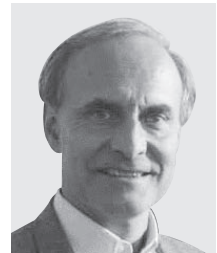


マンマシンインターフェイスのキーテクノロジー —ハプティクス—

Haptics as a Key Technology in Man-Machine Interface



ハネス・プロイレル*
Prof. Hannes Bleuler

The haptic senses include many different modalities: Sensing of force, texture, temperature, body posture etc. While optical display screens and acoustic signals are standard interface modi for machine to man communication, haptic interfaces are still at a research level. But many practical and commercial realizations are now emerging. This article gives some examples from the biomedical robotics field, namely surgery telemanipulators, rehabilitation devices and assist devices. But research results from haptic interfaces could benefit many other domains, including the automotive.

Key Words: Haptic interface, Man-Machine Interface, Human-Machine Interface, Man-Machine Interaction

1. ハプティクスの簡単な背景

ハプティクスは、ギリシャ語の “ἅπτω” = “I touch” (私 触る) が由来で、アリストテレスが説いた「古来からの分類による」五感のひとつである。その五感の中で、触覚は唯一全ての生命体で共通している。ヒト (他の生命体もだが) は、視覚、聴覚 (ヘレン・ケラー)、味覚、嗅覚なしでも生きることができるが、触覚なしには生きることができない。

これら五感の中で、触覚 (またはハプティクス) は最も複雑である。触覚は、少なくとも六つの感覚タイプを含み、そのそれぞれに対し、生理学者は独立した受容器細胞や器官を特定できる。

①力感知

②質感感知

③固有受容性感知

(例) 肉体の関節位置や筋肉姿勢の知覚

④温度感知: 感知した物体の温度と放熱量 (ヒートシンク量) のコンビネーション

⑤前庭器官: 重力加速度方向の感知

⑥痛み感知: 痛覚

上記の上から三つの感覚タイプの緻密なコンビネーションにより、滑り感なのか粘着感であるのかを区別でき

る。左記の上から四つの触覚感覚のコンビネーションにより、濡れ感と乾燥感を区別できる。

触覚は複雑でかつ富んでいるという点を考察すると、視覚や聴覚に比べてどことなく過小評価されることが多いことに驚かされる。視覚からの情報量は、技術的観点では、圧倒的に多いことは確かである。それは、視覚からの情報量は技術的におおむね測ることができるからであるが、まだ議論の余地はある。視覚の「リフレッシュ・レート」は、30 ~ 50Hz 付近であり、これに対応するピクセル数および色は、スムーズなビデオストリーミングを実現するには十分である。感知の上限下限は、ビット/秒で示すことができるので、ある程度正確に定義できそうである。

同様に、視覚の上限下限について考えてみると、聴覚のそれはより簡単である。具体的に説明すると、約 16Hz から 20kHz の周波数領域や 100dB までのダイナミックレンジは、ビット/秒に変換できる。しかしながら、圧縮形式と知覚いき値についての議論があることは、それらの推定値が不確かなものであることを例証している。

では、先ほど挙げた六つの感覚タイプはどれくらいのビット/秒になるだろうか。ほぼ言うまでもなく、これはまだ未解決の問題で、見解は数多の想定によるところがある。

*スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) ロボットシステム研究室

2. マンマシンインターフェイスにおけるハプティクス

マンマシンインターフェイスは、入力装置と出力装置で構成される「入力」か「出力」かは、ヒト側から見るのか機械側から見るのかによって当然入れ替わる。最も一般的な入力装置（人から機械への）は、キーボード、ボタン、レバー型リモコン、ハンドル、ペダルである。最も一般的な出力装置（機械から人への）は、視覚的表示物（時計、タコメータ、ランプまたはLED、表示用画面）である。マイク（入力信号）とスピーカ（出力信号）のような聴覚装置を加えると、マンマシンインターフェイスの90%以上をカバーできる。これにより、下記二つの相互作用方向には、大差があることが分かる。

1) [ヒト→機械]

2) [機械→ヒト]

一つ目のインターフェイス方向 [ヒト→機械] が本質的に触覚的である一方、二つ目 [機械→ヒト] は、非常に視覚的かつ聴覚的であり、きわめて間接的にしか触覚的ではない。（もちろん車内では振動や加速を感じるが、これは二次的現象であり運転に必要不可欠なものではない。）運転手と車の重要な触覚的インターフェイスは、コマンド要素である、ハンドル、ペダル、ハンドルの「感覚」、ボタン、つまみを通して伝わるものである。我々はこれらのインターフェイス上で、実際に重要な触覚的インターフェイスが動くのを目の当たりにする。つまり、ハンドルの基本的機能は、単に運転方向を示すコマンド機能のみということである。しかし、最も重要なのは、二次的機能で、たとえば、運転手がハンドルから受ける触覚的なフィードバックである。これは、本質的には幾分かの振動（エンジン ON/OFF や回転速度の程度など）を含む力のフィードバックである。あるいは、触覚的フィードバックを受けないレバー型リモコンでブレーキをかけることを想像してみると、まず、ブレーキトルクは、位置にのみ比例し、ペダルにかかる力には比例しない。これは、大変不便そうであり、減速時に車から来る触覚的フィードバックに、よりいっそう頼らなければならないだろう。しかし、たとえば、ビデオゲームマニア等のように、練習を積めば、視覚的フィードバックのみで運転の達人になることができる。

ここまでは、車の運転など、日常での触覚的インターフェイスの重要性について紹介した。実際、触覚的インターフェイスは、何年もあまり触れられていなかった研

究トピックであったが（参考：Hayward¹⁾）、近年では、カンファレンス（World Haptics, Euro Haptics, Asia Haptics）や、出版物が急速に増えている。次項からは、自動車分野以外の例を挙げる。

3. 生体医学技術での適用例

3.1 手術用ロボット工学

外科手術は、観血手術から小規模切開手術にまで発展し、この約10年ではロボット外科手術にまで発展した。この発展は手術器具が技術の進歩と共に増々精巧になったため、当然のことであった。外科手術で欠かせない以下に示す二つの草分け的進歩は、本来の外科分野とは別のところから始まった。

1) 全身麻酔：江戸時代末期（19世紀初期）、日本の華岡青洲²⁾により開発。

2) 無菌法：19世紀中期、ウィーンのセンメルヴェイスにより開発。

そして、20世紀、内視鏡検査の発展が見られ、ドイツのカールストルツや、日本のオリンパスにより大規模に導入された。内視鏡検査（硬いチューブまたは軟らかいチューブで体内を見る）は瞬く間に小規模切開手術の技術に繋がった。なぜならば、医者が体内を見ることができるということに加え、小さな穴から処置をしたかったからである。これが「内視鏡検査」という言葉がその後、見るという意味だけでなく、小さいオリフィスや元来のオリフィス、さらには小さなパーフォレーション（穿孔）から処置をするという意味を持つようになった理由である。小規模切開手術は患者にとっても大変利便的ではあるが（トラウマ・傷跡・感染が少なく、入院期間も短い）、言うまでもなく、複雑な外科的操作を必要とする。縫合などの簡単な作業でさえ内視鏡で行おうとすると訓練が必要となる。

手術器具製作者は、マイクロカメラと七つの自由度を持つピンセットが2本付いた内視鏡を作ることに成功した。このような内視鏡が持つ自由度は（2本のピンセット、カメラ、内視鏡位置）、計20を越す。上記のような手術器具を使うには、2,3人の外科医が必要である。

エンジニアにしてみると、このジレンマの解決策は明解である。それは、手術器具を電動化し、命令コンソール（端末）を外科医用に作ることである。つまり、手術器具は、今から約60年前、危険な物質（たとえば放射性）を取り扱うために設計された装置に似た遠隔マニピュレ

ータである（マスタースレーブシステムとも言う）。このような遠隔的手術システムは、言葉は悪いが、外科手術用ロボットとも呼ばれる。もちろん自動機械などの一般的な「ロボット」と同じではなく、厳密に言えば、単なる遠隔マニピュレータである。しかし、20個もつまみを回さなくとも、外科医がいつものように自分の両手で操作ができるという大きな利点もある。

インテュイティブ社の手術支援ロボット「ダヴィンチ」の過去10年間の成功によりこの状況は説明できる（図1）。つまり、外科医は元来の切開手術のときのように、手術器具のマスタースとして手術が出来るようになり、さらに今回は、患者の「中」に両手を入れているかのような、小規模切開（内視鏡的）状態にある。おそらく認知神経科学者は、外科医が効果的に手術器具を肉体化すると述べるであろう。たとえば、外科医の脳の運動皮質は手術器具を体の一部と認識する。これについての説明は3.4節にて簡単に述べる。



図1 インテュイティブ社の手術支援「ロボット」（または遠隔マニピュレータ）「ダヴィンチ」
DA VINCI surgery "robot" (or telemanipulator) from Intuitive Surgery inc

今まで、このような商業用遠隔マニピュレータは力のフィードバックを全く受けず、手術室内の患者の側にあるコンソールに座る外科医の視覚的ナビにのみ頼ってきた。小規模切開手術用器具を簡単に扱えることを可能にしたことにより、外科医だけでなく患者にとっても有名な装置となった。

しかし、今日の手術用ロボットは、力のフィードバックを全く受けていないので、医者は、多くの場合、2Dあるいは3D内視鏡カメラからの視覚的フィードバックにのみ頼っている。これは、確実に手術用ロボット工学の研究テーマとなる。つまり、我々エンジニアは、真の触覚的インターフェイスを今後開発する必要があるということである。それはたとえば、手術器具の先端で力を

測定するもの（殺菌機能付きで、使い捨ての力センサー付きであればより良い）が遠隔マニピュレータのスレーブ側にあり、マスター側（命令コンソール）には正確な力のフィードバックを受ける触覚を感知するジョイスティック型リモコン（またはハンドル）のようなものが付いているインターフェイスなどである。もしもこのようなインターフェイスを複数のモードにすることができれば（温度や脈拍を追加するなど）、患者の体内で両手を動かす際の感覚全てを外科医へフィードバックすることができるであろう。

3.2 リハビリテーション

生体医学的ロボット工学において、ヒトロボットの触覚的インターフェイスが核心となっている重要な分野には、他に、リハビリテーションロボット工学がある。世界人口の急速な高齢化（特に、日本と西ヨーロッパ）により、有能なセラピストの供給が追いつかないくらい専門的な理学療法の必要性が急速に高まっている。脳卒中の患者と整形外科手術（人工股関節置換手術）を受けた患者は、身体能力を取り戻すため（もしくは落とさないため）、集中的でかつ永久的な理学療法が必要であることは立証されている。また、脊髄損傷患者（脊髄損傷全般）は、日常的な理学療法をとっても必要としている。リハビリにおけるロボット器具の効果は多くの研究出版物で臨床的に証明されていて、研究も急速に増えている。しかし、実際のそのような器具はまだ高額であり、また、家で使用することが理想的ではあるが、操作が複雑すぎるため、貸し出す前には操作訓練が必要である。それらの器具を患者の手・腕・脚に取り付けることは複雑であるため、理学療法士が必要としている支援は、なかなか進んでいない。さらに、事故後の運動力を取り戻すには治療がとても重要であるため（血管、神経、他）、患者が定期的に使えるようにモチベーションを上げる器具も必要となってくる。ここでは、我々の研究室で開発した2自由度の手のリハビリ装置の例を挙げる。これは、遠隔装置のスレーブ側のバーチャルリアリティ（VR）ゲームと接続している（図2）。



図2 片まひの子供のために EPFL ロボティクスシステム研究所で設計された 2 自由度の手のリハビリ装置

Two degree-of-freedom (d.o.f) hand rehabilitation device designed at EPFL Robotic Systems Lab for hemiplegic children

人間工学的に正しい運動学であることに加えて、多くのリハビリ装置のように、鍵となる特徴は、患者のモチベーションを上げること。この場合、迷路内の物体を操ることがタスクである。運動と多自由度の力のフィードバックは、広範囲で調節可能。

3.3 補助的装置

ヒトアシスト装置としての外骨格が SF の中で登場したのはずいぶん前のことだ。この 10 年間、そのようなシステムがいくつか登場しており、その多くは日本で登場した。ホンダの歩行補助システム (図3) は労働者に的をしぼったようであるが、サイバーダイン社の HAL (図4) は、年配者の補助および「ヒトの強化」、すなわち「ヒトの身体力の増強」(例：重いものを運ぶ)の両用として推進されている。この最後に挙げた機能は、たとえば、年配者の日常的ケアや運動性が低下した人をアシストする装置 (例：身体障害者を運ぶ看護師のための装置) として、当然、生体医学的ロボット工学に密接に組み込まれている。

この分野では、有望なバイオニクス的装置や研究プロジェクトがいくつかある中、多くの研究機関で取り上げられた購入しやすいコストで実用的な商業利用が可能な装置は、まだ開発されていない。それら装置の主な課題は制御にある。下肢全体麻痺患者向けのニュージーランドの外骨格「Rex」は、静的な状態で安定しており、ジョイスティック型リモコンで制御される。本装置では、患者は直立位置で安定するが、とても動きが遅い (毎分約 6m)。サイバーダイン社の HAL は EMG、つまり、該当する肢の筋肉からの電気信号で制御されている。健康な患者にはある程度うまく機能するようであり、また、部分的に障害を負った患者への希望的なアプローチとも



図3 ホンダの歩行補助装置
Walk assist device from Honda



図4 サイバーダイン社 (日本) のヒトアシストロボットスーツ型装置 HAL
"Robot Suit" human assist device HAL from Cyberdyne, Japan

本装置では、EMG 信号、すなわち筋電位信号 (筋電図) を用いて制御されている。

なる。この研究の課題は、利用者の意図する動きを完全に補助するにはどれほどの自律性があるべきかという点と、信号をどこから受けるかという点にある。これは、急速に拡大している研究トピックである脳-機械インターフェイス (BMI) の課題であり、触覚的インターフェイスというトピックからは外れているので、これ以上、本論では追求しないこととする。

図5は、年配者の股関節補助装置を示している。

運動学的には、座った状態から立つ動作をするときや、階段昇降時には高トルクをかけ、通常歩行時には、装置は限りなく「スムーズ」になるような機械設計が必要である。ここで言う「スムーズ」とは、装置は通常の歩行動作を妨げてはならない、という意味である。技術的に述べると、装置がバックドライバビリティを有する必要があるということである。現在、我々の研究室ではモータの加速度を落とさないために、常に同一方向へ回転させる設計を実験している。コアとなるのは、軽量ブレーキとクラッチによって、脚の揺動運動を再現できるシステムである。そのようなシステムを設計するには、ヒトの骨格の複雑な関節運動学が、十分に理解され適応されなければならない。

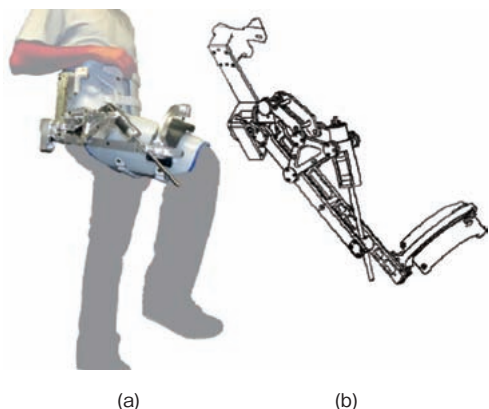


図5 EPFL ロボティクスシステム研究所設計の股関節補助装置
Assist device for the hip joint designed at EPFL Robotics Systems Lab

年配患者向けの装置。(例：股関節手術後や脳卒中発生後の運動機能の回復のため。)運動学的設計は、座った状態から直立するときや、階段昇降時には高トルクをかけ、通常歩行時には限りなくスムーズにすることを狙っている。

3.4 認知神経科学の研究

3.1 項の手術用ロボット工学では、外科医が手術器具を「肉体化」することを参考に挙げて、認知神経科学について少し触れたが、これは神経科学の関心が高まっているトピックの一例にすぎない。「肉体化」とは感覚運動系（およびヒトの脳全体）が手足（特に手・腕・脚・足首）を体の一部として一体化するメカニズムのことである。ヒトの体のような複雑な多自由度システムをうまく効率よく制御する秘訣は、「肉体化」メカニズムであり、エンジニア視点からすると、(ただし、かなり簡潔化して)脳の中、特に感覚運動皮質の中（これだけではないが）に存在する動的人体モデルの形成として説明できる。さらには、認知神経科学者の徹底的な研究によると、道具（フォーク、箸、カッター、運転者、手術器具、楽器、テニスラケット、自転車、車、など）のマスターには、肉体化メカニズムに全て頼るところがある。ロジャー・フェデラーはテニスラケットを肉体化し、脳はテニスラケットを体の一部だと認識するようになった。バイオリンが「体の一部」となったと偉大なアーティストが言うのは単なる比喻ではなく、脳が楽器を体の一部として認識することは科学的にも正しい。

この説明からわかるように、上記の点は、触覚的インターフェイスやジョイスティック型リモコン、遠隔マニピュレータ等のロボット工学（またはメカトロ工学）を



図6 バーチャルリアリティ（VR）環境で動く遠隔マニピュレータ
Telemanipulator acting in a Virtual Reality (VR) environment

マーク・ボレンワイダー博士が設計した触覚的マスターコンソールは、両手で保持しているピンセットの上に4面体状に配置されたケーブルを通して3成分の力のフィードバックが可能である。これにより、広い作業環境と大きな力のフィードバック容量が生まれ、さらに、重量のあるモータはベースに固定されているため、マニピュレータには慣性の影響は働かない。また、トルクフィードバックはないが、ピンセットの姿勢角の計測と、リアリステックな力フィードバックが実現可能である。この装置は、手術用ロボットを使用するための訓練用に開発され、今日では神経精神学の実験で用いられているが、他の分野でも応用の可能性を持っている。

用いた肉体化メカニズムに関する研究アイデアへの少しの前進であるが、大きな新しい研究分野を切り開いた。遠隔マニピュレータを使用すれば、仮想環境（バーチャルリアリティ、VR）でも実環境と全く同じように動くことができる。これはとても便利で、たとえば、実験作業では、設備としてマスターサイドのみを具体化すればよいわけであり、操作する実験的セットアップは全てソフトウェア、つまりVRで行えばよい。図6は、そのような実験的セットアップを示していて、肉体化メカニズムは制御環境及び複雑な事象で研究できるようになっている。

4. 他の応用事例

総論として、自動車分野でのマンマシンインターフェイスの応用におけるハプティクスの重要性は明らかだろう。特に、認知神経科学との関連付けは、将来の研究活動への有望な道しるべとなる。確かに、運転をすることを知ることとくつろぎを「感じる」ことは全て、車との「肉体化」をあらゆる意味で脳が判断する材料だ。言い換えるならば、脳は車の部位を即座にイメージするので、ある意味、「車は体の一部となる」と言うことができる。このようなメカニズムを有効化するには、かつ、安全・快適・楽しい運転のためには、車からの命令を触覚的に「感じる」ことはやはり欠かせない。進化し続けている

剛性や適量の粘性減衰, ハンドルを回し切った際の特徴, アクセルとブレーキペダルはそういう意味では欠かせない要素であり, それに応じるようにして, 安全に調節されているべきである. しかし, 少なからず, このような反応は, つまみやボタン, ハンドル, 座席, ドアを閉める「フィーリング」等の二次的入力装置にも応用される. 主要な自動車メーカーはこのような問題に相当な注目を当てている.

触覚が重要となる他の応用分野は, 例えば, キーボードやタッチパネル, 楽器や家電, スポーツ用品のような入力要素の設計である. これらの分野では, インターフェイスの持つ触覚的物性の入念な分析が, 最終的な改善へとつながり, そして時にはマーケティングでの目覚しい成功 (もしくは失敗) へと転換することもある.

5. まとめ

一個人としての心と自己イメージは, 感じ取る感覚によって決まる. その内, 触覚的感覚の様々なタイプは (大きな意味で), ある意味では視覚的・聴覚的な情報の取り込み方よりももっと基本的である. ロボット工学者はもちろんのこと, 認知神経科学の研究者もこのことは重々承知している.

したがって, 触覚的マンマシンインターフェイスの研究は, ロボット工学・生体医学工学・メカトロニクス工学の活発的な派生分野となった. 純粋な研究的興味はさておき, 神経精神学などとの確かな結びつきを通じ, 生物心理学とメカトロニクスとの融和についてよく理解することで多くの実用的分野で利益を得る立場にある. 数々の事例があるように, ロボット工学やリハビリ, アシスト装置で触覚的マンマシンインターフェイスの重要性はすでに示されている. 特に自動車産業でも, その他多くの分野と同様に, ハプティクスに対する注目度が高まっており, 重要である.

* 1 ダヴィンチは, 米国 Intuitive Surgical 社の登録商標です.

* 2 HAL は, サイバーダイン社の登録商標です.

謝辞

Swiss National Science Foundation SNF, NCCR "Robotics" program Dr. Mohamed Bouri, Jeremy Olivier, Simone Gallo, Ali Sengül, Giulio Rognini EPFL LSRO

参考文献

- 1) Vincent Hayward et al. Haptic interfaces & devices, Sensor Review, 24, 1, pp16-29
- 2) 有吉佐和子: 華岡青洲の妻, engl. Ariyoshi Sawako: The Doctor's wife
- 3) Haptics for teleoperated surgical systems, Tavakoli et al., World Scientific ed., 2008(158 p)
- 4) Ali Sengül, PhD thesis EPFL No 5669, 2013: "Cognitive Neuroscience Based Design Guidelines for Surgical Robotics"
- 5) Giulio Rognini, PhD thesis EPFL, 2014: "Cognitive-haptic interfaces: robotics, sensorimotor processing and bodily self-consciousness"
- 6) Bleuler, Bouri: "Haptics in Robotics, Man-Machine Interface and Neuroscience", in 7)
- 7) Pisla, Bleuler, Rodic, Vaida, Pisla(editors): "New Trends in Medical and Service Robots", theory and integrated applications, Springer (ed.), 2014