

サック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

川上 隼斗^{1,a)} 笹田 裕太^{1,b)} 五十嵐 覚^{1,c)} 秋田 純一^{1,d)}

概要: 視線計測はユーザインタフェースや心理状態の分析などインタラクション分野での幅広い応用が期待されている。サックードと呼ばれる高速な眼球運動は、従来の視線計測システムではリアルタイムでの追尾が不可能であるものの、新しいインタラクションへの応用が期待されている。本稿では、サックードを含む眼球運動を 500[fps] 以上の高フレームレート、かつリアルタイム (低レイテンシ) で計測・追尾が可能な視線計測システムの開発について、高速カメラと FPGA を用いた実動作検証システムと専用イメージセンサの設計のそれぞれについて述べる。またそれを用いて「サックードが行き着く先」を先回りで予測する手法について検討した結果について述べ、さらにそのリアルタイムのサックード予測を用いるインタラクションの可能性について考察する。

Line-of-Sight Detection Camera with Saccade Tracking Capability and Its Applications for Interaction

KAWAKAMI HAYATO^{1,a)} SASADA YUTA^{1,b)} IGARASHI SATORU^{1,c)} AKITA JUNICHI^{1,d)}

Abstract: Line of Sight (LoS) measurement is expected to have wide application area, including user interface and psychological analysis. The saccade, one of the eye motion type, is also expected to be a new type of interaction technique, however, it is impossible to measure and track the saccade with high frame rate and low latency by using the conventional LoS measurement system. In this paper, we describe the real time LoS measurement system at frame rate of 500[fps], implemented by using high speed camera and FPGA, as well as integrated image sensor. We also describe the evaluation on the prediction of saccade destination, and the possibility on its applications for interaction.

1. 背景

眼球の運動状態を観測することで、我々が何をどのように見ているか知る視線計測技術は、PC 操作におけるポインティングデバイスのようなユーザインタフェースとしての利用だけでなく、視線から心理状態の分析や、自動車運転の支援への応用も数多く研究されており [1], [2], また低価格の製品 [3] も登場してきたことで、今後さらに応用分野が拡大することが期待されている。特に机上の操作機器

や眼鏡等の頭部に装着されたカメラにより取得した眼球付近の画像から視線情報を求める手法は、ユーザへの低侵襲性から幅広い用途が期待され、インタラクション分野でも更に幅広い応用が期待される。

眼球運動の中には、サックード (Saccade) と呼ばれる非常に高速な不随意運動が存在する。これは、ある注視点からある注視点へ視線を移動させる際に、多いときには 1 秒間に 5 回程度発生し、その最大速度は 500[deg/sec] に達する [4] ことが知られている。サックードが起こっている期間に網膜から得られる像は、カメラを素速く動かしたときの動画像のようにブレが大きいが、脳の視覚野での処理により、普段はサックード期間中には視覚情報がほぼ遮断されている [5]。一方、このサックードを積極的に利用する新しいユーザインタフェースもその可能性が提案されてい

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科 電子情報科学専攻
Division of Electrical and Comp. Eng., Kanazawa University, Kakuma, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

a) kawakami@ifdl.jp

b) sasada@ifdl.jp

c) igarashi@ifdl.jp

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

る [6].

従来のカメラベースの視線計測システムでは、カメラからの画像読み出し速度とその画像に対する視線計測処理速度という2つの速度向上に関するボトルネックが存在する。そのため、多くの視線計測システムではフレームレートが60[fps]程度にとどまり、視線の大きな移動から「サッケードが起こったこと」はわかるものの、その過程を追尾することはできない。高速カメラを用いて240[fps]程度の視線情報の記録を行うことが可能なシステムも存在し [7]、サッケードの過程の記録は可能であるが、視線計測のための画像処理をソフトウェアあるいはパイプライン処理のハードウェアで行うため、画像の取得から視線情報の算出までのレイテンシ（時間遅れ）が大きく、サッケードが起こっている時点での視線の動きをリアルタイムで追尾することはできない。

本稿では、サッケードを含む眼球運動を500[fps]以上の高フレームレート、かつ1あるいは2フレーム時間の低レイテンシで計測・リアルタイム追尾が可能な視線計測システムの開発について述べる。またそのシステムによる、「サッケードの起こり始め」から「サッケードが行き着く先」を先回りして予測する手法について検討し、またそのリアルタイムのサッケード予測を用いるインタラクションの可能性について考察する。

2. 関連研究

視線計測手法には多くのものが知られているが、大きく次の3種類に分類できる。

- 画像計測法
- EOG (Electro Oculo Gram) 法
- サーチコイル法

画像計測法は、机上の機器や眼鏡等で頭部に置いたカメラから眼球付近の画像を取得し、それから視線情報を求めるものであり、画像計測処理の工夫による高精度化 [8] や、頭部の動きに対するロバスト性を高める [9] ための多くの研究がある。EOG法は、眼球の周り筋肉の動きを計測する筋電信号から視線情報を求める手法であり、100[Hz]程度と比較的高速であるが外来ノイズに弱いという欠点がある。サーチコイル法は小型コイルが付いたコンタクトレンズをユーザが装着し、その動きを眼球付近に装着する検出コイルによって検知する手法であり、ユーザへの侵襲性が高いが、非常に高速・高精度であるという特長がある。

得られた視線情報を用いるアプリケーションについては、視線がとどまっている箇所（停留点）の情報を用いるものとしては、ポインティングデバイスなどのユーザインタフェースとしての応用が多数研究されており、それ以外にも心理状態の分析や、その自動車運転の支援 [1], [2] など多くの数多くの研究がある。PCにUSB接続する安価な小型視線計測装置 [3] の登場により、視線情報の応用分野は

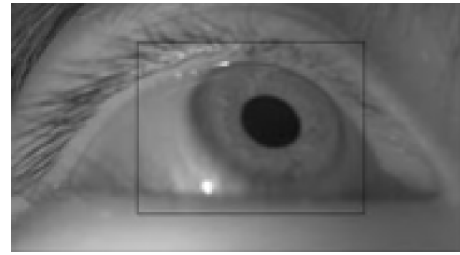


図 1 計測された赤外線眼球画像の例
Fig. 1 Example of an infrared image of eye.

さらに大きく広がりつつある。

一方、視線情報のうち停留点だけでなく、サッケードを積極的に活用するインタラクションに関する研究も存在する。渡邊ら [10] は、固定された1次元の光点列を数 [ms] 程度の周期でパターンに従って点滅させ、ユーザがそれを見ているときに起こるサッケードによってそのパターンが二次元に展開されたイメージを知覚することができるディスプレイを開発している。ただしユーザが意図的にサッケードを起こすことはできないため、そのイメージが現れるタイミングを制御することはできない。

また安藤ら [11] は、生体信号を利用した EOG 法によりサッケードをリアルタイムに検出し、それを積極的に用いることでユーザに精度良く情報を提示す手法を提案している。

3. サッケード追尾可能な視線計測カメラの開発

本節では、サッケードを含む視線の高速・リアルタイム（低レイテンシ）計測を可能とする小型カメラデバイスの実現を目的とし、その実装方法の検証のために、高速カメラと FPGA (Field Programmable Gate Array) を用いた高速・低レイテンシ視線計測システムの実装、および小型カメラデバイスの開発状況について述べる。

3.1 視線計測の原理

本稿では、視線計測に必要な眼球位置検出手法として、画像計測法の一つである暗瞳孔法を用いる。これは眼球に対し近赤外線を照射し、その反射光を赤外線カメラで計測するものである。このときに観測される眼球画像の例を図 1 に示す。暗瞳孔法では、瞳孔のみが非常に低輝度な、円に近い領域として得られる。この瞳孔領域は、周囲と比べて輝度コントラストが大きく、輝度しきい値による二値化が容易である。なお瞳孔以外にもまつ毛などの黒い領域は存在するが、瞳孔領域の面積が大きいため、眼球を含む横長の眼の領域に対して黒い画素領域の重心を求めることで、ほぼ正確に瞳孔の位置を求めることができる。なお視線が上下に向いている場合に瞳孔がまぶたに隠れた状態や、まつ毛が長いユーザでは、求められる瞳孔領域の重

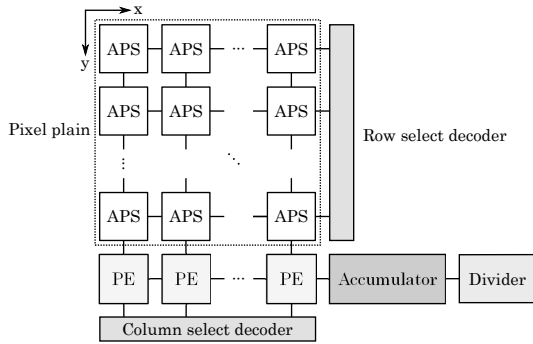


図 2 列並列処理アーキテクチャの Vision Chip
Fig. 2 Column-parallel vision chip architecture.

心の精度が悪化するが、4節で述べるような、計測前のキャリブレーションによって、これらの要因の影響を極力排除することが可能である。

求められた瞳孔領域の中心（重心）と眼球の幾何学構造やカメラとの位置パラメータから、視線方向の算出が可能である。これらの処理は、得られた瞳孔の中心座標という1組の値に対するものであるため、その処理時間は、画像処理の時間に比べて無視できるほど短いと考えられる。そこで本稿では、最も処理時間のかかる瞳孔の中心座標の算出を専用ハードウェアで実現することを主な目的とし、ここからの視線情報の算出は、4節で述べる簡易な方法を採用する。

一般に画像中の領域の重心の座標 (\bar{x}, \bar{y}) は (1) 式で表される。

$$\left(\bar{x} = \frac{\sum_x \sum_y x \cdot p_{xy}}{\sum_x \sum_y p_{xy}}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_x \sum_y y \cdot p_{xy}}{\sum_x \sum_y p_{xy}} \right) \quad (1)$$

ここで p_{xy} は画素 (x, y) の二値化後の画素値 (0 または 1) を表す。(1) 式より、領域の重心の算出には次の (2) 式の3つの項を求め、これらの比を求めれば良いことになる。

$$\left. \begin{aligned} S &= \sum_x \sum_y p_{xy} = \sum_x \left(\sum_y p_{xy} \right) \\ SX &= \sum_x \sum_y x \cdot p_{xy} = \sum_x \left(\sum_y x \cdot p_{xy} \right) \\ SY &= \sum_x \sum_y y \cdot p_{xy} = \sum_x \left(\sum_y y \cdot p_{xy} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

3.2 高速低レイテンシの視線計測カメラのアーキテクチャ

サッケードを含む高精度な視線計測検出のためには、高解像度と高フレームレート、低レイテンシのすべてを両立することが必要となる。著者らはこれまでに、カメラ (CMOS イメージセンサ) と同一チップ上に画像処理回路を統合する、いわゆる Vision Chip として、視線計測処理を備えるカメラデバイスのためのアーキテクチャの検討を行ってきた [4], [12]。Vision Chip では、カメラから処理回路への画像転送速度のボトルネックを解消でき、高フレームレートでの撮像・画像処理が可能であるが、その中で、処理回路を画素平面の列ごとに配置する列並列処理アーキテクチャ (図 2) は、画像処理速度 (1[kHz] 程度) と回路動

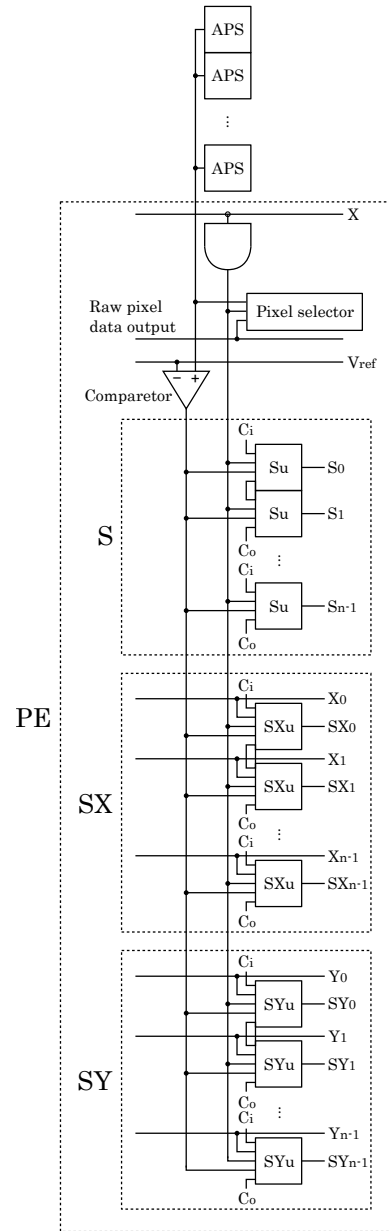


図 3 重心算出機能を持つ列並列構成イメージセンサの1列分のアーキテクチャ

Fig. 3 Column-parallel image sensor architecture for centroid calculation (for one column).

作速度 (100[MHz] 程度) の大きな差に着目し、処理の並列度を、画素単位ではなく列単位に落とすことで、十分な速度の画像処理と通常の CMOS イメージセンサ程度の高い解像度を両立することが可能である [12]。

図 3 に列並列構成の重心算出機能を持つイメージセンサの1列分のアーキテクチャを示す。ここで APS (Active Pixel Sensor) は受光素子を持つ回路、Su, SXu, SYu はそれぞれ重心計算に必要な (2) 式の各項 S, SX, SY を求める1ビット分の回路である。イメージセンサ全体のアーキテクチャとしては、この列ごとの回路に加え、各列の演算結果に対して横 (X) 方向の加算を行う回路が必要となる。

このイメージセンサ全体の動作タイミングを図 4 に示

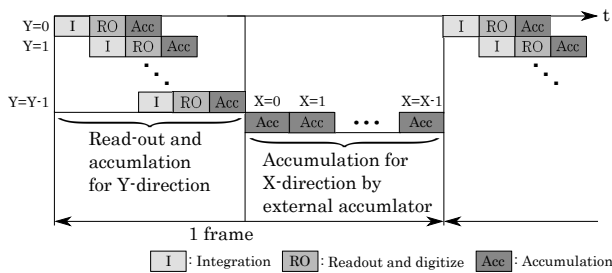


図 4 撮像と重心算出処理のタイミング図

Fig. 4 The operation timing of image transfer and calculation.

す。画素回路である APS は、通常の CMOS イメージセンサでも一般的に用いられるフォトダイオードと増幅トランジスタからなる APS 構造とし、露光に相当する蓄積 (Integration) 動作によって輝度に応じた電圧信号が得られる。なおこれらの信号を順次読み出すことで、CMOS カメラとしての撮像のみを行うこともできる。したがってモバイル機器のフロントカメラのように普段は通常のカメラとして使用しつつ、必要に応じて視線情報を求める、という利用形態も可能である。

APS で求められた各画素の輝度値は、縦 (Y) 方向に順次読み出されながらコンパレータにより二値化されて p_{xy} が求められ、これらを用いて各列で並列に逐次 S, SX, SY のうちの Y 方向の加算が行われる。すなわち縦 (Y) 方向の全画素の読み出しが終了した時点で、Y 方向の加算は終了していることになる。

その後、各列で求められた Y 方向の加算結果を、今度は横 (X) 方向に求めながら加算していくことで、最終的な S, SX, SY が求められる。

すなわち横方向・縦方向の画素数 X, Y に対して重心算出処理が終了するまでの全演算ステップ数は $(X+Y)$ となる。従ってこの構成のイメージセンサに必要な回路の動作速度 f [Hz] は、フレームレート F [Hz] から $f = F \cdot (Y+X)$ と求めることができる。本稿では、VGA 解像度 (640×480[pixel]) とフレームレート 500 [fps] を目標仕様として設定する。VGA 解像度の $X = 640, Y = 480$, フレームレート $F = 500$ から $f = 560$ [kHz] となるが、これは一般的な CMOS プロセスで十分に達成可能な速度である。

なお各列の S, SX, SY を求める回路は、それぞれ 1 ビット分の回路である S_u, SX_u, SY_u を縦続接続した構成とする。これにより各要素回路間の配線を最小限にしつつ、必要なビット幅の演算回路を構成することができる。S は 1 ビットの全加算器と演算結果を保持する 1 ビットレジスタ、および横 (X) 方向加算時に用いる 3 状態バッファからなり、また SX と SY はこれに 1 ビット分の乗算のための AND ゲートを追加した回路構成となる [12]。

以上により、重心計算に必要な (2) 式の各値が 1 フレームごとに求められ、ほぼ 1 フレーム分のレイテンシで瞳孔位置およびそれから視線情報を得ることができる。



図 5 開発した高速カメラと FPGA によるカメラシステム

Fig. 5 The developed camera system composed of the high-speed camera and FPGA.

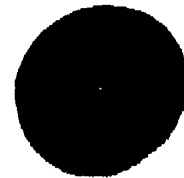


図 6 開発したカメラシステムにより観測された瞳孔と算出された重心 (中央の白い点)

Fig. 6 Observed pupil and the calculated centroid of captured image.

3.3 高速カメラと FPGA を用いたカメラシステム

提案したアーキテクチャを CMOS イメージセンサとして実装するに先立ち、視線検出処理の検証のために高速カメラと FPGA を用いたカメラシステムを開発した (図 5)。高速カメラには Lynx 社 IPX-VGA210-L, FPGA には Xilinx 社 XC6SLX150-2FGG484C を用いた。このカメラは垂直方向の読み出し解像度によってフレームレートが変化し、640×480[pixel] では 210 [fps], 640×175[pixel] で 500 [fps], 640×64[pixel] で 1,000 [fps] の撮像と処理が可能となる。また FPGA 上には、3.2 節で述べた列並列処理アーキテクチャを忠実に VerilogHDL によって設計し、これとカメラから転送した画像を保持するフレームバッファとあわせて実装した。実際の動作では、撮像から FPGA への画像転送に 1 フレーム分の時間がかかるため、撮像から重心が得られるまでには 2 フレーム分のレイテンシが生じることになる。

本カメラシステムによって求められた二値化後の瞳孔画像と重心位置を図 6 に示す。なお図中の黒い領域が瞳孔、中央の白い点が算出された重心位置である。カメラの垂直読み出し解像度とそれに応じたフレームレートでの正しい動作を確認した。

またこのカメラシステムを用いて、求められた瞳孔位置と視線方向を対応させるアプリケーションを試作した。使

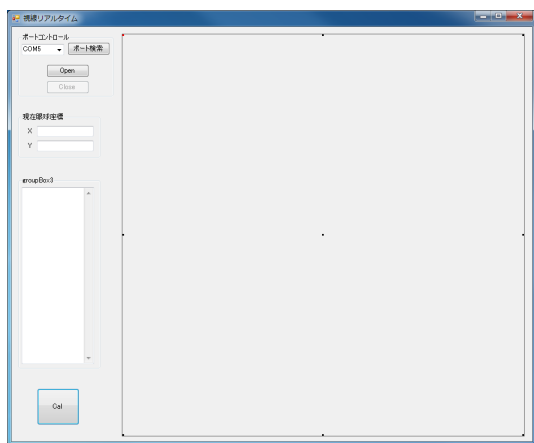


図 7 キャリブレーション機能付きのディスプレイ上の視線表示アプリケーション

Fig. 7 Line-of-Sight display application software with calibration operation.

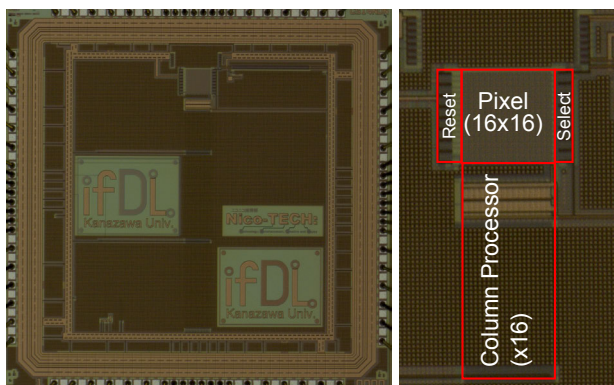


図 8 試作した視線計測 CMOS イメージセンサの評価チップ

Fig. 8 Evaluation chip of Line-of-Sight measurement CMOS image sensor.

用に先立って、ユーザはディスプレイモニタ上に等間隔・格子状のキャリブレーション点を 9 点表示し、それらを注視した状態での瞳孔位置との対応を記録する。それらの対応関係から、各キャリブレーション点間の領域での視線位置を双一次補間によって求め、ディスプレイモニタ上に注視点を表示する。なおこのキャリブレーションと補間のアルゴリズムに、より高精度な手法を適用することで、視線位置の高精度化も可能であると考えられる。

3.4 CMOS イメージセンサの開発

3.2 節で述べたアーキテクチャの視線検出イメージセンサの実現に向けて、その基礎評価のために試作したイメージセンサチップを図 8 に示す。製造テクノロジーは CMOS 0.18[μm] 5 層 Al プロセス、チップサイズは 2.5[mm] 角、画素数は 16 \times 16 である。本チップの評価は現在進められている。

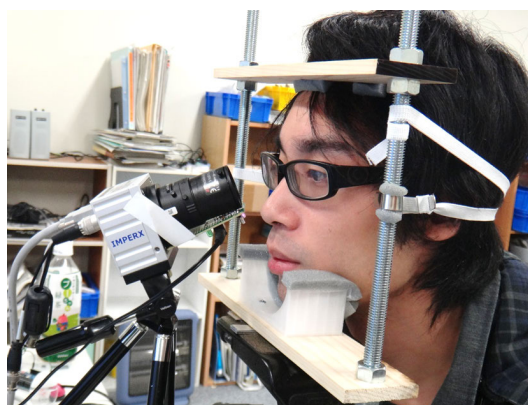


図 9 視線計測実験の様子

Fig. 9 Setup of Line-of-Sight measurement experiment.

4. 視線計測カメラシステムの基本性能の評価

本節では、開発した視線計測カメラシステムの、視線計測精度とサッケード検出性能の評価を行った結果について述べる。

4.1 視線計測精度の評価

本システムによる視線計測の精度を実験により検証した。

4.1.1 実験方法

被験者は正常な視力を持つ 21~30 歳の男女 10 人である。眼鏡の有無の精度への影響も検証するため、裸眼（コンタクトレンズ矯正を含む）と眼鏡による矯正を行っている被験者をそれぞれ 5 名とした。

被験者は図 9 のような顎台に頭部を固定し、60[cm] 前方に設置されたディスプレイモニタに表示される 30 \times 30[cm] の対象エリアを正面から見る。9 点キャリブレーション操作の後、ランダムに提示される画面上の点を注視させ、視線が定まったところで手元のボタンを操作して注視位置を記録する。これを 15 回繰り返す操作を 1 セットとし、各被験者が計 3 セット行う。なおカメラの位置は近赤外線 LED によって照らされる被験者の右目の眼球を中心に 40 \times 30[mm] 程度が撮影されるように調整し、解像度は 640 \times 480[pixel]、フレームレートは 210[fps] とした。

4.1.2 実験結果と考察

得られた実際の点の表示位置と求められた注視位置のディスプレイ上での距離と被験者とディスプレイとの間の距離から求めた、眼球回転角度の誤差を表 1 に示す。

全被験者の眼球回転角度の平均誤差は 3.19[deg] であり、これは 60[cm] 前方にあるディスプレイモニタ上では 33.4[mm] のずれに相当する。現在市販されている視線計測システムや研究では精度は 0.5[deg] 以下のものが多く [3], [13], それらと比較すると誤差が大きいと言える。カメラの水平解像度 640[pixel] と撮影対象幅 40[mm] に対して、竹上らの眼球モデル [14] を元に眼球半径 $r_0=13$ [mm][15]

表 1 視線計測実験における眼球回転角度の誤差
Table 1 The measured error view angle.

Set	Ave[deg]	Max[deg]	Min[deg]	
N-1	1	2.12	3.22	1.07
	2	0.57	0.91	0.34
	3	1.85	2.50	1.27
N-2	1	2.77	5.31	0.62
	2	4.43	11.2	0.21
	3	1.30	5.73	0.24
N-3	1	4.01	6.11	1.73
	2	2.69	3.98	0.25
	3	3.88	6.40	1.90
N-4	1	1.66	3.49	0.72
	2	4.71	9.78	1.76
	3	4.10	7.59	0.36
N-5	1	0.82	1.58	0.27
	2	0.98	2.21	0.03
	3	1.61	2.85	0.44
G-1	1	3.67	7.49	0.29
	2	3.43	5.86	1.33
	3	4.67	6.05	2.41
G-2	1	2.26	3.32	0.65
	2	2.39	6.58	0.10
	3	1.25	3.16	0.36
G-3	1	2.96	5.93	0.81
	2	4.18	6.45	0.98
	3	4.54	11.9	0.66
G-4	1	7.56	11.1	2.67
	2	3.59	5.51	2.14
	3	4.94	10.0	2.14
G-5	1	5.12	7.88	4.25
	2	3.36	4.07	1.89
	3	4.19	7.02	1.71

を仮定して求めた眼球回転角度の分解能は 0.28[deg] となるが、本カメラシステムでは画素座標以下の実数分解能で重心座標を求めていることから、理論上はこれよりも高い分解能を持つ。

また表 1 の結果からは、計測された眼球回転角度誤差の被験者ごとのばらつきが大きく、0.2[deg] 未満の誤差のケースもある一方でまた同じ被験者でも 3 回の試行内で 2 倍以上の差があることもあることがわかる。

この原因としては、本実験ではカメラが机に固定され、被験者の頭部を固定していたが、僅かな頭部の動きによりカメラとの相対位置が大きく変化するため、頭部の固定が不十分であったことから、このような被験者間・被験者内のばらつきが大きくなったことが考えられる。この問題は、眼鏡のようなデバイスによってカメラを頭部に固定することで大きく改善することが可能であることが期待される。なお眼鏡の有無による精度の違いは確認されなかった。

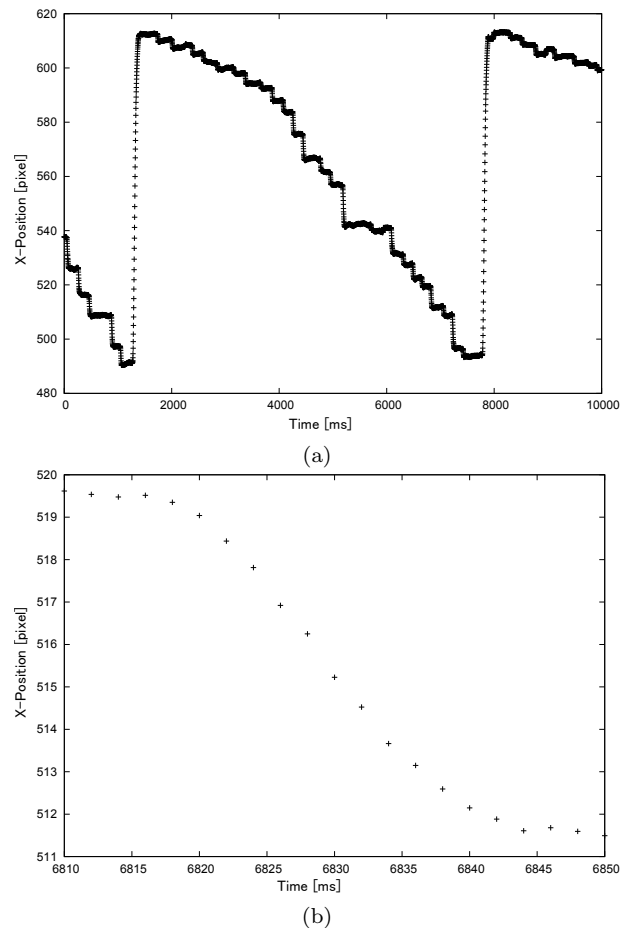


図 10 本カメラシステムで得られた瞳孔の X 座標 (a) とその拡大 (b)

Fig. 10 (a) Measured pupil position and (b) magnified graph.

4.2 サッケード追尾性能の検証

続いて、本カメラシステムでのサッケードの追尾性能の検証を行った。

4.2.1 実験方法

4.1 節の被験者 1 名に対して、本カメラシステムを用いた同様の実験環境で、500[fps] での視線計測を行った。被験者は、ディスプレイモニタに表示された横書きの日本語の文章を黙読し、その過程の瞳孔座標を記録した。カメラ解像度は 640×175[pixel] とし、フレームレートは 500[fps] に設定した。

4.2.2 実験結果と考察

実験で得られた水平方向の瞳孔の動きを図 10(a) に、またその一部を拡大したものを図 10(b) に示す。図 10(a) 中で細かくステップ状に観測されている運動がサッケードである。この結果から、サッケードの起こり始めと過程、終了を捉えられていることが確認され、本カメラシステムによって 500[fps] 程度でサッケードのリアルタイム追尾を行うことができることが可能であることが示された。

5. サッケードの検知と到達点の予測

サッケードのリアルタイム追尾により、サッケードの起

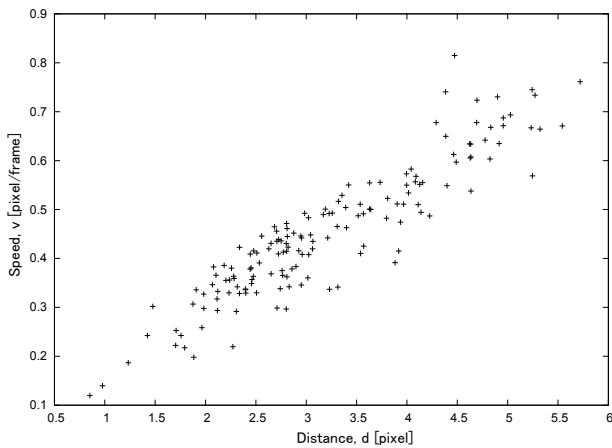


図 11 計測されたサッケードの速度 v とサッケード移動距離 d
 Fig. 11 Measured saccade speed, v and saccade distance, d .

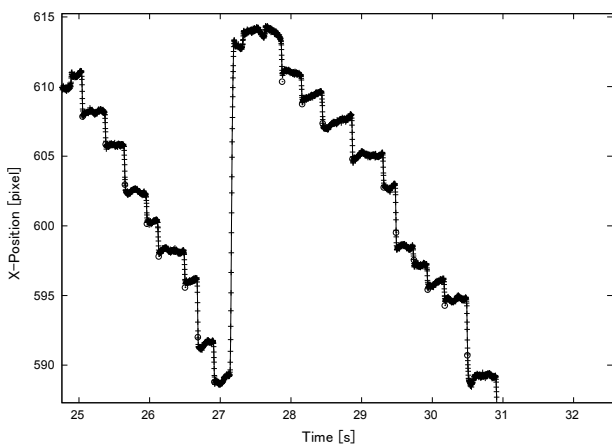


図 12 計測された瞳孔座標と予測されたサッケード到達点の例。
 ○がサッケード到達点の予測値。

Fig. 12 Measured pupil position and predicted saccade position. Circle indicates the predicted position of saccade destination.

こり始めを検知し、またその時点での眼球移動速度から、サッケードの到達点を先回りして予測することが可能であると考えられる。すなわちユーザの意図とは無関係に起こるサッケードを検知・予測し、それをを用いてその視線移動先付近の領域にのみ情報提示を行うなどの、そのユーザにしか見えない情報提示の形態が可能となると考えられる。

そこで本カメラシステムによる高速カメラによるリアルタイム視線計測によって、サッケードの検知と到達点の予測の可能性についての検証を行った。

5.1 サッケードの速度と視線移動距離

サッケードの速度とそれによる視線移動距離には、相関があることが知られている [11]。本カメラシステムで得られる瞳孔座標を用いて、この相関についての検証を行った。

4.2 節の実験で得られた瞳孔座標に対して、連続する 2 点の座標の差がしきい値 Δp を超えた時点 (t_s, p_s) をサッケードの開始点、またサッケード開始後に座標の差が再び

Δp 以下となった時点 (t_e, p_e) をサッケードの終了点と定義する。なおサッケードの開始点の終了点の位置 p_s, p_e は、それぞれ開始点の前 3 点と終了点の後 3 点の平均とする。これらから、サッケードの移動距離 $d = p_e - p_s$ [pixel] とサッケードの速度 $v = (p_e - p_s)/(t_e - t_s)$ [pixel/frame] を求める。

なお 4.2 節の実験では、被験者の視線は水平方向にのみ移動しているため、瞳孔の X 座標のみを用いた。

ここで $\Delta p = 0.4$ と設定し、計測データ中の全視線情報から v と d を求めた結果を図 11 に示す。この結果から、サッケード速度 v とサッケード移動距離 d はほぼ比例することから、その比例係数 a を用いて $d = av$ と表され、またサッケードが起こる期間はほぼ一定であることが示された。最小二乗法から、この被験者に対する d と v の比例係数 a は $a = 7.1$ と求められ、サッケードが起こる期間はほぼ 14[ms] で一定であることがわかる。

5.2 サッケードの到達点の予測

5.1 節の結果をもとに、サッケードの到達点の予測の評価を行った。サッケード到達点の予測値 \hat{p}_e 、サッケード開始点の瞳孔位置 p_s と、そこから k フレーム間から求めたサッケード速度 \hat{v} から、 $\hat{p}_e = p_s + a\hat{v}$ と求められる。サッケード予測に用いるフレーム数 k を $k = 4(500[\text{fps}]$ において 8[ms] 後) としてサッケード到達点の予測値 \hat{p}_e と、計測された瞳孔座標の例を図 12 に示す。実際のサッケード到達点 p_e とその予測値 \hat{p}_e の誤差の平均は -0.47 [pixel]、標準偏差は 0.96 [pixel] となった。この結果から、サッケード開始から 8[ms] 後に、平均 1[pixel] 未満の精度でサッケードの到達点を予測できることが示された。なお 4.1.2 節の視線停留点での精度評価では頭部の動きが原因と思われる誤差が生じていたが、本予測で用いるサッケードは頭部の動きより十分速いためその影響は無視できると考えられる。

6. アプリケーション例

本稿によりサッケードのリアルタイムな計測・追尾が可能な視線計測システムが実現された。これを用いたアプリケーションの検討と開発は今後詳細に進めるが、現時点で考えられるアプリケーションとインタラクションのアイデアを述べる。

まず渡邊ら [10] の一列点滅光源によるサッケードディスプレイを拡張し、ユーザの視線情報から実際にサッケードが起こるタイミングとその速度を計測して、それに応じて光源を点滅のタイミングと速度を制御することで、そのユーザにとっては通常のイメージとして見られるが他のユーザには一瞬の点滅にしか見えないことで、その存在に気づかないような、コンパクトでアンビエントなディスプレイが実現できると考えられる。

また壁面などの大規模なディスプレイにおいて、サッ

ケードの起こるタイミングと予測された視線の移動先から、その視線の移動先の周辺にのみ先回りしてそのユーザに向けた情報提示を行うことで、ユーザごとにディスプレイのごく一部のみを用いた複数ユーザに向けた多様な情報提示デバイスの実現も可能であると考えられる。

その他、モバイル機器のフロントカメラに本システムの高リアルタイム視線計測機能を統合することで、視線による機器操作だけでなく、モバイル機器のディスプレイ全体に表示される情報と、そのユーザにのみ見える、サッカーの移動先の周辺にのみ局所的に表示される情報とを重畳して表示するシステムの実現も可能であると考えられる。

一方、本研究で目的としている、視線検出機能を統合した専用イメージセンサは、ワンチップの超小型・低価格な視線検出カメラとみることもできる。従来のカメラと画像処理システムやPCとの組み合わせによる視線検出システムでは、画像転送・処理速度の制限のみならず、視線検出システム全体のサイズとコストの大幅な低減が困難であり、これが視線検出そのものの用途を制限する要因となっていた。ところが Google 社が発表した小型の頭部装着ディスプレイ (HMD) である Google Glass のように、ユーザが目のすぐ近くに小型のディスプレイを装着し、それに基づいたサービスを提供するウェアラブル・コンピューティングが、いよいよ実用的となってきた現在、この HMD に超小型のワンチップ視線検出カメラを搭載することは、ユーザの負担の増加は無視できる程度であるといえる。HMD への情報提示において、ユーザの視線情報は非常に有用な情報であり、特に両目の視線情報を統合して得られる奥行き方向を含めた注視点の情報は、例えばユーザが手前に焦点を合わせている場合は情報を提示し、遠くに焦点を合わせている場合には情報を提示せずに外界を見えるようにする、などの幅広い応用が期待される。本研究で目的としている視線検出イメージセンサは、このような超小型・低価格で HMD に統合された視線検出システムの実現の可能性を秘めている。

7. まとめ

本稿では、VGA (640×480[pixel]) 程度の解像度と 500[fps] 以上の高フレームレート、および 1 フレーム程度の低レイテンシを両立できる、視線計測カメラシステムのアーキテクチャを検討し、高速カメラと FPGA を用いた視線計測カメラシステムの開発、および統合イメージセンサの試作について述べた。視線計測カメラシステムを用いた評価実験では、実用レベルの視線計測精度とサッカーのリアルタイム追尾が可能であることを示した。さらにその結果から、サッカーの起こるタイミングの検知とその移動先の予測モデルについて検討し、サッカーの期間の半分程度の時点で 1 画素未満の精度でサッカーの移動先を予測可能であることを示した。

今後は視線計測の高精度化と、サッカー予測を活用したインタラクション技術の検討開発を進めたい。

謝辞

本研究は、半導体理工学研究センター (STARC) のアイディアスカウト (IS) の助成を受けた。また CMOS イメージセンサチップの試作は、東京大学大規模集積システム設計教育研究センター (VDEC) を通しローム (株) および凸版印刷 (株) の協力で行われたものである。また本研究の遂行にあたっては、公立はこだて未来大学の川嶋稔夫教授に有益なアドバイスをいただいた。あわせて、深い謝意を示す。

参考文献

- [1] E.A.Hoffman and J.V.Haxby: *Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception*, Nature Neuroscience, Vol.3, pp.80-84 (2000).
- [2] 白井了他: ドライバの運転状態検出のための視線方向の検出, 信学技報 HIP, Vol.103, No.455, pp.67-72 (2003).
- [3] トビー・テクノロジー・ジャパン: Tobii X2-60 アイトラッカー, 入手先 (<http://www.tobii.com/ja-JP/eye-tracking-research/japan/products/hardware/tobii-x2-60-eye-tracker/>)
- [4] 高木宏章, 秋田純一: 急速眼球運動対応の視線検出機能を持つ Vision Chip の試作と評価, 映情学技報, Vol.30, No.32, pp.17-20 (2006).
- [5] 大野健彦: 視線から何がわかるか-視線測定に基づく高次認知処理の解明, 認知科学, Vol.9, No.2, pp.565-576 (2002).
- [6] J.Triesch et al.: *What you see is what you need*, Journal of Vision, Vol.3, No.1, pp.86-94 (2003).
- [7] ナック・イメージ・テクノロジー: EMR-9, 入手先 (http://www.eyemark.jp/product/emr_9/)
- [8] 長崎健, 戸田真志, 川嶋稔夫: 局所特徴量による画像類似度を用いた視線映像の構造化, 映情学技報, Vol.27, No.39, pp.117-126 (2003).
- [9] 吉川厚, 大野健彦: 視線を読む-ユーザにやさしい視線測定環境, NTT R&D, Vol.48, No.4, pp.399-408 (1999).
- [10] 渡邊淳司, 前田太郎, 舘口: サッカー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).
- [11] 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, pp.505-512 (2005).
- [12] H.Kawakami et al.: *Column-Parallel Architecture for Line-of-Sight Detection Image Sensor Based on Centroid Calculation*, Proc. of International Image Sensor Workshop 2013, pp.149-152 (2013).
- [13] 大野健彦, 武川直樹, 吉川厚: 眼球形状モデルに基づく視線測定法, 第 8 回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.307-312 (2002).
- [14] 竹上健, 後藤敏行, 大山玄: 視線方向計測のための高精度瞳孔検出アルゴリズム, 信学論 (D-II), Vol.J86-D-II, No.2, pp.252-261 (2003).
- [15] 日本視覚学会: 視覚情報処理ハンドブック (2000).