

## 触覚ディスプレイ：技術と応用の発展

東京工芸大学 名誉教授 久米 祐一郎

### 1. はじめに

触覚ディスプレイと聞くと、スマートフォン（スマホ）やゲーム機器の振動を思い浮かべる人は多いと思う。触覚を使った情報伝達は近年開発されたものではない。

目の不自由な人が使っている点字は古くから使われている。点字は当初、1800年頃にフランス軍砲兵が夜間戦闘中に暗闇でも読める文字として考案された。それをフランスの盲学校の教師であり、自身も視覚障がい者であった Louis Braille が改良して、1825年に文字として体系化した。

現在、全世界で広く使われている点字は図1に示すように、縦3、横2の6点を1マスとして文字を表記する。点は平面に凸状に形成され、指先でなぞって触覚で読む。

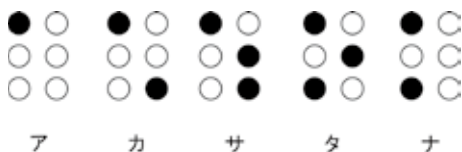


図1 点字の表記例、●は凸点を表す

第二次大戦後、電子工学の発展とともに電子的に制御する触覚ディスプレイの研究開発が行われるようになった。当初は宇宙航空応用を目的としたが、1960～70年代には障がい者支援機器のために、そして1980年代後半から携帯通信機器やゲーム機器への応用へと発展した。

本稿では、現在様々な機器に広く使われている電子的に制御する触覚ディスプレイの技術と応用の発展の経緯について概説する。

### 2. 触覚

人間の感覚は視覚、聴覚、嗅覚、味覚、触覚の五感から成っている。触覚は他の4つの感覚と異なっており、個別に発達した、例えば視覚の場合の眼のような感覚器官は無く、全身に分布している。

触覚という用語は場合により異なった意味で使われる。広義の触覚は触ること以外に運動覚、位置や姿勢を知覚する位置覚、力覚等を含んでおり、ハプティクス (haptics) とも呼ばれる。

一方、狭義の触覚は皮膚内に存在するセンサーである感覚受容器によって、皮膚への物体の接触による機械的刺激を知覚する皮膚感覚の一部である。本稿での触覚とは狭義の触覚とする。

触覚は皮膚内に存在する各種の感覚受容器によって、外部からの刺激は中枢へ向かう神経を流れる信号となり、信号は中枢に届いて知覚となる。図2は皮膚断面と触覚受容器を簡略化して模式的に表している。皮膚は有毛部と無毛部に分類されるが、無毛部は手のひらと足の裏である。皮膚内の様々な受容器は機械的接触による皮膚の変形、圧迫、縁、引っ張り、滑り、振動などを分担して受容している。また神経が皮膚組織内で終わっている自由神経終末では温かさや冷たさ、侵害による痛みを受容している。

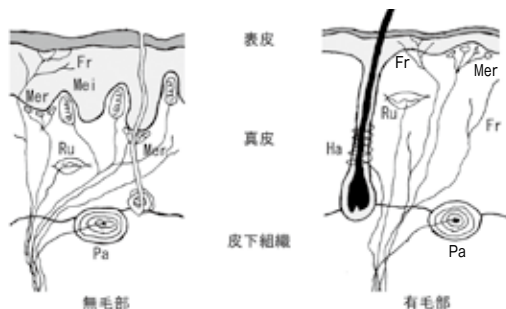


図2 皮膚断面と触覚受容器の模式図  
(無毛部と有毛部, 記号は受容器の種類)

### 3. 触覚の特性

触覚を情報伝達に使う場合, その特性を知り, それに合わせたシステム開発が必要である。

一般に感覚では順応という現象が起こる。順応とは同じ刺激を与え続けると, 感覚の感度が低下する現象であり, 触覚では順応が大きい。例えば腕時計を着用した直後は手首の周囲に接触している感覚があるが, しばらくすると何も感じなくなる。これは触覚が接触刺激に順応したためである。触覚ディスプレイで振動刺激が多く使われるのは, 順応を抑制するためである。

触覚の空間的解像度, 触れたときに細かさを感じる能力は身体の部位によって異なる。この触ったときの細かさを知覚する基準として二点弁別閾がある。コンパスの先で触れた2点が2つの刺激として感じる限界の距離である。細かい作業をする指先は5mm 以下, 唇は5mm 強である一方, 大腿や上腕は50mm 近い。

皮膚上の複数箇所を刺激したとき, 条件によって錯覚が生じる。例えば2つの刺激に適当な時間差を与えると, 刺激がその2つの刺激場所の間を動いたように感じる。また2つの刺激に強度差を与えると, 強い刺激の方へ変位して感じる現象がある。これら触覚の錯覚を情報提示に用いることもできる。

## 4. 触覚刺激技術

### 4.1 能動触と受動触

触覚による知覚の形態は主に2つの方式に分

類できる。点字では平面の点をなぞって認識する。これはなぞり運動と触覚により情報を知覚するため, 能動触という。もう一つは人体に刺激装置を装着し, 人の動きにかかわらず刺激を知覚するもので, これを受動触という。携帯端末の振動ディスプレイがこれに相当する。

次に, これまで提案された主な電子触覚ディスプレイの動作原理について説明する。

### 4.2 電磁力を用いた触覚刺激

電流を機械的な力へ変換する一般的な手法は, 磁界中の電流が受ける電磁力である。それを用いた触覚ディスプレイを以下に述べる。

#### (1) ピンディスプレイ

ソレノイドやモーターによってピンを駆動して触覚を刺激するピンディスプレイが開発されている。図3に示すように, 平面からピンを持ち上げ, ピンの先端で触覚を刺激する。



図3 ピンディスプレイ

#### (2) 振動刺激素子

現在, 多く使われている触覚ディスプレイは, おもり(質量)の周期的な移動による振動を用いている。振動素子として, 図4(A)に示すように偏芯おもりの回転による偏芯振動モーターと, (B)に示すおもりの直線的な往復運動による線形振動素子がある。線形振動素子は振動強度を大きくするために共振を利用したものがあ

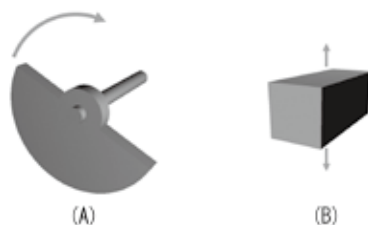


図4 振動素子 おもりの移動方法

図5は振動素子の外観であり、金属円盤や円筒形は偏芯振動モーター、直方体は線形振動素子である。偏芯振動モーターは回転の立上がりや立下がりが遅いが、駆動回路が簡単であり携帯端末に多く使われている。線形振動素子は時間応答性が良く、衝撃等を現実的に表現できるためゲーム機器や高級携帯端末に使用されている。

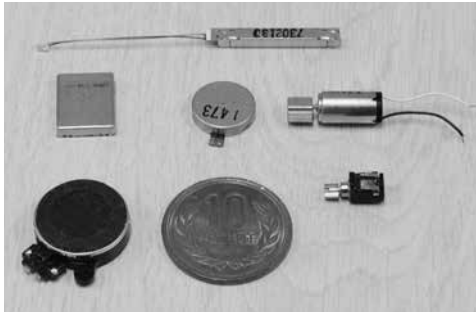


図5 振動素子の外観 手前中央は十円硬貨

### (3) ネオジム磁石の発明

偏芯振動モーターや線形振動素子は現在、多くの機器に用いられている。これらが1980年後半に急速に普及した一要因として、携帯機器の普及と同じ時期に、住友特殊金属の佐川真人氏らによる強力なネオジム磁石の発明と実用化がある。これにより小型低電圧低消費電力で高出力の電磁デバイスの製作が可能となり、小型振動子は大量生産により価格も大きく低下した。

### 4.3 ピエゾ素子を用いた触覚刺激

ピエゾ効果（圧電効果）を用いた振動素子やアクチュエータも触覚ディスプレイに利用されている。ピエゾ効果とは、特定の結晶が変形したとき電圧が発生し、逆に電圧をかけると結晶が変形する現象である。この性質を用いて、積層型やバイモルフ型等のアクチュエータが開発されている。電子点字はピエゾ素子によるピンディスプレイを使っているものも多い。

### 4.4 その他の触覚刺激方法

熱により記憶させた形状に戻ろうとする形状記憶合金を利用したアクチュエータを用いたピ

ンディスプレイの開発も行われている。また空気や液体の流体の噴流により触覚を刺激する方法も開発されている。

## 5. 触覚ディスプレイの応用

これまで研究開発された触覚ディスプレイの応用について、研究開発段階中も含めて概説する。

### 5.1 宇宙航空

航空機や宇宙船の操縦士の視覚、聴覚は多くの情報で飽和しているため、別の情報チャンネルとして、触覚の検討が第二次世界大戦直後から行われてた。誘導や警報等の情報提示、訓練の指示等が検討されてきた。現在の航空機では、失速警報やパイロットの誘導に操縦桿への振動を用いている。

### 5.2 自動車

振動ディスプレイの自動車への応用は宇宙航空分野と同様に、運転者への情報伝達方法として検討されてきたが、実装されるようになったのは最近である。運転者への直感的な情報伝達として、ステアリングホイール、座席、ペダルなど身体が接触する部分へ振動素子の実装が提案されている。ナビゲーション、自動運転の補助や警告等の情報伝達への応用が期待されており、すでに運転支援のレーンキープシステムでは、レーンを逸脱した場合にステアリングホイールへ振動で情報提示するものもある。

自動車は電子化により計器の液晶ディスプレイ(LCD)やヘッドアップディスプレイ(HUD)化、そして操作をタッチパネル付きLCDで行う車種が増加している。タッチパネルを指先で操作する場合、物理的スイッチのように接触感、押し込みや反力が無いために、操作の確認が難しく、安全面からも問題である。そのためスイッチ操作の手かかりとして触覚ディスプレイが用いられている。タッチパネル上のスイッチ等への接触や押下に相当する操作を行ったとき、振動によって操作のフィードバックを行う。このシステムは一部の車種に実装されている。

### 5.3 障がい者支援

障がい者の支援の1つとして、点字のように失った感覚に代えて、残存感覚の触覚を通して情報を伝達する方法がある。ここでは触覚ディスプレイを用いた障がい者支援機器を紹介する。

#### (1) 電子点字

前述したピンディスプレイを並べて電子的に点字を表示する電子点字は、1970年代後半以降、実用化されている。点字ディスプレイは1行数10マス、複数行表示できるもの等、様々な点字ディスプレイが国内外で商品化されている。

これらの点字ディスプレイはPCに接続して使用するもの、点字キーボードと記憶装置を組み合わせた電子メモなどがある。電子点字を使って点字本の電子化も可能となり、保存や整理も容易になった。

ゆうちょ銀行のATMは金額確認のため、図6に示すように piezo素子によるピンディスプレイを用いた点字表示装置を装備している。

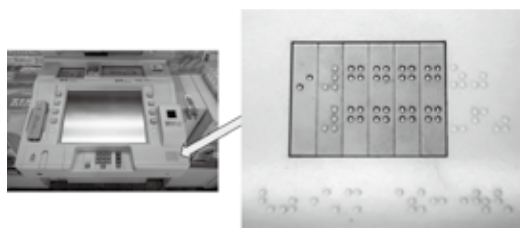


図6 ゆうちょ銀行のATM  
右は点字ディスプレイの拡大

#### (2) 画像情報伝達

触覚は体表に平面的に分布しており、平面的な情報を知覚できることから、画像情報の伝達が試みられている。

Optacon（商品名）は触覚を通して印刷文字を読み取る装置であり、図7にその外観を示す。左手の人差し指を装置の触知盤に置く。触知盤には縦24個、横6個の piezo素子によって振動するピンディスプレイがある。右手で小型固体素子カメラを印刷された文字を走査し、左手人差し指の触覚を通して文字を認識する。

この装置は1960年代にStanford大学のLinville教授、Stanford研究所のBliss博士らにより開発され、1971年にTSIにより商品化され、欧米を中心に視覚障がい者に普及した。

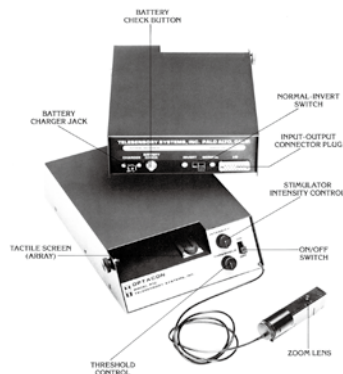


図7 Optacon TSI カタログ（1978年）より

しかし、1990年代に入ると文字情報が電子化されPCによって音声合成で出力したり、文字認識システムを視覚障がい者が用いるようになったため、Optaconの製造は1996年に終了した。



図8 TVSS (Smith-Kettlewell 研究所)

同時期に、視覚障がい者のために触覚を通して一般的な画像情報を伝達する装置（TVSS: Tactile Vision Substitution System）の研究が、1960年代後半から1970年代にSmith-Kettlewell研究所のBach-y-Rita博士、Collins博士らによって行われた。

図8はTVSSの一例であるが、椅子の背に縦20、横20個のソレノイドによるピン刺激素

子を取り付けて、撮像した画像を背の触覚へ提示した。また着用できる装用型装置も試作され、これら装置を用いて物体の位置や形状、奥行の認識、歩行等の実験が行われ、触覚による画像認識の効果はある程度、明らかになったが、実用には至らなかった。

その他、聴覚障がい者のために音の周波数情報をピエゾ振動子を用いて指先の触覚に提示する装置や、義手の触覚や力覚情報を触覚提示するシステムの開発が行われている。

### (3) オーディオ機器

20Hz以下の耳では聞こえない低音を振動に変えて触覚へ伝達し、臨場感を向上させる音響システム、ボディソニックがパイオニアによって1980年頃に開発された。振動子を椅子の座や背、あるいはクッションに取り付けた。

### (4) 携帯情報通信機器

触覚ディスプレイを備えた携帯情報通信端末の最初は、無線呼出しシステムのバイジャー(ポケベル)である。初期の装置は音で着信を知らせていたが、音では不都合な状況もあった。着信の振動提示は80年代初頭には提案されていた。1980年代後半に振動が一気に実装されたのは、前述のネオジム磁石やコアレスモーターの開発により小型、低消費電力の偏芯振動モーターの開発によるところが大きい。

そして1990年代に入ると携帯電話にも振動素子が搭載され、スマホが主流となった現在でも、振動提示は携帯端末に必要な機能となっている。またスマホがゲーム端末としての役割も大きくなり、より振動表現力がある線形振動素子を搭載した機種も増えている。

### (5) 電子ゲーム

ビデオゲームが家庭に普及し、視聴覚に加えて触覚への情報提示は自然の流れであった。衝撃や爆発等を振動で疑似的に表現することにより、臨場感を向上させた。1997年にはゲームコントローラに振動機能が実装された。図9は

PlayStation 2のコントローラ DUAL SHOCK 2の内部である。

また近年では、振動による表現力をより上げるために、高周波の振動を再現できる線形振動素子も多く用いられている。

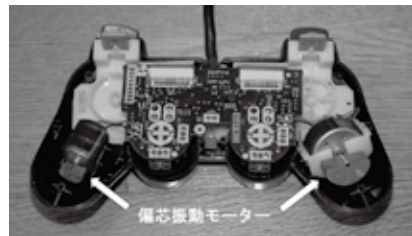


図9 PlayStation 2 DUALSHOCK 2内の偏芯振動モーター

## 6. おわりに

触覚ディスプレイは今後益々発展することが期待され、新しい触覚刺激素子も開発されつつあり、新しい応用も拓かれるであろう。

本稿では私達の身の回りで使われている電子的な触覚ディスプレイの発展について概説した。限られた紙面のため詳細な記述ではないが、おおよその流れを理解して頂ければ幸いである。

### 参考文献

参考情報は以下の文献及びその中の引用文献に記載されている。

Y. Kume: Evolution of Information Displays through Tactile Sensation in Human Interfaces: A Historic Review, Proceedings of The International Display Workshops, vol. 30, pp. 1221-1224. 2023.  
[https://pubfiles.atlas.jp/fs/public/idw2023/ver\\_2/abstract/en/INP5-02.pdf](https://pubfiles.atlas.jp/fs/public/idw2023/ver_2/abstract/en/INP5-02.pdf)

山本日登志, 松浦裕, 広沢哲, 藤村節夫, 佐川真人: 超高性能希土類磁石「NEOMAX」の開発, 日本金属学会会報, 26巻, 5号, pp. 416-418, 1987.  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/1962/26/5/26\\_5\\_416/\\_pdf/-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/materia/1962/26/5/26_5_416/_pdf/-char/ja)