



立体映像における奥行き要素に着目した視線適応型 字幕配置手法

清水, 裕介
大西, 鮎美
寺田, 努
塚本, 昌彦

(Citation)

情報処理学会論文誌, 63(11):1665-1678

(Issue Date)

2022-11-15

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

ここに掲載した著作物の利用に関する注意 本著作物の著作権は情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。

Notice for the use of this material The copyright of this material is retained by th...

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492845>



立体映像における奥行き要素に着目した 視線適応型字幕配置手法

清水 裕介^{1,a)} 大西 鮎美^{1,b)} 寺田 努^{1,c)} 塚本 昌彦^{1,d)}

受付日 2022年2月1日, 採録日 2022年8月8日

概要: バーチャルリアリティや 3D 映画などの 3D コンテンツにおいて, 字幕はユーザインタフェースや進行の補助など重要な役割を果たしている. しかし, 3D コンテンツは奥行きの情報を含んでいる点が 2D コンテンツとは異なり, 3D コンテンツにおける文字情報の最適な表示手法や枠組みは確立されていない. そこで本研究では, 3D コンテンツにおける最適な字幕配置を調査する. まず, 映像および字幕の見えにくさや視聴者の不快感など 3D コンテンツの字幕における問題を調べた. 抽出した問題点をふまえ, 視線移動の縦横方向, 奥行き方向の関係を考慮した視線適応型字幕配置手法を提案した. 評価実験の結果, ユーザの注視点に合わせて字幕を移動させることが, 字幕の読みやすさの向上や眼精疲労の低減に効果的であることが分かった. また, 眼精疲労は字幕の移動量や字幕と注視しているオブジェクトの距離に関係がある可能性が示唆された. 本研究は, 現在提案されているさまざまな 3D 空間への字幕配置手法を評価する際の基礎データとなるものである.

キーワード: バーチャルリアリティ, アイトラッキング, 字幕, センシング

Gaze-adaptive Subtitles considering Depth of Gaze Shift

YUSUKE SHIMIZU^{1,a)} AYUMI OHNISHI^{1,b)} TSUTOMU TERADA^{1,c)} MASAHIKO TSUKAMOTO^{1,d)}

Received: February 1, 2022, Accepted: August 8, 2022

Abstract: Subtitles (captions displayed on the screen) are important in 3D content, such as virtual reality and 3D movies, to help users understand the content. However, an optimal displaying method and framework for subtitles have not been established for 3D content because 3D has a depth factor. Therefore we investigated the optimal method of placing subtitles in 3D content. First, we investigated the user's discomfort and the cause of difficulty in watching videos and subtitles. Based on the extracted issues, we proposed gaze adaptive subtitles placement methods considering the relationship between vertical/horizontal and depth of gaze shift. Additionally, we evaluated the readability of the text and participants' fatigue. The results showed that aligning the text to eye movements improves visibility and readability. It was also shown that the eyestrain is related to the amount of gaze shifts and the distance between the object and subtitles. This evaluation provides basic knowledge for presenting text in 3D content.

Keywords: virtual reality, eye tracking, subtitles, sensing

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) の普及により, バーチャルリアリティ (VR) や 3D 映画などの 3D コンテンツは身近なものとなっている. VR は, 動画配信サービス [1] やゲーム [2], 教育 [3], 医療 [4], 防災 [5] などさまざまな分野で活用されつつあり, 今後更なる普及が見込まれ

¹ 神戸大学大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Kobe University, Kobe,
Hyogo 657-0013, Japan

a) yusuke-shimizu@stu.kobe-u.ac.jp

b) ohnishi@eedept.kobe-u.ac.jp

c) tsutomu@eedept.kobe-u.ac.jp

d) tuka@eedept.kobe-u.ac.jp

る。また、アイトラッカを搭載した HMD が開発され、リアルタイムでの視線解析が可能となっている [6]。

映像における字幕は、聴覚障害者に対する内容理解の補助や外国語話者への他言語対応 [7] など、アクセシビリティの向上のために必要不可欠である。3D コンテンツにおいても、字幕はユーザインタフェース (UI) や進行の補助など重要な役割を果たしている。

一方で、3D コンテンツにおける文字情報の最適な表示手法や枠組みはいまだ確立されていない。字幕の最適な表示をするためには、文字の大きさ、行数、色、フォント、表示時間などの多くの要素を考慮する必要があるが、3D コンテンツは 2D コンテンツとは異なる奥行きを含んでいる。3D コンテンツにおける奥行き要素の追加は、字幕の提示が難しくなる主な要因である [8]。これまで 3D コンテンツの文字を読みやすくするために、文字とオブジェクトの奥行きを合わせる提示方法などさまざまな手法が提案されてきたが [9], [10]、そのほとんどがユーザが注視している奥行きが異なることによる視聴体験への影響を改善することのみに着目しており、その他の要因は考慮されていない。したがって、3D コンテンツでの字幕の提示方法を決定する際に考慮すべき要素を明らかにする必要がある。

3D コンテンツでの字幕提示における重要な要素として、奥行き方向の視線移動があげられるが、筆者らは奥行き方向だけではなく、視線移動における奥行き方向と縦横方向の関係を考慮すべきと考える。奥行き方向と縦横方向では視線の移動方法が原理的に異なっており、それぞれが映像や文字の見やすさに影響する可能性がある [11], [12], [13]。奥行きの視線移動のために焦点距離を合わせる際には、眼球の動きに加え、眼の水晶体の調節と左右の眼の輻輳運動が必要である [14]。そのため、眼球を動かして行う縦方向や横方向の視線移動よりも眼にかかる負荷が増える可能性がある [8], [15], [16]。しかし、縦横、奥行き方向の文字移動の関係は体系立てて検討されておらず、3D コンテンツの字幕において縦横、奥行き方向の配置を変えた際に起こりうる問題点やその解決方法は明らかになっていない。

以上をふまえ本研究では、視線移動の縦横、奥行き方向の関係を考慮した 3D コンテンツにおける字幕の最適な配置方法を調査する。これは、現在提案されているさまざまな 3D 空間に配置する文字提示手法が効果的かを測る際の基礎データとなるもので、本研究では 3D コンテンツに付与する字幕の配置を分類、評価できる枠組みをつくることを目指す。

本論文では、まず 3D 映画を実際に鑑賞して 3D 映画への字幕付与の際に起こる問題を調査する。その結果をふまえ、視線情報が取得できる HMD を用いて立体映像内のオブジェクトの動きに準じて字幕の配置を変化させるシステムを作り、抽出した問題点を解決するため視線に合わせて字幕が動く手法を提案する。評価実験では、提案手法を用

いて提示した文字の読みやすさや疲労度への影響を確認し、提案手法の有効性を確認する。本論文は、国際会議 [17] で発表した内容から、関連研究を充実させ、実験結果についての詳細な考察、議論を追加したものである。

以下、2 章で関連研究を紹介する。3 章で提案手法について説明し、4 章で評価実験について述べる。評価結果をふまえて 5 章で先行研究との差異や制約について議論し、6 章で本論文をまとめる。

2. 関連研究

2.1 2D コンテンツにおける字幕の動的な提示手法

テレビ番組や映画などの 2D コンテンツにおいて、字幕は画面下部に固定して配置される。視聴者は字幕を読むために、映像内の注目している領域から視線を移動させる必要がある。しかし、注目している領域と字幕のある画面下部との視線移動は、視聴体験を阻害し、眼精疲労の原因となる。これらの問題を解決するために、不要な眼球運動を低減する字幕の配置方法に関する研究は多く行われている。

Hu らは音声情報と視覚情報に基づいて話者を検出し、話者の横に字幕を配置することで、眼球運動を低減させる手法を提案した [18]。この手法を用いることで、視聴者は字幕を読みながら映像を追うことができる。評価実験の結果、この手法は従来の位置を固定した字幕より視聴体験を向上させ、眼精疲労を低減させることができた。Akahori らは、画面上の注視点を取得して、その視線情報から映像内の重要な領域を検出し、重要な領域と字幕が重ならないようにしながら注視点に字幕を配置することで、視聴者の快適な視聴体験を実現させる提示手法を提案した [19]。評価実験の結果、この手法は視聴者が重要な領域と字幕を長く視聴でき、視聴の快適性と実用性を高めることが示された。

Kurzhals らは視聴者の視線に合わせて字幕を提示する手法を提案した [20]。この手法は、ディスプレイ下部に設置する据え置き型のアイトラッカを用いて視聴者の視線情報を取得し、リアルタイムで字幕を注視位置に表示する。従来の画面下部に固定された字幕と読みやすさや疲労について比較した結果、被験者は提案手法を好んだ。

これらの研究から、2D コンテンツにおいては、画面下部に固定した字幕配置よりも、映像の内容や視聴者の視線情報に合わせて動的に配置する字幕のほうが、眼精疲労の軽減や視聴体験の向上には適しているといえる。

2.2 3D コンテンツでの字幕による奥行き知覚の混乱

3D コンテンツにおける奥行き要素の追加は、視聴者の知覚を混乱させ、不快感や眼精疲労をもたらす [21], [22], [23]。先行研究では、VR 映像を視聴する際に、奥行き要素が原因で起こる可能性のある視聴者の知覚の混乱や不快感、疲労の要因を以下のように分類している [9], [10]。

輻輳と調節の不一致

人は見ている物体の奥行きを認識するためにさまざまな手がかりを利用している。生理的な要素に起因する手がかりとして、物体を見るときに両目を同時に内側または外側に動かす運動である輻輳や、見ている対象にピントを合わせるために眼球の水晶体の厚みを変化させる調節がある。3D ディスプレイでは、輻輳によって知覚される距離は映像内のオブジェクトに合うが、調節による焦点はディスプレイ自体に合い、このずれが視聴者に不快感をもたらす [8], [14]。現実世界では、注視している物体以外の周囲や背景をぼかすことで、奥行きを認識できる。しかし、VR ゴーグルでは背景を自然にぼかすことが困難であるため、奥行きを認識することが難しくなる。このような違いが両眼の視差を統合する際に影響し、不快感や眼精疲労を引き起こす可能性がある [15], [16], [24]。輻輳と調節の不一致を防ぐために、可変焦点 HMD [25] やライトフィールド HMD [26] は、調節による焦点の位置を変化させて輻輳と調節の奥行き知覚を一致させる。また、注視距離以外をぼかして競合する知覚の手がかりをなくし、輻輳と調節の不一致を防ぐ手法が検討されている [9], [27]。

遮蔽による立体知覚の不一致

人間の眼は、隣り合う 2 つの領域のうち、運動要素が出現あるいは消失する領域を非遮蔽物として奥に、つねに存在する領域を遮蔽物として手前に知覚する [28], [29], [30]。視聴者が両眼視差によって字幕が映像やオブジェクトより遠くにあると知覚しているときに、字幕が映像やオブジェクトを遮蔽すると、眼を混乱させ不快感が生じたり知覚が困難になる可能性がある [9], [10]。

異なる深度の移動

オブジェクトや背景が激しく動くゲームをしたり、場面の移り変わりが多い映像を見たりするときに、視聴者はオブジェクトや映像と字幕の間で注視点を頻繁に移動させる必要がある。オブジェクトや映像と字幕の奥行きが異なる場合、視聴者の眼はそのつど輻輳角を変化させる必要があり、余分な眼精疲労を引き起こす可能性がある [9], [10]。

このように、奥行き要素の追加により視聴者の知覚が混乱することは広く知られており、それらの原因も分析されてきた。しかし、奥行き方向と縦横方向の視線の移動の関係を考慮した字幕の提示方法に関する研究はなく、それらを考慮した適切な字幕の配置方法を検討する必要がある。

2.3 3D コンテンツでの字幕の提示手法

3D コンテンツの奥行き要素による不快感や眼精疲労を減らすための字幕の提示手法はいくつか提案されている。Sidenmark らは、奥行き知覚の混乱によって起こる問題を解決するために、アイトラッキングを利用した 3 つの字幕配置手法を提案している [9]。1 つ目の手法は、注視している字幕の背景をぼかすことで注視点の奥にあるほかの情報

を視認性を下げ、奥行きの手がかりが競合する可能性を弱めるというものである。2 つ目の手法は、注視しているオブジェクトの奥行きに合わせて、字幕の深度を調節することで遮蔽による立体知覚の不一致と異なる深度の移動が起こるを防ぐというものであり、3 つ目にこれら 2 つを組み合わせた手法を提案している。また、この研究では既製の VR アプリケーションの字幕の特徴を調査している。この論文で調査したアクションやロールプレイングなどさまざまなジャンルを含む 20 種類のゲームアプリケーションのうち、字幕の深度を動的に変化させるアプリケーションは 2 種類のみであった [31], [32]。この 2 つのアプリケーションでは、字幕を字幕と重なる可能性のあるオブジェクトよりも視聴者に近くなるように配置することで、遮蔽による立体知覚の不一致が起こるのを回避している。しかしこれらにおいても、字幕がつねに異なる深度間で自然に遷移するとは限らず、字幕が動くことで視聴者が文字を読みづらくなったり、他の映像との深度の差で不快感を感じたりすることがあった。

Nguyen らは、UI の深度を立体映像の深度に合わせて調整することで、視聴者の注視している深度との不一致を減らす手法を提案した [10]。これにより、視聴者の不快感や UI の見にくさを低減している。字幕のある映像視聴や UI 操作のタスクでの評価実験の結果、この手法は従来の UI の配置が固定されている手法より注視点の切り替えやすさや見やすさなどで高い評価であったため、字幕と注視している映像の深度を合わせたほうが、注視点を切り替えやすく、文字や映像が見やすいと分かった。

このように立体映像における奥行き要素に対応するために、字幕の配置を動的に変化させる手法はいくつか提案されているが、映像内のオブジェクトが動くときの文字やオブジェクトの見やすさ、視聴者の疲労は考慮されておらず、評価されていない。VR の主要なコンテンツである 3D ゲームや 3D 映画の鑑賞では、映像内のオブジェクトが動くことが多いため、オブジェクトに動きがあるときの字幕の配置方法を検討する必要がある。また、これまでの研究は視線移動に対応して字幕の配置を変えているが、縦横方向と奥行き方向の視線移動の関係を考慮した手法は筆者らの知る限り存在しない。そこで本研究では、縦横方向および奥行き方向の注視点の動きに適応した字幕配置手法を提案し、映像内のオブジェクトや字幕の見やすさおよび視聴者の疲労を調査する。

3. 提案手法

3.1 想定環境

本研究における字幕提示の対象は、VR の主要なコンテンツである 3D ゲームや 3D 映画とする。これらは、映像の場面が頻繁に移り変わったり、オブジェクトが動き回ったりし、視聴者は映像内のオブジェクトを目で追う必要が

ある．このようなコンテンツにおいて，視聴者はオブジェクトや映像自体を見ることを優先し，字幕は内容の理解を助けるために補助的に用いるものとする．

3.2 3D 映画鑑賞による問題点の抽出

3D コンテンツの字幕において何が問題となりうるのかを抽出するために，被験者に没入型 HMD (HTC VIVE Pro [33]) を装着させて実際に 3D 映画を鑑賞させ，映像および字幕の見えにくさや視聴者の不快感の原因を調査した．被験者には 3D 映画の観賞後に視聴時の不快感や見えにくかった箇所を自由に述べさせ，その感想を記録した．視聴映像は，3D のアニメーション映画と実写映画の 2 種類で，それぞれ本編のうち 5 分程度を抜き出した．実験ではそれらの 2 種類の映像に字幕を付与したものとししないものの 2 通りの計 4 通りの映像を視聴させた．なお，字幕位置は従来の 2D 映画と同様に画面の下部である．それらの 4 通りをそれぞれ 5 回ずつ計 20 回視聴させた．被験者は成人男女 2 名で，試行は数日間に分けて実施した．

実験の結果，被験者 2 名の感想をまとめると，以下の 3 つの問題点が抽出された．

問題 1：深度の差で文字が二重に見える

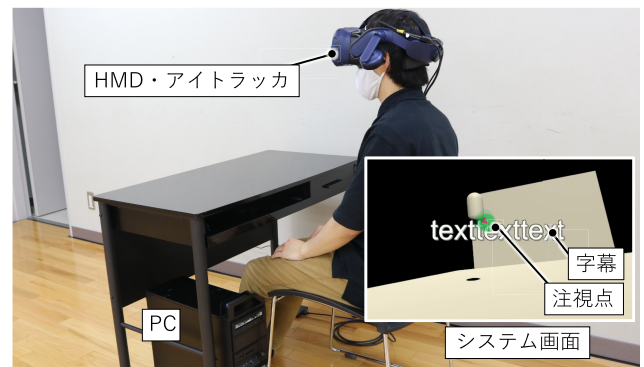
注視しているオブジェクトの深度が字幕の深度よりも大きいと，輻輳距離が字幕に合っていない状態で左右の眼の映像を処理するため，文字の位置がずれ，二重になっているように見える．この問題は，3D コンテンツにおける字幕配置手法を提案している研究でも問題とされている [9], [10]．

問題 2：文字が有効視野に入らないことでぼやけて見える
注視しているオブジェクトと字幕の位置が縦横方向に離れていると，映像を見ている際に文字が有効視野の外に配置され，視聴者の目にはぼやけて見える．この問題は，2D コンテンツにおける字幕配置手法を提案している研究でも問題とされている [18], [19], [20]．

問題 3：文字がオブジェクトよりも手前にあるため没入感を感じづらい

文字がオブジェクトよりも手前にあると，オブジェクトはその文字より飛び出してくるようには見えないため，字幕がないときよりも没入感が減ってしまう．

問題 1 を解決するために深度の差を小さくする手法は 3D コンテンツにおける字幕配置手法を提案している研究で検討されている [9], [10]．また，問題 2 を解決するために文字と注視点の縦横方向の距離を小さくする手法は 2D コンテンツにおける字幕配置手法を提案している研究で検討されている [18], [19], [20]．しかし，これらの複数の問題点を同時に解決している研究は筆者らが知る限りない．以上をふまえ，本研究では，3.4 節で没入感を考慮しつつ注視点と字幕の深度の差もしくは文字の縦横方向の距離を小さくする手法を 4 種類提案する．



(a) システム構成



(b) 字幕移動の例

図 1 提案システム

Fig. 1 Proposed system.



図 2 アイトラッカ [34] を取り付けけた HMD [33]

Fig. 2 HMD [33] with eye tracker [34].

3.3 システム構成

注視点と字幕の深度の差や縦横方向の距離を小さくするためには，視線情報を取得してそのときの注視点に動的に深度や縦横方向の位置を合わせる必要がある．そこで，三次元の視線情報を取得できる HMD を用いて字幕位置を注視点に合わせて変えられるシステムを構築した．提案システムの構成を図 1 (a) に示す．提案システム使用時には，視聴者はアイトラッカを備えた HMD を装着する．提案システムは，HMD に立体映像を映しながら，視聴者の縦横と奥行き視線情報や眼球の運動を取得し，それらの情報に基づいて図 1 (b) のように字幕の 3D 空間上の配置を動的に変更する．図 1 (c) の緑色のマークはユーザの注視点を示しており，その座標に基づいて字幕の縦横と奥行きの配置を変化させる．実際の使用時には，マークは見えず，ユーザはプロトタイプシステムでは図 2 に示すように，HMD としては HTC VIVE Pro [33]，アイトラッカとして Pupil Labs HTC Vive Add-On [34] を用いた．HTC VIVE Pro の視野角は最大 110° である．

3.4 字幕配置手法

3.2 節の問題点をふまえ，注視点と字幕の深度の差を小

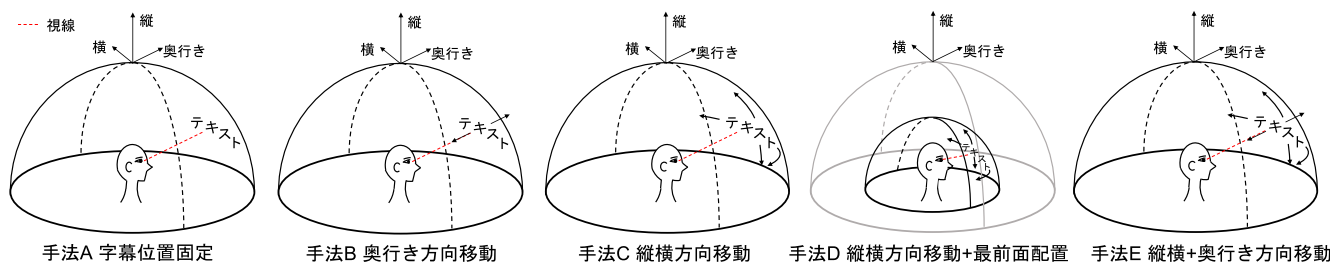


図 3 従来手法 (A) と提案手法 (B, C, D, E)
Fig. 3 Conventional method (A) and Proposed methods (B, C, D, E).

表 1 提案手法によって解決する問題点
Table 1 Methods that can solve the issues.

手法	問題 1	問題 2	問題 3
A	—	—	—
B	○	—	—
C	—	○	○
D	—	○	—
E	○	○	—

さくする手法、注視点と文字の縦横方向の距離を小さくする手法、没入感を考慮しつつ注視点と文字の縦横方向の距離を小さくする手法、深度の差と距離の両方を小さくする手法の 4 種類の字幕配置手法を提案する。それぞれの手法を図 3 に示す。なお、画面下部に固定され、移動しない字幕の配置手法を従来手法 (手法 A) とし、提案手法をそれぞれ手法 B, C, D, E とする。これらの手法は 3.2 節で抽出された問題点を表 1 のように解決する。以降、提案手法の詳細を述べる。

手法 B 奥行き方向移動

手法 B では、アイトラッカで視聴者の注視点の奥行きを取得し、見ている点と同じ深度に字幕を配置する。深度が異なるオブジェクトと字幕を同時に見ようとする、問題 1 のように文字がぼやけて二重になったように見える。さらに、視聴者は文字を見ようとするときに、焦点を合わせ直す必要がある。そこで、視聴者の視線情報から注視している点の深度を取得し、そこに字幕を移動させることで深度の差を減らすことができる。これにより、つねに注視点と同じ深度に字幕が表示されるため、視聴者はオブジェクトを見ているときに縦横方向の眼球移動のみで字幕を見ることができる。

手法 C 縦横方向移動

手法 C では、アイトラッカで視聴者が見ている方向を取得し、字幕の奥行きは変化させず、見ている方向に字幕を配置する。字幕の位置が注視しているオブジェクトから離れていると、問題 2 のように視聴者の有効視野から外れてしまい、文字がぼやけて見えてしまう。そこで、アイトラッカで取得した注視している位置に字幕を移動させることで、字幕を視聴者の有効視野に入れ、視聴者はオブジェクトを見ながら字幕の内容を理解できる。また、映像と字

幕の間で視線を行き来させる必要がなくなるので、眼精疲労の軽減にもつながる。

手法 D 縦横方向移動+最前面配置

手法 D は、手法 C と同様にアイトラッカで視聴者が見ている方向を取得し、字幕の奥行きは変化させず、見ている方向に字幕を配置する。3D コンテンツにおいて空間内に字幕を配置すると、オブジェクトの動きによっては字幕に対して遮蔽が起り、字幕が見えなくなってしまうときがある。手法 C ではこの遮蔽が発生するため、手法 D では字幕の動きは同様にして字幕をオブジェクトに対して前面に配置することで、オブジェクトで字幕が隠れることを防ぐ。しかし、字幕を最前面に配置することによって問題 3 が起り、没入感が減る可能性があるため、手法 C との比較が必要である。

手法 E 縦横+奥行き方向移動

手法 E は、アイトラッカで視聴者が見ている方向と注視点の奥行きを取得し、見ている点と同じ座標に字幕を配置する。手法 B の奥行き方向の移動に加え、手法 C の縦横方向の移動をさせることで、問題 1 と問題 2 を同時に解決できる。最も視線移動が少ないのは縦横奥行きすべて注視点位置に字幕を移動させることで、これは映像における字幕配置では支持されている [19], [20]。ただし、最も字幕の移動が多くなってしまうため、文字が読みにくくなったり、没入感を失わせたりする可能性もある。

4. 評価実験

3 章では没入感を考慮しつつ注視点と字幕の深度の差もしくは注視点と文字の縦横方向の距離を小さくする手法を 4 種類提案した。本章では、提案手法の有効性の確認のために映像などの変動要因を単純化した評価環境を構築し、提案手法の文字の読みやすさや疲労度への影響を評価した。なお本実験は、神戸大学大学院工学研究科人を直接の対象とする研究倫理審査委員会の承認を受けて行ったものである (審査番号 03-04)。

4.1 実験設計

評価環境の構築

実際の映画を提案手法の評価の題材として用いると変動

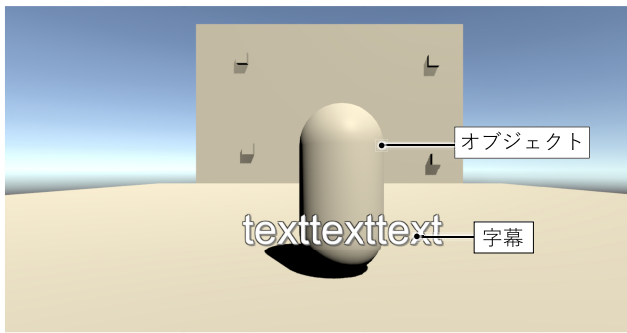


図 4 構築した評価環境

Fig. 4 Screen of constructed evaluation environment.



図 5 評価環境でのオブジェクトの動き

Fig. 5 Object movement in the evaluation environment.

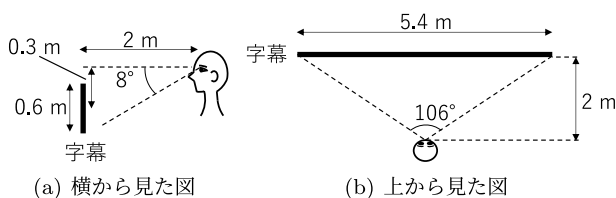


図 6 被験者に対する字幕の配置

Fig. 6 The location of the subtitles from the participant.

する要因が多いため提案手法の有効性を評価できないと考え、図 4 のような単純化した評価環境を構築した。この評価環境には、図 5 のように空間に斜め奥の方向に動くオブジェクトが配置されており、字幕の配置方法のみを変えられる。これを用いて、縦横方向、奥行き方向のどの要素が文字やオブジェクトの見やすさに寄与するかを評価した。

評価環境において、字幕を固定させる際には図 6 のように字幕を配置した。被験者と字幕との水平方向の距離は 2 m、垂直方向の距離は 0.3 m であり、下方に 8° の位置となる。字幕の大きさは、ひらがなを 10 文字並べたときに縦 0.6 m、横 5.4 m となり、被験者から見た横幅の角度は 106° となる。また、オブジェクトは図 7 に示す範囲を直線的に約 2.5 m/s の速さで移動した。オブジェクトは、被験者に最も近くなるときに被験者から奥に 3 m、右に 0.9 m に位置し、水平方向の角度が右に 17° となる。最も遠くなるときには、奥に 24 m、左に 13 m、上に 11 m に位置し、水平方向の角度が左に 29° 、垂直方向の角度が上に 15° となる。最も近くなるときのオブジェクトの高さは、被験者の目線と等しくなる。

視線追従の理想状態の再現

被験者がある 1 点を見ているとき、アイトラッカの認識精

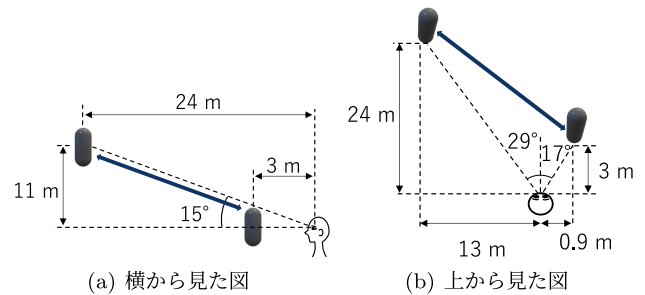


図 7 被験者に対するオブジェクトの配置

Fig. 7 The location of the objects from the participant.

度やノイズによって、字幕提示位置がずれてしまう可能性がある。提案システムで用いたアイトラッカの視線検出精度は誤差 1° である [35]。特に視線の縦横方向推定に比べて注視点の奥行きの推定は難しく、筆者らも推定方法を検討しているが [36]、誤差なく追従できるとはいえない。この検出誤差は、被験者の疲労などの指標として用いる際には、手法ごとに結果が大きく異なることが予想されるため問題はないと考えたが、字幕配置の際に視線情報を用いると手法の違いよりも視線情報のわずかなノイズによって結果が大きく変わってしまう。その環境では、字幕を移動させる方向による影響などの本来調べたいことを明らかにすることができないと考え、本実験では視線情報の認識精度が 100% の理想的な視線追従状態を再現して、評価を行った。

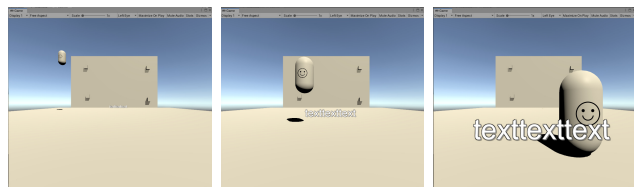
具体的には、被験者にオブジェクトを見続けるように指示を出し、視線データがオブジェクトを見ているという結果になると仮定した。そして、オブジェクトの座標を視点座標として、その座標に基づき字幕を配置、移動させた。実際のシステム使用時には、上述のような注視点のずれが生じ、提案手法の読みやすさやユーザの疲労に影響を与える可能性がある。実環境での評価および高精度な注視点の推定は今後の課題である。

実験手順

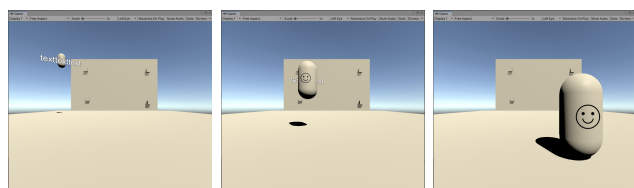
本実験では提案手法を評価環境に実装し、図 8 に示す提示パターンを被験者に視聴させた。視聴する順番は、試行順序の影響を考慮してランダム化した。被験者は HMD の使用経験のある 22 から 30 歳（平均年齢：23.5 歳、標準偏差：2.06 歳）の男性 10 名、女性 2 名、計 12 名である。実験の様子を図 9 に示す。被験者は HMD を装着し、アイトラッカのキャリブレーションを行った後、VR 映像を視聴しながら、表示されている字幕を読み上げた。各試行における映像の視聴時間は 1 分間とした。字幕は 1 行読み終えるごとに実験者によって、次の字幕へ送られた。各試行の後、被験者は質問紙に回答した。また、順序による疲労の影響を排除するために、被験者は試行の間に 10 分以上の休憩をとった。さらに、実験者は被験者の疲労が完全になくなったと確認してから次の試行を開始した。図 8 の 5 種類の手法に対し、ランダムな文字（ひらがな）の羅列の



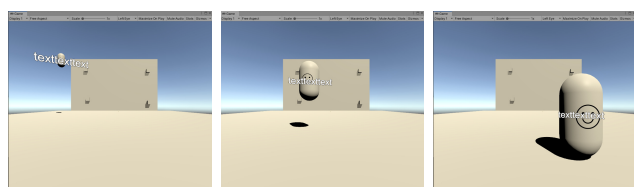
(a) 字幕位置固定 (手法 A)



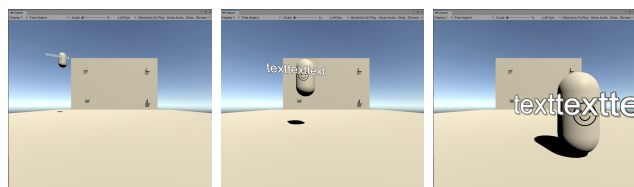
(b) 奥行き方向移動 (手法 B)



(c) 縦横方向移動 (手法 C)



(d) 縦横方向移動+最前面配置 (手法 D)



(e) 縦横+奥行き方向移動 (手法 E)

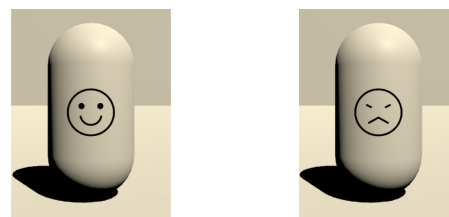
図 8 評価実験での字幕提示パターン

Fig. 8 The subtitles movements in evaluation experiment.



図 9 実験の様子

Fig. 9 Participant and experimenter in evaluation experiment.



(a) 笑顔

(b) 怒り顔

図 10 顔画像を貼り付けたオブジェクト

Fig. 10 The objects attached the face images.



図 11 顔を変化させる間隔

Fig. 11 The intervals of changing face images.

提示と意味のある文章の提示の 2 種類の文字パターンで各条件を 1 回ずつ計 10 試行繰り返した。

また、被験者がつねにオブジェクトを注視するように追加のタスクを与えた。被験者が注視するオブジェクトに図 10 に示す顔の画像を貼り付け、顔の画像を一定間隔で変化させた。変化させる間隔は、図 11 のように 1 秒から 5 秒まで 1 秒ずつ増やし、5 秒経過後は再度 1 秒から繰り返す。被験者には、オブジェクトの顔が笑顔のときには Enter キーを押し続け、顔が怒り顔のときには離すように伝えた。字幕の文字情報は映像視聴の補助であるため、映像自体を見ている時間は長いほうが視聴体験の向上や内容の理解にはよい。そこで、被験者がオブジェクトと字幕の両方を見るのが難しいときには、オブジェクトを優先して見るように指示した。

4.2 評価指標

本実験では、3 章で提案した文字提示手法について、文字の読みやすさを確認するため、評価指標として可視性、可読性を用いた。また、映像の見やすさと視聴者の負荷を確認するため、注視点移動量を調べた。視聴者の疲労の確認には、注視点移動量のほか、アイトラッカで計測した眼球運動を評価指標として用いた。さらに、主観的な評価として、5 段階のリッカート尺度による質問紙調査を行った。質問項目は表 2 に示す 5 項目である。また、字幕の読みやすさや疲労、不快感の原因について自由に記述させた。以下、各指標について詳述する。

可視性

可視性は 1 文字 1 文字の判別しやすさを示す。字幕は一定時間ごとに切り替わるため、素早く文字を認識できることは重要である。実験ではランダムな平仮名の羅列を 10 文字表示し、被験者はそれを声に出して読み上げた。1 行読み上げるごとに実験者が行を送り、新しい 10 文字を表示した。これを 1 分間繰り返し、読めた文字数を記録した。

表 2 質問紙調査項目
Table 2 Questions.

	質問	尺度 (1 – 5)
Q1	どのくらいオブジェクトが飛び出してきたように感じましたか?	感じなかった – とても感じた
Q2	奥行きが分かりやすかったですか?	分かりにくかった – 分かりやすかった
Q3	どのくらい没入感がありましたか?	感じなかった – とても感じた
Q4	どのくらい疲れましたか?	疲れた – 疲れていない
Q5	文は読みやすかったですか?	読みにくかった – 読みやすかった

また、主観評価として、表 2 の Q5 を被験者に回答させた。
可読性

可読性は文章としての読みやすさを示す。可読性の評価では、意味のある文章を読み上げる速さを計測した。実験では、文章を 1 行表示し、被験者はそれを声に出して読み上げた。1 行読み上げるごとに実験者が行を送り、新しい文章を表示した。これを 1 分間繰り返し、読めた文字数を記録した。また、主観的な評価として、表 2 の Q5 に回答させた。文章は著作権の切れた作品を無料で読める青空文庫の新字新仮名 [37] の文を用いた。

注視点移動量

注視点の移動量は、眼精疲労や内容の理解度、視聴体験の快適性などさまざまな要素に影響を与えると考えられる。今回の実験では、アイトラッキングデータから、1 つの固視 (fixation) から別の固視までの平均移動量を算出した。
眼精疲労

眼精疲労の評価にはアイトラッカによる視線情報を用いる。視線情報と疲労との関係は多く研究されており、注視点の移動量や瞳孔の直径 [38]、サッカード [39], [40]、脳波 [41]、瞬目 [39], [42], [43] など複数の疲労に関する測定値がある。眼精疲労が増加すると、瞬目の頻度と持続時間が増え [39], [42], [43]、サッカードの頻度が減少する [39]。本実験では、これら指標のうち、瞬目の回数とサッカードの回数を測定し、提示パターン間で比較する。さらに、主観評価として表 2 の Q4 を被験者に回答させた。

没入感

3D コンテンツでは、立体感の分かりやすさや没入感も重要な要素である。これらについては、質問紙を用いて調査した。質問内容は、表 2 の Q1, Q2, Q3 である。

4.3 実験結果

各データについて、3.4 節で提案した 5 つの条件で被験者内 1 要因分散分析を行った。さらに、有意差が得られた結果については、Bonferroni 法による多重比較を行った。また、質問紙調査の結果は Friedman 検定を行い、有意差が得られた結果については、Wilcoxon の符号化順位検定を用いた多重比較を行った。 p 値の調整には Bonferroni 法を用いた。4.2 節で示した各指標の結果を図 12 および図 13 にまとめる。図 12 は定量的な評価指標である読み上げた

文字数、瞬目の回数、サッカードの回数、注視点移動量であり、図 13 は質問紙調査結果をまとめたものである。また、図中のエラーバーは標準誤差を、* は $p < 0.05$ であることを示す。以下、各評価指標の結果について説明する。

可視性

被験者が読み上げたランダムなひらがなの文字数と質問紙調査結果による読みやすさは、図 12(a) および図 13 の Q5 (ランダムな文字の読みやすさ) の結果となった。図 12(a) より、手法 E を用いたときに読んだ文字数が最も多かった。被験者内 1 要因分散分析を行った結果、文字数 ($F_{(4,44)} = 18.00$, $p < 0.05$) に有意差が得られた。また、質問紙調査結果に関して Friedman の順位と検定を行った結果、有意差が得られた ($\chi^2(4) = 32.80$, $p < 0.05$)。

文字数に関する多重比較 ($MSe = 232.05$) の結果、手法 C, D, E は手法 A (従来手法) に比べて有意に読めた文字数が多かった。また、質問紙調査結果に関する Wilcoxon の符号化順位検定を用いた多重比較の結果においても、手法 C, D, E が手法 A (従来手法) よりも有意に読みやすかった。手法 C, D, E は、縦方向と横方向に字幕を移動させる手法であることから、ユーザの注視点に応じて縦横方向に字幕を動かすことは文字の認識に有効であると分かった。また、文字数と質問紙調査結果両方において、オブジェクトが字幕を遮蔽せずに字幕を縦横に移動させる手法 D, E が字幕を手法 B よりも優位意に読みやすかった。被験者の自由記述によると、手法 C では字幕の前にオブジェクトがあり、字幕が隠れて文字が見えなくなるときがあった。一方、手法 D と E では、字幕がつねにオブジェクトより手前にあるため、可視性が高かった。

これらの結果から、字幕の奥行きを変えるよりも、字幕を縦横に移動させるほうが可視性を高めるのに効果的であると考えられる。また、状況やコンテンツの内容によっては、字幕の奥行きを変えることでさらに可視性を向上できる可能性がある。

可読性

被験者が読み上げた意味のある文章の文字数と質問紙調査結果による読みやすさは、図 12(b) および図 13 の Q5 (意味のある文章の読みやすさ) の結果となった。これらより、縦横方向および奥行き方向に字幕を移動させる手法 E が最も読みやすかった。被験者内 1 要因分散分析を行っ

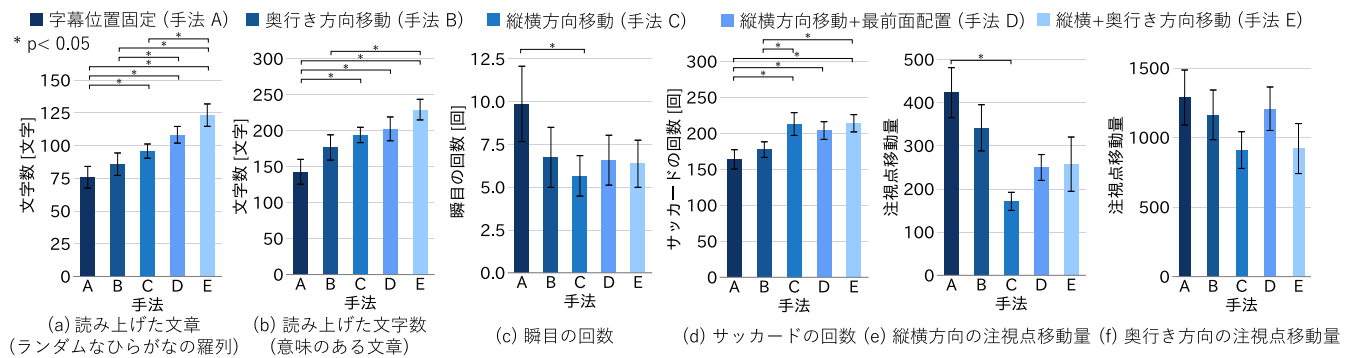


図 12 定量的な評価指標の結果

Fig. 12 Results of the quantitative evaluation experiments.

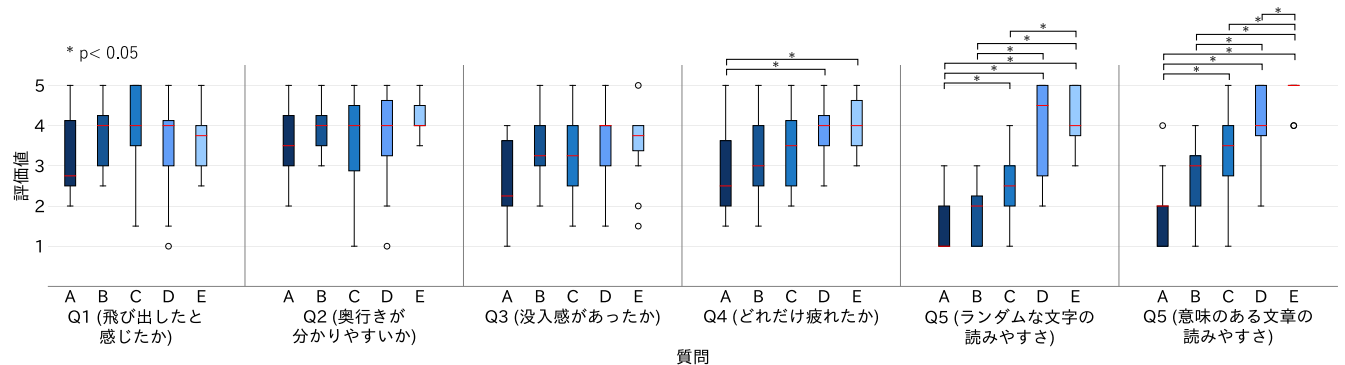


図 13 質問紙調査結果

Fig. 13 Results of the questionnaire.

た結果、文字数 ($F_{(4,44)} = 13.35$, $p < 0.05$) で有意差が得られた。また、質問紙調査結果に関して Friedman の順位検定を行った結果、有意差が得られた ($\chi^2(4) = 35.91$, $p < 0.05$)。

文字数に関する多重比較 ($MSe = 924.24$) の結果、手法 C, D, E は手法 A (従来手法) に比べて有意に読めた文字数が多かった。また、質問紙調査結果に関する Wilcoxon の符号化順位検定を用いた多重比較の結果においても、手法 C, D, E は手法 A (従来手法) よりも有意に読みやすかった。よって、可視性と同様にユーザの注視点の位置に応じて字幕を動かすことが可読性の向上に効果的であると分かった。また、縦横奥行きすべての方向に動かす手法 E が奥行き方向のみに動かす手法 B よりも有意に読みやすかったことから、奥行き方向よりも縦横方向に字幕を動かすほうが文章の理解に有効であると分かった。可視性に関しては、手法 E が縦横方向のみに字幕を動かす手法 C よりも有意に高かったが、可読性に関しては有意に差があるとはいえなかった。手法 C について自由記述によると、被験者はランダムな文字の場合は字幕がオブジェクトに隠れて読めなかったのに対し、意味のある文字の場合は文脈から文字が推測できていた。このことから、意味のある文章で字幕の一部が見えなくなることは、可読性の観点において大きな問題ではないことが示唆された。

以上の結果から、可読性を向上させるには字幕の奥行き

を変えるよりも縦横方向に移動させるほうが有効であった。また可読性に関して、字幕がオブジェクトによって隠れる影響は大きくなかった。

注視点移動量

各提示手法における縦横方向および奥行き方向の注視点移動量は図 12 (e) および図 12 (f) の結果となった。被験者内 1 要因分散分析を行った結果、縦横方向の注視点移動量 ($F_{(4,44)} = 4.03$, $p < 0.01$) で有意差が得られた。縦横方向の注視点移動量に関する多重比較 ($MSe = 27696.32$) の結果、手法 C は手法 A (従来手法) に比べて有意に注視点移動量が減少した。このことから、手法 C ではオブジェクトと字幕の間の注視点移動が減少し、視聴者の負荷を低減させることができると考えられる。ただし、4.1 節で述べたようにこれはアイトラッカの奥行き方向の視線検出誤差の影響を受けている可能性がある。

被験者がどれだけ字幕とオブジェクトを同時に見られるかは手法の見やすさによって異なる。同時に見えやすい手法であれば注視点の動きはオブジェクトの動きと同じになるため注視点移動量は少なくなり、同時に見えにくい手法であれば字幕とオブジェクトの間を注視点が行ったり来たりするため注視点移動量が多くなると考えられる。同時に見えにくい手法に関して、実際の結果から可視性、可読性が低かった手法 A と手法 B は、縦横方向および奥行き方向の注視点移動量が多かった。

同時に見えやすい手法に関して、結果から可視性、可読性が高かった手法 D と手法 E は、縦横の注視点移動量が少なかった。しかし、縦横方向移動のみの手法 D は、奥行き方向の注視点移動量が多かったことから、見やすい字幕配置のためには奥行き方向の移動も必要であると考えられる。手法 D および E より可視性、可読性の低かった手法 C が縦横方向奥行き方向ともに最も注視点移動量が少なかった。手法 C はオブジェクトが字幕を遮蔽し読めない時間があつたため、その期間は字幕を読むための注視点移動がなくなり、最も移動量が少なくなったと考えられる。これらより、字幕の見やすさと注視点移動量には関係があり、見やすい手法は移動量が少ないと分かった。また、字幕を読むことが難しい手法は、注視点移動がなくなる期間があり、移動量が最も少なくなることが示唆された。

眼精疲労

1 分間の瞬目の回数、サッカードの回数、質問紙調査による疲労度合いはそれぞれ図 12(c)、図 12(d) および図 13(Q4) の結果となった。被験者内 1 要因分散分析を行った結果、瞬目の回数 ($F_{(4,44)} = 3.41, p < 0.01$)、サッカードの回数 ($F_{(4,44)} = 10.87, p < 0.01$) で有意差が得られた。また、質問紙調査結果に関して Friedman の順位和検定を行った結果、有意差が得られた ($\chi^2(4) = 19.56, p < 0.05$)。

瞬目の回数に関する多重比較 ($MSe = 9.38$) の結果、手法 C は手法 A (従来手法) よりも瞬目の回数が有意に減少した。また、質問紙調査に関する Wilcoxon の符号化順位検定を用いた多重比較の結果、手法 D および手法 E は手法 A (従来手法) よりも有意に被験者が疲れていないと回答した。手法 C や手法 E は、他の手法に比べてオブジェクトと字幕の 3 次元的な距離が最も小さい手法である。このことから、眼精疲労はオブジェクトと字幕の距離と関係があると考えられる。また、手法 C は図 12(e) より最も注視点移動量が少ない手法であったことから、注視点移動量と眼精疲労にも関係があると考えられる。

没入感

没入感に関する質問紙調査は、図 13(Q1)、図 13(Q2)、図 13(Q3) に示す結果となった。Friedman の順位和検定を行った結果、質問紙調査結果 Q1, Q2, Q3 に有意差は得られなかった。被験者の自由記述から、手法 B は、字幕の大きさが変化したことから、映像全体の立体感を感じたという意見があつた。字幕を被験者から中程度離れた距離に固定する手法 C は、オブジェクトが飛び出したと感じたと回答した被験者が最も多かった。自由記述からもオブジェクトが字幕より手前に来るときに飛び出してくるように見えたという意見があつた。よって、字幕の大きさの変化や字幕と周囲のオブジェクトとの位置関係は立体感やオブジェクトが飛び出しているように感じるかに影響すると考えられる。また、手法 E は、字幕がオブジェクトに対し

て縦横および奥行き方向に追従するため、字幕が空間の中に入り込んでいるように感じて没入感が高くなったという意見があつた。一方、異なる被験者から、字幕がオブジェクトに張り付いて動いていることで、映像全体の没入感が減ったように感じたという意見が得られた。これらのように個人によって感じ方は異なっていたが、字幕の動かし方がユーザの没入感へ影響を与える可能性が示唆された。

各手法に関する考察

実験結果より、提案手法 (手法 B, C, D, E) は、従来手法 (手法 A) に比べ、可視性、可読性が高く、眼精疲労も小さかった。今回の実験では、オブジェクトを縦横および奥行き方向に移動させた。手法 A では字幕を最前面に配置していたため、オブジェクトが奥行き方向に大きく移動したときに、字幕と注視しているオブジェクトの距離が他手法と比較して最も離れた。質問紙調査における自由記述からもオブジェクトが遠くにあるときに文字を読むのが難しいといった回答やオブジェクトを見ながら字幕を読もうとすると注視点を頻繁に動かす必要があつたという回答があつた。このことから、先行研究 [10], [20] と同様に、手法 A は映像によっては被験者の眼精疲労を増加させる可能性があることが示唆された。

奥行き方向にのみ字幕を移動させた手法 B は、可視性や可読性が低下することが分かった。しかし有意差はないものの、オブジェクトが飛び出していると感じる度合いや奥行きの分かりやすさについては、多くの被験者が手法 B を高く評価した。また、自由記述から、字幕とオブジェクト間の視線移動は簡単だったというコメントが得られた。このことから、今回の実験におけるオブジェクトの動きとは相性が良くなかったが、字幕とオブジェクトの深度を揃えることは 3D コンテンツにおいて重要である可能性が高い。

縦横方向にのみ字幕を移動させた手法 C および D は、可視性、可読性に関して評価が高かった。このことから、字幕がユーザの有効視野から離れることは、文字の理解に大きな影響を与えることが分かった。手法 D はオブジェクトによって字幕が隠れることがないため、手法 C よりも可視性、可読性が高かった。一方で、手法 C は最も眼精疲労と注視点移動量が少なかった。よって、オブジェクトと字幕の距離が短いことが眼精疲労に関係する可能性がある。また、手法 C や手法 D のほうが、評価指標全体を通して評価の高い手法 E よりも字幕自体の移動量が少なかったため、眼精疲労に影響を与えている可能性がある。

縦横および奥行きのすべての方向で字幕が移動する手法 E は、可視性、可読性、主観的疲労で最も評価が高かった。このことから、オブジェクトと字幕の両方から情報を得るには縦横だけでなく奥行き方向に関しても距離が近いことが重要となることが分かった。自由記述の結果からも、オブジェクトと字幕の両方が見やすいという評価を得た。ただし、字幕の移動量が多くなってしまい、それがユーザの

眼精疲労につながる可能性が示唆された。

抽出された問題点に関する考察

抽出した問題点を提案手法によって解決できたかを確認するために、3.2節で抽出された表1の問題点について考察する。問題1（深度の差で文字が二重に見える）については、手法Eが手法Cよりも見やすく、文字が読みやすかったため、提案手法によって問題を解決できていた。また、問題2（文字が有効視野に入らないことでぼやけて見える）については、手法C, D, Eは手法A（従来手法）より有意に読みやすく、手法Eは手法Bより有意に読みやすいという結果であり、問題を解決できていた。問題3（文字が手前にあるため没入感を感じづらい）については、オブジェクトが飛び出していると感じるかどうか、奥行きが分かりやすいかなどの項目によって結果が異なっていた。よって、これらを別の問題と見なし、各要素を考慮する必要があった。

5. 議論

評価実験では、5種類の字幕配置手法を比較したが、各評価指標ごとに最適な手法は異なっていた。可視性、可読性に関しては、定量的な指標と質問紙調査ともに縦横方向と奥行き方向の両方に字幕を移動させる手法Eが最も評価が高かった。よって、読みやすさが必要な場合には手法Eが適していると考えられる。眼精疲労に関しては、瞬目とサッカードの回数から中程度の距離に配置させ縦横方向に移動させる手法Cの評価が最も高かった。このことより、長時間作業が続いたり集中力を持続させたりするなど疲労を抑える必要がある場合には、手法Cが適していると分かった。また、没入感に関する質問紙調査では自由記述の結果から、手法Cがオブジェクトが飛び出してきたように感じやすく、手法Bが立体感を感じやすかった。被験者によって異なるものの手法Eが没入感を与えるのに適している可能性があった。

2D・3Dコンテンツにおける字幕配置手法に関する先行研究と本研究で得られた実験結果について比較、議論する。2Dコンテンツでの字幕配置手法を提案した先行研究では、視線位置に応じて字幕の位置を変化させることで、ユーザの眼精疲労を低減し、快適性を向上させていた[19], [20]。本研究における提案手法の評価実験では、3Dコンテンツにおいてもユーザの視線位置に応じて字幕を縦横に移動させることが効果的であることが示された。また、3D映像に字幕を配置する先行研究において、映像の深度に合わせて字幕を移動させる手法は、可視性、可読性の向上に効果的であると述べられていた[10]。今回の評価実験から、注視点に適応して字幕を配置させることで、これらの手法と同様に可視性、可読性を向上させることができ、さらに注視点移動の縦横方向と奥行き方向の関係を調べた結果、縦横方向の字幕移動が奥行き方向よりも効果的であると分

かった。

しかし、提案手法の評価実験は、字幕の読みやすさに起因する基本的な要素について評価するために限定的な条件下で行ったため、実環境への適用は今後の課題である。具体的な制約として以下が考えられる。評価実験ではアイトラッカの精度を考慮し、オブジェクトの座標を注視点と仮定してその座標に字幕を提示したため、実際に注視点に追従させた際の検証はできていない。また、注視点に完全に追従させた際には、文字を読むための注視点移動によって字幕が動いてしまい、ユーザが文字を読むことが難しくなる。実験で用いた映像に関しても、1つのオブジェクトが斜め奥に動く映像だけで検証していたため、映像内容が変わると適切な配置方法が変わる可能性がある。また映像のほかに、文字の大きさやフォントの種類など配置方法以外の要素についても検討が必要である。以下にそれぞれ詳細を説明する。

実験ではアイトラッカの精度の影響をなくすために被験者にオブジェクトを注視させ、オブジェクトの座標を注視点とした。よって今回の実験結果は、被験者の注視点が固定されている場合や予測できる場合に適用できる。しかし、注視点が一定でない場合には、システムによって注視点を正確に予測する必要がある。注視点推定の精度が十分であれば、提案手法を取り入れることで字幕の見やすさや読みやすさを向上させ、眼精疲労を低減できる可能性がある。

一方、注視点の移動に対して字幕を完全に追従させることは、文字の読みやすさに関する問題を引き起こす可能性がある。人は一般に字幕を読むときには、文字をなぞるように注視点を動かす。その際、システムによって字幕を注視点移動に完全に追従させていると、字幕が動いてしまい、ユーザは文字を読むことが難しくなる。この問題を解決するためには、ユーザが文字を読んでいるかどうかをシステムによって認識し、ユーザが読んでいる間は字幕の横方向の移動を止めるといった処理が必要になると考えられる。

実験に用いた映像は、1つのオブジェクトが斜め奥に動くものであった。しかし、実際の3Dコンテンツでは複数のキャラクタを見る必要があったり、斜め奥以外のランダムな動きをしたり、場面自体が移り変わったりすることが考えられる。今回は最も基礎的な動きに関してのみ検証したが、ユーザが注視する映像やオブジェクトの変動要因が増えた際に適用できるかも検討する必要がある。

また、3Dコンテンツの最適な字幕提示には、字幕の配置以外にも文字のサイズやフォントの種類の検討が必要である。評価実験の際、被験者の自由記述から字幕が遠くにあるときに文字が小さく読みにくいという意見があった。また、文字サイズが一定であっても奥行き方向に文字が移動すると、文字の大きさは見かけ上小さくなる。文字の動きによって見かけ上の文字の大きさは変化するため、手法ごとに適したサイズやフォントの種類は異なると考えられ

る。最適な字幕配置が分かれば、その動かし方ごとにサイズやフォントなどの他の要素を調整することで最適な字幕の提示手法が確立できると考えている。

3D コンテンツでは、注視点の縦横方向に加えて奥行きを推定する必要があり、奥行きの推定は精度が低く難しい。注視点推定の精度が低いため、今回は理想的な追従をしているという想定で環境を作り、評価を行った。注視点移動量に関しては、4.1 節の実験設計で述べたようにアイトラッカの奥行き方向の視線検出精度の影響を否定できず正確な注視点移動量を推定できていない可能性がある。一方、瞬目の回数はアイトラッカの奥行き方向の視線検出の影響を受けていないため、結果の信頼性は高いと考えている。また、サッカードの回数は、アイトラッカの奥行き方向の視線検出の誤差を受けているが、実験結果の手法間の差が大きく評価の指標としては問題ないと結論づけた。今後、奥行き推定の精度が向上すれば、2D における字幕提示の先行研究で行われているような複雑な環境においても提案手法を利用することができる。

6. まとめ

本研究では、視線移動の縦横、奥行き方向の関係を考慮した 3D コンテンツにおける字幕の最適な配置方法を検討した。まず、没入型 HMD を装着して実際に 3D 映画を鑑賞し、映像および字幕の見えにくさや視聴者の不快感など、3D コンテンツにおける問題点を抽出した。調査結果をふまえ、アイトラッカが内蔵された HMD を用いて字幕位置を注視点に合わせて変えられるシステムを構築し、注視点と字幕の深度の差を小さくする手法、注視点と文字の縦横方向の距離を小さくする手法、没入感を考慮しつつ注視点と文字の縦横方向の距離を小さくする手法、深度の差と距離の両方を小さくする手法の 4 種類の字幕配置手法を提案した。さらに、提案手法の有効性を確認するため、映像などの変動要因を単純化した評価環境を構築し、評価実験を行った。実験の結果、ユーザの注視点に合わせて字幕を縦横に移動させることが、可視性、可読性の向上に効果的であることが分かった。また、3D コンテンツにおいて字幕を読むことに起因する眼精疲労は、オブジェクトと字幕の距離に関係がある可能性が示唆された。実験では、被験者にオブジェクトが斜め後方に移動する映像を視聴させるという限定的な条件下で提案手法を評価したが、このような状況は、既存の映画やゲームでも起こりうることであり、提案手法を実環境へ適用することも可能であると考えられる。

この調査が現在提案されているさまざまな 3D 空間への字幕配置手法を評価する際の基礎データとなるものである。さらに、異なる環境や字幕における配置以外の要素についての特性を明らかにすることで、今回の調査がより確かなものとなると考えている。

謝辞 本研究の一部は、JST CREST (JPMJCR18A3) の支援によるものである。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- [1] SoftBank Corp.: VR SQUARE, available from <https://livr.jp/>.
- [2] Sony Interactive Entertainment Inc.: PlayStation VR, available from <https://www.playstation.com/ja-jp/explore/playstation-vr/>.
- [3] Google: Expeditions, available from https://edu.google.com/products/vr-ar/expeditions/?modal_active=none#about.
- [4] Intuitive Surgical: Da Vinci Systems, available from <https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci/systems>.
- [5] Zhu, Y. and Li, N.: Virtual and Augmented Reality Technologies for Emergency Management in the Built Environments: A State-of-the-Art Review, *Journal of Safety Science and Resilience*, Vol.2, pp.1–10 (2021).
- [6] HTC: VIVE Pro Eye, available from <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro-eye/overview/>.
- [7] Koolstra, C.M., Peeters, A.L. and Spinhof, H.: The Pros and Cons of Dubbing and Subtitling, *European Journal of Communication*, Vol.17, No.3, pp.325–354 (2002).
- [8] Hoffman, D.M., Girshick, A.R., Akeley, K. and Banks, M.S.: Vergence–Accommodation Conflicts Hinder Visual Performance and Cause Visual Fatigue, *Journal of Vision*, Vol.8, No.3, pp.1–30 (2008).
- [9] Sidenmark, L., Kiefer, N. and Gellersen, H.: Subtitles in Interactive Virtual Reality: Using Gaze to Address Depth Conflicts, *Proc. Workshop on Emerging Novel Input Devices and Interaction Techniques*, pp.1–6 (2019).
- [10] Nguyen, C., DiVerdi, S., Hertzmann, A. and Liu, F.: Depth Conflict Reduction for Stereo VR Video Interfaces, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2018)*, No.64, pp.1–9 (2018).
- [11] Kowler, E.: Eye Movements: The Past 25 Years, *Vision Research*, Vol.51, No.13, pp.1457–1483 (2011).
- [12] Koretz, J.F. and Handelsman, G.H.: How the Human Eye Focuses, *Scientific American*, Vol.259, No.1, pp.92–99 (1988).
- [13] Liversedge, S.P. and Findlay, J.M.: Saccadic Eye Movements and Cognition, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol.4, No.1, pp.6–14 (2000).
- [14] Fincham, E.F. and Walton, J.: The Reciprocal Actions of Accommodation and Convergence, *Journal of Physiology*, Vol.137, No.3, pp.488–508 (1957).
- [15] Shibata, T., Kim, J., Hoffman, D.M. and Banks, M.S.: Visual Discomfort with Stereo Displays: Effects of Viewing Distance and Direction of Vergence–Accommodation Conflict, *Stereoscopic Displays and Applications XXII*, Vol.7863, pp.1–13 (2011).
- [16] Banks, M.S., Kim, J. and Shibata, T.: Insight into Vergence/Accommodation Mismatch, *Head-and-Helmet-Mounted Displays XVIII: Design and Applications*, Vol.8735, pp.1–18 (2013).
- [17] Shimizu, Y., Ohnishi, A., Terada, T. and Tsukamoto, M.: Gaze-Adaptive Subtitles Considering the Balance among Vertical/Horizontal and Depth of Eye Movement, *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2021)*, pp.137–142 (2021).
- [18] Hu, Y., Kautz, J., Yu, Y. and Wang, W.: Speaker–

- Following Video Subtitles, *ACM Trans. Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol.11, No.2, pp.1–17 (2015).
- [19] Akahori, W., Hirai, T. and Morishima, S.: Dynamic Subtitle Placement Considering the Region of Interest and Speaker Location, *Proc. International Conference on Computer Vision Theory and Applications*, Vol.6, No.8, pp.102–109 (2017).
- [20] Kurzhals, K., Göbel, F., Angerbauer, K., Sedlmair, M. and Raubal, M.: A View on the Viewer: Gaze-Adaptive Captions for Videos, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2020)*, pp.1–12 (2020).
- [21] Lambooi, M., Murdoch, M.J., IJsselsteijn, W.A. and Heynderickx, I.: The Impact of Video Characteristics and Subtitles on Visual Comfort of 3D TV, *Displays*, Vol.34, No.1, pp.8–16 (2013).
- [22] Kang, Y. and Cho, S.: Comparison of Visual Discomfort When Viewing 3D Videos with Various Contrast Changes on a Stereoscopic 3D Display, an Autostereoscopic Display, and an HMD, *Electronic Imaging*, Vol.2016, No.5, pp.1–5 (2016).
- [23] Yang, X., Wang, D., Hu, H. and Wang, H.: Visual Fatigue during Continuous Viewing the 3D Movie, *Electronic Imaging*, Vol.2016, No.5, pp.1–6 (2016).
- [24] Hoffman, D.M. and Banks, M.S.: Focus Information is Used to Interpret Binocular Images, *Journal of Vision*, Vol.10, No.5, pp.1–17 (2010).
- [25] Akşit, K., Lopes, W., Kim, J., Spjut, J., Patney, A., Shirley, P., Luebke, D., Cholewiak, S.A., Srinivasan, P., Ng, R. and Banks, M.S. and Love, G.D.: Varifocal Virtuality: A Novel Optical Layout for Near-Eye Display, *Proc. ACM SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, No.25, pp.1–2 (2017).
- [26] Chou, P.Y., Wu, J.Y., Huang, S.H., Wang, C.P., Qin, Z., Huang, C.T., Hsieh, P.Y., Lee, H.H., Lin, T.H. and Huang, Y.P.: Hybrid Light Field Head-Mounted Display using Time-Multiplexed Liquid Crystal Lens Array for Resolution Enhancement, *Optics Express*, Vol.27, No.2, pp.1164–1177 (2019).
- [27] Kraus, M. and Strengert, M.: Depth-of-field rendering by pyramidal image processing, *Computer Graphics Forum*, Vol.26, No.3, pp.645–654 (2007).
- [28] Howard, L.P.: Depth perception, *Stevens' Handbook of Experimental Psychology* (2002).
- [29] Kaplan, G.A.: Kinetic Disruption of Optical Texture: The Perception of Depth at an Edge, *Perception and Psychophysics*, Vol.6, No.4, pp.193–198 (1969).
- [30] Yonas, A., Craton, L.G. and Thompson, W.B.: Relative Motion: Kinetic Information for the Order of Depth at an Edge, *Perception and Psychophysics*, Vol.41, No.1, pp.53–59 (1987).
- [31] InXile Entertainment: The Mage's Tale, available from <https://www.inxile-entertainment.com/magestale>.
- [32] RockSteady Studios Limited: Batman: Arkham VR, available from <https://rocksteadyltd.com/>.
- [33] HTC: VIVE Pro, available from <https://www.vive.com/eu/product/vive-pro/>.
- [34] Pupil Labs: HTC Vive Add-On, available from <https://pupil-labs.com/products/vr-ar/>.
- [35] Pupil Labs: Technical Specs & Performance, available from <https://pupil-labs.com/products/vr-ar/tech-specs/>.
- [36] 清水裕介, 大西鮎美, 寺田 努, 塚本昌彦: 目の画像を用いた深層学習による注視点の奥行き推定手法, ユビキタスウェアラブルワークショップ 2021 (UWW 2021) 論文集, p.45 (2021).
- [37] 青空文庫, 入手先 <https://www.aozora.gr.jp/>.
- [38] Hopstaken, J.F., Linden, D.V.D., Bakker, A.B. and Kompie, M.A.: A Multifaceted Investigation of the Link between Mental Fatigue and Task Disengagement, *Psychophysiology*, Vol.52, No.3, pp.305–315 (2015).
- [39] Iatsun, I., Larabi, M.C. and Fernandez-Maloigne, C.: Investigation of Visual Fatigue/Discomfort Generated by S3D Video using Eye-tracking Data, *Stereoscopic Displays and Applications XXIV*, Vol.8648, pp.1–15 (2013).
- [40] Salvucci, D.D. and Goldberg, J.H.: Identifying Fixations and Aaccades in Eye-Tracking Protocols, *Proc. 2000 Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, pp.71–78 (2000).
- [41] Chen, C., Wang, J., Li, K., Wu, Q., Wang, H., Qian, Z. and Gu, N.: Assessment Visual Fatigue of Watching 3DTV using EEG Power Spectral Parameters, *Displays*, Vol.35, No.5, pp.266–272 (2014).
- [42] Benedetto, S., Pedrotti, M., Minin, L., Baccino, T., Re, A. and Montanari, R.: Driver Workload and Eye Blink Duration, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, Vol.14, No.3, pp.199–208 (2011).
- [43] Yamada, Y. and Kobayashi, M.: Detecting Mental Fatigue from Eye-Tracking Data Gathered while Watching Video: Evaluation in Younger and Older Adults, *Artificial Intelligence in Medicine*, Vol.91, pp.39–48 (2018).



清水 裕介

2020 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。同年同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程前期課程、現在に至る。



大西 鮎美 (正会員)

2014 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業。2016 年東京大学大学院新領域創成科学研究科自然環境学専攻修士課程修了。2019 年神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士課程後期課程修了。同年神戸大学大学院工学研究科特命助教, 2020 年同助教。博士 (工学)。ウェアラブルコンピューティング, ユビキタスコンピューティングの研究に従事。



寺田 努 (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終了。2000年同大学院工学研究科博士後期課程退学。同年大阪大学サイバーメディアセンター助手。2005年同講師。

2007年神戸大学大学院工学研究科准教授，2018年同教授，現在に至る。2004年特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事。博士（工学）。アクティブデータベース，ウェアラブルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングの研究に従事。IEEE，電子情報通信学会，日本データベース学会，ヒューマンインタフェース学会の各会員。



塚本 昌彦 (正会員)

1964年生。1987年京都大学工学部数理工学科卒業。1989年同大学大学院工学研究科修士課程修了。同年シャープ（株）入社。1995年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師。1996年同専攻助教授。2002年

同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授。2004年神戸大学大学院工学研究科教授，現在に至る。2004年特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長を兼務。博士（工学）。ウェアラブルコンピューティングとユビキタスコンピューティングの研究に従事。ACM，IEEE等8学会の会員。