

## アイモデルを用いた ConDensation による視線推定

北川 洋介<sup>†</sup> 加藤 丈和<sup>†</sup>  
呉 海元<sup>†</sup> 和田 俊和<sup>†</sup>

我々は、一枚の入力画像から黒目の輪郭を抽出し、楕円をフィッティングして、その形状に基づいて視線方向を推定する手法を提案している。しかし、まぶたと黒目の境界線と、黒目の輪郭との区別は一般的に困難である。この問題を解決するために、本論文では、まぶたと黒目の輪郭をもつアイモデルを構築し、それを用いて安定かつ正確に黒目の輪郭を追跡する方法について検討する。瞬きのある場合にも追跡できるようにするために *Condensation* を採用し、黒目のエッジの向きと黒目の輝度を考慮した尤度を提案する。

### Visual Line Estimation using ConDensation with an Eye-Model

YOSUKE KITAGAWA,<sup>†</sup> TAKEKAZU KATO,<sup>†</sup> HAIYUAN WU<sup>†</sup>  
and TOSHIKAZU WADA<sup>†</sup>

We have proposed an algorithm for estimating the visual direction using iris contours. The iris contours are detected from an input image and fitted with ellipses. However, it is difficult to detect the iris contours without the boundaries between an eyelid and the iris. In order to solve this problem, we propose a simple eye-model that consists of the iris contours and the eyelids. This paper describes how to track the iris contours correctly and robustly by using the eye-model. We use Condensation algorithm for tracking stably the iris contours against blinking and propose a likelihood function based on directions of iris contours and a brightness of iris region.

#### 1. はじめに

本論文では、視線推定のために、黒目の輪郭とまぶたを持つ 3D アイモデルを用いて、まぶたの影響を考慮しつつ、正確な黒目の輪郭を追跡する問題について取り扱う。

視線は、その人の関心や注意を引く事象に誘導される傾向がある。このように人間の内的状態を直接反映しやすい視線方向を求める技術は、心理学をはじめ、福祉・医療、ヒューマンインタフェース、人間工学などの分野で応用可能な基礎技術として位置づけることができる。

既存の視線計測法は、被験者の頭部にアイカメラを装着したり、頭部を動かさないなど、被験者に強い拘束を課すものが大半である。このため、自然な状態での視線方向の計測は行えず、視線を用いたヒューマンインタフェース技術の実用化は困難であった。この問題を解決する方法として我々は、被験者の顔画像のみから視線方向を計測する手法<sup>1)</sup> や移動する人物を十

分な解像度で、かつ鮮明に撮影するための能動追跡技術<sup>2)</sup> を提案している。これらの技術を組み合わせることにより、自然な状態での視線方向計測が可能になると期待できる。

心理学の研究分野では、人間が何を見て他人の視線方向を認識しているかについて「目の部分のみで認識できる」と「認識には目だけでなく、顔の姿勢など他の顔特徴も必要」という二つの説がある。

「認識には目だけでなく、顔の姿勢など他の顔特徴も必要」という説の根拠の一つとして、図 1 に示すように、顔が下を向いている画像 (a) から、こちらを向いている目の部分を抜き出して、顔が上を向いている画像 (b) にはめ込むと、目はこちらを向いているにもかかわらず上方を向いているように見える (図 1(c))。このことから、人間は顔の向きとそれに対する目の向きの情報から視線を認識していると考えられる。

実際に、このような考えに基づき、目だけでなく、顔の姿勢など他の顔特徴も利用した視線認識の研究が多数行われている<sup>3)4)5)</sup>。

これらの方法に対して、我々は「目の部分のみで視線方向を認識できる」という考えに基づいて “Two-

<sup>†</sup> 和歌山大学  
Wakayama University

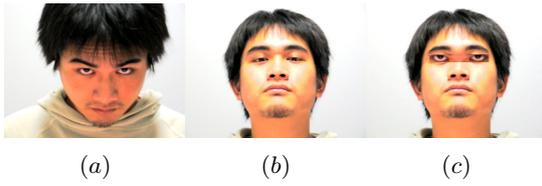


図 1 顔の向きの視線方向の認識への影響



図 2 “Two-circle” アルゴリズム<sup>1)</sup>による視線推定結果の例

“Two-circle” アルゴリズムによる視線推定法を提案している<sup>1)</sup>。この手法は、単眼画像の中の両黒目の輪郭に楕円をフィッティングし、その楕円の形状によって視線方向を推定する手法である(図 2 参照)。“Two-Circle” アルゴリズムでは、黒目の輪郭さえ抽出できれば、頭部の姿勢が分からなくても視線方向を推定できるという利点を持つ。しかし、正しく視線方向を推定するには、高解像度の顔画像から黒目の輪郭だけを正しく抽出する必要がある。これは一般的には困難である。

辻ら<sup>6)</sup>は、LMedS によるはずれ値除去を用いた楕円のロバストフィッティングにより黒目の輪郭の検出を行っている。彼らの研究結果より、目の画像から抽出されたすべてのエッジに対して正しい黒目のエッジが 50% 以上の場合には、楕円を黒目に正しくフィットすることができることが分っている。しかし、実際にまぶたと黒目の境界線と睫毛のエッジがあり、更に、上下のまぶたの間隔が狭いときなど、黒目の輪郭エッジが少なく、上の条件を満足することが困難である。

辻らの方法に対し、本論文では、黒目の輪郭とまぶたを持つアイモデルを用いて、まぶたの影響を考慮しつつ黒目の輪郭を追跡する手法を提案する。追跡には、瞬きのある場合にも安定に黒目を追跡するために *Condensation* を採用する。黒目を高速かつ安定に追跡するために、黒目の輪郭を抽出するという目標を達成でき、できるだけパラメータ数の少ないアイモデルを構築する。また、黒目という追跡対象に合わせた尤度推定方法を提案する。

アイモデルを用いた従来法として、森山ら<sup>7)</sup>は目領域の画像の多様性を表現する高精細な目領域モデルの構築法と、そのモデルを用いた目の開閉および瞳の位置の追跡法を提案している。この手法で用いるモデル

は生成型のグラフィックスモデルであり、目の各部分の構造的な個人性を表現する構造パラメータと、目の運動を表現する運動パラメータより制御される。この手法では、目全体の形状の詳細なマッチングが可能であるが、黒目部分の精度に着目すると、瞳部分のモデルを単一色の円盤とし、瞳の位置を円盤の中心座標で表現しているため、黒目の輪郭がずれて推定される場合がある。

森山らのモデルに対して、本研究では、目全体の詳細なモデルを用いず、黒目の輪郭とまぶたのみを持つ、簡単化されたモデルを利用することで、アイモデルのパラメータ数を削減し、追跡の高速化、安定化を計る。また、黒目に関しては 3 次元の球上にある円とし、目の向きが変化したときの黒目の変形に対応した。さらに、尤度推定の方法を工夫することにより、黒目の輪郭部分を精度よく、かつ安定に追跡する方法を提案する。

## 2. *Condensation* の概要<sup>8)</sup>

*Condensation* では、時刻  $t$  における追跡対象のパラメータを  $\mathbf{X}_t$ 、画像特徴を  $\mathbf{Z}_t$  とし、その集合を  $\mathcal{Z}_t = \{\mathbf{Z}_1, \dots, \mathbf{Z}_n\}$  としたとき、追跡の問題は各時刻で事後分布  $p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_t)$  を求める問題として定式化される。ここで、 $p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_t)$  についてベイズの定理より次式が導かれる。

$$p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_t) = k_t p(\mathbf{Z}_t | \mathbf{X}_t) p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_{t-1}) \quad (1)$$

ただし、 $k_t$  は正規化項である。また、 $p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_{t-1})$  は  $\mathbf{X}_t$  の事前分布であり、 $p(\mathbf{Z}_t | \mathbf{X}_t)$  はあるパラメータ  $\mathbf{X}_t$  を仮定したときに観測データ  $\mathbf{Z}_t$  が得られる確率(尤度)を表わす。

ここで、事前分布  $p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_{t-1})$  は時刻  $t-1$  の事後分布  $p(\mathbf{X}_{t-1} | \mathcal{Z}_{t-1})$  から次式のように推定できる。

$$p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_{t-1}) = \int_{\mathbf{X}_{t-1}} p(\mathbf{X}_t | \mathbf{X}_{t-1}) p(\mathbf{X}_{t-1} | \mathcal{Z}_{t-1}) d\mathbf{X}_{t-1} \quad (2)$$

ただし、 $p(\mathbf{X}_t | \mathbf{X}_{t-1})$  はあらかじめ与えた時刻  $t-1$  の状態に対する時刻  $t$  の状態を表わす推移確率である。式(1)、(2)より、各時刻において、すべての  $\mathbf{X}_t$  に対する尤度  $p(\mathbf{Z}_t | \mathbf{X}_t)$  を求めれば事後確率  $p(\mathbf{X}_t | \mathcal{Z}_t)$  が推定できることがわかる。しかし、すべての  $\mathbf{X}_t$  に対して尤度を求めるのは現実的でないので、事前分布に基づいてランダムサンプリングを行ない、各サンプルに対して尤度  $p(\mathbf{Z}_t | \mathbf{X}_i)$  を求めることで離散的に分布を推定する。あるサンプル  $\mathbf{S}_i$  の重み  $\pi_i$  を次式のように求める。

$$\pi_i = \frac{p_z(\mathbf{S}_i)}{\sum_{j=1}^n p_z(\mathbf{S}_j)}, \quad p_z(\mathbf{S}) = p(\mathbf{Z} | \mathbf{X} = \mathbf{S}) \quad (3)$$

このとき、 $X_i$  の期待値  $E[X_i]$  は  $\pi_i$  を用いて次式のように求められる。

$$E[X_i] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \pi_i S_i \quad (4)$$

*Condensation* では、尤度関数が図 3 に示すように大局的にみて最大値の箇所からなだらかに小さくなっていることが理想である。また、局所的に小さな極大値があってもランダムサンプリングにより、全体の分布を推定できるという利点を持つ。本研究では、この特性に合った分布を持つ黒目追跡のための尤度関数について検討する。

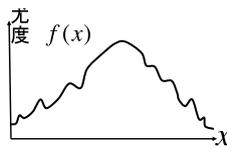


図 3 *Condensation* で追跡可能な尤度関数の例

### 3. 黒目の輪郭追跡用 3D アイモデル

本章では、両黒目の輪郭を正確に追跡・フィッティングするという目標が達成でき、また *Condensation* で高速かつ安定に追跡するために、できるだけパラメータ数の少ない簡単なモデルの構成について検討する。

#### 3.1 楕円型のアイモデル

“Two-Circle”アルゴリズム<sup>1)</sup>より、黒目の輪郭は 1 つの楕円で表現できる。そこで、まず一番簡単なアイモデルとして単独の楕円モデルについて検討する。

図 4 に示すように、画像上では黒目はまぶたで一部見えなくなることが多い。また、エッジ検出ではまぶたやまつげのエッジも検出してしまうため黒目の輪郭のみを求めることは困難である。実際に楕円モデルを用いて、黒目を追跡した例を図 4 に示す。この際、パラメータ数は 5、尤度は文献<sup>8)</sup>のエッジとの距離により計算した。図 4 (a) では、一部まぶたのエッジにフィッティングしたため縦に潰れた形状として推定されている。また、図 4 (b) では、目尻などエッジの多い箇所にフィッティングしてしまっていることがわかる。



(a) まぶたの影響による楕円の歪み (b) エッジの多い箇所の影響

図 4 楕円モデルを用いた *Condensation* での追跡失敗例

### 3.2 まぶたのあるアイモデルの提案

本研究では、まぶたのエッジや睫毛などのエッジの影響を考慮して追跡するために、図 5 に示すような黒目の輪郭と、まぶたをもつアイモデルを採用する。以下アイモデルの構成とそのパラメータについて述べる。



図 5 アイモデル

#### 3.2.1 アイモデルの個人性パラメータ

アイモデルは眼球と、その上にある黒目、まぶたからなる 3 次元モデルとして構成する。図 6 に示すように、両眼の眼球中心の midpoint をアイモデルの座標原点とする。両眼球の中心間の距離を  $d$  としたとき左右の眼球中心の座標を  $e_l = \left(-\frac{d}{2} \ 0 \ 0\right)^T$ ,  $e_r = \left(\frac{d}{2} \ 0 \ 0\right)^T$  とする。

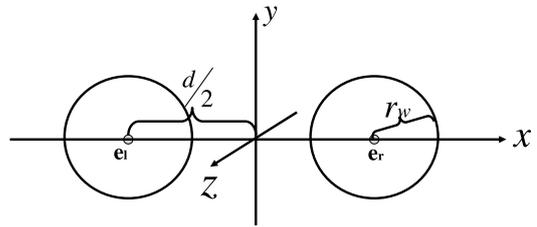


図 6 アイモデルの座標系

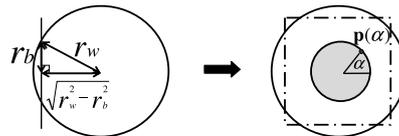


図 7 眼球の断面図

黒目の輪郭は、図 7 に示すように眼球を平面で切った切り口で表わす。ここで黒目の半径  $r_b$  とすると、黒目の輪郭  $p(\alpha)$  は眼球の中心を原点とする座標では式 (5) のように与えられる。

$$p(\alpha) = \left( r_b \cos \alpha \quad r_b \sin \alpha \quad \sqrt{r_w^2 - r_b^2} \right)^T \quad (5)$$

ここで、眼球が正面を向いているときのモデル座標における左右の黒目の輪郭  $p_l(\alpha)$ ,  $p_r(\alpha)$  は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} p_l(\alpha) &= \left( r_b \cos \alpha - d/2 \quad r_b \sin \alpha \quad \sqrt{r_w^2 - r_b^2} \right)^T \\ p_r(\alpha) &= \left( r_b \cos \alpha + d/2 \quad r_b \sin \alpha \quad \sqrt{r_w^2 - r_b^2} \right)^T \end{aligned} \quad (6)$$

次に、まぶたは図 8 に示すように左上まぶたは制御点  $E_{hl}$ ,  $E_{ul}$ ,  $E_{ll}$ , 左下まぶたは制御点  $E_{hl}$ ,  $E_{dl}$ ,

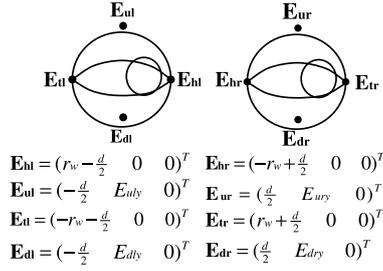


図 8 まぶたを表すベジエ曲線の制御点

$E_{tl}$ から形成されるベジエ曲線で表現する。同様に、右まぶたも制御点 $E_{hr}$ ,  $E_{ur}$ ,  $E_{tr}$ ,  $E_{dr}$ から形成する。モデル座標でのまぶたの制御点の位置は、 $z = 0$ の平面上に図 8 に示すように配置する。

こゝまでに挙げたモデルの形状を決めるパラメータを個人性パラメータと呼び、以下に列挙する。

- まぶたを形成するベジエ曲線の制御点:

$$\begin{cases} E_{hl}, E_{ul}, E_{tl}, E_{dl} \\ E_{hr}, E_{ur}, E_{tr}, E_{dr} \end{cases} \quad (7)$$

- 黒目の半径: $r_b$
- 眼球の半径: $r_w$
- 両眼球の中心間の距離: $d$

これらのパラメータは初期設定時に調節する。

### 3.2.2 アイモデルの運動パラメータ

視線方向について、対象人物は充分に遠方の対象を見ていると仮定する。このとき両眼の視線はほぼ平行となり、黒目の輪郭がある平面も平行となる。

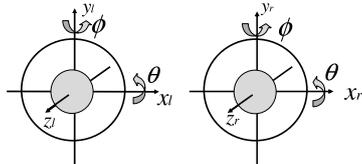


図 9 眼球座標系での黒目の回転

このとき、図 9 に示すような眼球の中心を原点とする座標で  $x$  軸、 $y$  軸に対する回転行列をそれぞれ  $R_\theta$ ,  $R_\phi$  とすると、モデル座標における回転後の黒目の輪郭  $p_l^M(\alpha)$ ,  $p_r^M(\alpha)$  は次式によって求まる。

$$\begin{aligned}
p_l^M(\alpha) &= R_\theta R_\phi p_l(\alpha) + \begin{pmatrix} -\frac{d}{2} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \\
p_r^M(\alpha) &= R_\theta R_\phi p_r(\alpha) + \begin{pmatrix} \frac{d}{2} & 0 & 0 \end{pmatrix}^T \quad (8)
\end{aligned}$$

ここでモデル座標系の  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸に対する回転行列をそれぞれ  $R_\rho$ ,  $R_\omega$ ,  $R_\psi$ , 顔の平行移動を  $T = \begin{pmatrix} t_x & t_y & t_z \end{pmatrix}$  とすると、ワールド座標での黒目の輪郭  $p_l^W(\alpha)$ ,  $p_r^W(\alpha)$  は次式のように求まる。

$$\begin{aligned}
p_l^W(\alpha) &= R_\rho R_\omega R_\psi p_l^M(\alpha) + T \\
p_r^W(\alpha) &= R_\rho R_\omega R_\psi p_r^M(\alpha) + T \quad (9)
\end{aligned}$$

$p_l^W(\alpha)$  の  $z$  座標を  $p_{lz}(\alpha)$ , 焦点距離を  $f$  とすると、画像座標での黒目の輪郭  $p_l^I(\alpha)$  は次式のように求まる。

$$p_l^I(\alpha) = \begin{pmatrix} f/p_{lz}(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & f/p_{lz}(\alpha) & 0 \end{pmatrix} p_l^W(\alpha) \quad (10)$$

また、右目に対しては左目と同様に変換する。

一方、まぶたの開閉運動は、上まぶたの制御点  $E_{ul}$ ,  $E_{ur}$  を動かすことで表現する。開閉運動後の制御点  $E'_{ul}$  は制御点  $E_{ul}$  と制御点  $E_{dl}$  とを結ぶ線分を  $m$  によって次式のように内分する。

$$E'_{ul} = m E_{ul} + (1 - m) E_{dl} \quad (11)$$

制御点  $E_{ur}$  に対しては同様である。下まぶたについてはほとんど動かないものと考え、変形しない。また、制御点  $E_{hl}$  をワールド座標へ変換した座標  $E_{hl}^W$  は式 (12) のように求められる。

$$E_{hl}^W = R_\rho R_\omega R_\psi E_{hl} + T \quad (12)$$

また、他の制御点についても同様である。この座標を画像座標に透視投影し、画像座標上でベジエで補完し、まぶたの形状を求める。

以下、運動パラメータを列挙する。

- $x$  軸まわりの眼球の回転角: $\theta$
- $y$  軸まわりの眼球の回転角: $\phi$
- まぶたの開き具合 ( $0 \sim 1$ ): $m$
- 顔の平行移動: $t_x, t_y, t_z$
- モデル座標系の  $x$  軸まわりの顔全体の傾き: $\rho$
- モデル座標系の  $y$  軸まわりの顔全体の傾き: $\omega$
- モデル座標系の  $z$  軸まわりの顔全体の傾き: $\psi$

## 4. 黒目の追跡に適した尤度推定

3.1 節で述べたように、文献<sup>8)</sup> の *Condensation* ではエッジとの距離を尤度としているため、目尻などのエッジの多い箇所の尤度が高くなり、間違った箇所に収束するという問題がある。そこで、本研究ではエッジの傾きを考慮した尤度を提案する。具体的には、楕円の法線ベクトルと輝度勾配ベクトルの内積を用いる。また、まぶたの影響を除去するためにアイモデルを用いてまぶたの内側のみを尤度の計算の対象とする。

### 4.1 輝度勾配による黒目の尤度推定

黒目以外のエッジの影響を削減するため、輝度勾配ベクトルを用いてエッジの位置だけでなくその傾きを考慮した尤度推定法を導入する。黒目の輪郭の位置を 3 章で求めた関数  $p_l^I(\alpha)$ ,  $p_r^I(\alpha)$  で表わす。輪

郭から離散的な点を一定間隔で  $n$  個取り出す．この点を輪郭点と呼ぶ．その輪郭点は， $p_{lk} = p_l^I(\frac{2\pi k}{n})$ ， $p_{rk} = p_r^I(\frac{2\pi k}{n})(k = 0, 1, \dots, n-1)$  と表わす．また，輪郭点  $p_{lk}$ ， $p_{rk}$  上の法線ベクトルを  $h_{lk}$ ， $h_{rk}$  とし，ある位置  $p$  の輝度勾配ベクトルを  $g(p)$  とする．このとき黒目に関する尤度  $\pi_I$  を次式のように求める．

$$\pi_I = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk}) |h_{lk} \cdot g(p_{lk})|}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk})} + \frac{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk}) |h_{rk} \cdot g(p_{rk})|}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk})} \quad (13)$$

ただし， $B(p)$  は次式のようなまぶたの内外を判定する関数である．

$$B(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p \text{ in eyelid} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

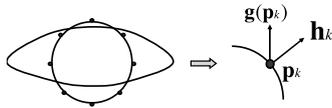
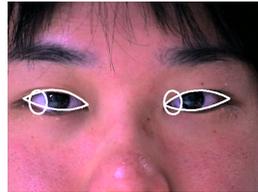
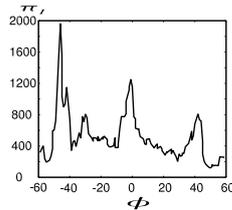


図 10 輪郭点の法線ベクトルと輝度勾配ベクトル

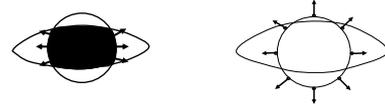
#### 4.2 輝度を考慮した尤度推定



(a)  $\phi$  に対する尤度推定 (b) 最大尤度のモデル

図 11 輝度勾配による尤度推定の一例

4.1 節で導いた式 (13) の尤度の推定方法では，輪郭の傾きを考慮しているが，近い方向のエッジの多い箇所では尤度が高くなってしまいう問題には完全には解決されない．式 (13) の尤度の一例を図 11(a) に示す．このグラフは正面顔画像にモデルの位置を正確に合わせ，黒目の回転角  $\phi$  だけを変化させたときの尤度を示す．この図より，尤度分布のピークが複数になっていることがわかる．また，尤度が最大となる位置 (図 11(b)) は，黒目モデルが黒目の輪郭とまぶたのエッジに接している部分となっている．この問題を解決するため，輪郭の傾きだけではなく，黒目とそれ以外の明るさの差を考慮した尤度推定を行う．図 12(a) に示すように黒目は周辺に比べて暗いので，輝度勾配ベクトルは黒目の外側に向いている．また，法線ベクトル



(a) 輝度勾配ベクトル (b) 法線ベクトル

図 12 輝度勾配と法線方向

も図 12(b) に示すように外側へ向いているため，法線と輝度勾配の方向は同じになる．そこで，式 (13) のように絶対値をとらずに，次式のように各輪郭点に対する内積をそのまま平均する．

$$\pi_I' = \frac{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk}) h_{lk} \cdot g(p_{lk})}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk})} + \frac{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk}) h_{rk} \cdot g(p_{rk})}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk})} \quad (15)$$

$$\pi_I = \begin{cases} \pi_I' & \text{if } \pi_I' \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

式 (15) は輝度変化の方向を考慮した尤度となっているが，輪郭点の位置のみを用いて計算するため，輪郭点がまぶたの影にかかったときなど値が不安定になる場合がある．そこで，もう 1 つの方法として，黒目が見えている領域の輝度値を用いた推定法を提案する．黒目の輝度は，周辺に比べて低いことを考慮し，次式のように領域の輝度値の平均が 0 から離れる程低くなるような値  $E_l$ ， $E_r$  を求める．

$$E_l = e^{-Y_l^2/k}, \quad E_r = e^{-Y_r^2/k} \quad (16)$$

ここで  $Y_l$ ， $Y_r$  は左右それぞれの黒目が見えている領域の輝度値の平均， $k$  は定数である．この  $E_l$ ， $E_r$  を次式のように式 (15) にかけて尤度とする．

$$\pi_I = \frac{E_l \sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk}) h_{lk} \cdot g(p_{lk})}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{lk})} + \frac{E_r \sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk}) h_{rk} \cdot g(p_{rk})}{\sum_{k=0}^{n-1} B(p_{rk})} \quad (17)$$

#### 4.3 まぶたを含めた尤度推定

黒目の尤度を正しく計算するには，まぶたの位置も正しく推定する必要がある．そこで，まぶたについても尤度を推定する．まぶたの尤度は，まぶたの内側と外側で輝度の変化が黒目程ないので，領域の輝度を利用する手法は使えないが，まぶた部分に影ができ，影から肌の方向への輝度勾配が生じる．そこで，法線と輝度勾配ベクトルの向きを考慮した式 (15) と同様に推定する．まぶたの尤度を  $\pi_E$  とし，まぶたを含めたアイモデル全体の尤度を次式のように定義する．

$$\pi = \pi_I \pi_E \quad (18)$$

## 5. 実験

### 5.1 尤度推定の比較実験

提案した尤度推定法について比較実験を4つ行った。

- (a) 『内積の絶対値』: 式(13)に示す法線と輝度勾配との内積の絶対値
  - (b) 『内積』: 式(15)に示す方向を考慮した法線と輝度勾配との内積
  - (c) 『内積の絶対値と輝度』: 法線と輝度勾配との内積の絶対値に黒目領域の輝度値の平均
  - (d) 『内積と輝度』: 式(17)に示す法線と輝度勾配との内積に黒目領域の輝度値の平均をかける手法
- 実験方法はモデルの黒目とまぶたの位置を画像に正確に合わせた状態から,  $m, t_x, t_y, t_z, \rho, \omega, \psi$  の7パラメータを固定し, 黒目の回転角  $\theta, \phi$  のみを変化させた場合の尤度の変化を調べた。

図13に黒目が正面を向いている画像に対する尤度, 図14に黒目が横向きの画像に対する尤度を示す。これらの実験結果より, (b) 『内積』は(a) 『内積の絶対値』に比べて極大点が少なくなり, ピークがはっきりしているが, 輪郭点でしか輝度を考慮していないため, 目尻目頭の影で暗くなっている箇所では尤度が高くなってしまっていることがわかる。(c) 『内積の絶対値と輝度』の手法は(a) 『内積』の手法と比べて, 目尻目頭の部分での尤度を抑えることができています。これらの結果より, (d) 『内積と輝度』が最も理想的な尤度分布に近づいていることがわかった。

### 5.2 追跡実験

Condensationによる追跡結果を示す。今回の実験ではモデル座標系の回転はz軸まわりのみとする。パラメータは  $\theta, \phi, m, t_x, t_y, t_z, \psi$  の7パラメータとし, ランダムサンプリングは標準偏差がそれぞれ  $\theta: 5$  度,  $\phi: 5$  度,  $m: 0.05$ ,  $t_x: 0.03\text{cm}$ ,  $t_y: 0.03\text{cm}$ ,  $t_z: 0.01\text{cm}$ ,  $\psi: 0.001\text{rad}$  の正規分布を用いた。また, 初期フレームにおいて, 手動でモデルをあわせて個人性パラメータと運動パラメータの初期値を与えた。

図15に各フレームのサンプル数100個で追跡した結果, 図16にサンプル数400個の追跡結果を示す。

サンプル数100個での追跡の処理時間は9.7ms/frame, サンプル数400個では30.7ms/frameとなり, ビデオレートで追跡できる。サンプル数100個で追跡した場合には, 黒目がすばやく動いたときに, 追跡の遅れが多いが, サンプル数が400の場合は遅れが少ない。また, Partitioned sampling<sup>9)</sup>の手法を用い, 1フレームに対してサンプル数150のランダムサンプリングと尤度推定を2回行った結果が図17である。処理速

度は29.3ms/frameであった。(d)の部分で黒目がすばやく動いているフレームに対してもモデルが遅れずに追跡でき, サンプル数400個の追跡より正確に楕円フィッティングできていることがわかる。

最後に, 二重まぶたの人の目で追跡実験した。サンプル数は150, 1フレームに2回サンプリングした結果が図18に示す。上方を向いている状態からすばやく正面を向くとまぶたモデルが二重まぶたの上のエッジにフィッティングしてしまい, まぶたのエッジを完全に除外することができないという結果となった。これは二重まぶたの上下どちらのエッジであるか区別していないからだと考えられる。

### 5.3 黒目の輪郭の再推定と視線方向推定

アイモデルのパラメータを用いて視線方向を推定した。実験では, 対象者の前方4mにある壁にマーカーを1.2m間隔で, 上中下の3段に配置した。各マーカーに対して, 左から右へ約0.5秒ずつ順番に注視した。その推定結果を図19に示す。また, 各マーカー毎の視線推定の平均誤差の角度を表1に示す。

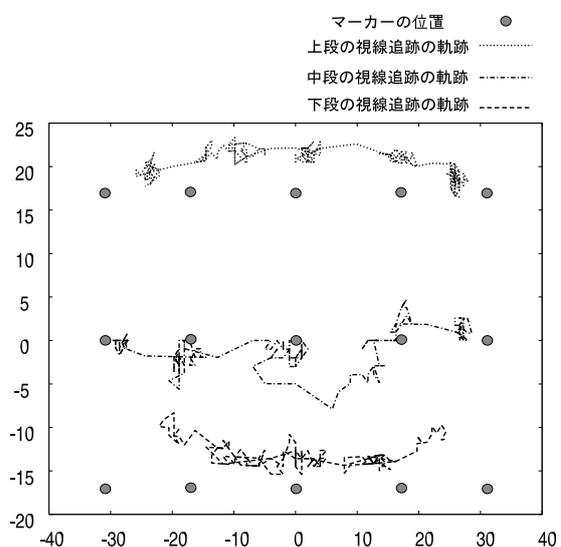


図19 アイモデルによる視線推定結果

表1 視線推定誤差 [(x,y) 両方向に対する平均誤差, 単位:度]

位置	1列	2列	3列	4列	5列
上段	(7.2,2.4)	(5.8,4.7)	(2.0,4.6)	(1.1,4.0)	(5.0,1.6)
中段	(2.7,0.4)	(1.6,2.1)	(2.0,1.3)	(2.9,1.8)	(4.0,1.2)
下段	(15.3,5.6)	(8.4,3.2)	(1.9,3.4)	(4.2,3.1)	(9.3,5.9)

これらの結果から黒目のおおよその方向はわかるので, 被視認識の応用が可能と思われる。しかし, 精度は十分ではない。一つの原因として, 眼球の大きさなどの個人性パラメータが十分正確ではないことが考え

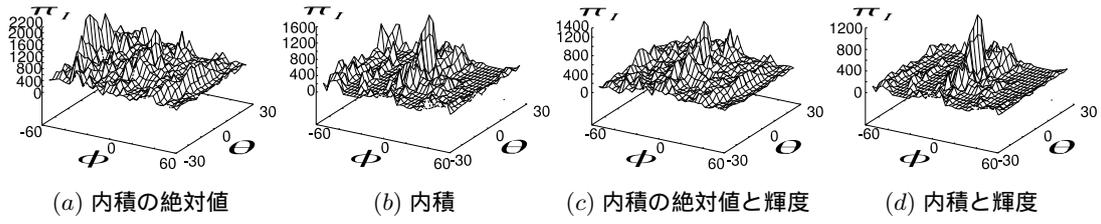


図 13 視線方向正面向きの尤度の比較

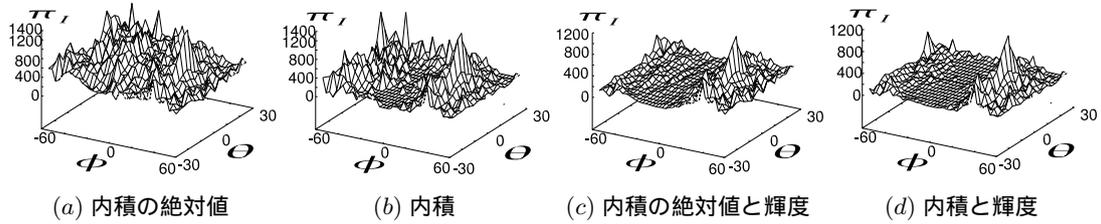


図 14 視線方向横向ききの尤度の比較

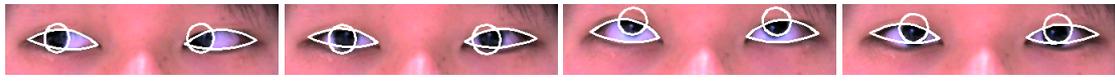


図 15 サンプル数 100 での追跡結果

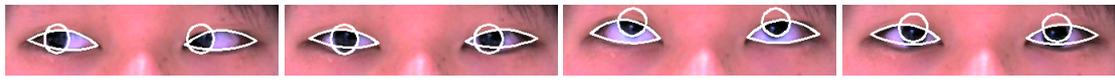


図 16 サンプル数 400 での追跡結果

られる。

また、下段の視線推定結果では上段、中段に比べ、精度が悪い。これは、図 20 に示すように、画像から黒目の輪郭があまり見えていないので、輪郭の追跡精度が保障できなくなることが原因だと考えられる。

そこで、本論文では、視線推定の精度を向上するために、黒目の輪郭のみを再推定することで微調整を行い、追跡処理時の微小なズレの解消を計る。なお、再推定時には、まぶたを固定し、両黒目の輪郭がある平面は平行であるという拘束のもと、両黒目中心の座標、黒目のある平面の回転角度  $\theta, \phi$  と黒目の半径の 5 パラメータについて、山登り探索により尤度が極大となるパラメータを推定した。このときの尤度は 4.3 節の式 (18) の  $\pi$  を用いた。

黒目の輪郭に楕円を再フィッティングすることにより黒目の輪郭がより正確に検出した一例を図 21 に示す。図 21 の (a) からわかるように、黒目のモデルは黒目の輪郭に対して多少ずれている。山登り探索で再



図 20 下向き時の黒目輪郭の見え方

フィッティングした結果を図 21 の (b) に示す。再フィッティングした楕円の形状から視線方向を推定し矢印で表わした結果例を図 22 に示す。同図のように正確に再フィッティングできれば、ほぼ正しく推定できていることが分かった。

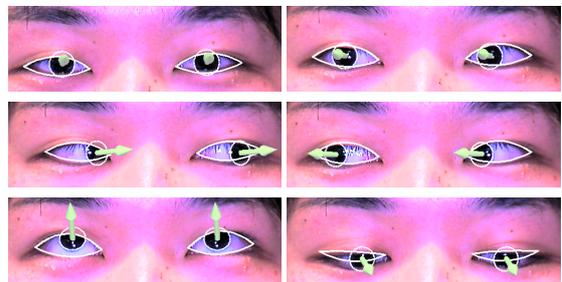


図 22 視線方向を矢印で表示

## 6. まとめ

本論文では視線推定するために、黒目の輪郭に楕円を正確にあわせることを目標とし、まぶたのエッジの影響を抑えることができる、まぶたのある黒目追跡用のアイモデルを提案した。また、黒目の追跡に適した



(a)1 フレーム (b)16 フレーム (c)70 フレーム (d)90 フレーム

図 17 サンプル数 150, 1 フレームに 2 回処理での追跡結果



(a)1 フレーム (b)70 フレーム (c)120 フレーム (d)180 フレーム

図 18 二重まぶたの追跡結果



(a) Condensation による追跡結果 (b) 山登り探索による再フィッティング後の結果

図 21 黒目に対する精円の再フィッティングの例 (約 6 倍拡大)

尤度推定方法について検討した。追跡実験では、*Condensation* で黒目をビデオレートで追跡できることを確認した。追跡結果を用いた視線推定実験より、被視認認識程度の精度が保証できることが分かった。また、更に高い視線推定の精度を求めるために、*Condensation* による追跡の後、黒目のみを山登り探索することにより再推定し微調整を行う必要があることが分かった。しかし、再フィッティング結果を時系列で見ると不安定であり、視線方向が激しく揺らぐ現象が見られた。この問題に関しては今後改善する予定である。

現段階では二重まぶたのフィッティングが正確にできていないので、今後二重まぶたへの正確なフィッティングについて検討する。

また、現段階では正面向きの顔画像のみに対応しているが、今後は、3次元の姿勢変化への対応について検討する。この際、3次元の姿勢の追跡では、パラメータ数が多くなりサンプル数を増加しなければならないので、そのような場合でも高速に追跡するための、処理の効率化について検討する。さらに、個人性パラメータや初期値の自動設定についても検討する。

#### 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(2)1620014、及び(c)(2)16500112の補助を受けている。

#### 参 考 文 献

1) 呉海元, 陳謙, 和田俊和: 単眼画像からの視線推定, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), pp.II-253-258, (2004)

2) 大池洋史, 呉海元, 加藤丈和, 和田俊和: 鮮明な画像撮影のための高速追従型アクティブカメラ, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), pp.I-113-114, (2004)

3) 青木 宏, 河越 正弘: 顔の面対称性を利用した視線感知法, 情処研報 CV 研究会 CV-61-2, pp.1-8, (1989)

4) Y.Matsumoto, A.Zelinsky: presented An Algorithm for Real-time Stereo Vision Implementation of Head Pose and Gaze Direction Measurement, FG, pp.499-504, (2000)

5) 長井 志江, 細田 耕, 森田 章生, 浅田 稔: 視覚注視と自己評価型学習の機能に基づくブートストラップ学習を通じた共同注意の創発, 人工知能学会論文誌, Vol.19, No.1, pp.10-19, (2004)

6) 辻 徳生, 柴田 真吾, 長谷川 勉, 倉爪 亮: 視線計測のための LMedS を用いた虹彩検出法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), pp.I-684-689, (2004)

7) 森山 剛, Jing Xiao, Jeffrey F.Cohn, 金出 武雄: 高精細な目のモデル化と顔画像解析への応用, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2004), pp.I-690-695, (2004)

8) Michael Isard, Andrew Blake: Condensation-conditional density propagation for visual tracking, International Journal of Computer Vision, Vol.29, No.1, pp.5-28, (1998)

9) John MacCormick and Michael Isard, Partitioned sampling, articulated objects, and interface-quality hand tracking, In Euro-pean Conference on Computer Vision, pp.3-19, (2000)