

触覚におけるオーグメンテッドリアリティの研究(第3報) -SmartSkin: 電気触覚による皮膚感覚の実装-

The SmartSkin: Augmentation of Skin Sensation with Electro-Tactile Display

梶本裕之¹⁾, 稲見昌彦¹⁾, 川上直樹¹⁾, 舘暁¹⁾

Hiroyuki KAJIMOTO, Masahiko INAMI, Naoki KAWAKAMI and Susumu TACHI

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {kaji, minami, kawakami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp)

Abstract: An electro-tactile display system composed of three layers is implemented for augmentation of skin sensation. The first layer has electrodes on the front side of a thin plate, the second has photo sensors on the reverse side of the plate, and the third is a thin film pressure sensor between the other two layers. Visual images captured by the sensor are translated into tactile information, and displayed through electrical stimulation. Thus visual surface information can be perceived through the skin while natural tactile sensation is unhindered. Based on the sensor, the user can “touch” other kinds of surface information as well.

Key Words: Tactile Display, Electrocutaneous Display, Augmented Reality, SmartSkin

1. はじめに

我々は日常生活の中で、五感と呼ばれる感覚群によって周囲の世界を把握している。これらの感覚を生成する個々の感覚受容器は、我々と外界を繋ぐ唯一の窓である。

もしこうした通常を超えた感知能力が我々の身体能力として得られるなら、それは超能力とでも呼ぶべきものであろう。

オーグメンテッドリアリティ (Augmented Reality: 拡張現実感, 以下 AR) は超能力の工学的実装と捉えることが出来る。AR では人工的に生成された情報が実世界に重畳され、既存の感覚チャンネルを介して提示される。情報の多くはセンサによって実世界から得られたものであり、人間は、そのセンサの能力を実質的かつ身体的に獲得する。

1.1. 触覚 AR

ここで触覚におけるARを考える。触覚のARでは実世界を触ると同時に、接触部位のもつ何らかの情報を触覚情報に変換し、重ねて触知可能な状況を作り出す (可触化)。

野嶋らの提案した SmartTool[1][2]は、手そのものに触覚提示装置を装着するのではなく、メスやペン等、手で扱う既存の道具を介して提示する (図 1左)。この道具の接触部近傍にセンサを搭載し、センサから得られた情報を、接触部を作用点とした力覚情報に変換して提示する。この配置によってセンシング位置と提示される触覚の位置を一致させている (空間的不整合の回避)。また指先における触覚の AR を狙った SmartFinger[3][4]は指の爪側にセンサと振動子を装着する (図 1右)。爪側からの駆動力によって、玉突きのように間接的に指腹部と接触対象の間に応力を発生させ、皮膚感覚を提示している。システムを爪側

に搭載することで、現実の触覚を損なわない AR を実現している。センサを感覚提示部のごく近傍に配置して空間的ずれを抑える戦略は SmartTool と同様のものである。

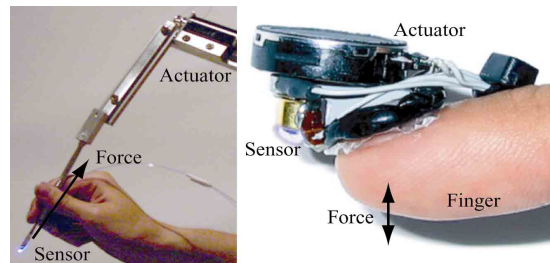


図 1 触覚 AR の例: (左) SmartTool [2]. (右) SmartFinger [4]

本稿では指先皮膚感覚の AR をさらに追求する。

我々が提案するのは、究極的には皮膚そのものにセンサと触覚ディスプレイが搭載された極薄の皮膚感覚 AR システム, SmartSkin である。図 2に本稿における SmartSkin の試作例を示した。接触対象の画像情報 (縞模様) を触覚テクスチャとして電気刺激によって提示している。

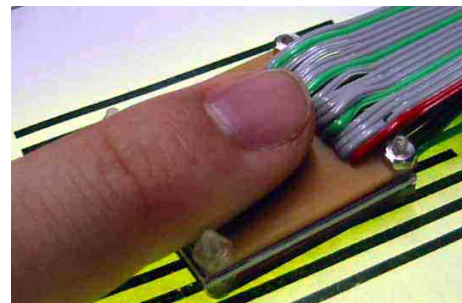


図 2 SmartSkin: 皮膚感覚の AR

2. 電気触覚による皮膚感覚 AR

空間解像度の高い皮膚感覚提示を行うには、どうしても提示装置を指腹側に装着し、装置を挟んで対象と接触しなければならない。このときどのような不都合が生じるだろうか。

まず注目すべきはなぞり動作に伴う触覚、いわゆるずれ感覚である。触覚ARでは現実の物体と接触していることが前提であるため、接触対象とディスプレイの間に摩擦力が生じる。もし提示装置の厚みが大きいと、接触部位と指腹の距離が作用点のずれを生み、指には余計な力モーメントが発生する(図 3)

しかし提示装置が十分に薄ければこの効果は抑えられる。手袋程度の厚みであれば、生起感覚としても手袋をはめた際に生じる程度の違和感に抑えられると考えられる。このため装置の薄さは必須要件となる。

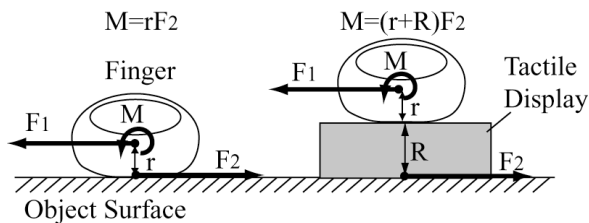


図 3 触覚提示装置の指に生じる力モーメントに対する影響。(左):指で直接なぞる場合。(右):提示装置を介してなぞる場合。F1:指のなぞり力, F2:摩擦力, r:指中心と皮膚表面との距離, R:提示装置の厚み, M:指中心に生じるモーメント。定常状態で $F_1=F_2$ 。

一方で指腹に装着したディスプレイは本来の皮膚感覚を阻害する。しかし皮膚感覚ARを行う状況では本来の皮膚感覚がかえって邪魔となる状況も多いと推測される。また皮膚感覚の提示は装着型デバイスが元来得意とする所であるから、Video See-Through HMDとの類推で、皮膚感覚情報は敢えてセンサで取得し、重畳したい情報と合成した後に提示することも考えられる。

こうした考察から、我々は皮膚感覚提示装置として電気触覚ディスプレイを採用した。電気触覚ディスプレイは感覚提示部の電極を他と切り離せるため、極めて薄く、また柔軟に作ることが可能であるためである。

3. システム構成

本システムは主に三つの要素からなる(図 4)。皮膚と接触し皮膚感覚を提示する電気刺激部、触覚に変換すべき対象の情報を取得するセンサ、そして指の接触圧を計測する力センサである。

センサの例として本稿では光センサを用い、画像情報から触覚情報への変換を行った。この場合考えられる応用例としては、まず視覚障害者に画像情報を提示する手法として提案することができる。現在のところ専用の据え置き型触覚ディスプレイを用いるか、特殊なプリンタにより厚紙

に凹凸をつけて提示しているが、本手法を用いた場合、通常の印刷出力を触覚によって捕らえることが出来ると期待される。また、例えば視覚ディスプレイと組み合わせることで、ディスプレイ表面に(特に位置計測をすることなく)触覚テクスチャを付与することが出来る。

試作システムの厚みは 5[mm]に抑えた。電気刺激部が 1.6[mm]、光センサ部が 2.4[mm]、力センサ部が 0.3[mm]で残りは各層の間を仕切る絶縁用フィルムの厚みである。

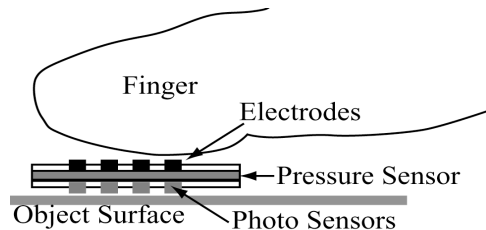


図 4 SmartSkin システム構成。

3.1. 電気刺激部

感覚提示部は直径 1.0[mm]のステンレス製電極を 4x4 マトリクス状に配置した(図 5左)。指の長軸方向は 2.5[mm]ピッチ、短軸方向は 2.0[mm]ピッチである。この電極を介して皮膚に電流制御された電流パルス(約 200[μs], 2.0[mA])を流すことにより皮膚感覚を生成した。

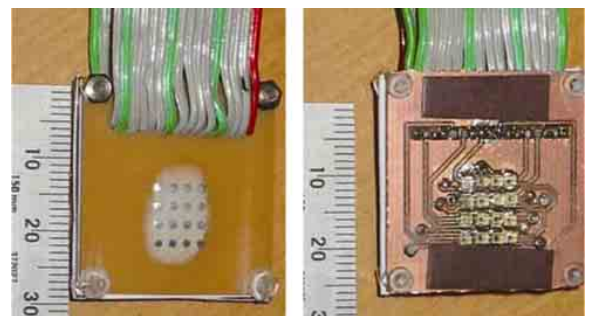


図 5 (左)刺激電極。(右)光センサ。共に 2.5[mm]x2.0[mm]ピッチで 4x4 マトリクス状に配置されている。各刺激電極と光センサは厳密に同一面の表裏に配置されている。

3.2. 光センサ

接触対象の画像情報を取得する光センサとしては、フォトトランジスタ(シャープ社製 PT600T, 1.6[mm]角, 0.8[mm]厚)を用いた。これを厳密に刺激電極の裏側に配置し、各刺激点と計測点の位置ずれを 1.0[mm]以下に抑えた。今回は接触対象としては印刷された紙を用い、光源を組み込まなかったため LED 照明で下から照らした。

図 6は完成後のシステムによって白黒の縞模様をなぞった際のフォトトランジスタの応答である。縞は黒 2.0[mm]、白 6.0[mm]の繰り返しであり、なぞり速度は 110[mm/s]である。この速度は通常の指のなぞり速度よりやや速い。図からフォトトランジスタが正しく応答している様子がわかる。

3.3. フィルム状力センサ

より自然な触覚を提示するためには指の接触圧に応じた刺激を行う必要がある。特に電気刺激の場合、安全性の点でもこれは重要である[5]。その一方で触覚ARの実現のためには前述のようにシステム全体を極力薄くする必要がある。今回はこの要請を満たすためフィルム状力センサ(ニッタ社製 FlexiForce, 0.3[mm]厚)を電極基板とセンサ基板の間にはさみ接触圧を検出した。

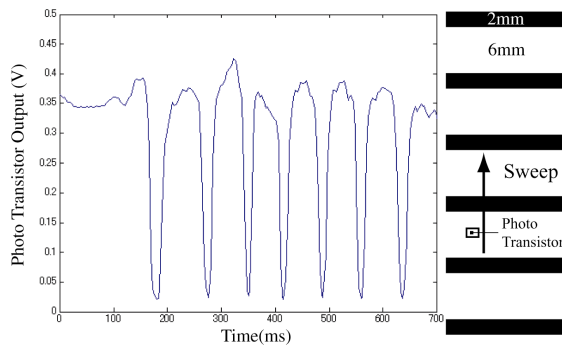


図 6 黒 2[mm]白 6[mm]の縞を 110[mm/s]の速度でなぞった際のフォトトランジスタの応答。

3.4. 時間遅れ

これらのシステムをまとめ、光センサの出力を元に電気刺激を行う。電極間の間隔が最小で 2[mm]であり、我々の予備実験によれば指のなぞり動作の速度は最大で 100[mm/s]程度であるため、ある電極から隣の電極に移動するまでの時間は最小で 20[ms]と計算される。この移動を適切に表現するためには移動にかかる時間より充分高い時間ステップが必要である。我々のシステムでは刺激波形生成用 DA ボード(National Instruments 社製 DAQ6713)の Double-Buffer 機能を用いることにより、センシングから刺激までの時間遅れと刺激の繰返し周期を共に 4[ms]以下に抑えた。

4. 刺激パターンの生成

取得したセンサの時系列情報を、電気刺激の刺激パターンに変換する。変換手法の良否は本来アプリケーションに依存する議論であるが、本稿では生起感覚の「自然」さを求めることとした。換言すれば、指のなぞり速度の変化等に関わらず、そこに触覚を生じる物理的な対象が存在する感覚、存在感に近づく事を目標とした。

その上で、取得した画像の濃淡情報を接触対象の凹凸情報として認識できることを目指した。例えば図 2のように白黒の縞模様をなぞった場合、同じ間隔の凹凸として感じられるというものである。

4.1. 電気刺激における受容器選択刺激

過去の研究において明らかになった指先電気刺激の要点は次のようなものである。中心電極の直径 1.0[mm]、不関(外周)電極の内径 2.0[mm]の同心円電極を用いた場合、

中心電極を陰極、不関電極を陽極とした電流パルス(200[μ s], 2[mA])を与えると、被験者の内観報告として中心電極付近に圧覚を生じる。逆に中心を陽極とした場合には振動感覚を生じる。一方生理学的知見としては、皮膚浅部に存在する 2 種類の機械受容器のうち、Merkel 細胞は皮膚に生じた静的な応力エネルギー、すなわち変位自体にตอบสนองして発火を続けるのに対し、Meissner 小体は変位の時間変化、すなわち微分に対応して発火するとされている[7](図 7)。このことから指先の電気刺激では、陰極刺激では Merkel 細胞、陽極刺激では Meissner 小体に接続された神経軸索が選択的に刺激されていると思われる[6]。

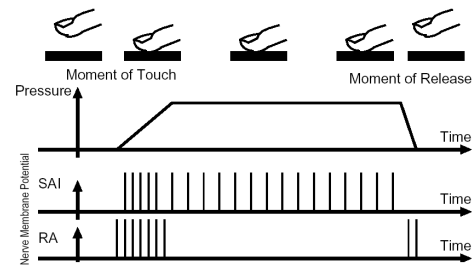


図 7 物体接触時の各受容器の応答. SAI: Merkel 細胞(圧覚), RA: Meissner 小体(振動覚)([7]より再構成)。

4.2. 凹凸から神経発火への変換

我々の方針は、「自然」な感覚を生じさせることであった。これを受容器興奮のレベルに還元するならば、現実には生じるであろう神経興奮の状態を人工的に作るということに他ならない。

前節の電気刺激における知見とあわせると、我々が行うべき変換は次のようになる。まずフォトトランジスタによって対象の明暗(即ち凹凸)を捉える。この明暗そのものに比例したパルス頻度で陰極性パルスで刺激を行い、Merkel 細胞に繋がる軸索を興奮(圧覚を生起)させる。

また明暗の時間微分をとり、これに比例した頻度で陽極性パルスを与えることで Meissner 小体に繋がる軸索を興奮(振動感覚を生起)させる。ただし皮膚には変形の検出特性があり、押される刺激には素早く応答するが離れる刺激には応答し難いため、振動感覚は接触対象が凸に変化したと見なされた場合のみに提示されるものとした。

この刺激法の場合、各電極における刺激はその直下のセンサ情報のみを用いて計算することが出来る。

現実にはある電極を刺激する場合、周囲の電極を電流回収用のグラウンドとして用いるため同時には一点しか刺激しない。また陰極性、陽極性パルス刺激は同時には実現できない事と併せて、時分割走査を行うことになる[6]。圧覚と振動覚の刺激頻度の比率も調整する必要がある。

これらの調整を行った結果、3.0[mm]間隔程度の大きな縞模様に対しては主に圧覚によって凹凸感を生じ、1.0[mm]間隔程度の縞に対しては主に振動覚を生じることで触覚的テクスチャ感を生成することが出来た。

5. 今後の課題

本稿では皮膚感覚のARシステムSmartSkinを提案した。提示部に電気刺激を用い、さらに実世界センサとして光センサを用いることで画像情報を触覚情報に変換するシステムを試作した。

電気触覚ディスプレイはその刺激部を極めて薄く作ることが出来る。この特徴が実世界の触覚をなるべく損なわずに新たな触覚を重畳する触覚ARに生かされている。しかし本来の触覚を損なわないという意味では、理想的には皮膚と接触対象の間に何も存在しないのが望ましい。このため提案したシステムを今後どこまで薄く出来るかというの興味深い問題である。

まず電気触覚提示部は電極さえあればよいため、現状の技術でもフィルム状基板をエッチングすることで0.3[mm]程度のものを作ることが出来る。しかしさらに、導電性インク等で皮膚表面に電極を「印刷」することが出来るならば、事実上電極の厚みは0とすることが出来るであろう。

また本システムの第二の構成要素であるセンサであるが、電極直下に配置する現状の構成ではこれ以上薄くすることは難しい。しかし図8のように指側面に沿ってセンサを配置すればこの問題は解決する。同時に指のなぞり速度をセンサ情報から計算すれば、指下面の状態は蓄えられた過去のセンサ時系列情報から展開可能である。

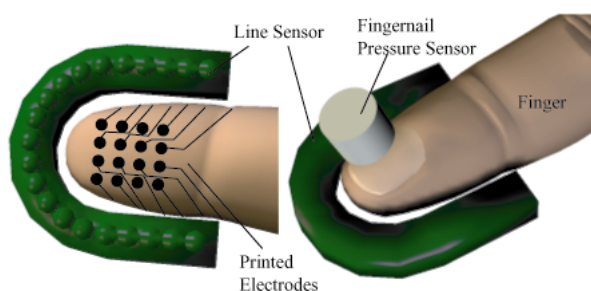


図8 電気触覚を用いたSmartSkinシステム未来図

例えばラインCCDを指を囲うように配置すれば、光学スキャナの要領で画像情報を取得することが出来ると同時に、光学式マウスに使われている時空間相関計算により指の速度を計算することは容易である。もちろんこれは指が連続したなぞり動作を行っており、さらにその動作中に接触対象が変化しないことを前提とした議論である。

第3の構成要素であった接触力センサに関しては現在、爪に搭載した光センサで圧力による血行変化を色変化として捕らえ得ることが明らかとなっており[8]、これを利用することで力センサを爪側に配置することが出来る[4]。

こうして理想的なシステムとして、ほぼ実世界の触覚を損なうことなく触覚ARを実現するものが構成可能と思われる。今後はこれらの構成を実現していく。

謝辞 本研究の一部は文部省科研費補助金(特別研究員奨励費13-06135)によっている。

参考文献

- [1]Takuya Nojima, Dairoku Sekiguchi, Masahiko Inami and Susumu Tachi, "The SmartTool: A system for augmented reality of haptics," in Proc. of the IEEE-VR Conference 2002, pp.67-72, Orlando, Mar 2002.
- [2]野嶋琢也, 関口大陸, 稲見昌彦, 館暲: 触覚におけるオーグメンテッドリアリティの研究(第1報) ~ SmartToolによる実作業支援~, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.485-486, 2002.
- [3]稲見昌彦, 三木健, 野嶋琢也, 前田太郎, 館暲: 触覚におけるオーグメンテッドリアリティの研究(第2報)- 爪装着型触覚重畳提示-, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol.4, No.1, pp.29-32, 2002.
- [4]Hideyuki Ando, Takeshi Miki, Masahiko Inami and Taro Maeda, "The Nail-Mounted Tactile Display for the Behavior Modeling," ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications, p.264, 2002.
- [5]梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暲: 電気触覚ディスプレイにおける能動触, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp.489-490, 2001
- [6]梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館暲: 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, pp.120-128, vol.j84-D-II, no.1, Jan, 2001
- [7]A. B. Vallbo and R. S. Johansson, "Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation," Human Neurobiology, vol.3, pp.3-14 Springer-Verlag 1984.
- [8]三木健, 野村宣邦, 安藤英由樹, 前田太郎: 指の屈曲を検出する爪センサの開発-パラサイトヒューマンの研究第8報-, 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集 pp.147-148, 2001.