

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K19791

研究課題名（和文）紐状柔軟物操作の低次元表現の構築法および動作計画法の確立

研究課題名（英文）Establishment of a method for constructing a low-dimensional representation of deformable linear object and a method for motion planning

研究代表者

山崎 公俊（Yamazaki, Kimitoshi）

信州大学・学術研究院工学系・教授

研究者番号：00521254

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、自動機械に組み込むための紐状柔軟物の操作に関する知識表現の方法および動作計画法の確立を目指した。そして、柔軟物の形状を低次元空間での表現に落とし込む方法と、その低次元空間を利用して所望の形状変化を創造する方法を組み合わせた。GANを用いた潜在空間の構築、任意の紐状柔軟物の形状を潜在空間から見つけ出す方法、所望の紐状柔軟物の連続的な形状変化を潜在空間上で見つけ出す方法をそれぞれ提案し、シミュレーションを主とした検証により適切性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は次のことを示唆している。(1)紐状柔軟物の形状は抽象化した変数空間上で表現することができる。それにより、紐状柔軟物の形状や性質が複雑になるほど表現するためのコストが高くなるという問題を避けられる可能性がある。(2)入力形状を目標形状へ遷移させるための操作を得る方法として、表現空間内で様々な経路を作成しておきそれらを接続・修正する、という方針は実現する。それにより操作計画を高速に実現するとともに、紐状柔軟物の物理特性の違いに対応できる可能性がある。これらにより、現実世界において自動機械の操作対象となりうる紐状柔軟物を大幅に拡張できる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to establish a method of knowledge representation and motion planning for the manipulation of deformable linear objects (DLO) for automatic machines. We proposed a method for constructing a latent space using GAN, a method for finding the shape of an arbitrary DLO shape in the latent space, and a method for finding the continuous shape change of a desired DLO in the latent space. The appropriateness of the proposed methods was confirmed through verification mainly by simulation.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：紐状柔軟物 操作 潜在空間 形状表現 操作計画

## 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、従来の紐状柔軟物の研究の方向性は、現実社会での大勢の要望とは必ずしも一致しない

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、自動機械に組み込むための紐状柔軟物の操作に関する知識表現の方法および動作計画方法の確立である。柔軟物の形状を低次元空間での表現に落とし込む方法と、その低次元空間を利用して所望の形状変化を創造する方法を組み合わせる。それにより、軽量かつ高速に紐状柔軟物の操作を計画できることを示す。

### 3. 研究の方法

図1は、本研究で提案した仕組みの概要である。この仕組みのコアとなるのは、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）である。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。本研究では紐状柔軟物を所望の形状へ遷移させることを目的とするが、その実現方法として、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す問題を解く。

従来方式では、位相幾何学の利用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。この方式には、状態数を位相的に意味あるものに限ることで、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、紐の実形状を陽に扱えないため、紐をどう動かすかの操作生成器が別途必要である。また、硬さや断面形状などの紐の個体差を考慮しにくい。一方で提案方式では、紐の実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、個体差を考慮する仕組みの提案を含む。

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試みられてきた。この方式は紐の実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予測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ため、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、適切な操作方法を効率的に探索できる。

### 4. 研究成果

潜在空間の構築法を模索した。情報圧縮を適切におこなう手法として敵対的生成ネットワーク(GAN)に着目し、いくつかのGANを実装し、効果を確認した。GANには学習が不安定になりやすいという問題があるが、比較的安定した学習を実現する方式として、Deep Convolutional GAN(DCGAN)がある。DCGANではいくつかの具体的な知見が示された。具体的には、バッチ正規化(batch normalization)が有効であること、深い構造では全結合の隠れ層を用いないこと、識別器ではすべての層で活性化関数としてLeakyReLUを使用すること、などである。これらが本研究でも確認できたため、DCGANをベースとして用いることとした。ただし、バッチ正規化をスペクトル正規化に変更したり、損失関数に形状誤差の項を加えるなどの新たな工夫を適宜追加し、潜在空間の構築に成功した。

紐状柔軟物の形状表現についても様々な検討があった。潜在空間の構築にGANを利用することから、当初はGANがよく活用されていた画像分野の方式を模倣し、紐状柔軟物が映り込んだ画像を入力としていた。しかしながら、潜在空間の精度が思うように上がらなかったため他の方式を検討し、点連鎖モデル表現が適切であるとの結論を得た。

また、潜在空間を活用して紐状柔軟物の操作計画を立てるには、現実世界で与えられた紐の形状が、潜在空間のどこに位置するかを求める必要がある。このための方式を提案した。学習済みの生成器があるとすると、この生成器に新たにエンコーダを組み合わせ、エンコーダを $E(\cdot)$ の関数、生成器を $G(\cdot)$ の関数で表現しておく。エンコーダの入力は、圧縮表現の元となる紐状柔軟物の点連鎖表現 $X$ である。出力は、潜在変数 $E(X)$ である。生成器の入力は、エンコーダの出力である $E(X)$ で、出力は紐状柔軟物の点連鎖表現 $G(E(X))$ である。エンコーダの入力と生成器の出

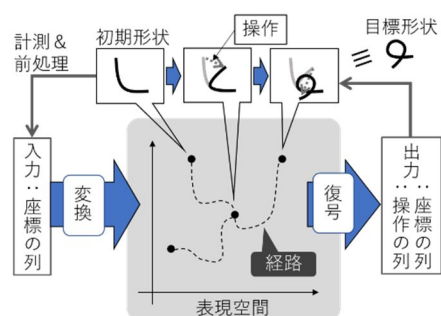


図1. 提案手法の全体像

力が一致するように、エンコーダのみを学習する。こうして学習したエンコーダを用いて、ある紐状柔軟物の点連鎖表現  $X_1$  に対応する潜在変数  $z_1$  を潜在空間内から探し出す。そして、その圧縮表現が本当に適切かどうかを確認するため、 $z_1$  を生成器に入力し、点連鎖表現  $X_2$  を生成する。 $X_1$  と  $X_2$  を二乗和誤差によって評価し、閾値以下であった場合は  $X_1$  に対応する潜在表現が見つかったとする。

ところで、マニピュレーションの立場では上述と逆方向の問題を解く必要がある。例えば、ある部位をある軌道で動かした場合に、紐がどのような形状変移をするかを知りたい。そこで、紐の形状変移を生成する方法を提案した。前提として GAN とエンコーダの学習は終わっているものとし、まず紐の初期形状と目標形状を与える。次に、初期形状と目標形状それぞれの圧縮表現を探す。また、探した圧縮表現が本当にそれぞれの形状とよく合致するかを前節の方法によって確認する。そののち、紐の端を直線的に動かしたときの形状変移を生成する。

以上の方法により図 1 の一つの実現例を示し、シミュレーション実験を主とした検証によって現時点での性能を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 山崎公俊	4. 巻 12
2. 論文標題 製品製造自動化に向けた部品把持のためのビジョン技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 画像ラボ	6. 最初と最後の頁 67-72
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 3件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kimitoshi Yamazaki
2. 発表標題 Prediction, Estimation and Learning for Deformable Object Manipulation,
3. 学会等名 The Robotics Society of Japan (RSJ) and The Robotics Society (TRS, India) WORKSHOP（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎公俊
2. 発表標題 自律型ロボットによる柔軟物操作の研究事例
3. 学会等名 佐久産業支援センター第4回ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎公俊
2. 発表標題 AI技術のロボット分野での活用事例
3. 学会等名 長野県テクノ財団浅間テクノポリス地域センター講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimitoshi Yamazaki
2. 発表標題 Generating Shape Transitions of Deformable Linear Objects Using Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (国際学会)
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------