

可変扇形分離度フィルタを用いた瞳追跡

松本光平[†] 呉海元^{††}

本論文では、Particle Filter と可変扇形分離度フィルタを用いた瞳追跡法を提案する。Particle Filter の尤度評価関数として利用する分離度フィルタを、まぶたの影響等を受けず、目の大きさなどの個人性に対応するため、可変扇形分離度フィルタとして構築し追跡を行う。従来の円形分離度フィルタと提案手法の可変扇形分離度フィルタを用いた比較実験結果より、従来手法に比べて提案手法の方が、追跡結果が安定し処理速度も短縮できていることが確認できた。また、様々な目の人物や眼鏡をかけているでも追跡できることを確認した。

Tracking Irises with Variable Circular Sector Separability Filter

Kohei Matsumoto[†] Haiyuan Wu^{††}

This paper describes a sophisticated method to track irises in a monocular video sequence with a particle filter that uses a newly proposed variable circular sector separability filter. In order to reduce the influence of eyelids and to cope with the variance of the appearance of eyes of different people, we propose a variable circular sector separability filter (VCSSF) and use to estimate the likelihood of hypotheses in the particle filter. Through the comparative experiments of the VCSSF and the conventional circular separability filter (CCSF), we confirmed that our iris tracking algorithm is more robustly and faster. We also confirmed that our method has the ability of tracking various eyes, even when people are wearing glasses.

1. はじめに

視線は、人の関心や注意など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、ヒューマンインターフェース、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。本論文では、動画像からの視線推定のために瞳追跡手法を検討する。より高速かつ安定に瞳を追跡するため、目の個人性に適応できる可変扇形分離度フィルタを提案する。

ATR の山添[1]らは、広視野・高解像度の単眼カメラで撮影した画像から3次元眼球および虹彩(黒目)モデルを生成し、カメラ画像と照合して眼球中心と虹彩中心を結ぶ3次元ベクトルとして視線方向を推定している。この方法では顔特徴点の同時抽出が必要である。

東大の小野・佐藤[2]らは、見えに基づく枠組みにより低解像度から視線方向を推定する手法を提案している。この方法では目の領域を正確に切り出す必要があり、頭部の姿勢変動を考慮していない。

また、神戸大の中松・有木[3]らは3D Active Appearance Model を利用した視線方向推定法を提案している。この方法は3次元座標が与えられている学習画像が2枚必要であり、小さな目を追跡することは非常に困難であった。

北川[6]らは、まぶたと黒目の輪郭をもつアイモデルを用いた Condensation による黒目追跡法を提案している。このモデルには、個人性を表現するパラメータ数が多いので、初心者が簡単にモデルを作れない。また、黒目のエッジの向きと黒目の輝度を考慮した尤度関数を使っているため、まぶたや睫毛、照明などの影響を受けやすい問題点も残っている。

筑波大の大谷・福井[7]、東芝は楕円形分離度フィルタと目のパターンを両方用いた瞳の検出・追跡方法を提案して

いる。彼らはパーティクルフィルタと3次元頭部モデルを用い、パーティクルフィルタの尤度関数は分離度フィルタから得られる瞳輪郭の適合度と判別分析によるパターン類似度を用いてシステムを構成している。円形分離度フィルタと楕円形分離度ファイルとも目の形に関する個人性を考慮していないので、細い目の人を検出・追跡対象とする場合、分離度の値が小さくなり、安定に処理できない可能性が高い。また、円形分離度フィルタと楕円形分離度ファイルの分離度を計算するコストも高く、ビデオレートでの処理に向いていない問題点も残っている。

提案手法の特徴として、実用的なヒューマンインターフェースの実現を目指しているため、特別な照明のない単眼ビデオカメラで撮影される動画像を処理対象とする。また、頭部、顔、まぶた・瞳などのモデルを使わない。提案手法では、以下の3つのアイデアを含む。

1) 目の個人性を適応できる可変扇形分離度フィルタを提案する。一枚目の画像から追跡人物の瞳に合わせた扇形分離度フィルタの形を自動的に設定する。これによって、まぶたの形に影響されず、瞳輪郭のみ評価する分離度フィルタを得られると同時に、計算範囲も絞られるので、計算コストを削減できると同時に、安定な瞳追跡が実現できる。

2) 可変扇形分離度フィルタの内側と外側の統計データ点はラジアルサンプリングで選ぶ。これによって、計算コストを削減できる同時に、二つの領域から得られるサンプル点数を完全に一致することを保証しているため、より正確な瞳輪郭の適合度を得られる。更に安定な追跡が可能になる。

3) 瞬きのある場合にも追跡できるようにするためにパーティクルフィルタを採用し、可変扇形分離度フィルタから得られる瞳輪郭の適合度を尤度とする。これによって、多数のサンプルデータから得られる統計値で尤度評価が可能になる。瞳輪郭上の離散・少数な点のみの評価方法と比べ、更に安定な追跡が可能になる。

[†]和歌山大学・システム工学科
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

^{††}和歌山大学・システム工学科
Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

2. 分離度フィルタとその問題点

分離度フィルタは画像中から円形あるいは楕円形領域を安定かつ高精度に検出するためのフィルタである。これまでに様々な瞳検出法の中で分離度フィルタが用いられた。

円形分離度フィルタは、図1に示すような二つの同心円領域1(青色の部分): $(r-r1)$ と領域2(黄色の部分): $(r2-r)$ からなるテンプレートマスク(r をマスク半径と定義)を考える。ここで、

$$r1 = (1 + \alpha)r \quad (1)$$

$$r2 = (1 - \alpha)r \quad (2)$$

とする。線形判別法によって、二つの領域に属するそれぞれの画素の輝度値や、色情報の統計的な違いを表わす量である“分離度”と呼ばれる値に数値化するものである。以下の式から分離度 η を出力することができる。

$$\eta = \frac{\sigma_b^2}{\sigma_t^2} (0 < \eta \leq 1) \quad (3)$$

$$\sigma_b^2 = n_1(\bar{P}_1 - \bar{P}_m)^2 + n_2(\bar{P}_2 - \bar{P}_m)^2 \quad (4)$$

$$\sigma_t^2 = \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_m)^2 \quad (5)$$

ここで、 N は領域1と領域2の合計画素数である。 $n1$ と $n2$ はそれぞれ領域1と領域2内の画素数である。 σ_t^2 は領域全体(領域1+領域2)の全分散値で \bar{P}_1 と \bar{P}_2 はそれぞれ領域1と領域2の平均輝度レベルを示している。分離度は、 $0 < \eta \leq 1$ の範囲内で値を取り、1に近いほど統計上領域1と領域2が分離していると判断される。このフィルタは照明変動に強く、ノイズの影響を受けにくいという特性を有する。

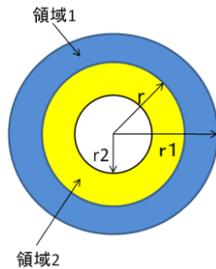


図1 分離度フィルタの概念図

本論文では目の白黒の輪郭を検出するために、画素の輝度値を用いて分離度を求める。

従来の円形分離度フィルタを用いた瞳評価の問題点として、360度の領域内で統計処理を行うため目が小さい人の場合などに上下のまぶたや睫毛の影響を受けてしまい、分離度の値が低くなり尤度評価値として使うと追跡が不安定になる。また、計算時間もかかりリアルタイムで追跡できない。

そこで我々は、個人性に適応した可変扇形分離度フィルタを提案する。可変扇形分離度フィルタは各個人のまぶたの形状に合わせた扇形角度を推定し、限定される範囲内に統計処理を行い、分離度を計算する。

3. 可変扇形分離度フィルタを用いた瞳追跡

本論文では、より高速かつ安定な追跡結果を得られるために、個人性を表現できる可変扇形分離度フィルタを提案する。また、初期フレームから構築される可変扇形分離度フィルタで計算された瞳輪郭の分離度を Particle Filter[10][11]の尤度関数として、生成された瞳の仮説を評価しながら瞳の追跡を実現する。

3.1 カスケード型識別器による瞳の初期パラメータの自動獲得

提案手法では、追跡対象の瞳における可変扇形分離度フィルタの形と、Particle Filterで対象を追跡する仮説パラメータの初期値を自動的に獲得するために、初期フレームから瞳を囲む円の中心位置と半径を求める必要がある。提案手法では、OpenCVのライブラリを利用して初期フレームから追跡対象の瞳の中心座標 (x,y) 、半径 r の初期パラメータを求める(図3(a)を参照)。その基本原理は、Haar-Like特徴を用いたカスケード型 AdaBoost ベース識別器[8][9]である。

3.2 個人性に適応できる可変扇形分離度フィルタ

可変扇形分離度フィルタの獲得について説明する。図2に示すように、初期フレームから得られた瞳を囲む円の中心と半径情報に基づいて生成された右斜め上と右斜め下の矩形範囲(点線の矩形)に対して、OpenCVのライブラリを利用して上下のコーナー検出をそれぞれ行う。その検出されたコーナーの座標(赤点)と、瞳の中心座標とのなす角度を求めることにより扇形の角度を自動的に決定することが可能となる。

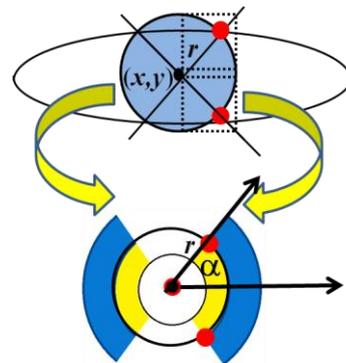


図2 可変扇形分離度フィルタの獲得と計算法

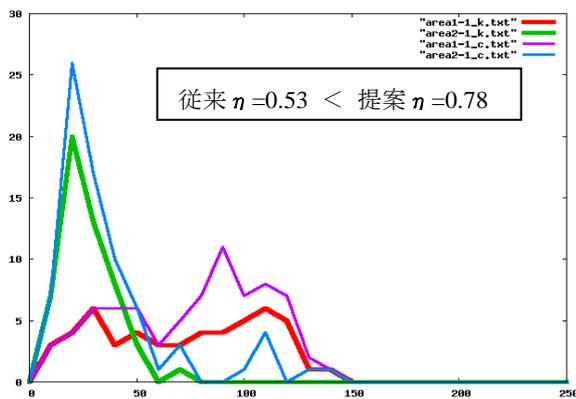
可変扇形分離度フィルタの計算について説明する。図2に示すように、個人の目の形に合わせた可変扇形分離度フィルタの分離度は、角度の左右対称の扇形(青色と黄色の領域)内のみ式(3)~(5)で計算を行う。上下の空欄の領域における計算を省けるので、計算時間が従来の円形分離度フィルタより短縮することが可能となる。可変扇形分離度フィルタの計算方法によるメリットとして、

1. 目の大きさなどの個人差に対応できる。
2. まぶたの影響を受けずに黒目と白目の輪郭における適合度が正しく評価できるので、瞳輪郭にフィットする場合、円形分離度フィルタで評価される分離度と比べ、

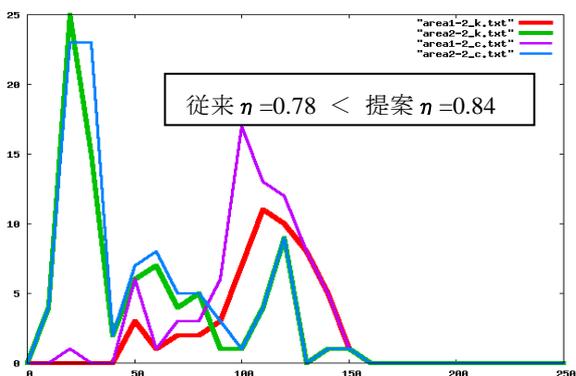
より高い値が得られる．尤度評価関数としてピークのある分布がより安定な追跡結果が得られる．などがあげられる．



(a) 実画像



(b) 右目 (赤い円) のヒストグラム



(c) 左目 (オレンジの円) のヒストグラム

図3 従来手法と提案手法の分離度 η の比較

図3は、同じ顔画像から検出された瞳に対して円形分離度フィルタと可変扇形分離度フィルタをそれぞれ用いて計算された分離度の値と、瞳の内側と外側の輝度値のヒストグラムである．図3(a)は用いた実顔画像である．円形分離度フィルタと可変扇形分離度フィルタをそれぞれ用いて分離度を計算した場合の右目(図3(b))と左目(図3(c))の輝度値のヒストグラムである．図3の(b)と(c)の縦軸は投票数、横軸は輝度値の値(0~255)を表わしており、図の太い緑色と赤色のグラフはそれぞれ可変扇形分離度フィルタを用いた時の瞳の内側と外側のヒストグラム、細い青色と紫色のグラフが円形分離度フィルタを用いた時の瞳の内側と外側のヒストグラムを表わしている．図3が示すように円形分離度フィルタの場合より、可変扇形分離度フィルタの方が分離度の値が高くなっているため正しく正確に適応

度を求めることができる．

3.3 可変扇形分離度フィルタのラジアルスプースサンプリング計算

提案手法では、図4に示すように、可変扇形分離度フィルタが限定される角度範囲内、 N 度ずつ M ピクセル間隔でラジアルスプースサンプリングよりサンプル画素を選んで計算する．これにより、1度ずつ各画素を計算するよりさらに計算コストを削減できる同時に、青色領域1と黄色領域2から得られるサンプル点数を完全に一致することを保証できるので、より正確な瞳輪郭の適合度を得られる．これで、さらに高速かつ安定な追跡が可能になる．

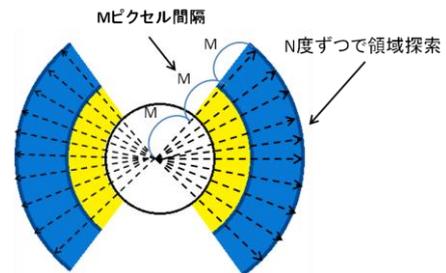


図4 可変扇形分離度フィルタのラジアルスプースサンプリング計算

3.4 可変扇形分離度フィルタと Particle Filter による瞳追跡

初期フレームから得られた瞳のパラメータに基づいて、Particle Filter の瞳の初期仮説(パラメータ)を生成することができる．動画から瞳を追跡するとき、Particle Filter のランダムサンプリングにより、新しい瞳の仮説を生成する．本論文では、可変扇形分離度フィルタから得られる瞳輪郭の適合度(分離度)を Particle Filter の尤度関数として、Particle Filter より生成された瞳の仮説を評価しながら追跡を実現する．

3.5 可変扇形分離度フィルタと Particle Filter による瞳追跡

初期フレームから得られた瞳のパラメータに基づいて、Particle Filter の瞳の初期仮説(パラメータ)を生成することができる．動画から瞳を追跡するとき、Particle Filter のランダムサンプリングにより、新しい瞳の仮説を生成する．本論文では、可変扇形分離度フィルタから得られる瞳輪郭の適合度(分離度)を Particle Filter の尤度関数として、Particle Filter より生成された瞳の仮説を評価しながら追跡を実現する．

3.5.1 片目追跡用の Particle Filter のパラメータ設計

片目を追跡するパラメータについて述べる．一番簡単なバージョンは頭部の前後移動がない場合、瞳の半径 r は初期値として得られている半径 r を固定値として利用し、瞳の位置情報である画像中の座標 (x, y) の2次元パラメータとする．Particle Filter でランダムサンプリングを行い、そのサンプリング値を可変扇形分離度フィルタで尤度評価をし、

尤度の値が高いパラメータの上位 5 個の重み付き平均を計算し追跡を実現する。

ユーザの頭部は前後に動くとき、瞳の半径を変化するので、Particle Filter のパラメータを瞳の中心座標(x,y)と半径 r の 3 次元パラメータでランダムサンプリングすることで前後の動きにも対応した追跡が可能となる。

3.5.2 片目追跡用の Particle Filter のパラメータ設計

3 次元空間では、人間の両瞳の中心間の距離 D と瞳の半径 R が一定と仮定し、既知とすれば、初期フレームから検出される瞳の半径 r を用いて、式(6)より画像内の右目と左目の瞳の中心の距離 d を推定することができる。

$$d = r \frac{D}{R} \quad (6)$$

d を用いて、推定される瞳の x 座標からもう片方の瞳の x 座標は式(7)で求めることができる。

$$x_l = x_r - d \quad \text{or} \quad x_r = x_l + d \quad (7)$$

式(7)の x_l は、画像内の左目の x 座標、 x_r は右目の x 座標を表わす。画像平面内の頭部の傾けがなければ、

$$y_l = y_r \quad (8)$$

式(8)の y_l と y_r はそれぞれ画像内の左目、右目の y 座標を表わす。

しかし、より自然な状態の両瞳を追跡するためには顔の傾きも考慮に入れる必要がある。図 5 に示すように、画像平面内の頭部の傾きを考慮した場合、x 軸周りの傾きを θ とした時、 d' と d'' は式(9)、(10)を用いてそれぞれ計算できる。

$$d' = d \cos \theta \quad (9)$$

$$d'' = d \sin \theta \quad (10)$$

仮に左瞳の中心座標を推定できたとし、式(9)と(10)を以下の式に代入することにより、傾いている場合の右瞳の中心座標を求めることができる。

$$x'_r = x_l + d' = x_l + d \cos \theta \quad (11)$$

$$y'_r = y_l - d'' = y_l - d \sin \theta \quad (12)$$

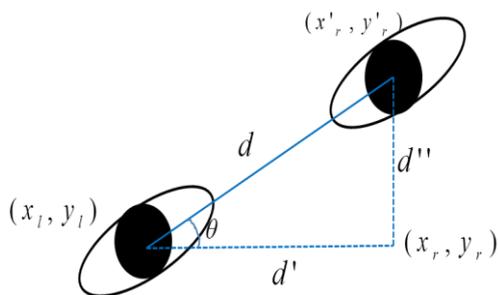


図 5 傾きを考慮した計算

この方法で追跡を行うために、Particle Filter のランダムサンプリングのパラメータを左瞳の中心座標(x,y)、半径 r、角度 θ の 4 次元とする。高速に収束させるため、提案手法では、まず、瞳の中心座標(x,y)と半径 r の 3 次元パラメータという片瞳用のアルゴリズムを用いて、左目の位置と半径を推定する。次に、角度 θ に対してランダムサンプリングし、式(11)、(12)で右瞳の中心座標を推定する。そして、二つの瞳の位置とサイズに合った可変扇形分離度フィルタ

を配置し、分離度 η_1 と η_2 をそれぞれ計算する。計算された二つの分離度を掛け合わせた値を尤度評価値 π として追跡を行う。

$$\pi = \eta_1 \times \eta_2 \quad (14)$$

こうすることにより、二つの分離度の値が高ければ掛け合わせたときにも高い値になる。その仮説が両方の瞳にフィットしている円になるので、追跡が可能となる。

4. 実験と考察

提案手法の有効性を確認するために、実動画を用いた実験を行った。提案手法の可変扇形分離度フィルタと従来の円形分離度フィルタをそれぞれ用いた追跡結果の精度や処理速度の比較実験についての結果を示す。

4.1 実験環境



図 6 実験環境

実験環境は図 6 に示す。ビデオカメラは PointGrey 社製 IEEE1394 カメラ Flea を用いた。撮影される画像サイズは 1024 × 768 画素である。CPU のスペックは AMD Phenom(tm) II X6 1090T Processor 3.20GHz であり、OS は Windows7 Professional である。

4.2 円形分離度フィルタと可変扇形分離度フィルタによる瞳追跡の比較実験結果

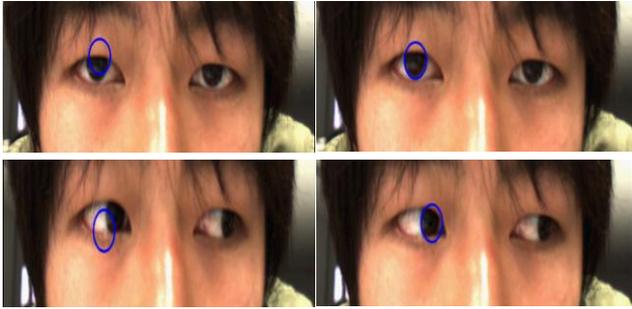
従来の円形分離度フィルタと提案手法の可変扇形分離度フィルタを用いた場合の追跡について比較を行った。追跡精度と速度を評価するために、ビデオカメラによって撮影された同じ動画ファイルを用いて評価を行った。

本実験では、Particle Filter によって生成される仮説数は 1000 個、分散値 σ は x, y が 14、半径 r が 1.4、 θ が 0.28 とした。分離度フィルタのラジアルスプースサンプリング計算の M の値は 10 度、N の値は 3 画素と設定し、追跡モデルのパラメータは円の中心(x,y)の 2 次元とする。また、半径は、初期フレームから得られた瞳の半径値 r を用いて、式(1)、(2)の分離度フィルタの α は 0.4 と設定している。

実験の結果、従来手法の円形分離度フィルタでは毎フレーム 1[ms] で処理することができ、提案手法の可変扇形分離度フィルタは、従来手法より約 2~3 割早く処理することができた。

図 6 には、比較実験の一部の追跡結果を表す。図 6(a)には円形分離度フィルタ、図 6(b)には可変扇形分離度フィルタを用いた追跡結果をそれぞれ示す。従来円形分離度フィ

ルタより提案手法の可変扇形分離度フィルタの方がより瞳に正確にフィットし、安定した追跡が行えることが確認できた。この理由として、提案手法の方が、上下のまぶたの影響を受けずに白目と黒目における分離度が正しく評価でき、分離度の値が高くなっている為と考えられる。

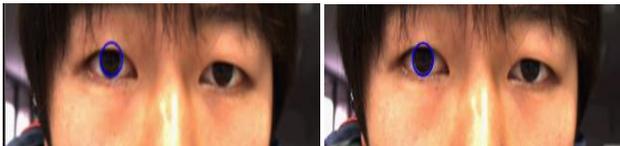


(a) 円形分離度フィルタ (b) 可変扇形分離度フィルタ

図6 パラメータ2個を用いた比較実験結果(Please see: <http://www.wakayama-u.ac.jp/~wuhy/CompExpOfCCSF&VCSSF.mp4>)

4.3 半径固定と可変の場合の瞳追跡比較

提案する可変扇形分離度フィルタを用いて、追跡パラメータが (x,y) の2次元の場合とパラメータが (x,y) と半径 r の3次元の場合での追跡比較実験を行った。図7にそれぞれの実験での追跡結果例を表わしている。



初期フレーム



顔をカメラに近付けた時



顔をカメラから引いた時

(a)パラメータ2次元 (b)パラメータ3次元

図7 半径固定と可変の場合の瞳追跡比較

図7が示すように、初期フレームではどの手法の場合も青い円が瞳にフィットしているが、顔を近づけたり、引いたりすると Particle Filter のパラメータが2次元の場合、円が正確にフィットせず、瞳から外れてしまったりして追跡が安定した追跡ができなかった。一方、3次元の場合は、顔を前後させても半径 r をランダムサンプリングさせているため、尤度評価値高い数値で求められ、その仮説円も瞳にフィットし安定した追跡ができることが確認できた。

4.4 頭部の傾けを考慮するか否かの両瞳追跡結果

Particle Filter のパラメータを顔の傾き θ を考慮した4次元にした場合での追跡実験を複数の被験者で行った。図8に一部の実験結果を示し、パラメータを傾き θ を加えた4次元にすることによって顔を傾けたときでも追跡が行うことができた。また、黒目を左右に動かした時も安定に追跡を行えることが確認できた。

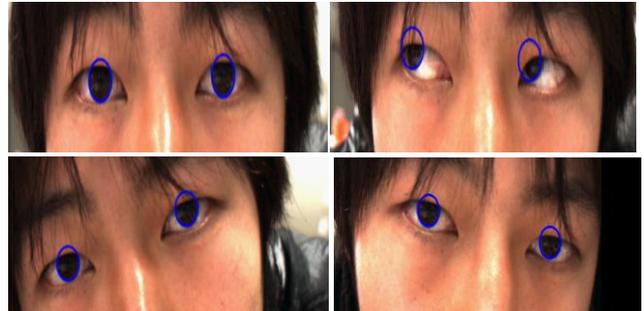


図8 両瞳追跡結果(Please see:

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~wuhy/RotationGlasses.mp4>)

4.5 様々な人物における両瞳追跡結果

複数の人での可変扇形分離度フィルタを用いた瞳追跡の結果を図9～12に示す(Please see <http://www.wakayama-u.ac.jp/~wuhy/4Perspn.mp4>). 図と動画から、提案手法を用いて、様々な目の人物のときでも黒目を追跡できることが確認できた。

4.6 眼鏡をかけている人物における両瞳追跡結果

眼鏡をかける人物での追跡実験を行った。図13に示す眼鏡のフレームが瞳にかかっていない人物Aは概に安定に追跡できた。

しかし、図14に示す人物Bは、眼鏡のフレームが黒目にかかってしまっているため、青い円が目にフィットせず安定した追跡を行うことができなかった。また、黒目を早く動かしすぎると追跡が失敗してしまう場合もあった。また、顔全体を早く動かした時に追跡が失敗してしまう時があるので、さらに安定に追跡を行えるようなアルゴリズムを考える必要がある。

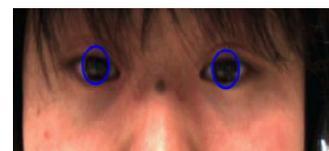
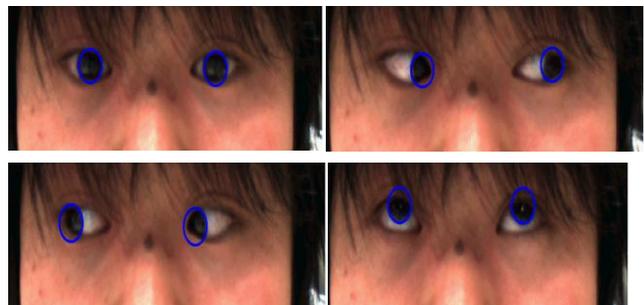


図9 人物Aの両瞳追跡結果

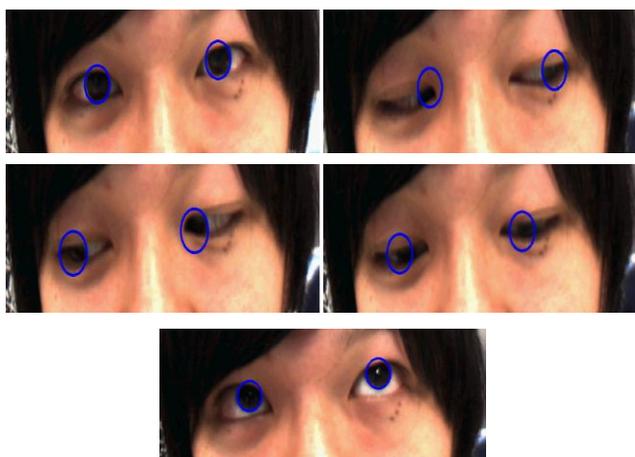


図 10 人物 B の両瞳追跡結果

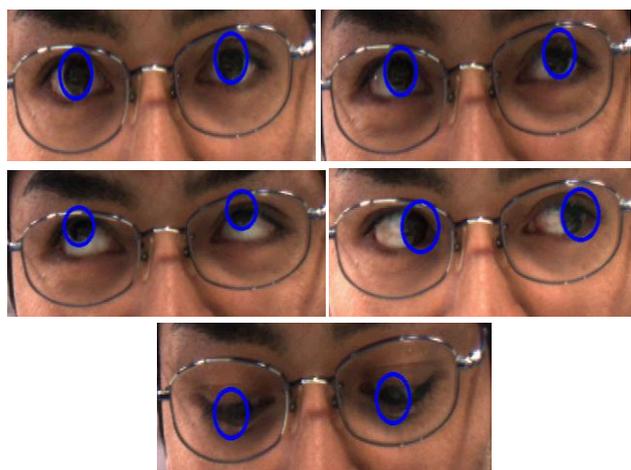


図 13 眼鏡をかけた人物 A での両瞳追跡結果(Please see:
<http://www.wakayama-u.ac.jp/~wuh/RotationGlasses.mp4>)

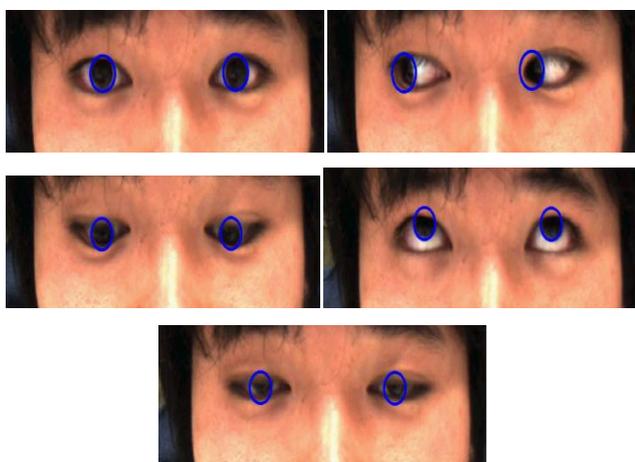


図 11 人物 C の両瞳追跡結果

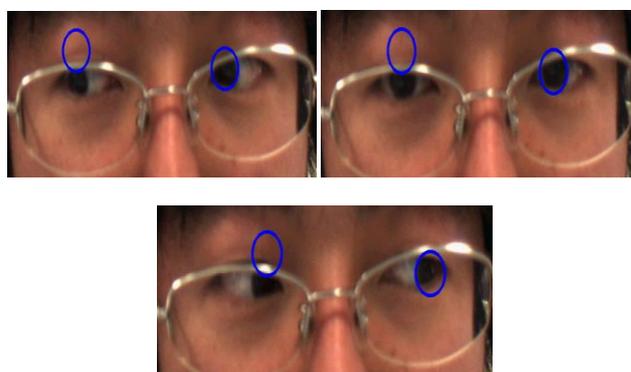


図 14 眼鏡をかけた人物 B での両瞳追跡結果
(眼鏡のフレームの影響で追跡が失敗した例)

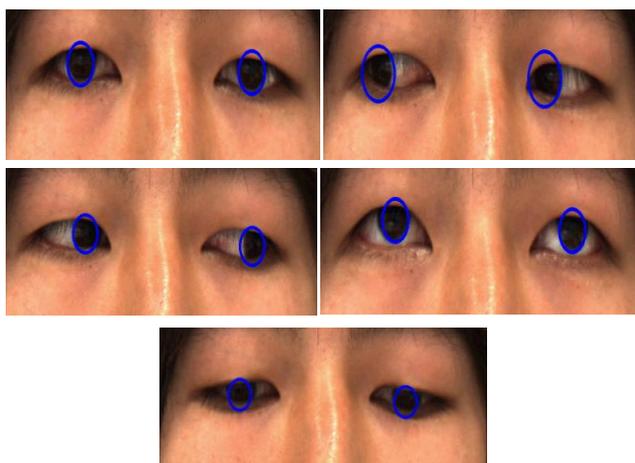


図 12 まぶたの開き具合が小さめの人物の両瞳追跡結果

5. まとめ

本論文では、目の個性に対応できる可変扇形分離度フィルタを提案した。また、可変扇形分離度フィルタで計算された分離度を Particle Filter の仮説を評価する尤度関数として利用する瞳追跡アルゴリズムを提案した。比較実験より、従来の円形分離度フィルタよりも提案手法の方が安定かつ高速に計算できることが確認できた。また、分離度の計算角度が個人に適応した形で求めることができるので、様々な人の瞳でも比較的安定に追跡を行えることが確認できた。

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(c) 24500205 の補助を受けている。

参考文献

- [1] 山添丈夫, 内海章, 米澤朋子, 安部伸治: "単眼カメラを用いた視線推定のための三次元眼球モデルの自動キャリブレーション", 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-D No.6, pp.998-1006, 2011
- [2] 小野泰弘, 岡部孝弘, 佐藤洋一: "低解像度画像からの視線方向推定 カーネル多重線形モデルによる個人差への対応", 電子情報通信学会論文誌, J90-D(8), pp2212-2222, 2007

- [3] 中松由香梨, 滝口哲也, 有木康雄: "3DActive Appearance Model を利用した視線方向推定", MIRU, pp572-579, 2011
- [4] 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", 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, 107(491), pp137-142, 2008
- [5] 坂下祐輔, 藤吉弘亘, 平田豊, 高丸尚教, 深谷直樹: "高速楕円検出に基づく眼球回旋運動の計測", 第12回画像センシングシンポジウム SSII06, pp558-563, 2006
- [6] 北川洋介, 加藤丈和, 呉海元, 和田俊和, "アイモデルを用いた視線推定のための黒目追跡", MIRU, pp.1343-1350, 2005
- [7] 大谷悠祐, 福井和広: "眼球の位置と姿勢を考慮した顔向き変化に頑健な瞳追跡", 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU 109(344), pp13-18, 2009-12-10)
- [8] 小林貴訓, 杉村大輔, 平澤宏祐, 鈴木直彦, 鹿毛裕史, 佐藤洋一, 杉本晃宏: "パーティクルフィルタとカスケード型識別器の統合による人物三次元追跡", 電子情報通信学会論文誌, J90-D(8), p2049-2059, 2007
- [9] 賀谷晃太, 安藤博士, 岩田穆: "類似特徴を有した異種物体認識のためのブーステッド・カスケード学習アルゴリズム", 電子情報通信学会技術研究報告. NC, ニューロコンピュータィング 107(542), 489-494, 2008-03-05
- [10] 加藤丈和: "パーティクルフィルタとその実装法(チュートリアル)", 情報処理学会研究報告. CVIM, pp161-168, 2007