

結び / 解き操作を含めた線状物体のマニピュレーション

若松 栄史^{*1} 妻屋 彰^{*1} 荒井 栄司^{*1} 平井 慎一^{*2}

Linear Object Manipulation Including Knotting/Unknotting

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

A planning method for linear object manipulation including knotting/unknotting in the three-dimensional space is proposed. Firstly, topological states of a linear object are represented as sequences of crossing points including the crossing type at each crossing point. Secondly, transitions among crossing states are defined. They correspond to operations that change the number of crossing points or permute their sequence. Then, we can generate possible sequences of crossing state transitions, that is, possible manipulation processes from the initial state to a given objective state. Thirdly, a method for determination of actions, that is, grasping points and their moving direction, is proposed in order to realize derived manipulation processes. Furthermore, criteria for evaluation of manipulation processes are introduced in order to reduce the candidates of manipulation plans. Finally, it is demonstrated that our developed system based on the above method can generate and execute manipulation plans for untying an overhand knot.

Key Words: Linear Objects, Manipulation, Knotting, Planning

1. 結 論

把持や組立等のマニピュレーション作業の大部分は、物体同士の機械的接触を介して行われる。剛体のマニピュレーションは、対象物とハンドあるいは作業環境との接触状態の移り変わりとして表現できるため、接触状態グラフを用いた作業計画手法が提案されてきている [1] [2]。しかしながら、柔軟物体のマニピュレーション計画における系統的な手法はまだ確立されていない。

ケーブルやチューブ等に代表される線状物体は工業製品に広く用いられている。これらの物体は狭隘な空間に押し込まれることが多く、変形しているのが常態である。また、ワイヤーやロープは、他の物体の固定や締結、梱包にも利用されている。このような場合、線状物体を特定の変形状態、すなわち結ばれた状態にすることで要求される機能を発揮することになる。包装産業の分野では、装飾としての結び目の作成に、また、医療分野でも手術系の縫合等に結び操作の自動化の要求がある。ともに必要とされる結び目は 1 種類ではなく、また状況によって結び目の種類も異なるため、人間の動作を単に模倣するだけでは不十分である。ただし、必要とされるのは最終的な結び目の形

状、あるいはその形状が発揮する機能であり、結び方そのものに対する制約はあまりない。結び操作を解析し、モデル化することができれば、操作を行う機械システムに適した結び方を導出することができる。結果として、人間と同じ双腕多指の構造ではなくとも多様な結び作業を実現できるような機械システムの設計に役立つと考えられる。

一方で、線状物体のマニピュレーションにおいて、物体の予期しない絡まりは避けなくてはならない。したがって、結びあるいは絡まりを解析することは、線状物体のマニピュレーションにおいて重要である。

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 [3]。しかし、紐で輪を作り、その中に紐の一端を通すという結び方はあらかじめ与えられている。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結び操作を実現しているが、結び方自体は人間が与えている [4]。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が、提案しているのはロープの曲げ剛性の同定手法であり、円柱への結び方はあらかじめ与えられている [5]。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 [6]。しかし、

原稿受付 2004 年 4 月 14 日

^{*1}大阪大学大学院

^{*2}立命館大学

^{*1}Osaka University

^{*2}Ritsumeikan University

結び方そのものをシステムが自動計画するには至っておらず、結び操作は人間の模倣にとどまっている。

人間が行う蝶結びには大体決まったやり方があるが、必ずしもそれ 1 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。したがって、線状物体の結びにおいて、結び操作の計画は重要である。

一方、Phillips らは、particle-based model によって線状物体を表現し、結びをシミュレートしている [7]。しかし、着目しているのは形状変化のみであり、どのように操作すればそのような形状になるのかについては触れていない。また、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 [8]。この結び目理論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が、状態遷移を引き起こす操作については研究の対象外である。

線状物体のマニピュレーションを実現するためには、物体の状態表現や状態遷移のルールだけでなく、状態遷移と操作とのかわり、すなわち、どこをどう動かせばそのような状態遷移が生じるのかについて考える必要がある。

そこで本論文では、結び / 解き操作を含めた線状物体のマニピュレーション過程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。また、得られた定性的計画から、視覚情報を用いて具体的な把持位置とその移動方向を決定する。これにより、ロボットシステムによる結び / 解き操作の自動計画と実行を目指す。

まず、線状物体の変形状態を定性的に表現する手法について説明する。次に、状態を遷移させるための基本操作を定義する。これにより、線状物体のマニピュレーション過程を、基本操作による状態の移り変わりとして表現する。続いて、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の決定手法について提案する。さらに、得られた定性的マニピュレーション計画の評価基準を導入し、マニピュレーション計画の候補を絞り込む。最後に、ひとえ結びの解き操作を例に、本論文で提案した手法が、線状物体のマニピュレーション作業の自動計画と実行に有効であることを示す。

2. 線状物体の交差状態表現

一般的に、マニピュレーション過程は、対象物とその周囲の物体との有限個の接触状態とその間の状態遷移として表現される。線状物体のマニピュレーション、特に結び操作においては、自己接触を考慮する必要がある。さらに、結び目によって物体の自己接触の仕方は異なる。そこで本章では、線状物体の自己接触を有限個の状態として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。これにより、物体の自己接触は、投影面上での曲線の交差とみなすことができる。ただし、交差の仕方は投影面に依存する。次に、投影された物体に沿って、初めて通過する交点に番号をつけていく。Fig. 1 に、線状物体の状態表現の例を示す。Fig. 1 では、射影された物体は五つの交点を持ち、その交点の並び方は、左から $E_l-C_1-C_2-C_3-C_4-C_5-C_1-$

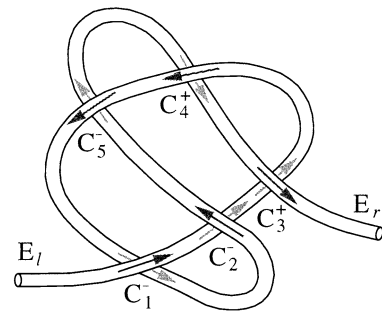


Fig. 1 Example of knotted linear object

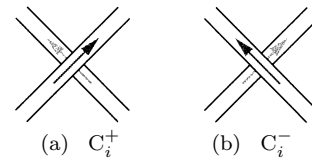


Fig. 2 Crossing type

$C_2-C_5-C_4-C_3-E_r$ と表される。ここで、 E_l は左端点、 E_r は右端点、 C_1 から C_5 は各交点を表す。このように、物体の状態は交点の並び方によって区別することができる。さらに、各交点は二つのタイプに分類することができる。一つは、Fig. 2 (a) のように、交点における上側の物体が下側に対し右に向かって交差するタイプ、もう一つは、Fig. 2 (b) のように、上側が下側に対し左に向かって交差するタイプである。本論文では、前者を右手交差 C_i^+ 、後者を左手交差 C_i^- と定義する。これにより、Fig. 1 に示す状態は $E_l-C_1^--C_2^--C_3^--C_4^+-C_5^--C_1^--C_2^--C_5^--C_4^+-C_3^+-E_r$ と表される。

このように、結び目を含む線状物体の状態は、物体の長さや太さ等の物理的特性にかかわらず、有限個の交差状態によって表すことができる。

3. 状態遷移のための基本操作

本章では、前章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、交点の数を変化させる、あるいは交点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 [8] に相当する。なお、結び目理論における対象は閉じた輪だが、本論文における線状物体は両端を有すると仮定するため、操作 IV が必要となる。操作 I、操作 II、操作 IV により、交点の数は増減する。操作 III は、交点の数は変えないものの、その並び方を変化させる。さらに、交点数を増やす操作として交差操作 CO_I, CO_{II}, CO_{IV} を、また交点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、交点数の変化しない操作として入換操作 AO_{III} を定義する。

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。

$$\dots -C_i^+-C_i^--\dots \quad (1)$$

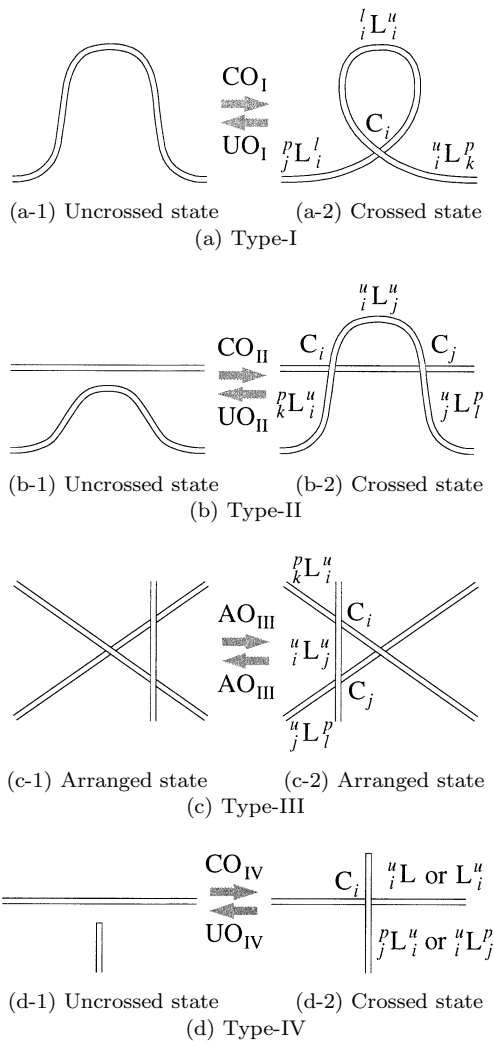


Fig. 3 Basic operations

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。

$$\dots -C_i^\pm - C_j^\mp - \dots - C_i^\pm - C_j^\mp - \dots, \quad (2)$$

$$\dots -C_i^\pm - C_j^\mp - \dots - C_j^\mp - C_i^\pm - \dots \quad (3)$$

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。

$$E_l - C_i^\pm - \dots - C_i^\pm - \dots, \quad (4)$$

$$\dots - C_i^\pm - \dots - C_i^\pm - E_r. \quad (5)$$

以上のように、解離操作 UO_I, UO_{II}, UO_{IV} は式(1)から式(5)で表される部分にのみ適用することができる。一方、交差操作 CO_I, CO_{II}, CO_{IV} は任意の線分上に適用することができる。したがって、ある交差状態に対し、交差操作によって遷移する可能性のある次の状態は、解離操作によって遷移する可能性のある次の状態と比較して、大変多くなる。例えば、Fig. 3(a-2)の状態に対し解離操作 UO_I を行った場合、次の状態は Fig. 3(a-1)のような交点のない1種類の状態のみだが、交差操作 CO_I を

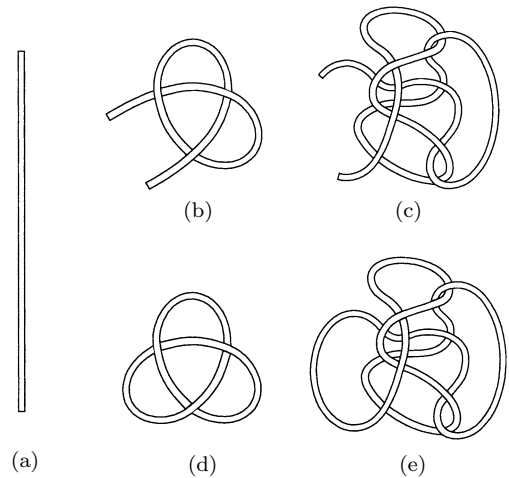


Fig. 4 Unlooped knots and looped knots

行った場合には、Fig.3(a-2)のような交差領域を構成する三つの線分のどこに右手交差、左手交差のどちらの交点を生成するかによって、6種類の違った状態が得られる。そこで本論文では、初期状態と目標状態が与えられた場合、交点の多い状態から交点の少ない状態へと遷移可能な解離操作列を生成することで、マニピュレーション過程を表現する。初期状態が交点のない状態であり、目標状態が結ばれた状態である場合には、上記手法で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得ることができる。

Fig. 4(a) に示す状態を線状物体の初期状態、Fig. 4(c) に示す状態を目標状態とする。ここで、Fig. 4(b) および Fig. 4(c) に示す線状物体の両端を仮想的に繋ぐと、Fig. 4(d) および Fig. 4(e) のような結び目を得られる。Fig. 4(d) の結び目は、一部を切断して繋ぎ直さない限りそれ以上交点を減らすことのできない結び目の一つで、三葉結び目と呼ばれる。Fig. 4(d) と Fig. 4(e) が位相的に等しいとすると、三つのライデマイスター移動、すなわち操作 I、操作 II、操作 III により、Fig. 4(e) の状態から Fig. 4(d) の状態、すなわち交点数が最小の状態へと変形させることが可能であることが証明されている [8]。ここで、両端を持つ線状物体の状態は、交点を有する限り必ず式(4)あるいは式(5)で表される部分を含む。したがって、Fig. 4(b) の結び目は、解離操作 UO_{IV} のみによって Fig. 4(a) の状態に変形できる。これは、交差操作 CO_{IV} のみによって、Fig. 4(a) の状態から Fig. 4(b) の状態に変形できることを意味する。

どのような結び目も、両端を仮想的に繋ぐことによって、操作 I、操作 II、操作 III により、最も交点の少ない状態に変形することが可能である。このようにして変形された結び目は、仮想的に繋いだ両端を切り離すことにより、解離操作 UO_{IV} のみによって、まったく交点のない状態にすることができる。逆に、まったく交点のない状態から、操作 I から操作 IV までを用いて、任意の結び目を生成することができる。したがって、線状物体の結び/解き過程は、Fig. 3 に示す四つの基本操作による状態遷移のみによって表現することが可能となる。なお、Fig. 4(c)

の結び目も、解離操作 UO_{IV} のみによって Fig. 4 (a) の状態にすることは可能である。これは、操作 IV のみによって任意の結び目を生成できることを意味する。ただし、解離操作 UO_{IV} は、両端に最も近い交点のみを解離させる操作であるため、物体中心付近の交点を解離できないなど、可能な操作が限定され、作業効率が悪くなる可能性がある。よって、操作 I, 操作 II, 操作 III を設けている。

Fig. 5 に、要求されるマニピュレーションの例を示す。Fig. 5 (a) の初期状態は $E_l-C_1^-C_2^-C_3^+C_4^+C_5^-C_1^-C_2^-C_5^-C_4^+C_3^+-E_r$ 、そして Fig. 5 (b) の目標状態は E_l-E_r と表すことができる。解離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. 6 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 のアークが得られる。入換操作 AO_{III} を含めると、21 のノードと 69 のアークが得られる。

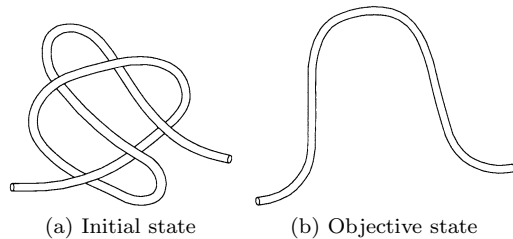


Fig. 5 Example of required manipulation

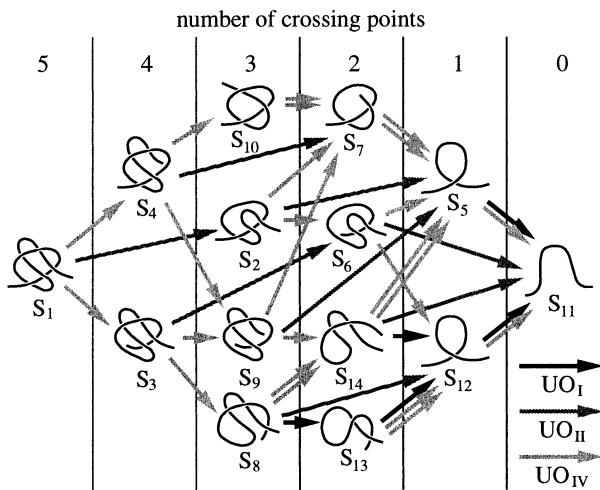


Fig. 6 Result of manipulation process planning

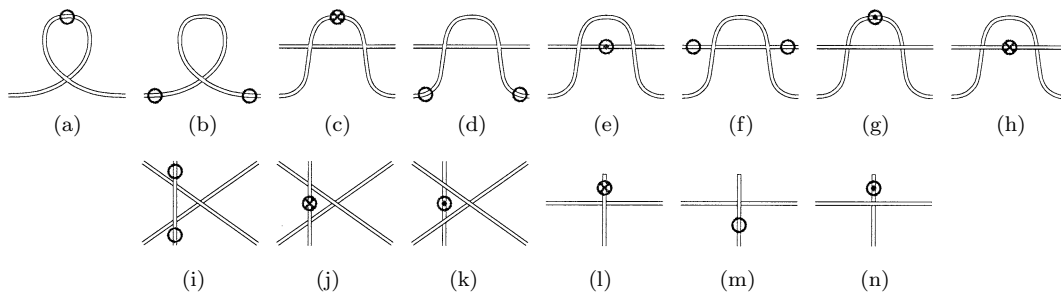


Fig. 7 Grasping patterns

このように、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状態遷移によって表現することができる。また、初期状態と目標状態、さらにはいくつかの中間状態が与えられれば、それらを満たすようなマニピュレーション過程を定性的に計画することができる。

4. 把持点とその移動方向の決定

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。

本論文では、マニピュレータは交点ではなく交点間の線分を把持すると仮定する。交点 C_i と交点 C_j に挟まれる線分を ${}^pL_j^p$ と記述する。ここで、対象とする線分が交点において上側に存在するときは $p = u$ 、下側に存在するときは $p = l$ と記述する。両端点に接する線分は、終端線分として L_i^p あるいは pL_i と記述する。

例えば、Fig. 3 (a-2) に示すような交差領域は三つの線分 ${}^pL_i^l$, ${}^lL_i^u$, ${}^uL_k^p$ から構成されている。ここで、 j と k は一つ前と一つ後の交点番号を表す。 ${}^pL_j^l$ と ${}^uL_k^p$ をこの交差領域の境界線分と呼ぶ。線分 ${}^lL_i^u$ は交点 C_i を解くことによって失われる。このように、解離操作によって失われる線分をターゲット線分と呼ぶ。解離操作を実現するためには、ターゲット線分が両境界線分は必ず把持しなければならないとする。例えば、Fig. 3 (a-2) において、線分 ${}^lL_i^u$ か、二線分 ${}^pL_i^l$ と ${}^uL_j^p$ は必ず把持しなければならない。

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、紙面垂直下向きを表方向からの接近、紙面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。例えば、Fig. 3 (d-2) において、終端線分を裏方向から把持すると、解離操作 UO_{IV} を実現することはできない。

このように考えると、Fig. 7 に示すような 14 の把持パターンが得られる。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。なお、Fig. 7 (g) と Fig. 7 (h), Fig. 7 (k), Fig. 7 (n) は、それぞれ、Fig. 3 (b-2), Fig. 3 (c-2), Fig. 3 (d-2) に示す交差状態の表裏を反転させたものである。

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、物体の中心軸方向の並進、物体の中心軸周りの回転、物体の中心軸に垂直な軸方向の並進、物体の中心軸に垂直な軸周りの回転の四つを用意する。これにより、把持点とその

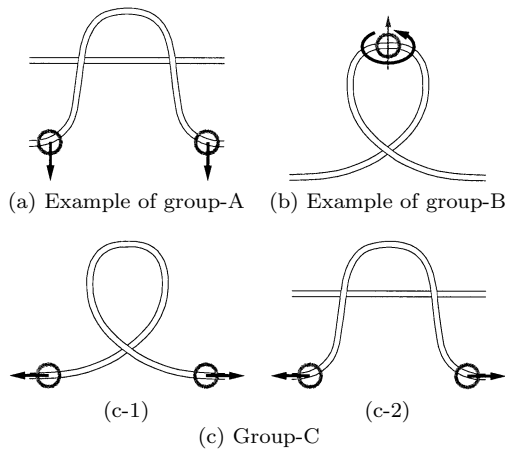


Fig. 8 Motion combinations

移動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、これらの組み合わせを三つのグループに分類する。

グループ A は、Fig. 8 (a) に示すような線分群全体の並進あるいは回転に相当する。この場合、各線分群は剛体とみなすことができ、交差領域の定性的な形状を考慮することによって、解離のための移動方向を得ることができる。

グループ B は、Fig. 8 (b) のように、ターゲット線分の直接把持による移動に相当する。グループ B の場合にも、各交差領域において適切な移動方向を得ることができる。

グループ C は、ターゲット線分に隣接する線分の把持によるターゲット線分の移動に相当する。Fig. 8 (c) のように把持線分を移動させた場合、いずれ物体は直線状になり、ターゲット線分は失われる。このような移動は、物体の実際の物理的特性にかかわらず解離操作を実現できる。

Fig. 8 (c-1) では、両境界線分を中心軸周りに互いに反対方向に捻っても、交点を解ける可能性がある。しかし、その実現可能性は、物体の物性値に依存する。したがって、そのような移動によって解離操作が実現できるかどうかは、定量的な解析を行う必要がある。本論文では、グループ C は Fig. 8 (c) に示すような二つの把持点と移動方向の組み合わせからのみ構成されるとする。

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把持点とその移動方向の組み合わせを得ることができる。これはすなわち、本手法により、単に可能性のある交差状態の移り変わりのみではなく、そのような状態遷移を生じさせるおおよその操作、すなわち「この線分を把持して、この方向に並進/回転させればよい」という定性的なマニピュレーション計画が得られるということになる。

5. マニピュレーション計画の評価

本章では、得られたマニピュレーション計画に対する評価指標を導入する。

まず、一つの遷移経路における状態遷移の数 N_t を考える。本研究では、中間状態が少ないほど、すなわち N_t が少ない経路ほ

どより好ましいとする。ここで、三つの解離操作のうち、 UO_I と UO_{IV} は交点数を 1 減少させ、 UO_{II} は交点数を 2 減少させる。したがって、解離操作 UO_{II} をより多く含む遷移経路を選択することにより、 N_t をより少なくできる。次に、一つの遷移経路における把持点の変更回数 N_c を考える。マニピュレーション中に把持点が変わると、詳細な作業計画において、次に把持すべき線分の位置や姿勢を予測しなければならない。また、把持点の変更にはそれなりの時間を要する。したがって、 N_c が少ない経路ほどより好ましいとする。以上のような評価指標により、マニピュレーション計画の候補を絞ることができる。

例えば、Fig. 5 (a) に示す初期状態における交点数は 5 であり、Fig. 5 (b) に示す目標状態における交点数は 0 である。よって、交点数を 5 減少させる遷移経路が必要となる。二つの UO_{II} と一つの UO_I/UO_{IV} の組み合わせによって得られる遷移経路は交点数を 5 減少させ、かつ $N_t = 3$ で最小となる。これ以上少ない N_t で目標状態に遷移させることはできない。このとき、考えられる三つの解離操作の組み合わせは以下ようになる。

$$OQ_1 : UO_{II} \rightarrow UO_{II} \rightarrow UO_I/UO_{IV}, \quad (6)$$

$$OQ_2 : UO_{II} \rightarrow UO_I/UO_{IV} \rightarrow UO_{II}, \quad (7)$$

$$OQ_3 : UO_I/UO_{IV} \rightarrow UO_{II} \rightarrow UO_{II}. \quad (8)$$

よって、上記操作列 OQ_1, OQ_2, OQ_3 により、線状物体の状態が Fig. 5 (a) から Fig. 5 (b) に遷移可能かどうかをチェックする。この場合、いずれの操作列でも遷移可能であり、対応する状態遷移経路 SQ_1, SQ_2, SQ_3 は Fig. 6 においてそれぞれ以下ようになる。

$$SQ_1 : S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_5 \rightarrow S_{11}, \quad (9)$$

$$SQ_2 : S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow S_6 \rightarrow S_{11}, \quad (10)$$

$$SQ_3 : S_1 \rightarrow S_3 \rightarrow S_6 \rightarrow S_{11}. \quad (11)$$

したがって、上記状態遷移経路が N_t が最も小さくなる経路となる。なお、操作列 OQ_1, OQ_2, OQ_3 のいずれによっても目標状態への遷移が不可能な場合には、一つの UO_{II} と三つの UO_I/UO_{IV} を組み合わせることができる操作列によって、状態遷移を達成できないか考える。このような手順により、最初に可能性のあるすべての状態遷移を含んだ Fig. 6 のようなネットワークを生成することなく、マニピュレーション計画を絞り込むことができる。

N_t が最小となる状態遷移経路が求まった後、 N_c がなるべく小さくなるように各解離操作における把持点を選択する。例として、状態遷移経路 SQ_1 について考える。交差状態 S_1 から S_2 の状態遷移において、Fig. 9 (a) のように、境界線分 $\frac{1}{2}L_5$ と $\frac{1}{4}L_3$ を表方向から把持するものとする。この状態で解離操作 UO_{II} を実行すると、Fig. 9 (b) のようになる。これは、交差状態 S_2 において、線分 $\frac{1}{2}L_3$ を 2 点で把持していることに等しいため、このまま把持点を変更することなく次の解離操作 UO_{II} を実行できる。実行後の状態は Fig. 9 (c) のようになる。交差状態 S_5 である Fig. 9 (c) から交差状態 S_{11} に遷移させるためには、以下のような計画が考えられる。

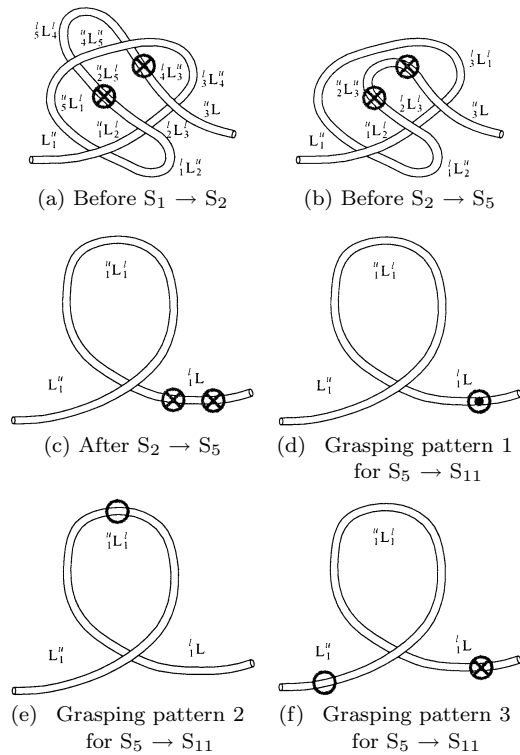


Fig. 9 Grasping patterns and their changing times

- Fig. 9 (d) に示すように、線分 1L を裏方向から把持し直し、解離操作 UO_{IV} を実行する。
- Fig. 9 (e) に示すように、線分 1L は解放し、線分 uL を把持して解離操作 UO_I あるいは解離操作 UO_{IV} を実行する。
- Fig. 9 (f) に示すように、線分 1L を把持したままで、線分 uL も把持し、解離操作 UO_I を実行する。

上記のいずれの場合も、線分を一度持ち変える必要があるため、 $N_c = 1$ となる。その他の把持点についても考慮した結果、 SQ_1 では $N_c = 1$ が最小となる。状態遷移経路 SQ_2 および SQ_3 についても同様に考えると、 SQ_2 では最小で $N_c = 2$ 、 SQ_3 では最小で $N_c = 1$ となる。したがって、把持点の変更回数という観点から見た場合には、状態遷移経路 SQ_2 よりも SQ_1 および SQ_3 の方がより好ましいということがいえる。このように、 N_c を考慮することにより、さらにマニピュレーション計画の候補を絞り込むことができる。

本論文で提案した評価指標による評価の結果、上記のように複数のマニピュレーション計画が得られる可能性がある。これらの計画は、あくまでも定性的には可能であるというラフな計画であるため、それぞれの実現可能性をチェックしてさらに候補を絞り込み、マニピュレータの軌道等のより詳細な計画を得るためには、線状物体の具体的な寸法や剛性等の物性値を用いて変形シミュレーションを行い、何らかの定量的評価を行う必要がある。

6. ケーススタディ

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. 10 に、本研究で開発した、PC と 6 DOF のマニピュレー

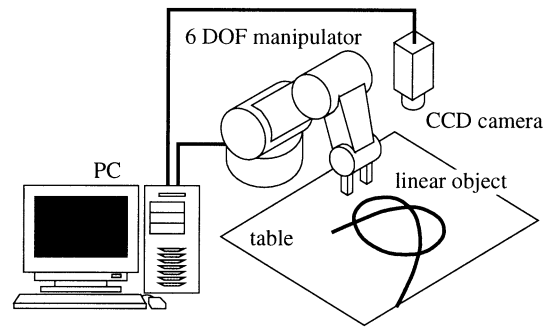


Fig. 10 Overview of developed system

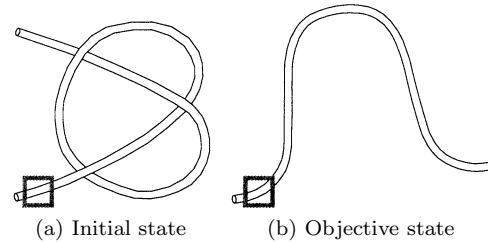


Fig. 11 Required manipulation - untying of overhand knot

タ、CCD カメラからなるシステムを示す。ゴム製ではあるが、詳しい物理的特性は分からない線状物体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. 11 に要求作業を示す。これは、ひとえ結びを解く作業に相当する。Fig. 11 (a) に示す初期状態は $E_l-C_1^-C_2^-C_3^-C_1^-C_2^-C_3^-E_r$ 、Fig. 11 (b) に示す目標状態は E_l-E_r と表現することができる。

このケーススタディにおける前提を以下に示す。

- 物体の左端はマニピュレーション中、常に固定されている。Fig. 11 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 台のみ使用できる。
- マニピュレータは投影面の表方向からのみ接近できる。
- マニピュレータは 1 回の解離操作が終了するたびに物体を解放する。

このとき、本論文の手法により、要求を満たす状態遷移経路が一つだけ得られる。これは三つの状態遷移から構成され、Fig. 6 における遷移経路 $S_{10} \rightarrow S_7 \rightarrow S_5 \rightarrow S_{11}$ に相当する。さらに、評価指標 N_c を考慮することにより、Fig. 12 に示すマニピュレーション計画が選択される。

次に、システムは、CCD カメラより得られた画像を二値化・細線化し、線状物体の中心軸を抽出する。このケーススタディにおいては、物体左端は画像の外に、物体右端は画像の中にあるものと仮定し、物体中心軸を画像外縁よりトレースして、出合った交点に番号を付けていく。ここで、物体が自身と接触してはいるが交差してはいない状態はないものと仮定し、交点の前後では、対になる線分の右側から交点に入った線分は左側へ出ていくようにトレースする。これにより、物体の交差状態を求めることができる。今回の実験では、簡単のため、各交点においてどちらの線分が上側であるかという情報はあらかじめ与

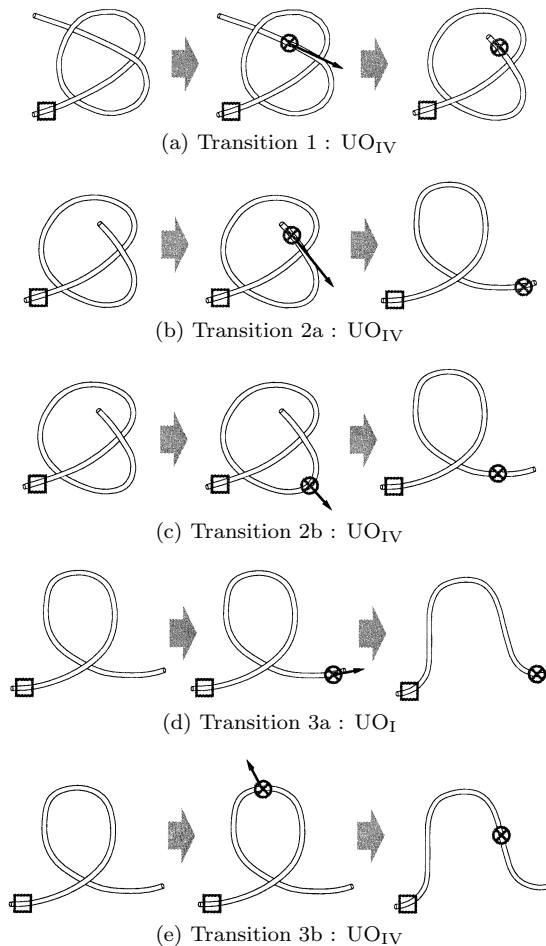


Fig. 12 Generated manipulation plans

えたが、ステレオカメラを用いれば、交点における上下関係を特定できる [6]。また、各線分の把持点は線分の中点とし、移動方向を決定するための各軸は、把持点における接線方向から計算した。状態遷移が生じるために必要な把持点の移動距離は不明であるため、物体をある程度移動させた後、状態を再度認識し、状態が変化するまで移動と認識を繰り返すこととした。

このようにして、マニピュレータは生成された計画に従って物体を把持し、移動し、解放する。このケーススタディでは、マニピュレータの指先を挿入する空間の大きさとマニピュレータの可動範囲を考慮することにより、遷移 2b と遷移 3a が選択されている。Fig. 13 にこのマニピュレーションの結果を示す。

このように、本手法は、線状物体のマニピュレーションにおいて、作業の自動計画と自動実行に有効であるといえる。

本論文では、提案した手法により、線状物体のマニピュレーション作業を定性的に計画することができたが、マニピュレータの具体的な把持位置や軌道を詳細に決定するには不十分である。しかしながら、我々は、すでに結び目形状を含めた線状物体の変形モデリング手法を提案し、妥当性を確認している [9]。例として、Fig. 14 にひとえ結びの形状を計算した結果を示す。したがって、本論文で提案した定性的計画手法と定量的解析を組み合わせることにより、より詳細なマニピュレーション計画

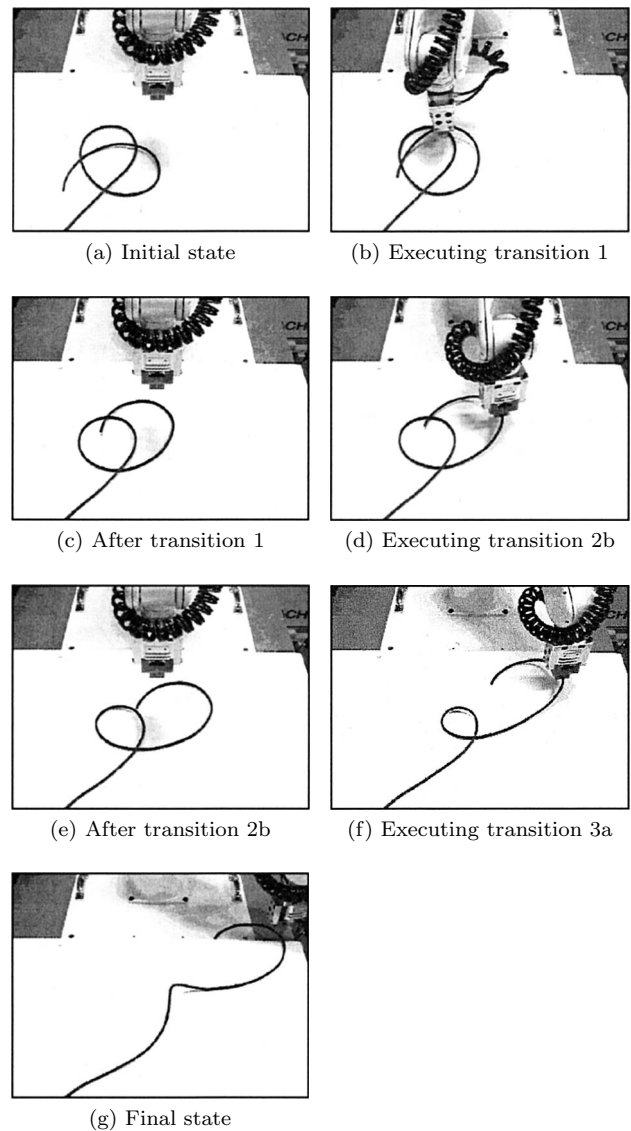


Fig. 13 Result of manipulation

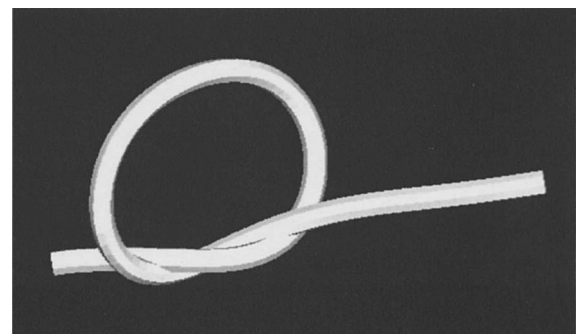


Fig. 14 Computed shape of overhand knot

の自動導出が可能になるものと考えられる。

7. 結 論

本論文では、結び/解き操作を含めた線状物体のマニピュレー

ション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，線状物体の変形状態を，交点の並び方と各交点での交差の仕方に着目して，定性的に有限個に分類した．次に，上記交差状態間の遷移に必要な四つの基本操作を定義した．これにより，線状物体のマニピュレーション過程を，基本操作による交差状態の移り変わりとして表現できる．続いて，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の決定手法について提案した．上記手法を組み合わせることで，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状態遷移経路，各遷移に必要な基本操作の種類，各基本操作を実現するための把持点とその移動方向という，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．さらに，得られたマニピュレーション計画を絞り込むための評価指標を導入した．最後に，上記手法に基づいてシステムを開発し，ひとえ結びに結ばれた線状物体の解き作業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．

今後は，定性的計画の実現可能性を判定するとともに，より詳細な動作計画を導出し，マニピュレーション計画の一つに確定するために，本論文での提案手法と変形シミュレーション等の解析手法との統合を進めていく予定である．

参考文献

- [1] T. Lozano-Pérez, M.T. Mason and R.H. Taylor: "Automatic Synthesis of Fine Motion Strategies for Robots," Int. J. of Robotics Research, vol.3, no.1, pp.3-24, 1984.
- [2] R.S. Desai and R.A. Volz: "Identification and Verification of Termination Conditions in Fine Motion in Presence of Sensor Errors and Geometric Uncertainties," Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.800-807, 1989.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] J. Phillips, A. Ladd and L.E. Kavraki: "Simulated Knot Tying," Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.841-846, 2002.
- [8] C.C. アダムス著, 金信泰造訳: 結び目の数学. 培風館, 1998.
- [9] 若松栄史, 加藤恒範, 妻屋彰, 白瀬敬一, 荒井栄司, 平井慎一: "結び目形状を含めた線状物体の変形モデリング", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol.8, no.3, pp.287-294, 2003.



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)