のマッピングを司る人工ニューラルネットワーク群 (ART; Adaptive Resonance Theory) から構成され、ARTによりマッピングの可塑性および環境知覚の創発性によりエージェントの自律的行動決定を保証する。提案されるメカニズムは内的シミュレータを持つ知覚メカニズムであり、エージェントの環境へのパルス波を出力と、その反射波の利用により能動観測系を実現しており、これにより創発的知覚発現メカニズムの設計法が明らかにしている。

5章は、本論において提案された手法の自律エージェント構築における特性を実験的検証により示している。実験は4種類のタスク条件の下で実施され、各々、(1) 環境情報に基づく静止障害物の大きさ・形状・方向・距離の知覚実験、(2) 創発原理に基づく環境知覚の獲得実験、(3) 動的環境下におけるエージェントの行動選択実験、(4) 窓状障害物に対するエージェントの通過判定実験、について行っている。

実験(1)は、能動的環境観測系において計測されたデータに基づき、障害物情報がエージェントの知覚モデル上に再構成され、静止障害物の物理的諸条件の判別が実現されることが示されている。また、知覚モデル上のデータは、障害物の諸条件に対して特異となることが示されており、シンボルグラウンディングが実現されることが確かめられている。

実験(2)は、ARTの効果を調べた実験であり、能動的環境観測系において観測されたデータのARTによる自己組織的に分類により、環境情報をその類似度に応じて知覚モデル上にマッピングされることが確かめられている。さらに、ARTと知覚モデルの協調動作により、本メカニズムの内包する知覚方法の後天的獲得の様相が明らかにされている。

実験(3)では動的障害物環境下における行動集合と知覚モデルの影響を調べた結果が述べられている。行動集合は知覚モデルに構築されたデータパターンのカテゴリと個々の行動のマッピングを試行錯誤的に獲得されることが示されており、これにより、知覚モデルと行動集合とのマッピングによって、主観的状況理解による行動決定が実現されることが確かめられている。

実験(4)は障害物環境下におけるエージェントの行動決定問題へ応用することにより、自律エージェント構築の可能性を検証している。実験によりエージェントは、「通過できる間隙」に関する経験を通じ、隙間の幅と自己の大きさに依存した知覚モデル、すなわち自己尺度を獲得可能であることが示されている。これにより、提案メカニズムが身体性を獲得可能であることが確かめられている。

以上の4種類の実験は、シンボルグラウンディング、主観的状況理解、知覚方法の後天的獲得、身体性の獲得、自律性の保証の問題が解決されるを示しており、本手法により自律エージェントが構築可能であることが確認されている。これらのことから、本論で提案される創発的知覚発現メカニズムの設計法の有用性が検証されている。

6章は結論であり、本研究で得られた成果を総括し、残された課題について述べている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 嘉 数 侑 昇
副 査 教 授 宮 本 衛 市
副 査 教 授 和 田 充 雄

学位論文題名

Design of the Mechanism for Emergent Perceptibility of Autonomous Agents

(自律エージェントのための創発的知覚発現メカニズムの設計)

最近の自律エージェントの研究分野においてはエージェントに予め与えられた単機能の発現のみではなく、複雑に変動する動的環境に適合するような機能をエージェントにいかにも埋め込むことが中心課題となっている。そこではエージェントの内部状態に対応させつつ、その外的環境をいかに認知出来るかというエージェントの認知能力発現問題、すなわち認知論、およびそのメカニズム設計法が基本的課題であると理解されてきたのが現状である。これまでのエージェントに付与されてきた認知メカニズムは主にデカルトに起因する解析的なものであったといえる。そこでは、予め設計者によって付与された測度に従って環境を細分化して捉え、それらを再構成することが認知であるとされてきた。しかし、この認知メカニズムが適応可能な環境は、予めその前事象が予測可能である世界、すなわち「Toy world」に限定されるということが指摘されてきており、その実世界における適用の困難さが明らかにされてきている。

本論文は、自律エージェントに実世界においても適応可能な認知能力を付与することを目的として、デカルトによる認知論の限界を超える可能性を持つものとして期待される、ギブソンの提唱した認知論、すなわちアフォーダンス理論を理論的ベースとして未だ明かされていないその認知メカニズム設計法にアプローチしたものであり、その主要な成果は次の4点に要約される。

1. 従来のデカルト的アプローチ、すなわち、シンボリック AI に基礎を置く自律エージェントの認知可能な領域は予め組み込まれた環境の捉え方、すなわち、特徴空間に依存して限定されることを数理論的に証明している。さらに、従来からシンボリック AI において重大な問題とされてきたフレーム問題、シンボルグラウンディング問題などがその設計法に起因して発生することを明らかにするとともに、これらの問題、及び主観的状況理解の欠如、身体性問題といった基本問題克服のためには非デカルト的アプローチが不可欠であることを明らかにしている。
2. 非デカルト的認知論としてアフォーダンス理論を導入し、アフォーダンスを知覚するための能力は、エージェント自らの実環境における経験とエージェントの内部状態との相互関係から創発的かつ逐次的に自己尺度として獲得される必要があることを明らかにしている。さらに、アフォーダンスの知覚能力を持つエージェントは自己尺度を創発的かつ逐次的に環境との相互作用から獲得するゆえに、自らの世界像までも後天的に獲得しうることを数理論的に示している。
3. アフォーダンス理論を具体化するためには能動的環境観測機構、知覚モデリング機構、内外情報マッチング機構、学習機構が必要であることを明らかにし、それらを統一的に表現可能な物理的振動場に基づく認知メカニズムを提案している。本メカニズムにおいては、特に、センサー入力に対して従来法のような具体的意味付けを行う必要はなく、またセンサー系に対して高い測定精度を要求しないゆえに、複雑に変化する実環境におけるセン

サー入力の不安定さを吸収し、それに起因する問題を克服する可能性を持つといえる。従って、本認知メカニズムに基づく自律エージェントが、従来困難であるとされてきた実環境における多機能の実現の可能性を持つことを示している。

4. 提案メカニズムに関する様々な計算機実験を通して、動的に変化する環境下においても、エージェントが主観的かつ逐次的な自己尺度をその身体性をも加味した状態で獲得できることを示している。また、獲得された自己尺度に基づく環境認知を行うことにより、未知環境下においても、これまでの経験から適切な行動選択が実現できることが示されている。さらに、この自己尺度を通じての環境知覚を現象論的視点から見ると、エージェントが環境の示すアフォーダンスを知覚していることになることにも言及している。

以上のように本論文は、認知機能を備えた自律エージェント実現のための中心課題である認知能力発現問題へアプローチしており非デカルト的視点から認知理論の体系化及び認知メカニズム構築、実験を通して多くの新知見を得ており、認知工学、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、工学博士の学位を授与される資格あるものと認める。