触覚のセンシングとディスプレイ

下 条 誠 (電気通信大学大学)

Tactile Sensing and Display

Makoto Shimojo, Non-Member (The University of Electro-Communications)

In this paper, a characteristic of human tactile sense and somatosensory were explained. As a tactile sensor, texture sensing methods which will be important in VR technology near future were described. And present state of the haptics display was explained.

キーワード：触覚センサ、ハプティクスディスプレイ、触感覚受容器、バーチャルリアリティ

Keywords: Tactile Sensor, Haptics Display, Cutaneous receptor, Virtual reality

1. まえがき

視覚は推定する感覚であり、触覚は確定する感覚である。このため見えているものに手を伸ばして触れた感覚がない場合違和感を感じ、臨場感を大きく損ねてしまう。近年、VR技術において触覚ディスプレイの開発が盛んに行われるようになってきたのはこのような理由によるのだろう。この触覚ディスプレイについては、まず指先に触覚情報を提示する装置を思い浮かべる。しかし、これは狭い範囲での触覚であり、通常手腕までの力感覚を含めた人間の体性感覚に情報を提示する装置を意味することが多く、また有用性も高い。これはハプティックディスプレイと呼ばれている。視覚・聴覚のディスプレイはモニターやスピーカー等標準的な装置があるが、このハプティックディスプレイにはまだ存在しない。これは視覚・聴覚が受動的な感覚で、しかも非接触でよいのに比べ、触覚は能動的感覚で、かつ接触で提示しなければいけないため、その困難さが格段と高いことによる。例えば提示装置を作るとなると、手指等に直接機構を取り付け手指等の動きを計測してその動きに合わせて提示情報を更新する必要がある。その機構の重量、寸法等の人体に装着することからくる制限のクリア、動作計測のメカニズムの工夫、そして触力覚を提示する場合望むべくは数 KHz 程度までの応答周波数の確保など、現状の技術レベルとしては困難な問題をかかえている。

本解説では、まず触覚ディスプレイが情報提示する場合、人間側の特性としての触覚、体性感覚について簡単に述べ、ハプティクスディスプレイの現状について触れたい。また遠隔操作などの応用を考えた時、撮像系としての触覚センサと提示系としての触覚ディスプレイとの組合せとなることから、本解説でも触覚センサについて述べるようにとのことであった。これについては良い参考文献があるのでそちらを参

照願い¹⁾²⁾、ここではその中で将来重要になるであろう材質感センシングに焦点を絞り解説したい。

2. 人間の触覚特性

2. 1 触覚受容器³⁾⁴⁾⁵⁾

皮膚の手掌面内にはおよそ 17,000 の機械受容器がある。これら機械受容器は、皮膚変形刺激に対する応答の時間変化と、受容野の広さから 4 種類に分類されている。前者は、皮膚に一定の凹みを加えた時に、受容器出力の時間変化が少ない遅順応型 (SA) と時間変化に応答する速順応型 (FA) に分けられる。後者は、受容野が狭く境界が明瞭である I 型と、受容野が広く境界が不明瞭である II 型となる。表 1 にはこれら受容器の特性をまとめものを示す。この感覚受容器の数は全身体では 10^7 個、痛覚 (自由神経終末) が 2×10^6 個、温点が 3×10^4 個、冷点が 2.5×10^5 個あるとされている。通信容量からみると、触覚は 10^6 (bit/s) であるといわれている。ちなみに、視覚は 10^7 (bit/s)、聴覚は 10^5 (bit/s)、嗅覚は 10^3 (bit/s)、味覚は 10^3 (bit/s) である。

2. 2 触覚の特性³⁾⁴⁾⁵⁾

表 2 には触覚機能の空間分解能、皮膚変形感度、時間分解能等の基本特性を示す。空間分解能では、コンパスのような器具を用いて 2 点刺激を加え、これが 1 点か 2 点かを識別できる距離から分解能を決めている。また継時 2 点弁別のようにコンパスの両端を順々に呈示した 2 つの点と同じ位置であるか否かを判断させる方法もある。また皮膚変形感度は、皮膚に凹みを与えた時の閾値が調べられている。各受容器の感度が周波数によって変化するため、閾値は振動周波数によって変化する。把持をしたものが滑る時に生じるずれを検知する能力については、指先に対する変位方向によって変わりその閾値は縦<斜め<横の順である⁶⁾。またその閾値は移動

表 1 ヒトの無毛部皮膚感覚受容器

Table 1. Properties of the tactile units in human glabrous skin

	SAI	SAII	FAI	FAII
受容器	Merkel触覚盤	Ruffini小体	Meissner小体	Pacinian小体
受容野の境界	明瞭	不明瞭	明瞭	不明瞭
手掌面における 神経支配密度	25% (4250本)	19% (3230本)	43% (7310本)	13% (2210本)
周波数レンジ	0.4-100Hz	0.4-100Hz	10-200Hz	70-1000Hz
機能的特徴	強度検出 空間パタン検出 皮膚曲率検出	皮膚の引張り 検出	速度検出 空間パタン検出 曲率変化検出	加速度検出 振動検出
感覚発生に必要なパルス数	連続パルス (20程度)	少しでは 関与なし	単一パルス	連続パルス
触神経電気刺激 による発生感覚	Pressure	--	Tapping(1Hz) Flutter(10Hz) Vibration(50Hz)	Tickling/ Vibration

度によって変わり、速度が大きいほど小さな変位量での検知が可能としている。接触力の分解能については、その変化を知覚できる荷重の変化として調べられており、およそ 5-15% 程度といわれている。

表 2 皮膚の検出感度

Table 2. Sensivities of human skin

項目	特 性
空間分解能	2点弁別 継時2点弁別
指先	2 mm 1.5 mm
前額	25 mm 5 mm
背中	70 mm 12.5 mm
皮膚の凹み閾値	静的: 20 μ m 0.3 mN/mm ² 10 Hz: 10 μ m 250 Hz: 0.1 μ m
表面凹凸	6 μ m(50 μ m ϕ), 1 μ m(500 μ m ϕ)
すれ検出	変位 速度
指先縦	50 μ m(0.2 mm/s) 20 μ m(4 mm/s)
指先回転	0.046 deg(21.6 deg/s) 0.265 deg(0.72 deg/s)
時間分解能	継続刺激時間間隔 10ms 周波数帯域 0-1000Hz 応答時間 70ms-500ms
剛体知覚	25N/mm以上

2. 3 上肢の位置検出と動作の特性⁵⁾

人間上肢の位置と動作特性については多くの実験結果がある。運動の検出特性としては 20-30Hz 程度とされている。一般に、末端の関節よりも中心に近い関節の角度分解能が高く、指先関節では 2.5 度、手首・肘では 2 度、肩では 0.8 度とされている。これは位置決めにおいて根元の関節の角度分解能の影響が大きいことを考えれば当然である。上肢動作特性は動作モードにより変わり、その周波数帯域は予期しない動きに対しては 1-2Hz、周期的動きには 2-5Hz、学習もしくは自発的な動作には 5Hz 程度、屈曲動作には 10Hz 程度とされている。

2. 4 触覚による材質認識

従来触覚は、圧力、温度、振動などに対する応答と感覚量

との関係付けなど、主に受動的認識機構としての研究が行われてきた。しかし、材質・表面状態などの物性情報認識のためには、ただ単に手指を押し当てるのではなく、手で対象を探る、または指でなぞる等の何らかの意図に基づいた探索的な要素が必要となる。これをハプティクス知覚という。このハプティクス知覚を岩村の図⁷⁾に加筆した図 1 を用いて説明する。我々が対象の材質を認識する場合、まず硬さ、表面状態、温度特性などを調べ、それらを統合した知覚像とこれまでの経験による記憶像との照合を基に判断を行っている。この過程を大まかに分けてみると、対象理解のための探索的戦略を作り手指に探索的運動を行わせ、手指部受容器からの情報から知覚像の形成を行い、記憶像の照合を行う。すなわち、探索戦略の決定→行動→検証→戦略の変更というループを経て対象の材質の認識を行うことになる。このような手順は触覚センサを用いた材質感センサの実現に対しても有用な知見を与えてくれるものと考えられる。

3. 触覚センサによる材質認識

触覚センサを用いて材質の判別を行った例として、触運動動作と複数センサ情報を統合したシステムがある⁸⁾。このシステムは温度センサ、振動センサ、摩擦センサなどを備えたセンサヘッドを、なぞり速度・接触力各 3 種類づつ、計 9 回対象にすりあわせ、その時に検出される温度変化、振動、摩擦、変形の情報を統合することによって、対象物の材質を検出している。識別アルゴリズムは、センサからの情報を温度変化率、振動の高・中・低周波成分など 8 種類の特徴量に分け、相互情報量基準に基づいて特徴量の逐次選択を行う方法を用いている。実験では、木材、金属、高分子材料、人間でも困難な紙質(画用紙、コピー紙等)及び布質の風合標準(紳士夏服用生地)を用い、ほぼ完全に判別できたとしている。また、人間の触感覚を通して材質感を提示する研究として、材質感を構成する物理的パラメータの推測とその材質感への寄与についての報告がある⁹⁾。それによると材質感の判別には、温度変化パターン情報が深く関与し、また表面アラサ・粘着度といった物理量が寄与することが述べられている。

図 1 触覚による材質認識

Fig. 1. Texture recognition by human tactile sense.

その他、硬さをはかるセンサがある。これは先端が球形の振動子を対象に接触させた時に、対象が硬い場合には接触面は小さくなりスティフネス効果で共振周波数が変化することを利用したものである¹⁰⁾。応用として体内臓器の硬さ及び細胞の硬さ診断など医療分野の応用があげられている。

4. 触覚ディスプレイの現状

仮想空間、もしくは遠隔操作において操作者がコップを掴み、移動させる場面を考えてみる。操作者はコップに手を近づけ・つかみ・移動させる。この時、(1)始め何の抵抗も無く手指腕を自由に移動させ、(2)コップを掴んだ時の把持力、(3)指先の接触パターン情報提示、(4)そして移動時の重量・慣性、及び台に置いたときの抵抗力の提示を行う。

この(1)の自由空間で自由に拘束感が無く動作可能とすることは以外に難しい。機構の慣性、特性などから何らかの抗力を感じてしまう。特に装置が大きくなるに慣性力が大きくなるため難しくなる。(2)の把持力は内力として提示すればよいので種々の方法が提案されている。(3)また触れた時の接触・温熱パターン情報は分布情報として提示する。(4)の重量・慣性・接触力は、人体に対して外力として提示する必要がある。以上のようなハプティクスディスプレイでは、(1)スムーズな自由運動提示、(2)内力提示、(3)触覚パターン提示、(4)外力提示、を行えることが望まれる。ハプティクスディスプレイとして現在研究開発、もしくは製品化されているものの一部を以下に紹介する。

(1) 内力提示型 この方式は身体に装置の基礎を置き、そこからの力を発生する装置である。このため、固定物、重量など接地系に関わる力覚提示は出来ないが、手指腕等に装着して利用することから動作範囲が広い特徴がある。代表的な製品として、CyberGrasp(Virtual Technologies 社)がある。これは手の甲側にアーチ状の支柱を取付けそこにケーブルを通し、指先につなげ、ケーブルを引くことにより5本の指先に反力を与える装置である。最大反力は12Nである。手指動作はCyberGloveといわれる22個の歪みゲージを手袋に貼り付け、関節角度を計測する装置により測定している。研究開発では各種のものが提案されている。例えば操作者に背負子のようなフレームを付け、そこから4本の糸を出し、ユーザが持つペン先を取付け、糸の張力を利用して力覚を提示するHapticsGEARと呼ばれる装置の報告がある¹¹⁾。また、手首に3自由度を有するジョイスティックを装着しその先端を指で掴み反力を提示する方式がある¹²⁾。把持については掌を基礎としそこから親指、人差指、中指に空気圧シリンダーを介して反力を提示する装置の報告がある¹³⁾。

(2) 外力提示型 この方式は机、定盤など接地系に提示装置の基礎を置き、そこからの力を発生する装置である。これらは身体外部に基礎があるため、重量等の制限を受けず高出力、高速応答のものが作りやすい特徴がある。代表的な製品と

してはPHANTOM (SensAble Technologies 社)がある。デスクトップ型力覚提示装置でリンク機構の先端に指貫がありそこに指先を入れて反力を提示する。バックドライブフリクションが小さく自由空間内は軽く動かせ、仮想物にあたると反力を返す。最大提示力、剛性はあまり大きくはないが、制御ループを1KHZ程度で動かしているためスムーズな動作が可能である。3自由度と回転を付加した6自由度型がある。上記ですでに述べたCyberGraspを接地系に固定したアームに取付けたCyberForce(Immersion 社)がある。触る、握るだけでなく、重さや壁などの固定されたオブジェクトに対して、それ以上移動しない抵抗感により押すことが表現可能としている。またDELTA型パラレルリンク機構を用いた3自由度及び6自由度のディスプレイ(三菱プレジジョン社)がある。この方式の特徴としてあまり作業領域は広く取れないが、高精度・高剛性という特徴があり、眼球手術シミュレータなど医療用に用いられている¹⁴⁾。またSpiderと呼ばれる指先にリングを付け3本のワイヤの張力で抗力と位置を与える装置がある¹⁵⁾。片手4指づつ両手に装着し両手多指による協調作業を可能としている。ER流体を用いて力覚を提示する方式もある。ER流体とは電界によって粘性が変化する流体で、入力軸と出力軸の間にこのER流体を満たし、電圧を制御することでその粘性を制御し出力軸のトルクを制御するものである¹⁶⁾。この方式は比較的大きな力覚を提示可能という特徴がある。

(3) 触覚ディスプレイ この方式は、主に指先表面に触覚パターン提示を行う方式である。触覚のパターンはアレイ状に配置したピン等によって指先に提示される。駆動方式としては、圧電素子、電磁素子、小型モータ、空気圧、電気信号などがある。圧電素子を並べたものでは、製品として8x8のマトリクス状に3mmピッチで配置(KGS 社)したものがある。変位量は0.7mm、押圧力は数g程度である。これを通常のマウスの左クリックボタンに埋め込み触覚マウスとして視覚障害者用機器として利用した報告がある¹⁷⁾。従来触覚パターンの提示装置は主に視覚障害者用ディスプレイとして開発されてきた。Optaconという装置では6列24本の圧電型の振動子で指先にボタンを伝え盲人用読書器として利用されている。より高分解能ディスプレイとしては4096(64x64)本のピンを3mmピッチで配置し、その上下をパルスモータで制御させているものがあり、図形の読み取りなどへの利用が提案されている¹⁸⁾。高密度提示装置としては10mm角内に100本のピンを配置し、リニアアクチュエータで駆動する装置が開発されている¹⁹⁾。

最近電気信号刺激を用いた触覚提示方式で興味深いものが開発された。皮膚表面に取り付けたアレイ状電極から体内に微弱電流パルスを通し、皮膚下の感覚神経を活動させる手法である。このような方法は従来からあったが、汗腺等による皮膚インピーダンスの局所的変動による電流の集中で急激な痛みなどを生じるため従来使われていなかった。新たな方式では微小電極を組合せ皮膚インピーダンスの補償を行うことで定常的な感覚を提示させている。また皮膚感覚受容器

の選択的な刺激も可能としている²⁰⁾。この他、表面状態の提示として、薄型静電アクチュエータ上に指先を置き左右方向に動作させた時に、表面状態に応じて発生抗力のパターンを変えることで、つるつる、ざらざらと言った表面粗さに関する触感を提示する装置の報告がある²¹⁾。また温度感覚としては指先に取付け温感を提示する製品(CMResearch 社)がある。

(4) 神経インターフェース 究極の触覚ディスプレイとしては人間の触覚神経系を介して直接人間に提示する方法も考えられる。このような神経系を介して生体系と機械系を一体化しようとする試みは、医用生体工学の中でも最も注目を浴びている領域の一つである。満洲らは²²⁾、遠隔地にあるロボットハンドを被験者がネットワーク経由で操作を行い、ハンドと対象物との接触情報を、Microstimulation 法を用いて被験者の触覚神経を刺激することで、ハンドに加えられた感覚刺激を自分の手に感覚が加えられたものとして感させる実験に成功している。Microstimulation 法とは直径 100 μ m 程度のタングステン製針を経皮的に神経束内に挿入し、電気的絶縁が剥がれている針先端部分と触覚神経線維の接触により電氣的接続を行う。ここにパルス幅 0.25ms 程度、電流として 10 μ A 程度以下の電気刺激を加えて触覚を発生させる。表 1 には Ochoa らが報告した各受容器と発生する感覚について示してある。このような神経インターフェースの技術は、義手義足などへの活用および将来のインターフェース方法として注目を浴びる技術であろう。

5. おわりに

触覚の提示は人間側の感覚特性の理解が必要であり、その特性により提示機器の仕様が定まるのではないかと考える。触覚提示では対象物の情報を正確な物理量として提示する必要はなく、テレビ画像が毎秒 30 フレームで更新されると動画と認識されるように、人間の特性を上手く利用することに鍵がありそうだ。その意味で仮現運動など人間の各種錯覚現象の活用も必要となるであろう。

(平成 14 年 7 月 29 日受付)

文 献

- (1) 篠田裕之: "器用な手の皮膚と触覚", 日本ロボット学会, 18-6, pp.767-771, 2000.
- (2) 篠田裕之: "接触センシングの現状と今後の展開", 日本ロボット学会, 20-4, pp.385-388, 2002.
- (3) Schmit, R.F. (岩村他訳): 感覚生理学第 2 版, 金芳堂(1991).
- (4) R S. Johansson, A. B. Vallbo: "Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand", Trends Neurosc, 6, 27, pp.27-32, 1983.
- (5) Basdogan, C., M.A. Srinivasan: "Haptic Rendering in Virtual Environments. Handbook of Virtual Environments", K. Stanney. London, Lawrence Earlbaum, Inc.: Chapter 5, 2002.
- (6) Hosoe, F. Odagawa, T. Shimizu, S., Ino, et.al.: "Development of a tactile sensor modelled after the shearing strain perception mechanism of the human tactile sense and its application", Trans. SICE, Vol. 30, Issue 5, pp.577-583, 1994.
- (7) 岩村吉晃: 脳と認識 (伊藤正男編), 平凡社選書(1982), pp.145-165.
- (8) 阪口豊: "能動的感覚統合による触覚認識システム", 計測自動制御学会論文集, Vol.31, No.8, pp.1217-1226, 1995.
- (9) 井野, 泉, 高橋, 伊福部: "物体接触時の皮膚温変化に着目した材質触覚ディスプレイ方式の提案", 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 3, pp. 345-351, 1994.
- (10) 尾俣定夫: "硬さ測定用触覚センサ", 超音波 TECHNO, Vol.9, No.3, pp.6-9, 1997.
- (11) 箕, 矢野, 斎藤, 小木, 廣瀬: "没入型仮想空間における力覚呈示デバイス HapticGEAR の開発とその評価", 日本 VR 学会論文誌, Vol. 5, No. 4, pp. 1113-1120, 2000.
- (12) 岩田, 中川: "着用型力覚帰還ジョイスティック", HIS, 1998.
- (13) Burdea, G, J. Zhuang, E. Roskos, D. Silver and N. Langrana: "A Portable Dextrous Master with Force Feedback," Presence, Vol.1:1, pp. 18-28, 1992
- (14) 片野, 寺田: "パラレルリンク機構を用いたハプティックデバイスの開発", 日本 VR 学会第 5 回大会論文集, pp.9-10, 2000.
- (15) 佐藤, 平田, 河原田: "空間インターフェース装置 SPIDER の提案", 電子情報通信学会誌, D-II.J74-D-II, pp.887-894, 1991.
- (16) 坂口, 古荘: "ER アクチュエータを用いた 2 次元力覚提示システムの開発", 日本 VR 学会論文誌, Vol.3, No.3, pp.133-140, 1998.
- (17) 下条, 石田, 渡辺: "視覚障害者用 TactileDisplay の開発", 日本 VR 学会第 4 回大会論文集, pp.101-102, 1999.
- (18) M.Shinohara, Y. Shimizu, A. Mochizuki: "Three-Dimensional Tactile Display for the Blind", IEEE TRANS. REHABILITATION ENGINEERING. Vol. 6, No. 3, pp.249-256, 1998.
- (19) D.T.V. Pawlu k, C.P. van Buskirk, J.H. Killebrew, S.S. Hsiao, K.O. Johnson: "Control and Pattern Specification for a High Density Tactile Display", Haptics Symposium, ASME IMECE, 1998.
- (20) 梶本, 川上, 前田, 館: "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", 電子情報通信学会誌, Vol.J84-D-II, No.1, pp120-128, 2001
- (21) 山本, 高崎, 樋口: 薄型静電アクチュエータを用いた触覚インタフェース, SICE SI2000 講演論文集, pp.59-60, 2000.
- (22) 下条, 牧野, 小川, 鈴木, 並木, 斎藤, 國本, 石川, 満洲: "ロボットハンドからの接触感覚を触覚神経系経由により提示するシステムの開発", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P2-E08, 2002.

下条 誠 (非会員) 1976 年 3 月東京工業学大学院総合理工学研究科修了。現在、電気通信大学教授。博士(工学)。ロボティクス・メカトロニクス関連研究、人間の触力覚を用いたインターフェースの研究開発および触覚センシングの研究開発に関する研究に従事。