

博士論文の内容の要旨

氏名	田中大輔
学位名	博士（工学）
学位授与年月日	2022年3月20日
論文題目	柔軟物操作における形状推定及び予測に基づいた操作行動生成に関する研究

(博士論文の内容の要旨)

現代では自動車産業のような主要な製造業だけでなく、サービス業や食品産業などの今までは人手によるところが多かった業界でロボットの導入が検討されている。その中で、サービス業や食品業界では、一般的に工場で行うような規格化された部品ではなく、形が不揃いで、柔らかく変形しやすい柔軟物を扱うことが多い。これらの業界の作業をロボットに代替させるには、ロボットの柔軟物の操作技能が求められる。しかし、柔軟物を取り扱うような作業のロボットによる完全な自動化の例は未だに少ない。

一方で、人間は取り扱う物体が剛体であろうが、柔軟物であろうが、器用に操ることが出来る。そこで、本研究では人がよく通に行う「操作中の柔軟物の形状をしながら目線の形状に移行させる」という行動をロボットに行わせることを研究の目的とした。

柔軟物を操作するために、目線とする形状は与えられる、対象物を掴む環境は外界センサーで観測可能である、という2点を操作時の前提条件とした。その前提条件下で目線とする形状への操作を実現するために、本研究では柔軟物操作を *planning scale* と *manipulation scale* という2つの処理に分解して考えることとした。*planning scale* では、現在の形状から目線形状へ変形させるための操作と中間形状を計画する。*manipulation scale* では、*planning scale* で計画された中間形状へ近づけられるように、操作中の形状をしながら操作を行う。そして、*planning scale* と *manipulation scale* を繰り返し行い、目線とする形状へ変形させる。このアプローチを実現するためには、形状推定、操作計画、形状予測、操作修正の4つの要素技術が必要であった。

はじめに、形状推定手法の構築を行った。柔軟物の形状を表現する表現方法としては、形状を細かく表現可能なメッシュ表現を採用した。そして、センサーデータから対象物の形状を、メッシュ表現で、且つ短時間で推定する手法として、ニューラルネットワーク (NN) ベースの手法 *Voxel-to-Mesh (VtM) method* を提案した。そして、対象物の事前知識を考慮した *Refinement* 処理により、*VtM method* の推定結果に基づく確率的な制約とトポロジー構造による制約との両方を満たすようなメッシュ表現を得た。実験により、矩形布の折り畳みタスクにおいて、セルフオクルージョンが発生するような環境で操作中の形状を推定可能であることを確認した。また、異なる素材によって、推定精度が大きく落ちないことがわかった。実行速度は約 6.8 [fps] であった。

次に *planning scale* で必要となる操作計画手法の構築を行った。ここでは操作計画手法として、*pEMD method* を提案した。シミュレーション環境での検証では、現在の形状と目線形状を表す2つのメッシュ表現から、目線形状へ変形させるための操作が得られた。しかし、環境での検証では、シミュレーション環境の場合ほどの精度で目線形状に近づけられなかった。この原因は、*pEMD method* が操作計画時に想定している操作環境と世界の操作環境とのズレにあった。

環境で有効な操作を実現するアプローチの一つとして、物理シミュレーションの挙動を世界の挙動と合わせた上で、操作軌道の探索を行った。物理シミュレーションの挙動を世界に合わせるために、世界の柔軟物に対して3種類の計測を行い、その結果を用いてシミュレーションの物理パラメータを設定した。そして、そのシミュレーション環境を利用して、操作軌道の探索を行った。実験により、Tシャツ、タオル、パンツの3種類の布製品の折り畳みを現した。ここで得られた操作軌道は、そのまま環境で行って有効な操作となっていた。

次に、*manipulation scale* を実現するための、形状予測手法および形状予測をベースとした操作修正手法を提案した。形状予測問題を取り扱うために、把持状態をメッシュ表現、手先移動量列による操作の表現について述べた。次に、それらの表現方法を用いた、NNベースの形状予測ネットワークを提案した。形状予測ネットワークは現在の形状に対して、その後の操作を行ったときの形状変化を出力するネットワークである。そして、その形状予測の結果を利用した操作修正処理のアルゴリズムを構築した。操作修正アルゴリズムは、予測される操作後の形状を目

形状に近づけられるような操作へ修正する のである。そして、シミュレーション、機の両環境にて、形状予測、操作修正の処理が動作することを確認した。実験結果を経て、環境で実際に運用していくには、各機能をさらに密に連携させる必要があることを述べた。

最後に、本研究の今後の発展として、「衣服などの変形が複雑な対象への適用」、「動的な変形考慮した操作の現」、「把持以外の接触状態を利用した操作への適用」の3点をあげ、それぞれのテーマで考えるべき問題についてまとめた。