

# フルカラーLEDを使用した眼球運動による 残像表示システムの評価

金澤宏介<sup>†1</sup> 数野翔太<sup>†1</sup> 奥村万規子<sup>†1</sup>

**概要:** 本研究では、一列 32 個で構成されるフルカラーLED 光点列を高速で点滅させ、サッカードと呼ばれる眼球運動で観測し、眼球の動きだけで残像を知覚させて情報提示を行うシステムを開発した。光点列は表示情報を縦に分割して順次点滅させるため、サイズが小さくスペースを取らず、省エネルギーである。一方で、フルカラーLEDを使用した場合、LED の RGB の光度比と人が知覚する残像の色味に影響があると考えられる。

本論文では、フルカラーLED 光点列を二つ並列に配置しサッカードを誘発させる。LED の RGB の光度比と色味の感じ方、LED の光拡散、観測者と光点列二つとの位置関係、サッカードと点滅周期、光点列デバイスの大きさ、それぞれが知覚にどのような影響を与えるのかを評価する。

**キーワード:** サッカード, 残像, フルカラーLED, 眼球運動, 視覚情報提示

## Evaluation experiment of the afterimage-display system by using full color LED to eyeball movement

KOUSUKE KANAZAWA<sup>†1</sup> SHOTA KAZUNO<sup>†1</sup> MAKIKO OKUMURA<sup>†1</sup>

**Abstract:** We developed novel afterimage-display system consisting of two fullcolor line LEDs located in parallel that easily generated saccade. In the line LEDs, the information on the display is vertically divided and flashed sequentially. It is a compact system which does not need a place and these is little consumption energy. To optimize the system, various kinds of parameters, such as RGB brightness, LED diffusion, distance between observer and LED, LED refresh rate and LED display size were determined by evaluation their influence in our perception.

**Keywords:** Saccade, Afterimage, Full color LED, Eyeball movement, Visual presentation

### 1. はじめに

我々は日常生活において、興味を引かれた対象物に視線を向けるため視線の移動をくり返し行っている。このとき起こっている速度の速い眼球運動がサッカードと呼ばれるものである[1]-[3]。この高速眼球運動であるサッカードを利用して、あるパターンで点滅している一次元の LED 光点列を観測することによって、点滅している一次元光点列が残像として二次元の広がりを持ち、情報として人間の網膜に知覚させる情報提示手法がある。類似の情報提示手法として、あるパターンで点滅している一次元の LED 光点列自体を高速で移動させることによって発生する残像により情報を提示する POV (Persistent Of Vision) またはバーサライトと呼ばれる手法が存在する。これにはペンライトや光点列がメトロノームのように往復運動する時計などといったデバイス例があり、玩具など多くの情報提示手法として使用されている。今回の情報提示手法ではサッカードである眼球運動を利用するが、仕組は POV やバーサライトと基本

は同じである。デバイス自体の高速運動を眼球運動のサッカードに置き換える。つまり、光点列は固定し眼球運動だけで残像を発生させる仕組みである。

この情報提示には少なくとも LED 光点列が一列のみで実現できるため、非常に少ないエネルギーと小スペースにも配置できるコンパクト性があり、街中の限られたスペースでの設置や小型化が期待できるのでウェアラブル端末としての活躍が期待でき、フルカラーでの情報提示が可能となる。

著者らは文献[1]で、LED 光点列を二つ並列に配置し、それらを交互に見ることにより特別に意識せずにサッカードを誘発させるシステムを開発した。[1]の問題点としては、単色の LED 光しか使用しておらず、フルカラーと残像の関係が明らかにできなかった。本研究ではその問題点を解決するためにフルカラーで残像を表現し、知覚にどのような影響をもたらすかの実験を行った。LED の数も文献[1]と比較して 2 倍にしているため、デバイスのサイズが知覚に最適な位置関係に影響を与えるかの調査も行う。

第 2 章では本研究で提案するフルカラーLED 情報提示システムの内容としてサッカード運動の基本的な特性や作成したデバイスの概要、表示情報に関する説明をする。第 3

<sup>†1</sup> 神奈川工科大学 電気電子工学専攻  
Kanagawa Institute of Technology, Electrical and Electronic Engineering,  
1030 Shimo-ogino, Atsugi-shi, Kanagawa, 243-0292, Japan.

章で本実験のフルカラーLED による色味に関する実験の内容として、表示画像の点滅周期とディスプレイサイズがもたらす影響や LED 光を混色するために用いた拡散キャップの有無による色の感じ方、残像の色によって知覚や認識に差が発生するのかを明らかにする。第4章では第3章の結果から得られたことをまとめ、今後の調査のための展望を記す。

## 2. フルカラーLED 情報提示システム

ここでは、情報表示システムに関係するサッカーの基本的特性と制作デバイスとそのデバイスで表示する情報についての内容を記す。

### 2.1 サッカー

サッカー運動は、視線保持のための眼球運動とは異なり、運動の動特性が視覚刺激の性質に依存するということが少なく、基本的に図1に示す移動角度であるその振幅が決まると、持続時間と速度がほぼ決まってくる運動である。具体的な特性としては、角速度が平均300~500度/秒、持続時間が約30~80msと高速で持続時間が短い眼球運動である[2]-[5]。サッカーの持続時間Dは振幅Aとともに増加するその振幅と持続時間の関係は

$$D = D_0 + d \cdot A$$

で近似される。ここでの $D_0$ は20~30ms、 $d$ は振幅 $1^\circ$ 当たりの増加量で2~3ms程度である[2]。また、振幅Aを求めるとは三角関数の法則より

$$A = 2\theta = 2(\tan^{-1} \frac{X/2}{Y})$$

で求められる。これより、デバイスと観測者の位置関係から、サッカーの持続時間が決まる。しかし、サッカーの持続時間や移動速度などは個人差や反復しているうちの慣れで変わってくるので、この式はおおよその目安として使用する。

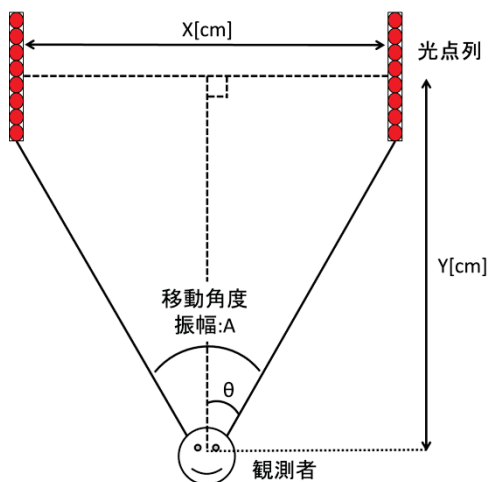


図1 振幅を求めるための位置関係

Figure 1 Experimental setup for optimizing two LED location.

### 2.2 制作デバイス

LEDは角型フルカラーLED (OSTA71A1D-1)をそれぞれ32個、TLC5940を6個、LED点滅制御にはArduino Pro Miniを使用した。設計したデバイスの写真を図2に、回路図を図3に示す。

今回制作したデバイスはフルカラーLEDを32個使用するため、32個それぞれのRGBを制御する必要がある。Arduino単体では96ピンの制御ができないため、16ch定電流シンクLEDドライバであるTLC5940を使用した。TLC5940は16chであるがデジチェーンが可能であり複数同時に使用することができるので、92ピン制御するためにTLC5940を6個使用した。Arduino-TLC5940間の配線とデジチェーンの回路図を図4に示す。

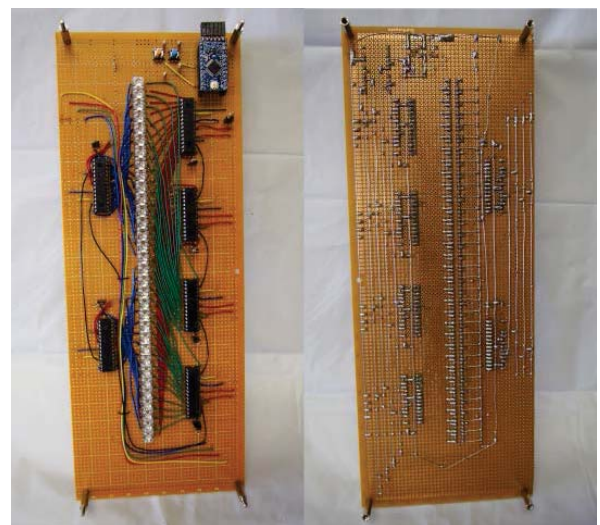


図2 LEDデバイス  
 Figure 2 LED device.

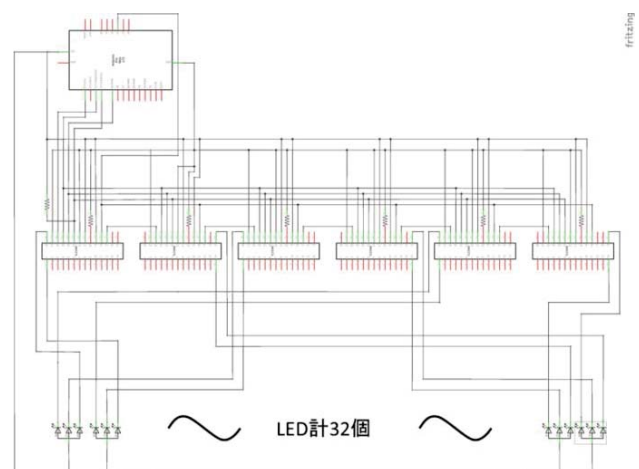


図3 LED駆動回路図  
 Figure 3 LED driving circuit diagram.

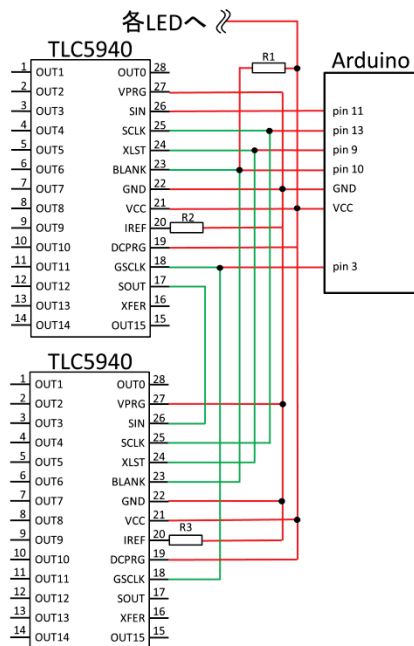


図 4 LED 制御のためのデジーチェーン回路  
 Figure 4 Daisy chain circuit for LED control.

### 2.3 表示情報

使用した LED ドライバは、個々の LED の明るさを 4096 段階 (12bit) の PWM で制御することができるので、理論的には約 687 億色の表現が可能である。しかし人間は RGB それぞれの成分を 256 段階 (8bit) で表した約 1677 万色程度でも階調の差も区別できないのに加え、一般的にパソコンレベルではフルカラーの画像を RGB それぞれ 256 段階として表しているの、今回は各色のピークを 255 に設定した。

縦 32×横 32 の 1024 ドットのディスプレイを想定し情報を提示し、その一例である元画像を図 5 に示す。VBA を使用してこの元画像を RGB それぞれ 256 段階の数値として算出した。本実験では 32×32 の正方形の画像になるが、物理的に LED が存在しているのは縦 32 個なので、サッカーの持続時間によっては横が 32 列より多い画像も表示できる。プログラムとしては、図 5 の画像を左からある時間で順次高速点灯させている。このように二次元の広がりを持った画像を順次点灯している光点列に対して、眼球を左から右、右から左に動かした際に像の向きも変化することが知られている[1][6]-[8]。したがって、使用した画像は像が反転しても認識できるように左右の区別がないイラストを使用した。また、プログラムはループしているので画像と画像の間に隙間を作るために 10ms の消灯時間を設けた。使用 LED の一辺のサイズが 7.42mm で、隙間なく配列しているので情報表示部のサイズは 237.44mm となる。本実験では正方形の画像しか使用していないので、約 24×24cm のサイズの画像となる。

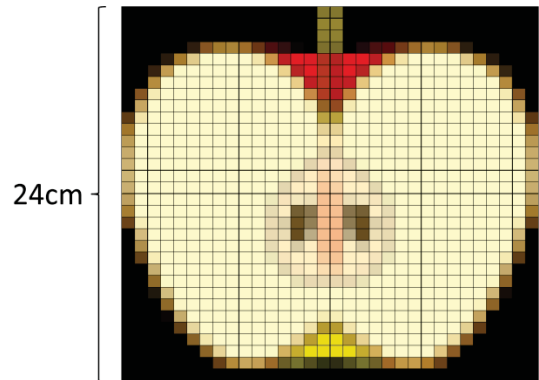


図 5 元画像  
 Figure 5 Original image.

### 3. フルカラーLED による色味に関する実験

この実験では、フルカラーの画像をある一定のパターンで点滅させ、残像によって提示される情報が観測者にどのように感じられるかを検証する。以下にその実験内容の詳細を示す。

- ① 表示画像の点滅周期とディスプレイサイズの関係
- ② LED 拡散キャップの有無による色の感じ方
- ③ 残像で情報表示する場合、色によって知覚や認識に差がでるのか検証する実験

#### ①表示画像の点滅周期とディスプレイサイズの関係

文献[1]より、点滅周期を長くすると、表示画像は横に伸びることがわかった。この問題を解決するために、まず、ディスプレイサイズに最適な点滅周期を見つける実験を行うことにした。

表示画像の点滅周期を変化させ、サッカーの持続時間との関係性を探る。また、デジタルカメラを使用し一定のシャッタースピードで光点列間の距離を 100cm、光点列被験者間の距離が 180cm の位置から撮影し画像を取得する。サッカーの持続時間が約 50ms であることを考慮してシャッタースピードは 50ms で撮影した。縦一列の点灯時間は持続時間である 50ms に対して横ピクセルの 32 ドットで割れば収まる計算なので、縦一列の点灯時間を 1.562ms とした。この時間を基準に表 1 のように 1/2, 1/4, 1.5, 2 倍の計 5 パターンの点灯時間で実験した。また、表 1 に記されている点滅周期は縦 32 列の画像の 1 周期の時間であり、一列あたりの点灯時間に 32 列分である 32 を乗算した値となっている。

表 1 点灯時間と点滅周期

Table 1 Illumination time and periods.

一列あたりの点灯時間 [ms]	点滅周期 [ms]
0.39	12.48
0.781	24.992
1.562	49.984
2.343	74.976
3.124	99.968

**[実験結果および考察]**

実験結果を図 6 に示す。点滅周期が点灯時間 1.562ms の 32 倍の約 50ms である (c) が正方形で写真に収まる形になった。また、点灯時間 2.343ms で点滅周期が 74.976ms の (d) と、点灯時間 3.124ms で点滅周期が 99.968ms の (e) の画像に関しては横に伸びていると感じた。これはすべてのピクセルを表示するために持続時間の 50ms では表示したい画像の一部しか映らなかったためである。全ての画像を意識したときの脳の補正が関係あると思われる。(e)の場合、イラストの半分も確認できないが、サッカーの持続時間を点滅周期に合わせて、サッカーの移動速度を遅くすれば (c) と同様の画像が取得できると考えられる。しかし、サッカーの移動速度は振幅で決まってくるので、光点列デバイスと観測者の位置関係が最重要となる。したがって、点滅周期はサッカーの移動速度と密接に関係していることがわかる。ディスプレイサイズに関しては、点滅周期ではなく画像の解像度の関係と一定の位置関係を保った状態での距離の増幅による観測者の認識に関係していると考えられる。

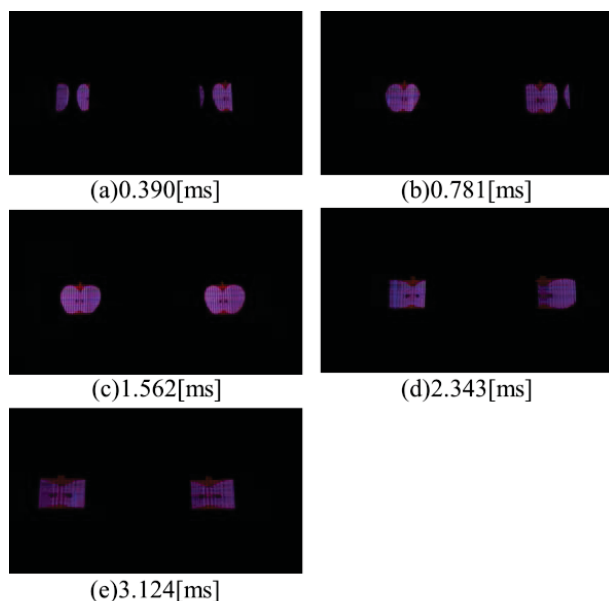


図 6 点滅周期を変化させたときの結果

Figure 6 Displayed images for various illumination time.

**②LED 拡散キャップの有無による色の感じ方**

LED をそのままの状態で使用すると、高速な眼球運動やデジタルカメラで撮影した際に、RGB の色が分離して見えてしまい、きれいに混色できない可能性がある。したがって、この実験では、LED に半透明タイプの LED 光拡散キャップを被せないときと、被せた場合の色の感じ方を比較検証する。その時の LED の写真を図 7 に示す。発光は RGB それぞれ 255 にしたときの光り方である。拡散キャップ無しの場合は図 7 (a) のように RGB が分離しているのが確認でき、図 7 (b) の拡散キャップ有りの場合では RGB が分離せずに混色しているのが観測できた。

実験方法としては、画像は同じイラストを使用し点滅周期とデバイス観測者の位置関係は固定して、被験者に違いを回答してもらう。また、デジタルカメラで撮影した画像も比較して結果を導く。

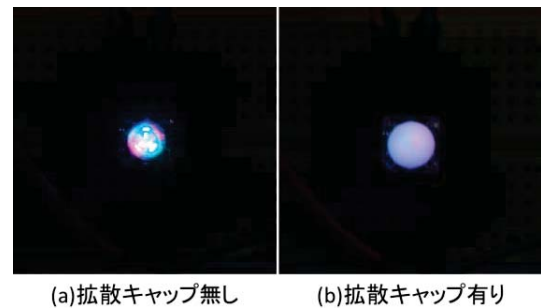


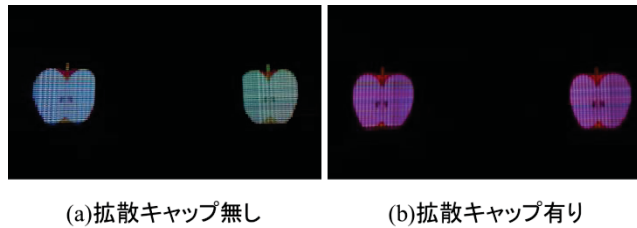
図 7 拡散キャップ有無の比較

Figure 7 Displayed image with and without diffusion optical cap.

**[実験結果および考察]**

点滅周期は一列 1.562ms のプログラムを使用した。デジタルカメラで撮影した結果を図 8 に示す。図 8 (a) はキャップ無しで撮影した写真であるが色が異なるのはデバイスの個体差であると考えられる。また、キャップ無しの場合では混色できておらず、RGB の色が分離してしまっている。被験者が観測した場合も色の分離が同様に観測できた。対象に図 8 (b) で示すキャップ有りの場合には混色できており比較的ソフトで柔らかい印象を受け、残像もキャップ有りのの方が知覚しやすいという結果が得られた。図 8 (b) は図 6 同様に全体的に赤っぽく表示された。これには二つの要因が考えられ、一つはデジタルカメラの性質的な問題だと考えられる。撮影対象の輝度差が大きいところでは、混色している部分の緑色の電子が黒色の電子の無い部分に流れ込み緑色が飽和されてしまい、結果的に赤色と青色が表現されるパープルフリッジという紫がかった画像になる現象が発生してしまう。もう一つは、波長の長い赤色が他の色より透過力が高く拡散キャップを透過するうえで光の減衰率が低かったためであると考えられる。可能性としては前者が有力であるが後者も可能性が無いとは限らないと考

えられる。これより、デジタルカメラで撮影する場合はパープルフリッジが発生しない方法を検討する必要がある。また、眼球運動によって残像を知覚させるためには何かしらの方法で RGB を混色させ、なおかつその混色に使用する素材の遮蔽率を考慮したうえで RGB の調光も必要と考えられる。



(a)拡散キャップ無し (b)拡散キャップ有り

図 8 拡散キャップ有無の結果

Figure 8 Displayed image with and without diffusion optical cap.

### ③残像で情報表示する場合、色によって知覚や認識に差がでるのか検証する実験

残像によって表示される画像の色と、元の画像の色を比較する実験を行った。この実験の目的は、RGB の数値的な値と人間が観測した時の感じ方に差が生じるかどうかを確認するためのものである。また、色によってその画像が認識しやすいか確認するためでもある。

実験は①と同じ方法で行い、LED の点灯時間は 1.562ms にした。表示する画像を図 9 に示す。形は変わらず色が変わっても不自然なものではない花のイラストを使用し、花びらの色だけを RGB のピークとその混色の 6 種類用意した。

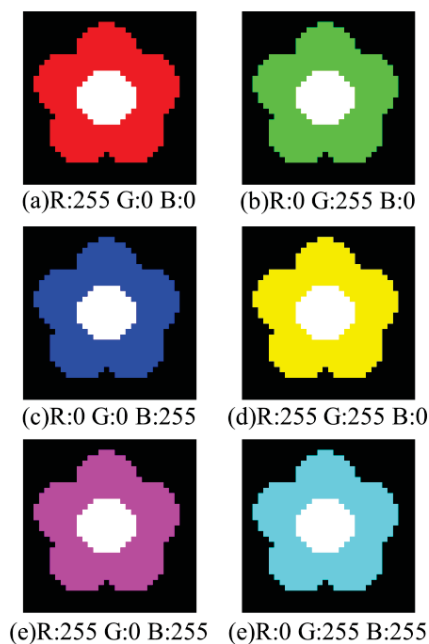


図 9 6 種類の元画像

Figure 9 6 kinds of evaluation image.

### [実験結果および考察]

デジタルカメラで撮影した結果を図 10 に示す。図 9 と比較すると (d) の R:255 G:255 B:0 が元画像と大きく結果が異なることが確認できた。これは②の実験でも発生した、デジタルカメラの性質の問題だと考えられる。しかし、実際には被験者はこのような黄色よりオレンジがかった色には知覚できず、図 9 (d) のような黄色に知覚された。

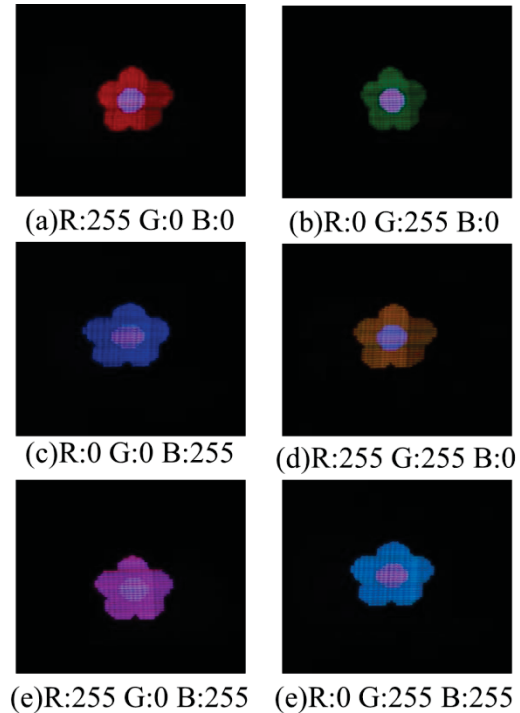


図 10 6 種類の実験結果

Figure 10 Experimental results for 6 kinds of evaluation image.

## 4. まとめ

本実験では、フルカラー光点列デバイスを使用し、残像によって表現される色や点滅周期やディスプレイサイズについて評価を行った。

表示文字の点滅周期はサッカードの持続時間より長いと、表示したい情報が全て提示できない。対象的に点滅周期がサッカードの持続時間よりも長すぎると 1 周期よりも多くの情報が提示されてしまう。点滅周期は持続時間に合わせる必要があり最も効率的な情報提示タイミングであることが確認できた。ディスプレイサイズに関しては点滅周期との密接な関係がないことが証明され、これに関与していることは解像度の問題と、デバイス観測者の位置関係による観測者の目視に対するデバイスのサイズの観測感であることが確認できた。拡散キャップの有無に関しては、無い場合は RGB が分離してしまうため、拡散キャップの装

着により混色を実現した方が良いという結果がデジタルカメラによる撮影と、被験者の回答により確認できた。最後に色味に関する実験については、被験者が実際に観測した残像とデジタルカメラで撮影した画像には違いがあることが確認できた。これはデジタルカメラの性質上の問題である可能性があるため、今後はこのような現象が起こらないように実験を進めていく。

今後は、今回よりも多くの色を用いて、補色などの色相関係や明度、彩度を考慮しつつ、残像と色の関係について詳しく調べる。今回の実験の結果を踏まえて今後は複数個のデバイスを使用した時のサッカードの運動観察を行い、その特徴を探りつつ、このシステムの有効性を確立させたい。

## 参考文献

- [1] 金澤宏介, 奥村万規子, “眼球運動による残像を利用した情報提示システムの評価実験”. 情報処理学会研究報告, Vol.2016-CDS-17, No2, pp.1-5, 2016
- [2] 日本視覚学会 編, “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, 2000.
- [3] 渡邊淳司, 前田太郎, “サッカードを利用した新しい情報提示手法の提案”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.79-87, 2001.
- [4] 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武厚, 前田太郎, 舘暲 “移動している観察者に対する Saccade-based Display を利用した情報提示の研究”. 電子情報通信学会, HIP2004-22, pp.69-73, 2004-7.
- [5] 渡邊淳司, 田畑哲稔, 前田太郎, 舘暲 “眼球運動を利用したディスプレイとパフォーマンスの融合”. 電子情報通信学会, HIP2003 15-28, pp.19-23, 2003-7.
- [6] 渡邊淳司, 前田太郎, 舘暲 “サッカード前中後に渡って提示される連続点滅光点刺激の知覚と眼球運動との時間関係”. 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J86, No.7, pp.1350-1357, 2003.
- [7] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 雨宮智浩, 前田太郎 “ウェアラブル・サッカード検出を利用した選択的視覚情報の研究”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.4, pp.505-512, 2005.
- [8] 有賀玲子, 斉藤英雄, 安藤英由樹, 渡邊淳司 “Saccade-based Display の特性を活かした呈示コンテンツの生成”. 日本バーチャルリアリティ学会, 第13回大会論文集(CD-ROM), ROMBUNNO.1A3-4, 2008-9.