学術・技術論文

結び目理論に基づくひも解き操作の計画法と マニピュレータの動作生成アルゴリズム

松野隆幸*1 白川智也*2 渡部知俊*3 見浪 護*1

String Untying Planning Based on Knot Theory and Algorithms to Generate the Motion of a Manipulator

Takayuki Matsuno^{*1}, Tomoya Shirakawa^{*2}, Tomotoshi Watanabe^{*3} and Mamoru Minami^{*1}

Our research purpose is to estublish an automated manipulator system which can operate a deformable linear object. Especially, our research group has been focusing on the string shape operation by a robot. We devide process of shape operation into four phases. These are string shape reconstruction, planning of string shape operation, robot motion generation and execution of shape operation. In our previous study on string shape reconstruction, shape of a string was reconstructed from 3D point cloud data by proposed method. In this study, the planning method of string untying operation based on knot theory and the motion generation of a manipulator are proposed. Finally, the results of string untying experiment are reported.

Key Words: Deformable Object Manipulation, Knot Theory, Untying Operation, Industrial Manipulator

1. はじめに

我々の身の回りにはひもや布,紙といった柔らかく変形しや すいものが数多く存在し、本論文ではこれらを不定形物体とよ ぶ.不定形物体をロボットで操る研究は剛体や弾性体に比べる と進んでおらず、工場における産業用マニピュレータもこれら を含んだ部品に対する作業は避ける必要がある.近年、日本で はセル生産方式とよばれる生産システムが増加している.その 中では様々なロボットが人間の代わりに作業を行っているが、柔 軟な配線を基盤に接続する作業[1][2]は人間が行っている場合 が多い.これらの作業の自動化に不定形物体の研究が応用でき る.また将来家庭用ロボットが普及し我々の生活空間で作業を 行う際、そこには数多くの不定形物体が存在しており、それら の把持操作は家庭用ロボットにとって必要不可欠である.しか しロボットによる不定形物体の形状操作は難しく、未解決の問 題として残っている.不定形物体の操作には形状認識と形状予 測という問題がかかわっており、画一的な動作による操作がで

原稿受付 2017年3月17日

- *¹Graduate School of Natural Science and Technology Okayama University
- ^{*2}Kawasaki Technology Co., Ltd.
- ^{*3}Nippon Information Control System, Inc.
- ■本論文は新規性(要素分野)で評価されました.

きないためである.

従来研究を分別すると不定形物体の研究は(i)ひもやワイヤ などの線状不定形物体の操作と(ii)衣類やタオルなどの面状不 定形物体の操作および(iii)レオロジーの分野に属する物体の 操作に大別できる.レオロジーに関してはマニピュレータより も専用機での操作が主である[3][4].また,面状不定形物体では 教示作業によってロボットで折り紙を実現する手法の提案[5], タオルのハンドリングにおける把持点の選択方法[6]やセンサ 統合による布生地の展開[7],そして双腕ロボットによる衣類の ハンドリングに関する研究[8]などがある.

本研究グループでは線状不定形物体であるひもの形状操作に 着目し研究してきた.ロボットによるひものハンドリングは稲 葉らによって発表された論文を起源とする [9].以下に工程の分 類と関連研究を述べる.我々はひもの形状操作に関して,Fig.1 に示すように (a) ひもの形状認識,(b) 形状操作の計画,(c) ロ ボットの動作生成そして (d) 形状操作の実行という4段階のフェ イズに分割する.第1段階である形状認識フェイズでは操作対 象となるひもの形状を認識する.ロボットは認識された形状と目 標形状との差異から意思決定するために必要な手順である.カ メラ画像からひも形状を認識する手法がいくつか提案されてお り [9] [10],我々はカメラ画像を用いてひも形状や交差部分の上 下関係を認識する手法を提案している [11].第2段階は操作計 画フェイズである.ここではひもを目標形状に変形させるため にロボットが行うべき形状操作を決定する.結び目理論を応用 し,ひものトポロジーに着目した計画法が関連研究においてい

^{*1}岡山大学大学院自然科学研究科

^{*&}lt;sup>2</sup>川重テクノロジー株式会社

^{*&}lt;sup>3</sup>株式会社 NICS

[■] J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます.

くつか提案されている. 高松らは P-data とよばれるひものトポ ロジー情報を記述する方法とそれを用いたひもの結びの計画法 を提案している [12]. また若松らは独自のトポロジー記述法と ひもの状態遷移グラフを用いたひも結び/締め操作の計画法を 提案している [13] [14]. 第3段階は動作生成フェイズで,操作 計画フェイズで決定されたひもの形状操作を実現させるロボッ トの動作を生成する. 森田らは人間が行う動作を観察すること でロボットによるロープ結びを実行させるシステムの開発を試 みた [15]. 片野らは人間による動作教示を行った双腕ロボット を用いて5種類の卓上ひも結びを実現している [16]. 最終段階 の操作実行フェイズでは動作生成フェイズで生成したロボット の動作を実行し形状操作を行う.

本論文の新規性について述べる.我々はロボットマニピュレー タによる柔軟物体のハンドリングの自動化を目的としており, 人間の介入の少なく自動化率の高いアルゴルリズムの構築が現 在の研究課題である.上記の動作生成フェイズに着目すると文 献[15]ではロボットの動作指令方法が明記されていない.また, 文献[16]ではロボットの動作指令には人間の介在を必要としそ の優位性が記述されている.文献[13]においてもロボットハン ド位置指令は手動で行っていることが説明されている.それに 対して我々は目的形状を与えれば,ひもの形状観測から操作ま で自動で操作を行うことを目的としている.先行研究において 我々はひもの三次元形状を記述する点連鎖モデル(Point Chain Model)と三次元点群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を提案した[17][18].これら の発展として以下の手法の提案が本論文の新規性である.

- (1) 距離カメラ情報を基に構築した点連鎖モデルから P-data とよばれるひものトポロジーを取得する.
- (2) 形状操作によるひもの状態遷移を樹形図で表現し、各形状



Fig.1 Sequence of string shape operation: (a) Shape reconstruction (b) Planning of string shape operation (c) Robot motion generation (d) Execution of shape operation

操作の難しさをコストとして定義することで適用可能な複 数の形状操作の中から最適な形状操作を選択する.

 (3) (2) において、クロスとよばれる操作方法をひもの状況に 合わせて分割定義し、それぞれに対応したロボット動作を 生成する。

本論文の構成は次のとおりである.第2章でロボットマニピュ レータによるひもの操作の概要を述べる.第3章でセンサから 得た距離情報を基にして点連鎖モデルを構築する手法を示す.次 に第4章で構築したモデルからひもの形状変更計画を決定する 手法を示す.第5章でロボットの動作計画について述べ,第6 章にて実験により提案した手法の有効性を確認する.

2. 概 要

ロボットによって自律的にひもを操作するときに、システム 設計者が考えければならないことがある.まずひもの操作計画 を考える必要がある.人間の操作指令はひもを結ぶ、縛る、ほ どくなどの抽象的なものであるから、この目的に向かってひも の形状をどのように推移させればよいかという問題を解決する 必要がある.

次にひもの動作計画を基にロボットの動作計画が生成される. ひものような多自由度のオブジェクトを操作する場合は,床面 などの環境を利用しかつ,持ち替え動作を繰り返すことで複雑 な形状に変更する必要がある.この点が形状変形しない剛体オ ブジェクトを操作する場合とは異なっている.

柔軟物体操作アルゴリズムを考えた場合,我々は二つの評価 指標が重要であると考える.一つはひもの初期形状や目標形状 などの状況の違いに対する適用範囲の大きさである.もう一つ は自動化率であり,作業者が介入し指示する量の少なさと考え ることができる.**Fig.2**に示すように,人間の介在が大きけれ ば適用範囲は大きいが煩雑であり,自動化率を上げると適用範 囲が狭くなることが現状である.適用範囲を拡大するためには 現在の状態を正確に把握する必要があり,センサ情報に基づく モデルの構築が重要である.また,自動化率を上昇させるため には構築されたモデル情報に基づく意思決定アルゴリズムが重 要となる.我々はFig.2にあるように,高い自動化率の中で適 用範囲を拡大することを目標としている.そのために,マニピュ レータに取り付けた距離カメラを用いて点群データを取得し点 連鎖モデル,二次元射影モデルなどを生成し抽象化された位相



Fig. 2 Relation both of capacity and automation in flexible object manipulation



Fig. 3 The flowchart of string untying operation

空間でひもの操作手順を決定し,ひもの操作手順に基づいてマ ニピュレータの移動位置を決定する.このようにいくつかのモ デルを用いる理由は,形状全体の情報を要約してシナリオを考 える部分とシナリオに沿って操作を実行していく部分に分かれ るためである.

ひも解き操作のフローチャートを Fig. 3 に示す. このフロー チャートは我々が設定したひも形状操作に関する四つの段階に 基づいたものであり、各処理はひもが解けたと判定されるまで 継続する。前処理として目標形状として解けたひもの形状が入 力され、計算がスタートする.一つめの処理は形状認識である. 対象となるひも形状は三次元点群データとして取得され、ひも 形状認識法によってその位置と形状を表す点連鎖モデルが生成 される.次の段階の目的はひもに行う最適な形状操作を選択す ることである.本研究では、ライデマイスター移動とクロスを 基本的な形状操作として採用した。これらは元々結び目理論で 定義された概念であり、その組み合わせによってあらゆるひも 形状を実現できることが証明されている. さらに P-data とよ ばれるひものトポロジー情報を行列形式で記述する方法を使用 する. P-data は点連鎖モデルの情報から生成される. ライデ マイスター移動およびクロスによるひもの変形は P-data の変 化として予測され、形状の遷移は樹形図として表現される.ま た本研究では、各形状操作の難しさをコストとして定義するこ とで最適な形状操作を決定する. ロボットの動作生成段階では, 我々の提案するアルゴリズムによって前の段階で選択された形 状操作を実現するためのロボットの動作が生成される. 最終段 階である形状操作の実行では生成されたロボット動作が実行さ れ,再びひもの形状認識から処理が実行される.

3. ひもの形状認識アルゴリズム

本研究で提案する形状認識アルゴリズムは、距離カメラで取 得した点群データからひもの形状を表現する点連鎖モデルを出 力するものである. Fig.4 にひも形状認識アルゴリズムの構成 を示す. 点連鎖モデルはひもの中心軸を表現する点のつながり である.4章で説明する P-data を生成するために必要で、5章







 ${\bf Fig. 5} \quad {\rm Plane \ and \ normal \ vector}$

で述べる動作生成に用いる重要なモデルである.本章では点連 鎖モデルを生成するアルゴリズムの詳細を述べる.

3.1 平面除去

これは点群取得の際に同時に取得してしまう床の点群を除去し ひもを構成する点群のみを残す前処理である.まず RANSAC 法[19]によって床面に属する点群が構成する平面の式を導出 する.この平面近傍に存在する点群はひもの表面に属しておら ず,後述の点連鎖モデル生成に不要なのでその平面を中心に厚 さt[mm]以内の点を除去する.

3.2 統計的外れ値除去フィルタ

点群取得の際にはノイズや誤差で外れ値とよばれる本来存在 しない点が記録されてしまう.外れ値は様々な処理の障害にな る.この処理ではまず各点における近傍 k 個の点との距離を算 出しすべての距離値の標準偏差を求める.そして標準偏差の α 倍以上の距離の点を除去する.

3.3 視点と物体表面の法線ベクトル

法線ベクトルとは **Fig.5** に示すように面上のある点におい て、その面に垂直なベクトルのことである。面には裏と表があ るため面上のある一つの点に対して向きが反対の2種類の法線 ベクトルが存在する.

カメラで物体を撮影するときカメラ座標系から見た物体表面 のある点までの位置ベクトル *p* とその点における物体表面の法 線ベクトル *n* には以下の関係が成り立つ.

$$\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{n} \le 0 \tag{1}$$

3.4 法線推定アルゴリズム

法線推定アルゴリズムとは点群データ内の各点における法線 ベクトルを推定するためのアルゴリズムである.このアルゴリズ ムはある注目点とその近傍点から成る局所的点群に平面をフィッ ティングすることで法線ベクトルを求めるというものであるが, 最終的に局所的点群の主成分分析の問題に帰着する.

注目点をp, p における法線ベクトルをnとする. さらにpの近傍k 個の点を算出し,点pから各近傍点までのベクトルを q_i ($i = 1, 2, \dots, k$)とすると、局所的点群 q_i の分散共分散行列Cは

$$\boldsymbol{C} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{k} \left\{ (\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{q}_a) (\boldsymbol{q}_i - \boldsymbol{q}_a)^T \right\}$$
(2)

ただし,

$$\boldsymbol{q}_a = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \boldsymbol{q}_i \tag{3}$$

である. この行列 C の絶対値が最も小さい固有値の固有ベクトルをvとすると求める法線ベクトルnは. 式(4)によって求められる.

$$\boldsymbol{n} = \begin{cases} \boldsymbol{v} & \text{if } \boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{v} \leq 0\\ -\boldsymbol{v} & \text{else} \end{cases}$$
(4)

3.5 中心軸推定

この処理は、点連鎖モデルの各点はひもの断面の中心に位置 するという条件を満たすためのものである.**Fig.6**(a) に示す ように推定した法線ベクトルが正確にひもの表面から垂直に出 ているとすれば、法線ベクトルの向きとは反対方向に半径r[m] だけ進んだ位置にはひもの中心軸が通っているはずである.こ れを式で表すと次のようになる.点群データの点の個数をN, その第i番めの点の位置ベクトルを p_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), そ の点における法線ベクトルを n_i とする.点 p_i で予測される 中心軸上の点 c_i は

$$\boldsymbol{c}_i = \boldsymbol{p}_i - r \cdot \boldsymbol{n}_i \tag{5}$$

となり,その個数 N_c は N と等しい.理想的な状態ではこ の処理によってできる点群はひもの中心を通る曲線上に点が集 中的に分布したものになるはずであるが,実際は計測誤差や 外れ値の影響を受けそのような点群はできない.そこで Fig.6 の (b) に示すようにある距離内にある各点において推測された 中心点の平均をとるという処理を行う.点 p_i から距離が 2r以内にあるすべての点の個数を \bar{N}_i としそれらの点の番号を k(j,i) ($j = 1, 2, 3, \dots, \bar{N}_i$) と表す.ここで \bar{N}_i がある一定 数 \bar{N}_{lim} 未満のときは外れ値である可能性があり信頼性に乏し いのでその点からの中心推定は行わないこととする.そのため 求める点群の点の個数 N_a は N 以下となり,その第 m 番め ($m = 1, 2, \dots, N_a$) の点 \bar{c}_m を以下の式で算出する.

$$\bar{\boldsymbol{c}}_m = \frac{1}{\bar{N}_i} \sum_{j=1}^{\bar{N}_i} \boldsymbol{c}_{k(j,i)} \tag{6}$$

3.6 マッチング法

このマッチング法によって中心軸推定でできた細長い点群から点連鎖モデルが生成される.点連鎖モデルの実体は位置ベクトルの列である.センサ情報から得られた点群全体から生成される点連鎖モデルが一つとは限らないので検出された個数を Na



Fig. 6 Image of center line estimation



Fig. 7 Flowchart of matching method



Fig. 8 Imege of matching method

とし, 順番 $j(j = 1, 2, \dots, N_d)$ ごとに構成する位置ベクトル の個数を ${}^{j}N_{c}$, ベクトル列を ${}^{j}\boldsymbol{v}_{i}$ ($i = 1, 2, \cdots, {}^{j}N_{c}$)とする. この処理のフローチャートを Fig.7 に示す. この方法はある点 から最も近い点を次々につないでいけば、並んだ点群をたどる ことができるのではないかという考え方に基づいている. すべ ての点が同一曲線上に並んでいる理想的な点群の場合、うまく ひもの形状を検出することができる.しかし実際の点群は並び が乱れていたり多数の外れ値が存在するため正しくない方向に 連結が続き、うまくひもの形状を検出することができない、そ こで Fig.8 に示すように,任意に選択された点に対して内径 r_n [m], 外径 r_f [m] の二つの探索範囲を設定する. 半径 r_n 内 のすべて点は選択点近傍であり省略可能であるとし以後処理の 対象外とする,またもう一つの探索半径 rf 内の点で最も距離 が近い点に連結しひもの形状を検出していく. これにより曲線 上に並んだ点群をたどる際の一方向性、点のばらつきや外れ値 へのロバスト性を向上させる.探索時に次の探索点が見つから なかったり、ひもの交差点に到達したときはマッチング法によ る処理が完了し、中心点の連結で表現される点連鎖モデルが生 成される.このマッチング法は未処理の点群がなくなるまで繰 り返す、マッチング法による点連鎖モデルの生成方法の詳細は 文献[17] を参照されたい.

4. ひも形状操作の計画

この操作計画フェイズの目的はひもに対して行う最適な形状 操作を決定することである.本研究は基本的な形状操作としてラ イデマイスター移動とクロスを採用した.これらは元々は結び目 理論とよばれる数学の分野において定義された概念である [20]. さらに P-data とよばれるひものトポロジー情報を行列の形式 で記述する方法を採用した.P-data は形状認識フェイズで得ら れた点連鎖モデルから生成される.ライデマイスター移動およ びクロスによって生じるひもの位相的形状遷移は P-data 行列 の各要素の操作によって計算され,それは樹形図として表現さ れる.さらに各形状操作の難しさをコストとして定義し,ひも を解くまでにかかったコストの合計を比較することで最適な形 状操作を選択する.

4.1 P-data

P-dataとはひものトポロジー情報を記述するためのデータ構造である. **Fig.9**にひものある結び目の射影図とその P-dataを示す. P-dataはひもの射影図から生成される. 三次元空間内のひもは適当な二次元平面に射影して射影図として表現するこ



Fig. 9 Generation of P-data from a projection of a string

とができ,射影図の中でひもの端を端点,ひもが交差した箇所を 交点またはノード,端点や交点を結ぶ線分をセグメントとよぶ.

Fig.9に示す行列は図中に示したひもの射影図の P-data で ある. P-data 中で第1行および第2行の数は交点の番号であ り、二つの番号で一つの交点が表される. 第3行は交点の符号 (Sign) とよばれる値で、図中に示すように交点におけるひもの 交差方向を表しており、+もしくは – で表記される. 第4行に は U もしくは L が入り、交点におけるひもの上下 (Vertical) を表す. U および L はそれぞれ Upper と Lower の頭文字であ る. 第5行の値は符号と上下の組み合わせによって (1: -/U, 2: -/L, 3: +/U, 4: +/L) 決まる値 (Value) が入る. こ こで射影図から P-data を生成する際のアルゴリズムを以下に 示す.

- (1) どちらか一方の端点を選び,選んだ端点を始点もう一方を 終点とよぶ.
- (2) Fig.9 に示すように始点から終点までひもをたどり、交点 に出会う度に順番に番号を振る.このとき一つの交点につ き二つの番号が振られることになる.
- (3) もう一度始点から順にひもをたどりながら、交点を通るたびに番号を書き出す.このとき現在の交点の番号を1行めに、交点の対応する番号を2行めに書く.また上を通っていればUを、下を通っていればLを書き出し、交点の符号も記録する.
- (4) 最後に符号および交点の上下から対応する数値(1:-/U, 2:-/L, 3:+/U, 4:+/L)を付ける.

交点の符号の付け方は Fig.9 に示すように上を通るひもの方向 ベクトルが下を通るひもの方向ベクトルに対して時計回りのと きを +,反時計回りのときを – とする.ただし方向ベクトル とはひもの接線方向の単位ベクトルであり,始点から終点の方 向に向かっているものとする.

4.2 ひもの形状操作による P-data の更新則

本来,ライデマイスター移動とクロスには交点を増やす操作 と減らす操作の両方が含まれるが,本研究ではひもの解き操作 を目的としているため交点を減らす操作のみを使用する.また, ライデマイスター移動にはライデマイスター移動 I,ライデマイ



434

Fig. 10 Basic shape operations by Reidemeister move and Cross

スター移動 II, ライデマイスター移動 III の3種類が存在する が, ライデマイスター移動 III は交点を減らす効果がないため, 本研究では考慮しないこととする. Fig. 10 にライデマイスター 移動およびクロスによるひもの形状変化とそれに伴う P-dataの 変化を示す. 各形状操作によって解ける交点の種類は決まって おり, P-dataの各要素の関係を調べることによってひものどの 部分がどの形状操作によって解けるかを特定することができる. また操作適用後の形状とその P-data も操作適用前の P-dataの 各要素の操作のみによって予測することが可能である.

ライデマイスター移動 I は Fig. 10 (a) に示すように単純な ループを作ったり解いたりする操作である. P-data 上ではある 列の1行めの番号とその次の列の2行めの番号が等しいことが 必要十分条件である.以下に形状操作適用後のP-data を求め る手順を示す.

- P-data内では一つの交点を表すのに二つの列が関与している. Fig. 11 に示すように、この列どうしの対応をあらかじめ求める.
- (2) ライデマイスター移動およびクロスによって消去される列 を適用前の行列から消去する.
- (3)残った列の1行めの番号を左から順に新しく1から順番に 更新していく、このとき対応する列の2列めの番号を同じ 値に更新する。
- (4) 更新された列を新しい行列として書き下す.

この手法はライデマイスター移動 I に限らずすべての基本的形 状操作で適用可能である.

ライデマイスター移動 II は Fig. 10 (b) に示すようにあるセ グメントがほかのセグメントを横切る操作である. P-data 上で はある連続した2列の上下が等しいこと,さらにこの2列の対 応する列の上下はもともとの2列の上下とは反対であることが 必要十分条件である.ライデマイスター移動 III は Fig. 10 (c) に示すようにひもの一部を交点を越えて動かす操作である.こ の形状操作では交点の数が変化しないため、本研究では基本的 形状操作として採用しない.クロスは両端のあるひもの操作の



Fig. 11 The transformation of a string and P-data



 ${\bf Fig. 12} \quad {\rm Generation \ of \ P-data \ from \ a \ projection \ of \ point \ chain \ model }$

ために考案された形状操作で, Fig. 10 (d) に示すように端点が あるセグメントを横切る操作である.端点には始点と終点の2 種類が存在するため,常に始点のクロスと終点のクロスの二つ が存在する.始点のクロスによって消去される P-data 内の列 の条件は,第1列とそれに対応する列であり,終点のクロスの 場合は最後の列とそれに対応する列である.

4.3 点連鎖モデルからの P-data 生成

前章では、P-dataの各要素の意味や射影図からの生成アルゴ リズム、基本的形状操作との関連について述べた.ここではひ も形状認識法によって出力された点連鎖モデルから操作対象と なるひもの P-data を生成する手法について述べる.

4.3.1 ひもの射影図の生成

P-data はひもの二次元射影図から生成されるため, 点連鎖モデルの射影図を作成する. **Fig. 12** に示すように, 点連鎖モデルは複数の点 (三次元位置ベクトル) とそれらの連結 (リンク) によってひもの形状を表現している. そこで, 各点を $z_w = 0$ 平面に射影することで同図中に示している射影図を得ることができる.

4.3.2 端点の設定および交点の検出と番号の付与

点連鎖モデルには二つの端点が存在しており,一方を始点,他 方を終点と設定する.次に点連鎖モデルの射影図中の交点を検 出し,始点側から順番に番号を付与する.Fig.12に示すように, 交点は射影図中の二つのリンクの交差である考えられるのでリン クの交差をすべて検出する.ここで,始点から順にたどっていっ たときに n 番めに出会うリンクを n 番リンクとよぶこととする. リンクには始点側の端と終点側の端が存在するが,射影した点連 鎖モデルの n 番リンクの始点側の端の座標を $\mathbf{s}_n = [s_{nx}, s_{ny}]^T$, 終点側の端の座標を $\mathbf{e}_n = [e_{nx}, e_{ny}]^T$, \mathbf{s}_n から \mathbf{e}_n に向かうリ ンク方向ベクトルを $\mathbf{d}_n = \mathbf{e}_n - \mathbf{s}_n = [d_{nx}, d_{ny}]^T$ と定義する. Fig. 12 に *i* 番リンクと *j* 番リンク (*j* \noti , *i* + 1, *i* - 1) の交差 を示す. *i* 番リンクと *j* 番リンクの交差点の座標を \mathbf{c}_{ij} とする と, \mathbf{c}_{ij} はある定数 t_{ij} と t_{ji} を用いて以下のように表すことが できる.

$$\boldsymbol{c}_{ij} = \boldsymbol{s}_i + t_{ij}\boldsymbol{d}_i = \boldsymbol{s}_j + t_{ji}\boldsymbol{d}_j \tag{7}$$

そして t_{ij} と t_{ji} は次の式で計算することができる.

$$\begin{bmatrix} t_{ij} \\ t_{ji} \end{bmatrix} = \frac{1}{d_{jx}d_{iy} - d_{ix}d_{jy}} \begin{bmatrix} -d_{jy} & d_{jx} \\ -d_{iy} & d_{ix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_{jx} - s_{ix} \\ s_{jy} - s_{iy} \end{bmatrix}$$
(8)

よって i 番リンクと j 番リンクが交差しているときの条件は

$$d_{jx}d_{iy} - d_{ix}d_{jy} \neq 0 \tag{9}$$

かつ

$$0 \le t_{ij}, t_{ji} \le 1 \tag{10}$$

である. すべてのリンクの組み合わせでこれを計算することで 交差を検出し, 始点側から順番に番号を付与する.

4.3.3 交点の上下の判定

P-data における交点の上下は射影図中の交差点直上における リンクの上下関係によって判定する.ここで、三次元空間内の点連 鎖モデルにおける n 番リンクの始点側の端と終点側の端の座標、 リンク方向ベクトルをそれぞれ $S_n = [S_{nx}, S_{ny}, S_{nz}]^T$, $E_n = [E_{nx}, E_{ny}, E_{nz}]^T$, $D_n = E_n - S_n = [D_{nx}, D_{ny}, D_{nz}]^T$ と定 義する.射影図中の交差点直上に存在する i 番リンク内の点の z_W 座標 Z_{ij} は t_{ij} を用いて

$$Z_{ij} = S_{iz} + t_{ij} D_{iz} \tag{11}$$

と表すことができる. 同様に, j番リンク内の点の z_W 座標 Z_{ji} は t_{ji} を用いて

$$Z_{ji} = S_{jz} + t_{ji} D_{jz} \tag{12}$$

と表せる. すなわち, $Z_{ij} > Z_{ji}$ のとき i 番リンクが上で j 番 リンクが下である. 反対に $Z_{ij} < Z_{ji}$ のとき j 番リンクが上で i 番リンクが下である.

4.3.4 交点の符号および Value の判定 交点の符号は以下の式で定義される.

$$\operatorname{sign}((\boldsymbol{D}_{over} \times \boldsymbol{D}_{under}) \cdot \boldsymbol{u}_z),$$
 (13)

ここで D_{over} , D_{under} , u_z はそれぞれある交差点における上 側リンクのリンク方向ベクトル,下側リンクのリンク方向ベク トル, z_W 方向の単位ベクトルである.また, Value とはその 交点の上下と符号によって決まる1から4の値で,P-dataの 5 行めに記録される.その組み合わせは (1: -/U, 2: -/L, 3: +/U, 4: +/L) である.

4.4 最適な形状操作の選択

射影図で表されたひも形状とそのP-data,そして基本的形状 操作によるそれらの変化については前章で述べた.またP-data の要素を操作することで形状操作適用後のP-dataを求めるこ とができる.つまり基本的形状操作によるひもの位相的形状遷 移をP-dataの操作のみによって予測することができ,それは Fig.13に示すような樹形図によって表現することができ,ひ もを現在の状態から解けた状態に変化させるまでに必要な基本 的形状操作の群を求めることができる.

単腕ロボットによるひも解き操作を考えた場合,形状操作の 成功率は操作するセグメントが他のセグメントとどのように 折り重なっているかに依存して変化すると考えられる.そこで 各基本的形状操作の難しさを表す指標である"コスト"を導入 する.ここで Fig. 14 に示すように,クロスを更に CR(U,U), CR(U,L), CR(L,U), CR(L,L)の四つの形状操作に分割する. クロス CR(a,b)の第1引数aはセグメント両端のうちひも全 体の端点に近い側の交差点における上下関係を示しており,操 作対象となるセグメントが交差点上でほかのセグメントの上側 にある場合がUとなり,下側がLとなる.第2引数bはセグ



Fig. 13 A tree diagram which expresses the transition of topological string shape with cost



Fig. 14 Examples of CR(a,b): A dotted line means a target segment to be manipulated. And an arrow means moving direction of target segment

Viewpoint	RM I	$RM \Pi$	RM III	CR(U,U)	CR(U,L)	CR(L,U)	CR(L,L)
Reduce of nodes	fair	good	bad	fair	fair	fair	fair
Success rate	fair	fair	bad	good	fair	good	bad
Interference between segments	fair	good	bad	good	fair	fair	bad
Interference between segments and the robot's hand	fair	good	bad	good	bad	good	bad
Cost	8	1	N.A.	3	10	5	N.A.

 Table 1
 The evaluation and cost of shape operations

メントのもう一方の端における上下関係を示す. CR(L,L) はロ ボットハンドとひもとの干渉が大きいことから選択されないこ ととする. そして合計五つの基本的形状操作を交点の減少数,成 功率,セグメントとロボットハンドの干渉,セグメントどうし の干渉という四つの観点から評価し,発見的にコストを決定し た. Table 1 に各基本的形状操作の評価とコストを示す. これ らのコストは単腕マニピュレータでのグリッパ把持操作を基に 考慮したものであり,マニピュレータの数,手先効果器の種類 によって再構築する必要があると考える. 樹形図の生成と同時 にひもを解くまでに要したコストの合計を計算する. それらを 比較し,最小の合計コストを記録した経路中の最初の形状操作 を最適な形状操作として選択する. 例外として,交点の数が 1 ならば CR(U,L) が選択されることとする.

5. ロボットの動作生成

動作生成フェイズでは、操作計画フェイズで選択された基本 的形状操作を実現するためのロボットの動作が生成される.な お本研究では、手先にグリッパを装着したロボットマニピュレー タ1台を使用して形状操作を行うことを想定したロボットの動 作生成アルゴリズムを提案する.生成されるロボットの動作は 手先の軌道、ハンドの角度、グリッパーの開閉状態を含んでい る.**Fig.15** にグリッパ付きロボットハンドの手先位置と姿勢 を示す.**H**_k は手先軌道における第 k 番めの中継点の三次元座 標、 θ_k は第 k 番中継点でのグリッパの大態を表している.また G_k は第 k 番中継点でのグリッパの状態を表しており、Open はグリッパが開いた状態、Close は閉じた状態である.

Fig. 16 は点連鎖モデル内のあるセグメントに含まれる点を 示している. 点連鎖モデルを始点から順にたどっていったとき に *j* 番めに出会うセグメントを *j* (*j* = 1,2...,*N*) 番セグメ ントとし, *j* 番セグメント内で始点側から *i* 番めの点の座標を ${}^{j}P_{i} = [{}^{j}x_{i}, {}^{j}y_{i}, {}^{j}z_{i}]^{T}$ (*i* = 1,2,...,*n_j*) と定義する. また点連 鎖モデルのリンク間の角度を計算する関数 $A({}^{j}P_{i})$ とセグメン トの中点座標を計算する関数 $P_{m}(j)$ をそれぞれ式 (14) と式 (15) のように定義する.

$$A({}^{j}\boldsymbol{P}_{i}) = \tan^{-1} \frac{{}^{j}y_{i+1} - {}^{j}y_{i}}{{}^{j}x_{i+1} - {}^{j}x_{i}}$$
(14)
$$\mathbf{P}_{m}(j) = \begin{cases} {}^{j}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{j}}{2} \rceil} & (if \ n_{j} \ is \ odd) \\ \left({}^{j}\boldsymbol{P}_{\frac{n_{j}}{2}} + {}^{j}\boldsymbol{P}_{\frac{n_{j}}{2}+1}\right)/2 & (if \ n_{j} \ is \ even) \end{cases}$$
(15)

ここで[]は天井関数 (ceiling function)を表す.加えて、グリッパの手先とひもとの不要な接触を回避するための共通のオフセットとしてベクトル $P_s = [0, 0, 0.05 \text{ [m]}]^T$ と $P_o =$



Fig. 15 Pose of the hand in grasping motion



Fig. 16 Points in segments of point chain model

Table 2 Passing point plan of motion of a manipulator for RMI

k	$oldsymbol{H}_k$	$ heta_k$	G_k
1	$\mathbf{P}_m(\alpha) + \mathbf{P}_s$	$A(\alpha P_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil})$	Open
2	$\mathbf{P}_m(\alpha)$	$A(\alpha \boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil})$	Close
3	$\mathbf{P}_m(\alpha) + \mathbf{P}_l$	$A(\alpha \boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil})$	Close
4	${}^{r}P_{1} + P_{l}$	$A(\alpha \boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil})$	Close
5	${}^{r}P_{1} + P_{l}$	$A(^{\alpha}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil}) + \theta_t$	Close
6	$\mathbf{P}_m(\alpha) + \mathbf{P}_l$	$A(^{\alpha}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2}\rceil} + \theta_t$	Close
7	$\mathbf{P}_m(\alpha)$	$A(^{\alpha}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil}) + \theta_t$	Open
8	$\mathbf{P}_m(\alpha) + \mathbf{P}_s$	$A(^{\alpha}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\alpha}}{2} \rceil}) + \theta_t$	Open

 $[0,0,0.02\,[m]]^T$ を定義する.

5.1 ライデマイスター移動I

Table 2 にライデマイスター移動 I を実現するための動作計 画を示す. この動作にはループを作っているセグメントを持ち 上げ, ひねる動作が含まれている. ループを作っているセグメ ントの番号は前述の方法で判別可能であり, その番号を α とす る. P_l は持ち上げる高さを表すベクトルであり, 以下の式で定 義される.

k	$oldsymbol{H}_k$	θ_k	G_k
1	$\mathbf{P}_m(eta) + \mathbf{P}_s$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Open
2	$\mathbf{P}_m(eta)$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Close
3	$\mathbf{P}_m(eta) + oldsymbol{P}_o$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Close
4	$\mathbf{P}_m(\beta) + \mathbf{Q} + \mathbf{P}_o$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Close
5	$\mathbf{P}_m(eta) + oldsymbol{Q}$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Open
6	$\mathbf{P}_m(\beta) + \mathbf{Q} + \mathbf{P}_s$	$A(\beta P_{\lceil \frac{n_{\beta}}{2} \rceil})$	Open

 ${\bf Table \ 3} \quad {\rm The \ motion \ of \ a \ manipulator \ for \ RMII}$

Table 4 Passing point plan of motion of a manipulator for CR(U,U) and CR(U,L)

	0		
k	$oldsymbol{H}_k$	θ_k	G_k
1	$\mathbf{P}_m(\delta) + \mathbf{P}_s$	$A(^{\delta}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2}\rceil})$	Open
2	$\mathbf{P}_m(\delta)$	$A(\delta P_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2} \rceil})$	Close
3	$\mathbf{P}_m(\delta) + \mathbf{P}_o$	$A(^{\delta}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2}\rceil})$	Close
4	$\mathbf{P}_m(\epsilon) + \mathbf{P}_o$	$A(\delta P_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2} \rceil})$	Close
5	$\mathbf{P}_m(\epsilon)$	$A(^{\delta}\boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2}\rceil})$	Open
6	$\mathbf{P}_m(\epsilon) + \mathbf{P}_s$	$A(\delta P_{\lceil \frac{n_{\delta}}{2} \rceil})$	Open

$$\boldsymbol{P}_{l} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} \\ |\boldsymbol{P}_{m}(\alpha) - {}^{\alpha}\boldsymbol{P}_{1}| \end{bmatrix}$$
(16)

また θ_t はひねる角度である. この角度はループを構成している部分の交点の符号によって決まり,以下の式で定義される.

$$\theta_t = \begin{cases} \pi & (if \ sign \ of \ the \ node \ is \ +) \\ -\pi & (if \ sign \ of \ the \ node \ is \ -) \end{cases}$$
(17)

5.2 ライデマイスター移動 II

Table 3 にライデマイスター移動 II を実現するための動作 計画を示す. ライデマイスター移動 II は重なった二つのセグメ ントを離す操作であるが,この動作によって重なった上側のセ グメントは持ち上げられ,下側のセグメントの横に移動させら れる.上側のセグメントの番号 β ,下側のセグメントの番号を γ とする. Table 3 中の Q は上側のセグメントと下側のセグメ ントを離すために設ける距離を表しており,以下の式で定義さ れる.

$$\boldsymbol{Q} = 4d \frac{\boldsymbol{P}_m(\gamma) - \boldsymbol{P}_m(\beta)}{|\boldsymbol{P}_m(\gamma) - \boldsymbol{P}_m(\beta)|}$$
(18)

ここで d はひもの直径である.

5.3 クロス

クロスは端点を含むセグメントを移動させる操作であるが, 形状操作の成功しやすさで分類すべきであるのでクロスを CR(U,U), CR(U,L), CR(L,U) という三つの操作に分割した. これらの操作では操作対象となる端点を含むセグメントと,この セグメントに接続するセグメントの二つを考慮する必要があり, それらの番号をそれぞれ δ , ϵ とする. CR(U,U) と CR(U,L) の動作計画は同じであり, **Table 4** にそれを示す. この動作で は δ 番セグメントの中間点を把持し, ϵ , 番セグメントの中間点 まで移動させる操作を行う. 一方で CR(L,U) は独立した操作 方法を設定する. **Table 5** に CR(L,U) の動作計画を示す. こ

k	${oldsymbol{H}}_k$	θ_k	G_k
1	$\mathbf{P}_m(\epsilon) + \mathbf{P}_s$	$A(\epsilon \boldsymbol{P}_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Open
2	$\mathbf{P}_m(\epsilon)$	$A(\epsilon P_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Close
3	$\mathbf{P}_m(\epsilon) + \mathbf{P}_o$	$A(\epsilon P_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Close
4	$2\mathbf{P}_m(\epsilon) - {}^{\delta}\mathbf{P}_{n_e} + \mathbf{P}_o$	$A(\epsilon P_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Close
5	$2\mathbf{P}_m(\epsilon) - {}^{\delta} \mathbf{P}_{n_e}$	$A(\epsilon P_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Open
6	$2\mathbf{P}_m(\epsilon) - {}^{\delta} \mathbf{P}_{n_e} + \mathbf{P}_o$	$A(\epsilon P_{\lceil \frac{n_{\epsilon}}{2} \rceil})$	Open



Fig. 17 The environment of string untying experiment and coordinate systems

の動作では ε 番セグメントの中間点を把持し, δ 番セグメント 中の端点とは反対方向に動かす操作を行う. CR(L,U) を異なる 動作にした理由はひもの端点を交差点から引き抜く動作方向が セグメント両端の上下関係により異なるためである.

6. ひも解き実験

本論文で提案した手法の有効性を検証するために,ロボット マニピュレータを用いたひも解き実験を行った.

6.1 実験環境

Fig. 17 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.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 は点群取得用の距離カメラの座標系である.ロボットマニピュレータは三菱電機社製 RV6SL であり、手先には距離カメラ (Creative 社製: Senz3D) が取り付けられている.また、エンドエフェクタはシュンク・ジャパン社製電動ハンド RH707 にグリッパの開いた長さを測るエンコーダを取り付けたオリジナルである.

6.2 実験の流れ

実験の流れは Fig. 3 で示したフローチャートに基づいたもの であり, Fig. 18 に実際の実験の様子を示す.まず点群データ を五つの異なる視点から取得し,ひも形状認識法によって対象 の点連鎖モデルを得る.これらの作業には数分の時間を要する. 次に取得した点連鎖モデルから P-data が作成され,目標形状 (ひもがほどけた状態)と一致するかが P-data によって判断さ



 $Fig. \, 18 \quad {\rm Work \ flow \ of \ an \ experiment}$

れる.もし目標形状と異なる場合は、P-dataと点連鎖モデルが 分析されロボットマニピュレータの動作が生成される.最後に マニピュレータによる形状操作が実行される.これらの処理は ひもが解けたと判定されるまで繰り返す.

6.3 実験結果

Fig. 19 (a) に今回の実験に使用したひもの初期形状を示す. ひもは綿ロープ三つ打タイプ直径 8 [mm] (ユタカメイク社製) であり,その長さはおよそ 0.8 [m] に切断して使用した.実測 したひもの直径 d は 8.4 [mm] である.また Fig. 20 に実験に 使用したひもが解けるまでの樹形図とコストを示す.そして点 線で示された矢印は最小の合計コストを持つ経路を表しており, 実験でも同じ形状遷移が実現された.Fig. 19 に実験におけるひ もの形状遷移と各ループごとの出力された点連鎖モデルおよび 生成されたマニピュレータ動作計画を示す.図中の黒い実線は 点連鎖モデルを表している.また点線矢印はマニピュレータが ひもを操作するときの手先軌道である.

1回めの試行では始点の CR(U,L) が選択された.2回めの 試行では適用可能な形状操作が2種類存在し,それはどちらも CR(L,U) であった.このうち選択されたのは始点の CR(L,U) であったが,これは P-data によるコスト計算が同じだった場合 は先に計算された形状操作が優先されるためである.CR(L,U) はひもどうしの干渉が少ないため形状操作はスムーズに成功し た.3回めの試行では始点の CR(U,L) が選択された.これは交 点が一つの場合は例外的に CR(U,L) が選択されるためである. 4 回めの試行では形状認識が再び行われ,ひもが解けたと判断 されたため実験が終了した.

上記で示した形状を初期形状とした実験を29回試行した. そ の成功回数,失敗回数とその理由を**Table 6**に示す. 成功率は 48%であった. Table 6 において,撮影失敗(fail in sensing) と操作失敗(fail in handling)の現象はマニピュレータに対し



Fig. 19 The transition of string shape and generated motion



Fig. 20 The shape transition of the string used in this experiment

 Table 6
 Counts of success and fail in experiments and reason of failure result

task result	count	reason
success	14	-
fail in recognition	7	A rope is recognized as two devided strings.
fail in sensing	5	Parts of rope move to outside of camera range.
fail in handling	3	Parts of rope move to outside of operatable range.



Fig. 21 The transition of string shape and generated motion in the case that is shown in Fig. 13

て Table 2~4 までの情報に基づいて作業を指示したところ,ひ もの一部が距離カメラの計測領域からはずれたり,移動先がマ ニピュレータロボットの手先が届かない領域であったりという ことが起こった.この失敗は移動指令の範囲を限定することで 改善が可能であるので,今後訂正を行う.一方,認識失敗(fail in recognition)はひもの重なっている部分が長い場合に起こっ た.この場合二つのセグメントが交差しているのか,それとも 沿って並んでいるのかの判別が困難になり,失敗した場合には 一つのひもの連続的なつながりが切れて二つのひもとして認識 される.これは認識アルゴリズムの問題であり,改善は今後の 課題である.

また,前述の Fig. 13 に示す形状を初期値とした場合の実験 結果を Fig. 21 に示す. この場合はひもは結ばれていないので, Fig. 13 の点線で示された経路によって前述の形状より簡単に解 くことができる. Fig. 21 (d) ではライデマイスター移動 II が指 令され, Fig. 21 (e) ではクロスが指令された. Fig. 21 (f) にお いて,交差点がないことから P-data は空行列となり作業終了 となる.

次に作業に要する時間に関して述べる, Fig. 19 (e) の作業を 例にするとマニピュレータが距離カメラを操作して撮影する時 間が約 50 秒,得られた距離データから点連鎖モデルを生成す るのにかかる時間が約 30 秒,軌道生成が約 20 秒そして動作が 約 40 秒であった,この時間は形状の複雑さによって多少変化す る.Fig. 19 の作業における総作業時間は約 8 分であり,作業時 間を短縮することは本論文の研究課題には入れていない.

7. おわりに

本紙では結び目理論に基づいたひも形状操作の計画法とマニ ピュレータの動作計画法を提案し、比較的単純な形状を用いた ひも解き実験の結果について報告した.本研究では P-data とよ ばれるひものトポロジー記述方を採用し,距離カメラ情報を基 に構築した点連鎖モデルからこれを求める手法を構築した.そ して形状操作によるひもの状態遷移を樹形図で表現し,各形状 操作の難しさをコストとして定義することで適用用可能な複数 の形状操作の中から最適な形状操作を選択する.このときクロ スとよばれる操作方法をひもの状況に合わせて分割定義し,そ れぞれに個別のロボット動作を割り当てた.最後にロボットマ ニピュレータの動作を自動的に生成するアルゴリズムを提案し, これらの手法を用いた実験によりひも解き操作が実現可能であ ることを示した.

参考文献

- [1] 鷲見和彦: "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.
- [2] X. Jiang, K.-M. Koo, K. Kikuchi, A. Konno and M. Uchiyama: "Robotized assembly of a wire harness in car production line," Proc. of 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.490–495, 2010.
- [3] 徳本真一,平井慎一: "成形過程モデルを用いたレオロジー物体の成 形制御",日本ロボット学会誌,vol.20, no.7, pp.717-724, 2002.
- [4] M. Higashimori, K. Yoshimoto and M. Kaneko: "Active shaping of an unknown rheological object based on deformation decomposition into elasticity and plasticity," Proc. of 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.5120–5126, 2010.
- [5]田中健太,木原康之,横小路泰義: "人間の直接教示動作の統計的性質に基づいた折り紙ロボットの目標軌道とセンサフィードバック則生成法",日本ロボット学会誌,vol.27, no.6, pp.685-695, 2009.
- [6] K. Yamazaki: "A Method of Grasp Point Selection from an Item of Clothing Using Hem Element Relations," Advanced Robotics, vol.29, no.1, pp.13–24, 2014.
- [7]小野栄一,喜多伸之,坂根茂幸: "視触覚を用いた輪郭情報に基づく折れ重なった布生地の展開",日本ロボット学会誌,vol.15, no.2, pp.275-283, 1997.
- [8] L. Sun, G. Aragon-Camarasa, S. Rogers and J.P. Siebert: "Accurate garment surface analysis using an active stereo robot head with application to dual-arm flattening," Proc. of 2015 IEEE International Conference on Robotics Automation, pp.185-192, 2015.
- [9] 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.
- [10] W.H. Lui and A. Saxena: "Tangled: Learning to untangle ropes with RGB-D perception," Proc. of 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.837– 844, 2013.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 若松栄史, 妻屋彰, 荒井栄司, 平井慎一: "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", 日本ロボット学会誌, vol.24, no.4, pp.523-532, 2006.
- [15] 森田拓磨,高松淳,小川原光一,木村浩,池内克史:"観察によるひ も結び動作の学習",情報処理学会研究報告コンピュータビジョンと イメージメディア, pp.71-78, 2002.
- [16] 片野良太,五味知之,冨沢哲雄,工藤俊亮,末廣尚士: "双腕ロボットによる五種類の卓上紐結びの実現",日本ロボット学会誌, vol.33, no.7, pp.505-513, 2015.

- [17] K. Mukai, T. Matsuno, A. Yanou and M. Minami: "Shape Modeling of A String And Recognition Using Distance Sensor," Proc. of the 24th IEEE Int. Symposium on Robot and Human Interactive Communication, pp.363-368, 2015.
- [18] T. Shirakawa, T. Matsuno, A. Yanou and M. Minami: "String Shape Recognition Using Enhanced Matching Method From 3D Point Cloud Data," IEEE/SICE Int. Symposium on System In-

tegration, pp.499-454, 2015.

- [19] M.A. Fischler and R.C. Bolles: "Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, vol.24, pp.381–395, 1981.
- [20] K. Reidemeister: Knot Theory. BCS Associates, 1983.

護



松野隆幸(Takayuki Matsuno)

2004 年名古屋大学大学院工学研究科マイクロシス テム工学専攻博士課程後期課程満期退学.博士(工 学). 2004年より名古屋大学大学院工学研究科助手, 2006年富山県立大学工学部助手, 2008年同大学講 師. 2011 年岡山大学大学院自然科学研究科講師, 2017年同大学准教授,現在に至る,産業用マニピュ

レータ、医療用ロボットの研究に従事. (日本ロボット学会正会員)



渡部知後(Tomotoshi Watanabe)

2016 年岡山大学工学部機械システム系学科卒業. 2018 年岡山大学大学院自然科学研究科機械システ ム工学専攻博士前期課程修了.同年(株)NICSへ 入社. 在学中は不定形物体の形状認識および形状操 作に関する研究に従事.



白川智也(Tomoya Shirakawa)

2015 年岡山大学工学部機械システム系学科卒業. 2017 年岡山大学大学院自然科学研究科機械システ ム工学専攻博士前期課程修了.同年川重テクノロ ジー(株)入社. 在学中は不定形物体の形状認識お よび形状操作に関する研究に従事.

見浪 護 (Mamoru Minami)

1993 年金沢大学大学院自然科学研究科博士課程修 了.博士(工学).1994年福井大学工学部機械工学 科助教授,2002年同知能システム工学科教授,2010 年岡山大学大学院自然科学研究科教授,現在に至る. ロボットの力学, 拘束運動, 力制御, 移動マニピュ レータの制御,画像認識,ビジュアルサーボイング

等の研究に従事.日本機械学会,計測自動制御学会, IEEE などの会 員.

(日本ロボット学会正会員)