

線状物体の結び / 解き操作のための作業計画の導出

若松 栄史 (大阪大学) 田中 裕介 (野村総研) 妻屋 彰 (大阪大学)
白瀬 敬一 (神戸大学) 荒井 栄司 (大阪大学) 平井 慎一 (立命館大学)

Generation of Manipulation Plans for Knotting/Raveling of Linear Objects

*Hidefumi WAKAMATSU (Osaka Univ.), Yusuke TANAKA (Nomura Research Institute),
Akira TSUMAYA (Osaka Univ.), Keiichi SHIRASE (Kobe Univ.),
Eiji ARAI (Osaka Univ.), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

Abstract— A planning method for linear object manipulation including knotting/raveling in the three-dimensional space is proposed. Firstly, topological states of a linear object are represented as finite permutations of crossing points including the crossing type of each crossing point. Secondly, transitions among the topological states are defined. Then, we can generate possible sequences of crossing state transitions, that is, possible manipulation processes from an initial state to a given objective state. Thirdly, a method for determination of grasping points and their moving direction is proposed in order to realize derived manipulation processes. Finally, it is demonstrated that our developed system can generate manipulation plans for raveling from an overhand knot.

Key Words: Linear Object, Manipulation, Knotting, Raveling, Planning

1. 緒論

チューブやコード、ワイヤーやロープ等に代表される線状物体は、電気信号の伝送や流体の搬送だけでなく、他の物体の固定や締結、梱包等にも広く用いられている。更に、これらの線状物体を輸送あるいは保管する場合、巻いたり束ねたりしてコンパクトなサイズにすることが殆んどである。このように、線状物体を対象とする作業には、物体の変形を積極的に利用するものが多く、このような作業の自動化のためには、変形をうまく制御する必要がある。特に、固定や締結作業においては「結び」という操作を考慮しなくてはならない。一方で、線状物体を操作する際には、物体の絡まりを防ぐ必要もある。したがって、線状物体のマニピュレーションにおいて、結び / 絡まりを解析することは重要である。

線状物体の結びを対象とした研究では、Hopcroftらは、結び操作における紐のトポロジーの移り変わりを記述する言語について提案している¹⁾。Wolterらは、紐の変形過程を定性的に記述する手法を提案している²⁾。しかし、これらは作業計画を導出するものではない。森田らは、観察によるプログラミングによってロープ結びを行う手法を提案している³⁾。これは人間の行動を観察・理解し、同じ行動を行うロボットプログラムを生成するものであり、これも作業計画の自動生成を目的としたものではない。また、松野らは、CCDカメラと柔軟物モデルを用いてロープの形状を認識し、双腕マニピュレータによって円柱にロープを結びつける作業を実現している⁴⁾。しかし、これも作業計画を自動生成するものではない。一方、位相幾何学分野でも結び目は研究対象とされており、数学者たちによって古くから解析が行わ

れている。ただし、この分野では結び目は閉じたループを表し、そのトポロジーが主な議論の対象である⁵⁾。

そこで本研究では、ロープ等の線状物体を対象として、その特徴的な変形形態である結びを制御するような作業の自動化を目指し、計算機による結び / 解き作業計画の導出手法を提案する。

2. 線状物体の状態と状態遷移表現

一般的に、物体のマニピュレーション過程は、対象とする物体とそれ以外の物体との接触状態と、その状態遷移によって表現することができる。そこで本研究では、線状物体の状態と各状態間の遷移に対する表現手法を提案する。

三次元空間内で変形している線状物体の形状を、ある平面上に射影する。この時、射影された物体は、物体自身と複数の点で交差しているように見える。そこで、物体の一端から中心軸に沿って物体を辿り、出会った交点に番号をつけていく。図1に、射影された線状物体の形状例を示す。この物体は5つの交点を持ち、交点の順列は $E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_1-C_2-C_5-C_4-C_3-E_r$ と表すことができる。ここで、 C_i は i 番目の交点、 E_l / E_r は左 / 右端点を表す。更に、交差の仕方に着目し、各交点を右ねじ型 C_i^+ と左ねじ型 C_i^- の二つに区別することにより、図1の状態は、 $E_l-C_1^+-C_2^+-C_3^+-C_4^+-C_5^+-C_1^--C_2^--C_5^--C_4^--C_3^--E_r$ と表される。このように、交点に着目することで、物体の定性的な状態を表現することができる。

次に、以上のようにして表現された状態間の遷移について考察する。状態遷移は、交点数を増減させる、あるいは交点を並べ替える操作に相当する。本研究では、図2に示す4つの基本操作を用意する。操作 I、II、III

はそれぞれ、結び目理論におけるライデマイスター移動 I、II、III に相当する⁵⁾。操作 I、II、IV では交点数が増減し、操作 III では交点の並べ替えが行なわれる。更に、交点数が増加する操作として交差操作 I、II、IV を、交点数が減少する操作として解離操作 I、II、IV を定義する。

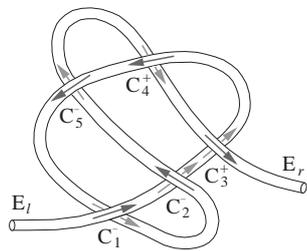
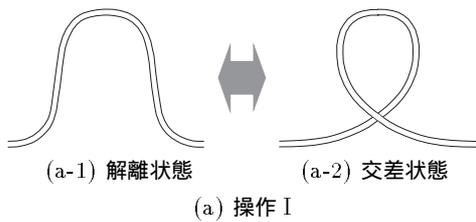
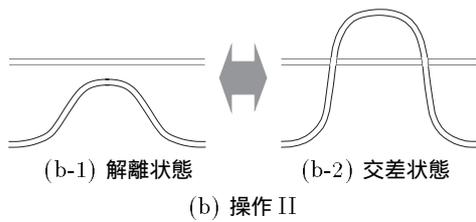


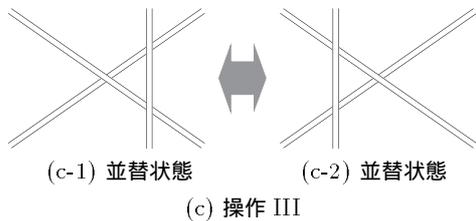
Fig.1 線状物体の状態例



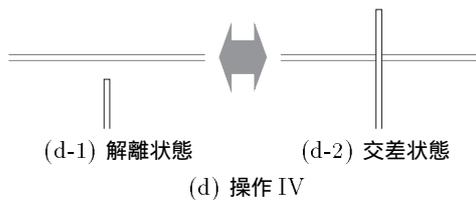
(a) 操作 I



(b) 操作 II



(c) 操作 III

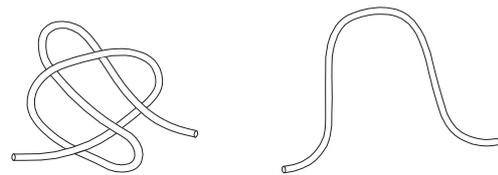


(d) 操作 IV

Fig.2 基本操作

以上より、線状物体のマニピュレーション過程は、有限個の交差状態とその間の遷移に相当する4つの操作によって表現することができる。そして、物体の初期状態と目標状態が与えられれば、その間の可能性のある状態遷移経路を計算機により導出することができる。

状態遷移経路生成の例として、図3に示すような作業を考える。図3(a)を初期状態、図3(b)を目標状態とし、解離操作I、II、IVのみで状態を遷移させると仮定すると、計算機により図4に示すような状態遷移経路が生成される。このように、本提案手法を用いることにより、線状物体の定性的なマニピュレーション計画を導出することができる。



(a) 初期状態 (b) 目標状態

Fig.3 要求される作業の例

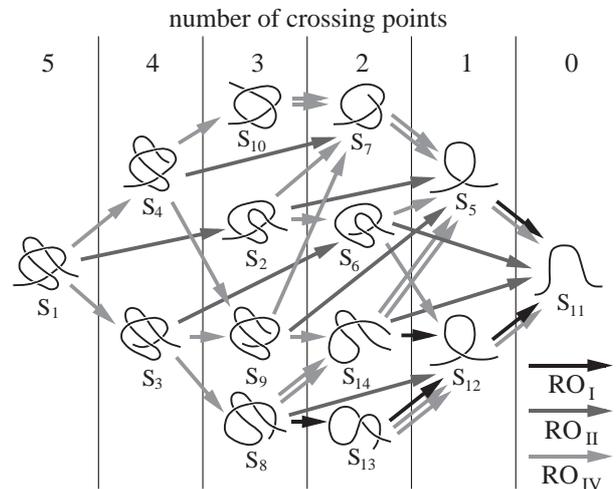


Fig.4 状態遷移経路の自動生成結果

3. 把持位置と移動方向の決定

次に、導出された状態遷移経路中のそれぞれの操作を実現するためのマニピュレータの把持位置と移動方向について考察する。線状物体の交点間の部分を線分と呼び、図2右側に示したような各解離操作の対象となる領域を交差領域と呼ぶことにする。ここで、1) 各線分は最大一箇所を把持する、2) 交差領域の両端の線分は必ず把持する、3) 操作後、一つの線分が二箇所以上で把持されている場合は、一箇所を残して他を解放する、というルールを導入し、これに基づいて把持位置候補を決定する。また、各把持位置候補について、射影面に対するマニピュレータのアクセス方向、すなわち、射影面の表側からアクセスするのか、裏側からアクセスするのかについても考慮する。移動方向については、1) 物体の中心軸方向の並進、2) 物体の中心軸周りの回転、3) 物体の中心軸に垂直な軸方向の並進、4) 物体の中心軸に垂直な軸周りの回転、を考える。これらの把持位置候補と移動方向の組み合わせを、操作の実現可能性の観点から評価して、各操作を実現するために適切な把持位置と移動方向を決定する。更に、状態遷移の回数や、必要なマニピュレータ数、マニピュレータの持ち替え回数等から各遷移経路を評価し、適切なマニピュレーション計画を導出することができる。

4. 試作システムによる実験

提案した手法の妥当性を確認するために試作システムを構築し、実験を行なった。図5に試作システムの構成を示す。テーブル上に置かれたゴム製の線状物体を、

6DOFのマニピュレータを使って操作する。テーブル上方にはCCDカメラを設置し、物体の形状を計測する。

図6に想定する作業を示す。これは、止め結びを解く作業に相当する。図6(a)の初期状態は $E_l-C_1^-C_2^-C_3^-C_1^-C_2^-C_3^-E_r$ 、また図6(b)の目標状態は E_l-E_r と表される。なお、物体の左端は、作業全体を通してテーブルに固定されているものとする。この時、システムにより一つの状態遷移経路が生成される。この経路は、図4の $S_{10} \rightarrow S_7 \rightarrow S_5 \rightarrow S_{11}$ に相当する。更に、マニピュレータの持ち替え回数を考慮することにより図7に示すようなマニピュレーション計画が導出される。

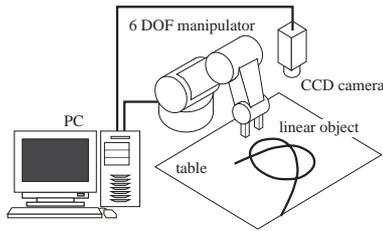


Fig.5 試作システムの構成

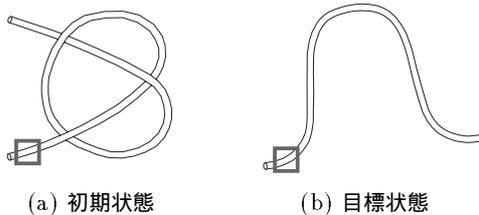


Fig.6 想定する作業 — 止め結びの解き操作

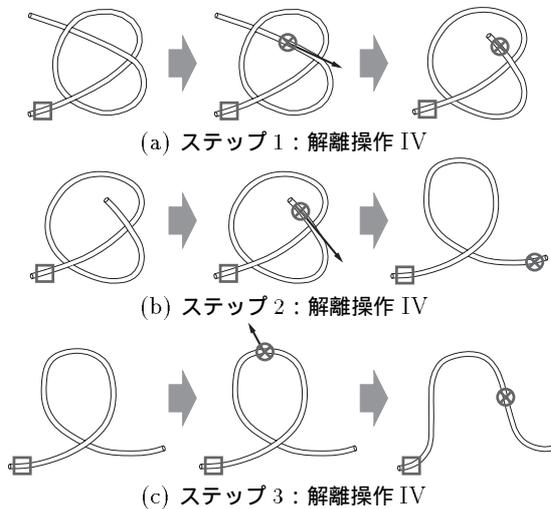


Fig.7 導出されたマニピュレーション計画

図8に実際にマニピュレータを用いてマニピュレーションを行なった結果を示す。各ステップの前後にCCDカメラを用いて物体の形状を計測し、状態遷移を認識すると共に、具体的な把持位置と移動方向を決定している。このように、本提案手法を用いることにより、止め結びされた線状物体に対する解き操作の計画から実行までを実現できた。

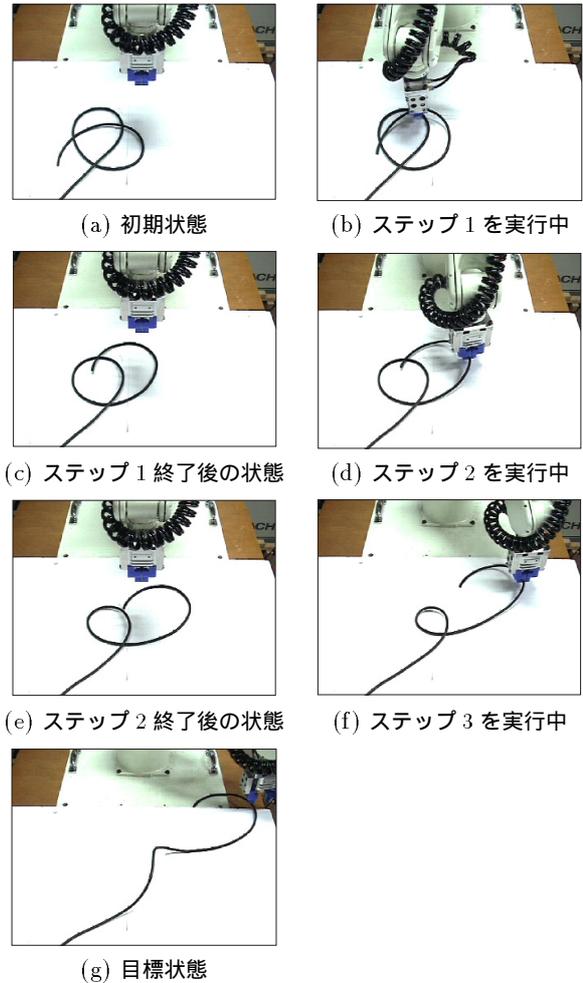


Fig.8 ロボットによるマニピュレーション結果

5. 結論

本研究では、ロープ等の線状物体を対象として、その特徴的な変形形態である結びを制御するような作業の自動化を目指し、計算機による結び/解き作業計画の導出手法を提案した。また、試作システムを構築し、提案手法により、線状物体のマニピュレーションの計画から実行までを計算機により実現できることを示した。

参考文献

- 1) J. E. Hopcroft, J. K. Kearney, and D. B. Kraft: A Case Study of Flexible Object Manipulation, Int. J. of Robotics Research, Vol.10, No.1, pp.41-50, (1996).
- 2) J. Wolter and E.Kroll: Toward Assembly Sequence Planning with Flexible Parts, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1517-1524, (1996).
- 3) 森田, 高松, 小川, 木村, 池内: 観察によるひも結び動作の学習, 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会論文集, (2002).
- 4) T. Matsuno and T. Fukuda and F. Arai: Flexible Rope Manipulation by Dual Manipulator System Using Vision Sensor, Proc. IEEE Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.677-682, (2001).
- 5) C.C. アダムス著, 金信泰造訳: 結び目の数学, 培風館, (1998).