顔特徴点追跡による単眼視線推定

Gaze Estimation with a Single Camera Using Facial Feature Tracking

正会員 山添大丈[†], 内海 章[†], 安部伸治[†]Hirotake Yamazoe[†], Akira Utsumi[†] and Shinji Abe[†]

Abstract We propose a real-time gaze estimation method based on facial-feature tracking using a single video camera. In our method, gaze directions are determined as 3D vectors connecting both the eyeball and iris centers. Since the center of eyeball cannot be directly observed from images, the geometrical relationship between the eyeball centers and the facial features and the radius of the eyeball (face model) are calculated in advance (calibration process). The 2D positions of the eyeball centers can be estimated by using the face model and facial feature positions. Gaze direction can then be determined by tracking the facial features. In the calibration process, we employ an image sequence (more than three frames) where a subject moves his/her head while keeping his/her gaze on the camera location. In such a situation, since the camera, iris centers and eyeball centers lie in a straight line, the eyeball centers can be observed as the position of the iris-center. Using data from these observations enables us to easily obtain the relations between the eyeball centers and facial features. Experimental results show that the gaze estimation accuracy of the proposed method is 4° horizontally and 7° vertically.

キーワード：視線推定, 視線インタフェース, 虹彩, 眼球

1. ま え が き

視線情報には、コンピュータインタフェースとしての利用やユーザの意図検出など、多くの応用が考えられるため、これまでにさまざまな視線推定手法が提案されている。

視線推定手法としては、近赤外の点光源(LED)により目を照明し、角膜で反射された光源像(プルキニエ像)と瞳孔の位置から視線方向を推定する瞳孔角膜反射法が一般的であった¹⁾²⁾。これらの手法では、推定誤差が1度程度と比較的高精度な結果が得られる。一方で、赤外光源によって目領域を照明する必要があるため、視線の検出可能範囲がカメラ(赤外照明)の近傍に限られるといった問題や、プルキニエ像を検出するために目領域の高解像度画像を必要とするという問題がある。また、カメラに加えて赤外照明が必要なため、装置構成が複雑になるという問題もある。

これに対し、ビデオカメラのみを用いて通常の画像から視線を推定する手法が近年提案されている^{3)~12)}。これらの視線推定手法は、アピアランスベースとモデルベースの大きく2種類に分けることができる。

アピアランスベースの手法は、目周辺の画像を入力とし、ニューラルネットワークや最近傍探索といったパターン認

識手法を利用することで、視線方向を推定することを目指した手法である^{3)~5)}。これらの手法では、ユーザの違いや頭部の姿勢変化、目領域の切り出し誤差などによって視線推定結果が大きく影響を受けるという問題があり、視線推定に大量の学習データを必要とするという問題もある。

モデルベースの手法は、3次元の眼球モデルを用いて視線方向を推定するもので、さらに二つに分類することができる。一つは、“one-circle (two-circle)” アルゴリズムであり、観測された虹彩領域に対し、楕円を当てはめ、その楕円パラメータから視線方向を推定するものである⁶⁾⁷⁾。これらの楕円当てはめを利用した手法では、虹彩の形状から直接視線方向を検出できるため、事前のキャリブレーションが必要ないという利点がある。しかし、正確に楕円を当てはめるためには高解像度の目領域画像が必要である、ユーザがカメラに近い方向を見ている場合には、虹彩がほぼ円として観測されるため楕円当てはめ精度が低下し、視線推定精度が低下する、といった問題がある。

もう一つのモデルベースの手法は、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するものである^{8)~12)}。眼球中心位置や眼球半径といったパラメータは、画像から直接観測することはできないため、顔に貼付した人為的なマーカや目・鼻・口などの自然特徴などの顔面上の特徴点と眼球中心との相対関係をあらかじめモデル化しておくことで、顔特徴点を追跡することにより間接的に眼球中心を推定し、視線方向を推定しており、3~5度程度の

2007年5月2日受付, 2007年7月20日再受付, 2007年8月22日採録
†ATR 知能ロボティクス研究所

(〒619-0288 「けいはんな学研都市」 光台 2-2-2, TEL 0774-95-1405)

†ATR Intelligent Robotics & Communication Laboratories
(2-2-2, Hikaridai, Keihanna Science City, Kyoto 619-0288, Japan)

推定精度が得られている。

Matsumoto ら⁸⁾や Pogalin ら¹¹⁾ はあらかじめ顔特徴点(目頭・目尻)と眼球中心の関係を求めておき、ステレオカメラにより顔特徴を追跡することで、視線方向を推定する手法を提案している。しかし、これらの手法ではステレオカメラを用いており、事前にカメラ間のキャリブレーションが必要なためカメラの観測範囲の変更が容易ではないという問題がある。

Ishikawa らは、8),11)と同様に目頭・目尻と眼球中心の関係を利用し、Active Appearance Model(AAM)により顔特徴を追跡することで、単眼による視線推定手法を提案している¹⁰⁾。しかし、眼球中心の推定に、頭部姿勢・視線方向が既知の複数枚の画像列を必要とするため、キャリブレーションにかかる手間が大きいという問題がある。

これに対し、我々は顔に装着した四つの参照点を利用した視線推定手法を提案した¹²⁾。四つの参照点は原理的には同一平面上でなければ位置的な制限はなく、四つの参照点から眼球中心を推定し、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する。この手法では、ユーザがカメラを注視したときにはカメラと虹彩中心、眼球中心が一直線上に並ぶという性質を利用し、眼球中心の投影位置を虹彩中心として観測することにより、ユーザがカメラを注視しながら頭部姿勢を任意に変化させるだけで、眼球中心を推定することが可能となっている。

本論文では、手法12)を拡張し、マーカを顔に装着する代わりに顔の特徴点を追跡することにより、視線方向を推定する手法を提案する。

次章では、提案手法における視線推定の原理と提案手法の処理の流れについて簡単に述べる。3章では提案する視線推定手法について説明し、4章で実画像を用いた実験により提案手法の有効性を示す。5章で本論文をまとめる。

2. 提案手法の概要

2.1 視線推定の原理

提案手法では、視線方向は眼球中心と虹彩中心を結ぶ3次元ベクトルとして検出できるとする(図1)。画像上の眼球中心位置を $x_c = [x_c, y_c]$ 、虹彩中心位置を $x_{iris} = [x_{iris}, y_{iris}]$ 、画像上での眼球投影半径を r とする。視線方向(カメラ光軸とのかす角)のカメラ座標系 x 軸方向成分 α_i と y 軸方向成分 β_i は次式で求められる。

$$\begin{aligned}\alpha_i &= \sin^{-1} \left(\frac{x_{iris}^{(i)} - x_c^{(i)}}{r^{(i)}} \right), \\ \beta_i &= \sin^{-1} \left(\frac{y_{iris}^{(i)} - y_c^{(i)}}{r^{(i)}} \right).\end{aligned}\quad (1)$$

一方で、眼球半径は解剖学的なパラメータより推定可能であり、虹彩中心は画像から観測可能であるが、眼球中心位置は、画像から直接求めることはできない。

ここで、ユーザがカメラを注視した場合について考える

図1 視線推定の原理
Gaze estimation model.

図2 視線推定の原理 (キャリブレーション時)
Gaze estimation model (calibration process).

と、図2に示すとおり、カメラ、虹彩中心、眼球中心の3点が1直線上に並ぶため、画像上では虹彩中心と眼球中心は同一点に投影されることがわかる。

そこで提案手法では、ユーザがカメラを注視しながら顔の姿勢を変化させている画像列を撮影し、これらの画像列から顔特徴点を抽出・追跡するとともに、眼球中心位置として虹彩中心を抽出することで、眼球中心と顔特徴点間の相対幾何関係を推定することを考える。

2.2 提案手法の処理の流れ

図3に提案手法による処理の流れを示す。本システムの処理は単眼カメラをベースとしており、顔位置の検出が可能で光学的に十分なズーム比が得られれば観測距離の制約を受けない。図3に提案手法の処理の流れを示す。提案手法は顔検出・顔特徴追跡処理、顔モデル推定処理(キャリブレーション)、視線推定処理の三つの処理からなる。

顔検出・顔特徴追跡処理では、3次元モデル生成や視線推定で用いる顔特徴の抽出・追跡を行う。まず6分割矩形フィルタ(Six-Segmented Rectangular(SSR) Filter)を用いた顔検出処理¹³⁾により、画像上の顔位置を決定する。次に目・鼻・口などの位置関係を用いて顔特徴点を抽出・追跡する。特徴点の抽出・追跡には、Lucas-Kanadeの特徴点を用いた¹⁴⁾。

顔モデル推定処理では、顔特徴点と眼球中心の相対幾何関係を求めるため、ユーザがカメラを注視しながら頭部姿勢を任意に変化させた画像列を撮影し、顔特徴の抽出・追跡を行うとともに、両目の虹彩中心を抽出する。得られた顔特徴点列と虹彩中心位置をもとに因子分解法¹⁵⁾を用いて、顔特徴点と眼球中心の3次元位置(顔モデル)を算出する。

図 3 提案手法の処理の流れ
Process flow of the proposed method.

視線推定処理では、まず新規の入力画像列に対して顔特徴および虹彩中心位置の追跡・検出を行う。次に顔特徴点の観測位置をもとに顔の 3 次元モデルを用いて眼球中心の投影位置を推定する。虹彩中心位置および眼球中心投影位置から (1) 式により視線方向を決定する。

3. 顔特徴の追跡による視線推定

3.1 顔特徴点の抽出・追跡

本節では、目、鼻などの顔特徴点を抽出し、追跡する手法について述べる。

まず 6 分割矩形 (SSR) フィルタとサポートベクタマシン (SVM) による顔検出手法¹³⁾を用いて、画像中の顔位置を検出する。SSR フィルタ (図 4) では、目および目周辺領域は顔の他領域に比べて輝度値が低いことを利用し、次式を満たす点を顔候補として抽出する。

$$\bar{S}_1 < \bar{S}_2 \quad \text{and} \quad \bar{S}_1 < \bar{S}_4, \quad (2)$$

$$\bar{S}_3 < \bar{S}_2 \quad \text{and} \quad \bar{S}_3 < \bar{S}_6. \quad (3)$$

ここで $\bar{S}_i$ は領域 S_i 内の平均輝度値。

次に得られた顔候補に対して、サポートベクタマシン (SVM) による顔モデルによる検証処理を適用し顔領域を決定する。髪型の違いや髭の有無、表情変化による認識率の低下を避けるため、手法 13) では眉間を中心とした画像領域を利用して SVM によるモデル化を行っている。

次に、目・鼻・口など顔特徴の位置関係を考慮しながら、顔検出結果をもとに各顔特徴のおおまかな位置を決定する。さらにそれらの位置の周辺領域に対して、Lucas-Kanade の特徴点¹⁴⁾を検出し、顔特徴点を抽出する (図 5)。ここで、 M 点の顔特徴点 $p_j (j = 1, \dots, M)$ を抽出することとし、画像 I_i 上での各顔特徴点列 p_j の 2 次元位置を $\mathbf{x}_j^{(i)}$ 、重心を

図 4 6 分割矩形 (SSR) フィルタ
Six-segmented rectangular (SSR) filter.

図 5 顔特徴点抽出の例
(白枠は顔特徴の探索範囲, × 印が抽出された顔特徴点)

Example of face detection.

(Box: searching area of facial features, ×: detected facial features.)

図 6 目周辺領域のラベリング例
(白: 虹彩, 灰: 白目, 黒: 肌)

Eye-region segmentation.

(white: iris, gray: sclera, black: skin)

図 7 虹彩中心推定の例
Iris center detection.

$$\bar{\mathbf{x}}^{(i)} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \mathbf{x}_j^{(i)} \quad \text{で表す。}$$

3.2 虹彩中心の推定

ここでは、虹彩中心位置を推定する手法について説明する。ここで述べる処理は、キャリブレーション時・視線推定時の両方で利用する。

まず前節の処理で得られた目周辺領域に対して、輝度・色情報をもとに虹彩、白目、肌領域の 3 領域にラベリングを行う。図 6 にラベリング結果の例を示す。次に、得られた各領域のうち、虹彩と白目の境界部分に着目し、ハフ変換により円を当てはめ、得られた円の中心を虹彩中心位置として決定する。図 7 に虹彩中心推定の例を示す。

3.3 顔モデル・眼球半径の推定

次に、視線推定の前処理である顔モデルと眼球半径の推定処理について述べる。ここで述べる処理は、キャリブレーション時に一度だけ実行される。

まず、キャリブレーション用の画像列として、前述のとおりにユーザがカメラを注視しながら、顔の姿勢を変化させている画像列を撮影する。ここで、 $N (N \geq 3)$ 枚の画像列 I_i が得られたとする ($i = 1, \dots, N$)。

次に、この画像から M 点の顔特徴点 p_j を抽出・追跡する。同時に、左右両目の虹彩中心位置を抽出し、それぞれ $\mathbf{x}_{irisL}^{(i)}$, $\mathbf{x}_{irisR}^{(i)}$ とすると、

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1^{(1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(1)} & \dots & \mathbf{x}_M^{(1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(1)} \\ \vdots & & \vdots \\ \mathbf{x}_1^{(N)} - \bar{\mathbf{x}}^{(N)} & \dots & \mathbf{x}_M^{(N)} - \bar{\mathbf{x}}^{(N)} \\ \mathbf{x}_{irisL}^{(1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(1)} & \mathbf{x}_{irisR}^{(1)} - \bar{\mathbf{x}}^{(1)} \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{x}_{irisL}^{(N)} - \bar{\mathbf{x}}^{(N)} & \mathbf{x}_{irisR}^{(N)} - \bar{\mathbf{x}}^{(N)} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

で表される行列 $\mathbf{W}$ は、因子分解法により次式のとおりに分解できる¹⁵⁾。

図 8 眼球モデル
Eyemodel.

$$\begin{aligned} W &= MS \\ &= \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 & \cdots & X_M & X_{cL} & X_{cR} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 M は姿勢変化に関する行列、 Q_i は 2×3 の行列。 S は顔モデル (顔特徴点・眼球中心の 3 次元位置) であり、 X_j は顔モデル座標系 C_X における各顔特徴点の 3 次元位置、 X_{cL}, X_{cR} は眼球中心の 3 次元位置である (図 8)。

以上で求められた顔モデル S (顔特徴点の 3 次元位置 X_j と眼球中心位置 X_{cL}, X_{cR}) を用いることで、新規に得られた画像 I_t において眼球中心位置は以下のように計算できる。

I_t における顔特徴点が $x_1^{(t)}, \dots, x_M^{(t)}$ の位置にそれぞれ観測されたとする。(4),(5) 式より、顔特徴点の観測位置 $x_j^{(t)}$ と 3 次元位置 X_j の関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} x_j^{(t)} &= Q_t X_j + \bar{x}^{(t)} \\ &= P_t \begin{bmatrix} X_j \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし $P_t = \begin{bmatrix} Q_t & \bar{x}_t \end{bmatrix}$ 。ここで、行列 Q_i は弱透視変換における投影行列とみなせるため、QR 分解により以下のように計算できる¹⁶⁾。

$$Q_t = A_t \cdot R_t^{(2 \times 3)} \quad (7)$$

ただし $R_t^{(2 \times 3)}$ は姿勢情報を含む 2×3 の行列。 A_t はカメラの内部パラメータであり、

$$A_t = k_t \begin{bmatrix} \xi & 0 \\ s & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

k_t はスケールファクタ。理想的には $\xi = 1, s = 0$ 。ここで、行列 P_t は 4 点以上の顔特徴点 $x_{i_1}^{(t)}, \dots, x_{i_s}^{(t)}$ ($s \leq 4$) が観測されれば、以下のとおり計算できる。

$$B = \begin{bmatrix} X_{i_1}^{(t)} & Y_{i_1}^{(t)} & Z_{i_1}^{(t)} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{i_1}^{(t)} & Y_{i_1}^{(t)} & Z_{i_1}^{(t)} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{i_s}^{(t)} & Y_{i_s}^{(t)} & Z_{i_s}^{(t)} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_{i_s}^{(t)} & Y_{i_s}^{(t)} & Z_{i_s}^{(t)} & 1 \end{bmatrix}.$$

$$C = \begin{bmatrix} x_{i_1}^{(t)} & y_{i_1}^{(t)} & \cdots & x_{i_s}^{(t)} & y_{i_s}^{(t)} \end{bmatrix}'. \quad (9)$$

$$p = (B' B)^{-1} C, \quad (10)$$

$$P_t = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

ただし、 $p = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \end{bmatrix}'$ 、 $X_i = \begin{bmatrix} X_i & Y_i & Z_i \end{bmatrix}'$ 、 $x_i = \begin{bmatrix} x_i & y_i \end{bmatrix}'$ 。ここで $'$ は行列の転置を表す。

よって、画像 I_t における両目の眼球中心位置 $x_{cL}^{(t)}, x_{cR}^{(t)}$ は (6) 式より以下のとおり計算できる。

$$\begin{aligned} x_{cL}^{(t)} &= P_t \begin{bmatrix} X_{cL} \\ 1 \end{bmatrix}, \\ x_{cR}^{(t)} &= P_t \begin{bmatrix} X_{cR} \\ 1 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (12)$$

3.4 視線推定

新たに観測される入力画像について、前節までで得られた顔モデルと眼球半径を利用して、視線方向を推定する。

時刻 t における画像 I_t に対し、まず顔特徴点の追跡と虹彩中心位置の抽出を行い、顔特徴点が $x_1^{(t)}, \dots, x_M^{(t)}$ 、虹彩中心が $x_{irisL}^{(t)}, x_{irisR}^{(t)}$ の位置にそれぞれ観測されたとする。

4 点以上の顔特徴点が観測されると、(12) 式により眼球中心の投影位置 $x_{cL}^{(t)}, x_{cR}^{(t)}$ を計算できるので、視線方向のカメラ座標系 x 軸方向成分 α_t 、 y 軸方向成分 β_t は次式により計算できる。

$$\begin{aligned} \alpha_t &= \sin^{-1} \left(\frac{x_{iris}^{(t)} - x_c^{(t)}}{r^{(t)}} \right) \\ \beta_t &= \sin^{-1} \left(\frac{y_{iris}^{(t)} - y_c^{(t)}}{r^{(t)}} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

ここで、現在の実装では眼球半径 $r^{(i)}$ については、眼球半径と眼間距離の解剖学的なモデルをもとに求めたパラメータを用いた。ただし、各ユーザにあわせた眼球半径を推定する場合には、方向既知の参照点を注視させた各ユーザの画像列を撮影し、これら画像列を用いてキャリブレーションを行う必要がある。

4. 実験

提案手法の有効性を確認するため、以下の実験を行った。実験環境の様子を図 9 に示す。Panasonic 社製 DV カメラ NV-GS200K を被験者の正面 220[cm] の位置に設置し、320 × 240 の解像度で被験者の顔画像を撮影した。撮影画像上の目領域の大きさは約 30 × 15[pixel]、虹彩半径は約 6[pixel] である。視線推定の精度を評価するために、被験者正面の距離 240[cm] の壁面上に 28 個のマーカーを図 10 に示すように設置した。

5 名の被験者 (眼鏡なしの男性 3 名 (被験者 1-3)、女性 1

名(被験者 4), 眼鏡ありの男性 1 名(被験者 5)) について, 提案手法により視線を推定し, その精度を評価した. 実験では, まず 50 枚の画像列を撮影し, 各被験者の顔モデルを推定した. 推定に要した時間は約 3 秒である. 図 11 に顔モデル推定に用いた画像列の例を示す.

顔モデル推定後, 各被験者にはマーカーをそれぞれ 5 秒ずつ順に注視するように指示し, 視線推定処理を行った. 視線推定時の処理速度は, 約 10 フレーム/秒である. 図 12 斜線領域に示すように, 各マーカーごとのデータの中央部分 30 フレーム分の推定値を利用し, 各方向に対する視線推定誤差を測定した. 表 1 に各被験者における視線推定誤差を示す. 結果より, 水平方向は約 4 度, 垂直方向は約 7 度の推定精度が得られていることわかる(実験環境のマーカー平面において, 5 度は約 20cm に相当). 眼鏡をかけている被験者 5 についても, 他の被験者と同様の推定精度が得られており, 眼鏡の枠などにより虹彩が隠蔽されなければ, 提案手法による視線推定が可能であることがわかる.

次に, 注視方向による視線推定精度の変化を確認するた

図 9 実験環境
Experimental environment.

図 10 マーカー配置
Marker arrangement.

図 11 キャリブレーション画像列の例
Examples of calibration image sequences.

図 12 視線推定結果と誤差評価データ
Gaze estimation results and error evaluation.

表 1 視線推定誤差 (平均)
Average of the estimation errors

	Horizontal[deg]	Vertical [deg]
Subject 1	5.59	8.68
Subject 2	2.26	7.31
Subject 3	4.78	9.73
Subject 4	5.50	6.49
Subject 5	3.65	5.55
Average	4.36	7.55

図 13 各マーカー (α, β) に関する視線推定誤差 (水平方向)
Estimation Error at each marker (horizontal errors).

図 14 各マーカー (α, β) に関する視線推定誤差 (垂直方向)
Estimation Error at each marker (vertical errors).

め, 各マーカー (α, β) に関する視線推定誤差 (水平・垂直方向) の全被験者の平均を図 13, 14 に示す. 図 13 より, 注視方向の違いによって水平方向の視線推定精度には, 特に変化がないことがわかる. 一方で図 14 より, 垂直方向に関しては, 注視方向の角度 (β の絶対値) が大きくなるに伴い, 推定誤差が大きくなっていることがわかる. これは, β 方向に視線を変化させた場合には, まぶたによって隠蔽される虹彩領域が広くなり, 虹彩中心の推定精度が悪化したためと考えられる.

最後に, 図 15 にすべての被験者の視線推定結果画像の例を示す. 以上の結果より, 提案手法を用いることで, さまざまなユーザについて頭部姿勢の変化する場合でも視線推定が可能であることが示された.

図 15 視線推定結果
(左から $(\alpha, \beta) = (-20^\circ, -20^\circ), (0^\circ, -10^\circ), (20^\circ, -20^\circ)$)
Experimental results.
(from left, $(\alpha, \beta) = (-20^\circ, -20^\circ), (0^\circ, -10^\circ), (20^\circ, -20^\circ)$).

5. む す び

本論文では、単眼カメラの観測に基づいて顔特徴点を検出・追跡することにより視線方向を推定する手法を提案した。提案手法では、まずキャリブレーションとして視線がカメラ方向を向いたまま顔の向きのみが異なる画像列から得られる虹彩位置と顔特徴点を利用することで、眼球中心と顔特徴点の関係をモデル化し、その後、その関係に基づいて推定された入力画像中の眼球中心位置と虹彩位置の関係から視線方向を決定している。提案手法は単眼カメラによる観測画像から視線方向を推定し、赤外照明を必要としないため、光学的に十分なズーム比を得ることができれば、観測距離の制約を受けずに視線推定が可能である。これにより従来の視線推定装置では実現が難しかった遠方・広範囲における視線推定が可能になる。

今後は、顔特徴点追跡処理や虹彩抽出処理の高精度化により視線推定の精度向上を図るとともに、複数のカメラやパンチルトカメラを利用した広範囲における視線推定についても検討を進める予定である。

本研究は、情報通信研究機構 (NICT) の研究委託により実施したものである。

【文 献】

- 1) T. Ohno, N. Mukawa, and S. Kawato. Just blink your eyes: A head-free gaze tracking system. In *Proc. CHI2003*, pp. 950–951 (2003)
- 2) C. H. Morimoto and M. R. M. Minica. Eye gaze tracking techniques for interactive applications. *Computer Vision and Image Understanding*, **98**, 1, pp. 4–24 (2005)
- 3) B. Shiele and A. Waibel. Gaze tracking based on facecolor. In *Proc. Int'l Workshop on Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 344–349, (1995)
- 4) 小野泰弘, 岡部孝弘, 佐藤洋一. 目領域の切り出しの不定性を考慮した低解像度画像からの視線方向推定. *情処論*, **47**, SIG 10(CVIM 15), pp. 173–184 (2006)
- 5) L. P. Morency, C.M. Chrrioudias, and T. Darrell. Recognizing gaze aversion gestures in embodied conversational discourse. In *Proc. ICM'06*, pp. 287–294 (2006)
- 6) J.G. Wang, E. Sung, and R. Venkateswarlu. Estimating the eye gaze from one eye. *Computer Vision and Image Understanding*, **98**, 1, pp. 83–103 (2004)
- 7) 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. *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005)*, pp. 1343–1350 (2005)
- 8) Y. Matsumoto and A. Zelinsky. An algorithm for real-time stereo vision implementation of head pose and gaze direction measurement. In *Proc. Int. Conf. Automatic Face and Gesture Recognition*, pp. 499–504 (2000)
- 9) T. Miyake, S. Haruta, and S. Horiata. Image based eye-gaze estimation irrespective of head direction. In *Proc. IEEE Int. Symp. Industrial Electronics*, **1**, pp. 332–336 (2002)
- 10) T. Ishikawa, S. Baker, I. Matthews, and T. Kanade. Passive driver gaze tracking with active appearance models. In *Proc. 11th World Congress on Intelligent Transportation Systems* (2004)
- 11) E. Pogalin, A. Redert, I. Patras, and E.A. Hendriks. Gaze tracking by using factorized likelihoods particle filtering and stereo vision. In *Proc. 3DPVT'06*, pp. 57–64 (2006)
- 12) S. Kawato, A. Utsumi, and S. Abe. Gaze direction estimation with a single camera based on four reference points and three calibration images. In *Proc. ACCV2006 (I)*, pp. 419–428 (2005)
- 13) S. Kawato, N. Tetsutani, and K. Hosaka. Scale-adaptive face detection and tracking in real time with ssr filters and support vector machine. *IEICE Trans. on Info. and Sys.*, **E88-D**, 12, pp. 2857–2863 (2005)
- 14) B.D. Lucas and T. Kanade. An iterative image registration technique with an application to stereo vision. In *Proc. Int'l Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 674–679 (1981)
- 15) C. Poelman and T. Kanade. A paraperspective factorization method for shape and motion recovery. Technical Report 92-208, CMU-CS (1992)
- 16) Long Quan. Self-calibration of an affine camera from multiple views. *Int'l Journal of Computer Vision*, **19**, pp. 93–105 (1996)

やまざき ひろあき
山添 大丈 2000 年, 大阪大学基礎工学部システム工学科卒業. 2002 年, 大阪大学基礎工学研究科修士課程修了. 2005 年, 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了. 2005 年 4 月, ATR メディア情報科学研究所専任研究員. 2006 年 4 月より, ATR 知能ロボティクス研究所専任研究員. 博士 (工学). 正会員.

うちい ありあ
内海 章 1991 年, 大阪府立大学工学部金属工学科卒業. 1993 年, 大阪大学基礎工学研究科情報工学修士課程修了. 同年, ATR 通信システム研究所に入社. 画像処理, ヒューマンインタフェースの研究に従事. 現在, ATR 知能ロボティクス研究所ならびに ATR メディア情報科学研究所主任研究員. 博士 (工学).

あべ しんじ
安部 伸治 1984 年 北海道大学工学部原子工学科卒業. 1986 年 同大学院工学研究科修士課程修了. 同年日本電信電話 (株) 入社. ヒューマンインタフェース研究所・サイバーソリューション研究所にて, 画像・映像ハンドリングなどに関する研究に従事. 現在 ATR 知能ロボティクス研究所にて認知症介護支援システムに関する研究に従事.