

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12157

研究課題名（和文）POMDP理論に基づく包括的な認知アーキテクチャの構築とフィジカルRPAへの応用

研究課題名（英文）Construction of a comprehensive cognitive architecture based on the POMDP theory and its application to physical RPA

研究代表者

伊藤 秀昭 (Itoh, Hideaki)

佐賀大学・理工学部・教授

研究者番号：20345375

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、認知アーキテクチャの一つである黑板モデルを部分観測マルコフ決定過程（POMDP）理論に基づいて定式化し直すことで、ヒトの備える認知能力（「考える」能力）を包括的に実現でき、理論的基盤がしっかりしていて工学的に応用しやすい新たな認知アーキテクチャを構築した。さらに、構築したアーキテクチャをフィジカルRPA（physical Robotic Process Automation）という実問題に応用し、その有効性を示した。また、紙を扱うフィジカルRPAを実現するために、静電吸着パッドや吸着センサなどを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で構築した新たな認知アーキテクチャは、認知能力を包括的に実現でき、理論的基盤がしっかりしていて工学的に応用しやすいため、本研究において開発したロボットシステム以外にも様々な応用に役立つと考えられる。また、本研究では黑板モデルを定式化し直したが、同様のアプローチは他の様々な認知アーキテクチャの再定式化にも用いることができると考えられる。さらに、本研究で開発した静電吸着パッドや吸着センサは、今後、紙を用いる作業を自動化することのできるフィジカルRPAを実現する際に有用であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have constructed a novel cognitive architecture that can comprehensively realize cognitive abilities (i.e., "thinking" abilities), has a solid theoretical foundation, and is easy to apply to real problems, by reformulating a fundamental cognitive architecture, the blackboard model, based on the Partially Observable Markov Decision Process (POMDP) theory. Furthermore, we have applied the proposed architecture to a real problem called physical Robotic Process Automation (physical RPA) and showed its effectiveness. Additionally, we have developed an electroadhesive pad and an electroadhesion sensor to realize physical RPA systems for handling paper.

研究分野：ソフトコンピューティング

キーワード：確率的情報処理 POMDP 認知アーキテクチャ Physical RPA 行動最適化

1. 研究開始当初の背景

深層学習や強化学習の研究の進展によって、高い認識能力と行動決定能力を備えた知的エージェントが開発されるようになってきていたが、ヒトの備える認知能力(様々な「考える」能力)がまだ実現されていなかった。そのような能力をモデル化したものとして認知アーキテクチャがあり、以前から多くの提案がなされていたが、脳の情報処理のモデル化などが重視されており、理論的な基盤が弱く工学的に応用しづらいという問題があった。

2. 研究の目的

そこで本研究では、認知能力を包括的に実現でき、理論的基盤がしっかりしていて工学的に応用しやすい認知アーキテクチャを構築することを目的とした。具体的には、既存の認知アーキテクチャを部分観測マルコフ決定過程 (partially observable Markov Decision Process; POMDP) 理論に基づいて定式化し直すこと、そして高性能な最適化手法を用いてその解法を実装すること、また、構築したアーキテクチャをフィジカル RPA という実問題に応用し、その有効性を明らかにすることを目的とした。

ここで、POMDP は環境を記述する確率モデルの一つであり、強化学習などと同様に、報酬最大化原理に基づいて知的エージェントを設計するための理論的枠組みを提供するものである。POMDP はエージェントが環境の状態を完全には観測できない場合も考慮することができ、知的エージェント設計のための非常に汎用的な理論的枠組みとして知られているため、本研究で用いることとした。

また、フィジカル RPA の RPA は、Robotic Process Automation の略で、企業のオフィス業務を人間の代わりに機械に行わせる技術の総称である。RPA は業務の効率化のために多くの企業に導入されているが、多くの場合コンピュータ上の作業を自動化するにとどまっており、物理的な作業の自動化はまだほとんどなされていない。物理的な作業まで行う RPA をフィジカル RPA と呼ぶが、これが実現されれば効率化が大きく進むと考えられることから、これを本研究の応用対象とした。

3. 研究の方法

まず、既存の認知アーキテクチャとして黑板モデル (blackboard architecture) に着目し、これを POMDP 理論に基づいて定式化し直し、新たなアーキテクチャを構築した。黑板モデルは、多数の情報処理モジュールの協働という、認知アーキテクチャの根幹をなす機能をモデル化した重要な認知アーキテクチャであるため本研究で用いた。そして、partially observable upper confidence bounds applied to trees (PO-UCT) アルゴリズムという高性能な最適化手法を用いて、その解法を計算機上で実装した。また、実装した解法の性能を数値実験によって四つの例題に対して調べた。さらに、構築したアーキテクチャを用いてフィジカル RPA を行う実ロボットを作製し、その有用性を調べた。

4. 研究成果

まず、黑板モデルを POMDP 理論に基づいて定式化し直した。これによって、報酬最大化と

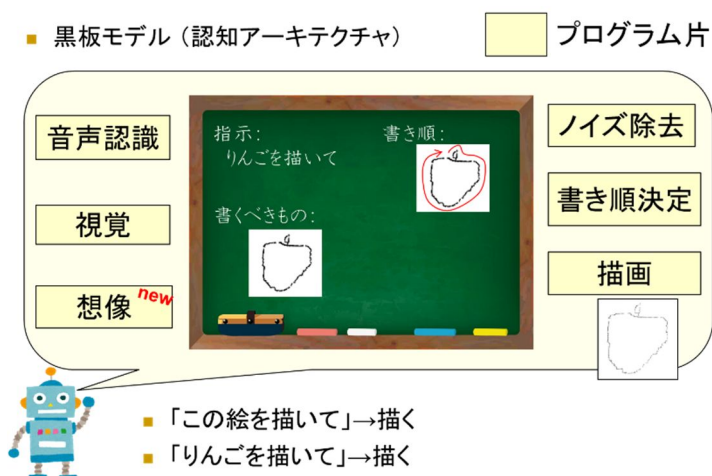


図1 黑板モデルの POMDP 理論に基づく定式化

いう理論的基盤の上で、認知能力を持つ知的エージェントを包括的に実現するための新たなアーキテクチャを構築することができた（雑誌論文 3）。

ここで、POMDP 理論を用いたことで、汎用的なアーキテクチャを構築することができたことは重要である。これにより、例えば音声入力や視覚入力にノイズが含まれる場合のような、不確実性を含む状況下においても適用可能なアーキテクチャを構築することができた（図 1）。

さらに、その解法を PO-UCT アルゴリズムを用いて実装し、四つの例題を対象とした数値実験によって、多くの場合において既存の手法よりも高速に性能の高い解を見つけることができることを示した（雑誌論文 3）。

また、フィジカル RPA の一例として、ユーザが指示したものをロボットが紙に描くという問題に対して本研究で構築したアーキテクチャを適用し、そのようなロボット（図 2）が容易に実現可能であることを示した。具体的には、図 1 に書かれているように、ユーザが「この絵を描いて」と言って何らかの線画をロボットに見せるとそれと同じ絵を描いたり、ユーザが「りんごを描いて」と言うのを描いたりすることのできるロボットを作製した。その際、音声を認識したり、カメラから画像を取り込んだり、書くべきものを想像したり、画像からノイズを除去したり、書き順を決定したり、ロボットの手を動かして線を書いたりといった種々のプログラム片をロボットに与えておくだけで、ロボット自身がそれらの適切な組み合わせ方を考え、ユーザからの要求に応えることができるようにした（雑誌論文 3）。

また、フィジカル RPA においては、紙を用いる作業を自動化することが最もニーズがあると考え、そのような作業を行うことのできるロボットを実現するための研究も行った。本研究では特に、高電圧を印加すると静電気力で紙を吸着することのできる静電吸着パッド（図 3）を開発した。そして、この静電吸着パッドを用いて、重ねられた紙の山の、最も上の紙だけを持ち上げる技術や、その紙を折り曲げることなく別の場所に運ぶ技術や、運んだ後で高速にその紙を離す技術などを開発した。さらに、それらの技術を用いて、紙を指定した順番に自動的に並べ替えるロボット（図 4）も開発した（雑誌論文 2、学会発表 7）。

さらに、静電吸着パッドが紙の吸着に成功したかどうかを判定することのできるセンサも開発した。前述の静電吸着パッドは、高電圧を印加してから数秒以上が経過した後であれば、ほぼ確実に紙を持ち上げることができる。しかし吸着時間がそれより短い場合は紙の持ち上げに失敗することがある。本研究で開発したセンサを用いることによって、紙の持ち上げに成功したかどうかを判定し、持ち上げに失敗した際にはもう一度紙の吸着をやり直すことができるようになったため、高電圧を印加する時間を短くしても、確実に紙を持ち上げることができるようになった（雑誌論文 1、学会発表 6）。

以上のように、本研究では、黑板モデルを POMDP 理論に基づいて定式化し直すことで、認知能力を包括的に実現でき、理論的基盤がしっかりしていて工学的に適用しやすい認知アーキテクチャを構築した。また、構築したアーキテクチャをフィジカル RPA という実問題に応用してその有効性を示した。さらに、紙を扱うフィジカル RPA を実現するための技術を開発した。紙を扱うロボットについてはまだ認知アーキテクチャの適用が完了していないが、これからの研究で実現させたい。



図 2 描画ロボット



図 3 静電吸着パッド

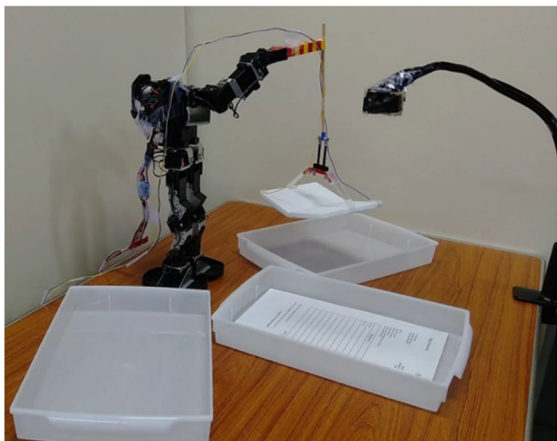


図 4 ソートロボット

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okamoto Takuya, Itoh Hideaki, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi	4. 巻 143
2. 論文標題 Adhesion Sensing in an Electroadhesive Paper Handler and Its Application to Physical RPA	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 47 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejieiss.143.47	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Itoh Hideaki, Okamoto Takuya, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi	4. 巻 10
2. 論文標題 An Electroadhesive Paper Gripper With Application to a Document-Sorting Robot	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 113598 ~ 113609
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2022.3217805	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Itoh Hideaki, Nakano Hidehiko, Tokushima Ryota, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi	4. 巻 14
2. 論文標題 A Partially Observable Markov-Decision-Process-Based Blackboard Architecture for Cognitive Agents in Partially Observable Environments	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems	6. 最初と最後の頁 189 ~ 204
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCDS.2020.3034428	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Itoh Hideaki, Ihara Nozomi, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi	4. 巻 25
2. 論文標題 A motion imitation system for humanoid robots with inference-based optimization and an auditory user interface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 106 ~ 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-019-00575-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 岡本 拓哉, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛
2. 発表標題 Physical RPAのための紙の位置情報検出
3. 学会等名 IEEE主催2021年度学生研究発表会予稿集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Satoshi Hiraki, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya
2. 発表標題 Exploiting a belief structure in deep neural network-based Monte-Carlo tree search for partially observable Markov decision processes
3. 学会等名 Proceedings of the 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshiki Ninomiya, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya
2. 発表標題 Developing a handwriting humanoid robot with low-precision hardware
3. 学会等名 Proceedings of the 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Harunobu Ishii, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya
2. 発表標題 Automatic balancing of cost functions in an optimization-based motion imitation system for humanoid robots
3. 学会等名 Proceedings of the 27th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 雄太, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛
2. 発表標題 不完全情報ゲームのための汎用ゲームAIの開発に向けて
3. 学会等名 第22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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本 拓哉, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛
2. 発表標題 紙の静電吸着ハンドにおける電極間電圧の測定
3. 学会等名 IEEE主催2020年度学生研究発表会予稿集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Okamoto Takuya, Itoh Hideaki, Fukumoto Hisao, Wakuya Hiroshi
2. 発表標題 Developing a Paper Sorting Robot for Physical RPA
3. 学会等名 Proceedings of the 26th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井原 望, 伊藤 秀昭, 福本 尚生, 和久屋 寛
2. 発表標題 深層強化学習を用いた模範学習システムの実現に向けて
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Kihara, Hideaki Itoh, Hisao Fukumoto, Hiroshi Wakuya
2. 発表標題 Towards general artificial intelligence for incomplete information games
3. 学会等名 Proceedings of the 25th International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室のホームページ https://www.ace.ec.saga-u.ac.jp/

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------