

平成 22年 5月 27日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19300068  
 研究課題名（和文） ヒトの作業計測と機械による機能実現を通じての手の巧みさのメタ理解  
 研究課題名（英文） Meta-understanding of Human Hand Dexterity Through Measuring Human Work and Mechanical Realization of Manipulation Function  
 研究代表者  
 横小路 泰義（YASUYOSHI YOKOKOHJI）  
 神戸大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：30202394

研究成果の概要（和文）：本研究ではヒトの手巧みさの本質的理解のために、「折り紙」を具体的な対象作業とし、機械による機能実現を目指した。「おたまじゃくし」という目標作品を人間が折る過程の観察を通しての作業解析から、3自由度の指4本で折れることが分かり、この結果を基にロボットハンドを設計・製作し、実際に「おたまじゃくし」を一連で折ることに成功した。次に、折り紙のように挙動に揺らぎのある柔軟物体を巧みに操るために、人間の直接教示動作の統計的性質に基づいたロボットの目標軌道とセンサフィードバック動作生成法を提案し、実際に作業の成功確率と折りの質を改善できることを実験で示した。最後に、直接教示データにおけるセンサ入力と出力動作間の正準相関に基づいてフィードバック則生成法の一般化を行った。

研究成果の概要（英文）：This research aimed at fundamental understanding of human hand dexterity with task-oriented approach and ‘‘Origami-folding’’ was chosen as a target task. By observing and analyzing human work folding a specific origami form ‘‘Tadpole’’, it was found that four fingers each of which has three degrees-of-freedom were enough for folding the ‘‘Tadpole’’. An origami-folding robot was prototyped and the robot could actually fold the ‘‘Tadpole’’ successively.

To dexterously manipulate flexible objects whose behavior may fluctuate like origami paper, a novel method to synthesize a desired trajectory and sensory feedback control laws for the robot based on the statistical feature of direct teaching data demonstrated by a human was proposed. Experimental results showed that the success rate and folding quality were improved by the proposed method. Finally, the proposed method was generalized based on the canonical correlation between sensory data and the robot motion data obtained by direct teaching.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2008年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2009年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・（知覚情報処理・知能ロボティクス）

キーワード：ロボットハンド，マニピュレーション，スキル，柔軟物操作，作業教示

### 1. 研究開始当初の背景

ロボティクスにおけるハンドの研究は 1970 年代後半から連綿と続いており、これまでも数多くの研究が行われてきた。これまでの研究によって確かに把持や操りに関する理論的な枠組みも整理され、人間の手とほぼ同じサイズに見事にモーターや駆動系を収めた機械設計として賞賛すべきロボットハンドも見られる。しかしこれまでの研究でヒトがもつ「手の巧みさ」を本質的に理解できたとは言えず、これまでに作られたハンドが人間並みの器用な作業を実現できたかと思えば、まだまだ程遠いといわざるを得ない。

### 2. 研究の目的

本研究では「巧みさ」が必要とされるヒトの手の動作を仔細に観察し、生物学的制約条件を考慮しながらその現象を理解し、その結果を基に同じ機能を実現できる機械を工学的に創生することで、「手の巧みさ」の本質的理解を目指す。本研究では、これまでのロボティクスが陥りがちであった根拠なき **Anthropomorphism** とは決別し、対象作業を典型的な柔軟物操作である折り紙作業として問題を明確化するいわゆるタスク指向のアプローチを取り、ある特定の対象作業の機械的实现を通して「巧みさ」の理解を試みる。特定の作業対象としては、典型的な柔軟物体操作である「折り紙」とする。

エンコーダの分解能に比べてヒトの体性感覚による関節角度の認識の分解能ははるかに劣る一方で、ヒトの指先の触覚機能（例えば、二点弁別閾が 1mm、粗さの違いの検知限が 3 $\mu$ m）に比肩するセンサは工学的にはまだ実現できていない。このように生物学的な制約条件と工学的制約条件とはまったく異質であり、ロボットの形状にこだわらずに機能実現を図ることで「手の巧みさ」の本質的理解に迫れると考える。また、折り紙のように対象作業をはっきりと限定したボトムアップアプローチであるからこそ「手の巧みさ」の原理原則的理解に到達し得るものと考えられる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 「折り紙」の作業解析と解析結果に基づく折り紙ロボットの設計

生産工学の分野では、生産現場での全員参加の生産保全活動(TPM 活動)において、作業対象物の加工点(作用点)とそこに加えられるべき作用でその作業の機能を分析する加工点分析という手法がある。ここでは、ヒトが折り紙を折る際の加工点(すなわち折り紙

と接触する指先の点)の動きのみに注目して折り紙作業を解析し、解析結果に基づいて折り紙作業が可能なロボットハンドを設計・試作する。加工点に着目することで、ヒトの手の外観にこだわることなく、対象作業に適した機構の設計を行う。

#### (2) 過去の操作・認識履歴に基づく環境の不確かさへの対処手法の確立

折り紙などの柔軟物操作の場合には、同じ動作を行っていても対象物体の動きにある程度のばらつきが生じ、結果として作業の失敗を招く。ここでは、作業を何度も行うことによって得られる操作とセンサ信号を対とした履歴を蓄積し、対象物の特性を統計的な観点から把握して失敗を未然に防ぐ手法を確立する。

#### (3) 折り紙作業というケーススタディからの「手の巧みさの」メタ理解

ヒトの手とはまったく違うロボットで同じ機能を実現させることで「手の巧みさ」を生物学的、工学的制約条件を越えた上位概念で原理原則的に理解する。これを「メタ理解」と呼ぶことにする。

### 4. 研究成果

#### (1) 人間による折り紙作業の観察に基づく折り紙ロボットの設計

布・紙・プラスチックといった柔軟物は挙動が予測しにくく、柔軟物の操作はロボットによる自動化が難しい作業の一つである。本研究では、手での器用な作業の例として折り紙作業を取り上げ、まず折り紙作業の解析を行って折り紙の難易度を定義した。目標とする折り紙作品を図 1 に示す手順で折る「おたまじゃくし」とし、人間が「おたまじゃくし」を折る作業の観察を通して、「おたまじゃくし」を折るために必要な指先の動きを解析した。

本研究では、ロボットを通して人間の手の器用さを理解したいのであるから、人間と同じように折るロボットを作らなければならない。

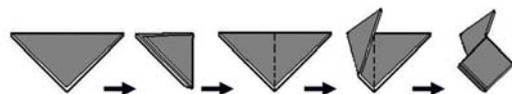


図 1. 「おたまじゃくし」の折り手順

ないが、ロボットの機構設計に際しては、作業の本質を見出すために、与えられたタスク

を実現する最小自由度のハンドを設計す

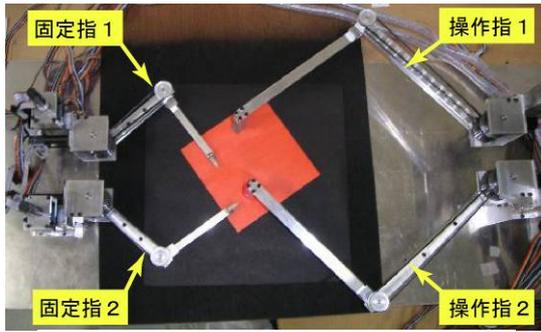
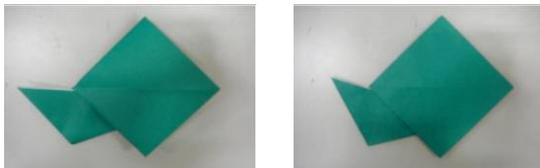


図2. 折り紙ロボットの外観

ることを心がけた。すなわち、人間が折り紙を折る際の折り紙そのものの動きに注目し、同じような紙の操り方を実現できるロボットハンドを、人間の手指の構造にとらわれることなく設計・開発することとした。以上の方針のもとで解析を行った結果、それぞれ3自由度の4本の指で「おたまじゃくし」が折れることが分かった。

次にこの解析結果に基づいて、各指3自由度で4本の指で構成されるロボットハンドを実際に設計・製作した。図2に試作した折り紙ロボットを示す。ロボットは、主に紙を固定する2本の固定指と、主に紙を操作する2本の操作指からなる。いずれも構造は基本的に同一で、鉛直上下にはボールねじスライドを用い、平面内移動には2リンクの機構を持つ。固定指と操作指ではリンクの長さが異なる。



(a) ロボット (b) 人間

図3. 折られた「おたまじゃくし」の比較

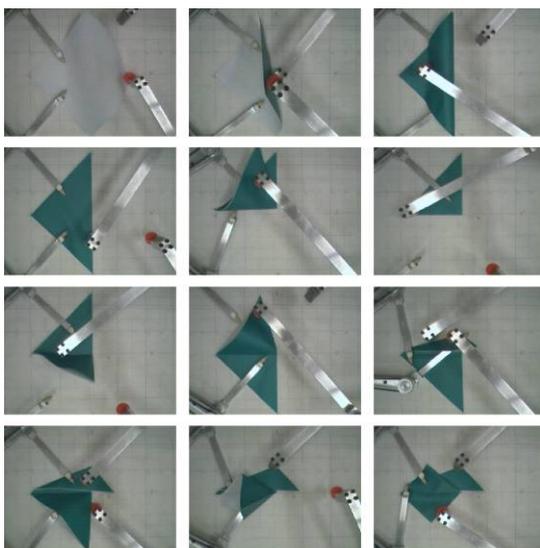


図4. 「おたまじゃくし」を一連で折る様子

り、固定指は約120[mm]、操作指は約220[mm]である。なお作業対象の折り紙は、一般的な150[mm]四方のものを想定している。

実験では、まず「おたまじゃくし」を3つの要素作業に分解し、個々の要素作業が試作したロボットで実現可能なことを確認した。要素作業の中で特に成功確率の低かった「袋折り」の部分に対して、再び人間の折り作業の観察結果を元に動作の改良を行い、成功率の向上させたのち、「おたまじゃくし」を一連で折ることに成功した。図3にロボットによる作品と人間による作品との比較を示し、ロボットが一連で折る様子を図4に示す。

作業に必要な時間は、現在のところ約30分であり人間が折るスピードに比べるとはるかに遅いが、個々の動作の高速化を図るなどして、時間の短縮は可能であると考えている。所要時間よりも問題なのが約20%程度という低い成功率である。失敗する原因は、紙の挙動に不確実性があるためであり、現状で行っている限られた局面のみでのカメラ画像を用いての修正動作だけではこの不確実性は吸収しきれない。今後は、カメラに加えて指先に力センサや触覚センサを付加し、常に紙の状態をモニタして失敗を未然に防ぐ方法を取り入れて行く必要がある。

## (2) 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動作生成法

本研究課題では、ヒトの手の巧みさの本質的理解を目指して、手を用いる複雑な動作として「折り紙」という具体的作業を取り上げて、人間による作業の観察から機能の機械的実現までを試みてきた。前節に示した研究成果として、図2に示すような各指3自由度からなる4本の指をもつハンドを設計・試作し、図1に示す「おたまじゃくし」という作品を一連で折ることに成功した。しかし現状では、

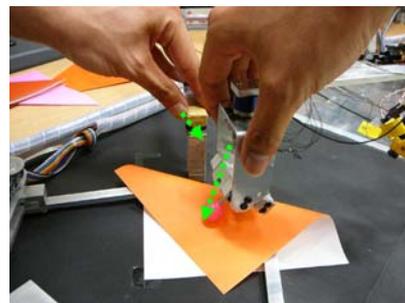


図5. 人間による直接教示の様子

このロボットハンドは様々な問題点を抱えており、特に問題となるのがタスクの成功確率の低さ(約20%)である。現状ではハンドの指先の軌道は人間が事前に試行錯誤的に与えたものであり、作業中に視覚や力覚を用いたフィードバックによる軌道修正も行って

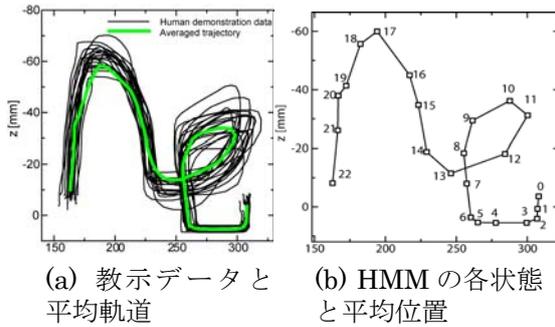


図 6. 教示データと HMM によるモデル化

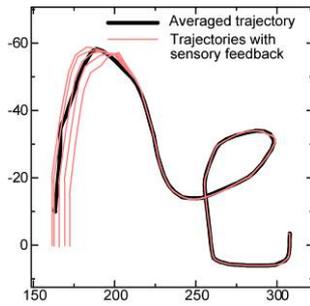


図 7. センサフィードバックを用いた際の指先軌道

いない。そのため紙を折る際の失敗の原因のほとんどは、与えた軌道の不適切さや不確実な紙の挙動によるものと考えられ、より適当な指先の軌道を与えると共に人間と同様にセンサフィードバックに基づいた器用な操りを実現する必要がある。

そこで本研究では、予め決められた軌道に追従するだけでは折り紙のように挙動に揺らぎのある柔軟物体を失敗せずに操ることが難しいことから、何らかのセンサで常時紙の状態をモニタして失敗を未然に防ぐようなセンサフィードバック動作を導入する必要があるとの認識のもと、そのようなセンサフィードバック動作を人間による直接教示から抽出する手法を開発した。具体的には、折り紙作業中の基本となる谷折り作業に焦点を絞って、人間の教示データを隠れマルコフモデル (HMM) を用いてモデル化し、そのモデルを用いてより適当な指先のノミナル軌道の生成とセンサフィードバック則の抽出を行った。

図 5 に直接教示の様子を示し、図 6 に教示データと平均軌道および隠れマルコフモデルでモデル化された結果を示す。センサフィードバック則は、教示データから抽出した作業の重要部分に対してのみ適用される。図 7 に、実験において実際に抽出したセンサフィードバックを適用した際の指先軌道を示す。複数回の試行において紙の挙動の揺らぎに

より、教示データの場合と同様に軌道に揺らぎがあるのが分かる。実験では、これらの方法を用いることで実際に作業の成功確率を改善できることを示した。

### (3) 直接教示データにおけるセンサ入力と出力動作間の正準相関に基づくフィードバック則生成法の一般化

ロボットに柔軟物操作のような複雑で器用な作業を行わせる際の問題として、目的とする作業を遂行できる感覚・運動機能を持たせることはもちろんのこと、どのようにして目的の作業を遂行するための動作を教示するかという問題が挙げられる。本研究では折り紙作業の成功率を向上させるという目的から、人間からの直接教示によって柔軟作業を扱う際の作業のコツともいえる適切なノミナル軌道とセンサフィードバック則を抽出する手法を提案するに至った。これは、「折り紙」という特定の作業の問題を超えて、広く一般的に人間の持つ暗黙的な作業スキルを如何に効果的にロボットに移植するかという問題を考えることになる。

本研究で先に提案した手法では、人間が複数回行った直接教示データを隠れマルコフモデルでモデル化し、そこからノミナル軌道としての平均軌道とセンサフィードバック則を抽出していたが、この手法にはいくつかの問題点があった。まず、センサフィードバックを適用する区間を抽出するための閾値を試行錯誤的に決めなくてはならず、区間毎にフィードバックを適用するかしないかを二值的に決めていた。また、ベクトルの相関には方向性が存在するが、その方向性が考慮されておらず、センサの数やセンサフィードバックを行うロボットハンドの数の変化によるセンサ入力や制御変数の次元の変化に対する考察はされていなかった。

この問題点を解決するために、先に提案した手法を基に、教示データの力と速度の正準相関係数を用いることで、相関の方向依存性が考慮され、かつ、センサフィードバックの適用の重みを相関の大きさに応じて連続的に変化させることができるように手法を拡張した。図 8 に正準相関係数の概念図を示す。

この結果、これまでの提案手法では必要であった、センサフィードバック区間抽出のための閾値の設定が必要なくなり、これまで考慮されていなかったセンサ入力と制御変数の次元数の変化にも対応できる手法となった。この新たに拡張された手法を 1/2 谷折りに対して適用した結果、失敗することなく従来手法より高い成功率・折の質で折れることが確認できた。

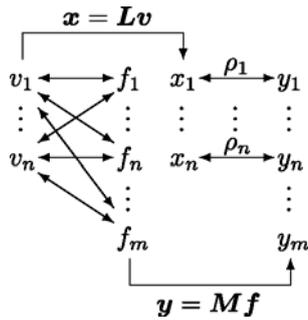


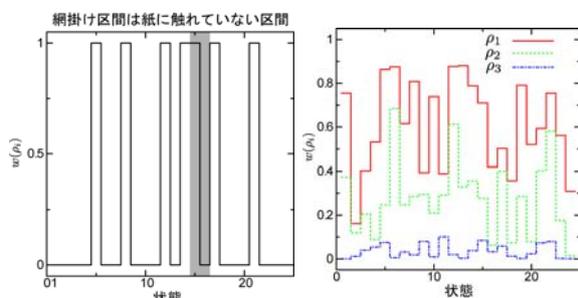
図8. 正準相関の概念図 ( $n < m$  の時)

図9に、実験に用いた谷折り作業において抽出されたセンサフィードバックにかけられる重みの比較を示す。従来手法では重みの大きさは2値的であり、すべての方向成分に共通の重みがかけていたのに対し、新たな手法では重みが連続的に変化するとともに方向ごとに異なった重みがかけているのが分かる。実験の結果、従来手法より高い性能を持ちつつ、教示後に閾値等の試行錯誤的な調整をせずとも作業スキルが抽出できることから、新たに提案した手法の有効性が示された。

(4) 研究成果のまとめ

本研究では「巧みさ」が必要とされるヒトの手の動作を仔細に観察し、生物学的制約条件を考慮しながらその現象を理解し、その結果を基に同じ機能を実現できる機械を工学的に創生することで、「手の巧みさ」の本質的理解を目指すことを目的としてきた。研究の手法としては、これまでのロボティクスが陥りがちであった根拠なき Anthropomorphism とは決別し、対象作業を明確化するいわゆるタスク指向のアプローチを取り、特定の対象作業の機械的実現を通して「巧みさ」の理解を試みた。対象作業としては、典型的な柔軟物操作である折り紙作業とした。

本研究では、図10に示したように、ヒトの手とはまったく違うロボットで同じ機能を実現させることで「手の巧みさ」を生物学



(a) 従来手法におけるセンサフィードバックの重み (b) 提案手法におけるセンサフィードバックの重み

図9. 教示データと HMM によるモデル化

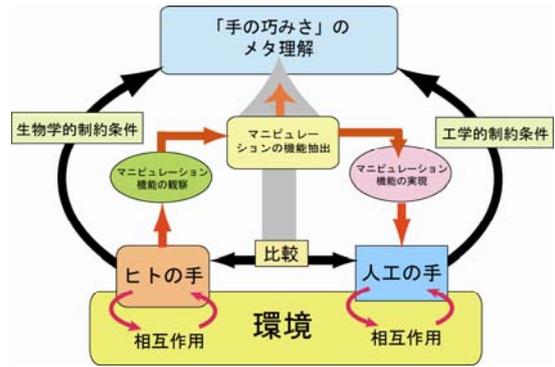


図10. 手の巧みさのメタ理解

的、工学的制約条件を越えた上位概念で原理原則的に理解することを目指し、これを「メタ理解」と呼んだが、本研究を通して果たしてどこまで「メタ理解」ができたであろうか。

まず、タスク指向アプローチで設計試作した折り紙ロボットで、目標とする「おたまじゃくし」を折ることに成功したが、実際にロボットで実現してみると、器用とされる動作でも動きの自由度自体はさほど複雑ではなくても良く、それぞれ3自由度の指4本で「おたまじゃくし」が折れることが分かった。

すなわち、人間の手の形にこだわらずに、人間と同じような方法で折り紙を折るロボットを作ったことで、この折り紙作業に必要な機能を抽出できたのではないかと考えている。

本研究では、折り紙作業の成功率を向上させるという目的から、人間からの直接教示によって、柔軟作業を扱う際の作業のコツともいえる適切なノミナル軌道とセンサフィードバック則を抽出する手法を提案するに至った。すなわち、現状では「折り紙」という限定された作業対象でしか実証できていないとはいえ、本研究の結果により「手の巧みさ」とか「作業スキル」と漠然と呼ばれていたものを、「作業スキルは適切なノミナル軌道とその軌道まわりの適切なセンサフィードバック則の組み合わせとして表現できる」と言うことができたのではないだろうか。

結局のところ、本研究によってこれまで暗黙知のとされていた作業スキルを、適切なノミナル軌道+センサフィードバック則という形で捉え、それを人間からの直接動作教示で抽出できる手法を確立できたことになり、これが本研究の最も大きな成果である。

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2件)

- ①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動作生成法”, 日本ロボット学会誌, vol. 27, no. 4, pp. 685-695, 2009.

- ② Kenta Tanaka, Yusuke Kamotani, and Yasuyoshi Yokokohji: “Origami Folding by a Robotic Hand,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 20, no. 4, pp. 550-558, 2008.

[学会発表] (計 9 件 : 国際会議 3 件, 国内学会口頭発表 6 件)

- ① Yasuyuki Kihara and Yasuyoshi Yokokohji: “Skill Transfer from Human to Robot by Direct Teaching and Task Sharing -A Case Study with Origami Folding Task-,” The 11th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, (August 31-September 3, 2010, Phenix Conference Center, Valenciennes, France), 2010. (to appear)
- ② 木原康之, 横小路泰義: “人間の直接教示動作に基づく複数センサによるセンサフィードバック則生成法”, 第10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論文集, (2009年12月24日~26日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス), 1L4-6, 2009.
- ③ 木原康之, 横小路泰義: “人間の直接教示動作の統計的性質からのロボットへの作業スキル移植 -折り紙動作を題材として-”, 電子情報通信学会技術報告 (手研究会), (2009年6月15日, 16日, 北海道大学学術交流会館), vol. 109, no. 83, HIP2009-69, pp. 107-110, 2009.
- ④ Kenta Tanaka, Yasuyuki Kihara, and Yasuyoshi Yokokohji: “Synthesizing a Desired Trajectory and Sensory Feedback Control Laws for an Origami-Folding Robot based on the Statistical Characteristics of Direct Teaching by a Human,” 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2009), (May 12-17, 2009, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan), pp. 126-133, 2009.
- ⑤ 木原康之, 横小路泰義: “人間の直接教示動作の正準相関に基づく折り紙ロボットの動作生成法”, 第9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論文集, (2008年12月5日~7日, 長良川国際会議場/未来会館), 1D1-7, 2008.
- ⑥ 田中健太, 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動作生成法”, 第13回ロボティクスシンポジウム予稿集, (2008年3月16日, 17日, 湯元こんぴら温泉 琴参閣), pp. 320-325, 2008.

- ⑦ 田中健太, 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生成とセンサーフィードバック動作生成法”, 電子情報通信学会技術研究報告(手研究会), (2007年11月19日, 20日, 金沢工業大学扇が丘キャンパス), vol. 107, no. 332, HIP2007-120, pp. 109-114, 2007.

- ⑧ 田中健太, 横小路泰義: “人間の直接教示動作に基づいた折り紙ロボットの動作生成法”, 第25回日本ロボット学会学術講演会, (2007年9月13日~15日, 千葉工業大学 津田沼キャンパス), 1025, 2007.

- ⑨ Kenta Tanaka, Yusuke Kamotani, and Yasuyoshi Yokokohji: “Origami Folding by a Robotic Hand,” IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), (October 29-November 2, Sheraton Hotel San Diego & Marina, San Diego, CA, USA), pp. 2540-2547, 2007.

[その他] (計 1 件)

解説記事等

- ① 横小路泰義: “折り紙を折るロボット”, 折り紙探偵団 (日本折紙学会機関紙), vol. 19, No. 5, pp. 10-13, 2009.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横小路 泰義 (YASUYOSHI YOKOKOHI)

神戸大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30202394

(研究期間のうち2009年10月30日まで京都大学工学研究科 准教授)

### (2) 研究分担者

該当なし

### (3) 連携研究者

該当なし

### (4) 研究協力者

田中 健太 (KENTA TANAKA)

京都大学・大学院工学研究科・修士課程

(2007年度担当)

木原 康之 (YASUYUKI KIHARA)

京都大学・大学院工学研究科・修士課程

(2008~2009年度担当)