

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249063

研究課題名(和文)人間型ロボットハンドの手全体の力覚提示によるマスター・スレーブシステムの研究

研究課題名(英文) Master-Slave System based on Hand Haptic Interface for Humanoid Hand Robot

## 研究代表者

川崎 晴久 (KAWASAKI, Haruhisa)

岐阜大学・工学部・特任教授・名誉教授

研究者番号：40224761

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 32,000,000円

研究成果の概要(和文)：人間は、指先に限定されず指腹部や掌も活用して物体操作を行う。これまでに開発した多指ハプティックインターフェイスと人間型ロボットハンドの技術を基礎に、4項目の研究を実施した。(1) 複合型ハプティックインターフェイスの構成法、(2) 人間型ロボットハンドの構成法、(3) 手全体の力感覚によるマスター・スレーブ制御、(4) 安全・確実な操作を支援するMSの構成法。

研究成果の概要(英文)：Human manipulate objects using not only fingertips and but also finger pads. Following four research issues based on technologies of our developed multi-fingered haptic interface HIRO III and humanoid robot hands are studied. (1) Constitution method of hybrid hand haptic interfaces, (2) Constitution method of humanoid robot hand, (3) Master-slave control based on force feeling of whole hand, and (4) Constitution method of master-slave system with safe and steady manipulation.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボットハンド ハプティックインターフェイス 遠隔操作 遠隔診断

## 1. 研究開始当初の背景

人間の手を模擬した人間型ロボットハンド (HHR) は、器用に様々な物体を操作できるハンドとして期待が大きい。一方、人間の手の器用さと同程度にロボットが様々な物体操作できる人工知能をもつ段階には至っていない。また、これまでのロボットハンドは指先力や把持力が弱く、人間が通常行う実際の作業での研究が殆ど実施できていない。さらに、実作業でのロボット操作には、滑りも検出できる力覚センサを備えた高出力な人間型ロボットハンドが必要である。

マスター・スレーブによる操作は、操作する人間側がマスターであり、マスターには操作者に力感覚を提示するハプティックインターフェイスがある。HHR は操作されるスレーブとなる。これまでのマスター・スレーブ制御法は、力感覚の提示箇所や制御点は殆ど1点であった。これは、複数の箇所に力覚を提示できるハプティックインターフェイスの研究が進んでいないためである。人間の操作は、指先に限定されず、指腹部や掌も活用して物体操作を行う。このため、人間が自然な感覚で操作できるようにするためのマスター・スレーブシステムの構成法とその制御法の研究開発が求められる。

## 2. 研究の目的

人間は、指先のみならず指腹部や掌を含む手全体での力感覚に基づいて精緻で器用な手作業を行う。人間の代替を期待される HHR は、自律的な手作業ができる技術レベルになく、手全体の力感覚が必要な手作業には、人間の手技をロボットに伝えるマスター・スレーブが実際の有効と期待できる。しかし、人間の手全体への力覚提示デバイスや手全体の力感覚によるマスター・スレーブの研究開発例はない。そこで、自然な操作感覚で HHR を操作できるようにするため、手の力覚受容特性や心理学等の人間科学を基礎としたマスター・スレーブシステムを研究する。本研究の成果は、ヒューマノイドロボットへの作業教示、医療分野での遠隔触診、原子力・海底・宇宙等の極限環境でのロボット遠隔操作など、幅広い応用へ展開できる。

## 3. 研究の方法

申請者のグループでは、人間の5本の指先に3次元の力提示ができる世界初の多指ハプティックインターフェイス HIRO □ を研究開発し、その後、両手作業を可能とする側面設置型多指ハプティックインターフェイス SF-HIRO へと研究を発展させている。また、マスター・スレーブの研究では、手指上肢のリハビリテーション支援システムの研究で、健側の手をマスター、患側の外骨格型ハンドをスレーブとする患者による位置制御型セルフモーションコントロールによるマスタ

ー・スレーブシステムを研究開発し、そのコンセプトとメカトロニクスデザインは国際的に高く評価されている。しかし、これまでの研究は、関節角度制御または指先での力制御に限定したマスター・スレーブであった。人間の操作は、指先に限定されず、指腹部や掌も活用して物体操作を行う。このため、これまでに開発した多指ハプティックインターフェイスと人間型ロボットハンドの技術を基礎に、次項を研究することとした。

- (1) 複合型ハンドハプティックインターフェイスの構成法
- (2) 人間型ロボットハンドの構成法
- (3) 手全体の力感覚によるマスター・スレーブ制御
- (4) 安全・確実な操作を支援するマスター・スレーブシステムの構成法

## 4. 研究成果

- (1) 複合型ハンドハプティックインターフェイスの構成法

指腹部力覚提示デバイスの小型・高性能化に向け、モータ+平歯車+衛星歯車減速機構+ギヤスライダーからなる伝達機構から平歯車をなくした改良を行った、図1に示す指腹部力覚提示デバイスを開発した。本体は、直径12.5mm、長さ17.3mmで、指腹部での提示力は、従来の4Nから6Nに向上し、重量は4.2gと軽量となり、物体操作に十分な提示力となった。

本デバイスを用い、HIRO と組み合わせバーチャルリアリティ環境での物体の把持、操り等の操作ができる複合型ハンドハプティックインターフェイスを構築した。

また、HIRO と操作者との干渉回避に向け、偏光フィルムを用いた複数赤外線測距センサによる手首間距離の計測、最適なセンサ配置法を設計し、手首間距離を用いた干渉回避制御を実現した。これにより、高信頼度なマスター・スレーブシステムが実現できた。

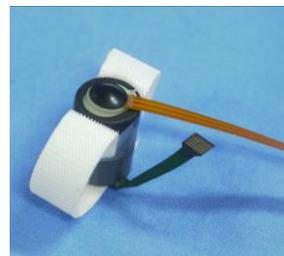


図1 改良した指腹部力覚提示デバイス

- (2) 人間型ロボットハンドの構成法

スレーブ側として、人間型ロボットハンドを装着可能な移動台車付き双腕ロボットを試作し、分布型触覚センサによる圧力中心位置、接触力の計測システムを構築した。また、

図2に示すように、ロボットハンドの指腹部と掌部の接触点位置と接触力を高精度に多点計測可能な分布触覚センサを試作し、その特性を評価した。その結果、物体の把持力、接触点の滑りを検出できることを確認した。また、触覚センサ情報による指先や指腹部の力制御も実現した。

また、多関節ハンドでの高出力化を図るため、モータ、衛星歯車減速機構、ボールネジ、4節リンクから構成する伝達機構の改良により、人間型ハンドサイズで指先50Nの力を出力できる高出力人間型ロボットハンドを開発した。

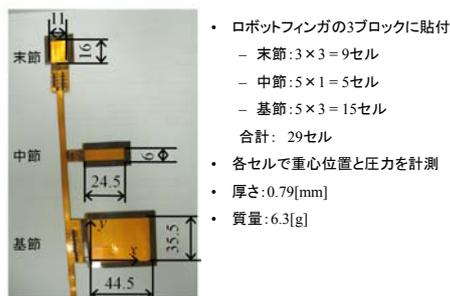


図2 試作した分布型触覚センサ

### (3) 手全体の力感覚によるマスター・スレーブ制御

マスター・スレーブ制御では、スレーブハンドの位置姿勢をマスター側の多指ハプティクスハンドの位置姿勢とすると、操作者が違和感を感じる事が判明した。そこで、スレーブハンドの位置姿勢を操作者の手の位置・姿勢とする制御法を開発し実験評価を行った。この結果、ロボットハンドの位置・姿勢は、ハプティクスハンドの位置姿勢でなく、操作する人間の手の位置姿勢とすることで操作性が改善できることが示された。

また、スレーブ制御では、視覚情報から大凡の形状を推定して物体操作が可能であるが、対象物体の剛性、粘性等の検出が可能になれば、物体の把持・操作性が飛躍的に向上する。そこで、スレーブロボットによる物体の物理パラメータ（剛性、粘性等）を推定するシステムを構築した。

さらに、通信の遅れの影響によりシステムが不安定となることを防止するため、これまで1点での力覚通信で示された通信の遅れを許容する条件を多点へ拡張した遠隔操作制御法を開発し、実験的にその有効性を検証した。

一方で、前述のシステムは自由度が多い複雑なシステムであるので、4指12自由度ハンドの簡易型マスター・スレーブも構築し、接触位置、接触パラメータの推定を行った。作業内容によっては、簡易型が有効であるといえる。

### (4) 安全・確実な操作を支援するマスター・スレーブシステムの構成法

HHRの安全な遠隔操作には、図3に示す人間とロボットとの意志合意形成システムが重要な役割を果たす。図4に示す、無医村や離島等でのHHRを介した遠隔触診を可能するために、意志合意システムの構築を諮った。その一環として、心電センサ、脈波センサ、呼吸波センサ、及び脳波計による計測システム、Kinect距離センサによる外部環境の計測データとロボットの形状モデルを用いた外部環境とロボット間の距離検出システムを開発した。また、スレーブ側の危険操作検出システムの情報を用いた干渉抑制制御手法を開発した。

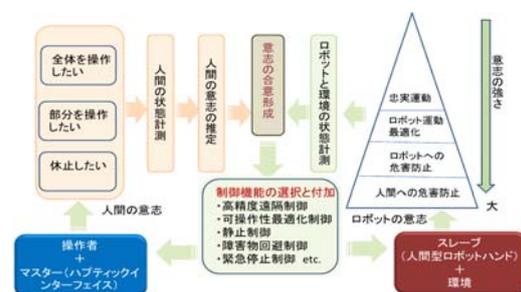


図3 人間とロボットとの意志の合意形成と制御



(1) 遠隔触診システム (2) 触診診断支援システム

図4 遠隔触診システムと触診診断支援システム

マスター・スレーブシステムにおいて、干渉抑制制御手法をスレーブの位置制御と統合し、マスター側の操作支援システムとしての硬さ表示と生体信号による操作者の操作時における状態の観測を行った。また、操作時における堅実性の向上のため、推定誤差が漸近的に零に収束することを保証する非線形外乱オブザーバの理論を構築し、安全・確実な支援を実現するため、スレーブシステムについて外部環境との最短距離やロボットの状態を可視化するシステムを構築した。

さらに、スレーブ側のカメラで取得した対象物形状について、マスター側のユーザに適切な把持位置を提示することを目的に、二次元対象物の最適な把持位置を算出する手法を構築した。指先位置、指先力、曲率、関節ばね剛性から把持の剛性行列を導出し、把持位置と安定性の関係を偏微分であらわし、繰返し計算により最適な把持位置を得た。得られた把持位置は人間の直感に近い結果であることを確認した。

こうした個々の技術を統合することで、安全・確実な操作を支援するマスター・スレーブシステムが構築できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

T. Endo, A. Kusakabe, Y. Kazama, and H. Kawasaki, “Haptic Interface for Displaying Softness at Multiple Fingers: Combining a Side-faced-type Multi-fingered Haptic Interface Robot and Improved Softness-display Devices”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 21, No. 5, pp.2343-2351, DOI: 10.1109/TMECH.2016.2567453, 2016. (査読有)

Satoshi Ueki, Tetsuya Mouri, Takahiro Endo, and Haruhisa Kawasaki, Study on stiffness visualization and safety control based on will-consensus building for tele-palpatation robot system, Artificial Life and Robotics, Published On Line 18, March, Volume 21, Issue 1, pp 31-36, 2016, DOI: 10.1007/s10015-015-0254-5. (査読有)

Takahiro Endo, Haruhisa Kawasaki, A Fine Motor Skill Training System using Multi-fingered Haptic Interface Robot, Int. J. of Human-Computer Studies Vol. 84, pp.41-50, 2015, DOI:10.1016/j.ijhcs.2015.08.006 (査読有)

遠藤孝浩, 川崎晴久, 中川志信, 山下誠治, 土屋陽太郎, 石樽康彦, 側面設置型多指ハプティックインターフェイス、計測自動制御学会論文誌、Vol.51, No.4, pp.251-259, 2015, DOI: 10.9746/sicetr.51.251 (査読有)

遠藤孝浩, 風間祐太, 川崎晴久, “側面設置型多指ハプティックインターフェイスによる柔らかさ提示”, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol. 134, No. 10, pp. 913-920, 2014, DOI: 10.1541/ieejias.134.913 (査読有)

T. Endo and H. Kawasaki, “Bending Moment-based Force Control of Flexible Arm Under Gravity”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 79, pp. 217-229, 2014, DOI: 10.1016/j.mechmachtheory.2014.04.013 (査読有)

Takahiro Endo, Fumitoshi Matsuno, Haruhisa Kawasaki, Force control and exponential stabilisation of one-link flexible arm, International Journal of Control, Vol. 87, No. 9, 1794–1807, 2014 (査読有)

〔学会発表〕(計 20 件)

Tetsuya Mouri, Satoshi Ueki, Haruhisa Kawasaki, Bilateral Tele-operated Hand Robot with Communicational Time Delay,

Proc. of IFAC 2017 World Congress, Toulouse, France, 2017年7月9日~2017年7月14日 (Accepted) (査読有)

Satoshi Ueki, Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Nonlinear Disturbance Observer for Object Grasping/Manipulation by Multi-Fingered Robot Hand, Proc. of The 20th IFAC World Congress, Toulouse, France, 2017 (Accepted) (査読有)

松尾健斗, 村上栄将, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 山本秀彦, 川崎晴久, 毛利哲也, Unityと4指ハンドを用いた仮想物体の力覚提示に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 福島2A1-K09, 2017年5月10日~13日 (査読無)

近藤真二, 村上栄将, 山田貴孝, 佐藤惇哉, 山本秀彦, 毛利哲也, 川崎晴久, 視覚と力覚の提示および接触点位置の推定を伴う遠隔操作による組立作業の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会2017, 福島, 2P1-N05, 2017年5月10日~13日 (査読無)

毛利哲也, 山村響, 藤井裕太, 川崎晴久, 人間型ハンドロボットの通信遅延を有する遠隔操作、日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017、福島、2017年5月10日~13日 (査読無)

上木諭, 毛利哲也, 川崎晴久, “ロボットハンドによる外乱オブザーバを利用した把持制御”, 第17回計測自動制御学会SI部門講演会 (SI2016) システムインテグレーション部門講演会、12.15-17, 札幌、2016 (査読無)

毛利哲也, 中村一也, 川崎晴久, 安部貴大, 小林保幸, 森賢一, 斎藤全弘, 無通電保持機構を有する高出力ロボットハンド, Robomec2016 予稿集 (2016年6月8日-11日, 横浜), No.16-2, pp. 1P1-10a1(1) - pp. 1P1-10a1(2), 横浜、2016 (査読無)

村上栄将, 山田貴孝, 山本秀彦, 川崎晴久, 毛利哲也, 力覚情報の提示と接触パラメタの同定を伴う多指ハンドの遠隔操作の研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 1P1-19a6, 横浜、2016年6月8日~11日 (査読無)

福島雅史, 山田貴孝, 山本秀彦, 川崎晴久, 毛利哲也, 把持対象物と外部環境との接触状態の同定実験 (指先の力覚センサを用いた場合), ロボティクス・メカトロニクス講演会2016, 1A2-19a3, 横浜、2016年6月8日~11日 (査読無)

H. Kawasaki, Controls and Applications of Multi-Fingered Haptic Interface Robots, BIT's 2nd Annual World Congress of Smart Materials-2016, Singapore, p.108, March 4-6, 2016 (査読有)

H. Kawasaki, S. Ueki, Disturbance Observer Estimating Frictions and External Forces for Robot Manipulators, CD-ROM Proc. of

2016 IEEE ANDESCON, Oct. 19-21, Arequipa, Peru, 2016 (査読有)

上木 諭, 毛利 哲也, 川崎 晴久, ハンドアームロボットのための障害物回避制御, 第16回システムインテグレーション部門講演会(SI2015)予稿集(2015年12月14日~16日・名古屋), pp.168-172, 2015 (査読無)

Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, and Satoshi Ueki, Teleoperated Humanoid Hand Robot Using Force Feedback, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) pp.942-947, Nagoya, Japan, 2015 (査読有)

Satoshi Ueki, Tetsuya Mouri, and Haruhisa Kawasaki, Collision avoidance method for hand-arm robot using both structural model and 3D point cloud, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) pp.193-198, Nagoya, Japan, 2015 (査読有)

Kenta Niwa, Takayoshi Yamada, Hidehiko Yamamoto, Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Optimization of grasp positions using the partial differentiation of the grasp stiffness matrix, 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII) pp.924-929, Nagoya, Japan, 2015 (査読有)

Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Force Discrimination Using Improved Hand Haptic Interface, Proc. of 2015 International Scientific Conference on Engineering and Applied Sciences (ISCEAS 2015), SCEAS-597, No.597, pp. 372-381, Okinawa, Japan, 2015 (査読有)

Satoshi Ueki, Tetsuya Mouri, Takahiro Endo, and Haruhisa Kawasaki, Study on stiffness visualization and safety control based on will-consensus building for tele-palpatation robot system, Proc. of The 20th International Symposium on Artificial Life and Robotics 2015 (AROB 20th 2015), Beppu, Japan, pp.297-300, 2015 (査読有)

Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Kentaro Iwase, and Hirofumi Sakaeda, Prosthetic Hand Control Using Speech and sEMG, Proc. of the 2014 IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, December 5-10, Bali, Indonesia, pp. 1136-1141, 2014 (査読有)

T. Endo and H. Kawasaki, "Collision Avoidance and its Experimental Investigation for a Side-Faced-Type Multi-Fingered Haptic Interface", Proc. of IEEE SMC2014 (2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics), pp. 4042-4047, San Diego, CA, USA, Oct 5-8, 2014 (査読有)

Haruhisa Kawasaki, Masayasu Kayukawa,

Hirofumi Sakaeda, and Tetsuya Mouri, Learning System for Myoelectric Prosthetic Hand Control by Forearm Amputees, Proc. of The 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (ROMAN2014), pp.899-904, August 25-29, 2014. Edinburgh, Scotland, UK, 2014 (査読有)

〔図書〕(計 3件)

S. Ueki and H. Kawasaki, "Adaptive Control for Multi-Fingered Robot Hands", Chapter 5 of Adaptive Control for Robotic Manipulators, Edited by Dan Zhang and Bin Wei, ISBN 9781498764872, CRC Press, pp.70-97, P.440, 2016 (査読有)

Haruhisa Kawasaki, Robot Hands and Multi-Fingered Haptic Interfaces: Fundamentals and Applications, World Scientific Publishing, ISBN 978-9814635608, p.1-325, 2015.5.9 (査読無)

Haruhisa Kawasaki, Tetsuya Mouri, Satoshi Ueki, Virtual Robot Teaching for Humanoid Both-Hands Robots Using Multi-Fingered Haptic Interface, Chapter 6 of Computer and Information Science » Human-Computer Interaction » "The Thousand Faces of Virtual Reality", book edited by Cecilia Sik Lanyi, ISBN 978-953-51-1733-9, Published by INTECH: November 26, 2014, pp.99-119, 2014.11.26 (査読有)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 1件)

名称: 外乱オブザーバ及びロボット制御装置  
発明者: 川崎 晴久, 毛利 哲也, 上木 諭, 丸山 章, 上田 和彦, 中村一也, 小林保幸  
権利者: 国立大学法人岐阜大学、独立行政法人国立高等専門学校機構 豊田工業高等専門学校、並木精密宝石(株)、(株)不二越

種類: 特許出願

番号: 特願 2016-198917

出願年月日: 平成 28 年 10 月 7 日

国内外の別: 国内

○取得状況(計 1件)

名称: SIDE-TPE FORCE SENSE INTERFACE

発明者: Haruhisa Kawasaki, Takahiro Endo, Tetsuya Mouri, Hisashi Aoyama

権利者: Gifu University

種類: PCT/JP2011/077660

番号: Patent No.: US 9,189,065 B2

取得年月日: Nov. 17, 2015

国内外の別：USA

〔その他〕

ホームページ等

<http://www1.gifu-u.ac.jp/~kawalab/>

## 6．研究組織

### (1)研究代表者

川崎 晴久 (KAWASAKI, Haruhisa)  
岐阜大学・工学部・特任教授  
研究者番号：40224761

### (2)研究分担者

山田 貴考 (YAMADA, Takahiro)  
岐阜大学・工学部・准教授  
研究者番号：00275518

毛利 哲也 (MOURI, Tetuya)  
岐阜大学・工学部・准教授  
研究者番号：40418728

遠藤孝浩 (ENDO, Takahiro)  
岐阜大学・工学部・助教  
研究者番号：70432185

上木 諭 (UEKI, Satoshi)  
豊田工業高等専門学校・機械工学科・准教授  
研究者番号：50467213