

触覚情報の通信とディスプレイ

池井 寧

東京都立科学技術大学



1. 触覚

人間は、いわゆる五感と称されるようなモダリティの異なる感覚器官を駆使して、外界の情報を取得している。それらの情報は、環境中での能動的な活動の経過を通じて処理されるように、感覚器から中枢神経系あるいは運動出力系まで還流して、動的なシステムの維持に中心的な役割を果たす。取り込まれた情報が脳でどのように統合され、環境の知覚と行動の決定に利用されるのかは、まだその機構の全体像を議論することはできない極めて難しい問題である [1]。この中で視覚と聴覚に係わる感覚情報が、環境の知覚すなわち自分を取り巻く空間の状態を知る際に重要な手掛かりを与えることは明らかであるが、それだけでは自分自身の状態を知るのに十分でない。体性感覚あるいは触覚は、その空間中における自分自身の状態と、外界との直接的干渉を知るのに不可欠な感覚である。

体性感覚は、皮膚感覚と深部感覚からなり、内臓感覚とともに、自分自身の身体がどのような状態であるかをモニタしている。皮膚感覚は、皮膚受容器からの情報により、(自身を含む)外界との接面において、その機械的な接触力や温度などに関して生起する。機械的な触覚は、触、圧、振動、くすぐったさなどと分類されることもあるが、現実の外界との多様な接触形態に由来する感覚は一般にはもっと複雑である。これらの感覚を受容するセンサとなる器官は、皮膚の表皮、真皮、皮下組織の3層構造の中に存在している。4種類の受容器、すなわちメルケル細胞、マイスナー小体、パチニ小体、ルフィニ終

末が、皮膚の機械的な変動を捉えるとされており、この他に痛みや温度に対する受容器として自由神経終末が存在する。4種類の受容器は、受容野の大きさと順応の速度によって、タイプI (受容野小)、タイプII (受容野大)、速順応 (RA: Rapidly Adapting)、遅順応 (SA: Slowly Adapting) の特徴付けを行う事ができる。それらの受容器の応答は、[2]などに述べられているが、神経生理学的手法を用いると、例えば点字の突起列をなぞった場合に、主としてSAIとRAI (の集合) に、点字の時空間的構造を明瞭に反映した発火パターンが現れることなどが明らかにされている [3, 4]。

一方、深部感覚は、筋、腱、骨膜、関節囊、靭帯などに存在する深部受容器で検出された身体各部の運動やその位置、あるいは振動や痛みに関する情報を与える。骨格筋では筋紡錘が、腱ではゴルジ腱器官が、関節では関節囊のルフィニ終末、パチニ小体が、靭帯ではゴルジ終末などが主要な受容器である。これらの受容器からの入力、関連して発火するためその機能的役割の分類は単純ではなく、また、感覚の呼び方も一通りでない。運動感覚は、体の各部の動きや位置、筋に働く力、あるいは重さの感覚を含むとされることもあるが、上記の受容器からの求心性情報が統合されて形成される複雑な感覚である。運動に伴う皮膚の変形が皮膚受容器を刺激し、これが運動感覚にも寄与すると考えられている。また、力の感覚には、運動系中枢からの信号が遠心性コピーあるいは随伴発射と称して、関与している。筋疲労や緊張性振動反射 (TVR) によって、主観的な重さが増加したり減少したりするのは、随伴性発射の必要量が変動するためである。

これら体性感覚の受容器からの神経線維の多くは、脊髄を通り視床核で中継され、大脳皮質体性感覚野 (SI, SII) に投射している。体性感覚野は、SIに特に明確な体表部位の再現的配置があり、ペンフィールドのホムンクルス (小人) で表されるような局在性を有している [5] (図1)。例えば、ヒト手5指の電気刺激下のfMRI観測の結果は、5指が個々にブロードマンの3b野の16 mmくらいの区間に投射していることを確認している [7]。この体性感覚野では、視覚野と同様に階層的な情報処理が行われていると考えられている [8]。すなわち、第1体性感覚野の1野2野では、3a, 3b野に投射された体部位 (例えば指) 局在的な情報が統合されて、より広範囲 (例えば手) の情報が処理されている。2野では、特定形状をつかむ時などに、関連部位を受容野とする特徴抽出ニューロンの活動が記録されている。更に高次の処理を行う頭頂連合野においては、体性感覚入力と視覚入力の両方に反応するニューロンがあり [9]、多感覚を統合する処理が行われている。サルの5野のニューロンでは、道具の使用で触覚的操作が可能な空間が大きくなった事が視覚的に観察されると、受容野が大きくなるものが存在することが確認されている [10]。一方、視覚障害者では、触覚による点字読みで一次視覚野も賦活される [11]。

外部対象の積極的な触覚においては、能動的な手指の運動が前提であり、アクティブタッチと呼ばれる。つかむ、触るを語源とするハプティクスも能動性を含んだ触覚を主たる議論の対象とする語である。Gibsonによる指摘 [12]でアクティブタッチの問題提起がなされ、以降、受動触と能動触に関して多くの比較が行われているが、一般には受動触より能動触がパターン知覚に有利である。しかし、受動触的条件は、触覚のディスプレイを構成する際、ディスプレイモード [13]の設計に関係する。

能動的に対象に触れることは、視覚と比較して tangible で疑いない情報を与えるように思われるが、触覚にも錯覚が存在する。視覚で認められる幾何学的錯視の多く (Muller-Lyer, 垂直水平, Ponzoなど) について、触覚でも錯覚が確認されるが、視覚のそれとは異なるメカニズムであることが示唆されている [14]。重さの感覚が温度による影響を受け、冷たいものの方が重く感じられることがWeberにより示されている [15]。また、サイズ-重さ錯覚は、Charpentierが最初に示したもので、知覚される重さは、物理的重量だけでなく、その大きさにも依存する。この錯覚は、視覚的サイズではなく、純粋に触覚的に知覚されるサイズに依存して起こる。先天性盲の被験者にも、閉眼の晴眼者と同じ強度で発生するため、体積の視覚化は必要ないと考えられる [16]。この錯覚は、物理的重量が同じであることが既知でも除去できないものであ

る。つまり、触覚も常に確かな情報を与えるとは限らない。

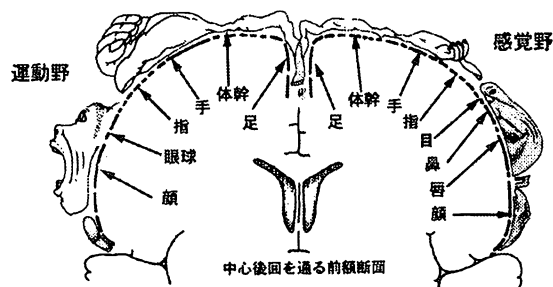


図1 皮質の体部位局在 (文献[6]より改変)

2. 触覚情報と通信

通信システムは、通常、空間的距離を超えて情報を伝達するが、その手続きの概要とは、対象の観測場所においてその情報を符号化し (て蓄積し)、有線無線による伝送を行った後、再び原信号に戻すことによって使用者あるいは体験者の前に対象を再現するというものである。この基本構成において、観測の態様に関する使用者側の関与は、限定的あるいは受動的であるのが通常である。例えば、画像音声通信では、観測側に設置されたカメラやマイクの位置を使用者が自由に動かすには、相応の設備を用意しなければならない。しかしながら、視覚や聴覚の場合は、そうしなくても基本的な情報の多くを伝えることができる。視空間の情報や言語的信息は、視点に制限があっても、その構造や意味情報を認識する上で十分な手掛かりを与える。これは厳密には、第三者の観測視点の体験ではあるが、観測視点の能動性を省略しても機能する用途は少なからず存在する。VRやテレグジスタンスでは、第一人称の視点、つまり自分自身の意図に基づく体験の形で、遠方の情報を手に入れて、観測側と体験側を同一化することを目指す。その場合は、体験者の視点の変化を観測点にリアルタイムに反映することが必要になる。つまり、通信して来る情報を体験者自身が能動的に決めるための逆方向の通信を組み合わせることによって成立することになる。

一方、触覚は、体験者が自ら対象に手を伸ばして、触ってみることにより得られる感覚である。あるいは、対象を手にとって、重さや慣性を感じ取ったり、対象を操作する際の操作感や手応えとして知覚するものである。この際、対象の機械的、熱的、化学的性質が提示情報として必要となると共に、これらの性質に関して、体験者から対象への影響あるいはエネルギーの伝達が生ずることになる。これらの点で、視聴覚情報の通信と、触覚情報の通信は大きく異なっている。まず、観測については、

対象の幾何学的3次元情報と力学的、熱的情報他が必要であるが、これらはいずれも対象のごく近傍や接触によらなければ、得ることが難しい。視覚情報は、遠方からでも観測でき、詳細度を低下させた俯瞰的あるいは“大掴み”の情報取得が可能であるが、触覚では、その提示が主として手指に対して直接接触で行われるので、表示データの詳細度の変化幅は、視覚における“大掴み”ほどには取り得ない。提示は、非常に局所的な接触面に行われるので、その程度の詳細化がなければ提示してもあまり有効ではない。しかも、触覚における対象は、観測時点で3次元幾何情報の取り込みが必要である。視覚では、視差を持った2チャンネル画像（2次元）が伝送されれば、人間が対象を3次元に再構成できるが、触覚の対象は提示の前に3次元化が必要である。この3次元化が、触覚に必要な帯域（およそ数100 Hz以上）で行われれば、少なくとも遠方の対象の外形状やその運動を提示することが可能となる。これが視聴覚情報のそれに対応させた1方向性の触覚通信と言えるかも知れない。

しかしながら、対象の外形だけでなく力学的特性も含めて観測を行える触覚用の包括的センサ（あるいは触覚用カメラ）は、実現されていないだけでなく、その完全な実現は非常に困難であろう。外見的構造だけでなく、本来ならば内部の断層撮影像や構成要素の分析が必要となるからである。従って、遠方で第三者が観測した触覚情報を、十分な品質でさわれるテレビ映像という形でリアルタイム伝送することは容易ではない。現実的には、対象に触れる手を、概略にあるいは出来るだけ詳細に近似する物理的なプローブやマニピュレータを観測点に置いて、対象に接触することにより、上記の触覚情報を取り込むことが考えられる。この情報に基づいて、再生側で同じ情報を提示すれば、指向性の鋭いカメラやマイクロフォンで捉えた情報を提示する場合に相当する。しかし、画像の場合は、観測した第三者視点への体験者視点の移入同一化が比較的容易だが、触覚では観測している場所と同位相で手指を保持せねばならず、これは実現上の困難を生ずる。つまり、位置と力を同一の自由度において同時に伝えることは出来ず、体験者の手がそこに誘導されても、観測側で加えた力を体験者が受けられるとは限らない。従って、観測の様態をテレビ視聴のように受動的に受信する形式には適さない。体験者が主体的に手を運動させて、その相対位置変化を観測側に伝達し、そこで対象の触覚情報を取り上げて体験者にフィードバックするという通常と同様のアクティブタッチの形式とすることにより、遠方の触覚情報を体験するための伝送がより現実的となる。

このような仕組みの有効な使用法は、勿論、遠隔の対

象の操作を行うことである。つまり、対象に接触して観測すること自体が対象に変化を与えるエネルギー交換の過程を含んでおり、情報を得ることと何らかの操作をすることが同時的である。このような遠隔操作は、かつての機械式リンク機構で危険物を扱うマジックハンドにその起源を持つテレオペレーションシステムにより、部分的ながら実現されてきた。テレオペレーションには、対象の触覚的操作感が不可欠であるが、実際には幾つかの難しい課題がある。遠隔地に置かれるスレーブあるいはテレロボットと、操作者が使用するマスターインタフェースのセンシングと駆動制御、そして両者を接続する通信の時間遅れなどである。人間の手指に対応するような器用なスレーブハンドと皮膚感覚に相当するセンサを構成するのは、ロボット技術の長期にわたる課題であり、またマスター側で操作者に皮膚感覚提示を行うディスプレイもまだ基礎的な研究の段階である。従って、現在のところ触覚情報として伝達されているのは、複数の指に対する少数のカベクトルと指先への接触の有無、若しくは粗な分布検出程度に限定されることが多い[17]。指先の接触面の様相を詳細に検出して、それによって対象の触覚的な状態を伝えることは、まだ一般には実現されていない。

遠隔操作で発生する時間遅れは、触覚情報の伝達には著しい障害となる。制御系における計算時間による遅延は数ミリ秒に抑えられるが、ネットワーク遅延では数10～100ミリ秒、さらに宇宙空間や深海では、地上から数秒以上の遅延が発生する。制御系をpassiveにすることで安定性の問題を回避しても、触覚提示の品質は下がり、遅延が1秒を越すような条件では、手動操作の遠隔操作よりテレロボットの自律制御を併用した管理制御 [18]が有効となる。

手動の遠隔操作が有効でない場合の自律制御では、環境のモデルが肝要であり、それが精度良く構築されれば、オペレータが事前にそのモデルを用いて操作の計画を行ったり、ロボットと環境のインタラクションを予測提示しながら制御を実施することが可能となる。上で論じた“通信”の文脈では、触覚情報をリアルタイムに取得する前提だが、触覚情報の取得困難さと通信遅延に対する制約の厳格さを考えると、対象のモデルを蓄積してから伝送する手法も検討すべき課題である。次章に述べるディスプレイは、現状ではむしろ蓄積とその展開に力点が置かれている。触覚情報に関する対象のモデル化は、本来は対象の性質だけに基づいて記述されるはずであるが、現在の触覚提示のディスプレイは、表示できる特性が限定されるため、モデル化はディスプレイの構造と切り離して論ずることができない。あるいは、ディスプレイ自

体の機械的、電氣的刺激生成の制約の中で、最大の表現を引き出す工夫をした方が実用的な提示を得られる段階と言える。現在の触覚ディスプレイの制限の中で、対象のモデルとディスプレイを効率良く利用することを目指した試みとして、触覚用共通ソフトウェアHIP [19]などが開発されているが、ハードウェアの進展を反映した継続的な構築が必要であろう。

3. 触覚ディスプレイ

触覚ディスプレイは、先に述べた人間の体性感覚の分類、すなわち皮膚感覚と深部感覚に分けて論じられることが多い。これは、両者の実現方法が大きく異なるためであり、皮膚感覚に対しては、皮膚表面の比較的小さな面積に刺激の分布を生成するが、深部感覚に対しては、機械的構造を用いて、カベクトルや位置的拘束を手指に加えることで、身体各部での動力的均衡を変動させる。しかしながら、深部感覚を生成するための機械的構造の使用は、皮膚の接触自体を模擬することと独立には行えない。例えば、深部感覚を提示する力覚ディスプレイにより、微小な振動刺激を与えれば、対象の表面状態の情報が皮膚感覚でも捉えられる。

3-1 力覚ディスプレイ

力覚のディスプレイは、米国ANLの電気式テレオペレータ[20]の開発のころ（1950年代）にその起源を遡ることができ、その後継機を使用した力覚シミュレーションのプロジェクトGROPE [21]が、VR空間における触覚提示の先駆的研究の1つである。その後、多数の力覚ディスプレイが製作されてきた [22]。その中で、商業的にも最も成功を収めたPHANToMは、1994年ころにMITで開発され [23]、現在までに1000台以上が販売された力覚ディスプレイの標準機に最も近い存在である。PHANToMは、3自由度の1点に加わる力を、ワイヤ接続の減速と高剛性のリンク機構で精度良く提示することを実現した。その後、トルクも出力できる6自由度型も提供されている（図2）。

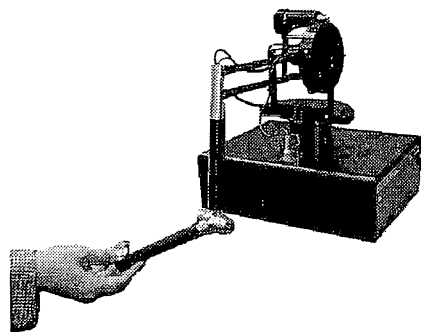


図2 6自由度PHANToM (SensAble Technologies, Inc.)

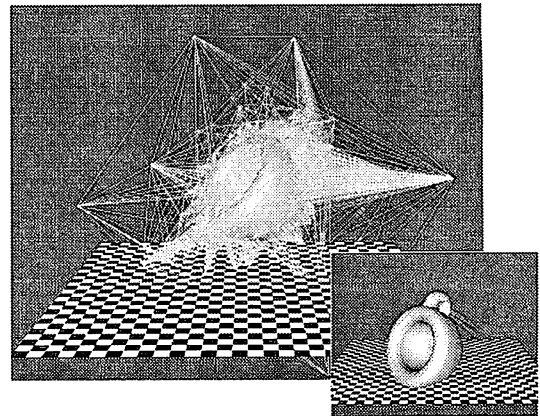


図3 空間拘束法による力覚レンダリング(広田ら)

これらのPHANToMの機構的精密さに相応した触覚表現を行う計算法が必要となり、ハプティックレンダリング [24]と呼ばれるようになった。対象物とのインタラクションを1点に限定し、ユーザが把持したスタイラスの先端が対象に接触する過程を計算することで、物体の形状や硬さと同時に、対象物表面の摩擦やテクスチャを“描画”することができる。この干渉点が対象モデルの表面に拘束され、薄い対象でも突き抜けないように表面上をトラッキングする手法としてGod-object Method [25]が提案されたが、これは力覚レンダリングに特有のアルゴリズムの1つである。この考え方は、VR空間中で指先が受ける拘束にも拡張されている（図3 [26]）。また、コンピュータグラフィックスの表現法と同様に、ポリゴンモデル表面に沿ったカベクトルのスムージングを行うフォースシェーディング、バンプマッピング相当でテクスチャ感を与えるフォースパタバージョンなどの技法が、力覚レンダリングにも導入され、コンピュータハプティクスとも呼ばれている [27]。対象物の変形も考慮するには、リアルタイムで計算が可能なアルゴリズムが必要であり、バネ/ダンパーのネットワークや有限要素計算を高速化する手法 [28、29]などが開発されている。これらのソフトウェアの進展により、PHANToMは、研究用途だけでなく、クレイモデリングや、機械設計時の組立・整備性評価、外科手術計画・トレーニング、分子設計、地層資源データの解析などの商用応用に用いられている。

PHANToMや筑波大のHapticMaster [30]は、共に実空間に固定（接地）された力覚ディスプレイであり、外界座標系のカベクトルを発生するが、ユーザの身体に装着して、体の他の部位に接地するタイプのディスプレイも開発されている。糸の張力で指先の運動を拘束するディスプレイは、実空間固定型では東工大のSPIDAR [31]があるが、東大のHapticGEAR [32]（図4）はウェアラブルタイプである。背中に背負ったBackpackに付けられた4本の

ビーム先端位置で、ペンに付けられたワイヤを巻き取って、対象を押す反力を表現する。実空間固定型では、力覚を表現できる作業空間が制約されるが、この設計では作業空間を広く取ることができるだけでなく、没入型(視覚)投影ディスプレイ(CABIN)の中でも視野を遮るデバイスサイズを最小限とすることが可能となっている。

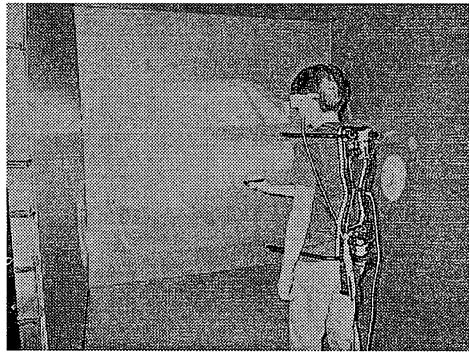


図4 CABIN内で使用できるHapticGEAR(廣瀬ら)

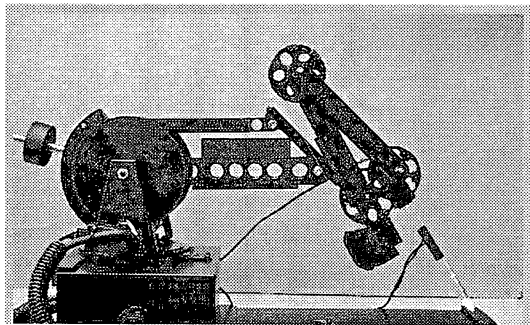


図5 SmartTool(野嶋ら)

視覚におけるAugmented Realityの考えを触覚に導入した新しいシステム設計として、東大のSmartTool [33] (図5)が提案されている。これは、視覚において裸眼では見ることの出来ない情報を実空間に重畳するかのごとく、通常の触覚では感じる事が難しい情報を触覚的に提示する仕組みである。例えば、手術用メスなどに相当する道具の先端部にセンサを取り付け、切開時に動的に変化する対象組織部位の差異を判断して、危険領域への侵入を阻止する反力を提示したりすることができる。

3-2 皮膚感覚ディスプレイ

皮膚感覚に対して刺激を提示するディスプレイは、力覚ディスプレイに対して、未だ制限が大きい状況である。皮膚感覚を生じさせるためには、皮膚受容器を刺激する必要があるが、その密度や受容特性に見合った刺激合成は必ずしも容易ではない。そもそも、全身の皮膚を対象とするわけには行かないが、最も表示効果の期待できる手指については、自由度が大きい上に運動も高速である。これは力覚でも同様だが、とりわけこの指先皮膚表面に

任意の接触状態を再現し、表面上に刺激の変動分布を与える必要がある。

このような皮膚感覚への提示に関して、1970年代から試みられたのは、いわゆる感覚代行として視覚情報や聴覚情報を皮膚感覚に変換提示することであった [34]。視覚障害者に、視野映像を触覚的に提示するTVS (Tactile Vision Substitution) システムでは、カメラで捉えた画像を背中に当てた振動子配列で伝達することが行われた。また、文字形状を振動ピン配列に投影して指先で読み取る触覚ディスプレイOptacon (Optical-to-Tactile Converter) も、そのときにスタンフォード大学で開発された [35]。TVSシステムは、解像度などに問題があったが、Optaconは当初、 piezoelectricモルフ駆動、6列24行の直径0.25mmのピン(2.5mm, 1.2mm間隔)が配置され、230 Hzの振動刺激を与えることにより、30単語/秒程度(まれに100単語/秒)の読み取り速度を可能とした [36]。後継機のOptacon II (図6)を含めて2万台程販売されたが、OCRと音声合成の普及で現在は製造されておらず、文字表示用途としての触覚ディスプレイの需要は減少している。

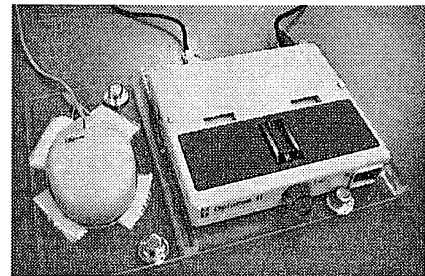


図6 Optacon IIと研究用座標計測マウス

音声情報を触覚に変換し聾者の発声補助などとする装置も存在するが、近年、北海道大学では、警報音や緊急信号などの非言語的音響情報を振動ピンで触覚提示するポコーダ型タクタイルエイドが再び開発されつつある [37]。

電気刺激を利用するディスプレイも、感覚代行用途からの開発が多い。例えば、32×24画素の電極配列を腹部に当ててカメラ画像を提示するディスプレイ [38]が開発されている。また、電気刺激の生成法として、異なる種類の受容器の神経軸索を選択的に刺激 [39]する新しい手法が東大で開発されている [40]。これは、直径1mmのステンレス電極を2 mmピッチで64個並べた配列(図7)を用い、陽極電流でRA軸索を刺激する場合と、陰極電流の電極間重み設定でSAI単独かPCも含めた軸索を刺激する場合を使い分け、振動覚、圧覚、衝突感などの提示を可能としている。また、指の押し付け力や皮膚インピーダンスを提示に反映することなどが行われている。

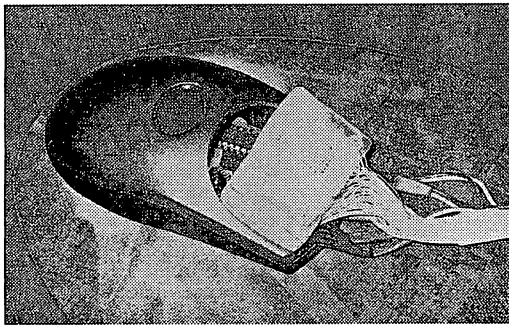


図7 電気触覚ディスプレイ (梶本ら)

振動ピン配列を用いて対象物表面の形状の変動を指先に提示する皮膚感覚ディスプレイは、筆者の研究室でも開発が行われている [41、42] (図8)。このディスプレイは、対象表面の触覚的なテクスチャ（肌理、材質感）の提示を目指すものである。ディスプレイの提示部分には、先端を鈍化した直径0.5 mmのピンを2 mm間隔で5列10行に並べて250 Hzで振動させ、この提示面に示指の指先を置いてディスプレイ全体を机上で並進運動することにより、なぞり運動に伴った刺激の分布の変化を皮膚面上に生成する。表示に使用する対象物表面のデータは、凹凸形状の高さマップであり、レーザ変位計などで計測しているが、精度を問わなければ、低位置から照明を当ててデジタルカメラで撮影しても簡便な代替となる。この高さマップに基づいて振動刺激強度を導く際、厳密には指の接触状態と振動の描像特性の反映が必要である。しかし近似として、画像のコントラスト調整に用いるヒストグラム変換によれば、比較的妥当な刺激強度マップが得られる。指の近似モデルによる接触部分の事前計算に基づけば、より正確な刺激強度マップを導出できる。

皮膚感覚の刺激だけでなく、力覚の提示も同時に行うディスプレイも開発されつつある。TextureExplorer [43] (図9) は、PHANTOMの提示部スタイラスに、振動ピン配列を付加して、対象物の形状や、表面の凹凸を力覚に伝えると同時に、皮膚感覚にも刺激分布を生成することが可能となっている。小型化のために、ピン数は10本（2列5行）に制限されるが、3次元の力覚と皮膚感覚の両者を提示することが可能な数少ない触覚ディスプレイである。

振動ピンを使用した刺激法では、Optaconを用いた生理心理学的研究が多く行われており、この中で、Optaconピンの刺激は、SAIを発火させないため、形状や粗さの表現に向かないという議論 [44]がある。しかしながら、TextureDisplay2は、構造上Optaconと明らかに異なる強力な刺激を発生可能であり、これと同等の感覚強度を与える力振幅はSAIの閾値より大きいことなどから、Optacon

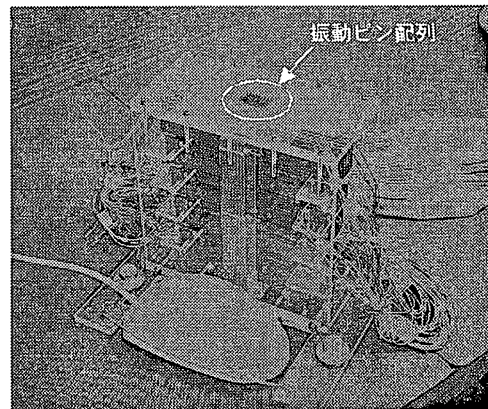


図8 TextureDisplay2 (池井ら)

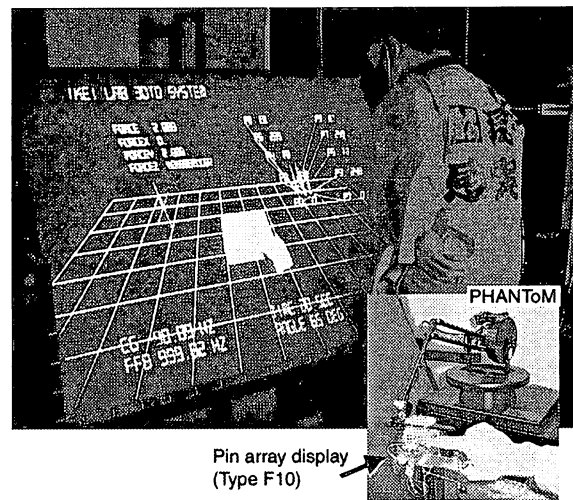


図9 TextureExplorer (池井ら)

の議論は該当しないと筆者らは考えている。

4. おわりに

触覚情報は以上に述べたように、まだ一般的に利用できる段階とは言えないが、技術的進展は急速に進行しつつあり、五感情報通信の枠組みの中で新たな方向付けが行われることが期待されている。

総務省「五感情報通信技術に関する調査研究会」（東大・廣瀬通孝座長）の報告書の中では、五感情報通信のニーズが挙げられている。視聴覚以外の感覚モダリティを情報通信に導入することによって、嗅覚であれば遠隔監視における危険察知に役立つであろうし、味覚のセンシングと再現によって例えば料理教材に味情報を加えることも等も可能となる。また、触感の精密な伝送があれば、遠隔手術の実現に大きく貢献するであろう。こうした利用法だけでなく、感覚モダリティ間の情報のトランスファが可能となれば、感覚に障害を有する人々に有効な代替手段を提供できるはずで、これは大変重要なニーズである。更に、五感情報を、それが本来あるべく統合された感覚体験の不可分な構成要素と見るとき、個々の

モダリティとしてでなく伝達することが本質的な要請であろう。それは、モダリティなしの他人との感覚体験の共有ということもできる。例えば医療福祉ならば、患者の傷病に関する統合された感覚を正確に医者に伝えること、あるいは障害者が介助者に身体状況を適切に伝えること等が可能となる。また、映画の登場人物の感覚体験全体を鑑賞者が体験できることにもなるであろう。

五感情報通信は、他人の痛みを理解するための有効な手段と言えるかも知れない。情報通信技術が目指すものは、幅広く世界と人間を理解するための汎化された知覚機能であり、人間が物理世界とのインタラクションを有する以上、触覚情報がその中で重要な位置を占めることは議論を要さないであろう。

参考文献

- [1] 伊藤正男, 脳の不思議, 岩波書店, 1998.
- [2] Johansson, R.S., Vallbo, A.B., Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand, *Trends in Neuroscience*, 6, 27-32, 1983.
- [3] Johnson, K. O. et al (Ed. Gazzaniga, M.), *Neural mechanisms of tactile form recognition*, *Cognitive Neurosciences*, pp. 253-267, 1995
- [4] Johnson, K. O. and Hsiao, S. S., Neural mechanisms of tactual forms and texture perception, *Annu. Rev. Neurosci.* 15, 227-250, 1992.
- [5] Penfield, W., Boldrey, E., *Brain*, Vol. 60, pp. 389-443, 1937.
- [6] 図解生理学, 中野昭一編, 医学書院, 1981.
- [7] Kurth, R. et al., fMRI shows multiple somatotopic digit representation in human primary somatosensory cortex, *Neuroreport*, Vol. 11, pp. 1487-1491, 2000.
- [8] Iwamura, Y., et al., Converging patterns of finger representation and complex response properties of neurons in area 1 of the first somatosensory cortex of the conscious monkey, *Exp. Brain Res.* Vol. 51, pp. 327-337, 1983.
- [9] Sakata, H., Somatic sensory response of neurons in the parietal association area (area 5) of monkeys, *The somatosensory system*, Kornhuber, HH (ed), 250-261, 1975
- [10] Iriki, A., et al., Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons, *Neuroreport*, 7, 2325-2330, 1996.
- [11] Sadato, N., et al., Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects, *Nature*, Vol. 380, pp. 526-528, 1996.
- [12] Gibson J.J., Observation on active touch, *Psychological Review*, 69, 447-491, 1962.
- [13] Loomis, J.M., Lederman, S.J., Tactual perception, (Ed. K. Boff et al.), *Handbook of perception and human performance*, pp. 31-1-42, 1986.
- [14] Suzuki, K., Arashida, R., Geometrical haptic illusions revisited: Haptic illusions compared with visual illusions, *Perception and psychophysics*, 52, 329-335, 1992.
- [15] Sherric, C.E., Cholewiak, Cutaneous sensitivity, *Handbook of Perception and Human Performance*, Boff, K.R. et al eds., Vol. 1, John Wiley, 1986.
- [16] Ellis, R.R., Lederman, S.J., The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion, *Perception and psychophysics*, 53, 315-324, 1993.
- [17] 平井和雄, 仲山茂人, ロボットプラットフォームの製作および高機能ハンドの開発, *日本ロボット学会誌*, 19 (1), 8-15, 2001.
- [18] Sheridan, T.B., *Telerobotics, Automation and Human Supervisory Control*, MIT press, 1992.
- [19] 廣瀬通孝ほか, 触覚用共通ソフトウェア (HIP) の開発, *日本VR学会論文誌*, Vol. 3, No. 3, pp. 111-119, 1998.
- [20] Goertz, R.C., Thompson, W.M., Electronically Controlled Manipulator, *Nucleonics*, pp. 46-47, 1954.
- [21] Brooks, F.P., Ouh-Young, M., Batter, J.J., Jerome, Kilpatrick, P.J., Project GROPE-Haptic Displays for Scientific Visualization, *Computer*

- Graphics*, 24 (4), pp. 177-185, 1990.
- [22] Burdea, G.C., *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley & Sons, 1996.
- [23] Massie, T., Salisbury, K., 'The PHANToM Haptic Interface' A Device for Probing Virtual Objects, *ASME WAM, DSC Vol. 55-1*, pp. 295-300, 1994.
- [24] Salisbury, K., Brock, D., Massie T., Swarup, N., Zilles C., Haptic rendering: Programming touch interaction with virtual objects, *Proc. ACM symposium on Interactive 3D Graphics*, pp. 123-130, 1995.
- [25] Zilles, C.B., Salisbury, J.K., A Constraint-based God-object Method for Haptic Display, *Proc. IROS'95*, 1995.
- [26] Hirota, K., et al, Physically-based Simulation of Object Manipulation, *ASME IMECE2000, DSC69-2* pp. 1167-1174, 2000.
- [27] Srinivasan, M., Basdogan, C., Haptics in virtual environments: Taxonomy, Research status, and Challenges, *Computer & Graphics*, 21 (4), pp. 393-404, 1997.
- [28] 広田, 金子, 柔らかい仮想物体の力覚表現, *情報処理学会論文誌*, Vol. 39, No. 12, pp. 3261-3268, 1998.
- [29] 小本哲朗ほか, 並列冗長予測法によるインタラクティブ・ビジュアルライゼーション, *機論 (C編)* Vol. 66, pp. 225-232, 2000.
- [30] Iwata, H. and Yano, H., Desktop Force Display, "The Edge", *Visual Proc. of SIGGRAPH'94*, p. 215, 1994.
- [31] Kohno, Y., et al., Evaluation of Two-Handed Multi-finger Haptic Device SPIDAR-8, *ICAT2001*, pp. 135-140, 2001.
- [32] Hirose et al., HapticGEAR: The Development of a Wearable Force Display System for Immersive Projection Displays, *Proc. IEEE Virtual Reality 2001*, pp. 123-130, 2001.
- [33] NOJIMA, T., et al., The SmartTool: A System for Augmented Reality of Haptics, *Proc. IEEE Virtual Reality 2002*, 2002.
- [34] Kaczmarek, K.A., et al., Electrical and vibrotactile displays for sensory substitution systems, *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-16, 1991.
- [35] Linvill, J.G., Bliss, J.C., A direct translation reading aid for the blind, *Proc. IEEE*, Vol. 54, pp. 40-51, 1966.
- [36] Goldish, L.H., Taylor, H.E., The Optacon: A valuable device for blind persons, *The new outlook for the blind*, Vol. 68, No. 2, pp. 49-56, 1974.
- [37] 伊福部達ほか, 触覚による聴覚補助装置の実用化プロジェクトについて, *信学会福祉情報工学研 WIT 00-14*, 13-19, 2000.
- [38] <http://www.execpc.com/~unitech/videotac.html>
- [39] Asamura, N., et al., A method of selective stimulation to epidermal skin receptors for realistic touch feedback, *Proc. IEEE Virtual Reality 1999*, pp. 274-281, 1999.
- [40] 梶本裕之ほか, 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ, *信学論*, Vol. j84-D-II, No. 1, pp. 120-128, 2001.
- [41] Ikei, Y., et al., Vibratory tactile display of image-based textures, "IEEE CG & A", Vol. 17, No. 6, pp. 53-61, 1997.
- [42] Ikei, Y., et al., A new design of haptic texture display - texture display2 - and its preliminary evaluation-, "Proc. IEEE Virtual Reality 2001", pp. 21-28, 2001.
- [43] Ikei, Y., Shiratori, M., TextureExplorer: A tactile and force display for virtual textures, *IEEE-VR2002 Haptic symposium*, 2002.
- [44] Gardner, E.P., Palmer, C.I., Simulation of motion on the skin. I. Receptive fields and temporal frequency coding by cutaneous mechanoreceptors of OPTACON pulse delivered to the hand, *J. Neurophysiology*, 62 (6), 1989.

【略歴】

池井 寧 (IKEI Yasushi)

1988年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。大阪大学を経て、1992年より東京都立科学技術大学に勤務。現在、東京都立科学技術大学生産情報システム工学科助教授。分散型システム、触覚のバーチャルリアリティ、ウェアラブルなどの研究に従事。日本VR学会、日本機械学会、ヒューマンインタフェース学会、IEEEなどの会員。