第15回画像センシングシンポジウム，横浜，2009年6月

自由空間における注視点の3次元位置を取得するInside-Outカメラの提案

Proposal of Inside-Out Camera for Measuring 3D Gaze Position in Free Space

西尾 和晃† 木村 誠‡ 藤吉 弘亘† 平田 豊†
Kazuaki NISHIO†, Makoto KIMURA‡,Hironobu FUJIYOSHI†,Yutaka HIRATA†
†中部大学 ‡産業技術総合研究所 デジタルヒューマン研究センター
†Chubu University, ‡AIST Digital Human Research Center
E-mail: xeno@vision.cs.chubu.ac.jp,hf@cs.chubu.ac.jp

Abstract

従来の視線計測装置は，視界を撮影するカメラが眼球と異なる位置に設置してあるため，実際の視点と同じ映像を撮影することができない．そのため，対象を既知の平面に限定するなど，注視位置に関する拘束条件を設けたシステムが主流である．本稿では，両眼の視界に近い映像を撮影することができるゴーグル型視線計測装置Inside-Outカメラとそれを用いた注視点の3次元位置推定法について提案する．Inside-Outカメラは，両眼を撮影するEyeカメラ2台とそれぞれの視界を撮影するSceneカメラ2台の計4台のカメラで構成されている．Eyeカメラは，ハーフミラーを介して，左右の眼球映像を取得することができる．Sceneカメラは，光学的に眼球とほぼ同じ位置から撮影している状態を作り出し，両眼の視界に近いステレオ映像を取得することが可能である．Eyeカメラにより撮影した眼球画像から，瞳孔中心と眼球回転中心を結ぶことにより，3次元視線ベクトルを推定する．推定した視線ベクトルを座標変換することで，Sceneカメラの座標系における3次元視線ベクトルを算出する．ここで，理想的には両眼の視線ベクトルの交点として注視点の3次元位置が取得可能である．しかし，実際には視線ベクトルの推定誤差により，両眼の視線が3次元空間で交差せず，注視点の3次元位置が取得できないという問題が発生する．そこで，本稿ではSceneカメラの画像平面と視線の交点を算出することで画像中の注視点を求め，両眼それぞれの注視点をSceneカメラ画像中で最適補正することで，注視点の3次元位置を高精度に取得する．評価実験の結果，本システムの有効性を確認した．

1 はじめに

人は，眼球を通して視界から取得した情報を瞬時に処理し，理解することができる．そのため，人の巧妙な視覚メカニズムを解析することにより行動理解技術への利用が期待できる．ここで，視界内において注意を引く対象を注視する傾向が存在するため，注視位置を取得することができれば，視覚メカニズムの解析を行う上で有効な技術となる．また，同一人物が同一物体を識別する際には，同一の注視経路 (Scan Path) を辿る [1] ことが報告されており，注視経路を取得することで，一般物体認識分野への応用も期待できる．さらに，医療，心理学，ヒューマンインタフェースなどの分野において利用が期待でき，ドライバーの運転状態の検知 [2] 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 [3] などにも応用が期待されている．

従来の視線計測装置として，NAC社のアイマークレコーダー [4] が挙げられ，計測時にコンピュータを必要とせず，装置のキャリブレーションが短時間で簡単に行えるため，スポーツ選手の視線解析などに用いられている．しかし，眼球から数cm程離れた場所に設置したカメラで視界を撮影しているため，実際の人の視界とは異なる映像しか取得できない．特に，顔からの距離が近い対象の注視点を推定する場合，視界とカメラ映像の差は大きくなる．そこで，人間の視界と視差の無い映像を得るようなシステムが必要とされている．本稿では，両眼の視界とほぼ同等の映像を撮影することができるゴーグル型視線計測装置Inside-Outカメラとそれを用いた注視点の3次元位置を取得する方法を提案する．

また，注視位置を取得するために視線同士の交点を直接的に求めると，視線ベクトルの推定誤差から視線同士が交差しない問題が発生する．そこで，提案手法では，まず両眼の注視点の画像座標を求め，それら視線同士が交差するように補正をかけてから注視点の3次元位置を取得する．本稿は6つの章から構成されている．2章では装置の概要について述べる．3章ではEyeカメラから取得した画像から3次元視線ベクトルを推定する方法について述べ，4章では，3章で3次元視線ベクトルをSceneカメラ座標系に変換し，注視点の3

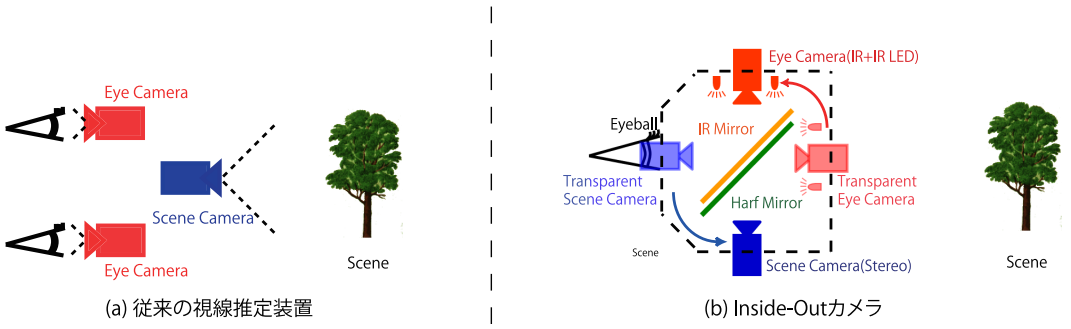


図 1　従来の視線推定装置との比較

次元位置を推定する方法について述べ，5 章では本稿の有効性を示すために実験を行った結果を述べ，6 章でまとめる．

2 Inside-Out カメラ

提案する Inside-Out カメラの概要について述べる．

2.1 従来の視線計測装置の問題点

従来の視線計測装置は，図 1(a) に示すように，視界を撮影する Scene カメラが眼球とは異なる位置に設置されているため，実際の人間の視界と撮影される映像に視差が存在する．複数カメラのステレオ法と同様，被写物体までの距離が短い近距離映像になると，人間の視界とカメラ映像の視差は増大する．そのため，従来は対象を既知の平面に限定するなどの拘束条件を用いることが一般的であった．

2.2 装置構成

我々の提案する Inside-Out カメラは，図 2 に示すように，上部に眼球を撮影する Eye カメラ 2 台と，下部に視界を撮影する Scene カメラ 2 台で構成されたゴーグル型の視線計測装置である．寸法は $W160 \times H80 \times D100$mm であり，重量は約 200g である．材質は木を使用しており，カメラが発する熱を被験者に伝えにくいため，長時間の計測が可能である．図 1(b) に示すように，Inside-Out カメラはあたかも透明なカメラが存在するような光学配置を実現している．その詳細は以降で述べる．

2.3 Eye カメラ

Eye カメラは，赤外反射ミラー，左右の眼球を撮影する 2 台の赤外カメラとカメラの周りに 6 個ずつ配置された赤外 LED で構成されている．赤外カメラは赤外反射ミラーを介して，人物の眼球を目の前から撮影した近赤外画像を 640 × 480pixel の解像度で取得する．Eye カメラより取得した画像を図 3(a) に示す．LED はカメラの周囲に配置されており 750nm〜900nm の近赤外光を発する．赤外光は不可視光のため，視覚刺激を与えること無く眼球を撮影することが可能である．

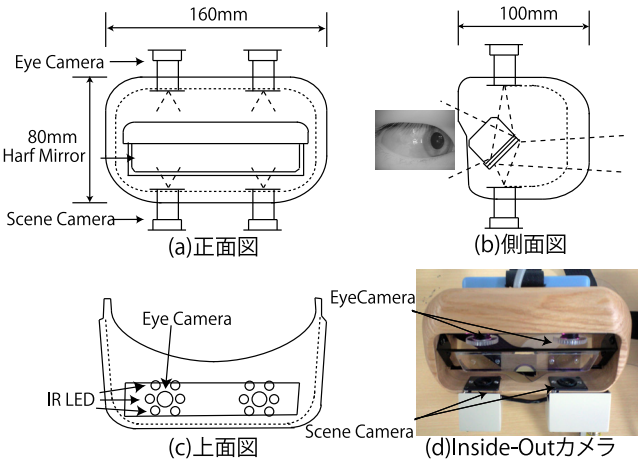


図 2　**Inside-Out** カメラの機構

2.4 Scene カメラ

Scene カメラは左右の視界を撮影する小型 CCD カメラ 2 台と 50% ハーフミラーで構成されている，CCD カメラの画角は約 80 度，焦点距離は約 4mm である．50% ハーフミラーは入射光の 50%を反射し，残りを通過させる性質を持つ鏡である．ハーフミラーを介すことで，透明なカメラで光学的に人物視点とほぼ同一の位置からの映像を撮影することができる．また，ステレオカメラであるため，視界内の 3 次元位置を推定することが可能である．Scene カメラから得られる映像を図 3(b) に示す．

2.5 注視点の 3 次元位置取得

注視点の 3 次元位置取得の流れを図 4 に示す．注視位置を取得するために視線同士の交点を直接的に求めようと試みると，3 次元視線ベクトルの推定誤差から視線同士が交差しない問題が発生する．そこで，Scene カメラと眼球位置が同一となる Inside-Out カメラの構造から，Scene カメラの画像平面と視線ベクトルの交点として，画像上の注視点を求める．その後，最適補正 [5] により 2 次元画像上の注視点を左右の視線が交差するように補正を行い，それら Scene カメラ画像中の視点位置を対応点とみなしたステレオ法として，注視点

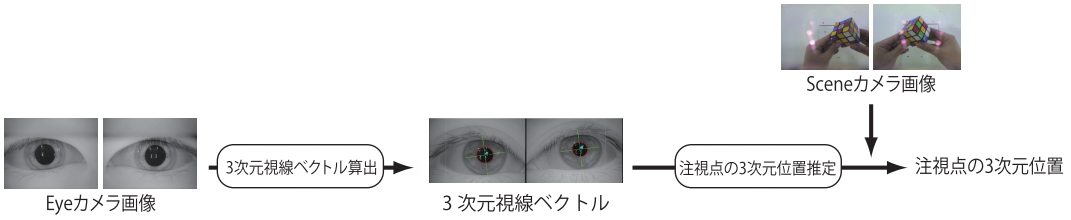


図 **4**　提案手法の流れ (注視点の **3** 次元位置取得)

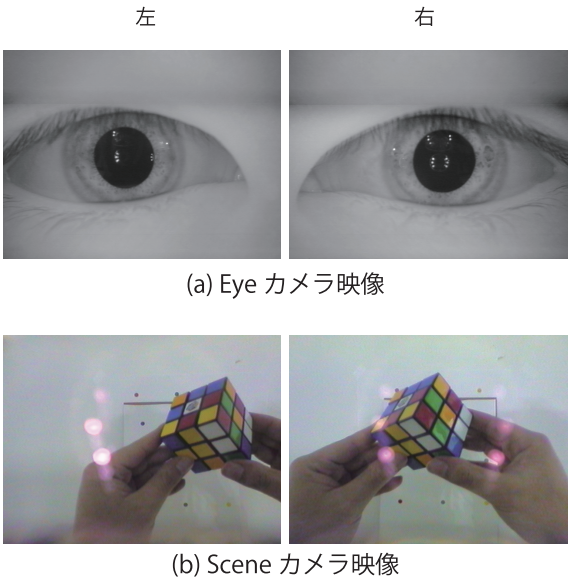


図 **3**　**Inside-Out** カメラにより得られる映像

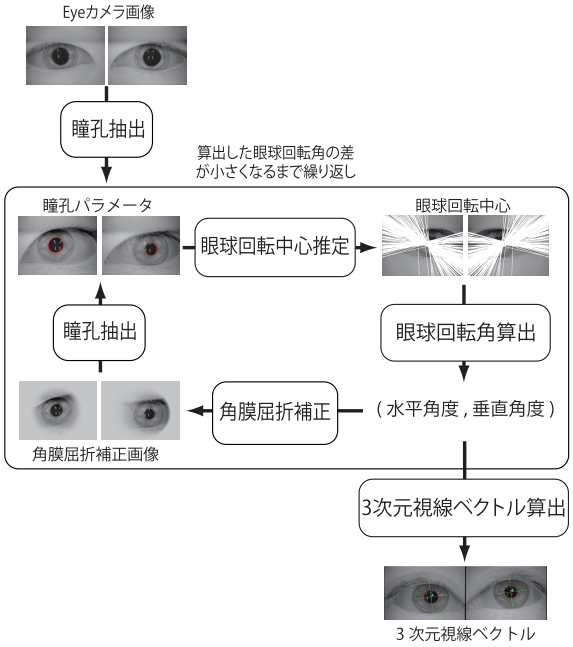


図 **5**　視線推定の流れ

の 3 次元位置を取得する．視線ベクトルの算出は眼球中心位置や向きなどの推定に基づいているが，左右の Scene カメラ同士の関係はカメラキャリブレーションによって視線ベクトルよりも正確に取得できているため，3 次元視線ベクトルから直接的に注視点を求めるよりも精度を向上させることができる．

3　Eye カメラ画像からの 3 次元視線ベクトル推定

Eye カメラから瞳孔を抽出し，3 次元の視線ベクトルを推定する手法の流れを図 5 に示す．以下に，各処理の詳細について述べる．

3.1　瞳孔抽出

瞳孔は視線の向きによって楕円形になるため，画像から楕円として検出する必要がある．また，まつ毛や照明入射光の影響により欠損する場合もあるため，瞳孔を求める際はアウトライアの除去も必要である．そこで文献 [6] の楕円検出に基づく楕円検出アルゴリズムを用いてアウトライアを除去し，楕円パラメータを推定する（図 6）．以下に，楕円検出手順を示す．

Step1. 楕円に内接する平行四辺形の成立条件より楕円の中心を算出

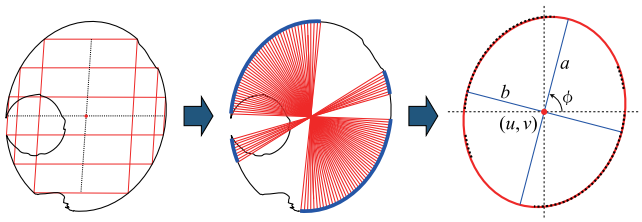
Step2. 楕円中心からの距離が等しい輪郭のみを残し，アウトライアを除去

Step3. アウトライア除去後の輪郭点に対して，フィッティングを行い，楕円パラメータを推定

3.2　眼球回転中心の算出

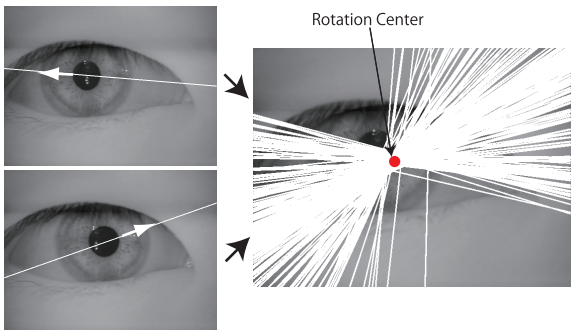
図 7(a) に示すように，視線ベクトルを Eye カメラ画像中に投影して得られる直線は，Eye カメラ中の瞳孔の楕円領域の短軸方向に一致する．視線方向は楕円短軸と一致する相関関係が成立し，これを利用した視線方向の推定法が提案されている [7][8]．視線は眼球回転中心を通ることから，楕円の短軸の延長線上に眼球回転中心 (u_0, v_0) が存在すると考えられる．Eye カメラと眼球の相対位置が固定であると仮定すると，眼球を動かしながら Eye カメラで複数の画像を撮影することで，各画像中の瞳孔の楕円短軸から画像中の眼球中心位置を算出できる [9](図 7)．

なお，3.1 節より推定された楕円短軸にはアウトライアが存在するため，RANSAC と LMedS 法を用いてアウトライアを排除してから，眼球回転中心を算出する．



(a) 楕円中心の算出　(b) アウトライア除去　(c) パラメータ推定

図 6　楕円検出



(a) 短軸と視線方向の相関　(b) 短軸交差による眼球回転中心推定

図 7　眼球回転中心の推定

3.3 水平・垂直眼球回転角の算出

図 8 において，眼球回転中心 (u_0, v_0)，眼球半径が r_0 として既知である場合，瞳孔中心 (u, v) から眼球の水平方向の回転角 θ と，上下方向の眼球回転角 ϕ は以下の式から算出できる．

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{u-u_0}{\sqrt{r_0^2-(u-u_0)^2-(v-v_0)^2}}\right) \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{v-v_0}{\sqrt{r_0^2-(u-u_0)^2-(v-v_0)^2}}\right) \quad (2)$$

なお，眼球半径は生体平均である 12.2mm とする [10]．

3.4 角膜屈折の補正

Eye カメラで観測される瞳孔は角膜による光の屈折に影響されるため，解剖学的な瞳孔位置よりも約 0.5mm ほど浮き上がり，15% 程度拡大された虚像として観測される．そのような虚像として得られている瞳孔から眼球回転角を求めると誤差が生じる．そこで，坂下らが提案した手法 [6] を用いて角膜屈折を補正した Eye カメラ画像 (図 9(a)) を作成し，そこから眼球回転角を求めることで，屈折の影響を補正した眼球回転角を推定する．しかし，ここで補正に用いる光の屈折パラメータは眼球回転角に基づいたものであり，その眼球回転角自身が光の屈折により誤差を含んでいる．そこで，瞳孔抽出，眼球回転中心算出，眼球回転角の算出，屈折補正の処理を前回推定した回転角の変化が収束するまで繰り返す．角膜屈折補正後の Eye カメラ画像と補正前後の瞳孔抽出結果を図 9(b) に示す．赤が屈折補正前の瞳孔，緑が屈折補正後の瞳孔である．

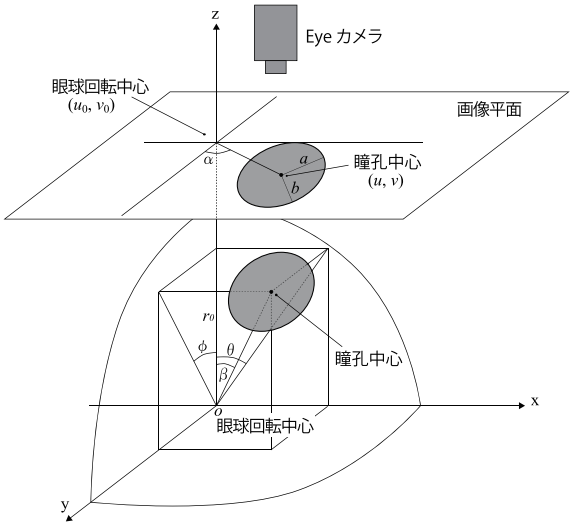
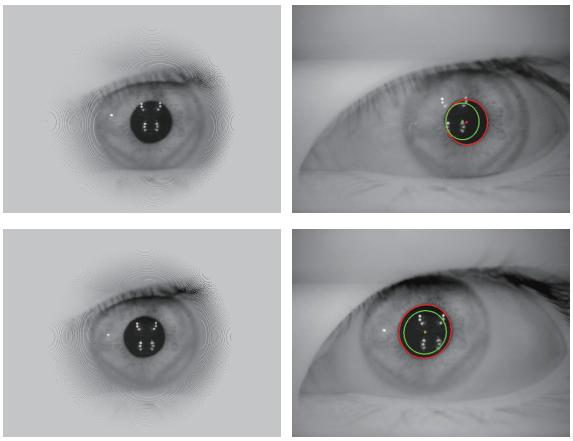


図 8　眼球回転角の算出



(a) 角膜屈折補正　(b) 補正前後の瞳孔抽出結果

図 9　角膜屈折の補正

このように，角膜屈折を補正することで，高精度な視線推定を行うことができる．

3.5 3 次元視線ベクトル算出

式 (1),(2) より求めた眼球の水平回転角 θ と垂直回転角 ϕ を 3 次元空間中における視線の式を定義するために，式 (3) を用いてベクトルに変換する．

$$\mathbf{V}^E = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & \sin\phi \\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上の手順により求めた $\mathbf{V}^E$ を Eye カメラ画像における 3 次元視線ベクトルとする．

4 注視点の 3 次元位置推定

3 章で得た 3 次元視線ベクトルは，生体の平均パラメータを用いて算出してるため，誤差を含む．そのた

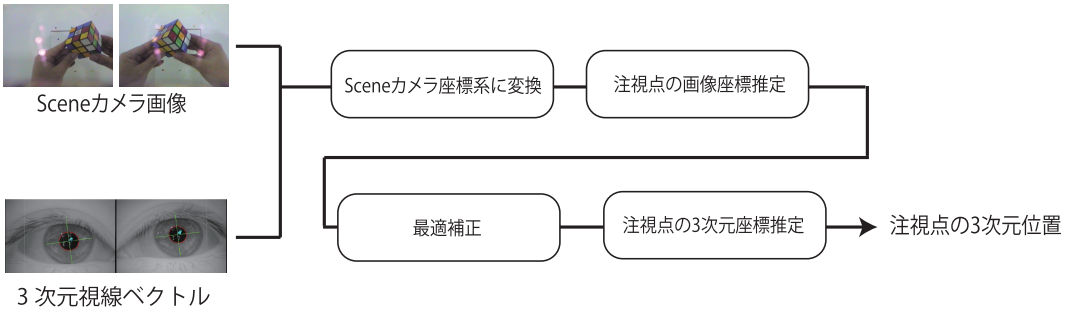


図 **11**　**3** 次元注視位置取得の流れ

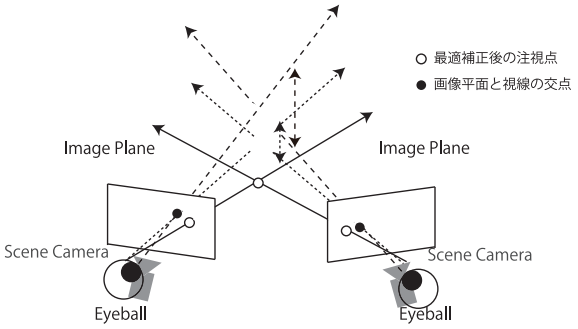


図 **10**　最適補正による注視点の **3** 次元位置推定

め図 10 に示すように，左右の視線同士は交差せず，このままでは注視点を正しく推定できない．

そこで，3 章で得た 3 次元視線ベクトルを Scene カメラ座標系に変換し，左右の Scene カメラの関係を利用して左右の視線同士が交差するように補正し，ステレオ視を用いて注視点の 3 次元位置を取得する．処理の流れを図 11 に示す．

4.1　3 次元視線ベクトルの座標変換パラメータ推定

3 章で得た 3 次元視線ベクトル $\mathbf{V}^E$ は Eye カメラ座標系で求まっている．$\mathbf{V}^E$ を Scene カメラ座標系に変換するため，生体平均パラメータに基づく眼球位置を基準に，眼球の正面遠方に注目点 $\mathbf{T}$ を用意する．$\mathbf{T}$ を注視した状態で Eye カメラから求められる視線単位ベクトルを $\mathbf{V}_T^E$ とする．一方，$\mathbf{T}$ は眼球の正面遠方であるため，その視線方向は Scene カメラ座標系では，Z 軸に平行であり，

$$(x_s, y_s, z_s) \quad = \quad (0, 0, 1) \tag{4}$$

となる．したがって，Eye カメラ座標系の視線ベクトルから Scene カメラ座標系へ変換されたベクトル $\mathbf{V}^C$

$$(x_c, y_c, z_c) \quad = \quad (x_s, y_s, z_s) - (x_e, y_e, z_e) \tag{5}$$

となる．眼球 $\mathbf{E}$，注目点 $\mathbf{T}$，視線ベクトル $\mathbf{V}$ の関係を図 12 に示す．

上記の手順により，左右のカメラそれぞれの $\mathbf{V}^C$ を求め，$\mathbf{V}^E$ に加算することで，$\mathbf{V}^S$ を求めることができる．

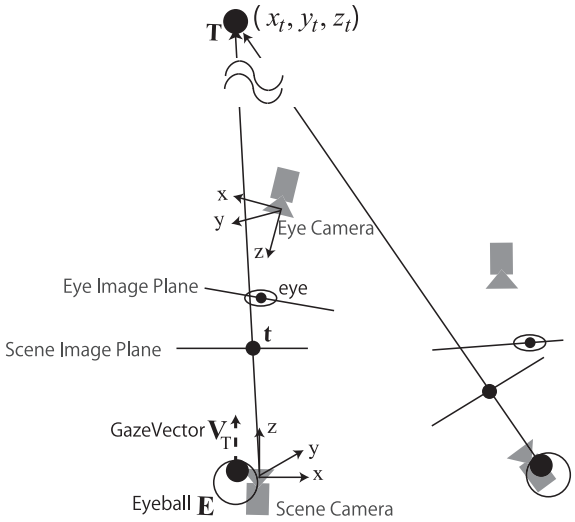


図 **12**　眼球と注目点位置関係

4.2　Scene カメラ画像平面上の注視点位置の推定

Scene カメラは，人物視点と同一の位置から撮影している．そのため，視線は Scene カメラの画像平面を通過する．Scene カメラ画像平面と視線の交点を求めることで，Scene カメラ画像上の注視点を取得することができる．注視点の Scene カメラ画像座標を取得する方法を次に示す．眼球位置を $\mathbf{E}(x_e, y_e, z_e)$，視線の単位ベクトルを $\mathbf{V}^S(x^s, y^s, z^s)$，3 次元空間中における Scene カメラ画像平面と視線の交点を $\mathbf{S}(x_s, y_s, z_s)$ とすると，媒介変数 t を用いてそれぞれの関係は式 (6) となる．

$$\mathbf{S} \quad = \quad t\mathbf{V}^S + \mathbf{E} \tag{6}$$

次に式 (6) から媒介変数 t を取り除くと比例式 (7) が得られる．

$$\frac{x_s - x_e}{x^s} = \frac{y_s - y_e}{y^s} = \frac{z_s - z_e}{z^s} \tag{7}$$

Scene カメラ画像平面は，カメラから Z 軸方向に焦点距離 f だけ平行移動した位置に存在するので，$z_s = f$

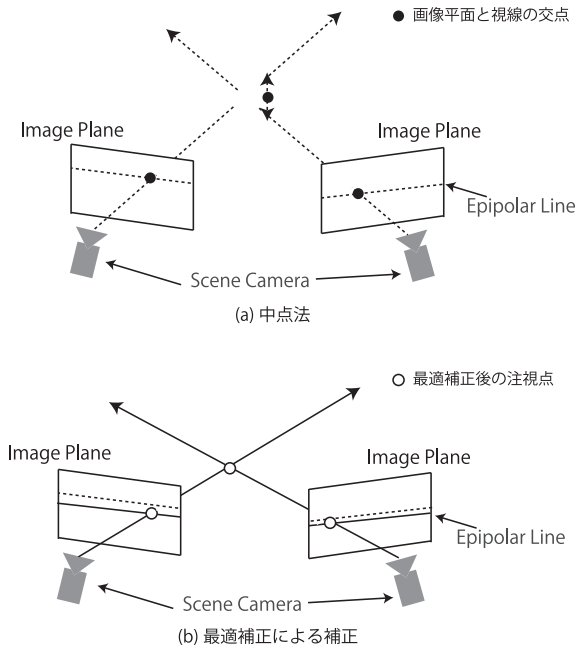


図 **13**　注視点の最適補正

とし，変形すると，

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} x^s(f-z_e)+x_e \\ y^s(f-z_e)+y_e \\ f \end{pmatrix} \tag{8}$$

となり，交点 $\mathbf{S}$ が求まる．最後に，求めた $\mathbf{S}$ に対して，あらかじめ求めておいたカメラ行列を掛けることで，注視点の Scene カメラ画像座標が求まる．

4.3 注視点の最適補正

左の Scene カメラの点 $\mathbf{m}_l = [u_l, v_l]$ と右の Scene カメラの点 $\mathbf{m}_r = [u_r, v_r]$ が対応しているとき，それぞれの点を通過する視線同士が交差する条件は式 (9) を満たす．

$$\mathbf{m}_l \mathbf{F} \mathbf{m}_r^T = 0 \tag{9}$$

ここで，$\mathbf{F}$ は基礎行列である．取得した視線ベクトルには誤差を含むため，Scene 画像上の注視点にもずれが生じ式 (9) が満たされない．そこで，文献 [5] にて提案されている最適補正を用いて，図 13 に示すように，Scene 画像上の注視点同士が式 (9) を満たすように位置の補正を行う．

最適補正では，視線同士が交差するように，Scene カメラ画像上の注視点を移動させ，その移動量が最小となるように定める．左側 Scene カメラの最適補正後の Scene カメラ画像座標 $\hat{\mathbf{m}}_l$ と，右側 Scene カメラの $\hat{\mathbf{m}}_r$ はそれぞれ式 (10),(11) を用いて算出する．

$$\hat{\mathbf{m}}_l = \mathbf{m}_l - \frac{(\mathbf{u}\xi)\mathbf{P}_k\mathbf{F}\mathbf{m}_r}{(\mathbf{u}\mathbf{V}_0[\xi]\mathbf{u})} \tag{10}$$

$$\hat{\mathbf{m}}_r = \mathbf{m}_r - \frac{(\mathbf{u}\xi)\mathbf{P}_k\mathbf{F}^T\mathbf{m}_l}{(\mathbf{u}\mathbf{V}_0[\xi]\mathbf{u})} \tag{11}$$

ここで，$\mathbf{P}_k$ は第 3 成分を 0 にする投影行列である，

$$\mathbf{P}_k = diag(1,1,0) \tag{12}$$

$\mathbf{u}$ と ξ は，それぞれ基礎行列 $\mathbf{F}$ とデータ $\mathbf{m} = [u/f_0, v/f_0, 1]^T$ を 9 次元ベクトルに書き直したものである．

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= (F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{21}, F_{22}, F_{23}, F_{31}, F_{32}, F_{33})^T \quad (13) \\ \xi &= (u_l u_r, u_l v_r, f_0 u_l, v_l u_r, v_l v_r, f_0 v_l, f_0 u_r, f_0 v_r, f_0^2)^T \end{aligned}$$

ここで，f_0 は任意のスケール定数である．さらに行列 $\mathbf{V}_0[\xi]$ は文献 [5] にて提案されている式である．

求めた $\hat{\mathbf{m}}$ を $\mathbf{m}$ に代入し，式 (10),(11) を再度適用し，収束するまで繰り返す．

4.4 注視点の 3 次元位置推定

補正した注視点の画像座標同士を用いてステレオ視を行うことで注視点の 3 次元位置を取得する．3 次元空間の注視点 $\mathbf{X}(x,y,z)$ と最適補正で求めた左右それぞれの画像上の注視点 $\tilde{\hat{\mathbf{m}}}_l = [\hat{u}_l, \hat{v}_l, 1]^T$，$\tilde{\hat{\mathbf{m}}}_r = [\hat{u}_r, \hat{v}_r, 1]^T$ の関係を式 (14) に示す．

$$\tilde{\hat{\mathbf{m}}}_l = \mathbf{P}_l\mathbf{X}, \qquad \tilde{\hat{\mathbf{m}}}_r = \mathbf{P}_r\mathbf{X} \tag{14}$$

ここで，$\mathbf{P}$ はそれぞれのカメラに対するカメラ行列で，文献 [11] の方法を用いてあらかじめ求めておく．式 (14) は，$\mathbf{X}$ を未知数とする連立方程式になるので，それらの未知数に関してまとめることで，式 (15) となる．

$$\begin{pmatrix} p_{31,l}u_l - p_{11,l} & p_{32,l}u_l - p_{12,l} & p_{33,l}u_l - p_{13,l} \\ p_{31,l}v_l - p_{21,l} & p_{32,l}v_l - p_{22,l} & p_{33,l}v_l - p_{23,l} \\ p_{31,r}u_r - p_{11,r} & p_{32,r}u_r - p_{12,r} & p_{33,r}u_r - p_{13} \\ p_{31,r}v_r - p_{21,r} & p_{32,r}v_r - p_{22,r} & p_{33,r}v_r - p_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{14} - p_{34}u_l \\ p_{24} - p_{34}v_l \\ p_{14} - p_{34}u_r \\ p_{24} - p_{34}v_r \end{pmatrix} \tag{15}$$

式 (15) を最小 2 乗法を用いて解くことで，2 次元画像座標から 3 次元の注視位置を取得できる．

5 注視点の 3 次元位置推定実験

Inside-Out カメラを用いて注視点の 3 次元位置を推定し，精度の評価を行う．

5.1 実験概要

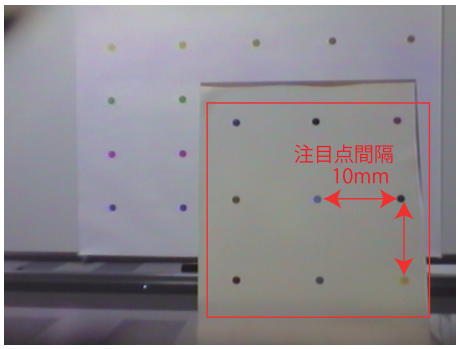
図 14 の赤い枠の中に示すように，同一平面上に 9 個の注目点を用意した．実験では，被験者の頭部を固定し，対象までの距離 Z を 500mm〜3500mm と変化させたときの注目点を注視して，提案手法により注視点の 3 次元位置を取得する．このとき，注目点の位置 (真値) は未知であるため，推定した位置から精度を評価することは困難である．そこで，対象までの距離が Z=500mm のときは注目点間隔を 100mm，Z=1000mm〜3500mm のときは 200mm 間隔で配置しておき，これを真値とする．次に，各注目点の 3 次元位置から注目点間の距離

表 1　評価結果 (平均誤差)[mm]

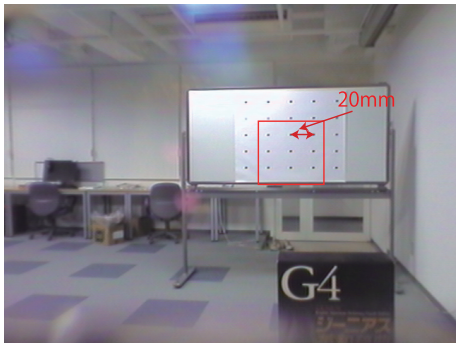
距離	直接推定	最適補正前	最適補正後
500	44.9	9.7	8.4
1000	64.0	13.2	11.0
1500	70.0	19.9	16.5
2000	81.1	50.0	41.0
2500	114.2	93.3	84.6
3000	142.4	116.6	111.0
3500	147.2	136.6	136.5
平均	94.7	75.0	64.5

表 2　評価結果 (標準偏差)[mm]

距離	直接推定	最適補正前	最適補正後
500	18.2	7.1	4.9
1000	25.1	8.0	5.4
1500	22.9	8.1	5.0
2000	36.8	10.7	7.2
2500	36.5	12.8	8.2
3000	40.9	14.6	9.4
3500	40.5	15.4	10.6
平均	31.6	10.9	7.2



Z=500mm



Z=3500mm

図 14　注目点データ

を算出し，真値との差を求める．ここで，注目点間隔は同一平面において上下左右の 12 個存在するため，12 個の平均と標準偏差を用いて評価する．注視点の 3 次元位置推定法には，以下の 3 つの手法を比較する．

直接推定　3 次元視線ベクトルの交点を直接推定

提案手法 1(最適補正前)　3 次元視線ベクトルを Scene カメラ座標に投影し，ステレオ視により推定

提案手法 2(最適補正後)　最適補正した後，ステレオ視により推定

5.2　実験結果

対象までの距離 Z=500〜3500mm としたときの平均誤差を表 1，標準偏差を表 2 に示す．提案手法は，直接推定よりも平均誤差が小さく，標準偏差の値が小さいことからばらつきも抑えられていることがわかる．提案手法 2 では，最適補正を行ったことで精度が向上している．これらのデータをグラフにプロットしたものを図 15 に示す．グラフ中のステレオ分解能は，ある奥行き Z において Scene カメラ画像中の 0.5pixel に対応する実空間の幅であり，ステレオ視による分解能を示す．最適補正後の結果は，この曲線を下回っていることから，サブピクセル推定と同等の精度であることが確認できる．これは，左右の Scene カメラの関係を利用して左右の視線同士が交差するように補正したことで精度が向上したためである．提案手法は，推定する対象までの距離が離れた場合においても誤差分布を抑えることができ，安定して注視点の 3 次元位置を取得できていることがわかる．

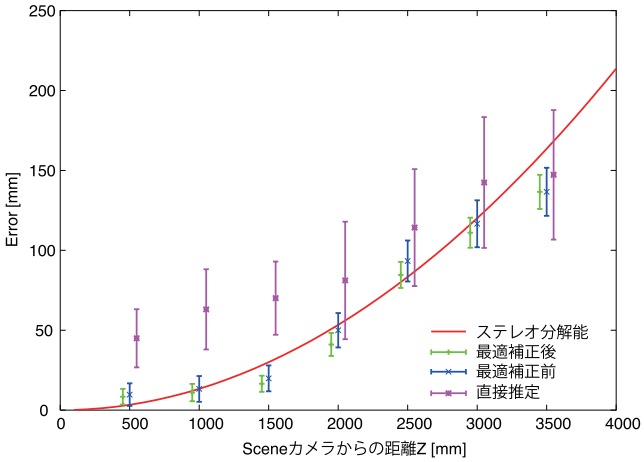


図 15　注視点の 3 次元位置推定誤差

5.3　注視点の 3 次元位置推定例

被験者に対象物体 (ルービックキューブ) の中心を注視してもらい，提案手法により注視位置とその 3 次元座標を取得した．Scene カメラ画像中の注視点と対象物体までの距離，Eye カメラ画像中の眼球回転中心 (赤) 並びに瞳孔中心 (緑) を図 16 に示す．図 16 から，被験

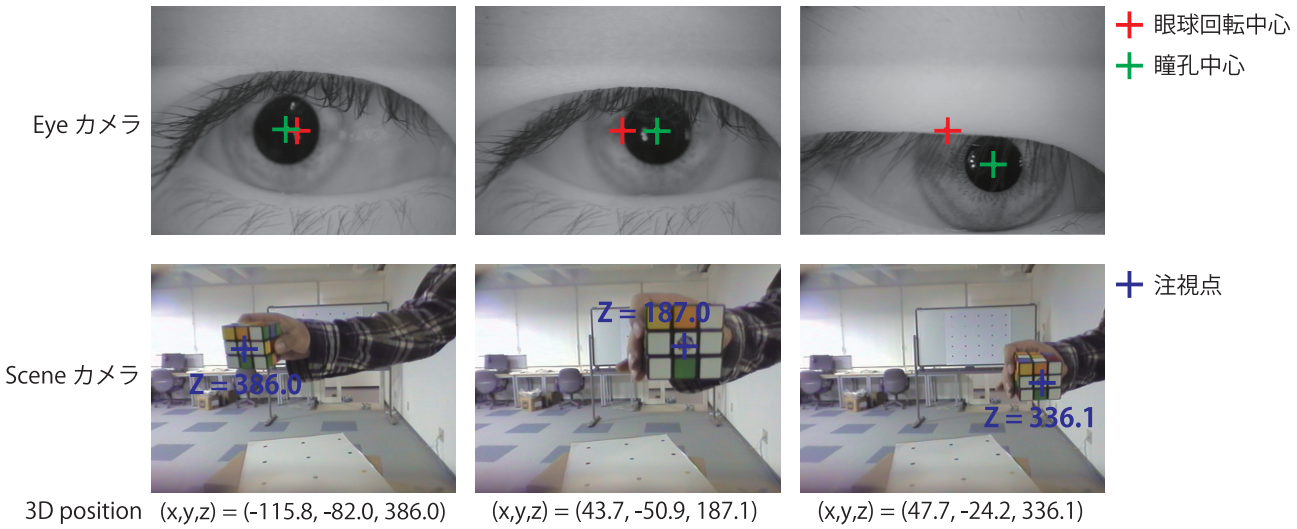


図 **16**　注視物体までの距離

者が対象物体 (ルービックキューブ) の中心を注視していることがわかる．また，推定した 3 次元位置から各画像における対象物までの距離がわかる．以上により，提案手法は，従来のシステムでは取得が不可能であった注視点の 3 次元位置情報を高精度に取得することができる．現在，提案手法は視線ベクトルの推定，Scene カメラ座標への変換，最適補正の処理に，約 800msec を要する．リアルタイム処理に向けての計算時間の削減については，今後の課題としたい．

6　おわりに

本稿では，自由空間における注視点の 3 次元位置を取得する Inside-Out カメラと注視点の 3 次元位置推定法を提案した．ハーフミラーを介すことで，人間の視界と視差が少ない映像を得ることが可能である．また，提案手法で Scene 画像平面上の注視点を求め，最適補正により注視点位置を左右の視線が 3 次元上で交差するように補正し，注視点の 3 次元位置を正確に取得するできることを確認した．評価実験の結果，平均 500mm〜3500mm の距離において，平均 64.5mm 程度の誤差で注視点の 3 次元位置を推定できることを確認した．今後の課題として，Inside-Out カメラの軽量化，また，得られた注視位置情報に基づいた人の視覚メカニズムの解析行う予定である．

参考文献

[1] D. Noton, L. Stark, “Eye Movement and Visual perception”, Seientic American, pp.35- 43,1971

[2] 山田浩史, 乗松有, 小塚一宏, 中野倫明, 山本新, “ドライバの運転状態の検知 1 －インナミラー内蔵カメラによる視線検出－”, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2004 論文集 I, pp.63-68, 2004.

[3] 大野健彦, “視線を用いた高速なメニュー選択作業”, 情処学論, Vol.40, No.2, pp.602-612, 1999.

[4] NAC, “アイマークレコーダー”.

[5] 金谷健一, 菅谷保之, 新妻弘崇, “2 画像からの三角測量: Hartley vs. 最適補正”, CVIM, pp.335-342, 2007.

[6] 坂下祐輔, 藤吉弘亘, 平田豊, “角膜における屈折を考慮した 3 次元眼球運動計測”, 第 13 回画像センシングシンポジウム SSII07, IN2-25, 2007.

[7] 辻徳生, 柴田真吾, 長谷川勉, 倉爪亮, “視線計測のために LMedS を用いた虹彩検出法”, 画像の認識・理解シンポジウム MIRU2004, 論文集 1 ,pp.684-689, 2004.

[8] J. G. Wang, E. Sung, “Study on Eye Gaze Estimation”, IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-Part B, Cybernetics, Vol.32, No.3, 2002.

[9] 松田圭司, 永見武司, “共通 VideoAPI 対応視線位置計測システムの開発”, 第 15 回生体・生理シンポジウム論文集, pp.285-288, 2000.

[10] 日本視覚学会, “視覚情報処理ハンドブック”, 2000.

[11] Z. Zhang, “Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations”, International Conference on Computer Vision, 1999