

解説

ハプティックインタフェースの実世界応用

Real World 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

本稿はハプティック (触覚) インタフェースの実世界での応用全体を俯瞰することを目的とする。最終的にはロボット研究とハプティック研究の類似性に関する何らかの示唆となれば幸いである。なお提示技術の分類については例えば [1] を, 研究分野全体の概観については [2] を参照されたい。

人間の五感 (視, 聴, 触, 味, 嗅) のうち, 触覚以外の四つは感覚と感覚器官が一對一に対応しており, 特殊感覚と呼ばれる。これに対して触覚は大きく様相を異にする。まず触覚は身体全体に分布している。さらに身体表面の皮膚感覚のみならず, 深部の筋や腱による力覚によって複合的に形成されている。

日常的には触覚といえば皮膚感覚である場合が多い。このため皮膚感覚と力覚を合わせた総称としては別の語を用いる方が学術的には明確である。この用語として, ギリシャ語の「接触」を起源に持つ「ハプティック (Haptic)」がよく用いられる。日本語としては触力覚または力触覚と呼ぶことが多い。

ハプティックに関する研究は現在大きな盛り上がりを見せており, 例えば専門誌 IEEE Transaction on Haptics が創刊されたのが 2008 年のことである。特にヒトと外界のハプティックを用いた関わりを支援する技術を, 本稿ではハプティックインタフェースと呼ぶことにする。

ハプティックインタフェースは CAD やゲームなどのコンピュータインタフェースにとどまらず, 実世界での応用が数多く提案されている。

実世界におけるハプティックインタフェースの応用分野は, 大きく次の四つに分類できる (図 1)。第一に操縦であり, 遠隔手術や災害救援用ロボットなどが含まれる。第二にコミュニケーションであり, 遠隔のヒトとの双方向通信が対象となる。第三に感覚変換であり, 例えば視覚障害者

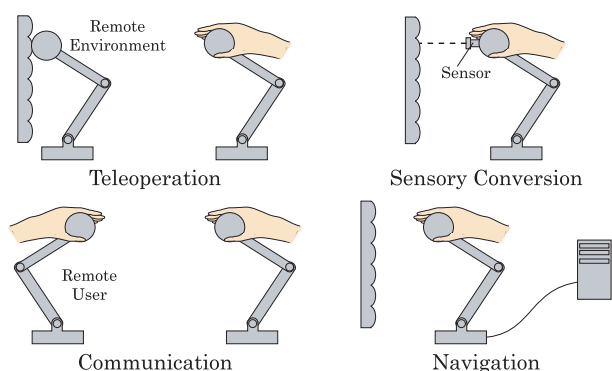


図 1 ハプティックインタフェースの実世界応用

のための視触覚変換がある。第四にナビゲーションであり, 歩行誘導などが含まれる。次章以降では各応用分野を実例と共に紹介する。

2. 操縦

最もプリミティブな操縦にも, 実はすでにハプティックインタフェースの基本的な要素が含まれている。例えば遠隔のロボットを操縦桿であやつる場面においては, 操縦者は操縦桿を傾ける角度やボタンを押す力を自分自身で知覚している。もしそれらがモータに流れる電流指令に対応していれば, 操縦者が知覚しているのはロボットの出す力そのものとなる。

つまりバイラテラル制御などによる明示的なフィードバックが無くても, 操縦という行為の中に, それなりに自然な感覚フィードバックが内在してしまう。これは運動指令と感覚が直結するハプティックならではの特徴である。

ただしロボットの前にある障害物は操縦者の前には無い。このため操縦者とロボットが同じ「力」を出力したとしても「姿勢」は異なってしまう。ヒトのハプティック知覚には姿勢知覚も含まれるから, 正しいハプティック情報が提示されていないことになる。

この問題を解決するには, ロボット側でセンシングした情報を元に, 操縦者の環境をハプティック的に同じ状況にすればよい。この技術をバイラテラル制御と呼ぶが, 目的は操縦側とロボット側で, 同じ力と姿勢の関係 (インピーダ

原稿受付

キーワード: Haptic Interface, Teleoperation, Communication, Sensory Conversion, Navigation

*〒 182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

*1-5-1 Chofugaoka Chofu, Tokyo

ンス)を成立させることである。これが必要な理由は、ヒトが力と姿勢を共に知覚する生き物だからである。

2.1 道具と力覚・皮膚感覚

例えば医療分野においてはハプティックフィードバックのないロボット手術はすでに実用化されており、現在は術者にハプティック感覚を提示する研究が数多く行われている [3] [4]。

操縦で実現したい作業は、指そのもので触るのではなく道具を用いて行う場合が多い。そこで多くの場合、遠隔ロボットのエンドエフェクタとして道具を装着し、操縦者側には道具の把持部分を用意するという構成がとられる。ロボットのエンドエフェクタと操縦者の把持部の挙動を一致させれば、操縦者は道具を介して対象に触れているように感じることが出来る。

このとき明示的に提示しているのは力覚のみであるが、操縦者は道具の把持部をつかんでいるから、自動的に自然な皮膚感覚も生じる。非常に堅実な構成であるといえる。

ハプティックインタフェースによる操縦の次の段階の一つは、道具を介することなく手で直接遠隔の対象物を扱えることであろう。ヒトと同程度の能力を持つハンドと、ヒトの手掌部全体に繊細な皮膚感覚を提示できるディスプレイの開発が必要である。

3. コミュニケーション

ハプティックインタフェースの操縦応用を拡張すると、遠隔にいるヒトとのコミュニケーション手段として用いることができる。操縦における対象が物体からヒトになれば、一応のコミュニケーションシステムが出来上がるためである。操縦にとってハプティックはあくまで目的達成のための手段であるが、コミュニケーションにおいては相互に感覚を共有すること自体が意味を持つ。

inTouch [5] は回転する棒により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。二本の棒が互いの姿勢を目標姿勢として制御されており、棒に触れた二人のユーザは、まるで一本の棒を共有しているように感じることができる。コミュニケーションにおける「場の共有」を、視聴覚からハプティック領域に拡張した点で非常に意義深い研究である。

RobotPhone [6] はぬいぐるみ型のロボット二体による同様のコミュニケーションを実現している (図2)。ロボットは互いの姿勢を目標に制御され、ユーザによる操作は即座にもう一体のロボットの動きに反映される。ロボットがヒトに近い身体を持っているため、遠隔ユーザとの場の共有にとどまらず、遠隔ユーザそのものの存在を身近に感じることができる。筆者の私見であるが、inTouchが「(遠隔だが棒で)つながっている」状況を作ったのに対し、RobotPhoneは「そこに居る」状況を作ったという点に違いがあるよう



図2 双方向ハプティックコミュニケーション [6]

に思われる。

ではハプティックインタフェースによるコミュニケーションの次の段階は何であろうか。おそらくは相手がここに居て、しかも直接触れあう事ができることであろう。この直接的な皮膚接触の状況 [7] を実現するには、皮膚感覚ディスプレイを用いたコミュニケーションシステムの開発が急務であると考えられる。

4. 感覚変換

操縦やコミュニケーションが自己を遠隔に飛ばす、あるいは遠隔とつながる応用であったのに対し、自己と近傍環境とのインタラクションにハプティックを利用することもできる。

この代表的な応用が感覚代行である。感覚代行は感覚(特に視聴覚)に障害をもつユーザに対し、別の感覚チャンネルに情報を提示する技術の総称である。ハプティックインタフェースの応用としては最も長い歴史を持ち、1960年代後半にはBach-y-Ritaらによる最初の視触覚変換システム(TVSS)が提案されている [8]。このTVSSでは視覚カメラによって捉えた映像を、背中あるいは腹の振動子マトリクスによって提示した。現在も数多くのパリエーションが提案されているが基本的な形態は大きく変わってはいない [9] (図3)。また聴覚情報を皮膚感覚として提示する試みも数多く行われている [10]。

4.1 ハプティックの拡張現実感

感覚代行が視聴覚情報の皮膚感覚への再マッピングであるのに対し、人間が本来持たないセンサ情報をハプティックによって提示することも考えられる。これはハプティックにおける拡張現実感技術 (AR: Augmented Reality) であると言える。

Smart Tool [11] は手で持つ道具の先端にセンサを付け、センサ情報によって道具を力覚的に制御するものである (図

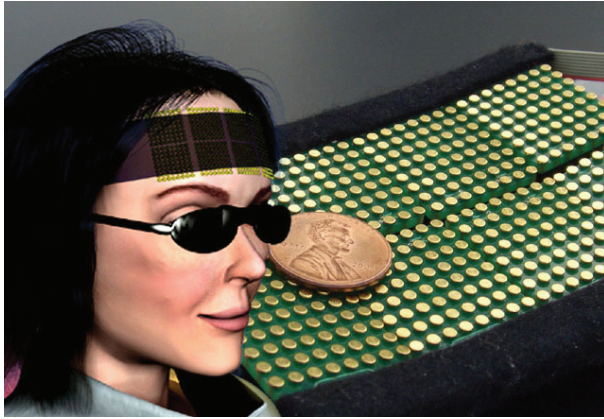


図3 額用電気触覚ディスプレイによる感覚代行 [9]

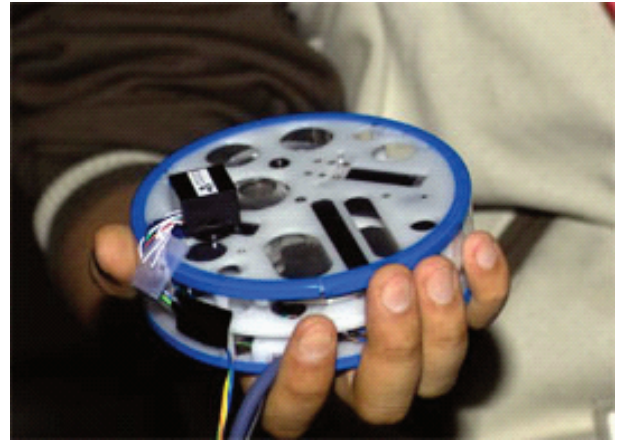


図5 牽引力錯覚を利用したナビゲーション [13]

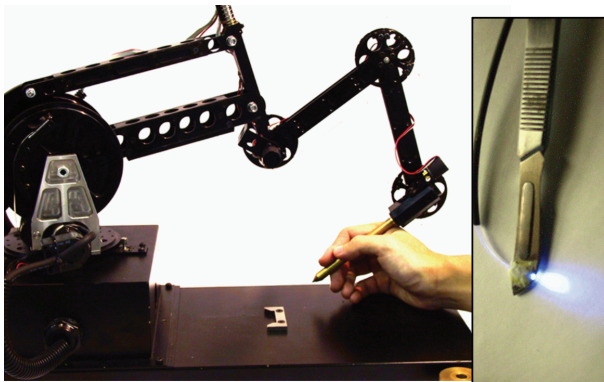


図4 ハプティックによる拡張現実感 [11]



図6 耳を牽引するナビゲーション [14]

4)．例えば道具としてメスを、センサとして色センサを用い、黄色に反応して力覚的な壁を作ると、ゆで卵の黄身を傷つけず白身だけを切る事ができる．外科手術の際に進入不可能領域を設定する等の応用が考えられる．

5. ナビゲーション

感覚変換と同様にユーザ近傍の情報をハプティックによって提示するもうひとつの応用がナビゲーションである．感覚変換はユーザ自身が環境を把握するためのものであり、行動の主体はユーザである．これに対してナビゲーションは、ユーザに望ましい行動をとらせるためのものであり、ユーザは環境情報ではなく行動計画にまで還元された情報を提示される．

センサとして例えばGPSを用いれば歩行ナビゲーションができる．ベルトタイプ [12]、ハンドヘルドタイプ [13] (図5) 等が開発されており、変わったところでは耳牽引型のデバイスも提案されている [14] (図6) ．

従来のナビゲーションでは主に視聴覚が使われてきたが、ハプティックを使うことには次の二つの利点がある．第一は安全面での利点である．視聴覚は外界の情報が入力され続けているため、ナビゲーションに利用してしまうと外界

の情報が遮断されてしまう危険があるが、ハプティックであればその恐れがない．

第二は直感性である．視聴覚によるナビゲーションは行動のために解釈を必要とし、極端な場合は左と右を間違える事もありうる．これに対してハプティックによるナビゲーションは身体に直接提示されるから、解釈のミスを生じにくいと考えられる．

5.1 ナビゲーションと教示

すでに述べたように、ナビゲーションは行動計画を指示されるという点で感覚変換とは異なり、極言すれば他人の意志に従う状態であると言える．しかしナビゲーションの利点の一つである直感性を突き詰めると、「指示される」のレベルであったものが「動かした方が自然と感じる」の段階を経て、最終的には「指示に気付かず動きたくなる」に達すると考えられる．

すべてのナビゲーションにおいて、このような能動性の誘発が理想形であるわけではない（責任の問題を生じる）が、この能動性を特に目的としたものは教示と呼ばれ、ハプティックインタフェースの大きな応用分野になると目されている．例えば書道の教示 [15] やスポーツにおける理想

的なフォームの教示 [16] が提案されている。教示は一般的なナビゲーションとは異なり、技術を体得することが目的である。

ナビゲーションと教示の違いには、能動性と受動性という、ハプティックにとって極めて本質的な問題が含まれている。書道を例にとれば、教師は生徒の手を取り、力覚的にナビゲーションすることによって正しい軌跡を教える。その段階では生徒の動きは受動的なものであるが、いつの間にか最終的に生徒自身の能力として運筆のスキルが身につく。従来から行われてきたこの方法を超えるような、ハプティックによる効率的な教示手法とその原理を探ることは今なお重要な課題である。

6. おわりに

本稿ではハプティックインタフェースの実世界での応用を四つに分けて説明した。この四つは目的およびそれともなう評価軸によって表1のようにまとめることができる。

表1 ハプティックインタフェースの実世界応用と目的

応用	目的	評価軸
操縦	対象の制御	リアリティ
コミュニケーション	対象との相互作用	リアリティ
感覚変換	対象の知覚	情報量
ナビゲーション	自分自身の制御	情報量

操縦は、ユーザが遠隔環境を制御することが目的である。コミュニケーションはユーザが遠隔環境と相互作用することが目的である。感覚変換はユーザが近傍環境を知覚することが目的である。そしてナビゲーションはユーザの行動そのものを制御するものである。前者二つには感覚のリアリティが重要となり、後者二つには提示情報の量が重要となる。

結局ハプティックインタフェースの実世界応用は、対象を制御するのか、相互作用するのか、知覚するのか、制御されるのか、という、対象との関わり方が応用分野を決めていることがわかる。こうした対象との関わり方のバリエーションは、ロボットの応用分類にも適用できるものであるから、ロボット研究者には馴染み深く理解されると推測する。

ハプティックインタフェースの研究は研究者数、研究内容とも我が国が大きな存在感を示している分野であるが、その背景には伝統あるロボット研究とのつながりがある。一つのつながりは技術要素が共通していることであるが、より重要なつながりは、物理的実体を持った自己と他者の関わり方のエンジニアリングであるという共通点であると思われる。

参考文献

- [1] 梶本: “触覚・力覚ディスプレイ”, 知能と情報, Vol.19, No.4, pp.326-332, 2007.
- [2] 篠田他: “特集「触覚技術」”, 計測と制御, Vol.47, No.7, 2008.
- [3] Mayer H., Knoll A., Braun E.U., Bauernschmitt R. and Lange R.: “Haptic Feedback in a Telepresence System for Endoscopic Heart Surgery,” Presence, Vol.16, No.5, pp.459-470, 2007.
- [4] Wagner C.R., Perrin D.P., Howe R.D., Vasilyev N. and Del Dido P.J.: “Force Feedback in a Three-Dimensional Ultrasound-Guided Surgical Task,” Proc. Haptics Symposium, pp.43-48, 2006.
- [5] Brave, S. and Dahley, A.: “inTouch: A Medium for Haptic Interpersonal Communication,” Extended Abstracts of CHI '97, pp. 363-364, ACM Press, 1997
- [6] Sekiguchi D., Inami M., Kawakami N., Maeda T., Yanagida Y. and Tachi S.: “RobotPHONE: RUI for Interpersonal Communication,” ACM SIGGRAPH 2000 Conference Abstracts and Applications, p.134, 2000.
- [7] 橋本, 中田, 梶本: “Hi-Fi 触覚提示に関する研究: ハードウェアの基礎的検討”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.14, No.4, pp.491-499, 2009.
- [8] Bach-y Rita P., Collins C.C., Saunders F., White B. and Scadden L.: “Vision substitution by tactile image projection,” Nature, Vol.221, pp.963-964, 1969.
- [9] Kajimoto H., Kanno Y. and Tachi S.: “Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution,” Proc. EuroHaptics, 2006.
- [10] Wada C., Shoji H. and Ifukube T.: “Development and evaluation of a tactile display for a tactile vocoder,” Technology and Disability, Vol.11, No.3, pp.151-159, 1999.
- [11] Nojima T., Sekiguchi D., Inami M. and Tachi S.: “The Smart-Tool: A System for Augmented Reality of Haptics,” Proc. IEEE Virtual Reality, pp.67-72, 2002.
- [12] Tsukada, K. and Yasumrua, M.: “ActiveBelt: Belt-type Wearable Tactile Display for Directional Navigation,” Proc. UbiComp, pp.384-399, 2004.
- [13] Amemiya T. and Maeda T.: “Directional Force Sensation by Asymmetric Oscillation from a Double-layer Slider-crank Mechanism,” ASME J. Computing and Information Science in Engineering, Vol. 9, No. 1, March 2009.
- [14] Kojima Y., Hashimoto Y. and Kajimoto H.: “Pull-navi: a novel tactile navigation interface by pulling the ears,” Proc. SIGGRAPH, 2009.
- [15] 嵯峨, 川上, 館: “力覚の主体性を活用した教示手法に関する研究”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 363-369, 2005.
- [16] van Erp J.B.F., Saturday I. and Jansen C.: “Application of tactile displays in sports: Where to, how and when to move,” Proc. Eurohaptics pp.90-95, 2006.

梶本裕之 (Hiroyuki Kajimoto)

1975年11月7日生。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, 日本ロボット学会, 計測自動制御学会各会員。(日本ロボット学会正会員)