

令和 4 年 6 月 6 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03308

研究課題名（和文）確率的生成モデルと深層学習の双対的関係を活用した自己組織型認知アーキテクチャ創成

研究課題名（英文）Creation of Self-organizing Cognitive Architecture Integrating Probabilistic Generative Model and Deep Learning

研究代表者

谷口 忠大（Taniguchi, Tadahiro）

立命館大学・情報理工学部・教授

研究者番号：80512251

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,930,000円

研究成果の概要（和文）：確率的生成モデルと深層学習のそれぞれの長所を活用することが出来る自己組織型認知アーキテクチャの分散開発フレームワークとしてNeuro-SERKETを提案した。これは記号創発ロボティクスの文脈の中で研究代表者らが提案したフレームワークSERKETを深層生成モデルをも取り込めるように拡張したものである。これにより分散的に開発された確率的生成モデルを統合し、全体として推論することが可能になった。応用研究としてSLAMとGANの融合や、音声変換のための深層生成モデルと音声認識の確率的生成モデルの融合にかかわる研究を行った。これらの研究を通して自己組織型認知アーキテクチャの基盤を構築できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

実世界で学習し続けるロボットを生み出すためには視覚や触覚、音声といったマルチモーダル情報を得続け、また行動を意思決定し続ける認知アーキテクチャが必要である。本研究では認知システムの内部で情報が自己組織化するように「学習し続ける」認知アーキテクチャのための基礎理論として、確率的生成モデルと深層学習を融合させるフレームワークの開発を行った。これは機械学習と認知ロボティクスを架橋する研究であるとともに、実世界で活動し続ける自律的な人工知能を生み出すための基盤技術となる。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a novel framework called Neuro-SERKET as a distributed development framework to develop a self-organizing cognitive architecture that can utilize the advantages of both probabilistic generative models and deep learning. The Neuro-SERKET is an extension of the previously proposed framework, SERKET. This enables us to integrate (deep) probabilistic generative models that have been developed in a distributed manner and to reason about them as a whole. We also have studied the fusion of SLAM and GAN, and the fusion of deep generative models for speech conversion and probabilistic generative models for speech recognition. Through these studies, we built the foundation of a self-organizing cognitive architecture.

研究分野：創発システム

キーワード：機械学習 深層学習 確率的生成モデル 認知アーキテクチャ 自己組織化

1. 研究開始当初の背景

教師あり学習を基礎とした深層学習により画像認識や音声認識の技術が発展していた研究開始当初の時期においても、実世界で活動するロボットのような統合的な認知システムを如何に構築するかは依然問題であった。ロボット全体を作動させるような認知システムを構成するフレームワークを認知アーキテクチャと呼ぶ。特に実世界で活動しながら得られるマルチモーダル情報をもとに学習を続ける認知アーキテクチャを如何に構築するかはロボットを始めとした、これからの統合的な認知システムの研究開発において本質的に重要である。

研究代表者らはこれまで記号創発ロボティクスと呼ばれる分野を立ち上げ一連の研究を行ってきた。ロボットに実世界の経験に紐づく記号系、言語を持たせるためには、ロボットの自らの実世界の感覚運動情報に基づく、記号創発、言語獲得といったボトムアップなアプローチが重要である。そこではロボットは、多くの深層学習の研究で行われるように「設計者によって与えられた教師データ付きのデータセット」を隷属的に学習（教師あり学習）するのではなく、自らの感覚運動情報の統合としての自己組織型学習（教師なし学習）を行う必要がある。

従来の記号創発ロボティクスのアプローチでは古典的な確率的生成モデルを用いて認知システムを構築することが多かった。具体的には触覚、聴覚、単語といったマルチモーダルな情報の同時かつ階層的クラスタリング手法のMMLDAや、地図生成、マルチモーダル場所概念生成、語彙獲得を統合したSpCoSLAM（図1）、音素と単語を音声データだけから獲得する教師なし学習器であるノンパラメトリックベイズ二重分解析器（NPB-DAA）などが提案されてきた。しかし、様々な感覚運動情報を統合するには、各モダリティの特徴抽出の設計の難しさと共に、学習器の複雑性の増加が開発での問題となっていた。

これらを克服するためには、実世界の経験から言語を獲得する知能の実現のために「分散開発が効率的に可能であり、再統合後に自己組織的な環境適応が可能となる認知アーキテクチャをいかにして作るか？」という問いに答える必要がある。

この問いは以下を含む。

- ❑ 問1：実世界の経験から言語を獲得する知能をいかにして創造するか？
- ❑ 問2：確率的生成モデル（ベイズアプローチ）によるアプローチと深層学習（ディープラーニング）によるアプローチをいかに統合するか？
- ❑ 問3：複雑化する認知アーキテクチャをいかにして分散開発し再統合後でも自己組織的に環境適応を行わせるか？

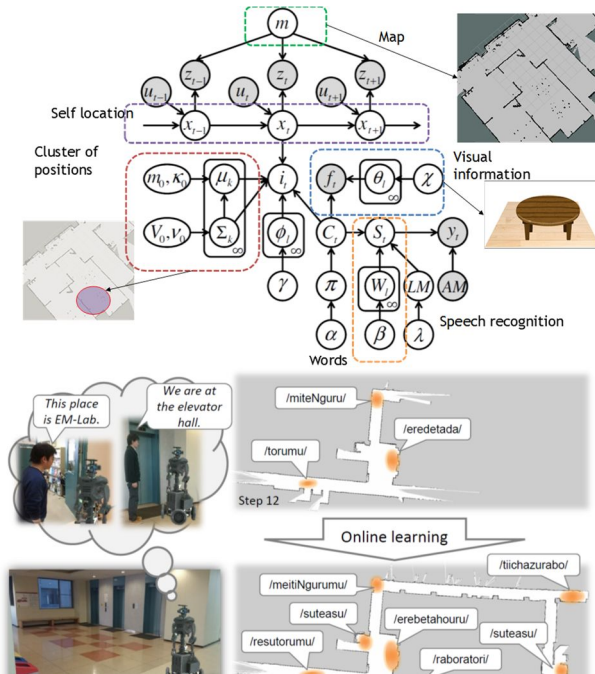


図1 SpCoSLAMの確率的生成モデルによって表される認知アーキテクチャ（上）とロボットによる地図と自己位置と場所概念と語彙の同時推定・学習タスクのイメージ図（下）確率的生成モデルにより様々な感覚運動情報が統合され実世界での語彙獲得が実現されている。

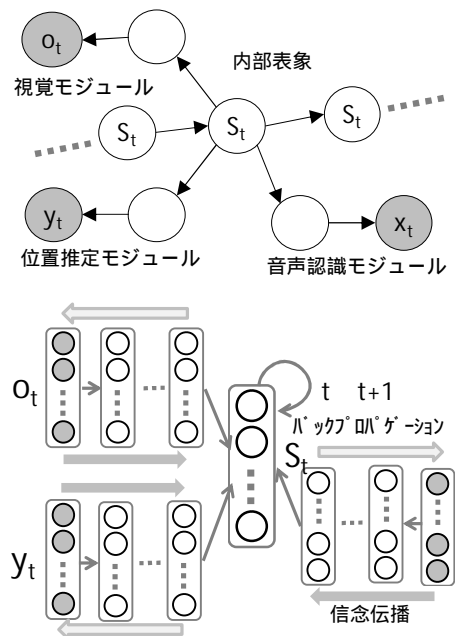


図2 複数の感覚情報を統合する確率的生成モデルのグラフィカルモデルの例（上）と対応する深層学習による推論ネットワーク（下）

研究開始当初に認識された上記の背景の元で、本研究は開始された。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、確率的生成モデルと深層学習のそれぞれの長所を活用することが出来る自己組織型認知アーキテクチャの分散開発フレームワークを提案し、その有効性を実証することである。

例えば、認知アーキテクチャが確率的生成モデルにより視覚モジュール、位置推定モジュール、音声認識モジュールの統合で表現されていた場合を考える(図2)。この時、深層学習による推論ネットワークがモジュール毎に対応して存在させることが考えられる。推論ネットワークの計算は信念伝播に対応し、ブラックボックス変分推論の枠組みに従って、学習は逆誤差伝播法によって実施される。このように捉えることで、別々に開発された認知モジュールを理論整合的に一つの教師なし学習器として統合できる。また、生成過程にニューラルネットワークを用いるなど、特徴抽出を行うための複雑な生成過程を導入することも容易となると期待される。

本研究は、ロボットの認知アーキテクチャの構築を確率的生成モデルの上で捉え、視覚、聴覚、触覚による認識、自己位置推定、語彙獲得などと言った複数の認知モジュールの学習を一体的な確率推論の枠組みで捉えることで、分散開発が効率的に可能であり、再統合後に自己組織的な環境適応が可能となる認知アーキテクチャの創造の基盤を構築することを目指した。

さらにこれを機械学習の理論的検証に用いられるようなデータに基づく検証にとどまらず、実世界ロボットのタスクへ応用し、その有効性を検証する。実世界ロボットの深層学習による特徴抽出能力を確率的生成モデルに持たせるという挑戦と、モデルが肥大化した際の分散的な推論を効率的に実装するという挑戦に、確率的生成モデルと深層学習の双対的關係という視点から同時にアプローチすることを目指した。

## 3. 研究の方法

以下の研究を通して 当該型認知アーキテクチャの実現可能性と有効性を明らかにすることを旨とした。

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"><li>(1) 確率的生成モデルと深層学習の双対的關係を活用した教師なし学習モジュールの開発</li><li>(2) 自己組織型認知アーキテクチャの分散開発フレームワークの構築<ul style="list-style-type: none"><li>信念伝播に基づく生成モデルの分割法の定式化</li><li>双対的關係に着目した開発フレームワークの定式化</li><li>フレームワークに基づく統合的認知アーキテクチャの開発</li></ul></li><li>(3) 自己組織型認知アーキテクチャの実ロボットへの実装と実世界タスクによる検証</li></ol> |
|---|

研究組織は谷口(代表者)と萩原(分担者)により構成した。代表者の谷口を中心に自己組織型認知アーキテクチャのモジュールの分散開発と、その統合後の自己組織的な学習を保証する理論的フレームワークの構築を行うことを計画した。また、このフレームワークの有効性を示すため、また、マルチモーダル物体カテゴリ、場所概念、語彙獲得モデルをこのフレームワークに基づき構築し、その有効性を検証することを目指した(上記1と2に対応)。

また萩原を中心に、提案されたフレームワークに基づいた自己組織型認知アーキテクチャを実ロボットに実装し、家庭環境におけるタスクにより、その実用可能性を検証することを目指した(上記3に対応)。

## 4. 研究成果

得られた研究成果の中から代表的な2件の成果に関して報告し、その後に、他の成果の概要に関して報告する。

### (1) 深層生成モデルを統合する Neuro-SERKET フレームワークの構築

確率的生成モデルと深層学習のそれぞれの長所を活用することが出来る自己組織型認知アーキテクチャの分散開発フレームワークとして Neuro-SERKET を提案した[1]。これは記号創発ロボティクスの文脈の中で研究代表者らが提案した SERKET と呼ばれるフレームワークを深層生成モデルをも取り込めるように拡張したものである。これと同時にそれまで確率的生成モデルにより構成されるモジュール間の結合が head-to-tail の場合にしかサポートされていなかったものを、head-to-head と tail-to-tail の2種類の結合に関してサポートし、これにより、確率的生成モデルの代表的な3つの結合様式をサポートすることができた。

Neuro-SERKET では変分オートエンコーダなどの深層学習に基づく確率的生成モデル、つまり深層生成モデルや従来の確率的生成モデルで構成された教師なし学習モジュールを結合し、その推論規則を個別モジュール内の推論と、モジュール間のコミュニケーションに分けて実現することができる。これにより分散開発された認知モジュールを再利用し、統合し、一体として動作させることができる。提案論文の中で示した一例を図3(上)に示す。この例は画像情報 $o_1$ と音声情報 $o_2$ で構成されるマルチモーダル情報を、同時クラス他リングする確率的生成モデルを表している。モジュールとしては画像を分散表現へと変換する表現学習器 VAE (変分オートエンコーダ)、分散表現としての連続ベクトルをクラスタリングする GMM (混合ガウス分布)、音声データを認識する ASR (音声認識器)、認識された音列をクラスタリングする LDA (潜在ディリクレ配分法) を結合することによって構成されている。図3(下)に示すように、これらのモジュールは実際には密結合させる必要はなく、各モジュールをカプセル化したまま、必要な確率情報を他のモジュールに渡すことで、全体としての推論・学習を進める事ができる。実験的にもその有効性は示されている。

さらにこのフレームワークは研究プロジェクトの内外で適用されると共に、さらなる議論の展開を生んでいる。代表的なものとしては、Neuro-SERKET を活用し、全脳規模の認知アーキテクチャを脳に倣って構築しようという取り組みだ。これを代表者らは全能アーキテクチャアプローチと呼ばれる取り組みと呼び、全脳確率的生成モデル (WB-PGM: Whole-Brain Probabilistic Generative Model) と呼称している。これらの研究開発は本研究課題を中心としつつ、CREST「記号創発ロボティクスによる人間機械コラボレーション基盤創成」や科研費・新学術領域「人工知能と脳科学の対照と融合」の研究者らと共同して推進した。

#### < 主要論文 >

- [1] Taniguchi, Tadahiro, et al. "Neuro-serket: development of integrative cognitive system through the composition of deep probabilistic generative models." *New Generation Computing* 38.1 (2020): 23-48.
- [2] Taniguchi, Tadahiro, et al. "A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots." *Neural Networks* 150 (2022): 293-312.

### (2) 深層生成モデルにより知識汎化を行う地図生成技術

家庭やオフィスで活動する実ロボットが、実世界の中でタスクを実行する時に求められる機能の一つに地図生成と自己位置推定がある。通常、ロボットは新規な環境で行動を開始すると、まず距離センサ情報や画像情報と、自らの移動に基づくオドメトリ情報等を用いて、地図を生成し、その生成された地図との相対的な関係により自らの位置を推定する。環境におけるナビゲーションはこの地図に照らしながら行われる。この地図と位置の同時推定に用いられるのが SLAM である。SLAM は確率的生成モデルの POMDP (部分観測マルコフ決定過程) に基づいており、その中の潜在変数である地図と自己位置をベイズ推論することによって、実現される。

一方で、多くの応用において SLAM による地図生成は環境毎に個別に行われる。このために新たな環境を訪れる度に、その環境をくまなく移動し、探索することが求められる。これに対して、私たち人間は、新たな家に訪問しても、家庭の間取りなどが持つある種の規則性から、まだ見ぬ部屋の形状もある程度予想することができる。これは常識的知識を個別的な地図の学習結果から学習しているためだと考えられる。

本研究ではこのような地図形状の「よくある形」を深層生成モデルにより学習させ、それを

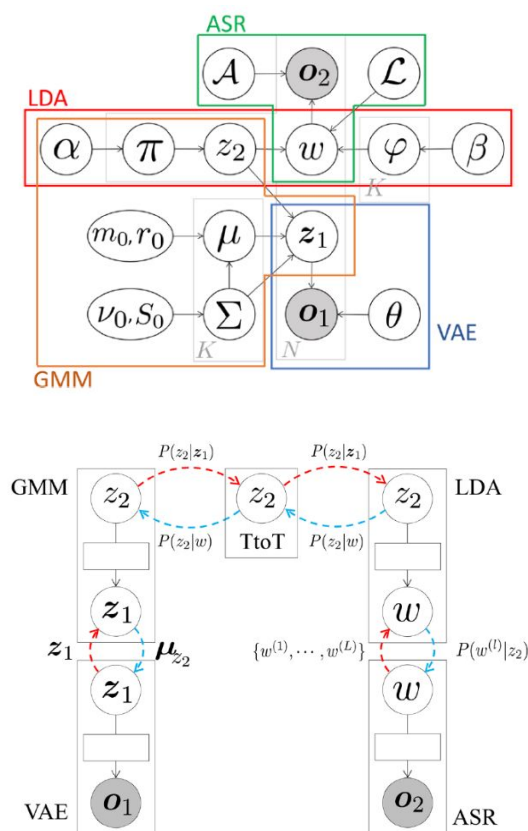


図3 Neuro-SERKET の使用例 [1]。(上) 四つのモジュールにより構成される統合的な確率的生成モデル、(下) 個別に学習しながら相互に情報をやり取りし全体として推論される。

SLAM に活用することを考えた(図4).これは SLAM の確率的生成モデルの事前分布に深層生成モデルを head-to-tail の形で結合させることに相当する .

提案手法 MCN-SLAM ( Map Completion Network-based SLAM )は一般家庭の間取りのデータセットで学習され,その事前知識が一定程度の良い効果を地図生成に与えることが実験により示された.本手法は完全な形のモデル統合とはなっていないが,深層生成モデルと従来の確率的生成モデルの統合的利用により実ロボットのタスクに貢献した事例といえる .

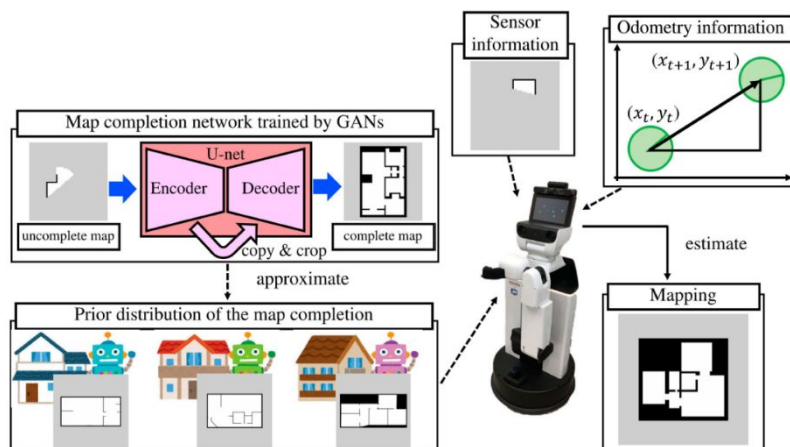


図4 深層学習により学んだ知識で地図を補完する MCN-SLAM の動作概要図 [3]

< 主要論文 >

[3] Katsumata, Yuki, et al. "Map completion from partial observation using the global structure of multiple environmental maps." *Advanced Robotics* 36.5-6 (2022): 279-290.

( 3 ) その他の研究

上記の2つの代表的研究成果の他に語彙獲得における深層生成モデルと二重分節解析器の統合に関する検証や,深層生成モデルを用いた音声変換を対象とした研究,深層生成モデルをサービスロボット環境で活用する方法の提案など,広がりのある研究活動を行った .

また国際会議で関連のワークショップを開催したり,自律ロボットの認知アーキテクチャの重要性の記述を含んだ一般書籍の刊行を行ったり,数多くの学会や講演会において招待講演を行ったりするなど研究のアウトリーチや領域形成に努めた .

これらにより当初の目的と計画に対して,十分な成果をおさめられたと考えている .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Tadahiro Taniguchi, Tomoaki Nakamura, Masahiro Suzuki, Ryo Kuniyasu, Kaede Hayashi, Akira Taniguchi, Takato Horii, Takayuki Nagai	4. 巻 84
2. 論文標題 Neuro-SERKET: Development of Integrative Cognitive System through the Composition of Deep Probabilistic Generative Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 New Generation Computing	6. 最初と最後の頁 23-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00354-019-00084-w	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 T. Taniguchi, D. Mochihashi, T. Nagai, S. Uchida, N. Inoue, I. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Hagiwara, N. Iwahashi & T. Inamura	4. 巻 33(15-16)
2. 論文標題 Survey on frontiers of language and robotics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 700-730
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2019.1632223	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 Taniguchi Tadahiro, Ugur Emre, Hoffmann Matej, Jamone Lorenzo, Nagai Takayuki, Rosman Benjamin, Matsuka Toshihiko, Iwahashi Naoto, Oztop Erhan, Piater Justus, Worgotter Florentin	4. 巻 11(4)
2. 論文標題 Symbol Emergence in Cognitive Developmental Systems: a Survey	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems	6. 最初と最後の頁 494-516
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCDS.2018.2867772	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 該当する
1. 著者名 Taniguchi Tadahiro, Yamakawa Hiroshi, Nagai Takayuki, Doya Kenji, Sakagami Masamichi, Suzuki Masahiro, Nakamura Tomoaki, Taniguchi Akira	4. 巻 150
2. 論文標題 A whole brain probabilistic generative model: Toward realizing cognitive architectures for developmental robots	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 293 ~ 312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2022.02.026	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 Katsumata Yuki, Kanechika Akinori, Taniguchi Akira, El Hafi Lotfi, Hagiwara Yoshinobu, Taniguchi Tadahiro	4. 巻 36
2. 論文標題 Map completion from partial observation using the global structure of multiple environmental maps	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 279 ~ 290
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/01691864.2022.2029762	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 Taniguchi Tadahiro	4. 巻 39
2. 論文標題 Integrative Cognitive Systems for Language Understanding and Symbol Emergence in Robotics	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Robotics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 405 ~ 410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7210/jrsj.39.405	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計15件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 知能を創る - 汎用人工知能への挑戦
3. 学会等名 AIビジネスインフォマティクス2019 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 記号創発ロボティクスにおける確率的生成モデルと深層学習の融合
3. 学会等名 「深層学習の先にあるもの - 記号推論との融合を目指して (2)」公開シンポジウム, 東京大学 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 記号創発ロボティクスによる汎用人工知能への挑戦
3. 学会等名 第10回人工知能学会汎用人工知能研究会(SIG-AGI) (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 ロボティクスと確率モデルに基づく汎用人工知能に向けて ~記号創発ロボティクスのアプローチ~
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会, OS19: 確率ロボティクスとデータ工学ロボティクス ~認識・行動学習・記号創発~ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Symbol Emergence in Robotics: Towards Architecture for Embodied Developmental General Artificial Intelligence
3. 学会等名 AEGAP 2018 Architectures and Evaluation for Generality, Autonomy & Progress in AI, IJCAI-ECAI 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 記号創発ロボティクスが目指す自律適応型AIアーキテクチャ
3. 学会等名 2018年度 人工知能学会全国大会 (第32回) (JSAI2018), OS-6 自律・創発・汎用AIアーキテクチャ (招待講演)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Sakamoto, S., Taniguchi, A., Taniguchi, T., & Kameoka, H.
2. 発表標題 StarGAN-VC+ASR: StarGAN-based Non-Parallel Voice Conversion Regularized by Automatic Speech Recognition
3. 学会等名 INTERSPEECH 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hayashi, K., Zheng, W., El Hafi, L., Hagiwara, Y., & Taniguchi, T.
2. 発表標題 Bidirectional Generation of Object Images and Positions using Deep Generative Models for Service Robotics Applications
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Moritani, A., Ozaki, R., Sakamoto, S., Kameoka, H., & Taniguchi, T.
2. 発表標題 StarGan-based emotional voice conversion for Japanese phrases
3. 学会等名 APSIPA 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 勝又勇貴, 兼近晃徳, 谷口彰, エルハフィロトフィ, 萩原良信, 谷口忠大
2. 発表標題 深層生成モデルを用いた地図補完とSLAMの統合
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小村 漱一郎, 林 楓, 谷口 彰, 谷口 忠大, 亀岡 弘和
2. 発表標題 StarGAN-VCを用いた話者非依存音響特徴量抽出と二重分節解析への応用
3. 学会等名 2021年度人工知能学会全国大会 (JSAI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阪本 翔紀, 谷口 彰, 谷口 忠大, 亀岡 弘和
2. 発表標題 StarGAN-VC+ASR: 音声認識結果を正則化に活用した教師なし音声変換
3. 学会等名 2021年度人工知能学会全国大会 (JSAI2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 Symbol Emergence in Robotics: Towards Emergence of Mind through Physical and Semiotic Interaction
3. 学会等名 メタ科学技術研究プロジェクト第4回国際ワークショップ(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadahiro Taniguchi
2. 発表標題 Symbol Emergence in Robotics: Integrative Probabilistic Generative Models for Developmental Human-Robot Communication in the Real-world Environment
3. 学会等名 IEEE Ubiquitous Robots 2020(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷口忠大
2. 発表標題 確率的深層生成モデルによる実世界自律知能の創成に向けて ~記号創発口ポティクスが生み出す認知アーキテクチャ~
3. 学会等名 2020年度人工知能学会全国大会(JSAI2020) (招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 谷口 忠大	4. 発行年 2022年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 206
3. 書名 僕とアリスの夏物語 人工知能の、その先へ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

立命館大学 創発システム研究室 研究業績 <a href="http://www.em.ci.ritsumeai.ac.jp/publications/">http://www.em.ci.ritsumeai.ac.jp/publications/</a>
---

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
研究 分 担 者	萩原 良信  (Hagiwara Yoshinobu)  (20609416)	立命館大学・情報理工学部・講師   (34315)	

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1件

国際研究集会 The Workshop on Deep Probabilistic Generative Models for Cognitive Architecture in Robotics	開催年 2019年～2019年
--	--------------------

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
---------	---------