

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240034

研究課題名(和文) プログラム可能な紐結びシステムに関する研究

研究課題名(英文) Study on Programmable Rope Knotting Robot System

研究代表者

末廣 尚士 (Suehiro, Takashi)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授

研究者番号：10357254

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,700,000円

研究成果の概要(和文)：紐結びの研究は柔軟物操作の代表としてこれまでも多数行われていたが、多種類の紐結びを一つのシステムで実現した例はほとんどなかった。その原因は、一つの紐結び実現のためにシステムを作り込んでいるか、逆に汎用的な理論をベースに実際には紐結びとして不完全な動作を生成していたからである。これに対して本研究は、種々の紐結びを実現可能な要素に分解し、それをプログラムで記述することで、それらの要素の組み合わせで紐結びを実現する手法を提案した。また、双腕多指ロボットを構築し、提案手法に基づき多種類の紐結びを実現し、手法の有用性を実証した。

研究成果の概要(英文)：There were a lot of studies on rope knotting robot systems. But they could not realize a variety of different knotting tasks. One reason for several systems were that they were built in order to realize one specific knotting. Another reason for the other systems were that they based on a universal knot theory to generate robot motions, but the generated motions were not suit for real knotting tasks.

This research proposes to realize knotting tasks as combinations of elemental operations. The elemental operations are abstracted from a variety of actual knotting tasks, and are described as reusable program modules. We realized a variety of knotting tasks based on the proposed method by a dual-arm multi-fingered robot system. These result demonstrate the effectiveness of the method.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：柔軟物操作 紐結び 作業モデル 作業スキル 人間観察 双腕ロボット 多指ハンド

## 1. 研究開始当初の背景

これまでのロボットの多くは形状変化の少ない剛体を対象として作業を行ってきた。今後、ロボットが活躍の場を広げ、様々な作業を行うためには剛体だけでなく柔軟物を扱う必要がある。たとえば産業分野では自動車のワイヤーハーネスの取り付けを現在は人手で作業を行っているが、その自動化が望まれている。また日常生活の場に目を向けてみると、洗濯物の折り畳みや電化製品のケーブルの操作など、ロボットに期待される作業として多数の柔軟物操作が存在している。

本研究では、線状柔軟物である紐の結び作業を取り上げ、これをロボットにより実現することを目的としている。

紐のような柔軟物の操作の難しさは主にその形状変形にある。形状変化の少ない剛体の場合、ロボットがそれを把持してしまえばその状態はロボットの動作によりほぼ制御が可能である。また、把持前後の位置合わせや認識なども現状の技術でかなりのことが可能となっている。しかし、柔軟物の場合は、仮にロボットが対象を把持していても、同じ動作で同じ状態になるとは限らないし、その状態の認識も簡単に行えるものではない。

従来研究の多くもこの問題点を解決するための工夫を行ってきた。稲葉らは、視覚情報を用い、見て掴むという静的なハンドアイ動作により紐結びを実現した[1]。また山川らは高速ビジョンと高速アームシステムを活用し投げ上げたものを掴むという、高速位置決めと多指ハンドを用いた紐の入れ替え操作により紐結びを実現した[2]。これらの研究は視覚を用いたロボットで紐結びができるということを実際に示したが、これを他の類似作業に応用する場合にどのようにしたら可能であるかが明確ではない。

一方、松野らは、結び目不変量を用いて画像から紐の位相を認識する手法を提案している[3]。森田らは、平面投影された結び目の交差により状態表現を行い、三つのライデマイスタ変形に対応する動作と端点で交差を生成する動作とを用いて紐結び作業モデルを構築し、人間の紐結び作業の認識に基づきロボットに作業を行わせることを試みた[4]。また若松らは、森田らと同様な理論を用いてロボットアームで実現可能な手順を計画することで紐結びを実現した[5]。このような結び目理論に基づく研究ではトポロジカルな状態に着目しているため、結び目の認識や結び目の実現はできたとしても、どこに、どのような結び目を作るかというロボットアームが行う作業として重要な情報が欠落しているという問題がある。実際の紐結びにおいては紐の摩擦などを利用することが多く絡み方が同じであっても同じ結びとして扱うことができないことも多い。

## 2. 研究の目的

これに対して我々は、プログラムの記述に

より紐結び作業を実現するシステムの構築を行う。もちろん従来の紐結びロボットも「プログラムで動いている」という点では変わらないが、人間が望む紐結び作業を実行するために何をどのように記述したら良いかが明らかではない。たとえば「端から 20cm のところにとめ結びを作る」という作業の実現をどのようにしたらよいかは従来のシステムでは不明確である。我々はロボットが様々な作業を行えるようになるためには、これを明示的にプログラムで記述できることが重要である。

本研究の目的は、種々の紐結びをプログラムで記述し実行できるシステムを実現するための手法を開発し、それを通して作業を実現するための動作制御を視覚などの外界情報を利用して体系的に行うための方法論を確立することにある。

## 3. 研究の方法

紐結び作業をプログラムで記述して行うためには、大きく分けて紐の状態とアーム動作を結びつけるセンサーモータのモデル化、それを紐結びの各ステップに対応した動作プリミティブ(スキル)として実装するスキル実装およびスキル動作による作業実行、さらに人間の紐結び動作からの紐結びスキル列の抽出(作業教示)が必要となる。本研究ではそれぞれを3組織で分担して連携を取って行う。

### (1) 紐結び作業のためのセンサーモータ系のモデル化の研究

紐結び作業では結び目のようなトポロジーのみを考慮した操作だけでなく紐の長さを調整したり、結び目の位置を調整したりすることが必要となる。そのような計量を考慮して、結び目の位置、紐の形状の一部をなすセグメントの長さ、これらの量を増減する基本動作を表現するための、紐および結び作業のモデル化を行う。このため紐の形状モデル・物理モデルの拡張と、結び目を作る際の把握位置、把握位置の変位、引っ張りの方向、張力を用いたモデルを構築する。

### (2) 紐結び作業スキルの実装および作業構成法に関する研究

紐結びロボットのセンサーモータを実装してスキル動作を実現するためには、様々なハードウェア要素(複数アーム、多指ハンド、種々のセンサーなど)を組み合わせて使うことのできるフレームワークが必要となるので、OpenRTM-aistを用いてシステム構築を行う。我々はすでにOpenRTM-aistを用いて単腕、平行2指ハンドを用いて教示再生でとめ結びを実現している[1]。これをベースにより一般的な動作で紐の操りが出来るように複数アームと多指ハンドで実行システムを構築し、紐結び作業スキルの実装を行う。それらのスキル動作を用いて、人間に分かりやすい形で紐結び作業をプログラムで記述して実行する紐結び作業システムの構築を行う。

(3) 人間の観察に基づく作業スキル列の抽出

全体像を一つのトポロジカルな表現とする従来型モデルに代わり、全体像を微小線素に分解し各領域間のトポロジカルな関係をマトリクス状に記述する新しい認識モデルの応用を試みる。

従来型トポロジカルモデルに対して、いわば視点を階層的にミクロな方向へ変更可能となるこのモデルでは、従来モデルでは抜け落ちていた大小の違いなどの量的な表現を保持することが可能であり、そのような観点から人間の教示動作から作業スキルを抽出する手法を構築する。

4. 研究成果

(1) 結び作業のためのセンサーモータ系のモデル化

① 結び作業のモデル化

紐の結び目を構成する際に、ある2次元平面上に紐を投影した図を考え、その際の交差とその上下関係を元に紐の状態を表現することができる。この交差と交差に挟まれる紐の一部をセグメントと呼ぶ。図1は、止め結びの途中経過を示したものである[発表⑦]。

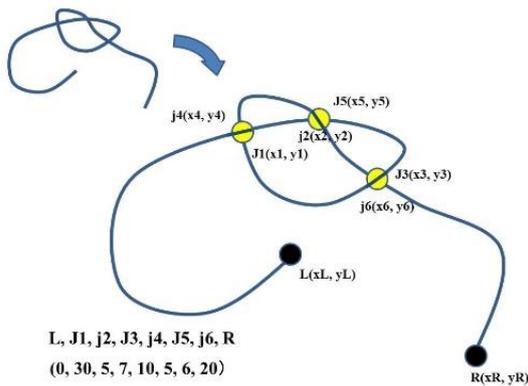


図1 紐の交差とセグメント

交差の位置はL, J1, j2, J3, j4, J5, j6, Rのように一方の端Lからもう一方の端Rに向かって下を通る場合は小文字のj, 上を通る場合は大文字のJで表す。これにセグメント長を加えて止め結びの形成過程を記述した例を表1に示す。表には3つの場面における、紐の交差とセグメント長が示してある。表中の「\*」の印は、結び目を固く小さくした場合、そのセグメント長は制御対象として意味を持たないことを表している。

LE-J1	J1-j2	j2-J3	J3-j4	j4-J5	J5-j6	j6-R
69	15	19	85	63	20	18
LE-J1	J1-j2	j2-J3	J3-j4	j4-J5	J5-j6	j6-R
85	14	15	95	61	20	15
LE-J1	J1-j2	j2-J3	J3-j4	j4-J5	J5-j6	j6-R
179	*	*	*	*	*	125

表1 結び動作中の紐のセグメント長の変化

② 結び目調整のための結び動作の分類

結びのための動作を大局的調整動作・主動作・局所的調整動作に分類した。大局的調整動作は、交差の初期位置やセグメントの初期長さなど初期状態を作るための動作である。主動作は、最終的な結びを作るために必要な交差を実際に形成するための動作である。局所的調整動作は、形成したセグメントの長さを所望の値に収束させるための動作であり、途中段階でのサブゴール的な状態の調整を行う動作である。

③ 動作摂動法とそれに基づく結び目調整法の有効性の実証

初期状態の作り方如何でどのように最終結果が変化するかを計測し、大局的調整動作の摂動で結び目の位置を調整する手法について検討した。結び動作中にループを形成する際の端点の位置を2cm増減させ摂動させた。この変化により、結び目の位置が左端から3cm減, 6cm増などの結果を得た。これにより大局的調整動作の調整で結び目の長さの制御が行えることが示された。

(2) 結び作業スキルの実装および作業構成

① 結び作業のための双腕多指ロボットシステム構築

結び作業の分析を行い、抽出した結び目基本動作が実行できる双腕多指ハンドの設計、試作を行った。多指ハンドの作成に際してサーボモータ用のRTコンポーネントを新規に開発し[論文③], 双腕ロボットを含め全体をOpenRTM-aistで統合した(図2)。また紐操作に必要な視覚特徴について検討を行

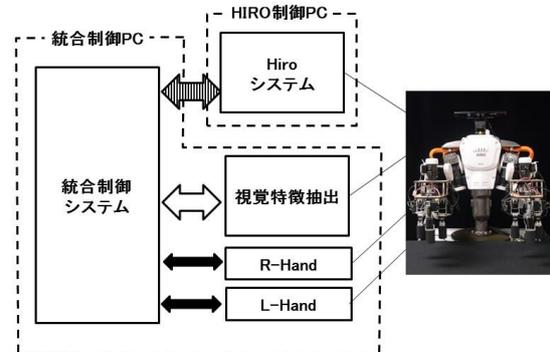


図2 双腕多指ロボットシステム

い、紐とハンドとの関係の表現および検出や端点検出の手法を開発した(図3, 図4)。

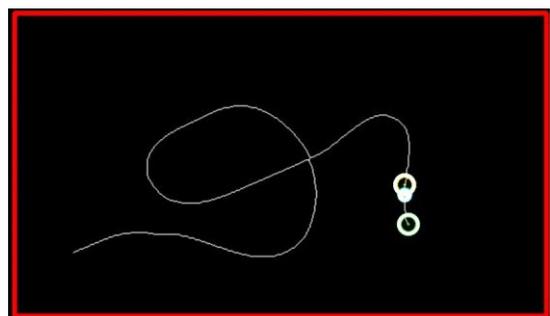


図3 端点検出

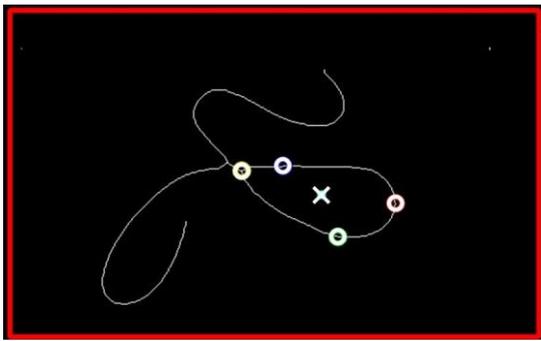


図4 ループ検出

② 指による紐の操りスキルの実装と空中紐結び作業の実現

双腕多指システムを用いて紐結びに必要なと考えられる指による紐の操り動作パターンとして「持ち替え」、「ループ作成」、「ねじり」などのひもの操りスキルの実装を行った(図5)。この操りスキルを用いることで、空中での、止め結び、ほん結びおよび対象物への結び付けなどの作業を実現した(図6)[発表⑧]。

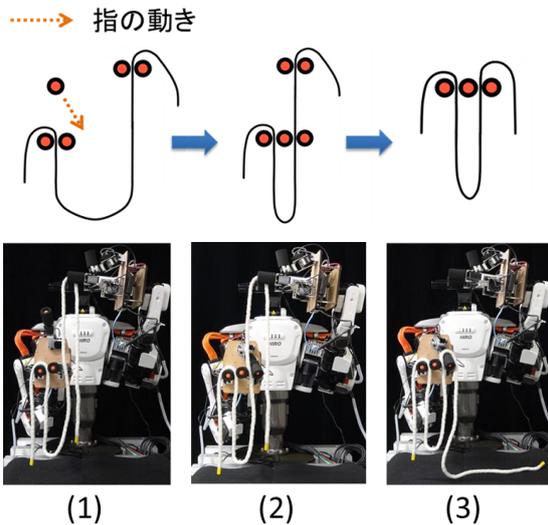


図5 指スキルの例(持ち替えスキル)

さらに紐の操りの動作パターンに加え、新たに指先に触覚の導入し「滑らせ動作」を実現した。この動作を用いることで、空中での紐結びにおいて、滑らせ動作の使い分けにより、アームの動作を変更することなく、止め結びと引き解け結びとの結び分けけることが出来ることを示した[発表④]。

③ 紐結び作業の手順分解に基づく種々の卓上紐結び作業の実現

紐結びに必要な紐の形状情報として、端点とループの検出を行った。止め結び、8の字結び、引き溶け結び、罟結び、もやい結びの5種類の結び作業について、視覚により抽出した情報に基づく手順を構築し、結び作業を実現した。それらの手順に含まれる互いに共通した手順を紐結び作業スキルの候補として抽出した(図7)[論文①]。

また、卓上での五種類の結びを実現した際の実装した手順要素を整理した。これに加え、

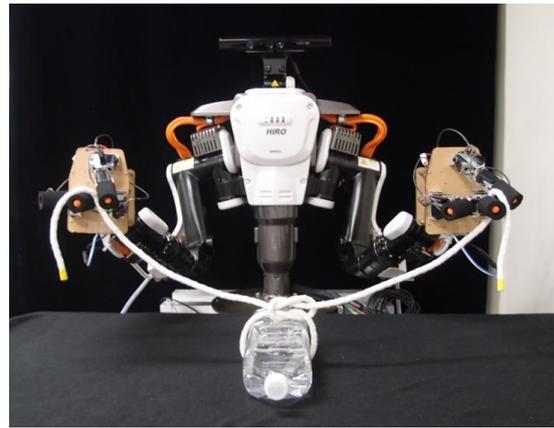


図6 ペットボトルへの縛り付け

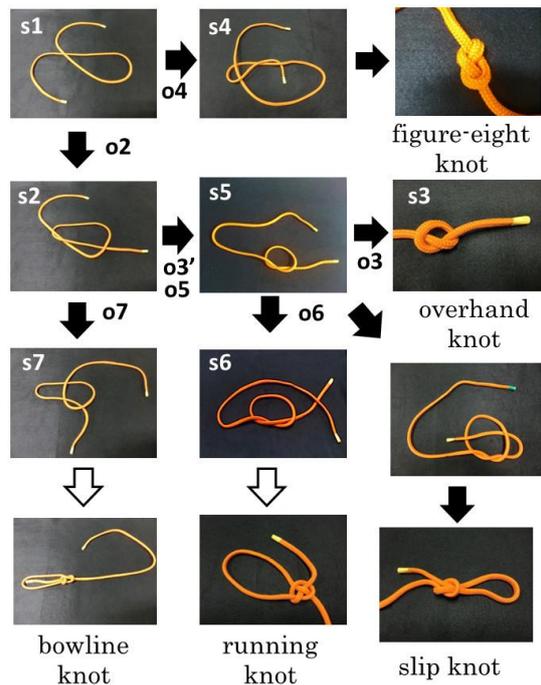


図7 五種類の卓上紐結びの実現

与えられた卓上での紐形状を実現するアーム動作の自動生成手法を開発した。これを用い二つのループを作成しそれを対象にかぶせることで、新たに巻き結びを実現した[発表②]。

(3) 人間の観察に基づく作業モデル抽出

① タングルトポロジーによる紐状物体の絡まりの解析

紐状物体の概念を拡大し、剛体や手指までも紐であるとし、紐と紐の絡まり度合を位相幾何学により数値化することで、相対的な位置関係を記述できることを提案した。ペン回し動作の作業モデル化とロボットによる再現を行うことで、その実用性を示した。

作業モデルを汎用化し記述するために、位相幾何学を用いた2つのひも状物体の位置関係の表現法とロボットのタスクモデルへの適用を提案してきた。理論を実証するために、ロボットによる物体マニピュレーション実験を行い有効性を示した[論文②]。

人間の観察に基づく作業スキル列の抽出

の研究に関しては、昨年度からの継続として、ハンドや操り対象の物体そのものをひもと見立ててトポロジー空間で認識・記述する提案理論の洗練をすすめた。

#### ② 非線状紐状柔軟物の扱い手法の検討

実世界で紐状物体を用いる作業のシチュエーションは、多岐にわたる。紐単体が操作対象である場面の他に、ひもと一緒に操作したい物体がある場合や、操作対象と関係のない障害物がある場面がある。とくに障害物が存在する場合、視覚情報をもとに、ひもや物体の位置関係から、どのようにエンドエフェクタをアプローチするかを決定する方法が課題になる。ひもの結び目の全貌が観測できる場合には、数え上げによる状態認識と行動戦略の決定手法が提案されているが、障害物などにより全貌が観測できない場合の解決方法は確立されていない。このような場面は、人工物により構成される環境の他に、自然界にも存在する。そこでこのような例として、ブドウ収穫を例に視覚解析を行った。葉や果樹や枝などのように、複数のクラスに属する物体が存在する場面の視覚セグメンテーション手法を提案した。RGB画像を用いた一般物体認識の手法を、奥行き画像を加えたRGBD画像に拡張し、局所的特徴について検討した。葉や果樹や枝が複雑に配置された環境において、人間がどのようにアプローチするのかを観察し、収穫対象の見え方の違いに基づいて遮蔽物の回避動作を行うことが可能な収穫タスクを設計した[発表⑤]。

また、紐状物体においては柔軟物をロボットで操作する課題における画像処理の役割を明確化させるために、オペレータへの力覚の伝達を含まず視覚のみに基づく、遠隔操縦における紐状物体や柔軟物の操作に取り組んだ。人間の柔軟物操作では力覚フィードバックが安定な操りに大きく寄与するが、力覚フィードバックを含まない操縦系においては、画像処理の認識モデルや操り操作のためのロボット動作モデルが安定な操りのために重要になることが、ワイヤー操作や植物の弦・果実・葉の扱いなどのタスクにおいて確認された[発表①]。

#### (4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

紐結びの研究は柔軟物操作の代表としてこれまでも国内外で多数行われていた。しかし、多種類の紐結びを一つのシステムで実現した例はこれまでほとんどなかった。背景でも述べたように、その原因の一つは、そのシステムが一つの紐結び実現のために作り込まれたものになっており、他の紐結びを実現するためには新たに作り込みを行わなくてはならないからである。もう一つの原因は、逆に結び目理論などの汎用的な理論をベースに紐結び動作を自動生成することを試みたシステムが提案されたが、実際には紐結びとして不完全な動作を生成しており、現実問題として多数の紐結びを実現できるような

動作を生成するに至らなかったからである。

これに対して本研究は、種々の紐結びを実現可能な要素に分解し、それを再利用可能なプログラムモジュールとして記述することで、それらの要素の組み合わせで紐結びを実現する手法を提案している。このことにより結び目のトポロジーや交差のみを考慮した操作だけでなく、紐の長さを調整したり、結び目の位置や大きさ、形を調整したりすることがプログラムとして可能となり、多種類の紐結びを実現することを可能とした。また実際に双腕多指ロボットを構築し、それを用いて提案手法に基づき多種類の紐結びを実現し、手法の有用性を実証している。

本システム構築の過程は、他の柔軟物ハンドリング作業や非把持作業にも適用できるものであり、今後のロボットの対象分野の拡大に大きく資するものである。また本研究では紐結びを、静的な結び目理論として扱うのではなく、紐結びの目的をもった基本操作(スキル)のシーケンスで構成される体系として記述しており、人間が行う作業のモデル化のあり方を示すものとして学術的にも意義が高い。

#### (5) 今後の展望

本研究により紐結びなどの柔軟物作業をロボットで実現するための一つの有効な方法論が確立された。

しかし、現実問題として考えると、紐結び作業一つをとっても、日常生活などの様々な場面で様々な結び作業を実現するところまでは至っていない。この問題を解決するためには、「様々な場面での紐結び作業のモデル化」を追求し、そこで使われている基本操作(スキル)を体系的に構築していく必要がある。

また一方で、本研究で確立した方法論は、紐結びや柔軟物作業に限るものではない。従来、モデル化が難しいと考えられていた作業も、そこに含まれる基本操作(スキル)からの視点で見直すことにより、新たな視点でのモデル化の可能性が出てくると考えている。具体的には、料理や、電気工事といった現実にも分野の体系が見え易い作業に対して、本手法を適応していくのは非常に有望な試みだと考えられる。

#### <引用文献>

[1] 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.

[2] Y. Yamakawa, A. Namiki, M. Ishikawa and M. Shimojo: Knotting Manipulation of a Flexible Rope by a Multifingered Hand System based on Skill Synthesis, 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems/pp. 2691/2696 (2008)

[3] 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.

[4] Takuma Morita, Jun Takamatsu, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, "Knot Planning from Observation," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automations (ICRA), pp.3887-3892, Sep. 2003.

[5] 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.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

①片野良太, 五味知之, 富沢哲雄, 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, 査読有, 採択決定, 2015.

② 工藤俊亮, ビナヤウエキン ポンタリン, 佐藤啓宏, 池内克史, タングルトポロジーを用いたロボットハンドによる人間の持ち替え動作の模倣, 日本ロボット学会誌, 査読有, 採録決定, 2015.

③ 松田啓明, 富沢哲雄, 工藤俊亮, 末廣尚士, ホビー用サーボ RT コンポーネントの設計と実装, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No.1, pp. 18-23, 2014. 査読有.

[学会発表] (計25件)

①Masaya Ogawa, Katsuya Honda, Yoshihiro Sato, Shunsuke Kudoh, Takeshi Oishi, Katsushi Ikeuchi, "Motion generation of the humanoid robot for teleoperation by task model," IEEE RO-MAN2015, 神戸国際会議場(兵庫県, 神戸市), 2015. 査読有, 採録決定.

② Masaru Takizawa, Shunsuke Kudoh and Takashi Suehiro, "Method for Placing a Rope in a Target Shape and Its Application to a Clove Hitch," IEEE RO-MAN2015, 神戸国際会議場(兵庫県, 神戸市), 2015. 査読有, 採録決定.

③ 玉田貴寛, 工藤俊亮, 末廣尚士, ラッピング作業のための適切な紙サイズと初期配置の提案, SI2014, 東京ビッグサイト(東京都, 江東区), 2014.

④ 耿昊天, 富沢哲雄, 末廣尚士, 工藤俊亮, 紐結びマニピュレーションにおけるすべり動作の検証, SI2014, 東京ビッグサイト(東京都, 江東区), 2014

⑤ 吉川成輝, 川口達也, 佐藤啓宏, 大石岳史, 池内克史, ブドウ摘みロボットの遠隔操縦を支援するシステムの開発, SI2014, 東京ビッグサイト(東京都, 江東区), 2014

⑥ 佐藤啓宏, ビナヤウエキンポンタリン, 工藤俊亮, 池内克史, タングルトポロジーを用いたロボットハンドによる人間の持ち替え動作の模倣, rsj2014, 九州産業大学(福岡県, 福岡市), 2014.

⑦ 音田弘, 工藤俊亮, 末廣尚士, 交差間のセグメントを用いた紐結び作業の定量的な

扱いと作業記述, rsj2014, 九州産業大学(福岡県, 福岡市), 2014.

⑧ 五味知之, 片野良太, 富沢哲雄, 工藤俊亮, 末廣尚士, 双腕多指ロボットによる紐の縛り付け作業の実現, SI2013, 神戸国際会議場(兵庫県, 神戸市), 2013.

⑨ 五味知之, 片野良太, 富沢哲雄, 工藤俊亮, 末廣尚士, 双腕多指ロボットによる空中紐結びのためのスキル動作, rsj2013, 首都大学東京 南大沢キャンパス(東京都, 八王子市), 2013.

⑩ 片野良太, 五味知之, 富沢哲雄, 工藤俊亮, 末廣尚士, 視覚特徴量を用いた双腕ロボットによる紐結び, rsj2013, 首都大学東京 南大沢キャンパス(東京都, 八王子市), 2013.

⑪ Phongtharin Vinayavekhin, Shunsuke Kudoh, Jun Takamatsu, Yoshihiro Sato, Katsushi Ikeuchi, Representation and mapping of dexterous manipulation through task primitives, IEEE ICRA2013, カールスルーエ(ドイツ), 2013. 査読有.

[その他]

① 日経産業新聞「魅せる技術」(2014.1.30)

② Nikkei Asian Review「Nimble robot ties strings into knots」(2014.1.30), <http://asia.nikkei.com/Tech-Science/Tech/Nimble-robot-ties-strings-into-knots>

③ YouTube への紐結び動画の公開(2013.12.5), <https://www.youtube.com/watch?v=ih3UYNpsyc8>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

末廣 尚士 (SUEHIRO, Takashi)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・教授

研究者番号: 10357254

### (2) 研究分担者

池内 克史 (IKEUCHI, Katsushi)

東京大学・情報学環・教授

研究者番号: 30282601

音田 弘 (ONDA, Hirom)

産業技術総合研究所・知能システム研究部門・主任研究員

研究者番号: 40356746

工藤 俊亮 (KUDOH, Shunsuke)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・准教授

研究者番号: 90582338

富沢 哲雄 (TOMIZAWA, Tetsuo)

電気通信大学・大学院情報システム学研究科・助教

研究者番号: 60549707