

画像処理による3次元眼球運動計測

坂 下 祐 輔*,藤 吉 弘 亘* **,平 田 豊* **

Measurement of 3D Eye Movements Using Image Processing

Yusuke SAKASHITA, Hironobu FUJIYOSHI and Yutaka HIRATA

Accurate measurement of eye movements with little load on subjects is highly demanded in neuroscience as oculomotor control is a popular model system to investigate biological motor control mechanisms. Video oculogram using real time image processing is suitable for this purpose. This article surveys recent progress in the measurement of 3 dimensional eye movements (yaw, pitch, roll rotations), particularly those using real time image processing techniques. We summarize the technique for the pupil extraction that determines the gaze direction by providing eye position in yaw and pitch planes. The technique to measure ocular rolling (cycloduction) is also summarized. **Key words**: Eye Movement, Cycloduction, Gaze Estimation, Pupil Extraction, Ellipse Detection

1.はじめに

生体の巧妙・精緻な運動制御メカニズムを理解するアプロー チの一つとして,眼球運動計測に関する研究が盛んに行われて いる 特に、被験者に負担のかからない眼球運動計測の実現は, 脳内神経回路網による情報処理と運動制御ならびに学習・記憶 の発現メカニズムの関係解明に貢献できると考えられている ¹⁾²⁾.また,眼球運動は脳内で実現される視覚情報処理機能を反 映する外部へのパラメータと考えることができることから,対 象を見ているときの眼球運動を捉え,対象の特徴やその認識メ カニズムを明らかにしようとする研究が行われている³⁾.

眼球は,水平,垂直,回旋(Yaw, Pitch, Roll)の3軸運動を行 い,これらの運動を計測することを一般的に3次元眼球運動計 測という.眼球運動を計測する手段として主なものに,眼球運 動に伴う生体電位変化を計測する方法,特殊なコンタクトレン ズを装着し計測する方法,カメラにより眼領域周辺を撮影し特 徴を抽出し計測する方法がある^{3,4)}.このうち,眼領域を撮影し た動画像から計測する方法は,被験者への負担が少なく,かつ 近年の飛躍的なコンピュータの処理能力の向上により,眼球運 動計測法の主流になりつつある.そこで本稿では,リアルタイ ム処理を前提とした画像処理による眼球運動計測について解説 する.

本サーベイでは,まず,眼球運動の種類とその計測法を紹介 する.画像処理による3次元眼球運動として,3章では,眼領 域画像からの瞳孔抽出について解説する.4章では,瞳孔抽出 を応用した眼球回旋計測について解説し,5章では,抽出した 瞳孔や虹彩から人物の視線方向を推定する手法について解説す る.

2.眼球運動と計測法

本章では,眼球運動の種類とその計測法について紹介する. まず,眼球運動の特性を種類別に述べる.そして,その計測法 を接触型と非接触型に大別し,画像処理による眼球運動計測の 有効性と必要性について述べる.

2.1 眼球運動の種類

眼球運動には両眼が相関して動く共同運動,輻輳開散眼球運動と,これらの運動の元となる,各眼ごとに生じる固視微動, 随従眼球運動,跳躍眼球運動がある³⁻⁵⁾.

2.1.1 衝動性眼球運動(サッカード: saccade)

サッカードは,視線位置を横方向,縦方向,斜め方向に変え る際に生じる急速な眼球運動である.本を読んでいるときや, 日常様々な視覚対象を次々と注視するときに生じる.指標の速 度が遅いときは,随従運動で視標を遅れなく追跡するが,視標 の速度が速くなると,随従運動で追えなくなり,視標に対して 遅れていく.サッカードはそのような時にも生じ,跳ぶような 速い動きを行い,遅れを取り戻す.サッカードは非常に高速な 眼球運動であり 最大速度は1000 deg/s 程度になることもある. 2.1.2 前庭動眼反射(VOR: Vestibulo-Ocular Reflex)

前庭動眼反射は,頭部運動時に眼球を逆方向にほぼ同じ速さで回転させることにより,網膜像のブレを抑え,安定した視界を保つ反射性眼球運動である.刺激によっては,最大速度は200 deg/s 程度にまでなる.

2.1.3 視運動性眼球運動(OKR: Optokinetic Response) 視運動性眼球運動は,視野全体が動いたときに眼球がそれと 同方向に動く視覚系を介した反応である.通常,VORと協調的 に働き,頭部運動時の視界の安定化に寄与している.

2.1.4 輻輳・開散運動 (vergence)

輻輳運動は,注視している物体が近づいてくる際,眼球が内 転する動きである.逆に,開散運動は,視標が遠ざかる際に眼 が外転する動きである.最大速度でもおよそ 10 deg/s であり, 非常に遅い眼球運動に分類される.

原稿受付 2006年7月18日

^{*} 中部大学工学部情報工学科(〒487-8501 愛知県春日井市松本町 1200)

^{**} 中部大学先進計測研究センター(〒487-8501 春日井市松本町 1200)

2.1.5 滑動性眼球運動 (smooth pursuit)

滑動性眼球運動は,一定の速度の範囲内(~60 deg/s)で比較的ゆっくりと運動する視対象に関して眼球を同じ速度で追従させる眼球運動であり,運動する視覚対象を追視するときに生じる運動である.滑動性眼球運動は一定の速度を超える運動刺激には追従することができず,最大追従速度は60 deg/s 程度であるが,これを超える場合にサッカードが起こり,視標と視線のずれを最小化する.

2.1.6 回旋性眼球運動 (cycloduction)

回旋性眼球運動は 眼球の視軸回りの回転運動である 身体, あるいは頭部を左右どちらかの方向に傾斜させると,眼球は Fig.1 に示すように,身体(頭部)の傾斜とは反対の方向に回転 し,回転性の補償運動を行う.



Fig.1 Ocular rotation (Cycloduction)

眼球回旋運動の計測は,宇宙空間における空間識失調の解析 や,めまい等の診断に必要とされている.微小重力環境に暴露 された場合,耳石からの重力情報を失うため,上下方向の感覚 に混乱が生じる.このような空間内での方向感覚失調などの予 防法の確立は,今後の有人宇宙活動を展開していく上での大き な課題となっている[®].

2.1.7 固視微動 (micro-fluctuation)

ー点を注視しているとき,眼球は静止しているように見える が,実際には注視点の周りで小さな動きが絶えず生じている. これを固視微動と呼ぶ.固視微動には小さな滑らかな動き,非 常に小さな高周波の振動,小さな跳ぶような動き(マイクロサ ッカード)がある.固視微動は単なるノイズではなく,空間上 に浮かんでいる眼球の方向を一定に保つための動きや,網膜像 を鮮明に保つための動きと考えられている.

2.2 3次元眼球運動計測法

2.1で紹介した各眼球運動を計測する手法は,接触型眼球 運動計測と非接触型眼球運動計測の2つに大別することができる.

2.2.1 接触型眼球運動計測

接触型では,より正確な眼球運動を計測するために,眼球や 頭部にコンタクトレンズやコイル等の検査用装置を取り付ける. 接触型の計測は高い計測精度を得ることができるが,人体にセ ンサーを取り付けるため,取り付け箇所などについての特殊な 知識を必要とする.また,人体に負担がかかるという欠点があ る.以下に,接触型として眼球電位法,オプティカル・レバー 法,サーチコイル法について述べる.

• 眼球電位法 (EOG)

角膜は,網膜に対して 1mV 弱の正の電位を有している.

この電位差の一部は眼のまわりに皮膚電極を取り付けること で検出でき、その電圧変化は眼球の回転角とほぼ比例関係に あることから、眼球運動の計測が可能となる⁷⁾. EOG の長所 は、後で述べるサーチコイル法と同様に、広い眼球運動検出 範囲(速度,周波数)を有している点であるが、1 deg 以上 の精度を得ることが難しいという短所がある.一般に高精度、 長時間の眼球運動の検出には不向きである.

・オプティカル・レバー法

オプティカル・レバー法は,端に小さな鏡を取り付けたコ ンタクトレンズを角膜に装着し,その鏡による光線の反射光 を画像解析または光電変化で取り出す方法である⁸⁾.本手法 は,非常に高感度であり,通常水平・垂直ともに1 deg 以下 の検出が可能である.ただし,眼球とコンタクトレンズとの 間のスリップを抑えるために,軽量化や負圧の導入などが必 要である.さらに,被験者への影響も無視できず,扱いには 十分な注意が必要である.また,反射光の検出範囲の制限か ら,大きな振幅の運動検出には不向きである.

・サーチコイル法

コンタクトレンズのまわりにコイルを取り付け, 被験者を ー様な交流磁場の内に置くと, 眼球の回転に比例した誘導電 流を取り出すことができる^{9),10)}.しかし,オプティカル・レ バー法と同様の欠点が残り, 被験者への影響を無視できない ため, 長時間の計測には不向きである.しかし,検出精度は オプティカル・レバー法と同様に優れている.

2.2.2 非接触型眼球運動計測

接触型眼球運動計測では,眼球運動を測定する際に人体への 負担がかかるという問題がある.これに対し,眼球の動きを捉 えるために光学的な手法を取り入れることで人体に接触しない 手法が提案されている.特に,コンピュータ性能の著しい進歩 と,光学的装置の性能の向上に伴い,このような非接触な眼球 運動計測法が多く提案されている.以下に,非接触型として, 強膜反射法,角膜反射法画像処理法について述べる.

• 強膜反射法

強膜反射法は,角膜(黒目)と強膜(白目)においての反 射率が異なることを利用した手法である.黒目と白目の境界 部分(角膜輪部)に微弱赤外線を照射し,その反射光をセン サーで捉える.白目からの反射光に対し,黒目からの反射光 は非常に強いため,センサーで受光する光の強さが眼球運動 に伴って変化する.その反射光の強度変化を測定することで 眼球運動を計測できる¹¹⁾.強膜反射法は水平方向に関しては 高い精度で計測できるが,上下方向の眼球運動の測定には適 していない.

• 角膜反射法

角膜反射法は,点光源照明を角膜に照射した際に明るく現 れる角膜反射像(プルキニエ像)の位置をもとに,眼球運動 を計測する手法である¹²⁾.眼球回転中心と,角膜の凸面の中 心とが一致しないため,角膜を凸面鏡とし光源の反射点を凸 レンズなどで集光すると,この集光点は眼球の回転にともな って移動する.この点をビデオカメラなどで撮影することで, 眼球運動計測をすることができる.

			ruore r	i tina ana i	neusurenn	ent of eye move	ement			
			VOR		smooth		micro	accuracy	examinee	
		saccade	OKR	vergence	pursuit	cycloduction	fluctuation	(time, position)	burden	cost
contact	EOG					×	×	×	low	middle
	optical lever					×			high	middle
	search coil								high	middle
noncontact	corneal reflection					×			low	high
	image processing								non	low

Table 1 Kind and measurement of eye movement

・画像処理による眼球運動計測

眼球をビデオカメラで撮影し,その画像から画像処理する ことで瞳孔や虹彩を抽出し,眼球運動の計測を行う.撮影さ れた眼球画像は,まつ毛やまぶたなどノイズの影響を受けや すいが,画像処理特有のノイズ除去を用いることで,高精度 な眼球運動計測を実現することができる.処理速度はビデオ カメラのフレームレートに依存し,通常のビデオカメラは30 fps が最大である.サッカードのような高速な動きを計測する には,高価な高速ビデオカメラを必要とする.

2.3 眼球運動の種類と計測法の関係

各手法における計測可能な眼球運動を Table 1 に示す.接触型のサーチコイル法とオプティカル・レバー法は,アナログ出力が可能であるためサッカードのような超高速眼球運動を計測可能であり,かつ,固視微動のような非常に細かい眼球運動を高精度に計測できる.しかし,被験者の眼にコイル付きのコンタクトレンズを装着したり,動物には実際にコイルを埋め込むなどの処置が必要であり,被験者への負担が大きく長時間の計測は不可能である.非接触型の角膜・強膜反射法は,正確なキャリプレーションが必要であり,長時間計測を行うと徐々に計測値が不安定になる欠点がある.また,計測機器が大きくコストも高いという問題もある.

一方,画像処理法は,ほぼすべての眼球運動を精度良く計測 することが可能であり,被験者の負担も非常に少ないという特 徴がある.また,最近では CCD カメラや,画像処理用 PC が安 価で高速になっており,サッカードや固視微動などの今まで困 難であった運動にも対応可能になりつつある.

このような点から,今後画像処理による眼球運動計測が主流 になっていくと考えられる.以下では,画像処理による眼球運 動計測として,瞳孔抽出,眼球回旋計測,眼球位置計測,視線 方向の推定法について述べる.

3. 眼球運動計測

サッカード, VOR・OKR, 輻輳・開散運動, 滑動性運動, 固 視微動等の眼球運動は, 瞳孔の動きを捉えることで計測が可能 になる.特に, 眼球回旋計測を行う場合には, 瞳孔形状に基づ いて虹彩パターンを抽出する必要がある.従って, 虹彩パター ンの抽出には瞳孔を高精度に抽出することが前提となる.また, 同様に,視線方向の推定においても瞳孔中心の抽出精度に依存 する.以上より,瞳孔抽出は眼球運動計測の前処理として非常 に重要な処理である.

画像処理による瞳孔の抽出法には,瞳孔を楕円として捉えて 抽出する手法と,まばたき時を含む眼領域全体のモデル(アイ モデル)を用いて瞳孔を抽出する2つの手法が提案されている. 主に,眼領域のみを撮影した高解像度画像からの瞳孔抽出には 楕円検出法が用いられ,顔全体を含む画像を対象とした低解像 度画像からの瞳孔抽出にはアイモデルが用いられることが多い.

3.1 楕円検出に基づく瞳孔抽出

瞳孔は視線方向とカメラとの位置関係により,Fig.2(a)に示す ように楕円形状として画像上に観測される.楕円検出を行うに は,前処理として閾値処理により2値化を行い,エッジを抽出 する(Fig.2(b)(c)).カメラで瞳孔画像を撮影した場合,赤外線照 明等の光が眼球で反射するために,楕円の上下左右に欠損が生 じ,瞳孔内に多くのアウトライアが存在する.従って,これら のアウトライアを考慮した楕円フィッティングが重要となる.



- . .

Fig.2 Extraction of edge

以下に 瞳孔の楕円フィッティング手法として Hough 変換, 最小メジアン,平行四辺形の成立条件を用いる3種類の手法を 解説する.

3.1.1 Hough 変換による楕円検出

楕円検出には,ハフ変換による手法が多く提案されている ¹³⁾⁻¹⁰.ハフ変換による楕円検出は,瞳孔のエッジ点が連結して いる必要がなく,ノイズに強いという特徴がある¹⁷⁾.以下に, ハフ変換による楕円検出の一般的な手法の流れを示す.

1. 投票用配列 A の初期値を0 にセットする.

2. 入力画像の各エッジ点 (x, y) を参照点として,長軸a,短軸b,回転角の楕円を描画し,配列Aに投票する.

3. 配列A を走査し,最大投票数を持つ画素 (x, y), (a, b,), 投票数を登録する(Fig.3).

4. すべてのエッジ点に対する (*a*, *b*,)について, 手順1~3 を繰り返し, 投票数が最大のパラメータを楕円パラメータとする.

楕円は5つのパラメータから構成されているため,ハフ変換 を用いて楕円を検出するには,5次元の配列を必要とする.投 票空間が多次元で,かつエッジ候補点が多いと投票数が増え, 計算量が増大するという問題がある.これに対し,計算時間や 記憶容量削減などの手法が工夫されている¹⁸⁻²¹⁾.計算コストの 削減には,通常は5次元となる投票空間を組み合わせハフ変換



などの考えを取り入れ2次元化したり²⁰⁾, 最小2乗法を組み合わせるなどの対処が挙げられる¹⁸⁾.しかし, 依然ハフ変換に基づく手法は計算量を要し, リアルタイムによる検出は未だ困難

3.1.2 最小メジアン法 (LMedS) による楕円検出

である.

アウトライアを含むデータからのパラメータ推定には,最小 メジアン(LMedS)²²⁾を評価基準とした,RANSAC (Random Sample Consensus)²³⁾が用いられている.LMedS は,50%の候 補点が正しければ正しい楕円を推定できるという特徴があり, アウトライアに対してロバストな手法である^{24,25)}.LMedS は 評価手法として

min med
$$(\varepsilon_i^2)$$

を用いる.med は中間値を求め, は輪郭候補点における楕円 との距離である.以下に,LMedS による楕円当てはめを行な うための処理手順を示す.

- 1. 侯補点の中から5 点をランダムに選出し,5 点を通る 楕円を計算する.
- 2. 各侯補点における楕円との距離 ² を算出する.
- 3. 2 (i=1,2,...,n) の中から中間値をとる.
- 4. (1)から(3)の処理を繰り返し,求めた中間値が最小となるパラメータを出力する.

瞳孔および虹彩抽出はまぶたの影響によって部分的に隠れる ことがある.そのため,楕円の弧が十分に画像上に観測できな いことがある.辻らは,処理過程において長軸の長さがある範 囲内であれば手順2を実行するという拘束条件を付け加えるこ とで,抽出誤差を減らすことを可能にした²⁴⁾.岡部らは,楕円 当てはめを繰り返して楕円を成長させていく過程で LMedS に よってアウトライアの除去を行い,実画像からの楕円検出法を 提案している²⁵⁾.

3.1.3 内接する平行四辺形による楕円検出

瞳孔画像を取得した際,まつ毛や照明入射光の反射の影響に より瞳孔に欠損が生じる場合がある.坂下らは,一度に楕円パ ラメータを求めるのではなく,最初に楕円中心を算出し,アウ トライアの除去を行ってから楕円パラメータを推定する二段階 の手法を提案している²⁰.

楕円中心の算出には,楕円に内接する平行四辺形の成立条件 を用いる.平行四辺形の相対する辺の中点同士を連結すると2 本の直線が交わり,その直線の交点が楕円の中心となる.欠損 した楕円にも対処できるように上下,左右から順に平行四辺形 を求めていき,平行四辺形が成立する場合のみ交点の画素に重みをつけて投票する.最終的に投票数が最大の画素を楕円中心とする(Fig.4(a)).次に,輪郭候補点と楕円中心を対称とした位置に輪郭点が存在するかを判定し,アウトライアを除去する(Fig.4(b)).アウトライア除去後の輪郭点に対して楕円の各パラメータを推定する.本手法は,瞳孔の欠損が少ない場合は精度が高く,瞳孔抽出処理も5 msec 以下と非常に高速である.しかし,まばたき時に楕円輪郭が連続して約30% 欠損すると検出が不可能となり,今後の課題となっている.



Fig.4 Ellipse detection by parallelogram

3.2 アイモデルを用いた瞳孔(虹彩)抽出

撮影された瞳孔や虹彩はまぶたの影響によって一部見えなく なることが多い.また,エッジ検出の際,まぶたやまつ毛等の エッジも検出してしまうため,瞳孔,虹彩の輪郭のみを求める ことは非常に困難である.これに対し,北川らは,黒目の輪郭 とまぶたからなるアイモデルを採用し,眼全体の形状から黒目 を抽出する手法を提案している²⁷⁾.眼球,黒目,まぶたからな る3次元アイモデルを用いて,*Condensation*²⁸⁾により,まばたき のある場合でも黒目の追跡を実現している.

森山らは,個人差を考慮した眼の開閉,眼領域画像の高精細 アイモデルを提案している²⁹⁾.森山らのアイモデルは,複数の レイヤに目の各部分(上まぶた,下まぶた,白目,コーナー,瞳) に対応した部品モデルを描き,眼領域の画像を生成する.アイ モデルはグラフィックモデルであり,構造パラメータ(6つ)及 び運動パラメータ(4つ)により制御している.初期フレームに おいて目領域モデルの位置合わせを行い,目の個人性を表す構 造パラメータを調節することで個人化を行うことができる (Table 2).このような個人毎のアイモデルを用いて運動パラ メータを追跡した結果,まばたきや斜視等の様々な運動に対し て正確な追跡が可能となっている.

アイモデルを用いた抽出法は,まばたきやまぶたの影響に よって見えにくい瞳孔や虹彩に対応が可能である.しかし,予 め眼領域画像の位置合わせや,まぶたの形状などの個人パター ンを入力しなければいけない問題がある.

4. 眼球回旋計測

眼球回旋運動は,虹彩パターンの視軸に対する回転として観 測される.本章では,画像処理による眼球回旋計測の手法につ いて解説する.また,回旋計測の精度に影響を与える虹彩パ ターンの伸縮について,その原理と画像処理による問題につい て述べる.



Fig.5 Structure of the eyeball and Expansion and contraction model of iris muscles

	input	normalized	model
Single-fold eyelid	•	6	0
Double-fold eyelid	5	6	(
Bright iris	E	6	
Dark iris	ė	é	
Bulge	0	6	0
Reflection	9	6	

4.1 参照パターンとのマッチングによる眼球回旋計測

眼球回旋の画像計測としては,主に虹彩パターンをマッチン グする手法が提案されている.予め取得した回旋運動が生じて いない安静時における虹彩パターンを基準とし,他の時刻にお ける虹彩パターンとの虹彩画像の各角度に対する相互相関を計 算し,その最大値を回旋角度として出力する手法が提案されて いる^{30,-33}.

- 以下に,一般的な眼球回旋計測手順を示す.
- 1. 予め ,回旋運動が生じていないときの虹彩パターンを参照 用虹彩パターンとして取得する .
- 2. Fig.6 に示すように瞳孔画像の (*u*, *v*) 空間から *r* 平面に 虹彩パターンを投影する.

3. 取得した虹彩パターンとある一定の角度ずつずらした参照用虹彩パターンとの類似度を算出し,最も類似した角度を 眼球回旋角度とする.

4.2 瞳孔径の変化への対応 虹彩パターンは瞳孔径に依存して変化するため,瞳孔径の時

Fig.6 Acquisition of iris pattern

間的変化がない安静時の虹彩パターンのみを基準として計測す ると,結果に大きな誤差が生じる.堺らは,背景の照度を徐々 に変化させたときの瞳孔画像から,約0.1 mm の瞳孔径変化毎 の虹彩パターンを抽出し,予めテーブル化しておく手法を提案 した^の.回旋計測時には,得られた瞳孔径に最も近い参照パ ターンをテーブルから取り出し相互相関を計算する.これによ り,瞳孔径の変化に対応できる.しかし,テーブルの作成に手 間がかかるという問題がある.

朝比奈らは,瞳孔径に依存した虹彩パターンの変化の様子を 捉える実験を行い,その結果,瞳孔輪郭に近い部分の模様は瞳 孔径によらずほぼ一定であることを確認した³⁴⁾.この実験結果 から,瞳孔輪郭付近の虹彩パターンのみを用いて相互相関を計 算し,回旋角度を求めている.しかし,瞳孔径の大きな変化や 被験者によっては必ずしもパターンは一定ではない.また,瞳 孔径付近の虹彩パターンのみでは,高い精度を維持することが 困難である場合がある.

4.3 縮瞳筋と散瞳筋の虹彩パターンへの影響

瞳孔は外界から眼球内に入射する光量の調節の他,網膜に投影される外界画像の情報量を最適化する機能を持つ³⁵⁾.瞳孔径は,虹彩にある瞳孔輪郭付近に円周状に配置された縮瞳筋(Sphincter)と,縮瞳筋の外側に位置し,放射状に配置された散瞳筋(Dilator)と呼ばれる2つの筋肉によって制御される。縮瞳筋が縮み,散瞳筋が伸びれば瞳孔は小さくなり,縮瞳筋が伸びれば瞳孔は小さくなり,縮瞳筋が伸び,散瞳筋が縮めば瞳孔は大きくなる³⁶⁾.このとき,虹彩部分の肉質は盛り上がるように変化するため(Fig.5(c)),虹彩パターンの伸縮は一定ではなく,不規則である.瞳孔径の大きな変化に伴う虹彩の伸縮に対応可能な手法は未だ確立されておらず,今後の課題となっている²⁶⁾.

5.視線方向の推定

視線方向の推定には,眼球運動の水平運動と垂直運動計測を すれば良い 37)-42). 視線方向を求める技術は,心理学,医療, ヒューマンインタフェースなどの分野において期待されており, その応用として,ドライバの運転状態の検知43,44)や,視線を 用いてコンピュータを制御する視線インタフェース^{45),40)} など が挙げられる.本章では,視線方向推定について解説し,その 応用例を紹介する。

5.1 視線方向推定のための眼球位置計測

画像上において瞳孔は,水平・垂直運動しているように観測 されるが,実際は眼球を中心とした回転運動を行っている. 従って,眼球の垂直・水平方向への回転角を算出する必要があ り,眼球の形状を球,瞳孔を円とみなして眼球位置計測を行う 手法が一般的である.Fig.7 に,瞳孔が眼球中心o,眼球半径r の球面上を動いた際に画像面上に投影される様子を示す。

Fig.7 Calculation of eyeball position

撮影画像面上で瞳孔が長軸 a, 短軸 b の楕円として観測され た場合,カメラ光軸と視軸間の角度 は

$$\cos\beta = \frac{b}{a} \tag{1}$$

で表すことができる.

Fig.7 において, 眼球中心, 眼球半径が (x₀, y₀, r₀) として既知 の場合,瞳孔中心(x, y)から眼球の水平方向の回転角と,眼 球の上下方向の回転角 は(2)式から算出できる¹⁶⁾.

$$\tan \theta = \frac{x - x_0}{\sqrt{r_0^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}}$$

$$\tan \phi = \frac{y - y_0}{\sqrt{r_0^2 - (x - x_0)^2 - (y - y_0)^2}}$$
(2)

眼球半径である (x₀, y₀, r₀) には, 個人差があるため, 予めキ ャリブレーションにより個人パラメータを求める必要がある. 5.2 視線方向の推定

視線方向の推定には,眼球構造のみで視線方向を推定する手

法と,瞳孔中心と目頭位置・顔向き等のように,眼領域全体か ら得られる情報を用いて視線を推定する手法に大別することが できる.

以下に視線方向推定に関する主流な手法を述べる.

5.2.1 眼球構造からの視線方向推定

眼球構造から視線方向を推定する手法には,角膜反射像を用 いる手法 , 角膜表面における屈折を考慮した手法 , 楕円パラ メータから推定する手法が提案されている.以下に各手法にお ける視線方向推定を示す.

purkinje image

Fig.8 Pupil and purkinje image

角膜反射像を用いた視線方向推定

視線の方向は,角膜の曲率中心,視線ベクトルから算出す ることができる.角膜の曲率中心はプルキニエ像の位置,視 線ベクトルはプルキニエ像および瞳孔中心位置から求められ る^{39)-42),47)}. プルキニエ像とは, Fig.8 に示す近赤外線光源を 照射した際に,角膜表面における反射像のことである.Fig.9 にプルキニエ像から視線方向を算出する例を示す.

角膜反射像を用いる場合,詳細な個人の眼球パラメータを 与える必要があり,予め個人キャリブレーションを行う必要 がある. 竹上らは眼球中心を固定した状態で眼球形状のキャ リブレーションを行う手法を提案している48.この手法によ り,眼球の回転半径や回転中心などの眼球パラメータの校正 を行い,安定な視線方向検出を可能にした.

角膜における屈折を考慮した視線方向推定

瞳孔を撮影した場合、角膜と房水によって光の屈折が生じ, Fig.10 に示すように本来の位置と見かけの瞳孔の位置がずれ る.高精度に視線方向を推定するにはこの屈折を考慮する必 要がある,大野らは,眼球モデルに基づく視線の屈折を補正 した視線方向の推定法を提案している 41,42).角膜反射像を用 いた手法と同様に,個人パラメータを求めるキャリブレーシ ョンを高精度に行う必要がある.

Fig.10 Visual line based on eyeball model

・楕円パラメータを用いた視線方向推定

視線方向と楕円の傾きには, Fig.11 に示すような相関がある.Wang ら⁴⁹⁾や辻ら²⁴⁾は,視線方向と楕円との長軸,短軸, 回転角の関係から視線方向の推定法を提案している.

Fig.11 Inclination of ellipse by change in gaze direction

長軸を *a*, 短軸を *b*, *x* 軸を基準とした長軸の回転角を としたとき, 回転角 は次式から算出される.

$$\phi = \cos^{-1}\frac{b}{a} \tag{3}$$

3 次元空間上における虹彩の法線を v としたとき, v は次 式から算出される.

	$\cos\theta$	$-\sin\theta$	0	1	0	0	0	(4)
v =	$\sin \theta$	$\cos\theta$	0	0	$\cos\phi$	$\sin \phi$	0	(4)
	0	0	1	0	$-\sin\phi$	$\cos\phi$	-1	

しかし、この手法では楕円が円に近い場合 楕円の傾き θ を 明確に求めることができない.また、 b_a' が1に近づき、 b_a' が少し変化しただけでも ϕ が大きく変化し、精度が低くなる という問題がある.

5.2.2 眼領域による視線方向推定

撮影された画像に眼領域全体が含まれている場合は,目頭等の眼領域の情報から視線方向を推定することが可能である.北 川らは,黒目の追跡が成功している画像に対して,アイモデルのパラメータを用いて視線方向を推定している²⁷⁾.山田らは, 瞳孔中心位置と目頭位置との相対距離に着目した視線推定法を 提案している^{43),44)}.Fig.12 に目頭位置を用いた場合の視線方向 推定処理の流れを示す.

本来の視線方向を得る場合には,相対距離から眼球方向への

Fig.12 Visual line estimation with inner corner of eye

変換が必要である.しかし,この相対距離には個人差があるた め,予め被験者に指示した方向に視線を動かしてもらい,その 時の相対距離と注視角度との対応を求めるキャリブレーション が必要不可欠である.また,この手法では顔の方向によって大 きく左右されるという欠点がある.この欠点に対して,山田ら は,顔方向の検出と目線方向の検出を同時に行い,精度の低下 を防いでいる^{43,44}.

5.3 視線計測の応用

5.2 で述べた視線方向の推定は, すでに実用化の段階にあ り, 様々な応用例が提案されている.以下では, 代表的な視線 検出のアプリケーションとしてドライバの運転状態の検知と視 線インタフェースについて紹介する.

5.3.1 ドライバの運転状態の検知

運転者の居眠りや脇見による交通事故は社会問題にまで発展 しており.運転中のドライバの状態を検知し,状態に応じて警 報等で危険を回避することが望まれている⁵⁰⁾.ドライバの状態 としては,居眠り,脇見,疲労,他事への過度の集中などが挙 げられ,このうち居眠りや脇見の検知にはドライバの視線方向 の推定が有効である.山田らは自動車のインナミラーに装着し たカメラからドライバの視線方向を計測し,ドライバの運転状 態の検知を実現している^{43),44)}.

5.3.2 視線インタフェース

視線を検出することにより,ユーザが注視しているかを知る ことがでる.コンピュータ画面上のボタンやアイコンを,視線 によって選択・操作する瞳孔マウスの研究が報告されている ^{45,46),51)-53)}.これを応用し,視線の変化によって文字を入力する システムや^{54),55)},文書を読むユーザに対して自動的に画面をス クロールする支援システムが開発されている⁵⁶⁾.これらは,ア プリケーションとして機能するだけでなく,障害者の支援シス テムとしての実用化が検討されている.

6.まとめ

本稿では,リアルタイム処理を前提とした画像処理による眼 球運動計測について,瞳孔抽出法,眼球回旋計測法,眼球位置 計測法,視線方向推定法について解説し,視線推定の実用的な アプリケーションを紹介した.画像処理による眼球運動の計測 は,被験者に負担がかからないため,幅広い応用が検討されて いる.

今後,さらなる画像処理技術の発展に伴い,完全な非接触, 無拘束な眼球運動計測の実現が期待されている.こうした技術 は医療・福祉分野だけでなく,HCI(Human Computer Interaction) に関わる分野への応用も期待されている⁵⁷⁾.

参考文献

- Hennessy, T.R., Iida, T., Shina, K. and Leibowitz, H.W.: *The effect of pupil size on accommodation, Vision Research*, 16 (1976), 587-589.
- Ward, P.A., and Charman, W.N. : Effect of pupil size on steady state accommodation, *Vision Research*, 25-9 (1985), 1317-1326.
- 3) 苧阪良二, 中溝幸夫, 古賀一男: 眼球運動の実験心理学, 名古屋大学 出版社 (1993).
- 4) 古賀一男:眼球運動実験ミニ・ハンドブック、(財) 労働科学研究所出版部 (1998).
- 5) 日本視覚学会編: 視覚情報処理ハンドブック (2000).
- 6) Sakai, H., Yamaji, K., Hirata, Y., Toda, N. and Usui, S: Development of Pupil Size and Eye Movement Measurement System and its Application for Evaluation the Spatial Disorientation, *T.IEE Japan*, **119**-C-1 (1999), 70-76.
- 7) Tursky, B.: Recording of Human Eye Movements, In Bioelectric Recording Techniques Part C, Academic Press, New York (1974).
- 8) Yarbus, A.L.: Eye Movements and Vision, Plenum Press, New York (1967).
- Robinson, D.A.: A method of measuring eye movements using a search coil in a magnetic field, *IEEE Transactions in Biomedical Engineering*, **10** (1963), 137-145.
- Hess, B.J. : Dual-search coil for measuring 3-dimensional eye movements in experimantal animals, *Vision Research*, 30 (1990), 597-602.
- Abe, K., Ohi, S. and Ohyama, M.: An Eye-gaze Input Systembased on the Limbus Tracking Method by ImageAnalysis for Seriously Physically Handicapped People, *Adjunct Proc* (2002), 185-186.
- Hazel, C.A. and Johnston, A.W.: Recording eye movements using coaxial camers - Applications for visual ergonomics and reading stdies, *Optometry* and Vision ergonomics, **72** (1995), 679-683.
- 13) Onda, K., Tonami, S. and Aoki, Y. : A New Method for Determining Parameters of an Ellipse from the Hough Plane, *IEICE(D-II)*, J72-10 (1989), 1760-1764.
- Huang, C.L. : Elliptical feature extraction via an improved Hough transform, *Pattern Recognition Lett.*, 10 (1989), 93-100.
- 15) Yoo, J.H. and Sethi, I.K. : An ellipse detection method from the polar and pole definition of conics, *Pattern Recognition*, 26-2 (1993), 307-315.
- 16) Takegami, T., Gotoh, T. and Ohyama, G. : An Algorithm for Model-Based Stable Pupil Detection for Eye Tracking System, *IEICE(D-II)*, J86-2 (2003), 252-261.
- 17) Illingworth, J. and Kittler, J. : A survey of the Hough transform, *Comput. Vision, Graphics & Image Process.*, 44 (1988), 87-116.
- Watanebe, T. and Shibata, T. : Detection of Broken Ellipses by the Hough Transforms and multiresolutional Images, *IEICE(D-II)*, J73-2 (1990), 159-166.
- Fujimoto, K., Iwata, Y. and Nakata, S. : Parameter Extraction of Second Degree Curve from - Hough Plane, *IEICE(D-II)*, J74-9 (1991), 1184-1191.
- 20) Watanabe, T., Kimura, A., Tanba, S. and Yokoyama, R. : Detection of Broken Ellipses by Li-Lavin-Le Maste's Fast Hough Transform, *IEICE(D-II)*, **J76**-12 (1993), 2504-2512.
- 21) Watanabe, T., Hatakeyama, M. and Kimura, A. : Extraction of Tangent Information and Detection of Broken Ellipses Using Hough Transform, *IEICE(D-II)*, **182**-12 (1999), 2221-2229.
- Rousseeuw, P.J. and Leroy, A.M. : Robust Regressionand Outlier Detection, *Wiley*, New York (1987).
- 23) Fischler, M.A. and Bolles, R.C. : Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications toimage analysis and automated cartography, *Commun.ACM*, 6-24 (1981), 381-395.
- 24) Tsuji, T., Shibata, S., Hasegawa, T. and Kurazume, R. : Iris Detection Using LMedS for Eye Tracking System, *MIRU2004 I* (2004), 684-689.
- 25) Okabe, M., Kanatani, K. and Ohta, N. : Automatic Detection of Circular Objects by Ellipse Growing, *IEICE(D-II)*, J85-12 (200), 1823-1831.
- 26) Sakashita, Y., Fujiyoshi, H., Hirata, Y., Takamaru, H. and Fukaya, N. : Measurement of Cycloduction Movement Based on Fast Ellipse Detection, *SSII06* (2006), 558-565.
- 27) Kitagawa, Y., Kato, T., WU, H. and Wada, T. : Iris Tracking for Visual Line Estimation with Eye-Model, *MIRU2005* (2005), 690-695.
- 28) Isard, M. and Blake, A. : Condensation-conditional density propagation for visual tracking, *International Journal for Computer Vision*, **29**-1 (1998), 5-28.
- 29) Moriyama, T., Kanade, T., Xiao, T.J. and Cohn, J.F. : Meticulously Detailed Eye Region Model and Its Application to Analysis of Facial Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 26-5 (2006), 738-752.
- 30) Sato, K., Yamamoto, S., Kamata, O., Ami, M., Fukushima, K. and Naito, T. : On Measurement of Angular Displacement of Human Eye using a 2-D

CCD, JSME(C), **58**-556 (1992), 3644-3648.

- Clarke, A.H., Teiwes, W. and Scherer, H.: Evaluation of the torsional VOR in weightlessness, *Journal of Vestibular Research*, 3 (1993), 207-218.
- 32) Zukeyama, Y. and Hoshino, K. : Eye Rotation Measurement System Considered Influence of Palpebral, *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, MBE98-124 (1999), 71-75.
- Hoshino, K. : Measurement of Binocular Cycloduction, *ITE*, 55-11 (2001), 1539-1542.
- 34) Asahina, S., Sakai, H., Yamaji, K., Ishigure, Y. and Usui, S.: Development of Monitoring System for Pupil Activity, Eye Movement and Lens Accommondation, *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, MBE2000 (2000), 67-74.
- 35) Hirata, Y., Yamaji, K., Sakai, H. and Usui, S. : Function of the Pupil in Vision and Information Capacity of Retinal Image, *IEICE(D-II)*, J85-4 (2002), 659-667.
- 36) Looewenfeld, E.I.: THE PUPIL: Anatomy, Physiology, and Clinical Applications, Oxford: Butterworth-Heinemann (1999).
- 37) Hutchinson, E.T., White, P.K., Martin, N.W., Reichert, C.K. and Frey, A.L. : Human-computer interaction using eye-gaze input, *IEEE Trans. Syst., Man. Cybern.*, **19**-6 (1989), 1527-1534.
- 38) Nishiuchi, N., Shibata, H. and Takada, H. : A Study on Non-Contact Line-of-Sight Detection Using Image Processing, JSME C-64, 97 (1998), 1237-1243.
- 39) Matsuda, K. and Nagami, T. : A New System for Measuring Eye Position Adopts Common Video Application Interface, *BPES* 2000 (2000), 285-288.
- Matsuda, K., Nagami, T. and Yamane, S. : A System for Measuring Eye Position, *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, TL2000-2 (2000), 9-16.
- Ohno, T., Mukawa, N. and Yoshikawa, A. : An Eyeball Model Based Eye Tracking Method, *MIRU2002* (2002), 307-312.
- 42) Ohno, T., Mukawa, N. and Yoshikawa, A. : An Eye Tracking System Based on Eye Ball Model FreeGaze, *Interaction 2002* (2002), 87-88.
- 43) Shirai, S., Ito, M., Norimatsu, Y., Adachi, K., Nakano, T. and Yamamoto, S. : Detection of the Gaze Direction for Detection of the Driver's Status, *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, HIP2003 (2003), 67-72.
- 44) Yamada, H., Norimatsu, Y., Kozuka, K., Nakano, T. and Yamamoto, S. : Drivers States Detection 1 -Gazing direction of a driver detected by a CCD camera built-in a rear view mirror-, *MIRU2004 I* (2004), 63-68.
- 45) Ohno, T. : Quick Menu Selection Task with Eye Mark, *IPSJ*, **40**-2 (1999),602-612.
- 46) Yamato, M., Monden, A., Matsumoto, K., Inoue, K. and Torii, K. : Eye Gaze and Mouse Combined Target Selection Methods for General GUIs, *IPSJ*, 42-6 (2001), 1320-1329.
- 47) Takegami, T and Gotoh, T : Vision-Based Algorithm for Eye Movement Detection Using Corneal Reflection and Iris Contour, *IEICE(D-I)*, **J82**-10 (1999), 1295-1303.
- 48) Takegami, T., Gotoh, T. and Ohyama, G. : An Algorithm for Eye Tracking System with Self-Calibration, *IEICE(D-II)*, **J84**-8 (2001), 1580-1588.
- 49) Wang, Jian-Gang. and Sung, Eric.: Study on Eye Gaze Estimation, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 32-3 (2002).
- 50) Ito, T., Mita, S., Kozuka, K., Nakano, T. and Yamamoto, S. : Driver Blink Measurement by the Motion Picture Processing and its Application to Drowsiness Detection, *Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems (ITSC2002)* (2002), 168-173.
- Jacob, R.J.K., Leggett, J.J., Myers, B.A. and R, Pausch. : Interaction Styles and Input/output Devices, *Behaviour and Information Technology*, **12** (1993), 69-79.
- 52) Hansen, J.P., Anderson, A.W. and Roed, P. : Eye-Gaze Control of Multimedia Systems, *Symbosis of Human and Artifact*, Elsevier Science, 20A (1995), 37-42.
- 53) Ebisawa, Y., Nurikabe, Y., Kitashiba, S. and Nakashima, A. : Operational improvement of PupilMouse by duplicating camera, *SSII06* (2006), 490-496.
- 54) Abe, K., Ohi, S. and Ohyama, M.: On an Eye-gaze Input System based on the Limbus Tracking Method by Image Analysis for the Seriously Physically Handicapped People, *JSME* 第 2 回 福祉工学シンポジウム講演論文集 (2002), 129-132.
- 55) Abe, K., Ohyama, M. and Ohi, S. : An Eye-gaze Input System Based on Image Analysis under Natural Light, *TECHNICAL REPORT OF IEICE*, HIP2003 (2003), 43-48.
- 56) Yamato, M., Monden, A., Takada, Y., Matsumoto, K. and Torii, K. : Scrolling the Text Windows by LOoking, *IPSJ*, 40-2 (1999), 613-622.
- 57) Scott, H.S. : Neuroscience, Converting thoughts into action, *nature*, **442** (2006), 141-142.