ひも形状操作におけるセグメント長の比率を考慮したマニピュレータ動作生成

○松野　隆幸（岡山大学），渡部 知俊（(株)NICS），見浪　護（岡山大学）

Manipulator Motion Generation Considering Ratio of Segment Length in String Shape Operation

○ Takayuki MATSUNO (Okayama University), Tomotoshi WATANABE(NICS),
Mamoru MINAMI (Okayama University)

Abstract : In this paper, we propose a method of generating a robot operation trajectory considering the ratio of the segment length of the string in the target shape, so as to improve the operation. Based on the shape abstraction data of the target shape and the planned operation group, the ratio of the segment length in the shape after one operation is calculated to generate the operation trajectory of the robot. The method was conducted on an actual robot with figure-eight knot, and the effectiveness was verified.

1.　はじめに

我々の身の回りに存在するひもや布，紙といった物体は柔らかく形状が一定に定まりにくいため不定形物体とも呼ばれる．近年，この不定形物体をロボットで操作する需要が増大している．

我々はこれまでひもの 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，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及び止め結びを目標としたひも結び操作実験に成功した [1, 2]．本論文では操作の成功率向上のために，目標形状におけるひものセグメント長の比率を考慮したロボット操作軌道の生成法を提案する．目標形状の形状抽象化データ及び計画された操作群をもとに一回操作後の形状におけるセグメント長の比率を算出しロボットの操作軌道を生成する．この手法を 8 の字結びを目標形状とした実機実験を行い，有効性を検証した．

2.　柔軟物体操作

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．

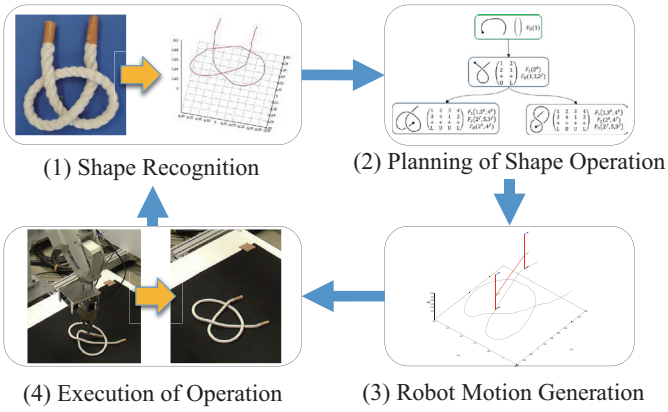

Fig. 1: Four phases of string tying operation

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．

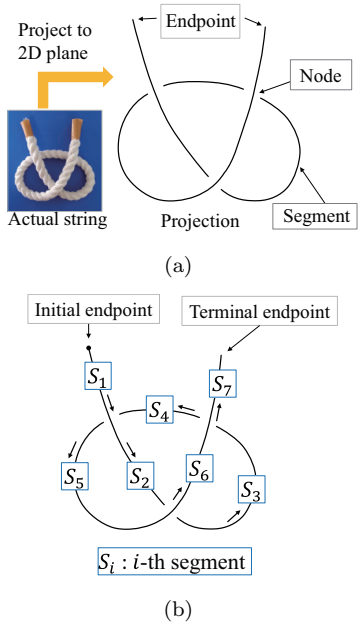

Fig. 2: (a)Projection of string, (b)Projection of string with numbered segments

2.1 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)[3] 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．

2.2 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

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

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

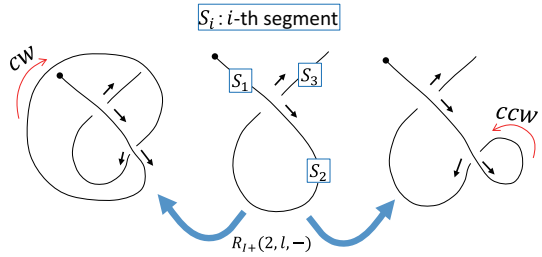

Fig. 3: Shape operation by RM I in outer face

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

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．

2.3 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

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

とし，終点のクロスを

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

と記述する．

3. アルゴリズム

3.1 コンセプト

これまでの研究成果として P-data などの位相情報を基にしてひもの操作計画をツリー構造で表現し，コストを基

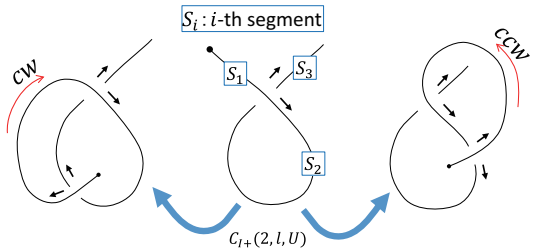

Fig. 4: Shape operation by Cross in outer face

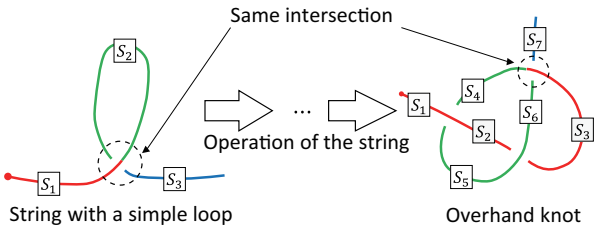

Fig. 5: Flow chart of trajectory generation of manipulator considering length of segments

準として操作計画を選択する手法を提案し，その有効性を検証した [1, 2]．次に解決すべき問題は，操作計画に基づいて意図した通りにひもを操作できる手法の確立である．ここで注目したのは，作業終了状態時のひものセグメントの配分を考慮することである．簡単な止め結びでは問題にならないが，最終形状が複雑になると操作の手順が多くなりその過程でセグメントのバランスが崩れ，操作すべきセグメントが短くなり，操作できなくなる問題が発生した．

そこで Fig.5 にあるように，最終形状のセグメント長が等しくなるように，その手前の形状を作る段階で各交点間のセグメント長を決定し，それに基づいて操作する手法を提案する．

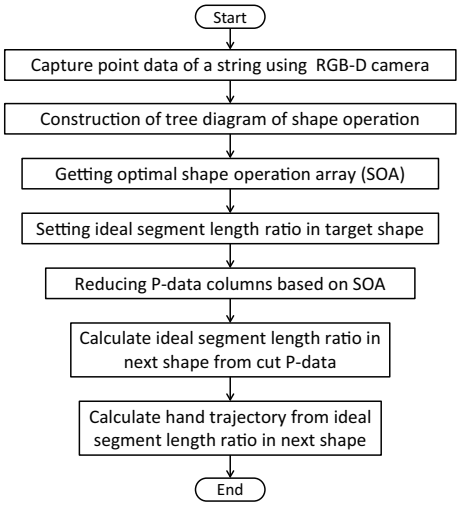

Fig. 6: Flow chart of trajectory generation of manipulator considering length of segments

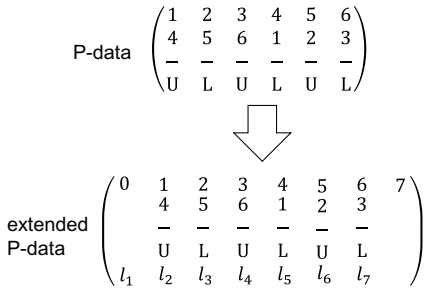

Fig. 7: Extended P-data

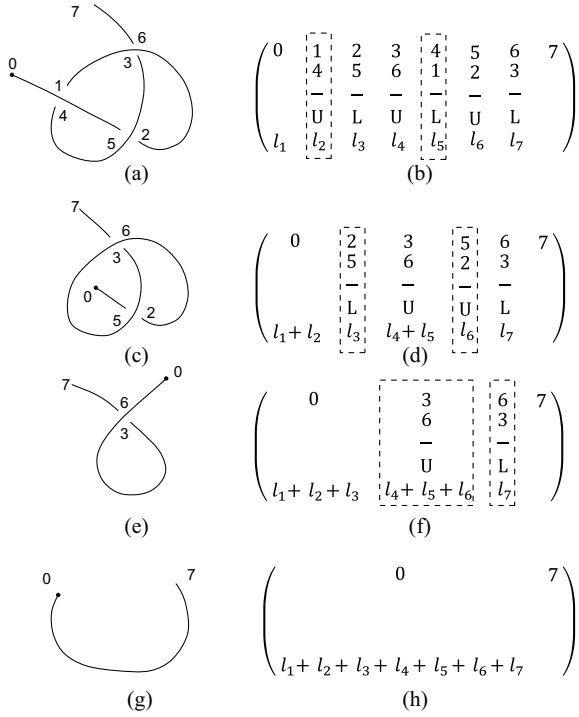

Fig. 8: Example of extended P-data changing

3.2 セグメント長の比率計算

目標形状における各セグメント長の比率に着目し，一回の形状操作後の形状における各セグメント長の理想の比率を求め，その比率をもとに形状操作における把持位置，中継点，解放位置等の軌道を計算する．セグメント長の比率の計算方法を Fig.6 に示す．距離カメラから得られたひもの表面形状より，現在ひもの P-data および拡張 P-data を計算し，形状操作計画によって導出された形状操作群を得る．また，事前に目標形状における各セグメント長の比率を設定する．

3.3 拡張 P-data

P-data に情報を付加して，拡張 P-data を作成する．拡張 P-data 作成ではまず，Fig.7 に示すように P-data の 1 行目の左側に 0 を追加し，右側に交点番号に 1 を足した値

を追加する．次に新たに追加した 5 行目にセグメント長を記入する，これは行列の右隣りの交点との間のセグメント長を意味し，最も右側の列は空である．この例では l_1 から l_7 を代入したが，全て同じ値でも構わない．また，比率のみを考慮するので，セグメント長の総和が実際のひもの長さと合っていなくても問題にならない．この拡張 P-data を最終形状から現在の操作目標形状まで時系列をさかのぼるように計算していくと次の操作における各セグメント長が得られる．形状操作群をもとに目標形状における P-data を交点番号を保持したまま縮小する．このとき，縮小された拡張 P-data の 1 行目の要素は目標形状における交点番号と対応している．そのため隣接する要素同士を比較することでその間にあるセグメントを識別することができ，一回形状操作後のセグメントと目標形状のセグメントの対応関係を求めることができる．この対応関係をもとにロボットの動作軌道を計算する．

その計算例を Fig.8 に示す．ここでは前述の操作計画で $(R_{I+} \rightarrow C_{I+} \rightarrow C_{I+})$ を得た場合を考える．形状の変更計画は (g)→(e)→(c)→(a) の順である．また，Fig.8(a) の形状から得られる拡張 P-data は (b) のようになり，(c) 以下も同様である．ここで，(b) の拡張 P-data に l_1 から l_7 を数値として入力する．次に手順をさかのぼって，拡張 P-data を (b)→(d)→(f)→(h) の順で計算する．(b)→(d) の変換は C_{I+} の逆工程であり，(b) の拡張 P-data の破線で囲まれた"1"の列と"4"の列を削除し，その分のセグメント長を左隣の列に加算する．この手順で Fig.8(d) が得られる．同様に (d)→(f) の変換も C_{I+} の逆工程にあたり，列の削除とセグメント長の加算によって Fig.8(f) が得られる．最後に (f)→(h) は R_{I+} の逆工程であり，(g) の図形は交点が無くなるため，P-data は空行列であるが，拡張 P-data は端点のみを記述している．ここで計算に用いるのは Fig.8(f) のセグメント長の比である．$l_i = 1, (i = 1, ..., 7)$ とすると始点から終点に向かってセグメント長は 3:3:1 の比になる．この比を保つように (g)→(e) の操作においてロボットの軌道を生成する．このように計算することでセグメント長が短くなりすぎて，柔軟物体操作が失敗するのを避けることができる．

4. 実験

提案手法の有効性を確認するために，マニピュレータを用いた実験をおこなった．Fig.9 に実験におけるひもの初期形状と目標形状，その中間形状を示す．また，その形状に対応する P-data も示す．目標形状は 8 の字結びであり，その交差点は 4 つある．Fig.10 に実験の様子を示す．実験に用いたマニピュレータは三菱電機社製 RV6SL であり，手先効果器に距離カメラ RealSense 3D を取り付けた．4 回の操作により，8 の字結びが実現できた．

Table. 1: Measured segment length in 1st step

Segment ID	S_1	S_2	S_3
Desired length :L^*[mm]	333	556	111
Measured length after operation:L_m [mm]	302	609	161
$R = L_m/L^*$ [ ]	0.91	1.09	1.45

Table. 2: Measured segment length in 2nd step

Segment ID	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
L^*[mm]	333	111	333	111	111
L_m [mm]	256	71	502	27	193
$R = L_m/L^*$ [ ]	0.76	0.63	1.51	0.25	1.73

Table. 3: Measured segment length in 3rd step

Segment ID	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
L^*[mm]	111	222	111	111	222	111	111
L_m [mm]	106	193	91	70	402	50	208
$R = L_m/L^*$ [ ]	0.95	0.87	0.82	0.63	1.81	0.45	1.86

Table. 4: Measured segment length in 4th step

Segment ID	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
L^*[mm]	111	111	111	111	111	111	111	111	111
L_m [mm]	73	88	112	188	60	254	97	58	208
$R = L_m/L^*$ [ ]	0.65	0.79	1.01	1.69	0.54	2.28	0.87	0.53	1.87

この実験例における生成されたロボット動作を Fig.11 に示す．図中の点連鎖モデル先端の点は始点，赤い線の矢印は手先軌道，水平方向の小さい矢印はハンドの方向と開閉を表している．1st step では R_{I+} のループが形成された．また 2nd step でも R_{I+} のひも形状操作が実行され，連なったループが形成された．さらに 3rd step における C_{I+} の操作によって端点がループの中に入り，4th step における C_{I+} の操作によって 8 の字結びの形状が完成した．

次に，セグメント長について述べる．本論文では最終形状における各セグメント長の比が全て等しくなるように $l_i(i = 1, ..., 9)$ を設定した．Fig.12 に 4 回の操作後のひも形状とセグメント IDS_i を示す．この 4 回の操作終了後の目標セグメント長 L^*[m] と距離カメラで撮影した形状から算出したセグメント長 L_m[m] およびその比 $R = L_m/L^*$ を Table 1〜Table 4 に示す．この R が 1.0 に近いほど目標のセグメント長を実現していると考えることができる．ひも全体の長さが 1m であるので Table 1〜Table 4 の L^* の総和は約 1m である．作業が進行する度に交点が増えていくので各 L^* は短くなる．セグメント長のコントロールは全体として問題なく実現できたが，好ましくないセグメント長も存在する．Table 2 の S_2 と S_4 はともに短くなりすぎるいるため，それぞれ R が低い値を示している．これは Fig.12(b) におけるセグメント S_2 と S_4 が形成するループが小さいことに起因する．Fig.12(b) において S_2 と

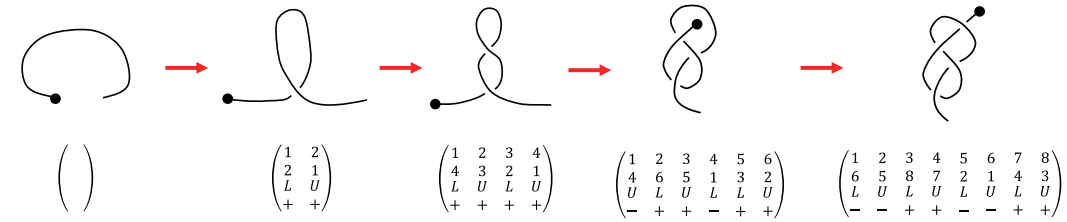

Fig. 9: Initial shape and target shapes of rope in this experiment

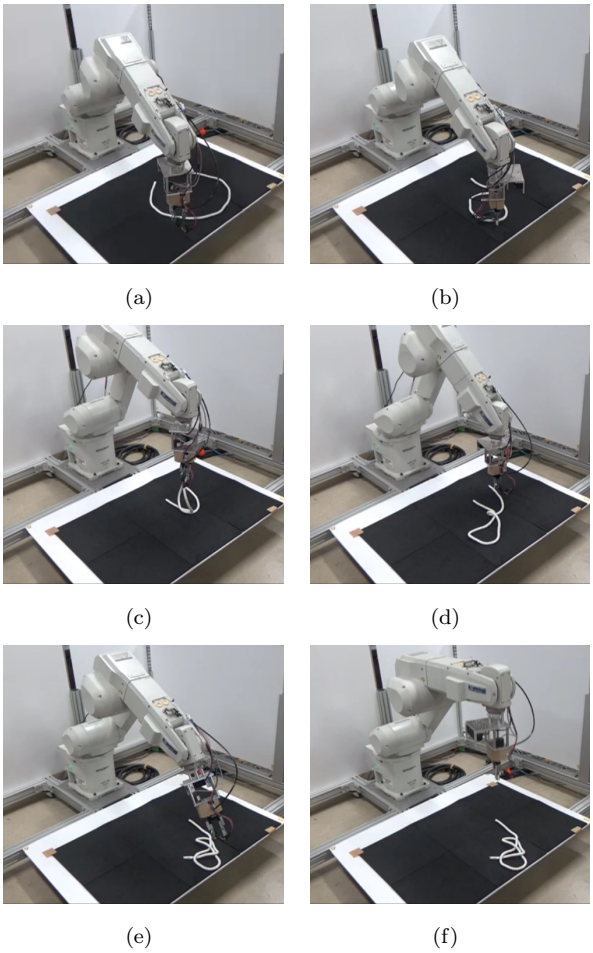

Fig. 10: Appearance of experiment

S_4 のループの長さは S_3 のループの長さの 2/3 程度であることが目標であったが，二つのループの大きさは明らかに差が大きい．これはライデマイスター移動 I のように捻りを 2 回繰り返すような操作を実行した場合どのような形状，セグメント長になるかの予想が難しく，適切なマニピュレータの手先軌道が実現できていないためである．

この問題を解決するためには，学習などの手法により動作プリミティブの状況に応じた変更を実現するか，ひもの操作中もリアルタイムでひもを観測し適切なセグメント長になるようにフィードバック動作を実現することが必要になる．

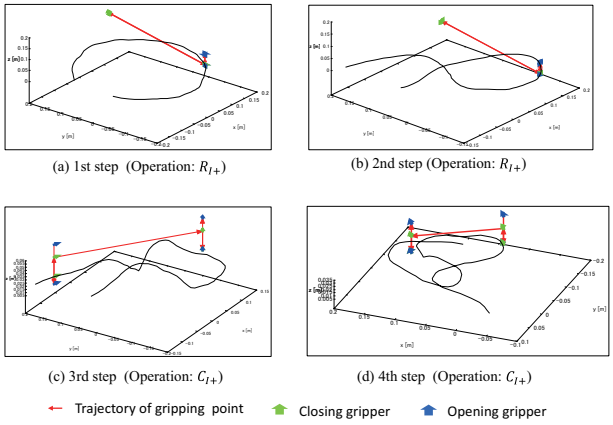

Fig. 11: Sequential target shapes of rope and its P-data in the experiment

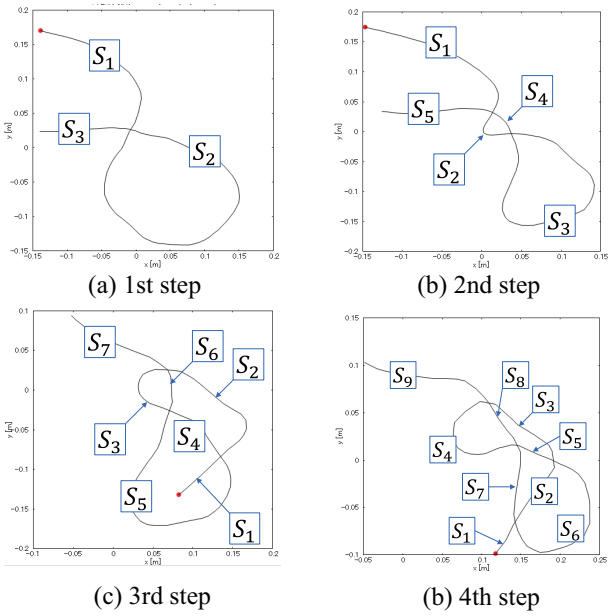

Fig. 12: Measured Shapes of rope after operation and its ID of segments

5. まとめ

本論文ではひもの結び操作の成功率向上のために，目標形状におけるひものセグメント長の比率を考慮したロボット操作軌道の生成法を提案した．目標形状の形状抽象化

データ及び計画された操作群をもとに一回操作後の形状におけるセグメント長の比率を算出する．有効性を検証するために 8 の字結びを目標形状とした実機実験をおこなった．

6. 謝辞

本研究は JSPS 科研費 18K04051 の助成を受けたものです．

参考文献

[1] 松野 隆幸, 白川 智也, 渡部 知俊, 見浪 護, “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”, 日本ロボット学会誌, 36 巻, 6 号, pp. 429-440, 2018.
[2] 松野 隆幸, 渡部 知俊, 見浪 護, “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”, 第 *23* 回ロボティクスシンポジア, 2C2, pp.125-132, 2018.
[3] 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.