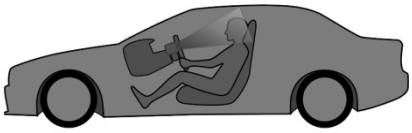
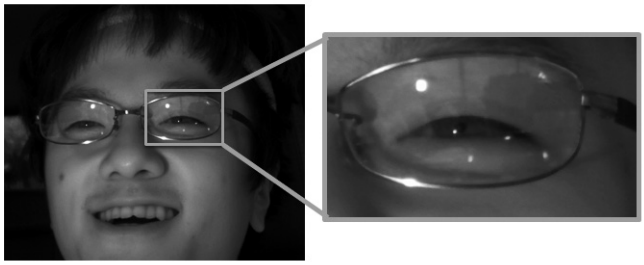
ドライバ状態推定に向けた視線検出技術の開発

Development of Gaze Detection Technology toward Driver's State Estimation

岡田直之 *Naoyuki OKADA*
杉江哲 *Akira SUGIE*
濱上斉 *Itsuki HAMAUE*
藤岡稔 *Minoru FUJIOKA*
山本晋 *Susumu YAMAMOTO*





要　旨

近年、自動車のアクセル・ブレーキ・ステアリング制御を伴う高度な安全支援システムや自動運転システムの開発が推進されている。自動運転システムでは、何らかの異常発生時等に自動運転が継続できない場合に、自動運転システムからドライバへ運転主体を切り替える必要がある。運転主体の切り替え時に、ドライバが運転の準備が出来ていなければ、危険な状態に陥る可能性があるため、システムはドライバの状態を常にモニタリングしておく必要がある。

そこで我々はドライバ状態をモニタリングするため、ドライバの視線情報を活用する方法を検討し、ドライバの顔領域のカメラ画像を処理することで視線方向を検出する手法を開発した。車載環境では、眼鏡に外界の風景や光が反射し画像として映り込み、検出性能へ悪影響を与えることが課題であった。この課題に対して、映り込んでいる領域内の輝度情報のデータを蓄積、活用する事で、車両走行におけるロバスト性を高めた視線検出アルゴリズムを確立した。

Abstract

In recent years, the development of advanced safety support systems and autonomous driving systems with the accelerator/brake/steering control for automobiles has been promoted. In the autonomous driving systems, in the event that the autonomous driving cannot be continued when an abnormal condition occurs, it is necessary to switch a subject of driving from the autonomous driving system to a driver. If the driver is not ready to drive an automobile when switching the subject of driving, there is a possibility of falling into a very dangerous state. Therefore, it is necessary for the system to always monitor a driver's state.

Accordingly, we considered a method of utilizing information on a driver's gaze in order to monitor the driver's state, and have developed a method of detecting a gaze direction by processing camera images of a driver's face region. In the in-vehicle environment, there was a problem in that the external scenery or light is reflected on glasses as an image, whereby exerting an adverse effect on the detection performance. With respect to this problem, we have established the gaze detection algorithm which improves the robustness during vehicle traveling, by accumulating and utilizing data on luminance information within a region in which the external scenery or light is reflected.

1 はじめに

2014年警察庁のまとめによると、日本国内の交通事故は、死者数4113人、負傷者数71万1374人となっており、近年減少傾向にあるが、この数年の死者数は、ゆるやかな減少となっている[1) 2)]（**図1**）。

さらに、交通事故の原因に目を向けてみると、死亡事故の多くが、漫然運転や脇見運転などの安全運転義務違反であり、運転中のドライバの人為的ミスに起因している（**図2** 日本国内における法令違反別（第1当事者）死亡事故発生件数（2014年））。これら人為的ミスに起因する交通事故に対して、自動緊急ブレーキ等の運転支援システムや、より高度な自動運転システムの開発が推進されている。

これらのシステムでは車速や操舵量などの自車両制御状況、ミリ波レーダーやカメラでの自車両周辺の車両との距離などをセンシングした自車両周辺状況を使って車両を制御する。我々はさらに、ドライバの状況をモニタリングする技術を向上させることが、より賢くユーザーフレンドリーな運転支援・自動運転システムの実現に重要であると考え、車両走行環境におけるドライバ状態推定に向けた視線検出技術の開発に取組んだ。

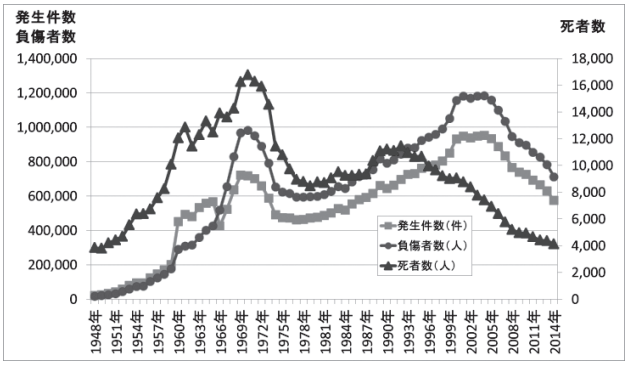


図1　日本国内における各年の交通死亡者数推移
Fig.1 Changes in Number of Traffic Accident Fatalities in Japan in Each Year

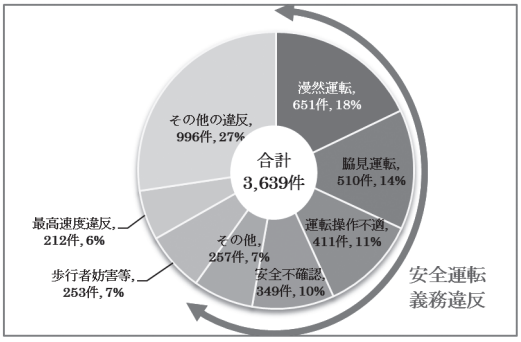


図2　日本国内における法令違反別（第1当事者）死亡事故発生件数（2014年）
Fig.2 Number of Fatal Accidents in Japan Classified by Types of Legal Violations (First Party)(in 2014)

2 開発の背景

2.1 運転支援システムおよび自動運転システムの課題

運転支援システムや自動運転システムでは、アクセル・ブレーキ等の車両制御情報、センサや通信機器によって得

表1　SAEインターナショナル（Society of Automotive Engineers International）による自動化レベル
Table 1 Autonomy Levels Classified by Society of Automotive Engineers International

Lv.	呼称	定義	運転操作の実行主体	走行環境のモニタリング	運転操作のバックアップ主体	システム能力	BASTの分類	NHTSAの分類
0	手動	ドライバが常時全ての運転操作を行う。	ドライバ	ドライバ	ドライバ	—	Driver Only	0
1	補助	運転支援システムが走行環境に応じた加速･操舵･制御いずれかを行うとともに、システムが補助をしていない部分の運転操作をドライバが行う。	ドライバ+システム	ドライバ	ドライバ	一部の運転モード	Assisted	1
2	部分的な自動化	運転支援システムが走行環境に応じた加速･操舵･制御を行うとともに、システムが補助をしていない部分の運転操作をドライバが行う。	システム	ドライバ	ドライバ	一部の運転モード	Partially Automated	2
3	条件付自動化	システムからの運転操作切り替え要請にドライバは適切に応じるという条件のもと、特定の運転モードにおいて自動化された運転システムが車両の運転操作を行う。	システム	システム	ドライバ	一部の運転モード	Highly Automated	3
4	高度な自動化	システムからの運転操作切り替え要請にドライバが適切に応じなかった場合でも、特定の運転モードにおいて自動化された運転システムが車両の運転操作を行う。	システム	システム	システム	一部の運転モード	Fully Automated	3/4
5	完全自動化	ドライバでも対応可能ないかなる道路や走行環境条件のもとでも、自動化された運転システムが常時車両の運転操作を行う。	システム	システム	システム	全ての運転モード	—	

られた車両の位置等の自車両周辺情報を使用し、運転操作の一部もしくは全てが自動化される。自動化の度合いに応じて**表1**に示すようにレベルが定義されている。この表において運転主体がドライバとシステム間で切り替わる場合に課題が存在する。

例えば、レベル1、レベル2に該当するシステムでは、ドライバにとって意図しない操作介入をする可能性がある。ACC（Adaptive Cruise Control：車間制御機能付きクルーズコントロール）を例にとると、ドライバが想定する以上の加速や、ドライバの期待よりも減速が遅いなどの制御が行われることがある。そのタイミングや頻度によってはかえって危険な状態に陥ったり、ドライバが煩わしく感じたりする。また、ドライバの感じ方は、前方を見ているか否かと言ったドライバの状態によっても変化すると考えられる。これに対して、ドライバの状態をセンシングし、自車や車外の状態だけではなく、ドライバの状態に合わせた最適な支援を行うことが必要であると考える。

また、レベル3に該当する自動運転システムにおいて、通常時はドライバが運転操作をする必要はないが、システムを構成する機器の故障やシステムエラー、急激な気象変化や道路環境変化といった外部環境変化により、自動運転の継続ができなくなる可能性がある。この場合はシステムからドライバへ運転を引き継ぐ必要が生じる。その際にドライバが運転できる状態でなければ、運転を引き継いだ途端にドライバが運転操作を誤り、人為的ミスとは異なる危険な状態に陥ることが懸念される。このため、自動運転システムは、ドライバが運転できる状態かどうかを常にモニタリングした上で、ドライバへの引き継ぎの可否判断を実施する必要があると考える。

ドライバの状態をモニタリングする為の手段として、運転に必要な五感の中で最も重要な役割を担う視覚に注目した。

2.2 視線を用いたドライバモニタ

ドライバが運転できる状態とは、「認知・判断・操作」の3つの運転行動がいずれも実施可能ということである。これら3つの運転行動が実施可能かをそれぞれ判断できるドライバモニタリングが必要とされる。「認知・判断・操作」の中で、最初に行われる認知はとりわけ重要であり、認知が行えることでその後に判断や操作が可能となる。運転行動における認知については、その大部分を視覚に依存していると言われている。現に、運転中に音楽を聴いたり飲み物を飲んだり視覚以外の行動は出来るが、目隠しといった視覚を使わずに運転する事は不可能である。視覚での認知は主としてドライバが何を見ているかということである。対象物に注目して視ることでその物体を認識する。

ドライバの顔画像を用いたドライバモニタリングシステムは既に実用化されているものがあり、ドライバの目蓋が開いているかどうか、顔が前を向いているかどうかの検出が可能である。しかし、ドライバの顔が正面方向であっても、カーナビゲーション画面等を見ることが可能であり、この場合にドライバは運転に必要な車両前方等の情報を正しく認知できていない。また、**図3**は高速道路を正常に運転しているドライバの視線方向を取得し、前方画像に合わせてプロットしたものである。ドライバが安全に運転している時は車両の進行方向を中心として集中する傾向にあることが分かる。これらのことからドライバの視線を検出する事が、ドライバモニタリングのひとつとして重要だと考えた。

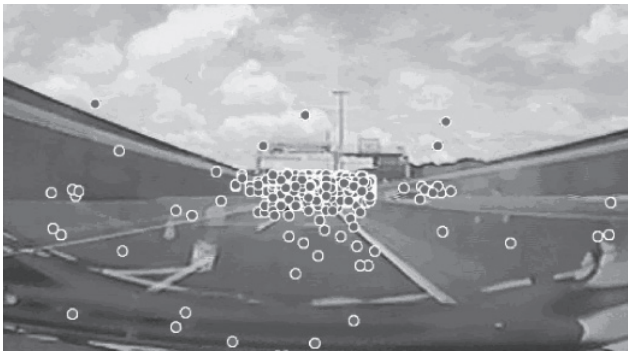


図3　高速道路を走行中の視線分布（30秒間）
Fig.3 Gaze Distributions during Traveling on Expressway (for 30 Seconds)

3 視線検知の要素技術

3.1 人の目のしくみ

まず、人間の眼球の構造を**図4**に示す。一般的に人間の視野角は180～190度程度であるが、視野の端の方になると、詳細な物の認識は出来ない。文字や対象物の詳細部分の認識などが可能な範囲は視野の内1～2度程度と非常に狭い。そのため、**図5**で示すように、対象物が何であるかをはっきりと認識するために眼球を回転させ、1～2度の範囲を対象物に合わせる。1～2度の範囲を対象物に合わせることがいわゆる視線であり、眼球の向きと視線には密接な関係があるため、眼球の向きを観測することが視線の検知に繋がる。

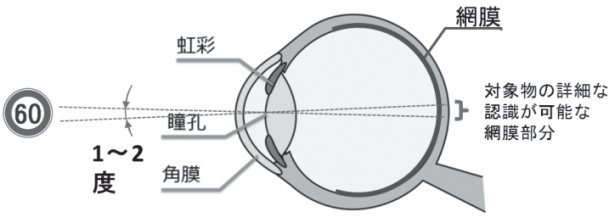


図4　人間の眼球の構造
Fig.4 Structure of Human Eyeball

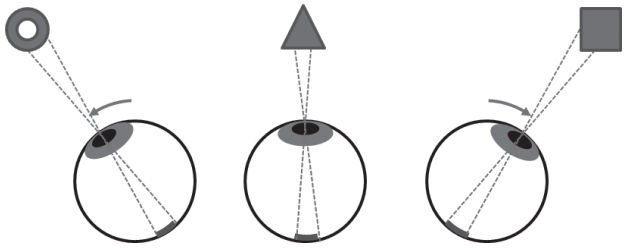


図5　ものを見る時の眼球の動き
Fig.5 Movements of Eyeball when Watching Something

3.2 視線検出方法

図6のように、ドライバ正面方向付近にカメラと点光源を設置する。この時、カメラ、点光源とも近赤外光領域のものを用いることで、実際の画像は、**図7**のように映る。点光源からの光は、角膜表面で反射し、白い点として映る。この角膜反射は球形状の眼球の表面における反射であるため、**図8**のように眼球が回転したとしても、常に同じ位置にある。このため角膜反射の位置を基準とし、これに対して瞳孔がどの位置にあるかで、眼球の3次元的な向きを求めることが出来る。

実際は、眼球が完全な球ではないうえ、構造、角膜形状等に個人差があるため、ドライバが実際に注視している方向と、その時求めた眼球の向きとを各個人毎に事前に対応付けることが必要となる。この対応付けによりドライバの視線方向をより高い精度で検出することが可能となる。

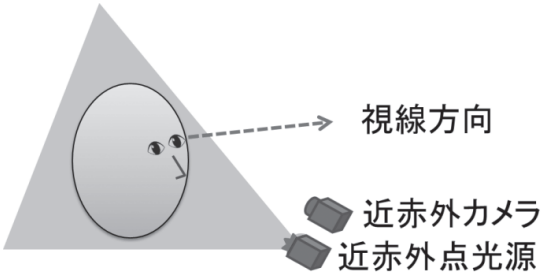


図6　点光源を用いた視線検出の仕組み
Fig.6 6 Gaze Detection Mechanism Using Point Light Source

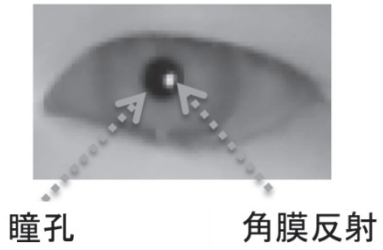


図7　近赤外カメラによる目領域画像
Fig.7 Eye Region Image Captured by Near Infrared Camera

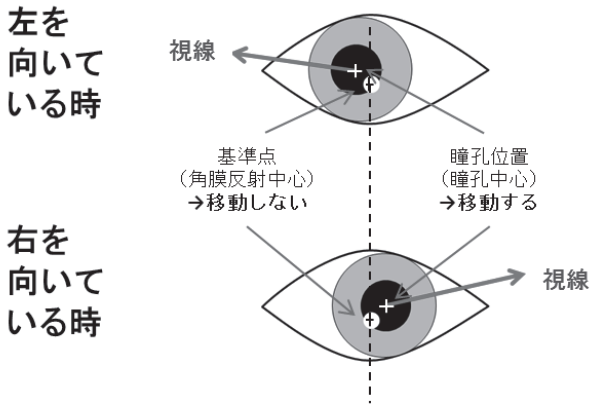


図8　瞳孔と角膜反射の位置関係
Fig.8 Positional Relationships between Pupil and Cornea Reflection

4 車載化への取り組み

4.1 車両走行における外乱光による影響

ドライバの顔画像から瞳孔・角膜反射を検出するには、目の領域を抽出した画像のうち、瞳孔が最も輝度が低く、角膜反射が最も輝度が高いという特徴を用いる。瞳孔・角膜反射は、それぞれ輝度が低い円形の領域、輝度が高い円形の領域を探索することで、瞳孔と角膜反射の位置を割り出す。

しかし、車両走行環境においては外部からの光が外乱となる。特にドライバが眼鏡を掛けている場合、**図9**のように眼鏡レンズ面に外の風景等周辺物が映り込む事がある。この時、映り込みが瞳孔付近に重なると、瞳孔の検出が困難になる。これは、映り込んだ光のため、本来最も低い瞳孔部分の輝度が高くなり、他の部分の輝度が相対的に低くなってしまうため、誤って他の部分を瞳孔として検出してしまうからである（**図10**）。このような状況は外光の強い晴天時や、車両周囲に建物などの構造物が多い都市部など比較的一般的な場面で多く発生するため、対策が必要不可欠である。

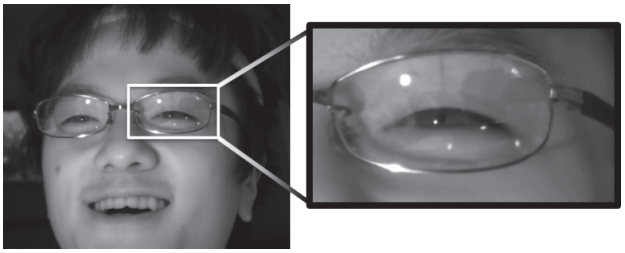


図9　周辺物が眼鏡レンズ面に映り込んだ状態
Fig.9 State in Which Peripheral Objects are Reflected on Lens Surfaces of Glasses

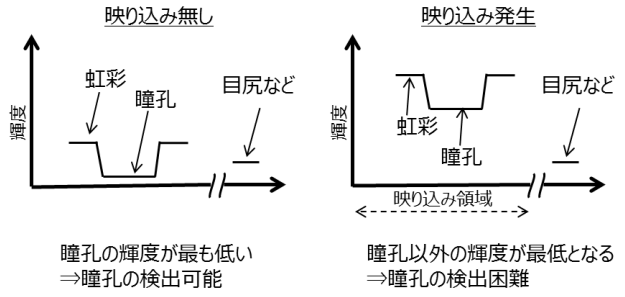


図10　眼鏡への映り込み発生による目領域の輝度変化
Fig.10 Luminance Changes of Eye Region Due to Reflections on Glasses

4.2 車両走行におけるロバスト性向上

眼鏡レンズ面への映り込みは片目のみの場合と両目ともに発生する場合とがある。このことを利用して移り込み対策を検討した[3]。映り込みが発生しているかどうかは目領域画像全体の輝度情報や輝度の変化によって判定できる。以下映り込み発生範囲が片目の場合と両目の場合とに分けて瞳孔の検出処理を述べる。

4.2.1 片目のみ映り込み発生の場合の瞳孔位置推定とデータ蓄積

映り込みが片方の目のみに発生している場合であっても、発生していない方の瞳孔と角膜反射は検出でき、視線方向が算出できる。一方、映り込みが発生している方の角膜反射も発光強度の強い光源を用いているため、映り込みよりも十分に輝度が高くなり、検出可能である。また、左右それぞれにおける瞳孔と角膜反射との位置関係と径はほぼ等しい。そこで、映り込みの発生していない目の瞳孔と角膜反射の位置関係と映り込みが発生している目の角膜反射位置から、映り込みが発生している目の瞳孔位置を推定することができる（**図11**）。

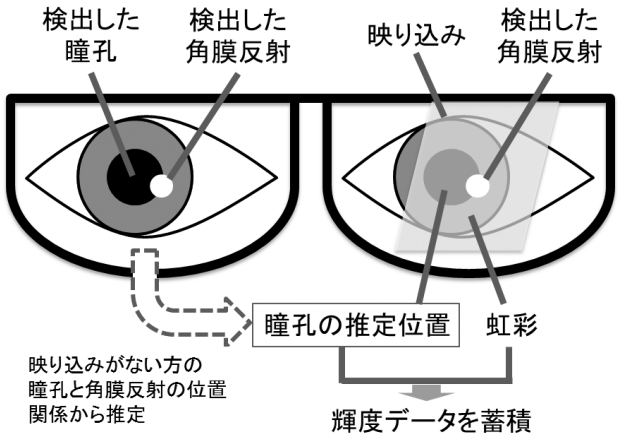


図11　片目映り込み発生時の瞳孔推定
Fig.11 Pupil Estimation when Reflected on One Eye

そして、映り込みのある目において、推定された瞳孔と瞳孔の外側にある虹彩の輝度のデータを蓄積する。このデータは次項で述べる両目とも映り込みが発生している場合の瞳孔推定に用いる。

4.2.2 両目とも映り込み発生の場合

両目に映り込みが生じている場合は、蓄積させておいた瞳孔と虹彩の輝度のデータを用いて、下記手順で瞳孔位置の割り出しを行う。

（1）左右それぞれの角膜反射位置を割り出し、虹彩のおおまかな位置を仮定する。
（2）虹彩と仮定した画素近傍において、蓄積してある輝度の相関関係から対応する瞳孔輝度を探索し、合致した画素を瞳孔の候補とする。
（3）これらの候補郡の内、円形となっている領域を瞳孔として検出する。

この処理で検出された瞳孔と角膜反射との位置関係から目の向きを求めることが出来る（**図12**）。

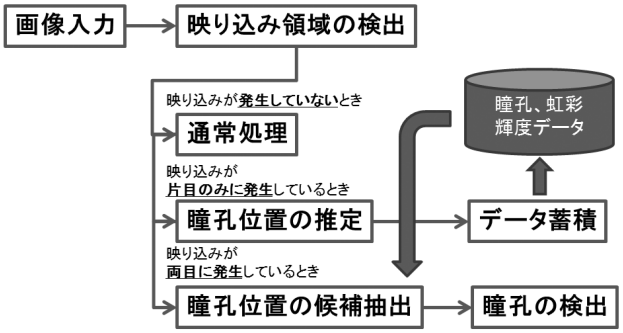


図12　映り込み発生時の瞳孔検出
Fig.12 Pupil Detection when Reflections Occur

4.3 評価

今回開発したアルゴリズムを我々が開発してきた瞳孔検出アルゴリズムに導入し、映り込み発生時の瞳孔検出性能について、導入効果を評価した。なお、導入前のアルゴリズムは、先述の、瞳孔と角膜反射の輝度特徴と、瞳孔が円形である特徴を用いて検出を行う従来技術（4.1節参照）を基本とし、映り込みが発生していない場合の眼鏡装着時や、周囲の明るさ変化などに頑健性の高いものである。

片目、もしくは両目に強く映り込みが発生している画像を収集し、これらの画像を入力としたときの瞳孔検出結果を**図13**に示す。アルゴリズム導入前は被験者5名の平均10.7%であったのに対し、当アルゴリズム導入後では平均89.7%であった。この結果から、当アルゴリズムの映り込みへの有効性を確認できた。

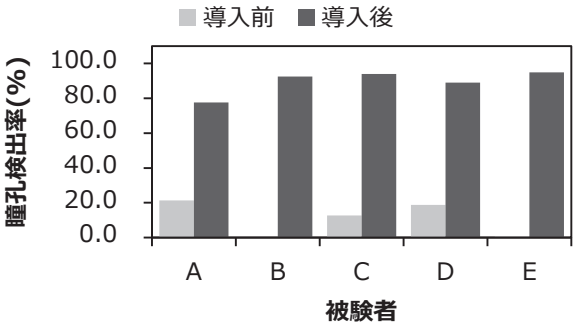


図13　開発アルゴリズム導入前後の瞳孔検出率比較
Fig.13 Comparisons of Pupil Detection Rates before and after Introducing Developed Algorithm

導入前のアルゴリズムは、映り込みが発生しなかった方の目画像、もしくは一部の映り込みによって目領域の輝度値が一様に上昇したような画像に対しては、頑健性を発揮し正しく検出できた。ところが、目領域の中で輝度の変化がばらつくまばらな映り込みに対しては、正しく検出できなかった。

一方、新たに開発したアルゴリズム導入後は、瞳孔だけでなく局所的に虹彩の輝度との関係をとらえているため、まばらな映り込み発生時にも瞳孔の検出が可能であった。しかしながら、眼鏡レンズ面に発生した小さな光源反射などに角膜反射の検出を誤った場合に、その付近で瞳孔を探索するために（4.2.2項参照）瞳孔を正しく検出できなかった。この誤検出については、角膜反射と瞳孔の候補を抽出し、左右の目での候補の位置関係や過去の検出結果との整合などから総合的に判断することで、正しく検出できるようになると考えられる。

5　おわりに

我々は、今後の自動車社会における安全、快適の実現のために必須であるドライバモニタリング、特にその中でも重要となる視線検出について車載化に取組んだ。車載環境特有の課題の具体化および課題に対する解決策の開発・評価を行うことで、耐外光性能を高めた視線検出技術を確立することができた。

視線検出技術では、ドライバの行動を直接的にセンシングできる。ドライバの視認行動が運転に必要な情報の大部分を占めるという事から、視線行動の分析により、従来は推定不可能であった、弱い眠気、運転に集中していない漫然状態、運転負荷といった様々なドライバの状態推定が可能になると考える。これらドライバ状態の推定結果を用いる事で、ドライバ状態に合わせた運転支援やサービス提供、自動運転レベル3におけるシステムからドライバへの運転の引継ぎに活用することができると考える。

今後、視線検出技術や、これを活用したドライバ状態推定技術を高度化させることで、Vehicle-ICTを構築し、より豊かな車社会を実現していく。

6　謝　辞

最後に、本技術開発にご協力頂いた、株式会社富士通研究所の中島主任研究員および関係者の皆様に心より感謝申し上げます。

参考文献

1）警察庁交通局，“平成26年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について”，2014.
2）内閣府，“平成27年版交通安全白書”，2015.
3）吉岡 隆宏，中島 哲，小田切 淳一，冨森 英樹，福井 琢，“眼鏡着用時における環境条件にロバストな瞳孔検出”，著：映像情報メディア学会技術報告，一般社団法人映像情報メディア学会，2014, pp. 37-39.

Vehicle-ICTは富士通の商標です。
記載した製品名等の固有名詞は、各社の商標または登録商標です。

筆者紹介

岡田　直之
（おかだ　なおゆき）
AS技術本部
センシングシステム開発室

杉江　哲
（すぎえ　あきら）
AS技術本部
センシングシステム開発室

濱上　斉
（はまうえ　いつき）
先行開発企画部
システム開発室

藤岡　稔
（ふじおか　みのる）
AS技術本部
センシングシステム開発室

山本　晋
（やまもと　すすむ）
先行開発企画部
システム開発室