

指先への電気刺激により触覚提示を 行う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。提案システムのタッチディスプレイ表面は導電層であり、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感触や、一時的な衝撃を与えることができる。また、画面への押下圧力検知が可能なタッチインタフェースの採用により、電気刺激の強さの制御を行い、ユーザの押下圧に準じて段階的に触感を提示することを可能とした。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。

A Touch Panel Technique Providing Tactile Feedback by Electrical Stimulation

HARUNA ETO,[†] YASUSHI MATOBA,^{††} TOSHIKI SATO,^{††}
KENTARO FUKUCHI,[†] HIDEKI KOIKE^{††} and HIROYUKI KAJIMOTO^{†††}

We present a new touch interface system that enhances touch-based interactions by providing electrical-stimulations as feedback. The proposed system uses a low-frequency muscle stimulator combined with a pressure-sensitive touch interface covered with a conductive surface and generates pseudo-vibrations and/or electric shocks that can be felt directly in the user's finger without the need for any additional equipment. Herein, we describe the principles used to design the system and the system implementation. Further, we 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ている。タッチディスプレイの利点は、必要に応じて出力内容を切り替えることで、同一画面上で多様な入力ができる点と、利用者に専用のツールを持たせることなく指だけで入力できるという点にある。一方で、タッチパネルの表面は一様で固く、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感を持つため、我々が日常的に触れている通常の操作対象とは大きく性質が異なり、

また、操作感をデザインできる自由度が少ない。そのため、タッチディスプレイに触覚提示の仕組みを加える試みが進められている。

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 Tesla Touch²⁾があるが、3節で述べる特性上、指先と画面の間に滑り運動が生じていないと触感を得られないという課題があった。このような受動的な提示に対し、画面に対して指が静止していても触感が提示できる仕組みを能動的な提示と本稿では呼ぶ。この能動的な触覚提示が可能になれば、映像や音の提示とは別の方法でユーザに働きかけるインタラクションが構築できる。そこで我々は電気刺激を指先に与えることで触覚提示を可能とするシステムを試作した。体験の際、ユーザに特殊なデバイスの装着をさせず、また大掛かりな仕組みなしに操作できることを目指した。

提案手法は、操作者に把持型電極 (図 3. Ball-type electrode) を握らせた状態で導電面とタッチ入力をさせ、指先に微弱電流を流し触感を提示するものであ

[†] 明治大学理工学研究科

Department of Science and Technology, Meiji University

^{††} 電気通信大学情報システム学研究科

Graduate School of Information Systems, The University of Electro-Communications

^{†††} 電気通信大学人間コミュニケーション学科

Department of Information and Communication Engineering, The University of Electro-Communications

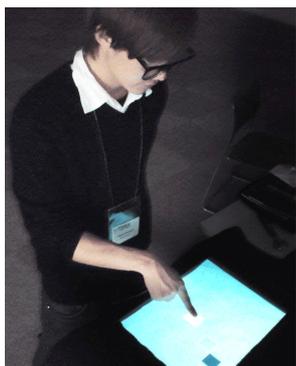


図 1 試作システムを使用している様子

Fig. 1 Prototype system in use

る。把持型電極はリストバンド型電極に比べ、身体への機器の装着および着脱の手間を少なくできる。試作したテーブルトップシステムは、FTIR⁵⁾ で使われるアクリル板上に柔らかい透明ゲルシートを載せ、その上に導電性布を張り付けて導電面とした。本稿では、提案システムについて詳述するとともに、フランス・ラバル市で開催された Virtual Reality に関する展示会「Laval Virtual 2011」に本システムを出展した際に得られた知見を報告する。

2. 背景

タッチディスプレイは、その小型化・低価格化にともない、個人向け携帯端末から公共交通機関の端末まで、既に広く採用されている。機械式インタフェースに比べタッチディスプレイ式のもの、ソフトウェア上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⁸⁾¹³⁾ が取り入れられるようになり、スマートフォン市場を中心に一気に導入が加速した。

タッチディスプレイ式インタフェースでは、機械式インタフェースにおけるスイッチやボタン、スライダなどの機械部品の代わりに、対応する部品をコンピュータグラフィクスによって画面上に自由に配置できるため、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一様な触感しか得られず、確実に部品に触っているかどうかという補助感覚がないため、操作感に欠け、画面に目を向けずに操作することが困難である。

この問題に対し、ユーザが情報を操作する際に重要なのは、実物体に触れた感覚を伴うこととする設計思想をもつタンジブルインタフェース⁶⁾ や、視覚表現を工夫することで疑似的な触感を演出する手法¹²⁾⁷⁾ が提案されている。また、その一方で次節に紹介するように、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。

3. 関連研究

星らは、超音波の放射圧を利用し、発信子から約 200mm 離れた位置に 1.6kgf の力覚を提示する触覚提示装置を開発した¹⁷⁾。これは空気の振動を利用しているためユーザには何の装備も必要ないが、ディスプレイ面のタッチ入力とは組み合わせられない。また、触覚や力覚を提示するために身体に何らかのデバイスを装着するシステムが多く開発されているが¹⁹⁾¹⁴⁾、専用のグローブや指サックなどが必要なため、システム体験時の前後での着脱の手間がある。

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、機械的振動を用いたものでは、福本らの Active Click⁴⁾ や Poupyrev らの Ambient Touch¹⁰⁾ がある。Active Click は、機械式ボタンの「クリック感」をタッチスクリーンに付与する試みで、振動モータで画面全体を振動させることによりタップを行う指先に対して触覚を提示したが、装置が大掛かりであった。これに対し Ambient Touch では piezo 素子を用いた小型振動子を開発し、携帯端末機器において振動による触覚提示の有用性を示している。

特別な機器の装着を必要とせず、かつ機械的振動以外で触覚を提示する試みとしては、Tesla Touch²⁾ が挙げられる。電気振動という現象を利用し、タッチディスプレイに表面の粗さの感覚を擬似的に再現するものである。この手法では、電荷が引き合う力を利用して指先に微小変形をもたらす、摩擦感の変化を再現している。ただし、この微小変形は指を滑らせた際に初めて感じられるため、指と面との間に滑り運動が生じていないときには触覚は提示できない。

Tesla Touch が触覚提示方法として指に微小変形をもたらす手法を用いた一方で、触覚提示に電気による直接神経刺激を採用した手法も提案されている。篠田らは触原色原理¹⁾ を提唱し、視覚における三原色原理のように、触覚においても、皮膚下に混在する感覚受容器の中から特定の種類の触覚受容器を選択的に刺激することであらゆる触感を自在に再現できるとした。この原理を具現化するシステムとして、梶本らは特定の電流信号を組み合わせて皮膚下の神経を刺激する触覚提示装置¹⁶⁾ を開発した。これを指先や額に装着することで、様々なインタラクションを可能にしている。

このように、触覚提示に関する研究は、機械的アプローチと電気的アプローチに大きく分かれるが、タッチディスプレイへの組み込みを考えると、機械的振動はそれ自体の提示する触感の種類が少ないということ

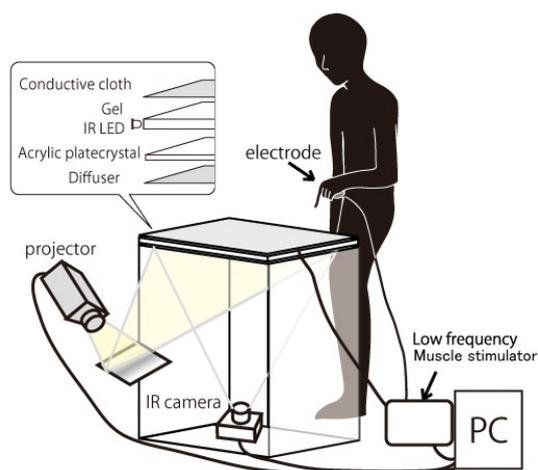


図 2 システム全体の概要
Fig. 2 System overview

や、強い触覚の出力を実現するためには大きな駆動部が必要になり省スペース化が困難であるという欠点を持つ。これに対し、電気刺激の提示では、直接神経を刺激するため、電流の波形を工夫することで振動感覚から痛みまで種々の刺激を表現できる。また、指が触れる触覚駆動部において導電性材料が存在していればよいので省スペースであり、広範囲への応用が期待できる。

そこで我々は、指先を電気刺激することにより能動的に触感提示を可能にするタッチパネルの開発を目指した。人体へ電流を流すことで、コンピュータから人間の筋肉を駆動することを目的とした先行研究は Tamaki らの PossessedHand¹¹⁾ や長嶋らの電気刺激フィードバック装置の開発²⁰⁾ が挙げられる。これに対し我々の提案システムは、指先に感触を与えることを目的としている。

4. 技 術

提案システムは、画面に触れた指に電気刺激を提示することを目的としたものである。図 2 にシステム全体の概要を、図 3 にシステムの電気刺激の概要を示す。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。図 3 に示したように、把持型電極とタッチパネル表面を電極とし、把持型電極を握った掌からタッチパネルに触れた指先間の人体を介して刺激の閉回路(図 4)を構成することで触覚の提示を行う。以下に詳細を示す。

4.1 触感提示系

4.1.1 低周波による刺激

通常、皮膚が外部から刺激を受けると、皮膚下にある触覚受容器がこれを受け、脳へ情報を伝達する。触

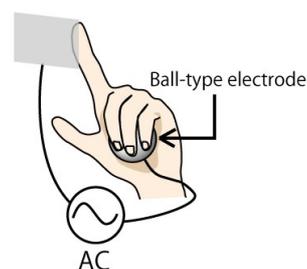


図 3 電気刺激の概要

Fig. 3 How electrical muscle stimulation works.

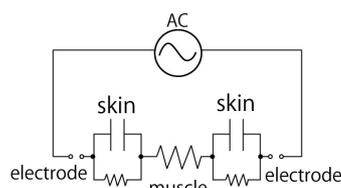


図 4 人体を含む刺激の電気回路概要

Fig. 4 Circuit model of the electrical human body stimulation.

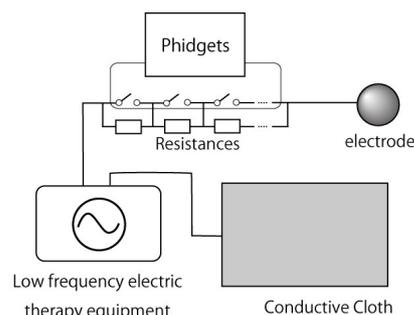


図 5 提案する触覚刺激制御部の概要

Fig. 5 Illustration of the proposed tactile feedback controller.



図 6 導電性布

Fig. 6 Conductive cloth

覚受容器に電流が流れると、脳はこれも触覚刺激として扱う。特に指先には触覚受容器が集中するため、強い電気刺激があるとしびれや痛みになりやすいが²¹⁾、刺激電流の大きさや波形を調節すれば、痛み以外にも独特な感触を起こせる。そこで今回の試作では、指先に流す交流信号源として医療用低周波治療器(オムロン社製, HV-F310)を用いた。この低周波治療器は、交流信号を人体に流して筋肉を刺激し収縮させる目的の

製品で、幅 $75\mu\text{s}$ 、高さ約 75V のパルスを約 1143Hz の周波数で発振する。本来は専用のパッド型電極を皮膚の任意の箇所貼り付けて使用する。肩や背中など、大きな筋肉のある箇所にこのパルスを通電させると、トントンと叩かれるような筋肉の収縮運動を引き起こす。掌に通電させると指の筋肉の他に、触覚受容器にも通電し、感触を提示できる。

この時、人体と低周波治療器を介して作られる刺激の閉回路の概略を図 4 に示す。電極と皮膚の接触により、乾燥した表皮や接触面のわずかな隙間が絶縁体となり、コンデンサを構成する。

4.1.2 掌への通電の仕組みと方法

提案システムでは治療器のパッド型電極を後述する導電性の布と把持用の電極に換え、図 3 のように掌から指にかけて通電させる。刺激の強さは治療器側で調整でき、低いレベルでは指に叩かれ振動しているような感覚を、高いレベルでは「しびれ」「痛み」の感覚を与えることができる。また、研究室内で数名に試験したところ、高いレベルの刺激では筋肉が突然激しく動くことで、「痛み」だと思って「驚き」反射的に電極から手を放すが、後で考えると大した痛みではなかった」と述べた体験者が多かった。

提案システムでは低周波治療器の出力電圧を最大に設定して刺激パルス発生源とし、図 5 に示すように、Phidgets コントローラで 30k 、 20k 、 10k 、 5k 、 2k 計 5 種類の抵抗の組み合わせを任意に選べるように構成した。コンピュータ側で任意の抵抗値を選択し刺激の強さを制御することで、刺激ゼロから弱い振動を経て痛みまでの感覚を 20 段階で提示できる。

4.1.3 導電性布

提案システムの操作画面最上層は導電性布 (図 6、セーレン社製、Su-4G-9027) で覆われており、電極を握ったユーザの指が画面に触れている間は触感を提示することができる。このため Tesla Touch とは異なり、指が画面を押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。使用した布は、直径 $29\mu\text{m}$ の細い繊維が 1 インチにつき 90 本編まれたもので、光の透過率が高く、また黒色で目立たないため、画面上に貼り付けても、視認性の低下はほぼ見られない。また、提案システムの表示画面には柔らかいゲルシートを用いており、タッチ位置検出のためにユーザにこれを押し込ませ変形させる必要があるが、この布は十分に柔らかいので、最上面に貼り付けても操作の邪魔にならない。タッチ位置検出については 4.3 節で述べる。

4.2 電極の実装

我々は、2 種類の電極を検討した。



図 7 両手用ハンドル型電極

Fig. 7 Handle-type electrode for bi-manual manipulation.

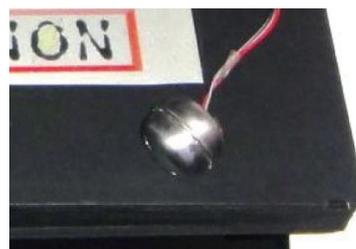


図 8 片手用把持電極

Fig. 8 Ball-type electrode for single-handed manipulation.

4.2.1 両手用ハンドル型電極

図 7 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。ユーザに何も装着させないのでシステムを体験させやすい。さらに、体験者がハンドル型電極を片手でしっかりと握り、もう片方の手でタッチパネルに触れた場合、ハンドル型電極を握る手には刺激を感じず、タッチパネルに触れた指先のみ刺激を感じることができる。このため、体験者はタッチパネル表面から刺激を受けたと認識することができる。

しかしこの手法では、電流が心臓のある体幹部を通過するため安全性に懸念がある。また、ハンドル型電極を持つ手の握り方が弱く接触面積が小さい場合は、ハンドルを持つ手にも刺激を感じてしまう。

4.2.2 片手用把持電極

上述した人体への安全性の観点から、掌の中に握りやすい電極を開発し、指し手側で握る方式 (図 3 図 8) を実装した。ユーザは電極を操作する側の掌の中に持ち、これを把持した状態で、タッチディスプレイを操作する。電流の大半は指し手側の指先と掌の間を流れるため、心臓付近への影響は避けられる。TeslaTouch²⁾ のようにリストバンドを用いることもできるが、本提案に比べて着脱の必要があり操作が煩雑になってしまう。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、提案手法はそうした抵抗感を軽減できる。ただし、手に物を握りながらタッチパネルを指先で操作する行為は、日常的に類似の操作を行うことが少ないため、操作に慣れるまでの間は電極と皮膚との間に

隙間ができ、良好に動作しない可能性があることに留意しなければならない。

4.3 認識系

指先位置検出方法としては、近年マルチタッチを可能とするタッチパネルとして静電容量式を採用したものが主流になりつつあるが、提案技術は最上層に導電性布を設置するため本提案には採用できない。そこで指先認識については、FTIR⁵⁾を応用した手法を採用した。指先検出層は、映像投影のための光拡散体の役割を果たす白い紙を張り付けた透明アクリル板を10mm厚の透明ゲルシート(硬度:ASKER C 15)で覆ったものから成る(図2)。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、ゲルシートが押下圧で凹んだ部位で光は拡散する。このとき、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。図9に、指で操作面を押している様子と対応する赤外線カメラ映像を示す。強く押すことで、観測される反射光の大きさが広がっていることがわかる。反射光の円の大きさは押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。同種の入力方法としては、Smithらによる、FTIRのアクリル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³⁾があるが、本提案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。また坂本らは、我々と同じ方法を用い、指以外のスタイラス等による接触の検出も可能なタッチパネルを提案している¹⁸⁾。

なお、ゲルシートに対するタッチはある程度以上の押下圧が加わらなければ検出できず、指が軽く触れるような、圧力をほとんど伴わないタッチは検出できない。

5. インタラクション技法

5.1 技術的制約

4章で述べたとおり、提案システムは、指先に振動感覚の強弱、痛みなどを提示することができる。振動感覚はタッチパネル操作感向上のために汎用的に活用でき、また、痛みを伴う提示は特にエンターテインメント分野に応用できると考えている。

提案システムはTeslaTouchと異なり、能動的にユーザに触感提示できると述べたが、ユーザにとって予期せぬ強い電気刺激があると、体験者は恐怖感を覚えることがわかっている。恐怖感を与えないためには、ユーザがパネルに触った際に突然強い電気刺激を受けることのないよう、高いレベルの刺激を最初から提示

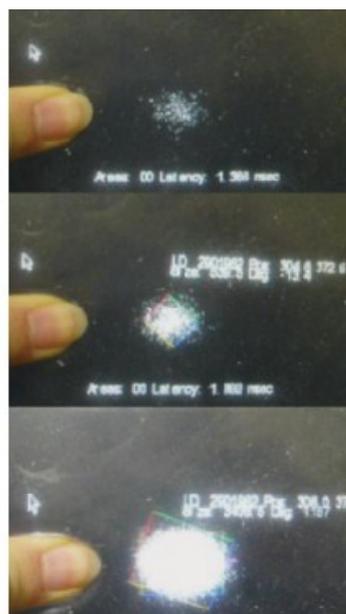


図9 指で操作面を押している様子と対応する赤外線カメラ映像を二値化したもの

Fig. 9 A finger presses down the input surface. Binarized images from the IR camera are shown aside.

することは避け、ユーザの指による押下圧に応じて段階的に提示のレベルを上げていくような実装を行った。これにより恐怖感をなくし、実用的な触覚提示インタフェースを目指すことができると考えている。

また、本システムでは操作者が画面上の導電布から少しでも手を放すと触感の提示はなくなる。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。我々が数名に試験した結果、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ると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。しかし弱いレベルの提示においては、通電し始めてから操作者がその提示を「振動の様である」と認識するまで数秒の時間を要することがわかった。このため、弱いレベルの提示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 提案手法

5.2.1 ボタンへの操作感の付与

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



図 10 コンセプトデモ用アプリケーションの画面
Fig. 10 Snapshot of a demo application

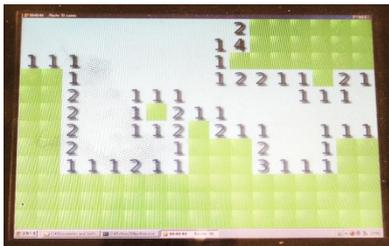


図 11 マインスイーパの画面
Fig. 11 Snapshot of “Minesweeper”



図 12 ゲームアプリケーションの画面
Fig. 12 Snapshot of a game application

きる．一般的に，タッチパネルに表示されるボタン画像には，このような触覚情報を想起させるようなボタンが押下するアニメーションや，システムが入力を受け取ったことを示す何らかの映像アクションが付与されていることが多い．一方，本システムでは，ボタンを押したときに期待される触覚感を，短時間の電氣的振動を指先に与えることで，タッチパネル上のボタンに疑似的に触覚提示できる．しかし，機器の操作感が良いか悪いかという評価は簡単ではない．どのような感覚がどの程度人々に受け入れられ，習慣化しているかが重要となってくるため，提案手法を様々な機器操作に適用できる状態にした上で，長期的な調査をする必要がある．

5.2.2 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，前者に比べて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，ほとんどの場合，ボタンに触れることはすなわち ON/OFF の 2 値を選択することであり，押しにくさなど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，押下圧が大きくなるにつれて刺激量が増加するように設計し，ある押下圧を超えた時にコマンドが実行されるよう設定することで，ON/OFF に至るまでの過程をユーザに表現できる．例えば誤って押しはいけないボタンに電気刺激を割り当て，刺激があることを認識した上で更に押し込ま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．

5.2.3 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．同種の試みを行った PainStation⁹⁾ では，ゲーム台に置かれた手に対して痛みの刺激を与えるが，ユーザの操作に細かく対応したフィードバックは実現されていない．一方，提案システムの場合は，画面上に表示されたオブジェクトに触れたとき，直接触れた手へ刺激が与えることができる．

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 3 種のアプリケーションを開発した．

1 つ目のアプリケーションは，危険物と安全物を触覚により提示するための映像表示であり，本システムのコンセプトを理解させるためのデモ用として作成したものである（図 10）．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により指先に痛みを感じる．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，右側は上下左右に動き回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，あたかもキャラクタの動きが指先に伝わっているように感じられる．

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 11），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．我々が試行した結果，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．

3 つ目は，弱い電気刺激による振動の感覚を提示するには一定時間押下している必要があるという前述の知見を反映させたアプリケーションである（図 12）．

画面内には 8 つの花と 18 匹の蜂がランダムに動き回っていて、それらは指で押すと動きが止まる。花を 2 秒間押し続けると消滅し、画面上のすべての花を消すとゲームクリアとなる。飛び回る蜂を押さえつけると、押さえている間、弱い電気刺激を受け、指先に弱い振動を感じる。これは蜂が押さえつけられて指の下でもがいている状態を表している。蜂が花の上に乗っている状態で花を取ろうと画面に触れると、強い電気刺激を提示する。これは蜂が「怒って攻撃する」という意味をもつ。マインスイーパと違いゲームキャラクターは常に動き続けており、この動きを抑えるには指先でしっかりと画面を押さえることを促している。そのため、このようなインタラクション設計であれば、キャラクターを捕えるのに数秒の押下が必要であることを違和感なく提示でき、同時に刺激の提示も確実になる。

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 Virtual2011 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。本節では、提案システムを体験した多くの参加者から得られた知見について報告する。

7.1 展示概要

4.2.1 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、図 8 に示した片手持持型電極を採用し、更に以下の 5 項目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。

(1) 妊娠中 (2) 心臓疾患患者 (3) ペースメーカーを使っている者 (4) 6 歳未満の子供 (5) 泥酔中の者

我々のブースを訪れた人々は、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。体験者には、事前に「操作側の手に把持型電極を握り、同じ手の指で画面上の各コンテンツに触れる」よう説明を行った。本システムは 5 日間で 1000 人以上に体験された。

7.2 電気刺激の感覚

6 章で述べたゲームアプリケーションの展示に接し、強い電気刺激を受けた一部の体験者は、明らかに蜂のキャラクターに触れることを怖がるようになった。このことから電気刺激を用いて、タッチパネルに表示されたオブジェクトから触感を得たと体験者に認識させることが可能であるということが確認された。

また、高齢者は電気刺激を感じにくかった。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



図 13 提案システムを体験する Laval Virtual 参加者
Fig.13 Proposed system in use at Laval Virtual

ことが原因と考えられる。

7.3 導電性布の耐久性

連日の展示で本システムのゲルシート及び導電性布は、一日あたり 2000 回近くの操作を受けたことになる。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。

この過程で布の劣化が進行し、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。特にキャラクターの位置が変化しない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あった。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、導電性布の同じ場所が連続して押される傾向があり、そのために導電率がちぎれたり、脂が染み込むことで導電性が低下するなどの劣化があったことが主な要因である。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、導電率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、導電性布が部分的に伸びてしまいゲルシートからでこぼこに浮き上がってしまうようになった。なお、導電性布は透光性が高いためテーブル上から液晶画面を見て操作する範囲において視認性の著しい低下は見られなかった。

8. 課題

我々の現行の実装では、タッチ画面の押下圧に応じた電気刺激を実現することで、体験者が予期せぬ強い刺激を受けることを防止することが出来た。しかし電気刺激に対する感受性は個人差があり、また人体の表面抵抗、内部抵抗にも個人差があるため、提示した電気刺激の感じ方も人により異なる。従来から、電気刺激の提示が強すぎて痛い、もしくは提示が弱すぎてわからないなどの問題を解決するために、皮膚のインピーダンスを測定し、それに応じた刺激強さを提示する方法が提案されている¹⁵⁾。この手法を用いれば皮膚のインピーダンス測定に基づくフィードバック回路が

構成できると考えている．また，今回用いた低周波治療器は電圧を基準に制御しているが，電気刺激の安定のためには電流制御が一般的である．今後は，本システムに電圧制御の機器を組み込んだ場合と，電流制御の機器を組み込んだ場合のユーザの体験の違いについて知見を集めたい．

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感提示装置を組み込むための手法を提案した．電極のデザインとして，両手用のものと片手用のものを提案し，それらの特徴について述べた．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．提案した試作システムを一般向け展示会に出展し，得られた知見から，システムの耐久性についての問題点，また一般来場者の反応について報告した．最後に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) Asamura, N., Yokoyama, N. and Shinoda, H.: Selectively Stimulating Skin Receptors for Tactile Display, *IEEE Computer Graphics and Applications Vol.18*, pp.32–37 (1998).
- 2) Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A. and Harrison, C.: Tesla Touch:electrovibration for touch surfaces, *Proceedings of UIST '10*, pp.283–292 (2010).
- 3) D., S., Graham, N., Holman, D. and Borchers, J.: Low-Cost Malleable Surfaces with Multi-Touch Pressure Sensitivity, *Proceedings of TABLETOP '07*, pp.205–208 (2007).
- 4) Fukumoto, M. and Sugimura, T.: Active click: tactile feedback for touch panels, *CHI '01 extended abstracts on Human factors in computing systems*, pp.121–122 (2001).
- 5) Han, J. Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection, *Proceedings of UIST '05*, pp.115–118 (2005).
- 6) Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms, *Proceedings of CHI '97*, pp.234–241 (1997).
- 7) Lécuyer, A., Burkhardt, J.-M. and Etienne, L.: Feeling bumps and holes without a haptic interface: the perception of pseudo-haptic textures, *Proceedings of CHI '04*, pp.239–246 (2004).
- 8) Lee, S., Buxton, W. and Smith, K.C.: A multi-touch three dimensional touch-sensitive tablet, *Proceedings of CHI '85*, pp.21–25 (1985).
- 9) Morawe, V. and Reiff, T.: The Artwork formerly known as PainStation, <http://www.painstation.de/>.
- 10) Poupyrev, I., Maruyama, S. and Rekimoto, J.: Ambient touch: designing tactile interfaces for handheld devices, *Proceedings of UIST '02*, pp.51–60 (2002).
- 11) Tamaki, E., Miyaki, T. and Rekimoto, J.: PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, *Proceedings of CHI '11*, pp.543–552 (2011).
- 12) 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*, pp.405–405 (2008).
- 13) Westerman, W.: Hand Tracking, Finger Identification and Chordic Manipulation on a Multi-Touch Surface, *PhD Thesis, University of Delaware* (1999).
- 14) Yoshida, T., Shimizu, K., Kurogi, T., Kamuro, S., Minamizawa, K., Nii, H. and Tachi, S.: Re-Pro3D: full-parallax 3D display with haptic feedback using retro-reflective projection technology, *Proceedings of ISVRI 2011, IEEE*, pp.49–54 (2011).
- 15) 梶本裕之：皮膚インピーダンス情報のリアルタイムフィードバックを可能とする電気触覚ディスプレイ，第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (2009)．
- 16) 梶本裕之，菅野米藏，館すずむ：日常的装具としての電気触覚ディスプレイ，計測自動制御学会誌，Vol.47 No.7 (2008)．
- 17) 星 貴之，岩本貴之，篠田裕之：空中超音波振動子アレイによる触覚提示，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，pp.No.1Aa–A14 (2009)．
- 18) 坂本侑一郎，吉川拓人，大江龍人，堀 竜慈，村田雄一，志築文太郎，田中二郎：赤外線 LED 埋め込みシリコンゴムを用いたタッチパネル，インタラクション 2011 論文集，pp.715–718 (2011)．
- 19) 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)．
- 20) 長嶋洋一，赤松正行，照岡正樹：電気刺激フィードバック装置の開発と音楽パフォーマンスへの応用，情報処理学会研究報告 Vol.2002, No.40 (MUS-45)，pp.27–32 (2002)．
- 21) 内川恵二：講座 感覚・知覚の科学 3 聴覚・触覚・前庭感覚，朝倉書店 (2008)．