

結び目理論に基づく線状物体の結び／締め操作の定性計画

若松 栄史*¹ 妻屋 彰*¹ 荒井 栄司*¹ 平井 慎一*²

Topological Manipulation Planning for Knotting and Tightening of Deformable Linear Objects Based on Knot Theory

Hidefumi Wakamatsu*¹, Akira Tsumaya*¹, Eiji Arai*¹ and Shinichi Hirai*²

A planning method for knotting and tightening of deformable linear objects is proposed. Firstly, we briefly explain crossing state description and basic operations corresponding to crossing state transitions. Possible sequences of crossing state transitions, that is, possible manipulation processes can be generated once the initial and the objective states are given. Secondly, 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 placed on a table can be realized by an one-armed robot with three translational DOF and one rotational DOF. Thirdly, a planning method for tying tightly is established to complete a knot because the knot fulfills its fixing function after it is tightened. Finally, it is demonstrated that an one-armed robot system can plan and execute tying and tightening a slipknot.

Key Words: Linear Objects, Manipulation, Knotting, Tightening

1. 緒 論

結びは、簡易かつ多様な固定方法であり、ひも等の線状物体さえあれば、それを結ぶことによって物体の結束や締結、梱包等が可能となる。スナップフィットやマジックテープ等の固定方法が発明された現在においても、結びによる固定方法は我々の周りからなくなっているわけではない。例えば、靴ひもを結ぶ、袋の口を閉じる、新聞紙を束ねる、その他、釣りやキャンプ、登山における利用等、枚挙にいとまがない。また、服飾産業ではボタン等を止める際に、食品産業でも、例えば、きんちゃくの口をかんばんようで縛ったりする際に結びが用いられている。医療分野では、組織の縫合や結紮に結びは不可欠である。このように、結びは人間の生活と密接にかかわっており、用途に合わせた様々な結び目が存在する。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あるいは解き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て、稲葉らは、ひも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、ロボットによる様々なひも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、普段我々が行っている結び方、例えば、ひとえ結びであれば、まず輪を作り、その中に一端を通すといった手順をあらかじめ与えている。

位相幾何学分野では、古くから結び目に関する研究が行われてきた [6]。この結び目理論を用いることにより、閉じた結び目、すなわち両端を持たない結び目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現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の中には、普段我々が行っている結び方とは異なる手順も含まれることが分かった。

人間が行うちょう結びにはおおよそ決まった手順があるが、それは人間の経験と手指の構造に依存したものであり、必ずしも

原稿受付 2005年7月7日

*¹大阪大学大学院

*²立命館大学

*¹Osaka University

*²Ritsumeikan University

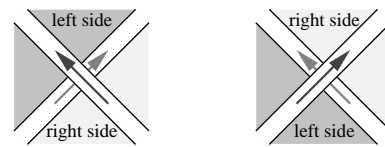
一通りしか存在しないわけではない。人間がひもを結ぶ場合には、ある部分を指に沿わせて他の部分に巻き付けたり、輪にした部分に指を通して他の部分を摘み、輪から引き出ししたりといった巧みな操作を行っている。もし、そのような操作でしかひもを結ぶことができないのであれば、ひも結びのためのロボットは人間の手指と同様の構造と自由度を持たなくてはならないことになる。しかし、結ぶための手順が複数あるのであれば、選択する手順によっては、人間とは異なる構造を持った機械システムによっても結び形状を生成できる可能性がある。また、結び目は、単に特定の形状を生成するだけでなく、何箇所かの部分を引っ張ってしっかりと締め付けることにより、初めて固定等の機能を発揮する。本論文では、結び目形状を生成する操作を結び操作、生成された結び目を締め付ける操作を締め操作と呼ぶことにする。また、結び操作と締め操作とを合わせて締結操作と呼ぶ。ちょう結びを締結する際、締め操作においてひもの両端だけを引っ張ると解けてしまう。ちょう結びを締結するためには、両端とともに二つの弓なりになった部分も引っ張る必要がある。このように、ある結び目が締結できるか否か、締結できるとしたらどの部分を引っ張ればよいかは、結び目の位相によって異なる。また、線状物体が絡まった場合、不用意に両端を引っ張ると、締結されてしまって絡まりを解くことが困難になるおそれがある。このような場合にも、絡まった状態の位相が締結可能なか否かを判断し、締結不可能な位相に変形する必要がある。

そこで本論文では、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生成する。また、締め操作のために引っ張るべき部分を計算機により導出する。これにより、ロボットシステムによる締結操作の自動計画と実行を目指す。まず、線状物体の状態の定性的表現手法と、状態遷移のための基本操作について説明する。これにより、線状物体の結び操作の過程を、基本操作による状態遷移の列として表現する。続いて、結び操作を実現するための定性動作、すなわち物体の把持点とその移動方向の決定手法を示す。また、結び目の締結可能性を導入し、締結のために引っ張るべき部分を導出する手法を提案する。最後に、引き解け結びの締結操作を例に、特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. 線状物体のマニピュレーション過程の表現

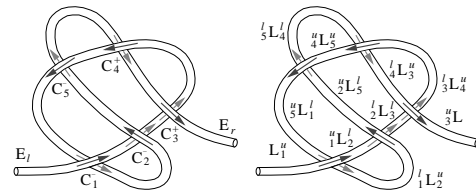
2.1 交差状態表現

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なぞり、初めて通過する交差に番号をつけていく。この方向を、本論文では交差のカウント方向と呼ぶことにする。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。第 i 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、**Fig. 1 (a)** のように上側の物体が下側の物体に対し左に向かって交差する



(a) Left-handed helical (b) Right-handed helical

Fig. 1 Crossing type



(a) Crossings

(b) Segments

Fig. 2 Example of knotted linear object

タイプ、もう一つは、**Fig. 1 (b)** のように上側が下側に対し右に向かって交差するタイプである。本論文では、前者を左手交差 C_i^- 、後者を右手交差 C_i^+ と定義する。**Fig. 2 (a)** 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。

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

次に、交点間の線分を表現する。交点 C_i^p と C_j^q に挟まれた線分を ${}^pL_j^q$ と表す。ここで、 p, q はそれぞれの交点在上交点なのか (このとき $p, q = u$)、下交点なのか (このとき $p, q = l$) を示す。**Fig. 2 (b)** に示した線状物体は 11 の線分を持ち、例えば、交点 C_1^u と交点 C_2^l に挟まれた線分は ${}^uL_2^l$ と表される。特に、両端点に隣接する線分は、それぞれ左終端線分 ${}^lL_i^p$ 、右終端線分 ${}^uL_j^q$ とする。

線状物体の交差の個数と、各交差におけるタイプおよび交点の上下関係が分かれば、線分の表現は一意に定まる。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・物理的特性にかかわらず、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。

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操作、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。本論文では、**Fig. 3** 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/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、線状物体の任意のマニピュレーション

ン過程は、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。

解離操作 UO_I は、以下のような、同じ交点番号を持つ交点が隣接する部分に適用することができる。

$$\dots -C_i^{u/l} - C_i^{l/u} - \dots \quad (2)$$

解離操作 UO_{II} は、以下のような交差状態の部分に適用することができる。

$$\dots -C_i^{u/l} - C_j^{u/l} - \dots - C_i^{l/u} - C_j^{l/u} - \dots \quad (3)$$

$$\dots -C_i^{u/l} - C_j^{l/u} - \dots - C_j^{u/l} - C_i^{l/u} - \dots \quad (4)$$

解離操作 UO_{IV} は、以下のような、両端点に最も近い交点に適用することができる。

$$E_l - C_i^{u/l} - \dots - C_i^{l/u} - \dots \quad (5)$$

$$\dots - C_i^{u/l} - \dots - C_i^{l/u} - E_r. \quad (6)$$

以上のように、解離操作 UO_I , UO_{II} , UO_{IV} は式 (2)~(6) で表される部分にのみ適用することができる。入換操作 AO_{III} は、以下の三つの部分の順列、例えば $\dots -\beta - \gamma - \alpha - \dots$ で表されるような三線分による交差部分にのみ適用することができる。

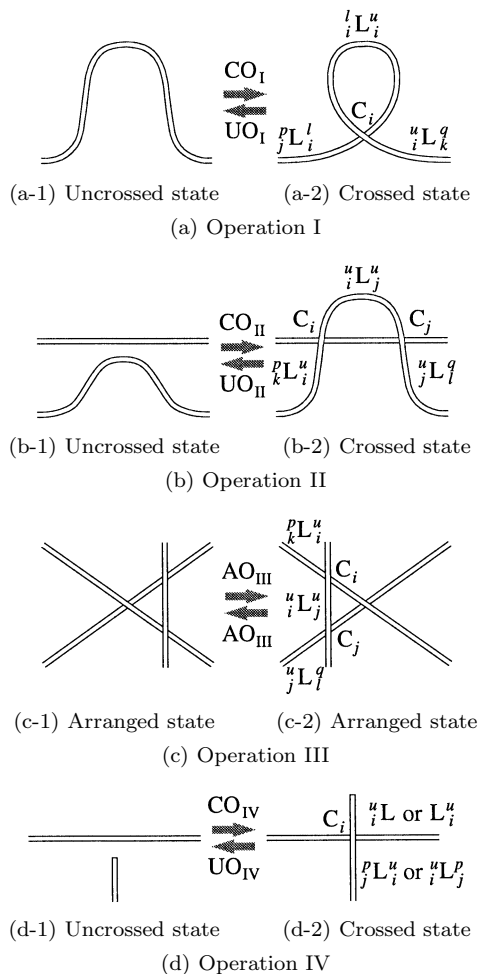


Fig. 3 Basic operations

$$\alpha : \dots -C_{i/j}^u - C_{j/i}^u - \dots \quad (7)$$

$$\beta : \dots -C_{j/k}^{l/u} - C_{k/j}^{u/l} - \dots \quad (8)$$

$$\gamma : \dots -C_{i/k}^l - C_{k/i}^l - \dots \quad (9)$$

一方、交差操作 CO_I , CO_{II} , CO_{IV} は任意の部分に適用することができる。本論文では、初期状態と目標状態が与えられた場合、交差の多い状態から少ない状態へと遷移可能な解離操作列を生成する。現在の交差状態に式 (2)~(6) で表されるような解離操作を適用できる部分が存在するか否かを確認し、存在する場合には、交差を消去して新しい交差状態を生成する。これを繰り返すことにより、可能性のある解離操作列を得る。目標状態が交差の多い状態である場合には、生成された解離操作列を、各解離操作に対応する交差操作、例えば、 UO_I であれば CO_I に置き換えることで、要求を満たす交差操作列、すなわちマニピュレーション過程を効率よく得ることができる。

3. 定性動作の決定

本章では、前章で得られた状態遷移経路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。本論文では、交差操作を実現するために、ターゲット点/線分あるいはそれらに隣接する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。本論文では、基本移動として、Fig. 4 に示すように、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、この軸回りの回転 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、投影軸回りの回転 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。このうち、 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、マニピュレータの投影面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。本論文では、この組み合わせを定性動作と呼ぶ。Fig. 5 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、

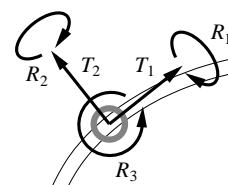


Fig. 4 Possible motions of grasping point

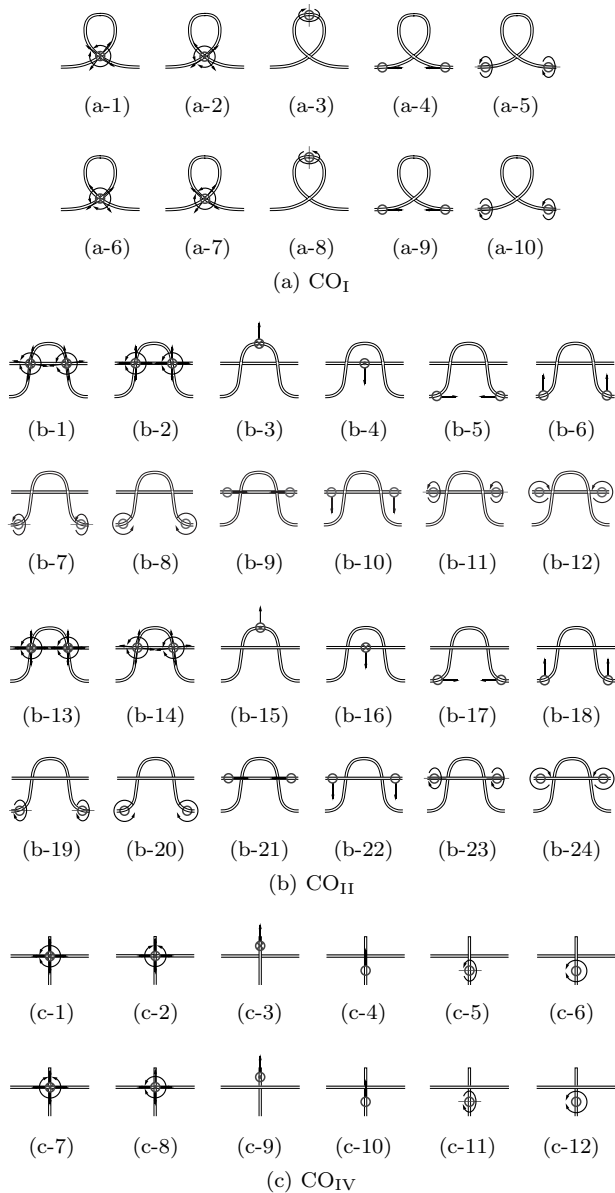


Fig. 5 Actions for crossing operations

⊗は表方向からの接近によって把持すべき点を，⊙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. 5(a-1)～(a-5)と，Fig. 5(a-6)～(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. 5(b-1)～(b-12)と Fig. 5(b-13)～(b-24)，Fig. 5(c-1)～(c-6)と Fig. 5(c-7)～(c-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，入換操作 AO_{III} を適用可能な部分を形成する三つの線分をターゲット線分とする。このうち，隣接する交点がともに上交点である線分を上ターゲット線分，ともに下交点である線分を下ターゲット線分とし，一方が上交点，他方が下交点である線分を中ターゲット線分とする。入換操作 AO_{III} は，これら三つのターゲット線分を移動させることにより実現できる。

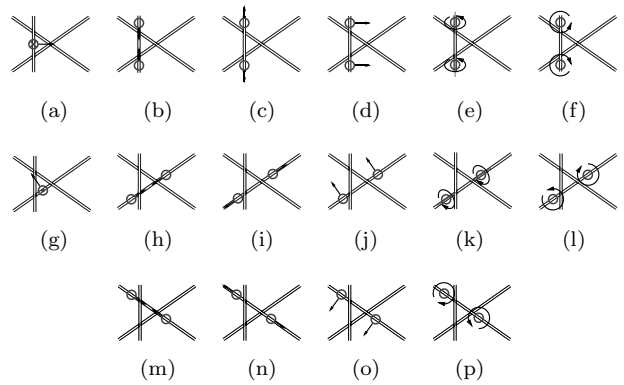


Fig. 6 Actions for arranging operation

Fig. 6 に，入換操作 AO_{III} のための定性動作を示す。ここで，Fig. 6(a)～(f) は上ターゲット線分の移動に関する定性動作を，Fig. 6(g)～(l) は下ターゲット線分の移動に関する定性動作を，Fig. 6(m)～(p) は中ターゲット線分の移動に関する定性動作を表している。

このように，本論文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。

4. 単腕による結び操作計画

交差操作 CO_I を実現するための定性動作のうち，Fig. 5(a-1)～(a-3)と Fig. 5(a-6)～(a-8)に示したものは把持点が1箇所である。また，Fig. 5(a-1)と Fig. 5(a-2)，Fig. 5(a-6)と Fig. 5(a-7)に示す定性動作については，並進 T_1 および T_2 と回転 R_3 によって操作を実現できることを示している。さらに，Fig. 5(a-1)，Fig. 5(a-6)では，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1台のマニピュレータによって物体を1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. 5(b-3)と Fig. 5(b-16)に示す定性動作を選択した場合，1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。同様に，交差操作 CO_{IV} について考えると，Fig. 5(c-1)，Fig. 5(c-3)，Fig. 5(c-4)，Fig. 5(c-6)，Fig. 5(c-7)，Fig. 5(c-10)，Fig. 5(c-12)に示す定性動作は，3軸並進と1軸回転の可能な1台のマニピュレータにより実現できる。入換操作 AO_{III} についても，Fig. 6(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。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，人間と同じ手順では動作不可能な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. 締め操作計画

一般的に、結び目は、結び操作の後、何箇所かの部分を引っ張って締め操作を行うことにより初めて固定等の機能を発揮する。すなわち、結び目の機能の発揮には、締結操作が不可欠である。結び目のどの部分を引っ張れば締結できるかは、結び目の位相に依存する。

Fig. 7 にいくつかの結び目を示す。Fig. 7 (a) はひとえ結びであり、Fig. 7 (b) は引き解け結びである。ひとえ結びは両終端線分 L_1^u と ${}_3L$ を把持して引っ張ることで締結できる。一方、引き解け結びと Fig. 7 (c) に示すような結び目は、両終端線分を引っ張ることで解けてしまう。そこで、終端線分に加えて、途中の線分も引っ張って締結することを考える。例えば、Fig. 7 (b) において、終端線分 L_1^u 、 ${}_3L$ に加えて線分 ${}_5L_4^l$ を把持しそれぞれ相反する方向に引っ張ると、図の引き解け結びは締結することができる。ここで、Fig. 8 (a) に示すように、線状物体を線分 ${}_5L_4^l$ 上のある点で分割し、Fig. 8 (b) および Fig. 8 (c) のように二つの部分に分ける。Fig. 8 (b) に示す左側の部分の新しい右端点を E_r' 、Fig. 8 (c) に示す右側の部分の新しい左端点を E_l' とすると、左側の部分は $E_l-C_1^u-C_2^l-C_5^u-C_1^l-C_2^l-C_5^l-E_r'$ と表され、これは Fig. 7 (a) に示したひとえ結びに等しくなる。すなわち、左側の部分は線分 L_1^u と ${}_5L_4^l$ を引っ張ることにより締結することができる。このとき、交差状態が変化しないように、線分 ${}_3L$ はしっかりと把持されている必要がある。したがって、引き解け結びは、三線分 L_1^u 、 ${}_5L_4^l$ 、 ${}_3L$ を把持して引っ張ることにより締結が可能となる。Fig. 7 (c) に示す結び目は、どのように分割してもそのような締結できる部分を持っていない。したがって、この結び目は締結することのできない結び目ということになる。以上のことから、結び目は締結可能な結び目と締結不可能な結び目とに分類できる。Fig. 7 (a) および Fig. 7 (b) は締結可能な結び目であり、Fig. 7 (c) は締結不可能な結び目である。さらに、締結可能な結び目の中には、両終端線分を引っ張っただけで締結できるものと、両終端線分だけを引っ張ったのでは締結できないものがある。そこで本章では、結び目を締

結するために、どの部分を引っ張るかという締め操作計画について考察する。

初めに、締結について再定義する。本研究では、交差状態を変化させることなく、把持した線分を引っ張って、把持していない線分の長さを無限小にすることを「締結する」と定義する。さらに、Fig. 7 (a) のように、両終端線分を引っ張るだけで締結可能な結び目を完全締結可能な結び目、Fig. 7 (b) のように、締結のために両終端線分以外の線分を引っ張る必要のある結び目を部分締結可能な結び目と定義する。例えば、8 の字結びは完全締結可能な結び目であり、ちょう結びは部分締結可能な結び目である。

次に、締結のために引っ張るべき線分の特定手法について考える。投影面において線状物体に囲まれた閉領域群を内部領域と定義し、それ以外の投影面内の領域を外部領域と定義する。すると、線状物体を構成する線分は、外部領域に接しているものと、外部領域に接していないものに分けられる。ここでは、前者を輪郭線分、後者を内部線分と定義する。Fig. 9 に、引き解け結びにおける内部領域、外部領域、内部線分、輪郭線分を示す。線状物体を締結するために、両終端線分を無限遠まで引っ張ることが可能でなければならないことを考えると、終端線分が内部線分である場合には、交差状態を変化させずに締結することが不可能である場合がある。したがって、本論文では、物体の両終端線分はともに輪郭線分であると仮定する。また、Fig. 8 (b) および Fig. 8 (c) のように分割された線状物体の部分も、締結可能かどうかを判定するためには、無限遠まで引っ張ることの可能な輪郭線分を持たなくてはならない。そこで、線状物体の交差状態から輪郭線分を抽出し、それをを用いて締結可能性を判定する手順を以下に示す。

まずは、輪郭線分の抽出手法について説明する。輪郭線分は外部領域の境界であり、その両端の交点において他の輪郭線分と交差している。したがって、輪郭線分である一方の終端線分から、前の線分的一端と交差を共有し、かつ外部領域に接する線分をトレースしていくことで、全輪郭線分を抽出することができる。ここで、いずれの輪郭線分もその右側が外部領域と接するようにトレース方向を定め、物体左端より輪郭線分の抽出を開始する。このとき、線分のトレース方向と2章での交差のカウント方向は一致している。物体をトレースし、上交点あるいは下交点に出合った場合には、下交点あるいは上交点に乗り換え、トレース方向の右側に外部領域が存在するようにトレ

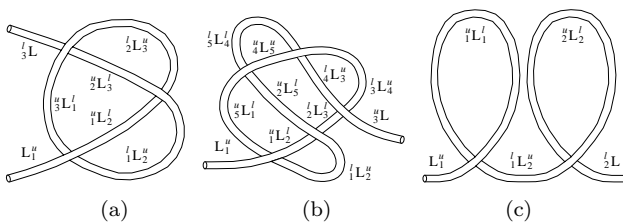


Fig. 7 Completely tightenable, partially tightenable, and untightenable knots

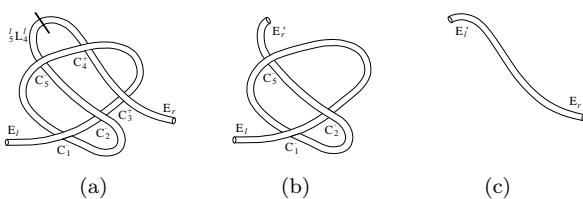


Fig. 8 Dividing of slipknot

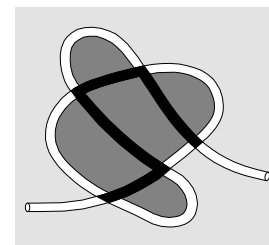


Fig. 9 Example of inner regions/segments and outer region/segments

Table 1 Rule of switching at crossing

previous direction	crossing		next direction
same	right-handed helical	lower → upper	same
		upper → lower	opposite
	left-handed helical	lower → upper	opposite
		upper → lower	same
opposite	right-handed helical	lower → upper	opposite
		upper → lower	same
	left-handed helical	lower → upper	same
		upper → lower	opposite

スを続ける。例えば、出合った交点が右手交差であり、上交点から下交点に乗り換えた場合には、交点のカウンタ方向とは逆の方向にトレースしなければならない。Table 1 に、交点乗り換え時のトレース方向を示す。右端点にたどり着いたら、方向を反転させてトレースを続行し、左端点に戻ってきた時点で終了とする。最終的にトレースされた線分が輪郭線分となる。例えば、Fig. 7 (b) に示した結び目の交差状態は以下のように表される。

$$E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_5^{l-} - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r. \quad (10)$$

このとき、上記輪郭線分の抽出手法を用いることにより、輪郭線分は $L_1^u, {}^1L_2^u, {}^2L_3^l, {}^3L, {}^3L_4^u, {}^5L_4^l, {}^5L_1^l$ となる。この抽出結果は、Fig. 9 に示す輪郭/内部線分の分類に一致する。このように、式 (10) のような、幾何学的な情報を持たない線状物体の交差状態表現から、Table 1 を利用して線分をトレースすることで、物体の輪郭線分を抽出することができる。部分締結可能か否かを判定する場合には、抽出された輪郭線分だけを分割するものとする。

次に、締結可能性の判定方法について説明する。完全締結可能な結び目は、両終端線分のみを引っ張ることによって締結することができる。締結のために両終端線分が把持されている場合、この結び目に解離操作 U_{OIV} を適用することはできないが、この結び目が解離操作 U_{OI} あるいは U_{OII} によって解くことができるとすると、締め操作中に交差状態が変化してしまう可能性がある。これは締結の条件を満たさないため、完全締結可能な結び目は、式 (2)~(4) のような解離操作 U_{OI} および U_{OII} を適用できる領域を持つてはならないことになる。したがって、交差状態表現から、完全締結可能であるかどうかを判定することができる。もし、ある結び目が完全締結不可能だった場合には、部分締結可能であるか否かについて判定を続ける。結び目をいくつかの輪郭線分上で分割し、複数の部分に分ける。複数の部分にまたがって存在する交差、すなわち、上/下交点はある部分に存在し、対になる下/上交点がそれとは異なる部分に存在するような交差を消去する。もし、少なくとも一つの部分が自分自身との交差を持ち、かつすべての部分が解離操作 U_{OI} および U_{OII} を適用できる領域を持たなかった場合には、その結び目は部分締結可能な結び目であり、締結のためには、両終端線分とともに分割した輪郭線分を引っ張ればよいことになる。すべての輪郭線分を分割しても上記条件が満たされなかった場合、その結び目は締結不可能な結び目となる。例えば、Fig. 7 (b) に

示す引き解け結び目は解離操作 U_{OII} を適用できる領域 $\dots - C_4^{u-} - C_5^{u-} \dots - C_5^{l-} - C_4^{l-} \dots$ を含む。これは、引き解け結び目が完全締結可能な結び目ではないことを意味する。ここで、引き解け結び目の輪郭線分は $L_1^u, {}^1L_2^u, {}^2L_3^l, {}^3L, {}^3L_4^u, {}^5L_4^l, {}^5L_1^l$ であるので、これらの線分で物体を分割することを考える。輪郭線分 ${}^5L_1^l$ 上で分割した場合、分割された部分 P_{11} および P_{12} は以下のように表される。

$$P_{11} : E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - E_r' \Rightarrow E_l - E_r', \quad (11)$$

$$P_{12} : E_l' - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_5^{l-} - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r \Rightarrow E_l' - E_r. \quad (12)$$

双方の部分にまたがる交差を消去すると、双方とも交差を持たなくなってしまうので、輪郭線分 ${}^5L_1^l$ は引っ張るべき線分ではない。輪郭線分 ${}^1L_2^u$ 上で分割した場合、分割された部分 P_{21} および P_{22} は以下のように表される。

$$P_{21} : E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - E_r' \Rightarrow E_l - C_1^{u-} - C_1^{l-} - E_r', \quad (13)$$

$$P_{22} : E_l' - C_2^{u-} - C_5^{l-} - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r \Rightarrow E_l' - E_r. \quad (14)$$

部分 P_{21} は解離操作 U_{OI} を適用できる領域 $\dots - C_1^{u-} - C_1^{l-} \dots$ を含むため、輪郭線分 ${}^1L_2^u$ はやはり引っ張るべき線分ではない。輪郭線分 ${}^5L_4^l$ 上で分割した場合、分割された部分 P_{31} および P_{32} は以下のように表される。

$$P_{31} : E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_3^{l+} - C_4^{u+} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_5^{l-} - E_r' \Rightarrow E_l - C_1^{u-} - C_2^{l-} - C_5^{u-} - C_1^{l-} - C_2^{u-} - C_5^{l-} - E_r', \quad (15)$$

$$P_{32} : E_l' - C_4^{l+} - C_3^{u+} - E_r \Rightarrow E_l' - E_r. \quad (16)$$

部分 P_{31} は、式 (2)~(4) で表されるような解離操作 U_{OI} および U_{OII} を適用できる領域を含まない。したがって、この結び目は部分締結可能であり、三線分 $L_1^u, {}^5L_4^l, {}^3L$ を引っ張ることにより締結することができる。さらに、締結可能であるのは部分 P_{31} のみであるので、 P_{31} の両端 E_l および E_r' 、すなわち、線分 L_1^u および ${}^5L_4^l$ の間の距離が離れるように引っ張れば、この部分は締結される。このとき、線分 3L は、交差状態が変化しないように固定しておけばよいということになる。このように、上記手法により、交差状態表現からその物体が締結可能か否かを判定し、締結可能であれば、締結のための締め操作計画を生成することができる。

一般的に、複雑な結び目は単純な結び目の組み合わせからなっている。例えば、Fig. 10 (a) のようなちょう結びには、ひとえ結びが含まれている。このような複雑な結び目の締め操作計画について考える。解離操作 U_{OI} および U_{OII} が適用できる領域を含まず、両端がともに輪郭線分で、かつ他の部分にまたがって存在する交差を持たない、ある連続した部分を締結可能部分と定義する。締結可能部分は、結び目の締結可能性判定において、単一の線分と見なすことができる。ちょう結びの場合には、Fig. 10 (b) のように簡略化して表すことができる。Fig. 10 (b) の結び目は部分締結可能であり、両終端線分と二つの弓状の線

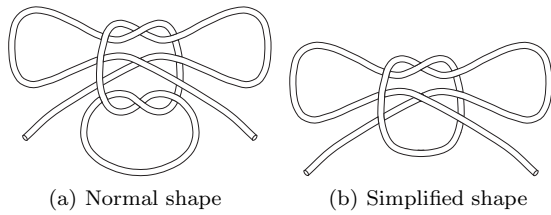
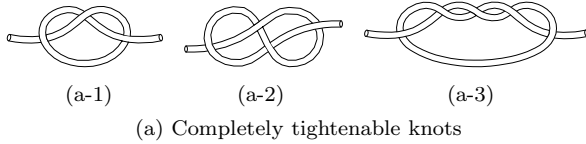
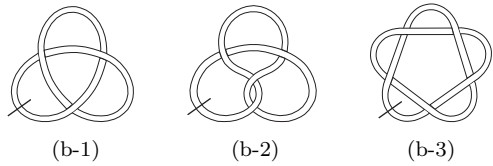


Fig. 10 Bowknot



(a) Completely tightenable knots



(b) Looped prime knots

Fig. 11 Completely tightenable knots and looped knots in the knot theory

分の計四つの線分を引っ張ることにより締結可能であることが分かる。これは、我々が普段行っているちょう結びの締め操作に一致する。

完全締結可能な結び目、あるいは締結可能部分は、交差状態を変化させることなく両端点を繋げた場合、結び目理論における閉じた結び目に対一に対応する。Fig. 11 に、完全締結可能な結び目とそれに対応する閉じた結び目の例を示す。例えば、Fig. 11 (a-1) のひとえ結びは Fig. 11 (b-1) の交差を三つ有する結び目に、Fig. 11 (a-2) の 8 の字結びは Fig. 11 (b-2) の交差を四つ有する結び目に相当する。結び目理論では、閉じた結び目は交差の個数と位相によって分類されている。したがって、この分類を利用して完全締結可能な結び目および締結可能部分のデータベースを作成できる。このデータベースを用いることで、結び目理論における閉じた結び目を、締結可能性の判定に利用することができる。

6. 結びおよび締め操作の計画と実行

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。Fig. 12 に、本研究で開発した PC と 6 DOF の манипуレータ、CCD カメラからなる締結操作計画/実行システムを示す。化学繊維製ではあるが、詳しい物理的特性は分からないひも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。

Fig. 13 に、要求される作業の例を示す。これは引き解け結びの締結操作に相当し、Fig. 13 (a) の初期状態は E_l-E_r 、Fig. 13 (b) の目標状態は $E_l-C_1^-C_2^-C_3^+C_4^+C_5^-C_1^-C_2^-C_5^-C_4^+C_3^+-E_r$ と表すことができる。このケーススタディにおける前提を以下に示す。

- ・物体の右端はマニピュレーション中、常に固定されている。

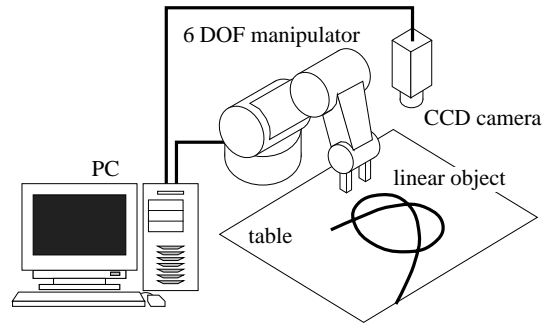


Fig. 12 Overview of developed system

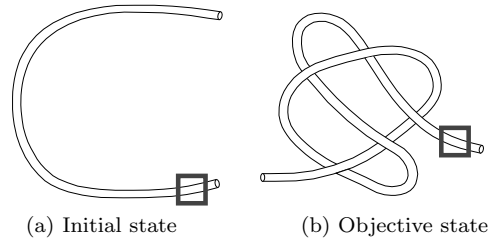


Fig. 13 Example of required manipulation—tying slipknot

Fig. 13 中の四角は、固定具の位置を表している。

- ・マニピュレータは 1 回の交差操作が終了する度に物体を解放する。

このとき、結び操作過程は以下のようにして生成される。要求される作業は、初期状態より目標状態の方が交差が多いので、まずは目標状態から初期状態への解離操作列を求める。目標状態は、解離操作 UO_{II} を適用できる部分 $\dots-C_4^{u+}-C_5^u-\dots-C_5^l-C_4^{l+}-\dots$ を含んでいる。また、解離操作 UO_{IV} を適用できる部分 $E_l-C_1^u-\dots-C_1^l-\dots$ および $\dots-C_3^{l+}-\dots-C_3^{u+}-E_r$ を含んでいる。解離操作 UO_{II} を適用した場合、交差 C_4^+ と C_5^- が消去される。このとき、操作適用後の物体の状態は $E_l-C_1^u-C_2^l-C_3^l-C_1^l-C_2^u-C_3^u-E_r$ となる。解離操作 UO_{IV} を適用した場合、交差 C_1^- あるいは C_3^+ が消去される。前者の場合、物体の状態は、交差番号を付け直すことにより、 $E_l-C_1^l-C_2^l-C_3^u-C_4^-C_1^u-C_4^l-C_3^{l+}-C_2^u-E_r$ となる。後者の場合は、 $E_l-C_1^u-C_2^l-C_3^u-C_4^-C_1^l-C_2^u-C_4^l-C_3^{l+}-E_r$ となる。このように、各交差状態から適用可能な遷移を生成することができる。こうして生成された解離操作列を、対応する交差操作列に置き換えることにより、可能性のある結び操作過程を生成することができる。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、Fig. 14 に示すように、交差状態を表す 14 のノードと、その間の操作を表す 39 のアークからなる状態遷移グラフが得られる。入換操作 AO_{III} も含めた場合には、状態数 21、操作数 68 からなる状態遷移グラフが得られる。Fig. 15 に、入換操作 AO_{III} を考慮することによって新たに生成された状態と操作を示す。Fig. 15 において、 S_{15} 以上の状態が新しい状態であり、 S_{14} 以下の状態は、Fig. 14 中の同じ番号を持つ状態に対応している。一般的に、結び目は交差数が多いほど、入換操作 AO_{III} を適用できる可能性が高くなり、結果として生成される状態遷移数も多くなる。例えば、11 の交差を有するちょう結

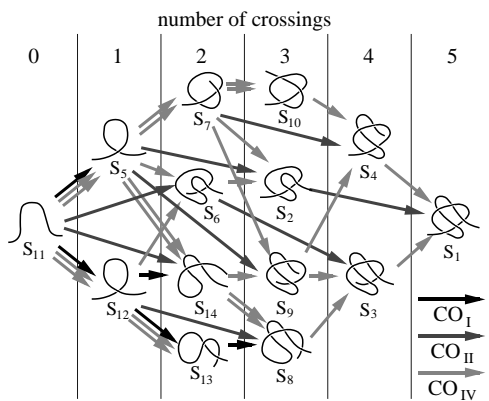


Fig. 14 Result of knotting process planning without AOIII

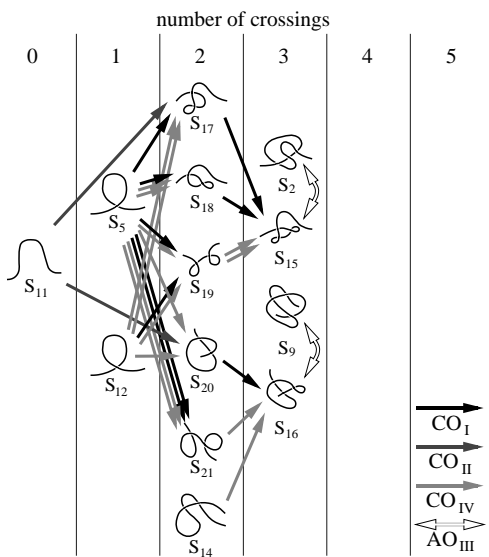


Fig. 15 Additional states and operations when AOIII is considered

びの結び操作過程は、入換操作 AOIII を含めない場合には、状態数 53、操作数 153 からなるグラフで表現されるが、入換操作 AOIII を含めた場合には、状態数 932、操作数 4,282 からなるグラフとなる。ここで、生成された操作過程の評価指標として状態遷移回数を考慮すると、Fig. 14 における三つの操作過程 $S_{11} \rightarrow S_5 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$ 、 $S_{11} \rightarrow S_6 \rightarrow S_3 \rightarrow S_1$ 、 $S_{11} \rightarrow S_6 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$ が候補として選ばれる。定性操作計画において絞り込めるのはここまでであり、この三つの操作過程の中から最適なものを選択するためには、操作に必要な具体的な力やモーメント、あるいは移動距離等を求めるための定量解析が必要となる。本実験では、例として $S_{11} \rightarrow S_5 \rightarrow S_2 \rightarrow S_1$ を選択した。次に、選択した過程に対して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 $S_{11} \rightarrow S_5$ に対して Fig. 5 (a-1) に示す定性動作を、状態遷移 $S_5 \rightarrow S_2$ に対して Fig. 5 (b-3) に示す定性動作を、状態遷移 $S_2 \rightarrow S_1$ に対して Fig. 5 (b-16) に示す定性動作を選択した。結果として、Fig. 16 のような結び操作計画が得られる。

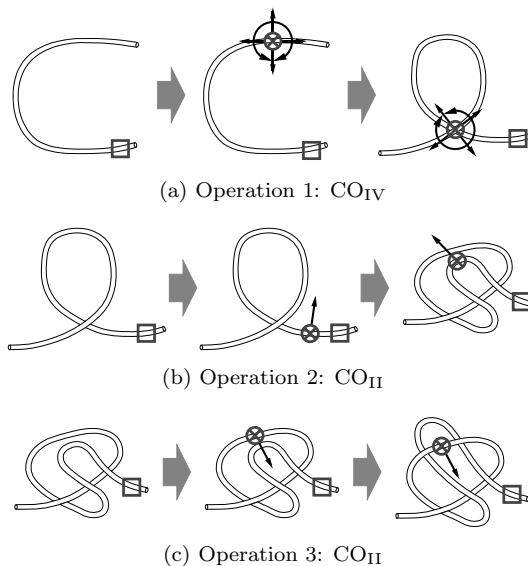


Fig. 16 Generated manipulation plans for tying slipknot

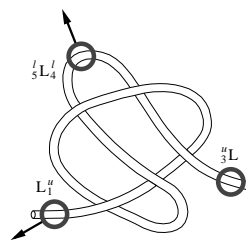


Fig. 17 Pulling segments for tightening slipknot

続いて、締め操作について考える。5 章でも示したように、引き解け結びは線分 $\frac{3}{5}L$ を固定したうえで、二線分 L_1' および $\frac{1}{5}L_4'$ を、互いに遠ざかる方向に引っ張ることにより締結できる。Fig. 17 に、締結のために引っ張るべき上記線分を示す。一般に、締め操作においては、引っ張るべき線分が複数存在するため、SCARA ロボットでの実行は可能であるが、単腕では操作を実現できない。この例においては、物体の右端点は固定されているので、締結するためには左終端線分 L_1' と線分 $\frac{1}{5}L_4'$ を引っ張る必要がある。しかし、マニピュレータは 1 台しか使用できないので、この 2 箇所を同時に把持することはできない。そこで本実験では、Fig. 18 (h) に示すように、結び操作終了後、左終端線分 L_1' をおもりによって固定することとする。これにより、引き解け結びは、線分 $\frac{1}{5}L_4'$ のみを左終端線分 L_1' から離れる方向に引っ張ることにより締結できる。

本実験では、物体の具体的な把持点の位置/姿勢は、CCD カメラより得られた画像を処理することにより求めたが、その把持点が物体上のどこに位置するか、すなわち物体の一端から物体に沿った距離で表すとどこになるのか、およびその把持点の目標位置/目標姿勢については手動で与えている。これについては、線状物体の位相と、各線分が内部線分であるか輪郭線分であるかを考慮することにより、定性的にもある程度決定できると考えており、現在考察を進めている。Fig. 18 に結びおよび締め操作の実験結果を示す。図に示すように、3 軸の並進動作と 1 軸の回転動作によって、線状物体のある部分を別の部分

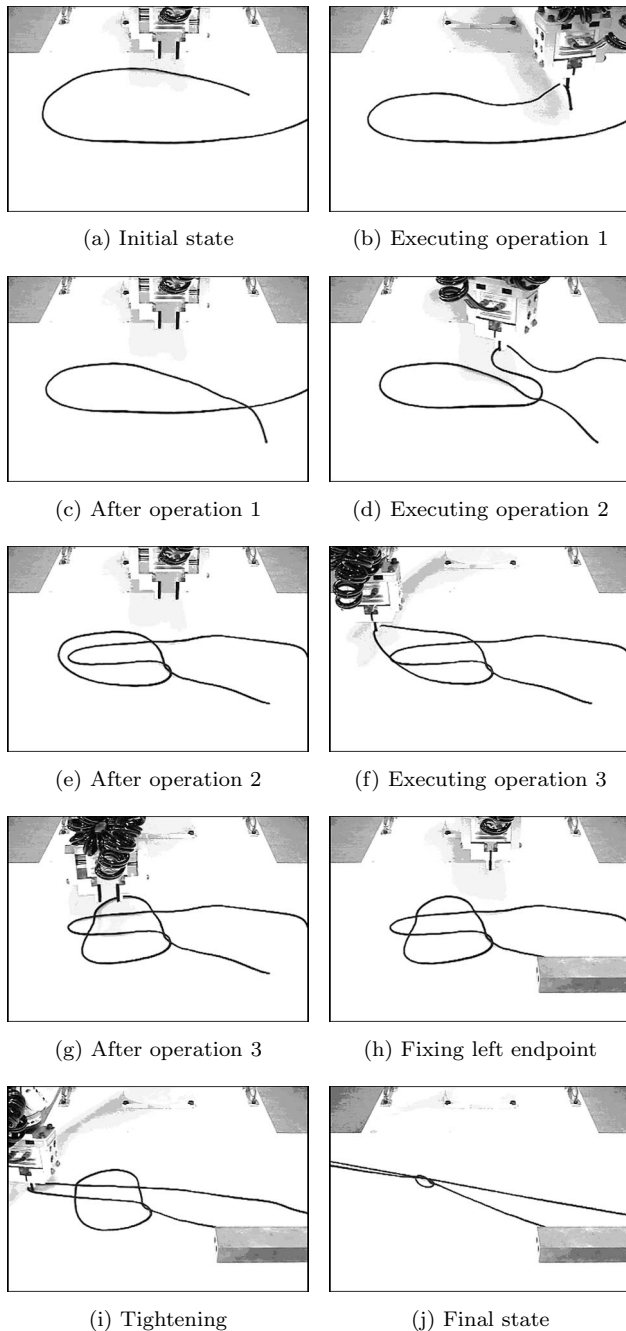


Fig. 18 Result of manipulation for tying slipknot

に重ねるという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順で、種々の結び目を作成できることを意味している。

7. 結 論

本論文では、線状物体の結びおよび締め操作を定性的に計画するための手法を提案した。結論を以下に示す。

まず、線状物体のマニピュレーション過程を、四つの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、マニピュレーション過程を実現するための物体の把持点とその移動方向、すなわち定性動作の決定手法について提案した。これより、線状物体の初期状態と目標状態が与えられれば、要求を満たすような定性的なマニピュレーション計画を求めることができる。また、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。続いて、結び目に固定等の機能を発揮させるために必要な締め操作計画の導出手法について提案した。最後に、上記手法に基づいて試作システムを構築し、引き解け結びの締結操作をシステムにより自動計画、自動実行できることを示した。特に、単腕ロボットの3軸並進と1軸回転のみにより、線状物体のある部分を他の部分に繰り返して重ねていくことで結び操作が達成できることを示した。

今後は、具体的な結びおよび締め操作を行うための把持位置/把持姿勢、および目標位置/目標姿勢の決定手法について、変形シミュレーションとの統合も含めて考察していく。

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)を受けて行われたものである。ここに謝意を表す。

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, vol.3, no.6, pp.538-547, 1985.
- [2] J.E. Hopcroft, J.K. Kearney and D.B. Kraftt: “A Case Study of Flexible Object Manipulation,” Int. J. of Robotics Research, vol.10, no.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 International Conference on 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, vol.41, no.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. of Robotics Research, vol.23, no.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, vol.23, no.3, pp.344-351, 2005.



若松栄史 (Hidefumi Wakamatsu)

1969年7月27日生。1995年大阪大学大学院工学研究科博士後期課程中退。同年大阪大学大学院工学研究科助手，現在に至る。柔軟物のマニピュレーション，CADに関する研究に従事。博士（工学）。（日本ロボット学会正会員）



荒井栄司 (Eiji Arai)

1953年1月15日生。1980年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年神戸大学工学部助手。1984年静岡大学工学部助教授。1992年東京都立大学工学部助教授。1995年大阪大学大学院工学研究科教授，現在に至る。機械設計の次世代CAD/CAMに関する研究に従事。工学博士。



妻屋 彰 (Akira Tsumaya)

1969年1月23日生。1998年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了，同年東京大学人工物工学研究センターリサーチ・アソシエイト。2000年大阪大学先端科学技術共同研究センター助手。2001年同大学大学院工学研究科助手，現在に至る。設計方法論，統合設計システムに関する研究に従事。博士

(工学)。



平井慎一 (Shinichi Hirai)

1963年3月19日生。1990年京都大学大学院工学研究科博士課程単位取得退学。同年大阪大学工学部助手。1995年同助教授。1996年立命館大学理工学部助教授。2002年同教授，現在に至る。柔軟物ハンドリング，リアルタイムビジョン，分散マニピュレーションなどの研究に従事。博士（工学）。

(日本ロボット学会正会員)