

OpenPalmMenu: 手掌に付随・追隨する電子メニューの提示と操作

浅井 拓己 大槻 麻衣 柴田 史久 木村 朝子

仮想現実 (Virtual Reality; VR) 空間や複合現実 (Mixed Reality; MR) 空間のような 3 次元空間では、仮想データを空間上に提示し、操作することが可能である。しかし、その操作のために必要となるメニューの 3 次元空間上の表示位置や操作方法についてはしばしば問題となる。既存研究では腕や手など身体上に表示する手法が提案されているが、項目数や配置に制限があった。本研究では、手を開くというジェスチャによって、非利き手に追隨するメニューを手掌の前の空間に表示し、それを利き手で操作するという OpenPalmMenu を提案する。表示領域を空間とすることで身体上に表示するよりも多くの項目を様々なレイアウトで表示できるほか、手掌の傍に表示することで空間中の操作しやすい位置への移動や円滑な操作を可能にする。本研究では、実験によって提案メニューの有用性、および設計指針を確認した後、その結果を考慮して設計したメニューをモデリングアプリケーションに導入し、提案メニューの使用感に関する調査を行った。

Virtual and mixed realities make it possible to view and interact with virtual objects in a three-dimensional space. However, the location to display menus and the means of manipulating them are often problems. Existing studies developed menus on the body. However, the number of items and its layout are limited. We proposed the OpenPalmMenu that appears in front of the user's palm of the non-dominant hand when he/she opens that hand. The user interacts with the menu by dominant hand. Using the space around the body makes it possible to display more items in more varied layouts. By placing the menu adjacent to the palm also enables the user to operate comfortably or to move the menu to an area where it is easier to use. In this study, we conducted two experiments to confirm the usefulness of the menu and to develop the menu design guidelines to ensure smooth operation, designed an optimal menu, and tested that menu by determining the ease of use.

1 はじめに

近年、安価なヘッドマウントディスプレイ (Head Mounted Display; HMD) の登場により、仮想現実感 (Virtual Reality; VR) 技術が身近なものになりつつある。さらに、仮想と現実を融合する複合現実感 (Mixed Reality; MR)、拡張現実感 (Augmented Reality; AR) 技術も注目されている。

VR 空間や MR/AR 空間でのインタラクション手法としては、空間に配置された文書・画像・3次元オブジェクトなどの電子データを、手や指の動きを用いたジェスチャで操作する手法がよく採用されている [3][15][20]。一方、機能を切り替える際や詳細の変更にはメニューが必要となるが、このメニューの表示場所や操作方法については、しばしば問題となる。

VR や MR/AR システム用のメニューとして多くみられるのは、メニューを空中に配置するものである。Colaco らの Mime [2] では、頭部の正面にメニューを浮かべ、指によるクリックで選択する方法がある。しかし、視界の中央にメニューが表示され、それが頭に追隨するため、視界がメニューで覆われメニューと作業対象を同時に確認し難いという問題がある。また、Microsoft HoloLens のアプリケーション HoloStudio

OpenPalmMenu: An Electronic Menu Following The Palm

Takumi Azai, Fimihisa Shibata and Asako Kimura, 立命館大学大学院情報理工学研究科, Information Science and Engineering, Ritsumeikan University.

Mai Otsuki, 筑波大学, University of Tsukuba. コンピュータソフトウェア, Vol.35, No.3(2018), pp.32-44.

[研究論文] 2018 年 2 月 28 日受付。

[22]では、空中の任意の場所にメニューを固定する方法を採用している。この手法ではユーザが向きや姿勢を変えると、メニューが見えなくなるため、その都度メニューをユーザにとって操作しやすい位置に移動させる必要がある。

実物体を利用したメニューも提案されている。Leeら [10]のTangible Spin Cubeでは、実物体の立方体にARマーカを貼り付け、その立方体を回転させることでメニュー選択を行う。またGrubertら [4]のMultiFiでは、HMDの他にスマートフォンやスマートウォッチといったデバイスを併用して、メニュー操作などの作業を行う手法を提案しており、作業負荷や作業時間を軽減できることを確認している。しかしながら、これらの手法ではHMDの他に立方体や把持型デバイスといった実物体を導入する必要がある。

実物体ではなく、ユーザの身体をメニュー操作に利用する方法も提案されている。よく用いられる部位の1つは手掌である。Schmalstiegら [18]によると、手掌の上に情報を表示することで、情報を自由に素早く移動することができる」と述べられている。そのため手掌にメニューを表示することで、操作しやすく・見やすい位置に簡単に移動でき、直観的に操作を行うことができると考えられる。He [8]らは、AR空間での作業において、手掌にメニュー表示を行う手法を提案し、頭部正面に表示されるメニューや仮想オブジェクト付近に表示されるメニューと比較している。その結果、表示や視認が容易であるという理由から、手掌に表示されたメニューを好む被験者が最も多く、手掌にメニューを表示する有用性を示している。

また、佐々木ら [17]の「てのひらめにゅう」では開かれた片手の指先にメニュー項目を表示し、もう片方の手で指に触れることによってメニュー選択を行う手法を提案している。この手法には、手を開いたり閉じたりすることによって簡単にメニューの表示・非表示を切り替えられるという利点や、直接触れることで操作できるため触覚フィードバックが得られるという利点がある。またMistryら [13]も様々な実物体に情報を表示する手法を提案する中で、手掌に情報を投影しそれに対し操作する手法を提案している。この手法においても触覚フィードバックを得ながら操作を

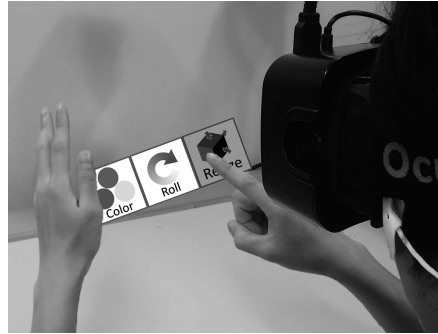


図1 手掌前に配置する仮想メニュー (イメージ)

行うことができる。しかしいずれの手法においても、表示領域が手掌や指先に限定されるため、各項目のサイズが小さくなるという問題や一度に表示できる項目数が限られているという問題がある。

ユーザの身体をメニューの表示領域として利用する別の方法として、Harrisonら [6]のOmniTouchやSkinput [7]、著者らの既開発のシステム [1]のように、前腕にメニューを表示する手法がある。前腕を利用することで、操作しやすく見やすい位置にメニューを容易に移動できるという利点はそのままだけに、メニューの表示面積を拡張することができた。しかし、メニュー項目を目視で確認するたびに、視界の大部分が手や腕に覆われてしまい、作業対象を見ながらのメニュー操作がやり難いという問題がある。

そこで本研究では、手掌を開くと非利き手の手掌の前の空間にメニューが表示され、それを反対の手(利き手)で操作するOpenPalmMenuを提案する(図1)。OpenPalmMenuは、表示領域を手掌の前の空間とすることで、身体上に表示するよりも多くの項目を様々なレイアウトで表示することができる。さらに、メニューが手掌に追従することで、操作しやすく、見やすい位置へのメニューの移動を容易にする。またOpenPalmMenuでは、非利き手を位置の制御、利き手をメニューの入力操作に用いる。絵画でのパレットや、作業時のハンドマニュアル・スマートフォン等のように、手に持って眺めて反対の手で操作するという、日頃慣れ親しんだ行為のメタファを導入し、さらに必要ときだけ手の前に出現させることで、ユーザが違和感なく操作でき、覚えやすさ、使いやすさも向

上すると考えられる。

以下 2 章では、まず OpenPalmMenu の設計と実装について述べる。続いて 3 章では OpenPalmMenu の有用性を確認し、4 章では円滑に操作することが可能な OpenPalmMenu の設計指針に関する実験について述べる。さらに、5 章ではその結果を基にした OpenPalmMenu のアプリケーションへの導入と提案メニューの使用感に関する調査について述べる。

2 OpenPalmMenu

2.1 設計

本研究で提案する OpenPalmMenu は、非利き手を開くことで手掌の前の空間にメニューを表示させ、それを利き手で操作するメニューである。

1 章で議論してきたことを整理すると、3 次元空間における理想的なメニューの要件として、以下の項目が考えられるが、これらの要件の中で、OpenPalmMenu は (a)~(f) を満たすメニューという位置づけとなる。

- (a) 実物体を導入不要
- (b) メニューの容易な移動
- (c) メニューの表示・非表示の容易な切替え
- (d) メニューと他の仮想物体を同時に視認可能
- (e) 表示領域の制限が小さい
- (f) 選択操作が円滑に行える
- (g) 操作時の触覚フィードバックが得られる

まず、要件 (a)「実物体を導入不要」、(b)「メニューの容易な移動」については、前述した手掌部にメニューを表示する方式 [13][17] と同様、OpenPalmMenu ではメニューを手を追従させるため、実物体を導入する必要はなく、手を動かすことでメニューを自由に移動することが可能となる。

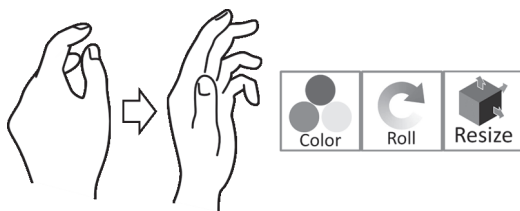


図 2 メニューの表示方法

次に、要件 (c)「メニュー表示・非表示の容易な切替え」については、てのひらめにゆう [17] や Yoshikawa ら [21] の手法、Hololens [23] のメニュー表示トリガである Bloom ジェスチャを参考に、手の開閉によってメニューの表示・非表示を切り替える方法を採用する (図 2)。片手 (非利き手) を閉じた状態で、手掌をユーザの顔の向きに平行に配置し、その状態から手掌を開くとメニューが表示される。また、ユーザが手掌を閉じるとメニューを非表示にすることができる。このメニューは、ユーザが手掌を開いている限り、手に追従して表示される。この手法によって容易にメニューの表示・非表示を切り替えることができる。

一方、[1][8][17] などの手法では、身体部位によって視界が覆われ、操作中の仮想物体を視認できないという問題があったが、OpenPalmMenu では、手を頭部に対して垂直に配置し、その横の空間にメニューを表示することで、前述の手法と比べ、身体部位によって視界が覆われる範囲を最小限に抑え、要件 (d)「メニューと他の仮想物体を同時に視認可能」を実現する。

さらに OpenPalmMenu は、手掌横の空間中にメニュー項目を表示することで、手や腕の表面にメニュー項目を配置する手法よりも広い領域にメニューを表示することができ、要件 (e)「表示領域」をより大きく使用することができるようになる。

その代り、要件 (g)「操作時の触覚フィードバック」については、空間上に表示されるメニューを操作するため、提示は難しくなる。

続いて、要件 (f)「選択操作の円滑さ」についてであるが、Hinckley ら [9] は 3 次元空間での作業では、両手を活用することが重要であると述べている。両手を上手く使うことによって、(f-1) 運動感覚と (f-2) 非利き手を利用した相対位置把握が操作に活用できるようになり、その結果円滑な操作が可能となると考えられる。そこで、(f-1)、(f-2) のそれぞれの観点から OpenPalmMenu の設計を考える。

まず、(f-1) 運動感覚について、Lin ら [11] は運動感覚を利用することで、前腕を目視せずとも前腕上の意図した位置に触れることが可能であることを確

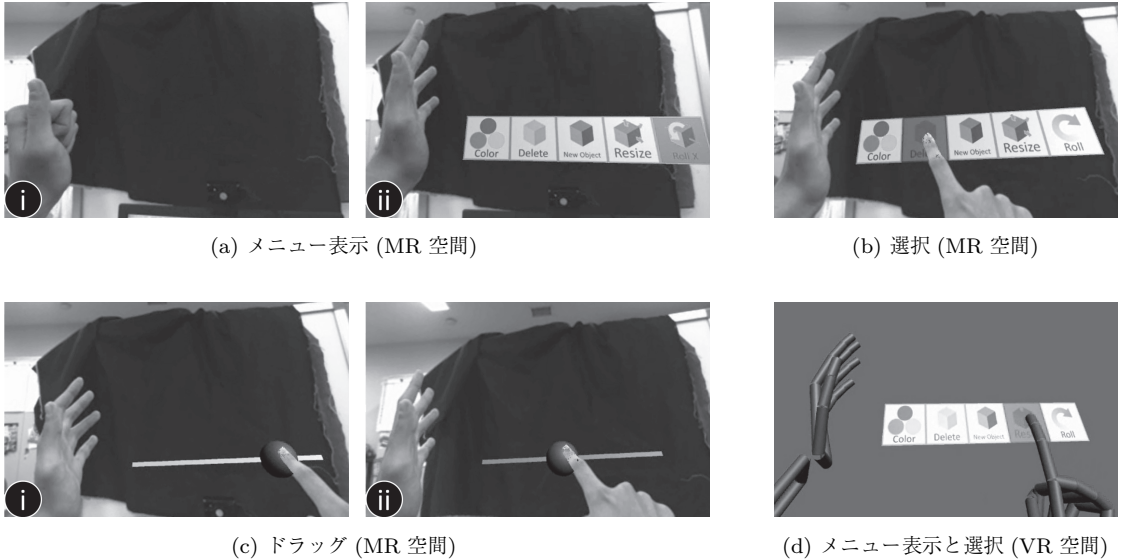


図 3 実装結果

認している。また Mine ら [12] も運動感覚を活用することで、VR 空間における作業を直観的に、効率的に、労力をかけずに行えることを示している。運動感覚とは深部感覚(体性感覚)の一種であり、関節の屈折状態を感受し手や腕の位置や運動の方向を認識できる感覚のことである [14]。前述の、指先や手掌に表示されたメニュー [8][17] や前腕に表示されたメニュー [1][6][7] では、自分自身の一方の手や腕に表示されたメニューを、他方の手の指で触れて操作するため、この運動感覚を活用することができ、素早く円滑な操作が可能であった。これに対して、OpenPalmMenu でも、非利き手のすぐ横に表示することで、従来研究と同様、運動感覚を利用した円滑な操作を行えると考えられる。

次に、(f-2) 非利き手を利用した相対位置把握について、Stoakley ら [19] は Guiard [5] らの研究に基づき、VR 空間において、両手を利用した仮想物体の操作手法を導入している。彼らのシステムでは、片手だけで絶対的な位置を指定するよりも、もう片方の手を基準にして相対的な位置を指定する方が容易であるということを示している。OpenPalmMenu でも項目が非利き手に追従して表示されるため、利き手によって、非利き手に対する相対位置を把握することで、項目の位置を容易に把握でき、円滑な操作が期待

できる。

2.2 実装

本研究では、VR、MR 両空間で OpenPalmMenu を実装した。図 3 (a)~(c) に MR 空間での実装結果、図 3 (d) に VR 空間での実装結果を示す。VR 空間の提示には HMD (Oculus Rift DK2) を、MR 空間の提示にはさらにステレオカメラ (Ovrvision Pro) を追加することで実世界の画像情報を取得し、同 HMD 上で実世界の画像情報と仮想オブジェクトであるメニューを重畳描画した。手掌と指の位置は、HMD 前面に取り付けた小型モーショントラッカ (LeapMotion) により取得する。開発環境には、Unity 5.3.5 を用いた。

提案システムでは、以下の 2 条件を同時に満たす場合にメニューを表示、そうでない場合は非表示とし、意図しないメニュー表示がされないようにした。

- 条件 1: 手が開いている状態、すなわち、親指以外の指と手掌中心の間の距離 l_i (図 4 (a)) が、すべて閾値 P 以上である
- 条件 2: 頭部と手掌の向きが平行に近い状態、すなわち水平面上の頭部の角度 θ_{head} と手掌の角度 θ_{hand} の差 (図 4 (b)) が閾値 A 以下である

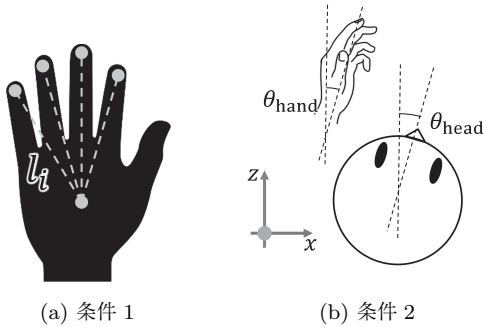


図4 メニューの表示条件

3 実験1: OpenPalmMenu の有用性評価

3.1 実験目的・概要

前述したように OpenPalmMenu では、項目が非利き手に追隨して表示されるため、円滑な操作が期待できると考えられる。そこで、非利き手に追隨しないメニューと比較を行うことで、OpenPalmMenu の有用性を確認する実験を行った。具体的には、提案手法である非利き手に追隨するメニュー（追隨型）と、追隨しないメニュー（非追隨型）を用意し、各々のメニュー項目に対する入力完了までの時間（試行時間）とエラー回数、実験後のコメントから、有用性を評価する。また、それぞれのメニューに対し、項目を横方向に配置した横メニューと縦方向に配置した縦メニュー（図5）を用意した。

被験者は16名（男性13名、女性3名、21歳～23歳、平均21.3歳）で、全員右利きであった。

3.2 実験環境

本実験は、手のトラッキングエラーのような要因を排除し、提案メニューの有用性のみを調査するため

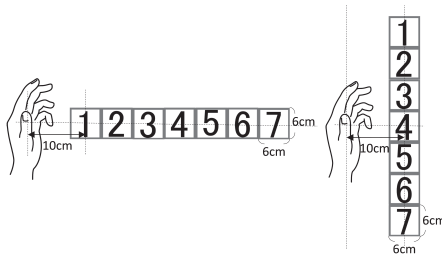


図5 実験に用いた横メニューと縦メニュー

に、MR空間ではなくVR空間で行った。Raganら[16]も同様の方法を採用している。

メニュー1項目あたりの大きさは、事前調査で視認、選択ともに容易であったサイズの中で最小の縦6cm×横6cmを採用した。また追隨型の場合、右手と左手が接触しないように横メニューの項目1と縦メニューの中央は手掌から10cm離して配置した（図5）。項目数は左手を視界の中央に配置したときに視界内に収まる7個とした。試行時間は数字が表示されてから、項目が選択されるまでの時間とした。

また、次節の実験手順(1)で被験者に触れさせる立方体は、触れやすい位置となるように被験者の目の高さよりも13cm低くし、頭部の前方32cm、右方10cmに配置した。また、実験手順(2)で被験者に選択させるメニューの初期位置（縦メニューの場合項目4の位置、横メニューの場合項目1の位置）は、問題なく選択できると確認できた、被験者の頭部の高さの下方13cm、頭部の前方42cm、左方10cmとした（図6）。これらの位置は事前に行った予備実験によって決定した。

3.3 実験手順

- (1) 各試行での右手（選択する手）の初期位置を一定にするため、右手正面に配置された小さな立方体を右手で触れる（図7(c)）
追隨型を体験する場合は左手を動かして、非追隨型と同じ初期位置に戻す（図7(a)）
- (2) 正面中央に表示された数字（1～7の数字がランダムに表示される）と同じ項目を選択する（図7(b), (d)）

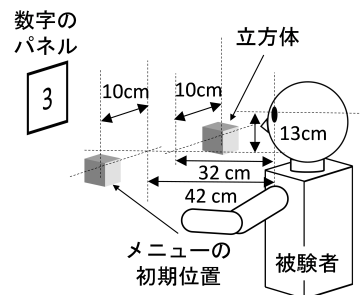


図6 実験環境

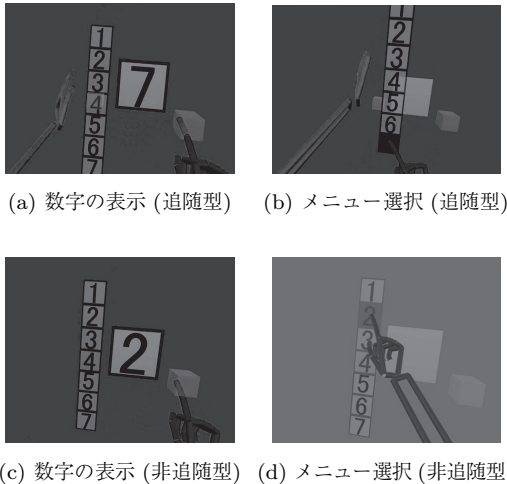


図7 実験手順

これを1試行とし、1つの項目(数字)につき計5回選択するまで(総計35回)繰り返した。被験者1人あたりの試行回数はメニュー1項目につき5回選択×7項目×メニュー方向2種×メニュー2種の計140回であった。

被験者には実験前に十分練習を行わせ、可能な限り素早く正確に項目を選択するように指示した。また、追随型メニューを体験する場合は可能な限り非利き手を活用するように指示した。順序効果を考慮して、半数の被験者は追随型、もう半数の被験者は非追随型から実験を開始した。さらに各被験者群の中で、半数の被験者は縦メニューから横メニューの順番で、残り半数の被験者は逆の順番で実施した。

全ての試行が終了したのち、追随型と非追随型で操作が容易だった条件、および素早く入力できたと感じた条件を回答させ、また、被験者からコメントを聴取した。

3.4 実験結果

横メニューの実験結果を図8(a), (b)、縦メニューの実験結果を図8(c), (d)に示す。

横メニューと縦メニューの項目ごとの平均試行時間をそれぞれ図8(a), (c)に示す。「平均」は全メニュー項目の平均試行時間である。

平均試行時間について、メニュー手法(2水準)とメニュー方向(2水準)、項目番号(7水準)を要因と

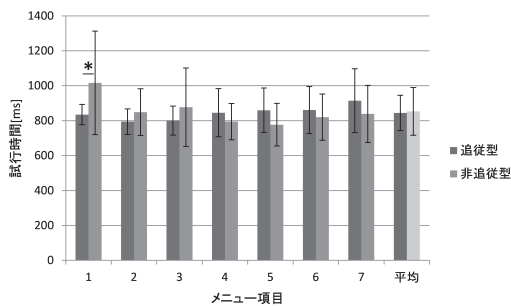
して、3要因分散分析を行った。その結果、メニュー方向と項目番号について主効果が有意であった(それぞれ、 $F(1, 15) = 10.1$, $p < 0.01$, $F(6, 90) = 8.7$, $p < 0.0001$)。また、メニュー手法とメニュー方向の交互作用、メニュー手法と項目番号の交互作用、すべての要因間の交互作用がそれぞれ有意であった(それぞれ、 $F(1, 15) = 5.0$, $p < 0.05$, $F(1, 15) = 7.6$, $p < 0.0001$, $F(6, 90) = 2.3$, $p < 0.05$)。

下位検定としてまず、メニュー方向ごとのメニュー手法間の単純主効果の検定を行った。その結果、メニュー方向が縦の時に、追随型と非追随型の間に有意差が見られた($p < 0.05$)。次に、項目番号ごとのメニュー手法間の単純主効果の検定を行ったところ、項目番号が1と3の時に、追随型と非追随型の間に有意差が見られた($p < 0.01$)。次に、すべての要因間の単純主効果の検定を行ったところ、メニュー方向が横で項目番号が1の時と、メニュー方向が縦で項目番号が1, 3, 6, 7の時に有意差が見られた($p < 0.05$)。

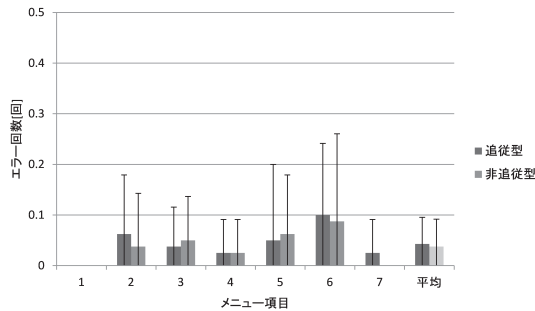
次に、横メニューと縦メニューの平均エラー回数をそれぞれ図8(b), (d)に示す。縦軸が1試行あたりの平均エラー回数を表し、横軸が項目番号を表す。「平均」は全項目の平均エラー回数である。

試行時間と同様に、メニュー手法(2水準)とメニュー方向(2水準)、項目番号(7水準)を要因として、3要因分散分析を行った。その結果、メニュー方向と項目番号のみ主効果が有意であった(それぞれ、 $F(1, 15) = 26.2$, $p < 0.001$, $F(6, 90) = 6.4$, $p < 0.001$)。また、メニュー方向と項目番号の交互作用が有意であった($F(6, 90) = 2.6$, $p < 0.05$)。

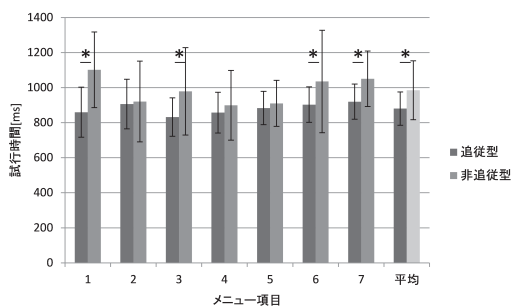
被験者に対して追随型と非追随型で操作が容易だった方を回答させたところ、16名中5名が追随型を、11名が非追随型を操作する方が容易だったと回答した。さらに被験者に対して追随型と非追随型で素早く選択できたと感じた方を回答させたところ、16名中9名が追随型を、7名が非追随型を素早く選択できたと回答した。それぞれの回答結果について、二項検定を行ったところ、いずれの回答結果でも追随型メニューと非追随型メニューの間に有意差は見られなかった(片側検定)。



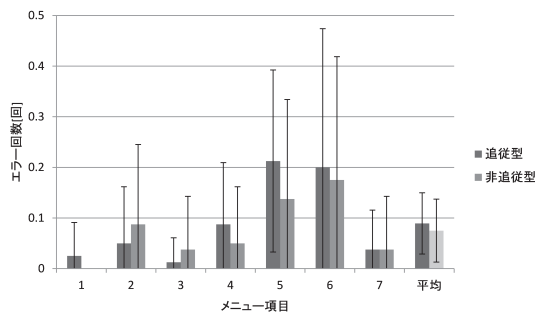
(a) 横メニューの平均試行時間



(b) 横メニューの平均エラー回数



(c) 縦メニューの平均試行時間



(d) 縦メニューの平均エラー回数

図 8 実験 1 結果 (Ryan の方法 *: $p < 00.5$)

3.5 考察

平均試行時間の結果(図 8 (a), (c))より, 横メニューの項目 1 の場合や, 縦メニューの項目 1, 3, 6, 7 の場合では, 追従型の試行時間の方が有意に短かった。これは左手を引き寄せることで被験者は容易に選択できたためだと考えられる。また 2.1 で述べたように非利き手に近い項目は, 非利き手を基準とした相対位置把握や, 運動感覚をより活用できたためであると考えられる。

また平均エラー回数の結果(図 8 (b), (d))より, 追従型と非追従型でエラー回数についての有意差は見られなかった。このことから, エラー回数は差がないにも関わらず, 追従型の方が一部の項目では素早く選択できるという利点があることが分かった。

被験者のコメントより追従型の有用性は確認できなかったものの, 3 名から「追従型の方が慣れれば使いやすいと思う」というコメントや, 2 名から「縦メニューの場合だと追従型の方が使いやすいかった」とい

うコメントが得られた。

これらの考察から, OpenPalmMenu では 2.1 で述べた要件 (e) の触覚フィードバックが得られないものの, 非利き手に対する相対位置の把握や運動感覚を活用することで, レイアウトや項目の位置によって, 素早くかつ正確に操作できるということが示唆された。

4 実験 2: 円滑な操作が可能なメニュー設計指針の確認

4.1 実験目的・概要

提案するメニューで円滑に操作することが可能な設計指針(表示範囲, レイアウト)を確認することを目的として実験を行った。具体的には, 実験 1 と同様の横メニュー, 縦メニュー(図 5)を用意し, 各々のメニュー項目に対する入力完了までの時間(試行時間)とエラー回数, ユーザの手の軌跡, 実験後のコメントから, 円滑な操作が可能なメニューの表示範囲を確認した。また, 実験 1 は常にメニューが表示された状

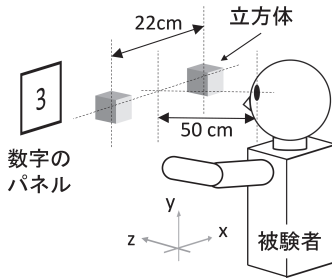


図 9 実験環境

態で行ったが、本実験はより実際の作業に近づけるため、被験者にメニューを表示させる操作も行わせた。

被験者は男性 14 名 (21 歳～23 歳, 平均 22.1 歳) で、全員右利きであった。

4.2 実験環境

実験 1 と同様に VR 空間で行った。メニューの大きさや項目数も実験 1 と同様の条件で行った (図 5)。

また、次節の実験手順 (1) で被験者に触れさせる 2 つの立方体は、視界の中央に配置されるよう被験者の頭部と同じ高さとし、立方体の間隔は 22cm とした。この間隔を採用した理由は、メニューを表示した際に右手が縦メニューと横メニューのおおよそ中央の位置になったためである。頭部から 2 つの立方体の中点までの距離は被験者が腕を頭部前方に自然に伸ばした際の距離とほぼ同じ 50cm とした (図 9)。

4.3 実験手順

- (1) 各試行での両手の初期位置を一定にするため、正面に配置された 2 つの立方体をそれぞれ左手と右手で触れる (図 10 (a))
- (2) 左の手掌からメニュー (縦メニューまたは横メニュー) を表示し (図 10 (b)), 正面中央に表示された数字 (1～7 の数字がランダムに表示される) と同じ項目を選択する (図 10 (c))

これを 1 試行とし、1 つの項目 (数字) につき計 5 回選択するまで (総計 35 回) 繰り返した。被験者 1 人当たりの試行回数はメニュー 1 項目につき 5 回選択 \times 7 項目 \times メニュー方向 2 種の計 70 回である。

実験前に十分練習を行わせ、可能な限り素早く正確

に項目を選択するように指示した。順序効果を考慮して、半数の被験者は縦メニューから横メニューの順番で、残り半数の被験者は逆の順番で実施した。また、全ての試行が終了したのち、横メニューと縦メニューで操作が容易だった方を回答させ、被験者からコメントを聴取した。

4.4 実験結果

横メニューの実験結果を図 11 (a)～(c)、縦メニューの実験結果を図 11 (d)～(f) に示す。

横メニューと縦メニューの項目ごとの平均試行時間をそれぞれ図 11 (a), (d) に示す。縦軸が 1 試行あたりの平均試行時間を表し、横軸がメニュー項目の番号を表す。「平均」は全項目の平均試行時間である。

平均試行時間について、項目番号 (7 水準) とメニュー方向 (2 水準) を要因として、2 要因分散分析を行った。その結果、項目番号とメニュー方向どちらも主効果が有意であった (それぞれ、 $F(6, 13) = 19.0$, $p < 0.001$, $F(1, 13) = 5.3$, $p < 0.05$)。また、項目番号とメニュー方向の交互作用が有意であった ($F(6, 78) = 2.3$, $p < 0.05$)。

下位検定として項目番号ごとのメニュー方向間の単純主効果の検定を行った。その結果、項目番号が 4～7 の時に、縦メニューと横メニューの間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。次に、メニュー方向ごとの項目番号間の単純主効果の検定を行ったところ、いずれのメニュー方向でも項目番号について単純主効果が有意であった。さらに Ryan の方法を用いた多重比較を行った結果、横メニューでは左手に近い項目 1～3 と左手から離れた項目 5～7 との間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。縦メニューでは、左手掌前と左手掌よりも上に配置されている項目 1～4 と左手掌よりも下の項目 6～7 との間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。

次に、横メニューと縦メニューの平均エラー回数をそれぞれ図 11 (b), (e) に示す。縦軸が 1 試行あたりの平均エラー回数を表し、横軸が項目番号を表す。「平均」は全項目の平均試行時間である。

同様に、平均エラー回数について項目番号 (7 水準) とメニュー方向 (2 水準) を要因として、2 要因分散分析を行った。その結果、項目番号のみ主効果が有意



図 10 実験手順

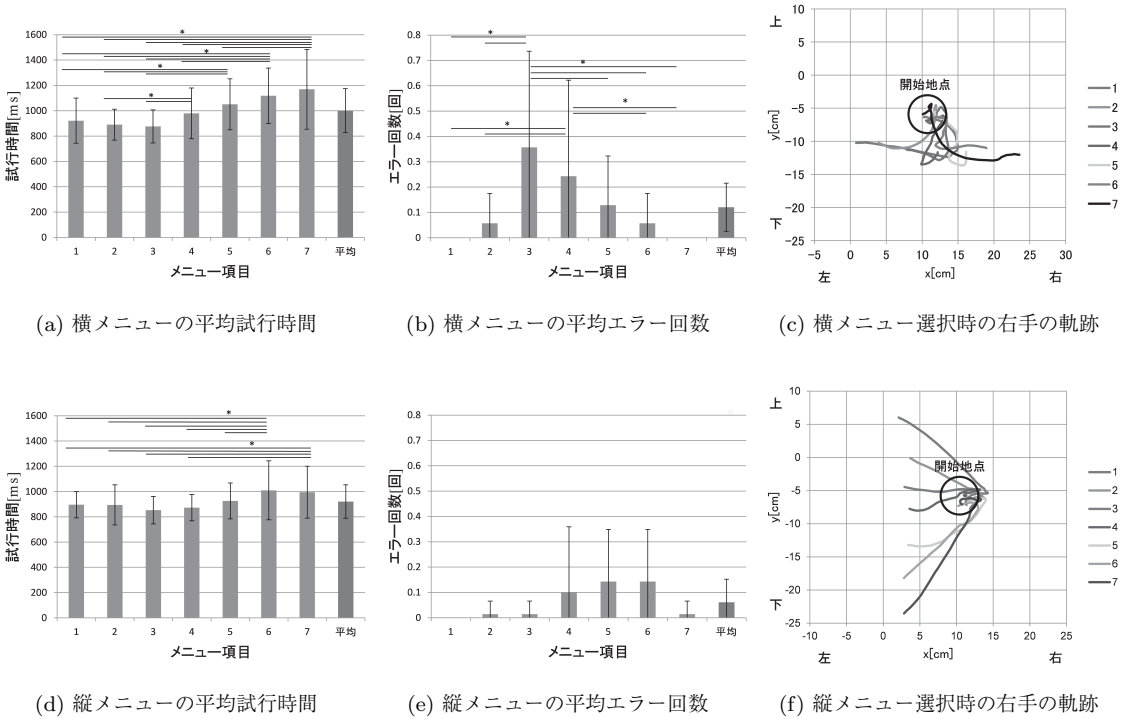


図 11 実験 2 結果 (Ryan の方法 *: $p < 0.05$)

であった ($F(6, 13) = 5.3, p < 0.001$). また、項目番号とメニュー方向の交互作用が有意であった ($F(6, 78) = 3.7, p < 0.005$).

下位検定として項目番号ごとのメニュー方向間の単純主効果の検定を行った。その結果、項目番号が3の時に、横メニューと縦メニューの間に有意差が見られた ($p < 0.001$)。次に、メニュー方向ごとの項目番号間の単純主効果の検定を行い、横メニューの場合のみ、項目番号間に有意差が見られた ($p < 0.001$)。Ryan の方法を用いた多重比較によれば、横メニューでは中央付近の項目 3~4 と端付近の項目 1~2, 6~

7 との間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。

試行時間が最も平均値に近かった被験者の横メニューと縦メニューの項目選択時の右手の x-y 平面上の軌跡をそれぞれ図 11 (c), (f) に示す。横軸が x 座標で左右を表し、縦軸が y 座標で上下を表す。7 本の線が 7 つの項目を選択する際の軌跡である。

被験者に対して横メニューと縦メニューで操作が容易だった方を回答させたところ、14 名中 10 名が縦メニューを、4 名が横メニューを操作する方が容易だったと回答した。回答結果について二項検定を行ったところ、縦メニューと横メニューの間に有意傾向が見ら

れた (片側検定: $p < 0.1$).

4.5 考察

4.5.1 平均試行時間

横メニュー (図 11 (a)) の結果より, 左手に近い項目 1~3 の試行時間は遠い項目 5~7 に比べて有意に短かった【設計指針 (1)】. 一方, x-y 平面上の被験者の右手の軌跡 (図 11 (c)) を確認すると, 項目 1 を選択する場合と 7 を選択する場合には移動距離に大きな差は見られなかった. すなわち, 移動距離がほとんど同じであったにも関わらず, 左手に近い項目 1 の方が素早く選択できていた. その理由として, 多くの被験者が, 左手を顔の正面付近に配置しており, 視界の端に表示され, かつ, 左手から遠い項目 5~7 は, 視認して選択を行うのに時間を要したと考えられる. また, 被験者のコメントに「左手に近い項目は注視せずとも直観的に選択できた」とあったことから, 非利き手を基準とした相対位置把握や運動感覚により素早く選択できたためではないかと考えられる.

縦メニューの場合 (図 11 (d)), 左手掌前と左手掌よりも上に配置されている項目 1~4 の試行時間は左手掌よりも下の項目 6~7 と比べて有意に短かった【設計指針 (2)】. 一方, x-y 平面上の被験者の右手の軌跡 (図 11 (f)) を確認すると, 横メニューと同様に, 項目 1 を選択する場合と項目 7 を選択する場合には移動距離に大きな差は見られなかった. この要因も横メニューと同様に, 被験者は左手を視界の中央よりも下に配置することが多く, 左手掌よりも下に表示された項目 6~7 が視界の端になり, 視認して選択を行うのに時間を要したためと考えられる.

項目番号が 4~7 の時のメニュー方向ごとの平均試行時間では, 縦メニューの方が横メニューよりも有意に短かった. また, コメント結果からも横メニューよりも縦メニューの方が容易に操作できると感じた被験者が多かった. 被験者からは「手を横に動かすよりも縦に動かす方が簡単だった」というコメントがあり, これらのことから縦メニューの方がユーザにとって容易に操作できることが示唆される【設計指針 (3)】.

4.5.2 平均エラー回数

横メニューの項目ごとの平均エラー回数 (図 11 (b))

を見ると, 中央の項目 3~4 の方が端の項目 1~2, 6~7 よりも有意に多いことが分かる. これはメニューを表示するとき多くの被験者の右手が中央の項目 3~4 付近にあり, それらの項目が誤って選択されたためである. これは今回の実験環境が原因であることも考えられるが, 実際の作業でも右手が左手の横に位置している場合が多い. また, 被験者からも「横メニューを表示した際に, 右手がメニュー項目と非常に近い位置にあったため, 操作が困難だった」というコメントがあった. これらのことから横メニューの場合は, 左右の手の初期位置を考慮したメニュー設計にしなければならないことが分かる【設計指針 (4)】.

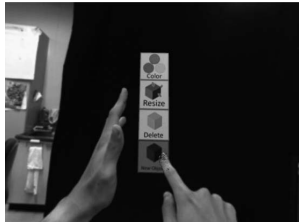
5 活用事例

5.1 実装

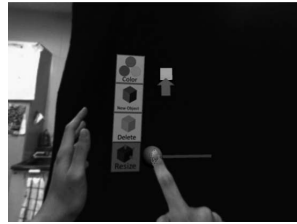
OpenPalmMenu の活用事例として, 3 次元空間内に仮想の 3 次元オブジェクトを自由に配置できる簡易的なモデリングアプリケーションを実装した (図 12). 提案メニューを使った, オブジェクトの配置・削除機能やスクロールバーによるオブジェクトの拡大・縮小機能, 色選択によるオブジェクトの色の変更機能を実装した. これらの機能は機能切替えメニュー (図 12 (a)) で切り替えることができる.

以下に, それぞれの設計について説明する. 設計指針 (3), (4) より, 始めに機能を選択する機能切替えメニューは非利き手の近くに縦に配置した (図 12 (a)). 次に, 設計指針 (1), (2) より, 拡大・縮小メニューは手掌の近くに配置された横型メニュー (図 12 (b)) と, 手掌より少し上に配置された縦型メニュー (図 12 (c)) を実装した. また, 設計指針 (1), (2) より, 縦に配置する場合は 4 項目, 横に配置する場合は 3 項目が妥当であるという結果であった. 複数のカラーパレットを表示する色メニューにおいては, 縦型メニュー (図 12 (e)) だけでなく 2 列 4 行の行列型メニュー (図 12 (d)) を実装した.

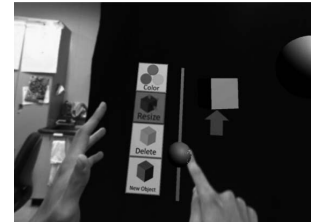
前述した [1] の前腕上のメニューでは, サイズ 6cm 四方の項目を一度に最大 4 個表示できるのに対し, 今回実装したメニューでは同大きさの項目を身体部位に視界が覆われることなく一度に最大 12 個表示できる.



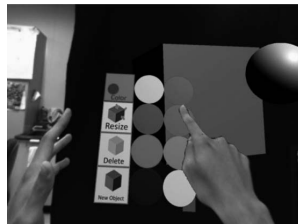
(a) 機能切替えメニュー



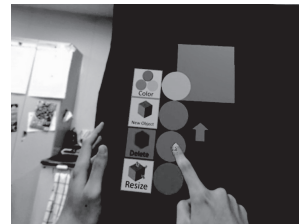
(b) 拡大・縮小メニュー (横型)



(c) 拡大・縮小メニュー (縦型)



(d) 色メニュー (行列型)



(e) 色メニュー (縦型)

図 12 モデリングアプリケーション

5.2 運用

作成したモデリングアプリケーションを男女3名(男性2名, 女性1名, 23~24歳, 平均23.3歳, 全員右利き)にVR環境で体験させ, メニューに関する意見を求めた。その結果, 以下のようなフィードバックが得られた。

拡大・縮小メニューにおいて2名から「操作の容易さにおいて, 横型と縦型で変わらなかった」という意見が得られ, 色メニューにおいて全員から「操作の容易さにおいて, 縦型と行列型で変わらなかった」という意見が得られた。これらの意見から, 設計指針(1), (2)に基づく円滑に操作できる範囲においては, メニューのレイアウトに関わらず容易に操作を行えることが窺える。

また「手に近いメニューは直観的に操作できる」という意見や「メニューを注視せずとも円滑に操作できる」という意見から, 非利き手を基準とした相対位置把握や運動感覚を活用してメニュー操作が行われていることが示唆された。

手の開閉によるメニューの表示や手掌に対しての追従について, 「左手を上げていなければならないので, 長時間メニュー操作を行うと疲れると思う」という意見があった。一方で「メニューの出し入れが簡単に行えるため操作しやすい」という意見も得られた。これ

らの意見から, 提案メニューは長時間メニューを表示する必要がなく, かつ, 頻繁にメニューの表示・非表示を切り替える作業に向いていることが示唆された。

また, 常に頭部の正面に追従して表示されるメニュー(図13)との比較を行った。これは Colaco [2] の手法や Hololens のメニュー [23] などで採用されている最も一般的なメニューである。メニューの表示・非表示の切替えについては, 頭部正面よりやや左下に常時表示されているメニューアイコンにタッチすることで行う。これは従来の WIMP 型のインタフェースでよく用いられる手法である。

8名(男性6名, 女性2名, 20~25歳, 平均21.9歳, 全員右利き)に OpenPalmMenu と図13の頭部正面に追従して表示されるメニューを体験させ, どちらが操作しやすかったかを回答させた。その結果全員が OpenPalmMenu の方が操作しやすかったと答えた。その理由について, 7名が「手の開閉によるメニューの表示・非表示の切替えが容易だったから」と回答した。また, 3名が「左手を動かすことで簡単にメニューを移動でき, メニューの向こう側のオブジェクトを確認しながら色選択などの作業ができたから」と回答した。

これらのコメントから, 提案手法は, 常に頭部の正面に追従して表示されるメニューよりも操作が容易で

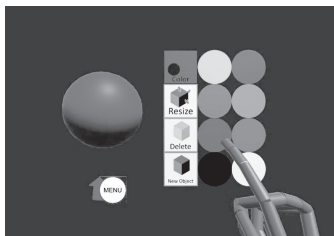


図 13 頭部正面に表示されたメニュー

あるということ、手の開閉によるメニューの表示・非表示の切り替えによって、メニューが作業の障害となることを防げることを確認した。

6 むすび

本研究では VR 空間や MR/AR 空間などの 3 次元空間に適したメニューとして、手の開閉によって手掌の前の空間に表示される追従型のメニュー OpenPalmMenu を提案した。手の開閉によるメニュー表示・非表示の容易さや、手掌に追従することによる操作しやすく見やすい位置への移動の容易さ、運動感覚を利用した円滑な操作を可能にした。

また、実験によって OpenPalmMenu の有用性の確認、および円滑に操作することが可能なメニューの表示範囲、項目数、レイアウトを確認した。そしてその結果を考慮して設計したメニューをモデリングアプリケーションに導入し、OpenPalmMenu の使用感に関する調査を行った。

今後の展望として、[1] や [6] などの身体上に表示されたメニューとの比較実験を行い、2.1 で述べた要件 (e) の触覚フィードバックの必要性や、OpenPalmMenu の利点である (f) の表示領域の制限の問題などを議論し、より深い考察を進める予定である。

今回提案したのは、2 次元の平面的なメニューであったが、Hinckley ら [9] は両手を使うことで 3 次元での作業が円滑になると述べており、今後は 3 次元の立体的なメニューの導入についても検討する。

さらに、今回非利き手はメニューの表示・非表示の切り替えと位置の制御のみに用いたが、非利き手の形によってメニューの種類が変わるなどのメニュー自体を制御する方法や非利き手のみのメニュー操作方法も

検討する予定である。

参考文献

- [1] Azai, T., Ogawa, S., Otsuki, M., Shibata, F. and Kimura, A.: Selection and manipulation methods for a menu widget on the human forearm, in Proceedings of CHI Extended Abstracts, ACM, 2017, pp. 357–360.
- [2] Colaco, A., Kirmani, A., Yang, H. S., Gong, N., Schmandt C. and Goyal, V. K.: Mime: Compact, low power 3D gesture sensing for interaction with head mounted displays, in Proceedings of UIST, ACM, 2013, pp. 227–236.
- [3] Ens, B., Byagowi, A., Han, T., Hincapie-Ramos J. D. and Irani, P.: Combining ring input with hand tracking for precise, natural interaction with spatial analytic interfaces, in Proceedings of SUI, ACM, 2016, pp. 99–102.
- [4] Grubert, J., Heinisch, H., Quigley, A. and Schmalstieg, D.: MultiFi: Multi-fidelity interaction with displays on and around the body, in Proceedings of CHI, ACM, 2015, pp. 3933–3942.
- [5] Guiard, Y.: Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: The kinematic chain as a model, The Journal of Motor Behaviors, Vol. 19, No. 4, 1987, pp. 486–517.
- [6] Harrison, C., Benko, H. and Wilson, A. D.: OmniTouch: Wearable multitouch interaction everywhere, in Proceedings of UIST, ACM, 2011, pp. 441–450.
- [7] Harrison, C., Tan, D. and Morris, D.: Skinput: Appropriating the body as an input surface, in Proceedings of CHI, ACM, 2010, pp. 453–462.
- [8] He, Z. and Yang, X.: Hand-based interaction for object manipulation with augmented reality glasses, in Proceedings of VRCAI, ACM, 2014, pp. 227–230.
- [9] Hinckley, K., Pausch, R., Goble, J. C. and Kasell, N. F.: Passive real-world interface props for neurosurgical visualization, in Proceedings of CHI, ACM, 1994, pp. 452–458.
- [10] Lee, H. and Woo, W.: Tangible spin cube for 3D ring menu in real space, in Proceedings of CHI Extended Abstracts, ACM, 2010, pp. 4147–4152.
- [11] Lin, S., Su, C., Cheng, K., Liang, R., Kuo, T. and Chen, B.: Pub-point upon body: Exploring eyes-free interaction and methods on an arm, in Proceedings of UIST, ACM, 2011, pp. 481–488.
- [12] Mine, M. R., Brooks, Jr., F. P. and Sequin, C. H.: Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction, in Proceedings of SIGGRAPH, ACM, 1997, pp. 19–26.
- [13] Mistry, P. and Maes, P.: SixthSense: a wearable gestural interface, in Proceedings of SIGGRAPH ASIA, Vol. 11, 2009.
- [14] 大沼俊博, 渡邊裕文: 深部感覚障害を有する患者への理学療法評価と理学療法の考え方, 関西理学療法学会, Vol. 6, 2006, pp. 39–42.

- [15] Pierce, J. S., Stearns, B. C. and Pausch, R.: *Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments*, in *Proceedings of I3D*, ACM, 1999, pp. 141–145.
- [16] Ragan, E., Wilkes, C., Bowman, D. A. and Hollerer, T.: *Simulation of augmented reality systems in purely virtual environments*, in *Proceedings of IEEE VR*, IEEE, 2009, pp. 287–288.
- [17] 佐々木博史, 黒田知宏, 真鍋佳嗣, 千原國宏: 『でのひらめにゆう』: ウェアラブルコンピュータ用入力インタフェース, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 日本バーチャルリアリティ学会, Vol. 7, No. 3, 2002, pp. 393–401.
- [18] Schmalstieg, D. and Hollerer, T.: *Augmented reality: Principles and Practice (Usability)*, Addison-Wesley Professional, 2016.
- [19] Stoakley, R., Conway, M. J. and Pausch, R.: *Virtual reality on a WIM: Interactive worlds in miniature*, in *Proceedings of CHI*, ACM, 1995, pp. 265–272.
- [20] Tecchia, F., Avveduto, G., Brondi, R., Carrozzino, M., Bergamasco, M. and Alem L.: *I'm in VR!: Using your own hands in a fully immersive MR system*, in *Proceedings of VRST*, ACM, 2014, pp. 73–76.
- [21] Yoshikawa, T., Shizuki, B. and Tanaka, J.: *HandyWidgets: Local widgets pulled-out from hands*, in *Proceedings of ITS*, ACM, 2012, pp. 197–200.
- [22] HoloStudio,
www.microsoft.com/ja-jp/hololens/apps/holostudio
(2018年2月16日閲覧)
- [23] Microsoft Windows Mixed reality
developer.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/gestures
(2018年2月16日閲覧)



浅井 拓己

2017年立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。仮想現実空間や複合現実空間におけるメニューウィジェットの研究開発に従事。



大槻 麻衣

2011年立命館大学大学院理工学研究科博士後期課程修了。2008年より2011年まで学振特別研究員DC1。2011年4月より2014年3月まで同

大学総合理工学研究機構ポストドクトラルフェロー。2014年4月より6月まで同プロジェクト研究員。2014年7月より筑波大学システム情報系助教。博士(工学)。複合現実感, 3次元インタフェースの研究に従事。ヒューマンインタフェース学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM各会員。日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。



柴田 史久

1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。1999年同研究科博士後期課程修了。大阪大学産業科学研究所助手を経て, 2003年4月より立命館大学理工学部助教授。同大学情報理工学部准教授を経て, 現在, 同教授。博士(工学)。モバイルコンピューティング, 複合現実感等の研究に従事。日本バーチャルリアリティ学会複合現実感研究委員会幹事。IEEE, 日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会, ヒューマンインタフェース学会等の会員。日本バーチャルリアリティ学会学術奨励賞・論文賞, ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。



木村 朝子

1996年大阪大学基礎工学部卒。1998年同大学院基礎工学研究科博士前期課程修了。同大学助手, 立命館大学理工学部助教授, 科学技術振興機構さきがけ研究員等を経て, 2009年4月より立命館大学情報理工学部メディア情報学科准教授。現在, 同教授。博士(工学)。実世界指向インタフェース, 複合現実感, ハプティックインタフェースの研究に従事。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, ACM, IEEE各会員。日本VR学会学術奨励賞・論文賞, ヒューマンインタフェース学会論文賞, 情報処理学会山下記念研究賞等受賞。