

# 下方視野を拡大した HMD の開発と評価

中野 萌士<sup>1,a)</sup> 磯山 直也<sup>1,b)</sup> 酒田 信親<sup>1,c)</sup> 清川 清<sup>1,d)</sup>

**概要：**一般的な既存の VR (Virtual Reality) 用 HMD (Head Mounted Display) は高い没入感や臨場感をユーザに与えるが、垂直視野角は人間の元来のものと比べると狭い。特に水平から下方向の視野角は、HMD を装着しての卓上での作業や歩行などの日常的な動作に重要であるが、人間本来の 65~70 度程度の垂直視野角に対して 35~45 度程度しか提示できていない。そこで我々は、既存の HMD 内部の鉛直下方向に対し下方視野用の LCD を新しく追加し、下方視野を拡大した HMD の開発と評価を行った。作成した HMD には臨場感の向上を目的とした VR モードと、外部に取り付けたカメラの映像を LCD に投影することで卓上作業の作業効率化と首運動の負担軽減を目的とした VST(Video See-through) モードを実装した。結果、下方視野を拡大した HMD は垂直視野角を約 70 度拡大させ、臨場感向上と首の負担軽減に成功した。一方、情報量の増加による集中の阻害や映像提示の不完全さによる作業時間増加も確認され、さらなる研究が必要であることが示唆された。

## 1. はじめに

近年、安価な HMD (Head Mounted Display) の普及によって、AR (Augmented Reality) や VR (Virtual Reality) の研究や産業応用、ゲーム開発などが盛んになってきている [1]。HMD はレンズ等の接眼光学系を通して LCD などの高解像度のフラットパネルによる映像をユーザに提示することで CG (Computer Graphics) による VR 環境をあたかも現実のように感じさせられる。この VR 環境に入り込んだような感覚は没入感や臨場感と呼ばれる。これらを高めるための方法の一つとして、HMD の視野角を増加させることが挙げられる。しかしながら、単純なレンズと LCD を組み合わせるだけでは与えられる視野角に限界がある。一般的な VR 用 HMD の視野角は対角 90~110 度程度であり、垂直視野角は 70~90 度程度である。これは人間の本来の垂直視野角 120~135 度程度に比べて狭く、特に水平から下方向の視野角は本来の 65~70 度程度に対して 35~45 度程度しか提示できていない。

下方視野は卓上での作業や歩行などの日常的な動作に重要である。従って、下方視野が狭いと VR 環境内でこれらの作業や動作を再現する際にも問題が生じる。例えば、Oculus Quest や VIVE Focus のような PC を必要としないスタンドアロン型 HMD の普及によって HMD を装着し

たまま現実世界を歩き回るシチュエーションが増加している。しかしながら、現在普及している HMD の視野角では、正面を見ているときに足元を見られない。そのため、HMD を装着したまま歩き回っているユーザが、見えない家具に足をぶついたり、階段を降りる場合に踏み外す事による怪我の危険性やそれらを危惧した恐怖心により、没入感や臨場感が低下する問題が生じると考えられる。近年、現実環境のレイアウトを VR 環境に取り入れることで触覚の再現などを目指す事例が増えており [2], [3]、下方視野が狭い問題は今後さらに顕著になる可能性がある。

一方、VR 用 HMD とカメラを併用してビデオシースルー (VST, Video See-through) HMD を構成することで、AR による作業支援を行ったり、VR 空間に現実環境の一部を表示する事例も増えている [4], [5]。しかしながら HMD の下方視野が狭いため、キーボードなどの卓上の物体を操作する際に首を深く曲げなければならないという問題がある。

同様のシチュエーションとして HMD を装着したままの食事が挙げられる。高い没入感や臨場感を保ったまま生活するためには [6]、VR 空間での食事や VST-HMD を使用した作業中に食事をする必要不可欠であるが、HMD を装着したままの食事は、下方視野角の制限により、口付近の情報提示が困難で食べにくい [7], [8]。

以上の問題を解決するため、本研究では、既存の HMD に新しく下方視野用のディスプレイを追加し、下向きの視野角を拡大する HMD の開発を行う。本研究の貢献を以下に示す。

- 下方視野用のディスプレイを追加した新たな HMD の

<sup>1</sup> 奈良先端科学技術大学院大学

a) nakano.kizashi.nc2@is.naist.jp

b) isoyama@is.naist.jp

c) sakata@is.naist.jp

d) kiyo@is.naist.jp

## 開発

- 下方視野を拡大した VR HMD が没入感や臨場感に与える影響の調査
- 下方視野を拡大した VST-HMD が卓上作業の作業効率や首運動の負担に与える影響の調査

## 2. 関連研究

大きな視野角を持つ HMD は VR 酔いの危険性が増加するものの、高い没入感や臨場感を与えることが知られている [9]。そのため、水平視野角 210 度、垂直視野角 130 度の広視野な HMD である StarVR などの研究開発が盛んに行われている。また、中心視野に比べて周辺視野の情報受容能力が低い [10] ことに着目した研究も多く存在する。Xiao らは多数のフルカラー LCD と拡散板を HMD の接眼光学系の外側に設置し、HMD の映像と同期させることで、視野角の拡大を行った [11]。解像度は低いが、ユーザに高い臨場感を与えることに加えて VR 酔いを軽減させることが確認された。また、Yamada らは通常の倍率の凸レンズと高倍率のフレネルレンズを組み合わせ、周辺視野にフレネルレンズを通してボケた画像を投影することで安価に視野角を拡大することに成功している [12]。しかしながら、これらの手法が提示できる映像は解像度が非常に低い問題がある。また、Orlosky らは魚眼カメラを用いて通常のカメラよりも広範囲の情報をユーザに提示することで視野角の拡大を行っている [13]。しかしながら、広画角の映像を狭画角のディスプレイに提示しているため、視界が歪み、物体のサイズ感や距離感も変化してしまう。

また、VR 用 HMD は高い没入感や臨場感を与えるが、視界すべてを覆ってしまうため、現実環境とのインタラクションが難しいという問題がある。例えば、HMD を装着した状態では現実環境のキーボードや飲み物を操作することは困難である。McGill ら [4] や Budhiraja ら [5] は HMD のフロントカメラから取得したキーボードやコップを VR 空間に AV (Augmented Virtuality) 表示する手法によって現実環境とのインタラクションを可能にしている。これにより、VR を体験しながら卓上のキーボードやマウスを操作したり、資料を見たり、コップを手にとって水を飲んだりすることができる。しかしながら HMD の下方視野が狭いため、キーボードなどの卓上の物体を操作する際に首を深く曲げなければならないという問題がある。

さらに、下向きの視野角の制限が問題となるシチュエーションとして、HMD を装着したままの食事が挙げられる。高い没入感を保ったまま生活するためには [6]、VR 空間での食事や VST-HMD を使用した作業中に食事をすることは必要不可欠である。また、VST-HMD を用いた視覚変調によって食べ物の見かけを置換し、ユーザが食べている食べ物の味や種類を変化させることもできる [7], [8]。しかし、これらの HMD を装着したままの食事は下向きの視野

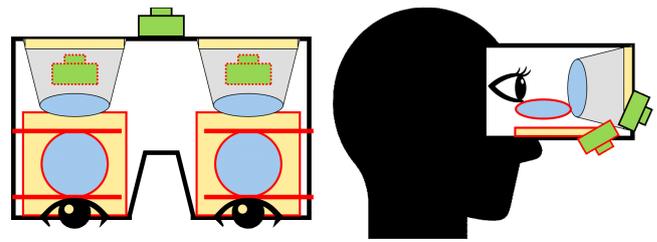


図 1 作成したデバイスの模式図 (左: 上面図, 右: 側面図, 黄色: LCD, 水色: 接眼レンズ, 緑色: Web カメラ) (黒線: HTC VIVE, 赤線: 新しく追加したデバイス)

角の制限によって食べ物を口付近に持ってきた場合、HMD のフロントカメラの下や手前にある食べ物を表示できないため、食べにくさや置換後の食べ物の表示に問題がある。

加えて、人物などが近づいてくることに気づかない危険性もある。そのため、HMD を装着した人物と現実世界とのインタラクションを行う研究が多く行われている。Lindeman はダンボール製の HMD に対して接眼レンズの下と両サイドに開口部を設けることで、低コストで現実世界とインタラクションできる HMD を作成した [14]。また、Tran らは開口部の透過度が調整可能な液晶シャッターを設置することで、没入感や臨場感を保ったまま、ユーザが好きなときに現実世界の様子を確認できる HMD を開発した [15]。また、遠藤らは液晶シャッターの開口部を搭載した HMD に加えて、サーボモーターで開閉可能な現実世界を確認できる HMD を開発した [16]。しかしながら、これらの研究は現実世界を確認する際に、VR 環境の没入感や臨場感が失われてしまう問題や、開口部に映像を提示できないといった問題が存在する。

そこで本研究では、周辺視野に映像提示可能かつ現実環境とのインタラクションを行える HMD の開発及び検証を行う。開発するシステムは、下方視野に高解像度 LCD を設置することで視野角の拡大を目指し、外部に取り付けたカメラの映像を投影可能にすることで、下方視野を拡大した VST-HMD としても機能する。これにより VR 空間内での没入感や臨場感向上と現実環境とのインタラクションの両立を目指す。

## 3. 下方視野を拡大した HMD の開発

### 3.1 ハードウェア構成

作成したデバイスの模式図を図 1 に示す。また、完成したデバイスの写真を図 2 に示す。HMD の本体はスマートフォンを用いる HMD より高い没入感や臨場感を得られる HTC VIVE を使用した。HTC VIVE のカバー及び本体の一部の下半分を切断し、HMD 用 LCD (Sharp LS029B3SX02, 大きさ: 2.9[inch], 表示領域: 51.84×51.84[mm], 解像度: 1440×1440, 120[fps]) を 2 枚配置した。LCD はユーザの眼球が下を向いたときに視認できるように、VIVE の接眼レンズの下部に配置した。また、LCD を設置するスペースを



図 2 作成したデバイス。構造を見えやすくするために一部スポンジを取り外している (左上：正面図，左下：背面図，右：レンズと LCD 部分の拡大図)

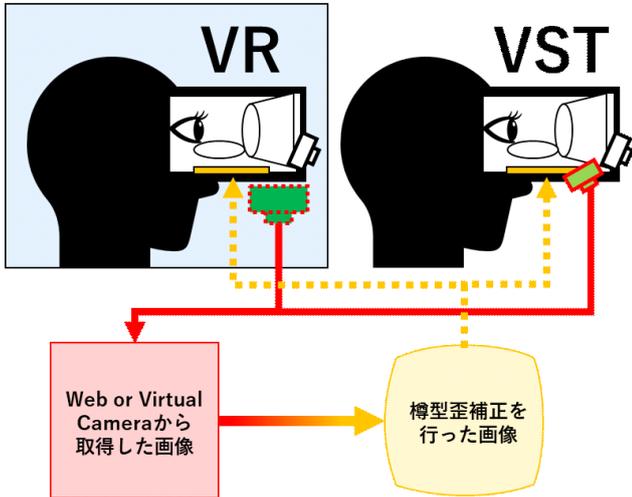


図 3 作成したデバイスの画像表示方法 (左上：Virtual Camera から映像を取得する VR 機能，右上：Web Camera から映像を取得する VST 機能)

確保するため、VIVE の接眼レンズとユーザの眼の距離を VIVE の調整機能を用いて最長に設定した。下方視野用の LCD は接眼レンズとして用いた Google Cardboard のレンズとともに 3D プリンタで製作したハウジングで固定した。ハウジングの最下部は口より高く、食事などの妨げにならない。レンズは使用するユーザの眼幅が異なることを考慮して、左右にスライドできるようにした。また、VST 表示を行うため、薄型の Web カメラ (HIMAX HM1355, 解像度: 1280×1024, 水平 FOV:60[度], 30[fps]) を HMD の外部に 2 台設置した。VIVE のフロントカメラの映像との連続性を考慮して、眼とレンズと LCD を結んだ対角線上に配置している。

### 3.2 レンダリング

提案システムで VR 環境を提示するための処理の流れを図 3 に示す。開発には Unity 3D を用い、LCD に映像を提

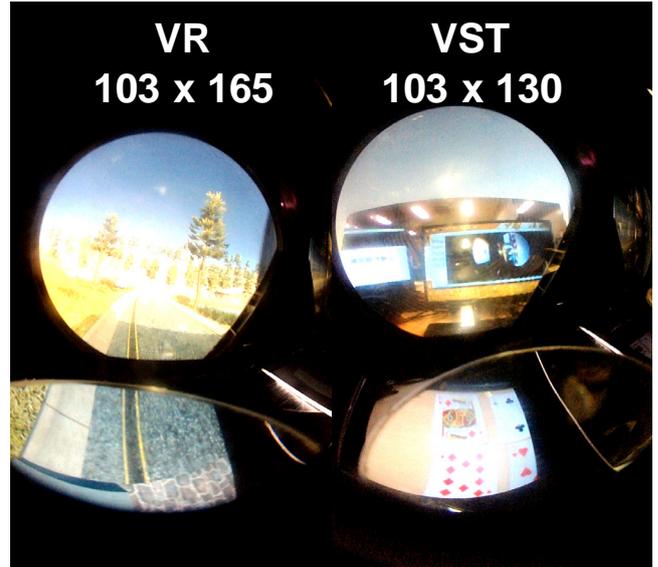


図 4 作成したデバイスの視野角および映像を出力した状態 (左：VR モードの視野角 (水平：約 103 度，垂直：約 165 度)，右：VST モードの視野角 (水平：約 103 度，垂直：約 130 度))

表 1 等距離射影式の魚眼カメラで計測した視野角

視野角	VR モード		VST モード	
	水平	垂直	水平	垂直
VIVE の映像部分	約 103 度	約 100 度	約 103 度	約 60 度
提案システム	約 103 度	約 165 度	約 103 度	約 130 度
視野角増減	±0 度	+65 度	±0 度	+70 度

示するバーチャルカメラを LCD に対応するように 2 つ用意し、SteamVR のメインカメラに追従するようにした。また、また、バーチャルカメラの位置と姿勢は標準的な眼の位置と LCD の相対的な位置関係に合わせて初期値を設定し、手作業でチューニングを行った。

図 3 では、提案システムで VST 映像を提示するための処理の流れも示している。VR モードと VST モードのいずれの場合でも、LCD に表示する映像には樽型歪み補正を行った。また、レンダータクスチャを切り替えることで、VR モードと VST モードを簡単に切り替えられるように実装した。

### 3.3 下方視野の視野角

提案システムの VR モードと VST モードの映像提示の様子および計測した視野角を図 4 に示す (それぞれ左眼の視野のみを示している)。また、事前にカメラ構成を行った等距離射影式の魚眼カメラで視野角の計測を行った結果を表 1 に示す。なお、HTC 社が公式に発表している VIVE の視野角はビューポートが真円のため (水平・垂直・対角：約 110 度) である。以上より、提案手法は垂直視野角を約 70 度拡大していることが分かる。水平視野角が公式スペックからやや減少した理由として、VIVE の接眼レンズとユーザの眼の距離を VIVE の調整機能を用いて最長に設定したことが考えられる。

## 4. VRモードにおける実験

### 4.1 概要

本実験は提案システムがVR環境における没入感や臨場感を向上させるかを調査することが目的である。各被験者は作成したシステムを装着した状態で、Unity 3D で作成されたコース [17] の道路上を一周し、アンケートに回答する。条件はLCDに映像を提示する条件（LCD条件）と提示しない（黒画面）条件（None条件）の2条件であり、被験者ごとに異なる順序で行う。VR環境内の移動は両手に持つVIVEコントローラ2台で行い、左コントローラのタッチパッドで前後左右の4方向移動、右コントローラのタッチパッドで左右の回転を行う。被験者には、コントローラを操作してコースを一周することだけを指示する。また、実験中にVR酔いで気分が悪くなるなど、任意の理由でいつでも直ちに実験を中止できることを事前に伝え、本人の同意の上で実験を行う。

### 4.2 実験手順と評価項目

各被験者は以下の手順で実験を実施する。

- (1) 机に座り実験手順の説明を受ける。
- (2) 作成したシステム（HMD）を装着する。その際、下方視野用のレンズの位置をVR環境の床の映像を見ながら調整する。
- (3) VIVEコントローラを両手で操作してコースを一周する。
- (4) HMDを外しアンケートに回答する。
- (5) 手順(2)~(4)をもう一方の実験条件でも行う。

没入感や臨場感の評価にはIgroup Presence Questionnaire (IPQ) の日本語版を使用した [18]。本実験ではIPQの下位項目のうち以下の4項目の評価軸で評価する。

- **Pres:** そこにいる感覚 (Sense of being there) または一般的なプレゼンス (General Presence)
- **SP:** 空間の存在感 (Space Presence)
- **Inv:** 現実への意識 (Involvement)
- **Real:** 現実との類似度 (Experienced Realism)

それぞれPresは1項目、SPは5項目、Invは4項目、Realは5項目の設問で構成されている。加えて、本実験では以下の総合評価を評価指標として使用する。

- **Total:** 各評価項目の平均値とすべての値の合計値

### 4.3 実験結果

22~25歳の男性6名を被験者として実験を実施した。実験結果を表2と図5に、実験の様子を図6に示す。各項目のNone条件とLCD条件にWilcoxon signed-rank test)を行ったところ、Inv項目 ( $p < 0.05$ )、Real項目 ( $p < 0.05$ )、Total項目 ( $p < 0.01$ ) にそれぞれ有意な差が確認された。

表2 VRモードにおける実験結果 (各値は平均値および標準偏差)

	Pres	SP	Inv	Real	Total
None	4.17±1.34	4.37±1.08	3.88±1.62	2.67±1.40	3.73±1.53
LCD	4.83±1.07	4.67±1.42	4.75±1.76	3.33±1.53	4.32±1.62

### 4.4 考察

すべての指標について、平均値としてNone条件よりもLCD条件のスコアが高く、Total項目に有意差があることから、下方視野を拡大する提案システムはVR環境の臨場感を増加させる目的に対して有効である事がわかった。

また、Inv項目に有意差が確認された。Inv項目が現実への意識を示す指標であり、通常のHMDだと現実環境を意識するきっかけとなりえるHMDカバーがある周辺視野にある程度VR環境の映像を提示できたためだと考えられる。加えて、Real項目に有意差が確認された。Real項目は、現実との類似度を示す指標であり、通常のHMDでは塞がれてしまう下方視野のある程度現実環境と同じように見ることができたためだと考えられる。被験者のコメントからは「LCDによって視野がひろがっているのが体感できた」、「歩く位置など、自分の位置を補正するのにLCDの表示が役に立った」という肯定的な意見が確認された。

一方、全体的なスコアは中庸の4付近を示している。これは視覚だけの情報提示やコントローラの操作性、座ったままでのVR体験などが影響していること、通常のHMDよりも接眼レンズと眼の距離が遠く正面方向のディスプレイの視野角がやや狭くなっていることが原因として考えられる。実際に被験者のコメントからは「いつも使用しているHMDよりも凸レンズの距離が遠く、映画館で映像を見ているような気分だった」という意見が確認された。加えて、「目下のディスプレイの遷移速度が早く見えたので、そちらに意識がいったしまった」という意見が確認された。これはバーチャルカメラの位置が本来設置すべき場所よりも地面に近かったため、ズームしたような表示になった結果、映像のオプティカルフローが速くなってしまったことが原因として考えられ、カメラパラメータ校正の改善が必要である。また、「下のレンズを表示せず、前方のみに映像があるほうがかえって集中できた感じがした」という意見も確認された。これは視野角が拡大した結果、様々な場所を見ようとしてかえって集中が阻害されたことを示している。VRコンテンツを作成する際は、広視野化が必ずしもユーザ体験の向上につながらない場合があることを考慮する必要がある。

## 5. VSTモードにおける実験

### 5.1 概要

本実験は作成したシステムによってVST-HMDの下方視野拡大を行った場合に、卓上作業の作業効率が向上するかや首運動の負担が軽減するかを調査することが目的であ

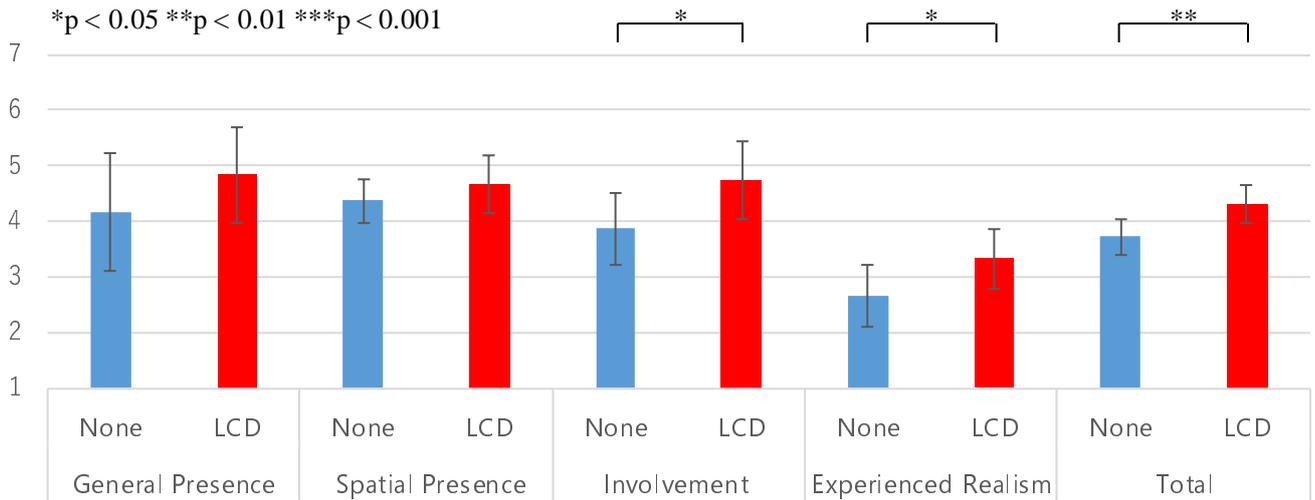


図 5 VR 実験における IPQ 結果の各項目平均値 (エラーバーは 95%信頼区間)



図 6 VR 実験の様子

る。実験は作成したシステムを装着した状態で、卓上の絵柄の異なる 12 枚のトランプを、正面方向のデスクトップモニタに表示される並び方に並び替えるまでの速さと正確さ、首の回転を計測する。実験条件は LCD に現実環境の映像を提示する条件 (LCD 条件) と提示しない (黒画面) 条件 (None 条件) の 2 条件であり、被験者ごとに各条件 3 回ずつ合計 6 回の試行を None 条件と LCD 条件を交互に、異なるトランプの組で行う。画面に表示されるトランプは横 3 行縦 4 列に並べられ、ジョーカー 2 枚を含めた 54 枚のトランプを 2 組用意し、各組から 36 枚を無作為に選んだものを 12 枚ずつに分けて、6 条件分使用する。トランプを選んだのは、映像の解像度が低すぎても問題なくタスクが完了してしまうと適切な比較にならないため、ある程度判別が難しいことや絵柄が身近であることが主な理由である。また、横 3 行縦 4 列に並べさせる理由は、ひと目で配置を覚えられない程度の難しきでありながら、難し

くない程度の難易度にしようとしたこと、手元を見なくてもトランプの配置が簡単にできすぎないことを考慮したためである。実験中に VR 酔いで気分が悪くなるなど、任意の理由でいつでも直ちに実験を中止できることを事前に伝え、本人の同意の上で実験を行う。

## 5.2 実験手順と評価項目

各被験者は以下の手順で実験を実施する。

- (1) 机に座り、実験手順の説明を受ける。
- (2) 実験に使用しないトランプの組を用いて、正解画像を提示されずにトランプを並べる練習を行う。
- (3) 作成したシステム (HMD) を装着する。その際、下方視野用のレンズの位置を現実環境の映像を見ながら調整する。
- (4) 実験に使用しないトランプの組を用いて、正解画像を提示されずに None 条件と LCD 条件の両方でトランプを並べる練習を行う。
- (5) 実験に使用するトランプ 1 組 (12 枚) を受け取る。
- (6) 条件開始と同時に目の前のデスクトップモニタに表示される正解画像に従ってトランプを並べる。
- (7) 並べ終わったと感じたら「終わりました」と宣言する。実験者は経過時間および誤配置数を計測する。
- (8) 手順 (5)~(7) をもう一方の実験条件でも行う。
- (9) 手順 (5)~(8) を合計 3 回行う。

実験の評価方法は、トランプの並び替えるまでの Unity 3D 内の経過時間と間違えた枚数、首の回転を HMD の姿勢を用いて 3 軸で計測し、比較した。

## 5.3 実験結果

22~25 歳の男性 6 名を被験者として実験を実施した。実験結果を図 7,8,9,10 と表 3 に、実験の様子を図 11 に示す。

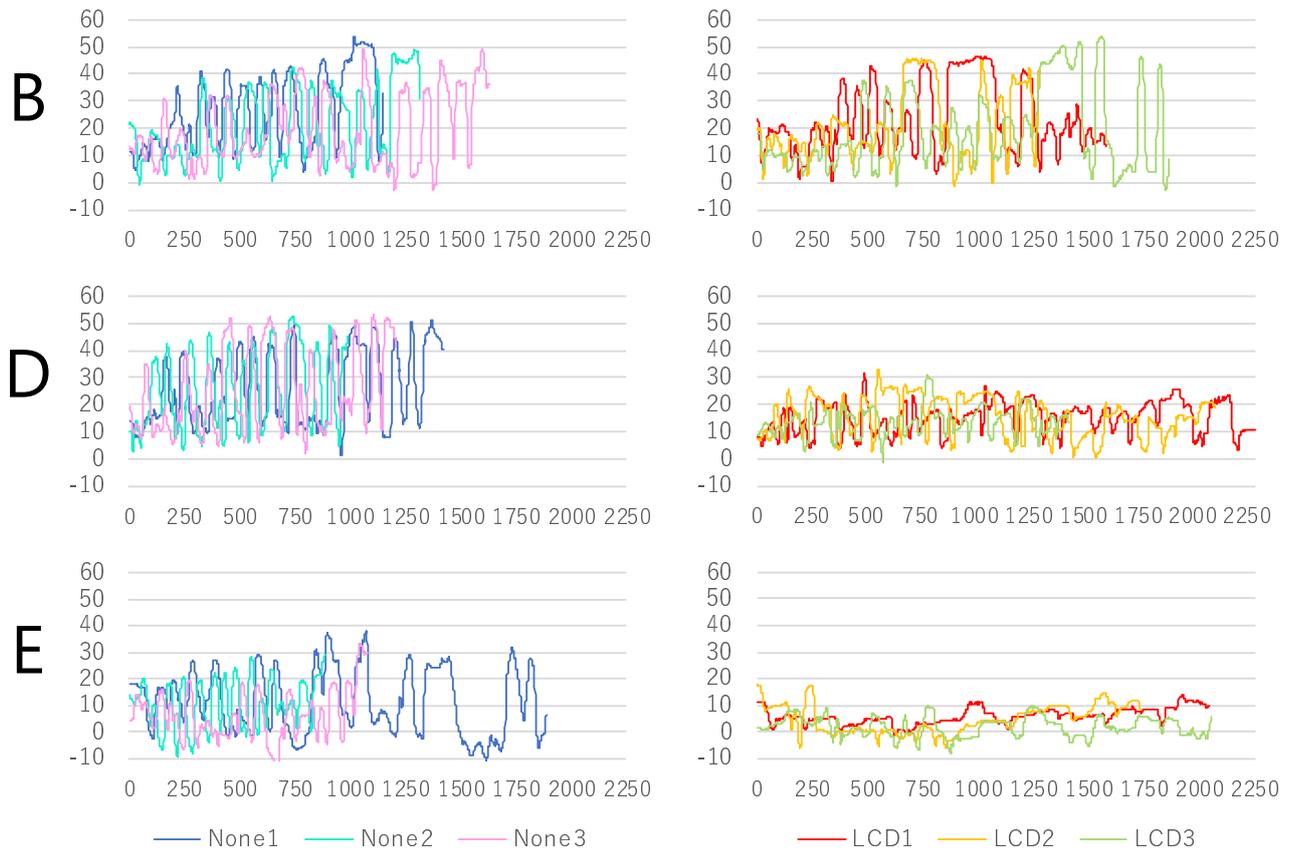


図 7 VST 実験での被験者の首の動き，縦軸：ピッチ角 (正面を向いたとき 0 度かつ + 90 度  
のとき完全に下を向いた状態)，横軸：フレーム数 (22~24[fps])，特に重要と思われる  
結果を抜粋

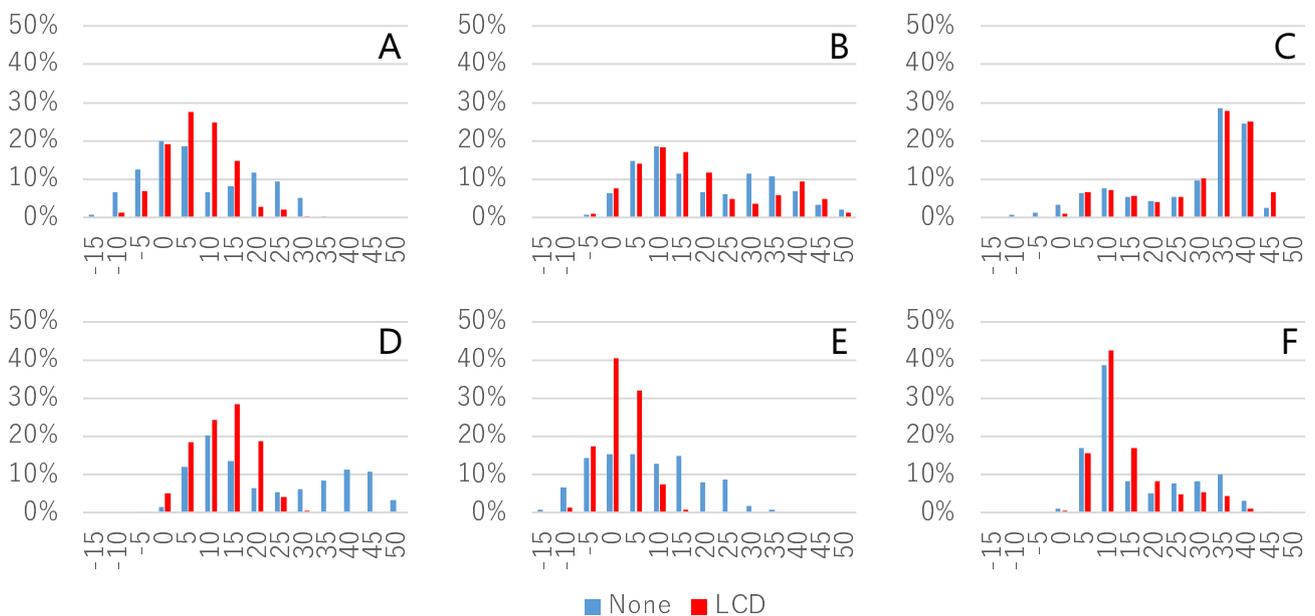


図 8 VST 実験での被験者の首の動きヒストグラム，縦軸：データの出現割合，横軸：5 度ごと  
に集計したピッチ角 (正面を向いたとき 0 度かつ + 90 度のとき完全に下を向いた状態)

図 7 は頭部を上下方向へ変化させた際の向きであるピッチ角について，被験者が水平に正面を向いた際の HMD 角

度を基準角度 0 と設定し，下方方向に向いたときをプラス，上方方向に向いたときをマイナスとして，被験者の実験中

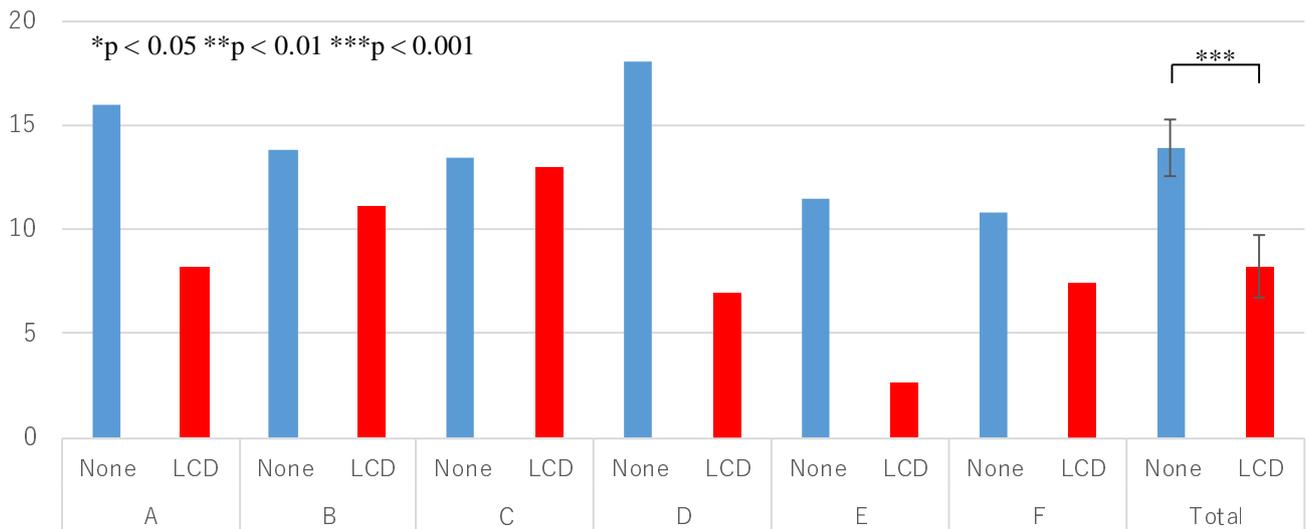


図 9 VST 実験での被験者の単位時間あたりの首振り量 [deg/sec](エラーバーは 95%信頼区間)

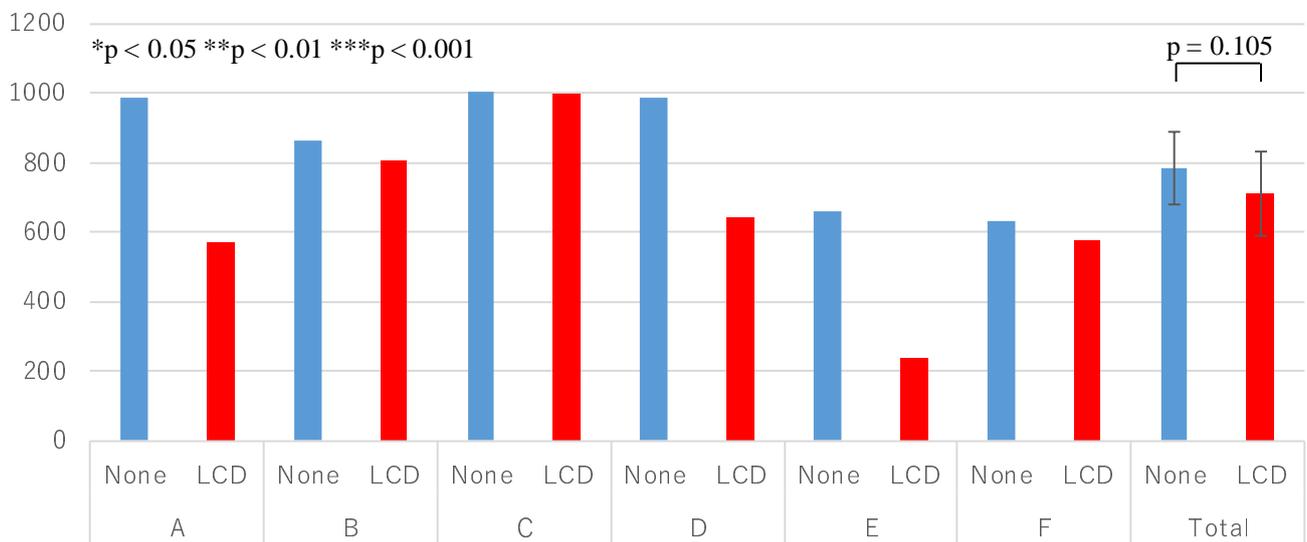


図 10 VST 実験での被験者のタスク完了までの首振りの総量 [deg](エラーバーは 95%信頼区間)

表 3 VST モードにおける実験結果 (各値は平均値, 太字は有意な差が確認された値)

		A	B	C	D	E	F
Angle [deg]	None	10.31	22.27	30.39	25.89	9.94	18.81
	LCD	9.38	21.03	32.46	15.03	4.09	16.75
Var [deg <sup>2</sup> ]	None	<b>134.13</b>	187.08	<b>177.40</b>	<b>212.70</b>	<b>119.22</b>	<b>117.76</b>
	LCD	<b>47.27</b>	185.33	<b>142.16</b>	<b>38.61</b>	<b>19.11</b>	<b>67.64</b>
Time [sec]	None	61.97	62.71	74.84	55.61	59.70	59.66
	LCD	69.02	72.41	77.39	91.19	90.37	78.70

の変化を示す。紙面の関係上、特に重要と思われる被験者 B,D,E の結果を抜粋している。ロール角とヨー角については大きな変化がなかった。None1, None2, None3 はそれぞれ None 条件の第 1, 2, 3 回目を, LCD1, LCD2, LCD3 はそれぞれ LCD 条件の第 1, 2, 3 回目を表している。実験時の計測フレームレートは約 22~24[fps]であった。

表 3 は各被験者の各条件の平均値を示す。Angle は首の

ピッチ方向の角度の平均値 [deg], Var は首の角度の分散値 [deg<sup>2</sup>], Time はタスク完了までの平均時間 [sec] である。また、被験者 B の LCD2 条件と被験者 C の LCD3 条件で 2 枚 (1 ペア) のミスが発生した。

各被験者の各条件 3 施行分をつなぎ合わせ、各条件の合計として F 検定を行った。結果、被験者 A,C,D,E,F に有意な差が確認された ( $p < 0.001$ )。

図 8 は None 条件と LCD 条件の首の角度を 5 度ずつヒストグラム化したものを示す。None 条件と LCD 条件ではデータ数が大きく異なっており、正確な比較を行うため、データ数に対する割合で正規化を行っている。

図 9 は、各被験者の None 条件と LCD 条件の単位時間あたりの首振り量 [deg/sec] を示す。Total 項目は全被験者のデータを合わせたものを表している。Total 項目に対



図 11 VST 実験の様子

して対応のある  $t$  検定を行うと顕著な有意差が確認された ( $p < 0.001$ ). また、図 10 は各被験者の None 条件と LCD 条件のタスク完了までの首振りの総量 [deg] を示す。Total 項目に対して対応のある  $t$  検定を行ったが統計的有意差は確認されなかった ( $p = 0.105$ ).

#### 5.4 考察

すべての被験者において、平均値として LCD 条件での首のピッチ方向への角度の分散値が None 条件の分散値よりも低いことが確認され、F 検定の結果、被験者 B 以外に有意差が確認された。これにより、下方視野用のディスプレイを追加して下向きの視野角を拡大する提案手法は、首を動かす頻度を低下させることに有効であることが示唆された。また、被験者 B に有意差が確認されなかった原因として、図 7 を確認すると、None 条件と LCD 条件で同様の首の動きをしている傾向が読み取れるため、追加した LCD を使用していない可能性が考えられる。

一方、タスク完了までの平均時間はすべての被験者において、LCD 条件が None 条件よりも時間がかかることが確認された。また、LCD 条件のみタスクのミスが観測された。これは接眼レンズを含む下方視野用のディスプレイの配置や画像歪みの補正が十分ではなく、特に周辺視野において映像を視認しづらかったことが原因として考えられる。VIVE の映像と LCD の映像の位置ずれが発生していたこと、LCD 表示のカメラに遅延があり、VIVE の映像と同期が取れていなかったことなども影響していると考えられ、改良が必要である。

タスクの平均時間の差が 10% 程度と小さく、LCD 条件時の分散値が None 条件時よりもかなり小さい (LCD 条件: 47.27, None 条件: 134.13) 被験者 A にインタビューを行うと「基本は VIVE 表示を見ながら、LCD 表示はサブとしてタスクを行った」と回答していた。つまり、現実環境と同じように基本は中心視野を用いて、周辺視野は物体

の大きな位置を確認するような方法であれば、タスクの平均時間の増加を抑えつつ首の運動量低下を行える可能性が示唆された。

特に、図 7 で示した被験者 D と E に首の角度の分散が小さくなり、作業時間が長くなる傾向が確認できた。詳しく解析すると、彼らの LCD 条件時の分散値は None 条件時よりも非常に小さいが、タスク完了までの平均時間が約 37% 増加している。彼らにインタビューを行うと「LCD をメインに使うことでタスクを行った。下が見えることによって、深く屈み込む必要がなくて良い」と回答していた。つまり、作業時間は長くなるが、首の動きが少なくなることによる疲労軽減を目的とした使用方法も可能であることが示唆された。

図 8 のヒストグラムを確認すると、被験者 A, D, E, F の None 条件時において、0 度付近と下方向を見ている 40 度付近に二峰性が確認できる。これは、None 条件では、正面のディスプレイを見ている状態と下のトランプ配置を確認している状態の 2 状態を行き来しなければならないことを示している。一方、LCD 条件では、None 条件の最初の山の右側の 5~10 度付近に単峰性が確認できる。これは下方向が見えることによって、首を大きく動かす頻度が減ったことを示していると考えられ、提案手法が首の負担を減らすことに有効であることが示唆される。F 検定で有意な差が確認できなかった被験者 B のヒストグラムはどちらの条件も似た形になっていて、LCD 表示を活かせてない可能性がある。これらのことから提案システムをうまく使うためには慣れとコツが必要である可能性が考えられる。

被験者 C のヒストグラムはどちらの条件も二峰性が確認でき、角度が大きい場所に最頻値が確認できる。これは、下を向いて作業しながら、低頻度で正解画像を確認していたためだと考えられる。常に下を向いた状態でたまに上を見るような方法の場合、下方視野の拡大が活かせない。これに対処するには、下方向だけでなく上方向の視野拡大の必要があり、今後の課題である。

図 9 を確認すると、すべての被験者および Total 項目において単位時間あたりの首振り量が減少していることが確認できる。また、Total 項目に対して顕著な有意差が確認されている。また、図 10 では、統計的有意差はみられなかったものの ( $p = 0.105$ )、単位時間あたりの首振り量だけでなく、タスク完了までの首振りの総量についてもすべての被験者について LCD 条件のほうが None 条件よりも少ないことが確認されている。これらは、提案手法を用いることで被験者の首の動きが減っていることを示しており、VST-HMD の下方視野拡大を行った場合に、首運動の負担を軽減させることができることを示唆している。

## 6. 制限

下方視野用のディスプレイを HMD に追加する提案手法

は、VR 実験では臨場感を向上させ、VST 実験では首運動の負担軽減に効果的であることが実験により判明した。VR 実験では、ユーザの自己位置推定に有効であるとの感想も得られている。一方、通常の HMD と比較した場合では、VIVE の接眼レンズとユーザの眼の距離が開き、正面方向の視野角が狭くなることによる没入感や臨場感低下や情報量が増えることによる集中の阻害の問題も指摘された。

作成したシステムは開発者の顔の形に合うように設計されたため、被験者からはつけ心地の悪さが指摘された。また、接眼レンズの位置調整機能が不十分であり、被験者によって見え方が不十分であったことや LCD 表示の遅延による VIVE 映像との不一致によって、没入感や臨場感低下や作業時間の増加につながったことも問題である。また、今回の実験では実験を途中で棄権する被験者がいなかったが、周辺視野に提示する情報量が増加することによる VR 酔いの危険性増加の問題が考えられる。

提案システムを用いて食事を行う場合についても、解決しなければならない問題が数多く存在する。例えば、LCD に収まらないような大きなものを見たときに、VIVE の映像提示と LCD 映像提示のスケールや形が合わない問題や、LCD 表示の遅延による VIVE 映像との不一致の問題があり、改良が必要である。

## 7. おわりに

一般的な HMD に下方視野用のディスプレイを追加し、下向きの視野角を拡大する HMD を提案した。提案システムは VR 空間における臨場感の向上に効果的であり、ビデオスルー表示での作業における不必要な首の動きを軽減する可能性が示唆された。一方、情報量が増えることによる集中の阻害や映像提示の不完全さによる作業時間増加、システムの効果には個人差があることも考えられ、今後さらなる研究が必要である。

## 参考文献

- [1] B. H. Thomas: "A Survey of Visual, Mixed, and Augmented Reality Gaming," *Computers in Entertainment (CIE)*, Vol. 10, No. 3, pp. 1-33, 2012.
- [2] K. Kanamori, N. Sakata, T. Tominaga, Y. Hijikata, K. Harada, and K. Kiyokawa: "Obstacle Avoidance Method in Real Space for Virtual Reality Immersion," *Proceedings of 2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 80-89, 2018.
- [3] L. Shapira and D. Freedman: "Reality Skins: Creating Immersive and Tactile Virtual Environments," *Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 115-124, 2016.
- [4] M. McGill, D. Boland, R. Murray-Smith, and S. Brewster: "A Dose of Reality: Overcoming Usability Challenges in VR Head-Mounted Displays," *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*, pp. 2143-2152, 2015.
- [5] P. Budhiraja, R. Sodhi, B. Jones, K. Karsch, B. Bailey, and D. Forsyth: "Where's My Drink? Enabling Peripheral Real World Interactions While Using HMDs," *ArXiv, abs/1502.04744*, 2015.
- [6] J. Guo, D. Weng, Z. Zhang, H. Jiang, Y. Liu, B. L. Duh, and Y. Wang: "Mixed Reality Office System Based on Maslow's Hierarchy of Needs: Towards the Long-Term Immersion in Virtual Environments," *Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 340-351, 2019.
- [7] 中野 萌士, 鳴海 拓志, 酒田 信親, 清川 清: "麺類を対象とした視覚変調による味覚操作インタフェースの有効性評価," 第 23 回日本 VR 学会大会論文集, 21B-1, 2018.
- [8] K. Nakano, D. Horita, N. Sakata, K. Kiyokawa, K. Yanai, and T. Narumi: "DeepTaste: Augmented Reality Gustatory Manipulation with GAN-based Real-time Food-to-Food Translation", *Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 328-339, 2019.
- [9] J. J. -W. Lin, H. B. L. Duh, D. E. Parker, H. Abi-Rached, and T. A. Furness: "Effects of Field of View on Presence, Enjoyment, Memory, and Simulator Sickness in a Virtual Environment," *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002*, pp. 164-171, 2002.
- [10] 石黒 祥生, 暦本 純一: "Peripheral Vision Annotation : 拡張現実感環境のための視線計測による周辺視野領域情報提示手法," 情報処理学会論文誌, Vol. 53, No. 4, pp. 1328-1337, 2012.
- [11] R. Xiao and H. Benko: "Augmenting the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Sparse Peripheral Displays," *Proceedings of the 34th Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '16)*, pp. 1221-1232, 2016.
- [12] W. Yamada and H. Manabe: "Expanding the Field-of-View of Head-Mounted Displays with Peripheral Blur-black Images," *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '16 Adjunct)*, pp. 141-142, 2016.
- [13] J. Orlosky, Q. Wu, K. Kiyokawa, H. Takemura, and C. Nitschke: "Fisheye Vision: Peripheral Spatial Compression for Improved Field of View in Head Mounted Displays," *Proceedings of the 2nd ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI '14)*, pp. 54-61, 2014.
- [14] R. W. Lindeman: "A Low-cost, Low-latency Approach to Dynamic Immersion in Occlusive Head-mounted Displays," *Proceedings of 2016 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 221-222, 2016.
- [15] K. T. P. Tran, S. Jung, S. Hoermann, and R. W. Lindeman: "MDI: A Multi-channel Dynamic Immersion Headset for Seamless Switching between Virtual and Real World Activities," *Proceedings of 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 350-358, 2019.
- [16] 遠藤 勇, 工藤 義礎, 高嶋 和毅, 藤田 和之, 北村 喜文: "周辺環境への気づきやインタラクションが可能な HMD に関する検討," 第 23 回日本 VR 学会大会論文集, 6C-01, 2019.
- [17] Lake Race Track, NIANDREI, <https://assetstore.unity.com/packages/3d/environments/roadways/lake-race-track-55908> (参照 2019-10-20) .
- [18] igroup presence questionnaire (IPQ), igroup, <http://www.igroup.org/pq/ipq/download.php#Japanese> (参照 2019-10-20) .