

被写界深度ボケと運動視差を同時に再現する 注視反応ディスプレイ

鈴木孝明^{†1} 岡谷貴之^{†1} 出口光一郎^{†1}

われわれが3次元シーンを見る際、見つめる対象の奥行きに応じて、眼は半ば自動的に焦点調節を行う。このとき、眼の網膜像には、被写界深度の制約からくるデフォーカスボケが存在するが、これが奥行き手がかりとなることは良く知られている。石澤らは、通常の映像ディスプレイと視線計測装置を使って、人の眼の焦点調節をシミュレートするシステムを提案し、空間情報の視覚提示の新しい方法の実現を狙った。本研究では、これを一歩進め、運動視差とボケを同時に提示するシステムを実現した。立体・運動視差は、ボケよりも強い奥行き手がかりとして知られるが、双方は互いに相補的であり、同時に提示することで相乗効果が見込めるのではないかという期待がある。システムの実装と、行った実験について報告する。

Gaze Reactive Display Simultaneously Presenting Defocus Blur and Motion Parallax

TAKA AKI SUZUKI,^{†1} TAKAYUKI OKATANI^{†1}
and KOICHIRO DEGUCHI^{†1}

When we see a three-dimensional scene, our eyes automatically accommodate (i.e. adjust their focus) depending on the depth to objects that we look at. There is defocus blur in its retinal image that emerges due to the depth-of-focus limitation, which is well known to serve as a depth cue. Ishizawa et al. proposed a system that uses an ordinary image display and an eye tracking system to simulate the accommodation of human eyes using, which aimed at realizing a novel method of visually presenting scene depth information. In this study, extending their study, we realize a system that simultaneously presents motion disparity and defocus blur. Binocular and motion disparity, which is known to be stronger depth cue than defocus blur, is also known to be complementary with defocus blur. Thus, their simultaneous presentation to a viewer is expected to bring about a synergetic effect. We report the implementation of the system and the results of a few experiments we conducted.

1. はじめに

究極のディスプレイとは、映し出す映像があたかも観測者の目の前に実際に存在しているかのように見えるディスプレイであって、実際にシーンを見た場合と同じ感動を抱くことができるようなものだろう。しかし、現在の映像ディスプレイ上で見ると、どんなシーンの画像でも、その本物を見たときのような感動はない。つまり、現在実現されている映像ディスプレイは、表示しているシーンをあたかも目の前で見ているかのような臨場感や立体感を与えることはない。CRT、プラズマ、液晶等のデバイスに基づく映像ディスプレイが再現する光線分布(ライトフィールド)は、様々な点において実世界のそれとは異なるからである。その違いは、高コントラスト比、色階調といった点を始め、両眼視差、運動視差、画像のボケ、輻輳、焦点調節等の奥行き手がかりを提示できるかどうかにある。

通常我々が奥行きのある対象を見る際には、対象の奥行きに応じて両眼の輻輳角や眼の焦点を調節するが、ディスプレイの場合には奥行きに変化がなく、それらはディスプレイの表示面の奥行きに固定されてしまう。ディスプレイに表示する画像を撮影した段階で、映像の焦点位置、被写界深度が決まっており、観測者が後から任意の奥行きに焦点をあわせることは出来ない。現実の視覚では、興味ある対象の奥行きに応じて焦点位置を能動的に変化させながらシーンを見ているが、ディスプレイの映像を見る際には映像側で固定されてしまっている。

現在の映像ディスプレイには以上のように制約がある。これらを改善し、少しでも現実に近づけるために、表示装置および画像の表示方法が研究されている。表示装置の分野では、左右の目に異なる画像を提示する両眼視差を利用したステレオディスプレイ¹⁾やヘッドトラッキングによる運動視差提示ディスプレイ²⁾が数多く研究されている。また、表示する物体の三次元位置と表示位置を一致させるポリウムディスプレイについての研究^{3),4)}も数多くある。映像技術としては一般的だが、被写界深度の制約から来るデフォーカスボケが奥行き感の知覚につながる事に着目し、これを画像に付加することで奥行き感を向上させる方法もある。仮想空間における奥行き量提示にボケを付加した画像を用いる研究⁵⁾などもある。

我々が3次元シーンを見る際、興味や関心の赴くままに視線を自由に移動させてい

^{†1} 東北大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

る．そして視線方向にある対象の奥行きに応じて焦点位置を調節し，明るさに応じて明暗順応を行っている．このことからディスプレイに表示される映像においても，視線方向に応じて画像のボケや明るさを変化させれば，臨場感を向上させられる可能性がある．しかし，過去の研究における視線の利用は，システム操作^{6),7)} や，画像上の注視点の調査等に用いられるケースが多く，視線方向に応じてディスプレイの表示画像を変化させることで臨場感や立体感の向上を目指す研究はあまりなされていない．

このことを踏まえ，石澤らは，映像ディスプレイの臨場感・立体感の向上を目指し，視線変動に応じて画像のボケを変化させることで，空間情報の提示を行うことを研究した⁸⁾．本研究では，石澤の研究を踏まえて，通常の映像ディスプレイに，焦点調節，運動視差を同時に再現することで，奥行き知覚が向上するかどうかを調査する．

2. 空間情報提示

2.1 デフォーカスボケの効果

目やカメラ等の光学システムではシャープに映したい対象の奥行きに応じて焦点調節を行う．その際，像がシャープに見えるシーンの奥行きを被写界深度という．被写界深度はレンズ口径や対象の奥行きにも依存する．

図1に同じシーンに対して被写界深度を変えて撮った画像を示す．左は被写界深度が深く，右は浅い．同じシーンでも被写界深度が変化するだけで印象が変わるのが分かる．シーンによっては被写界深度の深浅により，例えば奥行き感やスケールの認識が大きく変化する事がある．例として図2に同じシーンに対して被写界深度を変えて撮影した写真を示す．図2のシーンでは，右の画像において奥の物体がぼけたことでシーンの奥行きを感じやすく，物体の前後関係がつかみやすくなっている．図3の画像は，特殊な撮影方法を用い被写界深度を変えて撮影したものである．実際の風景を撮影した画像なのだが，まるでジオラマ（ミニチュアのシーン）を撮った画像のように感じられる．

デフォーカスボケが奥行き感を与えることは，これまでに医学・心理学の分野において研究されている．デフォーカスボケが奥行きの手がかりになることは文献⁹⁾において指摘されている．そこでは，画像上のボケの空間変化がシーンの点までの相対的な距離の量的手掛かりを与え得ることが，計算論的立場から示され，また人の視覚系がこの手がかりを用いて奥行き認識を行っていることが示唆されている．文献^{10),11)}では，デフォーカスボケが絵画的奥行き手がかり（陰影，重なり，大きさ，きめの勾配等⁷⁾）になることも指摘されている．文献^{10),12)}では人の視覚系では，遮蔽輪郭で生じるシャープな領域とボケた領域の見え



図1 被写界深度の深い画像（左）と浅い画像（右）



図2 被写界深度の違いによる印象の変化

方から物体の奥行き順序を判断していることが報告されている．さらに，シーンにボケ以外の奥行き手がかりがない場合に網膜上のボケから対象までの距離を区別して判断できるといった報告もある¹³⁾．また，ボケが焦点調節を誘発し^{14),15)}，さらにそのときの眼球運動の情報から奥行き知覚を行い得ることも報告されている¹⁶⁾．

以上のように被写界深度の制約からくるデフォーカスボケには，奥行き感を与えることが報告されており，またシーンのスケールを知覚させる働きもあることが容易に推測される．

2.2 石澤らのシステム

我々は目の前のシーンを見る際，視線を自由に移動させ注視対象を任意に切り取っている（注視点選択）．その際，眼の被写界深度の制約のため，注視する物体に焦点が合うように，物体のある奥行きに対して眼は焦点調節を行う．そして注視点選択・焦点調節のループを繰



図 3 現実のシーンだがミニチュアのシーンに見える写真

繰り返し行っていることから、このループが空間知覚に大きな役割を果たしていると考えられる。このことから、石澤らは、ディスプレイに映し出された映像を見る際にも観測者がシーンに応じた注視点選択・焦点調節のループを行うことが出来れば、あたかも実際にシーンを見ているかのような状況を再現でき、臨場感・立体感の向上につなげられる可能性があると考えた。

ディスプレイに表示する画像で観測者の眼に焦点調節を行わせるためには、実世界でのライトフィールドを完全に再現する必要がある。しかし、現状のディスプレイではライトフィールドは均等に分散してしまい、実世界のライトフィールドを再現出来ない。実世界のそれをディスプレイで再現するためには技術的課題が多く、ステレオディスプレイで多少再現できているのが現状である。ここで人の視覚系を考えた場合、注視点選択は視線を自由に移動させ行い、焦点調節は視線の先にある物体の奥行に応じて半自律的・自動的に行っている。石澤らは、焦点調節時に生じるデフォーカスポケを画像側で提示することで擬似的に焦点調節を行っている状況を再現することにした。そこで彼らが提案した提示システムでは、従来からある 2 次元ディスプレイと視線計測装置にて観測者の注視点を選択し、これを利用して擬似的な注視点選択・焦点調節のループを実現する注視反応ディスプレイを考えた。

注視反応ディスプレイのシステム概要図を図 4 に示す。観測者には通常のディスプレイを見てもらい観測者の視線に応じて提示画像をリアルタイムに変化させるシステムである。概略を述べると、まず被験者がディスプレイを見る際の眼球運動を視線計測装置で捉える。そこからディスプレイ上での注視点座標を計算する。そして注視点座標に応じて、表示画像のフォーカスを変化させるシステムである。つまりこのシステムは、被験者側に注視対象の

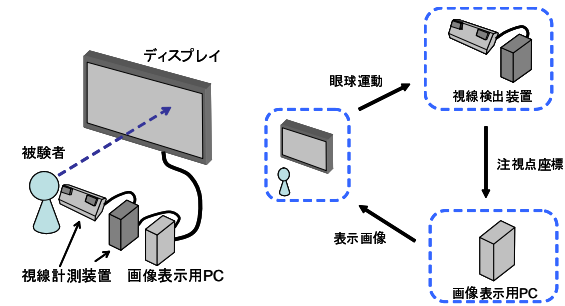


図 4 注視反応ディスプレイのシステム概要図

選択を自由に行わせつつ、眼の焦点調節を画像提示側で再現する。

石澤らはこの注視反応ディスプレイを利用した提示システムにより、見るものにシーンの好きな場所を自由に観察することを許しつつ、デフォーカスポケ由来の奥行き手がかりをうまく提示することが出来たとしている。

2.3 運動視差との融合

石澤らの提案した注視反応ディスプレイでは、静止画において得られるのと少なくとも同等の奥行き知覚の補強が、注視点選択の自由度とともに実現された。しかし、注視変化とデフォーカスポケの変化により、視覚的アクションとレスポンスの対をシミュレートすることで、さらに奥行き知覚が、これまでに知られていないようなあり方で補強されるとは、実験では明確には確認されていない。そこで、本研究では、更なる奥行き知覚の向上を目指し、新しい提示システムを構築する。具体的には、石澤らの構築した 2 次元映像ディスプレイによる注視反応ディスプレイに代わり、両眼視差や運動視差等を同時に再現可能な 3 次元注視反応ディスプレイを構築することである。これについては、視差に基づく奥行き手がかりとボケに基づくそれとでは、互いが相補的に働く可能性が強いという報告がある¹⁷⁾。したがって 3 次元ディスプレイを用いてボケ画像を提示すれば、相乗効果的に奥行き知覚をより現実感のあるものとする可能性がある。本論文では、このことについて、焦点調節と運動視差を同時に再現する 3 次元注視反応ディスプレイを提案し、実験を通して調査することを目的とする。

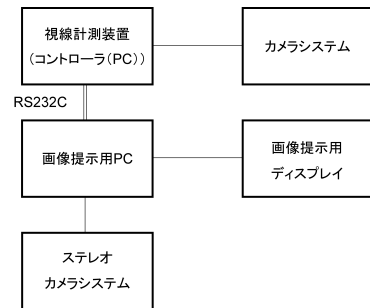


図 5 3次元注視反応ディスプレイシステム構成

3. システム概要

3.1 システム構成

本研究で製作した3次元注視反応ディスプレイシステムの構成を図5に示す。本システムは、観測者の注視位置を計測するための視線計測装置、観測者の頭部位置を推定するためのステレオカメラ、注視点位置、頭部位置に応じた画像の提示を行う画像提示用PC、画像を提示するためのディスプレイで構成される。なお、視線計測装置と画像提示用PCはシリアル通信により接続してある。装置の仕様は、視線計測装置はCPUがIntel Pentium4(動作周波数3.2GHz)、メモリは1GBであり、画像提示用PCはCPUがIntel Xeon 5160(動作周波数3GHz)、メモリは3GBである。また、ステレオカメラは最大解像度960×720、フレームレート30Hzである。システムの外観図を図6に示す。

3.2 視線の計測

視線計測にはNAC社製EMR-AT VOXER(図7)を用いた。この視線計測装置は検瞳孔/角膜反射法(暗瞳孔法)を採用している。この方式は、被験者の眼に人には見えない近赤外線を投射し、そのときの眼を映したカメラ画像から輝点(角膜反射像)と瞳孔を検出(図8)する。そして、瞳孔の中心と角膜反射像の中心間の距離から視線方向を求め、そこから被験者の注視点座標を算出している¹⁸⁾。

眼球の回転運動のみでは視線方向は分かっても、ディスプレイ上の注視点位置までは分からない。また、被験者の眼球形状や装置の設置位置等に応じて、眼球の回転運動と注視点座標の関係が変化するため、装置使用前にキャリブレーションを行う必要がある。本装置は、片眼から注視点位置を算出している。そのため、あらかじめ視線検出に利用する眼を登録



図 6 3次元注視反応ディスプレイシステム外観図



図 7 視線計測装置

し、以下の方法にてキャリブレーションを行う。9点に対しディスプレイ座標系での座標を装置側に登録する。被験者にその9点を見てもらい、そのときの注視点の座標位置と眼の回転角度の関係を計測することでキャリブレーションを行っている。

今回用いた視線計測装置は、被験者は何も装着せず、また頭部をあご台等に固定することなく視線計測が行える。つまり、非接触・非拘束に視線計測が行える。注視点計測のサンプリングレートは60Hzである。

3.3 視線位置の平滑化

眼球は1点を固視している際にも、固視微動と呼ばれる微小眼球運動を行っている¹⁹⁾。注

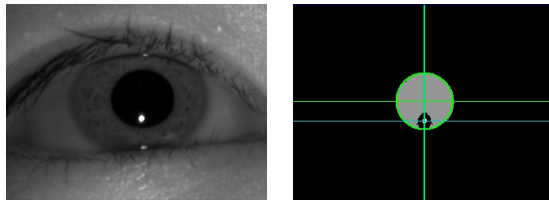


図 8 瞳孔と角膜反射像

視点位置に応じて提示画像を変化させる注視反応ディスプレイでは、固視微動による注視点座標の変動は不要である（被験者が注視していると思っいる点の座標が必要。）そのため、固視微動による注視点座標の変化を軽減する必要がある。ここでは、この目的で石澤らと同じヒステリシスフィルタ⁷⁾を用いた注視点計測値の平滑化処理を行った。

3.4 画像表示

画像表示用ディスプレイには、図 9 に示す SONY40 インチデジタルハイビジョン液晶テレビを用いた。なお、ディスプレイの最大解像度は 1920 × 1080 である。被験者はこのディスプレイ上の画像を見る。その時のディスプレイ上での注視点座標が視線計測装置から画像提示用 PC に送られてくる。画像提示用 PC はこの座標位置にあるシーン上の物体に対応する奥行きに焦点を合わせた画像の提示を行う。また同時に、2 台のステレオカメラが観測者の頭部位置を算出し、そこを視点として物体を描画、画像提示ディスプレイに投影する。

4. リアルタイムボケ画像合成

石澤らの研究では、高品位なボケ画像の生成を目指し、ボケ画像を合成した。しかし合成処理に時間がかかることから、ボケ画像は事前に合成された。本研究では、運動視差に対応するため、ボケ画像をリアルタイムで再現する。具体的には、GPU を用いて、描画するシーン全てをぼかした画像を作成し、それとシーン全てに焦点が合った画像をシーンのデプスマップを重み付けとして加え合成することにより、被写界深度をリアルタイムで再現する。

ボケ画像の作成方法としては、シーン全体にガウスフィルタをかけることで作成する。すなわち、(1) 式により各画素の値を決める。

$$\text{合成色} = c^2 \sum_i \sum_j \exp\left(-\frac{(x_i - x_a)^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{(y_j - y_a)^2}{2\sigma^2}\right) t(x_i, y_j) \quad (1)$$



図 9 表示ディスプレイ

ここで、 $t(x_i, y_i)$ は、 (x_i, y_i) にあるテクセルの色で、 (x_a, y_a) は、それぞれのピクセルが指す、テクセルの中心となる。テクセルの中心では、ガウス関数の指数の値は 1 になるので、規格化定数 c^2 の重みでテクセルが合成される。中心から離れたテクセルは、ガウス関数の指数の値が小さくなるので、ピクセルに対する影響力が小さくなる。

図 10 に、被写界深度を再現するためのボケ画像合成方法の概略を示す。シーンの奥行きを画素の輝度値として表した画像を、そのシーンのデプスマップとする。デプスマップの深度値から焦点を合わせたい場所（注視点位置）の深度値 (f_c) を減算し、その結果を 2 乗したものの（重み画像とする）を合成時の重みとして使用する。 c は被写界深度の深浅を調整する定数である。すなわち、シーン全体をぼかした画像と重み画像を乗算した画像、また、重み画像を反転したものにシーンを描画した画像を乗算した画像をそれぞれ作成し、それらを加算合成することで、被写界深度を再現する。図 11 に、石澤らの研究により合成したボケ画像と今回用いた手法により合成したボケ画像との比較を示す。図 11 から、両者に目で見てはっきりとした違いがないことが確認できる。

5. 実験

5.1 ボケ画像の比較

石澤らの研究で合成されたボケ画像と、本研究で合成したボケ画像それぞれを提示画像とし、図 4 で示した 2 次元注視反応ディスプレイを用いて、それらがシーンに与える奥行き

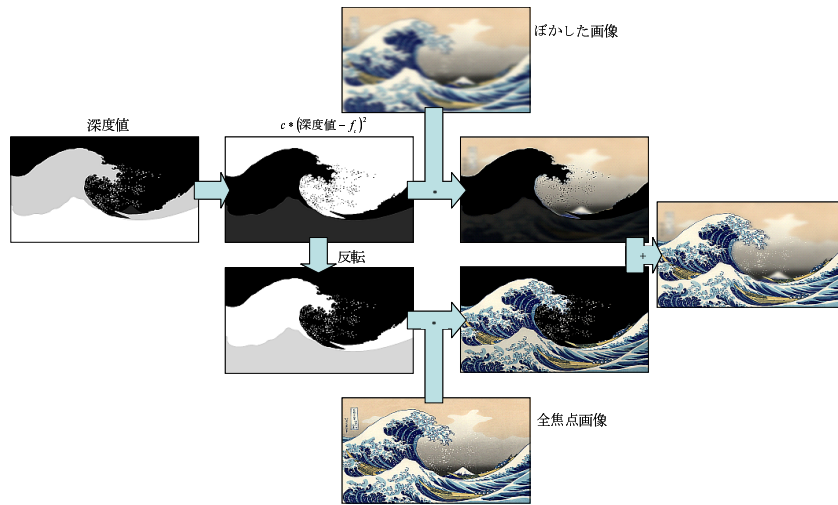


図 10 ポケ画像の合成

手がかりの効果について比較する実験を行った。すなわち、注視対象があると思われる奥行きに応じたボケを再現した画像を提示することによる奥行き知覚への影響を検証した。

実験には、図 12 に示す (a) と (b) の 2 枚の画像を用意した。また、評価方法は石澤らの研究にならい、3 人の被験者による主観評価による。実験では、石澤らの研究で合成したボケ画像、本研究で合成したボケ画像どちらにおいても、注視点が静止している間には、シーンに対する奥行き知覚が補強されたという報告が得られた。このことから、本研究で合成したボケ画像は石澤らの研究で作成されたそれと比較しても大きく変わらないことが確認できる。

5.2 焦点調節と運動視差を同時に再現するシーン

1 節で述べたように、視差に基づく奥行き手がかりとボケに基づくそれとは、互いが相補的に働く可能性が強いという報告がある¹⁷⁾。したがって 3 次元ディスプレイを用いてボケ画像を提示すれば、相乗効果的に奥行き知覚をより現実感のあるものとする可能性がある。そこで、図 6 で示した提示システムを用いて、このことを調査する実験を行った。

5.2.1 実験方法

図 13 は、今回の実験で提示したシーンの一例である。仮想シーン内にある 2 つのオブジェクトは、その奥行き配置が類似しているため、静止画ではもちろん運動視差を再現した場合でも、そのどちらが被験者に対して手前にあるのか分かりづらい配置をとっている。実

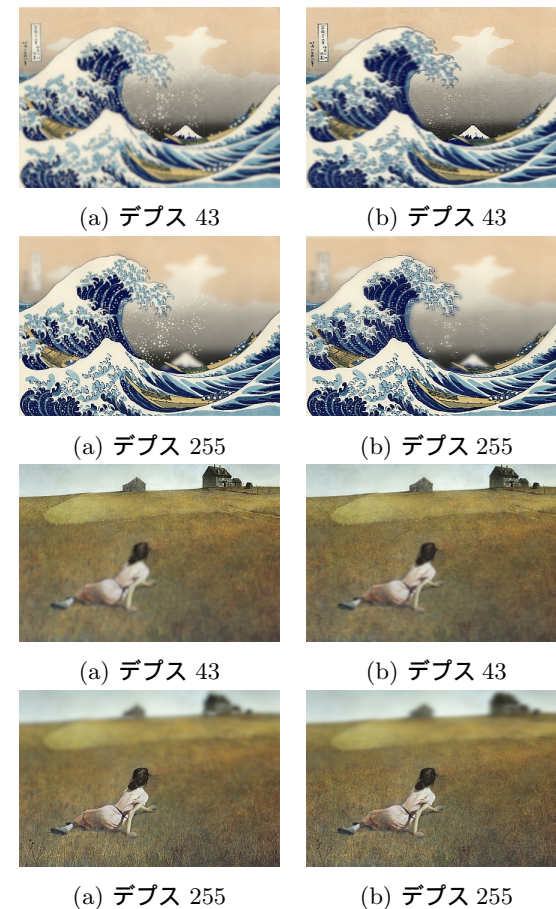


図 11 合成したボケ画像による比較。(a) 石澤らの方法によりオフラインで合成したボケ画像。(b) 本研究で用いた方法によりオンラインで合成したボケ画像。

験では、図 13 のように、運動視差だけでは 2 つのオブジェクトの奥行き配置が分かりづらいシーンを 10 種類用意した。そして、被験者に、まず、全てのシーンに対して運動視差を再現した場合のみで、どちらのオブジェクトが手前にあるかを理由とともに答えてもらう。次に、運動視差と同時に焦点調節を再現した場合で、同じ質問をする。実験結果は、各シー



図 12 ボケ画像の比較実験に用いた提示画像。(a) 葛飾北斎：富嶽三十六景 神奈川沖浪裏。(b) A. Wyeth : Cristina's World.

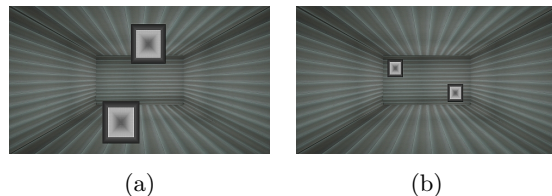


図 13 奥行き知覚向上調査に用いた提示画像。(a) シーン 5 (b) シーン 8

ンに対して被験者ごとの正答率をまとめ、運動視差と焦点調節を同時に再現することで、奥行き知覚はそれがない場合に比べ、補強され得るのか調査する。

5.2.2 実験結果

表 1 に、実験の結果をまとめる。実験は被験者 10 人に対して行い、どちらのオブジェクトがより手前に感じるか判断してもらった段階で、次のシーンに切り替えて実験を行った。また、どちらが手前か判断できなかったときは、間違いとして扱うものとした。

結果を見ると、シーンによっては運動視差と同時に焦点調節を再現することで正答率が向上する場合があるようだが、それとは反対に正答率が下がるシーンも存在する。被験者によれば、焦点調節の際、頭部位置の移動に伴い視線の計測を外す瞬間があり、それが画像に反映され、シーンに集中できなかったという。本実験で用いた視線計測装置は、被験者の頭部位置が大きく移動する、といった状況に対応する仕様にはなっていない。被験者は、視線の計測を外したときの画面の切り替えによる不快感をなくそうと、無意識のうちに運動視差を制限してしまっていた。これが正答率の低下につながったのではと考えられる。また、9 番のようなシーンでは、仮想的に被験者からオブジェクトまでの距離が遠く、ボケによる違いが分かりづらいといったことも考えられる。1 番、8 番、10 番のシーンはそれとは逆に、仮

表 1 ボケによる奥行き知覚向上効果

シーン番号	運動視差正答率 [%]	運動視差 + 焦点調節正答率 [%]
1	80	90
2	100	90
3	90	90
4	100	100
5	100	100
6	100	90
7	100	100
8	80	100
9	80	60
10	80	90

想的に被験者からオブジェクトまでの距離が近い場合、正答率の向上につながったと考える。

6. おわりに

本研究では、石澤の研究を踏まえ、通常の映像ディスプレイに、焦点調節、運動視差を同時に再現することで、奥行き知覚の相乗効果をねらい、より豊かな 3 次元的空間情報を提示することを目標とした。構築したシステムは、ディスプレイ上に表示されたシーンの映像を見る人が注視する点において、焦点を合わせたシーンの画像をディスプレイ上に提示しつつ、その頭部を追跡することで運動視差を同時に再現する。論文では、運動視差と焦点調節を同時に再現することで、シーンの奥行き知覚を強化することができるか、実験を行い結果を示した。それによると、視線計測装置と運動視差の融合という面で課題を残しつつも、仮想的に被験者の近くにあるような物体に対しては、奥行き知覚は補強される可能性があると考えられる。

今後はヘッドマウント型の視線計測装置を使用するなど、いかに、焦点調節と運動視差に代表されるような視差を自然な形で融合させるかが課題となる。また、眼の視野周辺に発生するボケと、人の眼の焦点調節や奥行き知覚との関係はよく分かっていないものの、周辺視でのボケが奥行き感や立体感に寄与している可能性は少なくない。没入型の映像ディスプレイを使用することで、このことを調査することも試してみる価値のある研究の方向といえる。

参 考 文 献

- 1) N.A.Dodgson.: Autostereoscopic 3d displays, *Computer*, Vol.38, No.8, pp.31–36 (2005).
- 2) 末永剛, 松本吉央, 小笠原司: 非拘束な運動視差提示 3次元ディスプレイの提案と評価, *ヒューマンインタフェース学会論文誌*, Vol.9, No.1, pp.49–56 (2007).
- 3) G.E.Favalora.: Volumetric 3d displays and application infrastructure, *Computer*, Vol.38, No.8, pp.37–44 (2005).
- 4) 木村哲也, 掛谷英紀, 恵比寿博充: ポリウム表示とステレオ表示を組み合わせた 3D ディスプレイ, *日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会論文集*, pp.219–222 (2006).
- 5) 内海章, Paul Milgram., 宮里勉, 岸野文郎: 画像ボケの奥行き知覚および仮想物体操作に及ぼす影響, *ITE Technical Report*, Vol.19, No.46, pp.1–6 (1995).
- 6) 叶世智士, 阿部清彦, 大山実, 大井尚一: 視線入力制御によるパソコンテレビ鑑賞システム, *IEICE technical report, Welfare Information technology*, Vol.104, No.638, pp.37–42 (2005).
- 7) 柳原圭雄, 濱裕光: 視線制御による画像選択・表示システムに関する研究-頭部断層像表示システムの試作-, *MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY*, Vol.18, No.5, pp.725–733 (2000).
- 8) 石澤昂, 岡谷貴之, 出口光一郎: 被写界深度ボケの提示により奥行き感を強化する注視反応型ディスプレイ, 第 11 回画像の認識・理解シンポジウム, (2008).
- 9) A.P.Pentland.: A new scene for depth of field, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.9, pp.523–531 (1987).
- 10) G.Mather.: Image blur as a pictorial depth cue, *Proceedings of Biological Sciences*, Vol.263, No.1367, pp.169–172 (1996).
- 11) G.Mather.: The use of image blur as a pictorial depth cue, *Perception*, Vol.26, pp.1147–1158 (1997).
- 12) G.Mather. and D.R.R.Smith.: Blur discrimination and its relation to blur-mediated depth perception, *Perception*, Vol.31, pp.1211–1219 (2002).
- 13) V.A.Nguyen., I.P.Howard., and R.S.Allison.: Detection of the depth order of defocused images, *Vision Research*, Vol.45, pp.1003–1011 (2005).
- 14) K.J.Ciuffreda.: Accommodation and its anomalies. In W.N.Charman, editor, *Visual Optics and Instrumentation*, pp.231–279, Macmillan Press, London, UK, (1991).
- 15) K.J.Ciuffreda.: Accommodation, the pupil and presbyopia, In W.Benjamin, *Borish's Clinical Refraction*, pp.77–120, W.B.Saunders Co., Philadelphia, PA, (1998).
- 16) K.Fisher. and K.J.Ciuffreda.: Accommodation and apparent distance, *Perception*, Vol.17, pp.609–621 (1988).
- 17) G.Mather. and D.R.R.Smith.: Depth cue integration: stereopsis and image blur, *Vision Research*, Vol.40, No.25, pp.3501–3506 (2000).
- 18) 株式会社 ナックイメージテクノロジー: eyemark 用語解説 瞳孔 / 角膜反射方式, <http://www.eyemark.jp/tips/wording/explanation01.html>.
- 19) 大山正, 今井省吾, 和気典二: 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック, 株式会社誠信書房 (1994).