

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24680020

研究課題名(和文) 高速ビジュアルフィードバックによる柔軟物の高速操り

研究課題名(英文) High-speed Manipulation of Flexible Objects Using High-speed Visual Feedback

研究代表者

山川 雄司 (YAMAKAWA, Yuji)

東京大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：90624940

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、変形しやすく柔らかい物体(柔軟物)をロボットで高速に操ることを目標とし、その実現に必要な操り方法を提案するとともに、高速に柔軟物の状態を認識した上でロボットの運動を生成する手法を提案した。また、その手法に適したロボットシステムを構築した。提案手法と構築したロボットシステムを用いて、実際に紐、リボン、カード、ピザ生地等を対象の柔軟物として、ボタンスピナー、リボンの形状制御、カードシューティング、ピザ生地回し等の様々なタスクを高速に実現した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to manipulate deformable and soft objects (flexible objects) by robot at high-speed. To achieve this, we proposed manipulation method that is necessary for the realization of the flexible object manipulation and trajectory generation method of the robot based on the manipulation method. In addition, high-speed image processing is implemented in order to recognize state of the flexible object at real-time. Then the result of the image processing is fed back to the trajectory generation of the robot. And, high-speed robot system suitable for the proposed method was constructed. Using the proposed method and the robot system, various tasks such as button spinner, shape control of the ribbon, card shooting and the pizza dough rotation were realized.

研究分野：ロボティクス

キーワード：柔軟物 マニピュレーション 高速フィードバック

1. 研究開始当初の背景

従来、柔軟物の操りはロボットの低速な動作による静的もしくは準静的操りの下で実現されることがほとんどであり、作業効率が悪く、作業時間も極めて長いといった欠点が存在する。一方、ロボット開発について考察すると、人間の運動を超えるような高速なロボットが開発されており、その高速なロボットを制御するために高速なセンサ（例えば、1,000 fps で撮像・処理が可能な高速ビジョン）も開発されている。

このように、高速なロボットシステムが開発され、剛体の高速な操りに関しては様々な研究が行われているが、柔軟物に対しては具体的なタスク実現例が少なく、操りのための方法も提案されていないようである。

2. 研究の目的

本研究では、柔軟物の高速操りを目的として、適した操りスキルの抽出とその実現、さらにスキルに最適なロボットシステムを構築するとともに、高速ビジュアルフィードバックに基づいて柔軟物に対する様々なタスクを高速に実現することを目指す。

3. 研究の方法

様々な柔軟物（線状柔軟物：紐・ケーブル等、帯状・面状柔軟物：リボン・布・紙等、立体柔軟物：粘土・ゲル等）に対して、適切なタスク（従来のロボットでは実現が困難なタスク）を設定し、それらのタスク実現に必要な操りスキルの抽出を行う。抽出した操りスキルを実現するためのロボットの動作戦略を提案するとともに、ロボットが高速運動することにより柔軟物がロボットの運動をなぞるように変形することを利用して、柔軟物の変形を再現する簡易モデルを構築し、モデルを用いたロボットの軌道生成手法の提案及び動作戦略の有効性・妥当性を検討する。さらに、柔軟物の高速操りをロボットの高い成功率で実現するために、高速ビジョンを導入し、高速画像処理を行い、ミリ秒オーダーでのビジュアルフィードバックによるロボットの知的制御を行う。これらを統合することにより、柔軟物の高速操りのタスク実現を目指した。

4. 研究成果

(1) 紐を用いたボタンスピナー

線状柔軟物として紐を取り上げ、紐のねじりを利用した円盤物体の回転操作（ボタンスピナー）を行った。ボタンスピナーは、中心に置かれる軸対称な回転体（以後ロータと称する）と、回転軸から対称に配置された二つの穴を紐が通り、閉ループを形成するように構成される。紐の両端を指に引っ掛けて、引っ張ったり緩めたりする動作を反復的に行うと、それに合った周期で紐がねじられ、ロータが回転することになる。指の動きにもよるが、数Hz程度の指の直動振動で数千rpmも

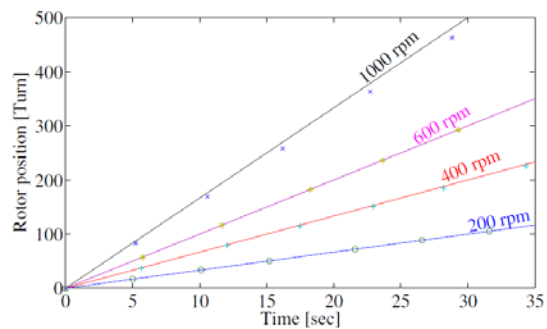


図1 高速ビジョンを用いた回転計測

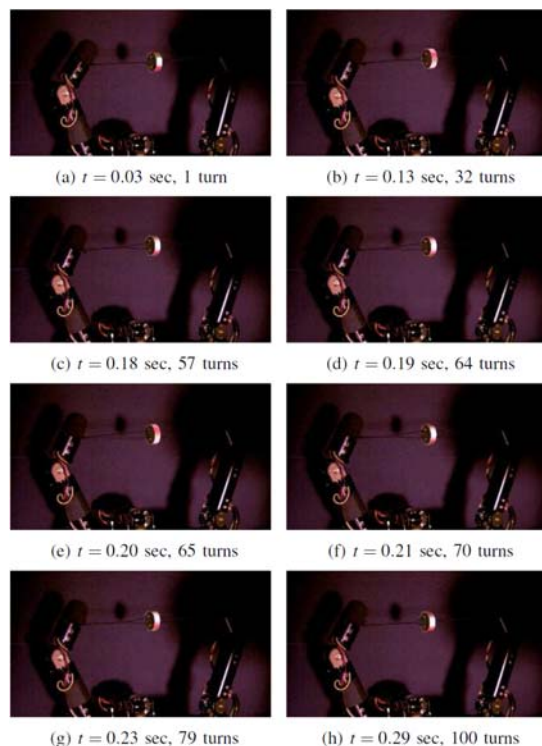


図2 ボタンスピナーの実験結果

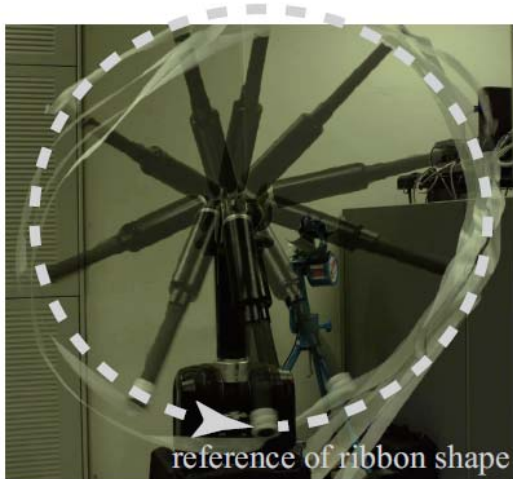
のロータの高速回転が得られる。

本タスクの目標は、高速視覚フィードバックでボタンスピナーの安定な回転を実現することである。その実現のために、紐のねじりと円盤物体の回転運動についてモデル化し、シミュレーションを通して、ロボットの軌道を生成した。円盤物体の回転数を計測しフィードバックするために、高速ビジョンを用いたビジュアルエンコーダを構築し(図1)、提案手法を用いて実際に円盤物体の高速回転を実現した(図2)。

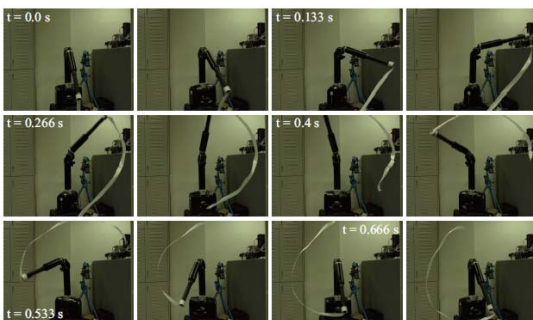
(2) リボン操り

これまでに柔軟紐の動的操りとして、紐の形状制御や紐の動的結び操作を実現してきている。ここでは、厳密な紐の変形モデルを基に、ロボットの軌道を辿りながら紐が変形するための条件として、ロボットの等速かつ高速運動を導出している。この戦略を用いて、紐の変形モデルが代数方程式で近似できることを示すと同時に、物理シミュレーションによって有効性を確認している。

ここでは、柔軟紐のような線状柔軟物から



(a) 実験結果の合成写真



(b) 実験結果の連続写真

図3 リボン操りの実験結果

リボンのような带状柔軟物へと操作対象を拡大し、带状柔軟物の操りにおいて考慮すべき空気抵抗の影響や、重力の影響を加味したモデルを基に理論的解析を行った。その結果、線状柔軟物の操りと同様、带状柔軟物がロボットの軌道と同じように変形するための条件として、ロボットの等速かつ高速運動を導出するとともに、ロボットの基本的動作生成法を提案した。その理論結果を基に、変形モデルの簡易化にも成功している。

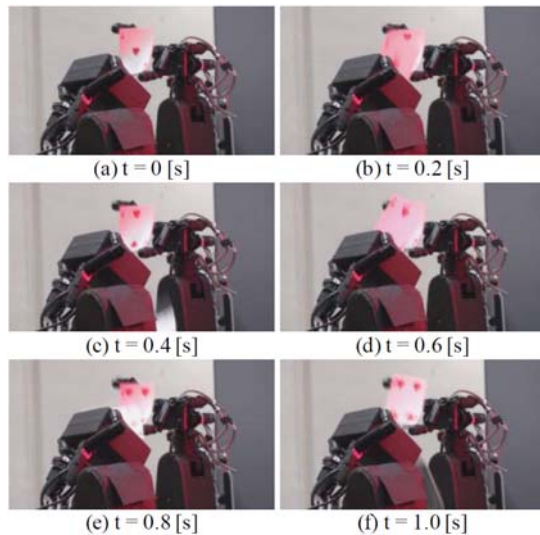
解析結果を基に、高速アームによるリボン操作を行い、様々な形状生成(円形状(図3)、波形状、8の字形状、直角形状)を実現した。また、シミュレーションを通して、提案手法の有効性も確認した。

(3) カード操り

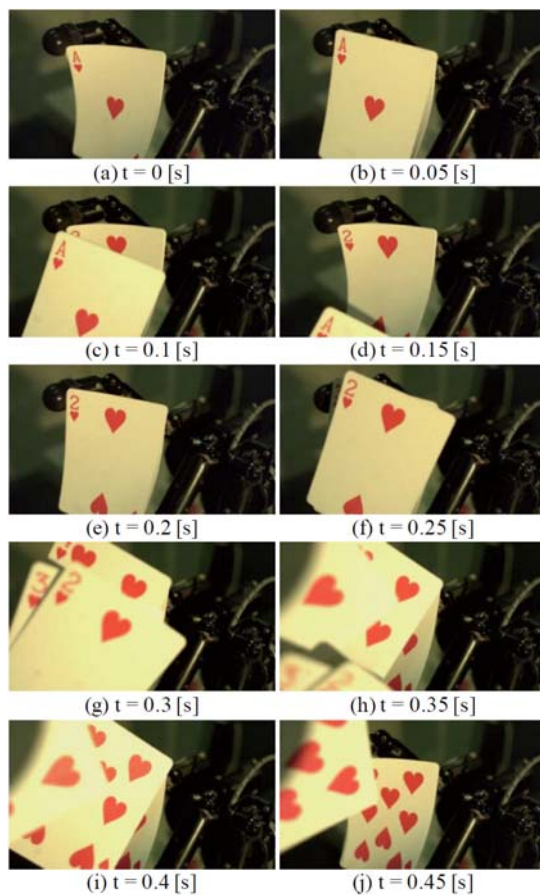
面状柔軟弾性物としてカードに着目し、カード操りとして、次の2つのタスクを実現した。1つ目は「カードの変形を利用したカード飛ばし」、2つ目は「カードを目的の場所に飛ばすカードシューティング」である。

① カードの変形を利用したカード飛ばし

本課題では、変形によって蓄えられたエネルギーを運動エネルギーに変換し、新しい運動を発生させることが可能な柔軟弾性物に着目し、高速ロボットハンドシステムによる操りを目指した。従来研究として、この特徴を利用したロボット開発が行われているが、弾性



(a) カード飛ばしとカードキャッチ



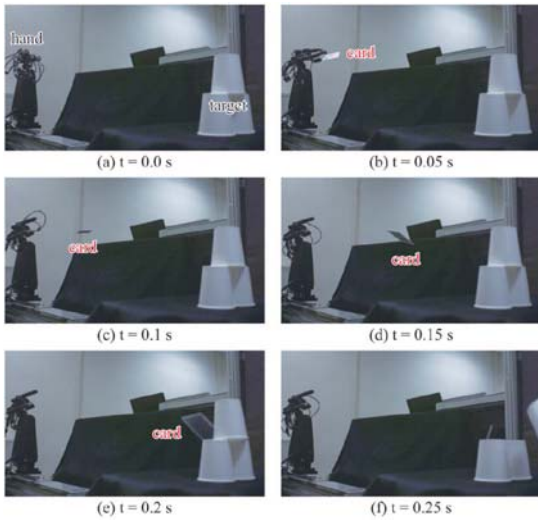
(b) カード飛ばし (スロー)

図4 カード飛ばしの実験結果

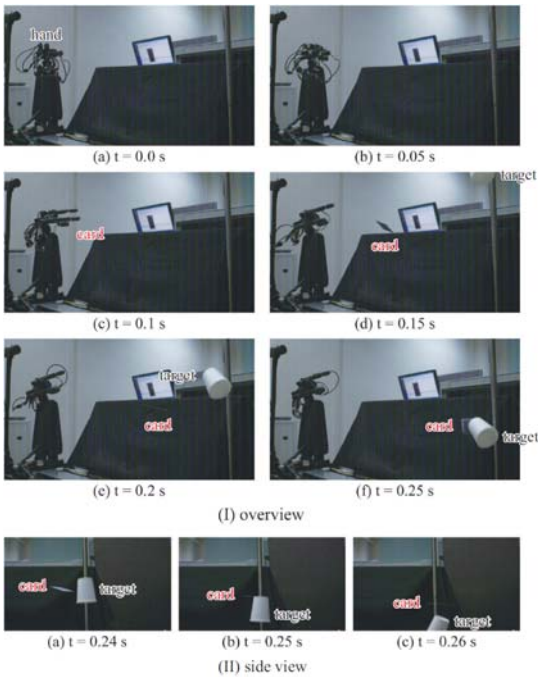
物体をロボットハンドやマニピュレータで操る研究は行われていないようである。

本課題の目的は、高速ロボットハンドを用いてカード飛ばしを行い、高速ビジョンを用いて、その飛ばされたカードを他のロボットでキャッチすることである。その実現のために、面状柔軟弾性物のひずみエネルギーを用いた器用な操り実現を目指して、ロボットハンドによる操り戦略を提案した。

具体的には、高速ロボットハンドの高速振



(a) 静的対象へのカードシューティング



(b) 動的対象（落下物体）へのカードシューティング

図5 カードシューティングの実験結果

動を利用したカード飛ばし手法を提案するとともに、カードが飛び出すメカニズムについて力学的解析を行い、実機実験により提案手法の有効性を確認した(図4)。また、高速ビジョンを用いたカードの状態認識を行い、飛ばしたカードのキャッチを実現した。

② カードを目的の場所に飛ばすカードシューティング

本タスクでは、高速ロボットハンドとビジョンシステムによって、対象物体に向けてカードを器用に投擲することを目指した。

その実現に向けて、はじめに人間によるカード投げを分析するとともに、初期状態におけるカード把持を解析し、タスクを実現するための基本的な戦略を提案した。また、カードの把持位置や目標とする方向へカード投

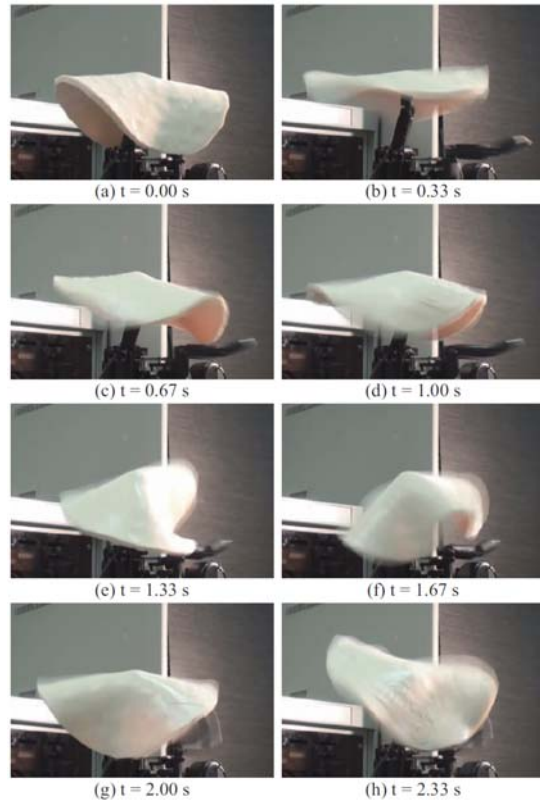


図6 ピザ生地操りの実験結果

擲を行うためのリリースタイミングについて調査し、適切な把持位置およびリリースタイミングを実験的に導出した。

提案手法を用いて、カード投げや対象へのカードシューティングを実現した(図5(a))。加えて、高速ビジョンによる対象物体認識を統合することにより、動的対象（落下物体）に対してもカードシューティングに成功している(図5(b))。

(4) ピザ生地操り

立体柔軟物としてピザ生地を取り上げ、ロボットハンドによるピザ生地回しを行った。ここで、ピザ生地回しとは「ロボットシステムを用いて、柔軟物を回転させながら保持する動作」を指す。

はじめに、ピザ生地回しを実現するための操りスキルの抽出を行い、それに対するロボットの動作戦略を提案した。その動作戦略を基に、シミュレーションを行い、提案手法の有効性を確認した。また、様々な条件に対するシミュレーションを行い、力学現象について言及した。

次に、実際にピザ生地回しを実現するために、ピザ生地の回転軸を保持する指の運動とピザ生地を回す指の運動を提案するとともに、高速ビジョンによりピザ生地の重心位置および変形状態を認識し、それにより適切にピザ生地回しを実現する制御手法を提案した。

提案手法を用いてピザ生地回しを実際に実現した(図6)。

(5) その他の柔軟物操り

① ハンドによる紐操り

スキル統合に基づく結び目の動作生成に関する研究を行った。

高速多指ハンドを用いた柔軟紐の片手結びにおいて、止め結びと呼ばれる結び目を実現している。この結び目は、3つのスキルである(1)輪の作成、(2)紐の入替、(3)紐の引抜を組み合わせるにより実現される。

本課題では、様々な結び目を実現するために最小限必要なスキルを人間の結び動作を基に抽出し、抽出されたスキルを統合することにより、それらの結び目の生成が可能であることを示した。

結び目の記述として、結び目を構成している交点に着目し、交点の記述と交点の把持状態を定義するとともに、抽出したスキルの記述を明確にした。提案した記述手法を基に、解析手法を提案し、実際に結び目の生成について解析を行った。

② 動的紐操り

高速かつ等速運動を用いた動的紐操りに関する研究を行った。

本課題では、ロボットの高速性を利用することで、ロボットの運動から幾何学的な表現(代数方程式)で柔軟物体をモデル化できることを示した。そして、提案したモデルを用いて高速アームの軌道の妥当性を検討した。さらに、モデルが代数方程式であることから、紐の形状を指定したときに、その形状からアームの軌道を得る軌道生成手法を提案した。提案手法を用いて、実際に動的な結び目操作に成功している。高速性を利用することで、従来よりも比較的簡単なモデルが得られており、制御も容易になると期待できる。本課題の成果は、(2)リボン操りに拡張されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5件)

- ① 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊, 下条誠: ロボットハンドの構造・運動を考慮した操りスキルの統合に基づく結び目の生成計画, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 31, No. 3, pp. 283-291 (2013)
- ② 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, 査読有, Vol. 31, No. 6, pp. 628-638 (2013)
- ③ Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Dynamic High-speed Knotting of a Rope by a Manipulator, International Journal of Advanced Robotic Systems, 査読有, Vol. 10, Article No. 361, pp. 1-12

(2013)

- ④ Taku Senoo, Yuji Yamakawa, Yoshihiro Watanabe, Hiromasa Oku and Masatoshi Ishikawa: High-Speed Vision and its Application Systems, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, Vol. 26, No. 3, pp. 287-301 (2014)
- ⑤ 妹尾拓, 山川雄司, 石川正俊: 高速ビジョンのロボット応用, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 32, No. 9, pp. 769-773 (2014)

[学会発表] (計 11件)

- ① Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Simple Model and Deformation Control of a Flexible Rope using Constant, High-Speed Motion of a Robot Arm, 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (St. Paul, 2012. 5. 16) / Proceedings, pp. 2249-2254 (2012)
- ② 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊: 高速ロボットハンドの指先高速振動を用いたカード飛ばし, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, (浜松, 2012. 5. 28) / 講演論文集, 1A1-J04 (2012)
- ③ Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Card Manipulation using a High-speed Robot System with High-speed Visual Feedback, 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (Vilamoura, 2012. 10. 10) / Proceedings, pp. 4762-4767 (2012)
- ④ Niklas Bergstrom, Carl Henrik Ek, Danica Kragic, Yuji Yamakawa, Taku Senoo, Masatoshi Ishikawa: On-Line Learning of Temporal State Models for Flexible Objects, 2012 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, (Osaka, 2012. 12. 1) / Proceedings, pp. 712-718 (2012)
- ⑤ 山川雄司, 並木明夫, 石川正俊: 高速多指ハンドシステムを用いたカード操り, 第13回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, (福岡, 2012. 12. 19) / 講演会論文集, pp. 1806-1809 (2012)
- ⑥ Yuji Yamakawa, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa: Dexterous Manipulation of a Rhythmic Gymnastics Ribbon with Constant, High-Speed Motion of a High-Speed Manipulator, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (Karlsruhe, 2013. 5. 7) / Proceedings, pp. 1888-1893 (2013)
- ⑦ 山川雄司, 中農士誠, 妹尾拓, 石川正俊: 高速多指ハンドによるピザ回し動作の解析, ロボティクス・メカトロニクス講

演会 2013, (つくば, 2013. 5. 23) / 講演
論文集, 1A2-J03 (2013)

- ⑧ Yuji Yamakawa, Shisei Nakano, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Dynamic Manipulation of a Thin Circular Flexible Object using a High-Speed Multifingered Hand and High-speed Vision, 2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO2013), (Shenzhen, China, 2013. 12. 14) / Proceedings, pp. 1851-1857 (2013)
- ⑨ 金賢梧, 山川雄司, 妹尾拓, 石川正俊: 柔軟物のねじりを利用した多指ハンドによる軸対象物の回転制御, 第14回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, (神戸, 2013. 12. 19) / 講演会論文集, pp. 1192-1194 (2013)
- ⑩ Hyuno Kim, Yuji Yamakawa, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa: Manipulation Model of Thread-Rotor Object by a Robotic Hand for High-speed Visual Feedback Control, 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2014), (Besancon, France, 2014. 7. 9) / pp. 924-930 (2014)
- ⑪ Yuji Yamakawa, Kazuki Kuno and Masatoshi Ishikawa: Throwing and Shooting Manipulations of Playing Cards using a High-Speed Multifingered Hand and a Vision System, 2014 14th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), (Madrid, Spain, 2014. 11. 19) / Proceedings, pp. 92-98 (2014)

[その他]

ホームページ等

① ハンドによる紐操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/Knotting/index-j.html>

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/SkillSynthesis/index-j.html>

② 動的紐操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/DynamicKnotting/index-j.html>

③ 紐を用いたボタンスピナー

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/ButtonSpinner/index-j.html>

④ リボン操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/RibbonManipulation/index-j.html>

⑤ 布操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/DynamicFolding/index-j.html>

⑥ カード操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/CardShooting/index-j.html>

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/CardSpringManipulation/index-j.html>

⑦ ピザ生地操り

<http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/PizzaSpinning/index-j.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山川 雄司 (YAMAKAWA, Yuji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号： 90624940