

## 研究課題別評価

### 1.研究課題名 模倣学習によるマルチエージェントシステムの構成

### 2.研究者氏名 野田 五十樹

### 3.研究の狙い：

人間の学習において模倣は重要な役割を占めている。例えば団体スポーツなどのチームプレーの練習の際、各プレイヤーの動きを言葉で説明するよりも、コーチが自ら動きを示す事が多いが、これも学習者がコーチの動きを模倣できるからこそ可能な教示方法である。スポーツに限らず、人間のさまざまな社会活動において、実演やビデオ教材など人間の模倣能力を前提とした指導や学習が行われている。模倣学習は、この模倣という現象を計算機上で実現することを目指しており、以下のような性質を持つ学習方法として注目されてきている。

- 未知の環境への素早い適応性
- マルチエージェント間における有用なコミュニケーションの手段
- 他の学習手法との併用が容易
- 学習結果の共有が容易

これらの性質から、模倣学習は実環境で動作するロボットに行動規則を教える方法として期待されている。一方、従来の模倣学習の研究では問題を簡潔にするため、学習者は単一であり学習タスクも単一であることが多かった。よって、複数の仲間や人間と協調して行う作業などへの適用は限られており、複雑なタスクへの拡張は容易でなかった。

本テーマでは、この複数による協調作業(チームプレー)の模倣学習を可能とするために、模倣を行うためのモデルを階層的に構築していく枠組みとその上での学習方法を開発し、模倣によって複雑なスキルを獲得する手法を提案する。

### 4.研究結果：

本研究では協調作業の模倣を実現するのに必要なプロセスとして、

- エージェントの動作の観察からの意図の認識と内部表現の獲得
- 協調作業における各エージェントの意図の変化のタイミングの獲得

に注目し、これらを統一的に表現し、かつ、認識と再現の両方に適用できる枠組みとして、隠れマルコフモデル(Hidden Markov Model, HMM)を階層的に適用したモデル化を行った。

#### 意図の内部表現の獲得

エージェントの意図を動作の観察から認識する場合、環境の変化とエージェントの動作をどのような内部モデルで表すかが問題となる。特に環境の変化をどのような精度で表現するか、つまり環境をどのレベルで分節するかは認識の制度を決める重要な要因となる。本研究ではこの内部表現の獲得の問題をHMMによる学習によって解決した。

提案したモデルの最大の特徴は、環境の変化をモデルへの入力ではなく出力として扱っているところである。エージェントの行動をHMMで表現する手法はすでいくつかの研究が行われているが、これらの方法では環境の変化はHMMへの入力として扱っているため、環境がHMMの中で陽

に扱われず、環境の分節を扱うことができない。環境変化を出力とすることで HMM は環境をモデルの中に陽に含むようになり、環境の分節も確率的関係として導き出すことができる。

環境変化を HMM の出力として扱うもうひとつのメリットは、環境の認識が不完全であっても HMM をロバストに動作させられる点にある。たとえば環境のある属性が観測できない場合、提案モデルでは HMM の出力としてその属性値を推定することが可能であり、そのままモデルの動作を続けることができる。実世界を対象とするエージェントやロボットの場合、環境認識の完全性を仮定できないため、このメリットは重要である。

#### 意図の変化のタイミングの獲得

マルチエージェントシステムにおける協調動作を扱う場合、複雑に絡み合った依存関係をどのように整理してモデル化するかが問題となる。本研究では「意図」をその整理の単位と考え、複数エージェントによる協調動作は各エージェントの意図が相互に同期して変化することで達成されるものであると考えた。そして相互に同期して変化していく意図の流れを表すために、1つの意図を達成するための動作モデルに1つの HMM を割り当て、それらの HMM をより上位の遷移の単位として扱う階層的な HMM を提案した。

提案モデルの最大の特徴は、意図の流れをあらわしている上位の HMM の遷移条件として他のエージェントの意図だけを扱っている点にある。つまり、あるエージェントが特定の意図をもっているということは、そのエージェントの周囲の環境が特定の条件を満たしているという考えに基づき、エージェント同士の協調作業を相互の意図の依存関係として記述する。これにより自分および他のエージェントの意図により環境の細かい変化が抽象化され、協調動作に関係する広範囲の条件を少ないパラメータで表現することが可能となる。パラメータが少数であることにより機械学習における汎化能力が高くなり、模倣学習のような小数の成功例のみ与えられる課題に対しても適用可能なモデルとなっている。

また、意図レベルと動作レベルをともに HMM で表し、計算量を抑えつつ確率的関係を用いて階層化している点も提案モデルの特徴となっている。これにより一般的な HMM の手法を適用することができ、HMM の特徴である認識と生成の双方向の適用可能性が保たれている。この双方向性を利用することで、学習におけるエージェントの意図の認識と動作生成における意図決定の両方に提案モデルを用いることができるようになっている。

複数エージェントの協調作業ではコミュニケーションも重要な要素となる。本研究ではコミュニケーションについては扱うことができなかったが、考察により、提案したモデルの中で扱っている意図の尤度を用いることでエージェントがコミュニケーションを必要とするタイミングを発見できる可能性が示されている。また、HMM の階層化を拡張することで、戦略など高度な意図を表現やグループ全体の意図などを扱う枠組みを構成できると考えられる。

#### 5. 自己評価 :

本テーマでは、複雑で微妙な制御を必要とするマルチエージェントシステムを効率よく構築するために、人間のチームあるいは他のマルチエージェントシステムが行った協調動作の模範行動をもとに各エージェントの行動規則を獲得する統一的方法を探究してきた。3年間の研究の結果、各エージェントの私的な意図が協調動作のビルディングブロックになりえること、そしてその意図を階

層化した隠れマルコフモデルで適切に扱うことができることを示せたことが本テーマでの最大の成果といえる。マルチエージェントシステムではエージェントの数が増えるに従い状況の多様性が指数的に増えていき、通常のルールベースシステムや学習手法では手におえなくなるのは目に見えているが、個々のエージェントの意図による環境の抽象化は多様性の爆発を回避する有効な手段となっている。同時に、意図はマルチエージェントシステムを設計する人間にとっても扱いやすい概念・単位であり、ルールベースシステムなどによる既知行動ルールなどとの親和性も高いといえる。実際、例題で用いたサッカーエージェントでは既存のルールベースの行動規則中に提案手法の意図の遷移モデルを自然な形で埋め込むことができている。

また、意図を扱う際に生じるあいまいさを確率あるいは尤度であらわすことにより、汎用性の高い隠れマルコフモデルで扱える形にモデル化できたことは、応用を広げる意味で大きな意義があったと考えられる。特にマルコフモデルの学習により環境の内部表現を獲得する能力があることを示せたことは、内部表現が機械学習の能力を規定してしまう点から重要な成果といえる。ただし、提案した手法では学習の収束性や完全性は保証されておらず、コンピュータの計算能力に頼った解決方法をとっている。今後はこの部分の改善が必要であろう。

一方、テーマの当初の目的であったマルチエージェントシステムの構築に関しては、最初の例題であるサッカーエージェントの比較的簡単な例題を実現したところで時間切れになってしまったことは残念であった。時間がかかってしまった原因としては、隠れマルコフモデルの採用までの試行錯誤と、他人の意図を環境の抽象化に利用できるという考え方に到達するのにことに気づくのにかかったことがあげられる。また、すべてを学習的手法で構成することにこだわりすぎたことも研究がなかなか進捗しなかった原因となってしまった。より多くのシステム、複雑な課題への応用や具体的な構築手順の確立に関しては今後の課題としていきたい。

また、階層的な意図の導入や意図の尤度の変化を明示的なコミュニケーションのきっかけとする考えなど、多くの魅力的な課題が本テーマには残っている。これらについても今後取り組んでいきたい。

## 6. 研究総括の見解：

模倣による協調動作の学習は、人間と共存するロボットの行動設計や社会における人間行動のモデル化などの重要な基盤技術となるものであり、それに率先して取り組み、システムの構成単位となる「意図」の扱いを汎用性の高い確率モデルで整理し一定の成果をあげたことは評価できる。ただし、マルチエージェントシステムの構築に関しては、積み残しており、またその他にも課題は多数あるなど今後の研究推進が大いに重要であり、発展を期待したい。

## 7. 主な論文等：

1. 野田五十樹: 模倣に基づくエージェント動作系列の学習, 人工知能学会全国大会(第 15 回)論文集, 2C1-06, 2001/5.
2. NODA, Itsuki et. al.: Language Design for Rescue Agents. Proc. of RoboCup 2001 Symposium, p.17, 2001/Aug.
3. NODA, Itsuki et. al.: Language Design for Rescue Agent, The Second Kyoto Meeting on Digital Cities, 2001/Oct.
4. 野田五十樹: HMM の学習による環境の分節, 人工知能学会全国大会予稿集, 2B3-082002/5.

5. NODA, Itsuki: Segmentation of Environments using Hidden Markov Modeling of Other Agents. Proc. of AAMAS-2002, pp.1395--1396,2002/Jul.
6. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Multi-Agent Systems and its Learning Method 第15回 SIG Challenge 研究会, pp.13--20,2002/3.
7. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling for Multi-Agent Systems, Proc. of The Seventh Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence, pp.128--137,2002/Aug.
8. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Multi-Agent Systems and its Learning Method. Proc. of RoboCup 2002 International Symposium, 2002/Jun.
9. Itsuki Noda et. al: Language Design for Rescue Agents, Robot Soccer World Cup V, pp.164--172,2002
10. Itsuki Noda, Peter Stone: The RoboCup Soccer Server and CMUnited Clients: Implemented Infrastructure for MAS Research, Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol.7, No.1-2,pp.101-120,2003/Jul.
11. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Team-play, Proc. of IJCAI-2003, pp.1470--1472,2003/Aug.
12. 野田五十樹:お気軽サッカーを目指して,情報処理, Vol 44, No.9, pp.927--930,2003/9.
13. 野田五十樹:HMM による協調動作の模倣学習,2003年度 人工知能学会全国大会(第17回) 論文集, No. 3D4042003/6.
14. NODA, Itsuki: Hidden Markov Modeling of Team-play Synchronization, Proc. of RoboCup 2003,2003/Jul.
15. NODA, Itsuki: Hierarchical Hidden Markov Modeling for Team-play in Multiple Agents, IEEE Conference on System, Man, and Cybernetics,2003/Oct.
16. 野田五十樹:ロボットにおける機械学習の課題と動向,情報処理, Vol.44, No.11, 2003/11.