

研究論文

# 大画面ディスプレイのための 両眼視差を考慮した指差しインタフェース

吉村 圭悟<sup>1,a)</sup> 小川 剛史<sup>2,b)</sup>

受付日 2014年1月15日, 採録日 2015年5月29日

**概要:** 大画面ディスプレイに対する, 指差し動作を利用した直感的なユーザインタフェースに関する研究がさかに行われている. しかし, ユーザとディスプレイとの距離が大きく離れた状況では両眼視差が弊害となり, タッチパネルを操作するようにユーザがオブジェクトを1点で指差しして操作することが困難になる. 本論文では, ユーザがディスプレイに対して指差し動作を行った際にディスプレイに重なって見える両眼像の指を用いた「両眼視差インタフェース」を提案する. プロトタイプでは, RGB-D カメラを用いて得た指と両眼の座標を用いて指の両眼像の座標を推定してポインティングを可能にしており, 指の両眼像を用いた「選択/解除」「移動」「拡大/縮小」の基本操作を実装した. 大型スクリーンを用いて実施した被験者実験について述べ, 提案インタフェースの有効性について議論する.

キーワード: 両眼視差, 指差し位置推定, 大画面ディスプレイ, ユーザインタフェース, RGB-D カメラ

## Pointing Interface Considering Binocular Parallax for Large Displays

KEIGO YOSHIMURA<sup>1,a)</sup> TAKEFUMI OGAWA<sup>2,b)</sup>

Received: January 15, 2014, Accepted: May 29, 2015

**Abstract:** There have been many studies on intuitive user interfaces for large displays by using pointing movements. However, if a user cannot reach a display, object manipulations on the display are difficult because the user will see duplicate fingers due to binocular parallax. Therefore, in this paper, we propose Binocular Interface, which enables interactions with an object by using two pseudo fingers. In a prototype, pointing positions on the display are estimated on the basis of the positions of eyes and a finger detected by an RGB-D camera, and we implemented three basic operations (*select*, *move*, and *resize*) using duplicate fingers. We describe experiments using a large screen, and discuss effectiveness of our proposed interface.

**Keywords:** binocular parallax, pointing estimation, large display, user interface, RGB-D camera

### 1. はじめに

大画面ディスプレイに対する直感的なインタフェースとしてユーザのジェスチャを利用した操作方式に関する研究 [1], [2] がさかに行われている. たとえば, Vogel ら [1] は日常生活において行う身体動作の1つである指差し動作

に着目し, スクリーンに表示されたコンテンツの操作方法を提案している. 指差し動作を用いたインタフェースの多くは, レーザポインタでスクリーンを指示するように, 指の延長線上にポインタを表示しなければならないが, ポインタはコンテンツを見る際の妨げとなる場合がある. また, 大型のスクリーンなどでは, 複数のユーザが同時にコンテンツを操作することも考えられ, スクリーン上が多数のポインタにより煩雑となるだけでなく, 自身のポインタを見失う可能性も考えられる. 一方, ポインタを用いず, タッチパネルディスプレイでコンテンツを操作するように, スクリーン上に表示されたコンテンツに自身の指を重ねて操作することも考えられるが, 人は異なる距離にある物に

<sup>1</sup> 東京大学大学院学際情報学府  
Graduate School of Interdisciplinary Information Studies,  
The University of Tokyo, Bunkyo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>2</sup> 東京大学情報基盤センター  
Information Technology Center, The University of Tokyo,  
Bunkyo, Tokyo 113-8658, Japan

a) k.yoshimura@cml.t.u-tokyo.ac.jp

b) ogawa@nc.u-tokyo.ac.jp

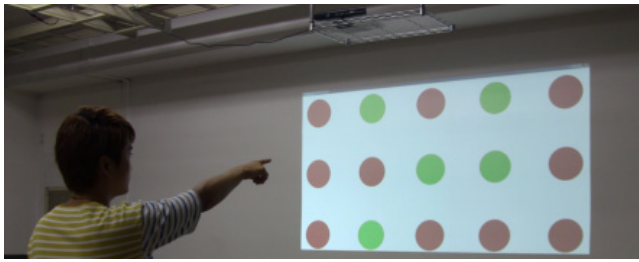


図 1 両眼視差インタフェースの概要  
Fig. 1 Overview of Binocular Interface.

対して同時に焦点を合わせることができないため、コンテンツと指を重ねて見ることはできず、ポインタを表示せずにコンテンツの操作を行うのは困難である。

そこで本論文では、ユーザから離れた位置にある大画面ディスプレイに提示されたコンテンツを操作するためのインタフェースとして、「両眼視差インタフェース」を提案する(図 1)。前述したとおり、スクリーンが離れた場所にある場合、コンテンツと指を重ねようとしても、スクリーンに焦点を合わせると両眼視差によって指が 2 本に見え、片目を閉じなければ重ねることができない。しかし、提案インタフェースでは、我々が日常生活で行っている自然な動作を、この両眼視差によって生じる 2 本の指を用いて、擬似的に再現することで、直感的で分かりやすい操作の実現を目指している。

以下、2 章では、大画面ディスプレイのためのインタフェースに関する関連研究について述べ、3 章では、両眼視差インタフェースの概要を述べる。4 章では、プロトタイプの実装について述べ、5 章において被験者実験による提案インタフェースの評価実験について述べる。6 章では、提案インタフェースの特徴について考察し、最後に 7 章において、本論文のまとめについて述べる。

## 2. 関連研究

大画面ディスプレイのためのインタラクション手法がこれまでも多く提案されている。本章では、従来手法の問題点について述べ、提案手法の意義について述べる。

大画面ディスプレイに対する最も一般的な入力方式は、ユーザの指やペン型デバイスを用いたタッチインタフェースである。Liveboard [3] はグループミーティングやプレゼンテーション、遠隔協調作業などを提供するために提案されたシステムであり、3 つのボタンを搭載したペン型デバイスによるアプリケーションの操作を実現している。同様に Fluid Interaction [4] でもペン型デバイスによるダイレクトインタラクションを実現している。これらのシステムでは、自然なポインタ操作を用いてユーザは、ディスプレイ上での直接入力が可能であるが、大画面ディスプレイに手が届く範囲でしか利用できない。そのため、縦方向のディスプレイサイズが大きくなっても利用できないと

いう問題があり、スケーラビリティの点で問題がある。

VisionWand [5] は両端に色がついたスティックを用いて、離れた場所にある大画面ディスプレイ上のコンテンツを操作するシステムである。ほかにも離れた場所の大画面ディスプレイのためのインタフェースとしてレーザーポインタを用いたシステムが提案されている。Olsen ら [6] は、グループミーティングを想定して、ディスプレイから離れたところからレーザーポインタとカメラを用いた入力システムを提案している。Myers ら [7] は、レーザーポインタを用いたインタラクション手法のための最適なレーザーポインタデバイスの基本性能とスクリーン上のレーザーポインタを正しく検出するための条件を、被験者実験により明らかにしている。また、Cheng ら [8] は、赤外光を用いた複雑な入力操作を提案している。このようなシステムでは、ユーザはつねに専用のデバイスを把持する必要があり、デジタルサイネージのような街角に設置されたディスプレイの前に偶然やってきた人が利用することは不可能である。

一方、Barehands [9] では、ジェスチャ入力を用いて大画面ディスプレイに表示されたオブジェクトを操作する手法を提案している。このシステムでは、手の姿勢を検出するためのカメラ追跡と大画面ディスプレイへのポインタを提供するためのスマートボードを採用している。Charade [10] は、大画面ディスプレイとのインタラクションにジェスチャ入力を利用しており、ユーザの手の追跡にはデータグローブを用いている。同様に、Vogel らはモーションキャプチャシステムを用いて手の三次元位置を取得することで、大画面ディスプレイの人差し指の方向にポインタを表示するシステムを提案した。新谷ら [11] や井村ら [12] は、指差し位置の推定精度に着目し、新たな指差し位置推定手法を提案している。また、片手によるジェスチャ入力手法だけでなく、両手によるハンドジェスチャを入力として用いた手法 [2] も提案されており、ユーザに特別な機器を把持させずに入力を実現している。

ジェスチャとして指先を画面に向けるシステムでは、両眼視差によりディスプレイに表示されているオブジェクトと指先を重ねて同時に見ることができないため、自分の指は見ずに操作する必要がある。Lee ら [13] は、透過型ディスプレイに付加情報を提示して、その透過ディスプレイ越しに現実のオブジェクトを見る場合、両眼視差によって適切な位置に情報が提示できなかつたり、透過ディスプレイをタッチしても適切にオブジェクトを指示できなかつたりするため、両眼視差によって二重に見える映像を用いたカーソルを提案している。

本論文で提案する両眼視差インタフェースは、直接手が届かないディスプレイに表示されたオブジェクトを操作することを目的として、デジタルサイネージのように偶然その前にやってきた人であっても操作できるようにユーザに特別な装置を持たせないシステムである。これまでに提案

されているジェスチャインタフェースでもユーザが装置を把持しなくても利用することが可能であるが、オブジェクトと指を重ねて同時に見ることは不可能である。提案インタフェースは、日常生活において物を動かすときのように、オブジェクトと指先を重ねて見ながら操作する仕組みを提供し、誰でも利用できるインタフェースの実現を目指している。

### 3. 両眼視差インタフェース

#### 3.1 アプローチ

左右の目から得られる網膜像の差やある物を注視した際の左右の目がなす輻輳角により、人は奥行きを知覚している。つまり、異なる距離にある物を同時に注視することはできない。そのため、離れた場所にある大画面ディスプレイに表示されたコンテンツに自身の指先を重ねようとした場合、片目を閉じなければ重ねることはできない。たとえば、両目でディスプレイ上のオブジェクトに焦点を合わせると図 2(a)のように、両眼像においてオブジェクトの位置は同じであるのに対し、指の位置がオブジェクトの左右となるため、指が2本に見える。同様に、指に焦点を合わせると、図 2(b)のように指は1本であるのに対し、オブジェクトが2つに見える。オブジェクトに焦点を合わせた場合に現れる2本の指を「両眼像の指」と呼ぶ。

両眼像の指の間隔は、オブジェクトに焦点を合わせたときの視線の方向と眼から指を結ぶ直線の間隔の角度によって変化する。つまり、図 3 に示すように、腕を伸ばし

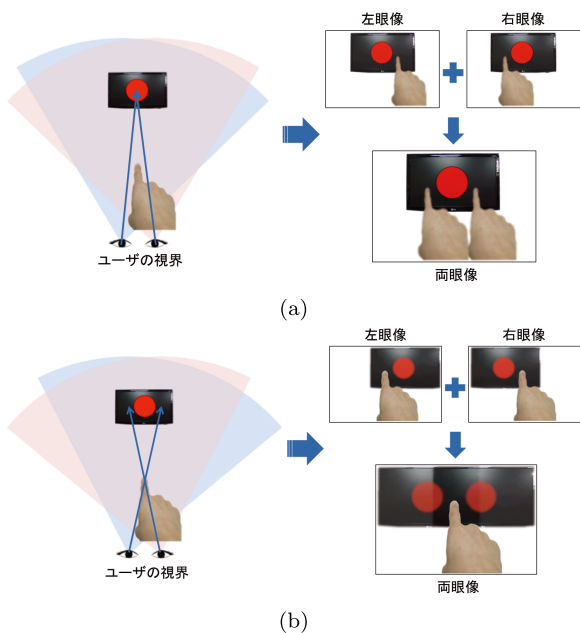


図 2 指差し操作における両眼視差の影響：(a) 画面に焦点を合わせた場合、(b) 指に焦点を合わせた場合

Fig. 2 Influence of binocular parallax in pointing: (a) when a user focuses on the display, (b) when a user focuses on the user's fingertip.

指を顔から遠ざけることで視線方向と眼と指を結ぶ直線のなす角は小さくなり、結果として両眼像の指の間隔は狭くなる。一方、腕を曲げて指を顔に近づけることで両眼像の指の間隔は長くなる。提案インタフェースでは、両眼像の指の間隔の変化を用いてオブジェクトの操作手法を実現する [14], [15]。

#### 3.2 基本操作

提案インタフェースの基本操作となる3つの操作「選択/解除」「移動」「拡大/縮小」について述べる。

##### 選択/解除

「選択」操作は、現実世界において指や箸で物体をつまむように、ディスプレイに表示されたオブジェクトを両眼像の指で外側から挟み込むことで実現する。一方、オブジェクトの選択を解除するには、物体を置くときのように両眼像の指を開く（間隔を広げる）ことで実現する（図 4(a)）。

##### 移動

「移動」操作は、現実世界において指や箸で物体をつま

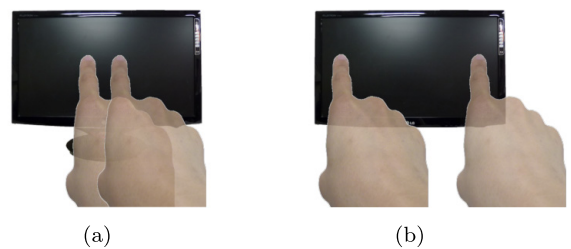


図 3 指の前後移動にともなう両眼視差の変化：(a) 指を画面に近づけた場合、(b) 指を画面から遠ざけた場合

Fig. 3 Change of Binocular parallax by moving a finger: (a) Moving the finger forward, (b) Moving the finger backward.

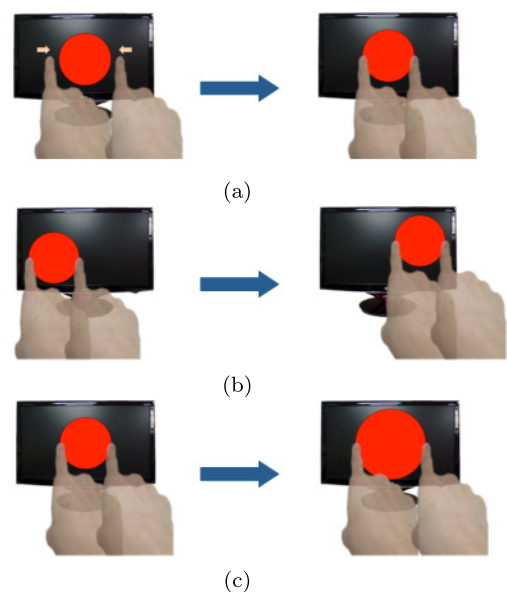


図 4 基本操作：(a) 選択/解除、(b) 移動、(c) 拡大/縮小  
Fig. 4 Basic functions: (a) select/release, (b) move, (c) resize.



で移動するのと同様に、両眼像の指でオブジェクトを選択した後、両眼像の指の間隔を維持したまま、腕を動かして指差し方向を変更することで実現する (図 4(b)).

拡大/縮小

「拡大」操作は、現実世界において物体の端を持って押し広げるように、オブジェクトの両端を両眼像の指で広げることで実現する. 一方、「縮小」操作はオブジェクトの両端を押し縮めることで実現する (図 4(c)). この操作は、たとえば画像の拡大/縮小操作に、タッチパネルにおけるピンチアウト/ピンチインがマッピングされているのと同様である.

4. プロトタイプの実装

プロトタイプの実装において、大画面ディスプレイから離れた位置に立つユーザが特別なデバイスを身に付けることなく、ディスプレイに表示されたコンテンツを操作できるように、空間におけるユーザの指先および両眼の座標を環境に設置したセンサを用いて検出することとした. プロトタイプのシステム構成図および開発環境をそれぞれ図 5, 表 1 に示す. 本章で示す機能を実装し動作させたところ毎秒約 39.9 フレームで動作した.

4.1 指差し位置推定

図 6 に示すとおり、ユーザから見て両眼像の各指がスクリーンと重なる点は、各眼より指先を通る直線がスクリーンと交わる点となる. 図中の *eye* は一方の眼を、*P* はその眼で見た場合の指差し位置である. 両眼像の指が指す位置の座標を  $P_{\{L,R\}}$ , 指先の三次元座標を *finger*, 眼の三次元座標を  $eye_{\{L,R\}}$  とすると、指差し位置の座標は、眼と指先を結ぶ線分の外分点として式 (1) および式 (2) で表される. なお、空間内の座標系には RGB-D カメラの座標系

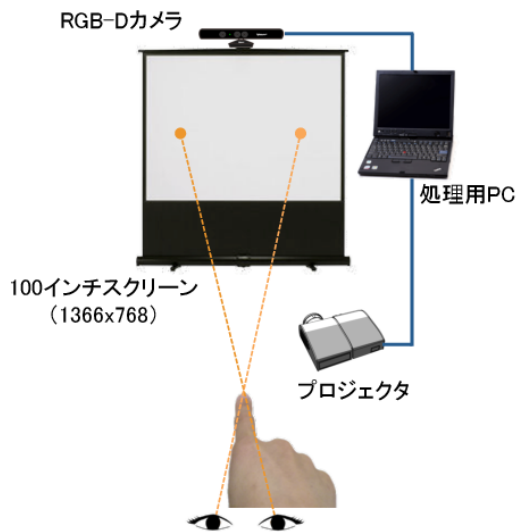


図 5 システム構成

Fig. 5 The configuration of proposed system.

を利用し、RGB-D カメラが原点、スクリーンに向かって水平方向右向きが *x* 軸、鉛直方向上向きが *y* 軸、スクリーンからユーザに向かうスクリーンに対する垂直方向が *z* 軸となる.

$$P_L = \frac{1}{1-m} \mathit{finger} - \frac{m}{1-m} \mathit{eye}_L \quad (1)$$

$$P_R = \frac{1}{1-n} \mathit{finger} - \frac{n}{1-n} \mathit{eye}_R \quad (2)$$

スクリーン面は  $z = 0$  のため、指先の  $z$  座標を  $f_z$ , 両眼の  $z$  座標を  $e_z$  とすると、 $m = n = f_z/e_z$  となる.

4.2 キャリブレーション

本システムでは、RGB-D カメラを用いて骨格トラッキングを行い、右手、右肘および頭部の関節点の三次元座標は取得可能であるが、指先および両眼の座標は取得できない. そこで、ユーザごとに腕を伸ばした状態でスクリーンを指差した場合に RGB-D カメラから得られる右手、右肘、頭部の関節点の座標 *hand*, *elbow*, *head* と、実測による両眼像の指がスクリーンと重なる点の座標  $P_{r\{L,R\}}$  を用いて、指先の座標 *finger* および両眼の座標  $eye_{\{L,R\}}$  を算出する.

RGB-D カメラが出力する関節点と算出する指先、両眼の位置の関係を図 7 に示す. ここでは、簡単化のため、(i)

表 1 開発環境

Table 1 The configuration of proposed system.

処理用 PC	Lenovo 社 ThinkPad Edge E420
OS	Microsoft 社 Windows7 (64 bit)
スクリーン	SANWA SUPPLY 社 100-PRS009 (100 インチ)
プロジェクタ	BenQ 社 MW824ST
RGB-D カメラ	Microsoft 社 Kinect for Windows
プログラミング言語	Processing (v2.0.3)
Kinect デバイスドライバ	SensorKinect (v0.93)
Kinect 制御ライブラリ	OpenNI (v1.5.4.0)
ジェスチャ認識ライブラリ	NITE (v1.5.2.21)
OpenNI ライブラリ	Simple-OpenNI (v0.27)

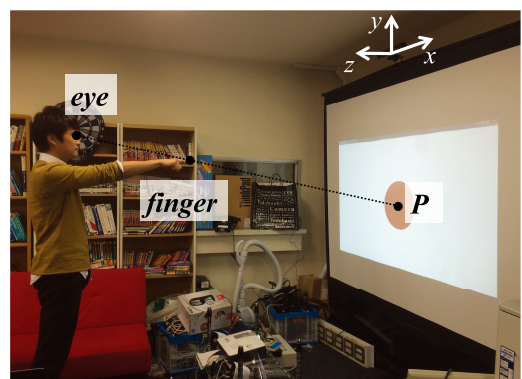


図 6 指差し位置推定

Fig. 6 Estimation of pointing position.

指先は肘から手の関節点を結ぶ直線上にあり、指や手首は曲げない、(ii) ユーザはスクリーンに正対しており首は曲げない。つまり、両眼を結ぶ線分はスクリーンおよび床と平行となる、と仮定している。特に指や首を曲げながらの指差しはやや困難であり、自然に指差し動作を行った場合は、これらの仮定をほぼ満たしている。より厳密な指先、両眼の座標の計測は今後の課題である。

指先は、右肘と右手の関節点の外分点として式 (3) で、両眼の座標は式 (4) および式 (5) で表され、式 (1)~(5) を用いて定数  $k, s, t$  を決定する。

$$finger = \frac{1}{1-k}hand - \frac{k}{1-k}elbow \quad (3)$$

$$eye_L = head + (-s, t, 0) \quad (4)$$

$$eye_R = head + (s, t, 0) \quad (5)$$

### 4.3 基本操作の実装

上記の指差し位置推定手法により算出したディスプレイ上での両眼像の指の座標を用いて、オブジェクトに対する操作を実現する。

「選択/解除」操作では、両眼像の指の指差し位置がオブジェクトの外側から内側に向かって移動した際に、オブジェクトの両縁の座標と両眼像の指の指差し位置の座標が閾値以下となった場合に両眼像の指で挟んだと判定し、オブジェクトの選択状態となる。両眼像の指の間隔がオブジェクトの幅よりも短くなったとしても、片方の指の指差し位置だけがオブジェクト内にある場合は、オブジェクトを挟んだことにならず、選択状態とはならない。一方、オブジェクトの選択中に両眼像の指の間隔がオブジェクトの幅よりも長くなると摘んでいた指を離れたものと判定し、選択を解除する。

「移動」操作では、オブジェクトを選択中に指差し方向を変更する（腕を動かす）と、オブジェクト選択時の両眼像の指とオブジェクトの位置関係を保持するように、オブジェクトの座標を変更する。

「拡大/縮小」操作では、オブジェクト選択中に、両眼像

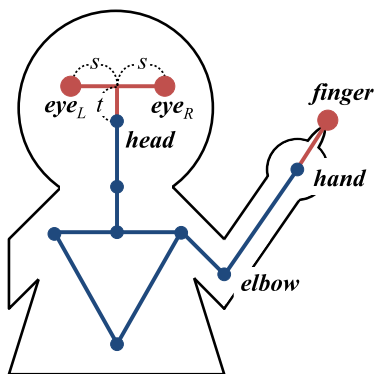


図 7 指先と両眼の位置

Fig. 7 The positions of fingertip and eyes.

の指の間隔をより狭くすることでオブジェクトを縮小し、両眼像の指の間隔を広くすることでオブジェクトを拡大する。この「拡大」操作は、オブジェクトの解除操作と区別することができないため、オブジェクトをつかんだ状態をロックする操作を追加することとした。具体的には実装の簡単化のため、左手を挙げる動作をロック操作とした。

## 5. 評価実験

本システムにおける指差し位置の検出精度ならびに操作性を評価するため、2種類の実験を実施した。実験環境は図 8 に示すとおりである。

### 5.1 実験 1

#### 5.1.1 目的と内容

プロトタイプにおける指差し位置の正確さを検証するため、スクリーン上における 2 つの指差し位置についてジッタを測定した。スクリーンに投影する画像の解像度は 1366 × 768 ピクセルである。被験者はスクリーンから 3m 離れた場所に立ち、その場から移動せずに、スクリーン上の指定位置を指差す。

スクリーンの 5 カ所に表示される 2 つの円に両眼像の指を 10 秒間合わせた際の指差し位置の midpoint 座標を計測した。被験者は右腕を伸ばした状態と右腕を曲げて指先を顔に近づけた状態の 2 パターンの試行を行った。それぞれのターゲット表示位置は図 9 に示すとおりである。ターゲットとなる 2 円間の距離は、図 9(a) では各被験者が腕を伸ばした際の両眼像の指の間隔、図 9(b) では各被験者が腕を曲げて顔から指先までの距離を 40 cm としたときの両眼像の指の間隔に一致するようにしている。被験者は、21 歳から 25 歳までの成人男性 10 名であり、全員が右利きであった。実験前に 5 分間程度提案インタフェースについての概要を説明した。

#### 5.1.2 結果

被験者ごとの実験結果を図 10 に示す。エラーバーは標本標準偏差を示している。被験者には各ターゲットに 10

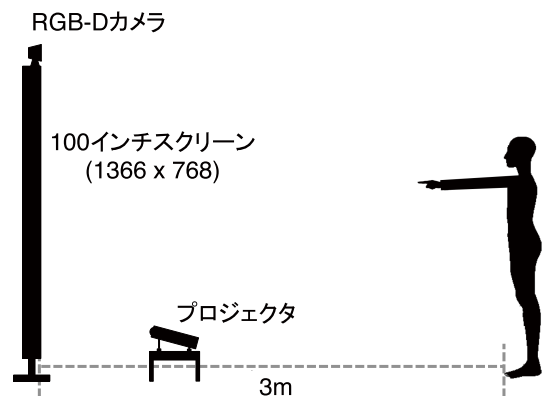


図 8 実験環境

Fig. 8 Experimental configuration.

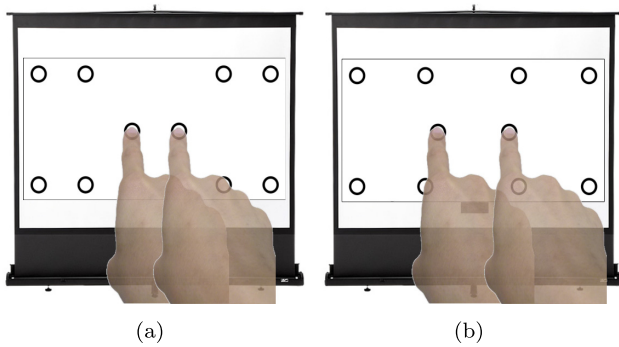


図 9 実験 1 : (a) 腕を伸ばした状態, (b) 腕を曲げた状態

Fig. 9 Experiment 1: (a) The arm is stretched, (b) The arm is bent.

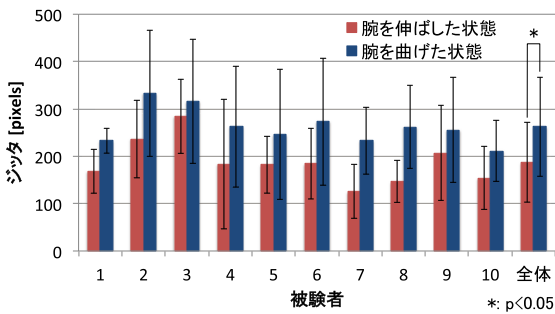


図 10 被験者ごとのジッタ (実験 1)

Fig. 10 Jitters of each subject in experiment 1.

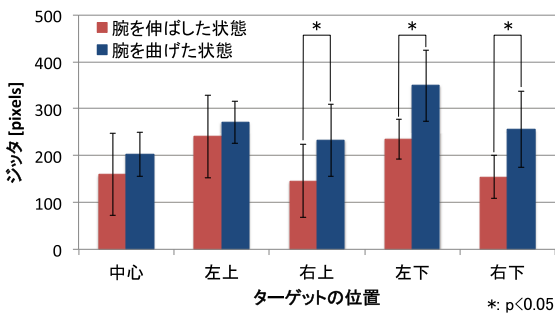


図 11 ターゲットごとのジッタ (実験 1)

Fig. 11 Jitters of each target in experiment 1.

秒間両眼像の指を重ねるように指示したが、両眼像の指を重ねた直後は姿勢が安定しないと考え、両眼像の指が重なったことをシステムが検出したときから 1 秒後のフレームより 300 フレーム分の指差し位置を調査した。具体的には、両眼像の指で指差した位置の中点座標と、ターゲットとなっている 2 つの円の中心の中点座標との差をジッタとして表している。腕を曲げた状態と腕を伸ばした状態における被験者全員のジッタについて t 検定を行ったところ、 $t = 8.87, p < 0.05$  となり、有意水準 5% で有意差があった。したがって、腕を曲げている状態では、腕を伸ばした状態と比較してジッタが大きくなったといえる。

さらに指差し位置の精度がターゲットの位置に依存するかどうかを調べるために、ターゲットごとのジッタの平均値を算出した。図 11 に結果を示す。エラーバーは標本標

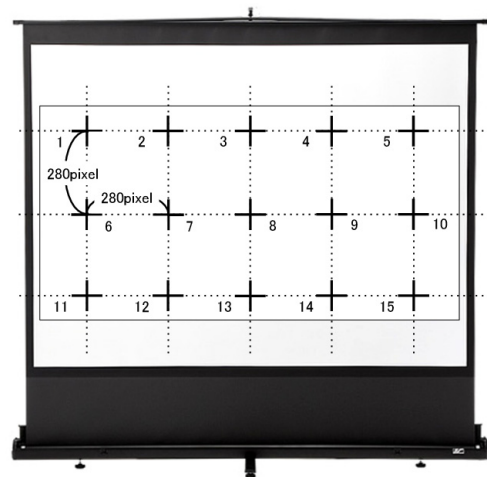


図 12 実験 2-1 および 2-2 におけるターゲット表示位置

Fig. 12 Lattice points to display targets in experiment 2-1 and 2-2.

準偏差を示している。上記と同様に、腕を伸ばした状態と腕を曲げた状態のジッタについて t 検定を行ったところ、以下に示す結果となった。スクリーン中心および左上のターゲットを指差す場合は、それぞれ ( $t = 1.59, p > 0.05$ ), ( $t = 0.79, p > 0.05$ ) となり、有意水準 5% で有意差はみられなかった。一方、スクリーン右上, 左上, 右下を指差す場合は、それぞれ ( $t = 4.44, p < 0.05$ ), ( $t = 2.89, p < 0.05$ ), ( $t = 3.15, p < 0.05$ ) となり、有意水準 5% で有意差があった。すなわち、スクリーン左下, 右上, 右下において、腕を伸ばした状態と腕を曲げた状態において、有意にジッタに差が生じていることが分かる。

## 5.2 実験 2

### 5.2.1 目的と内容

プロトタイプにおいて実装した 3 つの基本操作手法の操作性をそれぞれ評価するため、評価実験 1 と同環境において、3 種類の実験を行った。被験者は評価実験 1 を実施した成人男性 10 名である。以下に、詳細についてそれぞれ述べる。

#### 実験 2-1

「選択」操作を評価するため、図 12 に示すようにスクリーンを 3 × 5 の格子状に分割し、各格子点に表示したオブジェクトを選択させる実験を行った。なお、格子点 15 カ所のうち中心の格子点 8 は「選択」操作を開始する初期位置とした。実験手順を説明する。まず、腕を伸ばした状態にさせ、両眼像の指の間隔を測定する。以後、この測定値の間隔で、スクリーンの中央に表示された半径 40 ピクセルの 2 つの円を「選択」操作を行う前のスタート地点とする。スタート地点に指を合わせると、格子点 8 を除く 14 カ所の格子点の中からランダムに選ばれた 1 点に腕を伸ばした状態での両眼像の指の間隔を直径とする円が表示され、その円を被験者に選択させる。選択が完了すれば、その円が



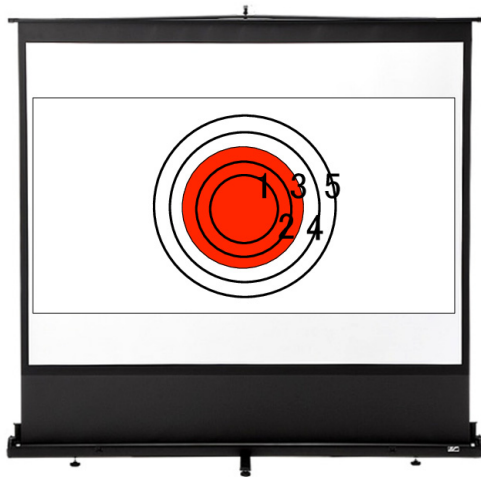


図 13 実験 2-3 におけるターゲットと基準円  
Fig. 13 Targets and basic circle in experiment 2-3.

消え、再びスタート地点が表示される。以上をランダムな順序で 14 カ所すべての地点について行うことを 1 試行とし、各被験者に対して 10 試行実施した。

#### 実験 2-2

「移動」操作を評価するため、格子点 8 から、残りの格子点へ円を移動させる操作を行った。格子点は、実験 2-1 と同様に、図 12 のとおりである。実験手順を説明する。格子点 8 に表示された円を選択すると、移動先となる目標位置が残りの格子点からランダムに選ばれ、その場所に円が表示される。被験者には、スクリーン中央にある円を選択して、目標位置に表示されている円に重ねて置くように指示した。オブジェクトを正しく移動できたかどうかは、2 つの円の中心間の距離が 30 ピクセル以内であるかどうかを基準に判定した。なお、移動させる円の直径は、被験者が腕を伸ばした状態でちょうどつかむことのできる長さとした。14 カ所すべての地点に移動させる操作を 1 試行とし、各被験者に対して 10 試行実施した。

#### 実験 2-3

「拡大縮小」操作を評価するため、提示された円を指示された大きさに変更する実験を行った。図 13 に示すように、腕を伸ばした状態で両眼像の指の間隔を  $x$  ピクセルとしたとき、直径を  $x + 160(k - 1)$  ( $k = 1, 2, \dots, 5$ ) ピクセルとする 5 種類の円を用意した。被験者には、円 3 を基準円とし、指定したサイズに拡大縮小させた。実験手順を説明する。まず、スクリーンの中央に表示した基準円を被験者が選択しロックすると、ターゲットとなる円が表示され、被験者にはターゲットと同じ大きさになるよう操作してから、選択を解除させる。選択を解除した際に、操作対象の円の直径とターゲットの直径との誤差が  $\pm 30$  ピクセルの範囲に収まっていれば、拡大縮小操作は成功したと判定し、操作に失敗した場合には、成功するまで操作させた。円 1, 2, 4, 5 の 4 つの円からターゲットとする円をランダムに

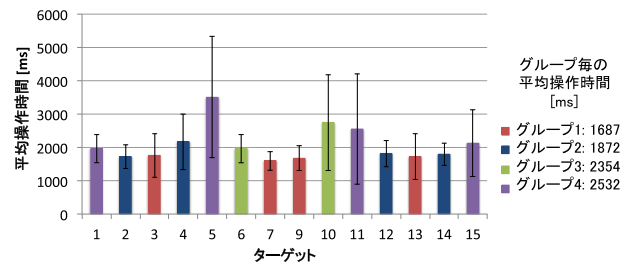


図 14 実験 2-1 結果

Fig. 14 The results of experiment 2-1.

表 2 ターゲットのグループ

Table 2 Groups of targets.

ターゲットグループ	ターゲット
1	3, 7, 9, 13
2	2, 4, 12, 14
3	6, 10
4	1, 5, 11, 15

決定し、すべての円へサイズを変更させる操作を 1 試行とし、各被験者に対して 10 試行実施した。

#### 5.2.2 結果

##### 実験 2-1

実験 2-1 の結果を図 14 に示す。スクリーン中央から選択対象が表示された各格子点までの平均操作時間および画面中央から選択対象が設置された格子点までの距離ごとにグループ化 (表 2) した場合の平均操作時間を示している。なお、エラーバーは標本標準偏差を示している。

中心からの距離が大きくなるにつれて、操作時間を要する傾向にあることを確認するため、ターゲットグループごとに、スクリーン中心からの距離と平均操作時間に関して相関係数を求めたところ、相関係数は 0.69 であった。強い相関とはいえないが、正の相関がみられた。これは指差し動作の移動距離が大きいことが主な理由であると考えられる。また、ターゲット 5, 10, 11 では他のターゲットと比較して大きな平均操作時間となった。それぞれスクリーン中心から距離が長いターゲットであり、その移動時間が主な原因であると考えられるが、予備実験などから人体の構造や着衣によって指差し動作のやりやすい方向とやりにくい方向があるように思われるため、そのような状況が影響している可能性もある。今後、別の実験などを実施して、詳細に分析する予定である。

##### 実験 2-2

実験 2-2 の結果を図 15 に示す。スクリーン中央から選択対象が表示された各格子点までの平均操作時間および画面中央から選択対象が設置された格子点までの距離ごとにグループ化 (表 2) した場合の平均操作時間を示している。なお、エラーバーは標本標準偏差を示している。

中心からの距離が大きくなるにつれて、操作時間を要する傾向にあることを確認するため、スクリーン中心からの

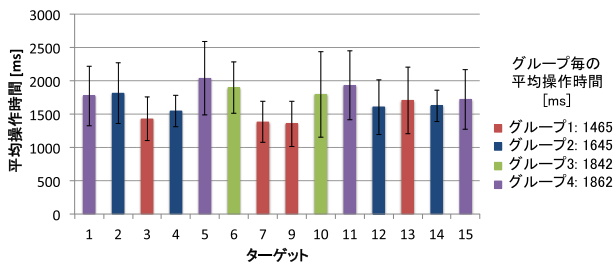


図 15 実験 2-2 結果

Fig. 15 The results of experiment 2-2.

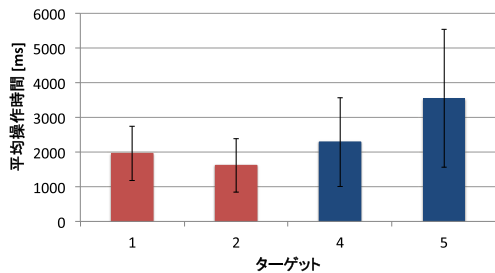


図 16 実験 2-3 結果

Fig. 16 The results of experiment 2-3.

距離と、平均操作時間に関して相関係数を求めたところ、相関係数は 0.81 であった。強い正の相関があり、実験 2-1 と同様に、移動距離が大きく影響していると考えられる。

実験 2-3

実験 2-3 の結果を図 16 に示す。ここでは、各被験者が対象の大きさに合わせるために要した平均操作時間を示している。エラーバーは標本標準偏差を示している。グラフより、拡大操作の方が縮小操作よりも時間を要していることが分かる。拡大操作および縮小操作の結果について t 検定を行ったところ、 $t = 4.11, p < 0.05$  となり、有意水準 5% で有意差があった。つまり、拡大操作の方が縮小操作よりも操作時間を要している。これについても腕を曲げたときにジッタが大きくなることが原因であると考えられる。

6. 考察

6.1 ポインティング座標の誤差

実験 1 の結果からも分かる通り、提案インタフェースによるポインティング操作ではジッタが発生する。人が指差し動作を行う場合、一定の姿勢を保持することは難しく、体の揺れを止めることはできない。実験 2 において、実装した基本操作を実行できない被験者はいなかったことから、大きな問題とはならなかったと考えられるが、より大きなスクリーンでの利用を考えた場合やユーザとディスプレイの距離が大きくなった場合に、ジッタの影響が問題となることも考えられるため、移動平均を用いるなどジッタを低減させるための方法を検討する予定である。

また、腕を曲げた状態での指差しでは、腕を伸ばした状態のときよりも、ジッタが大きくなる傾向がみられた。プ

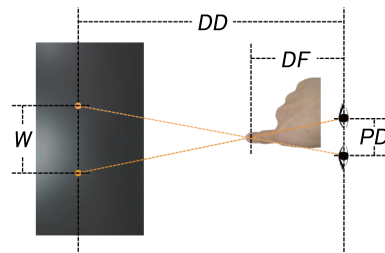


図 17 PD, DD, DF および W の定義

Fig. 17 The define of PD, DD, DF, and W.

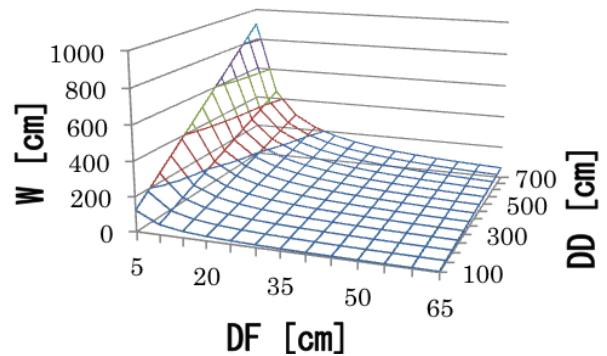


図 18 W のダイナミックレンジ (PD=6.5 cm)

Fig. 18 The dynamic range of W (PD=6.5 cm).

ロタイプでは、RGB-D カメラを被験者の前方(スクリーンの上部)に設置しており、腕を曲げた状態では頭部と RGB-D カメラとの間ある手によって頭部が死角となり、頭部の検出座標に誤差が生じている可能性がある。今後、RGB-D カメラの設置位置や設置数および別方式による指先、両眼座標の検出についても検討する予定である。

6.2 操作対象のサイズ

提案インタフェースを用いてユーザが操作できるオブジェクトの大きさは、両眼像の指の間隔によって制約を受ける。両眼像の指の間隔は、ユーザが腕を伸ばした状態で最小となり、反対に、腕を最大限顔に近づけた状態で最大となる。また、スクリーン上での両眼像の指の間隔 W は、図 17 に示すように、両眼の間隔を PD、スクリーンから両目までの距離を DD、両目から指先までの距離を DF とすると、式 (6) で表される。

$$W = \frac{PD(DD - DF)}{DF} \tag{6}$$

たとえば、日本人の成人男性をユーザとして想定した場合、平均的な両眼の間隔(瞳孔間距離)は 6.5 cm であり、スクリーンから 2m 離れた場所で操作を行うとき、顔から 40 cm 離れた位置にユーザの指先がある場合には、スクリーン上での両眼像の幅は 26 cm となる。操作できるオブジェクトのサイズのダイナミックレンジは、ユーザとスクリーンとの距離に依存しており、図 18 のように表される。



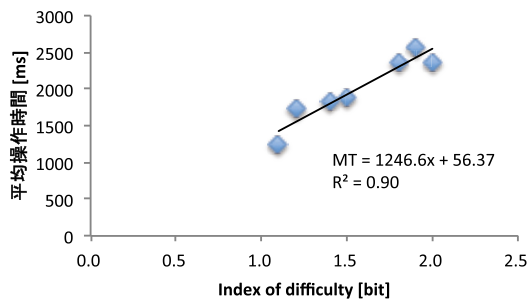


図 19 難易度 ID と平均操作時間 (実験 2-1)

Fig. 19 Mean pointing times in each ID of experiment 2-1.

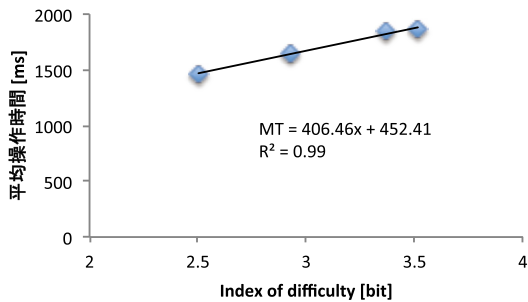


図 20 難易度 ID と平均操作時間 (実験 2-2)

Fig. 20 Mean pointing times in each ID of experiment 2-2.

### 6.3 フィッツの法則の適合性

「選択」操作および「移動」操作はポインティングを含む操作となっているため、実験 2-1 および実験 2-2 の結果に関して、フィッツの法則が適用可能であるかを検証する。検証には、MacKenzie ら [16] の 2 次元に拡張された式 (7) を用いる。MT はポインティング時間、A はターゲットまでの距離、W はターゲットの幅、a、b は定数である。

$$MT = a + b \log_2(A/W + 1) \quad (7)$$

実験 2-1 では、ターゲットまでの距離 A を格子点 8 から選択する円が表示される格子点までの距離、ターゲットの幅 W を選択する円の直径とし、選択するのに要した時間 MT とタスクの困難さ (ID, Index of Difficulty) を示す対数項の値ごとに操作時間の平均値を求め回帰分析を行った。結果を図 19、式 (8) に示す。

$$MT = 56.37 + 1246.6 \log_2(A/W + 1) \quad (8)$$

$$(R^2 = 0.90)$$

適合係数  $R^2 = 0.90$  となり、MacKenzie らの式によく適合する結果となった。

実験 2-2 では、A を格子点 8 から移動先となる格子点までの距離、W を正しく移動したと判定した範囲の幅とし、移動に要した時間 MT とタスクの困難さ ID を示す対数項の値ごとに操作時間の平均値を求め回帰分析を行った。結果を図 20、式 (9) に示す。

$$MT = 452.41 + 406.46 \log_2(A/W + 1) \quad (9)$$

$$(R^2 = 0.99)$$

適合係数  $R^2 = 0.99$  となり、実験 2-2 に関しても実験 2-1 と同様に MacKenzie らの式によく適合する結果となった。

## 7. おわりに

本論文では、大画面ディスプレイ上に表示されたオブジェクトを操作するために、ユーザがディスプレイに対して指差し動作を行った際、ディスプレイに重なって見える両眼像の指を積極的に活用した「両眼視差インタフェース」を提案した。提案インタフェースでは、離れた場所にあるディスプレイをあたかも手元にあるタッチディスプレイであるかのように、ディスプレイ上のオブジェクトを操作する方法を提供している。提案インタフェースの基本性能と、オブジェクトに対する 3 つの基本操作である「選択/解除」、「移動」、「拡大/縮小」の操作性に関し、実際に大画面スクリーンを用いて、それぞれ被験者実験による評価を行った。プロトタイプの基本性能に関して、特に腕を曲げた場合の指差し位置の推定精度が低下することが分かった。また、各操作手法については、操作に要する時間に多少のばらつきはあるものの、おおむねその有効性は確かめることができた。今後は、指差し位置推定の精度向上、および移動や拡大縮小以外の新たな操作手法に関する検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (C) (25330227) の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] Vogel, D. and Balakrishnan, R.: Distant Freehand Pointing and Clicking on Very Large, High Resolution Displays, *Proc. 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.33-42 (2005).
- [2] 中村 卓, 高橋 伸, 田中二郎: ハンドジェスチャを用いた公共大画面向けインタフェース, *DICOMO2006* (2006).
- [3] Elrod, S., Bruce, R., Gold, R., Goldberg, D., Halasz, F., Janssen, W., Lee, D., McCall, K., Pedersen, E., Pier, K., Tang, J. and Welch, B.: Liveboard: A Large Interactive Display Supporting Group Meetings, Presentations, and Remote Collaboration, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.599-607 (1991).
- [4] Guimbretière, F., Stone, M., and Winograd, T.: Fluid Interaction with High-Resolution Wall-Size Displays, *Proc. 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.21-30 (2001).
- [5] Cao, X. and Balakrishnan, R.: VisionWand: Interaction Techniques for Large Displays Using a Passive Wand Tracked in 3D, *Proc. 16th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.173-182 (2003).
- [6] Olsen, D. and Nielsen, T.: Laser Pointer Interaction, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.17-22 (2001).
- [7] Myers, B., Bhatnagar, R., Nichols, J., Peck, C., Kong, D., Miller, R. and Long, A.: Interacting at a Distance: Measuring the Performance of Laser Pointers and Other

- Devices, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.33-40 (2002).
- [8] Cheng, K. and Pulo, K.: Direct Interaction with Large-Scale Display Systems Using Infrablack Laser tracking Devices, *Proc. Asia-Pacific Symposium on Information Visualisation*, Vol.24, pp.67-74 (2003).
- [9] Ringel, M., Berg., H, Jin, Y. and Winograd, T.: Barehands: Implement-Free Interaction with a Wall-Mounted Display, *CHI '01 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (Extended Abstracts)*, pp.367-368 (2001).
- [10] Baudel, T. and Beadoin-Lafon, M.: Charade: Remote Control of Objects Using Free-Hand Gestures, *Comm. ACM — Special issue on computer augmented environments: Back to the real world CACM Homepage archive*, Vol.36, Issue 7, pp.28-35 (1993).
- [11] 新谷晃市, 関下以大, 清川 清, 竹村治雄: 大画面ポインティングシステムのための回帰モデルによる単眼画像からの指差し位置の推定, 情報処理学会研究報告, Vol.2009-CVIM-167, No.33 (2009).
- [12] 井村誠孝, 武田直之, 佐々木博史, 安室喜弘, 眞鍋佳嗣, 千原國宏: VR 空間における操作者の姿勢に基づく指示方向推定, 情報処理学会論文誌, Vol.48, No.3 (2007).
- [13] Lee, J. and Bae, S.: Binocular Cursor: Enabling Selection on Transparent Display Troubled by Binocular Parallax, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.3169-3172 (2013).
- [14] 吉村圭悟, 小川剛史: 両眼視差を考慮した大画面ディスプレイのための指差しインタフェースの提案, VR 学研報, Vol.19, No.CS-2 (2014).
- [15] 吉村圭悟, 小川剛史: 大画面ディスプレイのための両眼視差を利用したユーザインタフェースの評価, *DICOMO2014*, pp.1910-1915 (2014).
- [16] MacKenzie, I.S. and Buxton, W.: Extending Fitts' law to two-dimensional task, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp.219-226 (1992).



吉村 圭悟

1990年生。2013年慶応義塾大学経済学部経済学科卒業。2015年東京大学大学院学際情報学府学際情報学専攻修士課程在学中。



小川 剛史 (正会員)

1974年生。1997年大阪大学工学部情報システム工学科卒業。1999年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。2000年同研究科博士課程中退後、大阪大学サイバーメディアセンター助手。2007年東京大学情報基盤センター講師、2010年同准教授となり、現在に至る。拡張現実感、ヒューマンインタフェース、グループウェア等に関する研究に従事。博士(情報科学)。