

# サッカード型ラインディスプレイ観測時における 眼球運動の角度測定

川崎直紀<sup>1</sup> 奥村万規子<sup>1</sup>

**概要:** 縦一列に固定された LED を高速に点滅させ、サッカードと呼ばれる高速眼球運動を利用して網膜上に 2 次元の画像を知覚させるラインディスプレイを開発してきた。本報告では、ラインディスプレイ観測時の眼球運動の角度を求めることを目的として、眼球運動測定装置 Pupil Core を装着し、瞳孔の動きを記録し、これをもとに眼球運動の角度を計算するプログラムを作成した。求めた角度の精度を実験で検証した結果、15 [°] 以内の範囲では誤差が 0.6 [°] 以下になった。また、夜間屋外でのラインディスプレイ観測実験では、被験者が Pupil Core を装着し、点滅周期を変化させたときの知覚の最適距離を測定した。点滅周期と最適距離、点滅周期と眼球運動の角度の関係を評価した結果、最適距離が長い被験者は角度が小さく、最適距離が短い被験者は角度が大きかった。

**キーワード:** ラインディスプレイ, Pupil Core, 眼球運動測定, 角度

## Measurement of eye movement angle during saccade-based line display observation

NAOKI KAWASAKI<sup>†1</sup> MAKIKO OKUMURA<sup>†1</sup>

**Abstract:** We have been developing a line display that perceives a two-dimensional image on the retina by using high-speed eye movements called saccades, which are caused by flashing LEDs fixed in a vertical row at high speed. In this report, we developed a program that calculates the angle of eye movement based on the pupil movement recorded by the Pupil Core, an eye movement measurement device, in order to determine the angle of eye movement during line display observation. The accuracy of the calculated angle was verified by experiments, and the error was less than 0.6 [°] within a range of 15 [°]. In the line display observation experiment outdoors at night, the subject wore the Pupil Core and the optimal distance of perception was measured when the flashing period was varied. As a result of evaluating the relationship between the blinking cycle and the optimal distance, and between the flashing cycle and the angle of eye movement, it was found that the angle was smaller for subjects with a longer optimal distance and larger for subjects with a shorter optimal distance.

**Keywords:** Line display, Pupil Core, Eye movement measurement, angle

### 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に視線を向けるための視線運動を繰り返し行っており、この速い眼球運動をサッカードと呼ぶ[1]。サッカードの最高速度は 300~500 [°/s]、持続時間は 30~50 [ms]で、振幅が大きくなるにつれて回転速度が速くなり、持続時間が増加する[2]。また、サッカード中は視認性が低下するサッカード抑制が生じるが、背景の輝度が低い場所(暗室・夜間屋外)は低減し、視認しやすくなる[3]。このサッカードを利用して網膜上に二次元画像を知覚する情報提示手法が提案されている[4][5]。この手法は、固定された縦一列の LED を高速点滅させ、その間にサッカードを行うことで、二次元の画像を知覚することができる。物理的に存在する表示部は縦一列の LED のみであるため通常の二次元ディスプレイと比べて省スペースで情報提示が可能なことや、高速に点滅しているため注視した際は連続して点灯している直線状の光の見えるといったことがある。これを応用することによ

り、景観を損なわないデジタルサイネージや情報を組み込んだ街灯の実現や、イルミネーションなどを実現できる。

これまでの研究では、フルカラーLED32 個を使用したラインディスプレイを製作し、これを 2 基用いて被験者の位置関係や点滅周期による知覚への影響を評価し、最適な周期やサッカードの振幅を明確にした[6][7]。また、LED64 個を 5 階調で点灯可能なラインディスプレイを製作し、距離ごとの知覚に最適な点滅周期を求めた[8][9]。

点滅周期における知覚最適距離の実験[10]では点滅周期ごとの知覚最適距離を計測したが、被験者によって個人差のばらつきがあった。また、測定値と計算値の比較において一部差が大きくなった。これは、観測する画像の大きさが距離を離れることにより小さくなり、視認しづらくなったことが考えられる。我々は観測距離や被験者によっては眼球運動の角度が変わっているのではないかと考えた。

そこで本研究では、ラインディスプレイを用いて、点滅周期ごとの表示された画像を歪みなく知覚できた知覚最適距離において被験者の眼球運動を測定する。また、表示す

<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.

る画像の大きさを2種類に分け、観測距離や画像の大きさによる眼球運動の角度の変化を調査する。

本研究では、眼球運動の瞳孔の動きを計測するために Pupil Core を使用する。Pupil Core で記録される二次元上における瞳孔の中心座標と楕円の半径データから python で眼球運動の角度を求めるプログラムを作成する。計算した角度の精度を検証するために、顎固定台を用いて Pupil core を装着した被験者を固定し、あらかじめ角度が分かっている指標に視線を向け、実際の眼球角度と計算した角度の違いを評価する検証実験を行った。また、夜間屋外でのラインディスプレイ観測時における眼球運動測定の実験では、設定した点滅周期ごとのラインディスプレイから表示された画像を歪みなく知覚できた知覚最適距離において、Pupil core を装着した被験者の瞳孔の動きを測定し、開発したプログラムにより眼球運動の角度を計算した。

本報告では第2章で角度と点滅周期による画像の視認性について述べ、第3章では使用するラインディスプレイを述べる。また、第4章では角度計算方法について述べ、第5章では角度の精度検証について述べる。第6章では夜間屋外でのラインディスプレイ観測の実験について述べる。

## 2. 角度と点滅周期による画像の視認性

サッカーボールを利用してラインディスプレイから出力される画像を視認するとき、サッカーボールの角度及び速度とラインディスプレイの点滅周期によって画像の見えやすさが変わる[4]。光源が網膜上に移動した距離  $l$  は以下の式で求められる。

$$l = v \times t_m$$

ここで、 $v$  は眼球運動の速度で、 $t_m$  は点滅周期を示す。この光源が網膜上に移動した距離  $l$  がラインディスプレイの画像1ライン分の大きさ  $\varphi$  と同じ大きさ ( $l = \varphi$ ) になると、画像が歪みなく視認することが出来る。 $l$  が  $\varphi$  よりも小さい ( $l < \varphi$ ) と画像細く見え、大きい ( $l > \varphi$ ) と横長く見える。画像1ライン分の大きさ  $\varphi$  は以下の式で求められる。

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{d}{L} \right)$$

ここで、 $d$  は1ライン分の横幅で、 $L$  はラインディスプレイとの距離を示す。1ライン分の横幅  $d$  はラインディスプレイの縦の大きさを画像の縦の画素数で割ることで表せる。

## 3. 使用するラインディスプレイ

使用するラインディスプレイを図1に示す。本研究で使用するラインディスプレイはフルカラーLED128個を使用し、信号を送るマイコン基板1枚とLEDを駆動するLED駆動回路基板8枚と1枚の基板に16個のLEDが設置されているLED基板8枚から構成されている。LEDが128個で、高さが1.384[m]、LED同士の間隔は3.19[mm]、1ラ

イン分の大きさ  $\varphi$  は10.81[mm]である。

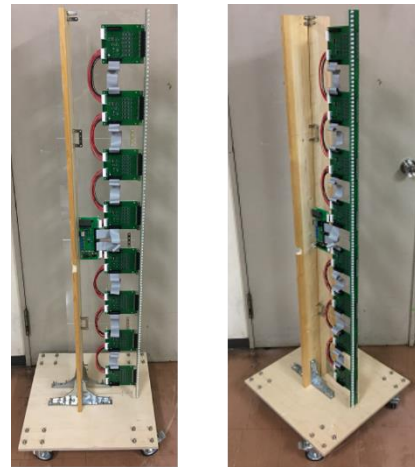


図1 使用するラインディスプレイ

## 4. 角度計算方法

実験において、瞳孔の動きを計測するために、本研究では、Pupil Labs社開発のPupil Core[11]を使用する。Pupil Coreを実際に装着したときの写真を図2に示す。アイトラッキングカメラ搭載のヘッドセットで、サンプリング周波数は200[Hz]、正確度(Accuracy)は0.60[°]、精度(Precision)は0.02、重さは22.75[g]と手軽で屋外での観測も容易である。

Pupil Coreで記録される瞳孔画像を図3に示す。赤い点は瞳孔の中心、赤い枠は瞳孔の大きさ、青い円は目を動かしたときの瞳孔中心の範囲を示す。Pupil Coreでは二次元上における瞳孔の中心座標と楕円の半径データと瞳孔の動画が記録される。これらのデータを用いてpythonで眼球運動の角度を求めるプログラムを作成する。角度を求める計算方法としては松田氏の「汎用視線位置計測システム」の論文を参考に[12]。角度を求めるためには「眼球回転中心座標」と「瞳孔回転半径」と「瞳孔中心座標」が必要となる。「瞳孔中心座標」はPupil Coreの瞳孔の記録データから取得する。最初に「眼球回転中心座標」を求めるために、サンプリングした複数のデータから、瞳孔の楕円の短軸の延長線の交点を最小二乗法で求める。次に、「瞳孔回転半径」を求めるために、XY平面と視線ベクトルのなす角度  $\theta'$  を以下の式で求める。

$$\theta' = \sin^{-1} \left( \frac{\text{瞳孔の短軸の半径}}{\text{瞳孔の長軸の半径}} \right) \quad (1)$$

瞳孔回転半径  $R$  を以下の式で求める。

$$R = \frac{\sqrt{(X_c - X_o)^2 + (Y_c - Y_o)^2}}{\cos \theta'} \quad (2)$$

ここで、 $X_o, Y_o$  は XY 平面の眼球回転中心座標、 $X_c, Y_c$  は瞳孔中心座標である。次に、3次元空間における瞳孔中心座標  $Z_c$  を以下の式で求める。

$$Z_c = \sqrt{\bar{R}^2 - (X_c - X_o)^2 - (Y_c - Y_o)^2} \quad (3)$$

ここで、 $\bar{R}$  は(2)式で求めた瞳孔回転半径の平均値である。最後に、視線ベクトル  $\vec{a}$  と  $\vec{b}$  のなす角  $\theta$  を以下の式で求める。

$$\theta = \cos^{-1} \left( \frac{|\vec{a} \cdot \vec{b}|}{|\vec{a}| |\vec{b}|} \right) \\ = \cos^{-1} \left( \frac{X_c X_p + Y_c Y_p + Z_c Z_p}{\sqrt{X_c^2 + Y_c^2 + Z_c^2} \sqrt{X_p^2 + Y_p^2 + Z_p^2}} \right) \quad (4)$$

ここで、 $X_c, Y_c, Z_c$  は視線ベクトル  $\vec{a}$  の瞳孔中心座標、 $X_p, Y_p, Z_p$  は視線ベクトル  $\vec{b}$  の瞳孔中心座標である。(1)~(4)式をもとに python でプログラムを作成し、眼球運動の角度を算出する。



図 2 Pupil Core を装着したときの写真

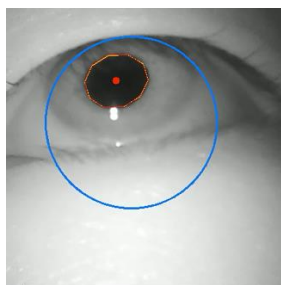


図 3 Pupil Core で記録される瞳孔画像

## 5. 角度の精度検証

### 5.1 目的

Pupil Core を屋外の実験で使用する前に精度検証を行う。第4章で述べた計算方法をもとに Pupil Core で記録された瞳孔の中心座標と半径のデータから角度を計算し、誤差を検証する。

### 5.2 実験方法

実験配置図とモニターに表示する指標と設定した各角度の図を図4に、実験環境の写真を図5に示す。実験は環境照度 0.1 [lx] の暗室内で行い、株式会社 NAMOTO TDK-UK1 の視覚実験用顎台を使用して被験者の顎を固定する。モニターと 50 [cm] の距離をとり、高さは指標と同じ高さになるように被験者ごとに合わせた。モニターの背景は黒にして、指標は周りを白にして中心に黒い点の大きさ 0.258 [°] に設定し、被験者は中心の黒い点を見る。被験者の左目と右目の距離の中心に 0 [°] の指標を設置し、角度は水平方向に 0, 5, 10, 15, 20 [°] を左右に設定した。指標はモニターに角度が小さい順に1つずつ表示される。被験者は4名でそれぞれメガネやコンタクトで視力 1.0 に矯正し、Pupil Core を装着した。記録した瞳孔の座標データをもとに第4章で述べた角度計算方法をもとに求めた角度と設定した角度の誤差を調べる。ここでの誤差とは、計算した角度と指標の角度の差の絶対値を示す。また、本実験では被験者の左と右それぞれの瞳孔の座標データが記録されるが、より精度の良い方の目を利き目とした。

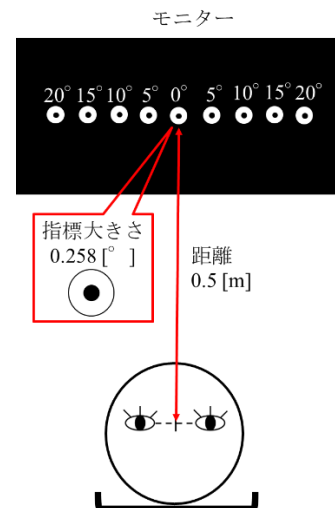


図 4 実験配置図と設定した角度



図 5 実験環境の写真

### 5.3 実験結果

各被験者を S0~S1 とし、被験者 S1 と S3 は裸眼で、被験者 S0 は眼鏡、被験者 S3 はコンタクトである。被験者 S0 の右目の眼球運動の角度の結果を角度と時間で表したグラフを図 6 に示す。図 6 は横軸を時間とし、縦軸を計算した角度とし、中心を 0 [°] とし、中心から右に目を動かしたときに正の値とし、中心から左に目を動かしたときに負の値とした。各ピーク値の角度を平均化し、前後の 0 [°] 指標からの変化量を角度とした。

各被験者の指標角度ごとにおける計算した角度の誤差を図 7、平均と標準偏差を表したものを図 8 に示す。図 7 の実験結果は左と右の同角度の誤差を平均したものを表している。実験結果から、5 [°] のときはどの被験者も誤差が最も少ないが、指標の角度が大きくなるにつれて、計算した角度の誤差も大きくなり、ほとんどの被験者は 20 [°] のときに最も誤差が大きい。図 8 より、15 [°] 以下では誤差が 0.6 [°] 未満となり、Pupil Core のデバイス性能の角度誤差 0.6 [°] 以内と同じになったが、20 [°] は誤差が 0.6 [°] 以上となった。日常生活で発生するサッカーの角度は 10 [°] 前後が多いとされ[13]、その範囲内では良好な結果が得られた。

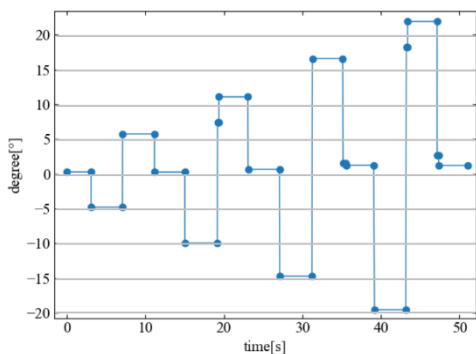


図 6 被験者 S0 の眼球運動の角度と時間のグラフ

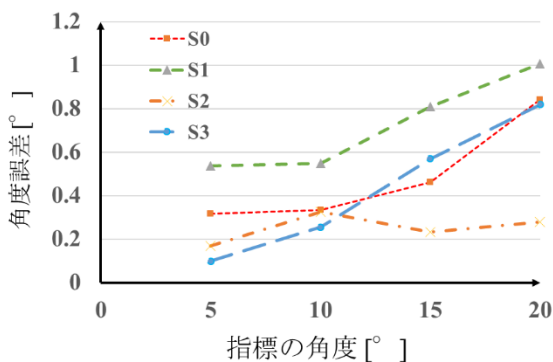


図 7 各被験者の指標ごとの計算した角度の誤差

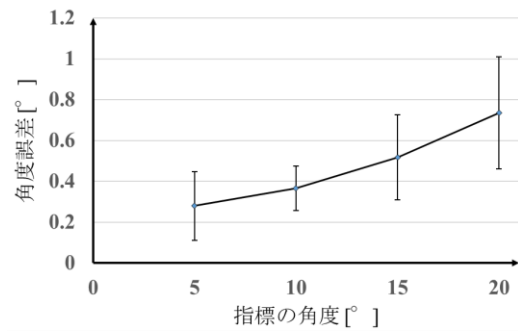


図 8 角度の誤差の平均と標準誤差

## 6. 夜間屋外でのラインディスプレイ観測の実験

### 6.1 目的

本実験では、夜間屋外においてラインディスプレイの観測時に被験者が Pupil core を装着し、二次元上における瞳孔の中心座標と楕円の半径データを測定する。録画した測定データから被験者の観測時の眼球運動の角度を計算する。また、ラインディスプレイの LED の点滅周期や被験者との距離、画像の大きさの違いによる角度を計測する。

### 6.2 実験方法

実験配置図を図 9、実験風景の写真を図 10 に示す。夜間屋外での環境照度は 0.1 [lx] で、被験者はラインディスプレイの中心となるように椅子に座り、Pupil Core を装着する。また、まっすぐ向いた時の目線の高さがラインディスプレイの中心となるように調整した。使用する画像は黄色の星で、大きさは 64×64 [pixel] と 128×128 [pixel] の 2 種類を使用する。本実験では、点滅周期を 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 [ms] に設定し、点滅周期ごとに画像を出力する。このとき、被験者は指標なしで自由に目線を左右にラインディスプレイを通り過ぎるように見てもらう。視認した黄色の星の画像が細く見えたり、横に広がって見えたりせずに、最も歪みなく画像が視認できる距離までラインディスプレイを中心のまま被験者は前後に移動する。歪みなく視認できたときのラインディスプレイと被験者の距離を適性距離とする。

実験でのラインディスプレイの表示を図 11 に示す。適性距離を定めた後、Pupil Core での録画を開始する。最初、ラインディスプレイの中心に赤い点の指標を表示させ、被験者はその赤い点を注視する。このときの角度を 0 [°] と設定する。次に黄色の星の画像を出力し、被験者は 15 秒間視線を左右に移動させ画像を視認する。15 秒後、再びラインディスプレイに赤い点の指標を表示させ、被験者はその赤い点を注視する。その後、録画を終了する。次に点滅周期を変えて再び被験者に知覚最適距離を定めてもらい、その後録画を開始する。この記録の動作を点滅周期ごとに、画像の大きさ変えて行い、計 12 回眼球運動を測定する。被

験者は第5章の精度検証の実験と同じ4名でそれぞれメガネやコンタクトで視力を1.0に矯正する。また、データの解析は利き目の結果を用いた。

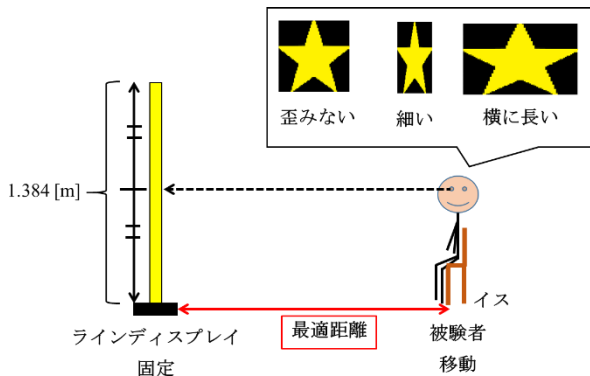


図9 実験配置図



図10 実験風景の写真

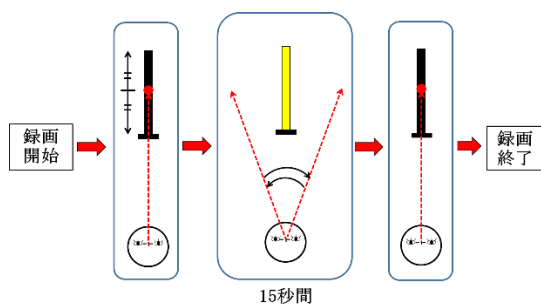


図11 実験でのラインディスプレイの表示

### 6.3 実験結果

被験者 S1 の左目の眼球運動の角度の結果を角度と時間で表したグラフを図12に示す。図12のグラフは図6のグラフと同様で中心と目の左右の動きの角度を表している。本実験の眼球運動の角度の計算結果として、図12のグラフのそれぞれ正と負のピーク値の平均を求め、絶対値を足して眼球運動の角度とした。

各被験者の点滅周波数ごとの知覚最適距離を図13に示す。図13(a)は画像の大きさが64×64 [pixel], (b)は128×128 [pixel]の場合である。図14は平均と標準偏差を表し

たものである。また、点滅周波数ごとの眼球運動の角度を図15に、平均と標準偏差を図16に示す。

点滅周波数ごとの知覚最適距離の結果では、点滅周波数が大きくなるにつれて知覚最適距離が大きくなった。画像が大きくなったとき、平均で1.86 [m]距離が伸びた。点滅周波数ごとの眼球運動の角度は、平均値で40~60 [°]となり、点滅周波数が大きくなるにつれて角度が小さくなった。64×64 [pixel]では点滅周波数3.3 [kHz]から20 [kHz]で約9 [°], 128×128 [pixel]では約18 [°]小さくなった。また、図13と図15を比較すると、最適距離が長い被験者は角度が小さく、最適距離が短い被験者は角度が大きくなるのがわかった。このことから、知覚最適距離が被験者によって変わるのはラインディスプレイ観測時の眼球運動の角度が異なるからと考えられる。

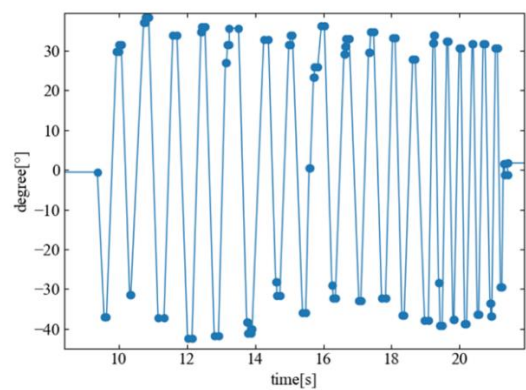


図12 被験者 S1 の眼球運動の角度と時間のグラフ

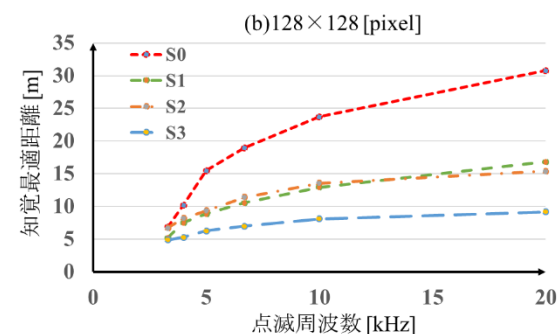
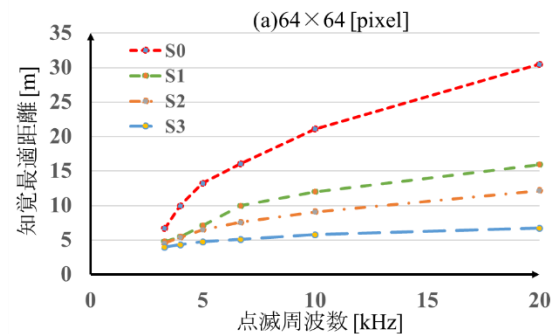


図13 各被験者の点滅周波数ごとの知覚最適距離 (a)64×64 [pixel] (b)128×128 [pixel]

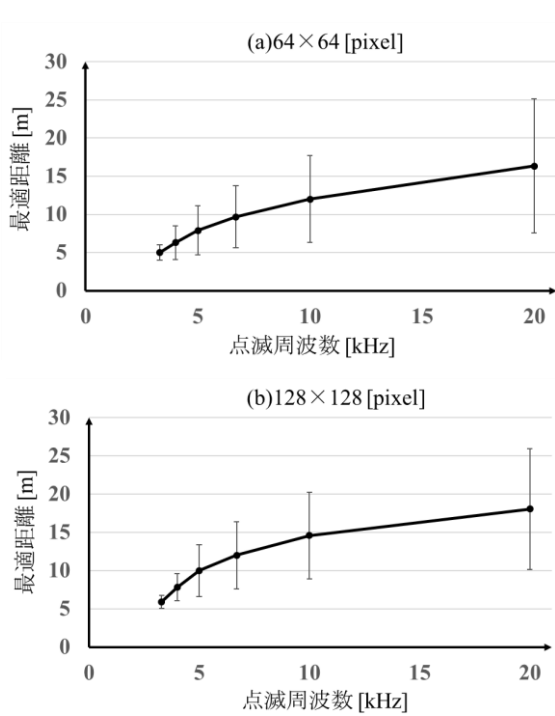


図 14 点滅周波数ごとにおける知覚最適距離の平均と標準偏差  
(a)64×64 [pixel] (b)128×128 [pixel]

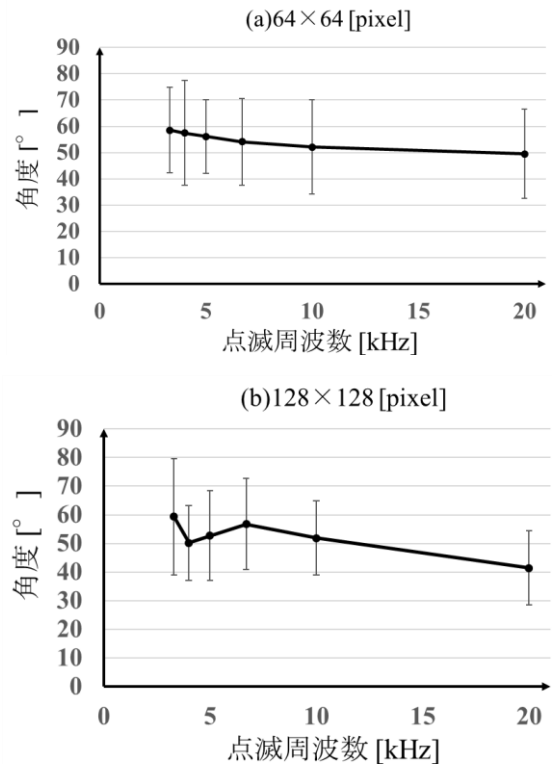


図 16 点滅周波数ごとにおける眼球運動の角度の平均と標準偏差  
(a)64×64 [pixel] (b)128×128 [pixel]

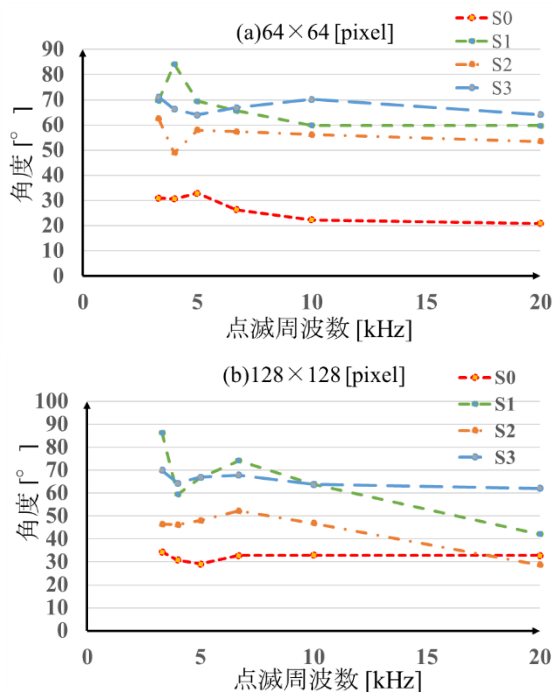


図 15 各被験者の点滅周波数ごとにおける眼球運動の角度  
(a)64×64 [pixel] (b)128×128 [pixel]

## 7. まとめ

本研究では、Pupil Core で記録される二次元上における瞳孔の中心座標と楕円の半径データから python で眼球運動の角度を求めるプログラムを作成した。顎固定台を用いて眼球運動の角度の検証を行った結果、15 [°] 以内の範囲では誤差が 0.6 [°] 以下になった。また、夜間屋外でのラインディスプレイ観測時における眼球運動測定の実験では、設定した点滅周期ごとのラインディスプレイから表示された画像を歪みなく知覚できた知覚最適距離において各被験者の眼球運動を測定した。その結果、点滅周波数が大きくなるにつれて知覚最適距離が大きくなった。また、画像が大きくなったとき、知覚最適距離が伸び、点滅周波数が大きくなるにつれて角度が小さくなった。最適距離が長い被験者は角度が小さく、最適距離が短い被験者は角度が大きくなることがわかった。このことから、知覚最適距離が被験者によって変わるのはラインディスプレイ観測時の眼球運動の角度が異なるからと考えられる。

**謝辞** 実験に使用したラインディスプレイの製作について、ご指導をいただいた有限会社マイクロチップ・デザインラボ 代表取締役 後閑哲也氏に心より感謝申し上げます。本報告は JSPS 科研費 JP18K04170 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 日本視覚学会 編, “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, pp.93, 2017.
- [2] 大山正, 今井省吾, 和气典二 編, “新編 感覚・知覚心理学ハンドブック”, 誠信書房, pp.853, 1994.
- [3] 荻阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男 編 “眼球運動の実験心理学”, 名古屋大学出版会, pp.102-103, 1993.
- [4] 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.
- [5] 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.J86, No.7, pp.1350-1357, 2003.
- [6] K. Kanazawa, S. Kazuno, and M. Okumura, “Optimization of Flashing Period for Line Display Using Saccade Eyeball Movement”, IEICE Trans. Electron., vol.E101-C, no.11, pp.851-856, 2018.
- [7] 金澤宏介, 奥村万規子, “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”, IPSI SIG Technical Reports, Vol. 2017-CDS-18, No27, pp.1-7, 2017.
- [8] 川崎直紀 他 “眼球運動を利用したラインディスプレイの高速化と基板化”, 電子情報通信学会, 回路とシステム研究会, CAS2018-116, 2019 年 1 月 24 日.
- [9] 川崎直紀 他 “眼球運動を利用した高速ラインディスプレイの開発と点滅周期の最適化”, 第 92 回 MBL・第 26 回 CDS 合同研究発表会, 2019 年 8 月 30 日.
- [10] N. Kawasaki, Y. Machida, T. Misu, K. Abe, H. Sugimura, and M. Okumura, “A Study on the Increase of Perceivable Information in the Saccade with High Speed Line Display”, The 27th International Display Workshops (IDW), Dec, 2020.
- [11] “Pupil Core Technical Specs & Performance”. <https://pupil-labs.com/products/core/tech-specs/>, (参照 2021-12-21).
- [12] 松田圭司, 永見武司, “汎用視線位置計測システム”, 生体・生理工学シンポジウム論文集, Vol.12, pp.173-176, 1997.
- [13] W. Hershberger, J. S. Jordan, D. R. Lucas, “Visualizing the perisaccadic shift of spatiotopic coordinates,” Perception & Psychophysics, 60, pp.82-88, 1998.