ロープのマニピュレーションにおける位相幾何を用いた計画法に関する考察

Planning of flexible rope manipulation based on topology

○正　松野隆幸 (岡山大)　　渡部知俊 (岡山大)
正　見浪護 (岡山大)
Takayuki MATSUNO, Okayama University, matsuno@cc.okayama-u.ac.jp
Tomotoshi WATANABE, Okayama University
Mamoru MINAMI, Okayama University

Deformable linear object manipulation is attractive research issue in field of industrial robotic manipulator. And robots' ability to manipulate deformable object is still inferior to human ability. The major factor of difficulty comes from variety of shape when manipulating a part of deformable object. And it cannot be realized with fixed operation ordered by teaching playback scheme. Therefore, our research group focuses on rope manipulation using both of vision sensor system and topological model. Vision sensor system is required for observing current situation of deformable object. Also, topological model is feasible to abstract information of rope form. In this paper, historical research outputs of our research group are introduced. Also future plan of data processing in deformable object manipulation is presented.

***Key Words*:** Planning, Deformable Object Manipulation, Topology

1　緒言

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．例えば生産ラインでは産業用ロボットによって多くの作業が自動化されているが，柔軟なケーブルの配線作業 [1] やバラ積みされた部品のピックアップ等は現在も手作業で行なわれている．少子高齢化に伴う労働力の減少が危惧されている日本の生産現場ではこうした作業の自動化が求められている．また医療の分野では様々な手術支援ロボットが開発・導入されているが，その操作は医師が行っている．もし手術後の患部を縫合する作業を自動化できれば医師の負担軽減につながる [2]．人間の生活空間には食品や衣服，紙などの柔軟物が数多く存在するが，ロボットによるこれらの自在な把持操作が可能になれば，近い将来家庭用ロボットが普及するかもしれない．このようにロボットによる不定形物体の操作が実現されれば我々の生活はより豊かで便利になると期待される．しかし不定形物体の自在なマニピュレーションは困難である．その大きな要因は不定形物体の形状が様々に変化する事にあり，ティーチングプレイバック等による画一的な動作では操作することができない．そこで本研究グループでは不定形物体であるロープに着目し，ロープの結びや解きといった形状操作をロボットで実現することを目標として研究を行っている．

ロープやひもの形状操作を対象とした研究では，Schulman らは点群データを用いたロープ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 [3]．Javdani らは線状物体の物理パラメータを観測データから推定し，シミュレーションに応用する研究を行っている [4]．ロープ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ロープ解き操作の計画法を提案している [5] 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 [6][7]．その論文の中で面に着目するアイデアを提起しているが，詳しい研究はなされていない．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 [8, 9, 10, 11, 12, 13]．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．山川らは高速ロボットアームを用いたひもの動的なマニピュレーションに関する研究を行っている [14][15][16] が，その動作は自動的に生成されたものではない．Trinh Van Vinh らはセンサで取得した人間のロープ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，実機によるロープ結び操作を実現させている [17]．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ロープ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 [19] を応用したロボットの行動習得法によって双椀ロボットによるロープ解き操作を実現させている [18]．Alex X. Lee らはロボットの力制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ロープの締め付け作業について実験と考察がなされている [20]．本論文では我々の研究グループがおこなってきた柔軟なロープのロボットによるハンドリングに関する研究成果を紹介し，ロープのような柔軟物体のハンドリングに必要な情報処理の手順と課題について述べる．

2　これまでの研究成果

本章では，これまでの柔軟物体のハンドリングに関する研究成果について述べる．

2.1　変形量予測と画像情報に基づく把持点の決定方法

ロープのような柔軟物体のハンドリングに関して複雑な形状を操作しようとすると，持ち替え動作が需要となり，ロープ形状は 2 台のカメラセンサで認識する必要がある．しかし，形状が不定のため画像間一致点を探るのが困難であるので，マニピュレータが把持しているロープの自由端端点から把持目標位置を推定することを提案した [21, 22]．また，撮影画像全体を探索するのは効率が悪いため，ロープの形状を弾性変形モデルを用いて予測し，画像中の端点探索範囲を狭める手法を提案した．画像から得られたロープの端点の位置情報から把持目標位置を補正する手法を提案し，実験により有効性を確認した．図 1 に双腕マニピュレー

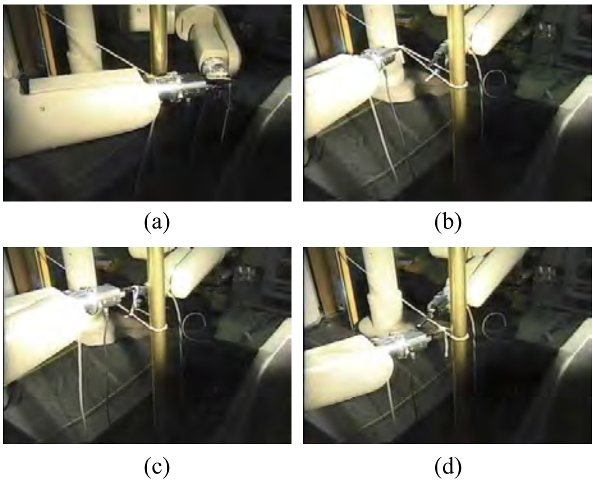


Fig.1 Appearance of experiment tying rope onto cylinder object by dual manipulator: Dual manipulator robot conducts over hands with a rope like (a). After that, the robot makes a hole by rope (b), in order to go through the hole by an edge of rope like (c)(d).

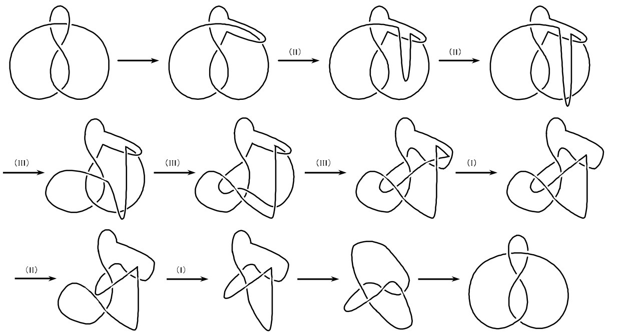


Fig.2 An example of equivalence conversion: The numbers on arrow mean type of Reidemeister move

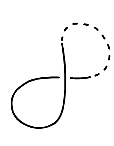
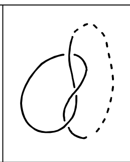
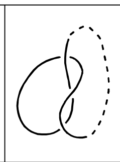
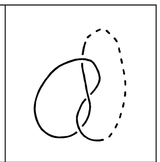
Form				
$\langle K \rangle$	$-t^3$	$-t^5-t^{-3}+t^{-7}$	$-t^3$	$t^7-t^3-t^{-5}$
$w(K)$	1	3	1	-3
$V_K(t)$	1	$t+t^3-t^4$	1	$t^{-1}+t^{-3}-t^{-4}$

Fig.3 Examples of Knot invariant for form of flexible rope: $\langle K \rangle$ means Bracket polynomial, w is Writhe number and $V_K(t)$ means Jones polynomial.

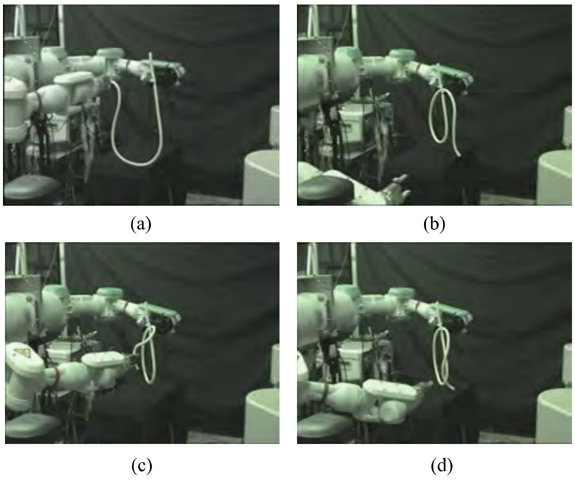


Fig.4 Appearance of experiment tying rope using dual manipulator: During the task, camera system equipped in front of work space obeserves form of flexible rope. Knot invariant can be calculated based on information obtained by camera system.

タによるロープの円筒への結び付け動作の実験の様子を示す．図1(a) のように持ち替え動作を繰り返して，図 1(d) のようにロープを円筒に結び付ける動作を実現している．用いたロボットはダイキン社製 R2680 であった．制御用コンピュータはモトローラ社製 68060 を CPU とする VME バスコンピュータであり，OS は VxWorks を用いた．

2.2　結び目の不変量を用いた状態判別

次に我々は，ロープの形状の位相情報の記述方法に着目した [23, 24]．ロープの形状を 2 次元平面に写像して，ロープの重なる位置（交差点）をナンバリングして記述する手法が P-data と呼ばれるマトリックス形式の記述方法を代表として，提案されていた [6, 7, 8]．しかし，ロープの始点終点の定義などにより同じ結び形状であっても異なる P-data になることが分かっており目的とした結び形状になっているかを判断する方法が確立されていなかった．そこで，より情報を要約するために，結び目の不変量と呼ばれるブラケット多項式とジョーンズ多項式を組み合わせて利用することにより結び目の構造を判別し．操作結果が目標形状に到達したか確認する手法を提案した．この方法は図 2 に示す同値変換と呼ばれる手法よりも簡便に状態の評価ができる．同値変換はライデマイスター移動 I,II,III と呼ばれる変形を繰り返して同位相にある形状を得る方法であるが，難解である上に異なる位相形状であることは示せないため，上記の多項式を用いる方法がより優れているといえる．図 3 にロープの形状に対する結び目の不変量の計算結果例を示す．ブラケット多項式 $\langle K \rangle$ とジョーンズ多項式 $V_K(t)$ は図 3 にあるように媒介変数 t の多項式で表現される．図 3 の 1 列目と 3 列目のロープ形状の見た目は異なっているが，どちらも結び目が無い状態であるので同じ多項式の値をとる．ジョーンズ多項式はブラケット多項式よりも細かく状態の分類が可能であるとことに着目して 2 つの不変量を用いた．提案した手法は図 4 に示す双腕マニピュレータによるロープの片結び実験によって有効性を示した．図 4(a) の状態から各操作ごとに，ロープのカメラ画像から結び目の不変量を計算し計画通りに形状変形が行われているかを判別しながら操作を行っている．図4(d) のようにロープの片結び動作を実現している．ロープの受け渡し動作に必要な把持位置の決定方法は経験則によるところが大きい．用いたロボットは MHI 社製 PA-10 であった．制御用コンピュータは Pentium III を CPU とするパーソナルコンピューターであり，OS は RT-Linux を用いた．

2.3　ロープ解き動作生成アルゴリズム

これまでの研究では認識方法に主眼を置いてきたが，ロボットの知能化において動作生成が重要である．そこで我々は図 5 に示すようにロープの形状を P-data で表し，ロープを解く手順をツリー構造で表現する手法を提案した．ツリー構造において各ノードはロープの P-data を示し，リンクはライデマイスター移動 I,II およびクロスと呼ばれる動作プリミティブを示す．初期状態を頂点として様々な手順によって変形していく様子が表現できるこの

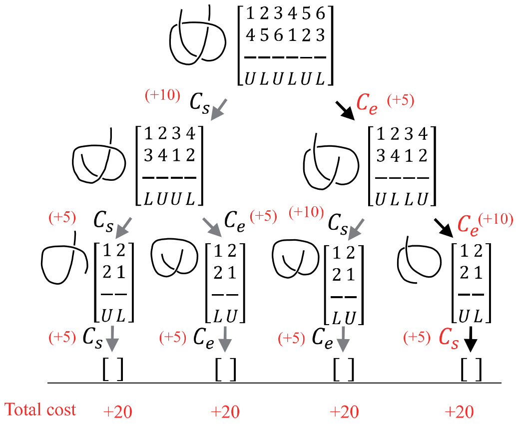


Fig.5 Tree strcture to express sequence of knot untying: Those matrics in nodes is P-data which is topology expression of rope deformation, that is proposed in [6] by Prof. Takamatsu.

中で，どの操作が操作主体であるロボットマニピュレータの作業成功率が高いかはロボットに依存する．そこで我々は予備実験によって成功率を概算し，経験則的に作業コストを割り当てた．それぞれのノード間に存在するリンクに作業コストが得られるので，目標状態（この場合はロープが解けた状態）までにかかるトータルコストが計算できる．トータルコストが最小である手順の第一手を選ぶことによってロープを解く作業を実現した．図 6 に示す単腕マニピュレータによるロープの解き実験によって有効性を示した．図 6(a) の状態から手先に取り付けた距離カメラによって形状を判断し，動作を選択して操作を行っている．図 6(f) のようにロープの解き動作を実現している．ライデマイスター移動 I,II やクロスなどの動作プリミティブでは，ロープでできた輪の中心位置や操作対象となるロープの一部の長さの情報を用いて決定されるが，やはり把持位置決定方法や，ロープ端点の移動量などは経験則を用いている．用いたロボットは三菱電機社製 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，RV6SL は距離カメラが接続された PC から指令される位置目標を追従する．

上記のアルゴリズムを実現するために，ロープの 3 次元位置・形状を記述する点連鎖モデルおよび，3 次元点群のデータからロープの形状を認識し点連鎖モデルを出力するロープ形状認識法 [25][26] を提案した．

3 柔軟物体ハンドリングに必要なアルゴリズムとモデル

これまでの研究成果を基にして，ロープのような柔軟物体のハンドリングに必要な情報処理の手順をまとめると，図 7 に示すフローチャートのようになる．

(1). まずセンサによって現在のロープ形状を抽出し，

(2). 形状情報を圧縮した空間で目標形状までの変形手順を計算する．

(3). 次に全体計画の情報に基づき，現在のステップで実現予定の 3 次元空間におけるロープの形状を計算する．

(4). ロボットマニピュレータがロープのどの部分を把持して，どこまで移動させるかをロープの形状変形計画を基に計算する．

(5). ロボットマニピュレータの動作計画を計算する．

ここで (3) はこれまでの取り組んできた課題であったが，おおよそ実現できている．柔軟物体のハンドリングのハンドリングにおいて困難なのは (4) である，以下に理由を述べる．

ロープのような柔らかく形状変形が容易な物体のハンドリングはそれまでの剛体物体のハンドリングとは大きく異なる．弾性変形モデルで記述可能な鉄板の変形は，ロボットマニピュレータの手先位置・姿勢と手首に設置されている力センサの情報から形状が推定可能である．ロープでも同様に拘束条件とポテンシャルエネルギ最小化の原理に基づいて形状が計算可能であるが，剛性が金属などに比べて低いロープは同一条件下における形状の再現性が低い．これは最小ポテンシャルエネルギ状態を実現する安定な形状に移動するための変形反力が小さいためである．ゆえに，ロボットマニピュレータによる操作によって変形する形状の再現性は低いと考えられる．一方で，ロープで紙の束を縛る動作にあるように強い外力で移動させると環境形状に倣う性質があるため，柔軟物体の操作が容易と捉えることもできる．外力が弱い場合の再現性の低さは (4) のアルゴリズムの構築に困難さを与える．ロープを把持する部分が一点である場合はその操作によって変形するのは把持点まわりが大きく変形し，そこから離れると変形量，移動量は減少する．しかし，変形させたい部分と現在の形状を維持したい部分が影響を及ぼすので，意図通りの変形は一般的には実現できない．これを解決するためには多点拘束が有効であるが，大変形をともなう柔軟物体の自由度に対してマニピュレータロボットとロボットハンドの自由度は十分ではない．

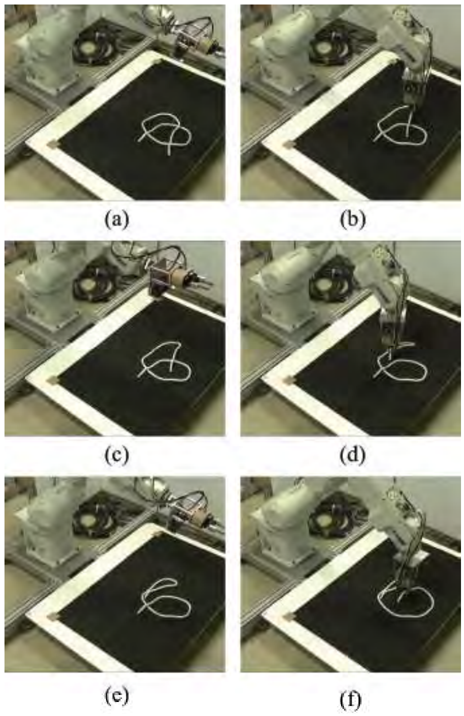


Fig.6 Appearance of experiment of untying rope: (a) First a robotic manipulator observes current form of flexible rope using distance camera equipped on wrist. (b) The manipulator selects behavior to pick up edge of rope that is called as “Cross” in order to reduce cross section of rope. (c) After 1st manipulation, the manipulator once obeserves current form of flexible rope and calculates whole plan to deform a rope. The scheme is repeated until robot system judges a rope to be untyed after (f).

一方，人間の動作を観察すると決まった手順を学習済みで図 7 のような手順は踏んでいない．しかし，学習段階においては (2),(3) と (4) の計算を繰り返してネゴシエーションしているように考えられる．本来はそのように，全体計画と現在すべき動作の間で互いにフィードバックをかけあって妥協点を見出すことがその操作主体（人間であったり，ロボットであったりする）が最

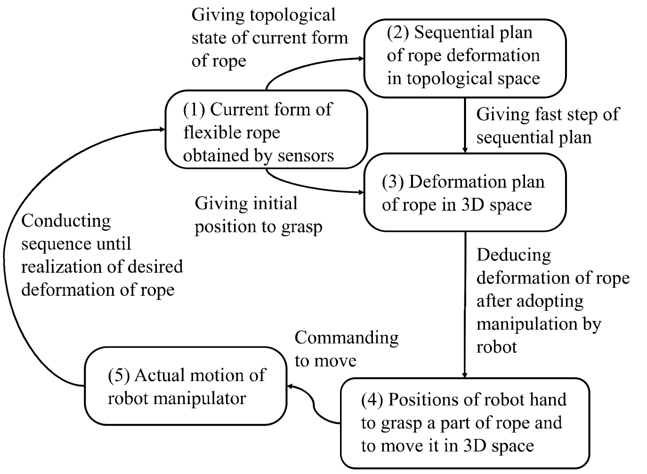


Fig.7 Required data processing of deformable object and sequence to order motion of robot manipulator

も実現容易な動作を獲得するのに必要な枠組みであると考えられるが，現在のところできていない．人間の行動を観察し，その行動手順をロボットマニピュレータに移行する学習機能を用いたアプローチは存在するが [27]，ロボットマニピュレータに適した形状変形ミスの少ない操作方法はロボットが行動を通して獲得する必要がある．まとめると，図 7 は現在のアプローチであるが，図 7 の (2),(3),(4) の計算は一方向に限定せずに，情報のやり取りを実現することでより機能的なマニピュレーションが可能になると考える．

4　まとめ

我々の研究グループがおこなってきた柔軟なロープのロボットによるハンドリングに関する研究成果を紹介し，ロープのような柔軟物体のハンドリングに必要な情報処理の手順と課題について述べた．現在までに国内外の様々な研究者が柔軟物体のハンドリングに関する研究を行ってきたが，現状で人間のような器用な操作は実現できておらず，工場でも自動化が進んでいない．本論文ではその原因のひとつとなっている操作計画法の課題と課題解決のアプローチについて述べた．

References

[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] 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

[3] John Schulman，Alex Lee，Jonathan Ho，Pieter Abbeel，”Tracking Deformable Objects with Point Clouds”，ICRA 2013

[4] Shervin Javdani，Sameep Tandon，Jie Tang，James F. O’Brien，Pieter Abbeel，”Modeling and Perception of Deformable One-Dimensional Objects”，　ICRA 2011

[5] 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

[6] 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

[7] 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

[8] 若松栄史，田中裕介，妻屋彰，白瀬敬一，荒井栄司，平井慎一，”線状物体の結び／解き操作のための作業計画の導出”，第 21 回日本ロボット学術講演会，2003

[9] 若松栄史，妻屋彰，荒井栄司，平井慎一，”単腕マニピュレータによる線状物体の結び操作”，第 23 回日本ロボット学術講演会，2005

[10] Hidefumi Wakamatsu，Akira Tsumaya，Eiji Arai，Shinichi Hirai，”Manipulation Planning for Knotting/Unknotting and Tightly Tying of Deformable Linear Objects”，ICRA 2005

[11] 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

[12] 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

[13] 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

[14] 山川雄司，並木明夫，石川正俊，下条誠，”高速多指ハンドと高速視触覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作”，日本ロボット学会誌，Vol.27，No.9，pp.1016-1024，2009

[15] 山川雄司，並木明夫，石川正俊，”高速ロボットアームを用いた柔軟紐の動的マニピュレーション”，日本ロボット学会誌，Vol.31，No.6，pp.628-638，2013

[16] Yuji Yamakawa，Akio Namiki，Masatoshi Ishikawa，”Dynamic High-speed Knotting of a Rope by a Manipulator”，International Journal of Advanced Robotic Systems，Vol.10，361，2013

[17] Trinh Van Vinh，Tetsuo Tomizawa，Shunsuke Kudoh，Takashi Suehiro，”A New Strategy for Making a Knot with a General-Purpose Arm”，ICRA 2012

[18] Wen Hao Lui，Ashutosh Saxena，”Tangled: Learning to Untangle Ropes with RGB-D Perception”，IROS 2013

[19] 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

[20] Alex X. Lee，Henry Lu，Abhishek Gupta，Sergey Levine，Pieter Abbeel，”Learning Force-Based Manipulation of Deformable Objects from Multiple Demonstrations”，ICRA 2015

[21] Toshio Fukuda, Takayuki Matsuno, Fumihito Arai，“Flexible Object Manipulation by Dual Manipulator System,”Proc. of International Conference on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1955-1960, 2000

[22] Takayuki Matsuno, Toshio Fukuda, Fumihito Arai，“Flexible Rope Manipulation by Dual Manipulator System Using Vision Sensor,”Proc. of International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 677-682, 2001

[23] 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 volume 41, No. 4, pp. 3463-3472, 2005

[24] Takayuki Matsuno, Daichi Tamaki, Fumihito Arai and Toshio Fukuda，“Manipulation of Deformable Linear Objects using Knot Invariants to Classify the Object Condition Based on Image Sensor Information,”IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, volume 11, issue 4, pp. 401-408, 2006

[25] Tomoya Shirakawa，Takayuki Matsuno，Akira Yanou，Mamoru Minami，”String Shape Recognition Using Enhanced Matching Method From 3D Point Cloud Data”，SII 2015

[26] 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

[27] 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 –視覚による特徴抽出と操作を融合した紐結び作業の手順分解–”, 日本ロボット学会誌 volum 33, issue 7, pp.25-33 2015