摩擦力制御を用いた静電皮膚感覚ディスプレイ†

山本 晃生*・石井 利樹*・樋口 俊郎*

Electrostatic Tactile Display Using Friction Control†

Akio YAMAMOTO*, Toshiki ISHII* and Toshiro HIGUCHI*

A new electrostatic tactile display consisting of parallel electrodes and thin film slider is proposed. The tactile display can present tactile sensations corresponding to surface roughness textures. By exploring the surface of the electrodes with the slider film, subjects can receive distributed shearing force on their fingertip, which results in tactile sensation. The experimental results show that the display can simulate fine surface textures that have regular asperities arranged with intervals of several hundreds of microns. We also report visual-tactile integrated display using transparent electrostatic tactile display. In the integrated display, tactile sensations are presented in synchronization with visual information shown on LCD visual display. Subjects can directly scan the image on the LCD and can feel it on their fingertips.

Key Words: tactile feeling, cutaneous sense, tactile display, touch panel, transparent display

1. はじめに

近年、バーチャルリアリティ技術の発展や、五感情報通信技術への期待の高まりに伴い、皮膚感覚／触覚情報を再現する技術、すなわち皮膚感覚／触覚ディスプレイ技術が注目を集め、さまざまなデバイス開発が進められている^{1)~11)}。皮膚感覚あるいは触覚ディスプレイの主たる目的は、物体に触れた際の手触り感を再現することであるが、手触り感を構成する感覚要素は多種多様であり、あらゆる感覚要素を現実さながらに再現することは、現状の技術では難しい。そのため、現状では多くの場合、一部の感覚要素（たとえば、面粗さ感^{4)~7)}、粘弾性感^{8),9)}、温度感^{10),11)}など）に特化した形でさまざまな装置が開発されている。本研究は、その中でも、物体表面における微細な凹凸テクスチャ感覚、あるいは、面粗さ感覚を再現するディスプレイに関するものである。

本研究では、簡易な構造で、微細なテクスチャ感を表現できる皮膚感覚ディスプレイを開発することを目的とする。皮膚感覚情報の特徴を鑑みると、ディスプレイの構造が簡易であることは、たいへん重要な意味を持つ。皮膚感覚は、その情報量から考えても、単一では主要な情報伝達チャンネルとはなりがたく、多くの場合、ほかの感覚情報、たとえば視覚情報などと合成して提示することにより優れた効果を生む。そのようにほかの感覚と合成して情報提示を行なう場合には、

当然ながら、皮膚感覚ディスプレイは、簡易な構造であることが望まれる。

本研究では、簡易な構造により表面テクスチャ感を提示する方法として、静電気力を用いた方法に注目する。静電気力を用いた皮膚感覚情報提示の手法としては、Strongらによる点字ディスプレイとしての研究例があげられる¹²⁾。Strongらは、マトリクス状電極を直接指でなぞることにより、電極と指との間に働く静電気力を利用して簡単な図形テクスチャを提示する盲人用点字ディスプレイ、Electrotactile Displayを提案している。この装置は、きわめて簡易な構成とすることができる反面、提示する図形の分解能が電極ピッチ（報告されている試作例では2.54mm）と等しく、表面粗さ感などの提示には十分とはいえない。また、電極を指で直接なぞる構成のため、指先の発汗の影響を受けやすく、安定した感覚提示が行なえないという問題点も指摘されている¹³⁾。

これらの点を鑑み、本研究では、新たな構成の静電皮膚感覚ディスプレイを提案する。提案する装置では、フィルム状のスライダを介して電極をなぞることにより、指先の発汗の影響を受けず安定な感覚提示が可能である。また、スライダを導入することで指先変位の正確な測定が可能となるため、その変位に応じて刺激に変調を加えることで、電極ピッチによらず微細なテクスチャの表現が可能となる。

本論文では、考案した装置の基本的な概念と、基礎的な実験結果を報告する。さらに、静電皮膚感覚ディスプレイの利点を活かし、視覚情報を提示する液晶ディスプレイと静電皮膚感覚ディスプレイとを組み合わせた視触覚融合ディスプレイの試作例についても報告する。

† SI2001 講演会 (2001・12), SI2002 講演会 (2002・12) で一部発表

* 東京大学大学院工学系研究科

* School of Engineering, University of Tokyo
(Received April 26, 2004)

(Revised August 23, 2004)

Photo. 1 Electrostatic tactile display

Fig. 1 Schematic of electrostatic tactile display

2. 装置構成と感覚提示原理

2.1 装置構成

本研究で製作した静電皮膚感覚ディスプレイの模式図を Fig. 1 に、外観を Photo. 1 に示す。本装置は 50 本の平行電極を有するステータと、フィルム状のスライダから構成されている。ステータ電極は電極幅 0.8mm、電極長さ 37mm、電極配列ピッチ 1mm であり、フレキシブルプリント回路基板として製作されている。フィルム基材はポリイミドであり、電極材料は銅である。電極表面は、電気的な絶縁のために、厚さ $7.5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムで覆われている。このポリイミドフィルムは、ステータ表面が十分に滑らかとなるよう（電極パターンの凹凸が表面に現れないよう）、高い平面度を有するセラミックスの板を表面に押し当てた状態で接着されている。

Photo. 2 に本装置の操作方法を示す。操作者はスライダ上に指をおき、指とスライダを一体として動かすことにより、ステータ・スライダ間の摩擦力変化をスライダフィルムを通して皮膚表面に受け、粗さ感などの表面テクスチャ感提示を得ることができる。なお、Photo. 1 では、電極パターンが見えるように装置が構成されているが、このように電極が見えている状態で用いた場合、被験者の感じる表面粗さ感が、見た目の電極ピッチに影響される傾向があったため、表面粗さ感の提示実験に際しては、Photo. 2 のように、絶縁用ポリイミドフィルムの裏面に黒色に塗り電極部分を視覚的に遮蔽して用いている。

スライダは、導電性を持たせるため一方の面にアルミニウムを蒸着したポリエステルフィルムであり、アルミニウム膜が、ステータと向き合う面（ステータと擦れ合う面）になるようフィルムを設置している。そのため、ステータとの摩擦によりアルミニウム蒸着膜が剥離しないよう、その表面を

Photo. 2 Electrostatic tactile display under operation.
The subject is exploring the stator surface by moving the slider.

$0.5\mu\text{m}$ 厚程度にウレタン樹脂をコートし保護している。フィルム寸法は、幅 20mm、長さ 30mm、厚さ $9\mu\text{m}$ である。

スライダは、リニアガイドと静電容量式リニアエンコーダ⁷⁾に接続されており、横方向（なぞり方向）の変位を測定できるようになっている。静電容量式リニアエンコーダは、 $600\mu\text{m}$ 周期で出力を発生し、その出力をアナログ的に分割することで、数 μm オーダの分解能を得ることができる⁷⁾。

2.2 感覚提示原理

本装置で想定している感覚提示原理を、Fig. 2 を用いて説明する。ステータ電極に、直流もしくは交流の電圧を印加すると、電圧印加した電極とスライダとの間に静電吸引力が発生する。この状態でスライダを指で動かすと、静電気力を垂直抗力として、各電極への電圧印加パターンに応じた摩擦力分布がスライダ裏面に生ずる。スライダは厚さ $9\mu\text{m}$ と薄く柔軟であるため、この摩擦力はその分布をある程度維持しながら指先へと伝達される。それにより、操作者の指先皮膚は、電圧印加した電極周辺部において剪断力を受け、その部分に突起感等を感じることができる。よって、各電極への印加電圧を制御することにより、さまざまな摩擦力分布を指先皮膚に発生させることができ、それにより、さまざまな表面テクスチャ感を惹起することが可能と考えられる。以上の原理は、指とステータ電極との間にスライダフィルムが介在する点を除けば、Strong⁸⁾らが示した原理と同様である。なお、本研究においては、安全上の観点からスライダ電位を 0V 付近に保てるよう、隣接する 2 本の電極を一組とし、それらに異符号で絶対値の等しい電圧を印加することとしている。

また、Strong⁸⁾らも指摘していることであるが、本ディスプレイにおいては、指先への刺激は指先が動いた際のみ発生する。各電極への印加電圧にかかわらず、指先が動かない場合、被験者は何も指先に感じることはない。この点においては、実際の面をなぞるときと同様の感覚を得ることができる。

さて、上述の構成では明らかに、表現可能な表面テクスチャの空間分解能は電極配置ピッチにより制限される。Photo. 1 に示した装置では、電極配置ピッチが 1mm であるため、1mm 以下の微細なテクスチャ感は表現できないことになる。しかし、現実にはわれわれが面に触れた際には、1mm 以下の周期で凹凸が存在するような微細凹凸面においても、十分に粗さ感を知覚することが可能であることから、さまざまな表面テクスチャを表現するためには、ディスプレイ側の表現分解能

Fig. 2 Basic principle of texture presentation in electrostatic tactile display

も、より細かいものでなくてはならない。

そこで、微細表面テクスチャを表現するために、われわれ人間が、なぞり動作により表面テクスチャ感を得る仕組みについて考察する。人間の指先皮膚表面の2点弁別閾(2mm前後)などを考慮すると、われわれは、皮膚の振動分布を空間的に微細な部分まで捉えているわけではなく、振動分布を空間的にはある程度ラフに捉え、その時間的な変動を知覚することで、微細テクスチャ感を得ていると考えるのが妥当である。そこで、この考察に基づき、本装置では、指先のなぞり動作に対応して印加電圧に変調を加えることで、擬似的に微細なテクスチャ感を表現する。すなわち、スライダが接続されたリニアエンコーダ出力を指先の位置とみなし、その信号を用いて、各電極への印加電圧を変化させる。そのように、なぞり動作に基づいて摩擦振動分布を変化させることで、ある種の錯覚により、リアルな微細テクスチャ感覚を生起できる。この方式は、なぞり動作に基づき摩擦力を変動させるという点で、Naraらによる皮膚感覚ディスプレイ⁶⁾と同様である。

以上をまとめると、本装置では、1mmピッチで配置した各電極への印加電圧を、スライダ位置に応じて細かく変調することで、微細かつ複雑な表面テクスチャ感を再現する。理想的には、50本の電極への印加電圧を独立に制御することで、多様な感覚を惹起できると期待できるが、本論文では、まず、装置の基礎的な特性を明らかにするため、電極接続を大幅に簡略化した。すなわち、50本の電極を交互に2相に接続して、それら2相に、互いに符号が逆転した同波形の電圧を印加することとした。しかし、このような単純な構成においても、なぞり動作に応じて印加電圧に変調を加えることで、微細な面粗さ感を提示できることを実験により示す。

3. 実験

3.1 摩擦力特性

本ディスプレイにおいては、電極への電圧印加により電極・フィルム間に静電気力が発生し、それにより、指先を動かした際の摩擦力が生ずる。従来研究^{12), 13)}においては、この静電気力およびそれに付随する摩擦力は、常に電圧の2乗に比例するものとして扱われてきた。すなわち、電極と指先との

間の絶縁層厚さを d 、印加電圧を V 、接触面積を S 、絶縁層の誘電率を ϵ とすれば、発生する静電気力は $\epsilon SV^2/2d^2$ であるとされている。これが正しいとすると、電極にDC電圧を印加し続けた状態で指でなぞっても、各電極の電圧パターンに対応した刺激を指先に感じられるはずであるが、現実には、DC電圧を電極へ印加し続けた場合、電圧印加直後の数秒の期間しか、刺激を感じ取ることができない。

このことから、発生する静電気力および摩擦力は、単に印加電圧の2乗ではなく、時間とともに減衰する特性を持っていると推測される。そこで、本研究においては、まず構造を単純化した装置を用いて、ステータ電極と、スライダフィルムとの間に働く摩擦力特性を測定した。

測定用装置の概略を Fig. 3 に示す。本装置では、全面に単一の電極を有するプリント基板を固定子とし、その電極に電圧を印加しながら、グランド電位のスライダと相対運動させることで、発生する摩擦力特性を測定した。ステータ電極の表面には、厚さ $7.5\mu\text{m}$ のポリイミドフィルムをエポキシ樹脂により貼り付け絶縁層としている。スライダは、実際のディスプレイ装置に用いているものと同じフィルムを用いているが、フィルムのままでは力測定が困難であるため、底面 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ のアクリルプレートをスライダフィルムで覆い、プレート全体にかかる力を測定した。なお、スライダのステータ表面への密着性を良くするため、アクリルプレートとスライダフィルムの間にはゴム膜を挟み、また、スライダ全体に 20gf の与圧をおもりにより与えた。この状態で、ステータとスライダを 0.5mm/s の速度で相対運動させ、スライダに働く摩擦力をロードセルにより測定した。

まず、極性一定の(負の)パルス電圧を印加した場合の、摩擦力変化を Fig. 4 に示す。電圧印加前に生じている 0.1N 程度の摩擦力は、ステータ・スライダ間の固有の摩擦力である。パルス電圧の発生と同時に、摩擦力も大きく上昇しているが、その後、電圧が一定値を保ち続けている間、摩擦力は減衰していくことがわかる。さらに、同極性のパルスを繰り返し印加すると、発生する摩擦力は徐々に小さくなるのがわかる。Fig. 4 の例では、負のパルス電圧を印加しているが、正のパルス電圧を印加した場合も同様の傾向が観察された。すなわち、本装置においては、一定電圧を印加し続けた場合、時間とともに摩擦力は減少する。また、一定極性のパルス電圧を連続して印加した場合も、パルスごとに摩擦力が減少し、安定に摩擦力を発生することが難しい。

つぎに、正負のパルスを交互に印加した場合の摩擦力変化を Fig. 5 に示す。このように逆極性の電圧を交互に印加した場合、電圧印加中の力の減衰は防げないものの、連続したパルス印加に対して、毎回、同程度の摩擦力が発生できることがわかる(Fig. 5 では、初回のみピークが欠落しているが、これは測定系の問題と推測される)。よって、本研究では、この例のように、正負のパルス電圧を交互に印加することで感覚提示を行なう。

つぎに、Photo. 1 に用いたものと同じステータ電極を用い

Fig. 3 Experimental setup for friction measurement

Fig. 4 Generated friction force for single-polarity pulse waveform

Fig. 5 Generated friction force for alternating pulse waveform

て、同様の測定を行なった。ステータ電極 50 本を 2 相に結線し、互いに逆極性の交番パルス波形を、さまざまな電圧振幅で印加した。測定結果を Fig. 6 上に示す。図中、 V_1 、 V_2 とあるのは、電圧振幅 100V の場合の印加電圧例である。実際のステータ電極を用いた場合も、摩擦力の発生特性は Fig. 5 の測定と同様であることが確認できる。このことから、摩擦力および静電気力の減衰は、電極形状等の要因によるものではないことがわかる。考えられる減衰要因としては、スライダ・ステータ間のいずれかの層で帯電が生じている可能性があげられる。すなわち、たとえば、絶縁層として用いているステータフィルムの表面が、ステータ・スライダ間の摩擦に伴い、印加電圧極性に応じた帯電をし、それが、発生する静電吸引力を弱めていることなどが考えられる。

また、各印加電圧振幅に対するピーク摩擦力をプロットしたものを、Fig. 6 下に示す。これにより、摩擦力のピーク値は、印加電圧のほぼ 2 乗に比例することが確認できる。

3.2 摩擦力分布の伝達特性

本装置の感覚提示原理では、電圧を印加した電極の上部においてのみ指先が剪断力を受けることを想定しているが、実際にはスライダ越しに電極をなぞるため、剪断力分布がフィ

(a) friction force patterns

(b) peak friction vs. voltage amplitude

Fig. 6 Friction force on stator electrodes

ルムで拡散されてしまい、必ずしも、電圧印加電極の上部のみにおいて剪断力を受けるとは限らない。そこで、スライダが介在することの影響を把握するため、特定の電極のみに電圧を印加した際に、どの範囲に刺激が知覚されるかを測定した。測定時のセットアップを Photo. 3 に示す。この実験では、スライダは指に巻き付けて用いており、位置計測用のリニアエンコーダは用いていない。印加電圧は、Fig. 6 に用いたものと同様の交番パルス波形を用い、波形の繰り返し周波数は 125Hz (摩擦力は正負どちらのパルスでも同様に発生するため、力の発生周期は 250Hz)、電圧振幅は $\pm 150V$ とした。

実験では、50 本の電極から任意の連続した複数本の電極を選び電圧を印加した、その際、隣り合う電極には、互いに正負を反転した電圧を印加した。その状態で、スライダを巻き付けた指で被験者にステータをなぞってもらい、どの電極部分に刺激を感じるかを答えてもらった。本実験は、刺激を感じる電極についての回答を求めているため、ステータ表面は電極が見える状態とし、各電極には左から順に番号を振った。回答結果の例を Table 1 に示す。たとえば、Table 1 の第 1 行目の測定においては、17 番から 20 番の電極に対して電圧を印加したのに対し、この被験者は 16 番から 18 番の範囲に刺激を感じている。刺激を感じた範囲は、その中央値と比較すると左に電極 1.5 本分ずれており、刺激を感じた範囲の広さ (電極 3 本分) は、実際に電圧印加した電極本数 (4 本) に比べ、電極 1 本分狭いことがわかる。

これと同様の測定を、計 7 名の男性被験者に対して行なっ

Photo. 3 Experimental setup for measuring friction transfer characteristics

Table 1 An example of answers obtained in experiments measuring friction transfer characteristics

No. of experiment	Activated electrodes	Answered electrodes	Deviation	Diffusion
1	17-20	16-18	-1.5	-1
2	21-26	20-26	-0.5	1
3	5-6	2-7	-1	4
4	40-47	40-48	0.5	1
5	30-35	29-34	-1	0
6	8-11	7-12	0	2
7	29-30	26-31	-1	4
8	36-43	35-44	0	2

Fig. 7 Characteristics in transferring friction distributions from slider to finger

た。得られた結果をまとめたものを Fig. 7 に示す。Fig. 7 上のグラフは、刺激を感じた範囲の中心位置が、電圧印加した範囲の中心位置とどれだけずれているかの分布を示したものである。実際に電圧印加した位置に対して、被験者は左寄りの位置に刺激を感じていることがわかる。装置そのものは左右対称な構成であることから、これはすべての被験者が右手の人差し指で装置を操作したことが影響していると考えられる。Fig. 7 下のグラフは、電圧を印加した電極本数と、被験者が刺激を感じた電極本数との差の分布を示している。実際に電圧印加した電極本数より、平均すると約 1.7 本分広い範囲に刺激を感じているとの結果が得られた。この結果より、本装置においては、実際に電圧を印加した範囲よりやや広い範囲において刺激が知覚されているものの、おおよそ電圧印加した電極の周辺部にのみ、選択的に刺激を発生できることがわかる。

なお、本実験では、電圧を印加した範囲に、ライン状の突起が存在するような感覚（もしくは、被験者によっては溝が

Fig. 8 Waveform modulation according to finger position

Photo. 4 Fine surface samples used in comparison tests

Fig. 9 Intersectional view of surface sample A

Table 2 Characteristics of surface samples

surface	A	B	C	D
peak pitch [μm]	134	263	522	1055
peak height [μm]	24	46	70	120

あるような感覚) が得られた。

3.3 微細テクスチャの表現

つぎに、スライド変位に応じて印加電圧に変調を加えることで、電極ピッチよりも微細なテクスチャの表現が可能であるかどうかを確認する実験を行なった。50 本の電極を交互に 2 相に結線し、Fig. 8 に示す電圧を印加した。この電圧は時間の関数ではなく、スライド変位の関数として定義しており、リニアエンコーダからの出力に基づき電圧を変化させた。よって、実際の周波数はなぞり速度に応じて変化する。パルスのデューティー比は 50% である。

この電圧パターンにおいて波形ピッチ d と、電圧振幅 A の値をさまざまに変化させ、Photo. 4 に示す比較用表面アラサ標準片（日本金属電鍍製）の形削面 4 種となぞり比べた。これらの形削面は、一例を Fig. 9 に示すように、三角形の突起が連続的に並んだ断面形状をしており、各面の突起間距離と突起高さは、Table 2 に示すとおりとなっている。

実験では、電圧振幅 A を 80V~160V までの 20V 刻み 5 種類の電圧のいずれかに固定し、被験者に比較用サンプル面と、本装置とをなぞり比べながら、両者の粗さ感が等価と感ぜられるように、パターン長 d を調整してもらった。なぞり

Fig. 10 Equivalent parameters for surface samples

時の指先の押し付け圧やなぞり速度については特に規定せず被験者に自由に操作させた。10人の男性被験者により、調整を行なったもらった結果をまとめたものが Fig. 10 である。印加電圧 80V の場合の面 D と 160V の面 A に対する等価な感覚は得られなかったが、それ以外の場合では、各面と等価な感覚を与えるパラメータが得られた。このことより、パラメータ調整により、百 μm 程度のピッチで突起が分布する表面サンプルと同程度の粗さ感も表現可能なことがわかる。この結果により、印加電圧をなぞり動作に応じて変調することで、微細なテクスチャ感が表現できることが確認できた。なお、上記の2つの場合を除き、実験に用いたすべての電圧において比較用サンプル面と等価な感覚を与えるパラメータが得られたことは、なぞり時の指先の押し付け圧と関連していると思われる。装置をなぞる際には、押し付け圧を変化させても静電気力による刺激はそれほど大きくは変化しない。一方、実物の比較用サンプル面では、押し付け圧により強度の異なった刺激が得られる。本実験では、指先の押し付け圧を規定しなかったため、被験者が装置と比較用サンプルをなぞり比べる際に、両者の感覚が等価となるよう、各印加電圧ごとに、指の押し付け圧を自然に調整した可能性が考えられる。

4. 視覚情報との融合

本論文で提案する皮膚感覚ディスプレイは、静電気力を利用して感覚提示を行なっている。静電気力は、薄い電極で十分に発生可能なため、本装置は、装置全体を薄型化することが容易である。また、電極材料として透明導電体を用いれば全体を透明化することも可能である。このような点は、本装置を、ほかの情報提示装置と組み合わせる際に、大きな効果を発揮する。前述したように、皮膚感覚あるいは触覚はきわめて重要な感覚であるにもかかわらず、その情報量から考えても主たる情報伝達手段とはなりにくい。多くの場合、視覚情報などと同時に提示され、それを補完する役割を担う。よって、これらを視覚情報を融合して提示することはきわめて重要である。

皮膚感覚や触力覚などを視覚と融合した視触覚融合装置としては、ハプティクスディスプレイにプロジェクタで画像情報を投影する装置^{14), 15)}などが提案されているが、プロジェ

Photo. 5 Photograph of visual-tactile integrated display

クタなどを用いた場合、装置の小型化が難しい。一方、本研究の皮膚感覚ディスプレイでは、きわめて簡易な構成で、視覚情報と皮膚感覚情報の融合が実現可能である。そこで、本章では、提案する静電皮膚感覚ディスプレイの応用例の一つとして、透明皮膚感覚ディスプレイとタッチパネル LCD の組み合わせにより、画面に直接触れて画像のテクスチャ感を知覚可能とする視触覚融合ディスプレイについて述べる。

4.1 装置構成

試作した装置を Photo. 5 に示す。本装置はタッチパネルディスプレイ、その上に貼り付けた透明電極からなるステータ、そして、指に巻きつけられたアルミニウム蒸着フィルム（スライダ）の3つの要素から構成される。操作者はスライダが巻きつけられた指で LCD モニタに表示されている模様や図形などをなぞることにより、その触感を得ることができる。本装置では、指位置の検出に、タッチパネルの位置検出機能を用いている。タッチパネルが平面内2自由度で位置検出可能であるため、本装置では、皮膚感覚提示も平面内2自由度で行なうことができる。

ステータはポリエーテルサルフォンを基材とした ITO 電極上に粘着材付ポリエステルフィルム（厚さ $8\mu\text{m}$ ）を絶縁層として貼り付けたものであり、無色透明である。この ITO 電極は、エッチングにより、電極幅 1.0 mm、電極ピッチ 1.27 mm の平行帯状電極となっている。電極は全部で 95 本形成されており、フラットケーブルを介して最終的には交互に 2 相に結線されている。電極は、Fig. 11 に示すように、画面縦方向に長く、横方向へと配列されている。このステータを抵

Fig. 11 Schematic view of stator electrodes

Photo. 6 Photographs of slider film

抗膜式タッチパネルディスプレイ (Gunze, AV7630FT02) の画面右上部に貼り付けている。なお、本論文で提案している皮膚感覚ディスプレイは、凹凸テクスチャ感を、電極パターンによってではなく、なぞり動作に応じた摩擦力の変動によって表現している。そのため、電極が Fig. 11 のように方向性を持っている場合でも、方向により提示感覚に差異は生ずるものの、指位置検出さえ 2 自由度で行なえれば感覚提示も 2 自由度で行なうことが可能である。

本装置においては、スライダは指に巻き付けて用いる。スライダ材料は、Photo. 1 の装置と同じく、アルミを蒸着したポリエステルフィルム (厚さ $9\mu\text{m}$) である。スライダの外観を Photo. 6 に示す。タッチパネルを確実に動作させるため、タッチパネルと接触する面の中央に直径 1mm の鉛玉を接着固定することでタッチパネルへの接触圧力を高めている。また、これのみでは皮膚表面にも大きな圧力が働き違和感を生じるため、スライダフィルム内側全面に、同様の鉛玉を敷き詰めている。本スライダは、鉛ボールを敷き詰めた面を内側 (指側) となるよう指に装着する。鉛玉は、人の指先 2 点弁別閾よりも細かい 1mm 強の間隔で密に敷き詰められているため、指先に装着した際に、鉛玉の存在はあまり感じられない。なお、本スライダは、Photo. 1 のスライダと比べて複雑な構成となっているため、万一の破損時に操作者が感電しないよう、アルミ蒸着層を導線を介してグランド電位に接続して用いた。

4.2 印加電圧パターンの生成方法

本装置では、ステータが貼り付けられたタッチパネルを指でなぞるとタッチパネルの機能により、パソコン画面のカーソルが、指先位置に沿って動く。そこで、カーソル位置のピクセル情報に応じて PC から静電皮膚感覚ディスプレイへの電圧指令値を発生し、これを増幅してステータの電極

Fig. 12 Relationship between applied voltage and visual texture

Fig. 13 Examples of applications for visual-tactile integration

に印加する構成とした。カーソル位置のピクセル情報と、印加電圧の関係は Fig. 12 のように設定した。基本的には、ピクセルの濃度と電圧値を対応づけており、電圧値は白色ピクセル部で 0V、色のあるピクセル部では、その濃さに比例して $\pm 130\text{V} \sim 250\text{V}$ の間で電圧をリニアに変化させた。また、Fig. 4 に示した静電触覚ディスプレイの特性上、単一極性の電圧を印加し続けることはできないため、白色ピクセルから有色ピクセルへと切り替わるたびに、印加する電圧の極性を入れ替えることとした。

Fig. 13 に作製したアプリケーション画面の例を示す。Fig. 12 に示したとおりの電圧値制御を行ない、これらのアプリケーション画面上をスライダ装着してなぞったところ、模様が細かいほど細かく、また、色が濃いほど強い粗さ感の提示が可能であることが確認できた。たとえば、左側アプリケーションの上段では、それぞれ異なる面粗さの模様をなぞっている感覚を受けることができ、また、下段では色の濃いものほど強い粗さ感の提示を受けることができた。

また、本装置の電極構造は、Fig. 11 に示したとおり、縦長電極を横方向へと配列したものであり方向性を持っているが、タッチパネルが平面 2 自由度で位置検出が可能であることから、触感提示も、平面 2 自由度で行なうことが可能であった。たとえば、Fig. 13 右側の上段画像では、指を横方向へとなぞったときのみに触感が発生し、縦になぞった際には触感が発生しない。逆に、下段画像では、縦方向になぞったときのみ触感が発生する。これらの違いにより、粗さの方向性も認識することが可能であった。

5. ま と め

本論文では、安定性と表現分解能に優れた新しい静電皮膚感覚ディスプレイの原理を提案し、その基礎的な特性を実験により明らかとした。提案したディスプレイは、帯状電極の

ステータと、導電性スライダフィルムから構成され、スライダフィルム越しにステータ表面をなぞることで、さまざまな表面テクスチャ感を感じることができる。

本論文では、まず、静電皮膚感覚ディスプレイにおける力発生特性を明らかにした。従来、静電型ディスプレイでは、印加電圧の2乗に比例した摩擦力が発生するとのみ説明されてきたが、実際には、帯電等の影響により、発生する静電気力および摩擦力が、時間とともに減衰する特性を示すことを測定結果から示した。また、正負のパルスを交互に印加することで、安定した摩擦力が得られることを確認した。

また、本ディスプレイの基礎的な制御方法として、スライダ変位(=指の変位)に応じて、印加電圧に変調をかける手法を提案した。この手法に基づき表現された凹凸テクスチャ感を、実際の粗さ面サンプルの感触と比較したところ、粗さ突起が100 μ m間隔程度で分布する微細な凹凸面と同等の粗さ感が提示できていることが明らかとなった。

皮膚感覚や触覚の情報提示に静電型ディスプレイを用いる利点は、その簡易な構造にある。静電気力は、薄い電極により発生可能であるため、装置の薄型化が容易であるほか、電極を透明導電材料で製作することで、装置を透明化することも可能である。そこで、そのような静電皮膚感覚ディスプレイの利点を活かし、画面に直接触れて触感を得ることのできる視触覚融合ディスプレイを提案した。提案したディスプレイでは、液晶ディスプレイ上に表示した画像に同期して静電皮膚感覚ディスプレイを制御することで、画面に対応した触感が得られることを確認した。

本論文では、ステータ電極群を2相に結線することで、制御方式を単純化して実験を行なった。これに対し、各電極への印加電圧を、おのおの独立に制御することで、より複雑な摩擦力分布が生成され、より多様でリアルな触感が提示可能になるものと期待できる。今後は、そのような方針に基づき、よりリアルな触感生成方法を検討していきたい。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「平成12~16年度産業技術研究助成事業」により行なわれた。

参 考 文 献

- 1) N. Asamura, N. Tomori and H. Shinoda: A Tactile Feeling Display Based on Selective Stimulation to Skin Receptors, Proc. IEEE Virtual Reality Annual International Symposium 98, 36/42 (1998)
- 2) 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, 電子情報通信学会論文誌, **J84-D-II-1**, 120/128 (2001)
- 3) 昆陽, 田所, 高森, 小黒, 徳田: 高分子ゲルアクチュエータを用いた布の手触り感覚を呈示する触感ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **6-4**, 323/328 (2001)
- 4) M. Shinohara, Y. Shimizu and A. Mochizuki: Three-Dimensional Tactile Display for the Blind, IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering, **6-3**, 249/256 (1998)
- 5) Y. Ikei and S. Fukuda: Tactile Display for a Surface Texture Sensation, Proc. DETC '97 ASME Design Engineering Technical Conferences, 1/8 (1997)

- 6) T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando and S. Tachi: Surface Acoustic Wave (SAW) Tactile Display Based on Properties of Mechanoreceptors, Proc. IEEE Virtual Reality 2001, 13/20 (2001)
- 7) A. Yamamoto, T. Ishii, M. Takasaki, H. Yasui and T. Higuchi: Tactile Interface using Ultra-Thin Electrostatic Actuator, Proc. 32nd International Symposium on Robotics, 1170/1174 (2001)
- 8) 藤田, 大森, 片桐: 指先接触面積制御による柔らかさディスプレイの試作, 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, 251/254 (2000)
- 9) 井上, 上杉, 笹間, 新井, 前: 柔軟シートを用いたハプティック・デバイスによる可変コンプライアンスの提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, **8-3**, 295/302 (2003)
- 10) 井野, 泉, 高橋, 伊福部: 物体接触時の皮膚温度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, **30-3**, 345/351 (1994)
- 11) 山本, 橋本, 樋口: 接触面温度予測に基づく材質温度感の提示, 日本バーチャルリアリティ学会第8回大会論文集, 233/236 (2003)
- 12) R. M. Strong and D. E. Troxel: An Electrotactile Display, IEEE Trans. on Man-Machine Systems, **11-1**, 72/79 (1970)
- 13) H. Tang and D. J. Beebe: A Microfabricated Electrostatic Haptic Display for Persons with Visual Impairments, IEEE Trans. on Rehabilitation Engineering, **6-3**, 241/248 (1998)
- 14) Hiroo Iwata, Hiroaki Yano, Fumitaka Nakaizumi and Ryo Kawamura: Project FEELEX: adding haptic surface to graphics, Proc. SIGGRAPH 2001, 469/476 (2001)
- 15) 野間, 柳田, 鉄谷: 二次元リニアモータによるバーチャルデスクトップ用の力覚提示装置の開発, 日本バーチャルリアリティ学会第7回大会論文集, 507/510 (2002)

[著 者 紹 介]

山 本 晃 生 (正会員)

1994年東京大学工学部精密機械工学科卒業, 99年同大学院工学系研究科博士課程修了, 博士(工学). 同年, 東京大学助手. 翌年より同講師. 静電気力のメカトロニクス応用や, 触覚ディスプレイなどの開発に従事。

石 井 利 樹

2003年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 東京大学在学中に, 触覚ディスプレイの研究開発に従事. 現在は, 日立製作所に勤務。

樋 口 俊 郎 (正会員)

1977年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了. 工学博士. 同年より東京大学生産技術研究所講師. 翌年, 助教授. 91年より東京大学工学部(現, 大学院工学系研究科)教授. 92年~97年まで神奈川科学技術アカデミー樋口「極限メカトロニクス」プロジェクトリーダーを兼任. メカトロニクスの研究に幅広く従事。