

手部への電気刺激を用いた タッチインタフェースのための触力覚提示手法の検討

宇戸 和樹[†] 岡崎 龍太[‡]
佐藤 未知^{‡, ††} 福嶋 政期^{‡, ††} 梶本 裕之^{‡, ††}

近年、タッチパネルにおける指先への触力覚提示方法として、タッチパネルとの間の静電気力によるテクスチャ感や凹凸感の提示、タッチパネルに搭載したモータによる凹凸感の再現などが試みられている。しかしこれらはタッチパネルに触覚提示機構を内蔵するため、マルチタッチを想定したときに触覚提示機構が複雑になることが考えられる。そこで本研究は手部に電気刺激を与えることで、各指に力覚と皮膚感覚を生起させ、擬似的な凹凸面を知覚させることを目指す。本手法によりタッチパネルはもちろんプロジェクタで投影された壁面や机面などへの、提示面を限定しない汎用性を持った触力覚提示が可能であると考えられる。

Haptic Feedback to Fingertips for Touch Interfaces by Using Electrical Stimulation to the Hand

KAZUKI UDO[†] RYUTA OKAZAKI[‡]
MICHI SATO^{‡, ††} SHOGO FUKUSHIMA^{‡, ††} HIROYUKI KAJIMOTO^{‡, ††}

To present geometric relief sensation on a touch screen, there have been many proposals that add haptic stimulation to a fingertip. However these methods have difficulty in presenting haptic sensations to multiple fingertips independently, because it requires embedded haptic device on the screen. Therefore we propose a new way to represent geometric relief sensation to each fingertip by using electrical stimulation to sensory and motor nerves inside the hand. Since our method require no mechanical haptic device on the touch screen, our method can add geometric relief sensation to a wide variety of touch interfaces such as smart-phones and tangle display on the wall.

1. はじめに

近年のスマートフォンやタブレット PC などのタッチインタフェースの普及により指で画面を直接操作する機会は劇的に増えている。これに伴い、視覚障害者の補助を目的とした触覚的な手掛かりの再現、押す・撫でるなどのタッチ操作を行う際の触覚の再現など指先への触力覚（＝皮膚感覚＋力覚）フィードバックの必要性が明らかになった。

特に凹凸感、タッチスクリーン上のボタンクリックなど、入力操作に直結する触知覚であるため、盛んに研究が行われている。

そこで本研究では、手部に電極を貼付し電気刺激を

行うことにより、タッチインタフェースにおいて擬似凹凸面を再現する手法を提案する(図1)。

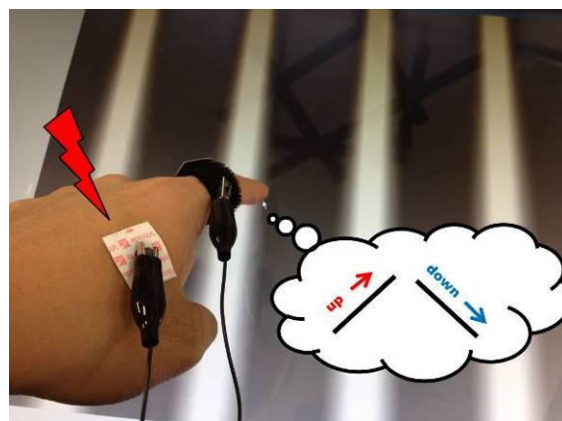


図1 タッチパネルに対する触力覚提示

人が凹凸形状を知覚する際には、指の凹凸面に対し上下方向の位置感覚よりも、凹凸面からの反力が優位に立つことが知られている¹⁾。また、指で凹凸面をなぞると、凹凸面に接する指腹の部位が変化する。この接触面の変化によっても、人は凹凸面を知覚する

[†] 電気通信大学 人間コミュニケーション学科

University of Electro Communication

[‡] 電気通信大学 総合情報学科/専攻

University of Electro Communication

^{††} 日本学術振興会特別研究員

Japan society for the Promotion of Science

^{‡‡} 科学技術振興機構さきがけ

Japan Science and Technology Agency

ことが知られている²⁾。つまり、人は指にかかる力と皮膚感覚の変化で凹凸形状を知覚していると言える。

タッチパネルにおいて指先に皮膚感覚をフィードバックする先行研究の一例として Bau らの Tesla Touch³⁾が挙げられる。これは、ディスプレイと指先との間に静電気力を生じさせ、画面上を指でなぞる際の動摩擦力を変化させることにより、テクスチャ感や凹凸感などを表現するものである。

これに対して、タッチパネルにおいて指先へ力覚をフィードバックする研究の一例としては、嵯峨らによる 2.5 次元触覚ディスプレイ⁴⁾が挙げられる。これは、タッチパネル前面に搭載した力覚提示装置 SPIDER により生み出される「せん断力」を用いて、凹凸感を提示するというものである。

これらの手法では皮膚感覚もしくは力覚を用いて擬似凹凸を提示しているのに対して、我々は力覚と皮膚感覚の両方を生起させることで、より自然な擬似凹凸面が提示できるのではないかと考えた(図2)。

本手法は、機能的電気刺激により実際の凹凸面をなぞる際に指先に掛かる力、また感覚神経への電気刺激で実際の凹凸面に触れた際の皮膚感覚を再現し、これら双方を用いて擬似的な凹凸を表現するものである。電気刺激を加える筋肉と感覚神経は手部に存在するため、将来的に指ぬきグローブのような形態での提供が可能であると考えられ、タッチパネルに触覚提示機構を内蔵する必要がないため、壁面から携帯端末に至るまで、あらゆるタッチインタフェースにおいて簡便に触覚を提示できると考えられる。

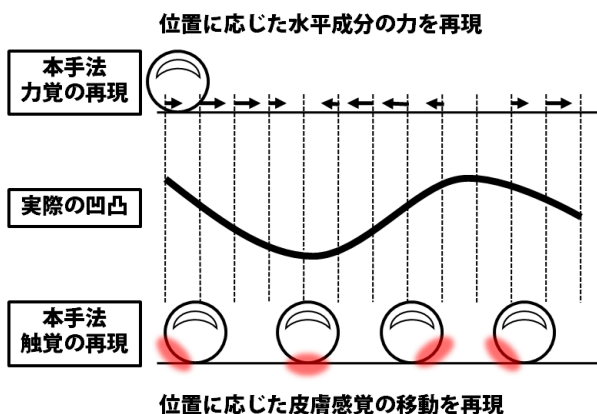


図2 凹凸面に触れた際の力覚と接触面の再現

本稿においては、機能的電気刺激を用いた筋駆動による力覚の制御が可能であるかについて検証し、力覚と皮膚感覚による擬似的な凹凸感提示を用いたアプリケーションについて今後の展開を検討する。

2. 関連研究：電気刺激とその応用

ヒトの筋肉に対する電気刺激は「機能的電気刺激」と呼ばれ、アスリートの筋力増強、リハビリテーション等を目的として用いられている。稲見らは機能的電気刺激を用いた仮想体感装置を開発し、バーチャル空間で物体を把持したかのような力覚提示を可能にした⁵⁾。玉城らも同様に前腕部に存在する筋肉を選択的に駆動させることで、指の屈伸運動の制御を可能とし、ナビゲーションや楽器演奏教示への可能性を示唆した⁶⁾。

一方、感覚神経への電気刺激により生成する皮膚感覚は電気触覚と呼ばれる。吉元らは、人差し指に指輪型電極をはめることで、感覚神経を活動させ、医療分野などへの応用を目的とした指先への電気触覚の生成を可能とした⁷⁾。

これらの手法は前腕部や指先に対して電気刺激を提示するものでありタッチパネルとのインタラクションは考慮されていない。これに対して本手法では、指を内転・外転させる手部の筋肉と、感覚神経の双方を電気刺激し、タッチパネルを操作するそれぞれの指に対して独立に触力覚を提示できると考えた。

3. 提案手法

3.1 手部への電気刺激

我々は電気刺激を手部の運動神経と感覚神経に対して行うことにより、タッチパネル上へ擬似凹凸感を提示する(図3)。

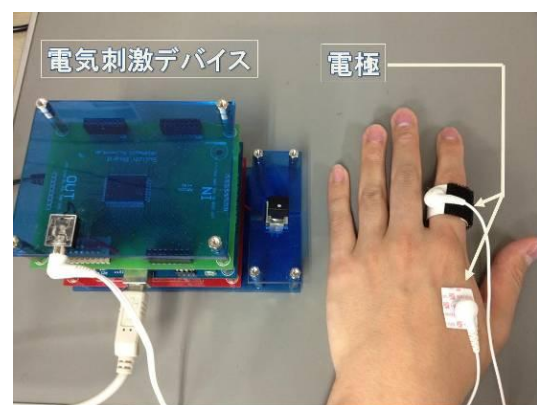


図3 電気刺激による実装図

手部表面に貼付した電極から電流パルス刺激を加えることで、感覚神経と運動神経を電気刺激する。またパルス刺激は単発ではなく、複数のパルス刺激の電気刺激である。パルス幅は機能的電気刺激で頻繁に用いられる $200 \mu\text{s}$ に固定した。電気刺激の強度調整は、

パルス周期の調整により行った。

3.1.1 機能的電気刺激による力覚の生成

力覚を生み出すために手部への電気刺激によって指先を水平駆動させた。ヒトの手部には、指の外転に用いられる筋肉である背側骨間筋と指の内転・外転に用いられる筋である掌側骨間筋が存在する(図4)。

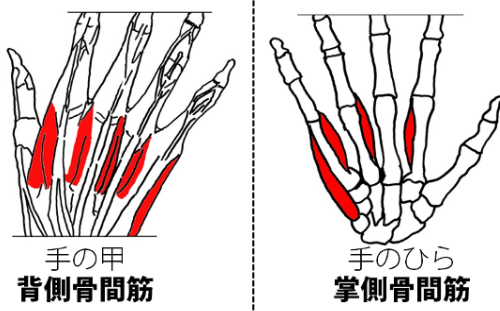


図4 手部筋肉の概略図

指先の外転・内転が電気刺激で制御できることを確認するために予備実験を行った。今回は人差し指を水平駆動させる第一背側骨間筋のみを刺激した。被験者は男性5名である。電極の貼付位置は、陰極側の位置が筋駆動に特に寄与していると考えられるため、陽極の位置は固定し、陰極の位置を調整した。人差し指で机を下側から押し上げ、その際に膨らんだ位置を筋肉の位置と定義し、そこに陰極を貼りつけた。

実験の結果、すべての被験者において、人差し指を親指方向へ駆動させることが可能である事を確認した(図5)。

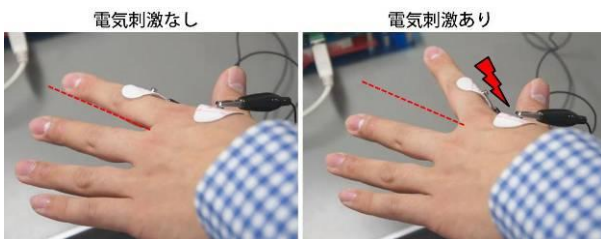


図5 電気刺激による人差し指の水平駆動

3.1.2 電気刺激による皮膚感覚の生成

皮膚感覚を生み出すため、手部に存在する正中神経に対して電気刺激を行った。手部の触覚を支配する正中神経は図6のように手部全体に張り巡らされており、特に指先においては、それぞれの指の両側面に存在する。また、これらの神経は表皮に近接して存在するため、電極位置と電流値を調整することで筋肉を駆動させることなく、感覚神経のみへの刺激が可能であると考えられる。

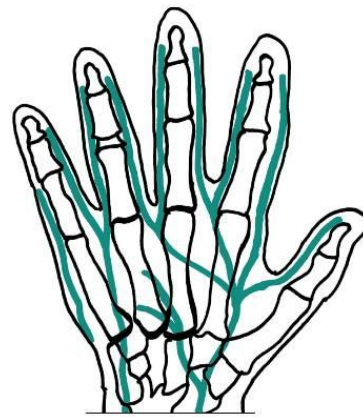


図6 手部の正中神経概略図

指先の正中神経を選択的に刺激可能であることを、試験的な実験で確かめた。陽極と陰極を指先の上に貼付し、電気刺激を与えたところ、指の側面や指の腹に触覚を知覚した。

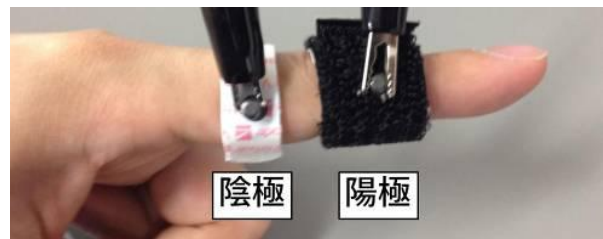


図7 指先の電極貼付位置

被験者5名に対してこの刺激を行ったところ、指の側面に衝突感がある、指先に触覚を感じる、などの意見を得ることができた。実験中、刺激と同時に指が動くことはなかったため、感覚神経のみへの選択的な刺激が可能であることが示唆された。

4. 実験

我々は将来的に力覚と皮膚感覚の双方を用いたタッチパネルに対する擬似凹凸面の再現を目標とするが、本稿においては、力覚提示の可能性についてのみ実験を行った。

4.1 単発パルスによる触覚生起

4.1.1 実験概要

指先がタッチパネルに触れた状態で手部に機能的電気刺激を加えると、指先にはどのような知覚が得られるかを確かめた。また、指先に力覚が提示されると共に、指の駆動によりタッチパネルと指先との間に意図しない皮膚ひずみが生じる。このひずみが知覚に影響を及ぼすかについても同時に検証を行った。

4.1.2 実験システム及び条件

この実験は 3 名の被験者(男性 3 名, 21 歳)を対象に, 左手の人差し指を用いて行った。被験者は全員右利きである。

実験には, 右点, 中線, 左点が存在するアクリル板(図 8)を用いた。右点と左点の距離は 60mm とした。視覚情報による結果への影響を考慮し, 試行を閉眼状態で行った。また, 指を動かすスピードを統制するために, メトロノームの音に合わせて指を動かしてもらうこととした(100 mm/s)。この速度は実験者による予備実験で触知覚が生じやすかった速度である。

皮膚ひずみを消す際は, オイルを垂らしたアクリル板上のプレートに親指をのせて試行を行わせた(図 8)。

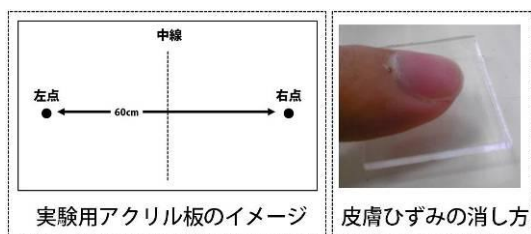


図8 実験器具概要

この実験においては背側骨間筋の選択刺激を目的とするため, 3.1.1 節と同様に陽極の位置は固定し, 陰極の位置を調整し, 電極位置を決定した。

4.1.3 実験手続き

最初に電気刺激の強さを決定した。本実験では単発パルスで実験を行ったため, パルス幅は 600 μ s 付近に固定し, 電流値を 0-8mA の範囲で 0.5mA ずつ, 被験者が痛みを感じない限界の値まで上昇させ, これによって指先が視覚的に駆動するかを確認した。駆動しなかった場合は, 陰極の位置を微動させ, 指先が視覚的に駆動するまでこの試行を繰り返した。

試行を行う前に, 被験者ごとの押付力を統一するため, 電子ばかりに指を載せ, 電子ばかりのモニターを見ながら指を動かす練習を行わせた。統制値は, 軽く平面に指を押し付ける程度の力である 50-100g を目安とした。

その後被験者はアクリル板に指を載せ, 目を閉じ, 左点から右点へ, 左手人差し指を動かす動作を 5 回行った。被験者の指がアクリル板の中線に差し掛かったときに, 実験者の操作により電気刺激を与えた。その後, 凹・凸・平面のうちから, 被験者がどれに最も近い感覚を得たかを選択させた。

これを 1 試行とし, 被験者あたり 4 試行した。また指を右点から左点へ動かす試行についても, 同様に 4

試行した(図 9)。この合計 8 試行を, 皮膚ひずみのない状態においても行い, 合計 16 試行をランダムに行い回答を得た。

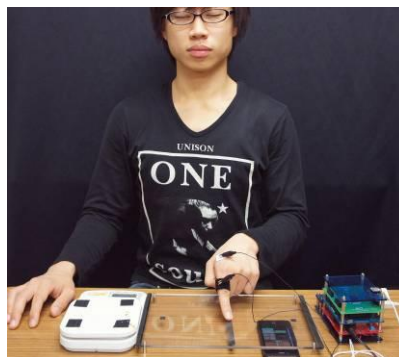


図9 実験風景

4.1.4 結果

試行から得られた回答率を以下の図 10, 図 11 にまとめた。回答率は, 被験者に対して行った全試行数(16 試行)を分母として, 凹・凸・平面それぞれの回答数を分子としたときの割合を求めた。

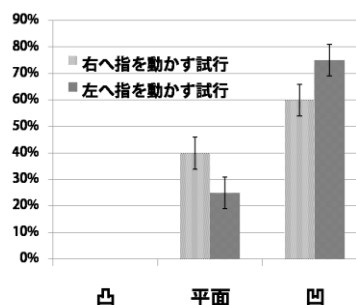


図10 皮膚ひずみがあるときの回答率

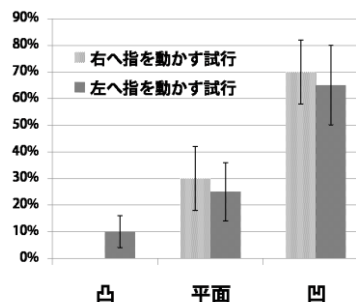


図11 皮膚ひずみがないときの回答率

4.1.5 考察

実験の結果から, どの試行においても凹面が高い割合で知覚されている。これは, 前稿⁸⁾でも報告したとおり, 単発パルスによる指の駆動を受動的なものと知覚し, その力を凹み面へ引きこまれた時にかかる力かのように錯覚しているものと考えられる。これにより,

指にかかる力の制御が必要とされることが再度確認された。

注目すべき点は、皮膚ひずみの有無による結果の違いが見られない点である。この結果より、今後タッチパネルとの連動を考慮していく上で、必然的に発生する皮膚ひずみは知覚に影響しないと考えられる。

4.2 生起する力の計測

4.2.1 実験概要

実験2では、これまで単発パルスで行なっていた背側骨間筋への刺激を複数パルスでの刺激に変更した。またパルスの幅は固定し、パルスの周波数を変更してゆくことにより刺激の強弱を設計し、生み出される力の制御が可能であるかを検討した。

4.2.2 実験システム及び条件

実験は3名の被験者(男性3名、21歳)を対象に、左手の人差し指を用いて行った。被験者は全員右利きであった。

指先に生じる力の測定には電子ばかりを用いた。電子ばかりは最低1g(0.01N)、最大1000g(10N)まで測定可能であるものを用いた。電子ばかりの直前に手の固定具をとりつけ、掌を固定できる固定台を製作した(図12)。

電極位置の決定も同時に行った。この実験においても背側骨間筋の選択刺激を目的とするため、3.1.1節と同様の手法で、電極位置の決定を行った。

被験者は電極を装着し電子ばかりの前に座って、手のひらが固定台につくように手の配置を決定した。

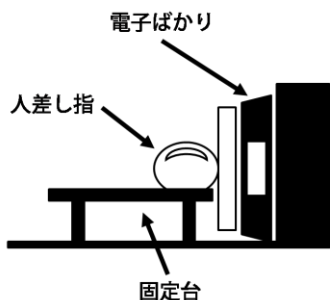


図12 測定システム

4.2.3 実験手続き

最初に、それぞれの被験者に対して最も強い刺激を与えたときに指先に生じる力を測定した。このときに与えることの可能な電流値は被験者ごとに異なるため、徐々に電流値を上げてゆき、痛みを感じない程度の最大の値を指定させることで決定した。

パルス幅は200 μ sに固定し、刺激の強弱の設計はパルスの周波数を変更することで行った。絶対不応期

が約2msであるということを踏まえ、周波数が640Hzの時を、最も強い刺激と定義した。この周波数を用いた刺激を0.5秒間被験者に与え、このとき電子ばかりが示した値を記録した。

パルス周波数は640Hz、320Hz、160Hz、80Hz、40Hz、20Hzの値を用いた。それぞれの周波数において0.5秒間の刺激を与える試行を5回繰り返し、周波数を上げてゆく時と、下げてゆく時の双方の値を記録することで、その平均値を最終的な力の値とした。

4.2.4 結果

被験者A~C(3名)の測定結果を以下の図13に示した。

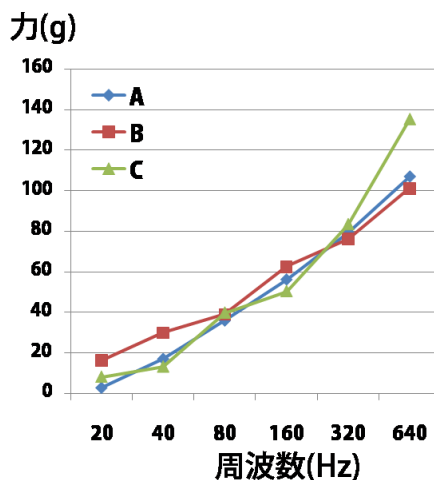


図13 実験結果

4.2.5 考察

結果から、電気刺激の強弱により力の制御が可能であるということが示唆された。被験者によっては最大で140g(1.4N)程度の力から徐々に弱い力へ変えてゆくことが可能である。

ただし、被験者ごとの個人差が大きいため、今後、擬似凹凸面を提示するアプリケーションを完成させるにあたり、適切な電気刺激を決定するための校正システムが必要であると考えられる。

5. 今後の課題：疑似凹凸の再現に向けて

本稿の前半で述べたとおり、本手法の目的は力覚と触覚を再現することにより、タッチパネル上に擬似的な凹凸面を提示することである。

現段階ではタッチパネルに触れたときに電気刺激がフィードバックされるシステムを構築した(図14)。位置に応じた出力の制御は予稿執筆の段階では行っていない。今後は位置に応じた力のフィードバックを

得るための制御を行うことで擬似凹凸面を提示し、実際の凹凸面と比較させるなどの実験を行なってゆく。



図14 タッチパネルとの連動

5.1 力覚の再現

4章の実験より、刺激周波数の調整による指の変位の制御が可能であることがわかった。今後は、タッチパネル上に表現する坂の設計を行う。坂の位置に応じた力を求めるため、Miskeyらの知見⁹⁾(図15、式(1))を用いる。

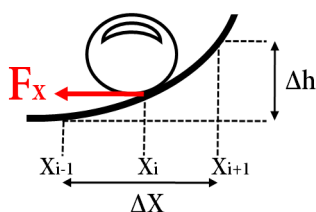


図15 指に加わる水平力

タッチパネル上で指先に提示する力を F_x として、指の加速度を A 、我々の設計した任意の凹凸面の幅を ΔX 、高さを Δh として、以下の式(1)を用いて値の計算を行う。

$$F_x = A \frac{\Delta h}{\Delta X} \quad (1)$$

この値をプログラム上で、第二実験で求めた指にかかる力の値と関連付けることで、タッチパネル上で指先を動かしたときに、位置に応じた力がフィードバックされるよう設計する。

5.2 皮膚感覚の再現

本稿においては、予備実験段階において、電気刺激による皮膚感覚の生起が確認された。今後は電極を複数使用し、力覚提示用電極、皮膚感覚提示用電極としてそれぞれ提示することで、力覚+皮膚感覚による凹凸面の再現を目指す。特に、指の両側面に感覚神経が存在することを利用し、刺激位置をタッチパネル上の位置に応じて変えることで、触覚の移動感を表現しようと考えている。

6. おわりに

本稿では、手部への電気刺激を用いたタッチパネルへの触力覚提示について、指が駆動することによりタッチパネルとの間に生じる皮膚ひずみが知覚に影響を及ぼすかについての検討と、電気刺激により指を駆動させることで生じる力の制御は可能であるかの検討を行った。

得られた結果より、皮膚ひずみの有無による知覚への影響は認められず、力覚をパルス周波数に応じた任意の強さで表現可能であることが明らかになった。

今後は、電気刺激による力覚と皮膚感覚を用いた、自然な凹凸感を再現する。まず、電気刺激による筋駆動における個人差を埋めるための校正システムを製作する。同時に、神経刺激により生じる皮膚感覚が知覚にどの程度影響を及ぼすかについても検討し、力覚と皮膚感覚を合わせた擬似凹凸面の提示を目指す。

参考文献

- 1) Gabriel Robles-De-La-Torre, Vincent Hayward: Force can overcome object geometry in the perception of shape through active touch, *Nature*, vol. 412, pp.445-448, 2001.
- 2) Wijntjes MWA, Sato A, Hayward V, Kappers AML, "Local surface orientation dominates haptic curvature discrimination", *IEEE Trans Haptics*, 2(2), 94-102, 2009.
- 3) O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr, and C. Harrison. Tesla-touch: Electro vibration for touch surfaces. In *Proc. UIST '10*.
- 4) 嵯峨 智, 出口 光一郎: タッチパネルインタフェースにおける剪断力による 2.5 次元触覚提示についての検討, 第 5 回力触覚の提示と計算研究会, 2010.
- 5) 稲見 昌彦, 川上 直樹. 仮想体感装置 特開平 07-020978. 1995-01-24.
- 6) Emi Tamaki, Takashi Miyaki and Jun Rekimoto: PossessedHand: Techniques for controlling human hands using electrical muscles stimuli, *ACM CHI2011*, paper, May 7-12, 2011.
- 7) 吉元俊輔, 黒田嘉宏, 井村誠孝, 大城理: 神経活動解析に基づく電気触覚提示のための電極設計, 日本生体医工学学会大会プログラム・論文集, 2011.
- 8) 宇戸, 岡崎, 佐藤, 福嶋, 梶本: 手部筋肉への機能的電気刺激を用いた指先への触覚提示, 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会(2011年9月 函館), 2011.
- 9) Minsky M. et al, "Feeling and Seeing : Issues in Force display", *ACM Computer Graphics*, Vol. 24, No. 2, pp.235- 243, March 1990.