

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

川上 隼斗¹ 笹田 裕太¹ 五十嵐 覚¹ 秋田 純一^{1,a)}

受付日 2014年5月1日, 採録日 2015年1月7日

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。サッケ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「サッケードが行き着く先」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。

キーワード: 視線検出, サッケード, イメージセンサ, 高速カメラ, 視線予測

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

HAYATO KAWAKAMI¹ YUTA SASADA¹ SATORU IGARASHI¹ JUNICHI AKITA^{1,a)}

Received: May 1, 2014, Accepted: January 7, 2015

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.

Keywords: line-of-sight, saccade, image sensor, high-speed camera, eye prediction

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など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さらに幅広い応用が期待される。

眼球運動の中には、サッケード (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。なおサッケードにはさまざま

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 Computer Engineering, Graduate
School of Natural Science and Technology, Kanazawa Uni-
versity, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

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

まな種類のものが知られているが、本稿では、視野内での注視点の移動や、文章を黙読する際の文に沿った視線の移動（改行を除く）にともなう跳躍を対象とし、以下では、これらを単に「サッケード」と呼ぶ。サッケードが起き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ですが、脳の視覚野での処理により、普段はサッケード期間中には視覚情報がほぼ遮断されている [5]。一方、このサッケ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」は分かるものの、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] 以上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], [8], 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、サッケードが起き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、高速カメラと FPGA による並列度の高い画像処理系により、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 0 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。これにより、従来はフレームレートや処理レイテンシの制限から不可能であった、サッケードが起こった時点や起きている最中に、リアルタイムでサッケード現象を計測し、さらにその結果を用いて「サッケードの行き着く先」を、サッケードが終了する前に先回りして予測することが可能となる。

本稿は、まず 3 章で、高速カメラと FPGA による高速・低レイテンシの視線計測カメラシステムの開発とワンチップ視線計測カメラの設計について述べる。続く 4 章では、本視線計測システムの、基本的な視線計測性能について評価を行った結果について述べ、5 章では、それに基づいてサッケードの到達点予測の評価を行った結果について述べる。6 章では、サッケードが終了する前にサッケードの速度や到達点を予測可能であることで可能となるアプリケーションのアイデアと、いくつかの実装例について述べる。

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、机上の機器や眼鏡など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 [9] や、頭部の動きに対するロバスト性を高める [10] ための多くの研究がある。EOG 法は、眼球の周りの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。

高速カメラを用いた視線計測システムも市販されており、サッケードを追尾可能な 500 [fps] での視線計測が可能なもの [7] もある。しかしこれらは画像処理系にパイプライン処理を用いることで、視線計測の結果が得られるまでの時間が数十 [ms] と長かったり、あるいは画像処理範囲を制限しつつ頭部の動きにあわせて追尾させることで高速処理を実現しているために、頭部の大きな移動などによって追尾が外れた場合には、再追尾までに数十 [ms] を要したりする。そのためこれらは、サッケードを含む視線情報を記録する用途には適しているが、サッケードが起きている時間は非常に短いため、サッケードが起こったその時点での計測結果を、高フレームレートで継続的かつ安定に得ることは困難である。

一方、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、自動車運転の支援 [1], [2] など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 [11] 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減させ、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。

また安藤ら [12] 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

本章では、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ので、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と、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心の精度が悪化するが、4 章で述べるような、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 章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}) は式 (1) で表さ

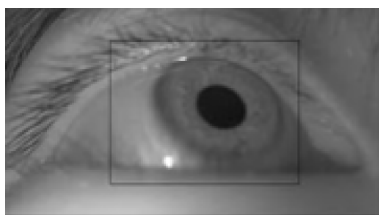


図 1 市販の視線計測システムによって計測された赤外線眼球画像の例（黒枠は算出された瞳孔周辺領域）

Fig. 1 Example of an infrared image of eye captured by a commercial eye tracker, where the rectangular indicates the extracted eye area.

れる。

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

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。式 (1) より、領域の重心の算出には次の式 (2) の 3 つの項を求め、これらの比を求めればよいことになる。

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

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させ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], [13]。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させることが可能である [13]。

このイメージセンサ全体の動作タイミングを図 3 に示す。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

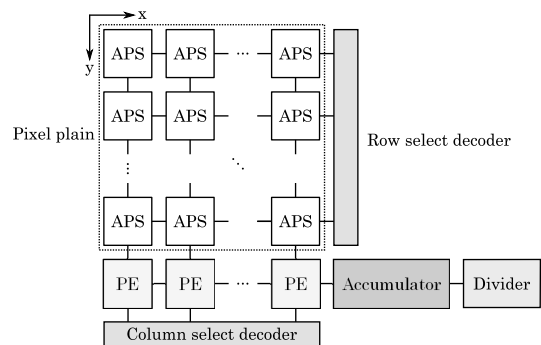


図 2 列並列処理アーキテクチャの視線検出 Vision Chip の構成
Fig. 2 Column-parallel vision chip architecture.

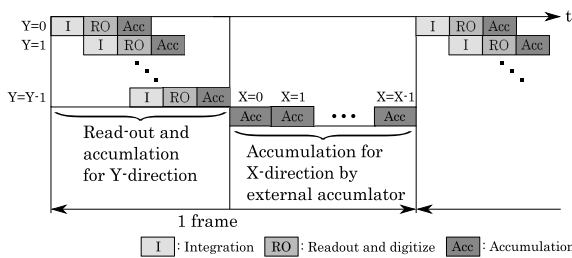


図 3 撮像と重心算出処理のタイミング図

Fig. 3 The operation timing of image transfer and calculation.

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各列に配置される処理回路 (PE) 内のコンパレータにより二値化されて瞳孔領域画素を示すフラグ 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。したが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 $f[\text{Hz}]$ は、フレームレート $F[\text{Hz}]$ 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。

以上により、重心計算に必要な式 (2) の各値が 1 フレームごとに求められ、ほぼ画像読み出し開始から 1 フレーム分のレイテンシ (時間遅れ) 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。

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 4)。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 によって記述し、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。この重心計算処理は、画像転送後、次の



図 4 開発した高速カメラと FPGA によるカメラシステム

Fig. 4 The developed camera system composed of the high-speed camera and FPGA.



図 5 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. 5 Observed pupil and the calculated centroid of captured image.

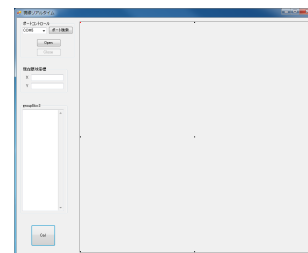


図 6 キャリブレーション機能付きのディスプレイ上の視線表示アプリケーション

Fig. 6 Line-of-Sight display application software with calibration operation.

フレーム転送が終わる前に終わることから、実際の動作では、撮像から FPGA への画像転送の 1 フレーム分の時間を加えて、撮像開始から 2 フレーム後に瞳孔重心座標が得られることになる。

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 5 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 (図 6) を試作した。使用に先立って、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

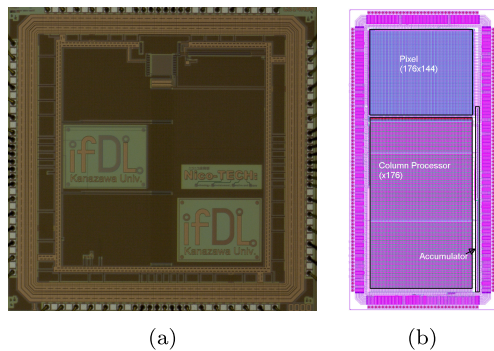


図 7 試作した視線計測 CMOS イメージセンサの評価チップ (a) と、設計した第 2 世代視線計測 CMOS イメージセンサ (b)
Fig. 7 Evaluation chip of Line-of-Sight measurement CMOS image sensor (a), and designed next generation image sensor (b).

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 7 (a) に示す。このようにイメージセンサと重心計算回路を統合したイメージセンサチップでは、画像読み出しを行いながら重心計算処理を同時に行うことが可能であり、次のフレーム（露光）が始まる前に演算結果を得ることができる。すなわち実質的なレイテンシを 0 フレームとすることが可能である。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 × 16、画素面積に対する受光素子の面積の割合（開口率）は 25% である。本イメージセンサの性能評価の結果、500 [fps] 相当の動作速度での重心演算の正常動作を確認した。しかし受光素子の感度が不十分であり、500 [fps] での短い露光時間での視線検出のための眼球画像の取得は困難であることが確認された。この結果をもとに、受光素子の感度の改良を加え、さらに画素数を CIF 解像度 (176 × 144 画素) まで向上させたイメージセンサチップの設計レイアウト図を図 7 (b) 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] × 5.0 [mm]、開口率は 60% である。

4. 視線計測カメラシステムの基本性能の評価

本章では、3.3 節で述べた、高速カメラと FPGA を用いた視線計測システムの、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

本節では、本システムによって視線検出が可能であることの基礎実証と、その精度の検証の実験について述べる。

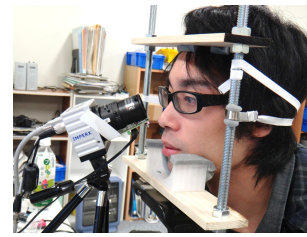


図 8 視線計測実験の様子
Fig. 8 Setup of Line-of-Sight measurement experiment.

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 人とした。

被験者は図 8 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 × 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。被験者の疲れによる注視動作の乱れと、実験中の頭部移動に対する再キャリブレーションを行うため、以上のキャリブレーションから注視操作を 15 回繰り返す操作を 1 セットとし、各被験者が計 3 セットの試行を行う。なお 9 つのキャリブレーション点からの注視点との算出は、簡易な双一次補間を用いた。また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 × 30 [mm] 程度が撮影されるように調整し、解像度は 640 × 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の平均値 (Avg)、標準偏差 (SD)、最大値 (Max)、最小値 (Min) を表 1 に示す。表中の被験者名の頭文字が N と G は、それぞれ眼鏡なしと眼鏡ありであることを示す。なおこの際、実験中の頭部の移動やまばたきなどが原因と思われる、他の値より数十倍大きな値は除外して集計した。この結果、集計に用いたデータ数は、眼鏡なしとありの被験者に対して、それぞれ全試行数 15 × 3 × 5 人 = 225 のうち、203 (90.2%) と 208 (92.4%) となった。

この結果から、被験者の眼球回転角度の平均誤差は 3.19 [deg] となった。また、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分かる。

なお眼鏡ありとなしの被験者のそれぞれの全試行の眼球回転角度の平均値と標準偏差 (括弧内に表記) は、それぞれ 2.46 (2.03) [deg] と 3.84 (2.26) [deg] であった。この両者

表 1 視線計測実験における眼球回転角度の誤差の平均値, 標準偏差, 最大値, 最小値

Table 1 The measured mean error of view angle, standard deviation, maximum and minimum values.

Sbj.	Set	Avg [deg]	SD [deg]	Max [deg]	Min [deg]
N-1	1	2.12	0.61	3.22	1.07
	2	0.57	0.17	0.91	0.34
	3	1.85	0.36	2.50	1.27
N-2	1	2.77	1.11	5.31	0.62
	2	4.43	3.71	11.2	0.21
	3	1.30	1.41	5.73	0.24
N-3	1	4.01	1.49	6.11	1.73
	2	2.69	1.08	3.98	0.25
	3	3.88	1.45	6.40	1.90
N-4	1	1.66	0.74	3.49	0.72
	2	4.71	2.32	9.78	1.76
	3	4.10	2.00	7.59	0.36
N-5	1	0.82	0.39	1.58	0.27
	2	0.98	0.52	2.21	0.03
	3	1.61	0.90	2.85	0.44
G-1	1	3.67	1.99	7.49	0.29
	2	3.43	1.25	5.86	1.33
	3	4.67	1.17	6.05	2.41
G-2	1	2.26	0.72	3.32	0.65
	2	2.39	1.99	6.58	0.10
	3	1.25	0.69	3.16	0.36
G-3	1	2.96	1.24	5.93	0.81
	2	4.18	1.66	6.45	0.98
	3	4.54	3.23	11.9	0.66
G-4	1	7.56	2.74	11.1	2.67
	2	3.59	0.96	5.51	2.14
	3	4.94	2.81	10.0	2.14
G-5	1	5.12	1.15	7.88	4.25
	2	3.36	0.71	4.07	1.89
	3	4.19	1.51	7.02	1.71

に対して F 検定を行ったところ, 両者の分散に有意差は認められなかった ($p = 0.06 > 0.05$). そこでこの両者に対する等分散 t 検定を行ったところ, 両者の平均値に有意差が認められた ($p = 1.39 \times 10^{-10} < 0.05$). すなわち, 眼鏡の有無による視線検出精度には有意差があることになる.

なお視線の動きには, 注視状態でも 0.5 [deg] 程度の固視微動があることが知られており [15], また現在市販されている視線計測システムや研究でも精度は 0.5 [deg] 以下のものが多い [3], [14]. そのため本稿で目的としているサッケードによる視線の移動の検知と予測のためには, 視線計測精度はこの 0.5 [deg] が 1 つの到達目標の目安であるといえるが, 表 1 の結果は, これと比較すると誤差が大きいといえる. 本システムの眼球回転角度の計測精度 (分解能) の理論上限は, カメラの解像度から決まるが, カメラの撮影範囲を眼部周辺に限定して撮影領域の幅を 40 [mm] と仮定し, 竹上らの眼球モデル [16] をもとに眼球半径 $r_0=13$ [mm] [17] を用いると, カメラの水平解像度 640 [pixel] に対する眼球回転角度の分解能, すなわちカメラ 1 画素あたりの眼球回転角度は 0.28 [deg] となる. それに加えて本システムではサブピクセル精度で重心座標を求めていることから, 本システムは, カメラの分解能から決まる画像計測の能力では, 市販

の視線計測システムと同程度あるいはそれ以上の分解能・精度を達成することが原理的には可能であると考えられる.

現状でこの理論性能を達成できていない原因としては, まず机に固定されたカメラと頭部の移動による位置関係の変化が考えられる. これは, 眼鏡のようなデバイスによって, 3.4 節で実現される小型カメラを頭部に固定することで, 大きく改善できることが期待される. また本実験では, 瞳孔重心と注視点の対応を 9 点キャリブレーションからの簡易な双一次補間で求めていることも, 注視点の計測誤差の大きな要因であると考えられる. これに対しては, 本システムの後処理として, 既存の, より高度で高精度な補間アルゴリズム [18], [19] を用いることでも改善でき, カメラ自体の画像計測精度とあわせると, 市販の視線計測システムと同程度の計測精度を達成することは可能であると期待される. ただしデータ集計の際に現れたような, 頭部移動やまばたきに起因するはずれ値の検知と除外, および眼鏡の有無による精度の影響とその対策は, 今後の課題である.

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

正常な視力を持つ 21~24 歳の男性の被験者 5 人に対して, 4.1 節と同様に, 本カメラシステムを用いた実験環境で視線計測を行った. 被験者には, ディスプレイモニタ上に提示される以下の 3 種類の対象物を見るように指示し, それぞれを 1 つの試行として, 計 3 試行での瞳孔座標を各 40 秒間記録した.

- (1) 横書きの日本語の文章を黙読.
- (2) 人の顔の写真を注視する.
- (3) 1 秒ごとにランダムに表示される点を注視.

カメラ解像度は 640×175 [pixel] として眼部全体が撮影されるように調整し, 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の例を図 9 (a) に, またその一部を拡大したものを図 9 (b) に示す. 図 9 (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. なお図 9 (a) の 1,700 [ms] 付近と 8,000 [ms] 付近に観測されている瞳孔の大きな移動は, 横書きの文章を黙読している際に, 文章の右端から次の行の左端へ視線が移動した現象によるものであり, これもサッケードであるといえるが, 細かいステップ状のサッケードとは性質が異なると考えられるため, 本稿では除外して考える.

この結果から, 停留からサッケードへの遷移過程 (図 9 (b) 中の [1]), サッケード中の移動 (同 [2]), およびサッケードから停留への遷移過程 (同 [3]) が 3 点~4 点の計測点ととらえられていることが確認できる. なお各被験者の 3 試

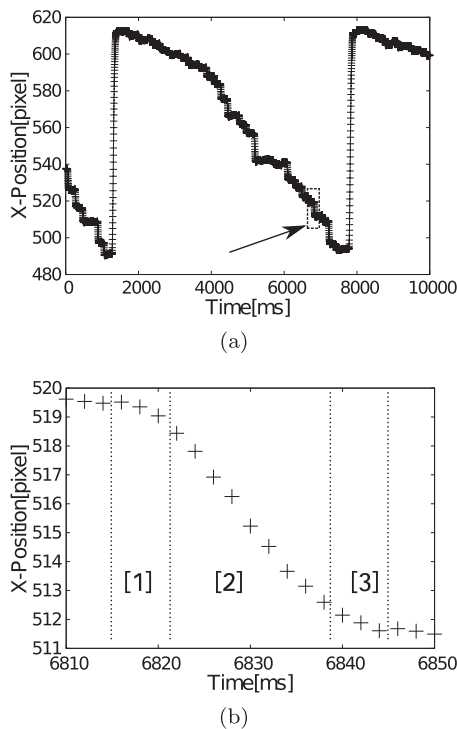


図 9 本カメラシステムで得られた瞳孔の X 座標 (a) とその点線枠内の拡大 (b)

Fig. 9 (a) Measured pupil position and (b) magnified graph.

行のいずれでも、同様のサッケードの過程が記録されていた。すなわち本システムによる 500 [fps] の計測で、停留とサッケードとの間の 3 段階の現象を複数の計測点で観測することが可能であることが示された。さらに本システムの処理時間は 1 フレーム分であることから、サッケードの起り始め (図 9 (b) 中の [1]) あるいはサッケードの途中 (同 [2]) の時点の、サッケードが終了する以前に、サッケードの速度などのサッケードの到達点に関する情報をリアルタイムで取得することが可能であるといえる。

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

本システムで得られる瞳孔座標を用いて、このサッケードの速度と、それによる視線移動距離との関連についての検証

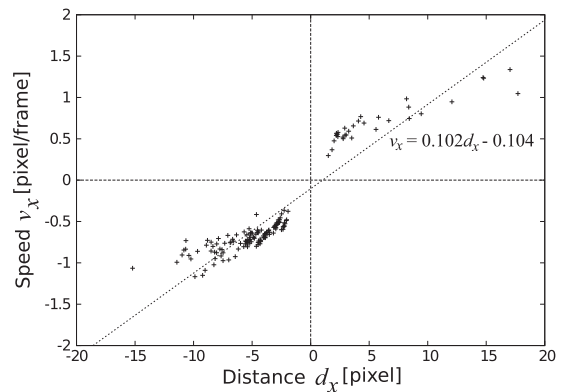


図 10 計測されたサッケードの速度 v_x とサッケード移動距離 d_x の例

Fig. 10 Example of measured saccade speed, v_x and saccade distance, d_x .

を行った。

4.2 節の実験で、5 人の被験者のそれぞれに対する 3 試行によって得られた瞳孔座標に対して、連続する 2 点の距離の差がしきい値 Δp を超えた時刻 t_s [frame] とその座標 $\vec{p}_s = (p_{sx}, p_{sy})$ の組 (t_s, \vec{p}_s) をサッケードの開始点、またサッケード開始後に距離の差が再び Δp 以下となった時刻 t_e [frame] とその座標 $\vec{p}_e = (p_{ex}, p_{ey})$ の組 (t_e, \vec{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と終了点の瞳孔位置 \vec{p}_s, \vec{p}_e は、それぞれ時系列での 3 点の移動平均とする。これらから、サッケードの移動距離 $d = |\vec{p}_e - \vec{p}_s|$ [pixel] とサッケードの速度 $\vec{v} = (\vec{p}_e - \vec{p}_s) / (t_e - t_s)$ [pixel/frame] を求める。ただし d が小さすぎる場合 ($d < 2$) と大きすぎる場合 ($d > 20$) は、それぞれサッケードに至らなかった視線移動と文章の改行などともなう大きな視線移動と判断し、除外した。なおこれらの判断の閾値は、今回の実験では計測データから経験的に決定した。

本実験から得られた結果から、経験的に $\Delta p = 0.4$ と設定し、各試行での全視線情報からサッケードの速度の水平・垂直成分 $\vec{v} = (v_x, v_y)$ と、水平・垂直方向の瞳孔の移動距離 $(d_x, d_y) = (p_{ex} - p_{sx}, p_{ey} - p_{sy})$ との関係の例を図 10 に示す。また各被験者 S1~S5 の各試行のそれぞれの、水平・垂直成分に対して、速度 v と移動距離 d の回帰直線 $v = ad + b$ の係数 a, b と決定係数 R^2 を求めた結果を表 2 に示す。また各試行で、全被験者を通した回帰分析の結果もあわせて示した。なおこの回帰分析は、水平・垂直の各成分に対して個別に行うため、回帰直線の係数も水平・垂直の各成分が求められる。

この結果から、各被験者の各試行での、水平・垂直成分のそれぞれでは、決定係数 R^2 がほぼ 0.8 以上と高い線形関係にあることが分かる。また被験者によるばらつきがあるものの、水平成分と垂直成分では両者の回帰直線の係数は、被験者数が少ないために定量的な検証は困難であるものの、やや異なる値をとることが確認される。

表 2 各被験者の各試行ごとのサッケード速度とサッケード移動距離の水平・垂直成分の回帰直線の係数と決定係数

Table 2 Regression analysis results among saccade speed and distance for each trial, each subject.

試行	Sbj.	a_x	b_x	R^2	a_y	b_y	R^2
(1)	S1	0.102	-0.104	0.872	0.098	-0.012	0.777
	S2	0.067	-0.266	0.740	0.093	-0.017	0.607
	S3	0.091	-0.111	0.906	0.097	-0.041	0.843
	S4	0.115	-0.175	0.830	0.124	-0.037	0.892
	S5	0.096	-0.133	0.886	0.058	-0.078	0.564
	S1~S5	0.095	-0.160	0.844	0.076	-0.049	0.630
(2)	S1	0.092	-0.010	0.814	0.089	-0.003	0.791
	S2	0.093	-0.002	0.866	0.095	0.015	0.817
	S3	0.118	-0.023	0.886	0.095	0.080	0.896
	S4	0.108	-0.042	0.849	0.072	-0.024	0.806
	S5	0.102	-0.009	0.881	0.069	-0.078	0.722
	S1~S5	0.099	-0.022	0.839	0.079	-0.005	0.795
(3)	S1	0.084	-0.006	0.809	0.071	-0.012	0.867
	S2	0.074	-0.008	0.926	0.069	0.113	0.919
	S3	0.082	-0.104	0.940	0.072	-0.015	0.942
	S4	0.076	0.021	0.895	0.069	0.009	0.838
	S5	0.074	0.010	0.916	0.074	0.011	0.921
	S1~S5	0.079	-0.017	0.876	0.071	0.003	0.895

また各試行で全被験者の全瞳孔座標に対して回帰分析の結果でも、決定係数 R^2 はほぼ 0.8 以上となり、やはり定量的な検証は困難であるものの、各試行に対して、被験者ごとの回帰直線の係数の差は小さいことが示唆される。

さらに全被験者の各 3 試行のすべての瞳孔座標に対して回帰分析を行ったところ、水平、垂直方向の (a, b, R^2) は、それぞれ $(0.092, -0.106, 0.867)$, $(0.074, -0.026, 0.827)$ となった。

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 の水平・垂直成分は、それぞれほぼ比例することが分かる。なおサッケード移動距離 d は、サッケード速度 v とサッケードが起こる時間の積であることから、 d と v がほぼ比例するという事は、サッケードが起こる期間がほぼ一定であることになる。

ただし図 10 からは、両者は線形関係というよりも、 d が小さい領域で v が大きく変化する領域と、 d が大きい領域で v の変化が小さい領域に分けてみる方が妥当であるとも考えられる。この両者の関係の詳細なモデル化と被験者・試行に対する普遍性の検証、サッケード開始検知の閾値 Δp の詳細かつ普遍的な決定方法の検討、および移動距離の大きなサッケードを含めたモデル化は今後行う必要がある。

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を、以下の手順で行うことができる。

- (1) 本システムによる視線（注視点）の計測
- (2) サッケードの開始の検知

表 3 サッケード到達点の予測値と到達点との平均誤差とその標準偏差、最大値・最小値

Table 3 Mean error, standard deviation, maximum and minimum values of the predicted saccade destination.

試行	Sbj.	Avg [pixel]	SD [pixel]	Max [pixel]	Min [pixel]
(1)	S1	1.712	1.178	6.371	0.016
	S2	2.115	2.185	10.22	0.032
	S3	1.832	1.130	4.990	0.084
	S4	0.978	1.058	6.314	0.004
	S5	1.557	1.426	9.338	0.030
	S1~S5	1.730	1.432	9.406	0.001
(2)	S1	2.690	1.667	9.268	0.067
	S2	1.826	1.156	3.575	0.092
	S3	0.855	0.782	2.831	0.001
	S4	1.713	1.189	8.812	0.011
	S5	1.432	0.933	3.956	0.066
	S1~S5	1.921	1.347	9.832	0.005
(3)	S1	3.453	1.855	9.614	0.256
	S2	2.210	1.564	5.695	0.203
	S3	1.886	1.304	4.867	0.008
	S4	2.602	1.814	7.739	0.088
	S5	1.595	1.308	5.394	0.015
	S1~S5	2.699	1.894	10.693	0.002

- (3) サッケードの速度の計測（または予測）
- (4) サッケードによる視線移動予測量の算出
- (5) サッケード到達予測点の導出

本節では、この手順によるサッケード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 は、サッケード開始点の瞳孔位置 \vec{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 $\vec{v} = (v_x, v_y)$ から、表 2 の回帰直線係数 $(\vec{a}, \vec{b}) = ((a_x, a_y), (b_x, b_y))$ を用いて $\hat{p}_e = \vec{p}_s + (\vec{v} - \vec{b})/\vec{a}$ と求められる（この式の最後の除算は、各成分に対して行うスカラー除算と定義する）。サッケード予測に用いるフレーム数 k を $k = 4$ (500 [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、実際の到達点 p_e との誤差 $\hat{p}_e - p_e$ の平均値 (Avg)、標準偏差 (SD)、最大値 (Max) と最小値 (Min) を、各被験者・各試行ごとに求めた結果を表 3 に示す。なお各試行で、全被験者を通した回帰分析の結果もあわせて示した。

また全被験者・全試行を通した全データに対して、これに対する回帰直線を用いて予測したサッケード到達点と実際の到達点の平均誤差、標準偏差、最大値と最小値は、それぞれ 2.216, 1.514, 11.52, 0.003 (単位はいずれも [pixel]) であった。この結果は、4.1.2 項と同様のモデルを用いて眼球回転角度に換算すると、平均誤差 0.62 [deg]、標準偏差 0.42 [deg]、最大値 3.23 [deg] となる。この結果から、被験者・注視対象によらず、サッケード開始から 8 [ms] 後に、平均 0.6 [deg] 程度 (最大 3.2 [deg] 程度) 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。

ただし 5.1 節で述べたような、サッカーの速度と移動距離との関連の詳細なモデルと、それに基づくより高精度なサッカー到達点の予測は、今後の課題である。

なお 4.1.2 項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カー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

本稿によりサッカー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 [11] の一列点滅光源によるサッカー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カー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。基礎的な実験として、本システムを用いて、サッカーの開始時点のタイミングにあわせて、計測されたサッカー速度に対応した速度で次元の LED 列を点滅させたところ、詳細な評価は不十分であるものの、提示した図形が横方向の歪みがなく知覚されることが確認された。

また壁面などの大規模なディスプレイにおいて、サッカー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。このようなユーザごとの特性に合わせた情報提示のアプリケーションでは、視線、特にサッカーの計測・予測を、ユーザごとの視線の動きの特性にあわせることが重要となる。本稿ではこのようなユーザごとの特性の差異に関する検討は十分とはいえないため、これらの詳細な検討が必要である。

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速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でもできる。従来のカメラと画像処理システムや PC との組合せによる視線検出システムで

は、画像転送・処理速度の制限だけでなく、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、たと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。なお画像処理機能を統合した高機能イメージセンサは、「人工網膜」とも呼ばれて研究の歴史が長い、必然的に処理内容が専用化されるために用途が狭く、そのために製品としての出荷量が担保できずに実用化された例は皆無であった。そのようなイメージセンサの歴史の中で、非常に幅広い応用分野が期待される視線検出カメラは、十分に実用化の価値があると考えられる。

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。これにより、従来はフレームレートや処理速度レイテンシの制限から不可能であった、サッカーが起こった時点や起こっている最中に、リアルタイムでサッカー現象を計測し、さらにその結果を用いて「サッカーの行き着く先」を、サッカーが終了する前に先回りして予測することが可能であることが示された。

また開発した視線計測カメラシステムを用いた評価実験では、視線計測精度は実用レベルには不十分であるものの、既存のキャリブレーション・補間アルゴリズムを活用することで実用的な視線計測精度は達成することができると考えられる。またサッカーの過程の計測が可能であることが示され、それに基づいて、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 0.6 [deg] 程度の精度でサッカーの移動先を予測可能であることが示された。この結果と、処理系の持つ 1 フレームという低い処理レイテ

ンシを活用することで、サッカーのリアルタイムでの検知と到達点予測が可能であることが示された。

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] Hoffman, E.A. and Haxby, J.V.: Distinct representations of eye gaze and identity in the distributed human neural system for face perception, *Nature Neuroscience*, Vol.3, No.1, pp.80-84 (2000).
- [2] 白井 了, 井東道昌, 乗松 有, 足立和正, 中野倫明, 山本新: ドライバの運転状態検知のための視線方向の検出, 信学技報, 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/>).
- [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] Triesch, J. et al.: What you see is what you need, *Journal of Vision*, Vol.3, No.1, pp.86-94 (2003).
- [7] Inc., S.: RED500, available from (<http://www.smivision.com/>).
- [8] ナック・イメージ・テクノロジー: EMR-9, 入手先 (<http://www.eyemark.jp/>).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 渡邊淳司, 前田太郎, 館ススム: 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).
- [12] 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).
- [13] Kawakami, H., Igarashi, S., Sasada, Y. and Akita, J.: Column-Parallel Architecture for Line-of-Sight Detection Image Sensor Based on Centroid Calculation, *Proc. International Image Sensor Workshop 2013*, pp.149-152 (2013).
- [14] 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).
- [15] 小濱 剛, 新開 憲, 白井支朗: マイクロサッカーの解析に基づく視覚的注意の定量的測定の試み, 映情学誌, Vol.52, No.4, pp.571-576 (1998).
- [16] 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).

- [17] 日本視覚学会 (編): 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店 (2000).
- [18] 佐竹純二, 小林亮博, 平山高嗣, 川嶋宏彰, 松山隆司: 高解像度撮影における実時間視線推定の高精度化, 信学技報, Vol.107, No.491, pp.137-142 (2008).
- [19] 大野健彦, 武川直樹, 吉川 厚: 2点補正による簡易キャリブレーションを実現した視線計測システム, 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.4, pp.1136-1149 (2003).



川上 隼斗

1990 年生。2012 年金沢大学理工学域電子情報学類卒業。2014 年同大学院博士前期課程修了。高機能イメージセンサとその応用システムに関する研究に従事。



笹田 裕太

1990 年生。2013 年金沢大学理工学域電子情報学類卒業。現在、同大学院博士前期課程在学中。高機能イメージセンサとその応用システムに関する研究に従事。



五十嵐 覚

1989 年生。2012 年金沢大学理工学域電子情報学類卒業。2014 年同大学院博士前期課程修了。高機能イメージセンサとその応用システムに関する研究に従事。



秋田 純一 (正会員)

1970 年生。1998 年東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻博士課程修了。博士 (工学)。同年金沢大学工学部電気・情報工学科助手。2000 年より公立はこだて未来大学システム情報科学部情報アーキテクチャ学科講師。2004 年より金沢大学工学部情報システム工学科講師。2008 年より同准教授。2011 年より同教授。集積回路, 特に高機能イメージセンサと, その応用システム, 特にインタラクティブシステムに関する研究に従事。電子情報通信学会, 映像情報メディア学会, 芸術科学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。