

端末を把持する手への触覚刺激による操作指への押下・凹凸感呈示

荒井 観^{†1} 木曾 宏顕^{†1} 村田 一仁^{†1}

概要：タッチパネルを操作する指に触覚刺激を呈示する代わりに、端末を把持する指や掌に触覚刺激を呈示することでハードボタンの押下感や凹凸感を再現する触覚情報呈示端末を開発した。仮説として、タッチパネルの操作に応じて変化する視覚情報とともに端末を把持する手にピストンによる触覚刺激が呈示されることで、実際には刺激が呈示されていない端末を操作する手の指にもその触覚情報が知覚されることが考えられた。そこで、ハードボタンの押下感呈示アプリケーションを開発して実験的に仮説を検討した結果、7名中4名の被験者が把持する手に刺激を与えているにもかかわらず、操作指にも何らかの触覚情報を知覚していた。提案した刺激呈示手法により、触覚刺激呈示場所を代替するだけでなく、錯覚的に操作指に触覚情報を与えられる可能性が示唆された。

Tactile Stimulus Presentation to the Hand Grasping a Touch Screen Mobile

KAN ARAI^{†1} HIROAKI KISO^{†1} KAZUHITO MURATA^{†1}

Abstract: In this paper, we proposed a new tactile presentation system for a touch screen mobile. The system presented tactile stimuli on a hand which grasped the terminal when user touched the screen by the other hand. The system was designed on the assumption that human perceives tactile information by the finger which controls the touch screen when the tactile stimulus is presented with visual information to a different hand's finger or a palm. A psychophysical experiment showed that more than half subjects perceived tactile information by the finger controlling the touch screen in spite of the fact that tactile stimuli were presented to the hand grasping the terminal.

1. はじめに

近年の携帯端末の主流は、従来のハードウェアテンキーを持つ端末から、スマートフォンやタブレットなどに代表されるタッチパネル端末へ移りつつある。タッチパネル端末はタッチパネル上に表示されているアイコンに直接触れてメニューなどを選択することや、パネル上での指の動きに応じて移動・拡大・縮小することが可能であり、直接性・直観性の高いものとして認識されている。また、テンキーなどソフトウェアで再現されたボタン（以下、ソフトボタン）は、ハードウェアのボタン（以下、ハードボタン）と比較して配置変更や機能の変更が容易で、柔軟性が高い。

しかしながら、多くのタッチパネル端末は触覚フィードバックがない。そのため、ハードボタンのようにボタンに触れてから押し込むことはできず、ボタンの凹凸形状など位置の手がかりもないため、誤操作をしやすい。操作に対するレスポンスも視覚情報に依存してしまうため、視覚情報の応答が遅れた場合には、操作が実際に行われたのか瞬間的に判断できず、ユーザに対してストレスを与えてしまう。

これらのタッチパネルの問題に対して触覚刺激を付与することによる解決方法が考えられ、触覚情報呈示技術が開発・研究されてきた。例えば immersion[1]社はタッチパ

ネル端末での触覚情報呈示のため、偏心モータなどを用いたフォースフィードバックシステムを開発・提供している。またアルプス電気は偏心モータを使用せず線形な振動により力を呈示するフォースリアクタ[2]を販売している。これらの製品は触覚情報を疑似的に再現しており、小型の携帯端末にも組み込むことが可能であるが、タッチパネルに対して垂直方向の変位を伴うハードボタンを押したときの押下感（以下、押下感）や、ハードボタン上で指を移動させた時の凹凸感（以下、凹凸感）を呈示することはできなかった。これに対して BlackBerryStorm (Research In Motion社)は、液晶パネル全体がハードボタンのように筐体内部に沈み込むことで押下感を再現しているが、この機構ではハードボタンの凹凸感を与えることはできなかった。

従来技術において、ハードボタンの押下感と凹凸感をタッチパネル上で再現することは、システムの大型化や複雑化を伴ってしまう。たとえば、押下感や凹凸感のような変位を伴う触覚刺激が呈示できるインタフェースとして Phantom[3]などが知られているが、最小タイプの Phantom Omni でも 1.8kg 程度の重さであり、携帯端末には不向きである。偏心による力や振動を利用した小型デバイスを装着するタイプ[4,5]の触覚情報呈示システムも存在するが、タッチパネルに対して垂直方向の変位を呈示することは難しく、またデバイスを操作する指先や爪に装置を装着するため、日常生活において多用する指の拘束や指への装着が必要となり、やはり携帯端末に向かない点があった。

^{†1} NEC 情報・メディアプロセッシング研究所
NEC Corporation, Information and Media Processing Laboratories

そこで、もし触覚刺激を目的とは異なる体の部位に与えても、あたかも目標としている位置に刺激があったかのように知覚させられるならば、これらの機械的制約を取り除くことが期待できる。たとえば端末の側面に小型ピストンなどを実装して、端末を把持している手に変位を伴う触覚刺激を呈示することにより、タッチパネルを操作する指にその触覚情報を知覚させることが可能ならば、携帯端末などに組み込める小型の装置でありながら、端末の操作をする指先に対して拘束をかけずにハードボタンの押下感や凹凸感を呈示することが可能になる。

これまでに、与えられた触覚刺激が異なる身体部位に知覚される現象はいくつか知られている。たとえば Cutaneous Rabbit [6]は、触覚刺激を腕の場所 A に複数回呈示したのち、続けて異なる場所 B に触覚刺激を複数回呈示すると、A から B に向けて徐々に刺激の呈示された場所が移動したように知覚される現象であった。また、Green[7]は、人差し指と薬指に温かい刺激または冷たい刺激を呈示したときに、刺激を呈示していない中指に対しても両サイドに呈示したのと類似した温度感覚が知覚されることを示した。さらに、Phantom Sensation[8]は、皮膚上の 2 点に与えた触覚刺激がその 2 点を結ぶ直線上のどこか 1 点に知覚される現象として知られている。近年では異なる身体部位上に与えた温度刺激が振動刺激を与えた場所に知覚される可能性についても検討されている[9]。

これらの現象は身体上の空間に必ず 2 点以上の触覚刺激を呈示する必要があり制約が大きかったが、触覚以外の感覚情報は使われていない。これに対してタッチパネルを持つ携帯端末では、ディスプレイを見て操作することが前提となっているため、視覚刺激を利用することが可能である。視覚情報が触覚知覚に寄与することはこれまで多くの研究で知られており[10-15]、触覚刺激の呈示と共に、凹凸感のある視覚刺激や指先の操作によって変化する視覚刺激を呈示することにより、触覚情報が知覚される位置を変えられる可能性が考えられた。

そこで、本稿ではハードボタンのもつ押下感（指で押す感覚と離れたときの感覚）や、凹凸感（筐体に対するキーの盛り上がりに触れる感覚）の呈示が可能なタッチパネル型携帯端末を実現するため、操作指の動きに連動して端末を把持する手に変位を伴う触覚刺激を呈示する新たな端末を提案するとともに、視覚刺激とともに把持する手に触覚刺激を呈示した際に、タッチパネルを操作する指に触覚情報が知覚されるかどうかを実験的に検討した。

2. 提案端末とアプリケーション

2.1 ハードウェア

開発した触覚情報呈示端末は抵抗膜式タッチパネル付液晶ディスプレイ(3.2インチ)、DC モーター (並木精密宝石製 SCL10-1810PG22)、触覚刺激呈示ピストン(以下ピストン)、

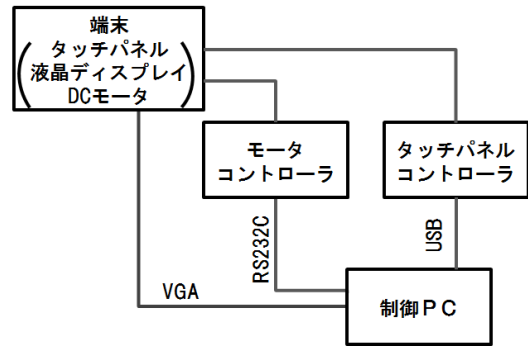


図1 システム構成

Fig.1 Configuration of system



触覚刺激呈示ピストン

図2 端末外観

Fig.2 Appearance of terminal

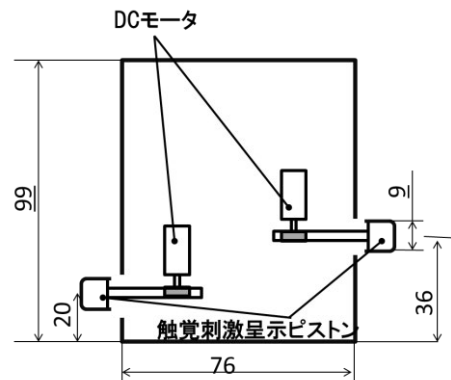


図3 端末内部構造概略及び寸法(mm)

Fig.3 Internal structure

樹脂筐体で構成された。DC モーターのコントローラには浅草ギ研製小型アクチュエータコントローラ AGB65-SAC を使用した。モーターおよびタッチパネルの制御は PC により行なった。システムの全体構成を図 1 に、触覚情報呈示端末の外観を図 2 に、端末内部構造の概略と寸法を図 3 に示す。DC モーターが回転し、ラック・ピニオンで動力を直進運動に変え、ラックに接続されているピストンが入り出すことで端末を把持している手に変位や圧力を呈示可能に

した。図2に示すように触覚刺激呈示部は端末の右側、および左側に1つずつ配置しており、触覚刺激をあたえる場所を実験的に検討するためこのような構成とした。

2.2 ソフトウェア

ピストンの制御、並びに液晶ディスプレイに呈示した視覚刺激は Visual C# 2008 で構築された。

2.3 ボタンの押下感および凹凸感呈示アプリケーション

液晶ディスプレイ上に表示されたボタンの押下感を呈示するアプリケーションと、ボタンの凹凸感を呈示するアプリケーションを実装した。これらのアプリケーションでは電話のボタンをイメージしてソフトボタンが構成されており、図2に示すようにソフトボタンがディスプレイに表示される。触覚刺激を呈示するピストンは、図4左側に示すように突出した状態を基本状態とした。端末は左手で図4右側のように持ち、右手で操作することを想定した。このとき、端末左側ピストンは左手の親指付け根に接触しており、端末右側ピストンは左手の薬指先に接触している。

ボタンの押下感を呈示するアプリケーションの一連の流れを以下に説明する。

操作する右手の指（以下、操作指）がディスプレイ上に表示されているソフトボタンに触れ、それがタッチパネルで検知された直後に、ピストンが突出している状態（基本状態）から任意の時間だけ筐体内部に入る方向に移動することで、ハードボタンの押下を想定した変位が端末を把持している左手に呈示される。ハードボタンの押下を想定した変位とは、人がハードボタンを押したときにハードボタンが筐体から出ている状態から筐体側に引っ込んで、操作指の位置が筐体側に移動することを意味する。

続いてソフトボタンの押下が完了したのちに操作指がソフトボタンから離れる際に、指が離れたことをタッチパネルが検知すると、ピストンが任意の時間だけ筐体外部に出る方向に移動してピストンが接触している左手の部位を押すことで、押下されているハードボタンから力を抜いた瞬間を想定した変位が端末を把持している左手に呈示される。ハードボタンから力を抜いた瞬間を想定した変位とは、ハードボタンが押されている状態から元の位置に戻ること、指が筐体から離れる方向に移動することを意味する。

上述の流れに従って、ソフトボタンが押された際には DC モータを回転させることでピストンが筐体内部に引っ込むように制御され、ソフトボタンから指が離れた際には、DC モータを逆回転させ、ピストンが筐体外部へ出ていくように制御された。

視覚刺激はソフトボタンへの接触・非接触のイベントに同期して、操作指がソフトボタンに触れた際には図5左のボタンが押されていない状態から図5右のボタンが押下されている状態に切り替わり、操作指が離れた際には図5右の状態から図5左の状態に戻るよう制御された。

これらの一連の流れにより、ハードボタンの押下感呈示

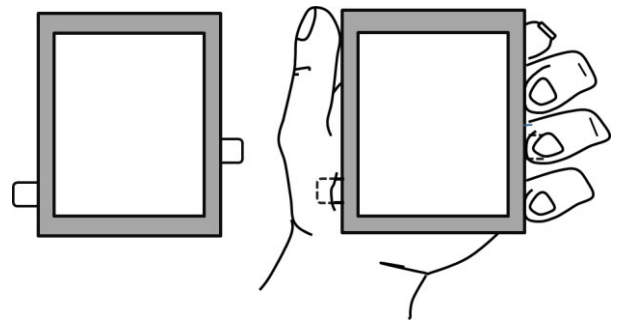


図4 端末の基本状態と把持手法

Fig.4 Base position of pistons and grasping posture

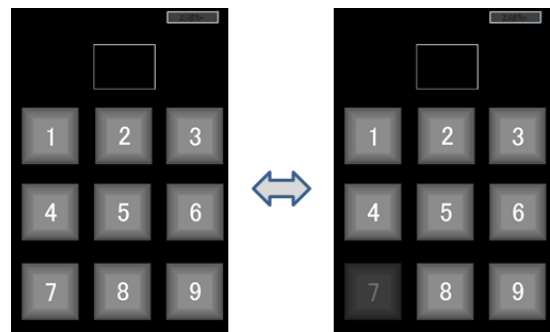


図5 視覚刺激の変化

Fig.5 Visual stimulus

を実現した。

もう一つのアプリケーションとして、ハードボタンの凹凸感呈示アプリケーションを説明する。

タッチパネル上で指を走査した際に、押下感呈示と同様にピストンが移動することで、端末を把持している手に対してボタンの凹凸を想定した刺激を呈示した。具体的には図5左側を視覚刺激として常に呈示しておき、操作指がタッチパネル上を走査してソフトボタン上にかかった際に、ピストンを筐体から突出させて筐体から離れる変位を把持手に呈示することで、ハードボタンの凸形状に触れた感覚を再現した。逆に操作指がソフトボタン上からソフトボタン外の領域に移った際に、ピストンを筐体内に引っ込む方向に動かして筐体側に近づく変位を把持手に呈示することで、ハードボタンの凸形状から指が降りた感覚を再現した。以上によりハードボタンの凹凸感呈示を実現した。

3. 実験

前章で示した押下感呈示アプリケーションを用いて、端末を把持している左手に触覚刺激を呈示することにより、操作指に触覚情報が知覚されるかどうかを実験した。

3.1 目的

2.3 節に示した押下感呈示アプリケーションを用いて、触覚刺激の呈示速度、呈示時間、呈示場所をパラメータに、端末を把持する手に触覚刺激を呈示することで、タッチパネルを操作する指に触覚情報が知覚されるかを実験的に検討する。

3.2 刺激

以下に示す触覚刺激の 3 つの要素をパラメータとして、タッチパネルを操作する右手の指に触覚情報が知覚されたかどうかを実験した。

- ① モータ印加電圧 6V に対する PWM のデューティ比
- ② 一回の刺激呈示でモータに電圧を加え続ける時間 (刺激継続時間)
- ③ 触覚刺激が呈示される場所のパターン

上記①は DC モータを制御するデューティ比であり、30%と 100%の 2 パターンとした。これはピストンの移動速度が変わることを意味し、ピストンが 200gf の力で指を押す条件下で、それぞれのデューティ比においてピストンの速度が 5.6cm/s, 19cm/s になると計算された。これはメタルドーム式ハードボタンの変形する速度が約 20cm/s との計算を参考に設定された。②の刺激継続時間は、ソフトボタンに触れたこと (または、離れたこと) が検知された瞬間から、DC モータに電圧を与え続ける時間の長さであり 1/120, 1/60, 1/30 sec の 3 パターンとした。③はピストンによる触覚刺激が把持している手のどこに呈示されるかを意味し、図 4 に示す端末右側のピストンを動作させることによる薬指先への刺激呈示 (パターン 1)、端末左側のピストンを動作させることによる親指付け根への刺激呈示 (パターン 2)、両方のピストンを動かすことによる薬指と親指付け根への刺激呈示 (パターン 3)、ソフトボタンの列に応じて刺激呈示位置を変化させ、1,4,7 を操作した場合親指付け根に、3,6,9 を操作した場合に薬指先端に、2,5,8 を操作した場合に親指付け根と薬指先端の両方への刺激呈示 (パターン 4) の 4 パターンであった。

これらそれぞれのパラメータの組み合わせを実験条件としたため、 $2 \times 3 \times 4$ の 24 条件と、アクチュエータが全く動かない 1 パターンを合わせた全 25 条件で実験した。

実験タスクは、液晶ディスプレイ上部 (図 5 の 9 個のボタンの上部にある枠の中) に表示された 3 桁の数字を順番に押すこととした。また、3 桁の数字を構成する 3 つの数字の組み合わせは、図 5 に示したソフトボタン配列において必ず異なる行および列に属し、同じ数字は含まれないこととした。したがって、159, 168, 249, 267, 348, 357 の 6 通りがこのルールを満たす組み合わせであり、各々の並び替えが 6 通りのため、全 36 パターンの刺激であった。36 パターンの 3 桁の数字の中からランダムに選んだ 25 パターンを触覚刺激の 25 条件に割り当てて呈示することで、1 セッションを構成した。実験は 1 被験者に対して 3 回のセッションを繰り返し行った。1 セッションが終わった後、残りの 2 セッションについても同様に 36 パターンのうちの 25 パターンの 3 桁の数字がランダムに選択され、触覚刺激の 25 条件に割り当てられた。以上の操作により、押すべきボタン位置の学習等によるタスク難易度の変化がないよう配慮した。

3.3 被験者

被験者は 20 代～40 代の男女 7 名であった。実験タスクの説明を行なった後、実験参加にあたっての同意書を提出してもらい、実験を開始した。

3.4 手順

はじめに被験者には実験手順の説明を印刷したものを読んでもらい、その後それらの内容を口頭で説明した。実験の目的は明示しなかった。評価項目は、「操作指に対して (通常の) タッチパネルに触れた時とは異なる感触が得られた」であり、7 段階の尺度で 1 を「全くそう思わない」、7 を「強くそう思う」として評価してもらった。したがって尺度が 1 以外であれば何らかの感触を得た可能性はあり、確信の強さを評価する指標であった。呈示した触覚刺激が実際のハードボタンの感触を完全に再現したものではなく、押下感の再現性の良し悪しを評価から排除するため「タッチパネルに触れた時とは異なる感触」という表現とした。また、把持手に対する触覚刺激の知覚については評価させなかった。

評価の方法として、前に出された刺激等と比較することなく評価するよう教示するとともに、評価値の違いは等間隔な尺度と考えて評価するよう指示した。端末は左手で図 4 右側に示したように持ち、右手人差し指でタッチパネルを操作してもらった。聴覚情報を可能な限り遮断するため、被験者はインストラクションの後、耳栓を装着した。

実験の説明の後、練習セッションとして全 25 条件を 1 度ずつランダムで呈示し評価をしてもらった。手順としては液晶ディスプレイ上部に 3 桁の数字が呈示された後、3 桁の数字を上から順番にタッチパネルで入力し、入力が終わってから評価値を口頭で応答してもらった。なお、タッチパネル操作時には押そうとした数字のボタンをはっきりと見ながら操作するよう教示した。評価値の応答が終わり、次の数字が液晶ディスプレイに呈示された後に再び数字の入力を行う手順を繰り返した。これらの手順に関しては練習も本番も同様であったが、練習の際に得たデータは解析には用いなかった。練習の後、1 セッション目を開始し 25 試行が終わったところで、10 分以上の休憩をはさみ、2 セッション目を開始した。2 セッション目が完了した後も同様に休憩をとり、3 セッション目を行なった。

3 桁の数字を押すタスクをミスした場合 (異なる数字を押した場合や 4 つ以上の数字を押してしまった場合) には、同じ条件をそのセッションの最後に再び呈示するようにし、1 セッション内で必ず 25 条件のデータが 1 回ずつ取得できるようにした。

3.5 結果

実験の結果を図 6 に示す。図 6 は実験を通して一度でも 2 以上の評価をつけた 4 名の被験者のデータである。横軸は実験条件で、印加電圧に対するデューティ比の割合 (%), 並びに刺激継続時間を示す。縦軸は 3 施行の評価値の算術

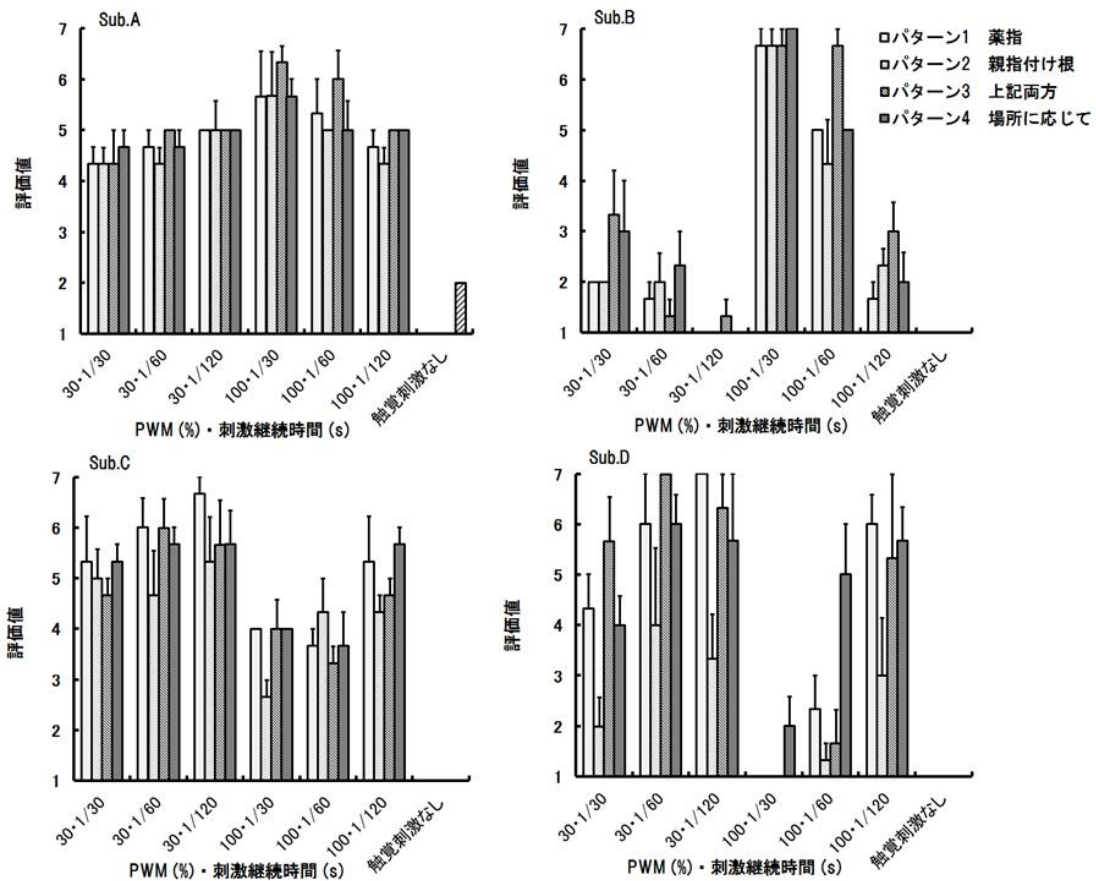


図6 実験結果. 横軸は PWM のデューティ比と刺激継続時間の組み合わせ

Fig.6 Results in experiment

平均値であり、誤差棒は標準誤差である。また、各グラフの塗りつぶしの違いは触覚刺激呈示場所のパターンの違いを意味する。4名の結果は全体として様な傾向を持っているわけではなかったが、いずれかの条件で6を超える評価を示しており、条件次第で操作指に刺激を呈示していないにも関わらず、強い確信をもって触覚情報を知覚していたことが分かった。

一方で他の3名については1度も1を超える評価をすることがなく、これらの被験者は、端末を把持している手に呈示された触覚情報が操作指には知覚されなかったことが分かった。また、触覚刺激が呈示されず視覚的なソフトボタンの変化のみが与えられた条件では、6名の被験者が全く操作指に触覚を得ておらず、残りの1名に関しても評価値2という結果であった。

3.6 考察

触覚情報を操作指に知覚しない被験者と強く知覚した被験者に結果は二分されたとともに、操作指に知覚した被験者間でも統一的な傾向が見られなかった。統一的な傾向が見られなかった理由、および人によって操作指での触覚が得られなかった理由として、刺激に対する手の当て方の違い、端末を把持する圧力の違いが考えられる。本実験は端末操作等の状況において操作指以外に与えられた刺激が操作指に知覚されるかを検討することが目的であった

め、被験者間での端末の把持圧力の違いなどを統制していなかった。その結果、手に対する刺激の当たり具合や強度に差が表れた可能性が考えられた。少なくとも、効果が見られた被験者内においても、実験条件による評価値の差が明らかにあることから、本現象はすべての触覚刺激の条件で起こるわけではなく、被験者によって適切な条件があることが示唆された。

また、本実験の結果は視覚刺激のみによって操作指に触覚情報が知覚されたわけではないことを示しており、7名中6名の被験者は視覚刺激のみでは指先での触覚が起きておらず、残りの1名でも評価値は2であった。Pseudo-Haptic[12]では、視覚情報と自らの動きにより抵抗感などの知覚が起きることを示しているが、本研究では視覚情報によって触覚情報が知覚される傾向は見られなかった。この理由として、本実験では視覚情報であるソフトボタンの絵が瞬間的に変わるだけであり、ソフトボタンの押下時に操作指の変位が実際にあるわけでもないため、Pseudo-Haptic が起きる条件ではなかったと考えられる。

これまでの触覚刺激の位置知覚に関する錯覚現象では複数回の刺激呈示や長時間の刺激呈示が必要であった[6,10]。それに対して本手法では単一の刺激を瞬間的に呈示することで触覚刺激を呈示した場所と異なる身体部位にも刺激呈示されたように知覚されることが示唆された。これ

は感覚間の相互作用から視覚情報が変化した場合で触覚的变化があったものと人間の情報処理系が判断し、結果的に連続的な刺激や長時間の順応をすることなく、視覚情報によって触覚刺激が与えられた場所とは異なる位置にも触覚情報が知覚された可能性が考えられた。

他の可能性として、与えている刺激は把持している左手の一手所（条件によっては二か所）であるが、操作する右手の指がタッチパネルに触れたことによって操作指にも触覚刺激が与えられている。そのため、把持している手に与えられた刺激と、操作指がタッチパネルに触れたことによる刺激が同時に与えられたため触覚情報が混同され、視覚刺激が伴うことにより左手に与えた触覚刺激が右手の操作指にも知覚されたことが考えられた。

さらに、本実験のみでは操作指にて得られた触覚情報が、端末内に組み込まれた DC モータが動作することによる極めて微小な振動や動き始めの加速度等を、タッチパネルに触れた操作指が知覚した結果である可能性も否定できなかった。しかしながら、今回の実験で操作指に触覚刺激があった4名のうち3名に対して、ピストンの開口部をふさいで指に触覚刺激があたらないようにしたうえで本実験と同様の条件による補足実験を実施したところ、2名の結果は今回の実験よりも評価値が大きく低下した。このことから今回の結果が、モータの振動や加速度の操作指への伝搬だけでは説明できないと考えられた。

本実験により見られた現象の理由をより明確にするには更なる検証が必要と考えるが、一つ目の可能性として示したように、もしタッチパネルに触れたことによる触覚情報がなくても視覚情報の変化があることで同様の現象が生じるとするならば、タッチパネル式の携帯端末向けにとどまらず、3次元映像への触覚情報提示システムとしての応用も考えられる。指の動きに合わせて3次元映像を変化させながら、触覚刺激を体のいずれかの部位に加えることで、何も装着していない指で触れた3次元映像から変位を含む反力を呈示できるかもしれない。また、操作指が実際に何かに接触する必要があった場合でも、現実に存在している物体への接触をセンシングして、いずれかの身体部位に触覚刺激を呈示することで、その物体の質感や形状感を変化させる現実物体の触覚情報拡張システムなどへの展開が期待される。ただし、これらを実現するには刺激呈示位置と知覚させたい位置の距離の関係性も検討していく必要がある。本研究では、刺激を与えた位置と知覚させた位置が左手と右手であり、身体上においてかなりの距離があったが、一方で現実空間上では非常に近い範囲での刺激呈示位置と知覚させたい場所の関係であった。温度の錯覚現象においては、身体上の空間変化により錯覚強度が変化することや、現実空間の距離に依存しないことが知られており[16]、本現象におけるこれらの検討も必要と思われる。

4. 終わりに

操作する指自身にデバイスを装着することなく、また視覚情報を呈示する液晶面に構造的工夫をすることなく、ハードボタンからフィードバックされる押下感や凹凸感を呈示する携帯端末を開発し、条件次第で触覚刺激が呈示されていない操作指に対して触覚刺激を与えられる可能性を示した。

今後、本現象について、被験者に与えられた刺激強度と知覚の関係や、刺激呈示位置と錯覚の発生の関係など、より基礎的な実験が必要と考えられる。また、本稿では呈示された刺激が知覚される位置に着目したが、刺激の制御方法の違いによる押下感や凹凸感の再現度合いなども検討していきたい。より詳細な検討を進めることで、人間の知覚メカニズム解明や異なる UI としての展開が期待される。

参考文献

- 1) Immersion 社 Web サイト
<http://www.immersion.com>
- 2) アルプス電気株式会社 Web サイト
http://www.alps.com/j/about_alps/tec/tec_human.html
- 3) Sensable 社 Web サイト <http://www.sensable.com>
- 4) 中村則雄, 福井幸男: 携帯型感覚情報通信における可触化技術の開発動向:非ベース型触力覚インタフェース'GyroCube'について, パイオメカニズム学会誌, Vol.31, No.2, pp.90-94 (2007).
- 5) 安藤英由樹, 渡邊淳司, 稲見昌彦, 杉本麻樹, 前田太郎: Augmented Reality のための爪装着型触覚ディスプレイの研究, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-DII(11), pp.2025-2033 (2004).
- 6) Geldard, F.A. and Sherrick, C.E.: The Cutaneous "Rabbit": A Perceptual Illusion, Science, Vol.178, No.4057, pp.178-179 (1972).
- 7) Green, B.G.: Localization of thermal sensation: an illusion and synthetic heat; Attention, Perception, & Psychophysics, Vol.22, No.4, pp.331-337 (1977).
- 8) Békésy, G.V.: Neural Funneling along the Skin and between the Inner and Outer Hair Cells of the Cochlea, The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.31, No.9, pp.1236-1249 (1959).
- 9) 渡辺亮, 大原淳, 國安裕生, 佐藤未知, 福嶋政期, 梶本裕: 前腕部への触刺激に対する温度感覚の重畳; 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会 (2011).
- 10) Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands 'feel' touch that eyes see; Nature, 391, 756 (1998).
- 11) Arai, K. and Okajima, K.: Tactile force perception depends on the visual speed of the collision object, Journal of Vision, Vol.9, No.11, Article 19, pp.1-9 (2009).
- 12) Lécuyer, A.: Simulating Haptic Feedback Using Vision : A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, Presence : Teleoperators and Virtual Environments Vol.18, No.1, pp.39-53(2009).
- 13) Murray, D. J., Ellis, R. R., Bandomir, C. A., and Ross, H. E.: Charpentier (1891) on the size-weight illusion, Perception & Psychophysics, Vol.61, No.8, pp.1681-1685 (1999).
- 14) Charpentier, A.: Analyse expérimentale: De quelques éléments de la sensation de poids; Archives de Physiologie Normale et Pathologique, 3, pp.122-135 (1891).
- 15) 荒井観, 岡嶋克典: 摩擦に対する作用力知覚における視覚情報効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.1, pp.57-64 (2011).
- 16) 渡邊淳司, 黒木忍: 触覚の時空間知覚・属性知覚に姿勢が及ぼす影響, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.16, No.3, pp.489-496 (2011).