

論文の内容の要旨

論文題目 多様な物体操作行動を対象としたインタラクティブ模倣学習システムの構成法

氏 名 深野 亮

技能を持った人間から、観察と試行錯誤を通して技能を獲得するロボットによる模倣学習を実現するためには、並列に動作する反射的な応答を実行する低レベルな複数のモジュールと、モジュール群の相互作用によって状況にたいして適切な応答が選択される構造が必要である。

技能をロボット上で取り扱う上での大きな問題は、技能に含まれる操作をどのようにして実現するのかと、操作をどのような状況において適用するのかという問題に大まかに分割することが出来る。従来人間の技能をロボットによって実現するという研究では、技能を記述可能であるという前提に基づき、いかに効率良く記述するかという試みがなされてきたが、これは技能実現に必要とされる記述することが困難な暗黙知という概念が取り扱われていない。また、従来のロボットによる模倣学習を実現する研究では、単一の技能のみに注目し、複数の技能を持つロボットが状況に応じて適切な行動を実行するという課題は試みられていない。そこで本論文においては明示的に記述を行わないという条件のもと、状況に応じて適切な行動を実行するという技能を実現することを試みた。

模倣学習は、既に技能を持った被模倣者を参考にし、試行錯誤を行いながら模倣者が技能を獲得するという過程である。ロボットにおいては被模倣者が技能を記述するという暗黙知に関する問題を回避することが出来ると同時に、全くの無からロボットが技能を獲得するという広大な学習空間に関する問題も回避することが出来る。また模倣学習には常に新奇な技能を獲得するという性質が存在する。従ってロボットが模倣学習を実現するならば、効率良く技能を獲得すると同時に、将来的な可能性も確保することが可能となる。

本論文では、以上の性質を持つ模倣学習の中で核となる部分を分析し、これの工学的な実装に基づくロボットを用いて実験を行った。実験では、ロボット自身の動きに基づいて他者の行動を理解することによって、明示的な記述によらず操作と環境に対応する内部表現を獲得し、これに基づいて実行した模倣応答を人間が評価することで技能の成功した。この実験には模倣学習に必要な、ロボットと環境、人間と環境、ロボットと人間という3つの相互作用がすべて含まれている以上に基づいて、本論文はロボットが模倣学習を実現することが可能であることを示した。

2章、自律的に提示行動を観察し模倣学習を行うロボットの構成においては、動物に見られる模倣学習能力を検討し、模倣学習に必要な要素を明らかにした。また、新奇な動作を観察によって獲得するという従来の模倣の定義は、実際の模倣と比較してあくまで理想的な状態であると指摘を行い、新たに試行錯誤を導入した模倣の定義を示した。

模倣学習を実現するためには、被模倣者の意図を完全に理解する必要はなく、観察した被模倣者の振る舞い、道具、操作対象物に対して反射的な模倣応答を実行し、これら低次の複数の応答が統合され、徐々に高度な模倣となり真の模倣に到達すればよいことを示した。この考察に基づき、模倣に必要な入出力と、要素の結合について考察を行い、従来の状態遷移、並列緩結合プロセスより高い表現力を持つ模倣の構成論的仮説に基づく模倣アーキテクチャを提案した。提案する模倣アーキテクチャは一般のロボットアーキテクチャに見られるセンサ入力、モータ出力に加え、ロボット自身の動作を教師信号としてセンサ入力に対して学習を行った認識入力、ロボットの行動に対する人間の評価を意味する意図入力を持つことが特徴となっている。

3章、自律模倣学習を行うロボットの構成要素の実現においては、上記の提案に基づき、模倣学習ロボットシステムを構築するのに必要な、視覚認識システム、自律環境認識、自他行動の対応付けを構築した。

模倣学習においては事前に観察対象のモデル化を行っておくことは出来ないため、モデルによらない画像特徴を導入した視覚認識システムの構成を明らかにし、実際に動作するシステムを構築した。

この視覚認識システムを枠組とし、ロボットの動作プリミティブを教師信号とすることで、人間とロボットの身体に類似性があるという身体性の制約から恣意的な対応付けによらない、自他行動の自律対応付けを実現した。この認識を実現するために自他の区別を行わない画像特徴を設計した。これは人間の乳幼児に観察される自己と他者が未分化な認識を実現する。

さらに発展的な課題として、導入した画像特徴による特徴空間中で、特徴に基づいて観察対象を分類することで、自律的な視覚認識を、また手探りによって操作対象を探ることに適した特徴を提案し、この特徴に基づいて手探り対象を分類することで自律的な体性感覚認識を実現した。

4章、自律模倣ロボットを実現する実時間ソフトウェアの構成においては模倣の構成論的仮説に基づく表現力の大きい提案アーキテクチャについて検討を行い、ロボットソフトウェアとして実現を行った。本論文の仮説においては、センサ入力、モータ出力に加え認識入力、人間の意図入力が存在し、また、これらを入出力とする複数の並列要素と、並列要素同士の相互作用が必要で

あるため、そのデータフローは複雑であり、実現にあたってはデータフローを分析し安全性と高速性を両立する必要がある。

一方でロボットの能力向上は近年の汎用 PC の計算能力向上に強く依存しており、汎用 PC の開発傾向を無視することは難しい。この模倣と、工学的な二つの要請を満たすため、模倣のための実時間ソフトウェアをオブジェクトが並列に実行されるアクティブオブジェクトに基づいて実現した。今後の汎用 PC の開発傾向がマルチコア化であるため、ロボットソフトウェアを並列プログラムとしておくことで、開発の進行に伴い単に計算能力が向上するだけではなく、模倣ロボットとしての能力が向上するといえる。

5 章、構成要素の統合による多様な模倣応答の創発においては、3 章、4 章で実現した要素を実際のシステムとして動作させることで、単純な模倣応答を統合することで、状況に対して適切かつ多様な模倣行動が発生することを示した。これは状況に応じた技能を記述するという、暗黙知の観点から困難な問題を回避するため、要素の相互作用によって適切な行動が確率的に選択されるという解決を導入した。また状況に対して適切な行動は一意に定まらないという点からも、この確率的な選択は適切である。

6 章、人間とのインタラクションによる模倣応答の意味獲得においては、5 章で実現した多様な模倣行動を実現する確率選択の重みを人間の意図によって更新し、学習することを実現した。人間が提示する行動を学習対象として、行動の組合せを確率的に選択することで少数の学習から多様な模倣を実現したが、これによって本来禁止されている行動も実行してしまうという問題を孕むこととなった。これを解決するための情報はロボット内部には原理的に存在せず、既に技能を獲得している人間のみが所持している。

よってロボットの応答を人間が評価することによって、人間の意図をロボットに導入することが必要となる。これを解決するインタフェースとして音声に含まれる、肯定的、否定的な調子を抽出し教師信号とした。もし音声の言語情報を用いれば、言語とロボットの内部状態を対応させるという記号接地の問題に再び直面することになるが、本論文においては既に意味を持った音声の調子を利用することで問題を解決した。

以上によって、ロボットシステムは、少数の観察から、組合せによって多様な模倣を行い、意図にそぐわない行動は人間によって修正されるという、模倣学習を実現した。また以上の学習は全てインタラクティブであり、人間がロボットの行動に対し自由に割り込み、教示することが可能である点が大きな特徴となっている。