解 説

遠隔ハプティクス

Remote Haptic Interface

梶 本 裕 之* *電気通信大学, 科学技術振興機構さきがけ

Hiroyuki Kajimoto* *University of Electro-Communications, JST PRESTO

1. は じ め に

ヒトが遠隔環境間で情報をやり取りする場合, 電話や遠隔会議などで見られるように視聴覚を用いた方法が多く用いられる. ここで視聴覚に追加して触覚(力覚と皮膚感覚の総称, Haptic Sensation)を用いるとすると, その利点は何だろうか.

触覚に比べ視覚のほうが提示可能な情報の量は多く, 聴覚のほうが時間分解能は高い. よって単に情報量を増やすためだけに触覚を用いることはあまり考えられない(触覚しか使えない状況は除いて). 一方で触覚には, 「対象に直接触れ, その応答から知覚を得る」という, 視聴覚にはない特徴がある. 遠隔ハプティクスの意義は, この触覚特有の相互作用性が利用されることであると考えられる.

触覚の相互作用性を考慮すると, 遠隔ハプティクスは「対象への作用」と「対象の知覚」のどちらに重きをおくかによって次の三つに分類することができる.

- (1) 対象への作用を目的とし, その手段として対象の知覚を用いるもの. 手術などの遠隔操作がこれにあたる.
- (2) 対象の知覚を目的とし, その手段として対象への作用を用いるもの. 触診などがこれにあたる.
- (3) 対象への作用と対象の知覚を共に目的とするもの. いわゆる触覚コミュニケーションがこれにあたる.

以下ではそれぞれについて現状と課題を述べる.

2. 遠隔操作のためのハプティクス

遠隔医療に代表されるように, 遠隔操作環境において繊細な作業を必要とする場面は数多い. これを可能とするには, 特に手掌部に適切な触刺激をフィードバックすることが有効と考えられる[1]~[3].

遠隔操作のためのハプティックデバイスは, 遠隔地で用いる道具が決まっている場合(手術用具やペン, ハンドルなど), その道具の持ち手部分を操作側でも用意するのが効

率的である. これによって手掌部への複雑な触覚呈示を考えなくとも正しい触覚が自然と呈示される. 現在入手可能なハプティックデバイスの多くはこの方式を採用している.

道具の挙動を再現する方法は合理的ではあるが, 遠隔地の幅広い環境には対応しにくい. よって究極的には各指に触覚を返すハプティックデバイス(マスタハンド)が必要と考えられる. 現在マスタハンドを必要とするアプリケーションは必ずしも多くないが, 昨今の人型ロボットの進歩, 特に義手の流れをくむハンド部の洗練は, 今後マスタハンドが重要となることを示唆している.

これまで各指への触覚提示を実現するマスタハンドは数多く提案されてきた[4]~[7]. しかしこれらのほとんどは指の末節のみを対象としており, 手掌部全体を用いる多くの実作業への適用は難しかった. 今後は手掌部全体への触覚呈示を行うことにより, 手のもつ本来の技能を十分に活かす遠隔操作が可能になると思われる[8].

以上に述べた遠隔作業のためのハプティックインタフェースは, 遠隔地環境を操作者側に再現することを目指しているとも言える. 一方で作業性の向上という観点からは, 必ずしもリアルに再現しなくても, 作業しやすい環境を整えればよいとも考えられる. 例えば遠隔手術においては操作者の動きを縮小するなどの工夫がなされるが, これも作業性向上のために環境を整える一例である. 現在こうした分野は触覚の拡張現実感(Haptic AR)として精力的に研究されている[9].

代表的な例では, 力覚呈示装置を用いて対象の粘弾性を変化させる[9][10]. システムは力覚呈示装置と把持ツール先端に取り付けた力センサから構成される. ユーザがツールによって対象に接触すると, 力センサによって反力が計測される. このとき反力に応じた適切な変位と速度を呈示すれば, 対象とは異なる粘弾性を呈示することができる. 作業に合わせて現実のインピーダンスを変更するという観点は重要である. 例えば柔らかいスポンジの表面に文字を書くことは通常困難であるが, 硬いブロックのように振る舞わせることで容易となる.

触覚の拡張現実感の対象が動的に変化する状況にも適用できる. 例えば心臓外科手術において心拍を止めることな

原 2012 年 4 月 11 日

キーワード: Haptic Interface, Teleoperation, Haptic AR, Communication, Sensory Substitution

*〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

*Chofu-shi, Tokyo

く施術するため、器具先端を心拍と同期して動かすことで相対的に静止させる試みが挙げられる [11].

3. 遠隔知覚のためのハプティクス

遠隔対象の知覚を主目的としたハプティックインタフェースとしては、例えば遠隔手術中に固さの異なる病巣部を触覚的に知覚する状況が考えられる [12]. これは対象の触覚的性質の知覚が目的となる例であるが、触覚的性質以外を触覚に変換する例も数多く提案されている.

例えば博物館のガラスケースに収められた重要文化財のように、直接触れることのできない対象を距離センサなどを介して触る提案がある [13]. また福祉分野における感覚代行は最も重要な遠隔知覚の応用例である. 距離センサと触覚呈示の組み合わせによって白杖の代替としたり、カメラでとらえた画像情報を触覚情報として呈示する試みなどが数多く提案されている [14]~[18] (図 1).

感覚代行の分野の課題は二つに大別できると思われる. 第一にセンサの問題である. 実環境である程度ロバストに距離計測を行う手段としては超音波の利用が考えられるが、音速の遅さ、また解像度の低さや反射が問題となる. 一方画像ベースの計測は環境の変化にロバストではない場合が多く、また小型化、携帯化が難しかった. しかし近年、Microsoft 社の KINECT に代表されるように安価な面的距離計測手段が入手可能となっており、こうしたセンサの問題は解決に向かうと思われる [19].

第二に触覚呈示手法の問題である. 白杖のように一点で知覚する場合、周囲の広い範囲を認識するためには時間をかけた探索が必要となる. 一方で面的な触覚呈示ではヒトの触覚の特性として形状を認識することは相当に難しく、時間的な走査等による呈示が従来から提案されている [20]. しかしこの場合、結局は周囲を認識するために時間がかかることになる. 今後は時間応答性と形状認識を両立させる工夫が必要と思われる.

図 1 額への触覚呈示を用いた視触覚変換 [18]

4. 遠隔コミュニケーションのためのハプティクス

遠隔にいるヒトとのコミュニケーション手段としてのハプティックインタフェースを考えることもできる.

inTouch は回転する棒による最も単純なハプティックコミュニケーションを実現している [21]. 3 本ずつの対となった棒が互いの姿勢を目標姿勢として制御されており、ユーザは棒を介して遠隔ユーザの力を感じ、まるで同じ棒を 2 人で回転させているようなリアルな共有感覚を実現している. RobotPhone はぬいぐるみ型のロボット 2 体による同様のコミュニケーションを実現している [22]. ロボットは互いの姿勢を目標に制御される. ロボットがヒトに近い実体を持っているため単に遠隔ユーザの力を感じるだけでなく、遠隔ユーザの存在感を視覚的にも身近に感じることができる.

これらの例は棒やロボットを介しているという点では遠隔操作において紹介した道具を介したハプティックインタフェースと同様である. 今後より面的、全身的なコミュニケーションに触覚が活用されると思われる. 例えば Huggy Pajama は遠隔地同士で抱擁感を伝達する試みである [23]. 片方のユーザがぬいぐるみを抱擁すると、その圧力がもう片方に伝達される. KUSUGURI は遠隔触覚コミュニケーションの現実的な手法としてスマートフォンを用いたものである [24] (図 2). 双方がスマートフォンを把持し、片方がタッチパネルを撫でるとその動きが映像としてもう片方に表示される. 触覚としては振動呈示のみでありながら、映像との融合によってくすぐられた感覚を伝達できる.

遠隔の触覚コミュニケーションは、遠隔地側が能動的に反応する点で通常の遠隔触覚アプリケーションと大きく異なる. 通常の遠隔触覚アプリケーションは、遠隔地側の反応は操作の瞬間に生じるため、その反応が操作に付随するものであるという文脈 (コンテキスト) は明確であった. これに対して遠隔コミュニケーションの場合、遠隔地側の反応がいつ生じるか分からないため、その反応の内容、言い

図 2 画像伝送による擬似的触覚コミュニケーション [24]

換えれば文脈を理解できるように環境を整えることが重要となる。

5. お わ り に

遠隔ハプティクスはロボットの遠隔操縦の歴史とともに進展してきた歴史ある分野である。本稿では「対象への作用」と「対象の知覚」のどちらに重きをおくかによって「遠隔操作」「遠隔知覚」「コミュニケーション」の三つの応用分野に分類し、それぞれの現状と課題について述べた。

現在遠隔ハプティクスを実用化する努力が精力的に行われているが、そこでは従来の作業性、効率の向上から、さらに体験の質的転換に触覚を利用する方向に移行しつつあるように思われる。そこで重視される触覚の役割とは次のようなものである。

第一にリアリティを実現、拡張するための手がかりとしての触覚である。リアリティとは複数の感覚手がかりが一つの現象を指し示す（と脳が解釈した）瞬間に生じる特殊な感覚であるともみることができるが、このためにマルチモーダルであることは本質的に重要である。触覚はマルチモーダルな手がかりを増やすための重要な要素である。

第二に臨場感を生むための触覚である。臨場感とは視聴覚においては大きな画面やサラウンド音響によって呈示物と自己との相対関係が明確化されたときに生じる感覚ととらえることができるが、触覚は明らかに対象と自己の相対関係がはじめから提示される感覚である。また視覚における臨場感が大画面化によって再発見されたように、触覚における臨場感も、指先にとどまらない全身的な触覚呈示の提案の増加とともに再発見されつつあるように思われる。

参 考 文 献

- [1] H. Mayer, A. Knoll, E.U. Braun, R. Bauernschmitt and R. Lange: "Haptic Feedback in a Telepresence System for Endoscopic Heart Surgery," *Presence*, vol.16, no.5, pp.459-470, 2007.
- [2] C.R. Wagner, D.P. Perrin, R.D. Howe, N. Vasilyev and P.J. Del Dido: "Force Feedback in a Three-Dimensional Ultrasound-Guided Surgical Task," *Proc. Haptics Symposium*, pp.43-48, 2006.
- [3] W. Motoooka, T. Nozaki, T. Mizogochi, K. Sugawara, F. Mitome, K. Okuda, M. Miyagaki, D. Yashiro, T. Yakoh, K. Ohnishi, Y. Morikawa and N. Shimojima: "Development of 16-DOF Telesurgical Forceps Master/Slave Robot with Haptics," *Proc. IECON*, 2010.
- [4] CyberGrasp, <http://www.cyberglovesystems.com/products/cybergasp>
- [5] S. Walairacht, S. Ishii, Y. Koike and M. Sato: "Two-Handed Multi-Fingers String-Based Haptic Interface Device," *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol.E84-D, no.3, pp.365-373, 2001.
- [6] T. Endo, H. Kawasaki, T. Mouri, Y. Ishigure, H. Shimomura, M. Matsumura and K. Koketsu: "Five-Fingered Haptic Interface Robot: HIRO III," *IEEE Trans. Haptics*, vol.4, no.1, pp.14-27, 2011.
- [7] S. Nakagawara, H. Kajimoto, I. Kawabuchi, N. Kawakami and S. Tachi: "An encounter-type multi-fingered master hand using

circuitous joints," *Proc. International Conference on Robotics and Automation*, pp.2667-2672, 2005.

- [8] H. Kajimoto: "Design of Cylindrical Whole-hand Haptic Interface using Electrocutaneous Display," *Proc. EuroHaptics*, vol.2, pp.67-72, 2012.
- [9] S. Jeon and S. Choi: "Haptic augmented reality: taxonomy and an example of stiffness modulation," *Presence*, vol.18, pp.387-408, 2009.
- [10] Y. Kurita, A. Ikeda, T. Tamaki, K. Nagata and T. Ogasawara: "Haptic augmented reality interface using the real force response of an object," *Proc. 16th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.83-86, 2009.
- [11] 中村, 岸, 岡田: "高速度カメラを用いた心拍動同期とそれを用いた心臓外科手術支援ロボットシステム", *日本ロボット学会誌*, vol.21, no.4, pp.451-459, 2003.
- [12] M. Mahvash, G. Gwilliam, R. Agarwal, B. Vagvolgi, L.M. Su, D.D. Yuh and A.M. Okamura: "Force-feedback surgical teleoperator: Controller design and palpation experiments," *Proc. 16th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environments and Teleoperator Systems*, pp.465-471, 2008.
- [13] H. Yano, T. Aoki and H. Iwata: "Handheld Haptic Interface with Visual Display for Touching Remote Objects," *Proc. Haptics Symposium*, 2012.
- [14] Ultracane, <http://www.ultracane.com>
- [15] P. Bach-y Rita, C.C. Collins, F. Saunders, B. White and L. Scadden: "Vision substitution by tactile image projection," *Nature*, vol.221, pp.963-964, 1969.
- [16] C.C. Collins: "Tactile television: mechanical electrical image projection," *IEEE Trans. Man-Machine Systems*, vol.MMS-11, pp.65-71, 1970.
- [17] S. Tachi, K. Tanie, K. Komiyama and M. Abe: "Electrocutaneous communication in a guide dog robot (MELDOG)," *IEEE Trans. Biomedical Engineering*, vol.BME-32, pp.461-469, 1985.
- [18] H. Kajimoto, Y. Kanno and S. Tachi: "Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution," *Proc. EuroHaptics*, 2006.
- [19] KINECT for Windows, <http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/>
- [20] 清水: 触覚伝達機器の設計支援情報, <http://ushiku2.se.uec.ac.jp/shimizu/research/kaken/home.html>
- [21] S. Brave and A. Dahley: "inTouch: A Medium for Haptic Interpersonal Communication," *Extended Abstracts of CHI '97*, pp.363-364, 1997.
- [22] D. Sekiguchi, M. Inami, N. Kawakami, T. Maeda, Y. Yanagida and S. Tachi: "RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication," *ACM SIGGRAPH 2000 Conference Abstracts and Applications*, p.134, 2000.
- [23] J.K.S. The, A.D. Cheok, R.L. Peiris, Y. Choi and S. Lai: "Huggy Pajama: a mobile parent and child hugging communication system," *Proc. 7th International Conference on Interaction Design and Children*, 2008.
- [24] M. Furukawa, H. Kajimoto and S. Tachi: "KUSUGURI: a shared tactile interface for bidirectional tickling," *Proc. Augmented Human*, 2012.

梶本裕之 (Hiroyuki Kajimoto)

1998年3月東京大学工学部計数工学科卒業。2003年3月同大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻博士課程退学。博士(情報理工学)。2003年4月東京大学助手。2006年9月電気通信大学助教授。2007年4月同准教授。触覚ディスプレイ、触覚センサ、バーチャルリアリティシステムなどの研究開発に従事。日本バーチャルリアリティ学会、計測自動制御学会各会員。

(日本ロボット学会正会員)