

Studies on Methodology of Behavioral Acquisition for Autonomous Robot and Application to Virtual Elastic Robot

(自律ロボットの行動獲得方法の提案および仮想弾性ロボットへの適用)

学位論文内容の要旨

本論文では、人工生物の環境への適応能力を実現するため、ロボット工学的な視点から自律ロボットの機械学習に取り組み、目的のタスクを遂行する制御系を獲得する方法論の確立を研究目的とする。自律的なビヘイビアを獲得する従来の研究では、サブサンプションアーキテクチャをはじめとした詳細な動作を事前に設計したルールベースなアプローチが主流とされていた。しかし、対象とするロボットの形状が複雑となり、制御対象となる関節数が増大するとその動作設計が困難となる。そこで本研究では、多数の関節によって構成される弾性ロボットに対して人工ニューラルネットワーク(ANN)の制御系を導入し、機械学習から自律的な移動行動が獲得可能であることを明らかにする。また、多関節ロボットに複合的な自律行動を与えるための制御系の設計方法を提案し、進化計算による行動獲得実験から提案方法の有効性を示す。

本論文は全5章で構成しており、第1章では序論として研究背景、目的及び関連研究を紹介する。これまで本研究で提案してきた仮想自律ロボット Animated Robot 及びシミュレーション用物理モデリングツール TIPS-PM を紹介する。そして、自律ロボットの行動獲得を実現するために本研究が採用している教師なし学習及び ANN の最適化アルゴリズムについて述べる。これにより、本研究で採用する機械学習に関する基礎知識をまとめる。

第2章では、弾性ロボットの適応行動を獲得するための実験を実施し、自律分散制御によって特定の環境に適した移動行動を獲得可能であることを示す。ここでは、障害物を考慮しない環境における追従移動タスク、障害物を設置した環境における通り抜けタスクおよび障害物回避タスクの3種類のタスクを設定してそれぞれの環境に適応する学習実験を実施した。また、弾性ロボットが機械学習から獲得したビヘイビアの特徴を調査し、前進移動及び停止移動における運動メカニズムを明らかにした。これにより、本論文で対象とする弾性ロボットの妥当性を示すだけでなく、進化計算による学習実験によって特定の環境に適応可能であることを示した。

第3章では、複合的なタスクを達成するための制御系の設計方法を提案し、弾性ロボットへ適用した学習実験を実施する。自律ロボットの行動獲得において、追従移動や探索移動などのビヘイビアは前進移動、方向転換、停止などの複数の運動能力が複合的に要求されるビヘイビアであるため難易度の高いタスクとされる。本研究では、追従移動や探索移動のように、タスク達成に要求される動作が共通した複合型タスクに注目し、あるタスクで獲得した ANN を組み合わせて他のタスクの適応行動を設計する制御方法を提案する。ここで提案する制御方法では、ある特定のタスクで獲得した ANN はそのタスク達成に要求される動作を潜在的に獲得しているという仮説に基づいた設計方法である。また、進化計算による行動獲得では、同一のタスクであっても、学習実験を複数回実施することで、異なる特徴を有する ANN を獲得することが可能である。この探索の多様性に焦点を当てることで設計者による詳細な手動設計を必要としない設計方法の実現を目的としている。ここでは、

障害物を設置した環境における探索移動タスクを設定して提案方法を適用した学習実験を実施する。障害物を設置した環境における探索移動タスクを設定して提案方法を適用した学習実験を実施する。探索移動タスクは、障害物の設置によって考慮すべき各センシング状況における適応動作のパターンが増大するため、障害物を考慮しない追従移動タスクと比べると難易度の高いタスクである。弾性ロボットに追従移動タスクで獲得した ANN を組み合わせて探索移動タスクでの学習実験を実施し、実験的に提案方法が有効であることを検証した。

第 4 章では、第 3 章にて提案した制御系の設計方法に自律分散制御を導入することで提案方法の改善を試みた。そして、第 3 章と同様に弾性ロボットに探索移動タスクを設定して学習実験から提案方法の有効性を検証する。また、ここでは、提案方法を採用した場合及び採用していない場合において実験を実施し、それぞれの実験で得られたビヘイビアの特徴を分析した。実験では、従来通り直接学習をする場合及び提案方法を適用して複数の追従移動用の ANN を複合化する場合でそれぞれ学習実験を実施して比較することで、提案方法が従来方法の 5 分の 1 程度の試行時間で適応動作を獲得したことを確認した。これにより、実験的に提案方法の有効性を示した。

最後に第 5 章では、本論文の結果をまとめ、今後の展望を述べる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授	古 川 正 志
副 査 教 授	栗 原 正 仁
副 査 教 授	鈴 木 恵 二
副 査 教 授	小 野 哲 雄
副 査 准教授	山 本 雅 人

学 位 論 文 題 名

Studies on Methodology of Behavioral Acquisition for Autonomous Robot and Application to Virtual Elastic Robot (自律ロボットの行動獲得方法の提案および仮想弾性ロボットへの適用)

本学位論文では、人工生物の環境への適応能力を実現するため、ロボット工学的な視点から自律ロボットの機械学習に取り組み、目的のタスクを遂行する制御系を獲得する方法論の確立を研究目的としている。自律的なビヘイビアを獲得する従来の研究では、サブサンプションアーキテクチャをはじめとした詳細な動作を事前に設計したルールベースなアプローチが主流とされていた。しかし、対象とするロボットの形状が複雑となり、制御対象となる関節数が増大するとその動作設計が困難となる。そこで本研究では、多数の関節によって構成される弾性ロボットに対して人工ニューラルネットワーク (ANN) の制御系を導入し、機械学習から自律的な移動行動が獲得可能であることを明らかにすることを試みている。また、多関節ロボットに複合的な自律行動を与えるための制御系の設計方法を提案し、進化計算による行動獲得実験から提案方法の有効性を示している。

本論文は全 5 章で構成しており、第 1 章では序論として研究背景、目的及び関連研究を述べている。また、これまで本研究で提案してきた仮想自律ロボット *Animated Robot* 及びシミュレーション用物理モデリングツール *TIPS-PM* を説明している。そして、自律ロボットの行動獲得を実現するために本研究が採用している教師なし学習及び ANN の最適化アルゴリズムについて述べている。これにより、本研究で採用する機械学習に関する基礎知識をまとめている。

第 2 章では、弾性ロボットの適応行動を獲得するための実験を実施し、自律分散制御によって特定の環境に適した移動行動を獲得可能であることを示している。ここでは、障害物を考慮しない環境における追従移動タスク、障害物を設置した環境における通り抜けタスクおよび障害物回避タスクの 3 種類のタスクを設定してそれぞれの環境に適応する学習実験を実施している。また、弾性ロボットが機械学習から獲得したビヘイビアの特徴を調査し、前進移動及び停止移動における運動メカニズムを明らかにした。これにより、本論文で対象とする弾性ロボットの妥当性を示すだけでなく、進化計算による学習実験によって特定の環境に適応可能であることを示している。

第 3 章では、複合的なタスクを達成するための制御系の設計方法を提案し、弾性ロボットへ適用した学習実験を実施している。自律ロボットの行動獲得において、追従移動や探索移動などのビヘイビアは前進移動、方向転換、停止などの複数の運動能力が複合的に要求されるビヘイビアであるため難易度の高いタスクとされる。本研究では、追従移動や探索移動のように、タスク達成に要求される

動作の共通した複合型タスクに注目し、あるタスクで獲得した ANN を組み合わせて他のタスクの適応行動を設計する制御方法を提案している。ここで提案する制御方法では、ある特定のタスクで獲得した ANN はそのタスク達成に要求される動作を潜在的に獲得しているという仮説に基づいた設計方法である。また、進化計算による行動獲得では、同一のタスクであっても、学習実験を複数回実施することで、異なる特徴を有する ANN を獲得することが可能であることを示している。これは、この探索の多様性に焦点を当てることで設計者による詳細な手動設計を必要としない設計方法の実現を目的としたものである。そのために、本章では第 2 章と同様の追従移動タスクを対象とした学習実験を実施し、提案方法の有効性を示している。これらから、弾性ロボットに予め追従移動タスクで獲得した ANN を組み合わせることにより洗練された制御系の設計が可能であることを実験的に検証している。

第 4 章では、第 3 章にて提案した制御系の設計方法に自律分散制御を導入することで提案方法の改善を試みている。ここでは、障害物を設置した環境における探索移動タスクを設定して提案方法を適用した学習実験を実施している。探索移動タスクは、障害物の設置によって考慮すべき各センシング状況における適応動作のパターンが増大するため、障害物を考慮しない追従移動タスクと比べると難易度の高いタスクであるが、弾性ロボットに追従移動タスクで獲得した ANN を組み合わせて探索移動タスクでの学習実験を実施し、実験的に提案方法が有効であることを検証している。また、ここでは、提案方法を採用した場合及び採用していない場合において実験を実施し、それぞれの実験で得られたビヘイビアの特徴分析を行っている。実験では、従来通り直接学習をする場合、及び提案方法を適用して複数の追従移動用の ANN を複合化する場合でそれぞれ学習実験を実施して比較し、提案方法が従来方法の 5 分の 1 程度の試行時間で適応動作を獲得できたことを確認している。これにより、実験的に提案方法の有効性を検証している。

最後に第 5 章では、本論文の結果をまとめ、今後の展望を述べている。

これを要するに、著者は、多関節によって構成される複合タスクをもつ弾性ロボットに対して複数のビヘイビアをそれぞれ獲得した ANN の組合せによる新たな制御系を導入し、機械学習から自律的な移動行動が獲得可能であることを具体的に明らかにした。従って、本学位論文は人工生命の技術や複雑系工学の発展に寄与するところ大であり、博士 (情報科学) の学位を授与するに値するものと認める。