

Biri-Biri : 指先への電気刺激による 触覚提示を組み合わせた タッチディスプレイ技術

衛藤春菜[†], 的場やすし^{††}, 佐藤俊樹^{††}, 福地健太郎[†],
小池英樹^{††}, 梶本裕之^{††}

我々は、操作者の指先に電気刺激を与える、新しいタッチインタフェース技術を提案する。表面が導電層から成り、圧力検知が可能なタッチインタフェースにより、操作者の指先に低周波の電気刺激を加えることで指先に振動しているかのような触覚や、一時的な衝撃を与えることができる。また、電気刺激の制御を更に細かく行うことで、より様々な触覚提示ができると考えられる。本稿では提案システムの詳細とその上で実現されるインタラクション技術について述べる。

Biri-Biri: A Touch Panel Technique Providing Tactile Feedback by Electrical Stimulation

Haruna Eto[†], Matoba Yasushi^{††}, Sato Toshiki^{††},
Kentaro Fukuchi[†], Koike Hideki^{††}, Kajimoto Hiroyuki^{††}

We present a new touch interface system for enhancing touch interaction with electric-stimulating feedback. The proposed system uses a low-frequency muscle stimulator combined with a pressure-sensitive touch interface and allows the user to feel pseudo-vibration and/or electric shock on his finger without using any additional equipment. We introduce the details of the principles and implementation of the system, and then present some experimental applications to illustrate the design space of the proposed technique.

1. はじめに

近年、タッチディスプレイ向けのインタラクション技術の開発が進展し、またその小型化・低価格化に伴い、スマートフォンやパッド型コンピュータなどの個人向け携帯端末から、公共交通機関の券売機やキオスク端末などに、既に広く採用されている。このタッチディスプレイの利点は、多くの情報を一つのシステムで提示でき、必要に応じて出力内容を切り替えて画面上で入力をさせられることや、利用者に専用のツールを持たせることなく、「指」だけを用いて入力を行えるので、様々な応用ができるという点にある。しかし一方で、タッチパネルの表面は一樣で固く、画面上に表示されているどの部分を押しても、どのような操作をしても同じ触覚を持つため、我々が日常的に触れている者と大きく性質が異なり、表現力に劣る。そのため、タッチディスプレイにさらに触覚提示の仕組みを加える試みが進められている。触覚を提示する研究として、手や指先にアクチュエータを装着したり、侵襲的機器を装着して神経を直接刺激するなど様々なものがあるが、今回我々が採用したのは、非侵襲的機器を用いた電気刺激による触覚提示手法である。同種の手法では TeslaTouch[1]があるが、指先を動かし続けると触覚を得られないという課題があった。そこで我々は電気刺激を指先に与えることで継続的な触覚提示を可能としたシステムを構築した。

今回開発したテーブルトップシステム「Biri-Biri」(図 1)は、FTIR[2]を応用したタッチディスプレイ表面に導電性布を張り、また把持型電極を手持せ、指先に微弱電流を通電させることで、触覚を提示するものであった。この構成により、身体への機器の装着を極力少なくしつつ、タッチに応じた刺激を与えることを可能とした。そして 2011 年 4 月にフランスで行われた展示会「LavalVirtual2011」に提案システムを出展した。

本稿では、「BiriBiri」の技術的詳細について述べるとともに、この展示会で得られた知見について報告する。また、その際に安全性の面から操作する手に電極を握ってもらう必要があり、結果的に不自然な操作を伴うインタラクションに留まった経験を基に今回、電気刺激を提示するポータブル機器として発展させたインタフェースを提案する。これは薄膜抵抗式タッチパネルを導電性メッシュで覆い、片手でインタラクションを行うものである。また、電気刺激の提示方法を新たに検討している。

[†] : 明治大学理工学研究科

^{††} : 電気通信大学情報システム学研究科

[†] : Department of Science and Technology, Meiji University

^{††} : Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

2. 背景

スマートフォンやタブレット型端末、あるいはテーブルトップシステムや壁型ディスプレイによる公共端末などで、タッチディスプレイ式のインタフェースが普及しつつある。専用の機械式インタフェースを提供するのに比べてタッチディスプレイ式のもの、ソフトウェアでインタフェースを自在に構築することが可能なため、広い応用を生み出している。特に近年はマルチタッチ技術[5] [11] が取り入れられるようになり、旧来のものに比べて多彩なインタラクションを可能とするようになり、スマートフォン市場を中心に一気に導入が加速した。

機械式のインタフェースではスイッチやボタン、スライダなどを機械式の部品として提供するところを、タッチディスプレイ式のものでは、GUIとして画面上に対応する部品を配置し、ユーザはディスプレイ上の対応する箇所を指先で触れることで操作する。物理的制約に縛られないという大きな利点がある一方で、画面上のどこに触れても様な感触しか得られず、機械式部品からは自然に得られるような触覚を介した情報を得ることはできない。例えば触って反応する箇所とそうでない箇所の差や、確実に部品に触っているかどうかといった補助感覚がないため、操作感に欠ける・画面に目を向けずに操作することが困難といった問題がある。

こうした問題に対し、物体に触れて動かすことを操作の基本として据えることを主眼としたタンジブルインタフェース[3]や、視覚表現を工夫することで疑似的な触覚を演出する Visual Haptics [10], Pseudo Haptics [4] といった手法が提案されている一方で、次節で紹介するように、何らかの装置により疑似触覚を手や指に与えようという手法が数多く提案されている。それらの多くが、Virtual Reality の分野で多く見られるような、仮想物体とのインタラクションに力覚・触覚を付与することや、前述したようなタッチディスプレイを基本としたインタフェースに「触った」感覚を付与することを目的としている。

3. 関連研究

ディスプレイ表面の素材を工夫する試みとしては、PhotoelasticTouch [8] がある。立体形状を持つ透明弾性体をつまんだり押したりすることによって入力できるインタフェースである。透明弾性体を持つ形や素材の柔らかさという感触をユーザは感じるが、システム側からはそれらの特性を動的に変化させることはできない。

指先へ物理的な力覚提示を行うものでは、SPIDAR[14] は、ユーザの指先にはめられたリングを3本の糸で引っ張ることで、仮想物体から受ける力を力覚提示するデバイスであるが、装置が大がかりになる傾向がある。南澤らは、ユーザの指にベルトを巻き付け、モータでベルトを引っ張ることで、指先に把持力や振動の提示を行う触力



図1 試作システムを使用している様子
Fig. 1 Prototype system in use

覚ディスプレイデバイスを開発した[13]。これにより、ユーザはどんな姿勢でも、触覚の提示を受けることができる。しかし、仮想空間内の壁に触った感覚などを提示しようとする、デバイス位置をコンピュータが追跡しなければならないため、結果的にユーザはカメラに映る範囲内で、コンピュータが認識可能な姿勢をとってからインタラクションを行わなければならない。RePro3D [12] は、両目視差を利用した3D映像に南澤らの触力覚ディスプレイを統合させ、直接3Dに触れるインタラクションを実現させている。

タッチディスプレイへ触覚提示装置を組み込んだものとしては、圧電素子を振動させて触覚の再現を試みた Ambient Touch [7] がある。液晶ディスプレイ内部に素子を組

み込み、ディスプレイを振動させることで指先に触感を与える。TeslaTouch [1] は電気振動を利用し操作画面と指先との間に弱い力による振動を生じさせ、微細な感触を再現するものである。ユーザの身体は接地されていればよく、特殊な装備を必要としない。Poupyrev らは身体を安定して接地させるため、リストバンド型の電極を採用しているが、さらには素足で地面に立っているときなど、人体が接地に近い状態である場合は装着式の電極は必要ないとしている。TeslaTouch は電気振動の特性上、ユーザの指と提示面の間に滑り運動が生じていないと触覚を提示することができず、指を止めている間は触感を提示できない。電気による神経刺激を導入したものとして、梶本らは、視覚において三種類の原色を組み合わせることですべての色を再現できる 3 原色原理のように、触覚においても特定の電流信号を組み合わせることで皮膚下の神経を刺激することによって、あらゆる感触を自在に再現できるとする触原色を提唱し、その原理に基づいた提示装置として触覚ディスプレイ [15] を開発した。

我々は、PhotoelasticTouch にシステム側からの能動的な触覚提示能力を付与することを目的とし、タッチディスプレイの拡張としての触覚提示ディスプレイを目指している。

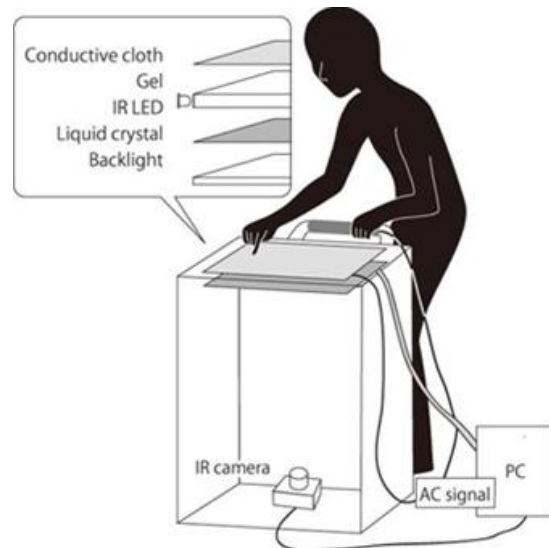


図 2 システム全体の概要
Fig. 2 System overview

4. 技術

図 2 にシステム全体の概要を、図 3 にシステムの触覚提示部分を示す。また図 1 に提案技術に基づいた試作システムの写真を示す。

4.1 認識系

指先位置検出方法としては、近年は透明電極を利用した静電容量式が、マルチタッチを可能とするタッチパネルとして主流になりつつあるが、提案技術は最上層に導電布を設置するためこれを採用できない。そこで指先認識については、FTIR を応用した手法を採用した。指先検出層は、液晶ディスプレイの背面カバーを取り除いたものを 10mm 厚のゲルシートで覆ったものから成り(図 2)、これは出力画面を兼ねる。ゲルシート端の 4 辺を、赤外線 LED で水平に照明しており、赤外光はゲル内部を全反射して進む。ゲルシートを上からユーザが指で押し込むと、ゲルシートが押し下圧で歪んだ部位で光は拡散する。このとき、赤外光はバックライトパネルを透過するため、下に設置された赤外線カメラからユーザの指先位置を認識することができる。光る部位の大きさは押し下圧に応じて変化するため、圧力のおおまかな計測が可能である。同種の手法としては Smith らによる、FTIR 方式の亚克力板の上にシリコンゴムを載せて圧力検出を可能にするもの [9] があるが、我々のものは透明シリコンゲルシートの内部を直接照明する点で異なる。

また、薄膜抵抗式タッチパネルの採用も可能である。4.3.3 で述べるポータブル機器への適用設計(図 5)では、認識系として薄膜抵抗を用いる。

4.2 触感提示系

提案手法は、指先に交流信号を流すことで疑似的な触感を与える。提案システムの操作画面の最上層は導電性布もしくはメッシュで覆われており、電極を握ったユーザが指し手でその布に触れたとき、ユーザの体の一部を介し交流閉回路が結ばれ、操作に使う指の筋肉が刺激される。従って、どちらかの電極との接触が断れると、触覚提示はなくなる。これにより、画面に指が触れている間は触感を提示することができる。TeslaTouch とは異なり、指が画面を押し下したまま静止している間も触感を与え続けることができる。

4.2.1 低周波治療器

最初の試作では、展示会に向けた開発期間短縮のために市販の医療用低周波治療器(オムロン社製、HV-F310)を用いた。使用した低周波治療器は、交流信号を人体に流して筋肉を刺激するもので、幅 $75\mu\text{s}$ のパルスを約 1143Hz の周波数で刺激に用いる。パルスの強さは 80V から 20V の間で 15 段階に調整でき、これを指に通電させると低いレベルでは振動する感覚を、高いレベルでは痛みを与えることができる。この低周波治療器と人体が構成する閉回路にマイクロリレーによる制御を挟むことで回路を流れる電流の大きさを段階的に調整し、痛みや弱い振動の提示を試みた。しか

し7章で述べる展示会では、痛みの刺激を一度受けてしまうと、弱い振動の感覚は鈍ってしまい、多くの人が感じにくかった様子が観察された。また、周波数は一定であるため、強度の違いは付与できても、感触の種類は全て同じである。

4.2.2 パルス周波数の制御

上記の理由から、現在、提案システムの触覚提示系に梶本らの電気触覚ディスプレイ[15]を採用し、コンピュータから信号の周波数と強さの制御を行い、刺激の強さ外で触覚提示の種類を増やすことを試みている。電気触覚ディスプレイは同心円状の多電極による指先の触覚受容器の刺激を想定し、触覚受容器を選択的に発火させることで触覚再現の精度を保証するが、我々の提案システムでは、表面の電界が一樣である点を考慮して実験を行わなければならない。そのため我々は、パルス周波数を制御し、手の平から指先にかけて筋肉を刺激したとき、指先に多様な触覚が出せるかどうかを研究している。この発信器は20mA程度の電流パルスを瞬間的に指先に与え、触覚を提示する。感触を提示するインタフェースの実用性を検討するためには、痛覚が発火しないレベルで数種類の感触を提示する必要がある。

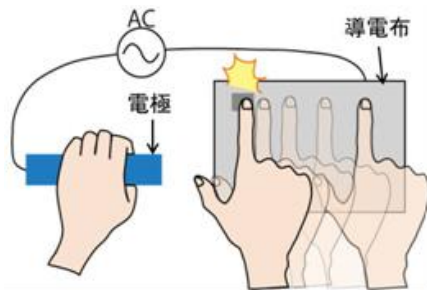


図3 両手用ハンドル型電極
Fig. 3 Handle-type electrode

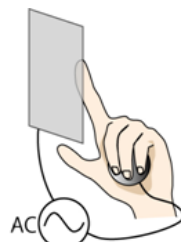


図4 片手用把持電極
Fig. 4 Ball-type electrode

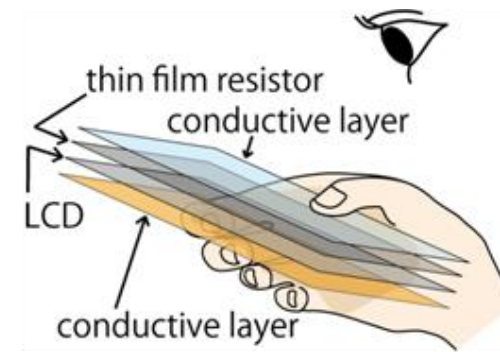


図5 ポータブル機器用電極
Fig. 5 Electrode for portable device

4.3 電極の設計

タッチディスプレイの最上層に敷設した導電布は、細い導電糸で粗く編まれており、更に黒くコーティングされているので、液晶画面の視認性を損なうことはほとんどなく、また十分に柔らかいので、ゲルを押し込む動作の邪魔にならない。ゲルを用いずフラットな面に提案システムを実装する場合は、導電布よりも耐久性のある半透明な金属メッシュでもよい。我々は、操作者が握る電極の形状によって以下の3種類のシステムを提案する。

4.3.1 両手用ハンドル型電極

図3に両手用ハンドル型電極を示す。図1で示したようにユーザは非利き手でハンドルを握り、利き手でパネル操作を行う。ユーザに何も装備させないので体験させやすく、電極を手のひら全体で握るため確実に電極と皮膚を接触させやすく、刺激を安定的に与えられる、という利点を持つ。しかし、交流電流が体の広範囲を通過してしまう。実際には人体には絶縁体である皮下脂肪があるため、電荷が心臓へ向かうことはあまり考えられない。とはいえ、心臓は数 μ Aの通電で機能不全を起こすことが知られており、不特定多数を対象とする場合には、安全性の観点からこの手法はあまり好ましくない可能性がある。

4.3.2 片手用把持電極

上記の懸念を軽減する目的で、今回特に一般展示向けに、電極を指し手側で握る方式(図4)を実装した。

ユーザは、操作する側の手で握りやすい形状をした電極を把持した状態で、タッチディスプレイを操作する。電流の大半は指し手の手の平を流れるため、心臓付近への

影響は避けられる。先行研究[4]にあるようにリストバンドを用いることもできるが、提案手法の場合着脱の必要がないため展示会に向く。また、電気の流れる拘束式機器は心理的抵抗を生みやすいが、提案手法はそれを軽減する目的を持つ。しかし、手にもものを握りつつ指先でタッチパネルを操作する方法は一般的でなく、電極と皮膚との密着を損ねやすい。

4.3.3 ポータブル機器用電極

両手用ハンドル型電極は、ハンドルのアフォーダンスがあるため、操作方法を詳しく説明する必要がないが、安全性の面から現実的でない。また、片手用把持型電極は、安全性の問題は少ないが、特殊な操作方法なので説明に時間を要し、また、当初の非装着型システムの開発という目的に沿わない。そこで、ポータブル機器用電極を設計した(図5)。これはユーザがスマートフォンのように片手で操作することを想定したもので、デバイス裏面と表面がそれぞれ電極になっている。ユーザの手とデバイス裏面は、デバイス本体を支えるために安定的に接触しているので、接触状態の変化による電気提示のばらつきを軽減できると考えられる。また、電気提示のための閉回路が片手で完結しているため、安全であると言える。

5. インタラクション技法

5.1 技術的制約

すでに述べたとおり、低周波治療器を用いた提案システム上では電気刺激を利用して、画面に触れた指先に「弱く振動している」感覚と「一時的に痛い」感覚を伝えることができる。ここで、操作者が画面上の導電布から少しでも手を放すと提示がなくなってしまうという。そのため、従来のタッチパネルで一般的な操作である「タップ」、すなわち表面に指先で触れたのちに素早く離す動作をした場合、電極と指との接触時間が短くなり、触感提示が困難となる。強いレベルの電気刺激においては、瞬間的に痛覚が刺激されれば人は即座に痛いと感じるので、接触時間が短時間でも提示は可能であり、目的は達成される。しかし、弱い振動の提示においては、強い刺激ほど激しくないため、通電し始めてから操作者が提示を認識するまである程度の時間がかかる。このため、弱い振動をユーザに確実に知覚させるためにはアプリケーション側で、画面をしばらく押下させ続けるようなインタラクションをデザインする必要がある。以上の制約に基づいたインタフェースデザインの例を示す。

5.2 ボタンの操作感の向上

メカニカルスイッチを用いたボタンの操作では、ボタンを押した際に指先に返ってくるカチリという触感により、操作が完了したことをユーザは知ることができる。本システムではこの、ボタンを押したときの感覚を、短時間の電氣的振動を指先に与えることで、疑似的に提示できる。

5.3 要注意コマンドの提示

重要度の異なる複数のコマンドに対応する GUI 部品を配置することを考える。このとき、例えばディレクトリ階層を1つ移動するコマンドとファイルの全消去というコマンドがあった場合、後者は不用意に操作されるべきではない。一般的な GUI では、ボタンの押しにくさは表現できないため、確認ダイアログを示す設計がなされる。本システムでは、コマンドの重要度に応じて電気刺激を付加することで、ユーザに触った感じでその重要度を伝えることができる。例えば減多に押しはけないボタンには強めの刺激を割り当て、その刺激に耐えつつ一定時間押し続けないと起動しないようにすることで、不用意な操作を抑止することができる。

5.4 ゲームへの応用

指先へ与える電流の強さを上げると、痛覚が刺激され痛みを感じる。これはゲームなどにおけるペナルティに応用でき、ゲームのシリアス性や恐怖演出を強化することができる。同種の試みは PainStation [6] に見られるが、同システムは操作とは関係なくゲーム台に置かれた手への刺激であるのに対し、提案システムの場合は、画面上の対象物へ手を伸ばす操作に対する反応として刺激が与えられるため、ゲームキャラクターの特性の演出(毒を持つ・トゲがある・電気属性を持つなど)にさらに向くと考えられる。

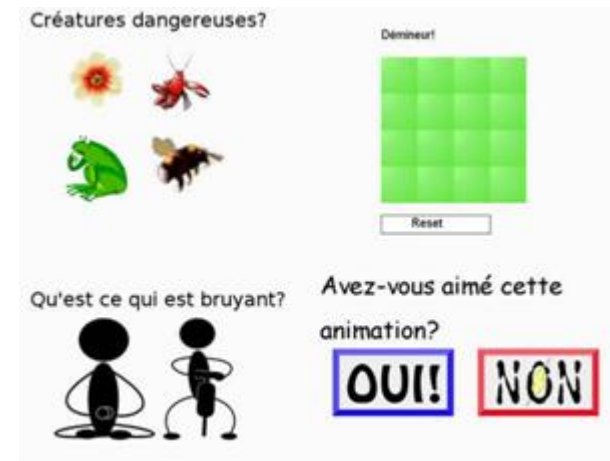


図6 デモアプリケーションの画面
Fig. 6 Snapshot of a demo application

6. アプリケーション

前述のインタフェースデザインに基づき、今回は三種のアプリケーションを開発した。今回はプロトタイプシステムの制約のため、与えられる電気刺激は強・弱の2種類のみとなる。

1 つ目は、危険物と安全物を触覚により提示するためのコンセプトデモ用アプリケーションである(図6)。左上の4つのアイコン群はそれぞれに強弱の電気刺激が割り当てられている。危険動物である蜂やカニに触れると電気刺激を受ける。左下の一組のキャラクタの図では、左側のキャラクタはじっと止まっていて、右側は左右上下に振動するアニメーションとなっている。右のキャラクタに触れると、弱い電気刺激を受ける。これは疑似的な振動刺激として感じられる。

2 つ目は、マインスイーパを提案システム上に実装したもので(図7)、ディスプレイに触れることでタイルをめくることができる。タイルの下に地雷があった場合には指先に強い電気刺激を与える。我々が試しに遊んだ感想としては、普通のマインスイーパに比べゲームのシリアスさが強化されたように感じられた。しかし、タイルめくりはタップ操作の繰り返しになるため、指先が画面に触れている時間はごく短くなる傾向があった。そのため、誤って地雷のあるタイルをめくった場合でも電気刺激が指先に瞬間的にしか与えられず、場合によっては何の刺激も感じずに終わることも多かった。

3 つ目は、前述の知見を元に作成したアプリケーションである(図8)。画面内には8つの花とともに18匹の蜂が動き回っていて、花は押すと消滅し、すべての花を消すとゲームクリアとなる。誤って飛び回る蜂を押さえつけると、押さえつけている間は電気刺激を受ける。マインスイーパと違いゲームキャラクタは常に動き続けており、確実にこれを狙ってタップするべく指先でしっかりと画面を押さえることを促している。これにより、マインスイーパに比べ、蜂に触ったときに確実に刺激を与えられるようになった。

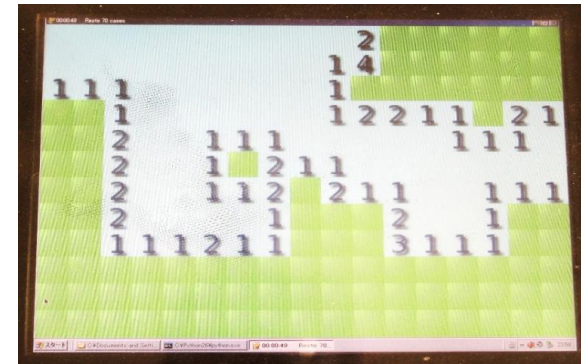


図7 マインスイーパの画面
Fig. 7 Snapshot of Minesweeper



図8 ゲームアプリケーションの画面
Fig. 8 Snapshot of a game application

7. 一般展示報告

我々は、2011年4月にフランス・ラバル市で行われた「Laval Virtual 2011 ReVolution」にて本システムを出展した。Laval Virtualは5日間にわたって行われるイベントで、前半3日間の専門家向け展示と後半2日間の一般公開で構成される。本年度の来場者は専門家約4,300名、一般約9,000名であった。本節では、提案システムを多くの参加者に体験してもらった際に得られた知見について報告する。図4で示した片手用把

持型電極を採用し、また図5で示したポータブル機器用提案システムについては今回展示していない。

7.1 展示概要

図9に、展示の様子を示す。4節で述べたように、本システムを不特定多数の人間に体験してもらうには、安全性を考慮する必要がある。そこで我々は、片手持持型電極を採用し、更に以下のいずれかに該当する来場者には体験を控えてもらった。

- _ 妊娠中
- _ 心臓疾患者
- _ ペースメーカーを使っている者
- _ 6歳未満の子供
- _ 泥酔中の者

システム全体の高さは600mm、幅600mm、奥行き400mmであり、24インチの液晶ディスプレイを埋め込んである。また、システム全体の軽量化のため、透明ゲルシートは5mm厚のものを使用した。我々のブースを訪れた人々は、まず初めに上記の警告を読み、了解してからシステムを体験した。操作側の手に電極を握り、その指で各コンテンツに触れるよう説明した。本システムは5日間で1000人以上に体験された。



図9 LavalVirtual2011で訪問者が提案システムを体験する様子
Fig. 9 Exhibition at Laval Virtual 2011.

7.2 導電布とゲル

連日の展示が続いたために、タッチディスプレイは多数の来場者に触れられ続け、その過程でシステムの耐久性に問題があることがわかった。仮に、一人の体験につき10回程度の操作があったとしても、一日約200人の訪問があったので一日2000回近くゲルシートおよび導電布は操作を受けた勘定となる。この過程でまずゲルが徐々に硬化し、タッチ反応が鈍くなるようになった。そこで来場者はより強い力をディスプレイにかけるようになり、導電布の劣化が進行し、展示2日目には布の導電性が低下するという現象が発生した。特にコンセプトデモアプリケーションの展示中にその影響が顕著で、これは対象アイコンがいつも画面上の同じ場所に位置していたため、導電布の同じ場所が連続して触れられる傾向があったことに起因する。具体的には、導電糸がちぎれたり、脂が染み込むことで導電性が低下するなどの劣化がみられた。蜂のゲームアプリケーションを展示している間は、ユーザの触る位置が毎回異なるため、導電糸がちぎれるほどの部分的劣化は見られなかったものの、ゲーム仕立てのためか来場者が興奮して画面を触ることが多く、布全体がよれたり伸びたりして、でこぼこに浮き上がってしまうようになった。なお、テーブル上から液晶画面を見て操作する範囲においては視認性の著しい低下は見られなかった。

7.3 電気刺激の感覚

年齢による反応の違いが観察された。高齢者は電気刺激を感じにくく、4節で述べた電気刺激のレベルを、他の参加者向け設定の倍程度に設定することでようやく刺激を感じた、と述べる来場者もあった。これは加齢による皮膚の乾燥が表皮の電気抵抗を上げていることが原因と考えられる。反対に子供は電気抵抗が低いと考えられるが、刺激を痛みが忌避するようになる者は少なく、小学生くらいの子供は比較的冷静で、不思議そうに通電を何度も確認する者も多かった一方で、怖がって体験しない子供もいた。

8. 課題

現行の実装では、確実に与えることのできる感触は強弱の2種類であり、更に体験者は痛みを感じた後、弱い振動を感じにくかった。インタフェースの実用性を検討するためには、種々の周波数で、パルスを指先に通電させることで、痛み以外の感触を提示する必要がある。しかし、人によって皮膚のインピーダンスが異なるため、触覚の受容も様々となる。これについては梶本らが即時インピーダンスを計測しながら電流を制御するフィードバック回路を提案しているので、将来的にはこれを適用する。また、電極と指の接触状態が滑りを伴う時とそうでないときにもインピーダンスの大きな変化があると考えられるので、今後は指が滑っているか静止しているかを認識し、それに応じて電流を制御する必要がある。

また、電極のデザインに関しては課題が多い。安全性の面から、両手による操作を防ぐような仕組みを、アプリケーション上でインタラクションとしてデザインするか、導電層を、いくつもの部分に切り分けることにより、接触面の周辺で閉回路が完結するように実装する必要がある。

また、提案手法の有効性を示すための評価実験を実施し、電気刺激による触覚提示をタッチパネルに付与するにあたり、この指針をまとめていく。

9. まとめ

本稿ではタッチディスプレイに電気刺激による触覚提示装置を組み込むための手法を提案した。提案手法に基づいたインタラクションについて例示し、それらを実装したアプリケーションを構築した。また、1000人規模の展示会に出展して得られた知見から、今後の発展の方向性および課題についてまとめた。

参考文献

- [1] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces, Proceedings of UIST '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 283-292 (2010).
- [2] Han, J. Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection, Proceedings of UIST '05, ACM, pp. 115-118 (2005).
- [3] Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, Proceedings of CHI'97, pp. 234-241 (1997).
- [4] Lecuyer, A., Burkhardt, J.-M. and Etienne, L.: Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures, Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems, CHI '04, New York, NY, USA, ACM, pp. 239-246 (2004).
- [5] Lee, S., Buxton, W. and Smith, K. C.: A multi-touch three dimensional touch-sensitive tablet, Proceedings of CHI '85, CHI '85, New York, NY, USA, ACM, pp. 21-25 (1985).
- [6] Morawe, V. and Rei, T.: The Artwork formerly known as PainStation, <http://www.painstation.de/>.
- [7] Poupyrev, I., Maruyama, S. and Rekimoto, J.: Ambient touch: designing tactile interfaces for handheld devices, Proceedings of UIST '02, New York, NY, USA, ACM, pp. 51-60 (2002).
- [8] Sato, T., Mamiya, H., Koike, H. and Fukuchi, K.: Photoelastic Touch: Transparent Rubbery Tangible Interface using an LCD and Photoelasticity, Proceedings of UIST '09, ACM, pp. 43-50 (2009).
- [9] Smith, D., Graham, N., Holman, D. and Borchers, J.: Low-Cost Malleable Surfaces with

Multi-Touch Pressure Sensitivity, Proceedings of TABLETOP'07, IEEE, pp. 205-208 (2007).

[10] Watanabe, K. and Yasumura, M.: VisualHaptics: generating haptic sensation using only visual cues, ACE '08: Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology, New York, NY, USA, ACM, pp. 405-405 (2008).

[11] Westerman, W.: Hand Tracking, Finger Identification and Chordic Manipulation on a Multi-Touch Surface, PhD Thesis, University of Delaware (1999).

[12] Yoshida, T., Shimizu, K., Kurogi, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H. and Tachi, S.: RePro3D: full-parallax 3D display with haptic feedback using retro-reflective projection technology, Proceedings of ISVRI 2011, IEEE, pp. 49-54 (2011).

[13] 南澤孝太, 家室 証, 川上直樹, 舘 暉: 指先装着型触覚ディスプレイを用いた空中における VR 物体の位置と大きさの提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 4, pp. 415-420 (2008).

[14] 佐藤 誠, 平田幸広, 河原田弘: 空間インタフェース装置 SPIDAR の提案, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 74, No. 7, pp. 887-894 (1991).

[15] 梶本裕之: 触覚ディスプレイ, 計測自動制御学会誌, Vol. 47, No. 7 (2008).