

# 急速眼球運動の注視点到達予測に基づく情報提示システム

森屋 暁登<sup>†1,a)</sup> 秋田 純<sup>—1,†1,b)</sup>

**概要:** 我々が文章を読むとき等に発生する、短時間で高速な眼球運動である急速眼球運動（サッケード）について、著者らは、その初速と方向から、到達点（次の注視点）の位置が予測可能であることを示し、その低レイテンシのリアルタイム計測が可能な視線計測システムを構築してきた。本稿では、注視点到達予測に基づく情報提示システムの試作・評価について述べる。

## Display System based on Line-of-Sight Prediction of Saccade

**Abstract:** Saccade is a rapid eye movement that occurs when we read texts, for example. We have already demonstrated to predict the terminal point of saccade from its initial velocity and direction, as well as the real-time, low latency gaze measurement system. In this article, we describe the development of a display system based on line-of-sight prediction of saccade, as well as its evaluation.

### 1. はじめに

眼球の運動状態を計測することで得られる視線情報は、医療福祉やマルチメディア、心理分析など様々な分野で活用されている。その活用例としては、視線をポインティングデバイスとして活用した視線入力装置 [1] や、視野の中心窩を優先して高解像度に描画し処理負荷を軽減するフォービエイデッド・レンダリング [2] などが挙げられる。これらのように、視線情報を活用したインタラクションの可能性が研究されている。

眼球運動の中には、急速眼球運動（サッケード）という高速な不随意運動がある [3]。これは、ある注視点から別の注視点に視線を移動させる際に発生する直線的な運動である。サッケードは 20~80[ms] 程度の短時間に発生し、その最大速度は 500[deg/sec] に達することが知られている。一方、視線が止まっているとき（固視と呼ばれる）にも、眼球は絶えず運動し続けている。固視微動とは、そのような固視の状態に起こる微小な眼球運動である。固視微動はその動特性により、マイクロサッケード、ドリフト、トレマーに分類される。マイクロサッケードは直線的な運動で、固視

微動の中では運動が比較的大きく高速である。ドリフトは曲線を描くような運動であり、大きくゆっくりとしている。トレマーはドリフト上に乗っている運動で、小さく高周波数な運動である。

サッケードを用いたインタラクションに関しては、様々な研究が行われている。安藤ら [4] は、サッケードの発生中に 1 列の光点列の点滅パターンを高速に時間変化させることで 2 次元イメージを知覚させる情報提示システム (Saccade-based Display) に対し、EOG(ElectroOculoGram) 法を用いた実時間サッケード検出により Saccade-based Display の問題点を解決している。また、金澤ら [5] は、Saccade-based Display における光点列を 2 列にして無意識的にサッケードを起こすことで、特別な視線計測装置を用いない情報提示システムを提案している。

著者らはこれまで、サッケードの初速と方向を利用してその到達点（次の注視点）の位置が予測可能であることを示し、その低レイテンシのリアルタイム計測が可能な視線計測システムを構築してきた。本研究では、本研究室で開発された低レイテンシのリアルタイム視線計測が可能な視線計測システムを用いて、サッケードの注視点到達予測に基づく情報提示システムを開発、評価することを目的とする。

### 2. 視線計測と到達点予測モデル

#### 2.1 視線予測システムの概要

本研究でサッケードを予測するための視線計測カメラシ

<sup>1</sup> 情報処理学会  
IP SJ, Chiyoda, Tokyo 101-0062, Japan

<sup>†1</sup> 現在、金沢大学  
Presently with Kanazawa University

a) moriya@ifdl.jp

b) akita@is.t.kanazawa-u.ac.jp

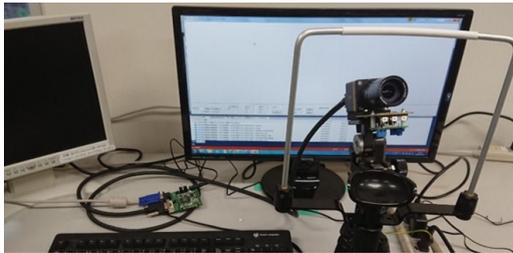


図 1 視線計測システム  
Fig. 1 The Gaze Measurement System

システム及び視線予測アルゴリズムについて、川上ら [6] の研究と同様のものを採用した。

図 1 に、使用した視線計測カメラシステムについて示す。このカメラシステムは、IMPERX 社の高速カメラである CLB-B0260M-TC000 と、Xilinx 社の FPGA である XC6SLX150-2FGG484C を使用している。このシステムでは、カメラから得た眼球の画像を FPGA にて二値化し、黒い画素領域の重心を求めることで瞳孔の座標を算出している。算出された値は 115200[bps] のシリアル通信により、フレームレート 500[Hz] で外部に出力される。

次に、視線予測アルゴリズムについて説明する。サッケードは直線的な運動であるため、これを予測するにはサッケードの開始点と移動方向、移動距離がわかればよい。

まず、サッケードの開始点については、視線の移動速度と移動方向に閾値を設定することで、視線が停留点から動き出す点を検知できる。

次にサッケードの移動方向については、サッケードが直線運動であることからその初動方向と同じ方向と考えられるため、その初動から算出する。

サッケードの移動距離を求めるためには、(1) 式に示す関係式を用いる。サッケードの視線の最高移動速度と移動距離については (1) 式の非線形関係があることが知られている [7]。ここで、 $V$  は最高速度、 $M$  は移動距離、 $V_0$  は  $V$  に漸近的な定数、 $\alpha$  は角度定数である。この 2 つの定数の値は、実験にて計測する視線データから求める。

$$V(M) = V_0 \{1 - \exp(-M/\alpha)\} \quad (1)$$

(1) 式を  $M$  について変形すると、(2) 式を得る。

$$M(V) = \alpha \log\{V_0/(V_0 - V)\} \quad (2)$$

発生するサッケードの最高速度  $V$  をリアルタイムに得られなければ (2) 式を用いることはできない。そこで、図 2 に示すような、擬似的に最高速度  $V$  を得るアルゴリズムを利用する。

## 2.2 視線計測実験

被験者 5 名に対し、横書きの文章を読んでいるときの視

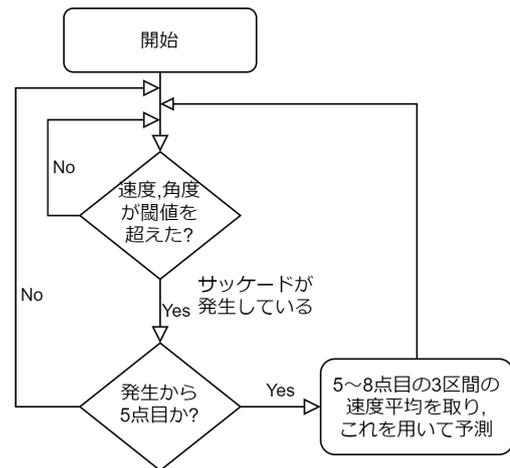


図 2 擬似的にサッケードの最高速度を得るアルゴリズム  
Fig. 2 The Algorithm for Simulating Peak Velocity of Saccade

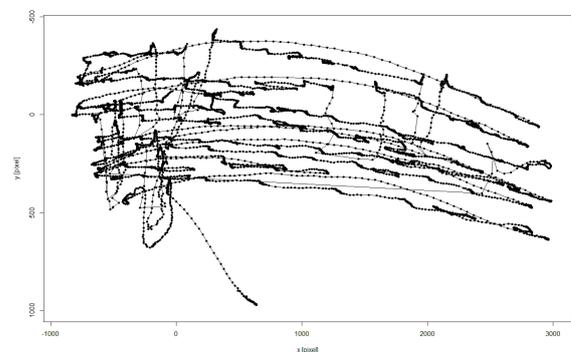


図 3 被験者 A の、横書きの文章を黙読したときの視線データ  
Fig. 3 The Gaze Data When Subject A Reads A Horizontal Text

線を記録した。実験では、被験者は顎台に頭部を固定し、 $3 \times 3$  の 9 点の座標を見てキャリブレーションを行う。その後、500 文字程度の横書きの文章を黙読し、そのときの視線の座標を記録する。図 3 に被験者 A が横書きの文章を黙読しているときの視線データを示す。視線の範囲は、被験者の眼前のディスプレイに映された文章の描画領域 (1884×600[pixel]) におおよそ対応している。

## 2.3 サッケード発生箇所の推定

視線予測アルゴリズムを用いるためには、まずサッケードの発生を検知する必要がある。これは、視線運動のうち、サッケードである箇所とそうでない箇所 (固視微動である箇所) を判別することで求められる。

サッケードは、固視微動 (マイクロサッケードなど) と比べて速度が速く、直線的に動く。対して、固視微動では比較的速度が遅く、またトレマーのように高周波数の振動運動もある。これらの特徴を踏まえ、本研究ではサッケードの移動速度とその角度で判別を行った。

まず視線の移動速度の観点から、速度が 5000[pixel/s] を超える点を抽出し、サッケードと思われる箇所を得るフィ

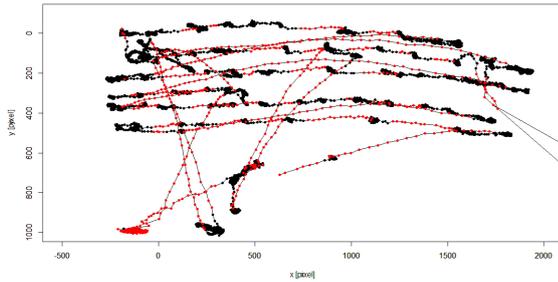


図 4 速度フィルタにより抽出した, サッケードと思われる点  
Fig. 4 Points Extracted by The Velocity Filter

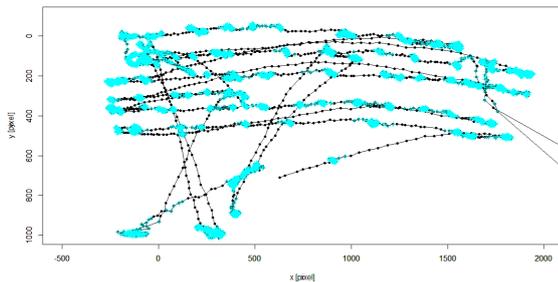


図 5 角度フィルタにより抽出した, 停留点と思われる点  
Fig. 5 Points Extracted by The Angle Filter

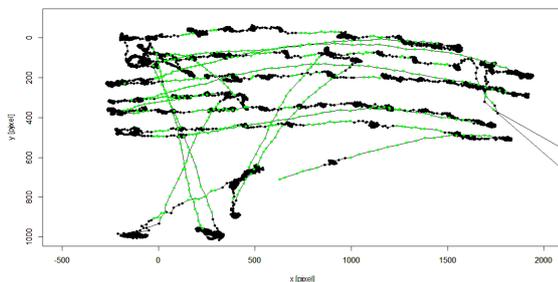


図 6 複合フィルタにより抽出した, サッケードと思われる点  
Fig. 6 Points Extracted by The Composite Filter

ルタを考えた. 図 4 はその結果である. これにより, 大まかにサッケードの箇所を絞ることができた.

次に, 視線が移動する方向という観点から, 3 区間が成す角度の余弦が 60 度未満である箇所 (すなわち, 視線が急な角度で動いた箇所) を抽出するフィルタを考えた. これは, 視線の停留点である箇所を示しており, 固視微動のうちの 1 つであるトレマーが高周波数の振動運動であるという特徴に拠る. 図 5 はその結果である.

上記の 2 つのフィルタを組み合わせ, 速度フィルタにかかり且つ角度フィルタにかからない点を抽出する複合フィルタでサッケードの判別を試みた. 図 6 はその結果である. これにより, サッケードである箇所のみを抜き出すことができた.

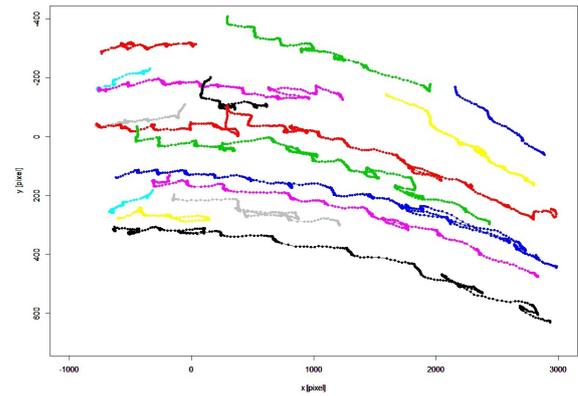


図 7 被験者 A のサッケードである箇所  
Fig. 7 Saccade Part of Subject A

## 2.4 定数 $V_0$ の推定

定数  $V_0$  はサッケードの最高速度  $V$  に漸近的な値であるため, サッケードである箇所のうち最も速い区間の速度を用いて  $V_0$  を定める. そのため, まず視線データの中から座標が直線的に繋がっている箇所を残し, 他をカットした. 被験者 A における抜き出した箇所を図 7 に示す.

表 1 に, 各被験者の視線データにおける 1 区間での最長移動距離と最高速度を示す. カメラシステムのフレームレートは 500[Hz] であるため, 1 区間は 2[ms] となる. したがって, サッケードの最高速度は視線データ上の 1 区間での最長距離を 500 倍することで簡単に求められる.

ただし, (2) 式は  $\log$  の定義上  $V < V_0$  のときしか使えないため, ここで得た最高速度を 1.5 倍した値を各々の  $V_0$  として計算に使用する.

## 2.5 定数 $\alpha$ の推定

定数  $\alpha$  について, 最小二乗法を用いて, 各被験者ごとの  $\alpha$  の値と, 全データでの値を求めた. 図 8 に, 被験者 A におけるサッケードの最高速度と距離の散布図と回帰直線を示す. また, 全データにおける定数  $\alpha$  と回帰直線は図 9 のようになった.

各散布図を見ると, 移動距離の大きいサッケードで比較的大きな誤差が発生し,  $\alpha$  の真値より小さいと思われる値を得ているが, おおよそ散布図の点に沿う回帰直線が得られた. したがって, 本研究におけるシステム構成では,  $V_0 = 8809.260, \alpha = 111.2300 \times 1.5$  と定めた.

## 2.6 計測データに対する視線予測アルゴリズムの適用

前項で定めた  $V_0$  と  $\alpha$  を用いた視線予測アルゴリズムを, 実験で得た視線データに適用した. 各被験者のサッケード数と予測率について表 2 に, その結果を図 10 から図 14 に示す. また, 図 15 に被験者 E の視線予測結果における拡大図を示す.

サッケードには発生した順番に番号が振られており, 予

表 1 各被験者のサッケードの最高速度

Table 1 Peak Velocity of Saccade for Each Subject

被験者	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
1 区間 (2[ms]) での最長距離 [pixel]	9.504548	12.91366	17.61852	7.126745	11.99835
最高速度 [pixel/s]	4752.274	6456.830	8809.260	3563.372	5999.175

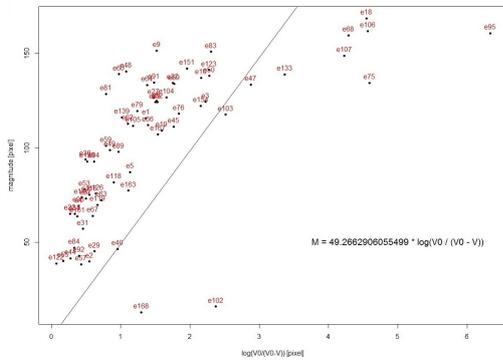


図 8 被験者 A のサッケードの最高速度と距離における散布図と回帰直線

Fig. 8 Scatter Plots and Regression Lines for Peak Velocity and Distance of the Saccades for Subject A

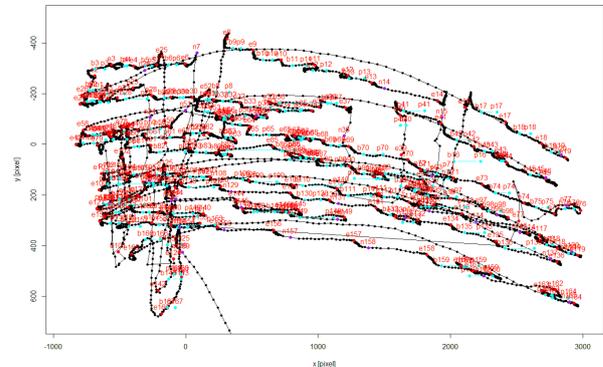


図 10 被験者 A の視線予測結果

Fig. 10 Gaze Prediction for Subject A

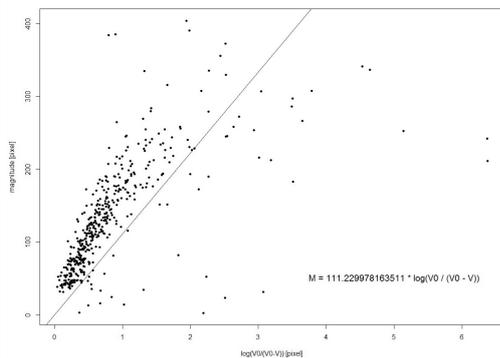


図 9 全被験者のサッケードの最高速度と距離における散布図と回帰直線

Fig. 9 Scatter Plots and Regression Lines for Peak Velocity and Distance of the Saccades for All Subjects

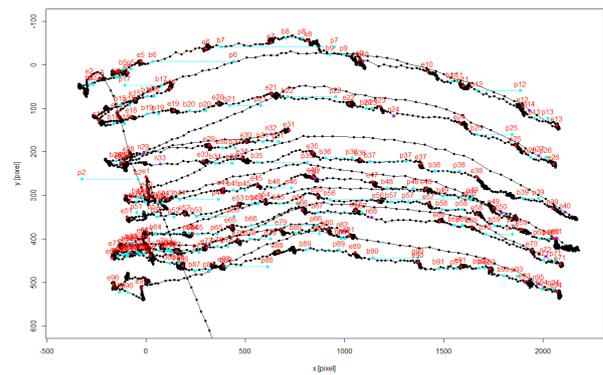


図 11 被験者 B の視線予測結果

Fig. 11 Gaze Prediction for Subject B

測開始点 b と予測した到達点 p をシアン, 実際の到達点 e を赤, 予測を開始できなかった点 n を紫で示している。

### 3. リアルタイムの到達点予測の評価

#### 3.1 リアルタイムの到達点予測の実装

サッケードの到達点予測アルゴリズムを用いた到達点予測システムについて, 図 16 に示す。

使用者は, サッケードを記録したときと同様に顎台に頭部を固定し, ディスプレイ上の描画領域 (1884 × 600[pixel]) を見る。予測された到達点には, 黒丸の画像 (55 × 55[pixel]) を表示させる。

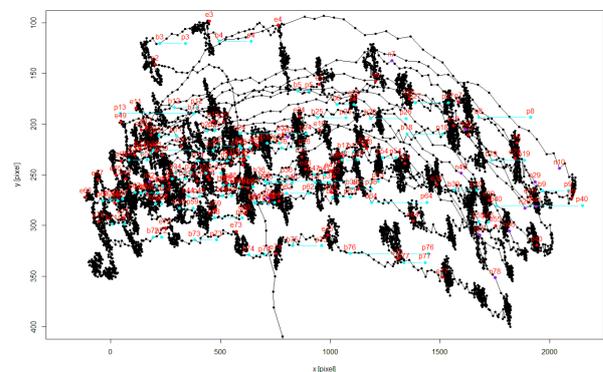


図 12 被験者 C の視線予測結果

Fig. 12 Gaze Prediction for Subject C

#### 3.2 リアルタイムの到達点予測システムの評価

この視線予測システムの評価について, 定量的な評価が

表 2 検知したサッケード数と到達点予測を行えた割合

Table 2 Detected Saccades and Percentage of Prediction for the Terminal Point

被験者	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	合計
検知したサッケード数	169	96	78	98	106	5475
予測できた割合	0.432	0.625	0.821	0.490	0.792	0.828

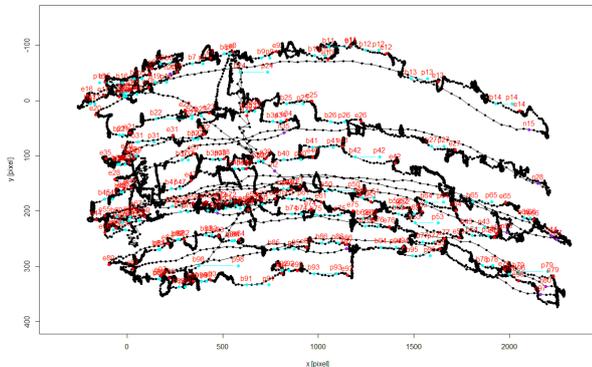


図 13 被験者 D の視線予測結果  
Fig. 13 Gaze Prediction for Subject D

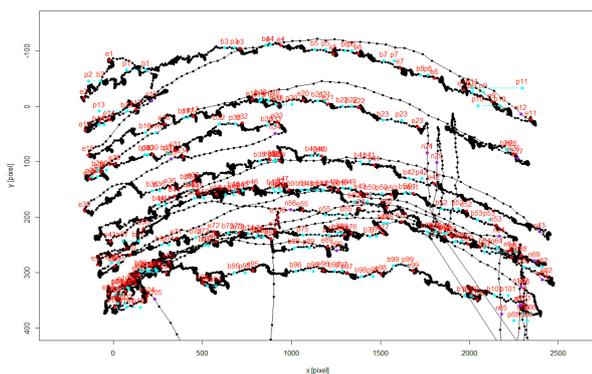


図 14 被験者 E の視線予測結果  
Fig. 14 Gaze Prediction for Subject E

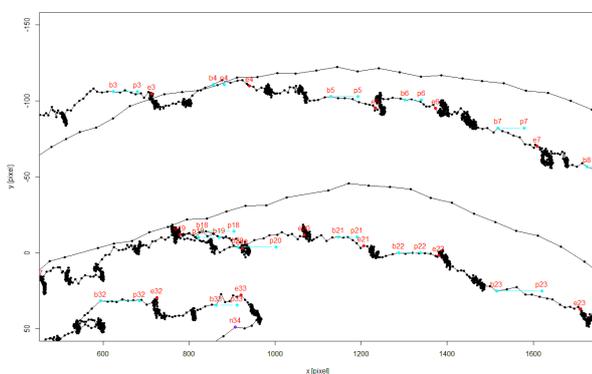


図 15 被験者 E の視線予測結果の拡大図  
Fig. 15 Zoomed Image of Gaze Prediction for Subject E

難しいため、被験者に到達点予測システムを使用してもらい、定性的な評価を求めた。以下がその評価である。

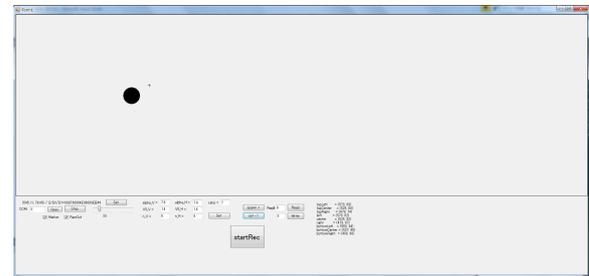


図 16 到達点予測システムによる予測表示

- 黒丸の描画が遅い
- 黒丸の位置はあまりズレがない
- 視界右側のほうが視線が予測されやすいと感じる

#### 4. 考察

まず、本システムの表示の遅れについては、ディスプレイへの描画の遅延による可能性が挙げられる。サッケードは 20~80[ms] 程度の時間で発生しているが、本システムはサッケード発生から遅くとも 8 点目までの座標を予測に使用しているため、 $2[\text{ms}] \times 7[\text{区間}] = 14[\text{ms}]$  を必要とする。今回使用したディスプレイのリフレッシュレートは 60[Hz] であるため、1 フレームの遅延は 16.66...[ms] となる。したがって、比較的短時間のサッケードでは 1 フレーム程度の遅延でも大きく影響を及ぼす。したがって、高リフレッシュレートなディスプレイの使用やプログラム内での描画メソッドの高速化などの改善点が挙げられる。

次に、予測した到達点の座標の精度について、本研究では視線を正面に向けたときを基準にしてディスプレイ上の表示位置が使用者の正面に来よう調整している。今後、眼球が球面であることを考慮した座標変換を行うことで、さらなる精度の向上を図れると考えられる。

また、視界右側がよく表示されるという報告については、本実験では全被験者で右目を対象にしていたためであるという理由が考えられる。

#### 5. まとめ

本研究では、サッケードの速度と方向から次の到達点予測を行うアルゴリズムを基に到達点予測システムを開発した。まず、サッケードと固視を判別するため、速度と方向の各観点で閾値を設定し、これらを識別可能とした。次に、サッケードの移動距離の予測に必要な 2 つのパラメータを推定した。そして、求めたパラメータを用いてリアルタイムに計測したサッケードの到達点を予測・表示するシステム

ムを開発した。このシステムで行ったサッケードの到達点予測において、描画処理に起因すると考えられる遅延が発生した。また、予測された到達点がディスプレイ右側に偏るという評価も得た。

今後の課題としては、描画処理遅延の改善と、球面であることを考慮した予測精度の向上が挙げられる。また、予測位置の偏りについては、左右の目で追加実験を行うことで詳しい影響を調べられるだろう。

#### 参考文献

- [1] 阿部清彦, 大内幹夫, 大井尚一, 大山実: 画像解析による強膜反射法を用いた視線入力システム, 映像情報メディア学会誌, Vol.57, No.10, p.1354-1360(2003).
- [2] 中川伶丞, 植村匠, 尾島修一, Foveated Rendering による動的被写界深度効果の検討, 火の国情報シンポジウム 2020, C1-1, p1-5, 一般財団法人 情報処理学会 九州支部 (2020).
- [3] 金子寛彦, 知っておきたいキーワード 固視微動, 映像情報メディア学会誌, Vol.63, No.11, p.1538-1539(2009).
- [4] 安藤英由樹, 渡邊淳司, 雨宮智浩, 前田太郎: ウェアラブル・サッケード検出を利用した選択的視覚情報提示の研究, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.10, No.4, p.505-512 (2005).
- [5] 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 Report, Vol.2017-GN-100, No.27, p1-7(2017).
- [6] 川上隼斗・笹田裕太・五十嵐覚・秋田純一, サッケード追尾可能な視線計測カメラの開発とそれを用いるインタラクションの可能性, 情報処理学会論文誌, Vol.56, No.4, p.1174-1183, 2015.4.
- [7] R. W. Baloh, A. W. Sills, W. E. Kumley, V. Honrubia: Quantitative measurement of saccade amplitude, duration, and velocity, *Neurology* 25: 1065-1070, 1975.