社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

注視対象の位置関係を利用した車載視線計測システム自動較正の高度化

山城　賢二† 　出口　大輔† 　高橋　友和†,†† 　井手　一郎†
村瀬　洋† 　樋口　和則††† 　内藤　貴志†††

† 名古屋大学大学院情報科学研究科 〒 464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町
†† 岐阜聖徳学園大学経済情報学部 〒 500-8288 岐阜県岐阜市中鶉 1-38
††† （株）豊田中央研究所 〒 480-1192 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道 41-1
E-mail: †{yamashiro,ddeguchi,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし　交通事故の原因として脇見運転や安全不確認などがあり，これらを防ぐためにドライバの視線方向の利用が注目されている．正確な視線計測を行うには視線計測システムの較正が必要である．一般的には，指定した複数の基準点をユーザに注視させる較正作業によって較正が実現されるが，ユーザに負担がかかる．そこで，我々は運転中に視線計測システムの自動較正を実現する手法を提唱してきた．この手法は，従来は運転前に行う必要があった較正作業を省き，ドライバに意識させることなく，運転中に自動的に較正を実現する．具体的には，ルームミラーとサイドミラーを較正に使用する基準点とし，車線変更時の視線分布からミラー注視時の視線方向を推定することで較正を実現する．しかし，ミラー注視時の視線方向が正しく推定できていない場合への対応がなされていなかった．そこで，本稿では注視対象 3 点間の位置関係を利用した条件を設定し，推定方向が妥当な場合のみ較正を行うことを検討した．一般道走行時の 3 人のドライバの視線データを用いて実験を行い，提案手法の有効性を確認した．
キーワード　自動較正，視線計測システム，ドライバ，注視行動，視線

Improvement of Automatic Calibration of an In-vehicle Gaze Tracking System Using Positional Relation between Gaze Targets

Kenji YAMASHIRO†, Daisuke DEGUCHI†, Tomokazu TAKAHASHI†,††, Ichiro IDE†,
Hiroshi MURASE†, Kazunori HIGUCHI†††, and Takashi NAITO†††

† Graduate School of Information Science, Nagoya University, Nagoya-shi, Aichi, Japan
†† Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku Gakuen University, Gifu-shi, Gifu, Japan
††† Toyota Central Research & Development Laboratories, Inc., Aichi-gun, Aichi, Japan
E-mail: †{yamashiro,ddeguchi,ttakahashi,ide,murase}@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract　Many traffic accidents occur when a driver looks aside or fails to confirm the safety while driving. They could be prevented by using driver's gaze direction. To measure correct gaze directions, a calibration process is needed for a gaze tracking system. This is usually achieved by a process which makes a user gaze at specified reference points. However, this is a troublesome task for users. We have previously proposed a method for automatic calibration of an in-vehicle gaze tracking system. The method uses the rear-view and the side-view mirror positions as reference points for the calibration process and estimates the gaze directions at a time when the driver looks at the mirrors from gaze direction data during driving. This method, however, fails to achive accurate calibration when the method could not estimate them correctely. To overcome this problem, we propose a method using a condition based on the positionl relation between gaze targets. The calibration process is performed only when the estimated directions meet the condition. The effectiveness of the proposed method was demonstrated by experiments on three drivers' gaze direction data collected while actual driving.
Key words　Automatic calibration, Gaze tracking system, Driver, Gaze behavior, Gaze direction

1. はじめに

警察庁の調べによると，平成 20 年の交通事故死者数は 4,914 人であり，9 年連続の減少傾向にある [1]．しかし，交通事故の発生件数は約 74 万件，死傷者は約 91 万人と，依然として高い状態が続いており，交通事故削減のためにより一層の対策が必要とされている．交通事故の原因を見ると，安全不確認，脇見運転，漫然運転などが上位を占める．これらが原因の事故は，ドライバの視線方向を計測し，危険を警告することで事前に防止することが可能と考えられる．具体的には，ドライバが信号を見逃して交差点に進入しそうになった場合に警告をすることで，事故を未然に防止することができる．そのため，ドライバの視線計測を行うことは安全運転支援に非常に有用である．

一方，正確な視線計測を行うには，視線計測システムの較正が必要である．較正は，システムが算出した視線と実際の視線との間に存在するずれを補正するために行われる．ずれが発生するのは，眼球形状や顔特徴などの個人差が視線計測に影響を与えるためである．また，照明や姿勢変化などが視線計測時の画像処理に影響を与えることも原因である．

較正には方向が既知な複数の基準点と，その点をユーザが見た際の視線が必要となる．一般的には，指定した複数の基準点をユーザに順次注視させる較正作業を行い，得られた視線と基準点の方向の関係から較正用パラメータを算出することにより，較正が実現される．しかし，基準点を順次注視することは時間がかかるうえに，ユーザにとって非常にわずらわしい作業である．そのため，較正作業の簡略化を目指し，眼球形状モデルを用いることで基準点を減らす研究 [2] や，移動する基準点を使用した較正手法に関する研究 [3] などがある．しかしながら，これらの手法でもユーザが指定された点を見るという作業を伴うことには変わりがなく，ユーザに少なからず負担がかかる．また，ドライバの運転支援を考えた場合，運転中に基準点を注視してもらうことは困難かつ危険であるため，運転開始前に行わなければならない．しかし，運転開始前に視線計測システムの較正作業を毎回行うのは現実的ではない．

そこで，我々は運転中の注視行動に着目した視線計測システムの自動較正手法を提唱してきた [4] [5]．この手法は，従来は運転開始前に行う必要があった手間のかかる較正作業を省き，運転中にドライバに意識させることなく，自動的に較正を実現する．そのためのアプローチとして，運転中のドライバの自然な注視行動に着目し，運転中の視線分布を利用する．具体的には，ルームミラーと右サイドミラーを基準点とし，運転中のドライバの視線分布からミラー注視時の視線方向を推定することで較正を行う．しかしながら，ミラー注視時の視線方向が正しく推定できない場合には正しい較正が行われないという問題があった．そのため，本稿では較正に用いるミラーの位置関係を利用した条件を定め，推定方向がこの条件に対して妥当な場合のみ較正を実行することを検討した．

以降，第 2 節では提案手法の手順について説明する．第 3 節では実験を行い，提案手法の有効性を評価する．第 4 節では本研究のまとめと今後の課題について述べる．

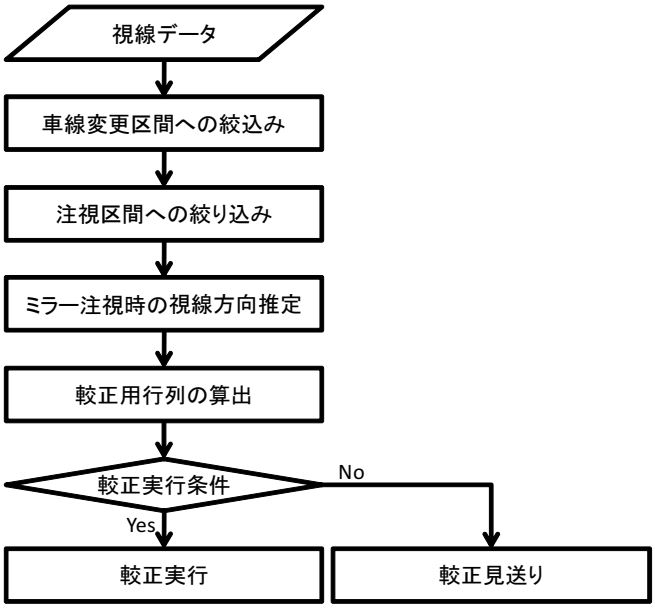

図 1　提案手法全体の流れ

2. 注視対象の位置関係を利用した車載視線計測システム自動較正

2.1 手法概要

本稿では，視線計測システムの自動較正手法を提案する．そのためのアプローチとして，運転中のドライバの自然な注視行動に着目し，運転中のドライバの視線分布を利用する．視線を計測する場合，従来は安全面の問題から運転開始前に視線計測システムの較正作業を行わなければならなかった．これに対して，提案手法では基準点としてルームミラーと右サイドミラーを使用し，運転中のドライバの視線分布からルームミラー，右サイドミラー注視時の視線方向を推定することにより自動較正を実現する．

提案手法が想定する状況，目的について述べる．提案手法では，較正されていない視線計測システムで計測されたドライバの視線データを入力とする．得られる視線データは水平方向の視線角度，垂直方向の視線角度である．較正されていないシステムで計測される視線と実際の正しい視線との間にはずれが存在する．そのずれを補正するための較正用パラメータを求め，それ以降に測定される視線を補正する．

提案手法の全体の流れを図 1 に示す．提案手法では，運転中のドライバの視線データのうち，左車線から右車線への車線変更前および車線変更中の視線データを用いる．これは，車線変更時には一般的にルームミラー，右サイドミラーを注視する頻度が増加するためである [6]．まず，視線の移動量から注視時の視線データのみに絞り込む．次に，絞り込まれた視線データ分布からミラー注視時の視線方向を推定する．得られた視線方向とミラー方向を用いて較正用行列を求める．ミラー注視時の視線方向が妥当であるための条件を定め，条件を満たす場合のみ，較正を実行する．以降，各処理について詳細を説明する．

図 5　事前確率分布の例

$$\mathbf{T}=\begin{pmatrix}1&0&t_x\\0&1&t_y\\0&0&1\end{pmatrix},\ \mathbf{S}=\begin{pmatrix}s&0&0\\0&s&0\\0&0&1\end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}=\begin{pmatrix}\cos\theta&\sin\theta&0\\-\sin\theta&\cos\theta&0\\0&0&1\end{pmatrix}$$

であり，t_x, t_y は平行移動パラメータ，s はスケールパラメータ，θ は回転パラメータである．そして，水平方向の最小値，最大値，垂直方向の最小値，最大値に囲まれる矩形領域を決定する．提案手法で用いる事前確率分布は，領域内で一様分布とし，それ以外の領域で 0 としたものである．図 5 に事前確率分布の例を示す．

EM アルゴリズムを用いて，事前確率分布 $p_k(x_n)$ を考慮した対数尤度（式 4）が最大となるパラメータを求める．

$$\sum_{n=1}^{N}\ln\left(\sum_{k=1}^{K}\pi_k\mathcal{N}(\boldsymbol{x}_n|\boldsymbol{\mu}_k,\boldsymbol{\Sigma}_k)p_k(\boldsymbol{x}_n)\right) \tag{4}$$

事前確率分布を考慮することで，事前確率分布が 0 となる位置に存在する外れ値が，推定に影響を与えることを防ぐことができる．そのため，推定精度が向上すると考えられる．

2.5　較正用行列の算出

計測される視線と実際の視線の間にはずれが存在する．このずれを修正するための較正用行列を算出する．提案手法では，計測される視線と実際の視線の間のずれは平行移動，拡大縮小，回転で近似的に補正可能であると仮定する．提案手法では，推定されたミラー注視時の視線方向と実際のミラー方向の関係から較正用行列を算出する．具体的には，式 5 から行列 $\mathbf{H}$ の 4 つの未知数 $\{w_1,...,w_4\}$ を最小 2 乗法を用いて求める．ただし，正面，ルームミラー，右サイドミラー注視時の推定視線方向を (x_f, y_f)，(x_r, x_r)，(x_s, y_s)，実際の正面，ルームミラー，右サイドミラー方向を (x'_f, y'_f)，(x'_r, y'_r)，(x'_s, y'_s) とする．

$$\begin{pmatrix}x'_f&x'_r&x'_s\\y'_f&y'_r&y'_s\\1&1&1\end{pmatrix}=\mathbf{H}\begin{pmatrix}x_f&x_r&x_s\\y_f&y_r&y_s\\1&1&1\end{pmatrix} \tag{5}$$

ただし，

$$\mathbf{H}=\begin{pmatrix}w_1&w_2&w_3\\-w_2&w_1&w_4\\0&0&1\end{pmatrix}$$

である．

2.6　較正実行条件

提案手法では，車線変更中はルームミラー，右サイドミラー，正面の 3 つの視線分布があると仮定しているが，実際にはそうならない場合も考えられる．例えば，ミラーを見ない場合やスピードメータなどを見る場合などがある．また，分布が 3 つ存在してもそれが正面，ルームミラー，右サイドミラーの分布に対応するとは限らない．基準点注視時の視線方向を正しく推定できない場合，それらを較正に用いると較正時の誤差は非常に大きくなる．そのため，各方向が正しく推定できているかを判断する必要がある．提案手法では，2 点以上の方向を推定できれば較正可能である．そのため，2 点以上の推定方向が妥当と判断され，採択された場合のみ較正を実行し，それ以外の場合は較正を次回に見送る．

各推定方向の採択基準として，推定方向の位置関係の妥当性を利用する．ルームミラー，右サイドミラーの正しい方向は頭部とミラー位置の関係から既知である．しかし，較正前の視線にはずれが含まれているため，ミラー注視時の視線方向は正しいミラー方向とは異なる．そのため，正しい方向に較正前のずれを考慮した推定方向の採択決定条件を設定する．

本研究では，正しい方向と較正前の視線方向の間のずれの大きさがある範囲に収まることを仮定する．具体的には，正しい方向と推定視線方向から算出した平行移動（t_x,t_y），スケール（s），回転（θ）パラメータがそれぞれ閾値（t'_x,t'_y,s',θ'）以内であれば推定方向が妥当であるとして採択する．

$$t'_x > |t_x|,\quad t'_y > |t_y|,\quad s' > |s-1|,\quad \theta' > |\theta| \tag{6}$$

一般に基準点が多いほど，較正精度が高くなる．そのため，まず 3 点の推定方向が条件を満たすかどうかを判定する．条件を満たす場合には，較正を実行する．満たさない場合は，続いて，2 点の推定方向について考える．具体的には，正面とルームミラー，正面と右サイドミラー，ルームミラーと右サイドミラーの 3 つの組である．これらの組についてそれぞれ条件を満たすかどうかを判定する．条件を満たす組があれば，その 2 点を用いて算出された較正用行列を用いて較正を実行する．満たさない場合は較正を次回に見送る．

3.　実験と考察

一般道を走行した際のドライバの視線データを用いて提案手法の有効性を評価した．まず，実験条件について述べ，続いてそれぞれの実験の概要と手順，結果を示し，個別に考察を行う．

3.1　実 験 条 件

本実験では，実際に一般道を自由に走行した際のドライバの視線データを使用した．被験者 3 人には，普通乗用車で一般道路を走行してもらった．ドライバの視線は SeeingMachines 製

図 10　スピードメータ方向に推定された例

非常に低くなった．この原因は，ミラーを見ていない車線変更があったことが原因である．ミラーを見ていない場合の視線分布から，ミラー注視時の視線方向推定を行うことは困難である．これに比べて，提案手法では 1 回分を使用した場合にも採択時の推定誤差を抑えることができた．これは，ミラーを見ていない場合には，較正実行条件によりその点を採択しないと判断できたためである．図 9 はルームミラーを見ていない場合の例である．この場合，ルームミラー推定方向は正面の分布付近に位置している．3 点と仮定した場合には採択条件を満たさない．そして，正面と右サイドミラーの 2 点と仮定した場合にのみ較正実行条件を満たし，推定正面方向，推定右サイドミラー方向の分布があると判断できた．同様に，右サイドミラーを見ていない場合にも正しく判断できた．また，図 10 はルームミラー方向がスピードメータ方向に推定された場合である．この場合もルームミラー推定方向が採択されず，正面と右サイドミラー方向のみ採択された．このように，提案手法を用いることで 2 点以上採択された場合には高い推定精度が得られた．以上より，提案手法の有効性が確認できた．

4. むすび

本稿では，視線計測システムの自動較正手法を提案した．提案手法は，ルームミラーと右サイドミラーを較正に使用する基準点とし，運転中の視線分布からルームミラー，右サイドミラー注視時の視線方向を推定し，較正を実現するものである．今回は特に推定方向の位置関係を利用した条件を設定し，推定された視線方向が妥当と判断される場合のみ，較正を行うことにより較正の精度向上を図った．

実験では，一般道を走行した際の 3 人のドライバの視線データを使用した．ミラー注視時の視線方向推定実験を行った結果，ルームミラー，右サイドミラーともに水平方向，垂直方向を誤差約 1 度の精度で推定でき，良好に推定が行えることを確認した．次に，車線変更回数によるミラー注視時の視線方向推定比較を行った結果，比較手法では回数が少ない場合に推定誤差が非常に大きい場合があるが，提案手法では較正実行条件を用いて正しく推定されたミラー注視時の視線方向を選択的に利用することにより，推定誤差を抑えることができた．

今後の課題は，基準点の追加（左サイドミラー，スピードメータ）及び，車線変更区間以外のデータの使用である．

謝辞　日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に深く感謝する．本研究の一部は，JST 戦略的創造研究推進事業 CREST および科学研究費補助金による．また，本研究では画像処理に MIST ライブラリ（http://mist.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/）を使用した．

文　献

[1] 警察庁交通局交通企画課, “平成 21 年中の交通事故死者数について,” http://www.npa.go.jp/toukei/kouki/0102_H21dead.pdf, February 2009.

[2] Takehiko Ohno and Naoki Mukawa, “A Free-head, Simple Calibration, Gaze Tracking System That Enables Gaze-Based Interaction,” Proc. 2004 Symposium on Eye Tracking Research (ETRA2004), pp.115–122, March 2004.

[3] 籔内勉, 宮元孝典, 山本哲也, 片渕典史, 中山丈二, 下倉健一朗, “FreeGaze を用いた視線追跡における自動キャリブレーション,” 信学技報, HIP2004-23, July 2004.

[4] 山城賢二, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 樋口和則, 内藤貴志, “ドライバの注視行動を利用した視線計測システムの自動校正,” 信学論（D）, vol.J92-D no.8, pp.1308–1316, August 2009.

[5] Kenji Yamashiro, Daisuke Deguchi, Tomokazu Takahashi, Ichiro Ide, Hiroshi Murase, Kazunori Higuchi and Takashi Naito, “Automatic Calibration of an In-vehicle Gaze Tracking System Using Driver’s Typical Gaze Behavior,” Proc. 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2009), pp.998–1003, June 2009.

[6] Dario D. Salvucci and Andrew Liu, “The Time Course of a Lane Change: Driver Control and Eye-Movement Behavior,” Transportation Research, part F, vol.5, no.2, pp.123–132, June 2002.

[7] 渋久奈保, 高橋友和, 井手一郎, 村瀬洋, 小島祥子, 高橋新, “車載レーザスキャナによる距離データマップの構築と高精度自車位置推定,” 信学論（D）, vol.J92-D, no.2, pp.215–225, February 2009.

[8] Oliver Pink, Frank Moosmann and Alexander Bachmann, “Visual Features for Vehicle Localization and Ego-Motion Estimation,” Proc. 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2009), pp.254–260, June 2009.

[9] A. P. Dempster, N. M. Laird and D. B. Rubin, “Maximum Likelihood from Incomplete Data via the EM Algorithm,” The Journal of the Royal Statistical Society, series B, vol.39, pp.1–38, 1977.

[10] Seeing Machines, “faceLAB,” http://www.seeingmachines.com/facelab.htm