

ロボットマニピュレータによるひも結びの動作計画のための 位相情報 Face-List の提案

松野 隆幸^{*1}, 渡部 知俊^{*2}, 見浪 護^{*2}

Proposal of new topology information Face-List for manipulation planning of deformable rope tying

Takayuki MATSUNO^{*1}, Tomotoshi WATANABE^{*2}, Mamoru MINAMI^{*2}

^{*1} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama City, Okayama Prefecture 700-8530, Japan

^{*2} Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University
3-1-1 Tsushimanaka, Kita-ku, Okayama City, Okayama Prefecture 700-8530, Japan

Our research group has been focusing on the automation of string tying-untying operations by a robot. In this paper, shape abstraction data of string named Face-list and an operation planning method with Face-list are proposed. In our planning method, string deformation is represented as state transition of known topology representation P-data and proposed shape abstraction data Face-list. Face-list enables a robot to decide shape operations that can correctly generate string deformation plan toward target shape. In addition, an optimal current operation for changing the string toward the target shape is decided based on scoring the difficulty of total shape operations. A result of experiment using proposed method is reported at final.

Key Words : Defomable linear object manipulation, Rope tying, Topology

1. 緒 言

我々はひもの操作を産業用マニピュレータで自在に操作できるシステムの構築を研究目標としている。その中で、我々はカメラ画像からロープの形状を取得する手法を提案している⁽¹⁾⁽²⁾。この方法では画像に二値化と細線化を施すことでひもの構造を抽出し、ひもの交差部分は輝度分布を計算することで正しい上下判定を行なっている。またひものトポロジカルモデルを用いてロボットによるひも結び実験を行っている。

従来研究について述べる。Schulman らは点群データを用いたひもを含む不定形物体のトラッキング法を提案しており、確率的観測モデルと改良した期待値最大化法を用いてオクルージョンによる影響を抑えながらリアルタイムでのトラッキングを可能にしている⁽⁵⁾。ひもの形状操作のプランニングに関する研究の多くでは結び目理論と呼ばれる数学分野の概念が広く応用されており、結び目の状態表現やライデマイスター移動などが挙げられる。Ladd らは結び目理論を応用したひも解き操作の計画法を提案している⁽⁶⁾が、その有効

性はコンピュータによるシミュレーションでしか検証されていない。高松らは P-data と呼ばれるひもの位相状態を記述する方法を用いたひも結び作業の計画法提案している⁽⁷⁾⁽⁸⁾。若松らはマニピュレータによる線状物体の結び・解き操作の自動化を目的とした作業計画の導出法を提案している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。彼らは独自の位相記述法やライデマイスター移動を基にした形状操作、樹形図による結び目の状態遷移表現を提案しており、マニピュレータを用いたひも結び実験を行っているが、形状操作の選択は手動で行われている。所望の形状操作をひもに施すためのロボットの動作生成はひも形状操作における最もチャレンジングな課題である。Trinh Van Vinh らはセンサで取得した人間のひも結び動作の中から特徴的な箇所を選択しロボットに教示する手法を提案しており、実機によるひも結び操作を実現させている⁽¹¹⁾。しかしこの方法はティーチングプレイバックを発展させたものであり、人間の介入を必要とする。近年では学習によってひもの結びや解きといった動作をロボットに習得させる研究も存在する。Wen Hao Lui らは独自の評価関数を用いたロボット動作のスコアリングと、Yun Jiang らの研究⁽¹³⁾を応用したロボットの行動習得法によって双腕ロボットによるひも解き操作を実現させている⁽¹²⁾。Alex X. Lee らはロボットの力制

^{*1} 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒 700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1) matsuno@cc.okayama-u.ac.jp

^{*2} 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒 700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1)

御に学習を取り入れる研究の中で不定形物体の形状操作実験を行っており、学習による制御ゲインの調整とひも締め付け作業について実験と考察がなされている⁽¹⁴⁾。上記に示したこれまでの研究では「ロボットがどの手順でひもを操作するか」は操作者、設計者が数ある操作候補の中から選択していた。それに対して我々は全ての操作候補の中から評価関数に基づいて操作を選択することで人間の介在が少ない柔軟物体のハンドリングの実現を目指している。

本研究グループではひもの3次元位置・形状を記述する点連鎖モデルや、3次元点群のデータからひもの形状を認識し点連鎖モデルを出力するひも形状認識法⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾、結び目理論を応用した操作計画法等を提案しており、マニピュレータを用いたひも解き操作実験にも成功した。本論文ではひも結び操作を効果的に実行するための新しい形状抽象化データ Face-list とこれを用いた操作計画法を提案する。この形状抽象化データは座標的情報を含まずにひもの結び目状態を記述するもので、形状操作によるひもの変形は P-data と呼ばれる既存の結び目の位相表現と提案する形状抽象化データの状態遷移として表現される。そして各形状操作の難しさを得点付けすることでひもを目標形状に変化させる最適な操作を計算し、ロボットによる形状操作を実行する。この戦略を採用した場合 P-data のみを用いた場合、ひも結び操作における目標形状までのひもの変形を正しく制御することができない。提案する Face-list を用いて P-data では記述できない情報を補完することで目標形状までの正しい形状変化の制御が可能になる。提案した記述方法を用いてセンサ情報に基づく動作計画を生成し、マニピュレータを用いた実験でその有効性を確認した。

2. ロボットによるひも結び操作

本研究ではロボットによるひも結び操作を実現させるにあたり、そのプロセスを4つの大きな段階に分けている。図1に示すように、4つの段階とは形状認識、形状操作の計画、ロボットの動作生成、形状操作の実行であり、ひもが目標形状と一致するまでこれらの処理を逐次的に繰り返す。形状認識ではカメラなどのセンサを用いてひもの形状を取得する。形状操作の計画段階の目的はひもに適用する最適な形状操作を決定することである。結び目理論の知識を応用し形状操作適用による結び目状態の変化をコンピュータで計算し、ひもを現在の形状から目標形状に変化させる一連の形状操作を導出する。さらに形状操作をロボットで実行する際の難しさを得点付けすることで最適な形状操作を決定する。次のロボットの動作生成段階では前段階

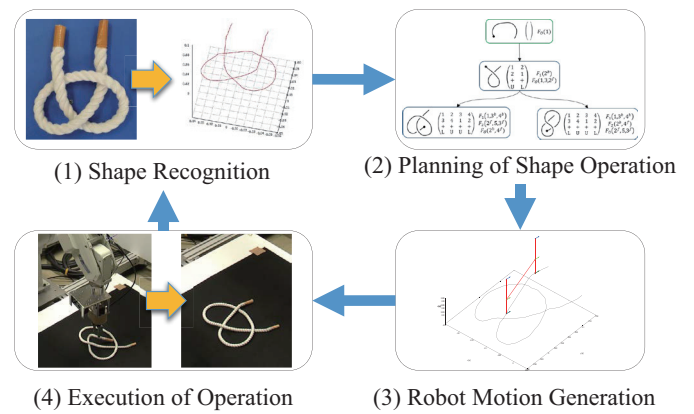


Fig. 1 Four phases of string tying operation

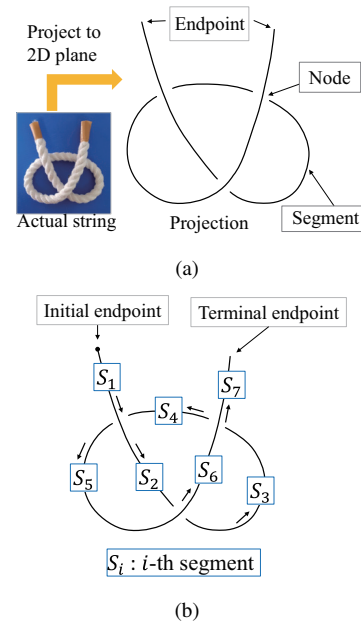


Fig. 2 (a)Projection of string, (b)Projection of string with numbered segments

で決定した形状操作を実現させるロボットの動作を生成する。形状認識段階で取得したひもの形状データをもとに手先軌道やひもの把持位置、解放位置などを決定する。最終段階である形状操作の実行段階では生成したロボットの動作を実行し、実際の形状操作を行う。

3. ひも結び操作における基本形状操作

3.1 射影図によるひもの表現 現実のひもは3次元空間内に存在するが、図2(a)に示すように適当な2次元平面に射影してひもの射影図として表現することができる。ひも射影図の中でひもの端を端点、交差した個所を交点またはノード、端点または交点を結ぶ線をセグメントと呼ぶ。

ここで図2(b)に示すように、2つの端点の一方を始点、他方を終点とする。そして始点から終点まで順に

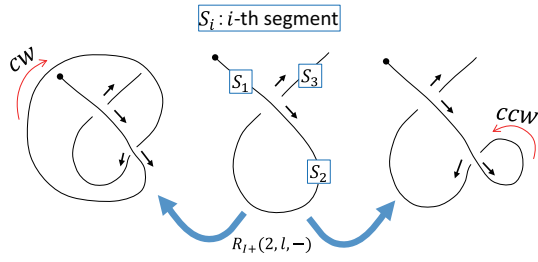


Fig. 3 Shape operation by RM I in outer face

ひもとたどったとき i 番目に出会うセグメントを i 番セグメントと呼ぶこととする。

3.2 動作プリミティブ 次に示すライデマイスター移動 I とクロス、本論文では採用しなかったライデマイスター移動 II, III は動作プリミティブ (motion primitive)⁽⁷⁾ と呼ばれ、ひもの形状操作はこれらの組み合わせで実現できる。またこれらの操作適用後の形状変化も位相情報として計算可能である。次節以降でライデマイスター移動 I とクロスの詳細を述べる。

3.3 ライデマイスター移動 I ひも結び操作におけるライデマイスター移動 I (RM I) は、単純なループを作る操作であるため交点が 1 つ増える。交点には + と - の 2 種類が存在するため、+ 交点を作る操作と - 交点を作る操作の 2 通りが考えられる。また同じ種類の交点を作る操作でもセグメントの右側にループを作る場合と左側に作る場合に分けられる。そこで操作するセグメントの番号を n 、ループを作るセグメントの左右方向を d ($d = r$: 右側, $d = l$: 左側), 作る交点の種類を s とした際の RM I を

$$R_{I+}(n, d, s) \quad (1)$$

と記述する。

しかしここで図 3 に示すように、外面と接するセグメントに RM I を行う場合を考える。図 3 では同じ $R_{I+}(2, l, -)$ の操作を行なっているが異なる 2 種類の形状が得られており、図中右側の形状操作では単純なループを作っているだけなのに対し、左側の形状操作では RM I によって作られたループによって周囲が取り囲まれた構造をしている。詳しく観察すると、この 2 種類の形状はループを作るセグメントが時計回りか反時計回りかによって区別できることがわかる。そこでセグメントが時計回りか反時計回りかを表す新しいパラメータ t ($t = cw$: 時計回り, $t = ccw$: 反時計回り) を導入することで RM I を

$$R_{I+}(n, d, s, t) \quad (2)$$

と記述する。よって図中左側の形状操作は $R_{I+}(2, l, -, cw)$ 、右側の形状操作は $R_{I+}(2, l, -, ccw)$ と

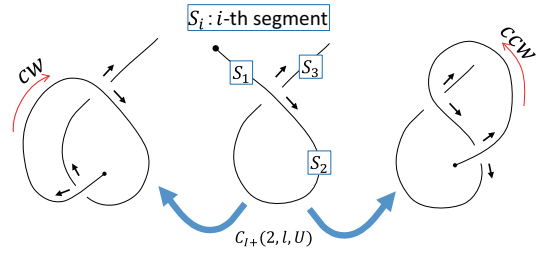


Fig. 4 Shape operation by Cross in outer face

なる。外面に接しない場合の RM I は 4 種類に分類可能である。

3.4 クロス ひも結び操作におけるクロスは、端点がセグメントを横切る操作であり、端点には始点と終点の 2 種類があるためクロスには常に始点のクロスと終点のクロスの 2 種類が存在する。クロスによる形状操作のパラメータとしてまず考えなければならないのは端点が横切るセグメントの番号である。さらにセグメントの右側から左側に横切るもしくは左側から右側に横切るか、端点がセグメントの上側と下側のどちらを横切るかも考慮しなければならない。そこで端点が横切るセグメントの番号 n 、端点が横切る方向を表すパラメータ d ($d = r$: 右側から左側, $d = l$: 左側から右側), 横切るセグメントの上下 v ($v = U$: 上側, $v = L$: 下側) を用いて始点のクロスを

$$C_{I+}(n, d, v) \quad (3)$$

とし、終点のクロスを

$$C_{T+}(n, d, v) \quad (4)$$

と記述する。

しかしここで図 4 に示すように、端点が外面に属している場合のクロスによる形状操作を考える。図 4 では同じ $C_{I+}(2, l, U)$ の形状操作を行っているが異なる 2 種類の形状が得られる可能性がある。RM I と同様に、セグメントが外周を時計回りに周回するか反時計回りに周回するかで区別できることがわかる。そこでセグメントが時計回りか反時計回りかを表す新しいパラメータ t ($t = cw$: 時計回り, $t = ccw$: 反時計回り) を導入することで、外面における始点のクロスを

$$C_{I+}(n, d, v, t) \quad (5)$$

終点のクロスを

$$C_{T+}(n, d, v, t) \quad (6)$$

と記述する。よって図中左側の形状操作は $C_{I+}(2, l, U, cw)$ 、右側の形状操作は $C_{I+}(2, l, U, ccw)$ となる。内面におけるクロスは 4 種類に分類可能である。

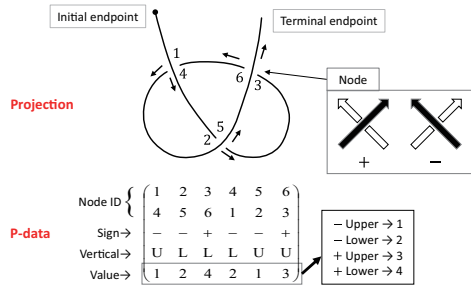


Fig. 5 A projection of string and its P-data

4. 形状抽象化データ

先行研究では P-data と呼ばれるひもの位相を記述する抽象化データを用いた形状操作の計画法を提案し、マニピュレータによるひも解き操作を行なった。これは高松らによって提案された手法⁽⁷⁾⁽⁸⁾を発展させたものであった。本研究ではひも結び操作を実現させるにあたり新しい形状抽象化データである Face-list を提案する。P-data はひも射影図の交点の情報のみから構成されていたのに対して、Face-list はいくつかのセグメントで囲まれた領域である面の情報で構成される。P-data からは得られない情報を Face-list で補完し、効果的なひも結び操作の実現を目指す。

4.1 P-data 前述のとおり、P-data は射影図で表現されたひもの位相状態（トポロジー）を行列の形式で記述する抽象化データである。図 5 にあるひも射影図とその P-data を示す。P-data の 1 行目と 2 行目は交点の番号である。3 行目は符号（Sign）と呼ばれる交差の種類である。図 5 に示しているように、上を通るセグメントに対して下を通るセグメントが交差する方向を + もしくは - で表す。4 行目の文字はひもの上下（Vertical）を表しており、U（Upper）もしくは L（Lower）のどちらかの値をとる。5 行目には符号と上下の組み合わせ（1:-/U, 2:-/L, 3:+/U, 4:+/L）によってきまる値（Value）が入る。ただし交点の数が 0 つまり完全に解かれたひもの P-data は空行列である。

4.2 ひも結び操作における P-data の問題点 我々は P-data を用いたひも結び操作の計画について考察を行い、P-data だけでは情報が不十分であるという結論に達した。例えば図 6 に示す様に、解かれたひもから止め結びを生成する場合を考える。解かれたひもに $R_{I+}(1, l, -, ccw)$ を適用した後、 $C_{I+}(2, r, L, ccw)$ を適用することで結び目 A を生成するのが正しい経路であるが、 $R_{I+}(1, r, +, cw)$ と $C_{I+}(2, l, L, cw)$ を順次適用した場合に生成される結び目 A' も P-data は同じとなる。さらに結び目 B と B' もおなじ P-data を持っている。つまり P-data のみを用いた操作計画法では結び目

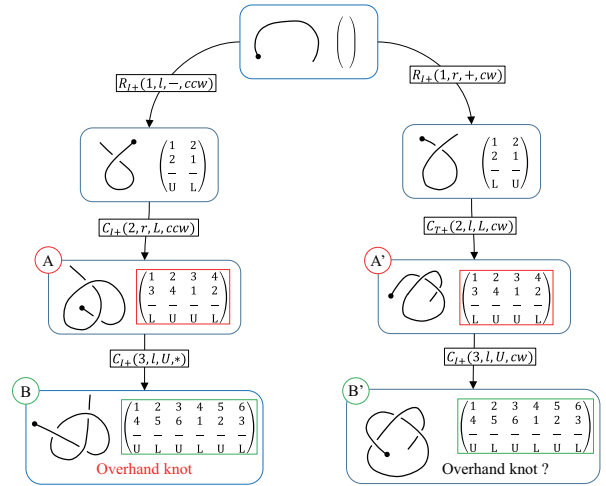
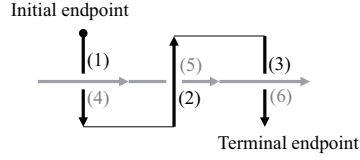


Fig. 6 Representation of string shape transition using P-data

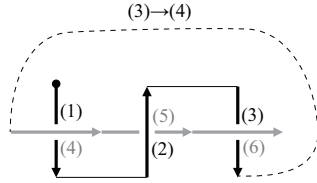
A と A' や B と B' の違いを区別できず、目標形状の結び目 B を生成する形状操作を正しく計画できないと言える。このように同じ P-data で異なる形状になる理由を考える。図 6 の結び目 B の P-data によって表現できる結び目を図 7 に表す。ここで、矢印は始点から終点に向かう方向を示している。また、図中の数字は始点から順番付けした交点の番号である。図 7(a) は交差点 3 と交差点 4 の間の接続を除いた全ての接続を表したものである。図 7(b) は (a) の状態に加えて交差点 3 と交差点 4 の接続を結び目全体の上側を通過して実現した場合の形状で、図 7(c) は (a) の状態に加えて全体の下側を通過して実現した場合の形状である。このように、同じ P-data であっても射影図上でひも全体の外側を通過するノードに 2 つの選択肢が発生する。これがどの条件で発生するかはわかっていない。いずれにしても、このように交差点の情報で表現される P-data ではひも全体の位相情報を表現できることがわかった。

この問題を解決するために、本研究で提案する Face-list はいくつかのセグメントで囲まれた領域である面の情報を取り入れることで結び目 A と A' や B と B' の違いを識別し、P-data と併用することで形状操作を正しく計画する。

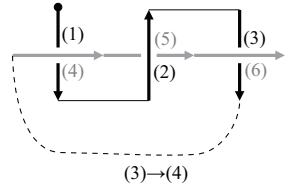
4.3 Face-List の提案 本研究ではひも射影図の形状抽象化データとして Face-list を提案する。面 (Face) とは図 8(a) に示すようにいくつかのセグメントによって構成される閉曲線によって囲まれた領域であり、ひも射影図に複数含まれる面をリスト形式で列挙したデータが Face-list である。P-data が交点の情報から構成されているのに対して、Face-list はセグメントの情報から構成されている。



(a) An example of connection with disconnection between node 3 and node 4



(b) One candidate of connection



(c) Other candidate of connection

Fig. 7 Two possibilities to connect pair of intersection through outside of whole rope in projected rope shape

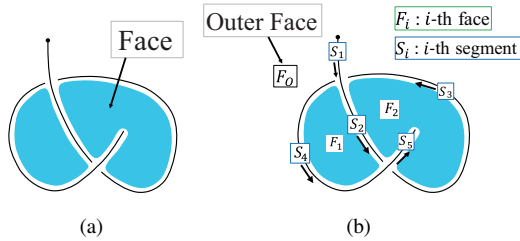


Fig. 8 Faces in a projection of string: (a) Definition of face, (b) Numbered Segments and faces

4.4 面の定義と Face-list ここでは面の定義と記述について説明する。ひも射影図に始点と終点を設定することでセグメントには方向性が生じるが、始点側から終点側に向かう方向を順方向、終点側から始点側に向かう方向を逆方向と定義する。面はセグメントの番号と方向を用いて記述し、図 8(b) に示す面 F_1 が逆方向の S_2 と順方向の S_4 によってできる反時計回りの閉曲線で囲まれていることを

$$F_1(2^b, 4^f) \quad (7)$$

と記述する。なお方向付セグメント番号列は最も小さい番号から始まる事とし、閉曲線を反時計回りに構成する順番で列挙する。 F_2 は順方向の S_2 と順方向の S_3 から成る反時計回りの閉曲線で囲まれており、さらに終点を面内に含んでいる。そして終点を含むセグメン

Table 1 The evaluation and cost both of Cross and Reidemister Move in string tying operations

Motion Primitive (MP)	Cost	MP	Cost
$RMI_+(in)$	1	$CR_+(L, in)$	8
$RMI_+(out)$	25	$CR_+(U, out)$	8
$CR_+(U, in)$	6	$CR_+(L, out)$	15

ト S_5 が S_2 と S_3 の間に位置しているので

$$F_2(2^f, 5, 3^f) \quad (8)$$

と記述する。 F_1 と F_2 は閉曲線で境界された内部の領域であるが、射影図の周囲を取り囲む非有界な面は外面と呼ばれる。そのため F_1 と F_2 は内面とも呼ばれる。図 8(b) に示す外面 F_0 は逆方向の S_3 と逆方向の S_4 から成る時計回りの閉曲線で内面と境界されており、内部に始点を含む。始点を含むセグメント S_1 は S_3 と S_4 の間に位置しているので

$$F_0(1, 3^b, 4^b) \quad (9)$$

と記述する。これら 3 つの面をリスト形式で列挙すると以下 Eq.10 のようになり、これを Face-list と定義する。

$$\begin{aligned} &F_1(2^b, 4^f) \\ &F_2(2^f, 5, 3^f) \\ &F_0(1, 3^b, 4^b) = F_3 \end{aligned} \quad (10)$$

なお内面の番号はセグメント番号列に関して自然順でソートした順番とする。また外面はリストの末尾とし、図 8(b) に示すひも射影図の場合には外面 F_0 は 3 番目の面 F_3 となる。

4.5 提案手法の利点 図 6 に示した解かれたひもから止め結びを生成する際のひも形状の遷移に Face-list を加えたものを図 9 に示す。P-data のみを用いた場合、結び目 A と A' や B と B' は P-data が同じとなるため区別することができなかったが、面リストを併用することでこれらを区別できていることがわかる。これはコンピュータが結び目 A と A' の違いを区別し、結び目 B を生成するまでの形状操作を正しく計画可能である事を意味している。

5. 最適な形状操作の決定

上記の記述法と基本形状操作による P-data と Face-list の変形則を用いることで、現在のひも形状を目標形状に変化させる基本形状操作の組み合わせが導出できる。理論的にはこれらの組み合わせのうちどれを適用しても目標形状を生成可能であるが、マニピュレータを用いた実際の環境では実行する基本形状操作の種

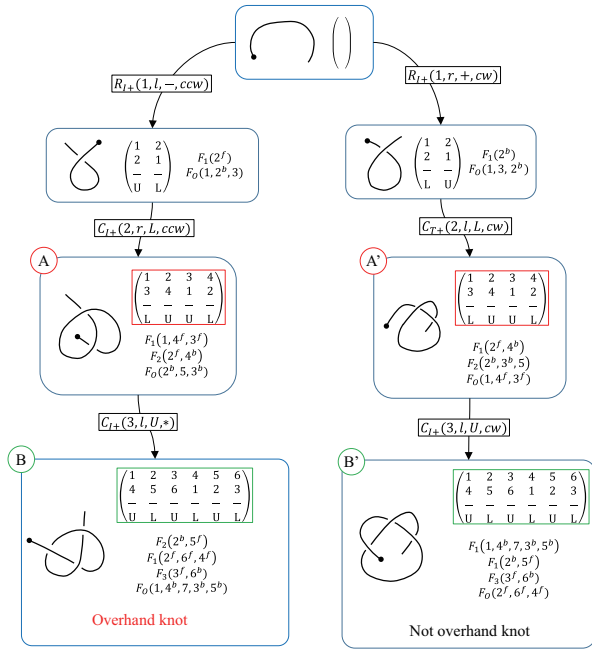


Fig. 9 Representation of string shape transition using P-data and Face-list

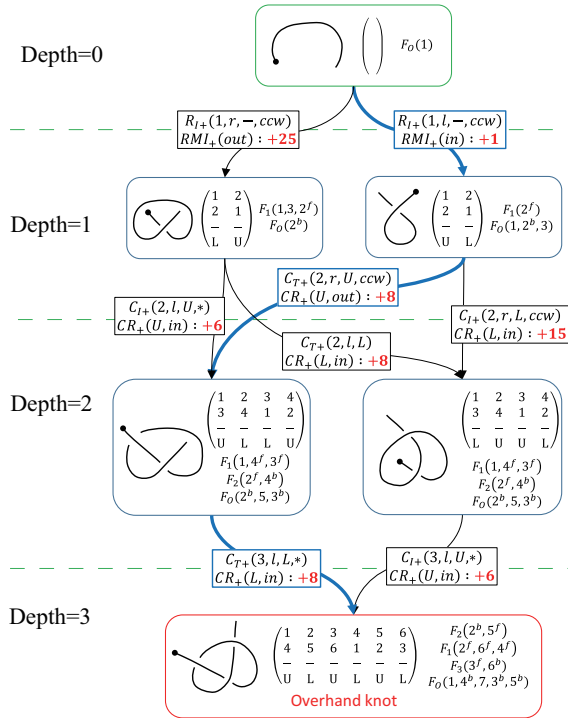


Fig. 10 Tree diagram representing knot state transition to overhand knot with costs

類やひもの形状、物理的特性等によって操作を成功させられる確率は変動すると考えられる。そこで適用する形状操作の難しさをコストと定義し、得点付けを行う。さらにツリー探索アルゴリズムにコストの計算を

導入し、コストの合計が最も小さい基本形状操作の組み合わせを最適な操作として選択することでマニピュレータによる形状操作成功の可能性を高める。

基本形状操作のコストを表 1 に示す。まずライデマイスター移動 I に関するコストについて述べる。 $RMI_{+}(in)$ は単純なループを作る操作であるのに対して、 $RMI_{+}(out)$ は外面にループを作る際、作ったループによってひも全体が取り囲まれた形状を作る操作で、 $R_{I+}(n, r, *, ccw)$ と $R_{I+}(n, l, *, cw)$ の操作が該当する。 $RMI_{+}(in)$ はセグメントやロボットハンドとの干渉が少なく、予備実験による試行では成功率が高かったためコストは最も低く設定している。一方 $RMI_{+}(out)$ の操作では作ったループをひも全体を取り囲むように配置する必要があり、ひもの大きな変形と伴うことから操作の成功率は極端に低い。そのためコストは最も高く設定している。

次にクロスに関するコストについて述べる。 $CR_{+}(U, in)$ と $CR_{+}(L, in)$ は内面に属する端点をセグメントに交差させる操作、 $CR_{+}(U, out)$ と $CR_{+}(L, out)$ は外面に属する端点をセグメントに交差させる操作で、 U と L は交差するセグメントの上下を表している。 $CR_{+}(U, in)$ は内面に属する端点を移動させるのでひもの変形量は小さい、また端点はセグメントの上に交差させるのでひもどうしやロボットハンドとの干渉も少なく成功率は高く、コストは比較的安く設定される。 $CR_{+}(L, in)$ の場合もひもの変形量は小さいが、端点をセグメントの下に交差させる際にセグメントどうしの接触が予想されるため前者よりもコストが高い。 $CR_{+}(U, out)$ は外面に属する端点をセグメントに交差させる操作であるためひもの変形量は大きくなるが、端点はセグメントの上に交差するのでひもどうしやロボットハンドとの干渉も少ない。 $CR_{+}(L, out)$ はひもの変形量が多い事に加えて、端点がセグメントの下に交差するためセグメント間やセグメントとロボットハンドの干渉も考えられる。そのためひも結び操作におけるクロスの中で最も高いコストが設定される。

上記の理由で表 1 に示すコストは決定したが、このコストは現在のロボットシステムに関するものであり、センサの計測精度やロボットの手先精度によって変わる。また、ライデマイスター移動 I やクロスなどの動作プリミティブの動作生成法の変更によっても見直す必要がある。

複数個導出される形状操作の組み合わせの中から上記のコスト計算で最適な組み合わせを求める。最適な形状操作の組み合わせの中で最初の基本形状操作を最適な形状操作として決定し、マニピュレータによる操

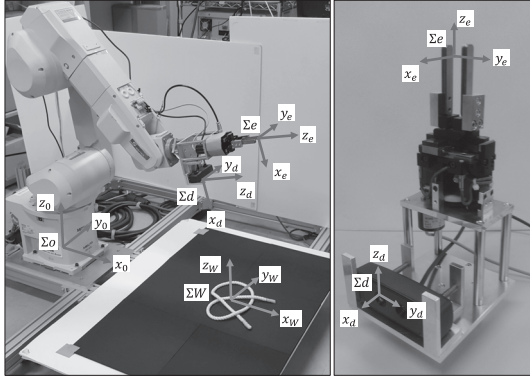


Fig. 11 The environment of string untying experiment and coordinate systems

作を実行する。例として、止め結びを生成する結び目の状態遷移をコスト付き樹形図で表したものを図 10 に示す。図 10 に示しているのは樹形図の一部で計算における初期形状から深さ (depth) が大きくなるにしたがって選択肢は増加していくこの場合では太い矢印で示した $R_{I+}(1, l, -, ccw) \rightarrow C_{T+}(2, r, U, ccw) \rightarrow C_{T+}(3, l, L)$ という基本形状操作の組み合わせが最も低い合計コストを示しており、その値は 17 である。そして最初の形状操作である $R_{I+}(1, l, -, ccw)$ が最適な形状操作として選択される。本論文では幅優先探索を採用する、幅優先探索を採用した理由はひもが解かれている状態を原点にした場合深さに限界が無いため深さ優先探索が採用できないためである。現在の目標形状は単純な形状であるため幅優先探索でも問題が発生していないが、より複雑な形状操作に対して探索時間増加の抑制する必要がある、ツリー構造の枝刈りと探索手法の改良は今後の課題である。

6. ひも結び操作実験

提案した手法によって生成されたひもの操作計画に基づいてロボットがひもを操作する実験を行った今回の実験では図 10 に示す止め結びを目標形状とする。止め結びの P-data と Face-list は同図中に示す通りである。

Fig.11 に実験環境とグリッパ付きのエンドエフェクタ、座標系の設定を示す。三菱電機社製産業用マニピュレータ RV6SL であり、マニピュレータ手先にグリッパと距離カメラ Creative Sens3D を取り付けてある。ワールド座標系 Σ_W は、マニピュレータのベース部分に固定された座標系 Σ_0 から 700[mm] 離れた位置に固定する。また Σ_e はグリッパの先端に固定された座標系であり、 Σ_d はひもの形状計測用の距離カメラの座

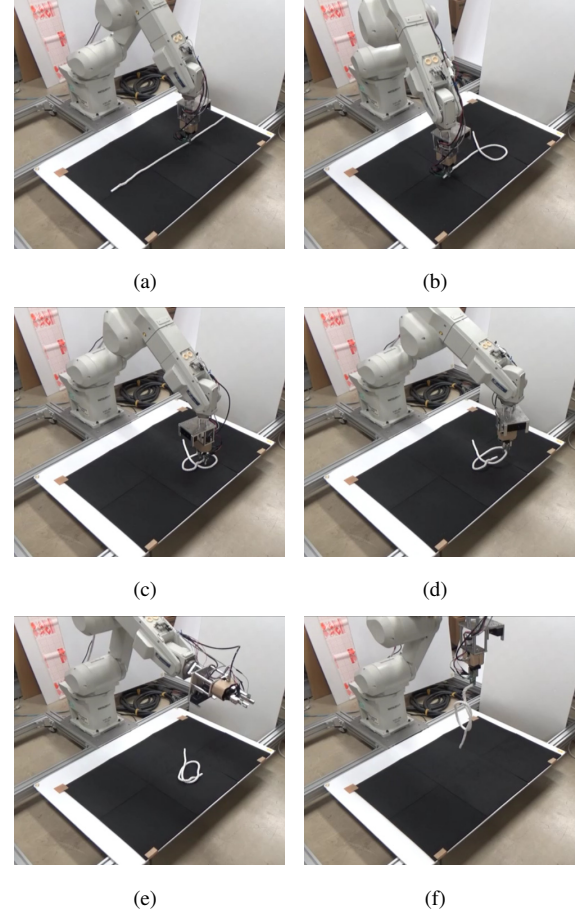


Fig. 12 Appearance of rope tying experiment: (a) initial condition, (b) after 1st operation, (c) after 2nd operation, (d) during 3rd operation, (e) tied rope, (f) picking up tied rope

標系である。

次に、実験の様子を図 12 に示す。操作は 3 回行った。操作を終えるごとに距離カメラを用いて現在のひも形状を認識し、ひも形状の操作計画の樹形図を計算してロボット動作計画の選択をおこなっている。作業時間は全体で 12 分ほどかかっており、主にひもの操作計画時の樹形図の生成に時間がかかっている。その計算時間の短縮は今後の課題である。図 12(a) は一つ目の操作であるライドマイスター移動 I の形状操作を行い、図 12(b) のように成功させている。次に図 12(c),(d) に示す 2 回のクロス操作によって止め結び (Over hand knot) を生成した。図 12(e),(f) に 3 回の操作によってできたひもの形状を示す。

本研究では操作ごとに距離カメラを用いて現在のひもの状態を取得して動作計画をおこなっている。形状認識の説明を本論文では省略しているが、形状認識アルゴリズムは⁽¹⁶⁾に詳しい。この実験結果は提案手法を実装したプログラムによる自動計算によるものであり、

実験中に人間の操作が介入することはなかった。このことから本研究で提案する Face-list の操作計画法の有用性を確認できた。

7. ま と め

本論文ではひも結び操作を効果的に実行するための新しい形状抽象化データ Face-list 用いた操作計画法を提案した。既存の抽象化データである P-data の問題点について述べ、それを補完する情報として Face-list を提案した。最後に、提案した記述方法を用いてセンサ情報に基づく動作計画を生成し、マニピュレータを用いた実験でその有効性を確認した。

今後の課題について述べる。これまでの我々の研究のアプローチでは生成した樹形図のリンクにあたるクロスなどの動作プリミティブを目標形状にひとつずつ実行していた。しかし、人間がおこなうように複数の連続したプリミティブモーションを実行したほうが持ち替え回数が減ることで作業失敗の確率を抑えることができ、また作業時間も短縮できる。そのような連続した動作プリミティブの実現にはひも同士の間渉による形状変形を予測するアルゴリズムが必要になる。

最後により複雑な形状の操作に関して述べる。より複雑な結び目を編むには結び目の要素の長さを考慮に入れた操作計画が必要となる。P-data と Face-list を用いた位相空間上ではどのような複雑な結び目でも操作計画を生成することは可能である。しかし、現実のひもの長さは有限であるので各交点と両端点の距離が適切でないと結びを形成するときに失敗する。これは短いセグメントに大きな曲率を与えると反モーメントが大きくなり形状操作に対して意図しない変形が起きやすいためであると考えられる。この問題を解決するために初期の交点の形成時に、最終形状に与える影響を考慮してひも上の交点の位置を選択する必要がある。

参 考 文 献

- (1) 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形状認識", 計測自動制御学会論文集, Vol.41, No.4, pp.366-372, 2005
- (2) Takayuki Matsuno, Toshio Fukuda, Fumihito Arai, Yasuhiro Hasegawa, "Flexible Rope Manipulation Using Elastic Deformation Modeling by Dual Manipulator System with Vision Sensor", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.1, pp.31-32, 2004
- (3) 鷺見 和彦, "柔軟物も取り扱える生産用ロボットシステムの開発", 日本ロボット学会誌, Vol.27, No.10, pp.1082-1085, 2009
- (4) Azad Shademan, Ryan S. Decker, Justin D. Opfermann, Simon Leonard, Axel Krieger, Peter C. W. Kim, "Supervised autonomous robotic soft tissue surgery", Science Translational Medicine 04 May 2016, Vol.8, Issue 337, pp.337ra64
- (5) John Schulman, Alex Lee, Jonathan Ho, Pieter Abbeel, "Tracking Deformable Objects with Point Clouds", ICRA 2013
- (6) Andrew M. Ladd, Lydia E. Kavraki, "Using Motion Planning for Knot Untangling", The International Journal of Robotics Research, Vol.23, No.7/8, pp.797-808, 2004
- (7) 高松淳, 森田拓磨, 小川原光一, 木村浩, 池内克史, "ロボットによる実行を目的とした紐結び作業の記述", 日本ロボット学会誌, Vol.23, No.5, pp.572-582, 2005
- (8) Jun Takamatsu, Takuma Morita, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, "Representation for Knot-Tying Tasks", IEEE Transactions on Robotics, Vol. 22, NO.1, pp.65-78, 2006
- (9) 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
- (10) Hidefumi Wakamatsu, Eiji Arai, Shinichi Hirai, "Knotting/Unknotting Manipulation of Deformable Linear Objects", The International Journal of Robotics Research, Vol. 25, No. 4, pp.371-395, 2006
- (11) Trinh Van Vinh, Tetsuo Tomizawa, Shunsuke Kudoh, Takashi Suehiro, "A New Strategy for Making a Knot with a General-Purpose Arm", ICRA 2012
- (12) Wen Hao Lui, Ashutosh Saxena, "Tangled: Learning to Untangle Ropes with RGB-D Perception", IROS 2013
- (13) Yun Jiang, Marcus Lim, Changxi Zheng, Ashutosh Saxena, "Learning to Place New Objects in a Scene", International Journal of Robotic Research, Vol.31, Issue 9, pp.1021-1043, 2012
- (14) Alex X. Lee, Henry Lu, Abhishek Gupta, Sergey Levine, Pieter Abbeel, "Learning Force-Based Manipulation of Deformable Objects from Multiple Demonstrations", ICRA 2015
- (15) Tomoya Shirakawa, Takayuki Matsuno, Akira Yanou, Mamoru Minami, "String Shape Recognition Using Enhanced Matching Method From 3D Point Cloud Data", SII 2015
- (16) Keisuke Mukai, Takayuki Matsuno, Akira Yanou, Mamoru Minami, "Shape Modeling of A String And Recognition Using Distance Sensor", International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, 2015
- (17) Kurt Reidemeister, "Knot Theory", BCS Associates, 1983