

# 網膜再帰反射を利用した遠隔サッカード検出手法の研究

渡邊 淳司\*<sup>1</sup> 安藤 英由樹\*<sup>2</sup> 関口 大陸\*<sup>1</sup> 前田 太郎\*<sup>2</sup> 館 暲\*<sup>1</sup>

Study of Remote Saccade Detection Technique based on Retroreflective Features of the Retina

Junji Watanabe\*<sup>1</sup> Hideyuki Ando\*<sup>2</sup> Dairoku Sekiguchi\*<sup>1</sup>, Taro Maeda\*<sup>2</sup>, Susumu Tachi\*<sup>1</sup>

**Abstract** – We have been studied on an information display based on saccadic eye movements. The display can present 2D images using only a single line of flickering light sources. When people make a saccade across the light sources, they can perceive 2D images thanks to the retinal afterimage drawn by the saccade. Though, so far, saccades of observers are induced by other stimuli such as two sequentially flashing light sources, if the saccades are remotely detected, practical applications can be realized. In this study, we present a new technique for detecting saccades, based on the fast, robust pupil detection method. The method uses two infrared light sources synchronized with the camera's frame rate. The two light sources generate bright and dark pupil images, and we can carve out the position of the pupil by subtracting them. From the series of the captured image, change of the eye gaze is measured as the displacement of the pupil's position. Measuring the displacement with a line scanning camera, which can take one line image with high frequency, the saccade can be detected. We investigated the feasibility of this technique by clarifying the retroreflective features of the retina and required spatial resolution for detecting saccadic eye movements.

**Keywords** : Saccade, Remote Measurement, Pupil Detection, Saccade-based Display

## 1. はじめに

### 1.1 眼球運動計測を利用した

#### Saccade-based Display の応用

これまで筆者らは、サッカードと呼ばれる高速な眼球運動を利用した視覚情報提示手法 (Saccade-based Display, 以下SD) についての研究を行ってきた [1] [2]. SD は図 1 左のように、1 列の光点列を固定し、観察者がサッカードを行っている間に光点列の点滅パターンを高速で時間変化させると、点滅パターンが眼球運動により空間パターンに展開されて 2 次元イメージが知覚されることを利用したものである. SD は図 1 右のように光点列自体を物理的に移動させるわけではないため、少ない空間的リソース、エネルギーによって情報提示が可能である. これまで、SD を利用して情報提示を行う際には、情報提示側が眼球運動を誘導するような刺激 (例えば順に光る 2 つの光点) によって、観察者の眼球運動を誘発し、それに合わせて光点列を点滅させて情報提示を行ってきた. そのため、眼球運動のタイミングが光点列の発光タイミングと合わない

と、観察者は 2 次元イメージを知覚することができなかった.

しかし、観察者のサッカードを遠隔から検出し、そのサッカード中に光点列を光らせることが可能であれば、観察者に対して確実に情報提示が可能となる. また、“どこ”にいる人間が“いつ”サッカードを起こしたかを判別可能であれば、特定の間がサッカードを起こしたときのみ、選択的に情報提示を行うことも可能となる. このように、SD を利用した情報提示システムにおいて、遠隔からサッカードを検出する手法は重要な要素技術であり、これによって様々なアプリケーションが実現されると考えられる.

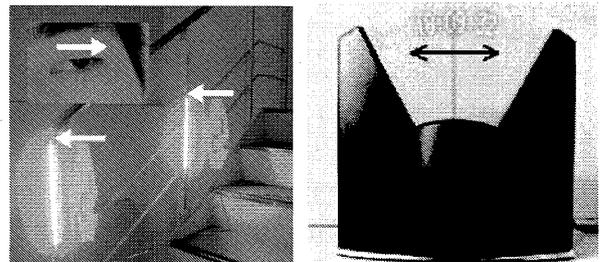


図 1 眼球運動を利用した情報提示システム (左) と 光点列移動による情報提示デバイス ISM 社 Fantazein (右)

Fig.1 Information display based on saccade and on a single moving light array

\*1: 東京大学大学院 情報理工学系研究科

\*2: 日本電信電話株式会社 NTT コミュニケーション科学基礎研究所

\*1: Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

\*2: NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

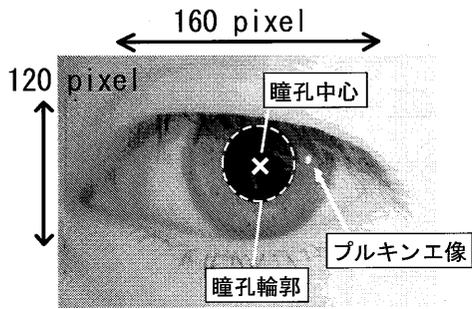


図2 視線計測に利用される要素  
Fig.2 Elements used in measuring eye movements

### 1.2 これまでの遠隔視線計測技術

これまで提案されてきた遠隔視線計測手法の多くは、赤外光をカメラ近傍から眼球に向かって照射し、眼球付近の映像をカメラによって取得、画像処理によってプルキンエ像と瞳孔中心を検出し、二点の相対位置関係によって眼球運動を計測するものであった(図2に各要素を示す)[3][4][5][6]。この手法を利用して、精度良く計測を行うためには眼球周辺の詳細な2次元画像が必要となる。具体的には、眼球を横160pixel縦120pixel程度で撮影すれば、0.5degの精度で眼球運動が計測可能であるという報告があり[7]、眼球周辺画像ではその2~3倍と考えると、NTSC規格標準(640×480pixel)程度のカメラで撮影する必要がある。一方で、NTSC規格標準のフレームレートは60Hzであり、サッカー(最高速度700deg/s、持続時間50ms[8])のような高速で短時間に行われる眼球運動のタイミングや軌跡を正確に知ることは困難である。

このように、これまでの遠隔眼球運動計測システムでは、位置計測に高い空間解像度を必要とするため、高速な眼球運動を計測可能な時間解像度を確保することができなかった。そのため、これまでの手法を利用してリアルタイムにサッカーを検出し、サッカー中に情報提示を行うことは難しい。そこで、本研究では網膜再帰反射像を利用することによって、一台のカメラで遠隔から高い時間解像度でサッカーを検出する手法について述べる。

### 2. 提案する計測手法

本章では提案する計測手法の原理、これまでの遠隔計測手法との違いについて述べる。

#### 2.1 計測原理

初めに、提案する計測手法に関連深い、網膜再帰反射を利用した瞳孔位置検出手法について述べる。図3にあるように、カメラと眼球を結ぶ光軸上に存在する光源によって眼球を撮影すると、網膜からの再帰反射によって眼球の瞳孔部分が明るく光る現象が観察される(この現象自体はフラッシュを使って写真撮影する

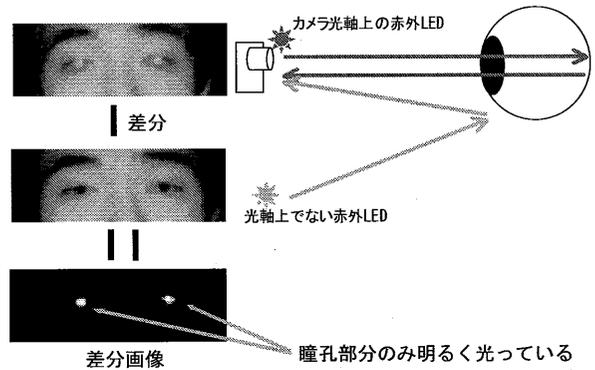


図3 差分画像による瞳孔位置の取得  
Fig.3 Acquisition of pupil positions by taking subtraction between the images with bright and dark pupil

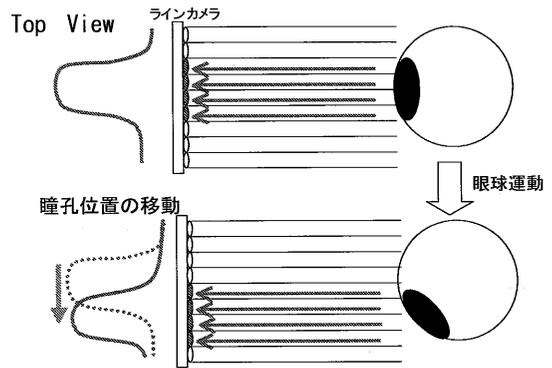


図4 眼球運動による瞳孔位置の移動  
Fig.4 Displacement of pupil position caused by an eye movement

際に、瞳孔部分が赤く光る赤目現象として知られている)。このとき、カメラの光軸上に存在する光源によって撮影された画像(以下、On-axis画像)とカメラの光軸とはずれた位置に存在する光源によって撮影された画像(以下、Off-axis画像)の差分をとると、On-axis画像のみ網膜再帰反射によって瞳孔部分が明るく光っているため、瞳孔位置が抽出されることが知られている(図3差分画像)[9][10]。

そして、本論文4.2節で述べるように、網膜再帰反射は視線がカメラ方向を向いてなくても生じるため、図4のように眼球の回転は、瞳孔位置の変化として計測される。このとき、サッカーによって生じる高速な瞳孔位置の変化を高フレームレートのカメラで撮影することによって、サッカー開始のタイミングを精度よくを検出することが可能であると考えられる。

サッカー検出の概念図を図5に示す。上が撮影された瞳孔位置の時間変化、下が瞳孔移動速度の時間変化を表している。時刻 $t_0$ にサッカーが開始、 $t_2$ に終了したとすると、瞳孔位置、移動速度は図にあるような時間軌跡を示す。本論文で目的としている、実時間サッカー検出を行うためには、サッカーの開始

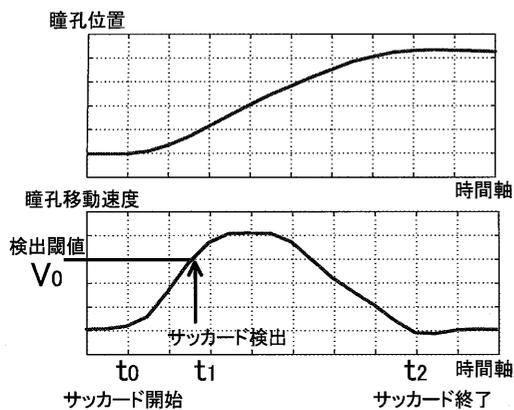


図5 サッカード検出概念図

Fig.5 Concept diagram of saccade detection

とともに生じる現象を捉える必要がある。これまでのサッカード近接計測を行った研究では、サッカード検出方法として眼球運動速度がある一定速度を越えたら、サッカード開始とみなす方法が多く採用されている [8]。本手法においても同様の考え方から、瞳孔の移動速度に着目し、瞳孔移動速度がある一定速度 ( $V_0$ ) を越えたらサッカードの開始を検出したと考えることとする。さらに、情報提示のために、検出後何らかの処理を行うことを考えると、サッカード開始から検出までの時間 ( $t_0$  から  $t_1$  までの時間) ができるだけ短いことが望ましい。また、本手法では位置の差分から速度を算出しているため、少なくともサッカード検出には2フレーム分の時間が必要となる。サッカードの持続時間が50ms程度であることを考えるとカメラのフレームレートとして最低でも200Hz程度(2フレームで検出できたとしてサッカード開始10ms後に検出)は必要となると考えられる。そのため、これまでの計測手法で使用されていた、フレームレート60Hz程度(1フレーム約16msであり、サッカードの持続時間中には3フレームしか撮影されない)の2次元エリアカメラではリアルタイムにサッカード検出を行うことは困難である。

ただし、サッカードを利用した情報提示においては、その振幅の大きさ、日常生活における頻度の高さから水平方向のサッカードのみを利用して情報提示を行っている [1]、水平方向のみのサッカードを高い時間解像度で検出できればよい。そこで、本手法では1次元方向に空間解像度を限定することによって、高いフレームレートを実現しているカメラを利用することとした。そのようなカメラとして、以下の2つのタイプのカメラが挙げられる。

1. ラインスキャンカメラ

- ・1kHz以上のフレームレートで撮影可能
- ・受光素子の位置が固定

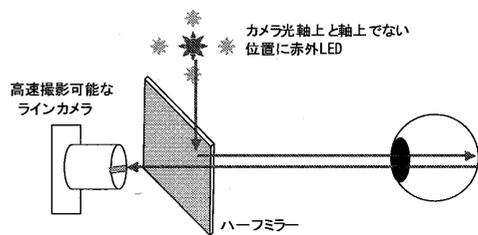


図6 提案する計測原理のシステム構成

Fig.6 System components of the proposed technique

2. パーシャルスキャンカメラ

- ・フレームレート200Hz~500Hz程度
- ・任意の部分を選択してスキャン可能

ラインスキャンカメラは、受光素子が1次元に固定して配置されているため、配置と垂直方向の眼球位置の移動に対してレンチキュラレンズやシリンジカルレンズを使用して受光素子の位置に合わせて物理的に光を集める必要がある。一方で、パーシャルスキャンカメラはスキャン位置をソフト側で簡易に変更可能であり、眼球位置の垂直移動に対する処理が比較的容易である。そのため、本論文ではパーシャルスキャンカメラを使用して実験を行うこととした(ただし、本論文では1次元方向を高速にスキャンするカメラを以降どちらもラインカメラと記す)。

システムの構成を図6に示す。ハーフミラーを使用してカメラとOn-axisの赤外LEDが同じ光軸上になるように配置する。Off-axisのLEDはカメラの光軸とある程度離して配置する。カメラ前には可視光のノイズを除くためにIRフィルタ(図には示されていない)を設置する。計測時にはOn-axisのLEDとOff-axisのLEDを交互に光らせ、それぞれの網膜再帰反射像をラインカメラで計測し、差分画像から瞳孔位置を取得、その移動速度からサッカードを検出を行う。

2.2 本手法の特徴

一般に、エリアカメラを使用して点光源の2次元位置を計測する目的において、エリアカメラではサンプリングレートが遅い場合、ラインカメラとシリンジカルレンズ等を用いて1次元方向を別々に高速計測する手法がとられることが多い。しかし、眼球位置を計測することを目的としたこれまでの遠隔眼球計測においては、エリアカメラが多く用いられており、サッカードのような高速な眼球運動の運動軌跡、開始・終了タイミングを精度良く計測することは困難であった。そこで、本研究では、これまで瞳孔位置検出のみに利用されていた網膜再帰反射像を利用すると同時に、瞳孔位置の水平移動を高速なラインカメラで計測することによって、高い時間解像度でサッカード検出を実現している。

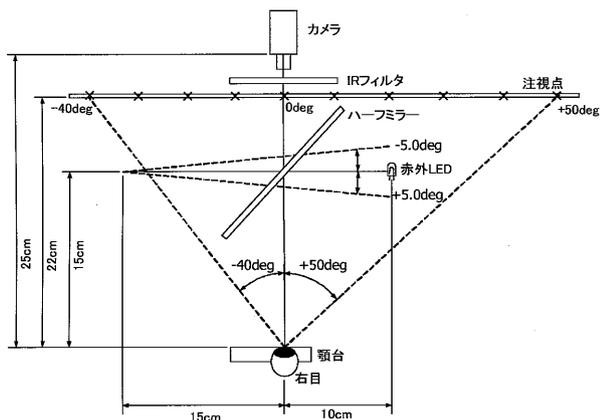


図7 実験装置の配置  
Fig.7 Experimental arrangement

### 2.3 本手法実現のための要件

本手法は網膜再帰反射によって得られる瞳孔位置の移動を利用して、サッカード検出を行うものである。しかし、本手法が基本原理としている網膜の再帰反射特性について詳細に調べた研究は存在していない。そこで、本手法を実現するためには、カメラ光軸に対する光源のずれと網膜再帰反射量の関係、及びカメラ光軸に対して眼球の向いている角度と網膜再帰反射量の関係を調べることが必要となる。また、計測条件を決定するにあたって、眼球をどの程度の空間解像度で撮影すればサッカードが検出可能なかを調べることが必要である。次章以降では網膜の再帰反射特性を調べる実験を行い、本手法を使用して効率的に計測を行う条件について述べ、次に、サッカード検出に必要な空間解像度について計測し、その結果を考察する。

## 3. 網膜再帰反射特性の計測

### 3.1 実験装置と手順

本章では網膜の再帰反射特性を調べた実験について述べる。実験装置の配置を図7に示す。本実験は網膜の再帰反射特性を調べることが目的なので、被験者の頭部を顎台で固定し、2次元のエリアカメラを使用して実験を行った。USBカメラ(フレームレート30Hz, 解像度320×240ピクセル, 画角92.6deg)を被験者の右目から25cmの位置に配置し、被験者の右目を撮影した。眼球の横幅は50pixel程度である。カメラの前にはIRパスフィルタを配置した。赤外LED(ピーク波長880nm, ビーム角120deg, 放射強度60mw/sr)をハーフミラーを介して配置し、その位置をカメラの光軸に対して-5degから+5degまで1deg刻みで11段階に変化させた。被験者の注視点は-40degから+50degまで10deg刻みで10段階に変化させており、注視点、LED位置の組み合わせは計110通りである。眼球の撮影は被験者に注視点の一つを固視してもらい、3秒

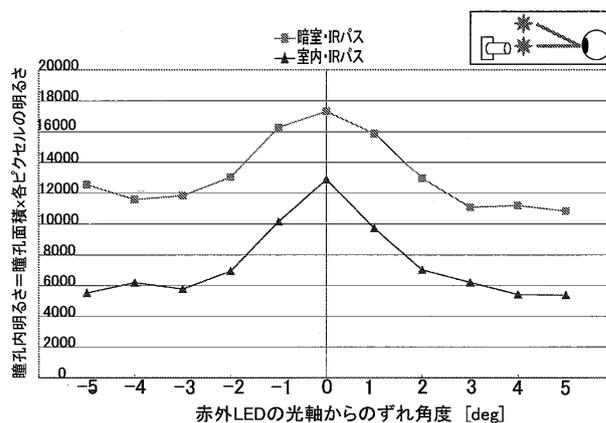


図8 注視点0deg(暗室・室内条件), 赤外LEDの位置を変えたときの再帰反射特性の変化  
Fig.8 Fixation 0 deg (dark room and indoor condition), retroreflective feature according to infrared LEDs' position

間(約90フレーム)撮影し、頭部が動かないように固定したまま、赤外LEDの位置を変化させた。つまり、ある注視点を見ているあいだは頭部を固定して、11段階に赤外LEDの位置を変化させ計測を行った。また、注視点0degの条件においては、照明条件を暗室、室内(100lx)と2通りに変化させ、他の注視点の条件では暗室条件のみで計測を行った。被験者は2名である。実験結果では代表的な1名分のデータを示す。

### 3.2 画像解析

次に実験によって得られた映像から網膜の再帰反射特性を抽出するために行った画像処理について述べる。各試行で得られた動画ファイルから50フレームを切り出し、50枚から1枚の平均画像を算出した。その画像を256段階のグレースケールに変換し、コントラストを調整するためにヒストグラムの均等化を行った。そして、赤外LEDとカメラ光軸のずれが0degの画像から瞳孔抽出を行って、画像から瞳孔部分を切り出すフィルタとして利用した。ある注視点に視線を向けている間は頭部が固定されており、瞳孔面積、位置は変化しないため、このフィルタを他のLEDずれ角度の画像にも乗算した。このような処理を全ての注視点のデータに対して行い、それぞれの瞳孔内の明るさの値の和、瞳孔面積、単位面積あたりの明るさを求めた。

## 4. 実験結果

### 4.1 赤外LEDのずれによる反射量の変化

図8に被験者が0degの注視点を固視しているときに、赤外LEDの位置を変化させたときの網膜からの反射量の違いを示す。照明条件は暗室、及び室内の2条件である。横軸は赤外LEDのカメラ光軸に対するずれ角度[deg]であり、縦軸は瞳孔内明るさの値の和である。暗室条件、室内条件ともにグラフの概形は似

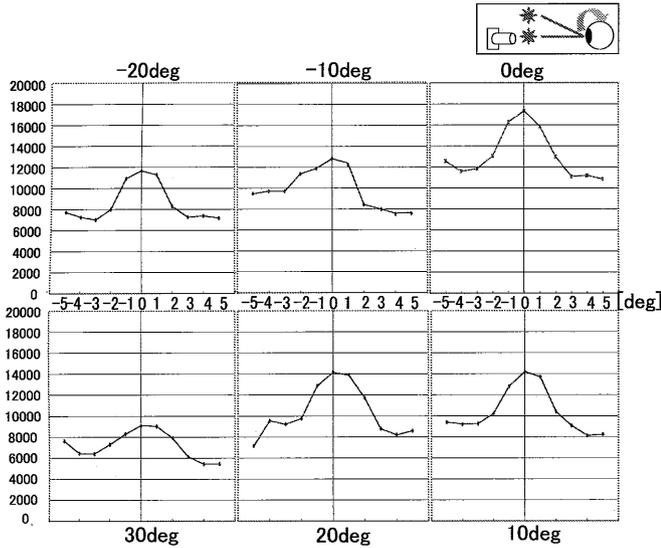


図9 視線方向による再帰反射特性の変化  
Fig.9 Retroreflective feature according to gaze direction

ており、カメラ光軸からのずれが 0deg のとき、明るさの和が最大となり、ずれ角度が大きくなると明るさの値が減少する。およそ 3deg 程度離れると暗室内で 7 割程度、室内で 5 割程度となり明るさが一定となっている。これは、赤外 LED が光軸から約 3deg 離れると網膜からの再帰反射が観察されないことを意味しており、瞳孔位置の計測においては 0deg と、3deg 程度離れた位置に赤外 LED を配置し、差分画像を取得することが望ましいということがいえる。また、室内条件では瞳孔が収縮することによって全体として値が小さくなっているが、3deg 程度離れると再帰反射が観察されない傾向は変化していない。これは、画像の差分を利用している本手法は外部環境によらず利用可能であるということを示している。

4.2 視線方向による反射量の変化

図 9 に注視点の位置を変化させた場合のデータを示す。全て暗室条件のデータである。実験では、-40deg から +50deg まで注視点を変化させて計測したが、同様の傾向を示したのでここでは -20deg から +30deg まで示す。縦軸、横軸ともに図 8 と同じである。どの注視点角度においても赤外 LED が 0deg のとき最も値が大きく、3deg 程度光軸から離れると再帰反射が観察されなくなっている。これは、サッカード(振幅 10 ~ 30deg [8]) のような振幅が大きい眼球運動を行った前後でも瞳孔位置を検出することが可能であるということを示している。また、明るさの和の最大値についてみると、LED のずれ角が 0deg のとき最大で、注視点が中心から離れるにつれ減少している。図 10 に示すように、眼球を回転させるにつれて撮影される瞳孔面積が減少している一方で、単位面積あたりの明るさに

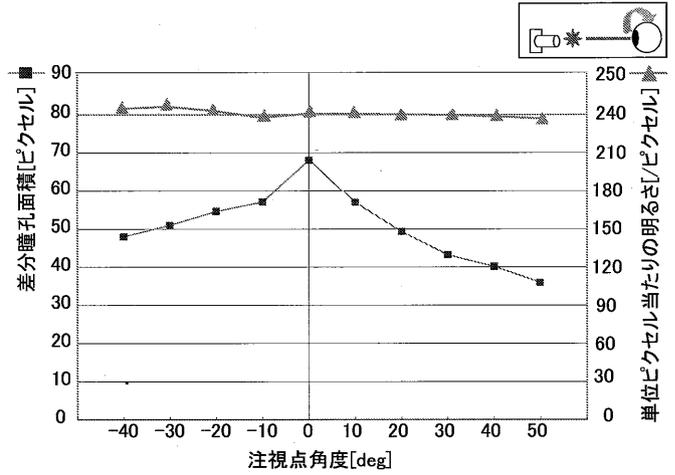


図 10 瞳孔面積と単位面積あたりの反射量  
Fig.10 Area of pupil and amount of reflection per pixel

変化が無いということ考えると、反射量の総量の減少はカメラに映る瞳孔の大きさが変化しているために生じているものと考えられる。

4.3 実験のまとめ

本実験により、On-axis と Off-axis の 2 種類の LED は 3deg 程度離すと効果的に差分画像を取得可能であり、サッカードのような移動量の大きな眼球運動が起きても、瞳孔位置を検出可能であることがわかった。また、注視点位置による反射量の変化は眼球の回転によって瞳孔の面積が変化し、それによって瞳孔全体の反射量が増えているということがわかった。

5. 本手法実現に必要な空間解像度

本章では、サッカード検出に必要な空間解像度を調べる実験を行った。

5.1 実験装置と手順

本実験においては、被験者(1名)のサッカードを実際に高速カメラで撮影し、得られた映像に対してサッカードタイミングを検出する処理を行った。そして、撮影された映像の空間解像度を落としていったとき、どの程度までサッカード検出が可能であるかシミュレーションを行った。実験装置の位置関係は図 7 と同様である。被験者は顎台に頭部を固定し、正面の注視点(0deg)から右方向に 5, 10, 15deg のサッカードをそれぞれ 10 試行行い、そのサッカードを撮影した。ただし、本実験においては眼球を撮影するカメラとして、パーシャルスキャンカメラ(Point Grey Research Inc. Scorpion)を使用し、眼球周辺の画像を空間解像度 340x120pixel(図 2 に示す眼球横幅を約 250pixel で撮影可能な解像度)、フレームレート 200Hz で撮影した。本実験においては、被験者の頭部は固定され、眼球の位置が既知であるので、眼球位置特定のため

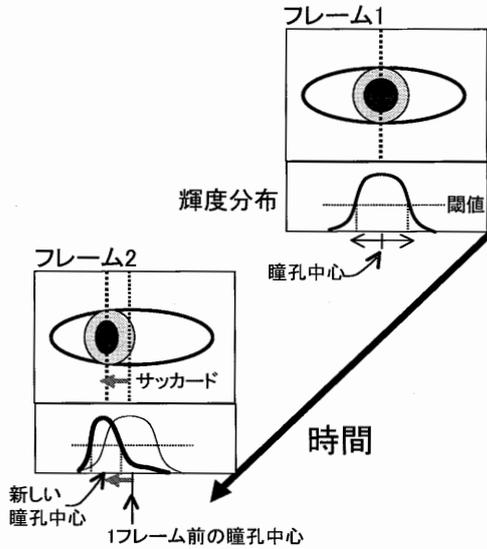


図 11 サッカード検出のための画像処理  
Fig. 11 Image processing for detecting saccades

の Off-axis の LED は使用しなかった。差分を取らず、On-axis の LED のみで眼球を照らした場合でも、明るい瞳孔部分はその他の部位とのコントラストが十分大きく瞳孔部位が抽出可能であったので、On-axis の LED によって得られた画像に対してサッカード検出の処理を行った。赤外 LED (Siemens 社 SFH480-2 ピーク波長 880nm, ビーム角 12deg, 放射強度 40mw/sr) をカメラ光軸上 (図 7 の赤外 LED, 0deg の位置) に固定し、撮影中は点灯させ続けた。実験環境は、実際の使用状況における瞳孔径に近づけるために、日常環境であるがサッカードを利用して情報提示が可能なやや暗めの室内の明るさ (40lx) とした。

### 5.2 サッカード検出のための画像処理

本節ではサッカード検出のために行った画像処理について述べる。得られた 200Hz の映像からサッカード周辺の 40 フレーム (200ms) を画像として取得し、それぞれの画像から瞳孔中心を通る水平方向 1 行を切り出す。そして、その 1 行の輝度分布において、図 11 のように、瞳孔中心の輝度と輝度分布の最低値の中間値を瞳孔輪郭を抽出する閾値として利用し、1 行における瞳孔の左右端を決定する。そして、その左右端の中点を瞳孔中心とした。この処理を全ての画像に対して行い、それぞれの画像における瞳孔中心位置を決定し、その時間変化を瞳孔移動速度として求めた (ただし、両端を検出するにあたっては、瞳孔の幅がある一定値 (4mm) 以上という前提を利用して、睫毛等によって瞳孔が隠される影響を除外した)。

### 5.3 計測された瞳孔移動軌跡と移動速度

サッカード振幅 5, 10, 15deg において計測された瞳孔移動軌跡, 移動速度の平均を図 12 に示す。図 (a) の

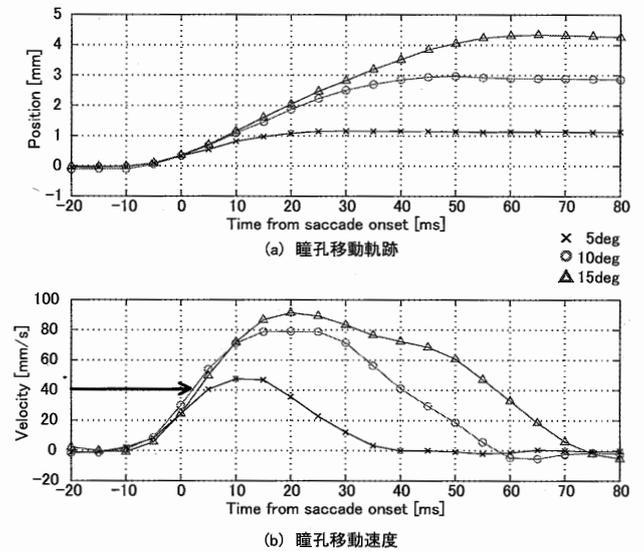


図 12 計測された瞳孔位置の変化と変化速度  
Fig. 12 Measured displacement of pupil position and velocity

縦軸はカメラによって計測された瞳孔移動距離 [pixel] を眼球との位置関係から移動距離に換算したもの [mm] (画像処理を開始した画像の瞳孔位置を 0 とした), 横軸はサッカード開始時間を 0 とした時間 [ms] である。図 (b) の縦軸は (a) から算出された移動速度 [mm/s], 横軸が時間 [ms] である。ただし、移動速度は (a) のデータに対してカットオフ周波数 50Hz, 段数 2 段 (2 フレーム後のデータまで使用する) のローパスフィルタを施した後に前後のフレーム間の差分を取って算出した。また、各試行の平均を取るにあたっては、瞳孔移動速度が 10mm/s を初めて越えた時刻をサッカード開始時刻 (時刻 0) とし、サッカード開始時刻を揃えて平均を取った。

両図において×印が 5deg, ○印が 10deg, △印が 15deg の軌跡である。図 (a) においては、サッカード振幅に比例して移動距離が大きくなっているのが観察される。また、サッカードの持続時間はそれぞれ、30, 50, 70ms 程度であり、図 (b) において速度が生じている時間とほぼ一致している。図 (b) の移動速度の時間履歴について考えると、10deg における最大速度は 5deg の約 2 倍である一方で、15deg における最大速度は 10deg よりやや大きい程度である。15deg のサッカードは最大速度が 10deg の場合と殆ど変わらないが、最大速度が生じている時間が長くなることによって、振幅を大きくしていることが観察されている。これはこれまで調べられてきたサッカードの動特性と一致している [8]。

これらの移動速度の時間履歴に対して、例えば、瞳孔移動速度が 40mm/s を越えたらサッカード開始を検出したとする場合、図 (b) の矢印の速度を越えたとき

の時間（時刻 5ms）にサッカーが検出されたことになる（ただし、本実験の処理では 2 段のローパスフィルタを用いているので、実際に検出される時刻は 3 フレーム後の 20ms である）。

また、5deg のサッカーによる瞳孔移動速度の最大値は 10, 15deg に比べて小さく、5deg のサッカーを検出しようとする必要があり、そうすると、頭部運動等他の要素による瞳孔移動とサッカーによる瞳孔移動を区別することが難しくなる。そして、5deg のサッカーは持続時間が 30ms 程度と短いため、検出時刻がサッカー開始に対して遅れると、実時間で何らかの処理を行うことは難しい。そのため、サッカー開始後約 10ms までの速度履歴は振幅 10deg 以上のサッカーではほとんど変わらない [8] ということから、10deg 以上のサッカーを検出対象にすることが安定したサッカー検出に繋がると考えられる（そのため、以後は 10, 15deg のデータについてのみ議論を行う）。

#### 5.4 空間解像度と検出の関係

次に、サッカー検出に必要な空間解像度について考える。空間解像度を考える目安として、被計測者のいる距離において水平方向 1cm を占める pixel 数、 $X[\text{pixel}/\text{cm}]$  という値を考える。 $X[\text{pixel}/\text{cm}]$  は、カメラの画角  $\theta[\text{deg}]$ 、水平方向解像度  $R[\text{pixel}]$ 、被験者とカメラの距離  $L[\text{cm}]$  とすると、図 13 から、 $X = (R/2)/(L \times \tan(\theta/2))$  と表される。本実験においては  $R = 1280$ 、 $\theta = 55.8$ 、 $L = 25$  であり、 $X = 60.6[\text{pixel}/\text{cm}]$  となる。このとき、本実験で得られた映像の解像度を下げ（ $R$  を小さくする）、 $X$  の値を小さくしていったときに、どの程度までサッカー検出が可能であるかシミュレーションを行った。 $R = 1280$  の条件で撮影された画像を水平方向に 1/2, 1/4, 1/5, 1/10 にダウンプリングしてサッカー検出処理を行った（それぞれ、 $X = 30.3, 15.2, 12.1, 6.0[\text{pixel}/\text{cm}]$ ）。

10, 15deg のそれぞれ 10 試行全てのデータをダウンサンプリングし、瞳孔位置、移動速度を算出した。得られた瞳孔移動速度の平均、及び標準偏差を図 14 に示す。縦軸、横軸は図 12(b) と同じである。エラーバーの大きさは  $2\sigma$  である。グラフに示されている黒い太線は移動速度が 40mm/s の値であり、検出の閾値を 40mm/s としたとき、確実にサッカーが検出される（閾値がエラーバーを下回っている）時刻まで線を水平方向に延ばしている。実時間でサッカーを検出、情報提示を行うためには、グラフにおいて 1~2 フレーム以内（5~10ms）にはサッカーが検出されていることが望ましい。図 14 から、10deg, 15deg 両条件において、 $X = 60.6, 30.3, 12.1[\text{pixel}/\text{cm}]$  の場合、サッカー開始直後（5~10ms 後）にサッカーが検

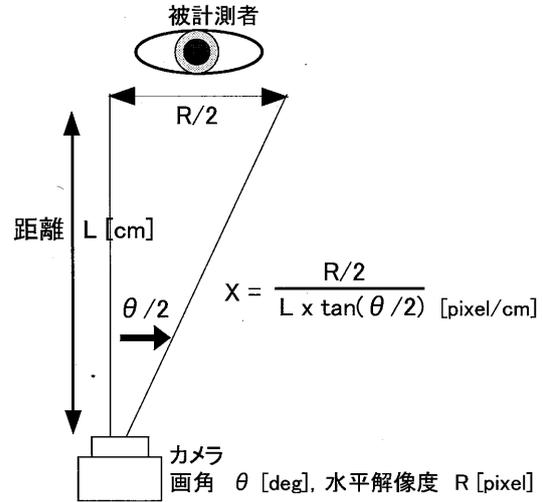


図 13. 空間解像度を決定する要因  
Fig. 13 Elements to be considered for determining spatial resolution

出されているが、 $X$  の値が小さくなると、標準偏差（エラーバーの大きさ）が大きくなり、 $X = 6.0$  では、検出までの時間が 20ms かかっていることが読み取れる。つまり、10deg 以上のサッカー検出においては、 $X = 12.1[\text{pixel}/\text{cm}]$  程度の空間解像度が必要であると考えられる。

#### 5.5 考察：頭部運動との分離について

ここで、サッカーによる瞳孔移動と頭部運動による瞳孔移動の分離について考察する。本手法では、瞳孔移動速度がある閾値を越えたらサッカー開始とみなしているが、その閾値として起こり得る頭部運動よりも大きな値を設定すれば、安定したサッカー検出が行われると考えられる。5.3, 5.4 節においては、40mm/s という値を閾値として使用したが、この値は、計測状態を着座姿勢等腰が固定された自然な姿勢であることを想定したものであり、立位、歩行状態においては、より大きな閾値が必要となる可能性が考えられる。

また、この閾値は、カメラによって撮影された画像における移動速度なので、被計測者とカメラの距離が変化すれば値が変化する。そのため、被計測者との距離を何らかの方法によって知る必要がある。本手法では、両目の瞳孔位置が算出可能なので、平均的な瞳孔間距離を元に被計測者とカメラのおよその距離を推定可能だと考えられるが、この点については、今後の研究において詳しく考えていきたい。

#### 5.6 実験のまとめ

本実験から、水平方向のサッカーを安定して検出するためには  $X = 12.1[\text{pixel}/\text{cm}]$  以上の空間解像度が必要であることがわかった。この値は、少なくとも 1mm あたり 1pixel 程度の解像度が必要であるという

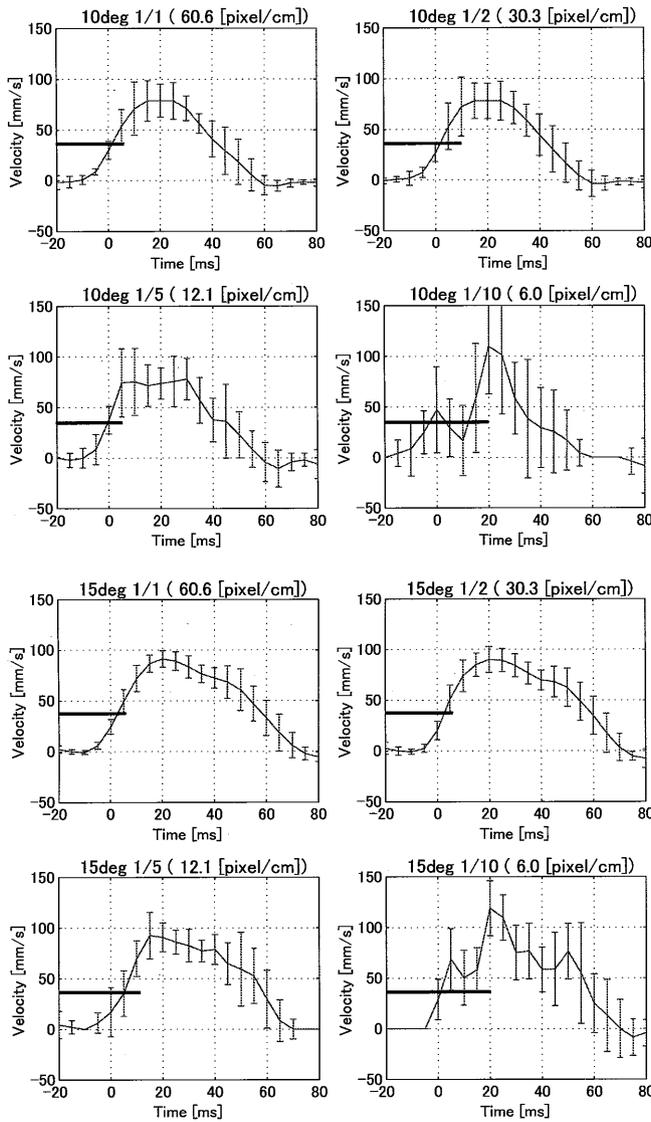


図 14 空間解像度による計測精度の違い (10, 15deg)

Fig.14 Difference of accuracy according to spatial resolution (10, 15deg)

ことを意味する。これまでの遠隔眼球位置計測において、0.5degの精度で計測を行うには眼球を水平方向160pixel, 1mmあたり6pixel程度で撮影する必要があった(眼球の直径は25mm程度[8])。つまり、サッカード検出という目的においては、従来手法に比べて、空間的解像度としては1/6で目的が達成されることが分かった。

また、従来手法では、頭部の運動が殆ど許容されなかったが、本手法においては、頭部運動はかなり許容されることが示唆される。例えば、 $X = 10\text{pixel/cm}$ として1mの距離から画角60degのカメラで撮影すると、必要な水平方向の解像度は1155pixelである。そして、瞳孔位置は撮影範囲内、約1m程度水平方向に移動可能である。

以上、本論文で提案するサッカード検出手順は以下のようにまとめられる。

1. 被計測者までの最大距離において、 $X = 10\text{pixel/cm}$ 程度以上になるようカメラの画角、解像度を設定
2. 被計測者までの距離を眼間距離によって推定
3. 閾値となる移動速度(本実験では40mm/s)が被計測者の距離で生じたときの画像上での移動速度  $V_{image} = (R/2) \times \frac{V_{real}}{L \times \tan(\theta/2)}$  [pixel/s] を計算
4. 瞳孔位置周辺の画像を高速に撮影(パーシャルスキャンカメラを使用した場合、撮影位置を瞳孔の位置に合わせて変化させる)
5. On-axis画像とOff-axis画像の差分から瞳孔位置を取得
6. 瞳孔位置の差分から瞳孔移動速度を算出し、閾値と比較してサッカードを検出

## 6. まとめ

本論文では、網膜再帰反射による瞳孔位置を水平方向に高速スキャン可能なカメラで撮影することによって、高い時間精度で水平方向のサッカードを検出可能な手法を提案した。そして、網膜再帰反射の特性と、サッカード検出に必要な空間解像度について調べる実験を行った。

本手法は、サッカードを利用した情報提示だけではなく、近年、多く開発されている視線を使用したインターフェイス[11][12][13]への応用等も考えられる。また、サッカードは注意や覚醒状態と強く関係しており[14][15][16]、人間の心理状態や生理状態を遠隔から計測する手法としての役割を持つ。また、遠隔から非侵襲で、高い時空間解像度の眼球計測が必要とされる分野として、眼球運動異常の診察が考えられる[17][18]。これまで、眼振等の眼球運動異常の治療においては、医師が眼球の動きを細かに観察し、異常の原因となる脳の部位を特定してきた。しかし、これらの観察は医師の経験に基づくことが多く、同時に定量的な計測が行われることが望まれる。脳内の異常と眼球運動の関係[19]についての研究も存在し、医療分野への応用も考えていきたい。

## 参考文献

- [1] 渡邊淳司, 前田太郎, 館暉: サッカード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, 館暉: サッカード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-D-II, No. 9, pp. 1350-1357, 2003.
- [3] 古賀一男: 眼球運動実験ミニ・ハンドブック, 労働科学研究所出版部, 1998.
- [4] 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, 1993.
- [5] 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 An Eyeball Model Based Eye Tracking Method, 第8回画像センシングシンポジウム, pp. 307-312, 2002.
- [6] 伴野明, 岸野文郎, 小林幸雄: 瞳孔抽出と頭部の動きを許容する視線検出装置の試作, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J76-D-II No. 3, pp. 636-646, 1993.
- [7] 松田圭司, 永見武司: 汎用視線位置計測システム, 第12回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 173-176, 1997.
- [8] 日本視覚学会 編: 視覚情報処理ハンドブック, 朝倉書店, 2000.
- [9] C.H. Morimoto, D. Koonsb, A. Amirb, M. Flicknerb: Pupil detection and tracking using multiple light sources, Image and Vision Computing, Vol. 18, pp. 331-35, 2000.
- [10] Y. Ebisawa: Improved Video-Based Eye-Gaze Detection Method, IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 47, No. 4, pp. 948-955, 1998.
- [11] 知野哲郎, 福井和広, 鈴木薫: 非言語メッセージ利用インタフェース”Gaze To Talk” システム, 信学技報 HIP98-26, pp. 31-38, 1998.
- [12] 大和正武, 門田暁人, 高田義広, 松本健一, 鳥居宏次: 一般的な GUI に適した視線・マウス併用型ターゲット選択方式, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 6, pp. 1320-1329, 2001.
- [13] 大野健彦: 視線インタフェースから視線コミュニケーションへ 視線のある環境を目指して, 情処研報 2001-HI-95, pp. 171-178, 2001.
- [14] 植野彰規, 笠原俊和, 高瀬守一朗, 南谷晴之: 覚醒水準に依存する視覚誘発サッカードの特性解析——脳波の同時計測にもとづく凶形弁別課題負荷時と無負荷時の比較, 計測自動制御学会論文集, Vol. 33 No. 9, pp. 861-868, 1997.
- [15] 植野彰規, 立山剛, 高瀬守一朗, 南谷晴之: 「持続性覚醒変化に対するサッカード動特性の依存性」、電子情報通信学会論文誌, Vol. J83-D-II, No. 4, pp. 1172-1179, 2000.
- [16] 中山実, 高橋功次, 清水康敬: 注視とサッカードの頻度が眼球の活動に及ぼす影響, 電子情報通信学会論文誌 DI, Vol. 85, No. 9, pp. 931-935, 2002.
- [17] 渡邊郁緒, 新美勝彦: イラスト眼科, 文光堂, 2003.
- [18] M. Strupp, O. Schuler, S. Krafczyk, K. Jahn, F. Schautzer, U. Buttner, T. Brandt: Treatment of downbeat nystagmus with 3,4-diaminopyridine, Neurology, Vol. 61, pp. 165-170, 2003. (本文献においては眼振のビデオ映像も同時に見ることが可能である)
- [19] 安藤新樹: 点滅光を利用した衝動性眼球運動速度の測定装置, 神経眼科, Vol. 11, No. 3, pp. 318-325, 1994.

## [著者紹介]

## 渡邊 淳司 (学生会員)



平 14 東京大学大学院工学系研究科修了。現在 東京大学大学院情報理工学系研究科 博士課程。眼球運動を利用したディスプレイ及び眼球運動中の視覚特性の研究を行う。日本バーチャルリアリティ学会論文賞受賞(平 13), 学術奨励賞受賞(平 14)。また, 身体性と表現という視点から作品展示及びパフォーマンスも行う。  
<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~junji>

## 安藤 英由樹 (正会員)



平 11 愛知工業大学大学院 工 電気電子工 修士課程修了。平 11 同大学工学研究科 電気材料工博士課程。平 12 理化学研究所 BMC JRA 配属。平 13 科学技術振興事業団「協調と制御」領域グループメンバーとして 東京大学大学院情報学環研究員を経て現在 NTT CS 研 客員研究員。生体工学, VR, ウェアラブルなどの研究に従事。  
<http://www.star.t.u-tokyo.ac.jp/~hide/>

## 関口 大陸 (正会員)



平 13 東京大学大学院工学系研究科博士課程修了, 博士(工学)。同年より科学技術振興事業団研究員。平 14 東京大学大学院情報理工学系研究科 助手となり現在に至る。ネットワークロボティクスおよびテレインテグレーションに関する研究に従事。

## 前田 太郎 (正会員)



昭 62 東大・工・計数工卒。工博。昭 62 通産省工業技術院機械技術研究所。平 4 東大先端科学技術研究センター助手, 平 6 同大学院・工 助手, 平 9 同大学院・工 講師, 平 12 同大学院情報学環講師。平 15 日本電信電話株式会社 主幹研究員。人間の知覚特性・神経回路のモデル化, テレインテグレーションの研究に従事。計測自動制御学会論文賞, 学術奨励賞, 日本ロボット学会技術賞受賞。

## 館 暉 (正会員)



昭 43 東大・工・計数卒。昭 48 同大学院博士課程了。工博。同年同大助手。昭 50 通産省工技院機械技研研究員, マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て, 平 1 東大先端科学技術研究センター助教授。平 4 同センター教授。平 6 同大学院・工・計数工教授。平 13 同大学院・情報理工・システム情学専攻教授。テレインテグレーション, 人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞, 通産大臣賞, 国際計測連合特別勲功賞など受賞。IMEKO ロボティクス会議議長, SICE フェロー, 日本バーチャルリアリティ学会前会長。

(2003年9月23日受付)