

触覚ディスプレイ

梶本 裕之*

* 電気通信大学人間コミュニケーション学科, 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1
* Department of Human Communication, The University of Electro-Communications Chofugaoka 1-5-1 Chofu-shi Tokyo 182-0033, Japan
* E-mail: kajimoto@hc.uec.ac.jp

キーワード: 触覚ディスプレイ (Tactile Display), 機械受容器 (Mechanoreceptor), ヒューマンインタフェース (Human Interface), バーチャルリアリティ (Virtual Reality)
JL 002/02/4202-0086 ©2008 SICE

1. はじめに

触覚とは広い意味では人と外界との物理的接触によって生じる感覚である。物理的な接触に伴う相互作用があることは他の感覚には無い特徴である。例えば見ることによって対象が変化するという事は通常無いし、聴くことによって音が変化するという事もない。しかし触る場合、対象は接触によって変形する。また触る側の皮膚も変形する。もし対象が硬ければ主に皮膚が変形し、逆に柔らかければ対象の方が変形する。触覚はこのように、人間の感覚の中で唯一双方向的な作用を持つものである。触覚を提示すると、この力学的な相互作用を再現することに他ならない。

触覚は皮膚感覚と深部感覚に分けられる。皮膚感覚とは皮膚下に存在する受容器によって生じる感覚である。深部感覚とは筋や腱の受容器によって生じる感覚であり、特にディスプレイの分野では力覚と呼ばれる。本稿では以降、主に皮膚感覚に着目し、断わりのない限り皮膚感覚のことを触覚と呼び、皮膚感覚を再現するディスプレイを触覚ディスプレイと呼ぶこととする。

触覚を人工的に提示することにはどのような応用があるだろうか。現在のところ一般用途では、ゲーム機のコントローラや携帯電話に内蔵されるバイブレータにその姿を見る程度であるが、例えば福祉機器としては感覚代行という用途がある¹⁾⁻³⁾。また点字ディスプレイは触覚ディスプレイの最も有用なアプリケーションであり、現在はピン間隔が2ないし3mm、ピン数が千程度の、画像情報も表示できる大面積の点図ディスプレイが商品化されている。また視覚や聴覚によらないナビゲーションの用途があり、腹部、背部に装着した振動子群で運動のタイミングを指示するものなどが提案されている⁴⁾。

しかし視覚や聴覚はこのような記号的な情報提示に留まっではない。これらの感覚では、記号的な情報提示を超えたリアルな感覚の再現によって、遠隔コミュニケーションや娯楽コンテンツなど、我々の日常生活がそれなしでは考えられないほどに応用用途が広がった。

同様のことが触覚についても言えるだろう。もしもリアルな触覚を再現することが出来れば、現在視覚や聴覚がそうであるように、触覚ディスプレイは我々にとって欠かせないものとなるだろう。このため現在の触覚ディスプレイ

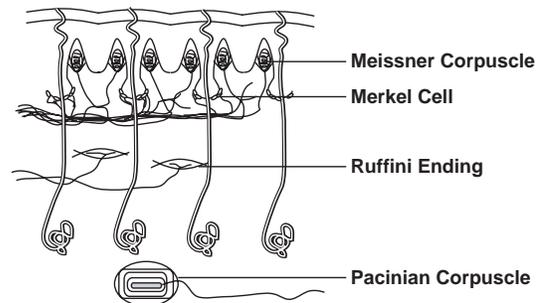


図1 無毛部皮膚の構造と触覚受容器

皮膚浅部に圧覚を知覚するMerkel Cellと低周波振動を知覚するMeissner Corpuscle、皮膚深部に高周波振動を知覚するPacian Corpuscleと横ずれを知覚するRuffini Endingが存在する。

研究の多くは、最終的には自然な触覚の再生を目標としている。

本稿ではまず人間の触覚機構について、ディスプレイにとって重要な部分のみ抜き出して説明する。そしてリアルな触覚を再現するという課題に対して「界面現象の再現」という立場から手法を分類する。さらに筆者らの提案している電気触覚ディスプレイについても簡単に触れる。

2. 人間の触覚

無毛部における人間の皮膚構造と、触覚に關与する主な受容器を図1に示す。このほかに温冷覚、痛覚の知覚に關与する神経や、有毛部ではさらに毛の曲がりを検出する受容器が存在する。個々の受容器の詳細については多くの良書があるのでそちらを参照頂きたい⁵⁾⁻⁷⁾。

触覚ディスプレイの設計にとって重要な点は、触覚受容器は皮膚表面に生じている全ての現象をとらえているわけではないということである。例えば空間的に細かいパターンを知覚できる受容器は時間的な高い振動には応答できず、逆に高い振動に敏感な受容器は細かいパターンを知覚出来ない。つまり人間は皮膚変形という時空間的な現象のうち、ある一部を切り出している。

3. 触覚ディスプレイ

触覚ディスプレイとは触覚現象を再現する装置であるが、既にみたように触覚とは外界と皮膚との直接的な相互作用

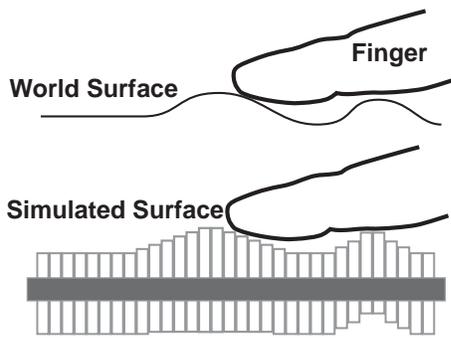


図2 外界の形状を再現する触覚ディスプレイ
上下運動するピンマトリクスによって形状を再現する。

の結果生じる感覚である。このため生じている現象が、外界で生じていることなのか、それとも人間の側で生じていることなのかを区別することが出来ない。

正確を期すならば、外界と人間の「境界」で生じている現象である、というしかない。以後触覚ディスプレイを、着目する「境界」の違いによって環境再現型、皮膚変形再現型、受容器活動再現型に分類して議論する。

3.1 環境再現型

第一の分類は、再現すべき境界として「外界の表面」をとるものである。これはすなわち、接触対象そのものの「形」を再現するディスプレイとなる^{8),9)}。本稿では環境再現型と呼ぶ(図2)。この方式は福祉機器としての点字/点図ディスプレイの延長として理解できる。据え置きでの使用が前提であり、手に装着する必要が無いこと、立体的な形状を触覚的に呈示できること、ディスプレイ面に映像を投影するなどの方式で視覚との融合が容易であることが利点である。その一方で非常に沢山のアクチュエータを高密度になれば、高速で長距離駆動する必要があるため、高いコストを要する。近年の興味深い試みとして山本ら¹⁰⁾は静電気アクチュエータの原理を用いた低コストな環境再現型ディスプレイを提案している。

また本方式は皮膚が階段状の提示ピン群をなぞるため、ピン間隔がいくら狭くても断続的な摩擦感を生じる。この問題に対してはピンの上端を丸める、弾性膜で覆う⁸⁾などの工夫が提案されている。環境再現型では呈示できる表面テクスチャは接触面の持つテクスチャそのものである。

3.2 皮膚変形再現型

第二の触覚ディスプレイは、再現すべき境界として「人間の表面」、すなわち皮膚の変形を考えるものである。本稿では皮膚変形再現型と呼ぶ(図3)。最も基本的な実装では、上下に振動するピンマトリクスが皮膚に装着される構成をとる。モーショントラックセンサで装着者の動作を取得し、それに応じて刺激を変化させる。環境再現型と異なり、皮膚とピン間で水平方向の相対運動はないため、ピン間隔が十分狭ければ断続的な摩擦感が生じず、滑らかな形状を提

示できる。またピンの振動周波数を変えることによって異なる種類のテクスチャを呈示できる。

本方式は現在最も多く研究されている方式である。研究の中心はいかに高密度で高速に応答するアクチュエータを指先に並べつつ、全体のシステムを小型化するかという点に集中しており、ソレノイド、空気圧、形状記憶合金など、多くの小型アクチュエータが利用されている¹¹⁾。触覚情報処理の研究用に作成された巨大なシステムでは、1.0[mm]間隔で400本のピンを並べたものも開発されている¹²⁾

近年の興味深い試みとしては、岩本ら¹³⁾による空中超音波の放射圧を利用したディスプレイが挙げられる。これは皮膚から離れた場所に設置された超音波スピーカ群を駆動して皮膚上に焦点を結ばせ、放射圧によって触覚を提示するというものであり、姿の見えない触覚ディスプレイ、というある種の理想を実現していると言える。またKooら¹⁴⁾は電圧印加によって変形するポリマーを用いたコンパクトな装着型触覚ディスプレイを提案している。

3.3 環境再現型と皮膚変形再現型の対比

環境再現型であっても皮膚変形再現型であっても、もしも結果としての皮膚変形が同じであれば感覚上の違いは無いはずである。このためこの二つの方式を区別することに違和感を覚えるかもしれない。しかしこれらの方式は以下に述べるように現実的な制約から区別して議論する必要がある。

(1) 絨毯と靴

環境再現型は皮膚変形再現型とは異なり常に装着している必要がないため拘束感のない非接触状態を作ることができる。これに対して皮膚変形再現型は装着しているため、全ての環境を再現する必要がない。これはちょうど、前者が絨毯(じゅうたん)、後者が靴と考えれば理解しやすい。絨毯であれば裸足で歩くことができる。靴であればどこまでも歩くことができる。つまりこの二つの方式はまずコストによって区別される。

(2) 受動と能動

環境再現型と皮膚変形再現型の外見上の違いはディスプレイが据え置きか装着かということであるが、環境再現型でも、ディスプレイの基部を手の甲などに装着する例も見られるから、装着しているかどうかは本質的な違いとは言いきれない。この二つの本質的な違いは、「皮膚との接触が受動的か能動的か」という点にある。環境再現型は外界を再現するのであるから、ディスプレイは受動的に、皮膚の到着を待つ。これに対して皮膚変形再現型のディスプレイでは皮膚を能動的に変形させる。

問題は、実際の皮膚変形再現型のディスプレイはアクチュエータの制限から、皮膚変形の一部の要素しか再現できないことである。その要素がもし本質的に何か足りなければ、生起される感覚は自然にはならないかもしれない。環境再現型がその高いコストにもかかわらず繰り返しその価値を

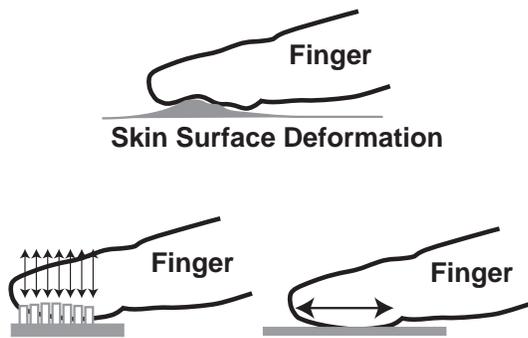


図3 皮膚変形を再現する触覚ディスプレイ
 (左)皮膚の垂直変位を再現する(右)皮膚の水平
 ずれを再現する。

再認識されるのは、皮膚との接触が受動的であるために、生
 起する感覚がより自然であるためである。

3.4 水平振動

環境再現型、皮膚変形再現型という分類とは独立した触
 覚ディスプレイの重要なトピックとして、水平振動につい
 て述べる。

(1) 皮膚変形再現型ディスプレイにおける水平振動

前節において、皮膚変形再現型のディスプレイの問題点
 として、皮膚変形の一部の要素しか再現できないことによ
 って違和感を生じる可能性について述べた。実際に駆動ピン
 の自由度不足による問題が指摘されている。

従来提案された皮膚変形再現型触覚ディスプレイの多く
 はピンを皮膚垂直方向に振動させるものである。しかし、
 いくらピンを高密度化し、振動の周波数レンジを広げても
 振動感覚しか生じず、ある程度以上現実の触感に近づけな
 い、という問題が生じた。

人が物に触るとき、多くの場合接触面に対して法線方向
 ではなく、接線方向に指を動かす。このとき皮膚は上下振
 動ではなく水平振動を生じており、これが触感の重要な要
 素であるかもしれない。実際、テクスチャ感に密接に関係
 すると考えられる低周波振動に应答する Meissner 小体が、
 特に水平振動に対して鋭敏に应答するとの解析結果²⁰⁾ や、
 垂直振動と水平振動で振動に対する感覚閾値の周波数依存
 性が変化すると心理物理実験結果¹⁵⁾ が、水平振動の重要
 性に関する推測を裏付けた。この考えに基づき、皮膚の水平
 変位を再現するディスプレイが数多く提案された^{16) - 18), 23)}
 (図3(右))。

(2) 環境再現型ディスプレイにおける水平振動

水平振動ディスプレイは従来の皮膚変形再現型ディス
 プレイで足りなかった皮膚の水平方向の変形を実現するもの
 である。しかし同時に、環境再現型のディスプレイでも皮膚
 の水平方向の変形に着目したものが数多く提案されている。

Kaczmarek¹⁹⁾ らのディスプレイは高い電圧を印加した
 絶縁された電極上に指を載せることで、指と電極の間に静
 電気力による吸着力を発生させている。ただしこの吸着力

自体は皮膚変形を引き起こさない。指を水平に動かした時
 に初めて吸着力の発生に気付くというものである。つまり
 ここでは、皮膚の変形ではなく、環境の摩擦係数を提示し
 ているといえることができる。本方式は電極のみで実現でき
 るため高密度な提示が可能であるが、報告されている感覚
 は「ねばつき(sticky sensation)」であり、自然な摩擦感と
 は言えないようである。これは静電気力による吸着が純粋
 な摩擦力とは挙動が異なるためかもしれない。

同様の摩擦力制御を超音波による Squeeze 効果によつて
 実現したもの^{20), 21)} では、実際の摩擦係数が変化するため、
 極めて自然な摩擦感の変化を感じることが出来る。ペンタ
 ブレットに装着して「書き味」を実現した例も見られる²²⁾。
 (3) 水平振動と空間解像度

水平振動はリアルな触感の追及から生まれたと言え、触
 覚のリアリティのために今後も必須の要素と考えられる。た
 だし形の情報提示する目的には不向きであることには注
 意しておくべきだろう。

皮膚を弾性体と考え、皮膚表面の一点に垂直方向に
 力を加えた場合と水平方向に力を加えた場合では皮膚下の
 歪み分布の広がり異なる。直観的にも明らかのように水平
 方向の力の方が広い分布形状となる。このため水平方向
 の皮膚ひずみは、形状把握を困難にする。実際仲谷ら²³⁾ は
 垂直方向にのみ移動する高密度ピンマトリクスを介して対
 象をなぞるとエッジ感が強調されてより形状を知覚しやす
 くなることを報告している。

3.5 受容器活動再現型

環境再現型は外界の形状を再現し、皮膚変形再現型は皮
 膚という界面の現象を再現した。後者では再現する対象が、
 より我々の内側に近付いていることが理解される。とすれ
 ば次の段階として、皮膚「内部」の状態を再現する方法が
 考えられる。実際、皮膚内部に存在する受容器の活動を再
 現する受容器活動再現型ディスプレイが提案されている。

振動知覚を例に説明する。振動は異なる周波数成分が異
 なる種類の受容器によって受容される。静的な圧力は皮膚
 浅部の Merkel 細胞が担当し、30Hz 付近を中心とする低周
 波領域は皮膚浅部の Meissner 小体が、200Hz 付近を中心
 とする高周波領域は皮膚深部の Pacini 小体が担当する。触
 感とはこれらの受容器活動の組み合わせに他ならない。と
 すればもし受容器を種類別に刺激出来れば、その刺激を組
 み合わせるにより、色を合成するようにあらゆる触覚
 を再現出来るはずである(本稿ではこれを触原色原理と呼
 ぶ)(図4)。

この方式は触覚特有の考え方ではなく、感覚提示一般で
 とられている方法である。たとえば視覚では赤、緑、青の三
 色を使ってすべての色を再現するが、これは人間の色感受
 性細胞が3種類しかいないことを利用したものである。もし
 この方法をとらずに外界の現象を再現しようと思えば、色
 スペクトルを再現することになったはずで、これは現実的

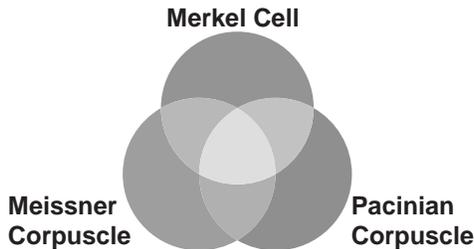
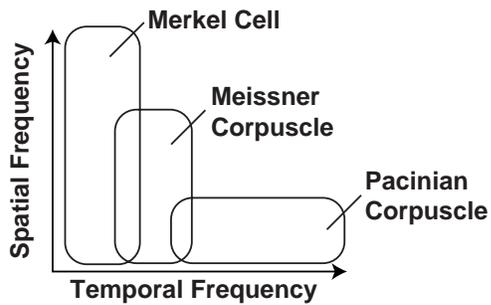


図4 触原色原理

それぞれの受容器は時間的・空間的周波数のある部分を担当する。これを原色と考えれば、あらゆる触覚はこの色の合成としてあらわすことができる。

ではない。受容器の特性をうまく使うことで初めて実用的な視覚ディスプレイが実現したと言える。

同様に聴覚において周波数領域で議論するのは、受容器（内耳有毛細胞）の段階で周波数分解されているためである。つまりこれまでに成功を収めた感覚ディスプレイは、全て受容器に着目した原色の原理を用いていると言える。

Asamura²⁴⁾らは、上下に振動するピンを用いて受容器選択的な触覚提示を実現した。隣り合った振動子を、同相、逆相で振動させることによって、歪みの皮膚到達深度を変化させている（逆相とは、あるピンが下に動いたときに隣のピンが上に動くということである。通常のピンでは皮膚を押し下げることしか出来ないため、逆に皮膚を引き上げるためにピンを皮膚に吸着させる工夫が必要となる）。これにより浅部の受容器と深部の受容器を選択的に刺激している。

また Okamoto²⁵⁾らは、各受容器が得意とする周波数を一つずつ選んで原色とすることを提案している。この方式はまさに視覚における色再現に近い。

受容器活動の再現という観点は振動感覚に限らない。牧野ら²⁶⁾による空気吸引を用いた触覚ディスプレイでは、指先皮膚を負の空気圧によって吸引する。当然皮膚表面の変形はピンによって押される場合とは異なる。しかし圧覚を担当する Merkel 細胞の深さでの歪みエネルギーは、押された場合と似た分布となる。この結果、吸引にもかかわらず、押された場合と区別が付かないことを報告している。

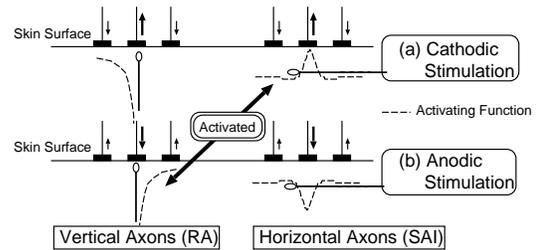


図5 電気刺激による受容器選択的の刺激

(a) 陰極からの電流は皮膚に対して水平方向に走行する神経を選択的に刺激する。(b) 陽極からの電流は皮膚に対して垂直方向に走行する神経を選択的に刺激する。

(1) 電気刺激による触原色原理実現

筆者らは皮膚表面に配置した電極による神経刺激において、受容器の種類別に駆動する手法を提案している²⁷⁾。

これまでに述べた受容器活動再現型のディスプレイは、あくまで受容器の活動を再現するために機械的な刺激を行うものであった。これに対して電気刺激の場合、受容器につながる神経を直接駆動することになる。

電気刺激によって神経軸索が活動電位を生じる現象は古くから知られているが、触覚ディスプレイとして用いる場合は針を用いることができず、電極を皮膚表面に配置しなければならない。皮膚表面からの電流が皮膚内部に電位勾配を生じ、軸索上の電位勾配が軸索内部の電流を生み、最終的に神経活動を誘発する、という間接的な段階を踏む。この際、神経軸索に沿った電位分布の空間二階微分が神経活動に直接寄与することが知られており、Activating Function と呼ばれる²⁸⁾。

この Activating Function は、神経の走行方向に依存して極性を変える。このため、ある電位分布では活動する神経が、逆極性の電位分布では活動しないという現象が生じる。筆者らは皮膚浅部の2種類の受容器 Merkel 細胞と Meissner 小体に接続される神経の走行が異なることに着目し、刺激電流の極性によって異なる感覚を生成できることを見出している(図5)。

また Asamura²⁴⁾らが機械的な刺激で行った深度別刺激は電気刺激においても有効である。我々は内径1mm程度の同心円電極を用いる場合に比べ、内径5mm程度の大型の電極を用いた場合の方が皮膚深部まで刺激でき、深部に存在する Pacini 小体が活動する結果、より高い周波数まで知覚可能となることを確認している²⁹⁾。

4. 触覚ディスプレイと感覚基底

これまで触覚ディスプレイを環境再現型、皮膚変形再現型、受容器活動再現型の3つに分類した。後の二つの手法は、接触にともなう現象の主成分要素を抜き出すという点では共通している。

主成分要素の抜き出し方は一通りではない。実際、現在の触覚ディスプレイ研究では、皮膚変形再現型のディスプレイの有効性が、受容器活動の観点から議論される事が多い。例えば第 3.4 節で水平振動の重要性を述べたが、水平変位は Meissner 小体を特に活動させやすいことが指摘されている²⁰⁾ から、水平・垂直という変位方向に関する議論は、Meissner 小体、Merkel 細胞の活動比率で議論可能と考えられる。

このような感覚基底に基づく触覚ディスプレイの設計は皮膚変形や受容器活動にとどまらない。より高次の感覚基底（触覚プリミティブ）を考えることも可能である。例えば指先の皮膚を 2 点同時に押したとき、2 点と判別できる最小のサイズは 2mm 程度である。多くの触覚ディスプレイはこの 2 点弁別能力を実現するために、高密度のピンマトリクスを採用している。しかし実際には人は 3、4 点が同時に押されるだけで形を把握出来なくなってしまう。つまり認知レベルでは触覚は視覚のようにパターンをありのまま形状としてとらえているわけではなく、重心や広がり、偏り、傾きといったパラメータで理解しているように思われる（念のため補足すれば、もちろん視覚においても形状は「ありのまま」とらえられているわけではなく、形状のプリミティブに分解して理解されている）。

触覚のもつ認知機構が視覚とは異なり、より単純であるとするれば、触覚プリミティブ再現型の触覚ディスプレイを考えることにより、シンプルな触覚ディスプレイも実現できるかもしれない。実際このような方式は、アクチュエータの制限から高密度の触覚呈示が実現不可能であった時期に、遠隔操縦用のマスタコクピットなどで提案されてきたものであるが、現在も振り返るべき価値のあるものと思われる。ただし触覚プリミティブは形状に限らず時空間上で考える必要があるだろう。例えば皮膚接触面積を時系列的に増加させると「柔らかさ」の感覚が呈示されることが知られている³⁰⁾。

5. まとめ

本稿では触覚ディスプレイについて、再現する現象に着目して分類、議論した。触覚とは界面現象であるがゆえに、世界の形を再現するか、自分の皮膚変形を再現するかという二つのアプローチをとることができる。さらに受容器活動の再現を行う方式や、受容器につながる神経活動の再現を行う方式を見た。

これらの方式を見ると、再現する現象のレベルが徐々に我々の内へ引き上げられていることがわかる。実際この先には脳の体性感覚野の再現という方式が考えられ、動物実験による研究が盛んにおこなわれている。結局触覚ディスプレイの研究は「私とはどこまで私なのか」という古典的な問題に対して色々なレベルで回答しているとも言える。

このような、再現する現象によるディスプレイ方式の分

類は他の感覚でも同様に可能なはずである。実際、視覚障害者の視覚を人工的に再生するために、脳の視覚野を直接刺激する研究は盛んに行われている。また聴覚においては電気刺激を用いた人工内耳はすでに広く普及している。

しかしこのような視覚や聴覚の事例は、あくまでも医療福祉という切実な必要性からなされている稀なケースである。少なくとも一般的な視覚や聴覚のディスプレイの設計論において、自己と世界の境界の置きどころに悩むことは、触覚ほどには無いように思われる。この点は触覚ディスプレイ研究の面白さとして強調することが出来るだろう。

5.1 その他の話題

本稿では詳しく取り上げなかったが今後触覚ディスプレイで特に重要となると思われる話題を 3 つ挙げる。

第一に触覚と力覚の融合が挙げられる。触覚ディスプレイと力覚ディスプレイは、接触という現象を二つに分割したものであり、統合は意外に容易ではない。例えばほとんどすべての力覚ディスプレイは手足の先に装着した End Effector によって力を提示するため、必ず副次的に触覚を生じる。このため単に触覚ディスプレイを力覚ディスプレイに搭載すると、重畳して提示される成分が出る。

第二に温度感覚が挙げられる。温度の提示は近年特に研究が盛んであり、接触対象の材質感呈示に重要であることが示されている³¹⁾。温度感覚は時間的応答性の低さから従来の記号情報提示を目的とした触覚ディスプレイでは活用されてこなかったが、今後の高品位な触覚提示には必須と考えられる。

第三に指先以外の触覚提示が挙げられる。多くの触覚ディスプレイは指先への提示を前提としているが、我々の日常生活で指先だけで行っている作業は意外に少なく、指中節、末節、掌を使うことが普通である。また福祉機器として提案されている多くの触覚ディスプレイは、腹部や背部への装着を前提としている。

6. おわりに

触覚ディスプレイは元々福祉用途を目的として開発されたため、当初はいかに多くの記号的・文字的情報をユーザに伝達するかという観点から研究されてきた。これに対して近年の触覚ディスプレイの研究は、視覚や聴覚のディスプレイと同様に、現実の「触った感覚」を再現できるようなディスプレイを目標としている。本稿はこの観点からの概観である。

しかし本当に現実の再現を目標とすべきかについては、いま一度立ち止まって考えるべきであろう。例えば遠隔コミュニケーションや遠隔操縦のように、時間的・空間的な制約を超えて感覚を再現する用途には、現実の「触った感覚」の再現が必要だろう。しかし一方で視覚や聴覚のディスプレイは、現実の感覚を再生するためだけに発展したわけではない。むしろその感覚を通してコンテンツを楽しむ

ために発展したという面を忘れてはならないだろう。

例えば音楽はけして自然な音の再現ではない。和音も、コード進行も、自然から学び自然を再現するだけではけして生まれなかったであろう。とすれば、今後提案されるべき魅力的な触覚の応用用途は、現実の再現という考えのみからは生まれないのではないか、というのが現在の筆者の考えである。

(2008年4月9日受付)

参考文献

- 1) Velazquez R., Pissalux E. E., Wiertelowski M., "A Compact Tactile Display for the Blind with Shape Memory Alloys," In Proc. IEEE ICRA, pp.3905-3910, 2006.
- 2) Collins C. C., "Tactile Television - Mechanical and Electrical Image Projection," IEEE Trans. Man-Machine Systems, Vol.MMS-11, No.1, pp.65-71, 1970.
- 3) Kajimoto H., Kanno Y., Tachi S., "Forehead Electro-tactile Display for Vision Substitution," In Proc. EuroHaptics, 2006.
- 4) van Erp, J.B.F., Saturday I., Jansen C., "Application of tactile displays in sports: where to, how and when to move," In Proc. EuroHaptics, 2006.
- 5) 岩村, "タッチ," 医学書院, 2001.
- 6) 大山, 今井, 和気, "新編感覚・知覚心理学ハンドブック," 誠信書房, 1994.
- 7) Kandel E. R., Schwartz J. H., Jessel T. M., "Principles of Neural Science," McGraw-Hill, 2000.
- 8) Iwata H., Yano H., Nakaizumi F., Kawamura R., "Project feelx: Adding haptic surface to graphics," In Proc. SIG-GRAPH 2001, pages 469-476, 2001.
- 9) Nakatani M., Kajimoto H., Sekiguchi D., Kawakami N., Tachi S., "Control Method for a 3D Shape Display with Coil-type Shape Memory Alloy," In Proc. IEEE ICRA 2005, pp. 1344-1349, 2005.
- 10) 時津, 山本, 樋口, "マトリクス・インチワーム式形状ディスプレイによる振動触覚提示," 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 1A3-5, 2007.
- 11) 触覚伝達機器の設計支援情報
ushiku2.se.uec.ac.jp/shimizu/research/kaken/home.html
- 12) Pare M., Smith A. M., Rice F. L., "Distribution and Terminal Arborizations of Cutaneous Mechanoreceptors in the Glabrous Finger Pads of the Monkey," J. Comp. Neur.vol.445, pp.347-359, 2002.
- 13) 岩本, 篠田, "空中超音波による触覚提示," 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 1A3-3, 2007.
- 14) Koo I., Jung K., Koo J., Nam J., Lee Y., Choi H. R., "Wearable Tactile Display Based on Soft Actuator," In Proc. IEEE ICRA, pp.2220-2225, 2006.
- 15) Miyaoka T. "Measurements of Detection Thresholds Presenting Normal and Tangential Vibrations on Human Glabrous Skin," In Proc. Twentieth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics, vol.20 pp.465-470, 2004.
- 16) Zhou Y., Ohka M., Miyaoka T., "A Tactile Display Presenting Pressure Distribution and Slippage Force," In Proc. IEEE Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.281-285, 2008.
- 17) Levesque V., Pasquero J., Hayward V., "Braille Display by Lateral Skin Deformation with the STReSS2 Tactile Transducer," In Proc. World Haptics Conference, 2007.
- 18) Yamamoto A, Ishii T., Higuchi T., "Electrostatic Tactile Display for Presenting Surface Roughness Sensation," In Proc. IEEE ICIT 2003, pp. 680-684, 2003.
- 19) Kaczmarek, K.A., Nammi, K., Agarwal, A.K., Tyler, M.E., Haase, S.J., Beebe, D.J., "Polarity Effect in Electrovibration for Tactile Display," IEEE Trans. Biomedical Engineering, Vol.53, Issue 10, pp.2047-2054, 2006.
- 20) Nara T., Takasaki M., Maeda T., Higuchi T., Ando S., Tachi S., "Surface Acoustic Wave Tactile Display," IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.21, No.6, pp.56-63, 2001.
- 21) Winfield L., Glassmire J., Colgate E., Peshkin M., "TPaD: Tactile Pattern Display Through Variable Friction Reduction," In Proc. World Haptics Conference, 2007.
- 22) 多門, 小谷, 高崎, 水野, "力覚提示デバイスを用いたペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ," 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2007), 1A2-5, 2007.
- 23) 仲谷, 川上, 館, "高密度ピンマトリクスが有する触覚フィルタ機能の検討," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会(ROBOMECH), 1A2-B10, 2007.
- 24) Asamura N., Yokoyama N., Shinoda H., "A method of selective stimulation to epidermal skin receptors for realistic touch feedback," In Proc. IEEE VR Conference, 1999.
- 25) Okamoto S., Konyo M., Maeno T., Tadokoro S., "Roughness Feeling Telepresence System with Communication Time-Delay," In Proc. World Haptics Conference, 2007.
- 26) 牧野, 篠田, "吸引圧刺激による触覚生成法," 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 11, No.1, pp. 123-132, 2006.
- 27) Kajimoto H., Kawakami N., Maeda T., Tachi S., "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation," In Proc. International Conference on Artificial Reality and Telexistence, 1999.
- 28) Rattay F., "Modeling axon membranes for functional electrical stimulation," IEEE Trans. Biomed. Eng, Vol.40, No.12, pp.1201-1209, 1993.
- 29) 梶本, 館, "経皮電気刺激における振動知覚の電極サイズ依存性," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-D2 No.12, pp.2380-2387, 2005.
- 30) 池田, 藤田, "指先の接触面積と反力の同時制御による柔軟弾性物体の提示," 日本VR学会論文誌, Vol.9, No.2, 004.
- 31) Yamamoto A., Yamamoto H., Cros B., Hashimoto H., Higuchi T., "Thermal Tactile Presentation Based on Prediction of Contact Temperature," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 3, pp. 226-234, 2006.

[著者紹介]

梶本 もとひろ 之 君(正会員)

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) 2001年4月日本学術振興会特別研究員(DC1)。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。