

# 眼球運動と LED 残像を利用した情報提示システムの知覚評価

金澤宏介<sup>†1</sup> 奥村万規子<sup>†1</sup>

**概要:** 本研究では点滅している LED 光点列をサッカードと呼ばれる高速な眼球運動により残像を知覚させ、情報の提示を行う。光点列は表示情報を縦に分割して順次点滅させているため、表示情報を知覚するためには眼球運動と点滅周期の関係が重要である。

本論文では、光点列を二つ用意し、それらを横に設置し観測者に光点列を交互に見させることによりサッカードを無意識的に誘発させる。実験は、光点列の数と知覚の関係性、観測者と光点列の距離と知覚の関係性、光点列と被験者の位置関係による知覚の関係性、点滅周期と知覚の関係性の評価を行う。これらの実験より、光点列を二つにするとサッカードが誘発されやすく、光点列二つと観測者の位置関係では、眼球の「移動角度」を決める三点の位置関係が情報知覚に最も影響がある。また、点滅周期がサッカードの持続時間より長いと表示文字は横に伸びて知覚されることがわかった。

**キーワード:** サッカード, 残像, POV (Persistent Of Vision), ディスプレイ, 眼球運動, 視覚情報提示

## Evaluation experiment of the information-display system by using afterimage according to eyeball movement

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

**Abstract:** We optimized an afterimage type display using a line display with the “saccade” mechanism of high speed eyeball movement. In the afterimage type display, it is important to adjust the flashing frequency of line display with eyeball movement speed. In this paper, we developed novel afterimage display with two line displays located side by side and optimized the distance of them, displayed timing, frequency, brightness and illumination environment to control “saccade” eyeball movement speed. We found our display controlled “saccade” easily and the best viewing angle between two line-display was about thirty degrees.

**Keywords:** Saccade, Afterimage, POV(Persistent Of Vision), Display, Eyeball movement, Visual presentation

### 1. はじめに

二次元の広がりを持った情報提示手法として、図1のような POV (Persistent Of Vision) と呼ばれる手法がある。これは、あるパターンで点滅している光点列を物理的に高速移動させ、残像を発生させて二次元の情報を提示させるデバイスであり、玩具など多くの情報提示手法として使用されている。光点列を移動させて情報を提示する手法に対して、図2のような光点列は固定し人間の眼球が移動することによって生じる残像を知覚させる手法が提案されている[1][2]。この手法にはサッカードと呼ばれる眼球運動が利用されている。サッカードは日常の視覚環境において、興味を惹く対象物が視野の中で動いている場合に、その対象物を見るために視線を高速で向ける一過性の眼球運動であり、我々の日常生活で自然かつ頻繁に発生している。具体的な特性としては、運動速度が 300~500 度 / 秒、持続時間が約 50ms と知られている[1]。この手法は少ないエネルギーと少ないスペースで実現できるので、ウェアラブル端末の情報提示手法としての利用や、照明機器や電源ランプへの利

用が期待されている。

サッカードを誘発させる手法としては、注視点や視標と呼ばれる注目点を用いる手法がある[1]。また、舞台などでパフォーマンスを行っている人間に光点列を装着し、動いている身体によってサッカードを誘発し、観客に情報を提示する手法や、観測者が高速で移動している状態で、周りに光点列を配置することによって残像を知覚させる手法などがある[3][4][5]。一方、外部からサッカードの計測を行い、その計測値を使ってデバイスの点滅を制御し、特定の人のみに情報を提示する手法も提案されている。具体的には膜再帰反射法と言われる眼球に光を照射して網膜で反射した光を測定する手法や、EOG 法と言われる眼球の動きを電位の変化などで計測する手法などがある[6][7]。ただし、これらの手法は観測者が特別な装置を装着する必要がある。

本研究では特別な装置を装着せずに、また注視点や視標を使って意識的にサッカードを誘発させるのではなく、点滅する光点列を二つ用意し、観測者がその二つの光点列を交互に見ることによってサッカードを無意識的に誘発させる。また、本手法では、デバイス二つと被験者の三点の位置関係が知覚に影響を及ぼすと考えられるため、光点列と被験者間の距離を変化させ、知覚にどのような変化が得られるか、明らかにする。まずは、光点列一つの場合と二つ

<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.

の場合の比較を行い、次に、光点列二つの場合に、被験者との距離を変化させる。また、距離を変化させる実験をデジタルカメラでも撮影し、それらを比較する。デジタルカメラを使って、点滅の周期が知覚にどのような影響があるのかも検討する。

本論文の流れとして、第2章では本研究で提案する情報提示手法について説明し、第3章で本実験の内容や結果を述べる。第4章ではまとめ、第5章では今後の展望を記す。

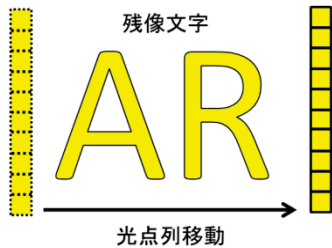


図1 POVによる残像表示  
 Figure 1 Afterimage display by POV.

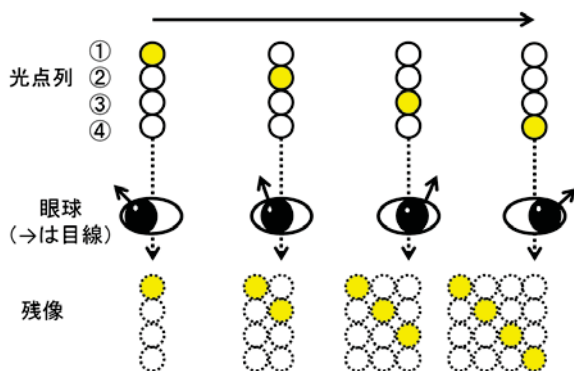


図2 眼球運動による残像知覚  
 Figure 2 Afterimage perception by eye movement.

## 2. 光点列二つの情報提示システム

### 2.1 本システム

本研究では、図3のように光点列を二つ用意し、注視点や視標などでサッカドを意識的に誘発させるのではなく、光点列自体でサッカドを無意識に誘発させる手法を提案する。

### 2.2 デバイス

デバイスは二つとも同じものを用意し、LEDは角型フルカラーLED(OSTA71A1D-1), npn トランジスタ(2SC1815GR), 抵抗 270Ωと2.7kΩをそれぞれ32個使用した。設計した回路図を図4に示す。

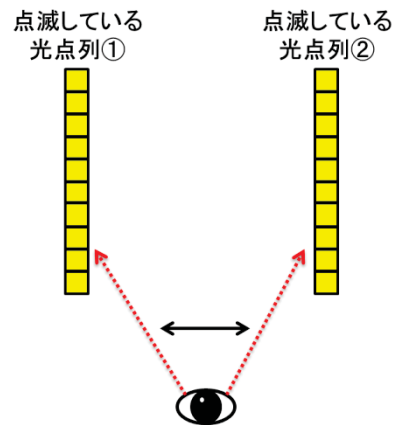


図3 光点列を二つ使用  
 Figure 3 two luminous point line

LEDは、赤色の単色のみを使用して実験を行った。左右非対称の像を提示すると眼球を動かした方向に依存して像の向きも変化するため[8][9], 今回の情報提示には図5のような左右対称の「◎」の文字を使用した。この「◎」のLED点滅プログラムは16×16ドットのディスプレイを想定し、縦はLED16個、横は時間で16列に分割する。実験では、1分割を1ms発光させ、その後に消灯時間として10ms設けている。したがって、一文字表示するのに26msかかることになる。消灯時間を設けた理由としてはこのプログラムはループしているの文字と文字の間に隙間を作るためである。LED点滅制御にはArduino MEGAを使用した。

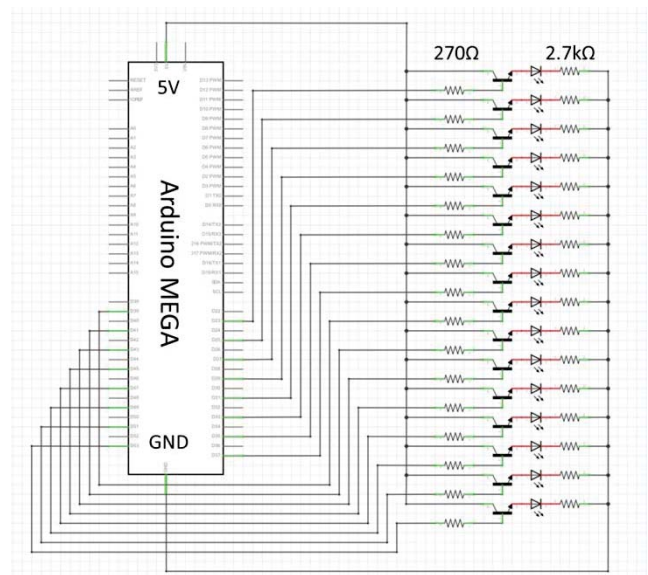


図4 回路図  
 Figure 4 Circuit diagram.

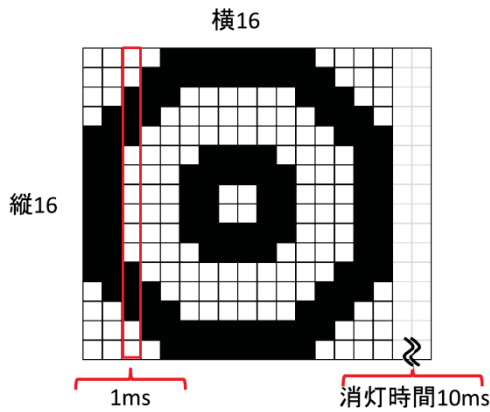


図 5 表示文字

Figure 5 Displayed character.

### 3. 位置関係と知覚に関する評価実験

この実験では 16 個の LED が一列に配置されている光点列デバイス一つ、または二つ使用し、ある一定のパターンで点滅させ、被験者にどのように情報を提示できるかを評価する実験を行う。以下にその実験内容の詳細を示す。

- ① 光点列を一つ用いた場合と二つ用いた場合の見え方に関する評価実験
- ② 光点列を二つ用いた場合、被験者と光点列の距離、及び角度に関する評価実験
- ③ デジタルカメラを使用して②と同じ条件で撮影し、②の結果と比較する実験
- ④ 点滅周期を変化させたとき、デジタルカメラで撮影した表示文字にどのような変化があるのか検証する実験
- ⑤ 角度を固定した場合の見え方に関する実験

本実験で実施した官能評価は被験者 10 名に対して行う。官能評価はリッカート尺度で行い、見えやすさの度合いを図 6 に示す。評価シートには、見え方の自由記述欄も設けた。この官能評価で得られた結果とカメラで撮影した画像と比較し、光点列と被験者の位置関係による見え方の特徴を検討する。

### サッケードを利用した情報提示システムに関する官能評価実験

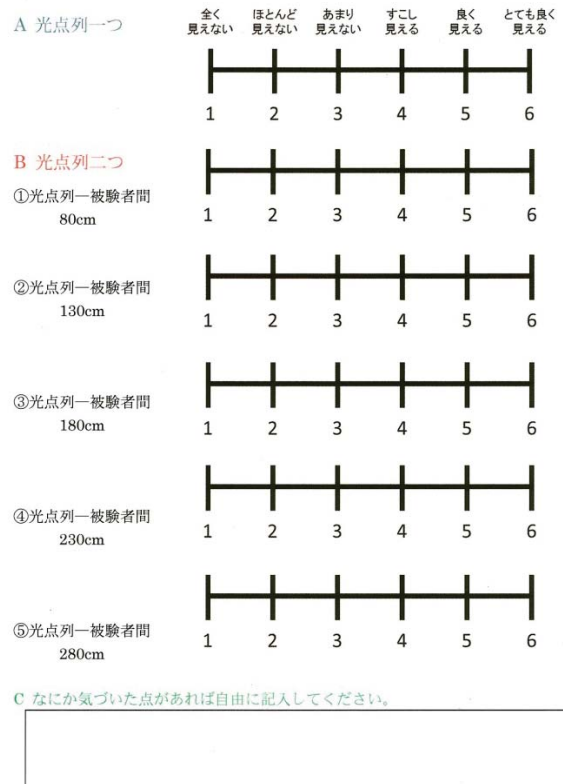


図 6 実験で用いた評価シート

Figure 6 The assessment sheet used in the experiment.

#### ①光点列を一つ用いた場合と二つ用いた場合

光点列を一つ使用した場合の被験者とデバイスの位置関係を図 6 に、光点列を二つ使用した場合の被験者とデバイスの位置関係を図 7 に示す。どちらも光点列を目線の高さに設置し、被験者は距離 180cm の位置にある椅子に腰を掛けてもらい、点滅している光点列を見てもらう。この実験は、光点列一つと光点列二つでは見え方が違うのかを明確にするのが目的である。

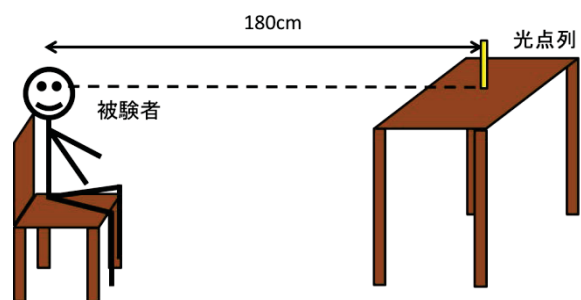


図 7 光点列一つの位置関係

Figure 7 The physical position relationship of one luminous point line

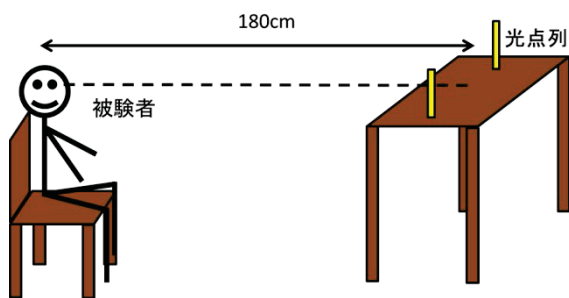


図 8 光点列二つの位置関係

Figure 8 The physical position relationship of two luminous point line

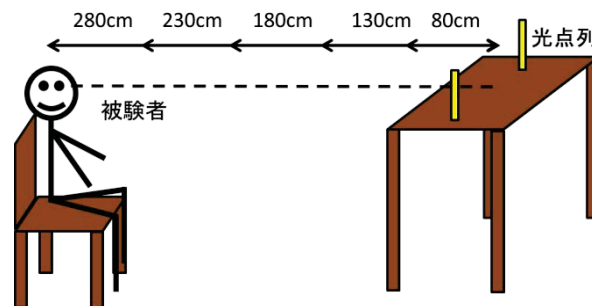


図 10 光点列二つの位置関係(横)

Figure 10 The physical position relationship of two luminous point line(side).

**[実験結果および考察]**

光点列を一つと二つの場合の官能評価の結果を図 8 に示す。光点列が二つのときの方が、一つのときと比べてよく見えていることがわかる。光点列が一つの場合でも知覚はできることが確認できたが、眼球を光点列の周りで無理やり動かさなければならず、眼球疲労が感じられたとの意見が複数あった。これより、光点列が二つのほうが、眼球疲労を伴わず、サッカードを誘発させやすいことがわかった。

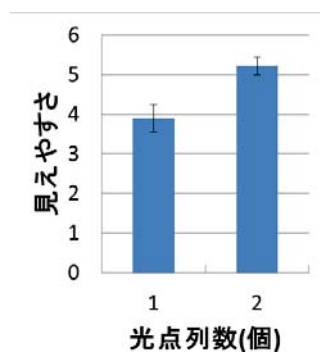


図 9 光点列の数と見えやすさに関する官能評価結果

Figure 9 Sensory evaluation result of relations between the numbers of the lines and visibility.

**②被験者と光点列の距離の関係**

この実験では光点列を二つ使用した場合に、被験者と光点列間の距離及び角度が知覚にどのような影響があるのかを検証する。被験者と光点列二つの位置関係を図 9 と図 10 に示す。二つの光点列間の距離を 100cm とし、被験者はそのデバイス間の中間地点、両方から 50cm の位置から垂直に 80cm, 130cm, 180cm, 230cm, 280cm の 5 パターンの距離でそれぞれの見え方について評価する。そのときの対応角度は 64.0°, 42.0°, 31.0°, 24.6°, 20.2° となる。プログラムは光点列一つのとおりものを使用する。

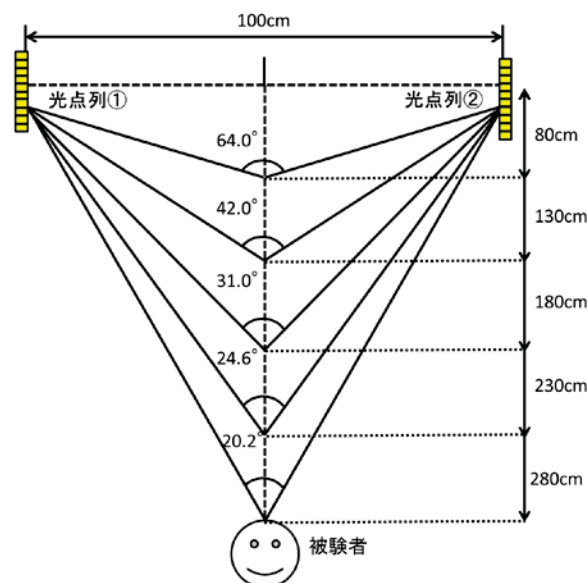


図 11 光点列二つの位置関係(上)

Figure 11 The physical position relationship of two luminous point line(up).

**[実験結果および考察]**

光点列二つの場合の距離を変化させた知覚の違いについての結果を図 11 に示す。グラフから読み取れるように、距離 80cm から 230cm では、いずれも見やすさは 4.5 以上であり、180cm, 角度 31.0° のときの知覚率が最も高かった。一方、一番知覚率が低かったのは距離 280cm, 角度 20.2° のときであった。知覚率に、距離と角度のどちらの影響が大きいかを明らかにするために、後で述べる実験⑤では、角度を固定して、距離を変化させる実験を行う。

また、距離が離れていくにつれて、表示文字が横に伸びたように知覚されたとの報告があった。この原因についての考察は、デジタルカメラによる画像比較実験③の結果の後で述べる。



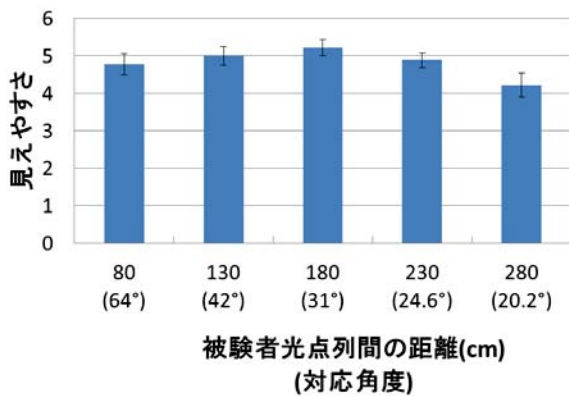


図 12 光点列二つ場合の被験者光点列間の距離と見えやすさに関する官能評価結果

Figure 12 Sensory evaluation result of relations between the distance of two lines and visibility.

### ③デジタルカメラによる画像の取得

被験者をデジタルカメラに置き換えて、②と同じ条件で撮影し、画像を取得する。サッカードの持続時間が約 50ms と知られているため[7]、シャッタースピードはサッカード持続時間に対応させ 50ms に設定し、左の光点列から右の光点列またはその逆の方向へカメラを移動させ残像を撮影する。

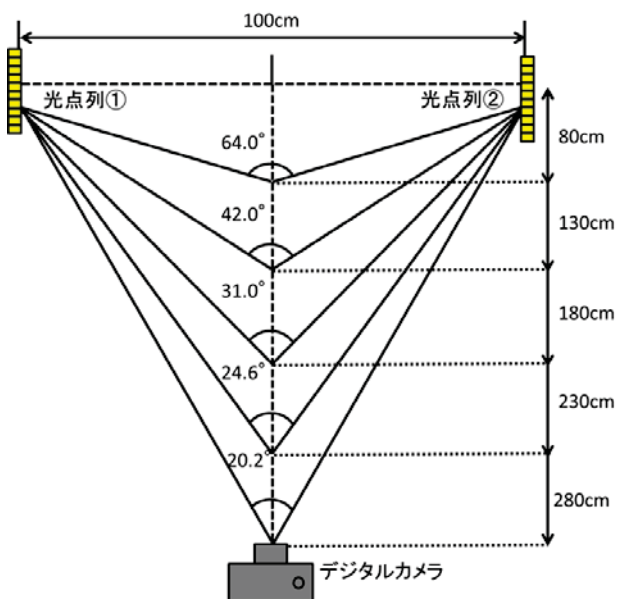


図 13 カメラを使用した際の位置関係

Figure 13 The physical relationship when using a camera

#### [実験結果および考察]

デジタルカメラでの撮影結果を図 13(a)~(e)に示す。カメラ撮影では、距離を変化させると、画像が小さくなるが、形はほぼ同じであった。また、この実験では、サッカードの持続時間である 50ms と同じシャッタースピードで撮影し、プログラムの点滅周期は 26ms であるため、光点列の

周りに残像文字は二つ写る結果となった。一方、官能評価では、殆どの方が、見える画像は一つであり、この違いは人間の場合、二つ目の円は、周辺視に入って見えなくなることによって起因するものと考えられる。

官能評価の結果では、距離が長くなるにつれて文字の形が横に伸びるとの報告があったが、カメラで撮影した場合、そのような変化は見受けられず、すべての画像で元の円形とほぼ同じの形となった。これは、カメラではシャッタースピードを 50ms に固定して撮影していたので、距離を変化させても、同じような形を保つことができた。一方、サッカードは図 14 に示すように光点列被験者間の距離により、眼球の移動角度が変化し、その結果、知覚の形が変形したものと考えられる。つまり、距離が近いと、眼球の移動角度が大きくなり、サッカードの持続時間が長くなると考えられる。反対に、距離が遠いと、移動角度が小さくなり、サッカードの持続時間が短くなる。この実験では、光点列の点滅周期は一定であるから、距離が遠くなると、相対的に、点滅周期より、サッカード継続時間が短くなることになる。これより、光点列の点滅周期がサッカード継続時間より、長くなると画像が横に伸びることが予測される。

そこで、次の実験では、この現象をデジタルカメラの撮影で実現することにした。表示文字の点滅周期が、シャッタースピードより長い場合、表示文字は横に伸びると考えられる。

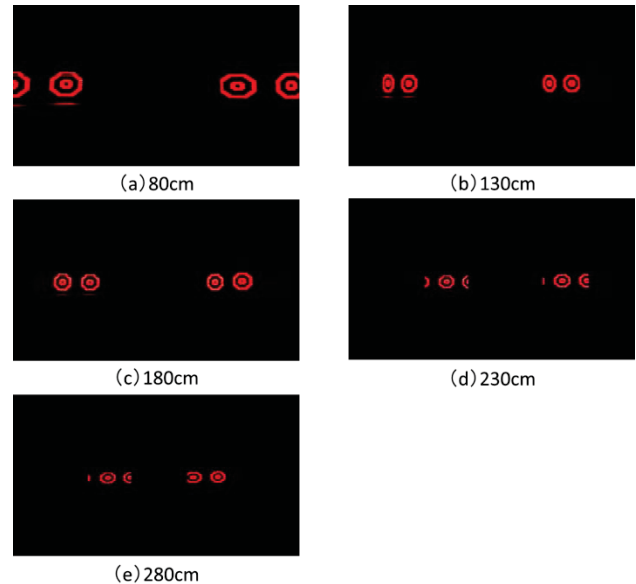
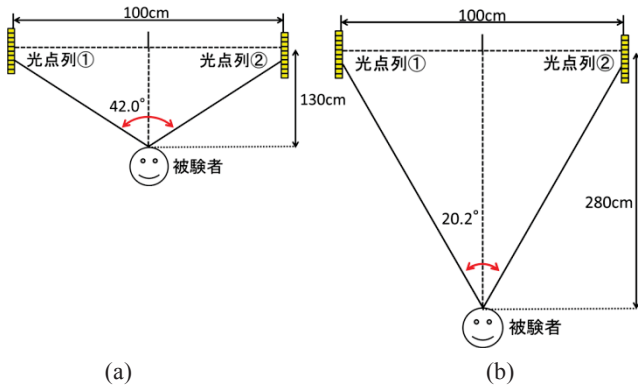


図 14 光点列一被験者間の距離を変化させたときの撮影画像

Figure 14 The photography picture when changing the distance



(a) (b)  
 図 15 角度が違う場合のサッカードの持続時間  
 Figure 15 The duration of Saccade when the angle is different

#### ④点滅周期と知覚情報との関係

点滅周期を変化させ、一定のシャッタースピードで、デジタルカメラで撮影する実験を行う。前節では1ドットの点灯時間を1msに固定して実験を行っていたが、今回は1msとは別に1ドットの点滅時間を2ms, 3ms, 5msと変えて光点列被験者間の距離が180cmの位置から撮影した。

#### [実験結果および考察]

図 15(a)~(d)は1ドットの点灯時間を2ms, 3ms, 5msと変化させて撮影したものである。これより、点滅周期が長くなると画像が横に伸びることが確認できた。

点滅周期を長くすると、画像は横に伸びるから、これを避けるためには、表示ディスプレイの縦サイズを大きくすれば良いことになる。このように、点滅周期の最適値はディスプレイのサイズに関連があることもわかった。

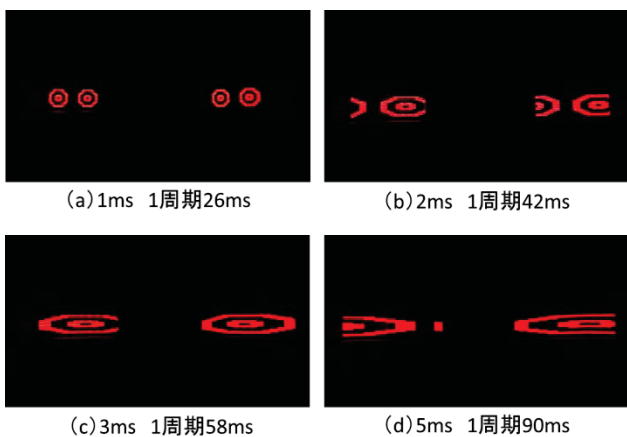


図 16 点滅周期を変えたときの撮影画像  
 Figure 16 The photography picture when changing the flash cycle

#### ⑤角度を固定した場合

官能評価の結果より、最も知覚率の高かったのは距離が180cm、角度が31.0°であったが、知覚に影響があるのは、距離と角度のどちらなのかを検証するために、角度を一定にして、距離を変化させて実験を行う。実験条件としては角度を31度に固定し、その角度に対応するように被験者光点列間の距離と光点列間の距離を変化させた。その位置関係を図 16 に示す。

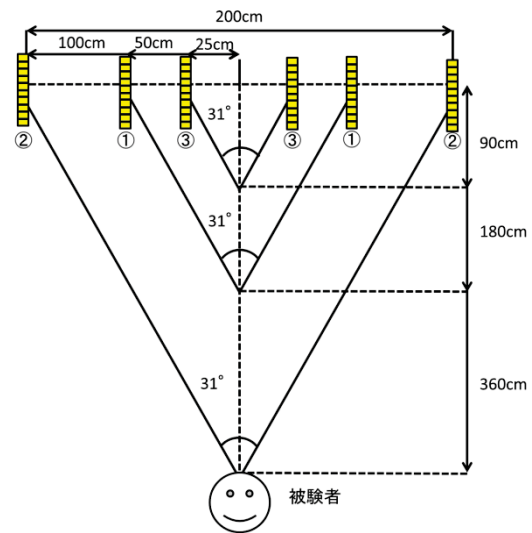


図 17 角度を固定した位置関係  
 Figure 17 The physical relationship on angle fixing.

#### [実験結果および考察]

距離が離れても横に伸びることはなく、180cmのときと同じような文字が知覚できた。このことから、距離ではなく、角度が最も重要であることがわかった。

#### 4. まとめ

本実験では、光点列を二つでサッカードを誘発させ、光点列を二つ使用することによって知覚にどのような影響があるのかを官能評価を通して明らかにした。また、光点列の点灯時間を変化させることによって知覚にどのような影響があるか検証した。

光点列を二つにすると、光点列一つの場合よりサッカードが誘発されやすく、知覚されやすいことが分かった。二つの光点列と被験者の位置関係を31.0°のラインに光点列配置すると最も良く知覚できることがわかった。また、デジタルカメラで光点列二つの実験と同じ環境でデータを取得した結果、サッカードは眼球の移動角度によってその持続時間が変化していることがわかった。また、点滅周期を変えることによって知覚に影響があることがわかった。

具体的には周期を長くすると残像は横に伸びるので、この点滅周期は、表示させたい横ドットの数や縦のディスプレイのサイズに関係があることがわかった。

## 5. 今後の展望

今後は今回の結果を踏まえ、光点列を二つより多い複数個設置した場合にどのような結果が得られるか、また、表示文字をフルカラー化し、色や形が知覚に影響を及ぼすかどうかの検証も行う。デバイスも LED の数を増やし、大きなディスプレイを想定して実験を行える環境を整え、改めて点滅周期とディスプレイサイズの関連性を検証する。色によって残像の持続時間が違う可能性があるため、様々な色を使用して実験を行いその特性を探る。

## 参考文献

- [1] 渡邊淳司, 前田太郎, “サッカーボール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.
- [2] 渡邊淳司, 前田太郎, 館暲 “サッカーボール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.86, No.7, pp.1350-1357, 2003.
- [3] 渡邊淳司, 安藤英由樹, 関口大陸, 前田太郎, 館暲 “網膜再帰反射を利用した遠隔サッカーボール検出手法の研究”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.105-113, 2004.
- [4] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 雨宮智浩, 前田太郎 “ウェアラブル・サッカーボール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.
- [5] 渡邊淳司 “VR 技術の舞台芸術への応用”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.9, No.1, pp.25-27, 2004.
- [6] 渡邊淳司, 田畑哲稔, 前田太郎, 館暲 “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.
- [7] 渡邊淳司, 坂本憲久, 則武厚, 前田太郎, 館暲 “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.
- [8] 有賀玲子, 齊藤英雄, 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.
- [9] 有賀玲子, 齊藤英雄, 安藤英由樹, 渡邊淳司, “Saccade-based Display のためのコンテンツ設計と印象評価”. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.15, No.3, pp.471-474, 2010.