

錯覚を利用した多指ハプティックデバイス 人の5指動作を伝達するVR・遠隔ロボットハンド

慶應義塾大学 理工学部
前野 隆司

バーチャルリアリティーや遠隔操作を実現するためには、視覚のみならず触覚・力覚のフィードバックが不可欠である。筆者らは、視覚により体性感覚を“だます”効果を積極的に利用したパッシブフォースフィードバックに基づく5指装着型ハプティックデバイスを開発した。本稿ではこの手法と装置の概要について解説する。

1. はじめに

筆者は、触覚・力覚、アクチュエータ、ロボットなど、いわば機械工学の範疇の研究を行っている。このような私が“画像ラボ”の原稿を執筆するのは僭越ではないかと抵抗が無くもなかったが、もしかしたら以下の2つの意味があるのではないかと勝手に考え、お引き受けすることにした。

ひとつは、アナロジーの視点からの交流である。触覚の検出や伝達の研究をやっていると、触覚と視覚の歴然とした格差に呆然とせざるを得ない。触覚も視覚もヒトがパターン情報を分布感覚としていかに処理するかという意味では似ているが、視覚の検出、圧縮、伝達、提示の技術はすさまじく進んでいるのに対し、触覚のそれはまだ始まったばかりで方法さえわかっていないというありさまである。このため、触

覚の研究においては視覚とのアナロジーという視点がきわめて重要だと思っている¹⁾。そこで、もしかしたら逆に触覚・力覚の話が視覚関係者にも何かひらめきを与えることになるかもしれない、と考えたのである。

2つめは、私の研究も実は画像の研究の一分野かもしれない、と考えたことによる。本稿で紹介する「パッシブフォースフィードバックを用いた多指エグゾスケルトン型ハプティックデバイスの開発」²⁾では、ヒトが変位を知覚するためには、視覚が体性感覚よりも優位であるという特徴を積極的に利用し、バーチャルリアリティーやレイグジスタンスのためのデバイスを提案している。広い意味での画像情報を有効に利用しているという意味では、筆者の研究も画像研究の一部といえるかもしれない。

このため、本稿では、上述の研究の

エッセンスについて簡単に述べる。詳細は文献²⁾を参照していただければ幸いである。

2. 錯覚を利用した柔らかさ提示法

遠隔ロボットやバーチャルロボットをヒトが操作するためには、ヒトに「力覚」を提示することが重要である。「力覚」とは、例えば指でゴムボールを押したときの反力を知覚する感覚であり、そのとき表面がつるつるか、ざらざらかを知覚する「触覚」とは区別される。

「触覚」とは、指表面の反力分布パターンを、指腹部内部に配置された触覚受容器群が情報処理した結果である。一方、「力覚」は一般に触覚受容器のみならず指の筋や腱に存在する自己受容器の働きにより検出される。

遠隔地またはバーチャル空間の「力覚」を検出する装置としては、

SensAble Technologies 社の PHANToM が有名である³⁾。他にも、国内外の多くの研究機関やメーカーが様々な機器を開発している。

これらの装置では、一般に、「力覚」を提示するためにバイラテラル制御が行われる。第1図(a)に、コンピュータの画像として示される仮想(スレーブ)デバイスの位置と力をハプティック(マスター)デバイスに提示するための、一般的なバイラテラル制御法を示す。ヒトが指でハプティックデバイスを操作するものとする、ハプティックデバイスの変位は仮想デバイスの変位として画面上に再現される。また、仮想デバイスが物体に接触した際の接触反力と同じ大きさの力がハプティックデバイスに設けられたアクチュエータによりヒトに返される。もちろん、仮想デバイスの変位や物体との位置関係は、画像からのビジュアルフィードバックとしてヒトの視覚にも提示される。このようなフィードバックを延々と行えば、バーチャルな力覚をヒトに提示することができる。仮想(または遠隔)物体が柔らかい場合にも、仮想デバイスが物体にぐにゃっと押し込まれたときの変位、力、画像が提示されるため、ヒトは物体の柔らかさをリアルに知覚することができる。このため、この手法は、仮想デバイスや遠隔デバイス操作のための一般的な手法となっている。

しかし、考えてみれば、この手法に対し、ふたつの素朴な疑問が湧く。ひとつは、仮想(または遠隔)デバイスが物体と接触し終えて止まったとき、この止まった感じをヒトに提示するために、ハプティックデバイス側のモータをわざわざ制御しつづけるというのはいかなるものか、という点である。止まっているという情報をヒトに与えるのにエネルギーを供給しつづけるの

は何とももったいない。

ふたつめの疑問は、結局ヒトが得る情報が冗長であるという点である。すなわち、指で操作しているハプティックデバイスと仮想デバイスの間では、変位と力が等しい。言い換えれば、操作者には変位と力が正確に提示されているといえる。また、操作者の視覚によっても、画像上の変位情報はビジュアルフィードバックされている。つまり、仮想物体に接触した仮想デバイスの変位は、操作者の指と目の両方に対してフィードバックされているのである。しかし、実は、ビジュアルフィードバックは臨場感を増すための補足的なものであり、使わなくてもかまわない。たとえば、目をつぶって PHANToM を操作してもちゃんと仮想物体の柔らかさを感じることができる。もちろん冗長な情報はロバスト性を高め有効なのではあるが、もっと情報を絞り込んでシンプルにすることはできないのか、と考えることもできる。

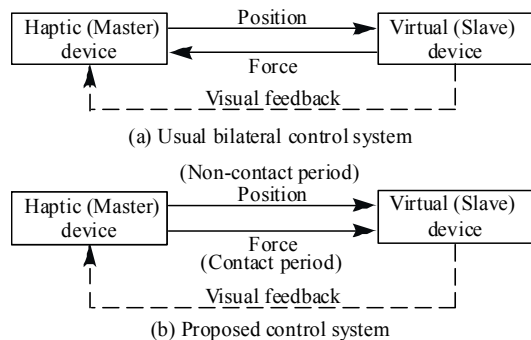
そこで筆者らが考えた論法は、以下のようなものである。

- (1) 力情報は従来どおり指にフィードバックすればよい。
- (2) 変位情報は視覚によりフィードバックされるだけで十分ではないか? 言い換えれば、ハプティックデバイスの変位は仮想デバイスの

変位と異なってもいいのではないか。

- (3) そうであるなら、ハプティックデバイス側にアクチュエータを設けなくても、クラッチとばねを使って機構を簡略化できるのではないか。実際、(2)は、Srinivasan ら⁴⁾によって確認されている。すなわち、Srinivasan らは、仮想対象物の剛性を認識する際には、視覚による変位情報が体性感覚による変位情報に対して優位に働くことを示している。

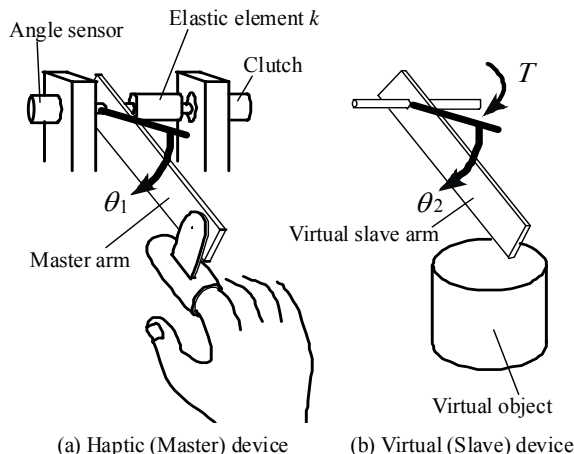
このため、筆者らは、物体との接触・非接触を判断して切り替える第1図(b)のような制御法を提案し、第2図に示した簡単な1自由度アーム装置を用いて、手法の妥当性を検証した。ハプティックデバイス(a)は、角度センサ、アーム、弾性要素、クラッチから成る。クラッチの軸の一端は固定されており、他端は弾性要素を介してアームに接続されている。また、図中の k は弾性要素のねじりばね定数を表す。仮想空間内のスレーブデバイス(b)はハプティックデバイスからの位置指令および力指令に応じてハプティックデバイスに追従するものとする。本装置を用いて仮想空間内の変位情報および力情報をハプティックデバイス操作者に提示するための手法を、接触時および非接触時に分けて以下に述べる。



第1図 従来の制御法と本手法の比較

仮想スレーブアームが対象物に接触していないときには、ハプティックデバイスのクラッチを保持解除状態とする。ハプティックデバイスが操作されると、 θ_1 (第2図(a)) に追従するように仮想スレーブアームの回転角 θ_2 (第2図(b)) が計算され、表示される。また、クラッチが保持解除の状態にあるため、弾性要素 k はねじれない (第1図(b)における位置の制御に相当)。結果として、ハプティックデバイスの操作者には、仮想スレーブアームの変位情報が提示されることになる。

仮想スレーブアームの回転に伴い、仮想スレーブアームが仮想対象物に接触した場合には、ハプティックデバイスのクラッチを保持状態に切り替える。また、この時点におけるハプティックデバイスの角度を θ_1' として記憶する。この状態から、操作者がハプティックデバイスをさらに動かすと、弾性要素 k にはねじり変形が生じ、ねじれ角 $(\theta_1 - \theta_1')$ の大きさに比例した反力が生じる。このため、ハプティックデバイスの操作者には力が提示される(能動的なフィードバック制御による力覚提示ではなく受動弾性による力覚提示であるので、パッシブフォースフィードバックであるといえる)。同時に、仮想スレーブアームと仮想物体に対しては以下の計算が行われる。仮想スレーブアームと仮想物体の接触部には、ハプティックデバイスの操作者に提示された力と等しい仮想接触力が加えられる。仮想物体は仮想スレーブアームとの仮想接触力により、あらかじめ設定された仮想物体の剛性に応じて変形する(第1図(b)における力のユニラテラル制御に相当)。結果として、受動弾性要素 k の復元力により、ハプティックデバイス操作者の指には仮想スレーブアームと仮想物体との接触反力に等しい力が提示されることとなる。



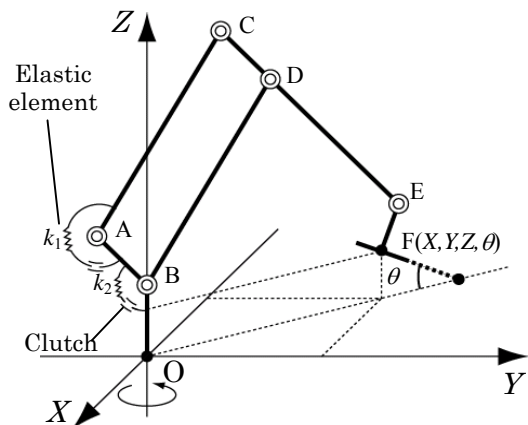
第2図 1自由度マスター・スレーブ装置の模式図

この際、一般的なバイラテラル制御手法を用いた力覚提示時とは異なり、仮想対象物と弾性要素 k の剛性の違いにより、ハプティックデバイスの角変位と仮想スレーブアームの角変位には差が生じてしまう。しかし、操作者は仮想空間を眼で見ている(ハプティックデバイスおよび実際の指は見ないので、当然、視覚的には仮想空間での仮想スレーブアームと仮想物体の変位を正確に知覚することができる。よって、視覚により得た変位情報と、体性感覚による力情報を組み合わせることにより、対象物の剛性を判断することができる。

本制御法では、第1図(b)に示したように、情報が常にハプティックデバイス側から仮想スレーブデバイス側へ伝達されるため、操作対象物が能動的に運動する場合には、運動に伴う反力変化をハプティックデバイス側に反映することができない。このため、本手法は、物体や道具の操作など、能動的に運動しない仮想対象物をハンドリングする場合に有効である。本制御法では、ハプティックデバイス操作者に受動的に力覚を提示するため、ハプティックデバイスにアクチュエータを付加する

必要がなく、位置と力の制御を同時に行わないため、簡便な装置と制御系を構成することが可能である。また、装置が簡便であるため、本制御法を多自由度システムに適用することが容易である。さらに、システムの暴走によって装置が操作者に危害を加える危険性がないことから、安全性の高いシステムであるといえる。また、仮想スレーブ側からハプティックデバイス側へのフィードバック信号は接触・非接触の切り替え情報のみであり、従来のバイラテラル制御と比較して情報量が少ないため、通信ネットワークの伝達遅れ時間変動に起因する過大な力の提示や発振がハプティックデバイス側に生じ得ないという利点を有する。

実際に、ハプティックデバイスと遠隔スレーブデバイスを用いて心理物理実験を行ったところ、ほとんどの被験者が本手法により違和感なく物体の柔らかさを認識することができた⁵⁾。このことは、指に加わる力が正確に提示され、変位が画像により提示されていることをヒトにあまり意識させずに、物体の柔らかさを錯覚に基づいて提示できることを表している。



第3図 3次元幾何モデル



第4図 多指ハプティックデバイス外観図

3. 多指ハプティックデバイス

2章で述べた手法を多指ハプティックデバイスに拡張した。第3図に本機構の3次元幾何モデルを示す。点Oが手の甲の上部に、点Fが指先に位置する。四角形ABDCは平行四辺形を形成しており、リンクは点OにおいてBO軸まわりの回転1自由度を有する。

本デバイスでは、1指につき4自由度の運動計測が可能であり、指先の位置と角度を近似することなく計測できる。各リンクのなす角は、点B, C, E, Oに設置する角度センサにより計測する。指先の位置と角度は、これらの角度とリンク長より順運動学を用いて求められる。

指先への力覚提示は点A, Bに設置するクラッチにより行う。それぞれのクラッチの軸は、前述の制御法を適用するために弾性要素を介してリンク部材と接続されている。第3図では、クラッチおよび弾性要素を模式的に示しているが、実際にはねじりばねとクラッチを回転軸上に直列に配する。2章の装置と同様、クラッチは接触・非接触の切り替えのために、ねじりばねは力提示のために用いる。点AのクラッチによりリンクACとリンクABのなす角を保持し、点Bのクラッチにより

リンクABとリンクBOのなす角を保持する。クラッチを動作させることにより、屈伸運動する指先に対してねじりばねの復元力による受動的な力を提示する。このとき、ハプティックデバイスの指先部に加わる力は、角度センサによる計測角度と弾性要素のねじりばね定数から求められる。

試作した3指ハプティックデバイスを第4図に示す。図では3指に装着しているが、4指または5指装置への拡張も可能である。各リンク部材にはアクリル板を、角度センサにはポテンシオメータを用い、弾性要素にはアクリル棒を使用した。

第5図には、本装置を用いて仮想空間内で物体をリアルに把持した感覚を得られることを確認した実験の様子である。心理物理実験の結果、本ハプティックデバイスにより、対象物の剛性

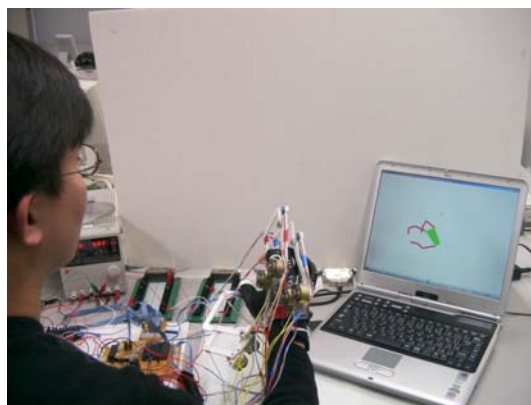
の違いを認識できることを確認している。

4. おわりに

筆者らが開発した、錯覚に基づく多指装着型ハプティックデバイスの原理と構造について述べた。ハプティックデバイスの高精度化を図る、4指または5指のハンドに拡張する、といったシステムのリファインは今後の課題である。また、今後、出力側に小型多指多関節ロボットを用いて微細な作業や道具ハンドリングの可能性を検討する、出力側をVRとして手指の動作特性の解析を行う、といった応用展開を図る予定である。

参考文献

- 1) 前野隆司, ヒトの触覚受容機構 一力



第5図 心理物理実験の様子

- 学・アナロジー・錯覚という視点から一、電気学会センサマイクロマシン部門誌, Vol. 122-E, No. 10, 2002, pp. 469-473
- 2) 小山辰也, 山野郁男, 竹村研治郎, 前野隆司, パッシブフォースフィールドバックを用いた多指エグゾスケルトン型ハプティックデバイスの開発, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 7巻4号, 2002, pp. 565-574
- 3) <http://www.sensable.com/>
- 4) M. A. Srinivasan, G. L. Beauregard and D. L. Brock : The impact of visual information in the haptic perception of stiffness in virtual environments, Proc. ASME Dynamic System and Control Div., DSC, vol.58, 1996, pp. 555-559
- 5) Ikuo Yamano, Kenjiro Takemura, Ken Endo and Takashi Maeno, Method for Controlling Master-Slave Robots using

Switching and Elastic Elements, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2002, pp. 1717-1722

著者略歴

前野隆司 (まえのたかし) : 昭和 37 年 1 月生れ. 昭和 59 年 3 月東京工業大学工学部機械工学科卒業, 昭和 61 年 3 月東京工業大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 昭和 61 年 4 月キヤノン株式会社入社, 生産技術研究所勤務. 平成 2 年 7 月カリフォルニア大学バークレー校機械工学科 Visiting Industrial Fellow (～平成 4 年 6 月). 平成 5 年 12 月博士 (工学) 学位取得 (東京工業大学). 平成 7 年 4 月慶應義塾大学理工学部機械工学科専任講師, 平成 11 年 4 月同大学助教授, 現在に至る. 平成 13 年 4 月ハーバード大学応用科学・工学部門 Visiting Professor (～平成 13 年 9 月).

平成 7 年「オートフォーカス用棒状超音波モータの開発」により日本音響学会技術開発賞受賞. 平成 11 年「ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係」により日本機械学会賞 (論文) 受賞.

日本機械学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会, 日本音響学会, バイオメカニズム学会, 計測自動制御学会, システム制御情報学会, 日本デザイン学会, IEEE の会員.

アクチュエータ, センサ, ロボット, VR 等の研究に従事.

連絡先 :

住所 : 横浜市港北区日吉 3-14-1 慶應義塾大学理工学部機械工学科

E-mail : maeno@mech.keio.ac.jp

ホームページ :

<http://www.maeno.mech.keio.ac.jp>