

修士論文

拡張現実感を用いた 輝度調節による視線誘導

藤原 徹平

2019 年 1 月 31 日

奈良先端科学技術大学院大学
情報科学研究科 情報科学専攻

本論文は奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科に
修士(工学) 授与の要件として提出した修士論文である.

藤原 徹平

審査委員：

加藤 博一 教授 (主指導教員)

清川 清 教授 (副指導教員)

Alexander Plopski 助教 (副指導教員)

拡張現実感を用いた 輝度調節による視線誘導

藤原 徹平

内容梗概

人間が周囲の環境を把握する上で、視覚による情報は非常に重要である。その中でも特に重要な情報を効率的に認識するために、人間には周囲に比べて特徴がある場所を無意識に知覚する特性が存在する。この特性を利用し、ある特定の対象物を周囲に比べて特徴的にする事により、意図的に注視を誘導する事が可能である。このような技術は高速に対象物への認知を促すべきタスクへの活用が期待でき、自動車や航空機の運転、習熟が必要な作業のサポートに効果が期待できる。また、既存研究より、コントラストを人工的に作り出す事で特定の物体の発見を促す事が示されている。しかし、この人工的なコントラストをユーザの視界に直接作り出すような技術については具体的な検証が行われていない。

そこで本研究では、ユーザの視覚機能や認知機能をサポートし視界内の対象物のコントラストを調節する技術の確立と検証を行うために、ユーザの視界に直接人工的なコントラストを与えるようなシステムの開発を行う。透過型液晶ディスプレイ及び凸レンズ群を用いた光学系を作成し、対象となる領域以外の明るさを抑制する事により対象となる領域を相対的に明るくする。その結果、ユーザが本システム越しに外界を観察する際に特定の領域に人工的なコントラストを与える事が実現できる。上記のデバイスを実装し、視野角や視界の鮮明さ等のシステム挙動について検証した。さらに、本研究ではユーザに物体の発見を促すために必要なコントラストの比を実験にて実証し、その結果をもとに透過型液晶ディスプレイの適切な画素値を導出した。

以上の試作システムの有効性を検証するために，ユーザに視界内の物体をなるべく早く発見するタスクを課す実験を行った．その結果，システムが特定領域を強調している場合に，物体の発見時間がおよそ27%短縮され，統計的にも有意である事を確認した．

キーワード

拡張現実感，視線誘導，コントラスト，光学設計

Pre-Attentive Contrast Cues

By Augmented Reality

Teppei Fujiwara

Abstract

Visual information is important for human beings to grasp the surrounding environment. To efficiently recognize important information, we unconsciously perceive salient features of our surroundings. It is then possible to direct attention of a user by intentionally making salient features stand out in the scene. We utilize this tendency to build a task support system that can help the user in recognizing objects faster (e.g., driving and learning of automobiles and aircrafts). According to previous research, artificially increasing contrast makes the object of interest stand out more. However, no concrete verification has been made on techniques for directly producing this artificial contrast on real objects in real time.

This research presents a method to support the user's visual and cognitive functions by varying the contrast of objects in the user's field of view. To realize this, we construct a system that modifies contrast of the user's view by using a liquid crystal display (LCD) and four convex lenses. The LCD is used to create masks that slightly suppresses brightness of unwanted areas, thus increasing overall contrast. This new artificial contrast can be observed by the user while viewing the outside world through this system. This study describes the optical behavior of the system such as viewing angle and visibility sharpness, as well as verifying the contrast ratio required for the user to experience a just-noticeable difference. To verify the effectiveness of this system, we conducted experiments to measure the time it takes for a user to find an object of interest. The result of this user study confirms our hypothesis that it takes less time to find the object of interest when contrast is

applied, as to no modification is made.

Keywords:

Augmented Reality, Gaze Guidance, Contrast Cue, Optical Design

目次

1. 序論	1
1.1. 背景	1
1.2. 本研究の目的	4
1.3. 本論文の構成	4
2. 関連研究及び本研究の位置づけ	5
2.1. 視覚機能の拡張	5
2.2. コントラストの強調に関する研究	9
2.3. 類似の映像提示技術	1 1
2.4. 本研究の位置づけ	1 4
3. テーブルトップ型輝度調節システムの開発	1 5
3.1. 提案システム概要	1 5
3.2. システム構成	1 6
3.3. 処理プロセス	1 8
3.4. システムの実装と挙動の検証	1 9
3.4.1. 機器構成デバイスの詳細	1 9
3.4.2. 光学レイアウト	2 1
3.4.3. 視認性と視野角のトレードオフ	2 4
3.4.4. システムの視認性と領域選択性のトレードオフ	2 6
3.5. 使用パラメータの検証	2 8
3.5.1. 予備実験	2 8
3.5.2. ウェーバー・フェヒナーの法則	3 3
4. 試作システムの実証実験	3 6
4.1. 実験 1	3 6
4.1.1. 実験概要	3 6
4.1.2. 実験結果	3 9
4.1.3. 実験結果の詳細と考察	4 2
4.2. 実験 2	4 3
4.2.1. 実験概要	4 3
4.2.2. 実験結果	4 5

4.2.3. 実験結果の詳細と考察	4 6
5. おわりに	4 7
5.1. 結論	4 7
5.2. 今後の展望	4 8
謝辞	4 9
参考文献	5 0

図目次

図 1	(左) 画像中の 1 から 8 に該当する領域にランダムに「+」マークが表示される. その際に対象と背景のコントラストを向上させるようなエフェクトが表示される. (右) その結果, 強いコントラストを示した場合に対象の発見時間が短縮された. [9]	3
図 2	拡張現実感を用いたカーナビゲーションシステムの例[11].	5
図 3	AdaptiVisor による映像提示例, 左側はシステム不使用時・右側はシステム利用時(b). 明るすぎる場所が暗く, 暗い場所が明るく変化している. [13].	7
図 4	(上) 提案システムの概要図及び (下) 使用例. 下図では手前右にあるぬいぐるみだけがぼやけており, 残りのぬいぐるみには全て焦点があっている [14].	8
図 5	映像を微小に変化させる一例. (a)が加工前, (b)が加工後である. (c)及び(d)で示す領域のみ微小に変化している [17].	10
図 6	ELMO における光学レイアウトの概要図[19].	12
図 7	(a)提案システム及び(b)システムの使用例 (左がシステム不使用時, 右がシステム使用時). 右ではチェスの駒 (ルーク) が強調されている [20].	13
図 8	提案システムの構成	15
図 9	(左) システム非利用時及び (右) システム利用時の視界の違い	15
図 10	提案システムによる視界の倒立及び正立	16
図 11	試作システムの外観	19
図 12	凸レンズ及び透明ディスプレイの距離	21
図 13	試作システム全体についての光学素子のレイアウト	22
図 14	凸レンズの焦点距離と視野角の関係性. (上) 焦点距離が長いレンズを使用した場合及び (下) 焦点距離が見時間レンズを使用した場合	24
図 15	焦点距離 100[mm]のレンズを使用した際の視野(a), 及び焦点距離 50[mm]のレンズを使用した際の視野(b).	25
図 16	(左) 図 13 の通り構築したシステム越しに観察した現実世界及び (右) その拡大	26
図 17	(a)透明ディスプレイをレンズの焦点上に配置した場合と, (b)図 13 のレイアウトから凸レンズ 1 寄りに 5[mm]移動させて配置した場合	27

図 18	予備実験で表示される画面	2 9
図 19	予備実験で使用したコントラストのパターン	3 0
図 20	被験者全員の実験結果	3 1
図 21	被験者 A の実験結果	3 1
図 22	被験者 B の実験結果	3 1
図 23	被験者 C の実験結果	3 2
図 24	被験者 D の実験結果	3 2
図 25	被験者 E の実験結果	3 2
図 26	ウェーバー・フェヒナーの法則を用いた適切な輝度値の計算	3 4
図 27	透明ディスプレイの画素値と透過率の関係	3 5
図 28	実験で使用した試作システムの概要	3 7
図 29	構築した実験環境（実験は暗室環境で実施）	3 8
図 30	ディスプレイに表示する映像．（左）インストラクション，（中央）表示される数字，（右）透明ディスプレイに表示されるマスク	3 8
図 31	透明ディスプレイの背景に該当する画素値が（左）255 の場合，（中央）144 の場合，（右）140 の場合の試作システム越しの視界	3 8
図 32	被験者全員を総合した実験結果	3 9
図 33	被験者 A の実験結果	3 9
図 34	被験者 B の実験結果	4 0
図 35	被験者 C の実験結果	4 0
図 36	被験者 D の実験結果	4 0
図 37	被験者 E の実験結果	4 1
図 38	被験者 F の実験結果	4 1
図 39	(a)ディスプレイに表示させた画像及び(b)透明ディスプレイに表示させるマスキング画像，(c)試作システム越しに観察した際の視界．（左）ボール，（中央）文房具，（右）フルーツの 3 種類の映像を観察させる．	4 4

1. 序論

この序論では，1.1 節で視覚機能の拡張に関する背景について述べる．1.2 節では，背景に基づいた当研究の目的を示す．1.3 節では本論文の構成について述べる．

1.1. 背景

我々が生きていく中で，見るという行為が果たす役割は非常に大きい．人間が周囲の環境を認知する時，聴覚や嗅覚の情報よりも先に，目から入った情報を基に判断する事が多い．1972 年に出版された産業教育機器システム便覧[1]によると，五感におけるそれぞれの知覚の割合が「味覚 1.0%，触覚 1.5%，臭覚 3.5%，聴覚 11.0%，視覚 83.0%」となっており，視覚機能の優位性が確認されている．しかし，私たちが何かに対して視覚的注意を払う時，その領域は非常に限られたものである[2][3]．そのため，網膜を通じて視覚情報を受けとるだけの並列処理に加えて，視界内の映像を小領域に分解して順々に認識する逐次処理を行っていると考えられている[4]．

一方で，我々がものを見る際に，周囲に比べて特徴がある場所をより注意深く見る傾向がある．人間は網膜に入った映像情報を単純に受け取るのではなく，脳によって複数の処理を重ね，より重要な個所を選択的に意識している，という事が分かっている．Healey ら[5]は，どのような違いが視覚的な注目を集めるかについて，さまざまな種類を示している．「大きさが異なる」，「色が異なる」，「移動方向が異なる」など特異足りうる特徴は様々であるが，いずれの場合も観察者は対象についてより詳細に情報を集めようとする．

近年，人間が持つ身体能力を増幅・補強するような身体拡張と呼ばれると試みが行われている．例えば，つま先に取り付けられた圧力センサを介して手に取り付けられた人工の指を操作できる The Third Thumb[6]や，脳からの刺激によって操作でき，3 本目の腕として使用できるロボットアーム[7]，人間の筋力をサポートし増幅させるようなパワードスーツ[8]などが挙げられる．また，人間の身体機能だけでなく知覚機能を拡張・補強する事も可能である．例えば，視覚や聴覚

を補助する手段としての、眼鏡や補聴器などが挙げられる。さらに現在では、拡張現実感や複合現実感の技術と融合させ、本来知覚できないようなものや場所についても擬似的に知覚する事ができるようになっている。例えば、自身の体そのものを拡張し、全く異なる場所の視覚情報や感覚情報を取得できるようなテレインテグレーションと呼ばれる技術などが挙げられる。このように身体拡張を用いる事で、先に述べた人間がものを見る能力をさらに向上させられるのではないかと考える。

ところで、ユーザに映像を提示するディスプレイの技術は大きく進歩し、高解像度な映像をより高いフレームレートで提示できるようになった。それに伴い、ユーザの視界に高画質な視覚映像を提示する技術が普及した。例えば、ユーザに人工的な空間を見せる事ができる仮想現実感や、ユーザの視界にコンピュータグラフィックスなどデジタル映像を現実世界に重ねて表示する拡張現実感などが挙げられる。

従来の拡張現実感とは、ガイダンスやナビゲーションのための情報提示・エンタテインメントなどへの利用が主流であり、それに関連する研究が数多く存在している。しかし、拡張現実感の技術を、先に述べた視覚機能についての知見と組み合わせる事で、視覚機能の拡張に利用できると考えられる。

Lu ら[9]は、図 1 左のような画像中の 1 から 8 の領域内にランダムに出現する十字マーク(+)をなるべく早く発見するような実験を行った。その際、対象となる十字マークの周囲に薄く白いエフェクトを追加し、周囲とのコントラストを強調した。その結果、コントラストが大きくなればなるほど、被験者が対象マークを発見するまでにかかった時間が有意に小さくなった事が確認されている。このように、人工的にコントラストを作り出す事で対象となる物体の発見を促す事が可能であると示されている。

以上の知見より、拡張現実感を活用しユーザの視界に人工的なコントラストを作り出す事で、対象となる物体の発見を促す事ができると考えられる。拡張現実感を提示するディスプレイによって特定の領域にエフェクトを加える事により、その領域のみ明るさを変更させる事ができるため、結果として対象領域とのコントラスト比を大きくする事が可能となる。

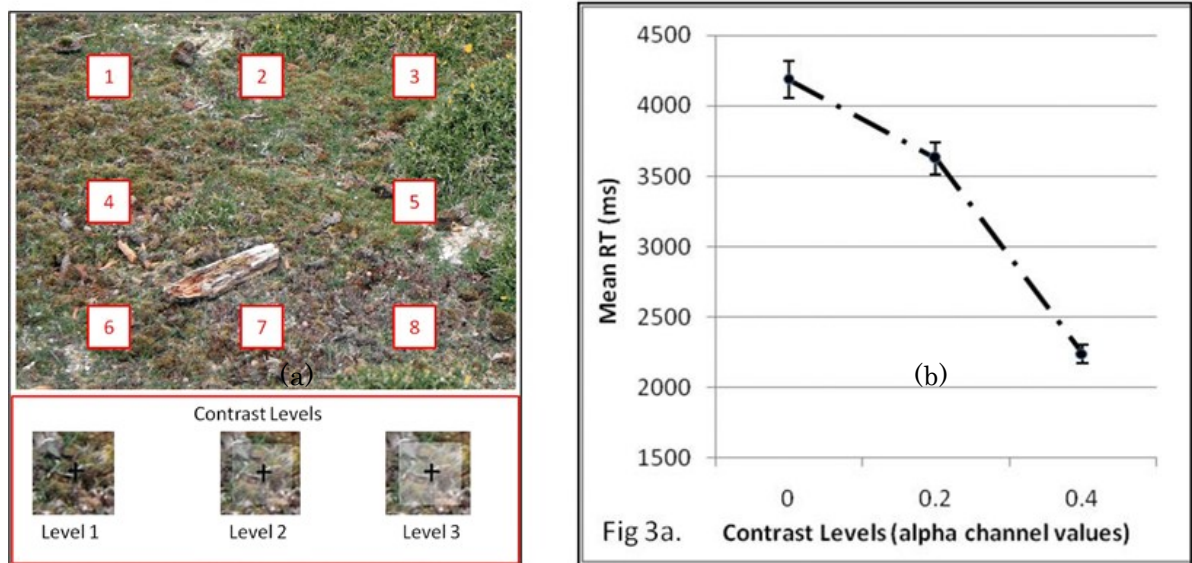


図 1 (左) 画像中の 1 から 8 に該当する領域にランダムに「+」マークが表示される．その際に対象と背景のコントラストを向上させるようなエフェクトが表示される．(右) その結果，強いコントラストを示した場合に対象の発見時間が短縮された[9]．

このような技術は，無意識的に注視を誘導するという点で活用が可能であり，操作が複雑なタスクの支援や教育のための活用が期待される．例えば，常に注視すべき位置が変化する車の運転中に，今どこを見ると重要な情報を得られるかをリアルタイムに伝える事ができる．これにより，視覚的な不注意がもたらす高齢ドライバーの事故[10]や，操作ミスを軽減する事が期待される．また，操作順序や工程が複雑なタスクについても，今どのような操作をすれば良いのかを提示するための手法としても有用である．さらに，このような微小な違いによって無意識に働きかけるようなシステムは，サブリミナル効果を引き起こすという意味で広告媒体としての利用の可能性も考えられる．

1.2. 本研究の目的

前項では，ユーザの視界のコントラストを直接調節し注視を誘導する事の重要性について述べた．本研究の最終的な目的は，ユーザの視覚機能や認知機能を支援するために，視界内の対象物のコントラストを調節する技術を確立し，その検証を行う事である．まず，技術を確立するために，本研究では液晶パネルを用いて部分的に明度を調節する光学系の設計に着目する．具体的には，透過型液晶ディスプレイ(以降透明ディスプレイ)を2枚の凸レンズ間に挟み込む構造にする事で，視認性を向上させるようなシステムを提案する．また，提案手法に基づいて試作したシステムについて，具体的な光学系のレイアウト及びディスプレイの画素値の設定方法について述べる．さらに，試作システムを用いて対象とした物体や領域の視認を促す事を検証するための評価実験について述べる．

また，本研究は最終的なウェアラブルでの実装と実用化のための実証研究である．コンビニエンスストア利用時の広告媒体としての利用や，自動車を運転中のドライバの支援のためのシステムを，本研究を踏まえたプロジェクトの最終的な実装目標とする．本研究で確立と検証を目指す技術は以下の通りである．

技術の確立

- 液晶パネルを用いて，部分的にコントラストを調節する光学系の設計
- 卓上型システムの試作
- 必要な透過率の検討

技術の検証

- 対象とした物体をユーザが見つかるまでの時間短縮の実現
- 技術的課題の評価

1.3. 本論文の構成

以降，2章にて関連する研究について説明し，本研究の位置づけについて述べる．3章では，筆者が本研究のために開発したシステムについて述べる．また，開発の際に考慮した具体的なパラメータの設定についても述べる．4章では，試作システムの有効性を検証するために実施した評価実験について，その手法，結果，考察を述べる，最後に5章で，本研究のまとめと今後の課題について述べる．

2. 関連研究及び本研究の位置づけ

2.1. 視覚機能の拡張

本研究では、システムを用いて人間が特定の物体を発見する事を支援する事を目的としている。本項では、本研究と同様に人間の視る機能を拡張し表現する研究について述べる。視覚機能の拡張については、主に 2 種類の方向性が存在する。

一つは、本来人間の目が持っていない機能を擬似的に与えるものである。一般的に視覚拡張を実現する手段の一つとして拡張現実感の技術が用いられる。例えば、澤野ら[11]が提案している拡張現実感のカーナビゲーションへの応用が挙げられる。図 2 のようにナビゲーション情報を、拡張現実感を用いて運転手の視界に重ねて表現する事により、ルートや速度等の情報を視線の移動を抑えつつ取得する事が期待できる。ヘッドアップディスプレイを用いる事でも過度な視線移動を軽減する事ができる[12]が、より実際の環境に基づいたインタラクティブな情報提示を行う際には、拡張現実感を用いる方が適している。このように、ユーザが本来視覚のみでは得られない情報をシステムによって表現するような手法が存在する。情報提示の手段として、拡張現実感の技術を活用した研究が多い。

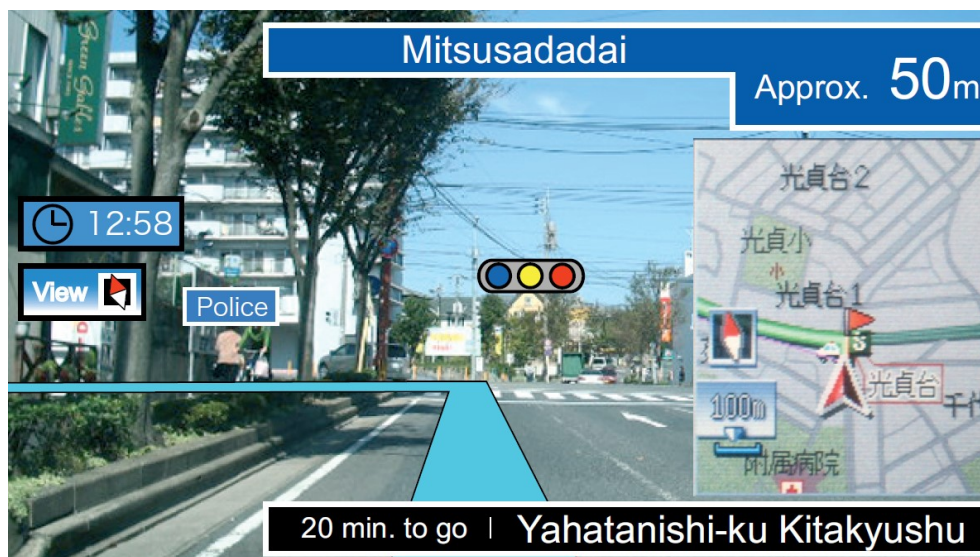


図 2 拡張現実感を用いたカーナビゲーションシステムの例[11].

二つ目は、人間が元来持っている視覚的機能を支援・増幅するものである。本研究は、人間が視界中にある特定の物体を認識するという基本的な機能の支援を目的としているためこちらに該当する。伊藤ら[13]は、人間の視覚機能を拡張するヘッドマウントディスプレイとして **AdaptiVisor** を提案している。人間の目は、周辺の環境の明るさが変化した際に、それに合わせて瞳孔括約筋と瞳孔散大筋が瞳孔径を変化させ、適切な光量が目に到達するように機能する。この人間の目が持つ明暗順応の機能をシステムによって拡張しようというのが、当研究の試みである。人間の目が無意識に明暗順応の機能を働かせるよりも早く、周辺の明るさの変化をカメラキャプチャによって計測し、ディスプレイにより明るさの変化を緩やかにする事で、ユーザの目にかかる負担を軽減する事ができる。システム非使用時及びシステム使用時のユーザの視界を図 3 に示す。システム非使用時は、図中 **OE** で示されている箇所が過度に明るくなっている一方、**UE** で示される箇所がオブジェクトの影響で暗くなっている。その結果、ユーザは適切な視認が困難になっている。しかし、このシステムを使用する事で、図 3 右のように視界全体の明るさの違いを抑制するように調節される。そのため、ユーザは環境の視認が容易となっている事が確認できる。

当研究についてはユーザの視覚機能を支援するという意味で本研究の動機と合致する。しかし、当研究が利用者の明暗順応機能を支援するものである一方、本研究は一定レベルの明るさが保持された環境における特定の物を見つけ出す支援をするものであり、目的やそれを実現するための手法が異なる。

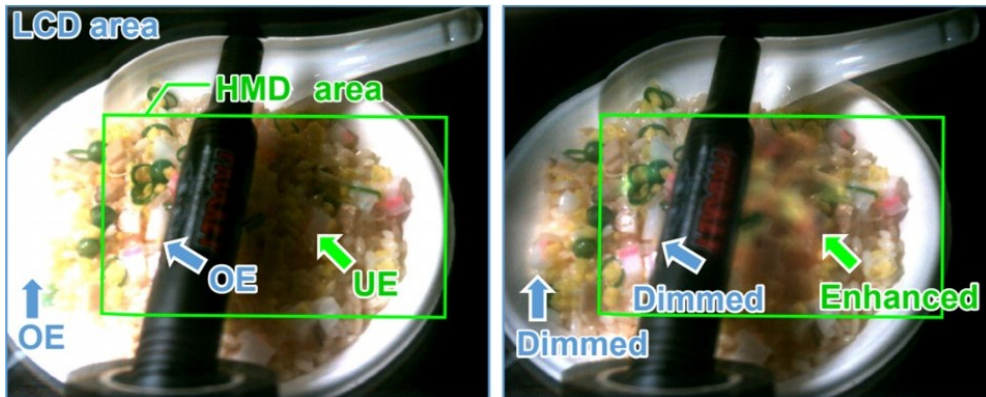


図 3 AdaptiVisor による映像提示例，左側はシステム不使用時・右側はシステム利用時(b)．明るすぎる場所が暗く，暗い場所が明るく変化している [13]．

また，類似の研究として上田ら[14]が提案している高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いた手法が挙げられる．当システムは，特定の物体への注視を促すために，見てほしい対象以外をぼかす事ができる．図 4 のように，異なる距離に存在する視界内の複数の物体に，プロジェクタは図中の t 軸に沿って一つずつ高速に投影を行う．ユーザは，焦点距離を電気信号によってリアルタイムに制御する事が可能な可変焦点レンズ越しに物体を観察する．プロジェクタがユーザに見てほしい対象物に投影している場合のみ，可変焦点レンズの焦点が対象の物体に合うように設定する．一方でプロジェクタが対象物以外の物体に投影をしている際には，可変焦点レンズは対象がぼけるように焦点距離を設定する．この処理が高速に繰り返される事で，人間がレンズ越しに物体を観察した際には，特定の物体にのみ焦点があった状態となり，図 4 のように注視を促す事ができる．

このシステムは，一度のプロジェクションで複数の距離に存在する物体に焦点を合わせる事が可能となるため，人間の目の被写界深度を拡張できるという大きなメリットが存在する．その結果として，ユーザが見つけたいと思った物を発見できる可能性やその速度の向上が期待できる．しかし，可変焦点レンズのフォーカスによって領域の鮮明さを制御しているため，同じ距離に複数の物体が存在しその一つのみを強調したいという場合には，対応できない．

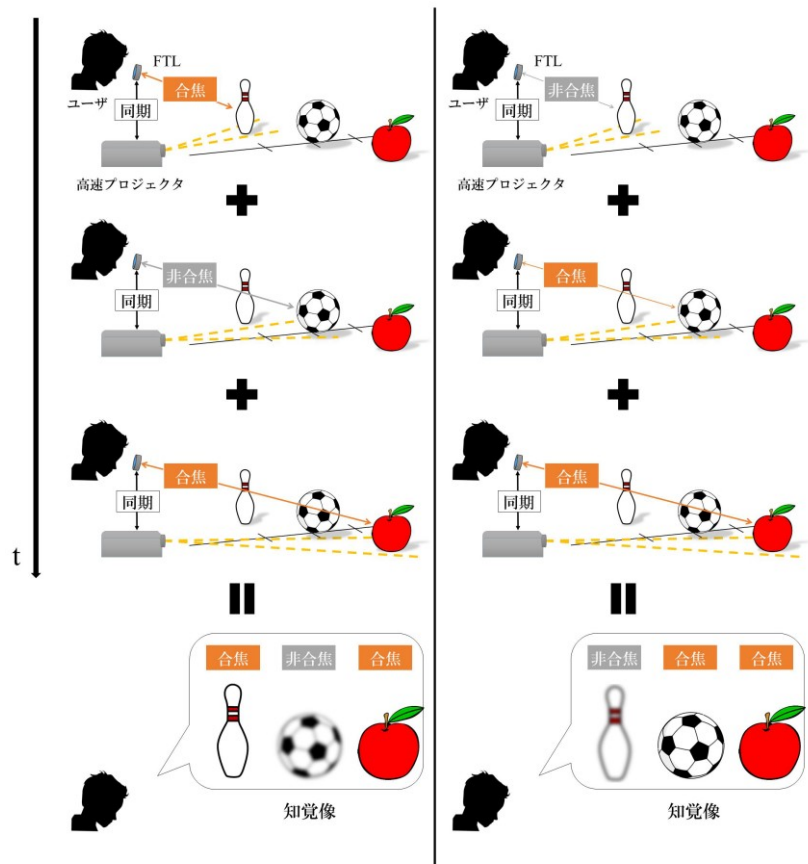


図 4 (上) 提案システムの概要図及び (下) 使用例. 下図では手前右にあるぬいぐるみだけがぼやけており, 残りのぬいぐるみには全て焦点があっている [14].

2.2. コントラストの強調に関する研究

一般的に拡張現実感によって特定の領域や物体への注視を促す場合、矢印や吹き出しなどのオブジェクトをユーザの視界に重畳して表現する手法がとられる[15][16]。しかし、場合によってはこのようなエフェクトやオブジェクトを追加する事が適切ではない場合がある。例えば、前項で述べたようなカーナビゲーションシステムを考える。ユーザの視界に大量の情報を表示してしまう事により現実世界の視認性が低下し、提示オブジェクトの後ろに隠れてしまった歩行者などを見落とす可能性が上がってしまう。そのため、ユーザの視界を極力隠さずに特定の物体や領域に注視を促す必要がある。

そこで考えられるのが、対象領域を周辺より特徴的にする事でユーザの意識を自然と誘導しようという試みである。実際に、明るさやコントラストを変更する事で利用者に注視を促す手法が複数の研究によって提案されている。

Veasら[17]は、拡張現実感の技術を用いる際にユーザが知覚できないくらい小さい変化を視覚に与える事で、ユーザに変化領域への注視を促し、その領域について想起しやすくなる事を示している。図5は実際に実験に用いられた画像である。図5(a)及び(b)は、それぞれ加工前と加工後の画像を示している。一見全く同じに見えるが、図5(c)及び(d)で示す領域のみ微細な変化を加えている。これらの映像を被験者に観察させたところ、視線を対象の領域に移動させ固定した被験者の人数が顕著に増加したと報告されている。さらに、このような映像に微細な変化を与える事で、その領域を思い出しやすくなるという事も当研究で述べられている。

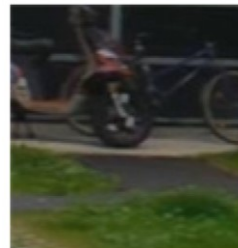
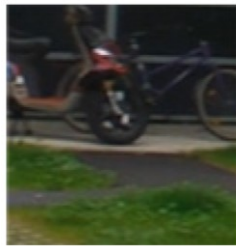
このように、視覚情報を微細に変化させる事による影響の大きさを確認できた。しかし、当研究ではあくまで人間の視覚機能の性質の一つを明らかにしたものであり、その性質をどのように利用するかという点までは言及されていない。本研究では、この知見を用いて、上記の認知機能をシステムにより誘発させる事を目的としている。



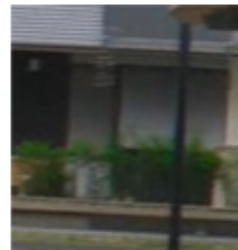
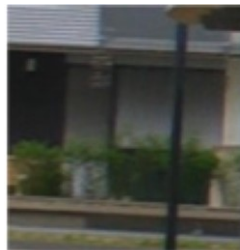
(a)



(b)



(c)



(d)

図 5 映像を微小に変化させる一例．(a)が加工前，(b)が加工後である．(c)及び (d)で示す領域のみ微小に変化している [17]．

2.3. 類似の映像提示技術

前項で述べたような，ユーザの視界に直接エフェクトを加えるためには，どのような技術が必要となるかについて検討する．拡張現実感の技術で使用されているディスプレイ技術が，本研究でも同様に活用できると考える．

一般的に，視覚に影響を与える拡張現実感を実現するための技術として，主に二つの手法が存在する．一つ目は，いわゆるビデオシースルーと呼ばれる方式である．ユーザが見ている世界をカメラ等によって計測する．そのカメラ映像に追加したいコンピュータグラフィックスを重ねた映像をディスプレイ面に提示する．視界映像と CG の合成が容易である一方，一度カメラに撮影した映像を表示する必要がある．二つ目は，オプティカルシースルーと呼ばれる方式であり，Microsoft 社の Microsoft HoloLens[18]などに採用されている方式である．視界をより現実に近い状態に保つ事ができる一方，CG を重畳表示する際のオクルージョンの問題が発生する可能性が高い．本研究での使用を考慮するあたり，それぞれの方式の利点と欠点を以下の表 1 に示す．

表 1 二種類の映像提示手法の比較

	利点	欠点
ビデオ シースルー	視界とオブジェクトの位置 合わせが容易 コンテンツの自由度が高い	現実環境の視認性が損なわれる
オプティカル シースルー	現実環境の視認性が高い 遅延が少ない	現実環境とオブジェクトの位置 合わせが困難 現実環境とオブジェクトの前後 関係を表現する事が困難

本研究では，現実環境に存在する領域や物体に対する強調を行うため，視界の視認性が高い事が要求される．さらに，対象を強調するためのエフェクトの背後も視認できる必要がある為，オクルージョンの問題を考慮する必要がない．．そのため，オプティカルシースルー型の開発を想定したシステムを構築する．

次に、拡張現実感を実現するためのオプティカルシースルー型のディスプレイの一例について述べる．清川ら[19]は、拡張現実感におけるオクルージョンの問題を解決する手法として ELMO を提案している．当システムでは図 6 のように、CG 画像をユーザに提示するとともに、液晶ディスプレイパネル（以降 LCD）を用いて CG が表示される領域の背景を完全に遮断する．これにより、CG と実環境の前後関係を考慮した映像提示を実現している．本研究で着目するのはシステムの機構についてであり、2 枚の凸レンズで LCD を挟み込む方式を採用している．LCD とそれぞれのレンズの距離はその焦点距離に該当し、ディスプレイ面で平行光が丁度収束するよう設計されている．これにより、ディスプレイを通して見る事で発生する視界の歪みを軽減する事ができる．

本研究ではこの機構を応用し、新しい利用法を考える．当研究では、特定の領域からの光を遮断するために LCD を使用しているため、光を完全に透過させるか完全に遮断させるかのいずれかである．しかし、本研究ではマスクを用いて視界を半透過させた際の挙動について検証する．この点が本研究の技術的な貢献の一つとなる．

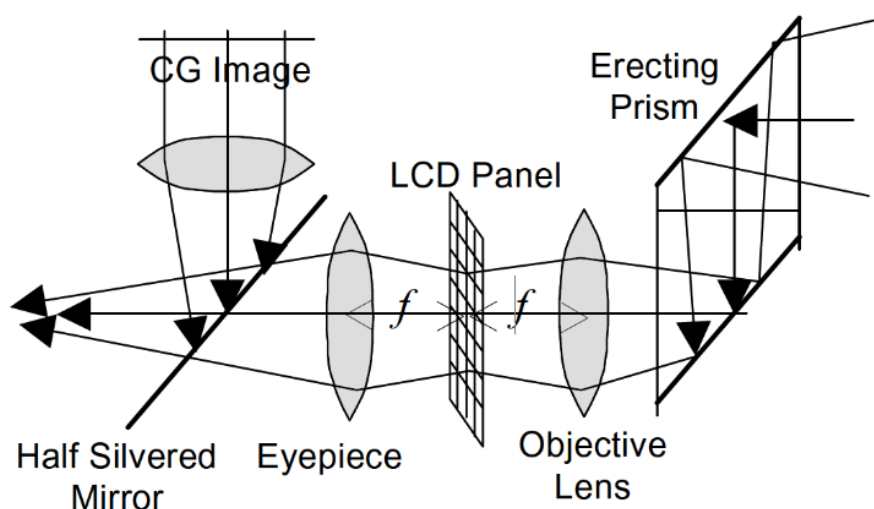
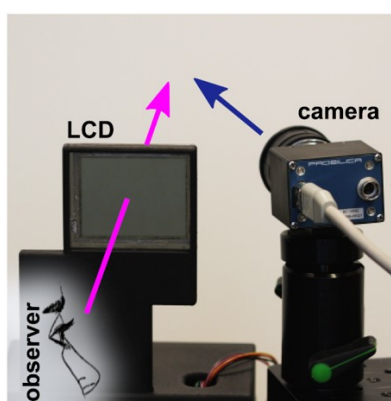


図 6 ELMO における光学レイアウトの概要図[19].

また、Wetzstein ら[20]は、図 7 で示すように、ユーザの視界を変化させるために LCD を直接ユーザの視界に配置するようなシステムについて提案している。カメラによってユーザがディスプレイ越しに観察する映像情報を取得し、位置合わせの計算を行ったうえでディスプレイにマスク画像を提示する。その結果、図 7 のように特定の物体のみをハイライトする事ができる。この手法では、LCD 越しに現実世界を観察する事による視認性の低下を軽減するために、解像度の低下と引き換えに画素が大きい特殊なディスプレイを用いている。

しかしこの研究では、当手法以外にもシステムの活用方法を検討しているに過ぎず、ハイライトを加える事による直接的なユーザへの影響については検証されていない。



(a)



(b)

図 7 (a)提案システム及び(b)システムの使用例（左がシステム不使用時，右がシステム使用時）。右ではチェスの駒（ルーク）が強調されている[20]。

2.4. 本研究の位置づけ

本研究は、オプティカルシースルー型のヘッドマウントディスプレイに採用される方式を用いて、実世界に存在する物体に対してコントラストの強調を行いその効果を検証するという意味で、初の試みである。研究背景で述べたようなコントラストを作り出す技術は、拡張現実感によって重畳表示されたオブジェクトに対してエフェクトを追加するものであり、背景の一部を強調するものではない。また、視覚機能を拡張する既存研究についても数件述べたが、目的や実現のための手法が異なる。透明ディスプレイを用いて特定の物体をハイライトする手法自体は提案されているが、実際に使用した際の効果についてまでは未検証である。よって本研究では、透過型液晶ディスプレイを用いた光学系を用いてユーザの視界の輝度を調節するシステムを提案し、その効果を検証するための実験を行う。

3. テーブルトップ型輝度調節システムの開発

透明液晶ディスプレイ及び凸レンズを用いた輝度調節システムを提案及び開発する．3.1 節にてシステムの概要及び機能について述べる．次に，3.2 節及び3.3 節では，システムの構成及び処理について述べる．3.4 節では実装したデバイスを基に詳細な光学素子の配置方法について検討する．最後に3.5 節では，透明ディスプレイの具体的なパラメータの設定方法について述べる．

3.1. 提案システム概要

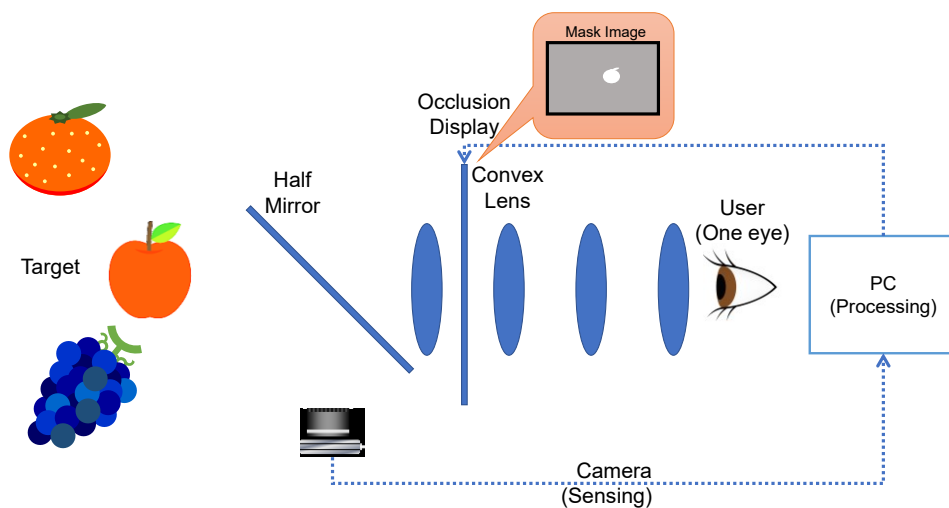


図 8 提案システムの構成

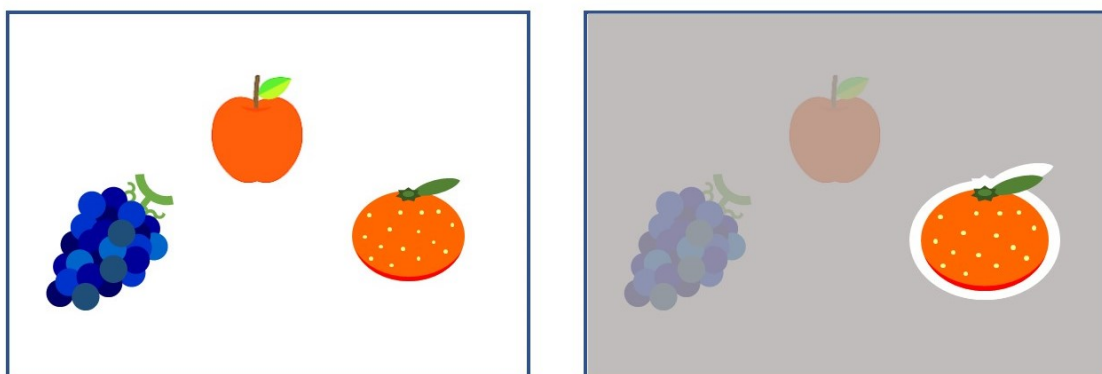


図 9 (左) システム非利用時及び (右) システム利用時の視界の違い

本研究では、透明ディスプレイ及び凸レンズ群の組み合わせにより、視界のコントラストを強調する事でユーザの視線を誘導するシステムを提案する。

当システムの機能を以下に示す。まず、対象となる物体が存在する領域を図 8 中のカメラによって計測し、それがユーザの視界中のどの領域に存在するかを計算する。その後、透明ディスプレイを用いて、対象物体及びその周辺の領域の輝度を調節する事で差異を与える。その結果、図 9 で示すように特定の領域の明るさのみを強調し、強調物体に注視を誘導する事が可能となる。ただし、対象物以外全体を暗くしなければならないため、背景の視認性を維持するためになるべくその明るさを変化させない事が望ましい。最適なコントラストの設定については 3.5 節で述べる。

3.2. システム構成

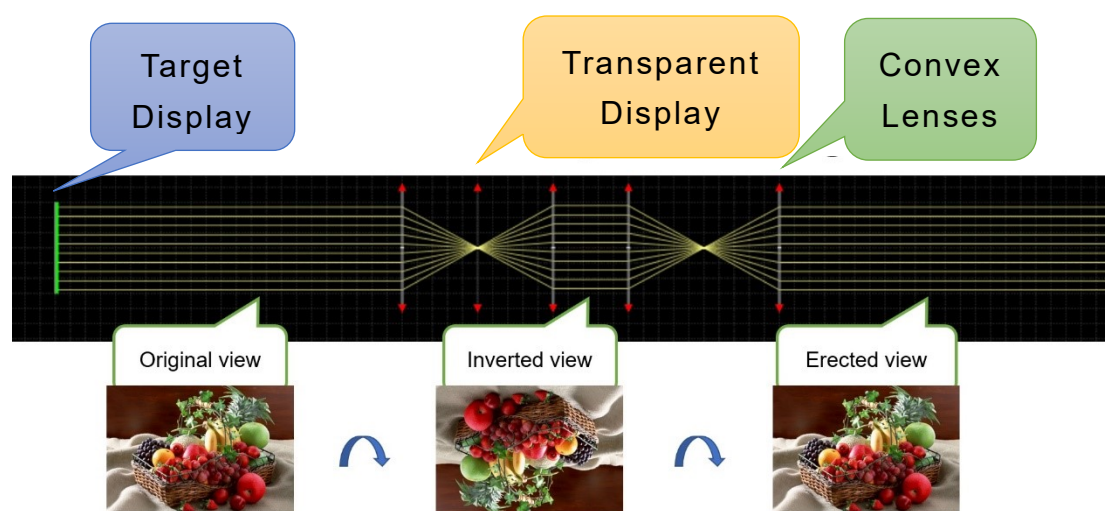


図 10 提案システムによる視界の倒立及び正立

本項では、提案システム内で使用されている光学素子について、それぞれの役割と目的について述べる。まず、図 8 中のハーフミラー及びカメラ、コンピュータは入力部の機能を担っている。ユーザがシステム越しに見ている視界を共有し、対象物体が視界内のどの位置に存在するかを計算する。ハーフミラーを使用せず、ユーザの視線と同じ方向にカメラを設置する事でも同様の計測が可能である。しかし、カメラとユーザの視線を合わせるためにキャリブレーションが必要とな

ってしまう。また、対象物の距離を把握した上でのキャリブレーションが必要となるため、機構が複雑になってしまう。一方でこの方式では、ユーザの視点とカメラが計測する視点が光学的に共役となる位置に存在するため、キャリブレーションの過程を削減しながら精度を向上する事ができる。上記のように配置されたカメラによって計測した視界画像に画像処理を施す事で、対象物体が存在する領域を計測する。計測結果をもとにマスク画像を計算し、最終的に透明ディスプレイに出力する。

次に、図 8 中の左側 2 枚の凸レンズ及びそれらに挟まれる形で配置されている透明ディスプレイは、システムの出力部を担っている。透明ディスプレイは画素を白に設定した際には背後から侵入した光を透過させ、一方で黒に設定した際にはこれらの光を全て遮断する。灰色に設定した際には、侵入光を一定の透過率で透過させる。透過率の詳細については 3.5 節にて説明する。透明ディスプレイ越しに背後を観察すると、白い画素に設定された画素に侵入した光のみがそのまま通過し、灰色に設定された画素を通過する光は輝度が一定量削減されて通過する。そのため、対象領域以外からの光を透明ディスプレイによって抑制する事ができる。結果として、対象領域以外が暗くなるため対象領域を相対的に明るくする事ができ、コントラストを強調する事ができる。しかし、凸レンズ群を使用せずにディスプレイ越しに直接背後を観察した場合、透明ディスプレイと背後の現実環境の距離が大きく異なる。そのため、現実環境に焦点を合わせた際に透明ディスプレイ上のマスクパターンがボケてしまい、視認性が大きく低下してしまう。そのため、本システムではディスプレイを挟むように配置された 2 枚の凸レンズを配置する。レンズとディスプレイの距離はそれぞれのレンズの焦点距離に合うようにする。その結果、図 3-1 中の左端のレンズに侵入した平行光はディスプレイの存在する位置で収束ため、ある無限遠から発せられた光はディスプレイ上の一つのピクセルを通過する。その結果、透明ディスプレイによる視認性の低下を軽減できる。

また、図 8 中の右側のレンズ 2 枚については、ユーザに適切な視界を提示するために映像を正立するために設置されている。透明ディスプレイによる視認性の低下を防ぐために設置した 2 枚の左側の 2 枚の凸レンズによって、視界が倒立してしまう。図 10 のように 2 枚の凸レンズを追加で使用する事で、補正する事ができる。

3.3. 処理プロセス

本項では，提案システムの具体的な処理の過程について述べる．本システムは「入力」「内部処理」「出力」の 3 段階の処理プロセスによって構成されている．まず入力部においては，カメラによって，ユーザの視界画像を取得する．次に内部処理においては，コンピュータによってマスク画像を算出する計算を行う．カメラとユーザの視界の光軸が同じである事に加え，ディスプレイの位置，ユーザの目線，カメラの位置が固定であるため，マスク画像を簡単な計算によって求める事ができる．最後に，計算したマスク画像をディスプレイに表示させる．

3.4. システムの実装と挙動の検証

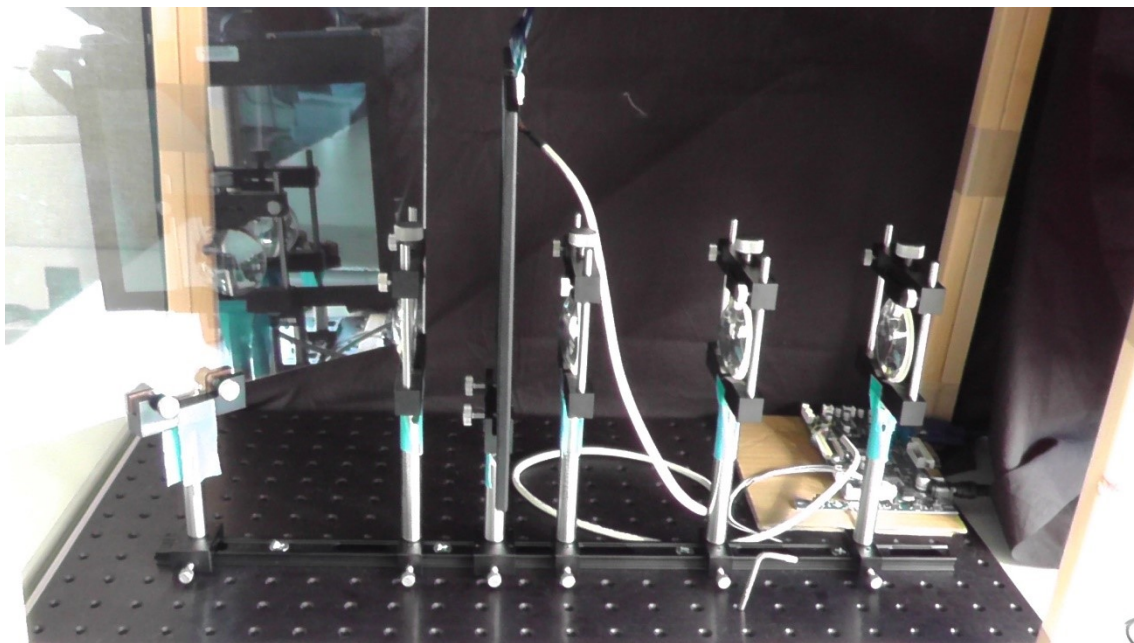


図 11 試作システムの外観

前項で述べたような提案システムを基に，本研究ではテーブルトップ型のシステムを試作した．この試作システムを用いて，実際の挙動や課題について検証を行った．その上で，各光学素子の詳細な配置やディスプレイの画素値の設定方法について述べ，どのようにすれば適切に映像を提示できるかについて説明する．

3.4.1. 機器構成デバイスの詳細

先に述べたように提案システムは視界の明るさを制御する透明ディスプレイ，ユーザの視界を観察するカメラ，これらを制御するための PC，そして光学系を設計するためのハーフミラー及び 4 枚の凸レンズによって構成されている．透明ディスプレイは，MF-403（株式会社 Metasign 製）を用いる．カメラとしては一般的に市販されている Web カメラである Q2F-00014（株式会社 Microsoft 製）を用いる．本システムで使用したハーフミラーは，透過率 60%，反射率 40%である．凸レンズについては株式会社 Edmund Optics 製の平凸レンズを用いる．本

研究で使用する装置の仕様について，表 2～5 に示す．

表 2 透明ディスプレイの主な仕様

製造者及び品名	株式会社メタサイン MF-403
解像度	1024×768
出力形式	HDMI
出力速度	60fps
大きさ	9.7inch

表 3 カメラの主な仕様

製造者及び品名	Microsoft 社 Q2F-00014
最大撮影速度	60fps
解像度	1920×1080

表 4 レンズの主な仕様

製造者及び品名	Edmund Optics 社
直径	50mm
焦点距離	50mm
中心厚	12mm

表 5 PC の主な仕様

OS	Windows10 home edition
CPU	Intel(R) Core™ i5-7Y54 @ 1.20GHz
主記憶	8GB
開発環境	Processing 3.3.5

3.4.2.光学レイアウト

本項では、各光学素子の具体的な配置について考える．まず、透明ディスプレイの配置について検討する．3.2 節では、透明ディスプレイは凸レンズの焦点に配置される必要があると論じた．しかし、この配置は対象物が無限遠に存在する場合に適切な表示が可能となるのであり、システムの近くに存在する物体には適用できない．本来、マスクパターン自体の視距離を対象物体の距離に合致させる必要があり、そのためには透明ディスプレイを光軸方向にリアルタイムで移動する必要がある．しかし、本システムでは最終的なウェアラブル化を視野に入れているため、透明ディスプレイの位置座標を精密に制御する機構を取り入れる事は困難である．以上の理由から簡単のために、透明ディスプレイを固定して配置する場合を考える．

本システムでは特定の距離 d 離れた点に存在する物体に対して強調を行うものと仮定する．この点から発せられた散乱光が焦点距離 f のレンズによって距離 x 離れた点に集光する場合、これらの関係性は以下の式及び図 12 で示される．

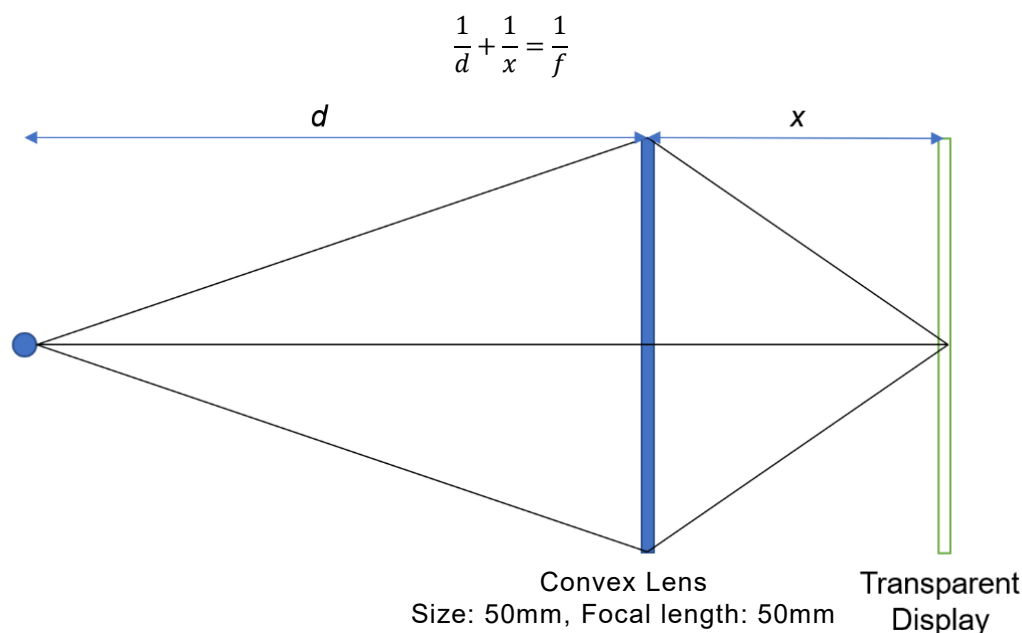


図 12 凸レンズ及び透明ディスプレイの距離

次に透明ディスプレイとその右のレンズに存在するレンズ（図 13 中の凸レンズ 2）との距離について考える．凸レンズ 1 によって収束した光をレンズに 2 によって平行光にする必要がある．そのためには距離をレンズ 2 の焦点距離 f に設定する必要がある．

さらに，凸レンズ 2 及び凸レンズ 3 間の距離について考える．対象の物体に焦点を合わせるという観点では，この距離については任意である．しかしシステムの視野角について考慮すると，レンズ 2 とレンズ 3 の焦点距離の合計に設定する必要があるため，この距離を $2f$ に設定する．

最後に，凸レンズ 3 及び凸レンズ 4 の間の距離について考える．本システムの理想として，システムの使用時と非使用時で対象となる物体の距離感及び倍率を維持する必要がある．そのためには，凸レンズ 4 における虚像面を対象となる物体の位置と一致させる必要がある．つまり，凸レンズ 3 の焦点と凸レンズ 4 の距離を y と置くと，その距離は次の式によって計算できる．

以上のレイアウトは，対象となる物体の想定距離に大きく依存している．そのため，本システムの利用が想定される状況や対象物によって，変更する必要がある．

$$-\frac{1}{d+x+f+2f+f+y}+\frac{1}{y}=\frac{1}{f}$$

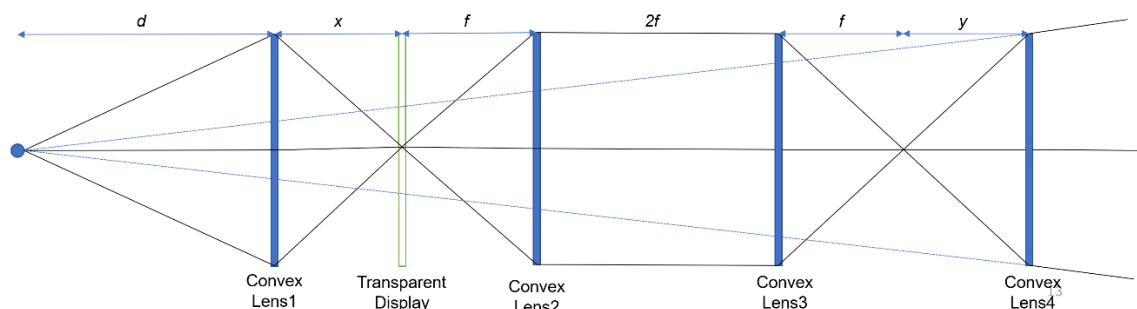


図 13 試作システム全体についての光学素子のレイアウト

本システムでは、500[mm]離れた物体に対してエフェクトを提示するものと仮定する．なぜなら、当システムが将来的にコンビニでの使用を想定しており、利用者が必要な情報を提示している対象物の距離や、対象の商品を手にする際の距離がおよそ 500[mm]に該当すると考えられるからである．また、焦点距離 f は本試作システムでは 50[mm]であるため、 $d = 500$ 及び $f = 50$ を代入する事で、 x 及び、 y は次の計算によって求められる．

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{x} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{500} + \frac{1}{x} = \frac{1}{50}$$

$$x = \frac{500}{9} \approx 55.56$$

$$-\frac{1}{d+x+f+2f+f+y} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$$

$$-\frac{1}{500 + \frac{500}{9} + 50 + 2 \times 50 + 50 + y} + \frac{1}{y} = \frac{1}{50}$$

$$\frac{-y + \left(755\frac{5}{9} + y\right)}{\left(755\frac{5}{9} + y\right)y} = \frac{1}{50}$$

$$y^2 + 755\frac{5}{9}y - 755\frac{5}{9} \times 50 = 0$$

$$y \approx 47.068$$

3.4.3.視認性と視野角のトレードオフ

本試作システムにおける視野角について考える．視野角を拡大する手段として「レンズ径を拡大する」、「光学系を適切に配置する」、「使用するレンズの焦点距離を小さくする」の3種類が存在する．まず，異なる焦点距離の凸レンズを使用する場合，図14のように焦点距離が短い凸レンズを使用すると，視野角は広くなる．しかし，凸レンズの焦点距離が短くなる事により厚みが増してしまい，レンズによって発生する歪が大きくなってしまい．その結果，視界全体が大きく歪んでしまい視認性を損なう．また，レンズ径を拡大する事によってもシステムの視野角を拡大する事が可能である．しかし，焦点距離を変えずにレンズ径が大きいものを使用すると，レンズの厚みが増してしまい，同様に視認性が低下する．一方，焦点距離が長いレンズを使用すると，視野角が狭くなってしまいう一方でレンズによる歪みは小さくなる．そこで，どのような視認性，視野角の組み合わせが適切かを実装システムによって検討する．なお，光学系の適切な配置については，3.4.2節ですでに述べているので割愛する．

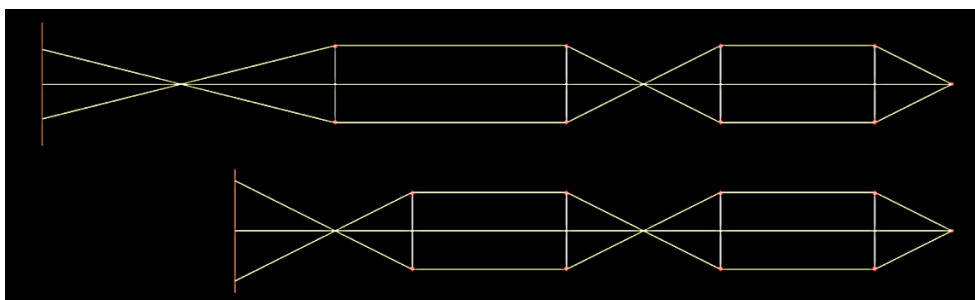


図14 凸レンズの焦点距離と視野角の関係性．（上）焦点距離が長いレンズを使用した場合及び（下）焦点距離が短いレンズを使用した場合

本研究では，この視野角の比較のために，焦点距離50[mm]の凸レンズ4枚と焦点距離100[mm]のレンズ1枚を用いた．図14下部のように，焦点距離50[mm]の凸レンズを4枚配置した場合と，上部のように焦点距離50[mm]の凸レンズを3枚と焦点距離100[mm]の凸レンズを1枚組み合わせた場合の2種類の構造を用いる，左端のレンズから500[mm]離れた場所にディスプレイを設置し，その視認性を検証した．焦点距離100[mm]の凸レンズを使用する際には，レンズの焦点が適切に合うように50[mm]離れた位置に移動させた．なお，この検

証を行うに当たり，図 8 で示した透明ディスプレイは使用しなかった．

検証の結果を図 15 に示す．(a)及び(b)のいずれの場合においても，レンズの縁にゆがみが見られた．そのため，また，実際にユーザが適切に視認できるような視野角は，いずれの場合においても理想値よりも同程度小さい事が確認できた．本研究では，最終的なウェアラブル化を視野に入れているため，より広い視野角を確保する事が望ましい．さらに図 15(b)のように，焦点距離が短いレンズを使用しても光学系を適切に配置すれば歪みを最小限に抑える事ができ，実環境での使用にも対応できる．以上より，本研究では焦点距離 50[mm]の凸レンズの使用が適切であると判断した．



(a)



(b)

図 15 焦点距離 100[mm]のレンズを使用した際の視野(a)，及び焦点距離 50[mm]のレンズを使用した際の視野(b)．

3.4.4. システムの視認性と領域選択性のトレードオフ

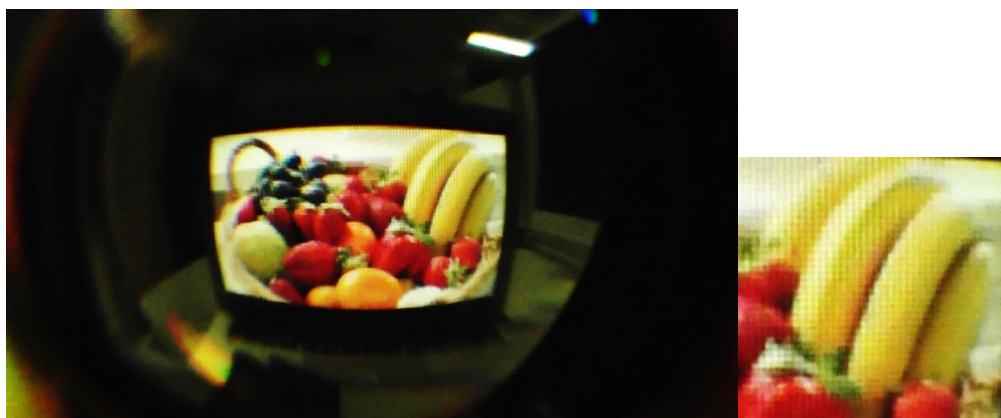


図 16 (左) 図 13 の通り構築したシステム越しに観察した現実世界及び
(右) その拡大

3.4.2 節で述べた光学レイアウトを用いて実装したシステムを通して，現実世界を観察した結果を図 16 に示す．

上図の通り，透明ディスプレイのグリッドが顕著に見られ，視認性が大幅に低下してしまった．図 16 中のバナナに着目すると，透明ディスプレイのグリッドによる筋が確認できる．これは，レンズの焦点上に透明ディスプレイを配置した事により，透明ディスプレイにも完全に焦点があった状態になってしまう事が原因である．また，光学系によって透明ディスプレイが拡大されて見えてしまうため，ディスプレイの画素及びその間にある隙間までもが拡大されて見えてしまう事も原因である．

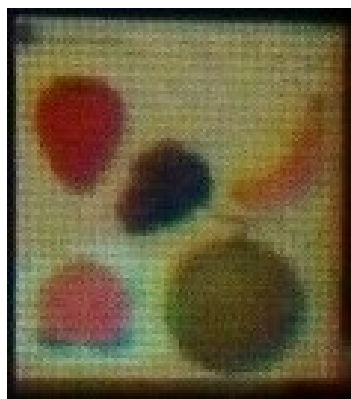
この課題を解決する手法として，透明ディスプレイを敢えてレンズの焦点からずらして配置する事が考えられる．これにより，透明ディスプレイがレンズの焦点からずれるため，ディスプレイの画素やその隙間がぼやけ，視認性の低下を軽減できる．しかしこの場合，透明ディスプレイによるマスク画像がぼやけるため，強調させるエリアもぼけてしまう．そのため，精密なエフェクトの表示が困難となる．そこで，透明ディスプレイをどの位置に表示するのが適切であるかを考える．

透明ディスプレイのみを移動させた際の視界を図 17 に示す．図 17(a)が前項で述べたとおりに光学素子を配置した場合，図 17(b)が透明ディスプレイを 5[mm]ずらした場合の映像である．右図では左に比べディスプレイによって発生するグリッドが見えにくくなっており，視認性がある程度向上している事が確認できる．またマスクの精度についても，本研究で使用したマスクは対象の物体だけでなくその周辺も強調するため，輪郭のボケが物体の視認機能に大きな影響を与えなかった．

以上の結果を踏まえ，本研究では透明ディスプレイを焦点距離から 5[mm]ずらした位置に配置するものとする．しかし，対象の物体のみを強調する場合やより複雑なマスクによる強調を行う場合は，異なる配置の検討が必要である．



(a)



(b)

図 17 (a)透明ディスプレイをレンズの焦点上に配置した場合と，(b)図 13 のレイアウトから凸レンズ 1 寄りに 5[mm]移動させて配置した場合

3.5. 使用パラメータの検証

本項では，透明ディスプレイの画素値どのように設定する事で，システムが視線誘導の効果を発揮できるかについて述べる．

3.5.1. 予備実験

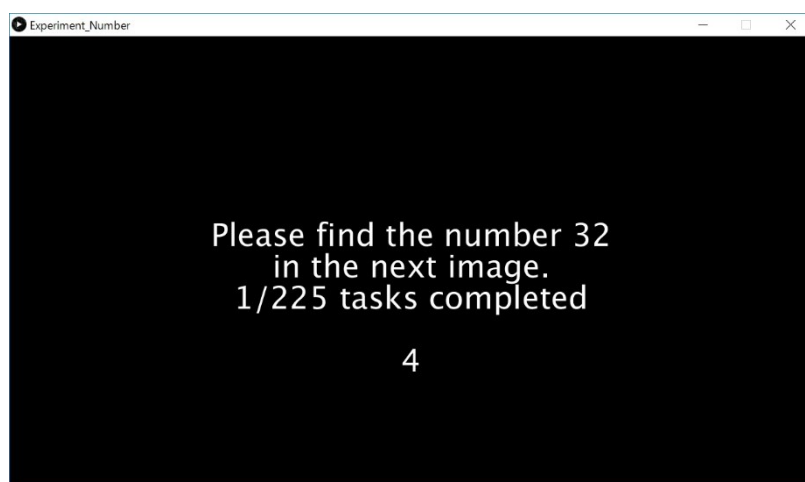
本研究では，システムがコントラストの違いを作り出す事で特定の対象物の発見を促す事を目的としている．そこで，実際にどの程度明るさが異なる際に，人間がその違いを認識し発見速度が向上するかについて，予備実験にて検証を行った．また，非強調領域の視認性を維持しつつ上記の効果を得られるような適切なコントラストについても検証する．なお，人間が違いを感じるようなコントラストを発見する事を目的としているため，先に述べた試作システムは使用せずに実験をおこなった．

まず被験者は，図 18(a)のように特定の番号をディスプレイ画面から発見するように指示を受ける．その後，図 18(b)のようにディスプレイ上に表示される 0 から 35 の番号の内，指示された番号を発見し，その番号が存在する領域の番号をキーボード入力で解答する．図中の緑の線及び数字がキーボード入力に対応しており，指示された数字が緑の数字で囲まれた領域に存在する場合は，その数字をテンキーによって入力する．図 18 の場合では指定された番号である 17 が緑枠の 6 の領域に存在するので，被験者はキーボードの 6 を入力する．

上記のタスクを繰り返し行う中で，システムは異なるパターンの映像をランダムに提示する．一つ目はあらかじめ指定した番号のみが，他の数字よりも明るくなっている場合である．この際に図 19 のように輝度の違いが 6%，12%，18%，24%の 4 パターンの異なるコントラストを被験者に提示する．ディスプレイの実際の輝度値を基にコントラストを作るために，輝度計 CS-100A（株式会社コニカミノルタ製）を用いた．二つ目は，指定した数字とは異なる数字がランダムに一つ明るくなっている場合である．この場合でも，輝度の違いが 6%，12%，18%，24%の 4 パターンの異なるコントラストを設定する．最後は，一切輝度の変化を加えずすべての数字の輝度が同じ場合である（図 19 のコントラスト 0%に該当）．

以上で述べた 9 パターンがそれぞれ 25 回ずつランダムに出現する．これらのパターンの発見までにかかった時間・発見までの誤入力の回数を計測した．

なお当実験は，奈良先端科学技術大学院大学の学生である男女 5 名を対象に行った．被験者の疲労を考慮し，実験の途中に必要なならば休憩の時間を設けた．



(a)

A screenshot of a software window titled "Experiment_Number". The window displays a 3x3 grid of numbers. Each cell contains two numbers, one in the top-left and one in the bottom-right. A green number is placed between the two numbers in each cell. The number 32 in the bottom-right cell is highlighted with a white circle. The green numbers are: 7, 8, 9, 4, 5, 6, 1, 2, 3.

23 20	25 2	12 22	34 4	10 27	6 19
18 35	13 30	16 11	3 1	21 0	29 5
33 24	7 32	31 15	8 9	14 17	28 26

(b)

図 18 予備実験で表示される画面

コントラスト比																																								
0%						6%						12%						18%						25%																
0	27	16	26	33	35	24	17	5	26	29	27	17	5	24	29	9	6	25	19	6	24	28	30	7	21	16	0	1	22											
31	7	29	14	8	34	10	9	8	16	12	9	8	20	32	9	19	2	7	1	0	8	11	34	9	33	29	3	7	8	34	33	9	26							
12	28	11	18	5	32	25	21	10	8	13	14	16	32	18	12	20	21	23	13	27	35	32	11	26	2	15	25	3	19	13	30	4	21	25	3					
1	19	24	5	23	9	15	0	11	35	30	22	7	28	15	10	3	35	8	10	4	20	5	15	31	6	8	35	4	29	33	11	32	8							
13	30	4	21	25	3	33	28	3	1	4	23	25	31	26	30	22	19	18	22	1	21	5	2	24	20	6	17	5	4	13	20	22	6	7	2	17				
20	1	22	6	2	7	2	17	18	1	15	34	2	2	31	3	6	23	1	7	27	2	13	14	4	0	1	12	17	2	16	14	9	28	1	30	14	2	23	9	27

図 19 予備実験で使ったコントラストのパターン

5名の被験者の実験結果を図 20 から図 25 にそれぞれ示す。横軸がそれぞれのパターン、縦軸が発見までにかかった時間を示している。表中の TRUE 及び FLASE は、ハイライトされた数字が発見を指示された番号であるかどうかを示す。また、縦軸の単位は表内では回答までにかかった秒数を示している。

この予備実験の結果、主に 2 つの事柄について有意な結果が得られた。まず、システムによるコントラストの強調有無による対象物体の発見時間について、 $p<0.01$ で有意である事が示された。本システムの目的である、輝度調節によってコントラストを作り出す事で視線誘導する事の実現可能性を改めて確認する事ができた。一般的に視界中に存在するものを探索する際には、特定の場所から順番に確認していく逐次探索と呼ばれる手法が用いられる。この手法は発見対象の位置と探索方法によって発見時間が大きく変化してしまう。しかし、発見対象を強調する事で、スキヤニングの開始点を無意識的に誘導するため、発見にかかる時間が減少したと考えられる。

二つ目は、システムが対象の数字をハイライトしている場合において、コントラスト比が 6%の時と 12%以上の時の発見時間に有意な差が見られた。図 20 で示すように、すべての被験者について、コントラスト比が大きくなる程発見時間が短くなる傾向がみられた。この傾向は、被験者全てのデータを統合した際に $p<0.05$ で有意であった。

以上の結果から、背景の視認性をなるべく損なわずに対象物への視線を誘導する場合には、6~12%のコントラストを与える事が最も適切であると確認した。

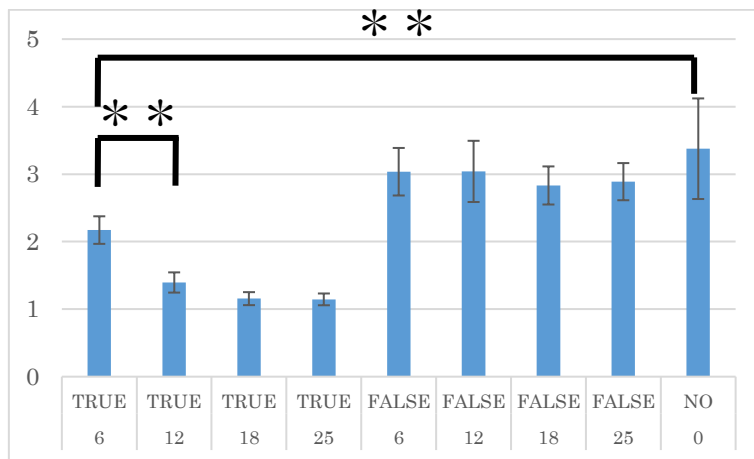


図 20 被験者全員の実験結果

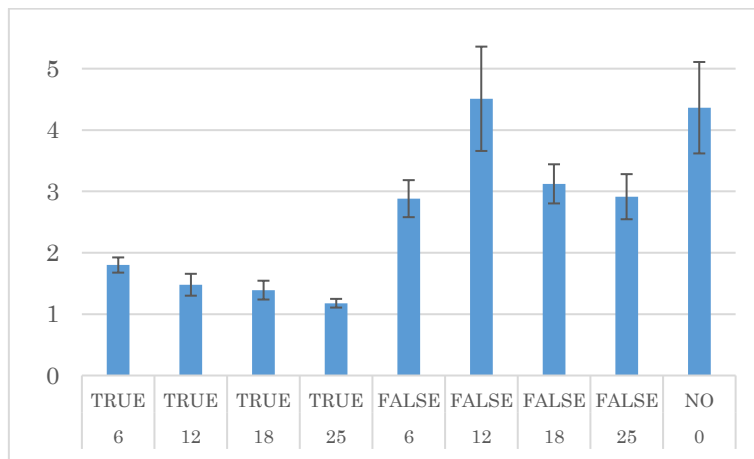


図 21 被験者 A の実験結果

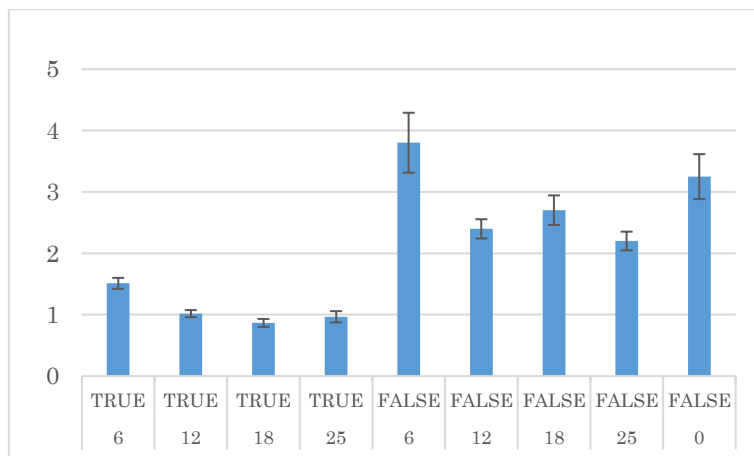


図 22 被験者 B の実験結果

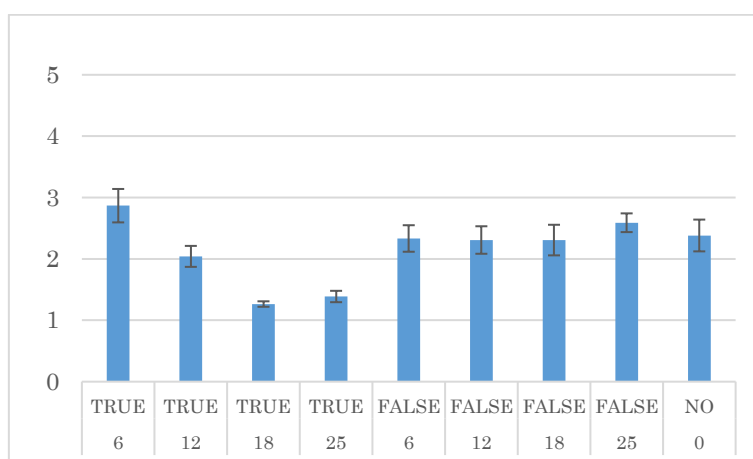


図 23 被験者 C の実験結果

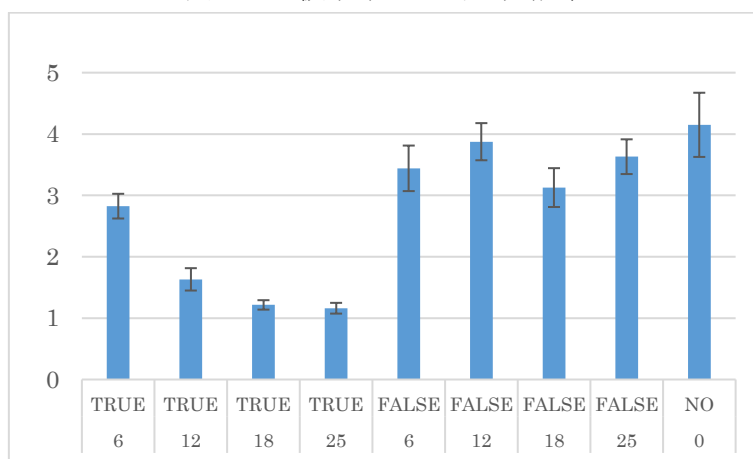


図 24 被験者 D の実験結果

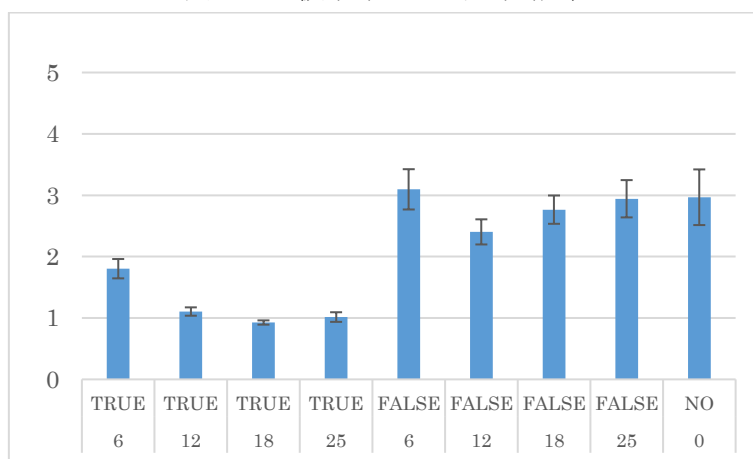


図 25 被験者 E の実験結果

3.5.2.ウェーバー・フェヒナーの法則

予備実験の結果から、本システムで使用する透明ディスプレイの透過率及び画素値をどのように設定すればよいかについて考える。これを考えるに当たり、重要な要因となるウェーバー・フェヒナーの法則についてその概要を説明する。ウェーバー・フェヒナーの法則とは、人間の知覚量 E は物理的な刺激量 R の対数に比例するというものである。

$$E = \log R$$

また、人間が違いを感じられる最小の知覚量の差は、刺激量に寄らず一定である、という事が分かっている。

$$\frac{E_1}{E_2} = \Delta E = \text{constant}$$

例えば、人間が刺激量 100 と 200 の明るさで違いをようやく感じるような場合、400 の明るさに対して違いを認識させようとするすると 800 の明るさが必要にある。刺激量が小さい場合は小さな変化にも敏感であるが、強い刺激を受けている際には微細な変化に対して鈍くなる、という事を体系的に示したものである。

予備実験の結果から、物理的なディスプレイの明るさのコントラストが 6%～12%であれば、その差を認識できる事が確認できている。コントラストの比較対象となっている画素値 255 の際のディスプレイの明るさを、輝度計によって計測したところ、175[cd/m²]であった。同様に計測を行ったところ、透明ディスプレイの透過率は 10%、凸レンズの透過率は 90%であった。試作システムでは 4 枚の凸レンズを使用するため、試作システム越しに画素値 255 のディスプレイを観察した際の明るさは次のように計算できる。

$$175 \times 0.1 \times 0.9^4 = 11.48175 \approx 11.48$$

以上の情報を踏まえ、透明ディスプレイが設定すべき輝度値を計算する。図 26 のように、輝度値 175[cd/m²]、及びそれと 6%の差が生まれた際に人間が感じる知覚量の差を a %とする。輝度値 11.48[cd/m²]の時との感覚量の差が a となれば、同様にその違いを認識する事ができる。そのため、求める輝度値を x とすると、 x は次のように計算できる

$$\frac{\log 175}{\log 175 \times (1 - 0.06)} = a = \frac{\log 11.48}{\log x}$$

$$\log_{175 \times 0.94} 175 = \log_x 11.48$$

$$x = 11.48^{\frac{1}{\log_{175 \times 0.94} 175}} \approx 11.15$$

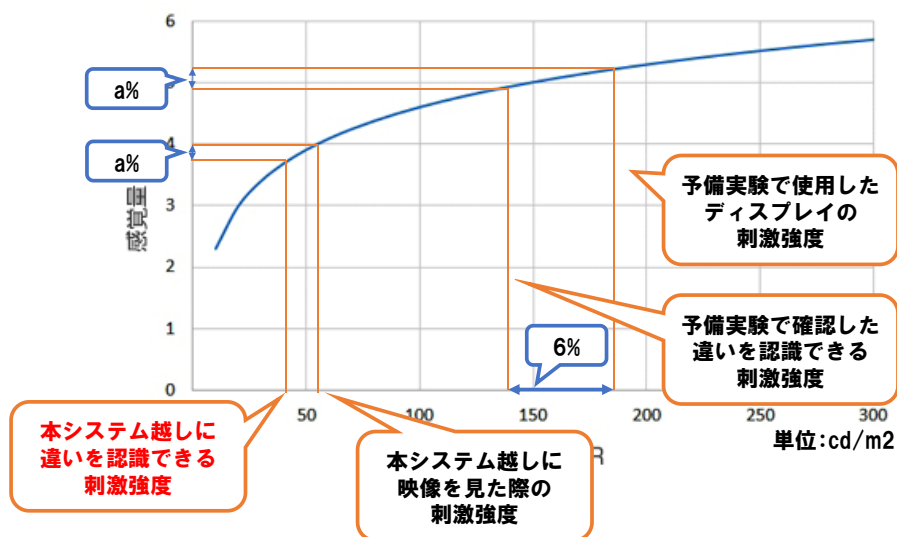


図 26 ウェーバー・フェヒナーの法則を用いた適切な輝度値の計算

システム越しに観察した際に違いを認識できる明るさである $11.15[\text{cd}/\text{m}^2]$ を出力できるような画素値を調べたところ、145 であった。ただし、試作システムで使用する透明ディスプレイにおける透過率と画素値の関係を輝度計により確認したところ、図 27 で示す通りとなった。図のように、画素値 146 から 255 においては透過率の変化が一切発生しなかった。一方で画素値が 145 を下回ると急激に透過率が低下し始め、画素値 130 から輝度値の低下が緩やかになり、画素値 5 の時に輝度値が $0[\text{cd}/\text{m}^2]$ となった。以上より、試作システムで使用している透明ディスプレイでは、輝度値 $11.15[\text{cd}/\text{m}^2]$ を厳密に実現できるような画素値が存在しない事を確認した。そのため、本システムにおいて、背景の視認性を維持しながら注視を誘導するために透明ディスプレイが設定すべき画素値を、1 未満で最大の透過率を実現できる 145 に決定した。

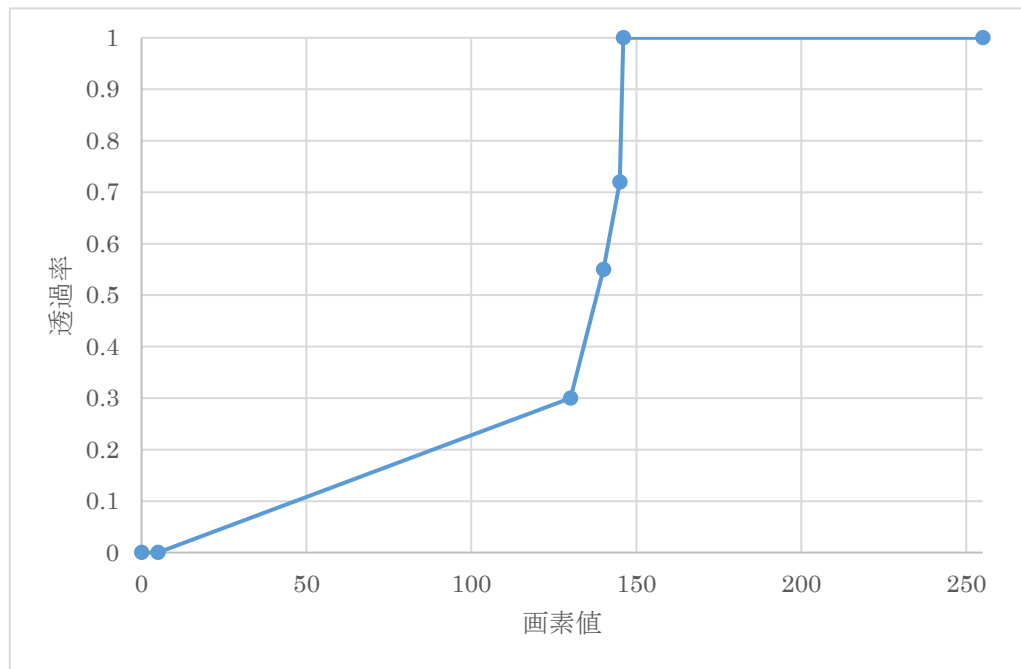


図 27 透明ディスプレイの画素値と透過率の関係

4. 試作システムの実証実験

本章では、透明ディスプレイ及び凸レンズ群を用いた試作システムを用いて部分的に輝度を調節する事による視線誘導の効果を評価するために、以下の 2 つの実験を行った。

実験1) 指定された物体を視界の中からできるだけ早く発見し、回答する実験。

実験2) 視界の中から発見したオブジェクトを発見した順に回答する実験。

以下、上記の 2 つの実験について述べる。

4.1. 実験 1

4.1.1. 実験概要

被験者は、暗室環境下にて図 28 及び図 29 で示すように、椅子に座り、試作システム越しに図 29 左側に存在するディスプレイに表示される映像を観察する。まず被験者は、図 30 のように特定の番号をディスプレイ画面から発見するように指示を受ける。その後、図 30 中央のようにディスプレイ上に表示される 0 から 15 の番号の内、指示された番号を発見し、キーボード入力で解答する。図中の赤の線及び数字がキーボード入力に対応しており、指示された数字が緑の数字で囲まれた領域に存在する場合は、その数字をテンキーによって入力する。

基本的な実験内容は 3.5.1 節で述べた予備実験と類似しているが以下の点については改良を加えている。

- ・表示領域の縮小
- ・回答番号の選択肢の削減
- ・透明ディスプレイによる輝度の変化

ユーザが確実に文字を識別できる凸レンズの中央に該当する領域のみを使用した。そのため、数字の表示領域を縦 360 ピクセル、横 360 ピクセルとし、予備

実験で 9 エリアに 36 個の数字を表示していたものを本実験では 4 エリア 16 個の数字を表示した。また、予備実験では、数字を表示しているディスプレイの画素値を直接操作する事で一つの数字を強調していたのに対し、本実験では対象を表示しているディスプレイは一切輝度の変化を作らず、透明ディスプレイが特定の数字及びその周辺の輝度を強調する役割を果たす。透明ディスプレイは上記のタスクを繰り返し行う中で、システムは異なるパターンの映像をランダムに提示する。この際、背景に該当する領域の透明ディスプレイの画素値として、図 31 で示すような 255, 145, 140 の 3 通りのパターンをそれぞれ提示した。255 の場合は、強調領域と非強調領域の輝度値は同じであり、145, 140 の場合は 255 での輝度値との比がそれぞれ 0.75, 0.57 となる。画素値 145 を選択した理由は 3.5.2 節で述べたとおりである。コントラストがおおよそ 50% となりその違いが明らかに認識できる比較対象として画素値 140 を選択した。これらを指定した番号、それ以外のランダムな数字を強調する場合の 2 パターンに分ける。以上の 5 パターンをそれぞれ 40 回ずつランダムに出現させる。これらのパターンの発見までにかかった時間・発見までの誤入力の回数を計測した。なお当実験は、奈良先端科学技術大学院大学の学生である男女 6 名を対象に行った。所要時間は 40 分程度であったため、被験者の疲労を考慮し、実験の途中に必要なならば休憩の時間を設けた。

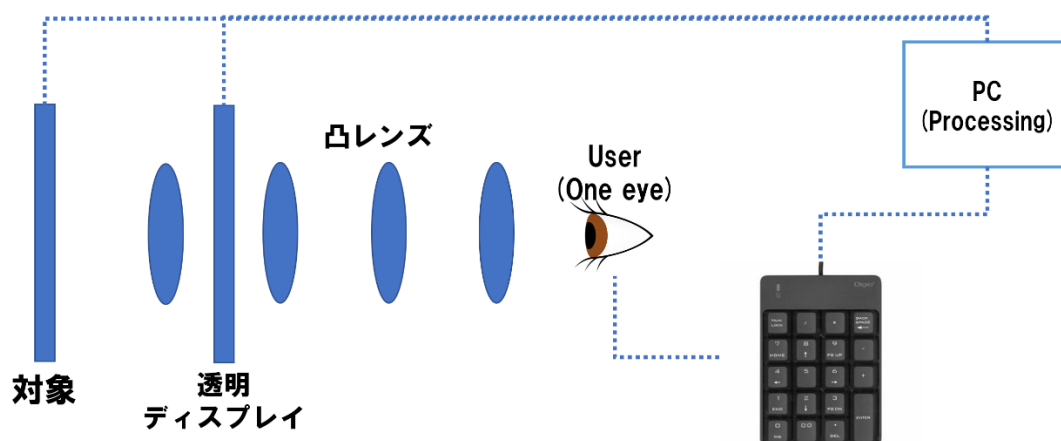


図 28 実験で使った試作システムの概要



図 29 構築した実験環境（実験は暗室環境で実施）

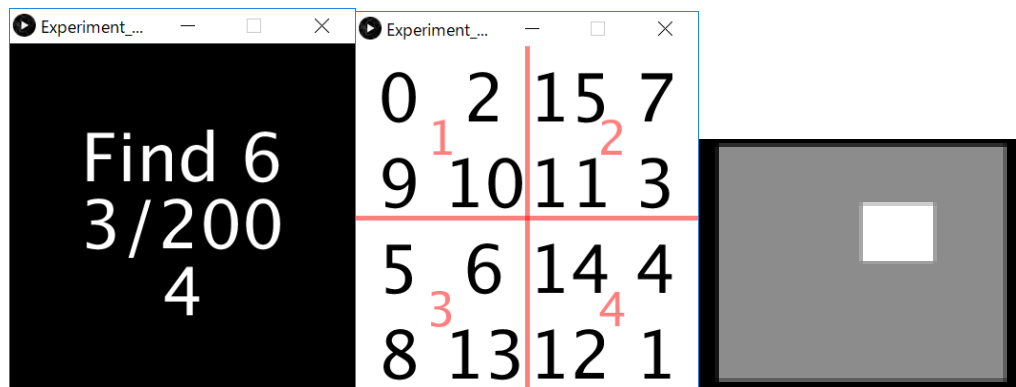


図 30 ディスプレイに表示する映像．（左）インストラクション，（中央）表示される数字，（右）透明ディスプレイに表示されるマスク

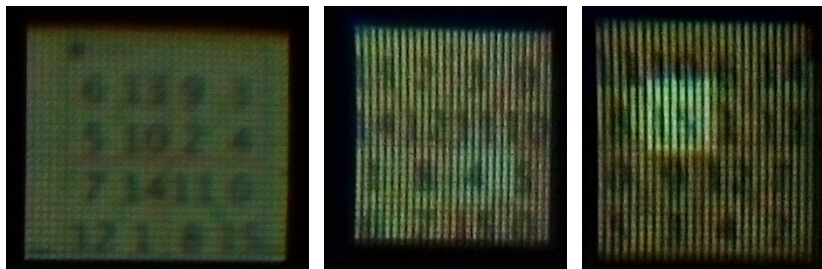


図 31 透明ディスプレイの背景に該当する画素値が（左）255 の場合，（中央）144 の場合，（右）140 の場合の試作システム越しの視界

4.1.2.実験結果

それぞれの被験者の実験結果を以下の図 32 から図 38 に示す.

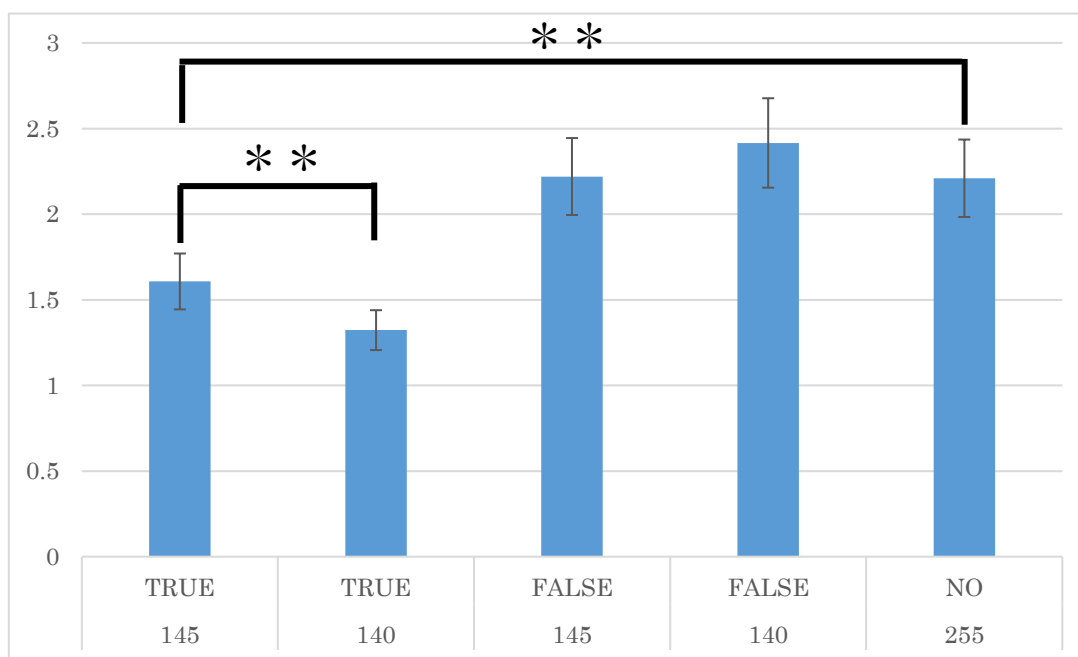


図 32 被験者全員を総合した実験結果

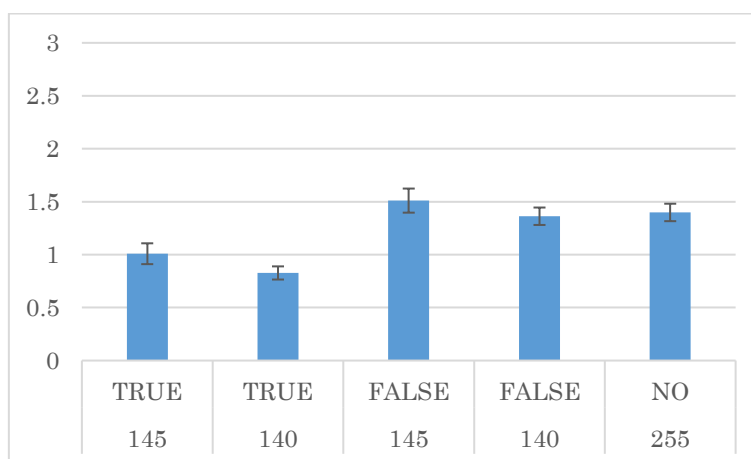


図 33 被験者 A の実験結果

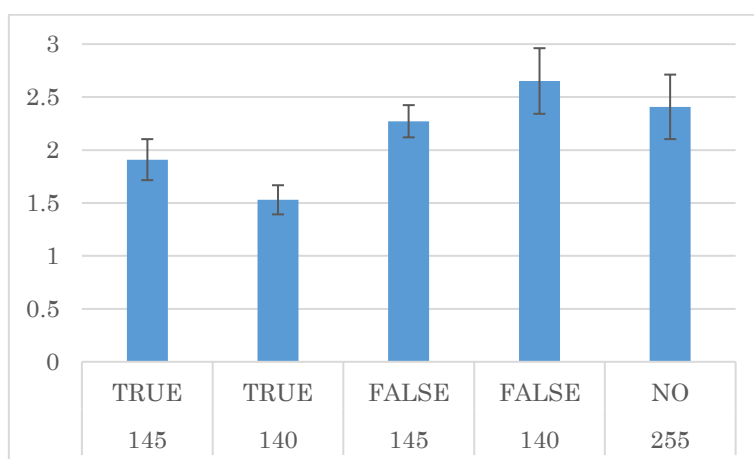


図 34 被験者 B の実験結果

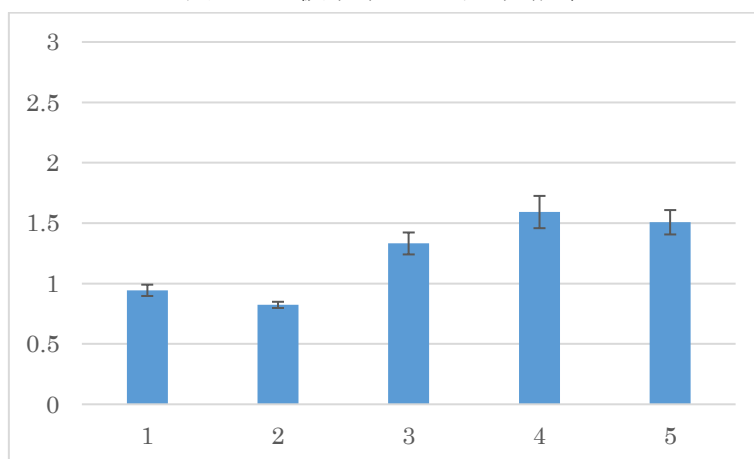


図 35 被験者 C の実験結果

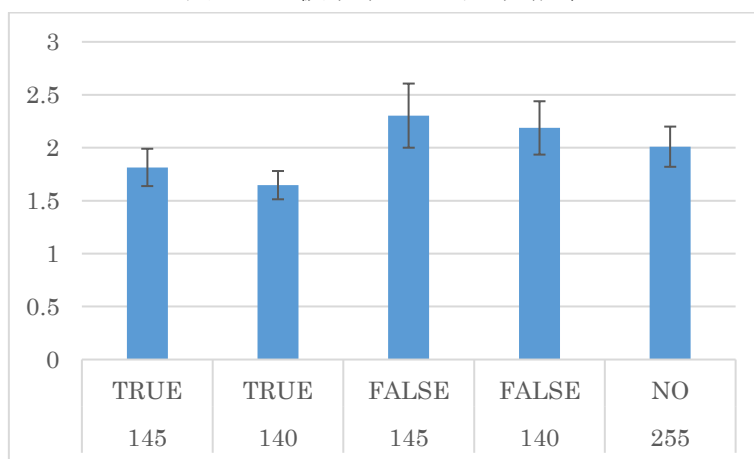


図 36 被験者 D の実験結果

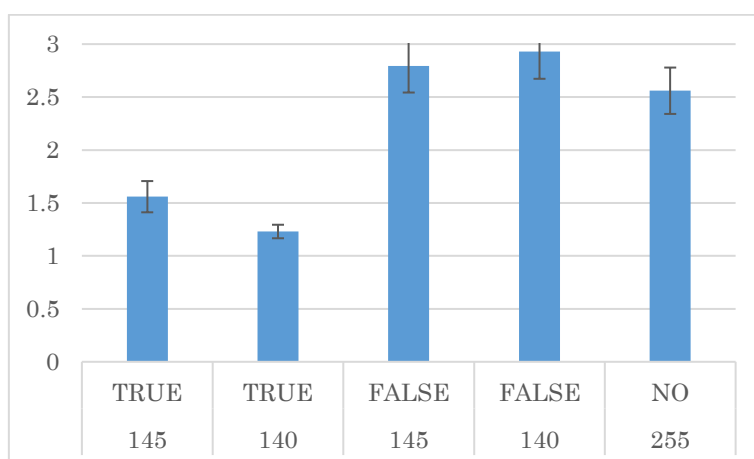


図 37 被験者 E の実験結果

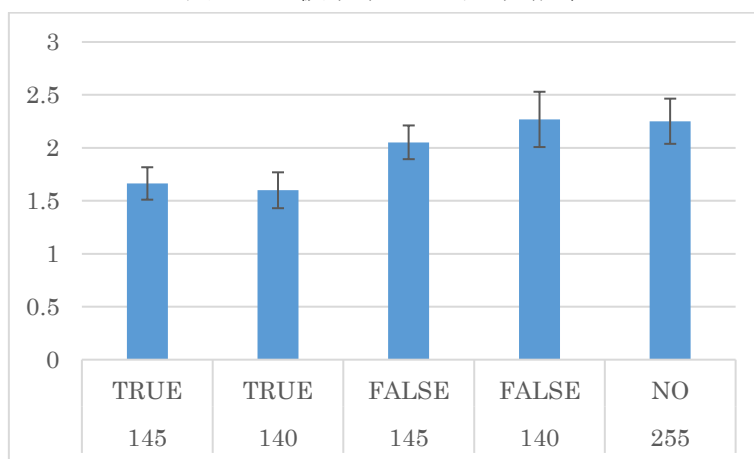


図 38 被験者 F の実験結果

4.1.3.実験結果の詳細と考察

図 32 から図 38 において、それぞれの軸が表す意味は予備実験と同様に、横軸が使用した画素値及びシステムによる指定した数字の強調の有無、縦軸が発見までにかかった秒数である。

まず、被験者全体に見られた傾向について述べる。予備実験と同様に、すべての被験者のデータを総合した図 32 について、指定した数字を強調した場合と透明ディスプレイによる特定の対象の強調を行わなかった場合を比較した。その結果数字を指定した場合の方が発見までの時間が約 27%短縮されている事が確認できた。また、指定した数字を強調している場合、画素値を 140 に設定しコントラストを 57%とする方が、画素値を 145 に設定した場合に比べて発見時間が有意に短縮された。透明ディスプレイの画素値を低く設定し周囲とのコントラストを強調する方が発見までの時間が短縮される事が確認できた。

一方で、指定した数字と異なる番号を強調した場合と、透明ディスプレイによる強調を一切行わなかった場合では、発見時間には有意な差は見られなかった。本実験では、背景を暗くし過ぎる事により背景の視認性が低下し、発見時間が延びる傾向は確認できなかった。

本実験においても予備実験と同様に、スキヤニングの開始位置がコントラストの強調によって誘導された可能性が高い。本システムを利用した際に、視線誘導の効果が十分に得られることが示された。

以上の結果を踏まえ以下の 3 点を本実験で立証する事ができた。

- 1) 本システムを用いて特定の物体を強調する事で、発見までの時間を有意に削減できる
- 2) 本システムを用いる事で、視界中に存在する物体を探す際のスキヤニングの視点の位置を操作できる可能性がある
- 3) コントラスト比を 57%に設定した場合であっても、背景にある数字を発見する時間が延びる事は確認できなかった。

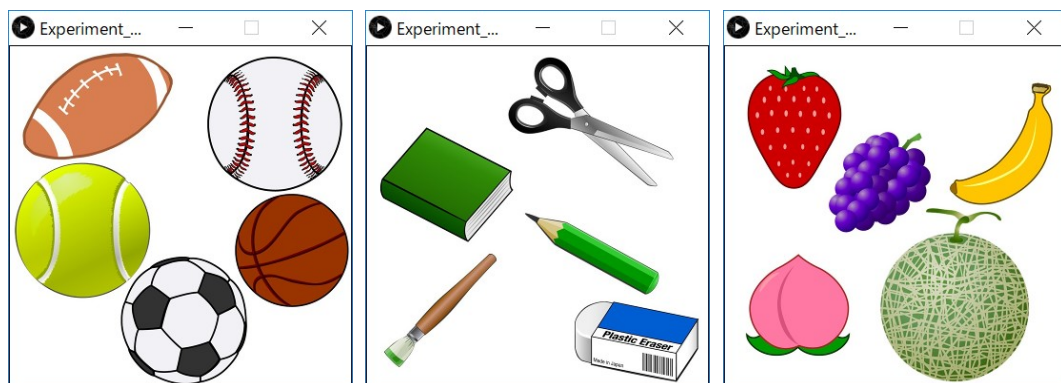
4.2. 実験 2

4.2.1. 実験概要

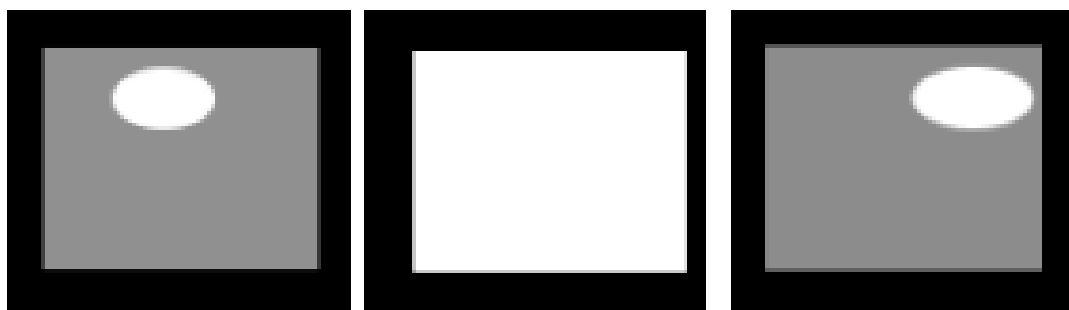
本システムを利用した際の物体の認知について検証を行うために、もう 1 つの実験を行なった。実験 1 で述べたものと同様の実験環境を用いる。当実験では図 39(a)に示すような 5 つのオブジェクトが描かれた画像をディスプレイに表示する。それを試作システム越しに観察し、発見した順番に回答してもらう。この際、透明ディスプレイに図 39(b)に示すようなマスク画像を透明ディスプレイに表示した。実際に観察した際にはマスク画像は凸レンズ群により倒立するため、図左ではサッカーボールを、図右ではモモをそれぞれ強調の対象としている。また、背景に当たる箇所の透明ディスプレイの対象物及びその周辺領域の画素値を、図 26 左では 145 に、図中央では 255 に、図右では 140 に設定した。それぞれの表示結果を図 39(c)に示す

被験者として、実験 1 の参加者と同じく奈良先端科学技術大学院大学の学生である男女 6 名を対象に行った。さらに、実験終了後にそれぞれの被験者に簡単な質問を行った。質問の内容を以下に示す。

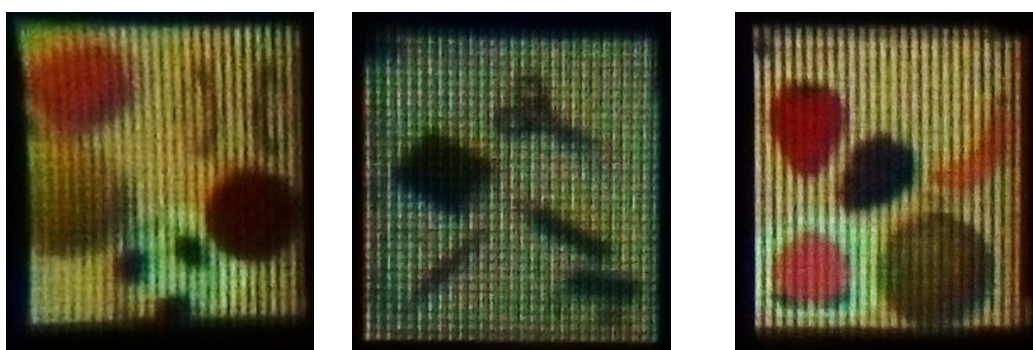
- 1) 物体が一部ハイライトされている事を認識できたか
- 2) ハイライトされている対象は何であったか
- 3) ハイライトの種類が 2 種類存在する事を認識できたか



(a)



(b)



(c)

図 39 (a)ディスプレイに表示させた画像及び(b)透明ディスプレイに表示させるマスキング画像，(c)試作システム越しに観察した際の視界．（左）ボール，（中央）文房具，（右）フルーツの 3 種類の映像を観察させる．

4.2.2.実験結果

実験 2 の結果を以下の表 4-7 から表 4-9 に示す.

表 4-7 ボールを表示した際の各被験者の回答

質問 1	1	2	3	4	5
被験者 A	ラグビー	テニス	サッカー	バスケット	野球
被験者 B	サッカー	テニス	ラグビー	野球	バスケット
被験者 C	サッカー	野球	ラグビー	テニス	バスケット
被験者 D	ラグビー	テニス	サッカー	バスケット	野球
被験者 E	ラグビー	野球	サッカー	テニス	バスケット
被験者 F	野球	サッカー	ラグビー	無回答	無回答

表 4-8 文房具を表示した際の各被験者の回答

質問 2	1	2	3	4	5
被験者 A	ハサミ	ノート	鉛筆	フデ	消しゴム
被験者 B	ハサミ	鉛筆	消しゴム	フデ	ノート
被験者 C	ハサミ	ノート	鉛筆	消しゴム	フデ
被験者 D	ハサミ	鉛筆	消しゴム	フデ	ノート
被験者 E	ハサミ	ノート	鉛筆	消しゴム	フデ
被験者 F	ハサミ	ノート	鉛筆	フデ	消しゴム

表 4-9 フルーツを表示した際の各被験者の回答

質問 3	1	2	3	4	5
被験者 A	ブドウ	バナナ	メロン	モモ	イチゴ
被験者 B	イチゴ	ブドウ	モモ	メロン	バナナ
被験者 C	イチゴ	モモ	バナナ	メロン	ブドウ
被験者 D	イチゴ	モモ	メロン	バナナ	ブドウ
被験者 E	モモ	メロン	バナナ	ブドウ	イチゴ
被験者 F	モモ	イチゴ	ブドウ	バナナ	メロン

4.2.3.実験結果の詳細と考察

当実験では、システムによる強調により、モモやサッカーボールといった強調された物体が最初に回答される事を予想していた。しかし、上表で示すように回答順と強調する対象についての明確な関係は見られなかった。しかし、質問の回答を通じて興味深い傾向を見る事が出来た。まず、「物体が一部ハイライトされている事を認識できたか」という質問に対しては、すべての被験者が「はい」と回答した。特に、被験者 C については、「エフェクトが変わっている事は認識したが回答は上から順番に行った」と回答した。次に、「ハイライトされている対象は何であったか」という質問に対しては、すべての被験者が「モモ」と回答した。しかしサッカーボールについては「被験者」B, C, D のみが回答した。この事から、すべての被験者がモモに違いがある事を認識しながらも被験者 E, F 以外はそれ以外の果物から回答を始めている事がわかる。サッカーボールについては、実験 1 でおなじコントラストを提示した際には発見時間の短縮が確認できたにもかかわらず、その違いが認識されにくい事が確認できた。最後にサッカーボールとモモの両方を回答した被験者 B, C, D に対して「ハイライトのコントラスト比が画素値 145 及び 140 の 2 種類存在する事を認識できたか」という質問を行ったところ、すべての被験者が「いいえ」と回答した。

以上の結果を踏まえ、発見対象のみを探索している場合には微小な変化でも視線誘導の効果があるが、被験者が発見対象を強く意識していない状態においてはその効果が見られない、という事が示された。さらに、同条件下においてこちらが特定の対象への注視を促そうとする場合には、より大きいコントラストによる強調が必要になる、という事が確認できた。

5. おわりに

5.1. 結論

本研究では、ユーザが視界中の物体を発見する事を支援するために、透明ディスプレイ及び凸レンズ群をもちいた輝度調節システムを提案及び試作した。また、試作システムにおける適切な光学系の配置やパラメータの設定について検討し、それらの有用性を評価した。従来の研究で、ユーザの視界を微調整する事で特定の物体へと注視を促す事ができる事が明らかにされていた。また、拡張現実感において重畳表示させた CG 画像に注視を促すために、対象及びその周辺の輝度を敢えて増幅する手法についても提案されていた。しかし、拡張現実感の技術を用いて現実世界の物体を強調し、注視を促す研究については検討されていなかった。そこで、実際にユーザの視界の輝度を調節し特定の領域や物体を強調するようなシステムを試作し、その効果を検証した。試作システム越しに映る現実世界を観察し、そのなかに表示されたもののうち指定されたものを可能な限り早く発見させる実験を行った。その結果、透明ディスプレイの画素値を適切に設定し透過率を調節する事で、背景の視認性の低下を最小限に抑えつつ指定されたオブジェクトを発見する時間が有意に短縮される事が確認できた。加えて、視界に存在するオブジェクトを一つだけ強調した状態で、被験者に発見したものを順番に回答させる実験を行った。しかし、多くの被験者が上から下などの特定の順番に沿って回答したため、システムによって強調した事による回答順番の変化は見られなかった。

5.2. 今後の展望

本研究では、本試作システムを基に最終的にウェアラブルデバイスの実装を検討している。本システムのウェアラブル化にあたり未解決な課題が幾つか存在する。まず、システム全体の小型化が求められる。試作システムはその全長が40[cm]に達するため、これらの光学素子をそのままウェアラブルシステムに利用する事は現実的ではない。使用する凸レンズやディスプレイを小型化する事である程度は小型化する事が可能だが、凸レンズの小型化によってシステムの視野角がさらに狭くなってしまう。実際の使用を想定した際の凸レンズやディスプレイの大きさについて検討する必要がある。

また、本研究で使用した透明ディスプレイについても、改善が可能であると考ええる。透明ディスプレイの透過率が最大になるような画素値である 255 に設定しても、ディスプレイそのものの透過率が低すぎる事が問題である。そのため、凸レンズによって挟み込む構造を導入し視界の歪みを最小限に抑えた場合でも、視界全体が非常に暗くなってしまった。また、透明ディスプレイの透過率の階調数が高くなく、適切な透過率の表現が困難であった。本研究では透明ディスプレイに表示させるマスク画像としてグレースケールの画像のみを使用したため、カラー表示ではない形式のディスプレイを使用する事でより良い結果が得られる可能性がある。

更に、ディスプレイの輝度値だけでなくマスクの形を変更するところでも注視を誘導する事が可能であると考ええる。本研究では、対象物体とその周辺のみを強調する手法を採用しているが、グラデーションやアニメーションなどを導入する事でさらに効果を高められる可能性がある。

本研究では、実際の利用を試みた際に、「なにを強調するのか」という問題については本研究では述べていない。車の運転中の利用を視野に置いた場合は各種標識や前方の車、歩行者などが挙げられる一方、広告での利用を考慮した場合には、店舗内に陳列されている特定の商品を強調する事が予想される。このように、本システムの用途によって何を強調すれば適切な効果が得られるかが大きく異なるため、使用用途に応じた適切な「強調する対象」の設定を検討する必要がある。

謝辞

本研究に際して、加藤博一教授には多大なるご指導，ご鞭撻を賜りました。未熟な自分が曲がりなりにも研究者として一定の結果を残せたのは，ひとえに加藤教授の温かい見守りと，的確なご助言によるものです。心より感謝申し上げます。また，本研究に関してやり取りを重ね，時に数々のアドバイスを，時に数々の激励を頂いた **Christian Sandor** 准教授に深く感謝致します。2 年という短い間でしたが，研究者として非常に密度の濃い指導をして頂きました。ありがとうございます。本研究の進行のために多大なるご協力を賜りました，清川清教授に厚く御礼申し上げます。研究のみならず，その他あらゆる面で数々のご助言を頂きました **Alexander Propsi** 助教授に深く感謝致します。研究生活において恩顧に預かりましたインタラクティブメディア設計学研究室 上野真紀子女史に衷心より御礼申し上げます。ともに研究生活を支え合ったインタラクティブメディア設計学研究室の先輩，同輩，後輩の皆様にお礼申し上げます。研究生活，私生活問わず数々のサポートをしていただき，感謝の念に堪えません。最後に，このような素晴らしい環境で研究する機会を与えて下さった両親を始めとする家族に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 教育機器編集委員会, 産業教育機器システム便覧, 日科技連出版社, 1972.
- [2] 横澤 一彦: 一目でわかる事形状認知にかかわる視覚過程一. 『科学』, Vol.62, No.6, pp.356-362, 東京:岩波書店, 1992.
- [3] 横沢 一彦, 熊田 孝恒: 視覚探索, テレビジョン学会誌. Vol.48, No.12, pp.1509-1515, 1994.
- [4] Neisser Ulric.: "Cognitive psychology", New York: Appleton-Century-Crafts, 1967.
- [5] Christopher G. Healey: "Perception in Visualization",
<http://www.csc.ncsu.edu/faculty/healey/PP/index.html>
(Last access: Jan. 25th, 2019)
- [6] The Third Thumb: <https://www.daniclodedesign.com/thethirdthumb>
(Last access: Jan. 25th, 2019)
- [7] Christian I. Penalozza and Shuichi Nishio: "BMI Control of a Third Arm for Multi-Tasking", Science ROBOTICS, Vol.3, No.20, 2018.
- [8] Yoshiyuki Sankai: "HAL: Hybrid Assistive Limb Based on Cybernetics", Robotics Research, The 13th International Symposium ISRR, pp.25-34, 2010.
- [9] Weiquan Lu, Been-Lirn Henry Duh, and Steven Feiner: "Subtle Cueing for Visual Search in Augmented Reality", IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR), Science and Technology Papers, pp.161-166, 2012.
- [10] 小竹元基, 細川崇, 宇治信孝, 鎌田実: 高齢運転者の運転特性とその背景要因に関する研究 (第1報: 高齢者の生活・身体特性と運転特性の関連性), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.71, No.709, pp.124-131, 2005.
- [11] 澤野弘明, 岡田稔: 車載カメラによる実時間画像処理とその AR 技術に基づく表示方式によるカーナビへの応用. 芸術科学会論文誌, Vol.5, No.2, pp.57-68, 2006.
- [12] 岡林繁, 畑田豊彦, 古川政光: 自動車用ヘッドアップディスプレイにおける視覚情報受容の優位性, テレビジョン学会誌, Vol.47, No.5, pp.714-721,

1993.

- [13] Yuta Itoh, Takumi Hamasaki, and Maki Sugimoto: "AdaptiVisor: Assisting EyeAdaptation via Occlusive Optical See-ThroughHead-Mounted Displays", 8th Augmented Human International Conference, pp.9, 2017.
- [14] 上田龍幸, 井澤英俊, 岩井大輔, 佐藤宏介, "高速プロジェクタと可変焦点レンズを用いた空間的に非一様な合焦距離変調," 第 62 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 356-3 (6 pages), 2018.
- [15] Michael Posner: "Orienting of Attention", Quarterly Journal of Experimental Psychology, Vol. 32, pp.3-25, 1980.
- [16] Reynold Bailey, Ann McNamara, Nisha Sudarsanam, and Cindy Grimm, "Subtle Gaze Direction", ACM Trans. Graphics, Vol. 28, no. 4, pp. 100:1-100:14, 2009.
- [17] Eduardo E. Veas, Erick Mendez, Steven K. Feiner, and Dieter Schmalstieg, "Directing attention and influencing memory with visual saliency modulation", Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1471-1480, 2011.
- [18] HoloLens: <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens>
(Last access: Jan. 25th, 2019)
- [19] Kiyoshi Kiyokawa, Yoshinori Kurata, and Hiroyuki Ohno: "ELMO: An Enhanced Optical See-through Display Using an LCD Panel for Mutual Occlusion", Proceedings of the International Symposium on Mixed Reality 2001 (ISMR 2001), pp.186-187, 2001.
- [20] Gordon Wetzstein, Wolfgang Heidrich, and David Luebke: "Optical image processing using light modulation displays", Computer Graphics Forum, Vol.29, No.6, pp.1934–1944. 2010.