

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目 Behavior Acquisition of Robots Equipped with Multi-Sensors
(マルチセンサを備えたロボットの動作獲得)

氏名 干川 尚人

論文内容の要旨

近年、災害現場や宇宙空間などの極限環境における人的リスクの削減、少子化・高齢化社会におけるマンパワー不足の解消などを目的としたロボットの開発が有力な研究テーマとなっている。人間の生活空間において安全・確実な作業を実施するためには、限られた空間で決まった動作を行う産業用ロボットとは異なり、人間のような生物が有している多種多様なセンサによる環境情報の獲得と高度な知能処理が不可欠である。メカトロニクス技術の発展に伴い、小型で多種のセンシング素子や多自由度を持つアクチュエータをロボットに適用できる前提が整ってきている。しかし、情報入力と動作出力が増加した場合、制御設計、動作ルールも同様に肥大化し、それに伴って知能動作設計が複雑化する問題も生じている。上述の問題は、センサやアクチュエータのバリエーションを変更する場合でも付随して生じるものであるため、種々のセンサとアクチュエータを搭載した高度なロボットを有効に運用するには知能動作設計手法の抜本的改良が求められる。

本研究では、前述のセンサ・アクチュエータ技術の発展に鑑み、ロボットに十分多いセンサ・アクチュエータを搭載すれば、古典的な知能化技術によってもロボットが環境の状態に適応した行動をとることが可能になると考えている。そのとき用いられる知能化技術については、広く一般の技術者に使用されるように可能な限り単純なアーキテクチャであることが望ましい。本研究の目的は、多種のセンサ・アクチュエータを搭載したロボットが環境情報に基づいて適切な行動をとらせるためのソフトウェア技術を開発することにある。その実現のために、ロボットアフォーダンス理論の考えを取り入れ、環境情報によってボトムアップ的に知能動作を獲得するアプローチを取り、短時間で有用な動作を獲得可能なシステムの確立を目指す。

センサ情報の中でも触覚は、環境とのインタラクションが不可避であり、しかも作業遂行上不可欠なものであるために、本研究で開発するシステムを総称して、アフォーダンス人工触覚センサシステム (Artificial Tactile Affordance System: ATAS) と呼ぶことにする。センシング行動の連鎖をソフトウェア設計者がきめ細かく設定する手法と進化論的行動表システム (Evolutionary Behavior Table System: EBTS) に分

けて 2 つのシステムを開発した。前者の方法では、設計者がきめ細かく設定するために、例えば触覚センサを搭載した双腕ロボットが物体をハンドリングする際に、触覚センサから得られる特定の信号パターンに対し指やアームの特定の運動を対応づけることにより同ロボットに種々の反射行動を実現させることが可能になる。反射行動の連鎖により組み立て作業のような比較的高度な作業の実現を目指している。

一方、後者の EBTS では、ボトムアップ手法に基づきソフトウェア開発がなされ、ロボットが進化することにより自動的に反射行動を獲得することを目指している。この方法では、順序立てて解析し厳密な解答を見つけるトップダウン的な動作設計方法とは対照的な立場をとり、「活動している世界の実時間中で現実的な答えを見つけ、機会を逸することなく行動を反映させる」という観点から、行動に対する結果を評価し、これを遺伝/淘汰させていくことを指している。EBTS では、行動規範型ロボットについて、情報入力に対する動作出力を規定した行動表を遺伝的アルゴリズムの遺伝子データとしてモデル化し、行動結果を適応度とする進化論的計算を行うことで、行動表の最適化を進める。なお、ここで獲得される行動表は厳密な最適解では無い可能性があるが、ミスの無い効率的な活動を生物が行えない事と同様に、その目的を達成できていれば良いという立場を採る。例えば、ロボットシステムとしての「大まかな動作」を獲得対象とした場合、「多自由度を持つ双腕ロボットが物を取るために腕を動かす」という動作を考える。

以上で述べたように、前者と後者のシステムではそれぞれ「細かな動作」と「大まかな動作」を対象としている。これらの 2 つのシステムによって、ロボットのすべての作業を網羅するとまでは言えないが、マニピュレーションと移動は基本動作であるために、ロボットの作業の内代表的なものには対応できると期待される。例えばヒューノイドロボットを使って「ある物体の置いている場所まで行き、それを把持して指定した場所まで持ち運ぶ」というシナリオを考えた場合、対象物のハンドリング、および対象物までの移動と指定された場所までの移動をそれぞれ上述のシステムで遂行することが可能となる。「細かな動作」と「大まかな動作」は、種々の場面で登場するものと思われる。

本論文は、マルチセンサの取得情報を利用しボトムアップ的に動作獲得する手法を機構の異なる二種のロボットに適用し、これを実現させることでシステムの有用性を示した一連の研究をまとめたものであり、次に示す全 7 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景と目的を述べ、知能ロボットとそれを構成する人工知能アーキテクチャ、環境情報に起因する感覚行動と知的行動の関連性（アフォーダンス理論の適用）の背景および理論を示し、ATAS, EBTS が本研究領域で有用であることを示す。

第 2 章では過去の研究文献をサーベイし、ボトムアップ手法が知能設計の問題を解決するために効果的であることを述べる。具体的には、古典的 AI から、環境情報を利用した刺激応答型ロボット、行動規範型ロボットへの発展、そして、ボトムアップ手法について説明する。また、ボトムアップ手法として遺伝的アルゴリズムによる進化論的計算を適用したボトムアップ的な解決手法のモデルを示す。

第 3 章は EBTS について詳細な説明がなされている。知能行動設計手法の先行研究では Genetics-Based Machine Learning (GBML) による Classifier Systems (CS) が知られている。EBTS は、CS を参考に開発されているが初期の CS と比べて、触覚センサを代表とするセンサ技術の向上、搭載数の大幅な向上に対応しており、適応度計算シミュレータと連携した大規模データを取り扱うシステムとなっている。このため、全てのセンサ状態を動作と結びつけることが可能となり、環境の変化に対するロバスト性が向上している。この仕組みは、全てのセンサ状態のデータを遺伝的アルゴリズムで遺伝子データとして扱うこ

とにより実現している。

第4章では、多指ハンドロボットの物体把持制御とマルチエージェントの協調的な物体輸送運動について動作獲得結果を報告する。本研究で利用するロボットモデルは、光導波型三軸触覚センサと近接センサ、光センサを想定している。多指ハンドロボットでは、光導波型三軸触覚センサが搭載され、これにより指先に圧覚だけではなく滑り覚も実装されている。このため、指先に生じる各種の滑りのパターンに対して指やアームの動きを制御することを ATAS ベースで実現したことを述べている。その結果、ペットボトルの蓋を閉めるなど、人間の生活空間で起こりうる制御動作をロボットで実現したことも述べている。

一方、マルチエージェントの協調的な物体輸送運動の動作獲得では、社会性昆虫の特性を模した集合ロボットを用いて、第3章で説明した EBTS モデルを適用した。このエージェントは4階調のモータ出力を持つ2つのアクチュエータと2階調3個の近接センサ、2個の光センサを有し、光でマーキングされた物体を、同じく光でマーキングされた特定の場所へ運ぶ問題となっている。計算機実験では1体から4体までの範囲で実施し、結果的にエージェント3体の時に最も効率よく輸送実施可能な動作を獲得できた。

第5章では、EBTSの細かな作業への適用性を検討することを目的として、ATASベースの多指ハンドロボットの指先をエージェントと見なし、その制御にEBTSを適用している。獲得目的の動作は双腕型ハンドロボットによる物体繰り動作である。計算機実験によって、当該動作にたいしてもEBTSがある程度適用できることを示す結果が得られたことを述べている。

第6章では、獲得した2つの動作、すなわち物体輸送運動の集合タスクと多指ハンドによる把持タスクについてより詳細な比較検討を行った。いずれのケースも環境のサイズに比べてエージェントの数が多すぎると効率が悪くなることなどが議論されている。

最後に第7章では本研究で得られた結論を要約する。

- ・これまでは触覚センサが十分な性能を有していなかったために、アフォーダンススペースの ATAS は実現できなかったが、本研究では進歩した光導波型三軸触覚センサを導入し、これを用いた双腕ハンドロボットでは ATAS による把持動作が達成された。

- ・移動ロボット群に自律協調的な物体輸送タスクを獲得させるために、EBTS を提案した。その結果、システムの妥当性を調べる計算機実験において、3 エージェントは4 エージェントより高い成績を残した。これはある環境において作業効率の高い最適な台数があることを示しており、冗長なロボットは逆に仕事の邪魔をすることがあることを示している。

- ・シミュレーションの結果、ATAS は人間型ロボットのタスクを取り扱うことに向いており、EBTS は汎用的なロボットの大まかな動作獲得に向いていることが示された。その結果、移動などには EBTS を用いて、直接操作などの精度の求められる作業では ATAS を適用する方針が得られた。

- ・EBTS は知能動作設計コストの削減にも役立つことができることをシミュレーションにより示した。本手法によると、十分なコンピュータ・リソースが利用できれば自動的に生成させることが可能であるとともに、遺伝的アルゴリズムのデータ構造から、一度進化させて獲得した優秀な遺伝子データを元に進化論的計算を続行することも可能である。

現在の EBTS で作成しているモデルは既存の移動ロボットやハンドロボットを想定している。将来展望として、センシング能力やアクチュエータ能力を多様化することで、実ロボットにより複雑な動作を獲得させる研究への発展が考えられる。その際に、EBTS を更に拡張していくためには次に挙げる三点の課題がある。すなわち、第一に、反射行動で実施できない行動に対応するために、EBTS の情報入力と動作出力について、刺激応答を一

階層から多層へ拡張する。第二に、現在のセンシングと移動のみのロボットから、消火活動ロボット、救難探索ロボットなど、極限環境下などの実用ロボットへの発展を可能とするために、ロボットにさらに多様な入出力デバイスを実装する。第三に、ヒューマノイドロボットクラスの高自由度を持つロボットの動作獲得支援を実現するために、ATAS と EBTS をハイブリッド化し、両者をシームレスに連携させるシステムを開発する。

本研究の知見を活用するとともに、以上の課題を対処することで、人間の生活空間における実用ロボットの研究開発を進めていく所存である。