

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560293

研究課題名(和文) 拡張現実感覚提示と作業反力提示によるロボットハンドの遠隔操作

研究課題名(英文) Robot Hand Teleoperation by force feedback and visual feedback with augmented reality

研究代表者

小林 太 (Kobayashi, Futoshi)

神戸大学・システム情報学研究科・准教授

研究者番号：50314042

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ハンド/アームロボットの遠隔操作において、操作者に操作感覚を提示するシステムを構築することを目的とし、ロボットハンドにおける把持力を人間の手指に直接提示するだけでなく、あたかも自身の手で把持物体を把持しているように視覚的に仮想物体を提示した。本目的を達成するため、具体的な研究項目として、作業反力提示装置の開発、拡張現実感技術を用いた把持物体提示装置の開発、システム統合化、を実施した。ハンド/アームロボットの遠隔操作において、把持感覚提示装置により提示が有効であるか、比較実験を行った所、力覚と視覚を提示することにより、物体を掴んだ感覚を操作者へと与えることが可能となった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research work is to construct a teleoperation system for the hand/arm robot with a grasping sensation display. The constructed system displays not only the haptic sensation measured, but also visual sensation to an operator. The research topics for achieving the aim are, (1) development of the force feedback device for five human fingers, (2) development of the visual feedback device by augmented reality, and (3) system integration. In the first topic, a force feedback device with SMA brake is constructed. In the second topic, the human hand is detected by using the optical and inertial motion captures, and then a virtual object is presented on a video see-through head mounted display. In the third topic, the teleoperation system with the force feedback device and the visual feedback device is constructed. The developed teleoperation system could show the grasping sensation to the operator by displaying the haptic and visual sensation through some grasping experiments.

研究分野：工学

キーワード：ロボットハンド 遠隔操作 把持感覚提示 反力提示 視覚提示 拡張現実感技術 ヘッドマウントディスプレイ モーションキャプチャ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットは産業分野に留まらず、災害復興・支援分野、医療分野等の様々な分野において活躍している。そのような分野では複雑な作業が含まれるため、単一機能しか持たないエンドエフェクタではなく、多様な機能を持つマルチエンドエフェクタをロボットに搭載することが望ましい。我々は、産官学が参画するロボット研究会においてハンド/アームロボットの開発を行い(園田祥、小林太、他6名、2010) 操作者である人間が遠隔で作業可能なロボットハンド遠隔操作システムの構築を行ってきた。この遠隔操作システムでは、モーションキャプチャデータグループ CyberGlove とモーションセンサを操作者が手と腕に装着し、操作者の手腕の動きに合わせ、ハンド/アームロボットを動作させた(小林太、長谷川洸、他6名、2011)。構築したロボットハンド遠隔操作システムを用い、基礎実験を行ったところ、操作者には物体を把持した感覚がなく、作業時にロボットハンドの把持力が変化し、物体に多大な影響を与えることが分かった。そこで、2指用作業反力提示装置を開発し、ロボットハンド作業中の作業反力を操作者にフィードバックすることが可能となった(F. Kobayashi, G. Ikai, et. al., 2011)。このようにハンド/アームロボットの遠隔操作において、2指用作業反力提示装置を用いることで、操作者への作業反力の提示が可能となったが、開発した2指用作業反力提示装置では形状記憶合金を活用して操作者の指の屈曲を拘束することで作業反力を提示しているが、応答速度が遅く、ロボットハンドに比べ操作者の指は大きく動くこととなった。また、作業反力の提示だけでは、体性感覚から得られる手腕の状態と視覚から得られる手腕の状態とに矛盾が生じ、操作者による直感的な操作の妨げとなった。そのため、ハンド/アームロボットの遠隔操作において、操作感覚を作業反力とともに視覚により、操作者に提示するシステムを構築する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究は、ハンド/アームロボットの遠隔操作において、操作者に操作感覚を提示するシステムを構築することを目的とする。操作者の手腕によるロボットハンドの遠隔操作では、操作者が自身の手腕を違和感なく動作させることが重要である。そのため、ロボットハンドにおける把持力を人間の手指に直接提示するだけでなく、あたかも自身の手で把持物体を把持しているように視覚的に仮想物体を提示する。

## 3. 研究の方法

上記目的を達成するため、下記3項目について研究を行う。

### (1) 作業反力提示装置の開発

背景で述べたように、これまでに2指用の作業反力提示装置を開発しており、親指末節と中指基節および中指末節の3節に力覚提示が可能となった。この提示装置は、形状記憶合金(Shape Memory Alloy: SMA)を活用したSMAクラッチブレーキを搭載しており、SMAクラッチブレーキを貫通する力伝達ワイヤにより、指の屈曲を拘束することができる。そこで、既存の提示装置を拡張し、5指用提示装置の試作を行い、検証する。また、開発した2指用作業反力提示装置は応答速度が遅く、直感的な操作のためには応答速度の向上が必要とされる。そこで、SMAにかかる電圧を計測回路により計測し、温度との関連を求め、その電圧値に基づいて通電を制御する制御ソフトウェアを作成する。

### (2) 拡張現実感技術を用いた把持物体提示装置の開発

ハンド/アームロボットの遠隔操作において、作業反力の提示だけでは操作者の操作に違和感が生じる。

把持物体提示装置では、あたかも自身の手で把持物体を把持しているように認知することを目指し、拡張現実感(AR)技術を用いる。ARは、現実環境に付加情報としてバーチャルな物体を電子情報として合成提示することを特徴としており、AR技術を活用することにより、自身の手先に把持物体があたかも存在するように本装置で視覚的に提示することが可能となる。

初めに、仮想物体を適切な位置に提示するため、3Dモーションキャプチャにより、操作者の手の位置を計測する。ここで、3Dモーションキャプチャは光学的方法を用いることとし、手の位置を計測するため、上腕・前腕・手の3箇所光学式マーカーを設置し、操作者の肩・肘・手首の関節角度を計測する。また、3Dモーションキャプチャでは、手や腕が操作者の体に隠れてしまい、計測ができなくなる場合があり、操作者の腕に装着可能なモーションセンサを活用し、安定した操作者の手先位置検出を行う。

次に、操作者の手先位置が検出可能となった後、仮想物体をヘッドマウントディスプレイ上に提示する提示用画像生成を行う。ここで、提示する仮想物体の大きさ等は、事前にデータベースに対象物体を登録し、マッチングをとることにより、正確な大きさの仮想物体を提示する。

### (3) システム統合化

把持物体提示装置の作成後、作業反力提示装置と把持物体提示装置を用い、システム統合化を行う。作業反力提示装置における応答速度の向上および視覚への把持物体提示により、操作者はハンド/アームロボットと把持物体との接触情報や相対位置情報を認識することが可能となり、ハンド/アームロボットの容易な遠隔操作が可能となる。

#### 4. 研究成果

上記に示した研究方法について、それぞれの成果を述べる。

##### (1) 作業反力提示装置の開発

これまでに開発した2指用の作業反力提示装置を拡張し、図1に示す5指用提示装置の試作を行い、検証した。5指用提示装置は、手甲部、親指部、人差指部、中指部、薬指部、小指部の6部分により構成され、操作者の親指の末節に1点、親指を除く4指の指先及び指の基節にそれぞれ2点の計9点に対して力覚提示を行っている。また、本装置は形状記憶合金（Shape Memory Alloy: SMA）を活用したSMAクラッチブレーキを搭載しており、SMAクラッチブレーキを貫通する力伝達ワイヤにより、指の屈曲を拘束することができる。

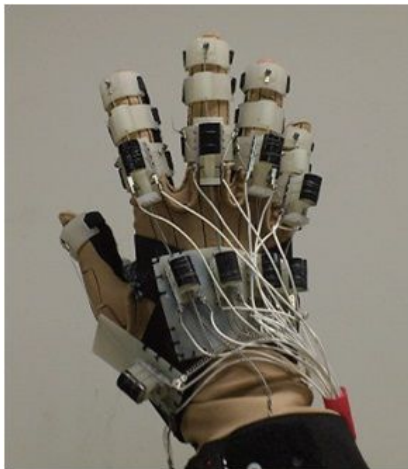


図1 5指用作業反力提示装置

次に、SMAにかかる電圧計測によるSMAクラッチブレーキ制御を行なった。ここで、SMAクラッチブレーキの発揮力とSMAにかかる電圧との関係をあらかじめ計測した。これにより、SMAクラッチブレーキに目標とする力を発揮させることが可能となる。

##### (2) 拡張現実感技術を用いた把持物体提示装置の開発

仮想物体を適切な位置に提示するため、3Dモーションキャプチャにより、操作者の手の位置を計測した。ここで、光学式モーションキャプチャと慣性式モーションキャプチャを併用することで、手の姿勢に依存せず位置計測可能となった。慣性式モーションキャプチャはZMP社製のIMU-Zセンサを、光学式モーションキャプチャはNaturalPoint社のOptiTrackを用いた。IMU-Zセンサは操作者に直接装着する。3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、3軸地磁気センサが内蔵されているために、手の姿勢に依存することなく計測が可能である。OptiTrackは赤外線LEDが搭載されており、測定対象に赤外線反射マーカーを取り付け、その反射を撮影すること

でリアルタイムにマーカーの位置を測定可能である。構築した計測システムを用いた手位置計測実験を実施した所、安定して操作者の手の位置を計測することが可能であることを確認した。

操作者の手先位置が検出可能となった後、仮想物体をビデオスルー型ヘッドマウントディスプレイ上に提示する提示用画像生成を行った。ヘッドマウントディスプレイに搭載されたカメラから取得したイメージ（図2a）をヘッドマウントディスプレイに映すことで操作者は普通の視界と変わらない映像を見ることが出来る。次に、図2bのように取得したイメージの操作者の手元にロボットハンドが把持した物体を3次元CGであるバーチャルオブジェクトとして提示した。ここで、イメージに映っている操作者の手に違和感無くバーチャルオブジェクトを把持しているように提示するため、操作者に正方形マーカーを設置し、イメージ上のマーカーに重ね合わせるようにバーチャルハンドを提示することとした。これにより、操作者の手の移動によりマーカーも同時に移動することとなり、操作者の手に合わせ、バーチャルハンドも移動することができた。



(a)HMD ビデオイメージ



(b) 仮想物体提示

図2 把持物体提示装置

##### (3) システム統合化

(1)と(2)で開発した作業反力提示装置と把持物体提示装置を統合し、図3のように、これらを用いたハンド/アームロボット遠隔操作システムを構築した。システムはモーションキャプチャシステム、ロボットハンドコントロールシステム、力覚提示システム、および視覚提示システムの4つのサブシステムから構成される。

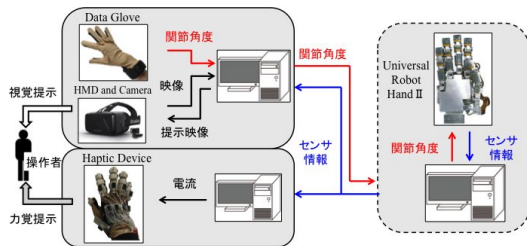


図3 把持感覚提示装置を用いた  
ハンド/アームロボット遠隔操作システム

#### モーションキャプチャシステム

モーションキャプチャシステムはデータグローブ及び PC から構成される。データグローブは Immersion 社製の CyberGlove を使用する。データグローブを装着した操作者の手の関節角度を取得 (16 関節) し、ネットワークを介してロボットハンドコントロールシステム、及び視覚提示システムへと送信する。

#### ハンド/アームコントロールシステム

ロボットハンドコントロールシステムはユニバーサルロボットハンド II とモータドライバ、各種センサ、および制御用 PC によって構成される。指先には 6 軸力覚センサ、各指腹部には分布型触覚センサが搭載されている。

このシステムは、ネットワークを介してモーションキャプチャシステムから操作者の手のモーションキャプチャデータを受信し、そのデータに基づいて各関節のモータを動作させる。また、ユニバーサルロボットハンド II の指先に搭載された 6 軸力覚センサから、物体との接触・把持の検知を行った結果をネットワークを介して力覚提示システムおよび視覚提示システムへと送信する。

#### 力覚提示システム

力覚提示システムは、作業反力提示装置、ドライバ回路、制御用 PC から構成される。本システムにおいて操作者はデータグローブの上から作業反力提示装置を装着する。ロボットハンドコントロールシステムから送信された 6 軸力覚センサの 3 軸の力の合力が閾値を超えた際に、制御用 PC からドライバ回路へと信号を送信することで作業反力提示装置を駆動させ、操作者へ力覚の提示を行う。

#### 視覚提示システム

視覚提示システムはビデオシースルーHMD、正方形マーカー、及び PC から構成される。ビデオシースルーHMD と拡張現実感技術を組み合わせることで、人間の視覚にその場には無い物体をあたかも存在させるかのように見せることが可能となる。

本システムでは、ロボットハンドが物体を把持した際にロボットハンドが掴んだ物体と同形状の 3DCG (バーチャルオブジェクト) を操作者の手に重ね合わされたバーチャルハンドに提示する。

#### (4) ハンド/アームロボット遠隔操作実験

ハンド/アームロボットの遠隔操作において、把持感覚提示装置により提示が有効であるか、実験を実施した。本実験では、以下の提示方法を設定し、比較した。

- 提示なし
- 力覚提示のみ
- 視覚提示のみ
- 力覚 + 視覚提示

操作者には、初めに a の提示を行い、b~d をランダムに提示した。また、遠隔操作後、表 1 の項目について 7 段階リッカート尺度 (1: 非常にそう思わない~7: 非常にそう思う) で回答してもらった。ここで、操作者は健全な 20 代の男性 9 人である。

表 1 遠隔操作アンケート

No.	アンケート項目
1	物体を掴んでいるように感じることができた
2	物体を掴んだ姿勢を維持しやすかった
3	ロボットハンドで物体を把持したとすぐに判断できた
4	ロボットハンドを操作しやすかった

アンケートの各質問のスコアの平均、最大値及び最小値を図 4~7 に示す。これらの結果より、力覚と視覚を提示することにより、物体を掴んだ感覚を操作者へと与えることが可能となった。

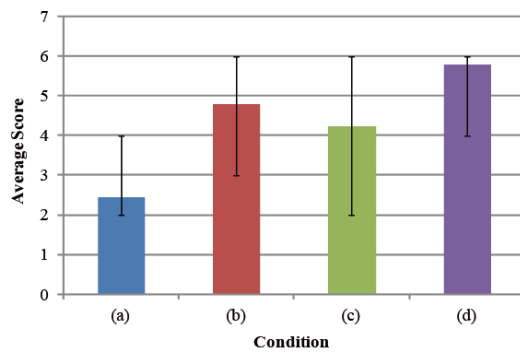


図 4 アンケート項目 1 の回答結果

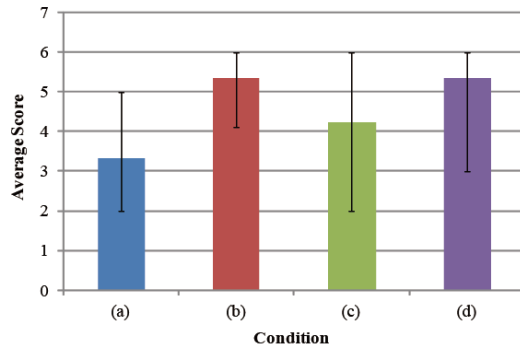


図 5 アンケート項目 1 の回答結果

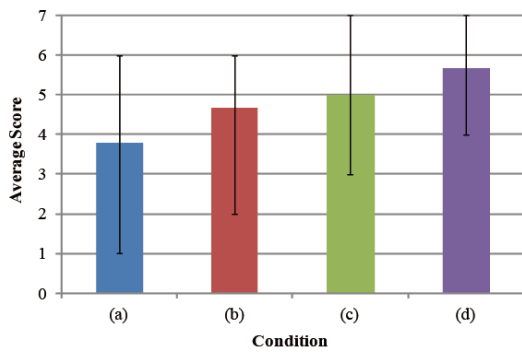


図 6 アンケート項目 1 の回答結果

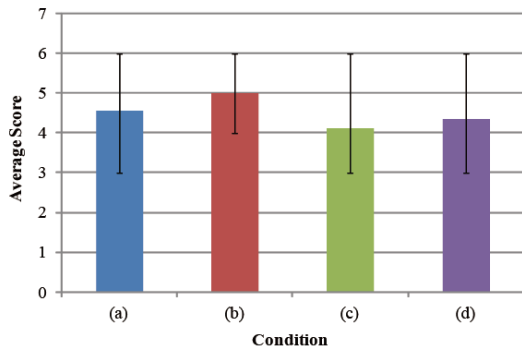


図 7 アンケート項目 1 の回答結果

<引用文献>

園田、小林、他 6 名、ユニバーサルロボットハンド II を用いたハンド/アームロボットシステムの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演、2009

小林、長谷川、他 6 名、人の動作計測によるハンドアームロボットの遠隔操作システムの開発、第 38 回知能システムシンポジウム、2011

F. Kobayashi, G. Ikai, W. Fukui, F. Kojima, Two-Fingered Haptic Device for Robot Hand Teleoperation, Journal of Robotics, Article ID 419465, 2011

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 1 件)

Futoshi Kobayashi, Ko Hasegawa, Hiroyuki Nakamoto, and Fumio Kojima, Motion capture with inertial measurement units for hand/arm robot teleoperation, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 45, No. 1-4, pp. 931-937, DOI: 10.3233/JAE-141927, 2014, 査読有

[学会発表](計 1 2 件)

藤本 公平, 小林 太, 中本 裕之, 小島 史男, ロボットハンド遠隔操作のための把持感覚提示システムの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2015.5.18, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府)

北林 慧一, 藤本 公平, 小林 太, 中本 裕之, 小島 史男, 光学式/慣性式モーションキャプチャを併用したハンド/アームロボットの遠隔操作, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014, 2014.5.27, 富山市総合体育館(富山県)

Kohei Fujimoto, Futoshi Kobayashi, Hiroyuki Nakamoto, Fumio Kojima, Development of Haptic Device for Five-fingered Robot Hand Teleoperation, 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2013.12.17, 神戸国際会議場(兵庫県)

Futoshi Kobayashi, Keiichi Kitabayashi, Hiroyuki Nakamoto, Fumio Kojima, Hand/Arm Robot Teleoperation by Inertial Motion Capture, 2013 Second International Conference on Robot, Vision and Signal Processing, 2013.12.10, 北九州国際会議場(福岡県)

Futoshi Kobayashi, Keiichi Kitabayashi, Hiroyuki Nakamoto, 他 4 名, Multiple Joints Reference for Robot Finger Control in Robot Hand Teleoperation, 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 2012.12.17, 九州大学(福岡県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林 太 (KOBAYASHI, Futoshi)

神戸大学・大学院システム情報学研究所・准教授

研究者番号: 5 0 3 1 4 0 4 2

(2) 研究分担者

中本 裕之 (NAKAMOTO, Hiroyuki)

神戸大学・大学院システム情報学研究所・助教

研究者番号: 3 0 4 7 0 2 5 6