

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成26年5月5日現在

機関番号：	12501
研究種目：	若手研究（S）
研究期間：	2009～2013
課題番号：	21670001
研究課題名（和文）	人間を超える次世代高速・高機能ロボットハンドシステムの研究
研究課題名（英文）	Research of the Next Generation of High-speed Advanced Robot Hand System
研究代表者	
並木 明夫（NAMIKI, Akio）	
千葉大学・大学院工学研究科・准教授	
研究者番号：	40376611
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）	77,400千円、（間接経費）23,220千円

### 研究成果の概要（和文）：

人間の手の能力を超える次世代高性能ロボットハンドの開発を目的として研究を行った。具体的には次の通りである。(1)超多自由度ロボットハンド、(2)ロボットハンドの指先回転制御、(3)ロボットハンドの教示、(4)動的柔軟物操り、(5)物理モデルに基づく紙の操り動作、(6)ボールジャグリング、(7)オンライン視触覚融合、(8)マスタ・スレーブにおける多指ロボットハンド制御、(9)高速エアホッケーロボット、(10)ズーム・フォーカスの視覚サーボ、(11)視覚情報によるハンドの姿勢推定。

### 研究成果の概要（英文）：

The aim of this project is to develop the next generations of advanced robot hands that are superior to human hands. The results of this project are: (1) an ultra-redundant-DOF robot hand, (2) dexterity of a robot hand by adding revolute joints to its fingertips, (3) a teaching algorithm for multifingered hands, (4) dynamic manipulation of flexible objects, (5) handling of a sheet of paper based on its physical model, (6) ball-juggling, (7) an online visual and tactile information fusion algorithm, (8) control of multifingered hands for master-slave systems, (9) an air-hockey robot, (10) visual servoing of a zoom-focus mechanism, and (11) an estimation of the pose of a robot hand based on visual information.

研究分野：ロボティクス

科研費の分科・細目：知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：(1) 知能ロボティクス (2) ロボットハンド (3) 感覚運動統合  
(4) ダイナミックスキル (5) 視触覚フィードバック

### 1. 研究開始当初の背景

近年、工業生産は多品種少生産の方向に進んでおり、また、操る対象も剛体だけでなくケーブルやシートのような柔軟材を扱う用途が増大しているが、それらの多くはまだ人手で行っており、自動化されていない。その他の分野でも、人間の手のように多目的かつ複雑な操りを可能とするロボットハンドの必要性が増しているが、現状では人間の手の能力に達していない。この理由としては、次のような問題点があった。

- (1) 運動系の問題：これまでに開発されたロボットハンドの多くは把持力が小さく、人間と比較して動きが低速である。
- (2) 感覚系の問題：多目的かつ汎用の操りに

対応するためには視触覚センシングが重要となるが、ロボットハンドに適したセンシングが実現できていない。

- (3) 処理系の問題：静的な把持理論についてはほぼ完成されているが、動的な要素が含まれる操りの研究例は少ない。
- (4) 設計理論の問題：汎用ロボットハンドの設計方法は確立されていない。

これらはどれも、ロボットハンドの実用化の際の大きな問題となり、ブレークスルーといえる技術が求められていた。

### 2. 研究の目的

申請者の研究グループでは、特に、「動作速度」と「反応速度」に着目することでハー

ドウェアの限界を突破し、速度について人間を超える性能を持つ高速多指ロボットハンドの開発を進めてきた。本研究では、これらの研究を更に発展させることで、ロボットハンドのブレークスルーとなる技術を開発する。具体的には、次の各要素技術について研究を進め、それらの成果を総合することで、次世代高性能ロボットハンドの開発を行う。

- (1) 把持・操りの動作解析に基づく設計パラメータ最適化と高性能アクチュエータの開発
- (2) ロボットハンド制御に適した高性能視触覚センシング
- (3) 動的操りの技能（ダイナミックスキル）に基づく、高速・高機能マニピュレーション
- (4) 人間の手と異なる構造を持つ、操作対象に適した準汎用高性能ロボットハンド

### 3. 研究の方法

- (1) 把持・操りの動作解析に基づく設計パラメータ最適化と超高性能アクチュエータの開発：把持・操りの動作を解析することでアクチュエータのパラメータを最適化し、ロボットハンドに適した小型高出力アクチュエータを開発する。

(対応する成果⇒4-(1), (2))

- (2) ロボットハンド制御に適した高性能視触覚センシング：ロボットハンドの操りに適した視覚システムを開発する。特に、視界内のハンド指によるオクルージョンを補正し、対象のみの3次元情報を取得する機能を実現する。

(対応する成果⇒4-(10), (11))

また、操りに適した触覚センシング手法を開発する。特に、紐操り、紙操りなどの柔軟物への対応を目指す。

(対応する成果⇒4-(6), (7))

- (3) 動的操りの技能（ダイナミックスキル）に基づく、高速・高機能マニピュレーション：複数の具体的な作業における人間の動的な作業技能を解析して、ハンドに実装する。特に、精密部品や柔軟対象などの組み立て操り作業、ジャグリングのような動的作業を対象とする。

(対応する成果

⇒4-(4), (5), (6), (7), (8))

また、人間とは構造・ダイナミクスが異なるロボットハンドを高速に制御するための教示方法を開発する。

(対応する成果⇒4-(3))

- (4) 人間の手と異なる構造を持つ、操作対象に適した準汎用高性能ロボットハン

ド：操りの対象を限定させることで、その範囲内で汎用的かつ高性能での作業の実現を目標とするも準汎用高性能ロボットハンドを開発する。

(対応する成果⇒4-(1), (2), (5))

### 4. 研究成果

#### (1) 超多自由度ロボットハンドの設計開発

人間の器用な操り作業では、親指と人差し指の対向とすり合わせ動作が重要な役割を果たす。人間の親指は5つ、人差し指は4つの自由度を持つが、これ以上の自由度を持たせることで、人間を超える器用さが期待できる。そこで、器用さに特化した準汎用高性能ロボットハンドの一例として、各指7自由度を持つ2指ロボットハンドを開発した。

この開発のためには、各関節において従来以上の高精度の小型アクチュエータモジュールが必要となる。そこで、従来のものを改良し、新たに強度の高い小型アクチュエータモジュールを開発した。これは、出力軸にハーモニックドライブ減速機を配置しているために、バックラッシュが除去される。

開発したハンドでは任意の位置姿勢で2指の対向と任意の擦り合わせ動作を実現でき、微細かつ器用な指先作業が可能となる。また、指リンク中間に6軸力センサを配置し力制御に対応し、配線として柔軟かつ細いロボットケーブルを採用することで、大きな可動範囲を実現した。このハンドを使用して下記(3)、(5)の研究において、様々な操り動作を実現した。

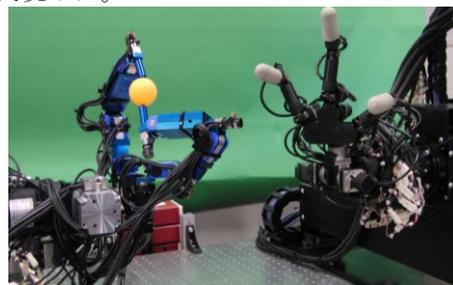


図1 超多自由度ハンド(左)と指先回転ハンド(右)

#### (2) 指先回転軸の付加による器用性の向上とリグラスピングへの応用

器用さと把持力を両立させるために、各指の指先に小型アクチュエータを埋め込み、指先旋回軸を持つロボットハンドを開発し、指先旋回軸による器用性の向上について解析、考察を行った。この指先旋回機能を利用して、対象を把持したまま把持姿勢を変えるリグラスピングを実現した。図2にキューブ状物体から指先を離さずに回転する様子を示す。

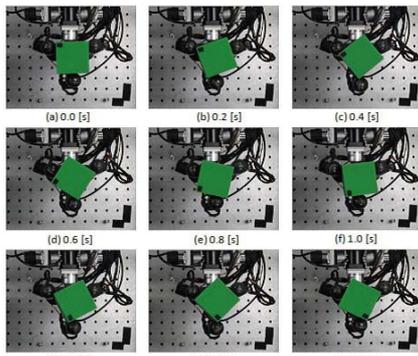


図2 キューブのリグラスピング

### (3) 対象の運動情報に基づくロボットハンドの教示アルゴリズムの開発

ロボットハンドは多くの自由度を持っているために、動作を教示するのが難しい。一方、ロボットハンドの操りにおいて、ほとんどの場合では、制御したいのはハンド自体ではなく、把持している対象物体の位置や姿勢で、指の配置は比較的自由度が高い。そこで、3次元力覚提示インターフェースデバイスを用いて対象物の目標軌道を直接入力し、対象物を目標値に追従させるための指の軌道を、対象と指の間の転がり接触を考慮しつつ接触軌道を最適化し、最終的に指の動きを自動生成する教示システムを開発した。転がり接触を考慮し、接触パラメータを可動範囲内に抑え、その変化を最小化することで、安定した操り軌道を生成する手法について提案した。2種類の違うタイプのロボットハンドに適用し、その有効性を示した。

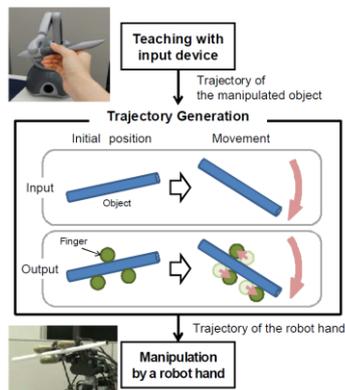


図3 対象の運動に基づくロボットハンド教示

### (4) 高速運動の特性を利用したロボットハンドによる動的紐操り・動的布操り

柔軟な紐の操りでは、動作中の紐の変形が予測しづらいことが問題点の一つである。そこで、紐の自由な変形を拘束する手法として、指先擦り合わせによる紐の入替を中心とした紐結び手法を提案した。さらに、紐を接線方向に等速運動させることで、動的に紐を任

意図的に配置する動的結び手法を提案し、実機により有効性を示した。また、動的紐結び手法を拡張し、面状柔軟物体の動的マニピュレーションの研究を行った。図4に示す空中での布の動的折りたたみ操作を実現した。

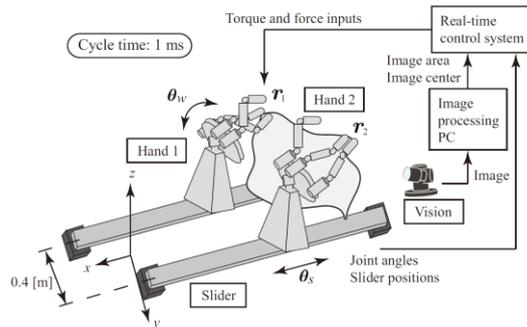


図4 布の動的操り

### (5) 物理モデルに基づく紙の操り動作

ロボットに折り紙を行わせる上での問題として、(1)紙の変形の解析的な予測が難しいこと、(2)動作中に紙の形状を適切に維持しながら変形させること、といったことがあげられる。これらの問題に対して本研究では、(1)紙の変形を解析するために紙を質点の集合として考え近似的な変形モデルを作成し、物理エンジンによって実時間オンラインで動作させる、(2)折りの各動作において必要とされるセンシング能力を分析しそれを組み合わせる、の2つの手法を統合することで紙折り動作を実現した。紙の物理シミュレーションを作業と同時に行うことで、紙の形状推定を容易にし、かつ操り動作の確認をオンラインで行うことができるようになった。結果として、紙折り動作の作業性能を向上させることができた。

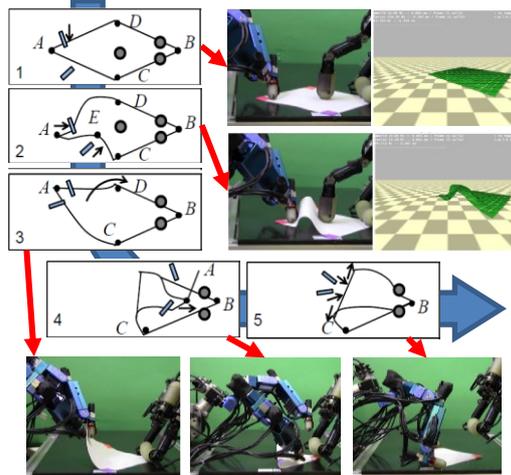


図5 物理エンジンを用いた紙折り動作

### (6) ハンドアームによるジャグリング

多指ハンドアームを用いたジャグリング

動作を実現した。多指ハンドを用いた場合は自由度が多いために動作生成は困難となるが、キャッチとリリースの位置や時間が操作可能となり、より高度なジャグリングが可能となる。特に (1)キネティックチェーンに基づく効率的なスロー動作軌道の生成アルゴリズム, (2)高速視覚フィードバックによるキャッチング (2)キャッチしてから投げ上げまでの間にボールをハンド内で安定した位置に持ち替えるためのリグラスピング, を開発した。結果として、2つのボールを片手でジャグリングすることに成功した。ハンドアームでのジャグリングの例は世界初である。

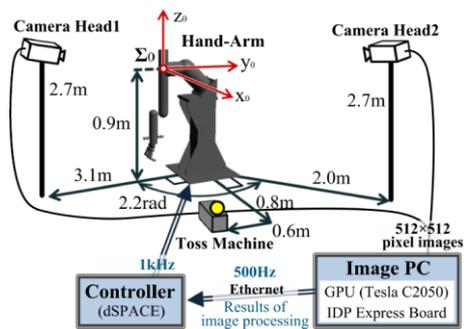


図6 多指ハンドアームによるボールジャグリング

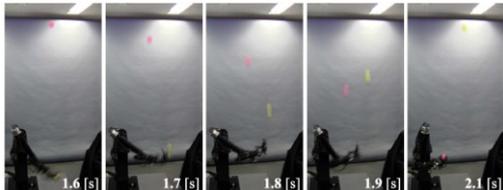


図7 2ボールジャグリングの実験

### (7) オンライン視触覚融合アルゴリズムとけん玉制御への応用

人間のようには剣をロボットハンドに握らせた状態での剣玉操りを行う。この場合、剣の持ち方が試行毎に異なる、動作実行中に把持状態が変化してしまうという問題がある。そこで、視覚による対象物の位置情報と触覚による指との接触位置情報から把持物体の位置・姿勢を推定するアルゴリズムを提案した。これは非線形カルマンフィルタを基本として、推定精度を上げるために線形に近い形に変形し、把持物体推定、視触覚融合に適した形態としたものである。ロボットハンドには感圧導電ゴムを用いた高速触覚センサを装備した。結果として、把持物体の位置推定アルゴリズムにより、どのような位置姿勢で剣を持たせても、動作途中で剣がずれた場合でも、安定した剣玉操りを実現できた。



図8 (左)触覚装備ハンド, (右)剣を握った状態

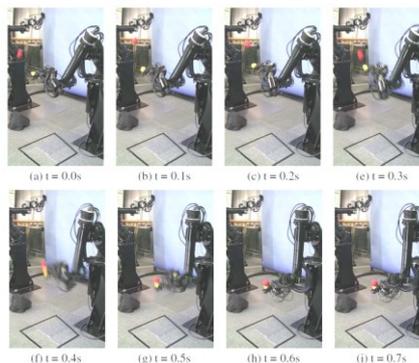


図9 剣による球のキャッチ

### (8) マスタ・スレーブにおける多指ロボットハンド制御

近年、危険作業などで人間が直接操作するマスタ・スレーブロボットの必要性が高まっている。特に精密作業を行わせるためには、人間の身体構造に近いロボットハンドシステムの構築が必要となる。

そこで、人間型の上半身を持ち、各腕に5指ロボットハンドを有するマスタ・スレーブシステムを用いて把持制御の研究を行った。ロボットハンドは人間に類似した構造を持つことが望ましいが、ダイナミクスや細かな構造まで一致させることは困難である。そこで、これらの違いに基づく操作感覚のずれを補償するために、操作者の動きを予測し、動作の種類に応じてオンラインで動作モードを切り替える把持制御アルゴリズムを開発した。特に、使用頻度が高いリーチング動作を取り上げ、操縦者の対象物体に対する把持意思の推定を行い、動作モードの自動切り替えを実現した。



図9 (左)操作マスタ(右)スレーブロボット

### (9) 高速エアホッケーロボットの開発

動的マニピュレーションの例として、人間を対戦相手とするエアホッケーロボットシステムを構築した。特に、対戦相手の運動から場の状況を推定して戦略を変える長期戦略を導入した。対戦相手が攻撃的や守備的な場合には、ロボット側の戦略を変えることで、戦況が膠着せず、単調にならないようにする機能を持つ。また、ロボットの動作を高速化するために、高速視覚フィードバックとモデル予測制御を統合した高速制御を実現した。



図10 エアホッケーロボットシステム

#### (10) ズーム・フォーカスの視覚サーボの研究

高速ビジョンの画像追跡能力を向上させるために、小型ACアクチュエータを用いたズーム・フォーカスメカニズムを視覚サーボ理論に基づいて制御する手法について提案した。画像特徴量に基づき自動的に制御されるため、対象の奥行き方向の大きな移動に対しても追従することが可能となった。

#### (11) オクルージョン回避のためのロボットハンドの姿勢推定アルゴリズムの開発

マニピュレーション中にロボットハンドが対象の上に覆い被さり、視覚センサの視界を遮るといった状況が頻繁に起こりうる。この問題を解決するために、3次元視覚センサとロボットモデルを用いて、視覚のみからのロボットの位置姿勢推定手法を開発した。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

1. 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, 2013, doi:10.5772/56783
2. 村上健一, 並木明夫, 視覚サーボを用いた移動・変形するスクリーンへの投影画像制御, 日本機械学会論文集C編, 査読有, Vol. 79, No. 808, pp. 232-244, 2013, doi:10.1299/kikaic.79.4757
3. 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, doi:10.7210/jrsj.31.628
4. 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. 283-29, 2013, doi:10.7210/jrsj.31.283
5. 並木明夫, 高速マニピュレーション, 日本ロボット学会誌, 解説論文, Vol. 31, No. 4, pp. 40-45, 2013
6. 木崎昂裕, 並木明夫, 脇屋慎一, 石川正俊, 野波健蔵, 高速多指ハンドアームと高速ビジョンを用いたボールジャ

グリングシステム, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 30, No. 9, pp. 102-109, 2012, doi:10.7210/jrsj.30.924

7. 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布の動的折りたたみ操作, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 30, No. 2, pp. 225-232, 2012, doi:10.7210/jrsj.30.225
8. 松下左京, 並木明夫, ゲーム状況に応じた意思決定を行うエアホッケーロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 査読有, Vol. 29, No. 10, pp. 954-962, 2011, doi:10.7210/jrsj.29.954
9. 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, 査読有, Vol. 27, No. 09, pp. 1016-1024, 2009, doi:10.7210/jrsj.27.1016

[学会発表] (計78件)

1. 伊藤直樹, 並木明夫, 視覚と触覚情報による把持物体の状態推定を用いたけん玉のキャッチ動作, 第19回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 査読有, pp. 431-437, 2014/3/14, 神戸
2. 小柳翔平, 横澤修一, 並木明夫, 接触座標の許容範囲を考慮した多指ハンド教示システム, 第19回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 査読有, pp. 203-208, 2014/3/13, 神戸
3. 横澤秀一, 小柳翔平, 並木明夫, 冗長自由度ロボットハンドシステムによる折り紙動作, 第19回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 査読有, pp. 196-202, 2014/3/13, 神戸
4. 根岸健多, 伊藤直樹, 松本庸佑, 並木明夫, 遠隔操縦型ヒューマノイドロボットシステムの開発と操作性向上に関する提案, 第19回ロボティクスシンポジウム講演論文集, 査読有, pp. 339-345, 2014/3/14, 神戸
5. Akio Namiki, High-Speed Manipulation by Using High-Speed Vision, USenix Vail Computer Elements Workshop, invited, 2013/6/25, Vail, USA
6. Akio Namiki, Sakyō Matsushita, Takahiro Ozeki, and Kenzo Nonami, Hierarchical processing architecture for an air-hockey robot system, 2013 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 1187-1192, 2013, doi:10.1109/ICRA.2013.6630722
7. Masatoshi Ishikawa, Akio Namiki, Taku Senoo, and Yuji Yamakawa, Ultra-High-Speed Robot Based on 1 kHz Vision System, 2012 IEEE/RSJ Int. Conf. on

- Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp. 5460-5461, 2012, doi:10.1109/IROS.2012.6386295
8. 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 Int. Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 2249-2254, 2012, doi:10.1109/ICRA.2012.6224763
  9. Takahiro Kizaki and Akio Namiki, Two Ball Juggling with High-Speed Hand-Arm and High-Speed Vision System, 2012 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 1372-1377, 2012, doi:10.1109/ICRA.2012.6225090
  10. Taku Senoo, Daiki Yoneyama, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa, Tweezers Manipulation Using High-Speed Visual Servoing Based on Contact Analysis, 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 査読有, pp. 1936-1941, 2011, doi:10.1109/ROBIO.2011.6181574
  11. Akio Namiki, Sojung Kim, and Kenzo Nonami, Teaching System for Multifingered Robot Hands Using Kinetic Information of Manipulated Objects, 8th Int. Conf. on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, 査読有, pp. 533-538, 2011, doi:10.1109/URAI.2011.6145877
  12. Yuji Yamakawa, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa, Motion Planning for Dynamic Folding of a Cloth with Two High-speed Robot Hands and Two High-speed Sliders, 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 査読有, pp. 5486-5491, 2011, doi:10.1109/ICRA.2011.5979606
  13. Yuji Yamakawa, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa, Motion Planning for Dynamic Knotting of a Flexible Rope with a High-speed Robot Arm, 2010 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp. 49-54, 2010, doi:10.1109/IROS.2010.5651168
  14. Akio Namiki, Ryoya Sugano, Satoru Mizusawa, Yuji Yamakawa, and Masatoshi Ishikawa, High Speed Dexterous Manipulation with High Speed Vision, 9th IFAC Symp. on Robot Control, 査読有, pp. 529-534, 2009, doi:10.3182/20090909-4-JP-2010.0006

8  
(他 64 件)

〔図書〕 (計 7 件)

1. 米田完, 中嶋秀朗, 並木明夫, はじめのメカトロニクス実践設計, 講談社, 2011
2. 並木明夫, 高速マニピュレーション, ロボットテクノロジー (日本ロボット学会編), 2-11 節, pp. 96-99, オーム社, 2011
3. 並木明夫, 器用なロボットハンド, ロボット情報学ハンドブック (松原 仁等編), 8-7 節, pp. 546-555, ナノオプトニクスエナジー, 2010
4. Akio Namiki, Taku Senoo, Satoru Mizusawa, and Masatoshi Ishikawa, High-speed Visual Feedback Control for Grasping and Manipulation, Visual Servoing via Advanced Numerical Methods (G. Chesi and K. Hashimoto Eds.), 査読有, pp. 39-53, Springer, 2010
5. Taku Senoo, Akio Namiki and Masatoshi Ishikawa, Ball Control in High-speed Throwing Motion Based on Kinetic Chain Approach, Robotics 2010 Current and Future Challenges (H. Abdellatif Eds.), pp. 109-122, INTECH, 2010
6. Yuji Yamakawa, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa and Makoto Shimojo, Knotting a Flexible Rope using a High-speed Multifingered Hand System based on Synthesis of Knotting Manipulation Skills, Robotics 2010 Current and Future Challenges (H. Abdellatif Eds.), pp. 149-166, INTECH, 2010
7. Satoru Mizusawa, Akio Namiki, Taku Senoo and Masatoshi Ishikawa, Tweezers Type Manipulation by a Multifingered Hand Using a High-speed Visual Servoing, Cutting Edge Robotics 2010, pp. 395-410, INTECH, 2010

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mec2.tm.chiba-u.jp/~namiki/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

**並木 明夫 (NAMIKI, Akio)**

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40376611