

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009 ～ 2012

課題番号：21246039

研究課題名（和文）

多指ハンド双腕ロボットによる高次機能タスク実現のための制御と情報処理

研究課題名（英文）

Control and Signal Processing for Multi-fingered Dual-arm Robots to Realize Dexterous Manipulations

研究代表者

早川 義一 (HAYAKAWA YOSHIKAZU)

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：60126894

研究成果の概要（和文）：

本研究で得られた成果は、(1) 多指ハンドによる安定な把持条件（3次元）を理論的に明らかにし、最適な把持点の探索問題と把持力決定問題を最適化問題として解く方法を提案した。

(2) 上腕サイズの曲面状触覚センサを介護支援ロボットの触覚ガイドに応用し、その有効性を確認した。(3) 多指ハンドによる鋏の把持と開閉、毛筆および硬筆の把持と習字を単腕の多指ハンドで、折り紙の山折りを双腕の多指ハンドで実現した。(4) アームロボット（6自由度）2機と3本指ハンドロボット（1指3自由度）2機を合体させた双腕ロボットシステムを構築し、上記課題の実用化検証に用いたが、関節自由度の配分や指先の柔軟性などが新たな課題として浮上した。

研究成果の概要（英文）：

The obtained results in this study are following; (1) some stability conditions of multi-fingered hand grasp (three-dimensional case) has been clarified theoretically, and a decision method has been proposed which searches optimal grasping positions and forces. (2) A curved surface tactile sensor with the upper arm size has been applied to guide a nursing care robot. (3) It has been succeeded that the single hand robot with three multi-fingers manipulates scissors and writes calligraphy and penmanship, and the dual hands robot with multi-fingered hands makes the folded paper. (4) A dual-arm robot system was composed of two arm robots (each has 6 degrees of freedom) each of which has a hand with three fingers (each has 3 degrees of freedom) to be used for the practical application verification of issues above, but such flexibility of the fingertip and allocation of joint degrees of freedom have emerged as new challenges.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	20,600,000	6,180,000	26,780,000
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2012年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
総計	33,700,000	10,110,000	43,810,000

研究分野：システム制御工学

科研費の分科・細目：機械工学、 機械力学・制御

キーワード：ロボット制御、多指ハンド、運動制御、センサ情報処理、学習制御

## 1. 研究開始当初の背景

ロボットハンドの研究は古くからなされているが、実用化に至っているものは製造工場におけるマニピュレータロボットの手先ツールである「グリップ」のみといても過言ではない。グリップの使命は整えられた作業環境下での比較的単純なタスクを高精度に遂行することであり、各々のタスクに特化した機構、アクチュエータと制御方法、センサと情報処理方法を有することになる。

ヒューマノイドロボットのハンド開発には2つのアプローチがあると考えられる。一つは、各々の高次機能タスクに特化したハンドを複数備え、要求されるタスクに合わせて最も適したハンドを選択する「千手観音型アプローチ」であり、他の一つは、単一の多指ハンドロボットを用いて、どのようなタスクにも制御、情報処理、行動計画によって対処する「汎用型アプローチ」である。本研究は後者のアプローチを採るものである。

多指ハンドロボットは、運動の自由度が極めて多いこと、運動の拘束条件が頻繁に変化することなどによって、数式モデルに基づく制御理論的アプローチが敬遠されて、実機検証も困難な状況であり、理論的な裏づけと実機検証の両面を備えた技術が未だ確立されていない。

## 2. 研究の目的

本研究では、人が指や手を用いて日常行っている高次機能タスクを、多指ハンドを備えた双腕ロボットシステムによって実現するための制御と情報処理の開発を目的とし、以下の項目を実施する。

(1) 安定な把持と巧みな操りを実現する制

御を確立するため、①時変拘束条件付多自由度力学系に適したモデリングと最適制御の考案、②動的ロバスト安定な把持を達成するための力学的考察と制御方法の構築、を行う。

(2) 位置情報と力情報を統合した情報処理を確立するため、①指腹の曲面触覚センサの開発、②曲面触覚センサ、力覚センサ、CCDカメラ視覚情報などの統合処理方法の考案、を行う。

(3) 高次機能タスクの繰り返し動作から最適な行動計画を自立的に獲得する学習メカニズムを構築する。

(4) 上記の制御方法、統合情報処理法、行動計画獲得方法の有効性、問題点を実際の多指ハンドつき双腕ロボットシステムで実機検証する。

## 3. 研究の方法

研究の目的に記した(1)～(4)について、より具体的な研究方法を示す。

(1) ①時変拘束条件付多自由度力学系の制御に適したモデリングと最適制御の構築：

多指ハンドロボットは極めて多くの運動自由度を持ち、また、物体を把持したり、把持物体を環境に押しついたりすることによる運動の拘束条件が頻繁に変化する。このような制御対象に適した数式モデル表現ならびに冗長自由度を適切に利用する最適評価関数の設定が課題となる。

(1) ②動的ロバスト安定な把持を達成するための力学的考察と制御方法の構築：

多指ハンドによる安定な把持に関する研究では摩擦円錐の概念がよく知られている。ここでは動的ロバスト安定な把持という新

しい概念を提案し、その必要十分条件を明らかにするとともに、安定な把持と巧みな操りを実現する制御方法を理論的に構築、確立する。

(2) ①指腹の曲面触覚センサの開発：

指の基節と中節を覆う円筒状の導電性エラストマーを用い、トモグラフィーの原理に基づいた多電極による歪一電気特性の観測値から、物体を把持している指腹内の接触点位置を推定する方法を確立する。特に、接触点が基節と中節に複数ある場合が課題である。

(2) ②曲面触覚センサ、力覚センサ、CCD カメラ視覚情報などの統合処理：

指腹の曲面触覚センサに加え、指先6軸力覚センサ、複眼CCDカメラ視覚情報など、サンプリング時間や時定数の異なる各種センサの情報を統合処理し、多指ハンドロボット、把持対象物、環境という3者の空間的かつ力学的な相対関係を常に正しく監視する情報処理システムを構築する。

(3) 最適な行動計画を自立的に獲得する学習メカニズム：

繰り返し学習制御の枠組みを拡張することにより、高次機能タスクを確実に遂行ながら、たとえばエネルギー最小という評価関数の下に、最適な行動計画を自立的に獲得する学習メカニズムを構築する。

(4) 実機検証：

複眼ロボットと多指ハンドを備えた双腕ロボットシステムを構成し、上記の制御方法、統合情報処理法、行動計画獲得方法の有効性、問題点を実機検証する。

#### 4. 研究成果

研究の目的および方法で記述した項目(1)～(4)ごとに成果を述べる。

(1) 多指ハンド付き双腕ロボットを多様な力学的拘束条件を有する多自由度力学系

としてモデル化し、シミュレータを構築するとともに、多指ハンドによる動的ロバスト安定な把持を達成するための力学的考察と制御方法を考察した。特に、力とモーメントの釣り合いに摂動を与えたときの安定な把持条件(3次元)を理論的に明らかにし、摩擦円錐と発生トルク限界の条件から、最適な把持点の探索問題と把持力決定問題を最適化問題として解く方法を提案した。これらの解析に基づき、安定な把持条件(複数指ロボットの接触点と把持力ベクトル)を実現するための多指ハンドロボットの制御方法を実機検証した。

(2) 曲面状触覚センサ、CCDカメラによるステレオビジョン、2本のマイクロホンによる音源定位と音声認識を統合した認識システムを製作し、センサフィードバックおよび人間-ロボット間のインタフェースとして有効に使えることを確認している。特に曲面状触覚センサを介護支援ロボットの触覚ガイドに応用し、触覚センサの有効性を確認した。上腕サイズの曲面触覚センサの小型を試みたが、指サイズの小型化には至らなかった。さらなる小型化には材料や回路などのハードウェアの改良が不可欠である。また、曲面触覚センサ、力覚センサなどの統合情報処理による滑り検出の方法にも挑戦し、多指ハンドの把持・操りのロバスト化に応用することを試みたが、未だ実用化に十分な性能は得られていない。

(3) 日常的な高次機能タスクとして、ナイフ・フォーク、鋏、ねじ蓋の開け閉め、箸、ページめくりなどを想定し、これらの高次機能タスクを制御モード(位置制御、力制御)と接触モード(固定接触、滑り接触、転がり接触)の時系列として表現することを試みた。具体的には、多指ハンドによる鋏の把持と開閉、毛筆および硬筆の把持と習字を単腕の

多指ハンドで、折り紙の山折りを双腕の多指ハンドで実現した。缺については準静力学的な解析によって、位置と力のハイブリッド制御を、毛筆と硬筆については指関節のコンプライアンス制御と腕関節の位置サーボによって、目的を達成している。また、折り紙では、タスク動作をよりロバストにするための学習方法や視覚フィードバックが課題となっている。

(4) 複眼ロボットと多指ハンドを備えた双腕ロボットシステムを構築した。具体的には、アームロボット (6 自由度) 2 機と 3 本指ハンドロボット (1 指 3 自由度) 2 機を合体させたものである。構築した双腕ロボットシステムは項目 (1) ~ (3) の実用化実証に用いられたが、実用化にはハードウェアに関する課題として、関節自由度の配分や指先の柔軟性などが新たに浮上した。

## 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 16 件)

- ①白岡 貴久, 郭 士傑, 橋本 和信, 向井利春; ポリマー材料を用いた静電容量型面状センサの開発 (測定精度と空間分解能両立構造の提案), 日本機械学会論文集 (C編), 査読有, vol.79, 2013, pp.304-313
- ② S.M.M. Rahman and R. Ikeura; Weight-perception-based novel control of a power-assist robot for the cooperative lifting of light-weight objects, International Journal of Advanced Robotic Systems, 査読有, vol.9, 2012, pp.1-13
- ③K. Fujimoto, S. Sakai and T. Sugie; Passivity based control of a class of Hamiltonian systems with nonholonomic constraints, Automatica, 査読有, vol.48, 2012, pp.3054-3063
- ④T. Mukai et al.; Realization and Safety Measures of Patient Transfer by Nursing-Care Assistant Robot RIBA with Tactile Sensors, Journal of Robotics and Mechatronics, 査読有, vol.23,2011, pp.360-369
- ⑤ S. Satoh and K. Fujimoto; Repetitive control of Hamiltonian systems based on

variational symmetry, Systems and Control Letters, 査読有, vol.60, 2011, pp.763-770

⑥S.M.M. Rahman, R. Ikeura and H.Sawai; Design and control of a power-assist robot system for lifting objects based on human's unimanual and bimanual weight discrimination, International Journal of Assistive Robotics and Systems, 査読有, vol.11, 2010, pp.11-29

⑦中島弘道, 河本満, 伊藤雅紀, 向井利春; 反射板を用いた2本のマイクによる2音源の2次元位置推定, 計測自動制御学会論文集, 査読有, vol.45, 2009, pp.664-670

[学会発表] (計 33 件)

①大岡寛幸, 中島明, 早川義一; 多指ハンドロボットを用いた硬筆の把持および運筆の制御, 第55回自動制御連合講演会 予稿集(京都大学, 京都府), 査読無, 2012.11.17-18

②Z. Hao and K. Fujimoto; Approximate solutions to the Hamilton-Jacobi Equations for generating functions with a quadratic cost function with respect to the input, IFAC Workshop on Lagrangian and Hamiltonian Methods for Nonlinear Control (Bertinoro, Italy), 査読有, 2012.8.29-31, pp.194-199

③T. Mukai, S. Hirano, M. Yoshida, H. Nakashima, S.Guo and Y. Hayakawa; Whole-Body Contact Manipulation Using Tactile Information for the Nursing-Care Assistant Robot RIBA, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (San Francisco, USA), 査読有, 2011.9.25-30, pp.2445-2451

④A.Nakashima and Y.Hayakawa; Stability Analysis of Multi-Fingered Grasp Under Destabilizing Gravity Effect, Proceedings of the 18th World Congress, IFAC (Milano, Italy), 査読有, 2011.8.28-9.2, pp.14667-14674

⑤後藤拓哉, 中島明, 早川義一; 多指ハンドロボットによるはさみの操り, 日本機械学会都会支部第60期総会講演会 (豊橋技科大, 愛知県), 査読無, 2011.3.14-15,

⑥A.Nakashima, T.Uno, Y.Hayakawa, et al; Synthesis of Stable Grasp by Four-Fingered Robot Hand for Pick-and-Place of Assembling Parts, 5th IFAC Symposium on Mechatronic Systems (Cambridge, USA), 査読有, 2010.9.13-15, pp.732-738

⑦A.Nakashima, Y.Yoshimatsu and Y.Hayakawa; Analysis and Synthesis of Stable Grasp by Multi-Fingered Robot Hand with Compliance Control, IEEE Multi-C

onference on Systems and Control (Pacific Yokohama, (Kanagawa), 査読有, 2010. 9.8-10, pp.1582-1589

〔図書〕 (計 0 件)

〔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 なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

早川 義一 (HAYAKAWA YOSHIKAZU)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60126894

### (2) 研究分担者

池浦 良淳 (IKEURA RYOJYUN)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20232168

向井 利春 (MUKAI TOSHIHARU)

理化学研究所・イノベーション推進センター・チームリーダー

研究者番号：80281632

藤本 健治 (FUJIMOTO KENJI)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10293903

### (3) 連携研究者 なし