

VR空間操作コマンドとしての アイジェスチャUIの特性分析

夏目 達也^{1,a)} 内村 裕也^{1,†1} クリスチャン アルサーテ クルツ² 柴田 史久¹ 木村 朝子¹

受付日 2022年5月10日, 採録日 2022年11月8日

概要: ポスト WIMP 研究が活発化するなかで, 身体の動きを入力方法としたユーザインタフェースの研究や製品が増加している. 最近ではアイジェスチャと呼ばれる視線移動や瞬き/両目閉じのような目の動きを入力とする研究も登場してきた. しかし, VR 空間においてアイジェスチャを入力として用いた UI の特性に関する研究はまだ数が少なく, 知見は十分ではないと考えられる. そこで本研究では, 5 種類のアイジェスチャ (注視, 瞬き/両目閉じ, ウィンク/片目閉じ, 見開く, 細める) に対して, VR 空間における入力操作を 4 種類に分類したものをタスクとして設定した実験 (選択, 掴み, 色変更, 拡大) を実施した. その結果を基に, 各アイジェスチャにどのような特性があり, どのような操作に適しているのかを分析・考察した.

キーワード: HMD, VR, アイジェスチャ, 視線入力, ユーザインタフェース

Characteristic Analysis of Eye Gesture UI as a VR Space Operation Command

TATSUYA NATSUME^{1,a)} YUYA UCHIMURA^{1,†1} ARZATE CRUZ CHRISTIAN² FUMIHISA SHIBATA¹
ASAKO KIMURA¹

Received: May 10, 2022, Accepted: November 8, 2022

Abstract: As post-WIMP research becomes more active, research and products on user interfaces that use body movements as input methods are increasing. Recently, research called eye gestures that uses eye movements such as eye movements and blinking/closing both eyes has also appeared. However, the number of studies on the characteristics of UI using eye gestures as input in VR space is still small, and it is considered that the knowledge is not sufficient. Therefore, in this research, for 5 types of eye gestures (gaze, blink, wink, open, squint), the input operations in the VR space are classified into 4 types as tasks. Experiments (selection, grasping, color change, enlargement) were carried out. Based on the results, we analyzed and considered what kind of characteristics each gesture has and what kind of operation it is suitable for.

Keywords: HMD, VR, eye gesture, line-of-sight input, user interface

1. はじめに

ポスト WIMP 研究が活発化するなかで, たとえば Kinect や HoloLens のように, ジェスチャや視線など, 入力操作に身体部位を利用するユーザインタフェース (UI) が増えてきている. 一般的にいえば「物を見るために目を開く」「眠るために目を閉じる」「移動するために歩く」のように, 人は目的のために自然に身体を動かすことを身につけている. 情報機器に対する恣意的な入力操作でも同様に, 自分

¹ 立命館大学大学院情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

² 立命館グローバル・イノベーション研究機構
Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan Uni-
versity, Kusatsu, Shiga 525-8577, Japan

^{†1} 現在, NTT データ
Presently with NTT DATA Corporation

^{a)} natsume@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp

の身体機能の1つとして自然に扱えることが望ましい。

身体部位を利用するUIには、これまでハンドジェスチャといったユーザの手や腕の動きを入力として利用するものが多かったが [1], [2], アイトラッキング機能の搭載されたHMDが登場し、VRやAR/MR空間への入力手段として瞬きや視線移動といった目の動き（以降、アイジェスチャ）を入力として利用するUIも増えてきている [3]。

こうした「アイジェスチャ」は、他の身体動作やスイッチやボタンなどの器具で代替できないかといえ、できなくもない。しかし、片手/両手が別の用途やデバイスで塞がっている場合や手が利用できないユーザには、ハンズフリーで使える「アイジェスチャ技術」は有力な操作ツールとなる。特に、VRやAR/MRのような空間体験の場合は、両手両足を使うことも多く、「アイジェスチャUI」の存在意義が高い。しかし、VRやAR/MR空間におけるアイジェスチャUIの研究は、まだ数が少なく、知見も十分ではない。

そこで本研究では、VR空間操作においてアイジェスチャにどのようなUI特性があるのか、どのようなタスク操作に適しているのかの分析を行うことを目指す。アイジェスチャには、注視や視線移動などの「目の動き」を入力とするものや、瞬きやウインクなどの「瞼の動き」を入力とするものなど様々な種類が存在する。

我々は、このようなアイジェスチャのUI特性について系統的に実験を行う必要があると考え、逐次研究を行っている [4], [5], [6], [7]。本論文ではその第1歩として、アイジェスチャの中でも瞼の動きを入力としたジェスチャに焦点を当てる。具体的には、注視、瞬き/両目を閉じ続けて開ける（以降、両目閉じ）、ウインク/片目を閉じ続けて開ける（以降、片目閉じ）、見開く、細めるという5種類のアイジェスチャに対してUI特性の分析を行う。

2. アイジェスチャを用いた入力方法

2.1 視線入力と他の入力方法を組み合わせた方法

アイジェスチャ、特に視線の動きを入力方法として利用している研究が数多く取り組まれており、それらの研究のうち、視線入力と他の入力方法を組み合わせることで操作を行う研究が多く行われている。たとえば、Stellmachら [8]の研究では視線入力とキーボード入力、視線入力とスマートフォン型デバイスへの入力を組み合わせた2種類の入力方法を提案している。これらの入力方法を用いて、眼前に設置してある「GazeGalaxy」と呼ばれるディスプレイに表示されているマルチメディア検索システムを操作する。ディスプレイ上には画像や音楽などのマルチメディアオブジェクトが散らばっており、視線でポインティングしている位置に対してキーボードやスマートフォン型デバイスを用いて、画面の注視箇所や、目標物への操作が可能である。また、大和ら [9]の研究では、一般的なGUI上での

ドラッグ&ドロップの操作効率の向上を目的として、視線の動きとマウスを併用した操作方法を提案している。この研究では、マウス操作によるドラッグ&ドロップといったカーソル移動に代わる入力方法として視線入力を採用している。また、Ludwigら [10]の研究では、頭の動きと視線の動きの相乗的な動きを組み合わせた入力方法を提案している。また、Klamkaら [11]の「Look & Pedal」では、地図アプリにおける視線入力と足を用いるペダル型デバイスを操作する入力を組み合わせた入力方法を提案している。この研究においてもまた、マウスでのカーソル移動に代わる入力方法として視線入力を採用している。

アイジェスチャの認識精度の不安定さや日常行うアイジェスチャとの識別といった課題を解決する手段としても、視線入力と他の入力方法を組み合わせる方法は有効である。

2.2 アイジェスチャのみを入力として利用している方法

これに対して、近年ではアイトラッキング機能が搭載されたHMDがいくつか発売されたこともあり、VR空間においてアイジェスチャのみを入力として利用する研究も増えてきた。その中でも、注視や視線移動などの目の動きを入力として利用する研究が多く存在する [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [20]。たとえば、Stellmachら [19]の研究では、仮想空間で移動を行うための視線入力を用いたユーザインタフェースを提案している。これは、眼前に設置してあるディスプレイに仮想空間を移動するためのユーザインタフェースが表示される。たとえば、前進する項目を注視することで、仮想空間を前進し、右に回る項目を注視すると右に回るなど、選択した項目によって行動が異なるユーザインタフェースなどを複数設計し、比較を行った。Rajannaら [20]は、VR空間におけるキーボード操作方法として、視線移動と注視時間を組み合わせた手法と、視線移動とコントローラのボタン入力を組み合わせた手法を提案して比較している。また、Mélodieら [15]は、画面上の複数オブジェクトの中から、選択したいオブジェクトの軌跡に対して視線を合わせることで選択するという入力方法を提案している。

これらの注視や視線移動などの目の動きを入力として利用する研究以外にも、瞼の動きを入力として利用する研究も増えている [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28]。たとえば、Mingmingら [21]は、運動障害を持つ人々のために、瞬き、ウインクといった瞼の動きを入力としたジェスチャを設計し、検出精度の確認を行っている。また、Masaiら [27]は、笑顔、眉を上げる、瞬き、ウインク、頭を振るといった、顔、目、頭の動きを用いた入力方法を提案している。また、Orloskyら [28]は、アイジェスチャを入力とすることで景色を拡大縮小して観測する、双眼鏡のようなシステム「ModulAR」を開発した。この研究では、景色を

拡大縮小する入力に対していくつかの目を用いた入力方法を設計しており、普段のアイジェスチャとの誤認識が少ないと考えられる、目を細める、2回継続で瞬きを行う、一定時間目を閉じる、といった動作を提案し、それらを比較している。

2.3 研究方針

このようにアイジェスチャの利用可能性が広がる一方で、これまでのアイジェスチャ研究は、アイジェスチャの認識精度向上に関する研究やアイジェスチャを導入した新しい入力方法の提案などの研究がほとんどで、アイジェスチャ単体を入力として利用する場合の基本的な UI 特性については明らかにされてこなかった。そこで本研究では、VR 空間操作にアイジェスチャを利用することを想定し、基本的なアイジェスチャの UI 特性や、どのようなアイジェスチャがどのような操作に適しているのかについて分析を行う。

3. 実験準備

3.1 アイジェスチャの整理

まずは制約条件なしで、どのようなアイジェスチャがありうるかから考えはじめた。30名(21歳~33歳の男性26名, 女性4名)の人に思いつくアイジェスチャをすべて列挙してもらったところ、「ウインク」「瞬き」「視線の動き(例, 上から下に視線移動)」「注視」「両目を閉じる」「片目を閉じる」「目を細める」「寄り目」「目を見開く」「白目をむく」の10種類のアイジェスチャがあげられた。

これらのアイジェスチャの中から、本研究では動作が比較的容易であると判断した、UIとして利用できそうな「注視」「瞬き/両目閉じ」「ウインク/片目閉じ」「見開く」「細める」の5種類のアイジェスチャをピックアップした。

3.2 アイジェスチャによる VR 空間操作の分類

VR 空間操作におけるアイジェスチャの UI 特性を分析するにあたり、VR 空間において最も一般的である VR アプリケーションに焦点を当て、オブジェクト操作の分類・整理を行った。対象とした VR アプリケーションは、Google Maps, Google Earth, YouTube, Netflix VR, Tilt Brush, Tвори, Minos Starfighter, VR Moon Walk 3D, Kingspray Graffiti, Dreams の10種類である。これらの VR アプリケーションで用いられているオブジェクト操作を分類・整理した結果を表1に示す。次に、これらのオブジェクト操作をアイジェスチャで行うことを想定し、いくつかの具体的なアイジェスチャ動作を当てはめ、類似した動作を整理することで VR 入力操作のパターンを分類することにした。

たとえば、オブジェクトを選ぶ「選択」は、マウスでいうとクリックのような操作にあたる。これをアイジェスチャで行うことを考えると、「視線を移動させてオブジェクト

表 1 VR アプリケーションで使用された操作一覧

Table 1 List of the needed actions for user interfaces in VR.

| オブジェクト 操作 | 使用されたアプリケーションの 数 |
|----------------|---------------------|
| ボタンを押す (選択) | 10 |
| 拡大 (大きさ変更) | 6 |
| 縮小 (大きさ変更) | 6 |
| ドラッグ&ドロップ (掴み) | 4 |
| スライダバー (移動) | 3 |
| 反復動作 (色変更) | 2 |

表 2 操作に対する抽象化したアイジェスチャ操作一覧

Table 2 List of the core eye gestures.

| オブジェクト 操作 | 抽象化したアイジェスチャ操作 |
|--------------|-----------------|
| 選択 | 単発的入力&ON/OFF 操作 |
| 掴み | 継続的入力&ON/OFF 操作 |
| 移動 | 継続的入力&値変更操作 |
| 回転 | 継続的入力&値変更操作 |
| 大きさ変更 | 継続的入力&値変更操作 |
| 色変更 | 単発的入力&値変更操作 |

を見る」→「瞬きなどの特定のアイジェスチャを行う」という動作が考えられる。これを整理すると、「選択」操作では、アイジェスチャが入力されると選択操作が ON になり、再度入力されると OFF になる操作となる。すなわち、単発的な入力、ON/OFF 操作が行われる。

他の例としては、オブジェクトの大きさを変化させる操作である「大きさ変更」がある。この操作は、マウスでいうとホイールをスクロールさせるような操作にあたる。これをアイジェスチャで行うことを考えると、「視線を移動させてオブジェクトを見る」→「片目閉じなどの特定のアイジェスチャを開始(そのアイジェスチャが行われている間はオブジェクトの大きさを変更され続ける)」→「目的の大きさに到達したらアイジェスチャをやめる(閉じていた目を開く)」という一連の動作が考えられる。これを整理すると、「大きさ変更」操作は、アイジェスチャが入力されるとオブジェクトの大きさ(値)が変化し、アイジェスチャを継続的に行っている間はオブジェクトの大きさ(値)が変化し続ける操作ということになる。こちらは継続的な入力、値変更操作が行われる。

同様に、様々なオブジェクト操作を分類した結果を表2に示す。

このようにして、VR 空間における基本のオブジェクト操作を分類したところ、以下の4つの操作に分けられた。

- ・単発的入力&ON/OFF 操作
- ・継続的入力&ON/OFF 操作
- ・単発的入力&値変更操作



図 1 システム構成
Fig. 1 Apparatus.

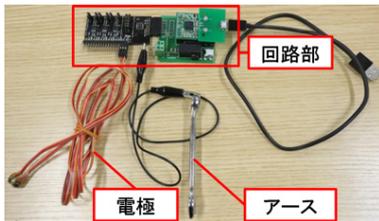


図 2 筋電位計測デバイス
Fig. 2 Myoelectric Interface.

・継続的入力 & 値変更操作

そこで本研究では、これら4つの操作方法ごとに、アイジェスチャのUI特性評価を行うこととした。4章の実験ではこれらの各操作方法に該当するような実験タスクを実験協力者に行わせることで、どのような種類のタスクにはどのようなアイジェスチャが適しているのか評価・分析する。そして実験結果から各アイジェスチャを分析することで、VR空間操作コマンドとしての各アイジェスチャのUI特性を分析する。

3.3 実験システム

4章以降の実験で使用するアイジェスチャ認識システムの構成を図1に、筋電位計測装置を図2に示す。実験では、赤外線によるアイトラッキング機能を有するHMDであるHTC VIVE Pro Eye (以降、VIVE Pro Eye) と筋電位計測装置 (前頭筋に電極を貼付) を利用してアイジェスチャを認識する。本システムはUnity2017.4.33f1上で開発を行った。使用したデスクトップPCのスペックは、OS: Windows 10 Professional, CPU: Core i7 3.60 GHz, メモリ: 16.0 GB, グラフィックボード: NVIDIA GeForce RTX2060 SUPERである。VIVE Pro Eyeとは、HTC社が開発・販売しているアイトラッキング機能を搭載したHMDである。本製品は、ユーザの頭部の動きを検出するヘッドトラッキング機能を搭載しており、頭の動きに表示が追従する。また、高解像度ディスプレイを通し、内部の表示部に設置されたレンズを通してそれぞれを左右の目で見ることによって立体視を実現している。VIVE Pro Eyeはレンズ付近に赤外線センサを設置しており、それによって視線の動きや瞬きなどの目の動きを検出可能である。また、本製品はアイトラッキングを最適化するためのキャリブレーション

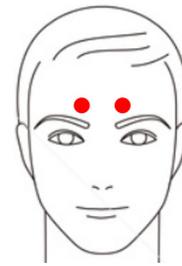


図 3 電極の貼り付け位置
Fig. 3 Myoelectric Sensor Position.

ション機能を有している。本研究では実験協力者ごとにキャリブレーションを実施し、目の開き具合を表す変数が、目を閉じているときに0.0、普通に目を開いているときに1.0となるように設定している。筋電位計測装置は、金沢大学学の新村らが作成した装置を使用している [29]。この装置は、皮膚表面における -1.25 mV 以上 1.25 mV 以下の範囲の電圧に対応しており、最終的な出力結果として、この微弱な皮膚表面での電圧を増幅したアンプ部分の出力をAD変換し、 -8192 以上 8192 以下の範囲で出力することができる。増幅率は500倍、1,000倍、5,000倍から選択可能であり、本研究では最大の増幅率となる1,000倍の設定を採用した。実験中は、電位の基準を決めるためのアースとして、導体であるレンチを実験協力者に握らせる (図2)。電極を2点に貼り付けることで筋電位が計測可能であり、今回はユーザの眉間に電極を貼ることによって目の動きを検出している (図3)。

3.4 アイジェスチャ認識

「注視」「瞬き/両目閉じ」「ウインク/片目閉じ」「見開く」「細める」の5つのジェスチャは、「見開く」ではVIVE Pro Eyeと筋電位計測装置を併用し、それ以外のアイジェスチャではVIVE Pro Eyeのみを使って識別している。各々のアイジェスチャUIは、表3のようなパラメータを設定して認識している。すべてのアイジェスチャの最適なパラメータを調査することは困難であると考えたため、本研究では既存研究やパイロットスタディにより、最適であると思われるパラメータを採用した。実際にアイジェスチャを使用する際は、同一環境下ですべてのアイジェスチャが識別されるようなシステムを利用することが想定されるため、本システムでは5種類すべてのジェスチャが識別されるように設計している。

【注視】一定時間の間、対象を見続けると入力されるアイジェスチャである。Choeら [30]の研究では、注視を入力方法とした選択タスクにおいて、注視と判定する時間が1.0秒、1.5秒、2.0秒の場合で比較しており、その結果1.0秒が最も評価が高いという結果を示している。Choeらの研究と同様に、この注視の判定時間は多くの研究で様々な時間が使用されており、その中でも1.0秒が多く採用されて

表 3 アイジェスチャのパラメータ設定
Table 3 Eye gestures parameter settings.

| アイジェスチャ | 単発的なアイジェスチャ | 継続的なアイジェスチャ |
|-----------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 注視 | 1000msの間、対象を見続けると入力 | 1000msの間対象を見続けることで入力が開始し、注視をやめると入力終了 |
| 瞬き/両目閉じ | 両目を閉じてから 500ms 以内に目を開くと入力 | 両目を閉じることで入力が開始、目を開くと入力終了 |
| ウインク/片目閉じ | 片目を閉じてから 500ms 以内に目を開くと入力 | 片目を閉じることで入力が開始、目を開くと入力終了 |
| 見開く | 両目の開き具合が 1.0 かつ、筋電位が一定値以上であれば入力 | 両目の開き具合が 1.0 かつ、筋電位が一定値以上である間、入力が継続 |
| 細める | 両目の開き具合が 0.1 以上 0.5 以下であれば入力 | 両目の開き具合が 0.1 以上 0.5 以下である間、入力が継続 |

いる [31], [32], [33], [34]. また、実際に注視の判定時間を 1.0 秒未満に設定したところ、注視以外のジェスチャを入力する前後の時間に注視と判定されてしまう回数が顕著に増加した. そこで本研究では、注視の判定時間を 1,000 ms に設定した. なお、注視中に、他のアイジェスチャを行った場合や、注視対象から視線が逸れてしまった場合は、注視時間がリセットされる.

【瞬き/両目閉じ、ウインク/片目閉じ】両目または片目を閉じて、また開くと入力されるアイジェスチャである. 目を閉じてから開くまでの時間がある程度短ければ単発の入力(瞬き、ウインク)、長ければ継続の入力(両目閉じ、片目閉じ)と認識する. また、本研究における継続の入力とは、両目(片目)を閉じてから目を開くまで、1 回の入力が継続し続けることを指す. Behrooz ら [35] の研究では、重度の運動障害を持つ個人向けの瞬きによるテキスト入力システムの実装、評価を行っているが、ここでは瞬きと認識される時間を、目を閉じてから開くまでの時間が 140 ms から 540 ms の間としていた. 本研究ではこれを参考に、目を閉じてから 500 ms 以内に目を開いた際に瞬き、ウインクの単発の入力であると設定した. また、目の開き具合の最大を 1.0、最小を 0.0 としたときに、両目が 0.2 以下を瞬き/両目閉じ、右目が 0.2 以上、左目が 0.2 以下を左ウインク/左目閉じ、右目が 0.2 以下、左目が 0.2 以上を右ウインク/右目閉じとして設定した.

【見開く、細める】目を大きく見開いたり、細めたりするアイジェスチャである. これらのアイジェスチャを識別するために、3.3 節で述べた目の開き具合を表す変数(普通に目を開いている状態が 1.0、目を閉じている状態が 0.0)が 0.5 以下 0.1 以上の場合を細めると判定した. また、見開くは目の開き具合だけでは精度が不十分であったため、筋電位による判定も併用し、目の開き具合を表す変数が 1.0 かつ、眉間の筋電位が一定値以上のものを見開くとして設定した.

3.5 評価指標

タスク達成までの平均作業時間、平均エラー回数、5 項目の主観評価(表 4)、そして好みのアイジェスチャの順

表 4 5 項目の主観評価

Table 4 Our 5-question questionnaire for the qualitative evaluation.

| 評価項目 | 主観評価の内容 |
|------|--------------------------------|
| 1 | この入力方法をどれくらい簡単に扱えるか(容易さ) |
| 2 | この入力方法を覚えるのはどれくらい簡単だったか(学習容易性) |
| 3 | タスクに対してこの入力方法はどれくらい適していたか(適合性) |
| 4 | 始める前と比べてどれくらい目が疲れなかったか(疲れにくさ) |
| 5 | 全体的にこの入力方法をどれくらい好んだか(好み) |

位の結果から各アイジェスチャを評価・分析する. 平均エラー回数とは、タスクを 1 回完了させるまでに入力に失敗した回数である. 具体的には、タスク 1 では誤った数字の選択、タスク 2 では移動途中での掴みを解除、タスク 3 では目標の色以外での決定、指示された色の超過、タスク 4 では指示された大きさ ± 0.2 以上を超える場合に入力に失敗したと見なし、エラーとしている. 主観評価は非常に悪いを「1」、非常に良いを「7」とした 7 件法で評価する.

4. 実験

4.1 目的

VR 空間操作コマンドとしての各アイジェスチャがどのようなタスクに適しているのか、そして各々にどのような UI 特性があるのかを分析するために、3.2 節であげた 4 種類のアイジェスチャ操作ごとにタスクを設定し、実験を行う. なお、本実験ではアイジェスチャ間の推定エラーによる識別精度への影響を最小限にするために、分析対象のアイジェスチャのみが識別されるように設定している. たとえば、ウインク/片目閉じの UI 特性分析を行う際は、注視や瞬き/両目閉じなど他のアイジェスチャは識別されない.

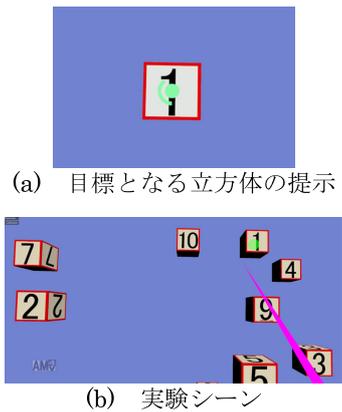


図 4 単発的入力 & ON/OFF 操作 (選択操作) のタスク
 Fig. 4 Single input & ON/OFF operation (selection).

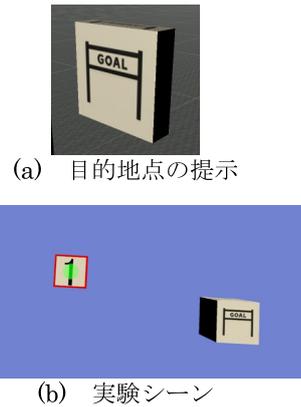


図 5 継続的入力 & ON/OFF 操作 (掴み操作) のタスク
 Fig. 5 Continuous input & ON/OFF operation (drag&drop).

4.2 実験タスクと実験手順

4 種類の入力操作ごとの実験タスクは以下のとおりである。すべてのタスクにおいて、目標物の提示シーンと実験シーンが存在する。

タスク 1: 単発的入力 & ON/OFF 操作 (選択操作)

提示シーンでは、選択タスクの目標となる数字を実験協力者の前方に提示する (図 4(a))。立方体に視線を合わせると、立方体の中央に円形のロードが表示され、3 秒後に実験シーンへと移行する。実験シーンでは、実験協力者の前方に 1~10 の数字が描かれた立方体をランダムに 10 個配置し、目標となる数字が描かれた立方体を視線でとらえ、アイジェスチャを行うことで選択させる (図 4(b))。実験シーンでは、立方体に視線を合わせた場合や注視を入力した場合でも、提示シーンで表示された円形のロードは表示されない。また、目標となる数字以外が描かれている立方体を誤って選択した場合はエラーとしてカウントされ、もう 1 度同じタスクを行わせる。また、タスク 1 でのみ視線位置をピンク色のレイで表示している。これは選択タスクが「目標となる数字が描かれた立方体を視線でとらえ、アイジェスチャを行う」動作であるため、視線位置の可視化が必要であると考えたためである。

タスク 2: 継続的入力 & ON/OFF 操作 (掴み操作)

提示シーンでは、タスク 1 と同様に立方体に数字を提示するが、提示される数字は実験協力者の現在の試行数を表している。1 試行目なら 1, 3 試行目なら 3 といったように実験協力者に対する目安として提示した。実験シーンでは、実験協力者の正面に立方体を配置し、アイジェスチャを行うことで立方体を掴み、目的地点まで視線によって移動させる (図 5)。目標地点に到達するまでに誤って掴みをやめてしまった場合や 1 度目標地点に到達したが掴み状態を解除する際に立方体が目標地点に接していなかった場合は、それらをエラーとしてカウントし、もう 1 度同じタスクを行わせる。また、タスク 2 では入力方法として注視と両目閉じは省いて実験を行う。これは、注視については、

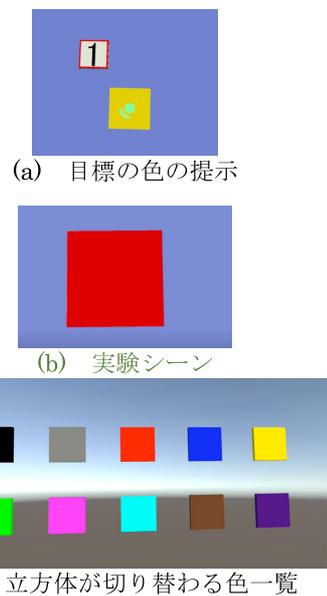


図 6 単発的入力 & 値変更操作 (色変更操作) のタスク
 Fig. 6 Single input & value change operations (color change).

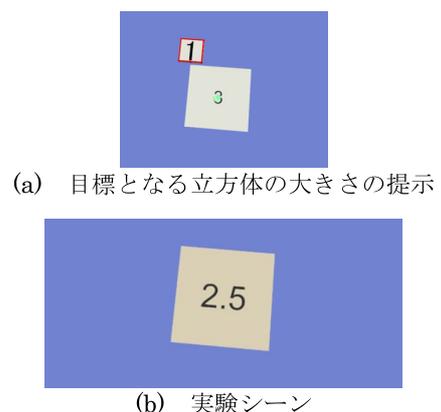


図 7 継続的入力 & 値変更操作 (拡大操作) のタスク
 Fig. 7 Continuous input & value change operations (scale up).

立方体から視線を外すと入力が終了されエラーとなってしまうタスクを完了できないためである。両目閉じについては、両目を閉じ続けている間入力が行われるため、入力動

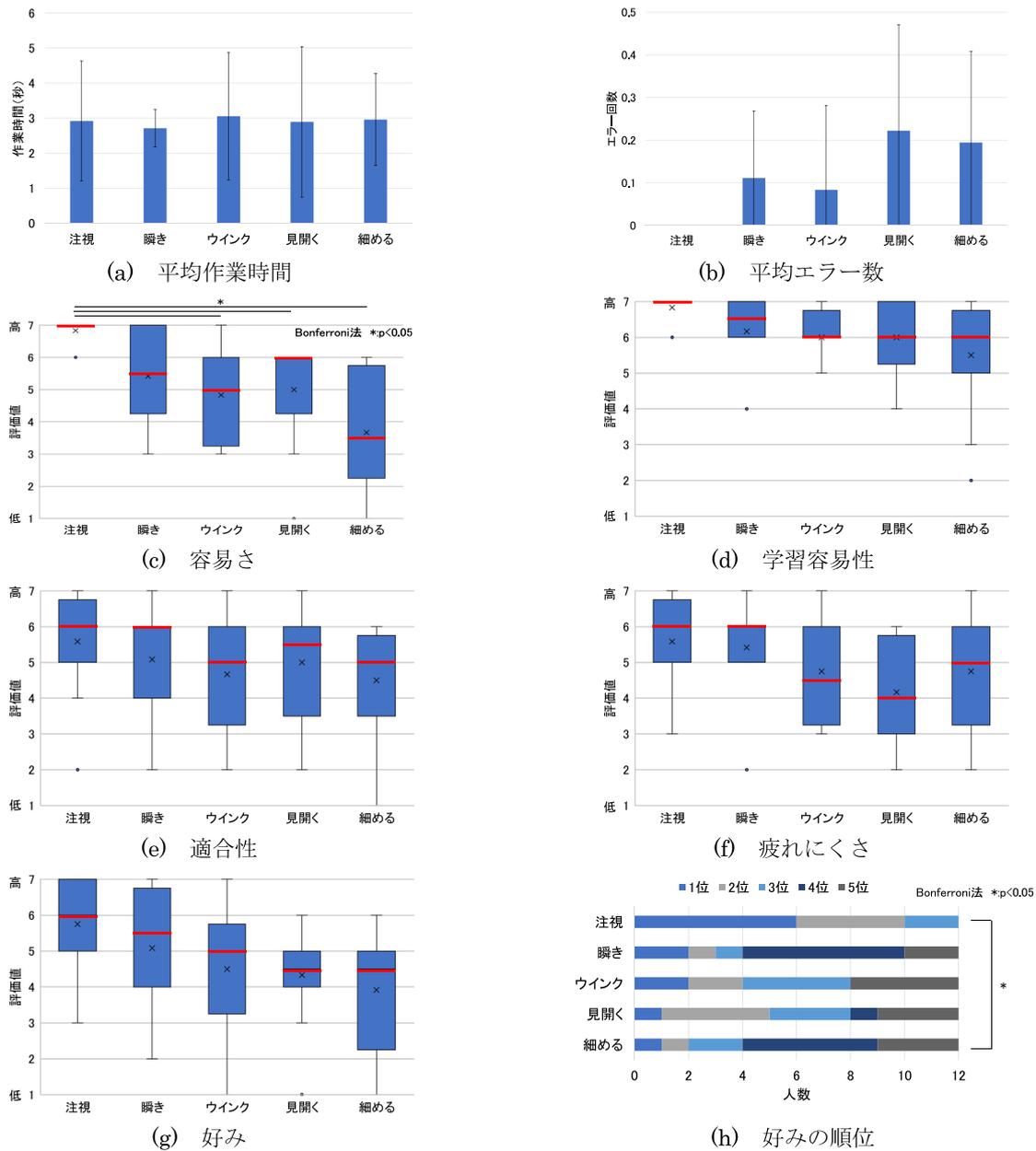


図 8 タスク 1：選択の結果
 Fig. 8 Task 1: Selection action results.

作中は何も見えず、タスクを完了できないためである。

タスク 3：単発の入力 & 値変更操作（色変更操作）

提示シーンでは、目標の色を実験協力者の前方に提示する（図 6(a)）。目標となる立方体の色は、赤・青・黄の中から 1 つが提示される。実験シーンでは、実験協力者の正面に立方体を配置し、アイジェスチャを行うことで立方体の色を目標の色になるまで変更させる（図 6(b)）。見つけている立方体に対してアイジェスチャを行うたびに、立方体の色が切り替わり、立方体を目標の色に変更し、決定することで成功となる。立方体の色が変わってから 3 秒間アイジェスチャ入力を行わなかった場合に、その時点での立方体の色で決定となる。実験シーンでの立方体の色は白色から始まり、アイジェスチャを行うことで図 6(b) に示

されている 10 色が順番に切り替わる。目標の色は、3 試行での合計が 10 番目になるように統一して提示している。たとえば、1 試行目が 3 番目、2 試行目が 4 番目のとき、3 試行目は 3 番目に目標の色が提示される。目標以外の色はランダムに提示される。また、誤って目的の色以外で決定した場合や目的の色で決定せず次の色に進んだ場合は、エラーとしてカウントされ、もう 1 度同じタスクを行わせる。
タスク 4：継続的の入力 & 値変更操作（拡大操作）

提示シーンでは、拡大する際に目標となる立方体の大きさを実験協力者の前方に提示する（図 7(a)）。元の立方体の大きさを 1.0 としたときに、目標となる立方体の大きさは 3.0、4.0、5.0 の 3 種類が用意されている。この 3 種類のうちの 1 つが目的の大きさとして設定される。実験シー

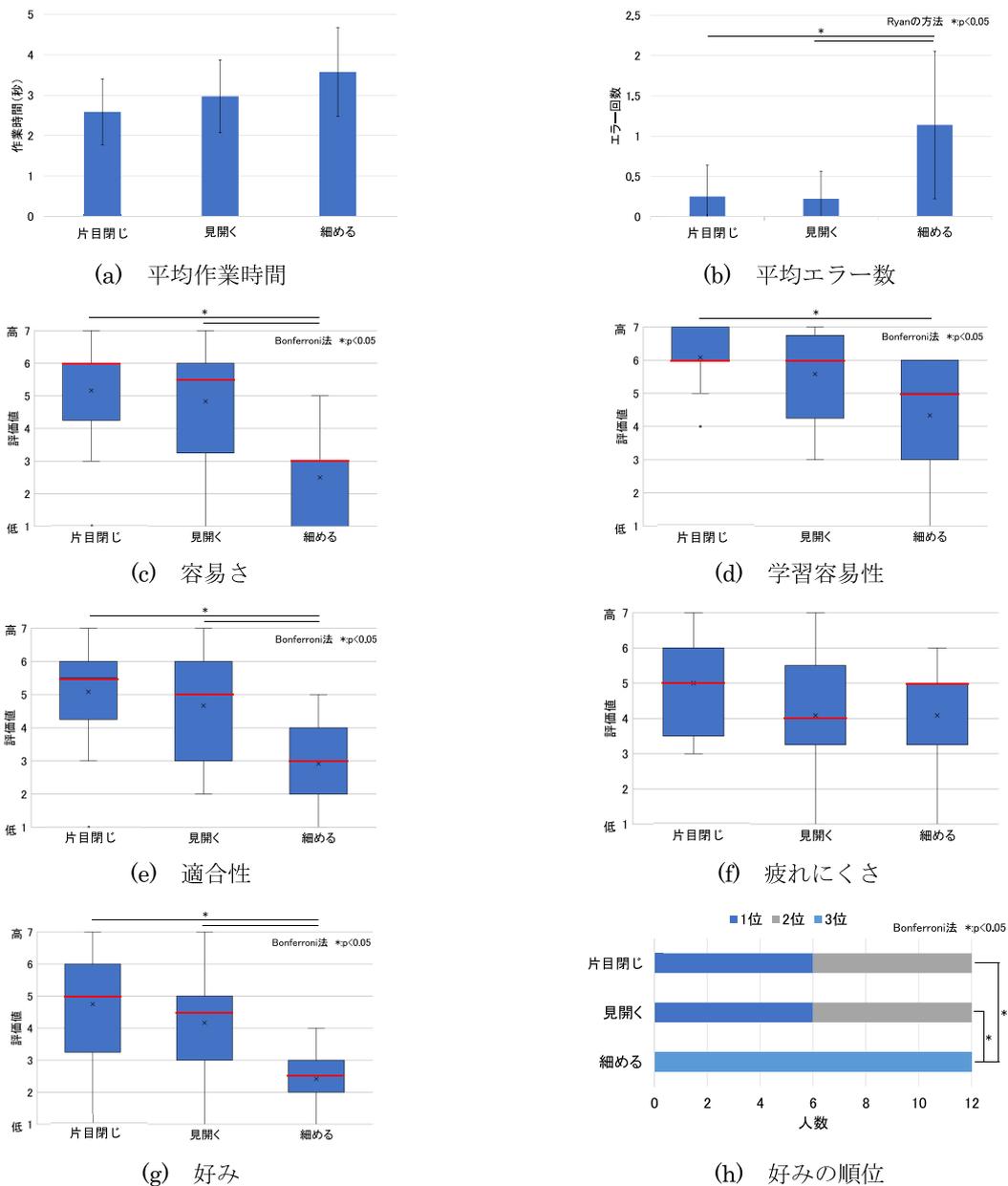


図 9 タスク 2：掴みの結果

Fig. 9 Task 3: Drag&drop action results.

ンでは、実験協力者の正面に立方体を配置し、アイジェスチャを行い続けることで立方体を目標の大きさになるまで、10ms 単位で 0.01 ずつ拡大させる (図 7(b))。また、目的の大きさの ± 0.2 以内で拡大を停止できた場合は成功、目的の大きさの ± 0.2 を超える場合はエラーとしてカウントし、もう 1 度同じタスクを行わせる。

また、タスク 4 では、入力方法として両目閉じは省いて実験を行う。これは、タスク 2 と同様に両目閉じは、両目を閉じ続けている間入力が行われるため、入力動作中は何も見えず、タスクを完了できないためである。

実験手順は以下のとおりである。本実験では、タスク遂行の順序効果をなくすため、タスクの実施順はラテン方格法 [36] を用いてカウンタバランスをとっている。

- (1) 参加者ごとに目の動きの検出精度に差が出ないように VIVE Pro Eye を用いてキャリブレーションを実行。
- (2) タスク 1~4 から行うタスクをラテン方格法を用いて決定。
- (3) 体験させる入力方法をラテン方格法を用いて決定し、入力方法の練習を行わせる。
- (4) (2) で決定したタスクを (3) で決定した入力方法で 3 回行わせる。
- (5) 体験した入力方法に対する主観評価を回答させる。
- (6) 目の疲労が排除されるまで休憩を設ける。
- (7) 残りの入力方法についても手順 (3)~(6) を繰り返す。
- (8) 残りのタスクについても手順 (3)~(6) を繰り返す。
- (9) 全タスク終了後、体験したすべての入力方法を好みで

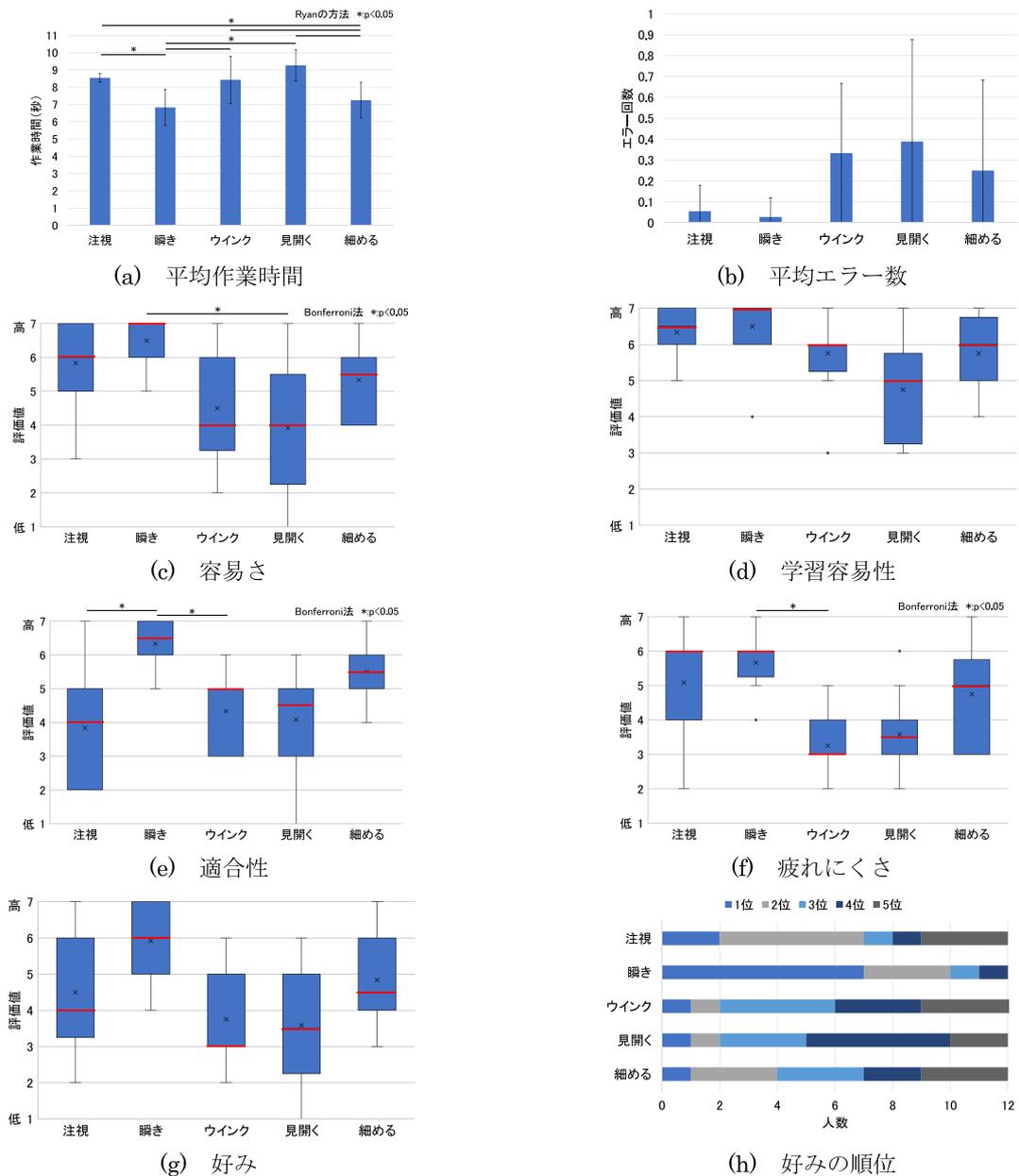


図 10 タスク 3：色変更の結果
 Fig. 10 Task 3: Changing color action results.

順位付けさせる。

以上より、各タスクの試行回数は以下のとおりとなる。

- タスク 1 とタスク 3 で使用するアイジェスチャは、単発的なアイジェスチャである注視、瞬き、ウィンク、見開く、細めるの 5 種類であり、各アイジェスチャにつき 3 試行を行うため、合計 15 試行である。
- タスク 2 で使用するアイジェスチャは、継続的なアイジェスチャである片目閉じ、見開く、細めるの 3 種類であり、各アイジェスチャにつき 3 試行を行うため、合計 9 試行である。
- タスク 4 で使用するアイジェスチャは、継続的なアイジェスチャである注視、片目閉じ、見開く、細めるの 4 種類であり、各アイジェスチャにつき 3 試行を行う

ため、合計 12 試行である。

4.3 参加者

実験協力者は 20~22 歳の男性 12 名で、矯正を含め、全員が正常視力を有した。実験は 1 人あたり 1 時間半程度であり、謝礼はない。

4.4 実験結果

タスク 1~タスク 4 の入力操作に対する実験結果を図 8、図 9、図 10、図 11 に示す。平均作業時間のグラフでは、縦軸が 1 回のタスクを完了させるまでの平均作業時間、横軸は入力方法を表している。平均エラー回数の結果では、縦軸が 1 回成功するまでに失敗した回数、横軸は入力方法

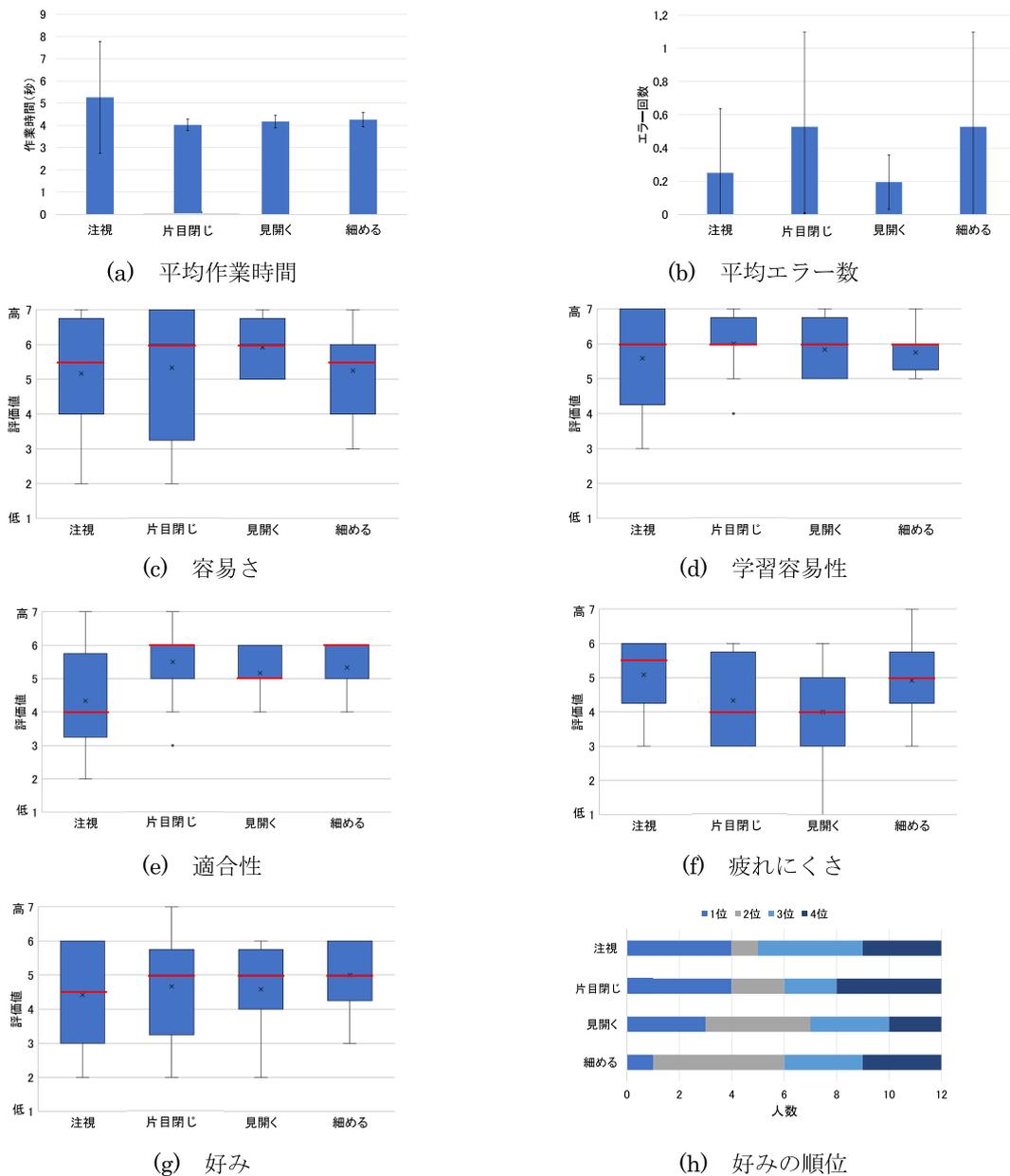


図 11 タスク 4：拡大の結果
 Fig. 11 Task 4: Scale up action results.

を表している。また、平均エラー回数の分析には、入力方法を要因として1要因分散分析を行った。主観評価の結果は、グラフの縦軸が7件法における評価値を表しており、横軸は使用したアイジェスチャの種類を表している。主観評価の分析には、入力方法を要因としてフリードマン検定を行った。入力方法の好みの順位の結果は、グラフの縦軸が入力方法、横軸が各順位を回答した人数を表している。好みの順位分析には、入力方法を要因としたフリードマン検定とボンフェローニ法を用いた多重比較を行った。

以下、それぞれの入力操作ごとの結果について述べる。

4.4.1 タスク 1：選択

単発的入力&ON/OFF操作では、容易さ(図8(c))において、入力方法間で有意差が認められた($p < 0.05$)。さ

らに、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、注視とウインク、注視と見開く、注視と細めるの間に有意差が認められた($p < 0.05$)。また、学習容易性(図8(d))、疲れにくさ(図8(f))では入力方法の要因において有意差は認められたもの($p < 0.05$)、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、入力方法間において有意差は認められなかった。好みの順位についても、入力方法間で有意差が認められた($p < 0.05$)。ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、注視と細めるの間に有意差が認められた($p < 0.05$)。

4.4.2 タスク 2：掴み

継続的入力&ON/OFF操作では、平均エラー回数において、入力方法の要因で主効果が有意であった

($F(2, 22) = 10.541, p < 0.05$). 下位検定として、入力方法間における有意差を確認するため、Ryanの方法による多重比較を行った。その結果、片目閉じと細める、見開くと細めるの間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。主観評価では、容易さ (図 9(c)) において入力方法間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。さらに、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、片目閉じと細める、見開くと細めるの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。同様に、学習容易性 (図 9(d))、適合性 (図 9(e))、好み (図 9(g)) に関してもフリードマン検定において入力方法間で有意差が認められ、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、学習容易性 (図 9(d)) では片目閉じと細める、適合性 (図 9(e)) では片目閉じと細める、見開くと細める、好み (図 9(g)) では片目閉じと細める、見開くと細めるの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。入力方法の好みの順位 (図 9(h)) に関しても、入力方法間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、片目閉じと見開く、見開くと細めるの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。

4.4.3 タスク 3: 色変更

単発の入力 & 値変更操作では、平均作業時間において、入力方法の要因で主効果が有意であった ($F(4, 44) = 13.199, p < 0.05$)。下位検定として、入力方法間における有意差を確認するため、Ryanの方法による多重比較を行った。その結果、注視と瞬き、注視と細める、瞬きとウイंक、瞬きと見開く、ウイंकと細める、見開くと細めるの間に有意差が見られた ($p < 0.05$)。主観評価については、容易さ (図 10(c)) では入力方法間で有意差が認められた ($p < 0.05$)。ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、瞬きと見開くの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。同様に、適合性 (図 10(e)) では注視と瞬き、瞬きとウイंक、疲れにくさ (図 10(f)) では瞬きとウイंकの間に有意差が認められた ($p < 0.05$)。学習容易性 (図 10(d))、好み (図 10(g)) に関しては、フリードマン検定において入力方法間における有意差は認められたものの、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、入力方法間において有意差は認められなかった。入力方法の好みの順位では、入力方法の要因における有意差は認められたものの ($p < 0.05$)、ボンフェローニ法を用いた多重比較を行った結果、入力方法間において有意差は認められなかった。

4.4.4 タスク 4: 拡大

継続的な入力 & 値変更操作では、主観評価、入力方法の好みの順位、いずれの結果についても、入力方法間で有意差は認められなかった。

5. 考察

5.1 各アイジェスチャの考察

本節では、4.4 節の実験結果から、VR 空間操作コマンド

としての各アイジェスチャ (注視、瞬き/両目閉じ、ウイंक/片目閉じ、見開く、細める) にどのような特性があるのか、また、どのような操作に適しているのかについて考察する。

【注視】注視はどの実験においても主観評価項目の容易さと疲れにくさの中央値が 5.5 以上と高く評価されている。これは、対象を見るだけでよいといった動作がとても簡潔であること、そして瞼を動かすといった筋肉に負担をかける動作が必要ないことためであると考えられる。ただし、タスク 1 では他のアイジェスチャと比べて注視はどの項目でも高評価であったが、タスク 3 とタスク 4 では全体的に評価が伸びなかった。タスク 3 とタスク 4 において注視の評価が伸びなかったのは、主観評価項目の適合性の評価が、他のアイジェスチャと比べて最も低くなったことが理由として考えられる。実験協力者から得られたコメントとして「注視は対象を見続けているだけで入力が継続されるため、入力のタイミングに目を動かす必要がないため自分で入力を行っている感覚が弱い」「入力を行わないためにはわざわざ対象を見ないようにする必要があり、違和感を感じた」といったものがあげられ、これらの要素によって注視の適合性が低くなったと考えられる。これらのことから、注視はだれでも簡単に扱えて疲れにくいが、複数回入力や継続的な入力には適しておらず、単発的な入力 & ON/OFF 操作 (単数回入力) に適していると考えられる。

【瞬き/両目閉じ】瞬きは、どのタスクにおいても主観評価項目の容易さと疲れにくさの中央値が 5.5 以上と高く評価されている。これは、瞬き/両目閉じという動作が、人間が日常的に行っている動作であるためと考えられる。また、タスク 3 の瞬きによる複数回入力 (値変更操作) では他のアイジェスチャと比べてどの項目でも高評価であったが、タスク 1 の瞬きによる単数回入力 (ON/OFF 操作) では評価が伸びなかった。このようになった理由としては、人間は日常的に瞬きを何度も行うことに慣れているため、タスク 3 のような瞬きを何度も行う必要のあるタスクでは他のアイジェスチャよりも使いやすく評価が高くなったのだと考えられ、タスク 1 のような瞬きを 1 回しか行わないようなタスクでは、他のアイジェスチャに比べ、目の渇きを防ぐために無意識にってしまうなど、誤って行ってしまう可能性が高いことや容易さや疲れにくさに差が付きにくいことが考えられる。これらのことから、瞬き/両目閉じはだれでも簡単に扱えて疲れにくいが、単数回入力には適しておらず、単発的な入力 & 値変更操作 (複数回入力) に適していると考えられる。

【ウイंक/片目閉じ】ウイंक/片目閉じは今回評価した 5 つのアイジェスチャの中では最も苦手な人が多かった。ウイंक/片目閉じが苦手な人が多かった理由としては、ウイंक/片目閉じは他のアイジェスチャと異なり、左右の目で異なる動きを行わせているからだと考えられる。具体的

には、片目は閉じる、もう片方の目は開いて対象を見るといった別々の動きを同時に行う必要があるため、人によって得意不得意が分かれているのだと考えられる。しかし、ウイंक/片目閉じは日常的に行う目の動作ではないため、ウイंक/片目閉じが得意な人にとっては誤って行ってしまう可能性が少なくスムーズに入力が行えることから、ウイंक/片目閉じは得意な人にはエラーが少なく使いやすいたことが示唆される。また、タスク2では他のアイジェスチャと比べて片目閉じは全体的に評価が高く最も好まれていたが、タスク3では好みの評価が最も低かった。これらのことから、ウイंक/片目閉じは得意な人にはエラーが少なく使いやすいたが、複数回入力には適していない。また、苦手な人には難しく疲れやすい。以上のことから、継続的入力&ON/OFF操作に適していると考えられる。

【見開く】見開くは目を大きく開くだけで入力が行われるため、だれでも不自由なく実行可能なアイジェスチャである一方で、無意識に目を大きく開いてしまうことや、上を見るだけで無意識に目を見開いてしまうことがあるためエラー回数が多かった。また、継続的な入力を用いるタスク2,4と比べて、単発的な入力を用いるタスク1,3で好みの評価が低かった。このようになった理由としては、タスク2,4においては見開く以外のアイジェスチャも疲れやすかったことから他のアイジェスチャと比べても疲れやすさは目立たなかったが、タスク1,3においては単発的な見開くの疲れやすさが目立ったことが好みの評価に影響したと考えられる。疲れやすい理由としては、見開くというアイジェスチャは目を大きく開く必要があるため、目の周りの筋肉に負担がかかっていることや、目を見開く際に顔に装着しているHMDが上にずれることから疲れやすいのではないかと考えられる。以上のことから、見開くは人によって得意不得意が分かれなない動作であるものの、エラーが起りやすい、単発的な入力には適していない、疲れやすいことから、どちらかという継続的入力&ON/OFF操作に向いていると考えられる。

【細める】細めるは人によって得意不得意が分かれなない容易な動作であるが、タスク1,2のような視線を動かす必要のあるタスクにおいて、エラーが頻繁に発生した。これは、細めるというアイジェスチャは入力を行う際に目を細くする必要があり、これによってアイトラッキングデバイスが視線情報を正確に取得することができず視線がぶれやすくなるためであると考えられる。また、細めるはタスク4では他のアイジェスチャと比べても好みの評価に差があまりなかった。以上のことから、細めるは単独のアイジェスチャとしてはあまり評価が高くなく、強いていえば継続的入力&値変更操作に向いていると考えられる。

5.2 全体考察

本節では、4.4節の実験結果から得られた、VR空間操作

コマンドとしてのアイジェスチャが、どのような場面で使用できるかを示すとともに、どのような場面では使えないのかといったリミテーションについても考察する。

まず、本研究で用いたアイジェスチャの利用場面としては、上肢に障害を持つ人の操作手法、片手/両手が別の用途やデバイスで塞がっている場合のハンズフリー操作、ショートカットキーとしての活用などが考えられる。ハンズフリー操作の例としては、VRシューティングゲームの体験時に両手で銃型のデバイスを把持している際に、アイジェスチャを用いてUI操作を行うといったシナリオが想定される。ショートカットキーとしての活用の例としては、コントローラでオブジェクトを把持している際に、アイジェスチャを用いてオブジェクトのサイズや色を変更することで少ない労力・時間で操作が可能になるといったシナリオが想定される。

このように、アイジェスチャには様々な利用場面が考えられる一方で、いくつかのリミテーションや課題が存在する。まず、本論文で対象としたアイジェスチャだけは、その種類が少ないこと、日常的な動作との誤認が起こる可能性があるという課題点がある。この課題への対処法としては、アイジェスチャを複数用いて1つのコマンドとする組合せアイジェスチャを採用することがあげられる。また、入力対象ではないものが注視によって誤って入力されるMidasTouch問題も課題点の1つである。本実験では、入力対象が少なかったためMidasTouch問題はほとんど見られなかったが、アイジェスチャを実際のVRアプリケーションで利用することを想定するとMidasTouch問題への対処が必要である。この課題の対処法としては、Choiら[9]の研究のようなユーザが意図的に目を動かさない限り、視線が移動することがほとんどない領域であるKuiper Beltの活用、コントローラやハンドジェスチャとの併用、注視の時間の再検討の実施などがあげられる。さらに、本論文ではアイジェスチャのUI特性分析を行うために、実験システムや条件をかなり統制して実験を行っている。そのため実課題を想定した場合の問題点や利用する際の知見については十分に得られていない可能性がある。よって、本研究の知見をふまえたアイジェスチャ操作型VRアプリケーションの開発とその有用性の分析にも取り組む必要がある。

6. むすび

本研究では、各アイジェスチャに対して、VR空間における操作を4種類に分類したものをタスクとして設定した実験に取り組んだ。その結果を基に、各々のアイジェスチャのUI特性と、どのような操作に適しているのかを分析した。

まず、注視は単発的な入力を用いた単数回入力、瞬き/両目閉じは単発的な入力の値変更操作に適していた。ウイंक/片目閉じは得意な人には使いやすく、継続的な入力

を用いた ON/OFF 操作に適していた。見開くと細めるに関しては、上記のアイジェスチャよりも評価は下がるが、見開くは継続的な入力を用いた ON/OFF 操作に向いていると考えられ、細めるは強いといえば継続的な入力を用いた値変更操作に向いていることが分かった。今後の展望としては、アイジェスチャを複数用いることで1つのコマンドとする組合せアイジェスチャの VR 空間操作コマンドとしての UI の特性分析や、本研究の知見を用いたアイジェスチャ操作型の VR アプリケーションの開発やその事例の分析などが考えられる。

参考文献

- [1] Pierce, J.S., Stearns, B.C. and Pausch, R.: Voodoo dolls: seamless interaction at multiple scales in virtual environments, *Proc. Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.141–145 (1999).
- [2] Tecchia, F., Avveduto, G., Brondi, R., Carrozzino, M. and Bergamasco, M.: I'm in VR!: using your own hands in a fully immersive MR system, *Proc. Virtual Reality Software and Technology*, pp.73–76 (2014).
- [3] Rajanna, V. and Hansen, J.: Gaze typing in virtual reality: impact of keyboard design, selection method, and motion, *Proc. Eye Tracking Research & Applications*, No.15 (2018).
- [4] 夏目達也, 内村裕也, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ UI 特性分析 (1) —単一アイジェスチャの UI 特性分析, 第 192 回 HCI 研究会 (2021).
- [5] 後藤健太, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ UI 特性分析 (2) —直列型アイジェスチャの UI 特性分析, 第 192 回 HCI 研究会 (2021).
- [6] 夏目達也, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ UI 特性分析 (3) —アイジェスチャ・コマンドの利用事例開発と UI 特性の評価, 第 194 回 HCI 研究会 (2021).
- [7] 夏目達也, 柴田史久, 木村朝子: VR 空間操作コマンドとしてのアイジェスチャ UI 特性分析 (4) —並列型アイジェスチャの UI 特性分析, 第 196 回 HCI 研究会 (2022).
- [8] Stellmach, S., Stober, S., Nürnberger, A. and Dachsel, R.: Designing gaze-supported multimodal interactions for the exploration of large image collections, *Proc. NGCA*, Article No.1 (2011).
- [9] 大和正武, 神代和範, 門田暁人, 松本健一: 視線・マウス併用型インタフェースのドラッグ&ドロップ操作への適用, *情報処理学会論文誌*, Vol.44, No.1, pp.166–175 (2003).
- [10] Ludwig, S. and Gellersen, H.: Eye&head: Synergetic eye and head movement for gaze pointing and selection, *Proc. 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (2019).
- [11] Klamka, K., Siegel, A., Vogt, S., Göbel, F., Stellmach, S. and Dachsel, R.: Look & Pedal: Hands-free navigation in zoomable information spaces through gaze-supported foot input, *Proc. ICMI*, pp.123–130 (2015).
- [12] Sunggeun, A. et al.: Verge-it: Gaze interaction for a binocular head-worn display using modulated disparity vergence eye movement, *Extended abstracts of the 2020 CHI conference on human factors in computing systems* (2020).
- [13] Myungguen, C., Sakamoto, D. and Ono, T.: Kuiper Belt: Utilizing the “Out-of-natural Angle” Region in the Eye-gaze Interaction for Virtual Reality, *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2022).
- [14] Heiko, D. and Schmidt, A.: Interacting with the computer using gaze gestures, *Ifip Conference on Human-computer Interaction*, Springer, Berlin, Heidelberg (2007).
- [15] Mélodie, V., Bulling, A. and Gellersen, H.: Pursuits: spontaneous interaction with displays based on smooth pursuit eye movement and moving targets, *Proc. 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing* (2013).
- [16] Arie E., K., Bandopadhyay, A. and Shaviv, B.D.: An eye tracking computer user interface, *Proc. 1993 IEEE Research Properties in Virtual Reality Symposium*, IEEE (1993).
- [17] Henna, H. and Rähkä, K.-J.: Simple gaze gestures and the closure of the eyes as an interaction technique, *Proc. Symposium on Eye Tracking Research and Applications* (2012).
- [18] Kwon, S.H. and Kim, H.C.: EOG-based glasses-type wireless mouse for the disabled, *Proc. 1st Joint BMES/EMBS Conference, 1999 IEEE Engineering in Medicine and Biology 21st Annual Conference and the 1999 Annual Fall Meeting of the Biomedical Engineering Society*, Cat. N. Vol.1, IEEE (1999).
- [19] Stellmach, S. and Dachsel, R.: Designing gaze-based user interfaces for steering in virtual environments, *Proc. ETRA*, pp.131–138 (2012).
- [20] Rajanna, V. and Hansen, J.: Gaze Typing in Virtual Reality: Impact of Keyboard Design, Selection Method, and Motion, *Proc. ETRA '18*, June 14–17, 2018, Warsaw, Poland (2018).
- [21] Mingming, F., Li, Z. and Li, F.M.: Eyelid gestures for people with motor impairments, *Comm. ACM*, Vol.65, No.1, pp.108–115 (2021).
- [22] Robin, S., et al.: The eye wink control interface: using the computer to provide the severely disabled with increased flexibility and comfort, *Proc. 3rd Annual IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, IEEE (1990).
- [23] Zhen, L., et al.: iWink: Exploring eyelid gestures on mobile devices, *Proc. 1st International Workshop on Human-Centric Multimedia Analysis* (2020).
- [24] Mingming, F., Li, Z. and Li, F.M.: Eyelid gestures on mobile devices for people with motor impairments, *The 22nd International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility* (2020).
- [25] Ricardo, J. and Wigdor, D.: Palpebrae superioris: Exploring the design space of eyelid gestures, *Proc. 41st Graphics Interface Conference* (2015).
- [26] Xuan, Z., Fan, M. and Han, T.: “I Don't Want People to Look At Me Differently” Designing User-Defined Above-the-Neck Gestures for People with Upper Body Motor Impairments, *CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (2022).
- [27] Masai, K., et al.: Face Commands-User-Defined Facial Gestures for Smart Glasses, *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, IEEE (2020).
- [28] Orlosky, J., Toyama, T., Kiyokawa, K. and Sonntag, D.: Modular: Eye-controlled vision augmentations for head mounted displays, *IEEE Trans. Visualization and Computer Graphics*, Vol.21, No.11, pp.1259–1268 (2015).
- [29] 新村 達, 秋田純一, 櫻沢 繁, 戸田真志: 導電性衣服を用いた高精度・多チャンネル筋電位測定システム, *情報処理学会論文誌*, Vol.48, No.12, pp.3784–3792 (2007).

- [30] Choe, M., Choi, Y., Park, J. and Kim, H.: Comparison of Gaze Cursor Input Methods for Virtual Reality Devices, *Proc. International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol.35 (2019).
- [31] Anke, H. and Mario H., U.: Object selection in gaze controlled systems: What you don't look at is what you get, *ACM Trans. Appl. Percept*, Vol.8, No.13, pp.1-14 (2011).
- [32] Majaranta, P. and R  ih  , K-J., Twenty Years of Eye Typing: Systems and Design Issues, *Proc. ETRA'02*, March 25 (2002).
- [33]   pakov, O. and Miniotas, D.: On-Line Adjustment of Dwell Time for Target Selection by Gaze, *Proc. NordiCHI'04*, October 23 (2004).
- [34] Penkar, A.M., Lutteroth, C. and Weber, G: Designing for the eye: design parameters for dwell in gaze interaction, *Proc. OZCHI '06*, November (2006).
- [35] Behrooz, A. and Scott, M.I.: BlinkWrite2: An Improved Text Entry Method Using Eye Blinks, *Proc. ETRA'10*, March 22 (2010).
- [36] Winer, B.J.: *Latin squares and related designs* (1962).



夏目 達也 (正会員)

2021年3月立命館大学情報理工学部情報理工学科卒業。現在、同大学院情報理工学研究科博士前期課程在学中。視線移動や目の動きを入力とするアイジェスチャの研究に従事。



内村 裕也

2018年3月立命館大学情報理工学部メディア情報学科卒業。2020年3月同大学院情報理工学研究科博士前期課程修了。現在、株式会社NTTデータ所属。在学中、視線移動や目の動きを入力とするアイジェスチャの研究に従事。



クリスチャン アルサー

2011年 Tecnologico de Monterrey でコンピュータサイエンスの修士号を取得。2018年同大学院で博士号を取得。2019年東京大学大学院情報理工学系研究科研究員を経て、2022年より立命館大学グローバル・イノベーション研究機構助教。主な研究対象はゲーム AI とヒューマンコンピュータインタラクション。



柴田 史久 (正会員)

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、2013年より同教授。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。IEEE、日本バーチャルリアリティ学会等の会員。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 (正会員)

1996年大阪大学基礎工学部卒業。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年立命館大学情報理工学部准教授。現在、同教授。博士(工学)。実世界指向インタフェース、バーチャルリアリティ、複合現実感、多感覚知覚の研究に従事。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、IEEE等の会員。j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、情報処理学会山下記念研究賞等を受賞。