

令和 2 年 6 月 25 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2019

課題番号：18K19809

研究課題名（和文）不均一性・弾性・異方性を伴う紐状柔軟物の操作能力の確立

研究課題名（英文）Establishing manipulation ability of string-like flexible objects with non-uniformity, elasticity and anisotropy

研究代表者

山崎 公俊（Yamazaki, Kimitoshi）

信州大学・学術研究院工学系・准教授

研究者番号：00521254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、紐状柔軟物を自動機械で扱わせるための方法論の提案である。紐状柔軟物の状態変化を計算機上で表現するために、敵対的生成ネットワークを用いた状態表現手法を提案・検証した。これにより、紐状柔軟物の形状状態を比較的次元の空間で表現できる可能性を明らかにした。また、その空間内で紐状柔軟物の操作方法を決めるためのアルゴリズムを考案した。一方で、紐操作を想定したマニピュレータの高速な動作生成手法を提案・検証した。このほかにも、表面性状が様々な紐状柔軟物を操るためのロボットハンドシステムおよび操り方を提案・実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、紐状柔軟物の計算機上での表現法を再構築した。これにより、動かされている最中の紐の形状変化を少ない計算リソースで創造することができるようになった。すなわち、操作中に紐の形状変化をオンラインで推測する用途に用いることができる。物理シミュレーションも同様の使い方は可能であるが、オンライン性に乏しい。その意味で、紐状柔軟物を操作する自動機械が、操作対象の状態を予測・推定しながら、臨機応変に操作を加えられる基盤を新たに構築したと言える。今後、状態表現を高精度化するとともに、様々な紐状柔軟物の操作に適用していくことで、世の中にある紐状柔軟物操作の自動化を推進できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, we propose a method for handling a string-like flexible object by autonomous robots. In order to represent the state change of a string-like flexible object on a computer, we proposed and verified a state representation method using Generative Adversarial Network. As a result, it was clarified that the shape of the string-like flexible object could be expressed in a relatively low-dimensional feature space. In addition, we devised an algorithm for deciding how to manipulate a string-like flexible object in that space. On the other hand, we proposed and verified a high-speed motion generation method for manipulators assuming string manipulation. In addition, we proposed and demonstrated a robot hand system and a method for manipulating flexible objects with various surface properties.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：紐状柔軟物 操作 生成モデル

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

紐やケーブルなどの紐状柔軟物は、様々な場面に存在しており、様々な用途がある。例えば、紐は複数の物品を縛る目的に使えるし、ケーブルは電源からの電流や電気信号等を機器に伝える目的で利用される。もし、紐状柔軟物を揃える・解く・束ねる・はめ込むなどの作業を自動化できれば、様々な場面で役立つと思われる。例えば、家電製品の内部には多くのケーブルが組み込まれており、製造の過程でそれらを製品内部にはめ込むことは手間のかかる作業のため、自動化が望まれている。一方、

従来から、自動機械に紐状柔軟物を操作させることを目的とした研究がある。結び目理論などの学術的な興味深さもあり、多くの研究では1本の柔らかな紐を対象にしている。そして、形状を論理的に記述したり、所望の形状に移行することを目的としている。しかしながら、従来研究での暗黙的な「問題設定の単純化」が、現実的な紐状柔軟物操作との隔たりを大きなままにしていると考えている。具体的には次のようである。

- 紐状柔軟物の組成の複雑さ：柔らかく、硬さが一様の紐を対象としている。しかしながら、現実世界で利用されている線状柔軟物は多様な硬さ・太さを持っている。また、断面が扁平形状であったり、曲げグセがあるケーブルなどは、位置や方向によって曲げやすさが異なる。よって、従来の研究成果に基づいて決めた操作方法を実行しても、所望の形状に移行できない紐状柔軟物が多く存在する。
- 存在条件の複雑さ：単一の紐が比較的単純な初期形状で存在していることを想定する。もちろん、単体・単純形状を想定した研究成果をより複雑な状態へ適用していくアプローチも考えられるが、従来手法では、紐の複雑な形状を記述することはできても、その紐に加えられる操作の種類が乏しいため、目標形状へ移行できる操作方法を探すことが難しい。

### 2. 研究の目的

自動機械に紐状柔軟物を操作させるときに必要な能力(以後、操作能力と呼ぶ)を確立することである。例えば、一部に曲げグセがついていたり、扁平形状であり曲げやすさに異方性があったり、弾性が高く押さえ手を放すと形状が元に戻るなどの紐状物体を、操作対象とできるようにしたい。そして、曲げグセのついた紐状柔軟物を曲げグセに沿って折り曲げて束ねたり、曲げやすさに異方性があり弾性が強いケーブルを所定の場所に嵌め込む、などの作業を実現したい。これらの作業は、日常場面や製造現場などで必要とされる頻度が高い一方で、従来の研究開発では自動化の実現例がほとんど見られない。

### 3. 研究の方法

上記目的を達成するために、三つの要素を揃える必要があると考える。一つ目は、紐状柔軟物の操作に関する知識である、二つ目は、知識を用いた操作手順と操作方法の計画能力である。三つ目は、ロボットの操作実行能力である。以下では、各々に対する研究方法をまとめる。

- A) 操作の複雑さを表現する指標：紐状柔軟物の新たな知識表現の手法を研究する。紐の形状によらず、紐の状態を低次元空間で表現できる方法を構築する。なお、その低次元空間内では、二つの紐の形状が似ている場合、それを表現する低次元空間上での点も、距離が近くなるものとする。
- B) 操作手順と操作方法の計画：紐状柔軟物に対する作業は、「把持 移動と操り 開放」を1セットとする操作を、適切な手順で何セットかおこなうことで成し遂げられる。そこで、紐状柔軟物の入力形状と目標形状から、必要な操作手順と各手順での操作内容を出力できる手法を研究する。上記A)で構築した表現空間において、適切な形状変移を実現する操作軌道を発見することで、操作計画を達成する。
- C) ロボットハンドの機構とマニピュレーション：効率的な操作が可能なロボットハンドを考案する。例えば、紐を把持した時にハンドの中で摩擦を調整し、操作入力 of 複雑さを緩和する方法を研究する。また、マニピュレータの動きを適切に生成する方法についても検討する。

### 4. 研究成果

紐状柔軟物の形状を表現する低次元空間(以後、表現空間と呼ぶ)を構築することに成功した。この空間では、ある紐状柔軟物の形状は一つの点で表現される。紐状柔軟物を所望の形状へ遷移させるには、現在の形状から目標の形状までをつなぐ一本の経路を、この表現空間の中で見つけ出せばよいようにした。この方式と従来方式との違いは次のようである。従来方式では、位相を定義するなどにより紐の形状をシンボル化し、結び目を作る作業などを達成してきた。これらの方式には、状態数を位相的に意味あるものに限定することで、状態認識や操作計画の見通しを立て易くする効果がある。しかしながら、幾何学的形状を陽に扱えないため、実際に紐をどう動かすかの操作計画器が別途必要である。一方で提案方式では、紐の幾何学的形状を直接的に扱うので、操作計画時に詳細な形状の違いを考慮できる。また、別の従来方式として、シミュレーションにより紐の時系列的形状変化を表現可能にして、操作計画に利用することがおこなわれてきた。この方式は紐の幾何形状を詳細に表現できるが、操作に伴う形状変化を時系列順に模擬することが必要になる。よって、操作計画において多様な形状変化をシミュレートするには、多くの計算時間もしくは多数の計算資源を必要とする。一方で提案方式では、操作計画を低次元の表現

空間で適切な経路を見つける問題に落とし込むため、操作方法を効率的に探索できる。

上記の表現空間を生成するために、GANの枠組みを用いた。紐状柔軟物の状態を、紐を定数個に分割した点の座標で表現し、潜在空間から得た1点が、一つの紐の形状を表すようにした。次に、潜在空間において、ある操作入力（例：端点の一つ把持して直線状に引っ張る）を加えたときに、それに相当する形状変化を潜在空間内で探索して探す方法を検討した。Rapidly - exploring random treesのアルゴリズムをベースとして、高次元空間から適切な経路を探す方法を実装し、操作にともなう適切な形状変移を創造できる見込みを得た。本研究に派生した活動として、ここで得た知見を利用して、フレキシブルフラットケーブルの配線作業などを試みた。特殊なエンドエフェクタを必要としたものの、適切な手順を入力すれば、配線が可能であることを確認した。

一方で、マニピュレータの操作に関して、効率的な動作生成法も研究した。様々なマニピュレータの動きをあらかじめ記録しておき、そこから適切な姿勢列を探索することで、目的の手先姿勢を実現する方法を提案した。このとき、単に探索するのみでは、手先の到達姿勢と目標手先姿勢の違いが大きくなる可能性がある。そこで、マニピュレータの動きを微修正する方式として、ヤコビ行列に当たる部分をニューラルネットワーク化し、計算を高速化する方法を提案した。4自由度程度のマニピュレータを用いたリーチング問題を解き、有効性を確かめた。

また、ロボットハンドについては、摩擦可変表面機構を新たに提案し、摩擦状態をセンシングおよび制御できる方法を提案した。チューブを掴んでいる最中に、その先端位置までハンドをすべらせて掴み上げるといった動作が実現可能であることを確認した。

#### 関連文献

- [1] Seita Noji, Akihiko Yamaguchi, Yosuke Suzuki, Tokuo Tsuji, and Tetsuyou Watanabe, "Sensing and Control of Friction Mode for Contact Area Variable Surfaces (Friction-Variable Surface Structure)," in Proc. of IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft) pp.215-222, 2020.
- [2] 山崎公俊, 「不定形物操作のための知能システムと行動学習」, 学会誌「人工知能」, Vol. 35, No. 1, pp 40 - 46, 2020.
- [3] 野尻晴太, 山口明彦, 鈴木陽介, 辻徳生, 渡辺哲陽, 「摩擦可変表面機構の摩擦状態のセンシングと制御」, ロボティクスシンポジウム論文集, pp.19-24, 2020.
- [4] 山崎公俊, 「不定形物操作に向けた知能ロボット技術」, 一般社団法人中部圏イノベーション推進機構, 第8回アカデミックナイト, 2020年1月23日.
- [5] 山崎公俊, 「自律ロボットの物体認識・行動計画・システム統合」, 信州大学ものづくり振興会 第2回技術講演会, 2019年10月16日.
- [6] 山崎公俊, 「物体操作をおこなう自律型ロボットの認識・行動計画・システム統合」, 第120回ロボット工学セミナー, 2019年6月27日.
- [7] 山崎公俊, 「ニューラルネットワークによる線形写像行列の算出に基づくマニピュレータの動作生成」, 第24回ロボティクスシンポジウム, pp.32-33, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1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 Seita Noji, Akihiko Yamaguchi, Yosuke Suzuki, Tokuo Tsuji, and Tetsuyou Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Sensing and Control of Friction Mode for Contact Area Variable Surfaces (Friction-Variable Surface Structure)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. of IEEE International Conference on Soft Robotics	6. 最初と最後の頁 215-222
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 山崎公俊	4. 巻 1
2. 論文標題 不定形物操作のための知能システムと行動学習	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 学会誌「人工知能」	6. 最初と最後の頁 40-46
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 無
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4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野尻晴太
2. 発表標題 摩擦可変表面機構の摩擦状態のセンシングと制御
3. 学会等名 ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎公俊
2. 発表標題 ニューラルネットワークによる線形写像行列の算出に基づくマニピュレータの動作生成
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎公俊
2. 発表標題 不定形物操作に向けた知能ロボット技術
3. 学会等名 一般社団法人中部圏イノベーション推進機構, 第8回アカデミックナイト(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎公俊
2. 発表標題 自律ロボットの物体認識・行動計画・システム統合
3. 学会等名 信州大学ものづくり振興会 第2回技術講演会(招待講演)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 山崎公俊他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 528
3. 書名 センサフュージョン技術の開発と応用事例	

1. 著者名 西田健, 山崎公俊他	4. 発行年 2018年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 287
3. 書名 実用ロボット開発のためのROSプログラミング	

〔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
研究 分 担 者	渡辺 哲陽  (Watanabe Tetsuyou)  (80363125)	金沢大学・フロンティア工学系・教授     (13301)	