

令和 2 年 6 月 29 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K12758

研究課題名（和文）時系列マルチモーダル情報の分節化と分類に基づくロボットの概念モデルの構築

研究課題名（英文）Construction of concept model based on segmenting multimodal time-series information

研究代表者

中村 友昭 (Nakamura, Tomoaki)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：50723623

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ロボットが取得可能なマルチモーダル情報から概念を学習する手法の開発を目的とし、時系列マルチモーダル情報を用いたロボットによる概念獲得モデルの開発と、共同注意を用いた人とインタラクティブに概念・語意を学習可能な手法の開発を行った。これにより、ロボットのセンサーから得られる時系列の情報を、教師なしで分節・分類することで概念の獲得が可能となった。さらに共同注意を用いることで、従来手法では難しかった乱雑に物体が配置された、実際の家庭環境に近い環境において、物体概念の学習が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットが取得可能なセンサデータはラベル付けされておらず、また連続的な時系列情報である。このようなデータから教師なしでロボットによる学習を実現した。さらに、従来のロボットによる物体学習に関する研究では、教示対象物体以外が存在しない、または存在していたとして少数しかない環境で学習が行われていた。一方、本研究では、より実際の家庭環境に近い、物体が乱雑に置かれているような環境におけるロボットの物体学習を実現した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop a method to learn concepts using multimodal information that can be acquired by a robot. We developed a concept acquisition model using time-series multimodal information, and a method for learning concepts and word meanings interactively using joint attention. This allows unsupervised segmentation and classification of time-series information from the robot's sensors. Furthermore, by using joint attention, robots can learn the concepts in a cluttered environment where it is difficult for robots to learn by conventional methods.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：教師なし学習 物体概念 隠れセミマルコフモデル マルチモーダル

1. 研究開始当初の背景

申請者はこれまで、Latent Dirichlet Allocation (LDA)をベースとして、概念形成アルゴリズムの構築を試みてきた。しかし、LDA を代表とするクラスタリングを目的とした確率モデルでは、ロボットのセンサ情報のような連続的な時系列情報を扱えず、さらにあらかじめモデルの構造を決める必要があるといった問題があった。すなわち、従来のモデルではセンサ情報はあらかじめ分節化し、形成すべき概念に合わせたモデル構造をあらかじめ与えていた。このようなモデルは、設計者が想定した範囲では学習することができるが、それ以外の状況では学習することができない。そこで、これらの問題を解決するため、時系列のセンサ情報を分節化・分類する階層ベイズモデルを構築する。

2. 研究の目的

本研究では、ロボットが取得する連続的なセンサー情報を分節・分類し概念獲得モデルを構築することを目的とする。これにより、ロボットは未知の環境においても、自身の身体を利用して様々な情報を取得し、その環境を理解するために必要な概念を獲得することができる。そのために、本研究では以下の2つの課題を扱った。

- (1) ロボットが取得する連続的なマルチモーダル情報の、どの情報のどの範囲を、いくつに分類すべきかを推定しながら概念を獲得可能な確率モデルの構築
- (2) 人とインタラクティブに学習可能な手法の開発

3. 研究の方法

(1) 時系列マルチモーダル情報の分節・分類に基づく概念学習

図1は提案手法のグラフィカルモデルである。このモデルでは、下位概念モデルにおいて観測情報 o_1 と o_2 の分節・分類によって下位概念を形成し、上位概念モデルにおいて上位概念カテゴリ c_i が下位概念カテゴリ z_1 と z_2 の共起関係を表現する。 c_i を学習する際には、下位概念の共起関係と、上位概念で表される下位概念の時間的な範囲を同時に推定する。本稿において o_1 はロボットが見ている物体画像、 o_2 はロボットが物体に対する動作を行った際の関節角を想定しており、それらを分節・分類することで物体概念・動作概念といった下位概念のカテゴリ系列を形成する。これらの下位概念のカテゴリ系列から、1つの上位概念で表現される下位概念の時間的な範囲を推定することで各物体と動作の対応関係を表現するような上位概念が形成される。続けて下位概念モデルで、上位概念情報を考慮したクラス分類を行うことで下位概念のカテゴリ系列を更新する。更新された下位概念のカテゴリ系列を用いた上位概念モデルによる学習により、新たな上位概念カテゴリと下位概念の時間的な共起範囲を再学習する。これを繰り返すことで下位概念カテゴリと、1つの上位概念で表現される下位概念の時間的な範囲が相互に更新される。

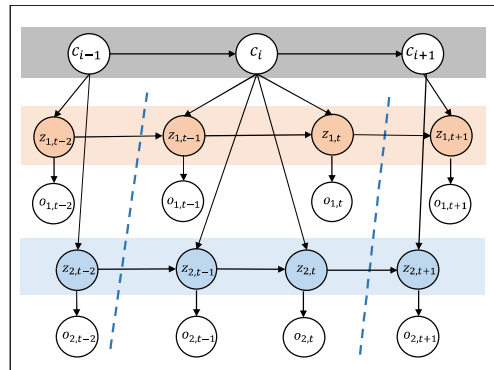


図1. 提案手法のグラフィカルモデル

(2) 共同注意を用いたロボットによる概念・語意学習

提案手法では、共同注意を利用し、複数の物体が存在する複雑な環境(複数物体環境)下での学習を可能とする。共同注意を利用することで指示対象物体は画像の中心付近に存在する可能性が高くなることを想定し、対象物体である確率は、画像の中心を平均としたガウス分布に従うことを仮定する。さらに、複数の物体が置かれたシーンから物体領域候補を抽出し、人から得られる教示発話を手がかりとして、指示対象を推定する。最終的に指示対象の画像と教示発話をカテゴリ分類することによって概念を学習する。

4. 研究成果

(1) 時系列マルチモーダル情報の分節・分類に基づく概念学習

提案手法を用いて、実際にロボットに物体に対して動作を行わせることで時系列マルチモーダル情報を取得し、得られたセンサ情報から提案手法によって概念の学習を行った。下位概念としては物体概念と動作概念を用いた。すなわちロボットは、各物体に対して実行可能な動作の組み合わせを表す上位概念を学習することになる。実験では計7カテゴリ70物体に対し、あらかじめ想定した動作をロボットに行わせた。

提案手法による相互学習により正しく上位概念が学習できたか検証した。まず、提案手法による学習を下位概念モデルの初期値を変えて5回試行し、得られた相互更新前・更新後の上位概念

を用いて、物体情報 z_2 を与えた時に、その物体に対してどのような動作プリミティブ z_1 で構成される動作が実行可能であるかを予測した。

$$P(z_1 | z_2) \propto \sum_z P(z_1, z_2 | z') P(z')$$

実験の結果、相互更新を行わないモデルでの予測精度は0.86であった。一方、提案手法である相互更新されるモデルでの予測精度は0.91となり、相互更新の有効性が確認できた。

(2) 共同注意を用いたロボットによる概念・語意学習

提案手法の有効性を検証するために、ロボットから指示物体までの距離を限定せず、人とロボットが共同注意を行い取得したデータセットを用いた実験を行った。学習に使用するデータセットの撮影は研究室で行い、すでに置いてある物などは動かすことなく、教示したい物体をランダムに配置して撮影した。学習対象物体は、ぬいぐるみ5個・ペットボトル5個・お菓子6個・時計6個・コップ4個の合計26個であり、これらの物体のいずれかが含まれている92シーンを撮影した。

共同注意を用いず、教示発話との整合性のみを考慮し学習した結果、正しく学習できた物体は約5割程度だったのに対して、共同注意を導入したモデルでは約9割の物体を正しく学習することができた。学習ができた物体には、ロボットから離れた壁にかけられた時計や、複数の物体が乱雑に置かれているシーンなど、従来手法では学習が困難であった環境であっても正しく学習することが可能となった。

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 0件）

| | |
|--|--------------------|
| 1. 著者名 Tadahiro Taniguchi, Tomoaki Nakamura, Masahiro Suzuki, Ryo Kuniyasu, Kaede Hayashi, Akira Taniguchi, Takato Horii and Takayuki Nagai | 4. 巻 |
| 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 1-26 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi and Wataru Takano | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 HVGH: Unsupervised Segmentation for High-dimensional Time Series Using Deep Neural Compression and Statistical Generative Model | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI | 6. 最初と最後の頁 1-15 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Tadahiro Tangiuchi, Daichi Mochihashi, Takayuki Nagai, Satoru Uchida, Naoya Inoue, Ichiro Kobayashi, Tomoaki Nakamura, Yoshinobu Hagiwara, Naoto Iwahashi and Tetsunari Inamura | 4. 巻 33 |
| 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) なし | 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 Tomoaki Nakamura, and Takayuki Nagai | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Ensemble-of-Concept Models for Unsupervised Formation of Multiple Categories | 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 1043-1057 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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21件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 6件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Tomoaki Nakamura |
| 2. 発表標題 A Framework for Construction of Multimodal Learning Models |
| 3. 学会等名 IROS2019: Workshop on Deep Probabilistic Generative Models for Cognitive Architecture in Robotics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi and Wataru Takano, |
| 2. 発表標題 High-dimensional Motion Segmentation by Variational Autoencoder and Gaussian Processes |
| 3. 学会等名 IROS2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Ryo Kuniyasu, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, and Tadahiro Taniguchi, |
| 2. 発表標題 Construction of a Multimodal Learning Model Based on Integrating Stochastic Models |
| 3. 学会等名 IROS2019: Workshop on Deep Probabilistic Generative Models for Cognitive Architecture in Robotics, Nov. 2019 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 秋山祐威, 中村友昭 |
| 2. 発表標題 LSTM と逆強化学習を用いた手順指示の学習 |
| 3. 学会等名 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 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉 |
| 2. 発表標題 Slice Samplingに基づく教師なし分節化における推論の高速化 |
| 3. 学会等名 情報論的学習理論ワークショップ |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 工藤仁紀, 中村友昭 |
| 2. 発表標題 複数の物体が存在する環境下でのロボットによる語意学習 |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 國安瞭, 中村友昭, 長井隆行, 谷口忠大 |
| 2. 発表標題 確率モデルとニューラルネットワークの相互作用による教師なしマルチモーダル学習 |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 布川遼太郎, 中村友昭, 長井隆行 |
| 2. 発表標題 HSMを用いた物体と動作の時間的分節化によるロボットの統合概念学習 |
| 3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 國安瞭, 中村友昭, 長井隆行, 谷口忠大 |
| 2. 発表標題 確率モデルの統合によるマルチモーダル学習モデルの構築 |
| 3. 学会等名 人工知能学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉 |
| 2. 発表標題 HVGH: 高次元時系列データの深層圧縮と教師なし分節化 |
| 3. 学会等名 人工知能学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 三村喬生, 中村友昭, 松本惇平, 西条寿夫, 須原哲也, 持橋大地, 南本敬史 |
| 2. 発表標題 霊長類における身体動作時系列の分節推移構造推定 |
| 3. 学会等名 人工知能学会全国大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 布川遼太郎, 宮澤和貴, 中村友昭, 長井隆行, 金子 正秀 |
| 2. 発表標題 時系列マルチモーダル情報の分節・分類に基づく物体と動作の統合概念学習 |
| 3. 学会等名 人工知能学会全国大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 長野匡隼, 中村友昭, 長井隆行, 持橋大地, 小林一郎, 高野渉, 金子正秀 |
| 2. 発表標題 VAEとガウス過程による高次元データの圧縮と同時分節化 |
| 3. 学会等名 情報論的学習理論ワークショップ |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Masatoshi Nagano, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai, Daichi Mochihashi, Ichiro Kobayashi, Masahide Kaneko |
| 2. 発表標題 Sequence Pattern Extraction by Segmenting Time Series Data Using GP-HSMM with Hierarchical Dirichlet Process |
| 3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村友昭 |
| 2. 発表標題 マルチモーダル情報に基づくロボットによる概念・言語獲得 |
| 3. 学会等名 玉川大学 脳科学研究所 社会神経科学共同研究拠点研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 中村友昭 |
| 2. 発表標題 マルチモーダルカテゴリゼーションに基づくロボットによる概念・言語獲得 |
| 3. 学会等名 脳型人工知能とその応用ミニワークショップ (招待講演) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Miyuki Funada, Tomoaki Nakamura, Takayuki Nagai and Masahide Kaneko |
| 2. 発表標題 Analysis of the Effect of Infant-Directed Speech on Mutual Learning of Concepts and Language Based on MLDA and Unsupervised Word Segmentation |
| 3. 学会等名 IROS2017: Workshop on Machine Learning Methods for High-Level Cognitive Capabilities in Robotics (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Tomoaki Nakamura |
| 2. 発表標題 Toward Realization of Intelligent Robots That Can Learn Concepts and Language |
| 3. 学会等名 IROS2017: Workshop on Machine Learning Methods for High-Level Cognitive Capabilities in Robotics (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村友昭 |
| 2. 発表標題 マルチモーダルカテゴリゼーション：階層ベイズモデルに基づくロボットによる概念・言語獲得 |
| 3. 学会等名 第20回情報論的学習理論ワークショップ (招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 布川遼太郎, 宮澤和貴, 中村友昭, 長井隆行, 金子正秀 |
| 2. 発表標題 時系列マルチモーダル情報の分節・分類に基づくロボットによる概念の学習 |
| 3. 学会等名 情報処理学会全国大会 |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中村友昭, 宮澤和貴, 青木達哉, 長井隆行, 金子正秀 |
| 2. 発表標題 複数概念の時間的分節化に基づくロボットによる上位概念の学習 |
| 3. 学会等名 人工知能学会全国大会 |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|