

視触覚クロスモーダル現象を用いた タッチパネルへの触覚フィードバックの付加

横山牧¹ 蜂須拓^{1,2} 佐藤未知^{1,2} 福嶋政期^{1,2} 梶本裕之^{1,3}

¹電気通信大学 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

²日本学術振興会特別研究員

³科学技術振興機構さきがけ

E-mail: ¹{m.yokoyama, hachisu, michi, shogo, kajimoto}@kaji-lab.jp

あらまし タッチパネルを搭載した携帯端末が近年急激に普及しているが、このタッチパネルは触覚フィードバックが欠けているためにテキスト入力に難しいという問題を抱えている。この問題に対して、本研究ではキーの境界線に段差がついたシートと視触覚クロスモーダル現象を用いることで、タッチパネルに触覚フィードバックを簡単に付加する手法を提案する。本稿では提案手法により付加される触覚フィードバックがテキスト入力パフォーマンスに与える効果を検証した実験、そして視触覚クロスモーダル現象によってヒトの知覚量がどの程度変化するかを検証した実験について述べる。

キーワード 視触覚クロスモーダル、触覚、タッチパネル、フリック入力

Adding tactile sensation to touch panel by using visuo-tactile cross-modal phenomenon

Maki YOKOYAMA¹ Taku HACHISU^{1,2} Michi SATO^{1,2} Shogo FUKUSHIMA^{1,2}
and Hiroyuki KAJIMOTO^{1,3}

¹University of Electro-Communications 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-si, Tokyo, 182-8585 Japan

²JSPS Research Fellow

³Japan Science and Technology Agency

E-mail: ¹{m.yokoyama, hachisu, michi, shogo, kajimoto}@kaji-lab.jp

Abstract There have been many proposals to add tactile sensation to touch panels, but most of them require additional electro-mechanical components and not suitable for mobile terminals. In this paper, we propose a simple method of adding tactile sensation of a bump, just by a thin sheet. The sheet has bumps that are haptically imperceptible, but once a visual stimulus such as a line is presented, visuo-tactile cross-modal mechanism induces haptic bump. We reported two experiments. First experiment tested whether these tactile sensation improves the performance of flick input. Second experiment tested how much subjective ridge height was emphasized by this phenomenon.

Keyword Flick input, Tactile, Touch Panel, Visuo-Tactile Cross-Modal

1. はじめに

スマートフォンに代表されるように、タッチパネルを搭載した携帯端末が近年急激に普及している。このタッチパネルはディスプレイと入力インタフェースの2つの機能を備えており、ディスプレイに表示された対象に直接触れて操作出来ることから、従来の端末と比べて操作の直感性が増したと言える。さらに従来の端末が「キーを押し込む」動作しか検出出来なかった

のに対し、タッチパネルでは「端末表面をなぞる」動作の認識も可能である。

このタッチパネル特有の「なぞり動作の認識」を活かした日本語入力方式が「フリック入力」である。これはプルダウンメニューの一種で、まずテンキーから子音をタッチで選択し、次に指を上下左右の4方向のいずれかにスライドさせて母音を選択することで、テキストを入力する方式である。従来のトグル入力方式

では目的の文字まで複数回キーを押し込む必要があったのに対し、フリック入力ではどの文字でも最高2回の操作で入力ができることから、入力速度の向上が期待される。

しかしながら、タッチパネルはPCや従来の携帯電話端末と異なりキーの凹凸やクリック感などの触覚フィードバックが欠けているために、テキスト入力操作が難しいという問題が報告されている[1][2]。この問題を解決するため、従来からタッチパネルに触覚フィードバックを付加する研究が数多くなされてきたが、フリック入力の補助を明確に意図したものは少なかった。本研究はフリック入力に対する触覚的補助を検討するものである。

従来の触覚付加の研究は、呈示される触覚フィードバックの観点から2つに分類出来る。

第一に、振動によってキーを押し込んだ際のクリック感を呈示する手法である[3][4][5][6]。これは端末に振動子を追加することのみで触覚フィードバックを付加出来ることから、既に実用化もされている。また、小さな突起状のゲルシートを端末裏面に貼付けることで、擬似的にボタンのクリック感を呈示する手法も提案されている[7]。しかしながら、これらの手法により呈示されるクリック感は従来のトグル入力ではボタンを押し込んだ際のフィードバックとしては適切でも、フリック入力のように指をスライドさせた際のフィードバックとして適切ではないと考えられる。すなわち、トグル入力はタッチパネルに対して垂直方向の指の移動だが、フリック入力は横方向の移動であるため、フリック入力に適したフィードバックを付加するためには、指がタッチパネル上を移動したことを呈示する必要があると考えられる。

第二に、キーの凹凸感を呈示する手法である。この手法では前述の横方向の動きに対する触覚フィードバックが可能となる。凹凸感の呈示には、与える振動のパターンを変化させることで指とキーの位置関係を示すもの[8][9]、指が凹凸を乗り越えた際の横向きの力を呈示するものなどがある[10][11]。しかしながらこれらの手法は指全体へ触覚呈示であるため、呈示の空間分解能が低いという問題がある。フリック入力は入力の際に上下左右の4方向に指を動かすため、4方向の違いをユーザに知覚させるためには、高い空間分解能が必要となる。一方、高い空間分解能での呈示手法として、タッチパネル上に配置した刺激子によって触覚フィードバックを与えるものも提案されているが[12][13][14]、これらの手法では大型の電気的な制御装置が必要になるため、携帯端末への実装は少なくとも現時点では難しいと考えられる。

以上より、これまで提案されてきた手法では、携帯

端末でのフリック入力への応用は難しいと考えられる。

そこで本研究では、携帯端末でのフリック入力のパフォーマンスを向上させるための触覚フィードバックの付加手法として、段差付きシートと視触覚クロスモーダル現象を用いることで、タッチパネルにON/OFF制御が可能な触覚フィードバックを付加する手法を提案する。本稿ではこの提案手法について述べた後、段差の付加がフリック入力を向上させる否かを検証した実験について述べる。また、提案した視触覚クロスモーダル現象によって、ヒトの知覚がどの程度変化するかを検証した実験について述べる。

2. 提案手法

フリック入力を正確に行うためには、指を上下左右の4方向へ明確に動かし分けること、母音が選択されるまで指を動かし続けること、の2点が重要である。従って与えるべき触覚フィードバックは、指の動いた方向とゴール（ここに至れば母音が確実に選択されるもの）の2つであると考えられる。この2つの情報を呈示する触覚フィードバックの一例として、キーの境界線上に段差を設けることが考えられる（図1）。このようなフィードバックを与えられた場合、ユーザは指先で感じた段差の角度によって自身の指が動いた方向を知覚出来、またこの段差を乗り越えるまで指を動かし続けることで確実に母音を選択することが出来るようになると思われ。

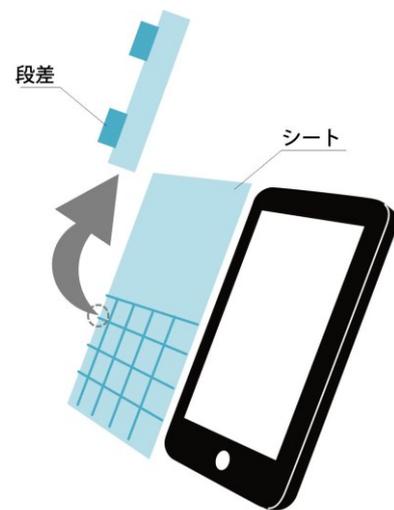


図1 キー境界への段差付加

このような触覚フィードバックを付加するための最も簡単な方法は、キー境界線に沿って実際に細い段差を設けることである。しかしながら、単純に段差を設けてしまうと、キー入力を行わない場合にもタッチパネルに触れる度にその段差に触れてしまうため、キー入力以外の操作の妨げとなることが予想される。従

って理想的には、キー入力を行う際には段差が存在するが、その他の操作を行う際には段差が消えるように、段差の ON/OFF を制御出来る手法が望ましい。

そこで本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いることで、この段差の ON/OFF を制御する手法を提案する。本研究が発見したこの現象では、通常は知覚が難しいヒトの段差知覚閾値周辺の微小な段差(数 μm ~数十 μm) (図 2 左下) のある箇所に線のような視覚の手掛かりを付加することで、ヒトはこの段差を強調して知覚する (図 2 右下)。我々はこの現象を、食品包装用ラップフィルムを用いて確認した。これは視覚の手掛かりの有無による主観的段差の強調と捉えることが出来る。

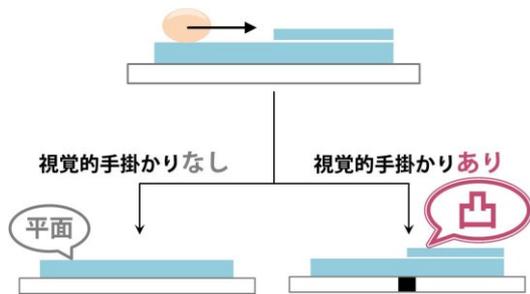


図 2 視触覚クロスモーダル現象による主観的段差の強調

従って、図 1 に示した段差の高さをヒトの段差知覚閾値周辺の値とすることで、キーボードを使用する際にはタッチパネルに表示されたキーボードの画像が視覚の手掛かりとなり段差が知覚されるが、この画像が消えれば同時に段差も知覚されなくなることが期待される。

3. 実験 1：キー境界への触覚フィードバック付加の有効性検証

本章では、提案手法によってキーの境界に付加される段差が、フリック入力によるテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを検証した実験について述べる。

3.1. 実験器具の製作

触覚フィードバックである段差を付加するために、iPod touch (Apple 社、第 3 世代) の日本語キーボード (テンキー) のキー境界線に沿って綿ミシン糸 (カネボウ株式会社、カネボウカタン糸 50 番、直径：0.159 mm) を這わせた (図 3 右)。糸は両面テープで両端を留め、ズレを防ぐために上から食品包装用ラップフィルム (旭化成ホームプロダクツ株式会社、サランラップ 20 m、厚さ：約 0.014 mm) を被せた。このとき、ディスプレイに表示される文字を隠さないように、糸の長さを調節した。また触覚フィードバックの効果の

比較対象として、ラップフィルムのみを被せた iPod touch も製作した (図 3 左)。



図 3 左：触覚フィードバックなし、右：触覚フィードバックあり

3.2. 実験手順

被験者は椅子に座り、利き手で iPod touch を持った状態で実験を行った。被験者のテキスト入力パフォーマンスを計測するため、タイピング練習アプリケーション「タイピング革命 Free」(iPhone App, バージョン：1.30) を使用した。実験で使用した「トレーニングモード」では、2~3 文字の短い単語を 10 個入力する流れを 1 セットとし、この 1 セットの中で入力速度、正解率を計測する。

2 つのデバイス条件(触覚フィードバックなし/あり)に対して、トレーニングセッションと計測セッションの 2 つのセッションを設けた。トレーニングセッションでは、被験者は「トレーニングモード」で 5 分間フリック入力の練習を行う。続く計測セッションでは、同じく「トレーニングモード」を 3 セット行う。デバイス条件の呈示順序は、被験者によってランダムにした。

触覚フィードバックやラップフィルムと通常のタッチパネルを比較するため、被験者には 2 つのデバイス条件の前後 2 回に、比較セッションとして通常のタッチパネルを使用させた。この通常のタッチパネルで行ったセッションは後の解析対象から除外した。

被験者は 22~26 歳の 8 名 (男性 7 名、女性 1 名) で、全員右利き、5 名が日常的にフリック入力を使用していた。被験者には可能な限り速く、かつ正確に入力するように指示をした。なお普段の入力方法に関わらず、被験者には利き手で iPod touch 本体を持ち、同じく利き手親指でフリック入力をするように指示をした。

3.3. 実験結果

通常のタッチパネルを用いて行った 2 回の比較セッション以外の実験結果を表 1 に示す。横軸はデバイス

条件，縦軸は全被験者の平均入力速度（文字/分）と平均正解率（%），括弧内は標準偏差を示している。

表 1 触覚フィードバックの有無と入力速度，正解率の関係（括弧内は標準偏差を示す）

デバイス条件	触覚フィードバックあり	触覚フィードバックなし
平均入力速度 [文字/分]	81.1(32.5)	78.9(33.7)
平均正解率 [%]	96.0(3.03)	92.9(4.76)

表 1 より，触覚フィードバックを付加することで入力速度と正解率が向上する傾向がみられた。入力速度と正解率に関してそれぞれ t 検定を行った結果，正解率の有意な差が認められた ($p = 0.019, < .05$) が，入力速度では認められなかった ($p = 0.227$)。

3.4. 考察

ここでは，本研究が提案する触覚フィードバックが，フリック入力によるテキスト入力のパフォーマンスを向上させるか否かを，実際にタッチパネルに段差を付加して検証した。

実験結果より，キーの境界に触覚フィードバックとして段差を付加することで，フリック入力を用いたテキスト入力パフォーマンスのうち，特に正解率が向上することが分かった。つまり触覚フィードバックの付加によって，自身の指が動いている方向を知覚しやすくなり，また越えるべきゴールが触覚的に明示された結果，テキスト入力のパフォーマンスが向上したと考えられる。

以上より，本研究が提案する触覚フィードバックが，フリック入力によるテキスト入力パフォーマンスを向上させる可能性が示された。

しかしながら，フィードバックの強さに関して今後の検討が必要である。本実験で用いた段差高さは 0.159 mm と大きく，その存在がはっきりと知覚出来た。一方で，本研究の提案手法によって最終的に付加される段差は，これより遥かに小さくなることが予想される。従って，パフォーマンス向上に必要な触覚フィードバックの強さ（ここでは段差の高さ）を今後検証する必要があると共に，最終的に提案手法によって付加される触覚フィードバックの強さでも，パフォーマンス向上の効果があるか否かも確認する必要がある。

4. 実験 2：主観的段差高さの増加量の算出

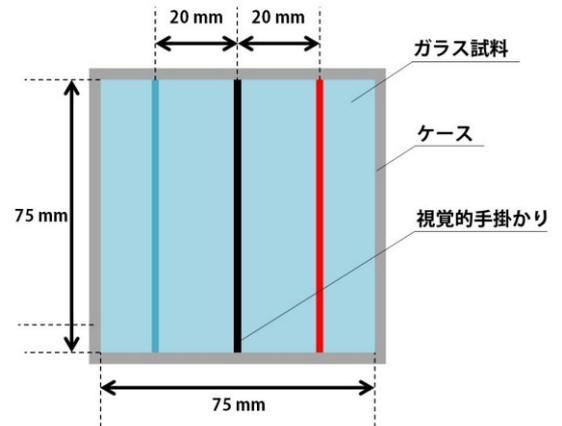
我々は前報にて，微小段差に視覚的手掛かりを付加することで主観的段高さが増加する可能性を示した

[15][16]。そこで本章では，この増加量がどの程度であるかを，恒常法を用いて算出する実験を行った。

4.1. 実験手順

実験試料の模式図を図 4 に示す。試料は SiO₂ 薄膜蒸着によって段差を生成したガラス試料を用いた。このガラス試料はケースに入れた。試料の下には台紙を敷き，これには視覚的手掛かりとなる黒色の線（線幅：0.1 mm），およびなぞり速度を統制するための目安となる青色と赤色の線（線幅：0.1 mm）を印刷した。ガラス試料の段差の真下に視覚的手掛かりが位置するようにした。ここでは視覚的手掛かりの付加によって主観的段差高さがどの程度変化するかを検証するため，被験者には標準刺激と比較刺激の段差高さを比較するタスクを課した。標準刺激として，段差高さが 2.2, 4.6 μm の視覚的手掛かりのない試料の 2 種類を設定した。対して比較刺激は段差高さが 0, 2.2, 4.6, 9.7 μm の視覚的手掛かりのある試料の 4 種類の試料を設定した。

<上面図>



<側面図>

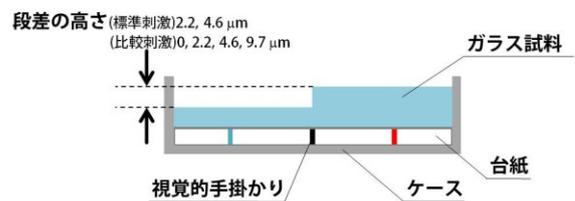


図 4 実験試料

被験者は試料の青色の線から赤色の線まで，右手人差し指でなぞった。なぞり速度を統制するために，iPod touch からメトロノームの音を流し，音がそれぞれの線の上でのみ鳴るように動かすよう教示した。メトロノームは 80 回/分に設定したため，青色の線から赤色の線まで指を動かす時間は 0.75 秒，試料をなぞる速さは約 53 mm/秒であった。このなぞり速度に慣れるため，

被験者は実験開始前に練習を行った。

被験者はまず基準刺激を呈示され、音に合わせて3回なぞった。次に比較刺激に交換され、同様に3回なぞった。2つの試料をなぞり終えた後、「どちらの試料の段差が大きかったか」を「基準刺激」「比較刺激」の2択から口頭で回答した。1つの標準刺激に対する試行数は、比較刺激4条件との2つの試料の組み合わせを6回ずつ呈示したため、24試行であった。なお、順序効果への対策として基準刺激と比較刺激の呈示順序は試行数の半分で入れ替えた。

被験者は22~26歳の5名（男性3名、女性2名）で、全員右利きであった。

4.2. 実験結果

実験結果を図5に示す。縦軸は比較刺激の段差の方が大きいと回答された確率、横軸は比較刺激の段差高さである。指標から伸びる縦棒は標準偏差を示す。また、それぞれの標準刺激において、ロジスティック関数による近似結果を曲線で示した。

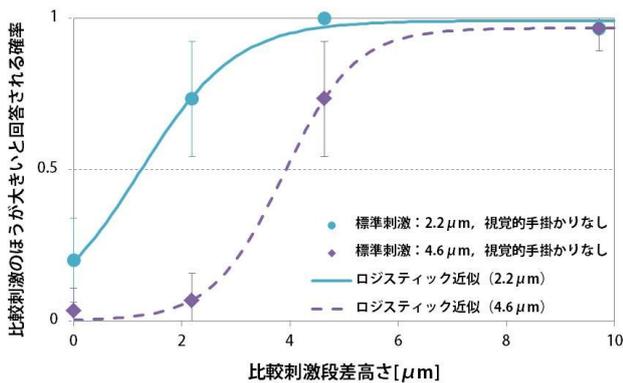


図5 比較刺激の段差の方が大きいと回答される確率と、ロジスティック関数による近似曲線

比較刺激の段差の方が大きいと回答される確率が50%となるのは、標準刺激が2.2 μmの場合は1.3 μm、4.6 μmの場合は3.9 μmであった。すなわち、視覚的手掛かりのある1.3 μmの段差は、視覚的手掛かりのない2.2 μmの段差と等しく感じ、同様に視覚的手掛かりのある3.9 μmの段差は、視覚的手掛かりのない4.6 μmの段差と等しく感じると予想される。従って、段差知覚閾値近傍の段差に視覚的手掛かりを付加すると、実際の段差高さに関わらず、約0.8 μm段差を大きく感じるということが分かった。

以上の結果より、物理的な段差高さの主観的段差高さの関係は図6に示したように、視覚的手掛かりがある場合には視覚的手掛かりがない場合に比べて上にずれ、この範囲ではおよそ平行になると予想される。

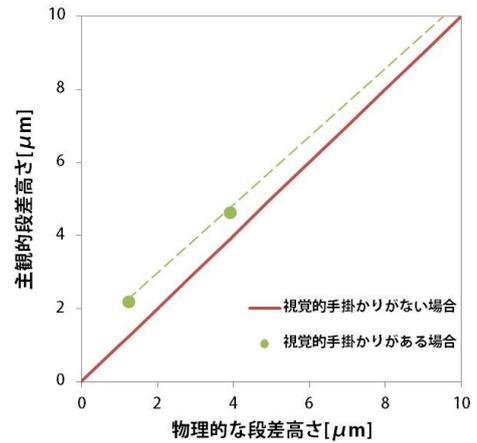


図6 物理的な段差高さの主観的段差高さの関係

4.3. 考察

前報より、視覚的手掛かりの付加によって主観的段差高さが増加することが分かっていた。従ってここでは、その変化量がどの程度であるかを算出する実験を行った。

実験結果より、知覚閾値近傍の段差に視覚的手掛かりを付加することで、実際の段差高さに関わらず主観的段差高さが約0.8 μm大きくなることが分かった。

一方前報の実験において、視覚的手掛かりを付加した0.014 mmの段差と、視覚的手掛かりを加えない0.021 mmの段差が同じ高さに知覚される傾向がわずかにみられていた。従って、実際の段差高さが異なると、主観的高さの増加量も異なる可能性が考えられる。しかしながら、今回の実験でガラス試料を用いていたのに対し、前報の実験ではラップフィルム試料を用いていたため、素材の違いが段差知覚に影響を与えた可能性も考えられる。

従って今後は、より大きい段差を基準とした場合に増加量がどのように変化するかについても検証するとともに、素材に関しても検証する必要がある。

5. おわりに

本研究では、視触覚クロスモーダル現象を用いたタッチパネルへの触覚フィードバック付加手法を提案した。これは、キーの境界線に段差を設けたシートをタッチパネルに貼るが、キー入力以外の操作の妨げにならないように、視触覚クロスモーダル現象を用いて段差のON/OFFを切り替える、というものである。これにより、フリック入力のテキスト入力パフォーマンス向上を狙う。

この触覚フィードバックがフリック入力によるテキスト入力パフォーマンスに与える効果を検証した結果、特に正解率が向上することが分かった。

また、ここで用いた視触覚クロスモーダル現象にお

いて、視覚的手掛かりの付加によってどの程度主観的段差高さが増加するかを算出する実験を行った結果、約 0.8 μm 増加することが分かった。

今後は、実際にこの現象を用いて段差の強調をした触覚フィードバックでも、フリック入力のテキスト入力パフォーマンスが向上する効果があるか否かを検証する。

また、視覚的手掛かりにも注目して実験を行いたい。具体的には、視覚的手掛かり線の幅や、色、濃度、そもその形などを変更し、段差の知覚にどのような変化が現れるのかを観察する。既に予備実験において、視覚的手掛かりの形状を今回実験で用いたような線から小さな丸い点に変えることで、得られる触覚が変化することが示唆されている。

また、複数の微小段差に対して単一の視覚的手掛かりを与えることで、段差を選択的に強調することが可能であるかも検証する。もしこれが可能であれば、例えば iPhone の角度を変えたときに表示されるキーボードの形が変わるような場合にも、図 7 のように元から複数の段差がついているシートを張っておくことで、画面に表示される視覚的手掛かりを変えるだけで、様々な形のキーボードに対応が可能であると考えられる。

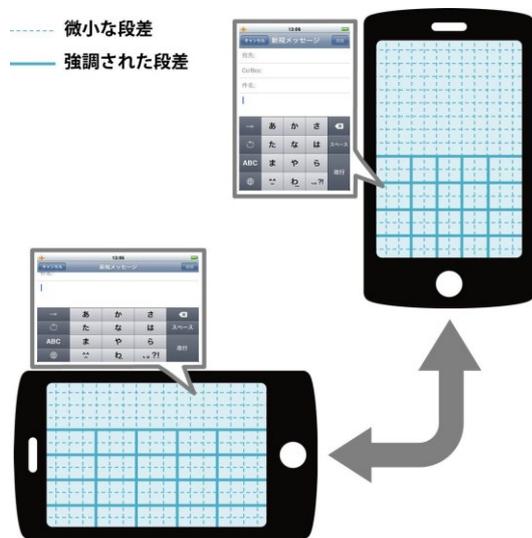


図 7 視覚的手掛かりによる段差の選択的強調

文献

[1] Sears A., "Improving Touchscreen Keyboards: Design issues and a comparison with other devices" *Interacting with Computers*, Vol. 3, Issue. 3, pp. 253-269, December, 1991

[2] Hasegawa A., Yamazumi T., Hasegawa S. and Miyano M., "Evaluating the input of characters using software keyboards in a mobile learning environment" *Proc. 7th IEEE International*

Conference on Wireless, Mobile and Ubiquitous Technology in Education, pp.214-217, Takamatsu, Japan, March, 2012

[3] Fukumoto M., Sugimura T., "Active Click: Tactile Feedback for Touch Panels" *Proc. CHI'01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.121-122, Washington, USA, March, 2001

[4] Poupyrev I., Maruyama S. and Rekimoto J., "Ambient Touch: Designing Tactile Interfaces for Handheld Devices", *Proc. Proceedings of the 15th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp.51-60, Paris, France, Oct, 2002

[5] Immersion Corporation. "TouchSense": <http://www.immersion.com/products/touchsense-tactile-feedback/>

[6] 京セラ株式会社トピックス「新感覚タッチパネル」：
http://www.kyocera.co.jp/topics/2012/1003_ntcp.html

[7] Fukumoto M., "PuyoSheet and PuyoDots: Simple Techniques for Adding "Button-push" Feeling to Touch Panels" *CHI'09 Extended Abstract on Human Factors in Computing Systems*, pp.3925-3930, Boston, USA, April, 2009

[8] Nashel A. and Razzaque S., "Tactile virtual buttons for mobile devices" *CHI'03 Extended Abstract on Human Factors in Computing Systems*, pp.854-855, Florida, USA, April, 2003

[9] Hoggan E., Brewster S. A. and Johnston J., "Investigating the Effectiveness of Tactile Feedback for Mobile Touchscreens" *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.1573-1582, Florence, Italy, April, 2008

[10] 嵯峨, 出口 "剪断力を用いた 2.5 次元触覚ディスプレイにおける定量的凹凸感提示方法" 第 16 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 北海道, 2011

[11] 宇戸, 岡崎, 佐藤, 福嶋, 梶本 "手部への電気刺激を用いたタッチインターフェースのための触力覚提示手法の検討" 第 15 回一般社団法人情報処理学会シンポジウム インタラクシオン, 東京, 2012

[12] Kajimoto H., "Skeletouch: Transparent Electro-Tactile Display for Mobile Surfaces" *SIGGRAPH ASIA*, Singapore, Nov, 2012

[13] Jansen Y., Karrer T. and Borchers J., "MudPad Tactile Feedback for touch screen" *CHI'11 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp.323-328, Vancouver, Canada, 2011

[14] Tactus Technology, Inc. "Taking touch screen interfaces into a new dimension" *A tactus technology white paper*, 2012

[15] 横山, 蜂須, 佐藤, 福嶋, 梶本 "視触覚クロスモーダルによる凹凸知覚の鋭敏化" 第 17 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 神奈川, 2012

[16] Yokoyama M., Hachisu T., Satou M., Fukushima S. and Kajimoto H., "Control of Ridge by Using Visuotactile Cross-Modal Phenomenon" *ITS'12 Proceedings of the 2012 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces*, pp.335-338, Boston, USA, 2012