

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 1日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21680019

研究課題名（和文）滑り動触覚と高視力調節機構を有するヒューマノイドによる柔軟物認識操作機能の研究

研究課題名（英文）Research on recognition-manipulation system of deformable object for humanoid robot with adaptive high-resolution vision and dynamic slipping sensors.

研究代表者

岡田 慧（OKADA KEI）

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号：70359652

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は多指ハンド、高視力ステレオ視覚、柔軟物モデリング、形状認識、操作計画、動作制御のハードとソフトの両面の革新を通じて、従来のコップ等の単純形状の剛体だけでなく、タオルや衣類などの複雑、非剛体の物体が扱えるロボットの認識操作手法を明らかにするものであり、柔軟物のシミュレーション、三次元色距離画像センサを用いた認識手法、タオルの掴み展開動作の認識行動制御法等、当初予想された認識操作手法に関する研究成果に留まらず、失敗の認識と復帰に注目した行動記述制御機構や行動経験の蓄積からの認識動作の適応修正機構等、個々の動作は不完全で失敗があっても経験から学びつつ最終的にタスクを完遂するような行動レベルを対象とした新しいタイプの学習知能の研究が展開されつつある。さらに、本研究課題に触発され海外でも同様の布衣類操作研究が開始されるなど、本研究を契機として家事支援ロボットの新しい応用領域が切り開かれるなど波及効果も大きい。

研究成果の概要（英文）：

The objective of this research is to understand recognition-manipulation methodology that is able to handle not only simple-rigid object such as a cup, but also complex and deformable towels and clothes through an innovation in both hardware and software aspects including multi-fingered hand, high-resolution stereo vision, deformable object modeling, shape recognition, manipulation planning and motion control. In addition to the research results which are listed on the original research plan, including deformable object simulation, perception algorithm using color-depth image sensor, manipulation action control on towel grasp task, we have investigated new type of intelligence mechanism that the robot learns from experiments with action description and control mechanism for failure detection and recovery. Finally, influence of this research is so great that there are several researchers who started cloth manipulation research inspired by this subject.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010 年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
2011 年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
総計	16,400,000	4,920,000	21,320,000

研究分野：知能ロボット

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：ロボティクス、柔軟物操作、器用ハンド、指先感覚、高視力視覚、ヒューマノイド、双腕操作、爪先機構

1. 研究開始当初の背景

近年、人が生活する環境で人を支援するロボットの研究が発展しつつある。特に家庭内で物を持ってきたり、片付けたりするタスクは、物体認識、行動計画生成、実時間制御の各機能の向上とそのシステムの統合が求められ、国内外で積極的に研究が進められている。申請者も等身大ヒューマノイドを用いた認識行動システムの構成法、視覚注意生成法を提案し、家事支援タスクを通じて世界的に評価の高い成果を挙げてきた。しかし、これらの研究における認識、行動、制御技術は、剛体を対象とした従来研究の延長にあり、衣服やタオルなどの柔軟物の扱いは家事介助支援タスクにおいて必要不可欠にも関わらず、扱うことができていない。柔軟物の認識操作には視触覚センサ・デバイス、状態表現法、物体認識、操作計画とロボティクス全分野にわたった技術革新が必要な状況である。

例えば一般的なロボットの視覚センサ(画角 70° , 640×480 画素)の視力は 0.15 である。手元 (40cm 先)での空間分解能はロボットの 4.3mm に対し、視力 1.0 の人間のそれは 0.3mm であり、手に持った柔軟物の質感をみるには視力の大幅な向上が必要なことがわかる。同様に指先の触覚に関しても、例えば人間の指先の圧覚の閾値が $0.3\text{--}0.5\text{g}/\text{mm}^2$ 程度で、触2点の分別閾が 5mm 以下 (Weinstein '68)であるなど精度、密度ともに大きな差がある。

知能化技術面では、剛体を対象にした形状モデルに基づいて構築されてきた物体認識、行動計画等の従来のロボティクスではなく、柔軟物を記述する形状モデリング法を確立し、この新しいモデルに対応した物体認識、操作計画法のロボティクス体系の再構築が必要になっている状況であった。

2. 研究の目的

本研究は、ヒューマノイドによる柔軟物の認識操作手法の確立を目的とし、コンピュータアニメーション分野で研究が進む柔軟物モデリングと高速シミュレーション技術を基盤とした形状認識法と操作計画法の各ソフトウェア・アルゴリズムを構築し、これを実現するためのハードウェアプラットフォームの拡張として、すべり覚がわかる指先と掌関節を特徴とする多指ハンド、ズーム機能による高視力ステレオ視覚、テクスチャのない布の距離情報を取得するための投射型三次元視覚の研究を行い、これらのソフト、ハード両面の要素技術を統合して等身大ヒューマノイドによる柔軟物認識操作行動を実現する。

柔軟物タスクにおける基本動作として、タオルをつかみ展開する、洗濯物をたたみハンガーにかける、衣類を人に着せボタンをかける、を取り上げる。この基本動作を年度毎にシミュレーション及び実ロボットに実装し要素技術の検証と修正を行う。最終年度にこれらを組み合わせた統合システムを構築し、家事・介助支援タスクを通じて開発した各手法を評価する。

3. 研究の方法

本研究の方法は、形状認識法と操作計画法の各ソフトウェア・アルゴリズムの構築と、これを実現するための多指ハンド、高視力ステレオのハードウェアプラットフォームの拡張を行う。具体的には動触覚を持った多指ハンドと高視力ステレオ視覚からなるセンサ・デバイス研究と、柔軟物のモデル化、形状認識、操作計画、動作制御の認識操作知能の研究に取り組みハードとソフトの両面からこの課題の解決を図り、さらに研究してきたソフト、ハード両面の要素技術を統合して等身大ヒューマノイドによる柔軟物認識操作行動を実現することで、提案手法の有効性を評価する。

4. 研究成果

ハードウェア面の成果として、爪先構造と分布触覚を有する多指ハンドの開発と、高視力距離画像システムの開発を行った。

多指ハンド開発では、爪先構造と分布触覚センサを特徴とする多指ハンドの開発を開発し、また、多指ハンドの指腹に触覚センサを取り付け、また、その爪先の機構を交換可能な構成とすることで、テーブル上の微笑物体をつまみあげる為の動作に必要な感覚機構と、爪先の構造を明らかにした。微笑物体の例としてM3ネジを取り上げ、このような従来のロボットハンドでは扱いが困難な小さい物体でも、開発した多指ハンドの指先構造、分布触覚により転がし操作と、操作時の物体位置の認識が可能であることを確認した。

高視力距離画像システムとしては、赤外光カメラと可視光カメラを用いた色付き三次元視覚認識を開発した。これはテクスチャのない布に対する距離計算を可能にするため、急速に実用化が進む超小型プロジェクタを利用してランダムパターンを赤外光投影し赤外線カメラで距離をこれを計測する仕組みであり、可視光カメラで対象の色情報を獲得しながら距離情報も計測するセンサシス

テムを構築した。

さらに、ステレオ視角システムに対して距離生成カメラを追加することで、より多点で精度のよい距離情報の取得を可能とした。また2枚のステレオ画像情報から距離情報への色情報の対応付けに関する新しいアルゴリズムを提案した。

認識操作ソフトウェア面の成果としては、視触覚統合による柔軟物体認識、多指掌軸ハンドによる物体把持計画、複雑操作の動作計画を明らかにした。

視触覚統合による柔軟物体認識としては視覚による形状抽出と指先感覚による検証に基づく柔軟物形状認識として、色領域抽出法、動的輪郭追跡法、三次元特徴点検出法を組み合わせた非剛体の三次元形状認識法を構築した。これにより、従来の剛体を仮定した物体認識法では困難であった多、両手で布の端を持てているかの認識や、ロボット次に掴むべき布の端点の位置の認識が可能になった。

多指掌軸ハンドを用い任意形状の対象物に対する把持計画として、入力となる三次元視覚情報から、フォースクロージャを考慮した把持姿勢探索、ならびに、その対象物を持ち替え操作するための最適なシーケンスを出力し、実際の等身大ヒューマノイドロボットを用いて、実証実験を行うまでのシステムを構築した。これにより、どのような形状の対象物でも任意の状態に遷移させるための把持と操作を生成できる技術を確認した。

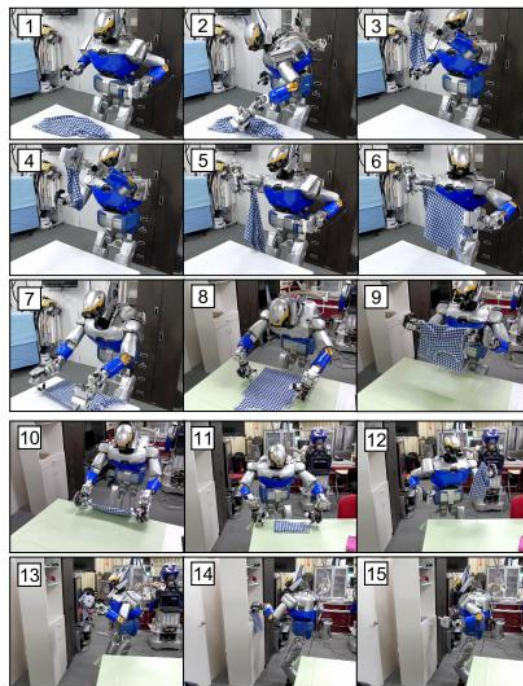
さらに、複雑操作の動作計画として、ロボットの動き(a)に対する環境の変化(e)の情報が必要になるが、布操作のような複雑な対象物の場合には失敗する可能性がある。そこで、ある動き(a)に対する環境の変化を成功した場合(e')と失敗した場合(e'')に分けて全ての可能性を出力しこれをまとめた動作遷移モデルを生成し、これにより現在の状態(S)から環境の変化(e)を繰り返し目標状態(E)に遷移するための動作(a)の系列を、途中で失敗した場合も含めて対応できる動作実行制御機構の構成法を明らかにした。

これらのハードウェア、ソフトウェアの両面の知見に基づいたヒューマノイドによる動作検証実験として、右図に示すようなタオルつかみ・展開動作による検証実験と、洗濯物たたみ動作による検証実験を行った。

タオルつかみ・展開動作による検証実験では、等身大ヒューマノイドが机の上に置かれたタオルつかみ展開する動作を構築し、開発したセンサや認識処理の実世界・実動作にお

ける有効性を検証した。視覚による柔軟物形状認識手法を柔軟物操作における各動作の成功、不成功を判断する動作検証プロセスに適用することで、柔軟物操作タスクの成功率の向上に寄与することがわかった。

また、洗濯物たたみ動作による検証実験では、距離画像システムによる布の概形状の獲得法と、双臂を用いた洗濯物の、つまみ上げ、



図： Humanoid robot accomplished to sort the blue heck-pattern sleeveless shirt.

ひろげ、たたみといった感覚動作法の有効性を確認した。また、個々の動作をネットワーク記述で接続することで、柔軟物体の認識操作に必要な不可欠な失敗時の復帰動作の記述が容易になるという知見を得た。

本研究の成果をまとめると多指ハンド、高視力ステレオ視覚、柔軟物モデリング、形状認識、操作計画、動作制御のハードとソフトの両面の革新を通じて、従来のコップ等の単純形状の剛体だけでなく、タオルや衣類などの複雑、非剛体の物体が扱えるロボットの認識操作手法を明らかにする計画であり。これまでに柔軟物のシミュレーション、三次元距離画像センサを用いた認識手法、タオルの掴み展開動作の認識行動制御法等、当初予想された認識操作手法に関する研究成果に留まらず、失敗の認識と復帰に注目した行動記述制御機構や行動経験の蓄積からの認識動作の適応修正機構等、個々の動作は不完全で失敗があっても経験から学びつつ最終的にタスクを完遂するような行動レベルを対象とした新しいタイプの学習獲得能の研究が展

開されつつある。さらに、本研究課題に触発され米国 UC バークレイ校等でも同様の布衣類操作研究が開始されるなど、本研究を契機として家事支援ロボットの新しい応用領域が切り開かれるなど波及効果も大きい課題であった。

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 5 件)

1 垣内洋平, 岡田慧, 稲葉雅幸:色ヒストグラムを用いたカラー距離画像の高速位置合わせによる未知物体のモデリングを伴う生活環境地図作成,日本ロボット学会誌, Vol.29, No.8, pp.694--701, 2011. (査読あり)

2 Hiroko KOBORI, Youhei KAKIUCHI, Kei OKADA, Masayuki INABA:Recognition and Motion Primitives for Autonomous Clothes Unfolding for Humanoid Robot, in Intelligent Autonomous Systems 11, pp.57--66, 2010. (査読あり)

3 Yohei Kakiuchi, Ryohei Ueda, Kazuya Kobayashi, Kei Okada, Masayuki Inaba:Working with Movable Obstacles Using On-line Environment Perception Reconstruction Using Active Sensing and Color Range Sensor, in Proceedings of The 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1696--1701, 2010. (査読あり)

4 Kei Okada, Mitsuharu Kojima, Satoru Tokutsu, Yuto Mori, Toshiaki Maki, Masayuki Inaba:Integrating Recognition and Action Through Task-Relevant Knowledge for Daily Assistive Humanoids, Advanced Robotics, Vol.23, No.4, pp.459-480, 2009. (査読あり)

5 Kazuya Kobayashi, Nobuyuki Ito, Ikuo Mizuuchi, Kei Okada, Masayuki Inaba: Design and Realization of Fingertiped and Multifingered Hand for Pinching and Rolling Minute Objects, in Proceedings of the 2009 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp.263-268, 2009. (査読あり)

[学会発表] (計 5 件)

1 Atsushi Tsuda, Yohei Kakiuchi, Ryohei Ueda, Shunichi Nozawa, Kei Okada, Masayuki

Inaba:Grasp, Motion, View Planning on Dual-arm Humanoid for Manipulating In-Hand Object, in IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts, 2011.

2 小堀 浩子, 垣内 洋平, 岡田 慧, 稲葉雅幸:認識動作プリミティブの結合とカラー距離センサの利用による衣類展開行動, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'10 講演論文集, 2A2-B16, 2010.

3 津田敦史, 垣内洋平, 野沢峻一, 植田 亮平, 伊藤 司, 岡田慧, 稲葉雅幸:ヒューマノイドによる双腕物体操作を用いた3次元形状テクスチャモデルの自動取得, 第11回SICE システムインテグレーション部門講演会講演論文集, 1G2-5, 2010.

4 小林 一也, 野沢 峻一, 岡田 慧, 稲葉雅幸:等身大ヒューマノイドにおける爪と指尖形状を持つ多指ハンドの開発とつまみ上げ・指先転がし動作の実現, 第27回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2S1-02, 2009

5 小堀 浩子, 岡田 慧, 稲葉 雅幸:ヒューマノイドロボットの洗濯物片付けにおける衣類の三次元概要認識による把持点の検出と動作の検証, 第27回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, 2S1-01, 2009

[その他]

ホームページ等

<http://www.jsk.t.u-tokyo.ac.jp/~k-okada>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡田 慧 (OKADA KEI)

東京大学・大学院情報理学系研究科・
准教授

研究者番号: 70359652

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし