

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03937

研究課題名(和文)テレコピーロボットを用いた遠隔地間における運動と力覚の複製

研究課題名(英文) Duplication of Motion and Force Sense between Remote Colony Using Telecopy Robot

研究代表者

三好 孝典 (Takanori, Miyoshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10345952

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：マスターである人間の運動や力覚を遠隔地において忠実に再現しようとするロボットをテレコピーロボットと定義したとき、自身のコピーロボットが遠隔地に存在し、その遠隔地に居る人間(マスター)のコピーが目前に存在する環境において、1.テレコピーロボットの概念の提示と、それを実現するための全方向移動機能を有した双腕コピーロボットの製作、2.通信遅延に対して安定な4chバイラテラル制御アルゴリズムの提案と実装、3.コピーロボットによるバイラテラル遠隔制御の実現、を行い、目前のコピーロボットを通じてあたかも遠隔地のマスターと直接力学的インタラクションをしているかのような体験が実現可能であることが実証された。

研究成果の概要(英文)：A robot that faithfully reproduces the master's motion and force sense in a remote place is defined as a telecopy robot. Consider an environment where its own copy robot exists in a remote place and a copy of a person (master) located in the remote place exists in front. Then, in this research, 1. Presentation of the concept of a telecopy robot and fabrication of a dual arm copy robot having an omnidirectional movement function to realize it. 2. Proposal and Implementation of 4ch Bilateral Control Algorithm Stable for Communication Delay. 3. Realization of bilateral remote control by copy robot, was carried out. Thus, it was proved that it is feasible to experience as if you are doing direct mechanical interaction with the remote master at the immediate copy robot.

研究分野：制御工学

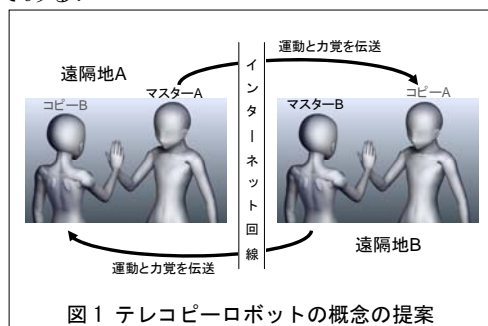
キーワード：遠隔制御 バイラテラルテレコントロール テレコピーロボット

1. 研究開始当初の背景

研究代表者は、ミュンヘン工科大客員研究員として遠隔制御の研究を開始して以降、海外 8ヶ所を含む延べ 38ヶ所と豊橋技術科学大学を結んで、バイ/マルチラテラル遠隔制御の実験を計 2000 人を超える規模で行ってきた。そのアンケート結果で明らかになったことは、我々の提案するアルゴリズムは大陸間を含む様々な通信環境においても力覚を明確に伝えることが可能であるということである。さらに、2012-14 年度の科研 B の研究においても、非受動な対象物に対して多数の遠隔地からアクセスし、対象物との力覚を安定に触知覚する制御アルゴリズムを提案し、全国 8 高専をインターネットで結んだ遠隔綱引き実験において妥当性を証明した。こうした経緯を経て、「そもそも遠隔地の人同士のコミュニケーションにはマスター機構は不要ではないか？自分の力と運動をコピーするロボットを遠隔地に設置すれば、マスター・スレーブという概念から離れて力覚が提示できるのではないか」と考え、本研究のテーマに至った次第である。

2. 研究の目的

マスターである人間の運動や力覚を遠隔地において忠実に再現しようとするロボットをテレコピーロボット (以下、コピーと呼称) と定義する。遠隔地 A においてマスター A (人間) が存在し、そのコピー A は遠隔地 B において存在している。遠隔地 B にはマスター B が存在し、そのコピー B は遠隔地 A に存在している。すなわち、遠隔地 A ではマスター A の目の前にコピー B が、遠隔地 B ではマスター B の目の前にコピー A が存在している。この状況下で、マスター A とコピー B の間に生じる運動・力と、マスター B とコピー A の間で生じる運動・力を安定的に一致させることが本研究の目的である。つまり、運動と力が一致する世界をいくつかの遠隔地 (以下コロニーと呼称) 間で複製しようという試みである。



具体例を図 1 を用いて説明する。遠隔地 A においてマスター A がコピー B に手のひらを合わせようと手を差し出す運動は、通信遅延を経由してコピー A に伝送され再現される。遠隔地 B においてマスター B が手を差し出す運動は遠隔地 A のコピー B へ伝送される。こうして遠隔地 A,B で人間とロボットの間で手を合わせる運動が行われるが、通信遅延の

ために遠隔地 A では人間とロボットの接触が起こり力が働くが、遠隔地 B ではまだ接触しておらず力が生じない場合が起こり得る。テレコピーロボットとしては何をどの様に制御して力を何[N]に一致させるべきなのだろうか？仮に遠隔地 A においてマスター A がコピー B を 10[N]で押したとき、マスター B も同じく 10[N]でコピー A からの力を感じるためには、コピー A の運動をどの様に制御すれば良いのだろうか？こうした複雑に作用し合う力と運動の輻輳が通信遅延を通じて行われるとき、本当に安定させることはできるのだろうか？

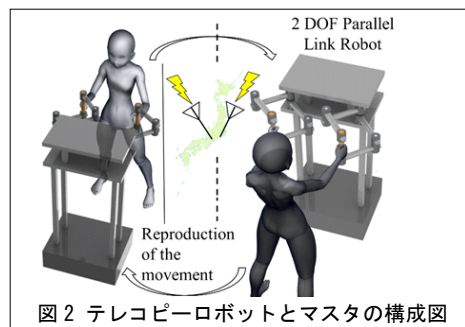
本研究目的は、こうした学術的問いかけにおいてマスター・コピー間の作用力を一致させ、カゴメカゴメのような力学的コミュニケーションをコロニー間で実現させることである。

3. 研究の方法

「研究目的」ではイメージのしやすさのためにヒューマノイドで説明したが、実際の研究では 2 軸リンク機構と全方向移動台車を用いて研究を行う。

a. 双腕テレコピーロボットの製作

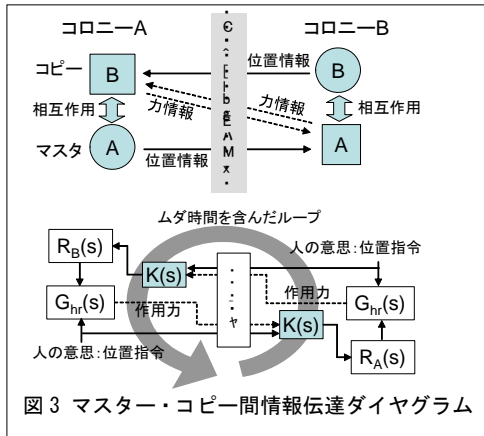
コピーの上肢部分として図 2 に示される 2 自由度パラレルリンクから構成される双腕機構を製作する。さらに、コピーの下肢部分として、速度制御可能な全方向移動台車を製作し、上肢部分と結合する。全方向とする理由は、マスターの様々な運動にコピーを機敏に反応するためである。マスターは人間であるため即座に様々な方向に移動するが、コピーもそれに対応して瞬時に応答できなければ、本研究目的を達成することはできない。完成したロボットは 4. 研究成果で詳述する。



b. 2対2のマスター・テレコピーロボット間での制御モデルと安定化理論の構築

実施する実験の情報伝達ダイヤグラムを図 3 に示す。コロニー A, B それぞれのマスターから位置情報がコピーに送られると共に、コピーが検知したマスターとの作用力を互いのコピーに送り合う。送られてきた位置情報にコピーが追従し、かつ相互に送り合う力情報が一致すれば、本研究の目的を達成できたことになる。本研究の課題は、コロニー間でのムダ時間を含んだ作用力のループが構成されるため、安定性を確保しつつ的確な力

覚を実現する制御コントローラ $K(s)$ を如何に作り出すかがポイントとなる。



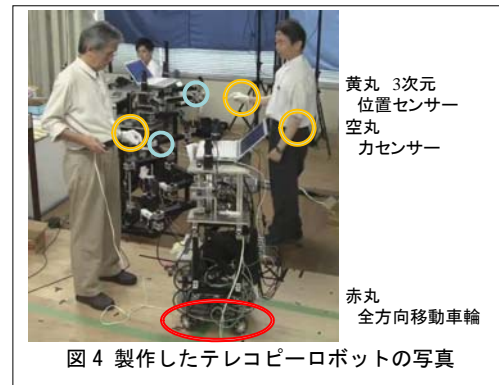
c. 制御アルゴリズムの実装とネットワーク回線を用いた遠隔実験・評価

b. で求めたコントローラ $K(s)$ を制御系に組み込み、ネットワーク回線を利用して実験を行う。制御システムは前回の科研で構築した RTAI (Real time OS) + Matlab/ Real Time Workshop + AD/DA/counter Board を使用する。マスターの位置は磁気式 3 次元位置計測装置 FASTRAK を用いて計測する。マスターの体幹の位置と角度、両手先の位置が位置計測装置により計測され、その位置に一致するようにコピーの体幹の位置と角度、両腕先端の位置を制御する。それに加えて、マスター・コピー間の作用力が一致するよう、コピー両腕先端の位置をコントローラ $K(s)$ が微調整する。2 つのコロニーでマスターとコピーがほぼ同一の運動を行い、かつ最大 10[N] 程度の様々な方向からの押し合い・引き合いが複製できれば本研究の目的は達成できたことになる。

4. 研究成果

a. 双腕テレコピーロボットの製作

図 4 に製作したコピーの写真を示す。コピーは 2 台製作され、うち 1 台には下肢部分に全方向移動台車が組み込まれている。コピーの上肢の双腕は、それぞれ 2 台のモータで 2 リンクの平行リンクを駆動する方式となっている。これにより、機械剛性を上げて片腕 10[N] 以上の力覚提示力を確保すると共に、腕先端が前後・左右の 2 自由度で移動できるようになっている。腕先端には力覚センサが取り付けられており、マスターの加えた操作力を検出するとともに、微細な力覚制御が



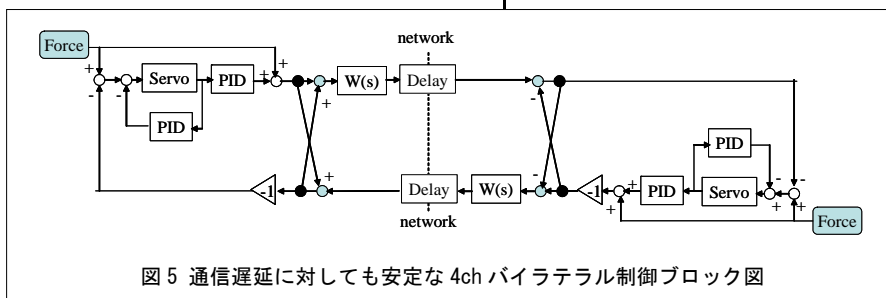
可能となるように構成されている。

下肢部分の全方向台車はギアードモータが直結されたオムニホイールを 4 輪備えており、床面上を前後・左右・回転の 3 自由度で移動できる構造となっている。

b. 2 対 2 のマスター・テレコピーロボット間での制御モデルと安定化理論の構築

コロニー間での位置の一致性を保証する通信遅延付きバイラテラル遠隔制御では位置・力帰還型制御、あるいは力・位置帰還型制御がよく用いられるが、それでは特定の周波数帯でトランスペアレンシー（位置や力のコロニー間での一致性）が大きく損なわれることが、本研究の知見として得られたため、図 5 に示す 4ch バイラテラル制御を導入した。コピーが検出したマスターの操作力 Force は自身を動かすと共に、遠隔地のロボットにも伝送される。コピーの加速度・速度・位置情報は自身に PID フィードバックされると共に遠隔地にも伝送される。「力、加速度、速度、位置」の 4 つの情報をコロニー間でやり取りすることでトランスペアレンシーを確保しつつ、通信遅延に対して安定な制御を可能にすることができた。

本研究のコントローラの知見として、あえてリアプノフの安定性を満たさないポジティブフィードバックを一部に導入することで、制御性能が向上することが確認された。これは、2 つのコピー間ではお互いに位置情報を指令しあう位置ループが構成されているが、もしリアプノフの安定性が満たされていれば操作力が 0 の時に原点に戻ってしまうことから妥当な結果と言える（本来は、原点ではない場所で停止すべき）。



c. 制御アルゴリズムの実装とネットワーク回線を用いた遠隔実験・評価

構築した全システムを用いて次のプロトコルに従い実験を行った。図6のシステムにおいて、マスターAの右手の運動をコピーロボットAの右手(縦バー部分)がまねる(橙色矢印間)。マスターBの左手の運動をコピーロボットBの左手(縦バー部分)がまねる(空色矢印間)。さらにマスターAが前後・左右・回転運動すると、コピーロボットAも前後・左右・回転移動する。加えてマスター同士がコピーの腕を把持し合っている間は、お互いの腕先端の位置と力が同じになるように、バイラテラル4ch制御でロボット同士が制御し合う。以上の実験は、通常の国内の有線インターネット回線であれば満たすであろう通信遅延RTT=40msを付加して実施された。

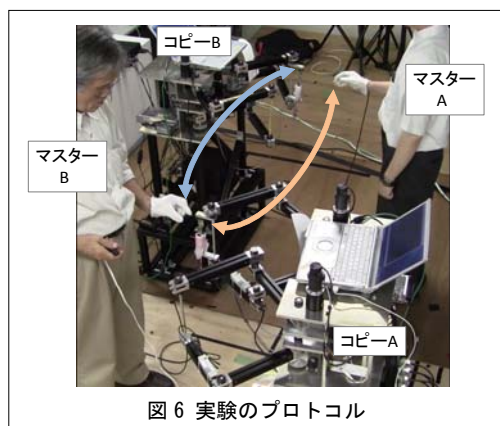


図6 実験のプロトコル

この実験におけるマスターAの右手の運動referenceに対するコピーロボットAの腕の運動motionのグラフを図7(x軸のみ記載、y軸も同様)に示す。当初の意図通り、ロボットがマスターのコピーとして同一の運動を行っていることが確認できた。

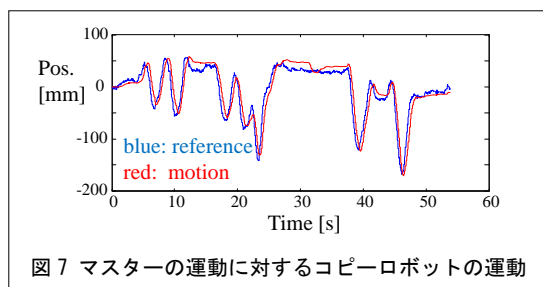


図7 マスターの運動に対するコピーロボットの運動

さらに、マスターとコピーがお互いの腕を把持して以降の操作力と腕の運動のグラフを図8に示す。図の上段がマスターの加える操作力、下段がコピーの運動を表す(x軸のみ記載、y軸も同様)。最初の10[s]においてマスターAのみが操作力を加えた際に、双方のコピーが力に応じて同一の運動を行っている。これはすなわち、マスターBは対面しているコピーAの運動を通じてマスターAの運動を知覚できることに他ならない。次の10[s]では、マスターBのみが操作力を加えているが、同様の理由によりマスターAはマスターBの運動を知覚することができる。30[s]前後からはマスター同士が拮抗する操作力

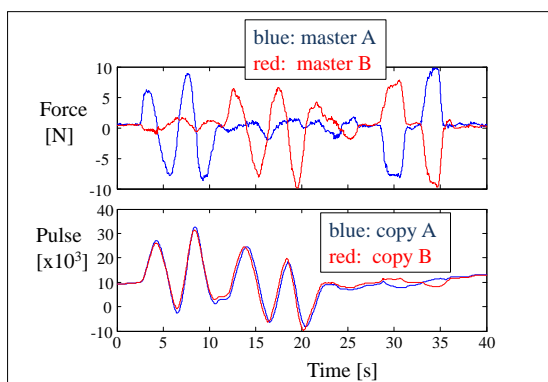


図8 マスターの操作力に対するコピーロボットの運動

を加え合っているが、ロボットが移動しないことで拮抗した押し合い・引き合いを行っていることを両マスターが認識できることが明らかとなった。最初の10[s]間のマスターAの操作力とコピーAの運動のグラフを図9に示す。平面上の円を描くような操作力に対して、確かにコピーロボットも円運動を行っていることが確認できた。

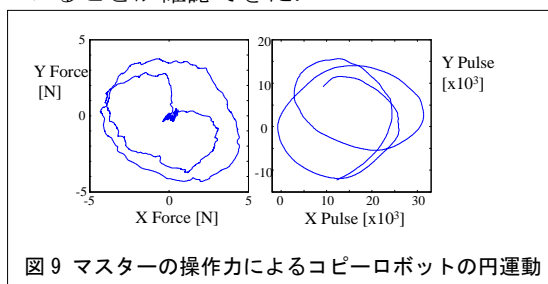


図9 マスターの操作力によるコピーロボットの円運動

以上、3年間の研究を通じて以下の研究成果を得た。

- (1) テレコピーロボットの概念の提示と、それを実現するための全方向移動機能を有した双腕コピーロボットの製作。
- (2) 通信遅延に対して安定で周波数特性の良い4chバイラテラル制御アルゴリズムの提案と実装。
- (3) マスターの併進・回転運動を遠隔地間で忠実に反映するコピーロボットの移動機能の実現。
- (4) 通信遅延の環境下でコピーロボットによるバイラテラル遠隔制御の実現。

特に、(a)コピーロボットが遠隔地のマスターの運動を正確に復元できているか、(b)コピーロボットが遠隔地のマスターの受ける力を正確に再現できているか、(c)コピーロボットが安定して運動できているか、(d)マスターは違和感なくコピーロボットと運動の共有を行えるかの評価。

以上により、コピーロボットが人間の運動を模擬し、マスター同士が目前のコピーロボットを通じてあたかも遠隔地のマスターと直接力学的インタラクションをしているかのような体験が実現可能であることが実証された。

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 10 件) 全て査読有

- ①T. Hatanaka, N. Chopra, J. Yamauchi, M. Doi, Y. Kawai and M. Fujita, A Passivity-Based System Design of Semi-autonomous Cooperative Robotic Swarm, ASME DSC Magazine, 査読有, Vol. 5, No. 2, 2017, pp. 14-18
- ②UEKI Satoshi, YAMAUCHI Yu, KANESHIGE Akihiro, MIYOSHI Takanori, TERASHIMA Kazuhiko, Design of liquid container transport control system with overhead traveling crane Transactions of the JSME (in Japanese), 査読有, 83 巻 855 号, 2017, p. 17-00237
- ③黄平国, 石橋豊, 五感情報通信における嗅覚の効果, Aroma Research, 査読有, vol. 18, no. 4, 2017, pp. 380-385
- ④P. Huang, Y. Ishibashi, and K. Psannis, Fairness assessment in networked games with olfactory and haptic senses, International Journal of Communications, Network and System Sciences (IJCNS), 査読有, vol. 10, no. 8, 2017, pp. 173-186
- ⑤R. Arima, M. Sithu, and Y. Ishibashi, QoS assessment of fairness between players in networked virtual 3D object identification game using haptic, olfactory, and auditory senses, International Journal of Communications, Network and System Sciences (IJCNS), 査読有, vol. 10, no. 7, 2017, pp. 129-141
- ⑥Abdul Halim Ismail, Yuki Mizushiri, Ryosuke Tasaki, Hideo Kitagawa, Takanori Miyoshi, and Kazuhiko Terashima, A Novel Automated Construction Method of Signal Fingerprint Database for Mobile Robot Wireless Positioning System, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol.11 No.3, 2017, pp. 459-471
- ⑦石橋豊, 黄平国, 触力覚通信の高品質化とその未来, 電子情報通信学会論文誌(B), 査読有, J99-B, 2016, 911-925
- ⑧G. Kokkonis, K. E. Psannis, M. Roumeliotis, Y. Ishibashi, Efficient algorithm for transferring a real-time HEVC stream with haptic data through the Internet, Springer Journal of Real-Time Image Processing, 査読有, vol. 10, 2015, pp. 1-13
- ⑨M. Sithu, Y. Ishibashi, P. Huang, N. Fukushima, Influences of network delay on quality of experience for soft objects in networked real-time game with haptic sense International Journal of Communications, Network and System Sciences (IJCNS), 査読有, 2015, vol. 8, pp. 440-455
- ⑩Takanori Miyoshi, Yuki Ueno, Kouki Kawase, Yusaku Matsuda, Yuya Ogawa, Kento Takemori and Kazuhiko Terashima, Development of Handshake Gadget and Exhibition in Niconico Chokaigi,

Haptic Interaction Perception, Devices and Applications, Volume 277, 2015, pp.267-272

[学会発表] (計 78 件) 一部を抜粋して記載

- ①D. Osada, Y. Ishibashi, P. Huang, and Y. Tateiwa, Assessment of weight perception with haptics in networked virtual environment, IEEE The 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), 2018
- ②H. Watanabe, Y. Ishibashi, and P. Huang, A formulation of remote robot system by using difference differential equation, IEEE The 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), 2018
- ③Q. Qian, Y. Toyoda, Y. Ishibashi, P. Huang, and Y. Tateiwa, Switching between stabilization control by viscosity and reaction force control upon hitting in remote robot system with haptics, IEICE Global Conference, 2018
- ④Takanori Miyoshi and Shogo Hamada, Experiment of Handwritten Tele-communication System between Hawaii and Toyohashi, IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan, 2018, 2018
- ⑤Satoshi Ueki, Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Nonlinear Disturbance Observer for Object Grasping/Manipulation by Multi-Fingered Robot Hand, Preprints of the 20th IFAC World Congress, 2017
- ⑥Tetsuya Mouri, Haruhisa Kawasaki, Satoshi Ueki, Bilateral Tele-operated Hand Robot with Communicational Time Delay, Preprints of the 20th IFAC World Congress, 2017
- ⑦Junichi SUGAYA, Yuzuru OHBA, Toshiyuki KANMACHI, Simulation of Standing Upright Control of an Inverted Pendulum using Inertia Rotor and the Swing Type Inverted Pendulum for Engineering Education, The 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE 2017) , 2017
- ⑧Y. Kushima, H. Kawai, T. Murao, Y. Kawai, M. Kishitani, R. Suzuki, and M. Fujita, FES-assisted Cycling with Velocity Tracking Control for Hemiparesis Rehabilitation, Proc. of The 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2017
- ⑨Yasunori Kawai, Takanori Miyoshi, and Masayuki Fujita, Written Communication System based on Multilateral Teleoperation using Robust Control, 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2017
- ⑩Yasunori Kawai, Kenya Honda, Hiroyuki Kawai, Takanori Miyoshi, and Masayuki Fujita, Tele-Rehabilitation System for Human Lower Limb using Electrical Stimulation based on Bilateral Teleoperation, 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications, 2017

⑪Y. Sakamoto, E. Nobuyama and Y. Kami, Robust Controller Design with Fixed-order Controllers Using FNFR Models, Proc. The 2017 Asian Control Conference, 2017

⑫P. Huang, R. Arima, and Y. Ishibashi, Influence of network delay on human perception of weight in virtual environment, The 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2017

⑬Y. Komatsu, H. Ohnishi, and Y. Ishibashi, Adaptive control of viscosity in remote control system with force feedback, IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW), 2017

⑭M. Sithu and Y. Ishibashi, Identification of 3D objects with haptic, olfactory, and auditory senses in virtual environment, IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW), 2017

⑮G. Kokkonis, K. E. Psannis, M. Roumeliotis, P. Nikopolitidis, and Y. Ishibashi, Performance evaluation of transport protocols for real-time supermedia - HEVC streams over the Internet, IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2017

⑯T. Rikiishi, Y. Ishibashi, P. Huang, T. Miyoshi, H. Ohnishi, Y. Tateiwa, K. E. Psannis, and H. Watanabe, Stabilization control by viscosity in remote robot system with haptics IEICE Society Conference, 2017

⑰A. Plageras, C. Stergiou, K. E. Psannis, B.-G. Kim, B. Gupta, and Y. Ishibashi, "Solutions for inter-connectivity and security in a smart hospital building", Proc. the 15th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2017

⑱C. Stergiou, K. E. Psannis, A. P. Plageras, G. Kokkonis, and Y. Ishibashi, "Architecture for security monitoring in IoT environments," Proc. 2017 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2017

⑲Shogo Hamada, Yudai Kawasaki, Takanori Miyoshi, Kazuhiko Terashima, Development of handwritten tele-communication system for the Deaf-blind based on the multi-lateral control, International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017 (ICISIP2017), 2017

⑳Takanori Miyoshi, Tsukahara Fumiya, Kentaro Tanaka, Takahiro Kanno, Kenji Kawashima, Stability Analysis of Haptic Tele-operation Using Surgical Robot IBIS The 2nd International Symposium on Biomedical Engineering, 2017

〔図書〕(計1件)

三枝 亮、他、NTS、人と協働するロボット 革命最前線、人とロボットの協調学習に基づく医療福祉支援、2016年、97-106

〔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

豊橋技術科学大学システム制御研究室 HP

<http://www.syscon.me.tut.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 孝典 (MIYOSHI Takanori) 豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (研究者番号: 10345952)

(2) 研究分担者

今村 孝 (IMAMURA Takashi) 新潟大学・自然科学系・准教授 (研究者番号: 10422809)

上 泰 (KAMI Yasushi) 明石工業高等専門学校・電気情報工学科・准教授 (研究者番号: 20413809)

真下 智昭 (MASHIMO Tomoaki) 豊橋技術科学大学・エレクトロニクス先端融合研究所・准教授 (研究者番号: 20600654)

石橋 豊 (ISHIBASHI Yutaka) 名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (研究者番号: 40252308)

小山 慎哉 (OYAMA Shinya) 函館工業高等専門学校・生産システム工学科・准教授 (研究者番号: 50435385)

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)

寺嶋 一彦 (TERASHIMA Kazuhiko) 豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (研究者番号: 60159043)

兼重 明宏 (KANESHIGE Akihiro) 豊田工業高等専門学校・機械工学科・教授 (研究者番号: 70224615)

青木 悠祐 (Aoki Yusuke) 沼津工業高等専門学校・その他部局等・講師 (研究者番号: 70584259)

北川 秀夫 (KITAGAWA Hideo) 岐阜工業高等専門学校・その他部局等・教授 (研究者番号: 80224955)

三枝 亮 (Saegusa Ryo) 豊橋技術科学大学・人間・ロボット共生リサーチセンター・特任准教授 (研究者番号: 80386606)

大場 譲 (YUZURU Ohba) 仙台高等専門学校・知能エレクトロニクス工学科・准教授 (研究者番号: 80455104)

河合 康典 (KAWAI Yasunori) 石川工業高等専門学校・その他部局等・准教授 (研究者番号: 90413765)