

携帯端末背面における空中ジェスチャを用いた ターゲット選択手法

石井 晃^{1,a)} 阿達 拓也¹ 島 佳吾¹ 中前 秀太¹ 志築 文太郎² 高橋 伸²

概要：スマートフォン等のタッチパネル端末（以下，端末）において，画面内のターゲットの選択はタッチにより行われる．しかしタッチによる選択の際に画面が指によって遮蔽されるオクルージョンが発生する．そのため，タッチするターゲットは十分に大きくなければならない．このオクルージョンが発生する問題に対し本研究においては，端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法を示す．提案手法は，端末の背面カメラにより検出した手の位置に応じて画面上にポインタを表示する．また，ユーザは親指を曲げる操作により選択を行う．端末の背面空間にてターゲット選択操作を行うためオクルージョンが発生しない．また，画面上に表示されたポインタにより選択対象が明確にわかるため，ユーザは小さなターゲットであっても容易に選択することが可能である．提案手法の性能を調べるためターゲット選択精度および作業負荷を評価する実験を行った．結果，提案手法は従来のタッチによる選択よりもエラー率が低く，タッチによる選択が困難なターゲットサイズ（1.9 mm × 1.9 mm）においても選択することが可能であることが分かった．また，提案手法をバーチャルリアリティ環境におけるターゲット選択手法として応用し，その環境下における選択精度評価を行った．結果，7.7 mm × 7.7 mm のターゲットを 90.1% の精度にて選択可能であった．

1. はじめに

スマートフォン等のタッチパネル端末（以下，端末）において，画面内のターゲットの選択はタッチにより行われる．しかしタッチによるターゲット選択は，画面が指によって遮蔽されるオクルージョンが発生するため，ユーザが小さなターゲットを押し分けることは困難である [1]．そのため，タッチされるターゲットは十分に大きくなければならない．Google は，ターゲットの幅および高さを 48 dp すなわち 7.7 mm 以上とし，かつターゲット間に余白を設けることを推奨している [2]．

このオクルージョンが発生する問題に対し我々は，端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法である FistPointer を示す（図 1）．FistPointer は，端末の背面カメラにより検出した手の位置に応じて画面上にポインタを表示する．ユーザは図 1 に示す姿勢にて手を動かすことによりポインティングを行った後，親指を曲げる操作

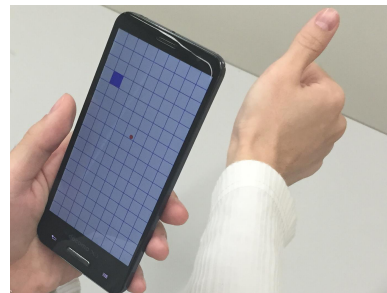


図 1 FistPointer の概観．

Fig. 1 Overview of FistPointer.

（クリック操作）によりターゲット選択を行う．提案手法では，端末の背面空間にてターゲット選択操作を行うためオクルージョンが発生しない．また，画面上に表示されたポインタにより選択対象が明確に分かり，かつユーザはタッチではなく指を曲げる操作によりターゲット選択を行うため，ユーザは小さなターゲットであっても容易に選択することができる．

また，提案手法は手の検出に端末の背面カメラのみを用いるため，ハコスコ [3] のようなスマートフォンを用いたヘッドマウントディスプレイ（HMD）向けのターゲット選択手法として追加の機器無しに応用可能である．現在のスマートフォンを用いた HMD スでは，ユーザがタッチパネ

¹ 筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻

Department of Computer Science, Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

² 筑波大学システム情報系

Faculty of Engineering, Information and Systems, University of Tsukuba

a) ishii@iplab.cs.tsukuba.ac.jp

ルに触れることができないため、アプリケーションへの入力操作は端末の傾きに基づくものが主である。一方、提案手法は、ユーザにタッチパネルに触れることなくターゲット選択を行うことを可能とするため、スマートフォンを用いた HMD に対する新たな入力手法となり得る。

今回、我々は提案手法の性能を調べるためターゲット選択速度、精度、および作業負荷を評価する実験を行った。また、提案手法をバーチャルリアリティ (VR) 環境におけるターゲット選択手法として応用し、その環境下における選択精度評価を行った。本稿では、これらについて報告する。

2. 関連研究

提案手法は、端末の背面カメラを用いてユーザの手の動きを認識することによるポインティング手法である。よって、ユーザの手および指の動きをカメラにて認識し、端末操作に活用する操作手法が関連する。また、提案手法は HMD 向けのターゲット選択手法として応用可能であるため、それらのポインティング手法とも関連する。

2.1 カメラを用いた端末操作手法

これまでもカメラを用いて検出した手、指を用いるポインティング手法が提案されてきた。Baldauf ら [4] は、検出した指先の位置によりポインティングを行うインタフェースを提案した。この研究では、クリック操作については述べられていないが、我々はこの研究とは異なる手の姿勢にてポインティングを行い、かつクリック操作も実装している。Lv ら [5] は検出した指の方向により独自の GUI を操作する手法を示した。本研究は指の方向ではなく、手の 2 次元座標を利用する点において異なる。Song ら [6] はカメラで検出した空中における手のジェスチャによる操作を提案した。この研究は手のジェスチャを特定の動作の起動および補助に用いているが、我々の研究では手をポインティングに用いる。

また携帯端末に外部カメラを取り付けることによりポインティングを可能とする研究もなされてきた。新倉ら [7] はハイスピードカメラと赤外線 LED を用いて指の追跡を行った。Wigdor ら [8] は、Web カメラを用いて端末の背面タッチを認識し、10 本指でのマルチタッチ入力を可能とした。我々の手法では、携帯端末に内蔵されたカメラのみを用いてポインティングを可能とするため、外部機器は不要である。

2.2 HMD を用いた VR 向けのポインティング手法

HMD に表示されたターゲットの選択などを可能とするために、VR 向けのポインティング手法が提案されてきた。例えば、Web カメラを用いて認識した手によるポインティング手法がある。杉浦ら [9] は、指先で HMD に表示された

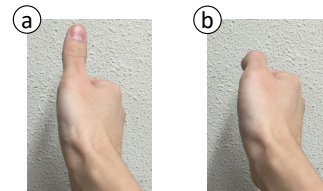


図 2 本手法に用いられる手の姿勢。

Fig. 2 Hand postures used in our technique.

仮想ボタンを指にてタッチする研究を行った。加藤ら [10] は、手のジェスチャによるクリックおよびポインティングを開発し、HMD に表示されたターゲット選択において、マウスによる選択の速さと比較する実験を行った。

Lee ら [11] は HMD の正面にタッチパネルを取り付けることによりユーザのタッチを認識し、仮想空間へのインタラクションを可能とした。Lee らの手法は仮想空間のターゲット選択として、手の動きに応じて移動するポインタを用いる。Petry ら [12] は、HMD の前面に取り付けられた Leap Motion により、ユーザの顔の前での手の左右の動きを取得し、パノラマビデオの操作を行っている。Petry らの手法は顔と手の距離に応じて操作を切り替えているが、提案手法では顔と手の距離に応じてポインタの移動量を調節することができる。

以上の研究は、ユーザの手を認識するために追加の機器を用いているが、提案手法は端末に内蔵されたカメラを用いて手の認識を行うため、追加の機器を取り付ける必要がない。そのため、スマートフォンを用いた HMD に対して容易に応用可能である。

3. 提案手法 : FistPointer

FistPointer は、ユーザが図 2a に示す姿勢にて手を動かすことによりポインティングを行った後、図 2b に示すように親指を曲げる操作 (クリック操作) によりターゲットの選択を行う手法である。端末の背面カメラから得た RGB 画像 (今回の実装では 320×240 ピクセル) 中の手の位置に応じて画面上にポインタを表示し、画像中の手の形状からクリック操作の判定を行う。本節にて、手の検出、ポインタ座標の決定、およびクリック操作の判定方法を示す。

3.1 手の検出

まず RGB 画像の各画素が手に相当するか否かを決定する。これには各画素に対して Song ら [6] の式 (1) を用いた。

$$S(u) = \begin{cases} 1 & (\min(R(u) - G(u), R(u) - B(u)) > \tau) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

$R(u)$, $G(u)$, $B(u)$ はそれぞれ座標 u にある画素の RGB 値であり、 τ は閾値である。結果として $S(u)$ は、座標 u が



図 3 ポインタの座標.

Fig. 3 Coordinate of the pointer.

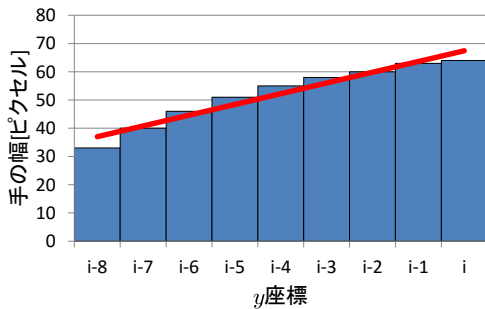


図 4 y 座標 i における回帰直線 (赤線).

Fig. 4 Regression line (red line) at y -coordinate i .

手に相当する場合には 1, それ以外の場合には 0 となる。
 次に各 y 座標において $S(u) = 1$ となる画素群のうち最も幅のあるものを手とする。これにより、手の幅より小さなノイズを除去することが可能である。なおユーザは環境光および肌の色に応じて τ を調整する必要がある。ただし閾値は 1 つのみであるため、調整は容易である。

3.2 ポインタの座標の決定

本手法ではクリック操作の際にポインタの位置に対する影響を最小限に抑えるために、親指の動きに影響を受けない位置である手の右上 (図 3 に赤い丸で示されている位置; 人差し指の付け根に相当) をポインタとした。このポインタの座標を (x_p, y_p) とする。

各フレームにおけるポインタ座標を求めるには、まず y_p を先に求め、次に y_p をもとに x_p を求めることとした。最初に、各 y 座標における手の幅を求める。次に y 座標 i において、 i を含む直前の 9 つの y 座標 (y_i, \dots, y_{i-8}) における手の幅の回帰直線の傾きを求める (図 4)。この回帰直線の傾きを指先以降のすべての y 座標に対して求める。各 y 座標における手の幅をヒストグラムで、回帰直線の傾きを折れ線グラフで表すと図 5 のようになる。この図から、親指の先および親指の付け根において傾きが大きくなっていることが分かる。特に、親指の付け根は親指の先と比べても傾きが大きい。そこで、回帰直線の傾きのピークを見つけ、そこを y_p とした。 x_p は y_p において手と認識された画素群のうち右端の x 座標とした。

ポインタ座標を決めるために手の幅を利用すること、およびクリック操作の判定に親指を検出する必要があることから、カメラ画像には手全体が映っていないといけない。

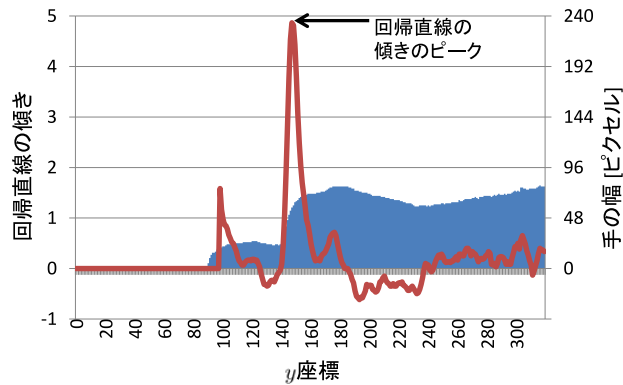


図 5 各 y 座標における手の幅 (青ヒストグラム) および回帰直線の傾き (赤折れ線グラフ).

Fig. 5 Hand's width (blue histogram) and slope of the regression line at each y -coordinate (red line).

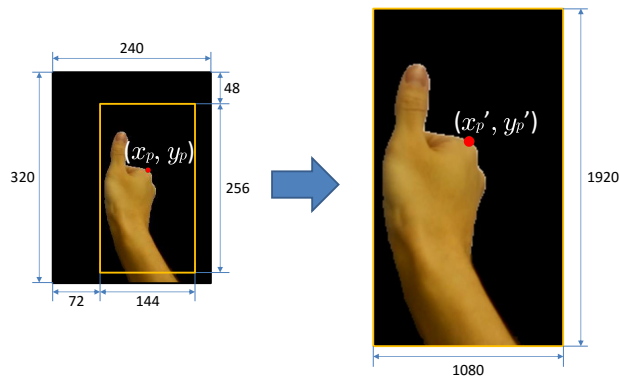


図 6 カメラプレビューと操作領域間のポインタの位置関係.

Fig. 6 Positional relation of the pointer between the camera preview and the control region.

これにより手が移動できる範囲が限られるため、ポインタ座標の取りうる値の範囲は実際のカメラ画像のサイズよりも狭くなる。そこで、図 6 の黄色の矩形領域内のポインタの座標が操作領域に写像されるようにした。写像後の座標 (x'_p, y'_p) はそれぞれ式 (2), (3) にて表される。

$$x'_p = \begin{cases} 0 & (x_p < 72) \\ (x_p - 72) \times 7.5 & (72 \leq x_p \leq 216) \\ 1080 & (x_p > 216) \end{cases} \quad (2)$$

$$y'_p = \begin{cases} 0 & (y_p < 48) \\ (y_p - 48) \times 7.5 & (48 \leq y_p \leq 304) \\ 1920 & (y_p > 304) \end{cases} \quad (3)$$

なお、本手法はカメラ画像からポインタ座標を決定するため、カメラと手の距離に応じてポインタの移動量を調節することができるという特徴を持つ。

3.3 クリック操作の判定

親指座標がポインタ座標に近づいたとき、クリック操作

が行われたとした。まず、手として認識された画素のうち、最も y 座標が小さい画素群の中央座標を親指座標 (x_t, y_t) とする。手の大きさ、およびカメラまでの距離の変化に対応できるように、 y_p における手の幅を親指の高さ (y_t から y_p までの長さ) で割った値を求める。この値が閾値 (今回は実験的に求めた 1.6) を超えたとき、クリック操作が行われたと判定する。

4. 被験者実験 1 : FistPointer の性能評価

FistPointer の性能を調べるためターゲット選択速度、精度、および作業負荷を評価する実験を行った。比較のために本評価実験においてはタッチ、FistPointer、FistPointer (拡大) の 3 手法によるターゲット選択タスクを行った。

4.1 被験者および実験機器

被験者として大学生および大学院生 6 名 (男性 5 名, 女性 1 名, 年齢 22–23 歳, 平均 22.3 歳) を雇用了。すべての被験者は日常的にスマートフォンを使用しており, その利用歴は 36–63 ヶ月, 平均 50.8 ヶ月であった。なお, すべての被験者は右利きであった。実験終了後, 実験への参加に対する謝礼として各被験者に 1,640 円を支払った。

実験には, Android 端末 (ELUGA P-03E, 端末サイズ: 高さ 132 mm × 幅 65 mm × 厚さ 10.9 mm, 画面サイズ: 4.7 インチ, 解像度: 1920 × 1080 ピクセル, OS: Android 4.2.2) を用いた。

4.2 比較手法

タッチ

ターゲットに右手人差し指で触れることにより選択を行う。選択の判定は画面に指が触れた瞬間に行われる。

FistPointer

ターゲットにポインタの中心を重ねた後, クリック操作により選択を行う。被験者がクリック操作を行うと, 端末が振動する。また, ターゲットの領域内にポインタの中心が重なっている間, ターゲットの色が青色から緑色に変わる。

FistPointer (拡大)

FistPointer と同様にターゲットの領域内のポインタの中心を重ね, クリック動作により選択を行う。ただし, ポインタが重なっているセルの領域が拡大され, 選択可能な領域が広がる。

4.3 ターゲットのサイズ条件

ターゲットの大きさがポインティング速度および精度にどのように影響を及ぼすか調査するため, 図 7 に示すように 3 種類の大きさのターゲットセットをサイズ条件として用意した。ターゲットは格子内に青で塗られた正方形のセルである。Google が推奨している最低のターゲットの幅

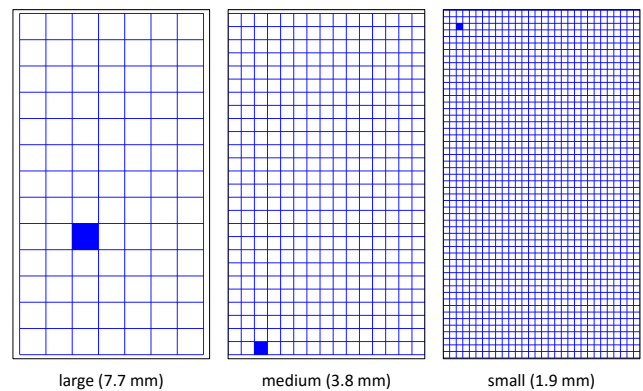


図 7 ターゲットのサイズ条件。

Fig. 7 Target size.

48 dp (今回使用した端末において 144 ピクセル) を最大とし, 1/2 ずつ小さくしたターゲットを 3 種類用意した。つまり, ターゲットの幅は 48, 24, 12 dp (7.7, 3.8, 1.9 mm) である。以降, それぞれ large, medium, small 条件と呼ぶ。図 7 に示すように, 各条件における格子の列数および行数はそれぞれ 7 × 13, 15 × 26, 30 × 53 となる。

4.4 実験手順

実験条件をそろえるため, 実験者は被験者に, 椅子に深く腰掛け, 左脇をしめ端末を左手にて把持し, 右手 (タッチの場合右手人差し指) を用いて選択を行うよう指示した。このとき右肘より先は体や机等で支えないよう指示した。その後, 被験者に FistPointer によるポインティングおよびクリック操作が正常に動作するかどうかを, 画面中央および四隅に出現するターゲットを選択することにより確認するよう指示した。正常に動作しなかった場合は, 実験者が閾値を調整してから再度動作確認を行うこととした。その後被験者には large 条件において, 操作に慣れるまで繰り返し中央および四隅に表示されたターゲットの選択を, 練習として行ってもらった。このとき被験者に, ターゲットをできるだけ速く, かつ正確に選択するよう指示した。

被験者に行ってもらったタスクは, 1 回のランダムな位置に表示されるターゲットの選択を 1 試行とし, 20 試行を 1 セッションとするタスクである。ターゲットは, 図 7 に示されるように画面上に青色で塗りつぶされたセルである。セッションは, 被験者が 1 つ目のターゲットの選択に成功した直後から開始される。20 回選択に成功すると格子が赤色になりセッションが終了する。被験者には, 手法ごとに large, medium, small 条件順に 2 セッションずつ行ってもらった。よって各被験者は, 合計 360 試行 (= 20 試行 × 2 セッション × 3 条件 × 2 手法) を行った。なお, 手法間のカウンタバランスをとるため, 被験者ごとに手法を

行う順番をランダムに変えた。疲労による影響を軽減するために、被験者にはセッション間に1分以上の休憩をとってもらった。また、被験者には2セッション(1手法1条件)終了するごとに、NASA-TLX[13]というアンケートに回答してもらった。NASA-TLXは6項目(精神的欲求, 身体的欲求, 時間的圧迫感, 作業達成度, 努力, 不満)に対して100段階の評価を与えた後, 各項目に対して重み付けを行い点数を算出することにより, 被験者の精神的な作業負荷を定量的に評価するためのアンケート手法である。ただし, [13]は英語にて記述されており, また本実験の被験者は全員日本語が第一言語であったため, 今回は三宅ら[14]によって日本語に翻訳されたものを使用した。全てのセッション終了後に, 被験者には使用感に関するアンケートに回答してもらった。本実験は, 実験説明から使用感に関するアンケートへの回答が終了するまでに90分程度の時間を要した。

4.5 実験結果

我々はKruskal-Wallisの検定により各条件の手法間の有意差の有無を検定した後, 有意差が認められた条件に対してDunnの方法を用いて多重比較を行った。本節ではこの多重比較により有意差が認められた結果を主に述べる。なお, これらの検定では有意水準を.05と定めた。また, medium条件およびsmall条件におけるタッチ, 全条件におけるFistPointerおよびFistPointer(拡大)に関して, ターゲットの中心の座標と選択した座標の x または y の差が $\mu \pm 3 \times \sigma$ (μ : 平均値, σ : 標準偏差)の範囲を外れる選択を外れ値として除外した。これは, ターゲットの選択に成功したあと誤って再びそのターゲットをタッチすること, およびFistPointerにおいて被験者の意図しないクリック操作判定があったためである。提案手法2種の全選択数における外れ値の割合は1.11%である。

4.5.1 試行時間

1試行に要した時間を図8に示す。large条件において, タッチの試行時間はFistPointer(拡大)より有意に短かった($p < .01$)。medium条件において, タッチの試行時間はFistPointerおよびFistPointer(拡大)より有意に短かった($p < .05$ および $p < .01$)。

4.5.2 エラー率

エラー率を図9に示す。ここではターゲットの領域外を選択した場合をエラーとし, 「エラー回数/選択総回数」と定義した。large条件において, FistPointer(拡大)のエラー率はタッチより有意に低かった($p < .01$)。small条件において, FistPointerおよびFistPointer(拡大)のエラー率はタッチより有意に低かった($p < .05$ および $p < .01$)。medium条件では, Shapiro-Wilkの検定およびLeveneの検定の結果から, 正規性と等分散性が認められたため, Tukey法を用いて多重比較を行った。その結果, FistPointerお

よびFistPointer(拡大)のエラー率はタッチより有意に低かった($p < .001$)。また, FistPointer(拡大)のエラー率はFistPointerより有意に低かった($p < .05$)。

4.5.3 作業負荷

NASA-TLXアンケートから得られた作業負荷を図10に示す。この値が低いほど作業負荷が少なく良い結果であるといえる。large条件において, タッチの作業負荷はFistPointerより有意に低かった。

4.6 考察

large条件, medium条件においてタッチの方が提案手法より有意に試行時間が短かった。一方small条件においては, タッチは提案手法よりもエラー率が優位に高く, 小さなターゲットをタッチすることは極めて困難であるため時間がかかったと推測される。

このことを確かめるため, small条件において選択時のポインタ座標がターゲットの中心からどれだけ離れているか調べた。タッチおよびFistPointerの各試行において, ターゲットの中心からみた選択時のポインタ座標を図11および図12にそれぞれ示す。図において赤色の円が各選択時のポインタ座標, 青色の矩形がsmallサイズのターゲット, 緑色の楕円が外れ値を除いた上で求めた $\mu \pm \sigma$ の範囲である。

図11, 図12から, タッチのポインタ座標のばらつきはFistPointerよりも大きいことが分かる。また, タッチの座標はターゲット中心に対して右上に多く分布している。これは, 右手人差し指で画面に触れる際, 指が画面に触れターゲットが完全に隠れる直前までターゲットを見ようとしたためであると考えられる。さらにsmall条件におけるタッチでは, 被験者が何度も画面をタッチしてようやく選択が成功する様子が観察された。これらのことから, 小さなターゲットをタッチすることは極めて困難であると分かる。一方, そのようなターゲットサイズにおいても, FistPointerは座標のばらつきが小さく, かつターゲット中心に多く分布していることが分かる。よって, FistPointerはタッチすることが難しいほど小さいターゲットサイズにおいても, 精度の高いポインティングを行うことができる。なお図12をみると, FistPointerは x 方向と比べて y 方向のずれが大きいことが分かる。これはクリック操作の際, 手が上下することに伴って連動してポインタがずれたためと考えられる。実験中に, 被験者の一人から「ポインタをターゲットに合わせたあとクリック操作により手自体がぶれる」という意見も得られた。この問題に対しては, クリック操作の開始を認識した時点でポインタの座標を固定するよう実装を変更するという改良が考えられる。これにより, このずれを抑えることができるため, よりポインティング精度が高まると考えられる。

すべてのサイズ条件において提案手法のエラー率はタッ

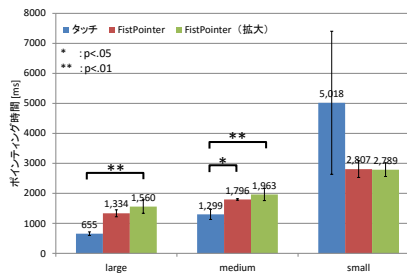


図 8 試行時間.
Fig. 8 Trial time.

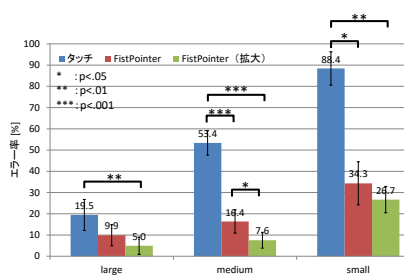


図 9 エラー率.
Fig. 9 Error rate.

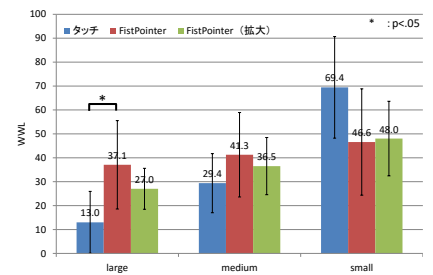


図 10 作業負荷.
Fig. 10 Workload.

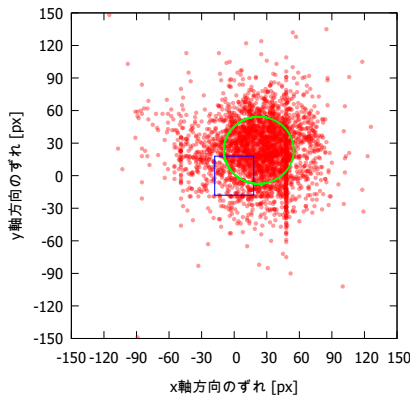


図 11 タッチのポインティング位置の分布.
Fig. 11 Distribution of the positions of touch.

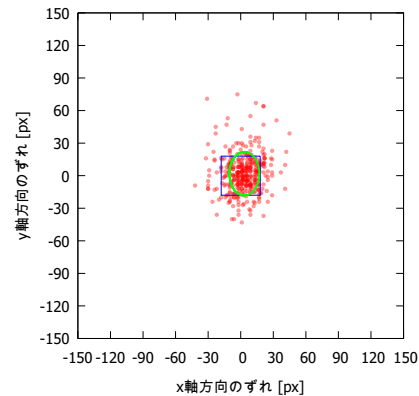


図 12 FistPointer のポインティング位置の分布.
Fig. 12 Distribution of the positions of FistPointer.

よりも低かった。このことから提案手法はタッチより精度の高いポインティング手法であると言える。また、medium 条件においては FistPointer (拡大) の方が FistPointer より有意にエラー率が低かった。このことから、ある程度ターゲットサイズが小さい条件において、ターゲットの拡大が有効であることが示唆される。

NASA-TLX の結果は、large 条件においてのみ、タッチの方が FistPointer より有意に作業負荷が低かった。NASA-TLX の評価項目の一つである身体的要求の値を確かめたところ、large 条件および medium 条件において FistPointer の値がタッチよりも高くなっていることから、手を一定の高さに保ちつつ操作し続けることは身体的な疲れを伴うことが示唆される。一方、medium 条件および small 条件においては手法間に有意差は見られなかった。よって、小さなターゲットの選択に失敗することによる作業負荷は、腕を上げ続けることと同程度であることが示唆される。

5. 被験者実験 2 : VR におけるポインティング性能評価

スマートフォンを用いた VR 環境における FistPointer のポインティング速度および精度を評価する実験を行った。本評価実験において、support 条件および non-support 条件の 2 条件におけるターゲット選択タスクを行った。

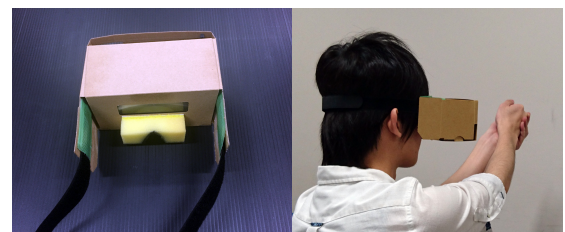


図 13 左 : 実験において使用した HMD. 右 : support 条件.
Fig. 13 Left: HMD used in the experiment. Right: Support condition.

5.1 被験者および実験機器

大学生および大学院生のボランティア 6 名 (男性 6 名, 年齢 21-24 歳, 平均 22.7 歳) を被験者とした。全ての被験者が日常的にスマートフォンを利用し、全員が右利きであった。スマートフォンの利用歴は平均 75.7 ヶ月であった。また、すべての被験者はスマートフォンを用いた VR アプリケーションを使用したことがなかった。

実験には Android 端末 (ELUGA P-03E, 端末サイズ: 高さ 132 mm × 幅 65 mm × 厚さ 10.9 mm, 画面サイズ: 4.7 インチ, 解像度: 1920 × 1080 ピクセル, OS: Android 4.2.2) をハコスコ タタミ 1 眼 [3] に装着した HMD を用いた。この HMD は手にて筐体を支える必要がある。しかし提案手法は両手を必要とする。そのため今回の実験ではゴム紐およびスポンジを用いて HMD を頭部に装着できるようにした (図 13 (左))。

5.2 比較手法および比較条件

FistPointer には、腕を伸ばしてポインティングするため長時間使用すると腕が疲れるという懸念がある。そこで、操作に用いる腕をもう一方の腕にて支えることが、どの程度ポインティング速度および精度に影響を及ぼすかを調査することにした。そのために、操作に用いる腕をもう一方の腕にて支える **support** 条件 (図 13 (右)), および支えない **non-support** 条件を支え条件として設けた。また被験者実験 1 と同じサイズ条件 (4.3 節) を用いた。

5.3 実験手順

実験者はまず、被験者に椅子に深く腰掛けるよう指示した。次に被験者の頭部に HMD を違和感なく、かつ頭を左右に振ってもずれないように装着した。その後、被験者に FistPointer によるポインティングおよびクリックが正常に動作するかどうかを、画面中央および四隅に出現するターゲットをクリックすることにより確認するよう指示した。正常に動作しなかった場合は、閾値を調整してから再度動作確認を行うこととした。その後被験者には large 条件において、操作に慣れるまで繰り返し中央および四隅の選択を練習として行ってもらった。このとき、実験条件をそろえるため、実験者は被験者に、右手を用いて FistPointer を行うよう指示した。また、ターゲットをできるだけ速く、かつ正確に選択するよう指示した。練習後、被験者は画面をタップすることによりタスクを開始した。

被験者に行ってもらったタスクは、1 回のランダムな位置に表示されるターゲットの選択を 1 試行とし、20 試行を 1 セッションとするタスクである。セッションは、被験者が 1 つ目のターゲットの選択に成功した直後から開始される。20 回選択に成功すると格子が赤色になりセッションが終了する。被験者には、手法ごとに large, medium, small 条件順に 1 セッションずつ行ってもらった。よって各被験者は、合計 120 試行 (= 20 試行 × 2 支え条件 × 3 サイズ条件) を行った。また、手法間のカウンタバランスをとるため、被験者を 2 グループに分け、一方を support 条件から、もう一方を non-support 条件から行うこととした。疲労による影響を軽減するために、被験者にはセッション間に 1 分以上の休憩をとってもらった。

全てのセッション終了後に、被験者には使用感に関するアンケートに回答してもらった。本実験は、約 40 分程度の時間を要した。

5.4 結果

被験者実験 1 と同様の手順にて実験結果の解析を行った (4.3 節)。1 試行に要した時間を図 14 に、エラー率を図 15 に示す。support 条件および non-support 条件間に優位な差は見られなかったものの、small 条件下においては support 条件の方が約 6.5% エラー率が低かった。

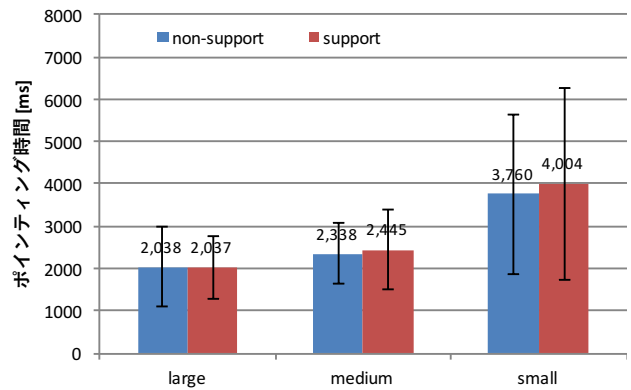


図 14 試行時間。

Fig. 14 Trial time.

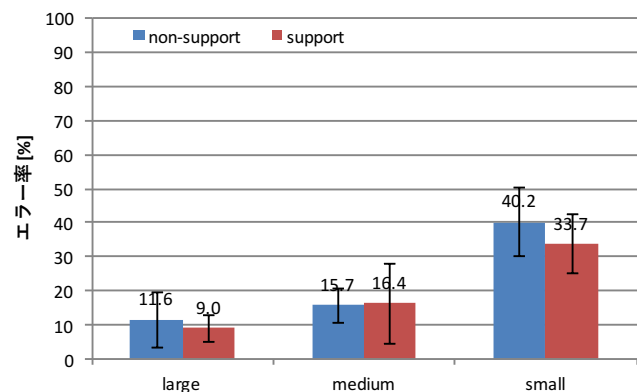


図 15 エラー率。

Fig. 15 Error rate

5.5 考察

実験結果からは support 条件による速度および精度への影響は無かった。よって提案手法を用いる場合、support 条件の姿勢にて用いれば、疲労を抑えつつ用いることができる可能性が示唆された。ただし、今回の実験においては、腕を支える位置は一箇所しか検討していない。そのため、腕を支える位置を複数箇所設定しそれらの条件下における速度およびエラー率を比較することにより、より最適な操作姿勢を特定する必要がある。

large 条件においては 90.1% の精度にて選択可能であり、VR コンテンツ内のメニュー選択などに応用が可能である。

6. 議論

被験者実験 1 における NASA-TLX の結果および実験後のアンケートから、長時間の FistPointer を利用し続けると、腕が疲れることが示唆された。長時間利用する際は、机に手をのせて移動することによりポインティングを行うように推奨するなど、腕が疲れる問題の解決策を検討する必要がある。

本研究における実験の目的は、FistPointer によるターゲット選択速度、精度、および作業負荷を評価することに

あった。また、今回の実装は実験時の環境のみを想定していたため、多様な環境で利用するためには、より頑強なノイズ除去を実装する必要がある。ノイズを除去し手を検出している研究は Sugiura ら [9] らおよび Song ら [6] により行われているので、今後はこれらの手法を参考にしながらノイズ除去を実装する。また、より高い精度にて手の位置を検出する方法として、手の特徴点を抽出する手法もある [15]。ただしこの手法は計算コストが高いため、精度とのトレードオフを考慮して適切な方法を検討する必要がある。

7. まとめと今後の課題

本稿では、端末の背面空間にて手を動かすことによるターゲット選択手法である FistPointer を示した。提案手法は外部機器を必要とせず、端末に内蔵されたカメラのみで実装可能である。提案手法の性能を調べるためのターゲット選択速度、精度、および作業負荷を評価する実験を行ったところ、小さなターゲットサイズにおいてタッチによる選択よりも有意にエラー率が低いことが分かった。また、提案手法は小さなターゲット選択時のポイントのばらつきがタッチによる選択よりも小さく、タッチでは選択が困難なほど小さなターゲットサイズであっても選択し分けることができた。

さらに、提案手法を VR 環境におけるターゲット選択手法として応用し、その環境下における選択速度および精度の評価を行った。large 条件においては 90.1% の精度にて選択可能であり、VR コンテンツ内のメニュー選択などに応用が可能である。また、VR 環境においては HMD を用いるためターゲット選択に両手を用いることが可能である。そこで、操作に用いる腕をもう一方の腕にて支える support 条件および支えない non-support 条件を支え条件として設け性能の比較を行ったが、支え条件による性能への影響は確認されなかった。

今後は、実環境利用に耐えうるようなノイズ除去を実装する。また、今回の VR 環境実験においては支える位置は一箇所のみしか検討していない。そのため、今後は複数箇所を検討しより最適な操作姿勢を特定する必要がある。

参考文献

[1] Siek, K. A., Rogers, Y. and Connelly, K. H.: Fat Finger Worries: How Older and Younger Users Physically Interact with PDAs, in *Proceedings of the 2005 IFIP TC13 International Conference on Human-Computer Interaction*, INTERACT '05, pp. 267–280, Berlin, Heidelberg (2005), Springer-Verlag.

[2] Google Inc., : Buttons - Components - Google design guidelines: <https://material.google.com/components/buttons.html#buttons-style>, 2016 年 8 月 8 日閲覧。

[3] HACOSCO INC., : スマホ VR のハコスコ — 360°動画で手軽に VR 体験: <http://hacosco.com/> (accessed 2016.7.27).

[4] Baldauf, M., Zambanini, S., Fröhlich, P. and Reichl, P.: Markerless Visual Fingertip Detection for Natural Mobile Device Interaction, in *Proceedings of the 13th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '11, pp. 539–544, New York, NY, USA (2011), ACM.

[5] Lv, Z., Halawani, A., Lal Khan, M. S., Réhman, S. U. and Li, H.: Finger in Air: Touch-less Interaction on Smartphone, in *Proceedings of the 12th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '13, pp. 16:1–16:4, New York, NY, USA (2013), ACM.

[6] Song, J., Sörös, G., Pece, F., Fanello, S. R., Izadi, S., Keskin, C. and Hilliges, O.: In-air Gestures Around Unmodified Mobile Devices, in *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '14, pp. 319–329, New York, NY, USA (2014), ACM.

[7] Niikura, T., Watanabe, Y., Komuro, T. and Ishikawa, M.: In-Air finger motion interface for mobile devices with vibration feedback, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 375–383 (2014).

[8] Wigdor, D., Forlines, C., Baudisch, P., Barnwell, J. and Shen, C.: Lucid Touch: A See-through Mobile Device, in *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '07, pp. 269–278, New York, NY, USA (2007), ACM.

[9] Sugiura, A., Toyoura, M. and Mao, X.: A Natural Click Interface for AR Systems with a Single Camera, in *Proceedings of Graphics Interface 2014*, GI '14, pp. 67–75, Toronto, Ont., Canada, Canada (2014), Canadian Information Processing Society.

[10] Kato, H. and Yanagihara, H.: PACMAN UI: Vision-based Finger Detection for Positioning and Clicking Manipulations, in *Proceedings of the 15th International Conference on Human-computer Interaction with Mobile Devices and Services*, MobileHCI '13, pp. 464–467, New York, NY, USA (2013), ACM.

[11] Lee, J., Kim, B., Suh, B. and Koh, E.: Exploring the Front Touch Interface for Virtual Reality Headsets, in *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, pp. 2585–2591, New York, NY, USA (2016), ACM.

[12] Petry, B. and Huber, J.: Towards Effective Interaction with Omnidirectional Videos Using Immersive Virtual Reality Headsets, in *Proceedings of the 6th Augmented Human International Conference*, AH '15, pp. 217–218, New York, NY, USA (2015), ACM.

[13] Hart, S. G. and Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research, Vol. 52, pp. 139 – 183 (1988).

[14] 三宅晋司, 神代雅晴: メンタルワークロードの主観的評価法, 人間工学, Vol. 29, No. 6, pp. 399–408 (1993).

[15] Kölsch, M. and Turk, M.: Fast 2D Hand Tracking with Flocks of Features and Multi-Cue Integration, in *Proceedings of the 2004 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, CVPRW '04, Washington, DC, USA (2004), IEEE Computer Society.