

# 単腕マニピュレータによる線状物体の結び操作

若松 栄史 (大阪大学) 妻屋 彰 (大阪大学) 荒井 栄司 (大阪大学)  
平井 慎一 (立命館大学)

## Knotting of Deformable Linear Objects with One-armed Manipulator

\*Hiddefumi WAKAMATSU (Osaka Univ.), Akira TSUMAYA (Osaka Univ.),  
Eiji ARAI (Osaka Univ.), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

**Abstract**— A planning method for knotting of deformable linear objects is proposed. First, crossing state description and basic operations corresponding to crossing state transitions are explained. Possible sequences of crossing state transitions, that is, possible manipulation processes can be generated once the initial and the objective states are given. Next, a method to determine grasping points and their moving direction is proposed in order to realize derived manipulation processes. Then, it is theoretically found that any knotting manipulation of a linear object lain on a table can be realized by an one-armed robot with three translational DOF and one rotational DOF. Finally, it is demonstrated that an one-armed robot system can plan and execute tying a slip knot.

**Key Words:** Manipulation, Planning, Linear Object, Knotting, One-armed

### 1. 緒論

結び目は、簡易かつ多様な固定方法であり、我々の日常生活のほか、服飾産業、食品産業、医療分野でも利用されている。我々は、両手指を用いて器用に物体を操り、種々の複雑な結び目を作成することができる。このような結び操作をモデル化することができれば、人間の器用さを解析することが可能となる。また、上記のような各分野における結び操作の自動化にも役立つものと考えられる。

線状物体の結びを対象とした研究では、稲葉らは、紐のような変形しやすい物体のハンドリングにおいて、視覚情報によってマニピュレータの動作を計画、確認、修正することにより、結び操作を実現している [1]。Hopcroft らは、結び操作における基本的な動作を抽象的に記述するロボット用言語について提案している。これにより、ハンド先端の具体的な軌道を与えることなく、ロボットによるさまざまな紐結び操作を実現している [2]。松野らは、モデルを用いてロープの変形を予測し、画像による補正を行なって、双腕マニピュレータによる円柱へのロープの結び付け作業を実現している [3]。また、結び目不変量を用いて、画像からロープの位相を認識する手法を提案している [4]。森田らは、人間が行なう動作を観察することによって、ロボットにロープ結びを実行させるシステムを開発している [5]。ただし、これらの研究では、普段我々が行なっているやり方、例えば、まず輪を作り、その中に一端を通すといった結び操作の手順を予め与えている。位相幾何学の分野では、結び目理論 [6] を用いることにより、閉じた輪の定性的な状態遷移を表現できる。Ladd らは、直線分の連結によって表された閉じた結び目を解くための計画手法を提

案している [7]。我々は、線状物体の結び / 解き操作を計算機処理できる形で定性的に表現し、実現可能性のある作業計画を計算機により自動生成する手法を提案した [8]。この手法により得られる作業計画には、普段我々が行なっているやり方とは異なる手順も含まれることが分かった。

人間が行なう蝶結びには大体決まったやり方があるが、必ずしも一通りではない。さらに、人間の結び方は人間の手指の構造に依存しており、人間とは異なる構造を持った機械システムにより蝶結びを行なう場合には、人間と同様のやり方で結ばなくても、蝶結びの形状を実現できる可能性がある。そこで本研究では、線状物体の結び操作を定性的に表現し、実現可能性のある作業計画を計算機により自動生成する。これにより、ロボットシステムによる結び操作の自動計画と実行を目指す。また、引き解け結びを例に、線状物体の結び操作が、並進 3 自由度と回転 1 自由度を有する単腕のロボットシステムで実現可能であることを示す。

### 2. 線状物体の結び / 解き操作過程の表現

#### 2.1 交差状態表現

本節では、線状物体の状態を定性的に表現する手法を提案する。まず、線状物体の三次元形状をある平面に投影する。投影された二次元曲線は自身と交差し得る。投影された物体の一端を左端点  $E_l$ 、もう一端を右端点  $E_r$  とする。左端点から右端点に向かって投影された物体をトレースし、初めて通過する交差に番号をつけていく。各交差において、上側の物体の交点と下側の物体の交点を定義することができる。 $i$  番目の交差における上側の物体の交点を上交点  $C_i^u$ 、下側の物体の交点を下交点  $C_i^l$

と表す．さらに，各交差を二つのタイプに分類する．一つは，上側の物体が下側の物体に対し右から左に向かって交差するタイプ，もう一つは，上側が下側に対し左から右に向かって交差するタイプである．本研究では，前者を左手交差  $C_i^-$ ，後者を右手交差  $C_i^+$  と定義する．Fig.1に，線状物体の交差状態の例を示す．これは，引き解け結びに相当する．この状態は次のように表すことができる．

$$E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_3^{l-} - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r. \quad (1)$$

したがって，線状物体の状態は，物体の長さや剛性等の幾何学的・物理的特性に関わらず，式(1)で表されるような交差状態によって表すことができる．

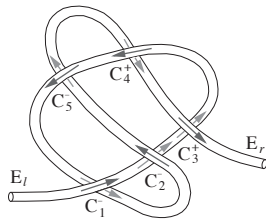


Fig.1 引き解け結び

## 2.2 状態遷移表現

本節では，前節で定義した交差状態間の遷移について考える．線状物体の状態を変化させるためには，何らかの操作が必要となる．したがって，状態遷移は，交差の数を変化させる，あるいは交差の並び方を変化させる操作と対応づけることができる．本研究では，Fig.2に示すような四つの基本操作を用意する．操作I，操作II，操作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[6]に相当する．この四つの基本操作により，任意の結び目/解き操作を表現できる[8]．操作I，操作II，操作IVにより，交差の数は増減する．操作IIIは，交差の数は変えないものの，その並び方を変化させる．さらに，交差数を増やす操作として交差操作  $CO_I$ ， $CO_{II}$ ， $CO_{IV}$  を，また交差数を減らす操作として解離操作  $UO_I$ ， $UO_{II}$ ， $UO_{IV}$  を定義する．また，交差数の変化しない操作として入換操作  $AO_{III}$  を定義する．これにより，線状物体の任意の結び目/解き操作過程は，交差/解離/入換操作の繰り返しによる交差状態の移り変わりとして表すことができる．物体の初期状態と目標状態が与えられた場合には，可能性のある操作列，すなわち結び目/解き操作過程を計算機により自動的に得ることができる．

## 3. 定性動作の決定

本章では，前章で得られた結び目操作過程を実現するための動作，すなわち把持点とその移動方向の決定手法について説明する．ある交差操作によって生成される交差をターゲット交差と呼ぶ．各ターゲット交差は，ターゲット上交点とターゲット下交点とからなる．ターゲット上交点とターゲット下交点とを合わせて，ターゲット

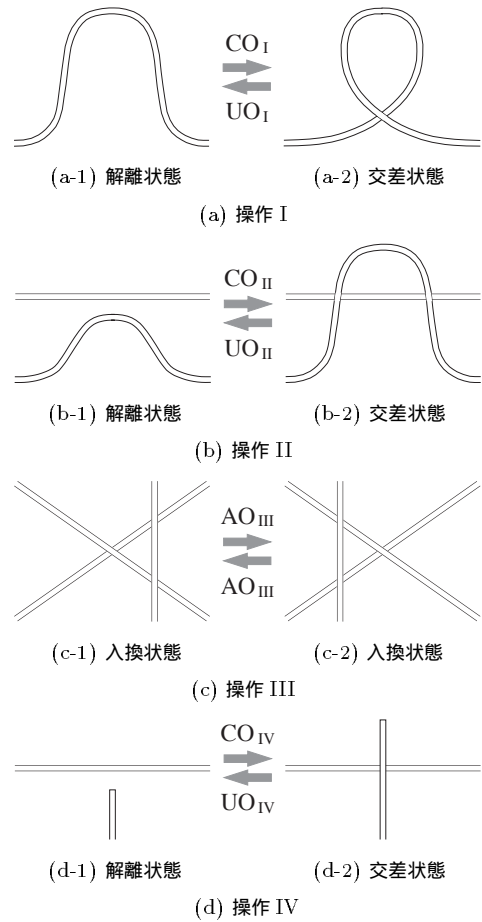


Fig.2 基本操作

点と呼ぶ．ターゲット点同士に挟まれた線分，あるいはターゲット点と端点に挟まれた線分をターゲット線分と呼ぶ．本研究では，交差操作を実現するために，ターゲット点あるいはターゲット線分を把持するものとする．

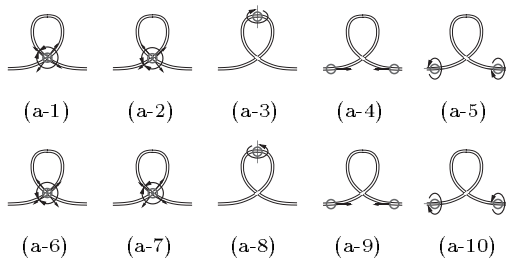
次に，把持点の移動方向について考える．本研究では，基本移動として，まず物体中心軸方向の並進  $T_1$  と，物体中心軸周りの回転  $R_1$  を考える．次に，物体中心軸に直交し，投影面に含まれる軸を設定し，この軸方向の並進  $T_2$  と，この軸周りの回転  $R_2$  を考える．最後に，投影面に直交する投影軸方向の並進  $T_3$  と，投影軸周りの回転  $R_3$  を考える．したがって，把持点の移動方向としては，三方向の並進  $T_1$ ， $T_2$ ， $T_3$  と三方向の回転  $R_1$ ， $R_2$ ， $R_3$  を考えることができる．なお， $T_3$  のみでは物体の交差状態を変化させることはできない．

さらに，マニピュレータの把持点への接近方向を考える．ここでは，投影面に対応する紙面に対し垂直下向きを表方向からの接近，垂直上向きを裏方向からの接近とする．各操作の実現可能性は，この接近方向に依存する．以上のような，把持点とその移動方向，さらには把持点への接近方向の適当な組み合わせを選択することにより，基本操作が実現できることになる．本研究では，この組み合わせを定性動作と呼ぶ．Fig.3に，交差操作  $CO_I$ ， $CO_{II}$ ， $CO_{IV}$  を実現するための定性動作を示す．ここで， $\otimes$  は表方向からの接近によって把持すべき点を， $\odot$  は裏方向からの接近によって把持す

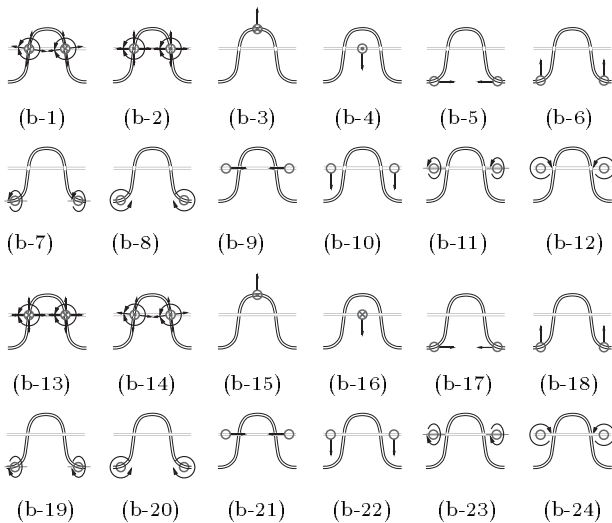
べき点を， は接近方向に制約のない把持点を表している．また， Fig.3(a-1) から (a-5) と， Fig.3(a-6) から (a-10) は，交差の上下関係，すなわち物体の表裏を反転させた状態を示している．同様に， Fig.3(b-1) から (b-12) と Fig.3(b-13) から (b-24)， Fig.3(c-1) から (b-6) と Fig. 3(c-7) から (b-12) は，それぞれ表裏反転の関係にある．

入換操作  $AO_{III}$  の場合には，操作の前後で交差の数は変化しないため，隣接する交点がともに上交点，あるいはともに下交点である線分をターゲット線分とする．Fig.4に，入換操作  $AO_{III}$  を実現するための定性動作を示す．ここで， Fig.4(a) から (f) と Fig.4(g) から (l) は表裏反転の関係にある．

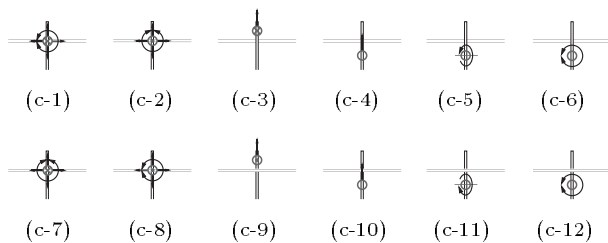
このように，本研究に示した手法により，要求作業を満たす有限個の交差状態遷移経路と，それぞれの経路の各遷移に対する適当な定性動作を得ることができる．



(a) 交差操作  $CO_I$



(b) 交差操作  $CO_{II}$



(c) 交差操作  $CO_{IV}$

Fig.3 各交差操作における定性動作

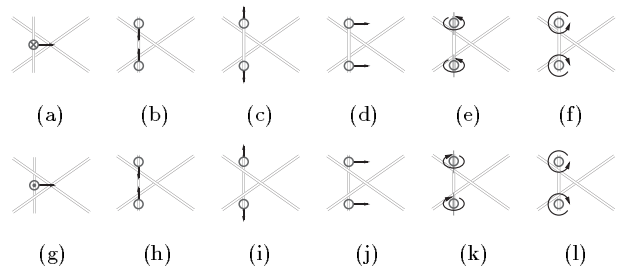


Fig.4 入換操作における定性動作

#### 4. 単腕による結索操作計画

交差操作  $CO_I$  を実現するための定性動作のうち， Fig. 3(a-1) から (a-3) と Fig.3(a-6) から (a-8) は把持点が一箇所である．また， Fig.3(a-1) と (a-2)， Fig.3(a-6) と (a-7) については，射影平面内の運動によって操作を実現できることを示している．さらに， Fig.3(a-1)， Fig.3(a-6) は，表方向からのマニピュレータの接近によって操作を実現できる．これは，線状物体が投影面に相当するテーブルの上に置かれている場合に，テーブル上方から接近可能な一台のマニピュレータによって物体を一箇所把持し，投影軸方向の並進  $T_3$  と，投影面内の並進  $T_1, T_2$  および回転  $R_3$  のみを加えることにより，交差操作  $CO_I$  を実現できることを意味している．交差操作  $CO_{II}$  について考えると， Fig.3(b-3) と Fig.3(b-16)，交差操作  $CO_{IV}$  の場合には， Fig.3(c-1)， Fig.3(c-3)， Fig.3(c-4)， Fig.3(c-6)， Fig.3(c-7)， Fig.3(c-10)， Fig.3(c-12) のような定性動作を選択した場合，一台のマニピュレータによって物体を把持し，並進  $T_1, T_2, T_3$  と回転  $R_3$  のみを加えることにより，操作を実現できる．入換操作  $AO_{III}$  の場合には， Fig.4(a) の定性動作を選択した場合，一点把持による3軸並進と1軸回転で操作を実現できる． Fig.4(a) とは表裏の反転した状態である Fig.4(g) から (l) には，表方向からの一点把持による定性動作は含まれていないが， Fig.4(g) のような最下方線分の移動は， Fig.4(a) のような最上方線分の移動に等しいため，表裏反転の状態においても，一点把持による3軸並進と1軸回転で操作を実現できる．ここで，交差操作  $CO_I, CO_{II}, CO_{IV}$  と入換操作  $AO_{III}$  によって任意の結び目を作成できることから，上記定性動作を選択することにより，例えば，単腕の SCARA ロボットによって任意の結び目を作成できることが分かる．これは，人間のような構造を持たず，人間と同じやり方では動作できない機械システムによっても，任意の結び操作が可能であることを示している．

#### 5. 結び操作の計画および実行例

本章では，これまで提案してきた手法の有効性について述べる．本研究で開発したシステムは，PC と6自由度のマニピュレータ， CCD カメラから成る．化学繊維製ではあるが，詳しい物理的特性は分からない紐をテーブル上に置き，テーブル上方に固定された CCD カメラにより形状を撮影する．このシステムでは，テーブル面が投影面となる．要求作業は， Fig.1に示すような引き解け結びを，交差の全くない状態から結ぶものとする．

また、この例では、物体右端は操作中常に固定されているとする。交差操作のみを使用する、すなわち入換操作  $AO_{III}$  を使わないものと仮定すると、システムにより、Fig.5に示すように、交差状態を表す14のノードと、その間の状態遷移を表す37のアーチからなる結び操作過程が得られる。ここで、状態遷移回数を考慮することにより、 $S_{11}$   $S_5$   $S_2$   $S_1$ の結び操作過程を選択する。次に、定性動作を決定する。3軸並進と1軸回転により結び操作が可能であることを確認するために、この例では、状態遷移  $S_{11}$   $S_5$  に対して Fig.3(a-1) に示す定性動作を、状態遷移  $S_5$   $S_2$  に対して Fig. 3(b-3) に示す定性動作を、状態遷移  $S_2$   $S_1$  に対して Fig.3(b-16) に示す定性動作を選択した。Fig.6に結び操作の実行結果を示す。図に示すように、3軸の並進動作と1軸の回転動作を用い、線状物体のある部分を別の部分に重ねるといった操作のみを繰り返すことによって、引き解け結びを結ぶことができる。これは、人間の手や腕よりも簡単な構造を有するシステムが、人間が通常行っている結び方とは異なる手法で、種々の結び目を作成できることを意味している。

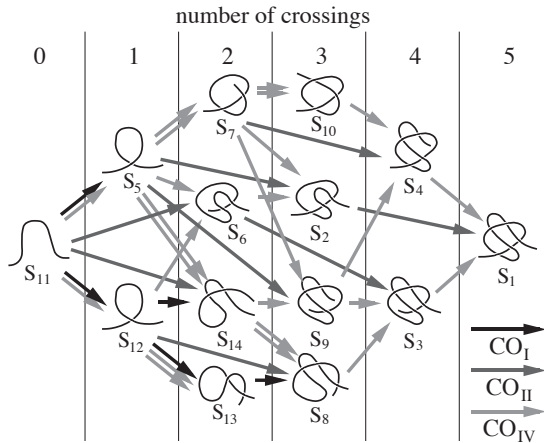


Fig.5 結び操作過程の生成結果

## 6. 結論

本研究では、線状物体の結び操作を計画、実行するための手法を提案した。まず、線状物体の結び操作過程を、基本操作による交差状態の移り変わりとして表現した。次に、結び操作過程を実現するための定性動作を導入した。上記状態遷移列と定性動作について考察した結果、並進3自由度と回転1自由度を有する単腕ロボットにより、任意の結び操作が実現できることが分かった。最後に、上記手法に基づいてシステムを開発し、引き解け結びの結び操作を計画、実行できることを示した。

### 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（若手研究 B 16760200）を受けて行なわれたものである。ここに謝意を表す。

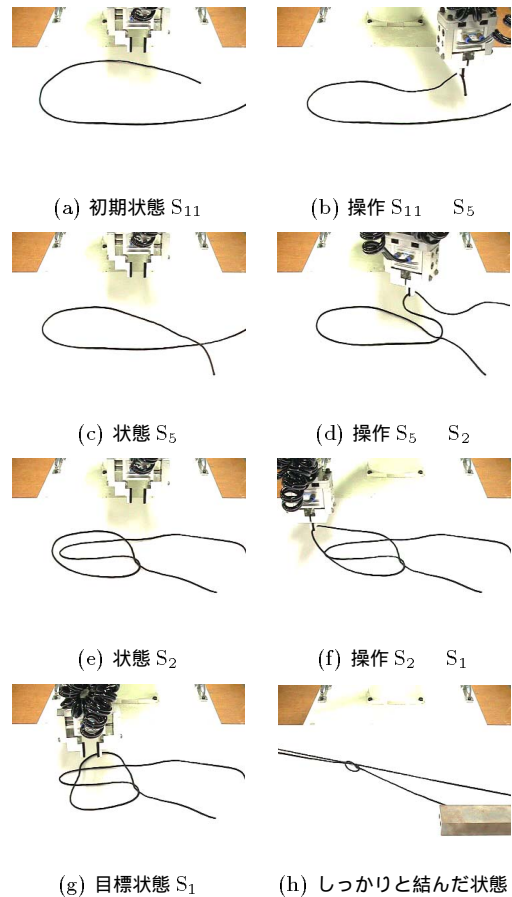


Fig.6 引き解け結びの結び操作実行結果

### 参考文献

- [1] 稲葉雅幸, 井上博允, “ロボットによる紐のハンドリング”, 日本ロボット学会誌, 3, 6, pp.32-41, 1985.
- [2] J. E. Hopcroft, J. K. Kearney, and D. B. Kraftt, “A Case Study of Flexible Object Manipulation”, Int. J. Robotics Research, 10, 1, pp.41-50, 1991.
- [3] T. Matsuno, T. Fukuda, and F. Arai, “Flexible Rope Manipulation by Dual Manipulator System Using Vision Sensor”, Proc. of Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics, pp.677-682, 2001.
- [4] 松野隆幸, 玉置大地, 新井史人, 福田敏男, “トポロジカルモデルと結び目不変量を用いたマニピュレーションのためのロープの形状認識”, 計測自動制御学会論文集, 41, 4, pp.366-372, 2005.
- [5] T. Morita, J. Takamatsu, K. Ogawara, H. Kimura, and K. Ikeuchi, “Knot Planning from Observation”, Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.3887-3892, 2003.
- [6] C.C. アダムス著, 金信泰造訳, “結び目の数学”, 培風館, 1998.
- [7] A. M. Ladd and L. E. Kavraki, “Using Motion Planning for Knot Untangling”, Int. J. Robotics Research, 23, 7-8, pp.797-808, 2004.
- [8] 若松栄史, 妻屋彰, 荒井栄司, 平井慎一, “結び/解き操作を含めた線状物体のマニピュレーション”, 日本ロボット学会誌, 23, 3, pp.344-351, 2005.