# 眼球の表面反射像解析による注視点推定法 中澤 篤志<sup>†,††</sup> ニチュケ クリスティアン<sup>†</sup> 竹村 治雄<sup>†</sup>

# † 大阪大学サイバーメディアセンター 〒 560-0043 豊中市待兼山町 1-32 †† 科学技術振興機構さきがけ 〒 332-0012 埼玉県川口市本町 4-1-8 E-mail: †{nakazawa,christian.nitschke,takemura}@cmc.osaka-u.ac.jp

概要 注視点推定技術は心理学やライフサイエンス,マーケティングやユーザインタフェースの分野で広く使用さ れている.従来の注視点推定システムは,ユーザに装置を装着することが必要だったり,システムの使用前に校正 (キャリプレーション)を行う必要があり使用が煩雑であるという問題点がある.またこの校正は,ユーザの前面に 仮想的な平面を想定し,眼球の角度と平面上の位置を対応づけるという原理に基づいており,ユーザが校正時と異な る環境に移動したりシーンが複雑な奥行きを持った状況の場合には大きな誤差が生じる.我々はこれらの問題を解決 するため,眼球表面上で反射する環境光の反射像を用いた新しい注視点検出手法を提案する.本手法は眼球に入射す るシーンの反射光から直接注視点を推定するため,従来法の問題点を解決することができる.まず我々は眼球の幾何 モデルに基づき,注視点からの光が眼球表面反射画像中で反射する位置 (Gaze Reflection Point(GRP))を求める手法を 開発した.これにより,眼球表面反射画像中の GRP での画像特徴とシーンの画像特徴を比較することで注視点を推 定することが可能だが,実際の眼球表面反射画像は輝度・解像度ともに低く,品質の良い画像が得にくいため直接的 な比較は困難である.これを解決するため,シーンに高速度のパターン光を投影することで,眼球表面反射画像と シーンの画像を高速かつ頑健に対応付ける手法を開発した.我々は高輝度 LED を格子状に配置しパターン光を高速 にコントロールする高速度パターン光プロジェクタを開発し、高速かつ頑健に視線検出を行うシステムを開発した. 複数の被験者による注視点推定結果により,事前の校正や装置装着を必要とせず,従来法と同程度の精度で注視点を 推定できることを確認した.

# 1. はじめに

シーン中から人の注視点を検出する技術は、心理学 やライフサイエンス、マーケティングやユーザーイン タフェース等様々な領域で利用されている.そのため、 商用も含め数多くの視線検出システムが提案されてい る[1]. これらの従来システムは用途に応じて様々なも のが提案されているが、いくつかの問題点も指摘されて いる.まず、多くのシステムはアイカメラ等のデバイス を装着しなければならず、また装着機器が不要なシステ ムであっても事前の校正(キャリブレーション)処理が 必要である.この校正は、ユーザの前面に仮想的な平面 を想定し、アイカメラによって検出された眼球の角度と 平面上の位置を対応づける原理に依っているため、ユー ザが校正時と異なる環境に移動したりシーンが複雑な奥 行きを持った状況の場合には大きな誤差が生じる.

このような問題点に対し本論文では, 眼球表面におけ る環境の反射像を用いることで視線検出を実現する新た な手法を提案する.すなわち, 眼球表面上での環境の反 射像と,別カメラから得られたシーンの画像とを直接対 応付けすることで注視点検出を実現する.このようなア プローチを取ることにより,以下のような長所が得られ る.

キャリブレーション不要 本手法はシーン画像中の点と 眼球表面反射像中の点の直接対応づけのみで実現できる ため,事前の校正処理が不要である。

装着機器が不要 眼球の表面反射像はカメラにより遠隔 から撮影できるため,機器の装着が不要である。

複雑なシーンへの対応 前述したように従来法は,ユー ザの全面に仮想的な平面を仮定し注視点を検出するも のであるため,キャリブレーションとは異なるシーンで は正しく動作しない場合がある.これに対し本手法は, シーン画像と眼球表面反射画像を画像特徴レベルで比較 するためこのような問題が生じない.

この推定方式を実現するために、以下の2つの手法を 新たに開発した.第1に、眼球表面上で視線方向から来 る環境光を反射する点(Gaze Reflection Point(GRP))を考 え、これを眼球の幾何モデルを用いて求める手法を提案 する.これにより、眼球反射画像でのGRPでの画像特 徴とシーン画像の画像特徴を比較することで注視点を推 定することができる.本論文では、透視投影に基づいた 解法および弱透視投影に基づいた近似解法によりGRP を導出する手法について述べる.一方で、眼球の表面反 射光は弱く解像度も高くないため、通常の撮影では画像 特徴を用いてマッチングすることは困難である.そこで 第2に,環境に対してパターン光を投影することで,眼 球表面反射画像とシーンの画像をロバストに対応付け する手法を提案する.注視点を動かす状況にも対応する ため,我々は非常に高速に時系列パターンを投影できる 照明システム (High Framerate Programmable Illumination Projector (HF-PIP))を新たに開発し,高速度カメラと同 期して撮影するシステムを実現した.HF-PIP は格子状 に設置された高輝度 LED,レンズ系,コントローラから なり,任意のパターン光を数百 Hz で投影することが可 能である.この仕組みにより,眼球表面反射画像とシー ンの画像上の点を高速に対応付けし,注視点の検出を行 う事が可能である.

以降2章では関連研究について述べ、3章では眼球の 幾何モデルおよび GRP の導出について述べる。4章では 新規開発した HF-PIP, 暗瞳孔法による眼球姿勢の検出 法およびシステム全体の構成について述べ、5章~7章 で実験結果および考察を行う。

### 2. 関連研究

視線(注視点)検出においてよく知られているシステ ムは、ユーザに頭部にアイカメラと呼ばれる機器を装着 するものである[2][3]. アイカメラはユーザの頭部に設 置され、頭部に対する眼球の角度を計測する。別の環境 を計測するカメラがユーザの前方を観察し、注視点はこ の画像中の位置として得られる。この方式はユーザの体 に機器を装着するため、ユーザの移動に対して柔軟であ るが、機器の装着が必要であり、また環境カメラと眼球 方向に対する校正処理が必要である.またこの校正は, 環境カメラ前方に仮想的な平面を仮定し、計測された眼 球角度とのマッピングを行うものであるため、注視点計 測精度は環境の形状に左右される. このような環境に対 する制約に対応したシステムもあるが、機器装着の煩雑 さの点ではより大きな制約が生じる.別種のシステムで は、パン・チルト・ズーム (PTZ) ユニット等を装着し たリモートカメラを用いて眼球画像を撮影するシステム もある[4][5][6]. この方式の場合機器装着の手間はない が、事前の校正は必要であり、また環境の形状に対応で きない点に対しても同様の問題がある.

眼球の表面反射画像を用いて、人の見ているシーンを 再現する試みも行われている[7].しかしこれらの一連 の研究では注視点計測は行っておらず、また画像は近接 した位置から十分にセットアップされた環境で撮影され たものを使っている.

近年ではユーザインタフェース等の用途を想定し, PC のマウスのクリックや画面のサリエンシマップと目領域 の画像を学習することで視線検出を実現するアプローチ



図1 提案する眼球表面反射による注視点検出手法.眼 球計測カメラから瞳の輪郭を抽出し眼球の姿勢を 計測する.注視点 (PoG) からの光は眼球表面上の Gaze Reflection Point(GRP) で反射しカメラに入射 する.提案する注視点検出法は,眼球表面反射像 中の GRP とシーン中の対応点を求めることで実 現される.

が提案されている[8][9]. これらの手法はキャリブレー ション等は不要であるが,想定された使用シナリオは限 られており,また人の認知特性に依存しているため,本 提案手法の適用範囲とは異なる.

# 3. 眼球の表面反射を用いた注視点計測

本章では、提案する眼球の表面反射を用いた注視点計 測アルゴリズム、およびそのために必要な眼球の幾何モ デル、画像による眼球姿勢計測、GRPの導出法について 述べる.

図 1に、提案する注視点計測アルゴリズムを示す.環境中の注視点 (Point of Gaze (PoG)) から発せられた光は 眼球表面上で反射し、眼球計測カメラに入射する.こ の眼球(角膜)表面上の反射点を Gaze Reflection Point (GRP)と呼ぶ.提案する注視点計測は、眼球計測カメラ での GRP での環境反射像と、環境カメラの画像とのマッ チングを取ることで実現できる.

GRPを得るためには、眼球計測カメラに対する眼球の 姿勢推定が必要である。以降ではまず眼球の幾何モデル および眼球の姿勢推定について述べ、次に2通りのGRP の導出法を述べる。

#### 3.1 眼球の幾何モデル

図3.(a),(b) に実際の眼球および近似した幾何モデルを 示す.ここから分かるように眼球は単一の球面では無 く,角膜部分の球面(角膜球面:Corneal sphere)と眼 球本体(眼球面:Eyeball sphere)の2つの異なる球面 から構成した方が良く近似できると考えられる.角膜 球面はより小さな径であり,眼球面全体の1/6の面積



図3 瞳の投影像による眼球姿勢推定

を占める.また、これら2つの球面が交差する円が瞳 (Limbus)である.この近似モデルにはいくつかのパラ メータからなり、本研究では全ての実験において既定の 値 ( $r_L = 5.6mm, r_C = 7.7mm$ )を用いる[10].この幾 何モデルは実際の眼球と完全に一致している訳ではない が、幾何的に単純であり解析的に扱いやすいという利点 がある.また従来研究においても用いられており[11]、 眼球の表面反射解析において十分な精度を持つものと考 えられる.

#### **3.2** 眼球の姿勢推定

次に、眼球計測カメラ画像からの眼球の姿勢推定手法 について述べる.弱透視投影モデルを仮定すると、瞳 は中心  $\mathbf{i}_L$ ,半径  $r_{\max}, r_{\min}$ ,回転角 $\phi$ の5パラメータで 表される楕円として投影される(図3).ここから、瞳 中心の3次元位置 L からカメラ中心までの距離 d は  $d = f \cdot r_L / r_{\max}$ で得られる.ただし f はカメラの焦点 距離である.

視線方向gは以下で得られる.

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \sin\tau\sin\phi & -\sin\tau\cos\phi & -\cos\tau \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$
 (1)

ここで  $\tau$  は瞳の奥行き方向の傾きを表しており,  $\tau = \pm \arccos(r_{\min}/r_{\max})$ で求められる.またここから 角膜球面の中心点 C は, L から C までの既知の長さ  $d_{LC}$ (= 5.6mm) と視線ベクトル g を用いて求めることが できる.

#### 3.3 眼球の表面反射と GRP の導出

眼球計測カメラによる眼球表面反射像の撮影は,反

射光学系(Catadioptic system)と同様であると見なせ, GRP は反射球面である角膜球面の幾何モデルと, 眼球計 測カメラから得られた眼球姿勢を用いて求めることがで きる.本論文では GRP の解法として,透視投影モデル に基づいた手法と弱透視投影モデルに基づいた手法を導 出する.前者はより正確な推定モデルであるがカメラの 内部パラメータの事前校正が必要であり,後者はカメラ の事前校正は不必要だが,弱透視投影の性質上,瞳を平 行投影する近似投影面での瞳の奥行きの差と,カメラと 近似投影面との距離の比に応じて誤差が大きくなる.し かし一般的な実験設定では,後者における誤差が問題に なることは少ないと考えられ,計算量の差を考えると後 者の近似モデルで十分である.

求めたい点は画像中の GRP の位置であり,これは GRP の 3 次元座標を求め,画像座標系に投影することで得ら れる.GRP の導出は 3 次元空間中の光のパスを計算する 必要はなく,眼球への入射光と反射光を含む面を考える ことで 2 次元平面上で解くことができる.以降では,3 次元座標でのカメラ主点を O,角膜球面の中心点 C,注 視点を P,GRP を S,および GRP における角膜球面の 法線方向を  $n_{\rm S}$  とし,これを前述した平面上で表した二 次元点をそれぞれ O', C', P', S',  $n'_{\rm S}$  と表す.これらの変 換を表す回転行列 R は以下で得られる.

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_{x} & \mathbf{r}_{y} & \mathbf{r}_{z} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(2)  
$$\mathbf{r}_{x} = -\frac{\mathbf{C}}{\|\mathbf{C}\|}, \quad \mathbf{r}_{y} = \mathbf{r}_{z} \times \mathbf{r}_{x}, \quad \mathbf{r}_{z} = \frac{\mathbf{r}_{x} \times \mathbf{g}}{\|\mathbf{r}_{x} \times \mathbf{g}\|}.$$
(3)

#### 4. 弱透視投影モデルによる GRP の導出

眼球のカメラへの投影に弱透視投影モデルを導入し, PoG が視線方向と並行な直線上にあると仮定すると, GRP を大幅に少ない計算量で得ることが可能である. こ の仮定は、カメラと眼球との距離が角膜球面の大きさに 比べて十分大きく,注視点の大きさが角膜球面の大きさ に比べて十分大きいことを想定しているが,殆どの利用 ケースで成り立つと考えられる.

眼球への入射,反射点,および反射光は1つの平面内 で起こると考えることができる。特に弱透視投影モデル の場合,この面は,瞳の投影像(楕円)の短軸を含み, 画像面に対して垂直な平面である。図4に,この仮定を 用いた場合の光線の経路を示す。まず,角膜表面での反 射から以下の式が得られる。

$$\mathbf{C}' \cdot \mathbf{n}_{\mathbf{S}'} = \mathbf{g}' \cdot \mathbf{n}_{\mathbf{S}'}.$$

$$\mathbf{C}' = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}, \quad \mathbf{g}' = \begin{bmatrix} \cos \tau & \sin \tau \end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

$$\mathbf{n}_{\mathbf{S}'} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}.$$
(4)



図4 弱透視投影モデルによる眼球(角膜)表面反射と GRPの関係.注視点からの光は視線方向と平行に 入射しGRPで反射しカメラに入射する.

ここから,視線方向を表す $\tau$ を用いて GRP を表す角 度 $\theta$ が得られる.また,弱透視投影の局所投影面上にお ける瞳の中心と GRP の距離  $|\mathbf{I}_{\mathbf{S}'} - \mathbf{I}_{\mathbf{L}'}|$ を求めると,

$$\theta = \arctan((1 - \cos\tau) / \sin\tau), \qquad (5)$$

$$|\mathbf{I}_{\mathbf{S}'} - \mathbf{I}_{\mathbf{L}'}| = r_c \cos\left(\tau - \theta\right) - d_{\mathbf{LC}} \sin\tau.$$
 (6)

となる.

次に, 瞳の中心を物体中心と見なした弱透視投影を考 えると, 眼球計測画像での GRP の位置 **i**<sub>S'</sub> は以下で求め られる.

$$\mathbf{i}_{\mathbf{S}'} = \mathbf{i}_{\mathbf{L}} + s \cdot \mathbf{v}_{sm} \left| \mathbf{I}_{\mathbf{g}'} - \mathbf{I}_{\mathbf{L}'} \right| \tag{7}$$

$$s = r_{\max} / \left( r_L \sin \tau \right). \tag{8}$$

ここでsは弱透視投影のスケール係数であり、 $i_L$  は瞳中心の座標、 $v_{sm}$  は瞳の投影像(楕円)の短軸を表す二次元ベクトルである.

#### 5. システムの実装

提案手法を実装しシステムを構築した.システムの実 装において問題となるのが、以下のような問題である.

1. 眼球の姿勢をどのように頑健に推定するか?

2. シーン上の注視点と眼球表面反射像の GRP をどのようにして頑健に対応付けるか?

第1の問題に対する解決法として,赤外光投影によりま ず瞳孔を検出し,次に瞳の輪郭を検出する2ステップの アルゴリズムを用いた.瞳孔抽出は暗瞳孔法[12]よりロ バストに行えるため,瞳孔輪郭をまず検出しておくこと で瞳の輪郭抽出も安定して実現できる.第2の問題に対 する解決法として,シーンに時系列パターン光を投影す ることで,シーン上の点と眼球反射像の対応付けを取る 手法を提案する.これにより,シーンの輝度が低い場合 でも高速・ロバストに対応付けを行う事ができ,また時 系列パターンを使うことで角膜のテクスチャの影響も除 外できる.我々はパターン照明装置として,通常のデー タプロジェクタに加え,新規に開発した LED アレイに よるプロジェクタも用いシステムを実装した.

#### 6. システム構成

提案システムは, 眼球計測カメラ, 環境カメラおよび プロジェクタからなる (図5).また, 眼球計測カメラの周 囲には赤外 LED が取り付けられている.全システムは マイクロコントローラで制御されており, 同期動作する.

眼球計測カメラは,目領域を撮影し赤外 LED を用い たアクティブライティングにより,瞳孔と瞳を検出しカ メラに対する眼球の姿勢を計測する.プロジェクタは環 境に時系列パターンを投影し,環境カメラはシーンを撮 影する.

システムの動作シーケンスを図6に示す.最初の27 レームで瞳孔,瞳の検出を行い,その後シーンへのパ ターン投影が行われる.このシーケンスを繰り返すこと で動的なトラッキングを行うことができる.

#### 6.1 赤外光照明による瞳孔・瞳の輪郭検出

瞳孔と瞳の輪郭検出は赤外光のアクティブライティン グにより行う.まず,暗瞳孔法を用いて瞳孔領域を抽出 する.これは瞳孔と他の領域との光の反射・吸収特性の 違いを利用した手法である[12].眼球計測カメラに取り 付けられた赤外 LED は,第1フレームでは OFF となり, 第2フレームでは ON となる.眼球領域の中で,瞳孔は 外部からの光を吸収するため両フレームとも黒く写る が,他の領域は光を反射するため第2フレームでは明る く写る (図7-(a),(b)).ここから,第1フレームと第2フ レームの撮影画像の差分を取ることで,値の小さな領域 を瞳孔領域と見なすことができる.

次に、この領域の輪郭に対して RANSAC による楕円フィッティングを適用し、楕円パラメータ  $B(x,y,c_x,c_y,a,b,\phi)$ を得る.ただし $(c_x,c_y)$ は中心位置,a,bは短径および長径, $\phi$ は回転角である.

瞳輪郭の検出は、瞳孔輪郭の推定結果を用いて2ス テップの最小化を行い推定する.まず、瞳孔の中心およ び回転角  $(c_x, c_y, \phi)$  を用い、径のパラメータ (a, b) の みを変化させ以下の関数を最小化し、瞳の径の初期パラ メータ  $a_0, b_0$  を得る.

$$eval(c_x, c_y, a, b, \phi) = \sum_{x,y} E_x(x, y) \cdot \operatorname{sgn}(c_x - x) \cdot B(x, y, c_x, c_y, a, b, \phi)$$
(9)
$$[a_0, b_0] = \operatorname{arg\,max}_{a, b} eval(c_x, c_y, a, b, \phi)$$
(10)

ここで  $E_x(x,y)$  は入力画像の x 微分であり,また  $a_0 > a$ ,  $b_0 > b$  である.画像の x 微分のみを用いるのは瞼の影響 を避けるためである.また,  $sgn(c_x - x)$  は,瞳の中心



図5 システム構成.本システムは眼球計測カメラ,赤 外線 LED,環境カメラとプロジェクタからなる. 全装置はマイクロコントローラによって同期動作 する.

Frame #	1	2	3	4	5	
赤外LED	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	
HF-PIP	OFF	OFF	ALL ON	CODE#1	CODE#2	

図6 高速度パターンプロジェクタ (HF-PIP) による実装 の場合の動作シーケンス.フレーム 1,2 で眼球計 測カメラに付けられた赤外 LED が点滅し,眼球の 姿勢推定を行う.フレーム 3 は HF-PIP の LED が 全点灯し輝度補正用のリファレンス画像を取得す る.その後 HF-PIP の時系列パターンを投影する

座標から外側方向に黒目から白目への変化があることを 評価するためである.次に,得られた径の初期パラメー タを用いて,楕円の全パラメータを同じ評価関数で収束 させ,瞳輪郭のパラメータ (c'<sub>x</sub>, c'<sub>y</sub>, a', b', \varphi') を得る.

#### 6.2 パターン照明装置

我々は異なるパターン照明装置を用いて2種のシステ ムを実装した.これは、特性の異なるプロジェクタを用 いることで推定精度がどの程度変化するかを評価するた めである.

#### 6.2.1 データプロジェクタによる実装

データプロジェクタを用いることで提案手法を容易に 実装することが可能だが、一方でフレームレートや輝 度、カバーする領域の広さに対して限界がある.本研究 では、データプロジェクタが高解像度であることを利用 し、PoGの推定精度を検証する目的のみに用いることと した.使用する照明パターンとしては、3次元形状計測 で一般的に用いられる*x*,*y*方向のグレイコードパターン を用いた.実験では両方向に10ビットのパターンを用 いたため、1 推定に20フレーム必要である.すなわちシ ステムが 60Hz で動作する場合 3 fps で計測できる. 6.2.2 高速度パターン光プロジェクタによる実装

我々は高輝度の時系列パターン光を高速で投影する ため、高速度パターン光プロジェクタ (High-framerate Programmable Illumination Projector (HF-PIP))を設計・開 発し、高速な視線検出手法を実現した。HF-PIP は、格 子状に配置された高輝度 LED 群、レンズ、コントロー ラからなる (図8).各 LED は 0.05 ms (最速)で点滅を コントロール可能であり、LED 毎に異なる時系列の 2 値 パターンを投影することができる。また各 LED の方向 を個別に変えることができるため、広い領域をカバーす るように照明光を配置できる。

各々の LED の時系列照明パターンにユニークな ID を もたせる事で,カメラの撮影画像列から ID を復元し光 源となる LED を同定することができる (図7(d)–(f). シー ンでの空間解像度は LED の数により決まるが,一般的 にはデータプロジェクタよりも低い.この欠点を補うた め,線形補間を組み合わせて PoG の推定を行う.すなわ ち,眼球反射画像中において GRP から近い 3 つの LED の投影点を求め,それらと GRP との相対的な位置関係 を求める.環境画像中からも各 LED の投影点を求め,既 に得られた GRP との相対位置関係を用いて,環境画像 中の注視点を推定する.

処理の流れは以下のようになる。まず、眼球反射画像 列からコード復元を行い、ピクセル毎の ID を求める。復 元された ID を元にラベリングを行い、一定以上の面積 を持つラベルを求め、その重心位置を各 LED に対する 表面反射点とする。時系列コードとしては Hamming(7,4) コードを用いている[13]. これは, HF-PIPの各 LED の 投影点は撮影画像の中では連続していないため、データ プロジェクタの場合と異なりグレイコードではコード復 元の頑健性がないためである。Hamming(7,4) コードは 7 bit のベースコード (ID = 1~64) と 3 bit のパリティビッ トからなるため、データ長は10bit (フレーム)である. 眼球姿勢復元および輝度補正のために3フレーム必要な ので、13フレームで1回の注視点推定を行う事ができ る. つまりカメラを 140 Hz で動作させた場合, 10.8 fps での推定が可能である。また撮影画像中で瞳領域の動き を線形補完で追跡することで、中間フレーム(フレーム 4~13)における瞳の動きに対応している。

現在の HF-PIP は可視光 LED を使用しているが,赤 外 LED に変えることも容易に可能である.これにより, ユーザが投影光に気づくことなく注視点推定を行う事が できる.

#### 7. 実験結果

2種類の実験を通して手法の評価を行った.実験1で は、被験者が壁面上の点を注視する静的な状況での計測



図7 HF-PIPによる実装での角膜表面反射光. (a) フレーム 1, (b) フレーム 2 (赤外光点灯), (c) 瞳孔および瞳輪郭の検出結果(黄).赤線は暗瞳孔法によって得られた瞳孔輪郭.黄十字マーカは瞳輪郭の中心.赤十字マーカは推定された GRP, (d) フレーム 3. (e) フレーム 13. (f) フレーム 3~13 を用いた表面反射光からのパターン復元結果(9 LED).異なる色は異なるパターン光 ID を示す.



図8 高速度パターン光プロジェクタ (HF-PIP). 上段:
 光源 (LED), 下段左:パワーモジュール・コント
 ローラ,下段右:実験環境と投影光 (9 LED)

点の推定精度を評価した.この実験は,プロジェクタを 用いたシステムとHF-PIPを用いたシステムの両者で実 験を行った.これらの実装の間では,眼球の姿勢推定や GRPの推定手法の違いも評価するため,異なるアルゴ リズムを適用した.プロジェクタによる実装では手動で 瞳の輪郭抽出を行い,透視投影によるGRP 推定手法を 用いた.一方 HF-PIP による実装では,自動的な瞳輪郭 抽出および弱透視投影による GRP 推定を用いた.実験 2では,被験者が注視点を動かす状況での推定を行った. この実験はプロジェクタではフレームレートが足らず実

表1 実験結果(実験1)

	誤差平均 [deg]	標準偏差 [deg]
被験者1(プロジェクタ)	2.37	-
被験者2(プロジェクタ)	2.91	_
平均 (プロジェクタ)	2.64	_
被験者 1 (HF-PIP)	3.11	0.953
被験者 2 (HF-PIP)	2.90	0.657
被験者 3 (HF-PIP)	4.60	0.896
被験者 4 (HF-PIP)	2.86	1.840
被験者 5 (HF-PIP)	4.69	0.730
平均 (HF-PIP)	3.63	_

行できないため, HF-PIP のみにより評価を行った.

実験環境を図8(下段右)に示す.プロジェクタによ る実験は環境光を消した状況で,HF-PIPによる実験は 通常の屋内照明環境で実験を行った.被験者は壁面から 約2.8m離れた位置に座り,壁面上の20点のマーカを注 視する(実験1).眼球計測カメラは被験者の顔の少し 下に位置し,顔とカメラとの距離は約0.6mである.環 境カメラは被験者の後方に位置し,壁面のマーカが全て 撮影できるように設置した.

実験機器として,NEC 社製 NP-U300XJD データプロ ジェクタ (1280 × 1024 pixels, 3000 lumen, 60 Hz), Point Grey Dragonfly Express カメラ (640 × 480 pixels, 140Hz, B/W) を用いた.HF-PIP の光源としては,Philips 社製 Luxeon Rebel High-Power LED (3W, White) を用いてい る.パターン光投影,撮影および画像取得は PC (Intel Core i7-960 3.06 GHz, 8 GB RAM) によって行い,HF-PIP の画像処理は同 PC 上の Matlab R2010b および Image Processing Toolkit 環境で行っている.設計した HF-PIP は 42 個の LED まで同時に投影可能であるが,事前実験 により LED を減らした状況でも同様の性能が得られる 事が分かったため,本実験環境においては 9 つの LED を用いている.実験 1,2 のマーカ配置および LED の投 影位置を図9,10に示す.

実験1においては、プロジェクタによる実装では2被 験者,HF-PIPによる実装では5被験者を対象に行った. 各被験者は壁面上の各点を20フレーム(プロジェクタ, 1計測),300フレーム(HF-PIP,22–23計測)の間注視 する.また全ての計測は右目を用いて行った.表1およ び図9に推定精度(誤差平均,標準偏差)および実験結 果をプロットした結果を示す.この座標系において,被 験者の右目は(*x*, *y*, *z*) = (0.9 m, 0.3 m, 2.8 m)に位置する. 両実験結果のうち,被験者1,2 は同一人物である.

図10に実験2の結果を示す.この実験では被験者は, 左上,左下,右下,右上のマーカを通り,再度左上に戻 るように矩形状に注視点を動かしている.実験2は2被 験者によって行い,各々1000フレーム(75-76計測)の画 像を取得し推定を行った.



図9 実験結果(実験1).各記号は被験者を表し、色は マーカ位置を表している。



# 8. 考 察

実験結果から,提案手法は従来手法と比較しても十分 な推定精度があることを確認した.本手法はデバイスの 装着や事前校正なしで実現されており,従来の視線検出 システムの問題点を克服しながら同様の結果を得たこと は,視線検出技術において大きな意味を持つものと考え る.本手法では注視点推定のために複数枚の画像が必要 だが,高速度な照明投光および画像取得により,注視点 を動的に動かした状況でも安定して推定を行えることを 確認した.

プロジェクタによる実装および HF-PIP による実装を 比べると精度に殆ど違いが無いことから,GRP の推定 アルゴリズム(透視投影モデルと弱透視投影モデル), プロジェクタの空間解像度,眼球輪郭抽出アルゴリズム (手動,自動)の違いは,本実験環境においては計測精度 には殆ど影響しなかったと考えられる.ここから HF-PIP で実装した高速度推定,自動的な瞳輪郭抽出,弱透視投 影による GRP 推定は有効であり,本システムが視線検 出システムとして実使用に耐えるものであることが示さ れたと思われる.

実験1の結果を見ると,推定結果のほとんどは注視 対象とするマーカよりも右側に位置している事が分か る.また,その誤差傾向は人により違いがある事も確認 できる.この理由は,一義的には本実験では全て右目を 用いたため生じたと考えられるが,一方,従来より,眼 球の幾何的前方向ベクトル (Optical axis)と視線ベクト ル (Gaze axis)の間には差があると言われており,また この値は 3–5 度の個人差があることが明らかになってい る[1].ここから,今回の実験結果で得られた現在のシ ステムの精度は本質的な限界であり,これ以上の精度向 上のためには何らかの校正を導入するか,あるいは両目 の推定結果を融合する等,この差を補償する方法が必要 であると考えている.

実験を通して、下側に位置するマーカの推定結果は上 部マーカよりも悪くなる傾向が見られた.これは、下部 のマーカを注視する場合には瞼があまり開かれない状況 となり、瞳領域が眼球計測カメラから見えにくくなるた め、瞳の輪郭が捉えづらく眼球の姿勢推定が不安定にな るためである.本注視点推定法は瞳の輪郭に基づく眼球 姿勢推定結果に依っているため、これを安定的に得る方 法は重要であることが理解できる.

今回開発した HF-PIP は高輝度 LED を格子状に配置 し、それをシーンに投光する手法を用いたが、他のシー ン照光方法を使うことも可能である.具体的には、LED を格子状に配置せずそれぞれの LED を別々にシーンの 異なる所に取り付け照光する、発光するデバイスをシー ン中の点に直接取り付ける等の実装が考えられる.この ように提案システムは、状況に応じて様々なパターン投 影方法を取ることができるため、適切な発光方法を用い ることで注視点追跡システムの適用可能性を広げる事が 可能である.

## 9. 結 論

本論文では,眼球の表面反射像を用いた新しい注視点 計測手法を提案した.従来法と比較して,本手法はアイ カメラ等の装着デバイスを必要とせず,事前校正も不要 である.また,本手法は複雑な形状を持つシーンにおい ても,理論上,計測精度が落ちないという利点もある. 技術的な新規性として,眼球表面上で注視点からの光を 反射する点である Gaze Reflection Point (GRP)というア イデアを提案し,眼球の幾何モデルと姿勢推定結果を用 いてこの点を解析的に求める手法を提案した.またシー ンと眼球表面反射像の点をロバストに対応づけるために シーンへのアクティブ照光を用いるアイデアを提案し, 高輝度 LED とコントローラからなる照光システムを開 発し,同期した高速度撮影と組み合わせることで高速な 注視点計測を実現した.本手法および提案デバイスは提 案した視線検出タスクのみならず,他の計測システムに も応用可能な汎用性を持つと考えられる.複数の被験者 による二種の実験により,本システムが従来法と同様の 精度を持ち,また動的な眼球の動きに対応可能であるこ とを示した.

謝辞 本研究は, JST 戦略的創造研究推進事業さきが けの一環として行われたものである.

#### 文 献

- D. W. Hansen and Q. Ji: "In the eye of the beholder: A survey of models for eyes and gaze", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI), **32**, 3, pp. 478–500 (2010).
- [2] D. Li, J. Babcock and D. J. Parkhurst: "openEyes: A lowcost head-mounted eye-tracking solution", Proc. Symp. on Eye Tracking Research & Applications (ETRA), pp. 95– 100 (2006).
- [3] Tobii Technology AB: "Tobii Glasses Eye Tracker Product Description", http://www.tobii.com.
- [4] S. M. Kim, M. Sked and Q. Ji: "Non-intrusive eye gaze tracking under natural head movements", Proc. Int. Conf. of IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEMBS), pp. 2271–2274 (2004).
- [5] D. H. Yoo and M. J. Chung: "A novel non-intrusive eye gaze estimation using cross-ratio under large head motion", Computer Vision and Image Understanding (CVIU), 98, 1, pp. 25–51 (2005).
- [6] M. Reale, T. Hung and L. Yin: "Viewing direction estimation based on 3D eyeball construction for HRI", Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW), pp. 24–31 (2010).
- [7] K. Nishino and S. K. Nayar: "Corneal imaging system: Environment from eyes", International Journal on Computer Vision (IJCV), 70, 1, pp. 23–40 (2006).
- [8] Y. Sugano, Y. Matsushita, Y. Sato and H. Koike: "An incremental learning method for unconstrained gaze estimation", Proc. Europian Conf. on Computer Vision (ECCV), pp. 656–667 (2008).
- [9] Y. Sugano, Y. Matsushita and Y. Sato: "Calibration-free gaze sensing using saliency maps", Proc. Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 2667– 2674 (2010).
- [10] R. S. Snell and M. A. Lemp: "Clinical Anatomy of the Eye", Blackwell Publishing, Malden, 2nd edition (1997).
- [11] C. Nitschke, A. Nakazawa and H. Takemura: "Displaycamera calibration from eye reflections", Proc. Int. Conf. on Computer Vision (ICCV), pp. 1226–1233 (2009).
- [12] R. Kothari and J. L. Mitchell: "Detection of eye locations in unconstrained visual images", Proc. Int. Conf. on Image Processing (ICIP), pp. 519–522 (1996).
- [13] T. K. Moon: "Error Correction Coding: Mathematical Methods and Algorithms", Wiley-Interscience (2005).