

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26540097

研究課題名(和文) 背面タッチパネルを用いた視覚触覚間相互作用誘発によるモバイル端末上での触力覚提示

研究課題名(英文) Representing Haptic Sensation on the Mobile Device with Visuo-haptic Interaction and a Rear Touch Interface

研究代表者

鳴海 拓志(Narumi, Takuji)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：70614353

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：小型タッチパネル端末では操作する指で画面が隠れ、また触覚フィードバックがないため、操作が不正確となる。これに対し、背面タッチパネルと視覚触覚間相互作用によって触覚デバイスなしに擬似触覚を提示する手法を提案した。押下方向に関しては、押下圧力に応じて画像を隆起変形し、その変形量を変化させる擬似触覚提示手法を提案した。せん断方向に関しては、背面からの操作に対するポインタの位置・速度を変化させる擬似触覚提示手法を提案した。被験者実験の結果、押下・せん断両方向に関して、背面タッチパネルを用いた擬似触覚提示により、段階的な押下・せん断方向の触知覚を提示できることが示された。

研究成果の概要(英文)：Input with a touch panel interface of a small device is typically inaccurate because the touch point is occluded by the user's finger and a user cannot obtain haptic feedback. To overcome this problem, we propose a visuo-haptic system with a rear touch interface to evoke the haptic sensation without using haptic devices. For normal force, the system modifies the shape of a virtual object when the user presses the device from behind. For shearing force, the system produces a mismatch between the speed of the touch point on the rear side, which is hidden by the monitor, and a pointer, which shows a touch point displayed on the monitor. Our experimental results demonstrated that more than 80% of participants perceived greater stiffness with the deformed model than the model not deformed by normal force. For shearing force, the results showed significant differences in perception based on differing strengths of visual feedback.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：感覚間相互作用 触力覚提示 背面タッチパネル クロスモーダル モバイル ユーザインタフェース

1. 研究開始当初の背景

高精細の小型画面とタッチパネルを搭載した小型汎用モバイル機器が広く普及し、その精細度を活かすべく細かい入力の操作性を高める手法が求められている。タッチパネルにおいて細かい操作が困難なことの主要因は、操作に対して触覚フィードバックがない点にある。この問題に対し、パネル全体を振動させる手法や電気刺激による擬似触覚提示手法等のモバイル向け触力覚提示手法が提案されてきた。しかし既存手法では押下方向か剪断方向のどちらかの触力覚しか提示できない、細かい触感の違いが表現できない等、表現可能な触力覚に強い制限があり、また必要な装置の大きさ、消費電力、安全性等にも問題が考えられることから、多様な細かい入力操作を補助する実用的な触力覚フィードバックシステムは実現されていない。

この課題に対し、本申請では視覚触覚間の感覚間相互作用である Pseudo-haptics のモバイル環境への適用を考えた。Pseudo-haptics を利用すると、身体の動きの映像に変化を加えて見せることで、触覚提示デバイス無しで押下力・せん断力の提示が可能になる。しかし生起には自身の身体動作を直接見せないことが必要となる。そこで直接手を見せないために、端末背面にもタッチパネルを配し、画面を指で隠すことなく精緻な入力を可能にする背面タッチパネルを利用する。デバイスが透過しているかのようにデバイスの裏側に隠れた手を表示し、画面内の手映像と操作オブジェクトを適切に変形して見せることで擬似触力覚を提示する手法を実現する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、背面タッチパネルと視覚触覚間相互作用を組み合わせて利用することで、実際に力や振動を発生させる装置を用いずに、モバイル端末上で押下・剪断両方向の触力覚を擬似提示可能な手法を実現することである。小型で超高精細のタッチパネルが普及するにつれ、触力覚フィードバックにより細かい入力の操作性を高める手法が求められている。本研究では小型画面の入力補助に用いられる背面タッチパネルシステムを利用し、デバイスが透過しているかのようにデバイス裏側の手を表示するとともに、その手と画面内のオブジェクトを変形して見せることで擬似触力覚を提示する手法を構築する。この手法の効果・適用限界を検証し、これを利用したユーザインタフェースを構築することでタッチパネル付モバイル端末の操作性向上を図る。

3. 研究の方法

背面タッチパネルに対して必要な触覚要素を以下の2つに分類した。

1. ボタン操作時の反発、タッチ時の硬さ、凹凸感などのフィードバックを提示す

るための画面に対して垂直方向への触覚提示(押下方向)

2. スライド操作、ピンチ操作時の動作方向、拡大方向への抵抗感等のフィードバックを提示するための画面に対して水平方向の触覚提示(せん断方向)

この2方向に関して、提案手法で触覚提示が可能であることを構築するシステムにおける要求事項とした。

具体的にそれぞれの手法による操作性の向上の例として、以下が挙げられる。

1. タッチパネルではボタン押下に対しての触覚フィードバックが無く、またボタンが指で隠れるためどのボタンを押したか、本当に押したのかが使用者に分からない問題点がある。これに対して、提案するシステムでは、押下に対する触覚フィードバックにより、ボタンによる細かい触覚感などを提示可能であり、また背面でのタッチパネルの操作では画面が隠れないため、視覚情報を妨げない触覚フィードバックの提示が可能である。これにより、使用者がどのボタンを押しているか、操作を完了しているかの情報を視触覚で知覚可能になり、誤操作、操作のミスを減らすことが可能である。
2. 実物体と異なり、タッチパネル上でのアイコン等やスライダーの移動には、その重さ、摩擦などによる抵抗感がなく、どの程度動かしたかなどのフィードバックが得られない。これに対し、スライダーの位置に応じて段階的な触覚提示することにより、過度にスライドして音量の上げ過ぎる誤操作を防ぐこと等が可能である。

そこで本研究では、(1)押下方向に関しては、押下時にその圧力に応じて画面上のテクスチャを隆起的に変形し、その変形量を操作することで硬さ知覚を変化させる手法を提案する。また、(2)せん断方向に関しては、背面からの操作位置を示すカーソル等のポイントの位置・速度に変化を加えて表示し、実際の手の操作と視覚的に提示する操作位置のずれによって抵抗力・摩擦知覚を変化させる手法を提案する(図1)。

提案するこれらの擬似触覚提示手法が触覚知覚に与える影響を検証する実験をおこない、提案手法の効果について検証することとした。

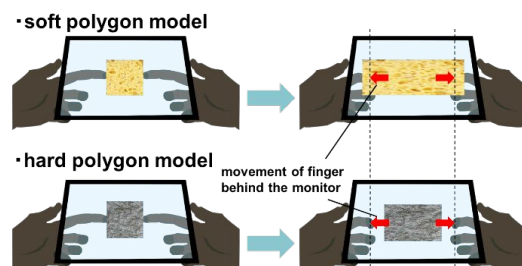


図1 提案する擬似触力覚システム概要

4. 研究成果

(1) 画像の隆起変形による押下方向の擬似力覚提示

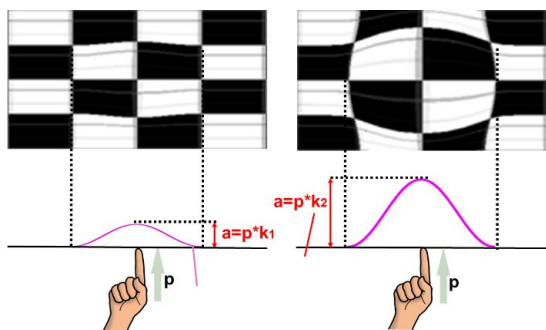


図2 sin 波形状のテクスチャ変形

実世界の多くの物は押下圧力によって変形し、人間は反発力だけでなく、視覚的な変形によってその硬さを知覚している。そのため、視覚的に提示する変形量を変調して提示すると、その硬さの知覚も変化する。

この知見から、背面タッチパネルと視触覚融合の効果を利用し、背面からの押下圧力に対してテクスチャを隆起的に変形し、その変形量を様々に変化させることで硬さ知覚を操作できるのではないかと考えた。この手法では、視覚的な変形量と同じ押下圧力に対して変化することで、その押下の反発力に対する知覚が変化し、硬さの知覚が変化すると考えられる。

プロトタイプとして、背面からの押下圧力を取得するために感圧センサを張り付けた Android 端末を用いた。前面の画面にはテクスチャを表示し、背面からの押下圧力に応じて手前方向に隆起的に変形した。センサは圧力のみを取得するため、常にセンサ中央を押させ、対応する前面の位置で画像を隆起変形した。画像変形は sin 波の形状(図 2)で提示し、その変形量は

$$h = k \cdot p \cdot \left(1 + \cos\left(\pi \cdot \frac{d}{r}\right)\right) \cdot \frac{1}{2} \quad (1)$$

で定義した。式(1)において、 h は各 pixel での画面垂直方向の変形量で、変調パラメータ k 、押下圧力 p 、押下位置からの距離 d によって定義されることを表す。また r は変形の範囲であり、押下圧力 p に比例する。 p の値がセンサの上限値かつパラメータ $k=1$ の時、テクスチャ中心($d=0$)での変形量は、画面上で約 5mm に相当する。用いたセンサの検出限界値は約 3.2[kg/inch²]であった。また、変形範囲 r は圧力値に比例し、検出可能な最大圧力値において表示するテクスチャの 1/2 のサイズ(36*22[mm])の楕円形の範囲になるよう設定した。

テクスチャの隆起変形による視覚フィードバックが触覚に与える要素として、変形量が増加すると押下時により柔らかいと知覚されると仮説を立てた。これに対して、提案する画像の隆起変形による擬似力覚提示

において、変形のパラメータ k に対してどの程度柔らかさが変化して知覚されるかを検証する実験を行った。

変調パラメータに対する知覚変化を検証するため、パラメータ k の値として、その比率が 0:1:2:3:4 となる 5 種類を用意した。実験の各試行では 2 肢選択によって評価を行い、一對の異なるパラメータに関して、順番に背面から押下する操作を行わせた。その後、比較した 2 種類のモデルが指の触覚としてどちらが柔らかいと感じたか、もしくは同程度に感じたかで回答させた。操作の際の注意点として、画面中心を押下すること、画面を注視し、触れてからぐっと押し込むよう指示した。試行回数は各組み合わせに対して、順序を含めて 6 回ずつの計 60 回行い、被験者間で順序がランダムになるように設定した。途中 30 回で 5 分休憩を挟み、実験には 30 分程度を要した。また、実験終了後に実験中に気づいたこと等を自由に回答するアンケートを行った。被験者は擬似触覚の分野に詳しくない 20 代男性 12 名に対して行った。

実験の結果として、変形をしない($k=0$)モデルよりも変形のあるモデル($k=1,2,3,4$)の方が柔らかいと回答された割合を図 3 に示す。この結果は、8 割以上の被験者がテクスチャ変形による視覚フィードバックによる硬さ知覚変化を感じており、背面タッチパネルを利用した擬似力覚提示によって押下方向の触覚が変化することを示している。

次に、比較した変形パラメータの比(Ratio = k_1/k_2 , ただし $k_1 > k_2$)に対して、変形量の大きいモデルを柔らかいと回答した割合を図 4 に示す。このグラフから、変形パラメータの比が大きくなるにつれ、モデル間の柔らかさの差が知覚される割合が増加している。また、比が 1.5 未満または 3.0 より大きい場合は漸的に収束しており、1.5 から 3.0 の間で、被験者が知覚する硬さを段階的に変化させることが可能と示唆された。

これらの結果から、「画像の隆起変形による視覚フィードバックで柔らかさ知覚が変化し、またその変形量の増加に対してより柔らかいと知覚される」という仮説は正しいと言える。硬さ知覚が変化した原因として押下による物体(ここではセンサを貼付した端末背面)の物理変形と、提示しているテクスチャの視覚的な変形に対応があり、同じ圧力で押下した際の視覚的な変形量が変化することによる関係性の齟齬が触覚知覚に影響を与えたと考えられる。

実験後のアンケートでは、多くの被験者は変形量が大きすぎるとテクスチャ変形に違和感を覚えると回答した。また、図 3 において、 $k=3$ よりも $k=4$ のモデルと変形なしのモデルと比較した場合の方が知覚に差がないことが見てとれる。これらの点から、硬さの知覚を操作するには変形量を適切な範囲で段階的に変化させる必要があると考えられる。

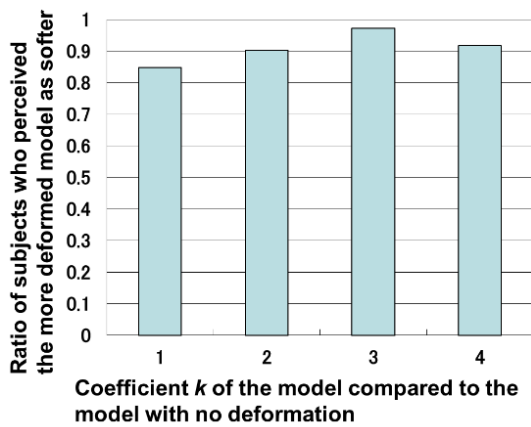


図3 変形したモデルが変形しないモデルよりやわらかいと回答した割合

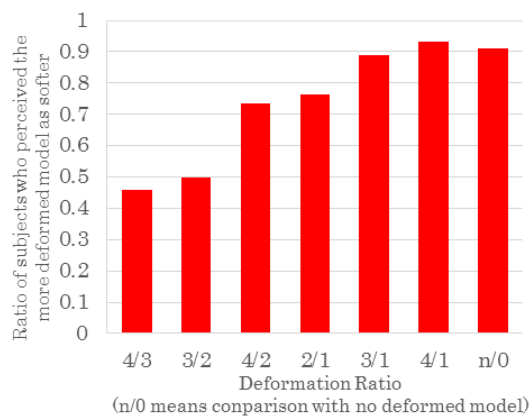


図4 変形パラメータの比に対して変形量の大きいモデルを柔らかいと回答した割合

(2)カーソルの位置・速度の変調によるせん断方向への擬似力覚提示

コンピュータのマウス操作では、実際のマウスの速度に対して、表示するカーソルの速度を変化させることで、せん断方向の力覚を感じる事が知られている。これに対して、背面タッチパネルにおいても、直接視認できない背面の操作に対して、視覚的に提示するタッチ位置を示すポインタに位置・速度の変化を加え、ずらして提示することでせん断方向の触覚提示が可能であると考えた。

筆者らは、先行実験として PowerCursor を前面タッチパネル、背面タッチパネル、マウスでのカーソル操作に実装し、それぞれの条件での触覚変化の程度を比較検証した、その結果、背面タッチパネル条件では、前面タッチパネルよりも高い知覚操作効果が見込め、マウス操作と同程度の効果が得られることを確かめた。一方、カーソルの視覚フィードバックのみでは背面からの操作感が得られず、知覚変化があまり生じないことが示唆された。

背面からの操作感を向上させるためには、LucidTouch (P.Baudisch, 2009) のように手の画像を提示する方法が考えられる。これに



図5 背面同士でモバイル端末を張り付けたプロトタイプ

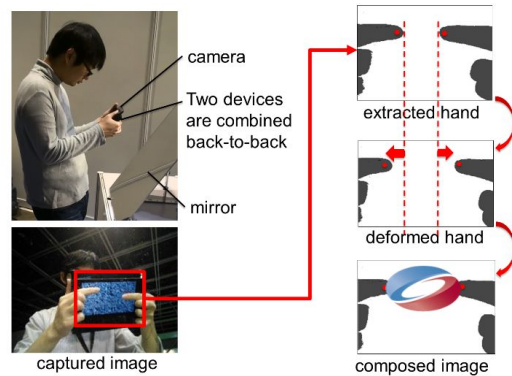


図6 手の画像を変調提示するシステム

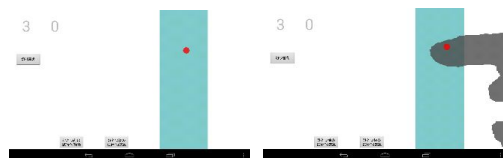


図7 実験中のカーソル条件(左)、手の変調提示条件(右)

より、カーソルと比べポインタに対する操作感が増し、提示する視覚的なずれに対してより鋭敏に触覚を操作できるようになると考えられる。そこで、背面操作に対するポインタとして手の画像を用い、画像を変形して提示することによって擬似触覚を生起する手法を提案し、カーソルと提案手法での触覚変化を比較検証した。

システムのプロトタイプとして、2 台の Android 端末を背面同士で張り合わせ、背面タッチパネルを構成したシステム(図5)を用い、図6のシステムを実装した。手の画像変形による視覚フィードバックは、背面での操作画面をカメラで取得し、変形することにより構成した。

プロトタイプでの画像は次のプロセスに従って処理をし、構成した。端末後方に設置した鏡によって反射した画像を端末背面のカメラで取得する。画像に含まれる、背面側のタッチディスプレイに表示したマーカーから、ディスプレイに対応する範囲の矩形領域を抽出する。抽出した画像から、肌色をベースとして手の画像を抽出する。背面でのタッチ点と、位置・速度の変化から計算した指先のポインタ位置に合わせて手の画像を拡大・縮小変形する。

これらの処理によって提示される手の変形画像を提示し、実際に操作する手と提示す

る手の視覚的な動きのずれによって擬似触覚を提示する。

視覚フィードバックとして、カーソルのみを変調提示した場合と、手の画像を付加して変調提示した場合で、変調のパラメータによる触知覚の変化を検証した。手の画像の視覚フィードバックの与える要素として、カーソルのみを表示と比べ、手の画像を提示することでポイントに対する操作感が増し、Pseudo-haptics がより強く生起することで触知覚がより細かく変化すると仮説を立てた。

各試行は、2 肢強制選択法(2AFC 法)を用い、一対の異なる変調パラメータでの比較で行った。実験時の画面は図 7 の様になっており、緑色の矩形領域上でカーソル又は手の画像に変調が加わる。

実験条件として、カーソルのみを提示する条件(カーソル条件)と、カーソルと変形した手画像の両方を提示する条件(手の変調提示条件)の二つを用意し、各試行は両者で共通の次の手順で行った。まず、矩形領域での変形量を 1 つ目のパラメータに設定し、被験者にはカーソルを幅 3cm の矩形領域の左端から右端まで操作させた。次に、被験者が切り替え用のボタンを押すと比較する 2 つ目のパラメータが設定され、1 つ目と同様にカーソルを操作させた。最後に、どちらのパラメータでより指の感覚として抵抗力を感じたかを選択させ、次の試行に移るサイクルで行った。どちらも同じ程度に抵抗力を感じた場合は、被験者にはどちらか一方をランダムに回答させた。パラメータの切り替えは 1 回のみとした。

位置の変調は、矩形領域の左端からの移動量に対して、表示されるポイントの移動量を変化させることで提示した。パラメータは 5 種類用意し、それぞれ表示するポイントの移動量が画面平面内の水平方向で 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 倍(CD ratio が 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6)となるように設定した。これらの 5 種類のパラメータ間での一対比較では、CD ratio の差は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 の 4 パターンである。これらの CD ratio の差になるようなパラメータの選び方は複数あるが、それぞれで試行回数が均等になるようにした。各 CD ratio の差に対してはそれぞれ 24 回の全 96 回の試行をカーソル条件、手の変調提示条件でそれぞれ行った。

実験全体はカーソル条件、手の変調提示条件の 2 回に分け、一日以上時間を置いて行った。96 回の試行中でも疲労を考慮し、16 回毎に必ず 2 分以上の休憩を取らせた。これに加え、被験者が疲労を感じた際は自由に休憩を取らせた。実験は休憩を含め約 40 分間で行った。また、実験終了後に自由回答の簡単なアンケートを行った。

レンダリングに関しては、平均で約 30fps(33.6ms)程度であり、実験参加者にはカメラからの画像取得の遅延による影響を避

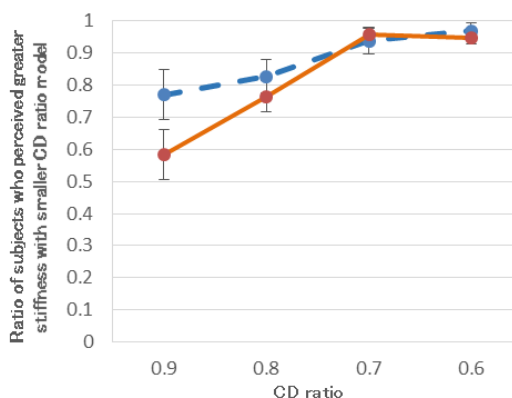


図8 カーソル条件(点線)と手の変調提示条件(実線)での CD ratio が 1.0 のモデルと比較し、より抵抗力を感じると回答した割合(±標準誤差)

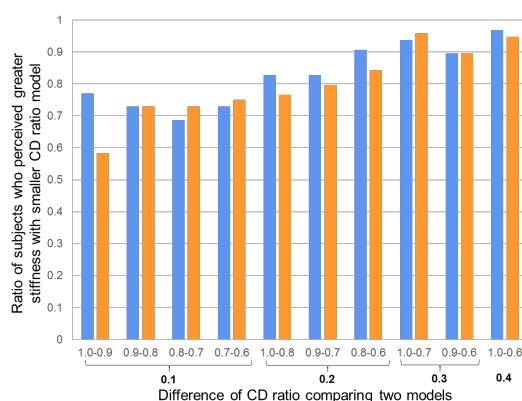


図9 カーソル条件と手の変調提示条件で CD ratio の小さいモデルでより抵抗力を感じると回答した割合(±標準誤差)

けるため、指を速く動かし過ぎないように指示した。

実験の結果として、CD ratio が 1.0 のモデルに対して、変調を加えた 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 のモデルをそれぞれ提示した際に、後者でより抵抗力を感じると回答した割合を図 8 に、比較したモデルの CD ratio の差に対して、CD ratio が小さいモデルでより抵抗力を感じたと回答した割合を図 9 に示す。

図 8 に関して、CD ratio と視覚フィードバックの 2 要素に対して 2 元配置の分散分析を行った結果、カーソルのみを表示する条件と手映像に変調をかけて提示する条件に関して、比較した際に抵抗力を知覚する割合に有意傾向が見られた($F(1,84)=3.1, p<.10$)。また、ポイントの位置変化による CD ratio のパラメータ間で有意差が見られた($F(1,84)=14.2, p<.05$)。一方で、図 8 からは、CD ratio が 0.7 と 0.6 で抵抗力の知覚変化がほとんどなく、CD ratio が 0.7 の付近で値が飽和していることが読み取れる。これは、手の画像を変形して表示する効果が CD Ratio が大きい時に特に有効であり、CD Ratio が

小さい時にはあまり効果が見られないことを示唆している。

図9と2元配置分散分析の結果から、CD ratioを変化させた際の触覚知覚の変化には、手の変調表示ありの場合に有意傾向があることが分かった。また、手の変調表示あり、なしに関して、それぞれCD ratio間でTukey法による多重比較検定を行った結果から、手ありの場合のみCDratio0.9と0.7, 0.9と0.6の間で知覚に有意差が見られた($p < .01$)。

これらの結果から、段階的又は連続的な触覚知覚変化の提示に関しては、手を表示することによって向上したことが示唆された。その一方で、各パラメータ間では有意な差が見られないものもあり、要求事項を完全に満たすものではなかったと言える。

今回のシステムにおいて、背面での実際の操作点に対し、前面のディスプレイで表示する対応するポイントに位置・速度を加えて提示することにより、Pseudo-hapticsを生起するというものであった。これに対し、マーカーのみの場合、背面での操作に対応するポイントとして感じられにくく、パラメータの差による位置変化の差が知覚されにくかったことが知覚割合の変化が小さかった原因として考えられる。また、図8の結果ではカーソル条件では比較したモデルのCD ratioの比と知覚割合に相関がみられず、これに関しても同様にパラメータの差によっては知覚がほとんど変化しないため、知覚操作が難しいことが示唆された。

一方、手の画像を変調して提示した場合、提示される手の動きによって背面操作との対応が直観的に分かるため、パラメータの変化に対してより細かく触覚知覚が変化したと考えられる。また、手の画像を変形して表示する効果は、一定以上のCD Ratioの範囲でなければ強く発揮されないことが示唆された。

図9に関して、比較したモデルのCD ratioの差に対しては、カーソル条件と手の変調表示条件で、抵抗力の知覚割合に有意差は見られなかった。これは、上述したように、0.7より小さいCD Ratioを提示したときには手の変調の効果がほとんどなかったことが影響しての結果であると考えられる。本実験で検証したCD Ratioの範囲においては、CD Ratioの差よりも、その絶対的な大きさが効果の発生に影響を与えたと考えられる。そのため、どのCD Ratioの範囲であれば手を表示することの効果が見れるかについて、CD ratioが0.7までの範囲でより細かく知覚変化を検証したり、CD ratioが1.0より大きい範囲でも比較を行うなどして、丁度可知差異等のパラメータを今後より詳細に明らかにしていく必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

鳴海拓志, Pseudo-haptics 応用インタフェー

スの展望: 疑似触力覚提示からその先へ, システム制御情報学会誌, Vol.61 No.11, 2017. (解説論文)

国分新, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 背面タッチパネルを用いた擬似力覚によるモバイル端末での触覚提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.19 No.4, pp.571-580, 2014年12月。(査読有)

〔学会発表〕(計5件)

鳴海拓志, 宇治土公雄介, 伴祐樹, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: タッチパネルでの背景移動量操作による疑似触力覚提示において手が見えることの効果の検証, 第21回日本バーチャルリアリティ学会大会予稿集, 2016年9月14日, つくば国際会議場(茨城県つくば市)

Yusuke Ujitoko, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Koichi Hirota and Michitaka Hirose: Yubi-Toko: Finger Walking in Snowy Scene using Pseudo-haptic technique on Touchpad, SIGGRAPH ASIA 2015 Emerging Technologies, Nov. 2-5, 2015, Kobe Convention Center (Kobe, Japan)

宇治土公雄介, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 広田光一, 廣瀬通孝: タッチパネル上での反復動作におけるPseudo-haptics, 第20回日本バーチャルリアリティ学会大会, 32A-1, 2015年9月11日, 芝浦工業大学(東京都江東区)

鳴海拓志, 国分新, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 押下圧力計測に基づく視触力覚相互作用の評価, 第20回日本バーチャルリアリティ学会大会, 32A-2, 2015年9月11日, 芝浦工業大学(東京都江東区)

国分新, 伴祐樹, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: 背面タッチパネルを用いた手の画像の変調提示による擬似力覚の生成, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 日本バーチャルリアリティ学会第19回大会, 2014年9月18日, 名古屋大学(愛知県名古屋市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鳴海 拓志 (Takuji Narumi)

東京大学・情報理工学系研究科・講師

研究者番号: 70614353

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

廣瀬 通孝 (Michitaka Hirose)

東京大学・情報理工学系研究科・教授

研究者番号: 40156716

谷川 智洋 (Tomohiro Tanikawa)

東京大学・情報理工学系研究科・特任准教授

研究者番号: 80418657

(4)研究協力者

なし