

## 車外のステレオ計測およびドライバーの視線計測に基づく注視点位置の三次元推定

高木 健治<sup>†1</sup> 河 中 治 樹<sup>†1</sup> 小 栗 宏 次<sup>†1</sup>

自動車を運転している最中のドライバーの有効視野を把握することはドライバーに適応的な安全運転支援を行う上で有益な情報となる。しかし、従来の有効視野計測はドライバーの反応操作を必要とすることに加えて、視野の二次元的な広さしか考慮しておらず、奥行き情報も加えた三次元的な知覚空間をリアルタイムに計測することができない。そこで本研究では、運転中の実効的な視空間を把握するために必要となるドライバーの三次元的な注視点位置を得ることを目的とする。本稿では、車載カメラによる車外のステレオ計測およびドライバーの顔画像から得た視線方向に基づいて注視点位置を推定する手法、さらにその車内外カメラの校正方法を提案し、実験によって有効性を示した。

### Estimation of a three-dimensional gaze point based on stereo reconstruction of outside and viewing direction of the driver

KENJI TAKAGI,<sup>†1</sup> HARUKI KAWANAKA<sup>†1</sup> and KOJI OGURI<sup>†1</sup>

For the driving support system adaptive to a driver state, it is beneficial to recognize the driver's useful field of view while driving. However, the previous measurement methods require several reacting operations of the driver and allow only two-dimensional field of view. So it is difficult to measure three-dimensional perceptual space, which includes the depth information, in real-time. Therefore, as the first step, we aim to obtain three-dimensional gaze points in order to measure an effective visual space while driving. In this paper, we proposed a estimation method of the gaze points and a calibration method of vehicle-mounted cameras, which are placed in and out of the vehicle. The estimation is based on a relation between a viewing direction from the driver's face image and a spatial configuration outside the vehicle by using stereo reconstruction. Finally, we demonstrated its effectiveness by experiments.

### 1. はじめに

自動車を運転する際の外界情報の90%は視覚に基づくと言われており<sup>1)</sup>、運転時には視覚的注意が特に重要であると考えられている。生理学的にはそうした人間の視野は中心視野と周辺視野に分けることができ、中心視野はある対象物を認識するための解像度が高い範囲のことを指す。一方、周辺視野は中心視野の周りの範囲のことを指し、中心視野と比べて解像度は低いものの対象物の運動や光の点灯というものを感知する際には敏感に反応する。Mackworth は注視点の周りで任意の対象物の検出、弁別処理、情報を貯蔵できる範囲を有効視野と定義しており<sup>2)</sup>、ドライバーの有効視野を計測する研究が今日までに多く行なわれている<sup>3)4)5)6)7)</sup>。

那倉らや佐藤ら是有効視野を計測するため、画面中あるいはドライビングシミュレータのスクリーン中に存在する刺激マーカーや照明などの位置を被験者に回答させることで有効視野の計測を行なっている<sup>3)4)</sup>。また、Joceline らや三浦や瀬谷らは刺激に対する反応時間を解析することで有効視野の計測を行なっている<sup>5)6)7)</sup>。

しかし、上記で挙げられるような有効視野の計測に関する研究は屋外・屋内環境に関わらず、ドライバーの視野内の垂直方向・水平方向の二次元的な広がりでしか計測されていない。このことから三浦は奥行き特性に関する知見が少ないことを指摘している<sup>8)</sup>。Andersen は奥行き範囲においても注意の働き方が変化することを述べている<sup>9)</sup>。しかしながら今日までにドライバーの有効視野を奥行き方向も考慮した範囲で計測することはまだなされていない。

そこで本研究はドライバーの運転中の実効的な視空間を把握することを目的とした上でその第一ステップとしてドライバーの注視点を三次元的に推定する手法を提案する。満上ら<sup>10)</sup>は輻輳に基づいて両眼の視直線の交点を求めることで注視点を三次元的に推定しているが<sup>10)</sup>、本研究では車外環境を三次元的に復元したうえでドライバーの注視点を三次元的に推定する。

### 2. 有効視野に関する先行研究

今日までに有効視野の計測に関する研究として様々な手法がなされている。例えば那倉らはディスプレイ中に表示するターゲット刺激の存在する場所を疲労を感じさせた被験者に答えさせ、その正答率で有効視野を計測した。その結果、疲労の度合いによって有効視野が狭

<sup>†1</sup> 愛知県立大学大学院 情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

くなることを示した<sup>3)</sup>。また佐藤らはドライビングシミュレータを用い、カーブ区間と直線区間の有効視野をターゲット刺激の正答率から計測した。その結果、カーブ区間の方が直線区間と比べ有効視野が狭くなることを示した<sup>4)</sup>。Joceline らはドライビングシミュレータ上で事故に繋がるシーンにおいて、年齢別にその運転パフォーマンスと有効視野の縮小の関係性について検討し、高齢ドライバーにおいて有効視野の縮小から事故回避のためのパフォーマンス時間が増加することを示した<sup>5)</sup>。また三浦らは実車のフロントガラスの内側に電球を取り付け、それを点灯させることで被験者の反応時間から屋外環境における有効視野を計測した。その結果、自車速度や道路の混雑状況によって有効視野の大きさが変化することを示した<sup>6)</sup>。瀬谷らはドライビングシミュレータのスクリーンにターゲットを表示させることで、注視点からターゲットの距離が遠いほど反応時間が遅くなることを示し、またサッカーが反応時間の遅延に繋がることを示した<sup>7)</sup>。このようにこれまでは有効視野を計測するにあたり、ターゲット刺激に対する反応時間や正答率が用いられてきた。

こうした計測の問題点は2つある。ひとつは、人間の注目するものが三次元空間中に存在するにも関わらず、有効視野を二次元的な広がりではしか計測していない点である。もうひとつは有効な視野角を計測するために被験者に反応作業が必要な点である。これらの問題点を解決するために本研究ではドライバーの反応作業を行なうことなく、有効視野を三次元的な空間として計測することを目的としている。本稿ではそれを実現するための一つのアプローチとして位置づけている。

### 3. 注視点三次元推定手法

ドライバーの注視点を三次元的に推定するため、本研究ではドライバーをモニタリングするカメラと車外環境の前方部分をステレオ計測するステレオカメラを用いる(図1)。ドライバーをモニタリングするステレオカメラは車両室内に搭載され、ドライバーの眼球回転角度(pitch, yaw)や眼球位置座標( $e_x, e_y, e_z$ )といった視線データを計測する。眼球運動の計測結果(視線データ(眼球回転角度( $\psi_{pitch}, \psi_{yaw}$ ), 眼球位置座標( $e_x, e_y, e_z$ )))を注視点の三次元推定に利用する。

また車外環境を三次元的に計測するために、車外撮影用カメラを車両前方向きに二台並べて設置する。これらでステレオ視を行ない、得られる形状データを注視点座標の推定に用いる。

しかし以上に挙げた二組のステレオカメラシステムはそれぞれ別のカメラ座標系に基づいているため、それぞれのデータの座標をある座標系に統一する必要があり、そのために事



図1 各ステレオカメラの配置の様子  
Fig. 1 Appearance of the installation of both stereo cameras

前にカメラの外部パラメータを求めておく必要がある。本節では外部パラメータ校正および注視点の三次元位置推定について述べる。ドライバーの注視点の三次元座標は眼球運動の計測結果から得られるドライバーの視視線と外部形状データとの交点として求める。

#### 3.1 ドライバーの視線データを用いたカメラ校正

図4に示すように、車外環境を撮影するステレオカメラ(以下、外向きカメラ)とドライバーの視線データを計測するためのステレオカメラ(以下、内向きカメラ)はそれぞれ独立した座標系を持っており、三次元環境と視線データを統合させるためには、各ステレオカメラの座標系を統一する必要がある。従来のカメラ校正の手法として、あらかじめ三次元的な大きさや形が分かっている対象物をカメラで撮影し、対象物上の点を投影した各カメラ画像の画像座標とカメラ座標系の対応から計算する手法や、平面パターンを用いたZhangの手法<sup>11)</sup>が一般的である。そのためにはある一つの校正器具を複数のカメラに同時に撮影することが必要となる。本研究で用いる外向きカメラには車外環境が撮影され(図2)、また内向きカメラにはドライバーの顔が撮影される(図3)。そのため各ステレオカメラには共通して撮影される領域がない。そこで本研究では撮影領域の重複しないカメラでのドライバーの視線データを用いたカメラ校正手法を提案する。本研究では世界座標系の原点を内向きカメラのカメラ座標系とし、外向きカメラのカメラ座標系を内向きカメラのカメラ座標系に合わせることにする。内向きカメラのカメラ座標系  $X_w Y_w Z_w$  での三次元座標 ( $W_x, W_y, W_z$ ) と外向きカメラのカメラ座標系  $X_c Y_c Z_c$  の三次元座標 ( $C_x, C_y, C_z$ ) との関係は式(1)のように書くことができる。



図 2 車外環境撮影画像  
Fig.2 Image of the vehicle exterior

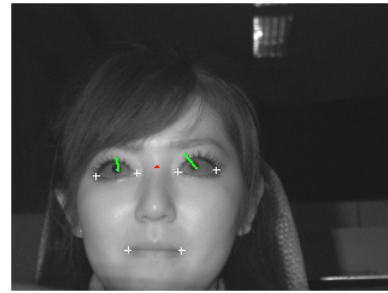


図 3 ドライバー撮影画像  
Fig.3 Image of the driver's face

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \\ p_9 & p_{10} & p_{11} & p_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式 (1) の  $p_n (n = 1, 2, \dots, 12)$  は内向きカメラ座標系と外向きカメラ座標系の間になり立つユークリッド変換行列の要素である。

提案手法で必要になる取得データを以下に示す。取得データは内向きカメラ座標系と外向きカメラ座標系のものが存在する。

- 外向きカメラ座標系での対象位置の三次元座標値  $(C_x, C_y, C_z)$
- 内向きカメラから得られる眼球回転角度  $(\psi_{pitch}, \psi_{yaw})$
- 内向きカメラから得られる眼球位置座標  $(e_x, e_y, e_z)$

眼球回転角度と眼球位置座標は両眼に対してそれぞれ取得される。本研究ではこれらのデータに関して次式 (2) ~ (4) のように各データの平均値をとり、それを眼球回転角度と眼球位置座標と定義する。

$$\psi_{pitch} = \frac{\psi_{pitchl} + \psi_{pitchr}}{2} \quad (2)$$

$$\psi_{yaw} = \frac{\psi_{yawl} + \psi_{yawr}}{2} \quad (3)$$

$$[e_x \ e_y \ e_z]^T = [(e_{xl} + e_{xr})/2 \ (e_{yl} + e_{yr})/2 \ (e_{zl} + e_{zr})/2]^T \quad (4)$$

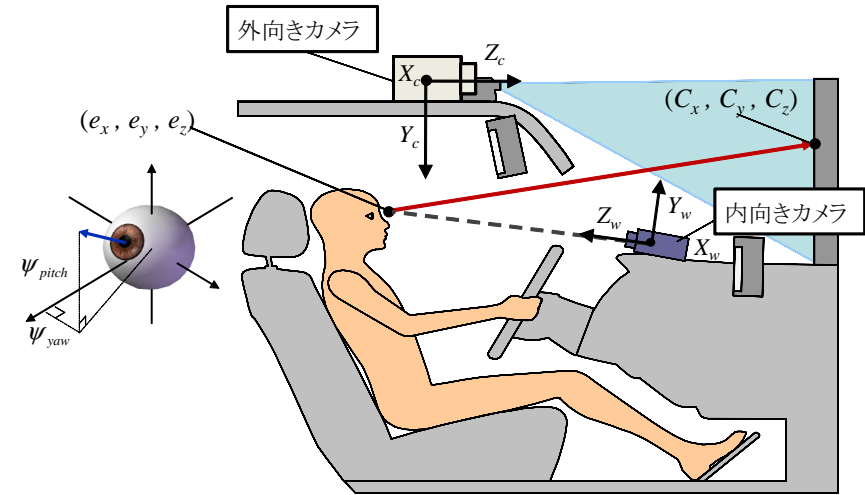


図 4 各カメラ座標系の関係

Fig.4 Relation between each camera coordinate system

ただし、左眼の眼球回転角度を  $\psi_{pitchl}, \psi_{yawl}$ , 眼球位置座標を  $e_{xl}, e_{yl}, e_{zl}$  とし、右眼の眼球回転角度を  $\psi_{pitchr}, \psi_{yawr}$ , 眼球位置座標を  $e_{xr}, e_{yr}, e_{zr}$  とする

世界座標系における視線を表す直線 (視直線) は眼球位置座標  $(e_x, e_y, e_z)$ , および視線方向ベクトル  $(n_x, n_y, n_z)$  より式 (5) のように書ける。

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、 $k$  は実数である。また視線方向ベクトル  $\mathbf{n}$  は眼球回転角度  $(\psi_{pitch}, \psi_{yaw})$  を用いると、式 (6) のように書くことができる。

$$\mathbf{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch} \\ \sin \psi_{pitch} \\ -\cos \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (1), 式 (5) および式 (6) より式 (7) を導出することができる.

$$\begin{bmatrix} n_y C_x & n_y C_y & n_y C_z & n_y & -n_x C_x & -n_x C_y & -n_x C_z & -n_x & 0 \\ n_z C_x & n_z C_y & n_z C_z & n_z & 0 & -n_x C_x & -n_x C_y & -n_x C_z & -n_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_y e_x - n_x e_y \\ n_z e_x - n_x e_z \end{bmatrix} \quad (7)$$

ただし, 式 (7) の  $\mathbf{0}$  は  $[0 \ 0 \ 0 \ 0]$  とする. 後述の実験では計算の簡略化のために図 4 に示すように外向きおよび内向きカメラの座標系は  $X_c$  軸と  $X_w$  軸を平行で同じ向きとなるように設置する. この条件により, ユークリッド変換は  $X_c$  軸回転と平行移動のみを考慮すればよくなる. すると式 (7) は式 (8) のように書き換えることができる.

$$\begin{bmatrix} -n_x C_y & n_x C_z & n_y & -n_x & 0 \\ n_x C_z & n_x C_y & -n_z & 0 & n_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_y e_x - n_x e_y - n_y C_x \\ n_x e_z - n_z e_x + n_z C_x \end{bmatrix} \quad (8)$$

上記の仮定条件を課した場合, 未知数は 5 個であり, 外向きカメラから取得される任意の計測値とその部分を注視したときに内向きカメラから得られる視線データの組を少なくとも 3 組あれば式 (8) を解くことができる (ただし, 同一平面上のデータ組を除く). 本研究では最小二乗法に基づいて一般化逆行列によって式 (8) を解いた. これより得られた  $p_n (n = 1, 2, \dots, 5)$  が外向きカメラの座標系を内向きカメラの座標系に変換するパラメータとなる.

### 3.2 三次元位置推定アルゴリズム

内向きカメラから取得される視線データ (眼球回転角度と眼球位置座標) と外向きカメラ座標値 ( $C_x, C_y, C_z$ ) を式 (1) で求まるパラメータによって変換される ( $W_x, W_y, W_z$ ) からドライバーの注視点を三次元的に推定を行なう. 以降の説明では外向きカメラで得られた左右の画像から対応点を取り, 全画素において三次元上の点が得られているとする.

図 5 より, 空間中の 3 点 ( $A, B, C$ ) を含む平面の方程式は式 (9) のように書くことができる. このときの 3 点は画像中における 3 つの画素が持つ三次元上の点から成る 3 点であり, 画像 ( $u, v$ ) の  $v$  座標が 0 または偶数の場合は ( $u, v$ ), ( $u + 1, v$ ), ( $u, v + 1$ ) の 3 点を採用す

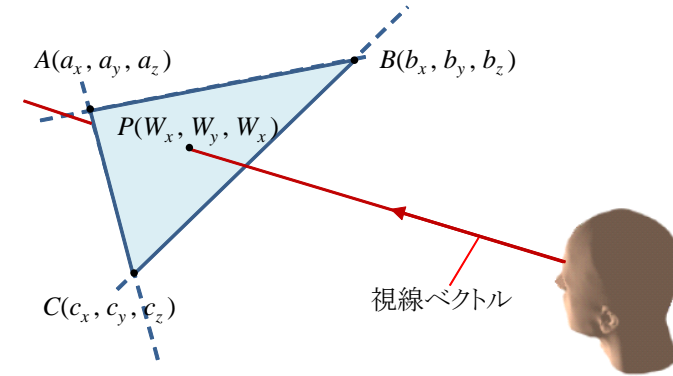


図 5 注視点の三次元推定

Fig. 5 Three-dimensional estimation of a gaze point

る. また  $v$  座標が奇数の場合は ( $u, v$ ), ( $u - 1, v$ ), ( $u, v - 1$ ) の 3 点を採用する.

$$\alpha(W_x - a_x) + \beta(W_y - a_y) + \gamma(W_z - a_z) = 0 \quad (9)$$

ただし, ( $W_x, W_y, W_z$ ) は視線ベクトルと面  $ABC$  との交点  $P$  の座標とする. また  $\alpha, \beta, \gamma$  は  $\vec{AB}$ , と  $\vec{AC}$  の外積から求められる要素であり, 次のように記述できる.

$$\alpha = (b_y - a_y)(c_z - a_z) - (b_z - a_z)(c_y - a_y) \quad (10)$$

$$\beta = (b_z - a_z)(c_x - a_x) - (b_x - a_x)(c_z - a_z) \quad (11)$$

$$\gamma = (b_x - a_x)(c_y - a_y) - (b_y - a_y)(c_x - a_x) \quad (12)$$

また, ドライバーの視直線を眼球回転角度 ( $\psi_{pitch}, \psi_{yaw}$ ) と眼球位置座標 ( $e_x, e_y, e_z$ ) を用いて表すと, 式 (13) のように書くことができる.

$$\lambda \begin{bmatrix} -\sin \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch} \\ \sin \psi_{pitch} \\ -\cos \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \quad (13)$$

式 (13) の  $\lambda$  は視線方向ベクトルの定数倍を表す正の実数である.

式 (9) と式 (13) の連立方程式より, 次式のように  $\lambda$  を求めることができる.

$$\lambda = \frac{\alpha(a_x - e_x) + \beta(a_y - e_y) + \gamma(a_z - e_z)}{-\alpha \sin \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch} + \beta \sin \psi_{pitch} - \gamma \cos \psi_{yaw} \cos \psi_{pitch}} \quad (14)$$

式 (13) より, 3 点  $ABC$  を含む平面と視直線との交点  $P(W_x, W_y, W_z)$  を求めることがで

きる。また点  $P$  が平面  $ABC$  の内部に存在するとき、式 (15) のように書くことができる。

$$s \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + u \begin{bmatrix} c_x \\ c_y \\ c_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

ただし、 $0 \leq s \leq 1$ ,  $0 \leq t \leq 1$ ,  $0 \leq u \leq 1$ ,  $s + t + u = 1$  であるときに三角形  $ABC$  の内部に交点をもつ。本研究では式 (15) の条件を満たす点  $P(W_x, W_y, W_z)$  を注視点の三次元位置座標と定義し、ラスタスキャンをして全ての三角パッチと視直線との交差判定を行なう。いずれの三角パッチとも交点をもたない場合は計測不可とする。

## 4. 実験

### 4.1 車外ステレオカメラのカメラ校正精度評価

この実験では撮影領域の重複しない外向きカメラと内向きカメラのカメラ座標系を視線データを用いることで統合したときの精度評価を行なう。本研究では、外向きカメラのカメラ座標系を内向きカメラのカメラ座標系に合わせる。注視対象の形状(円筒スクリーン)が既知であることと運転中のドライバーの姿勢が実車と同じであることから図 6 に示すドライビングシミュレータ(以下、DS)を用いて実験を行なう。また外向きカメラとして FUJIFILM 製の等距離射影方式の魚眼レンズを搭載したカメラを二台用い、図 7 に示すように DS のプロジェクターを挟むような位置に設置した。なお、プロジェクターはドライバーの頭上に位置し、天井部分は囲まれている設計になっているので、投射する箇所以外は外部から見えないようになっている。また内向きカメラとして本実験では seeing machines 社の faceLAB を用いて視線データを取得する。なお、各ステレオカメラについてのカメラの内部パラメータ校正は事前に行なっておいたものを利用する。

被験者には DS の座席に着座してもらい、視線データを取得するため faceLAB でヘッドモデルを作成する。また DS の円筒スクリーンには図 8 に示すような格子パターンを投影し、あらかじめ指示した格子パターンの交差点を左上角から水平方向に順番に約 10 秒ずつ注視してもらおう。なお注視してもらった点を本実験では注目点と呼び、縦 6 行 × 横 5 列の計 30 点である。円筒スクリーン上の格子の模式図を図 9 に示す。各注目点を注視してもらった際に得られる視線データと外向きカメラから得られる三次元座標値を用いて各ステレオカメラの外部パラメータ校正を行なう。なお、今回は外向きカメラにてステレオ視をする際の左右の画像の対応点は目視で設定し、誤対応のないようにした。得られた視線データの眼球



図 6 ドライビングシミュレータ  
Fig.6 Driving Simulator

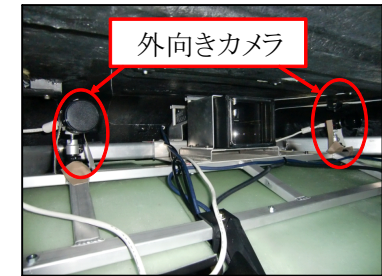


図 7 外向きカメラの設置の様子  
Fig.7 Appearance of the outward directed cameras installation

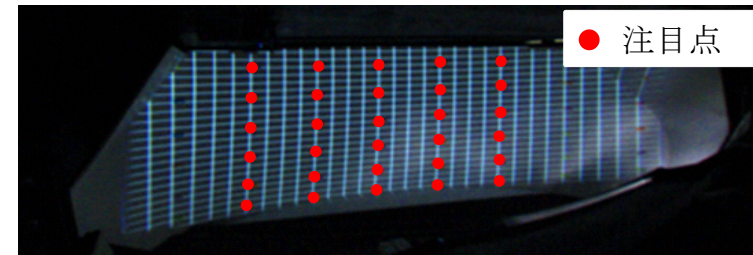


図 8 格子パターンと注目点  
Fig.8 Cross pattern and gaze point

回転角  $\psi_{yaw}$  を時系列にプロットしたものを図 10 に示す。縦軸が角度 ([rad]) を示し、横軸はフレームレートを示している。図 10 中に赤い丸で囲った箇所は被験者が注目点を注視していることを示しており、本実験ではその区間のことを停留区間と呼ぶ。また各停留区間ごとに  $\psi_{yaw}$  の平均値をとったものを図 11 に示す。他の取得データについても同様の処理を行い、各注目点に対する視線データとして用いる。

3.1 節で提案した手法により求める要素  $p_n (n = 1, 2, \dots, 12)$  は内向きカメラの座標系に統合させるための変換パラメータである。式 (1) より求められたパラメータと外向きカメラの座標値  $(C_x, C_y, C_z)$  より内向きカメラの座標系による  $(W_x, W_y, W_z)$  が得られる。

実験によって得られた要素  $p_n (n = 1, 2, \dots, 12)$  を示す。

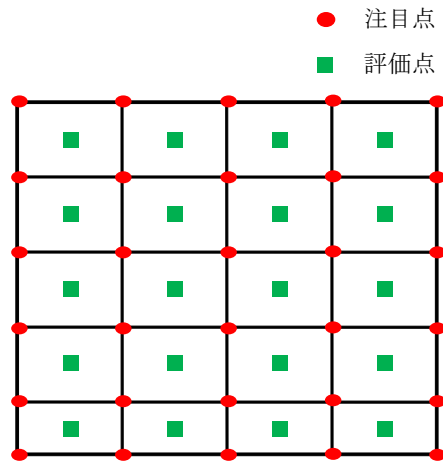


図 9 格子パターンの模式図  
Fig.9 Schematic of the cross pattern

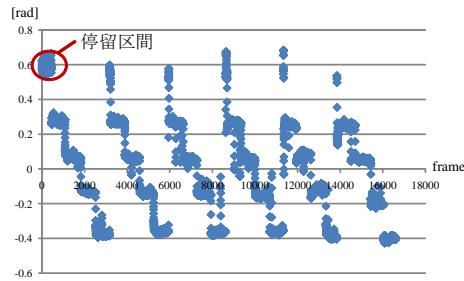


図 10 眼球回転角度  $\psi_{yaw}$   
Fig.10 Eyeball rotation angle  $\psi_{yaw}$

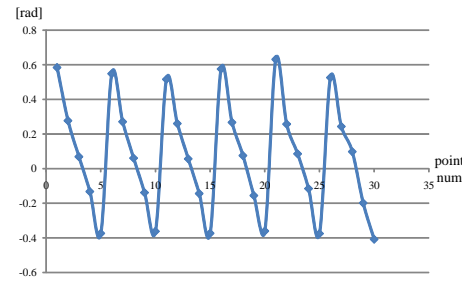


図 11 眼球回転角度  $\psi_{yaw}$  平均値  
Fig.11 Average of eyeball rotation angle  $\psi_{yaw}$

$$\begin{bmatrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \\ p_5 & p_6 & p_7 & p_8 \\ p_9 & p_{10} & p_{11} & p_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -547.6350 \\ 0 & -1.1109 & -0.0813 & 670.8574 \\ 0 & 0.0813 & -1.1109 & 1176.5284 \end{bmatrix} \quad (16)$$

変換前の座標から算出されるユークリッド距離の値と変換後の座標から算出されるユーク

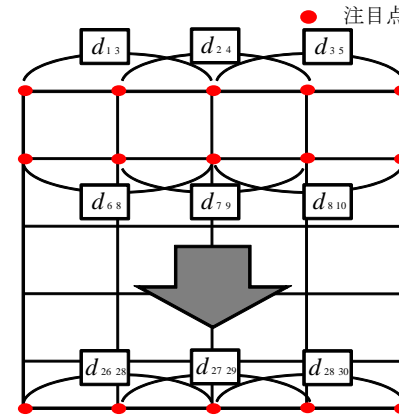


図 12 横方向評価  
Fig.12 Evaluation of horizontal distance

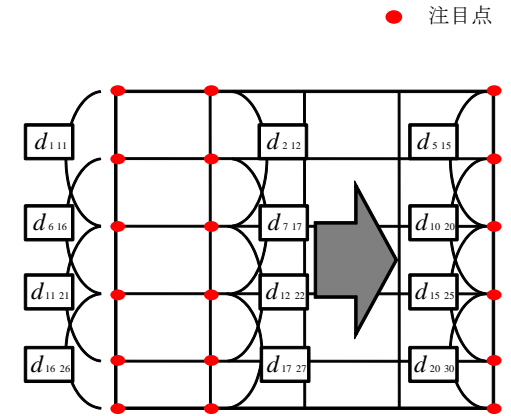


図 13 縦方向評価  
Fig.13 Evaluation of vertical distance

リッド距離を比較し、その誤差を評価する。評価方法としては図 12 に示すような、注目点の横方向に対する点同士の座標から算出されるユークリッド距離、また図 13 に示すような縦方向に対する点同士の座標から算出されるユークリッド距離を算出し、変換前の値を真値としたときの変換後の値の誤差を評価する。各方向に対する誤差の平均値および最大・最小値を表 1 に示す。

表 1 前後座標変換における距離評価  
Table 1 Distance evaluation between before and after transformation

	最大誤差 [mm]	最小誤差 [mm]	誤差平均 [mm]
縦方向誤差	9.2319	0.5801	4.1286
横方向誤差	15.6864	9.9957	13.9535

表 1 より、若干の誤差が生じている。この原因は、今回の実験では外向きカメラのカメラ座標系を  $X_c$  軸周りと平行移動のみに限定した仮定のためだと考えられる。本来、式 (16) で求めたパラメータの要素  $p_6, p_7$  の値は

$$p_6^2 + p_7^2 = 1 \quad (17)$$

の関係が成り立つはずであるが、本実験で求めたパラメータは

$$-1.1109^2 + 0.0813^2 = 1.2407 \quad (18)$$

と約 0.2407 の誤差が生じている。また式 (16) のパラメータは今回計 30 点の注目点によって求められたが、注目点の個数を増やすことで誤差が小さくなることが考えられる。また表 1 より縦方向距離に比べ横方向距離の誤差が大きく生じているのは、視線計測の精度に方向による差があることに起因していると考えられる。

#### 4.2 ドライバーの注視点の三次元推定精度評価

この実験では前節の実験で求めた円筒スクリーンの計測値の三点から求まる平面と視線データとの交点を求めることでドライバーの注視点を三次元的に推定したときの精度評価を行なう。図 9 の赤色で示す点は 4.1 節で用いた注目点 (計 30 点) を示し、またこの実験では注目点とは別に評価点 (計 20 点) を定義し、被験者にはその点を注目してもらうようにする。なお今回の評価点は図 9 に示すように、4 つの注目点の中央部分とする。

推定結果をプロットしたものを図 14 に示す。図中の線で示すのは内向きカメラ座標系における格子パターンであり、4.1 節の実験で計測した結果である。十印は評価点の真値であり、×印が提案手法による推定点である。なお真値は式 (16) と外向きカメラから得られた空間中の座標値  $(C_x, C_y, C_z)$  から求めた。表 2 に評価点の座標の真値と推定値の最大誤差、最小誤差、誤差平均および、ユークリッド距離の最大誤差、最小誤差、誤差平均を示す。またドライバーの眼球位置からスクリーンまでの距離の応じた誤差比率もあわせて示す。

表 2 評価点真値と推定値の誤差と誤差比率  
Table 2 Distance error and error ratio between true value and measurement

	最大誤差 [mm]	最小誤差 [mm]	誤差平均 [mm]	誤差比率 [%]
$W_x$	148.3942	12.7403	57.2257	3.5766
$W_y$	142.1106	17.4346	73.0625	4.5664
$W_z$	63.2111	1.3311	18.0260	1.1266
距離誤差	154.3452	53.2306	105.0913	6.5682

表 2 より  $W_x$  と  $W_y$  の最大誤差は共に約 150mm であり、最小誤差は共に約 15mm であった。誤差の原因として、式 (16) のカメラ外部パラメータの影響が本実験でも考えられる。また人間がある一点を注目したときに生じる固視微動や視線データを計測する視線計測システムにも誤差が生じるため表 2 のような誤差が生じている。

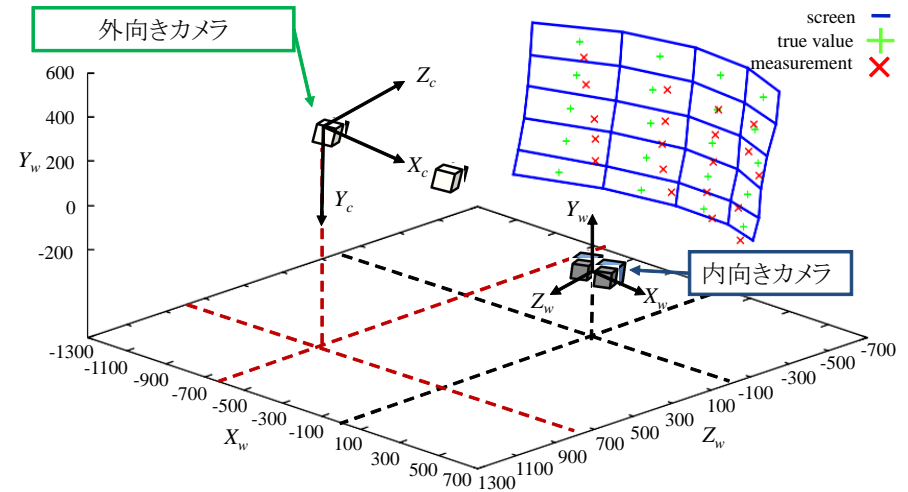


図 14 三次元推定結果

Fig. 14 Result of three-dimensional estimation of evaluation points

本実験で用いた視線計測システム (faceLAB) の視線計測データの誤差を別途平面スクリーンを対象にして評価した。これは SID(Screen Intersection Display) と呼ばれる機能で SID は平面スクリーンを対象として  $W_x$  と  $W_y$  を得ることができ、カメラと平面スクリーンとの距離は 1550mm と設定した。表 3 に SID による最大誤差、最小誤差、誤差平均、誤差比率を示す。

表 3 SID による誤差と誤差評価  
Table 3 Distance error and ratio of SID

	最大誤差 [mm]	最小誤差 [mm]	誤差平均 [mm]	誤差比率 [%]
$W_x$	146.1429	13.5913	65.1456	4.2029
$W_y$	93.6296	7.5980	40.5144	2.6138

表 3 から分かるように既存の二次元の計測システムにおいても  $W_x$  では約 4.2% の誤差比率、 $W_y$  では約 2.6% の誤差比率が生じることが分かった。三次元座標を推定している提案手法においても、 $W_x$  および  $W_y$  の誤差は同程度であり、提案手法の妥当性が伺える。

また表 2 より  $W_z$  の誤差は  $W_x$  と  $W_y$  に比べ小さい誤差で推定できていることが分かる。

距離誤差に関しても  $W_x$  と  $W_y$  の誤差が大きく影響しているものだと考えられるため、奥行き情報の  $W_z$  に関しては、比較的精度良く推定できていることがわかる。この結果より三次元空間中の平面と視直線との交点を求めることで、注視点を奥行き情報も加えて三次元的に推定できていると考えられる。

## 5. おわりに

本研究ではドライバー注視点を三次元的に推定するため、以下の二つに挙げられる事柄について検討した。

- 撮影領域の重複しない二組のステレオカメラ座標系の統合
- 視直線と平面の交点からのドライバー注視点の三次元推定

撮影領域の重複しないステレオカメラ座標系の統合では、ドライバーの視線データを介した手法で座標系の統合を行なった。実験では、二組のステレオカメラのカメラ座標系の軸に一部条件を与えたうえで統合を行なった。その結果、外向きカメラの座標系を内向きカメラの座標系に変換することができた。このことから、撮影領域が異なっても、その間で媒体するデータがあれば座標系の統合を行なうことができることが分かった。

ドライバー注視点の三次元推定では、三次元空間中の三点を含む平面とドライバーの視線データから求められる視直線との交点を注視点としたところ、注視点の奥行き情報は既存の二次元推定システムと同程度の精度となった。このことから本研究で提案した手法によりドライバー注視点を三次元的に推定できると考えられる。

また将来的にはこの技術により三次元的に推定したドライバーの注視点を時系列で見たときにドライバーの意識しているエリアがこれまでの二次元的な視野という概念ではなく、空間的に見る三次元の有効視野の概念になると考えている。

今後の課題としては、魚眼レンズの内部パラメータ校正の精度向上、魚眼ステレオ計測や注視点計測精度の向上、拘束条件のない内向き・外向きカメラの校正、遠領域の注視点計測などが挙げられる。

## 参 考 文 献

- 1) E.Hartman: Driver Vision Requirements, Society of Automotive Engineers, Technical Paper Series, Hillsdale, NJ: Erlbaum 700392, pp.629-630 (1970).
- 2) Mackwarth, N.H.: Ways of recording line of sight, In R.A.Monty and J.W.Senders(Ed.) Eye movement and psychological process. pp.173-178, Hillsdale, NJ:Erlbaum (1976).

- 3) 那倉 達哉, 入倉 隆: 疲労と有効視野の関係, 照明学会誌 89(11), pp.794-798 (2005).
- 4) 佐藤 美恵, 押切 省二, 長谷川 光司, 春日 正男, 阿山 みよし: カーブと直線区間における運転者の有効視野に関する一検討, 映像情報メディア学会誌, vol.59, no.8, pp.1215-1218 (2005).
- 5) Joceline Roge, Tbierry Pebayle, Aurelie Campagne, Alain Muzet: Useful Visual Field Reduction as a Function of Age and Risk of Accident in Simulated Car Driving, Investigative Ophthalmology & Visual Science, May 2005, vol.46, no.5 (2005).
- 6) 三浦 利章: 運転時の視覚的注意と安全性, 映像情報メディア学会誌, vol.61, no.12, pp.1689-1692 (2007).
- 7) 瀬谷安弘, 八木理, 中易秀敏: リアルタイム視線移動解析による運転作業時の有効視野計測, 電気学会研究会資料, MBE, 医用・生体工学研究会 1, pp.43-46 (2008).
- 8) 三浦 利章: 行動と視覚的注意 (1996).
- 9) George J. Andersen: Focused attention in three-dimensional space, Perception & Psychophysics, 47, 112-120 (1990).
- 10) 満上 育久, 浮田 宗伯, 木戸出正継: 視線情報を用いた注視点の3次元位置推定, 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU, 102(554), 1-6, (2003)
- 11) Zhengyou Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Trans.PAMI, Vol.22, No.11, pp.1330-1334 (2000).