

博士論文概要

論文題目

Learning of Language Grounding
in Robot Behavior by Recurrent Neural Networks
リカレントニューラルネットワークによる
言語と行動のグラウンディングの学習

申請者

山田	竜郎
Tatsuro	YAMADA

表現工学専攻 動的知能表現システム研究

2018年12月

自然言語は、我々人間が自身の要求を他者に伝えるための最も有用な道具であるから、サービスロボットが人間の要求にしたがって、あるいは人間とともに協調して働くためには、これを理解する能力が求められる。ここで、身体を持ち実世界で働くロボットは、単に雑談や質疑応答をこなす能力だけでなく、人間の言語指示を理解し行動をおこなう、あるいは現在の状況や出来事、自身の行動を言語的に説明するといった能力を有することが求められる。すなわち、実世界にグラウンディングされた形式で言語を理解し使用することができなければならない。本研究の目的は、言語のグラウンディングを要する二つの能力、(a) 言語指示に応じてロボットの行動を生成する能力、(b) ロボットの行動を言語的に説明する能力の双方を実現する計算モデルを構築することである。

本研究ではこれらを達成するために解決しなければならない 3 つの課題、(1) 言語の意味の状況依存性、(2) 内容語と機能語双方からなる文章の理解、(3) 言語とロボット行動の双方向変換、に取り組む。以下順を追って説明する。

第一に、(1) 与えられた言語指示を達成する実際の行動はその時の状況に大きく依存する。例えば、「赤いボールを掴め。」という単純な指示の場合でも、それを達成する関節角度の軌道は、赤いボールの位置によってまったく異なる。ロボットは現在の環境の状態を観測することによって、この問題を解決しなければならない。

第二に、(2) 内容語と機能語の双方の理解という課題がある。前者は名詞や動詞のようなら、それ自体実世界に指示対象を持つ語であるのに対し、後者は、接続後や論理語のような、直接明確なグラウンディング対象を持たない語のことであり、他の内容語と組み合わせて使用されることで文章の意味の構成に寄与する。従来のロボットにおけるグラウンディング学習の研究では、主に内容語のグラウンディングのみに焦点がおかれてきたが、我々人間の自然な発話には、機能語も含まれるため、ロボットは内容語と機能語の両方からなる文章を理解し行動できる必要がある。

第三に、(3) 言語表現とロボット自身の行動が双方向に変換できることが求められる。言語の双方向性（または対称性推論バイアス）は、他の霊長類の記号使用には見られない人間特有のものであると言われている。我々がこの双方向性を前提としたコミュニケーションをおこなう以上、効率的なインタラクションのためには、ロボットもこれを身につける必要がある。近年ディープラーニングの技術を用いて、言語指示からシミュレータ環境上のエージェントのナビゲーション行動への変換を学習させる研究が盛んに行われ、高い性能を示している。しかし、行動から言語説明文への変換も同時に実現する研究例はほとんど報告されていない。

これら 3 つの課題を解決するために、本研究は、**Recurrent Neural Network (RNN)**を用いた機械学習モデルを使用する。RNN は時系列的な構造を扱うことが

できるように一般的な **Neural Network (NN)** を拡張したモデルであるため、単語の系列として表現される文章や、関節角度あるいは手先位置の系列として表現されるロボットの行動の学習問題に用いることができる。本研究のアプローチは以下の三点に要約される。

1. **RNN** 型のエンコーダデコーダモデル (**Encoder—decoder model; EDM**) による言語表現とロボット行動との変換のボトムアップ学習。
2. 状況依存性を解決するためのマルチモーダル情報の統合。
3. 双方向性を実現するための言語と行動間での表現共有。

第一に **RNN** 型の **EDM** を用いる。**RNN** 型 **EDM** は元々自然言語処理の分野で対話や翻訳といったタスクのために提案された学習器である。その挙動においては、まずエンコーダ **RNN** が不定長の文章を固定次元のベクトル表現に埋め込む。この潜在表現を対となるデコーダ **RNN** が展開することで、対応する文章(対訳、回答)を生成する。本研究では、このフレームワークを言語表現とロボット行動の変換に応用する。言語と行動の関係性は全てデータからボトムアップに学習されるため、グラウンディングのルールを恣意的に設計することを必要としない。

第二に、**RNN** 型 **EDM** をマルチモーダル情報を受容するモデルに拡張する。この拡張により一つ目の課題であった状況依存性の解決をはかる。モデルは言語指示を視覚情報やロボットの姿勢状態の入力と総合することによって、その時の状況に応じた適切な行動を生成することを学習する。また、これら二つのアプローチを組み合わせることにより、二つ目の課題であった内容語と機能語双方からなる文章の理解も達成される。内容語は先述の通りマルチモーダル情報と統合されることで、現在の状況における意味にしたがって埋め込まれる。機能語は内容語によって得られた **RNN** の潜在表現をさらに操作するものとして作用する。最終的に文章全体の意味が固定次元のベクトルとして表現される。

第三に、言語と行動の双方向変換を達成するため、行動用と言語用の 2 つの異なる **EDM** を用意し、それらの潜在表現を互いに共有するように訓練するという手法をとる。一方の **EDM** は、行動シーケンスを潜在表現ベクトルに埋め込むことを学習する。もう一方の **EDM** も同様の仕方で、言語の潜在表現を抽出することを学習する。この学習プロセスに加えて、行動の表現ベクトルとそれに対応する言語の表現ベクトルが、同次元の共有空間内で互いに近づくように拘束する損失関数を設ける。これによって、学習後のモデルは共有空間を通して、ロボットの行動シーケンスと言語表現を双方向に変換できるようになる。

提案したフレームワークの性能は、(1) 内容語のみを含む指示からロボット行動への変換、(2) 内容語と機能語の両方を含む指示から行動への変換、(3) 言語と行動の双方向変換、の 3 つの学習実験によって評価した。

本論文は、7 つの章から成る。1 章では本研究に至った背景とその目的、および課題を解決するためのアプローチについて概観する。

2章では関連分野における先行研究を紹介し、その中での本研究の立ち位置を明確化する。

3章では、最初の二課題、すなわち(1)状況依存性の解決および(2)内容語・機能語双方の処理を達成するための手法であるマルチモーダル情報受容型のRNN-EDMを提案する。これは前述の第一、第二アプローチを統合したものである。まず一般的なNN, RNN, およびEDMについて順を追って説明したのち、提案手法についてその構造と挙動を詳しく説明する。提案のシステムは、まずエンコーダRNNが言語指示(ロボット行動)を固定次元のベクトルとして潜在空間に埋め込んだのち、それをデコーダRNNが展開することで対応するロボット行動(言語説明文)を生成する。視覚情報や間接角度情報も共にエンコードすることで、言語表現の状況依存性を解決する。

4章では、内容語のみを含む文章からロボットの行動への一方向変換タスクの学習を行った。ここでは、第一課題に照らしてモデルを評価するため、生成すべき行動はその時の視覚入力に依存して異なるようにした。設定された卓上のベルを叩いたり指さしたりするタスクにおいて、実際に提案システムは、言語、視覚、行動の関係を体系的に学習し、可能な状況の1/3の経験から未学習状況でも適切な行動を生成する汎化能力を達成した。

5章では、内容語と機能語の両方を含む文章からロボットの行動への一方向変換をタスクとして設計した。すなわち、第二の課題であった内容語と機能語双方からなる文章の理解に照らして評価した。機能語の一例として特に、“not”, “and”, “or”といった論理語が含まれるタスクを設定した。モデルは実際に、これらの語を含む旗揚げタスクを学習することができた。学習後のモデルの内部表現を解析したところ、内容語は視覚情報や間接角度情報と統合された形で表現され、論理語はその語の示す論理操作に従った形で表現された。一例として、指示動作の否定を表す“don't”は、内部表現の非線形な変換として作用し、直交する指示を同じ意味を持つ文同士として表現することを可能とした。

6章では、第三の課題であった双方向変換能力を付与するための手法である表現共有学習による拡張を提案し、実際に言語と行動の双方向変換の学習実験をおこなった。学習後のモデルは、視覚情報として与えられるそのときの状況に即して、言語と行動を双方向に変換することに成功した。内部表現を解析したところ、文章と、それに意味的に対応する行動シーケンスが、共有空間において互いに近傍に埋め込まれていることが確認された。

7章では本研究が、実世界にグラウンドされたロボットの言語使用をどのような側面において達成したかを総括し、残された課題と今後の研究の展望について述べる。

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

山田 竜郎 印

(2019年 2月現在)

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	<p>[International Journal Articles]</p> <p>[1] Tatsuro Yamada, Hiroyuki Matsunaga, Tetsuya Ogata, "Paired Recurrent Autoencoders for Bidirectional Translation between Robot Actions and Linguistic Descriptions," <i>IEEE Robotics and Automation Letters (RA-L)</i>, Vol. 3, Issue 4, 2018, July.</p> <p>[2] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Representation Learning of Logic Words by an RNN: From Word Sequences to Robot Actions," <i>Frontiers in Neurorobotics</i>, Vol. 11, Article 70, 2017, December.</p> <p>[3] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Dynamical Integration of Language and Behavior in a Recurrent Neural Network for Human-Robot Interaction," <i>Frontiers in Neurorobotics</i>, Vol. 10, Article 5, 2016, July.</p>
講演	<p>[International Conferences]</p> <p>[1] Tatsuro Yamada, Hiroyuki Matsunaga, and Tetsuya Ogata, "Paired Recurrent Autoencoders for Bidirectional Translation between Robot Actions and Linguistic Descriptions," <i>Proceedings of 2018 IEEE/RAS International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2018)</i>, Madrid, Spain, October, 2018.</p> <p>[2] Tatsuro Yamada, Tetsuro Kitahara, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Four-part Harmonization: Comparison of a Bayesian Network and a Recurrent Neural Network," <i>Proceedings of the 13th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR2017)</i>, pp.137-148, Porto, Portugal, September 2017.</p> <p>[3] Tatsuro Yamada, Saki Ito, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Learning of Labeling Room Space for Mobile Robots Based on Visual Motor Experience," In <i>Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2017, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)</i>, Alessandra Lintas et al. (Eds.), Vol. 10613, pp. 35-42, 2017 (<i>Proceedings of the 26th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2017)</i>, Alghero, Italy, September 2017).</p> <p>[4] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Dynamical Linking of Positive and Negative Sentences to Goal-oriented Robot Behavior by Hierarchical RNN," In <i>Artificial Neural Networks and Machine Learning – ICANN 2016, Lecture Notes in Computer Science (LNCS)</i>, Alessandro E.P. Villa et al. (Eds.), Vol. 9886, pp. 339–346, 2016 (<i>Proceedings of the 25th International Conference on Artificial Neural Networks (ICANN 2016)</i>, Barcelona, Spain, September 2016).</p> <p>[5] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, "Attractor Representations of Language-behavior Structure in a Recurrent Neural Network for Human-robot Interaction," In <i>Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2015)</i>, pp. 4179–4184, Hamburg, Germany, September 2015.</p> <p>[6] Shingo Murata, Saki Tomioka, Ryoichi Nakajo, Tatsuro Yamada, Hiroaki Arie, Tetsuya Ogata, and Shigeki Sugano, "Predictive Learning with Uncertainty Estimation for Modeling Infants' Cognitive Development with Caregivers: A Neurorobotics Experiment," In <i>Proceedings of the Fifth Joint IEEE International Conference on Development and Learning and on Epigenetic Robotics (ICDL-EpiRob 2015)</i>, pp. 302–307, Providence, USA, August 2015.</p>

早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
講演	<p>[International Conference Abstract]</p> <p>[1] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, “Representation Learning of Logical Words via Seq2seq Learning from Linguistic Instructions to Robot Actions,” <i>Workshop on Representation Learning for Human and Robot Cognition, The 5th International Conference on Human-Agent Interaction (HAI 2017)</i>, Bielefeld, Germany, October 2017</p> <p>[2] Tatsuro Yamada, Shingo Murata, Hiroaki Arie, and Tetsuya Ogata, “Logically Complex Symbol Grounding for Interactive Robots by Seq2seq Learning with an LSTM-RNN,” In <i>The 30th Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS2016)</i>, Barcelona, Spain, December 2016.</p> <p>[Domestic Conferences]</p> <p>[1] 山田竜郎, 松永寛之, 尾形哲也, “共有表現の学習によるロボット動作と指示説明文の双方向変換,” 第 32 回人工知能学会全国大会, 鹿児島, 2018 年 6 月.</p> <p>[2] 澤弘樹, 山田竜郎, 村田真悟, 森裕紀, 尾形哲也, 菅野重樹, “RNN を備えた二台ロボット間インタラクションの複雑性解析,” 情報処理学会 第 80 回全国大会, 東京, 2018 年 3 月.</p> <p>[3] 張耀宇, 中條亨一, 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也, “神経回路モデルにおける追加学習手法に関する検討,” 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, 宮城, 2017 年 12 月.</p> <p>[4] 伊藤彩貴, 山田竜郎, 有江浩明, 尾形哲也, “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,” 第 35 回日本ロボット学会 学術講演会, 埼玉, 2017 年 9 月</p> <p>[5] 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也, “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,” 第 31 回人工知能学会全国大会, 愛知, 2017 年 5 月.</p> <p>[6] 山田竜郎, 北原鉄朗, 有江浩明, 尾形哲也, “LSTM を用いた四声体和声の生成,” 第 31 回人工知能学会全国大会, 愛知, 2017 年 5 月.</p> <p>[7] 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也, “階層型 RNN を用いたロボットの旗揚げタスクにおける肯定及び否定指示の理解,” 第 30 回人工知能学会全国大会, 福岡, 2016 年 6 月.</p> <p>[8] 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也, “ターンテイキングタスクを行うロボットのための神経回路力学系上における言語と行動の動的統合,” 第 33 回日本ロボット学会 学術講演会, 1B3-05, 東京, 2015 年 9 月.</p> <p>[9] 富岡咲希, 村田真悟, 中條亨一, 山田竜郎, 有江浩明, 尾形哲也, 菅野重樹, “養育者-幼児間インタラクションの認知ロボティクスモデル —予測学習とその不確実性に基づく注意対象の遷移,” 日本赤ちゃん学会 第 15 回学術集会, 香川, 2015 年 6 月.</p> <p>[10] 山田竜郎, 村田真悟, 有江浩明, 尾形哲也, “人間ロボットインタラクションを目的とした神経回路による言語と行動のアトラクタ表現,” 情報処理学会 第 77 回全国大会, 5T-01, 京都, 2015 年 3 月.</p>