

令和元年5月14日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00341

研究課題名(和文) 部分観測マルコフ決定過程理論に基づく発達尺度の模倣関連タスクの包括的実現

研究課題名(英文) Comprehensive realization of imitation related tasks of developmental scales based on partially observable Markov decision process theory

研究代表者

伊藤 秀昭 (ITO, Hideaki)

佐賀大学・理工学部・准教授

研究者番号：20345375

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では全身の動作模倣、図形模写など発達尺度の模倣関連タスクを遂行するための各種システムを開発した。また、どのような模倣を行うべきかをエージェントが対話から判断できるようにし、さらに、各タスクの遂行においてどのような情報処理を行えばよいかをエージェント自身が自動的に最適化できるようにした。対話による判断および情報処理の最適化に関して、部分観測マルコフ決定過程(POMDP)理論を用いて統一的に実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、模倣関連タスクを遂行するための各種システムを開発し、どのような模倣を行うべきかをエージェントが対話から判断することや、各タスクの遂行においてどのような情報処理を行えばよいかをエージェント自身が自動的に最適化することを、部分観測マルコフ決定過程(POMDP)理論という汎用的な理論基盤の上で統一的に実現することができた。これは今後の多機能エージェントの研究・開発の基礎を築いた、意義のある成果であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed several systems to perform imitation related tasks of developmental scales such as whole body movement imitation and figure copying. We have developed a system in which the agent can determine through dialogue what kind of imitation should be performed. We have also developed a system in which the agent itself can automatically optimize what kind of information processing should be performed in doing each imitation task. We realized the dialogue and information processing optimization in a unified manner using the partially observable Markov decision process (POMDP) theory.

研究分野：ソフトコンピューティング, 人工知能

キーワード：確率的情報処理 POMDP 多機能エージェント 発達尺度 模倣 POMCP 適応制御 最適制御

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

従来の人工知能研究では、例えばチェス用人工知能に代表されるように、「ヒトの知能のある側面のみに着目し、それを工学的に実現する研究」が多くなされてきたため、実現されたエージェントは、ある側面については非常に知的でも、それ以外は何もできないことが多かった。多機能エージェントへの関心も高まりつつあったが、まだ理論的研究が多く実用化が遅れていた。

そこで研究代表者らは、発達尺度(心理学や医学分野で用いられている、ヒトの発達段階を判定するための尺度)の多数のタスクをできるだけヒトの乳幼児と同じ順番で達成することが、ヒトのように様々な知的活動を行うことのできる多機能なエージェントを実現するための一つの有効な方策であると考え、その方針に従って研究を進めてきた。具体的には、新版 K 式発達検査という発達尺度を利用し、両眼・首・手などを可動部として持つロボットを作製して、「眼前で動く物体を両眼で追視する(生後 1 ヶ月レベル)」、「首の運動を伴って追視する(3 ヶ月レベル)」、「両眼立体視(7 ヶ月レベル)」、「動く物体を指さす(1 歳レベル)」などを実現した。また、音声認識エンジン(Julius)を用いた対話システムを作製し、「絵を見せられて、これは何の絵かと聞かれたときに、その名称を答える(2 歳レベル)」、「大小さまざまな円の描かれた紙を見せられて、どの円が一番大きいかと聞かれたときに、正しく指さす(2 歳 5 ヶ月レベル)」なども実現していた。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の研究を発展させ、発達尺度のタスクのうちで「模倣」に関するものを多数行うことのできるエージェントを開発することを目的とした。その際、部分観測マルコフ決定過程(POMDP)理論を用いることによって、どのような模倣を行うべきかをエージェントが判断できるようにするとともに、各タスクの遂行においてどのような情報処理を行えばよいかをエージェント自身が自動的に最適化できるようにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

(1) ハードウェアおよびソフトウェアとして、研究代表者らが以前から用いてきた小型のヒューマノイドロボットおよび Robot Operating System (ROS) などを用いた。このロボットに、「他者が円などの図形を紙に描くのを見て、同じ図形を描く(2 歳 9 ヶ月レベル)」などの模倣関連タスクをできるだけ多く行わせることを目指した。

(2) (1)を実現するにあたって、多くのタスクの遂行を効率的に実現できるようにするため、複数のタスクで共通して用いることのできる機能要素モジュールを多数用意し、それらを組み合わせることによって各タスクの遂行を実現するようにした。さらに、それらのモジュールの組み合わせはエージェント自身が自動的に最適化して決めるようにした。

### 4. 研究成果

(1) 模倣に関して、まず図 1 に示すような動作模倣ロボットを作製した。図 1 左は人間がお手本となる動作を見せている様子で、図 1 右はロボットがそれと同じ動作をしている様子である。この模倣システムは以前から開発してきた



図 1 動作模倣ロボット

ものであるが、今回の研究で全身の動作模倣ができるようになった(ただし現在のところ足を上げることはできない)。研究の過程で、ロボットの動作制御のために必要な最適化手法の性能が不十分である(具体的には、最適化の計算が収束しないことが多いという問題がある)ことがわかったが、解決することができ、論文発表することもできた[雑誌論文 1, 学会発表 1, 4, 17]。

また、図 2 に示すような図形模倣ロボットも作製した。これは、3D カメラで模倣対象図形を撮影し、同じ図形をロボットが描画するというシステムである。3D カメラを用いることで、模倣対象図形を斜めから撮影した場合でも、正面から撮影した場合と同じように歪みなく模倣できるようにしている。このシステムで円や十字など様々な形状を模倣させることに成功した[学会発表 6, 8, 16]。

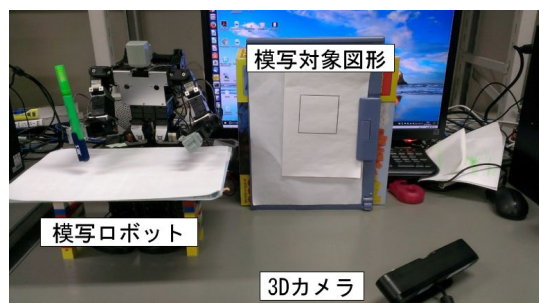


図 2 図形模倣ロボット

さらに、図3に示すような歩行動作の模倣の研究も行った。ここでは人間がお手本として歩く動作をして見せ、それをロボットに真似させている。歩行動作はバランスを崩しやすく、まだシミュレータ上でしか動作させることができていないが、実機での動作に向けて研究を進めた [学会発表 10, 12, 14, 23]。

また、「他者が積木で家などを作るのを見て、同じ形状を作る(2歳10ヶ月レベル)」を達成することを目指して、3次元物体形状の測定システムも作製した。これについては形状の自動測定まで成功している [学会発表 9, 13, 15, 22]。測定結果と同じ形状を作る部分は現在開発中である。図4に測定結果の一例を示す。

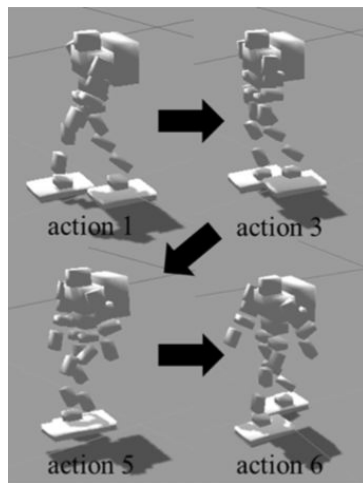


図3 歩行動作の模倣

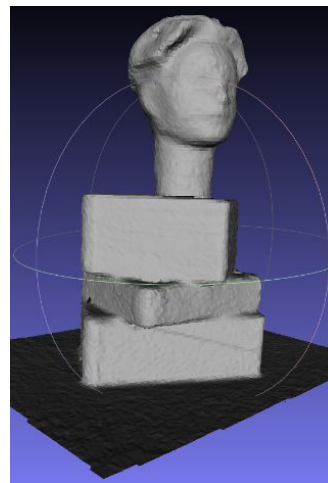


図4 物体形状の自動計測

(2) どのような模倣を行うべきかをエージェントが判断できるようにするために、人間がロボットに対して対話によって行なって欲しい動作を伝えるという状況を考え、この対話を成功させるという問題を POMDP を用いて定式化し、その POMDP 問題を POMCP という手法を用いて解くシステムを作製した [学会発表 11]。

図5に結果の一部を示す。図中で  $n$  は人間がロボットに行なって欲しい動作の種類であり、横軸は POMCP による先読みの回数 ( $10^7$  程度までは数秒で実行可能)、縦軸は対話の成功率合い(値が大きいほど成功率が高い)を示している。現在のシステムでは  $n = 25$  程度までであれば数秒以内に反応でき実用的であることが分かった。 $n = 50$  になると POMCP では最適化に要する時間が長すぎ実用的ではなくなったので、後述するように手法を改善し学習機能を取り入れることにした。

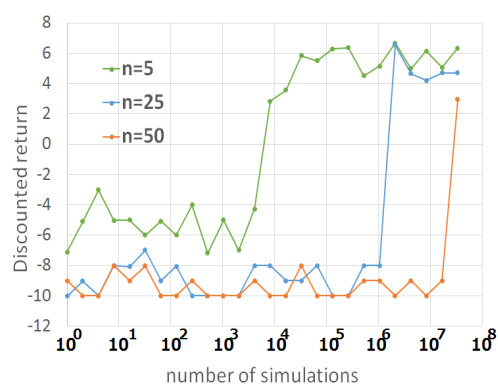


図5 対話行動の最適化

(3) 各タスクの遂行においてどのような情報処理を行えばよいかをエージェント自身が自動的に最適化できるようにするために、複数のタスクで共通して用いることのできる機能要素モジュールを多数用意し、どれをどのような順番で実行すればよいかという問題を POMDP を用いて定式化し、その POMDP 問題を AlphaZero という手法を用いて解くシステムを作製した。

AlphaZero は先読みとニューラルネットによる学習とを組み合わせた手法で、囲碁などでは既に高い性能を発揮することが示されている。図6に当システムの最適化問題における学習結果の一例を示す。横軸は試行回数(1 iteration が約 60 秒の試行に相当)、縦軸はタスク遂行に適した行動を正しく行うことのできた割合を示す。橙色は学習無し、青色は学習ありの結果であり、学習によって少ない試行回数で正解できるようになったことがわかった [学会発表 2, 3]。

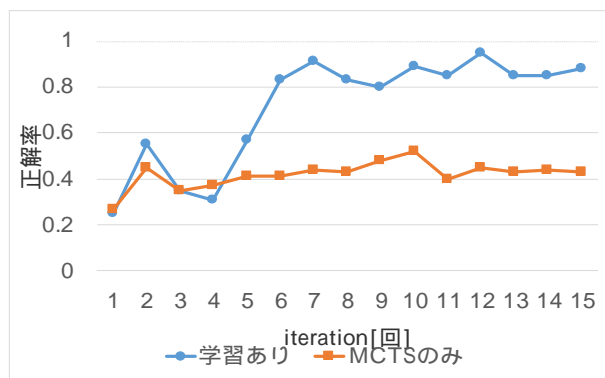


図6 タスク遂行に必要な情報処理の最適化

(4) 以上のように、本研究では模倣関連タスク遂行のための各種システムを開発し、どのような模倣を行うべきかをエージェントが対話から判断できるようにし、さらに、各タスクの遂行においてどのような情報処理を行えばよいかをエージェント自身が自動的に最適化できるようにした。現時点では未発表であるが、対話および情報処理の最適化を同時に行うシステムも開発しており、論文発表を準備中である。本研究によって POMDP という汎用的な理論基盤の上でこれらのシステムを構築できたことで、今後の多機能エージェントの研究・開発につながる成果が出せたと考える。研究代表者自身も今後この研究を発展させ、役に立つ多機能エージェントの開発に取り組んでゆく予定である。

## 5 . 主な発表論文等

### [雑誌論文](計1件)

Itoh Hideaki, Sakai Yoshitaka, Kadoya Toru, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi, and Furukawa Tatsuya, Using model uncertainty for robust optimization in approximate inference control, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol. 22(3), pp. 327-335, 2017  
DOI: 10.1007/s10015-017-0361-6

### [学会発表](計23件)

Nozomi Ihara, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Development of a motion imitation system for a humanoid robot using sound localization and dialog, *Proceedings of the 24th International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2019)*, pp. 612-616, 2019

中野 秀彦, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 図形模写ロボットにおける学習を用いた行動最適化の検討, 第20回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 69-72, 2018

徳島 諒汰, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 絵指示ロボットにおける学習を用いた行動最適化の検討, 第20回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 73-74, 2018

井原 望, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, ヒューマノイドロボットにおける音源定位を用いた動作模倣システムの開発, IEEE 主催 2018 年度第1回学生研究発表会予稿集, IEEE\_IM-S18-01, pp. 1-2, 2018

Ryota Tokushima, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Developing a robot that performs tasks of developmental scales: On pointing at pictures, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2018)*, pp. 63-66, 2018

Hidehiko Nakano, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Developing a robot that performs tasks of developmental scales: On copying drawings, *Proceedings of the 23rd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2018)*, pp. 67-70, 2018

徳島 諒汰, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, ディープニューラルネットワークとデブスカメラを用いた指さしロボットシステムの開発, IEEE 主催 2017 年度第1回学生研究発表会予稿集, pp. 5-6, 2017

中野 秀彦, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 図形模写ロボットのための対称図形の解析法の改善, IEEE 主催 2017 年度第1回学生研究発表会予稿集, pp. 9-10, 2017

笹山 友裕, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 3次元物体自動形状計測システムの性能向上, 第19回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 3-6, 2017

石本 一貴, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, KinectとPOMCPを用いたヒト型ロボットの見まねによる歩行動作の学習, 第19回日本知能情報ファジィ学会九州支部学術講演会予稿集, pp. 7-10, 2017

Maki Nakashima, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Optimization of speech and motion actions in a dialogue system by POMCP, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2017)*, pp. 241-244, 2017

Kazuki Ishimoto, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Learning of walking motion of a humanoid robot using POMCP, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2017)*, pp. 357-360, 2017

Tomohiro Sasayama, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, A Distributed and automated three-dimensional object shape measurement system using ROS and HummingBoard, *Proceedings of the 22nd International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2017)*, pp. 361-364, 2017

石本 一貴, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 足裏センサを用いたヒト型ロボットの姿勢制御, IEEE 主催 2016 年度第1回学生研究発表会予稿集, pp. 13-14, 2016

笹山 友裕, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, ROSとHummingBoardを用いた分散型3次元物体自動形状計測システムの開発, IEEE 主催 2016 年度第1回学生研究発表会予稿集, pp. 11-12, 2016

中野 秀彦, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 図形模写ロボットにおける対象図形の計測・解析法の検討, IEEE 主催 2016 年度第1回学生研究発表会予稿集, p. 5, 2016

Yoshitaka Sakai, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Tatsuya Furukawa, Parallelization of POMCP for movement imitation in a humanoid robot, *Proceedings of the 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2016)*, GS6-3, 2016

Maki Nakashima, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya, Tatsuya Furukawa,

- Developing a ROS node to control ICS servo motors, Proceedings of the 21st International Symposium on Artificial Life and Robotics (AROB 2016), GS6-2, 2016  
城戸 豊明, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 古川 達也, 3次元点群データを用いた物体把持システムにおける把持可能点の順位付き抽出, IEEE 主催 2015 年度第 1 回学生研究発表会, IEEE\_IM-S15-04, 2015  
城戸 豊明, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 古川 達也, 3次元点群データを用いた物体把持システムにおける把持対象抽出計算の高速化, 平成 27 年度電気関係学会九州支部連合大会 (第 68 回連合大会) 講演論文集 (CD-R), 13-2A-11, 2015
- 21 中島 麻貴, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 古川 達也, ROS を用いた HummingBoard によるサーボモーターの制御, 平成 27 年度電気関係学会九州支部連合大会 (第 68 回連合大会) 講演論文集 (CD-R), 11-2P-10, 2015
  - 22 笹山 友裕, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 古川 達也, ROS と HummingBoard を用いた分散型 3 次元物体形状計測システムの開発, 第 23 回電子情報通信学会九州支部学生会講演会講演論文集, CD-ROM, 5032.pdf, 2015
  - 23 石本 一貴, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛, 古川 達也, 足裏圧力センサーと ZMP を用いた二足ロボットの姿勢安定化, 第 23 回電子情報通信学会九州支部学生会講演会講演論文集, CD-ROM, 5037.pdf, 2015

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

研究室の業績

<http://www.ace.ec.saga-u.ac.jp/Work/>

多機能ロボット研究班

<http://www.ace.ec.saga-u.ac.jp/Research/robots.html>

## 6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者 なし