

氏名	沓澤 京
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第 1165 号
学位授与年月日	令和2年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Learning of Motion Generation for Various Situations based on Sequence-to-Sequence Models (Sequence-to-Sequence モデルに基づく多様な状況への動作生成の学習)
論文審査委員	委員長 准教授 辻 俊明 委員 教授 久野 義徳 委員 教授 金子 裕良 委員 教授 矢口 裕之

## 論文の内容の要旨

今後、ロボットの適用範囲は人間の日常作業（調理や掃除など）に広がると期待される。日常作業においてロボットは多様な状況に合わせて動作を生成する必要がある。そのためには、多様な状況に基づいて指令値を生成するような動作生成器が必要になる。

動作生成器は現在の状態に加えて、制約やユーザからの指示などの外部からの情報（本学位論文では external orders と呼称）も受け取る必要がある。このとき、日常作業で起こりうる状況の多様性を考えると、external orders は極めて多様なかたちがありうる。例えばロボットの制約を考えたとき、速度制限、トルク制限、可動範囲など多様な種類がある。あるいは動作の目標位置を表現するとき、座標で表現されたり画像で表現されたりと、表現形式も多様なものが考えられる。本論文では「動作生成器がどのように多様な external orders を扱うか？」という問題の解決を目指す。

様々な external orders を扱える動作生成手法には、大きく分けると数理最適化に基づく方法と機械学習に基づく方法がある。数式表現されないデータを扱える点で後者の方法が望ましいが、学習時に与えた範囲の external orders しか扱えないという問題がある。この問題は訓練時に external orders と軌道との対応関係を直接学習させることで生じている。代わりに、特定の external orders に依存しない中間表現と軌道との対応関係を学習させることによって上記問題を低減できる。すると動作生成モデルの汎用性は中間表現の表現能力に依存するようになるものの、external orders の具体的形式についての制限は大きく緩和できる。そのような中間表現として、本学位論文では軌道の潜在表現を用いる。すなわち、軌道の潜在表現に基づいた動作生成モデルを訓練することで上記問題の解決を試みる。具体的には、軌道の潜在表現が抽出でき、かつ軌道のオンライン生成が可能な手法として、sequence-to-sequence (seq2seq) モデルを用いる。このモデルはエンコーダとデコーダという2つのニューラルネットワークから構成され、このうちデコーダは潜在表現に基づく動作生成モデルとして利用できる。

しかし、seq2seq モデルを動作生成に利用するためにはいくつかの課題を解決する必要がある。そこで本学位論文では、seq2seq モデルが多様な external orders を扱うために必要な課題の解決をおこなった。

ひとつ目の課題は、多様な軌道の学習方法である。多様な external orders を扱うためには、それらに対応する軌道の潜在表現を学習させる必要がある。しかし環境に制約や不連続性があると、十分に多様な軌道を学習させるのは難しい。本論文では、軌道変形に基づいた訓練方法を提案し、この課題を解決した。

ふたつ目の課題は、獲得された潜在表現と external orders との関連付けである。seq2seq モデルが獲得した軌道の潜在表現は解釈性が低く、どのような軌道と対応づいているか自明でない。そのため、手動で特定の external orders と関連付けるのは困難である。本論文では、数式表現された external orders と数値表現された external orders という2種類の表現形式について、潜在表現と関連付ける手法を提案した。ここで、数式表現された external orders とは目的関数などを指し、数値表現された external orders とは人間からの教示データなどを指す。

まず数式表現された external orders に対しては、誤差逆伝播法と勾配法に基づいた最適化手法を提案した。この手法によって、数式表現された external orders (すなわち目的関数) を最小化するような潜在表現を求めることができる。検証では、終端位置の制約を様々に変えた目的関数や、それに加えて速度制限がある場合の目的関数を用いた。このように値も形式も様々な複数の external orders を用いて、すべてのケースで適切な軌道が得られることを確認した。また、潜在表現を最適化する手法によって、軌道を勾配法で直接最適化する場合よりも良い軌道が得られることを確認した。続いて数値表現された external orders に対しては、少数の教示データから external orders と潜在表現とを対応付ける手法を提案した。external orders と潜在表現とを対応付けるようなモデルを追加で訓練することで、数値表現された external orders を扱える動作生成器が構成できる。

上記の内容に加えて、訓練されたモデルの頑健性も検証した。動作生成モデルの頑健性は、実際の環境でパラメータ変動や予期せぬ外乱等が生じうることを考えると重要な能力である。結果的に、環境のパラメータ変動を与えずに訓練した場合でも、動作生成モデルは環境のパラメータ変動に対して頑健(すなわち、潜在表現に表現されたとおりの軌道が再現可能)なことが確認された。また、seq2seq モデルの訓練時に多くの軌道を学習させていれば、数値表現された external orders が少数であっても安定的に動作生成できることが確認された。

本学位論文の成果によって、seq2seq モデルに多様な軌道を学習でき、さらに獲得された潜在表現と多様な external orders とを対応付けることが可能になった。加えて、訓練後の動作生成モデルが環境のパラメータ変動などに頑健なことが確認された。これらの技術によって、多様な状況に対応可能な動作生成モデルが実現されたと結論付ける。

## 論文の審査結果の要旨

当学位論文審査委員会は、論文発表会を令和2年1月22日（水）14時40分～16時10分に、工学部棟12番教室にて公開で開催し、論文内容の審査を行った。その結果、研究成果が国際的水準に達していること、申請者の本学問分野における理解度が十分であることが確認された。審査結果を以下に要約する。

ロボットが実環境で自律的に動作するためには、ロボットの置かれている状況を適切に把握したうえで動作を生成するメカニズムが必要である。しかし現在の状況を把握するためにはロボットの内部情報に加えて、制約やユーザからの指示などの外部の情報（本論文では external order と定義）を受け取る必要がある。外部からの情報は様々な形式を取る可能性があるため、多様な形式の external order に対してどのように対処するか、が重要課題となる。そこで本論文では、external order とニューラルネットワークの潜在表現を対応付けることによってロボットが多様な形式の external order を扱うことを目的とする。第1章はその研究背景と提案の趣旨を述べるものである。

本論文の目的を達成するための主要課題のひとつ目は、ロボットのとりうる多様な軌道をいかに学習するか、である。そのためには多次元動作を低次元化して扱う必要がある。そこで第2章ではロボットの動作を低次元化された潜在表現に変換するための基礎理論として sequence-to-sequence (seq2seq) モデルを用いた動作生成の手法を述べている。本モデルは、時系列情報をニューラルネットワークに基づくエンコーダで次元圧縮した後にデコーダで展開することによって、時系列情報から時系列情報への変換を行うものである。何らかの制約が与えられたロボットの軌道を本モデルに予め学習させることによって、どのような入力軌道を与えてもデコーダがその制約を満たした軌道に変形した形で出力するようになる。この特性を応用して、お好み焼きをひっくり返すという、強度に動力的に制約される動作をロボットに学習させる試験を行った。その結果、お好み焼きが滑り落ちずにひっくり返される様々なパターンの軌道を自律的に生成できるようになることが確認された。

seq2seq モデルが動力的制約を学習して自律的に軌道を生成できることは確認されたが、一例のみの検証であるため様々な環境に対処可能か、環境の変化に頑健であるかが不明である。そこで第3章ではお好み焼きをフライパンの上で揺すって移動する、という動作を対象にすることで、不連続な変化を伴う環境に対処可能か、環境の摩擦等が変動した場合に seq2seq モデルが頑健性を持つかを確認している。静摩擦による拘束と動摩擦による拘束が不連続に切り替わることから、本動作は学習の難易度が高く、過学習に陥るリスクが高い。その問題を解決するために自由運動時の軌道生成と環境との接触を考慮した軌道生成を順に学習するカリキュラム学習を導入した。その結果フライパンの摩擦に関わらずお好み焼きの位置制御の誤差を低減できることが確認された。

ふたつ目の主要課題は、機械学習により獲得された潜在表現と external order とをいかに関連付けるか、である。seq2seq モデルによって学習された軌道の潜在表現は解釈性が低いため、手動で特定の external order と関連付けるのは困難である。そこで第4章と第5章でその方法論を議論している。特に数式表現の external order と数値表現の external order という2種類の表現形式について、潜在表現と関連付ける手法を提案している。ここで、数式表現の external order の典型例は目的関数であり、数値表現の external order の典型例は人間からの教示データである。第4章では数式表現された external order と潜在変数を対応付ける手法を述べている。目的関数が最小となるよう潜在変数を最適化する誤差逆伝播アルゴリズムを開発することにより、数式で表される目的関数と潜在変数を対応付けることが可能になる。お好み焼きをひっくり返す軌道が潜在変数の最適化によって補正可能であることがシミュレーションと実験の結果によって実

証された。本手法は低次元化された潜在変数の空間で最適化を行うことによって演算量を削減できるという効果も持つ。

そして第5章は、数値表現された external order と潜在表現とを対応付ける手法を提案している。数値的に表される external order の最たる例である画像を入力とし、潜在変数を出力とするニューラルネットワークを構築し、追加でその個所のみでの学習を行うことで少数の教示データを追加するのみで数値表現された external order に対応することが可能となった。

本学位論文の成果によって、seq2seq モデルに多様な軌道を学習でき、さらに獲得された潜在表現と多様な external orders とを対応付けることが可能になった。加えて、訓練後の動作生成モデルが環境のパラメータ変動などに頑健なことが確認された。これらの技術によって、多様な状況に対応可能な動作生成モデルの基盤が構築されたと結論付けられる。以上の内容はロボットの自律性を高める技術の基礎をなすものであり、本論文は学術的に意義のある研究成果であると評価される。さらに本研究の成果は、査読付き国際論文誌に2編の筆頭論文として発表され、本分野でのトップカンファレンスでの国際会議発表が2件なされるなど、十分な研究成果が得られている。したがって本論文は博士（工学）の学位論文として価値があるものと判断し、「合格」と判定した。