

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05878

研究課題名(和文)階層的目標志向行動を学習・生成する神経ダイナミクスモデル

研究課題名(英文)A neural dynamics model for learning and generating hierarchical goal-directed behavior

研究代表者

有江 浩明(Arie, Hiroaki)

早稲田大学・次世代ロボット研究機構・その他(招聘研究員)

研究者番号：20424814

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ロボットによる目標志向行動の学習と生成を目的として、まずロボット自身が経験する連続的な感覚運動情報を学習することで、行動の目標という抽象的な情報を自己組織的に表現できる神経回路モデルの開発に取り組んだ。さらにロボットが置かれた状況に合わせて適応的に行動計画を修正するメカニズムの開発も試みた。その成果として構築した神経回路モデルをロボットに実装し、人と共同で組み立て作業を行う課題において、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

行動の目標という概念は自ら行動する際に必要となるだけでなく、他者の行動に意図を見いだしたり、模倣学習をしたりする際にも重要な役割を果たしていると指摘されており、社会的認知能力の礎ともなっている。しかしながら、心理学や脳科学の重要な研究課題となっているにもかかわらず、行動の目標という抽象的な概念がどのように表象されているかは未だ明らかではない。本研究の結果として得られた目標志向行動に関する神経回路モデル上での情報表現に関する知見は工学的応用のみならず、認知科学等の学術的な研究への展開も期待できる。

研究成果の概要(英文)：This project aims to enable robots to learn and generate goal-directed behavior. First, I worked on the development of a neural circuit model that can express the abstract information of the action goal in a self-organizing manner by learning the continuous sensorimotor information that the robot itself experiences. Furthermore, I also attempted to develop a mechanism in which the robot adaptively modifies the action plan according to the situation. A neural circuit model constructed by integrating them was implemented in a robot. Then, I confirmed the effectiveness of the proposed method in the task of assembling with a human.

研究分野：情報学

キーワード：認知発達ロボティクス 目標志向行動 再帰型神経回路モデル 深層学習

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我々は日常生活の中で、目標に向かって適応的に行動を計画・実行するという認知的能力を持っている。それは例えば“買い物に行く”というような長期的・抽象的なものであったり、“目の前のボールを蹴る”というような短期的・具体的なものであったりする。また目標は自己の行動の方向付けとなるだけでなく、他者の行動に意図を見いだしたり、模倣学習をしたりする際にも重要な役割を果たしていると指摘されており、社会的認知能力の礎ともなっている。しかしながら、心理学や脳科学の重要な研究課題となっているにもかかわらず、行動の目標という抽象的な概念がどのように表象されているかは未だ明らかではない。

一方、人工物であるロボットの研究分野でも、目標に対して行動を計画・実行することは重要な課題となっている。従来のロボットに実装される智能制御系は、その内部で認識モジュール・行動計画モジュール・運動制御モジュールなど、いくつかのモジュールに分けて設計されることが多い。従って、これらのモジュール間での情報表現・伝達の規約を設計時に定めておく必要があるため、設計者がロボットに与えられる目標をよく理解して適切な表象を設計する必要があった。しかしながら、現実世界の多様な状況を、必ずしも設計された情報表現・伝達系の中で扱いきれない場合が生じるため、生活環境で働くロボットを実用化する際の大きな課題となっている。

### 2. 研究の目的

以上の背景を下に、本研究課題ではロボットによる目標志向行動の学習・生成を目的とした。具体的には(1). 階層的な目標志向行動を学習・生成する神経回路モデルの実現と、(2). ロボットが置かれた環境・文脈に合わせて適応的に行動計画を修正する方法を実ロボットに具現化し、その有効性を検証した。

### 3. 研究の方法

本研究では、目標を達成するための適応的な行動生成メカニズムは、予測制御システムの階層性によって実現されるとの仮説を提案する。この仮説を検証するために Deep Learning の学習アルゴリズムを取り込んだ神経回路モデルを用いて、階層性を備えた予測行動制御システムを作成し、ロボットと統合することで構成論的知能研究の立場から取り組んだ。

#### (1). 階層的な目標志向行動を学習・生成する神経回路モデル

行動の目標が長期的・抽象的なものである場合、それを達成するためには短期的・具体的な行動要素単位をつなぎ合わせた行動計画が必要となる。例えば“買い物に行く”という目標には、“家から出る”、“駅まで異動する”、“切符を買う”などの要素単位に分解することができる。このような階層性を伴う目標志向行動を学習するために、図 1 に示す MTRNN を用いたモデルを構築した。MTRNN は時定数の異なる 2 つの神経回路モデル群によって構成されており、Fast と呼ばれる群は短期的な要素単位を学習し、Slow と呼ばれる群は長期的な情報 (Fast に記憶される要素単位の組み合わせ) を学習する。また、PB と呼ばれる静的な値を保持する神経回路モデルを追加することで、行動の長期的な目標を保持する構成とした。

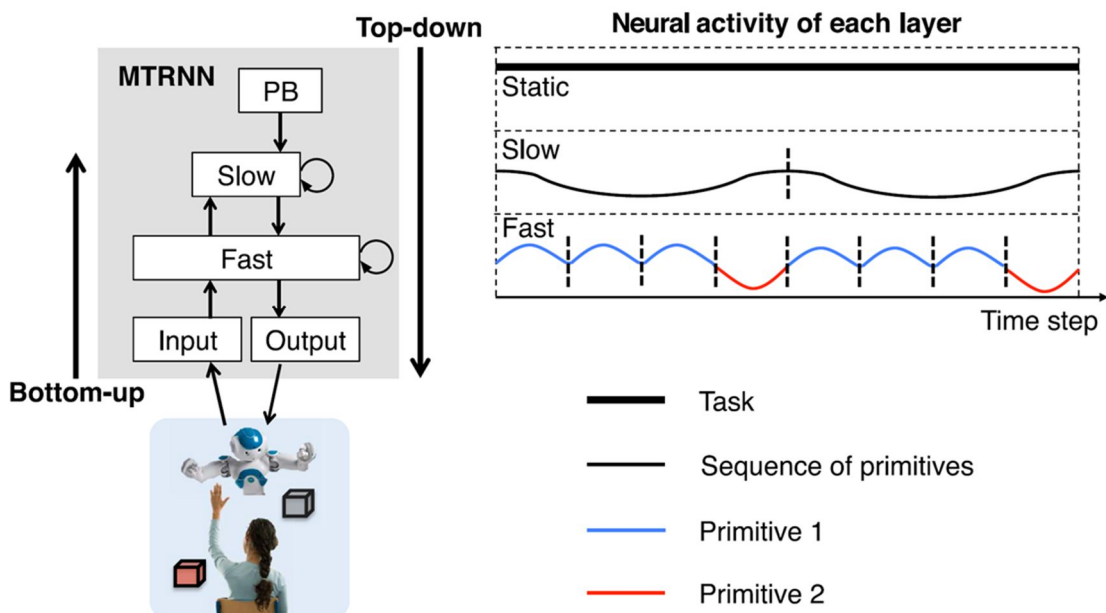


図 1 MTRNN による階層的目標志向行動の学習モデル

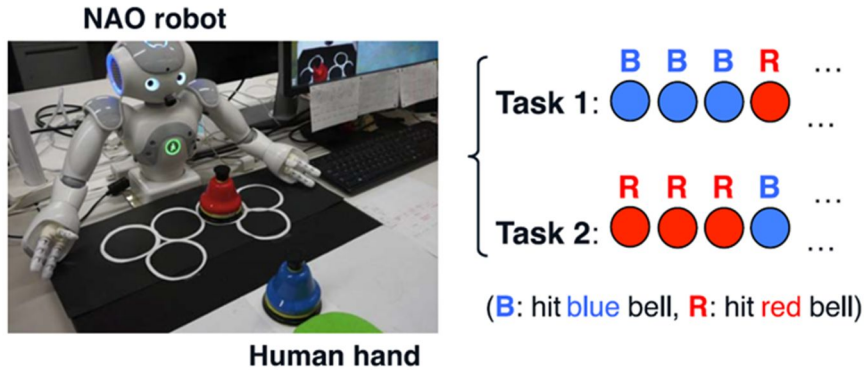


図 2 ベル鳴らしタスクの実験環境

この神経回路モデルを図 2 に示すロボットに実装し、人と協調して目標志向行動を行うタスクを与えて動作を検証した。具体的には、ロボットと人の前にそれぞれ 1 ずつベルが置かれており、協調して 2 種類のパターンでベルを鳴らすものである。1 つめのパターンは BBBR タスクと呼び、青いベルを 3 回鳴らした後に赤いベルを 1 回鳴らすものであり、2 つめのパターンは RRRB タスクと呼び、赤いベルを 3 回鳴らした後に、青いベルを 1 回鳴らすものである。赤いベル、青いベルが置かれる位置は試行ごとにランダムに設定されるため、ロボットは置かれた状況に対して適切に行動を計画する必要がある。実験ではベルの配置と鳴らすパターンの組み合わせのうち、一部をロボットに教示して、その際の感覚・運動情報を神経回路モデルに学習させた。その後、教示しなかった組み合わせに対しても、正しく行動を生成できるかを検証した。

(2). ロボットが置かれた環境・文脈に合わせて適応的に行動計画を修正する方法

ロボットが目標志向行動を開始した後、環境の状態に変化が生じた際には、当初計画した行動を適応的に変更する必要がある。例えば人と協調して組み立て作業を行う場合、作業目的を共有しつつ、人の行動に合わせてロボット自身の行動を変化させる必要がある。このような状況にも対応できるように、動作中も認識した環境情報に併せて、適応的に自信の行動計画を修正することが可能な神経回路モデル(図 3)を構築した。このモデルではカメラから得られる環境の観測情報とゴールイメージを Convolutional Variational Autoencoder(ConvVAE)で特徴量に変換し、それらと感覚・運動情報を LSTM に入力している。ロボットの動作時には予測した画像特徴量と、

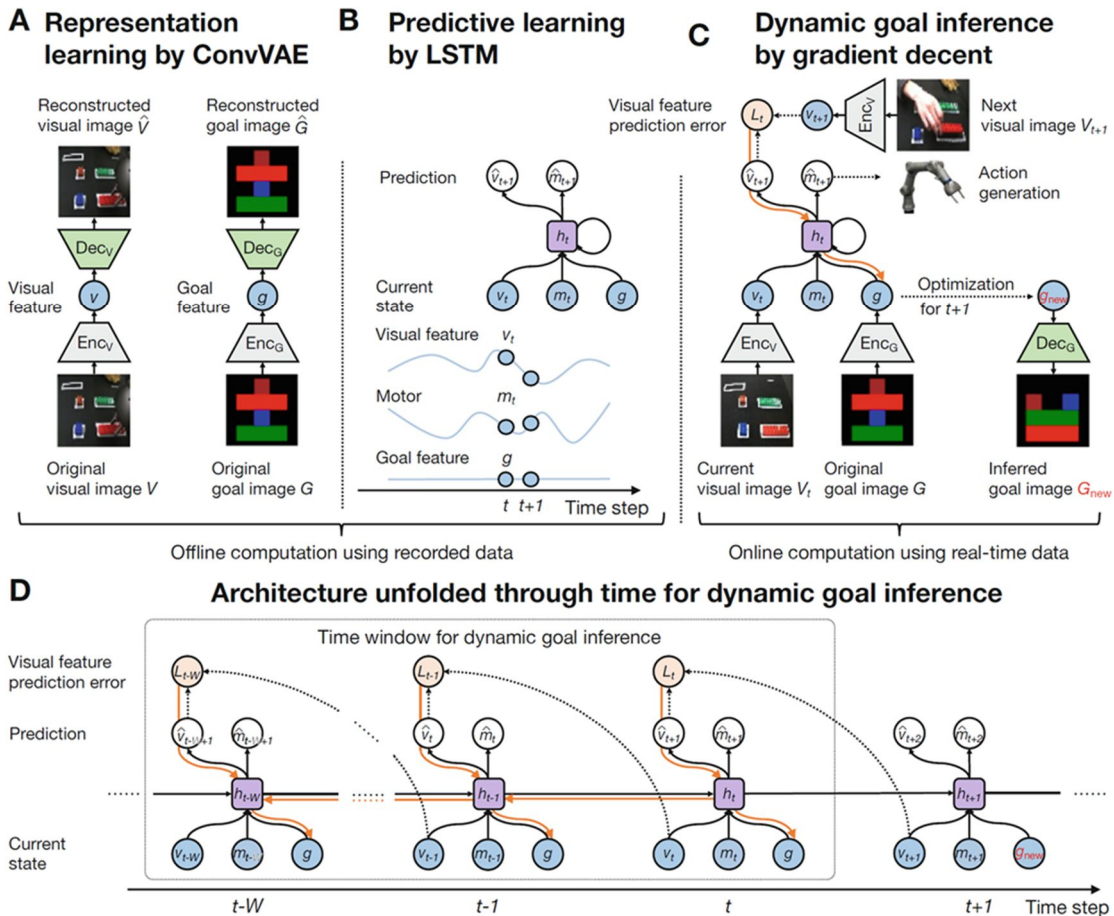


図 3 動的な計画修正を行う神経回路モデル



実際に観測した画像特徴量を比較し、勾配法を利用してその誤差を過去に遡って逆伝搬させてゴール情報を表現する特徴量の値を更新することで、行動計画の変更を実現している。

実験では図 4 に示すブロックの組み立てタスクを設定した。このタスクでは人とロボットが協調して組み立て作業を実施する。目標状態としてはいくつかの限定された候補を設定しており、Experiment1 では 2 種類、Experiment2 では 4 種類の可能性がある。ロボットには動作開始時に仮の目標状態画像が与えられるが、作業を進めてゆく中で、人の行動を認識し、そこから予測される目標状態に合わせて自身の行動計画を修正する必要がある。

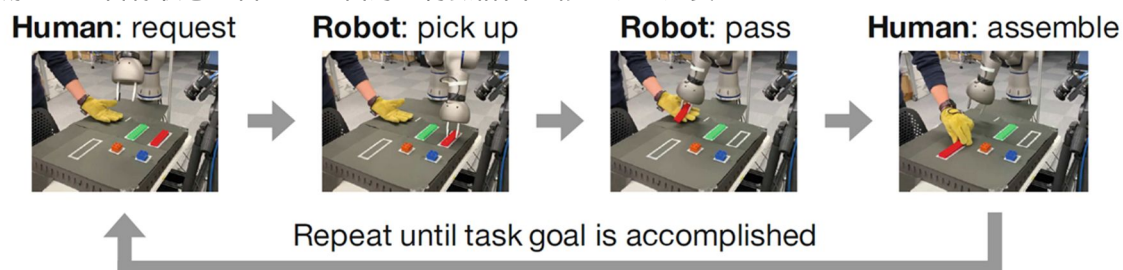


Fig. 2. Human-robot collaboration task involving object assembly.



図 4 人と協調したブロック組み立てタスク

#### 4. 研究成果

##### (1). 階層的な目標志向行動を学習・生成する神経回路モデル

実ロボットによる動作実験で、学習に用いなかったものも含めて、ベルの配置と鳴らすパターンの可能な組み合わせすべてに関して、ロボットが適切な動作を生成できることを確認した。さらに、人がベルを押すまで待つという、学習時のデータには含まれない状況にも対応できることが示された。

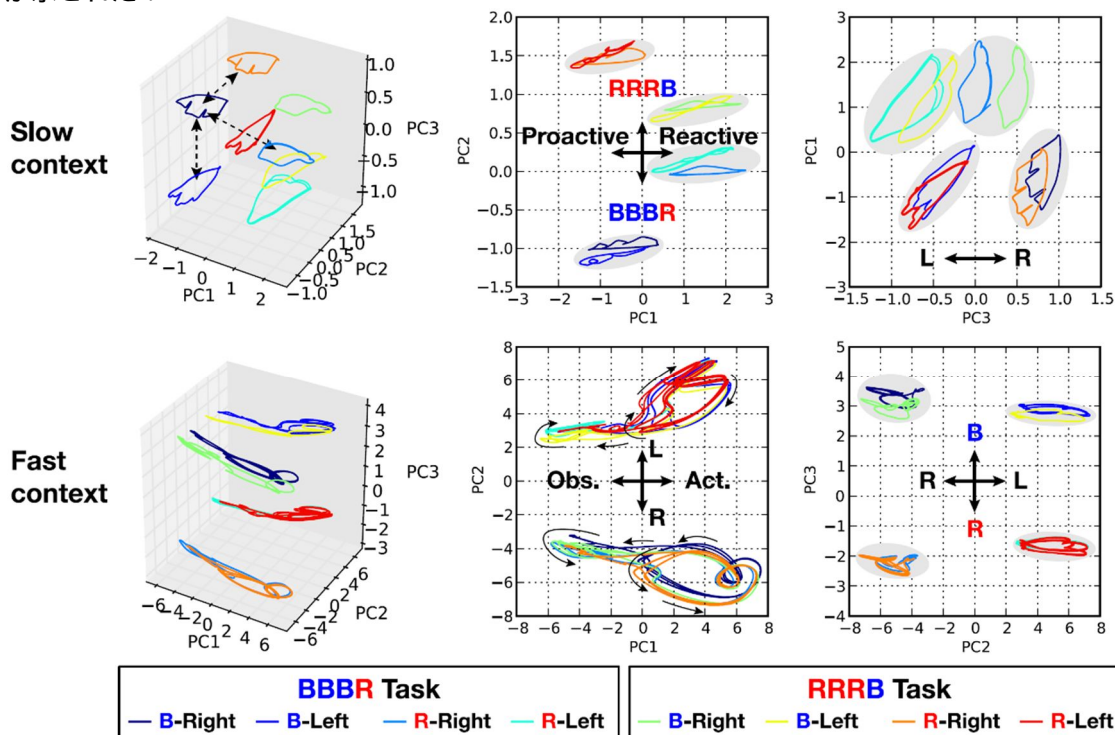


図 5 神経モデルの活動の様子

また、学習後の神経回路モデルの内部に表現される情報を可視化するため、Slow と Fast のそれぞれの群に関して、神経モデルの活動の様子を PCA により 3 次元に変換した (図 5)。この図を見ると、Slow 群の PC 2 で RRRB タスクと BBBR タスクの切り替えに関する情報が表現されてい

ることがわかる。PC1の軸に関しては人が先にベルを3回鳴らして、その後にロボットがベルを鳴らすのか(Proactive)、ロボット自身が先にベルを鳴らし、その後に人の動作が続くのか(Reactive)を表現している。また、PC3の軸では左右どちらの手でベルを鳴らすのかを切り替える情報が表現されていた。一方のFast群の活動を見ると、PC1の軸にロボット自身がベルを鳴らすのか、それとも人がベルを鳴らすのを待つのかを切り替える表現が見られる。この結果から、BBBR, RRRBなどのタスク全体の計画がSlow群によって表現され、Fast群ではベルを鳴らす行動要素が表現されており、階層的な役割分担が見られることを確認した。

(2). ロボットが置かれた環境・文脈に合わせて適応的に行動計画を修正する方法

実ロボットを用いた実験の結果、提案したモデルは適応的に行動計画を変更できることを確認した。Experiment1の具体的なシーンの例を図6に示す。このケースではロボットに仮の目標状態として(a)下段のイメージを与えた。その後、人が作業を開始して赤いブロックを取り上げている(b)が、その場合に予想される目標状態は当初与えられたものとは異なるので、(c)では目標状態のイメージが変更されている。その後は修正された行動計画に従ってロボットはブロックをピックアップすることができている。

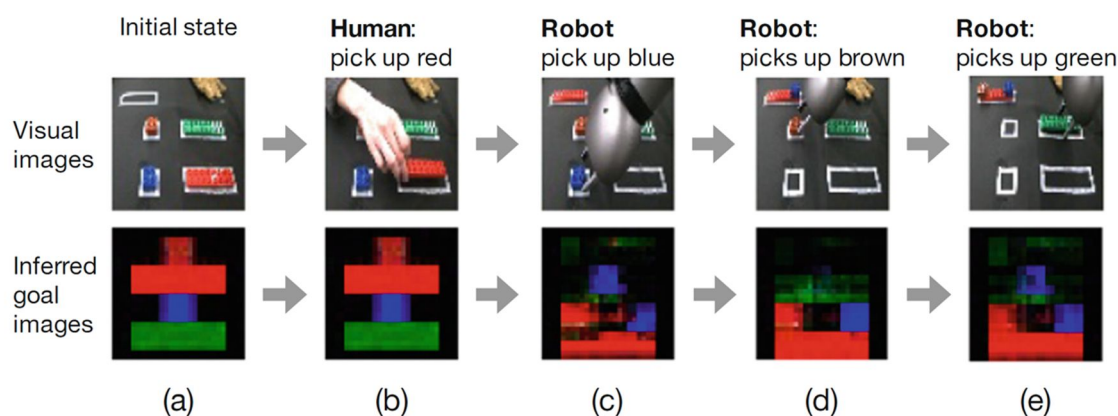


図6 適応的な行動計画変更の例

以上の研究の成果によって、階層性を持った目標志向行動を学習し、置かれた状況に合わせて適応的に行動計画を修正する基礎的な神経回路モデルが構築でき、その可能性が明らかになったと考えられる。実際の応用に関しては、他のハードウェアへの適用や、学習限界に関する検証等、多くの作業が残っているが、今後の継続的な研究により、工学的応用のみならず、認知科学や脳科学等における目標志向行動の情報処理との関連等、学術的な研究への展開も期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ryoichi Nakajo, Shingo Murata, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata	4. 巻 Vol. 12, Article 46
2. 論文標題 Acquisition of Viewpoint Transformation and Action Mappings via Sequence to Sequence Imitative Learning by Deep Neural Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2018.00046	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 Shingo Murata, Yuxi Li, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata, Shigeki Sugano	4. 巻 Published Online
2. 論文標題 Learning to Achieve Different Levels of Adaptability for Human-Robot Collaboration Utilizing a Neuro-dynamical System	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCDS.2018.2797260	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 Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata	4. 巻 Vol. 11, Article 70
2. 論文標題 Representation Learning of Logic Words by an RNN: From Word Sequences to Robot Actions	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurorobotics	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnbot.2017.00070	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 陳嘉壹, 村田真悟, 増田航, 有江浩明, 尾形哲也, 菅野重樹
2. 発表標題 LSTM-RNNを用いた階層的な目標計画による人間-ロボット協調組立の実現
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuro Yamada, Tetsuro Kitahara, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata
2. 発表標題 Four-part Harmonization: Comparison of a Bayesian Network and a Recurrent Neural Network
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuro Yamada, Saki Ito, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata
2. 発表標題 Learning of Labeling Room Space for Mobile Robots Based on Visual Motor Experience
3. 学会等名 The 26th International Conference on Artificial Neural Networks 2017 (ICANN2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata
2. 発表標題 Representation Learning of Logical Words via Seq2seq Learning from Linguistic Instructions to Robot Actions
3. 学会等名 The 5th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 張耀宇, 中條亨一, 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也
2. 発表標題 神経回路モデルにおける追加学習手法に関する検討
3. 学会等名 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 伊藤彩貴, 山田竜郎, 有江浩明, 尾形哲也
2. 発表標題 深層学習を用いた移動ロボットによる室内空間の状況依存的ラベリング
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也
2. 発表標題 Seq2seq学習による論理語を含む言語指示の理解とロボット行動の生成
3. 学会等名 第31回人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田竜郎, 北原鉄朗, 有江浩明, 尾形哲也
2. 発表標題 LSTMを用いた四声体和声の生成
3. 学会等名 第31回人工知能学会全国大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuxi Li, Shingo Murata, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata, and Shigeki Sugano
2. 発表標題 Achieving Different Levels of Adaptability for Human-Robot Collaboration Utilizing a Neuro-Dynamical System
3. 学会等名 Workshop on Bio-inspired Social Robot Learning in Home Scenarios, The 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016) (国際学会)
4. 発表年 2016年



〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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