

触力覚通信の仕組み

Mechanism of Haptic Communications

石橋 豊 黄 平国

Abstract

利用者が触力覚インタフェース装置を用いて現実空間や仮想空間における作業を行う触力覚通信の仕組みと開発の歴史などについて、国内外の大学や企業の研究機関における取組みを紹介しながら解説する。また、触力覚情報とは何かを述べ、触力覚インタフェース装置に提示される反力の計算方法などを説明する。更に、触力覚インタフェース装置間だけでなく、触力覚センサが付与されたロボットと触力覚インタフェース装置間の触力覚情報の転送方法を紹介する。

キーワード：触力覚通信，触力覚インタフェース装置，触力覚センサ，触力覚情報，反力

1. ま え が き

近年、触力覚通信に関する研究が盛んに行われている^{(1)~(3)}。利用者は、触力覚インタフェース装置^(用語)を用いることにより、遠隔の現実空間や仮想空間にある物体の形状や柔らかさ、表面の滑らかさ、重さなどが感じられるので、あたかも自分が直接その物体を触っているかのような感覚を得ることが可能である。また、触力覚を視覚・聴覚・嗅覚などの感覚と一緒に用いると、臨場感の高い通信が実現できるため、遠隔医療、遠隔教育、ネットワーク型エンタテインメント、深海や宇宙空間などの人が入りにくい場所での遠隔作業など様々な分野での応用が期待されている⁽⁴⁾。

一方で、触力覚は視覚・聴覚に比べると、入出力方式や必要な更新レートなどの特徴が大きく異なる。また、視覚・聴覚通信と比べて、触力覚通信は、利用者と触力覚インタフェース装置の作業対象である物体との間のインタラクティブ性の高い相互作用が重要であり、利用者が物体を操作するとき、物体から利用者が受ける反力の計算が必要である⁽⁵⁾。このときに送受信される触力覚

情報としては、力情報と位置情報の2種類が存在する。そして、どちらの情報を転送して処理するかによって、転送方式が異なる^{(6)・(7)}。

本稿では、触力覚インタフェース装置を用いて現実空間や仮想空間における作業を行う触力覚通信の概要と開発の歴史を解説し、触力覚情報の特徴や触覚インタフェース装置に提示される反力の計算方法について述べる。更に、触力覚情報の転送方式を紹介する。

以下では、まず、2.で触力覚通信の概要とその開発の歴史について解説し、3.で触力覚情報とその特徴を説明する。次に、4.で反力の計算方法を述べ、5.において触力覚情報の転送方式を紹介する。

2. 触力覚通信の概要と歴史

触力覚の英語は“haptics”であり、元々ギリシャ語の“haptesthai”からの言葉であり、接触感覚という意味である⁽⁸⁾。最初は心理学の領域において人が実際の物体に触っていることを指す⁽⁸⁾。1980年代後半には、人・計算機間の触感に関する全ての面が含まれるように定義されている⁽⁹⁾。最近では、人の触覚と力のフィードバックに関する心理学、工学及び計算機科学などの広い分野において、この言葉が用いられている⁽⁹⁾。

また、1980年代後半から、触る感覚や力を利用者にフィードバックするための触力覚インタフェース装置に関する研究が盛んに行われてきている⁽¹⁰⁾。代表的な例としては、海外では、MITで開発された、一つのジョ

石橋 豊 正員：フェロー 名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻

E-mail ishibasi@nitech.ac.jp

黄 平国 正員 星城大学経営学部

E-mail huangpg@seijoh-u.ac.jp

Yutaka ISHIBASHI, Fellow (Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan) and Pingguo HUANG, Member (Faculty of Business Administration, Seijoh University, Tokai-shi, 476-8588 Japan).

電子情報通信学会誌 Vol.102 No.1 pp.42-46 2019年1月

©電子情報通信学会 2019

イステックにモータによって力を生成して提示する SANDPAPER が挙げられる⁽¹¹⁾。また、1996 年から 2002 年まで PHANToM User's Group Workshop が開催され、主に触力覚インタフェース装置である PHANToM⁽¹²⁾を用いる研究者に研究発表と交流の場を作り、触力覚に関する研究を活発化している。日本では、筑波大学の岩田らが、計算機制御可能なマニピュレータを手に取り付ける方式によって力のフィードバックを実現する方法を提案している⁽¹³⁾。東京工業大学の佐藤らは、指にはめるキャップに取り付けられた 4 本の糸の動きを拘束して指の動きを制御することによって、接触情報と力情報を生成する SPIDAR を開発している⁽¹⁴⁾。当時の装置のカーソル^(用語)の数は少なく、ほとんどの装置では一つである。

近年では、触力覚インタフェース装置の構造が複雑になるだけでなく、装置のカーソルの数も多くなり、物体と複数の点で触れることや操作することができる装置、操作しやすく人間の指の動きのような微細な動作もうまく反映される装置などが開発され、その一部が製品化されている^{(15)~(17)}。更に、全身に触力覚センサ^(用語)を付けて触力覚刺激を与える装置⁽¹⁸⁾や、センサと触力感覚の再現技術の発展に伴い、触力覚インタフェース装置の精度が高くなり、携帯可能な小さい装置など様々な装置の開発も行われている⁽¹⁰⁾。これらの関連する技術の進歩によって、より自然な触力感覚を利用者に提供することが可能となりつつある。

更に、一つの端末だけで触力覚情報を処理するだけでなく、複数の端末間で触力覚情報を互いに共用するため、ネットワークを介して触力覚情報を転送する触力覚通信の研究が開始され、様々な応用が開発されている^{(1)~(4)}。慶應義塾大学の西原らは、触力覚通信に関す

■ 用語解説

触力覚インタフェース装置 利用者が装置に加える力や動きを計測して入力するとともに、触る感覚や力などを利用者に出力する装置である。

カーソル 利用者が触力覚インタフェース装置が操作している作業空間内での位置を表す点であり、この点を介して物体などを触ることができる。

触力覚センサ 触感や力などを計測し、それらの計測値をデジタル化された情報に置き換える装置である。

スレーブ端末とマスタ端末 複数の端末（例えば、二つの端末）が協調動作する際に、制御する方がマスタ端末であり、制御される方がスレーブ端末になる。本稿では、利用者が主体的にマスタ端末の触力覚インタフェース装置を操作し、スレーブ端末の触力覚インタフェース装置（または触力覚センサを付与したロボット）を制御する。スレーブ端末の触力覚インタフェース装置（または触力覚センサを付与したロボット）は、マスタ端末から制御され、マスタ端末の触力覚インタフェース装置の動きに応じて動く。

る必要技術と触力覚品質の評価技術を提案し、国内外における触力覚通信に関する研究の発展に大きく貢献している。西原らによると、触力覚通信には、同期性と双方向性の機能が必要である⁽²⁾。同期性とは、力が再生される端末（ローカル端末）は力が発生される端末（遠隔端末）と同じ動きをすることであり、双方向性は、作用と反作用法則のことであり、ローカル端末から遠隔の端末の操作ができるだけでなく、遠隔端末からローカル端末の逆操作も可能であることを指している⁽²⁾。

しかし、ネットワークを介して触力覚情報を転送すると、ネットワーク遅延やその揺らぎなどによって通信のサービス品質（QoS: Quality of Service）⁽¹⁹⁾が劣化する問題がある。より自然な触力覚感覚を利用者に提示するために、QoS 制御が必要となる⁽¹⁾。また、ネットワーク遅延によりシステムの不安定現象（例えば、触力覚インタフェース装置の振動）が生じるので、これを避ける安定化制御も必要となる。これらのうち、主に前者は通信・ネットワーク分野、後者はロボット・制御工学分野で別々に検討されてきている。しかし、各制御を単独で行うのは限界がある（例えば、安定化制御だけでは、システムは安定しているが、ネットワーク遅延などによって QoS が低くなることもある）。よって、今後は、両方の制御を融合して発展させることが必要である⁽²⁾。

3. 触力覚情報とその特徴

触力覚情報は、一般に触力覚インタフェース装置のカーソルの位置情報や触力覚インタフェース装置に出力される反力に関する情報を含む。このほか、これらの情報が入力された時刻を表すタイムスタンプやシーケンス番号を加えて、メディアユニット（MU と略す）⁽²⁰⁾として転送される。なお、MU はメディア同期のための処理単位である（例えば、音声 MU は音声パケット、ビデオ MU はビデオピクチャ）。また、触力覚情報のデータ転送量を減らすために、MU に含まれる位置情報を圧縮して転送する方法もある^{(21), (22)}。

触力覚情報の特徴として、視覚・聴覚情報の入出力が異なる装置を介して行われる（例えば、音声はマイクで入力され、スピーカで出力される）のに対して、触力覚情報の入出力は一つの触力覚インタフェース装置を通して行われる。また、触力覚インタフェース装置の位置と反力の更新レートは 1 kHz 以上であり、これによって、自然な触る感覚や反力を利用者に提示することができる⁽⁸⁾。

また、一般に触力覚の MU の転送レートは 1,000 MU/s 以上であり、音声 MU やビデオ MU の転送レート（数十 MU/s）より高い。これは、触力覚情報がネットワーク遅延やその揺らぎの影響を受けやすく、許容できる遅延が約 30~60 ms であり⁽²³⁾、視覚・聴覚情

報に比べると、厳しいからである（本小特集 5. 参照）。

4. 反力の計算方法

触力覚インタフェース装置に提示される反力の計算方法として、主に Spring-damper モデル⁽⁵⁾と God-object 法⁽²⁴⁾が挙げられる。本稿では、よく使われている Spring-damper モデルについて説明する。

Spring-damper モデルでは、作業を行うときに受ける反力は弾性と粘性による力から成ることを基本としている。弾性による力は、例えばばねを押すときに感じる力であり、この力の大きさはばねが押し込まれる深さに比例し、その深さに弾性係数を掛けて計算される。粘性による力は、例えば液体中で物体を動かすときに、動かす方向と逆方向に感じる抵抗力であり、この力の大きさは物体の液体に対する相対速度に比例し、その速度に粘性係数を掛けて計算される。

以下では、例として、利用者が触力覚インタフェース装置（Geomagic Touch⁽¹⁵⁾）のカーソルで仮想空間内の物体（剛体）を横から押す作業のときの反力の計算方法（図 1）と、現実空間の遠隔の他の触力覚インタフェース装置を操作するときのそれ（図 2）を説明する。

図 1 において、カーソルの表示位置（実線の丸印）

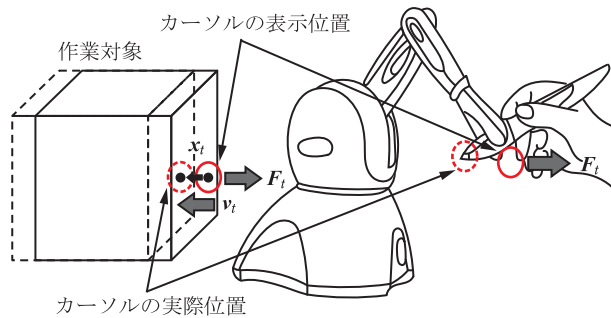


図 1 仮想空間における反力の提示例

は、画面上に表示され、利用者が見ているカーソルの位置であり、カーソルと物体の接触点を示している。しかし、カーソルの実際の位置は、物体の中へめり込んで、点線の丸印の位置にある。このとき（時刻 $t \geq 1$ ）に、触力覚インタフェース装置へ出力される反力 F_t は下記の式から計算される。

$$F_t = -K_s x_{t-1} - K_d v_{t-1} \quad (1)$$

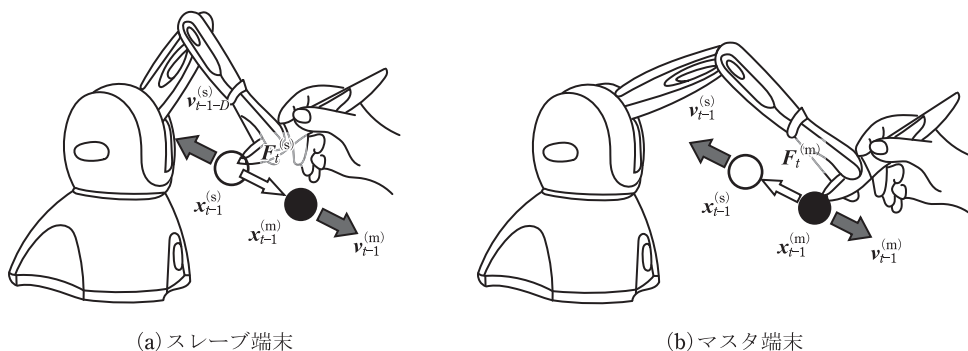
ここで、 x_{t-1} は時刻 $t-1$ の表示位置から実際の位置までのベクトルであり、 v_{t-1} はカーソルの物体に対する相対速度である。また、 K_s と K_d は、それぞれ弾性（spring）係数と粘性（damper）係数である。なお、反力の方向は、位置ベクトルの方向及び相対速度の方向と逆方向である。

また、図 2 では、触力覚インタフェース装置間の位置ベクトル（図中の白丸と黒丸は、それぞれスレーブ端末とマスタ端末^(用脚)の触力覚インタフェース装置のカーソル位置を表している）の差（式（1）の x_{t-1} に相当）と速度の差（式（1）の v_{t-1} に相当）によって反力が計算される。すなわち、時刻 t において、マスタ端末の触力覚インタフェース装置へ出力される反力 $F_t^{(m)}$ は次の式から計算される。

$$F_t^{(m)} = -K_s (x_{t-1}^{(m)} - x_{t-1}^{(s)}) - K_d (v_{t-1}^{(m)} - v_{t-1}^{(s)}) \quad (2)$$

ここで、 $x_{t-1}^{(s)}$ と $v_{t-1}^{(s)}$ はそれぞれマスタ端末で受信したスレーブ端末の触力覚インタフェース装置の位置ベクトルと速度である。 $x_{t-1}^{(m)}$ と $v_{t-1}^{(m)}$ はそれぞれ自端末の触力覚インタフェース装置のカーソルの位置ベクトルと速度である。同様に、スレーブ端末の触力覚インタフェース装置には、大きさが同じで方向が反対の反力が出力される。

以上の式から、ネットワーク遅延が大きくなると、仮想空間の場合は $|x_{t-1}|$ 、現実空間の場合は $|x_{t-1}^{(m)} - x_{t-1}^{(s)}|$ が主に大きくなり、反力が増大する。



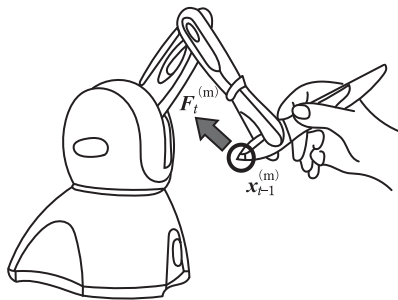
(a) スレーブ端末

(b) マスタ端末

図 2 現実空間における触覚インタフェース装置間の反力の提示例



(a) 力覚センサが付与されたロボット



(b) 触力覚インタフェース装置

図3 触力覚インタフェース装置と力覚センサが付与されたロボット間の反力の提示例

このほか、他の端末の触力覚センサから得られた力情報を受信し、係数 K_{scale} を掛けて、自端末の触力覚インタフェース装置へ出力する力の計算方法もある（後述の図3では、 $F_t^{(m)} = K_{scale} F_t^{(s)}$ ）。係数を掛ける理由としては、例えば遠隔ロボットの操作の場合、触力覚インタフェース装置へ出力される反力は、必ずしもその触力覚センサの力と同じ比率で出力する必要がなく、作業によって力を増大したり、縮小したりすることができるようにするためである。

5. 触力覚情報の転送方式

触力覚情報の転送方式として、主に Position-Position 方式、Position-Force 方式、Position-Position & Force 方式、Position & Force-Position & Force 方式が挙げられる^{(25)~(27)}。これらの方式の主な違いは、端末間で転送される各 MU に含まれる情報の種類（あるいは内容）にあり、マスタ端末からスレーブ端末に転送される情報と逆方向に転送される情報をそれぞれハイフン ‘-’ の前後に記述している（本小特集4. のように、転送される情報ではなく、制御に使用される情報によって分類することもできる）。以下ではそれらの詳細を説明する。

Position-Position 方式では、端末間で転送される MU には位置情報が含まれている。位置情報としては、自端末の触力覚インタフェース装置のカーソルや作業対象で

ある物体などの位置情報が挙げられる。各端末は受信した他の端末のカーソルの位置情報や作業対象である物体の位置情報などと自端末の触力覚インタフェース装置のカーソルの位置情報に基づいて、4. で述べた反力の計算方法で自端末の触力覚インタフェース装置に提示する反力や物体に与える力を計算し、触力覚インタフェース装置を介して、反力を利用者に提示する。また、作業対象である物体については、計算された力に従って物体の位置情報を更新する。

Position-Force 方式と Position-Position & Force 方式については、図3に示すように、マスタ端末の触力覚インタフェース装置を用いて、スレーブ端末の力覚センサが付与されたロボットを制御するシステム^{(28)~(30)}を例に説明する。マスタ端末で時刻 $t(\geq 1)$ に出力される反力 $F_t^{(m)}$ は、次のように計算される。（説明の簡単のため、ネットワーク遅延は十分小さいと仮定する。）マスタ端末は、触力覚インタフェース装置のカーソルの位置情報（図中では $x_{t-1}^{(m)}$ ）をスレーブ端末に送信する。スレーブ端末では、この位置情報とロボットアームの位置情報（ $x_{t-1}^{(s)}$ ）に基づいて位置の更新（ $x_t^{(s)}$ ）を行う。Position-Force 方式では、スレーブ端末は、力覚センサからの力情報（時刻 $t-1$ の力 $F_{t-1}^{(s)}$ ）のみをマスタ端末に送信する。Position-Position & Force 方式では、力覚センサから得られた力情報と位置情報（時刻 $t-1$ の位置 $x_{t-1}^{(s)}$ ）を同時にマスタ端末に送信する。Position-Position & Force 方式では、触力覚センサから得られた力の値がしきい値を超えた（すなわち、物体に接触している）場合にのみ、力情報を使うが、そうでなければ、触力覚センサの箇所が物体に当たっていないので、4. の式(2)の位置情報を使って力を計算する。これによって、ロボットアームの触力覚センサが付いていない箇所が物体に接触して動かない場合などにも力を感じることができる。

Position & Force-Position & Force 方式は、位置情報と力情報を同時に転送するものであり、作用・反作用の法則とマスタとスレーブの位置が一致するように制御する。すなわち、マスタ端末の力とスレーブ端末の力の和が0になり（力の大きさは同じであり、方向は逆である）、位置の差が0になること（位置ベクトルが同じであること）を保証する⁽²⁷⁾。

6. む す び

本稿は触力覚通信の仕組みと開発の歴史などを解説した。具体的には、触力覚情報とその特徴、反力の計算方法、触力覚情報の転送方式を説明した。更に、最近研究が盛んに行われている触力覚インタフェース装置を用いて触力覚センサが付与されたロボットの遠隔制御システムの情報転送方式も紹介した。

文 献

- (1) 石橋 豊, 黄 平国, “触覚通信の高品質化とその未来,” 信学論(B), vol. J99-B, no. 10, pp. 911-925, Oct. 2016.
- (2) 大西公平, 齊藤佑貴, 福島 聡, 松永卓也, 野崎貴裕, “リアルハプティクスの拓く未来社会,” 日本 AEM 学会誌, vol. 25, no. 1, pp. 9-16, 2017.
- (3) E. Steinbach, S. Hirche, M. Emst, F. Brandi, R. Chaudhari, J. Kammerl, and I. Vittorias, “Haptic communications,” Proc. IEEE, vol. 100, no. 4, pp. 937-945, April 2012.
- (4) P. Huang and Y. Ishibashi, “QoS control and QoE assessment in multi-sensory communications with haptics,” IEICE Trans. Commun., vol. E96-B, no. 2, pp. 392-403, Feb. 2013.
- (5) 3D Systems, “OpenHaptics toolkit programmer’s guide,” version 3.2, 2013.
- (6) Y. Yoo, M. Sung, N. Kim, and K. Jun, “An experimental study on the performance of haptic data transmission in networked haptic collaboration,” Proc. The 9th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), pp. 657-662, Feb. 2007.
- (7) J. Osada, Y. Ishibashi, N. Fukushima, and S. Sugawara, “QoE comparison of haptic control schemes in remote instruction system with haptic media, video, and voice,” Proc. The 27th International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC), pp. 1-4, July 2012.
- (8) K. Salisbury, F. Conti, and F. Barbagli, “Haptic rendering : Introductory concepts,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 24, no. 2, pp. 24-32, March 2004.
- (9) A. El Saddik, “The potential of haptics technologies,” IEEE Instrum. Meas. Mag., vol. 10, no. 1, pp. 10-17, Feb. 2007.
- (10) K.M. Grace, “触覚の世界 : 触覚研究の過去・現在・未来,” 日本人間工学会第 49 回大会, no. S4-1, 2008.
- (11) M. Minsky, O. Ming, O. Steele, F.P. Brooks, and M. Behensky “Feeling and seeing : Issues in force display,” ACM SIGGRAPH Comput. Graph., vol. 24, no. 2, pp. 235-241, March 1990.
- (12) J.K. Salisbury and M.A. Srinivasan, “Phantom-based haptic interaction with virtual objects,” IEEE Comput. Graph. Appl., vol. 17, no. 5, pp. 6-10, Sept./Oct. 1997.
- (13) 岩田洋夫, “実時間グラフィックスと力感覚帰還装置を用いた仮想立体のハンドリング,” NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 62-67, 1989.
- (14) 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田 弘, “空間インタフェース装置 SPIDAR の提案,” 信学論(D), vol. J74-D-II, no. 7, pp. 887-894, July 1991.
- (15) <http://www.geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview>
- (16) J. Zhou, F. Malric, and S. Shimohammadi, “A new hand-measurement method to simplify calibration in CyberGlove-based virtual rehabilitation,” IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 59, no. 10, pp. 2496-2504, Oct. 2010.
- (17) K. Bark, E. Hyman, F. Tan, E. Cha, S.A. Jax, L.J. Buxbaum, and K.J. Kuchenbecker, “Effects of vibrotactile feedback on human learning of arm motions,” IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng., vol. 23, no. 1, pp. 51-63, Jan. 2015.
- (18) 室山真徳, 卷幡光俊, 中野芳宏, 松崎 栄, 山田 整, 山口宇唯, 中山貴裕, 野々村 裕, 藤吉基弘, 田中秀治, 江刺正喜, “ロボット全身分布型触覚センサシステム用 LSI の開発,” 電学論(E), vol. 131, no. 8, pp. 302-309, Aug. 2011.
- (19) ITU-T Rec. I. 350, “General aspects of quality of service and network performance in digital networks,” March 1993.
- (20) Y. Ishibashi, S. Tasaka, and T. Hasegawa, “The virtual-time rendering algorithm for haptic media synchronization in networked virtual environment,” Proc. The 16th International Workshop on Communications Quality and Reliability (CQR), pp. 213-217, May 2002.
- (21) T. Tee, K. Eu, K. Yap, A. Marshall, and T. Lee, “A network-adaptive compensation technique for tele-haptics using position prediction algorithm,” Proc. IEEE International Symposium on Haptic Audio Visual Environments and Games (IEEE HAVE), pp. 39-44, Oct. 2013.
- (22) 有本 勇, 引地謙治, 森野祐直, 瀬崎 薫, 安田靖彦, “触覚通信における情報圧縮手法,” 信学技報, RC2001-205, DSP2001-147, SAT2001-105, pp. 17-22, Jan. 2002.
- (23) S. Matsumoto, I. Fukuda, H. Morino, K. Hikichi, K. Sezaki, and Y. Yasuda, “The influence of network issues on haptic collaboration in share virtual environments,” Proc. The 5th PHANToM User Group Workshop, Oct. 2000.
- (24) C.B. Zilles and J.K. Salisbury, “A constraint-based god-object method for haptic display,” Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IRS), vol. 3, pp. 146-151, Aug. 1995.
- (25) D.A. Lawrence, “Stability and transparency in bilateral teleoperation,” IEEE Trans. Robot. Autom., vol. 9, no. 5, pp. 624-637, Oct. 1993.
- (26) K. Suzuki, Y. Maeda, Y. Ishibashi, and N. Fukushima, “Improvement of operability in remote robot control with force feedback,” Proc. The 4th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 16-20, Oct. 2015.
- (27) 鈴木 希, 桂 誠一郎, “バイラテラル制御に基づく触覚伝送におけるパケットロスの評価,” 信学論(B), vol. J96-B, no. 8, pp. 842-849, Aug. 2013.
- (28) 大西公平, “実世界ハプティクスの原理と展望,” 電学誌, vol. 133, no. 5, pp. 268-269, May 2013.
- (29) V. Bantia, Y. Maddahi, S. Balakrishnan, and I. Sefehri, “Haptic-enabled teleoperation of base-excited hydraulic manipulators applied to live-line maintenance,” Proc. IEEE International Conference on Intelligent Robots and System (RSJ), pp. 1222-1229, Sept. 2014.
- (30) P. Huang, T. Miyoshi, and Y. Ishibashi, “Stability control in remote bilateral robot control system with force feedback,” Proc. IEEE The 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), no. C1011-A, April 2017.

(平成 30 年 7 月 31 日受付 平成 30 年 8 月 20 日最終受付)



いしばし ゆたか
石橋 豊 (正員 : フェロー)

1981 名工大・工・情報卒. 1983 同大学院修士課程了. 同年日本電信電話公社 (現 NTT) 入社. NTT ヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て, 1993 に名工大・工・助教授. 現在, 同大学院教授. 分散マルチメディア及び力覚を用いた遠隔ロボット制御の研究に従事. 工博.



こう へいこく
黄 平国 (正員)

2003 中国桂林電子工業学院・工・電子情報卒. 2010 名工大大学院博士前期課程了. 2013 同大学院博士後期課程了. 同年東京理科大・助教に就任. 現在, 星城大・経営・講師. 分散マルチメディア通信における QoS 制御と QoE 評価に関する研究に従事. 博士 (工学).