

6. ドライバ個性に着目した社会共生型予防安全支援に関する研究

機械工学系 教授 章 忠, 准教授 三宅 哲夫, 客員准教授 今村 孝

大都市と異なり地方都市にとって、自動車は重要な移動手段である。また、高齢者ドライバの急増、安全性や環境性など運転に求められる要素の多様化に伴い、自動車側の運転支援能力も高度化・多様化しつつある。そのため自動車の持つさまざまなリスクと社会生活との両立・共生が不可欠である。

本研究ではドライバの個性を情報・数値化する技術を通じ、社会や歩行者に対して安全な運転の実現、多様化するドライバの運転能力の平準化を目指した新たな運転支援のあり方について研究を行ってきた。本報告では、その基礎技術として開発を進めてきた技術課題を、6-1に示す「ドライバ行動計測技術」、6-2に示す「ドライバ内部状態推定技術」の2点に集約し、本事業5か年間の研究成果を報告する。ドライバ行動計測技術としては、顔画像を用いた表情変化や眼球運動、ハンドルの把持行動・操舵行動、の各行動情報計測技術を開発するとともに、これらの行動情報と車両挙動とを統合するドライブレコーダの開発を行った。また、ドライバ内部状態推定技術としては、前掲の行動計測技術にもとづき直接計測が困難な、ドライバの眠気、運転への集中度、運転行動意図に関する計測・推定技術の開発を行った。

6-1 ドライバ行動計測技術

(1) はじめに

近年、安価な電子パーツの普及に伴い、多くのドライブレコーダ（DR）が開発・市販されるようになってきた。これらのドライブレコーダは、主に、事故やヒヤリハットが発生した時のドライバ挙動である急ブレーキや急旋回をトリガとして、その前後の映像を車両前方に向けたカメラによって記録する、イベント記録型 DR や、運転中の全ての情報を記録する常時記録型 DR である。近年の自動車の IT 化に伴い、車両内部のさまざまな状態・挙動の電子・情報化が進むとともに、GPS（Global Positioning System）を用いた車両位置や加速度センサによる車両の加減速が車室内の機器やセンサをつなぐ CAN（Car Area Network）により情報化・記録されるようになってきている。近年ではこのような車両内外の情報化が進み、これを活用した運転支援システムの開発・実用化も進められている。

これらの車両搭載センサの計測の対象は、一般には、車外の環境である、道路・白線、前方の車両、周辺の歩行者などである。これに対し、本研究室では、特に車室内のドライバの行動情報を対象としたセンシングに注力し、これらを既存のナビゲーションやレコーダと連動させることで、車両挙動とドライバ挙動の統合的な計測の実現を目指した。これにより、車両や提示情報の制御をドライバの状態に応じて適応的に変化させることができれば、ドライバの認知的・心理的な負担の軽減とこれによる安全運転支援の実現が期待できる。

本節では、これらドライバ計測の基礎技術の開発状況として、眠気や車外情報への注意に関連する眼球運動や表情などの顔画像計測手法、ハンドル操作に関わる腕部運動や把持力などの物理量計測手法、および、これらを統合的に収録するドライブレコーダの開発状況について報告する。

(2) 眼球運動や表情を検出する顔画像計測手法

交通事故の主な原因のひとつは居眠り運転であり、その前兆として生じる運転中の注意・意識レベルの低下が危険要因であることが近年の研究で明らかになっている。このような眠気の早期検出手法の開発需要は高く、また近年のカメラの小型化・高精度化の実現により、その実現性も高まってきている。本研究室においても、単一のカメラ画像から得られる顔の正面映像より、視線方向を検出するインタフェース技術を開発してきており、その応用によって眠気の早期検出の実現を目指してきた。ここで提案するシステム構成概要を図 6-1-1 に示す。

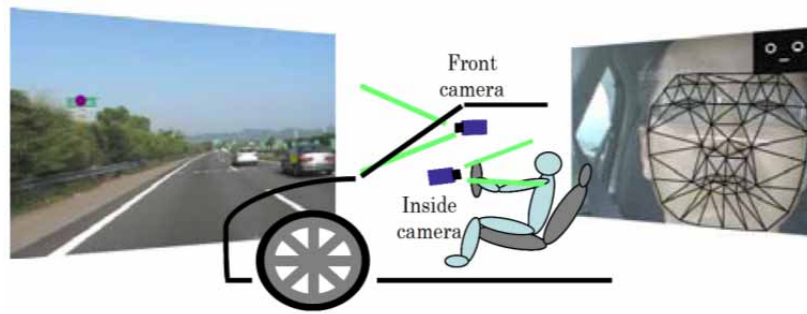
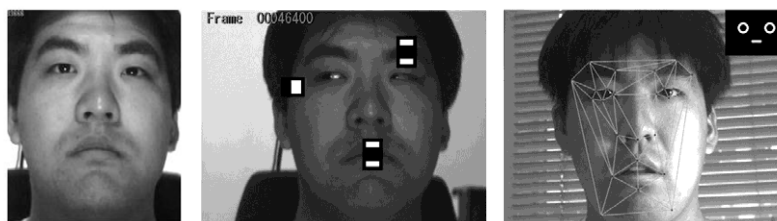


図 6-1-1 カメラを用いた画像計測システム

このシステムは、ドライバ計測用の1台のカメラと、車両前方を監視するもう1台のカメラで構成される。凹凸や動きのある顔部を計測する方法としては、2台以上のカメラを用いる方法も見られるが、本システムでは画像処理技術と頭部と眼球の運動モデルを用いることで、ドライバ計測を1台のみで実現している。一方、車両前方を監視するカメラから得られる周辺情報と総合的に処理・解析することで、運転中のドライバの注意が向けられる対象などを把握することも可能となり、これによって実現した研究成果としては運転集中度の分析（6-1参照）等がある。

本システムにおける、顔画像解析の流れを図 6-1-2 に示す。ドライバの正面から単一のカメラで取得した画像を入力として、まずその画像中から人物の顔を識別する。これにはHarr-Like 特徴量を用い、目、眉などの輝度パターンにもとづく顔部位の検出を行う。次にここで識別された顔画像に対して、顔部位の特徴点間をメッシュ状につないだ Active Appearance Model (AAM) を生成し顔画像に適用する。これにより顔全体の姿勢情報および各顔部位の変位情報を取得することが可能となり、以降の処理は眼球運動や表情など処理対象ごとの個別処理を行う。



顔画像取得

顔識別

AAM生成

個別処理

図 6-1-2 顔画像解析の流れ

このような顔画像解析より得られる、ドライバの非接触計測情報の例を以下に示す。

図 6-1-2 の処理より得られた顔画像のうち、眼球部の黒目・白目の領域変化に着目することで得られる情報をここでは眼球運動と総称する。眼球運動の解析においては、図 6-1-3 に示すような頭部内における眼球の幾何学的な配置モデル、標準的な眼球直径、眼球内で曲率の異なる眼球と角膜（黒目球）の合形成状モデルを用いる。また、各眼球から注視する対象物との間に十分な距離があることを条件とし、左右各眼球からの視線の平行性などの各仮定・標準化を適用する。

これにより、ある対象物に対する注視の有無の判定に加え、図 6-1-4 に示すような注視点や注視方向を標準偏差 $1.1 \sim 1.3[\text{deg}]$ の精度で推定が可能となった。また、眼球部の撮影解像度を向上させることで、注視対象の急激な移動に追従する高速眼球運動（サッケード）の分析も可能となる。図 6-1-5 は眼球運動に伴い発生し、眼部周辺から接触計測可能な生体電気信号（EOG）と画像解析によって、それぞれサッケードを測定した結果であり、非常に高い相関性が得られていることが確認できる。

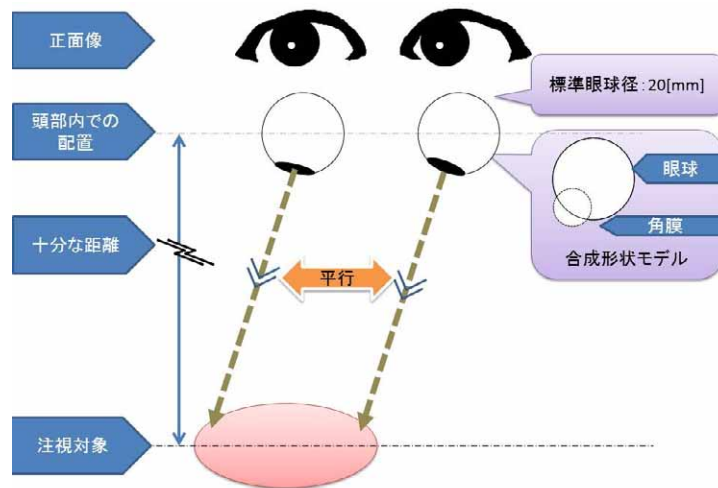


図 6-1-3 眼球運動計測に用いる眼球やその構造のモデル

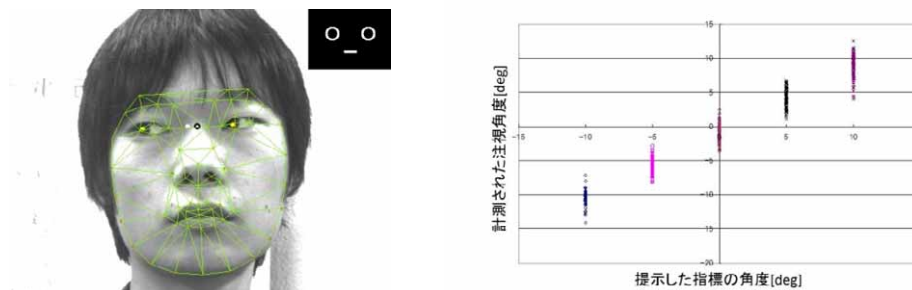


図 6-1-4 画像計測による注視方向の計測結果

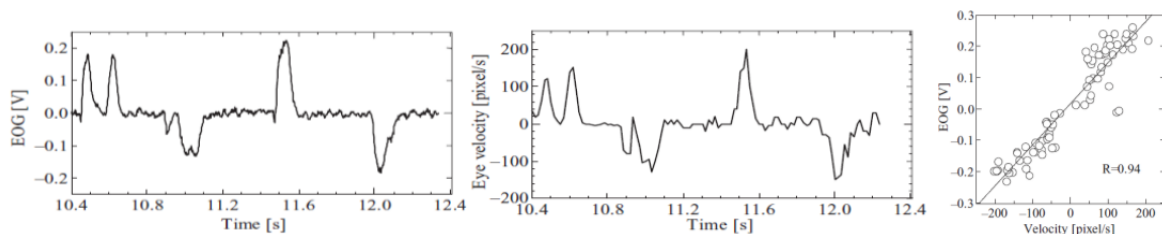


図 6-1-5 生体電気信号計測と画像計測による高速眼球運動の取得結果の比較

(3) ハンドル操作を対象とした把持・運転姿勢計測

前項で示した画像を用いたドライバの非接触計測に加え、侵襲性の低い計測手法を用いたドライバの接触計測も試みた。本研究では、ドライバが運転時に素手（もしくはこれに近い形）で握る必然性のある車室内デバイスとして、ハンドル（ステアリングホイール）をセンサ化する方法を提案し、図 6-1-6（左図）に示すような計測装置を考案した。この計測装置には、ハンドルの円形の把持部を 12 等分した各箇所について、円形状の面側および円周外側（一部は内側）の 2 点ずつの計 24 点、およびハンドルのスポーク（回転中心と円周を接続する部位）に 4 点の計 28 点の小型圧力センサを配置してある。また、センサ配置・配線の後、通常のハンドルと同様の皮革加工を施し、外観上および触感として通常のハンドルと違和感のないものとしている。

図 6-1-6（右図）にはこの計測例として、ハンドルを把持する手指の状態を、圧力センサ値の比から推定した結果を示す。また圧力の大きさから、図 6-1-7 のような運転姿勢の推定も試みている。本システムでは把持行動の計測に加え、把持箇所の特定が可能となることから、小型化した生体センサを併用することで、手のひらからの体温や発汗量の直接計測への応用が期待できる。

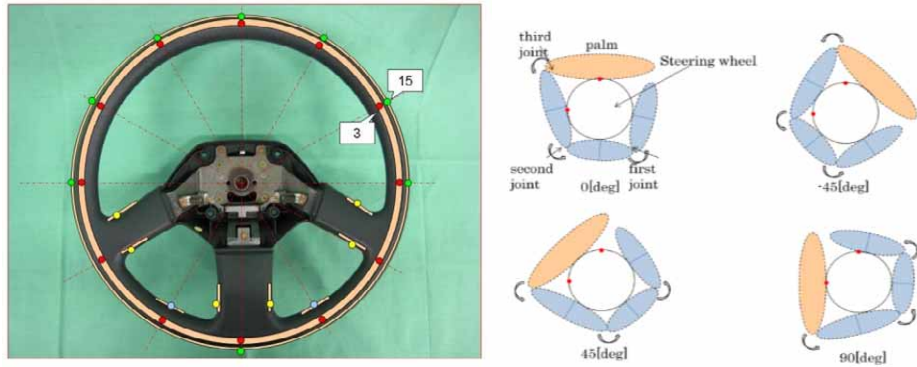


図 6-1-6 ハンドル内蔵型圧力センサの外観と手指位置の推定

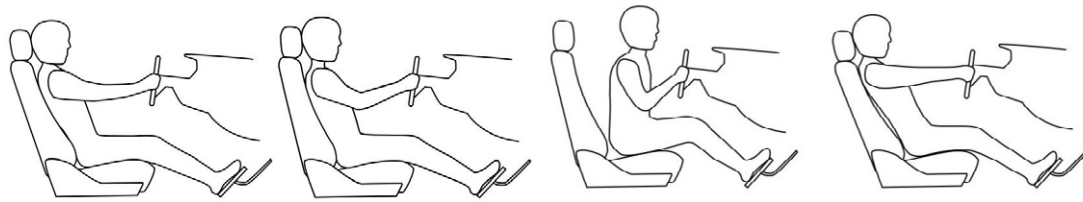


図 6-1-7 把持圧力変化により推定可能な運転時姿勢の変化

（４）加速度センサを用いた動作点計測と動作特徴の抽出

自動車運転時の行動は、運転装置（ハンドル、アクセル、ブレーキ）の操作量に加え、車室内の周辺装置（カーナビゲーション、オーディオ、空調など）の操作、または、飲食などのその他の行動と多岐にわたる。装置の操作は、各装置の動作・挙動や前出の CAN から取得可能であるが、そのほかの行動の定量計測は難しい。その反面、これらの周辺行動から、運転や周辺状況に対するドライバの注意・意識分配を把握することは、ドライバと運転支援装置の車両制御に対する寄与・優先度を制御し、相互の依存性のバランスを確保する上で重要である。

一般には、空間内の人の挙動計測には、モーションキャプチャと呼ばれる全身運動計測が用いられるが、車室内での利用は現実的ではない。そこで、運転を阻害しない程度の小型センサによって、身体の特定位位の運動（加速度）を計測し、これにもとづく運動予測・モデル化を実現することで、モーションキャプチャに相当する計測の実現を目指した。本研究で提案する計測環境を図 6-1-8 に示す。ドライバは、両手首にリストバンドを用いて小型の加速度センサを装着し、無線によりその時系列データを計測する。この加速度を軌道アトラクタによってモデル化・分類することによって、一連の動作からの特定の動作の特徴抽出や、動作の周期性の変化を捉えることが可能となっている。

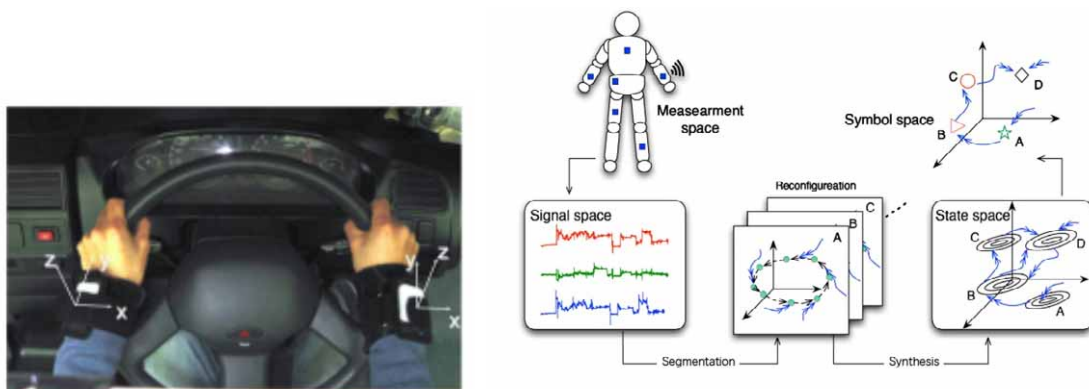


図 6-1-8 小型加速度センサと軌道アトラクタによる動作特徴の抽出

(5) 常時記録型ドライブレコーダの構築

前項までの各計測データと車室内・外の映像データを同期収録することを目的に、本研究では図 6-1-9 に示すドライブレコーダを設計・試作した。本レコーダでは、ドライバの運転動作情報として、2台のカメラと加速度センサ、GPS センサの3種類とし、それらを時刻同期させて記録する。カメラの解像度およびフレームレートは従来の画像処理研究にもとづき 1024×768[pixel], 30[fps]とした。また、加速度センサと GPS センサは計測用パーソナルコンピュータ (PC) と Bluetooth 無線通信により記録する。データの保存には耐震性の高い SSD (Solid State Disk) を複数用い、RAID ユニットの用いて 1[TB] の容量を確保した。

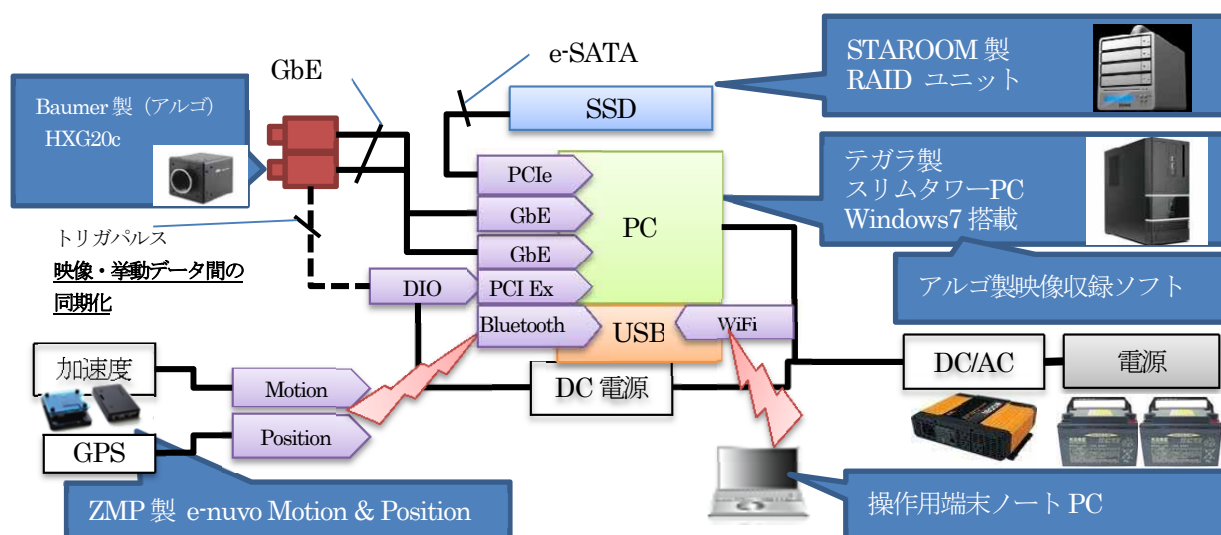


図 6-1-9 常時記録型ドライブレコーダの構成

試作したドライブレコーダについて、本学所有の公用車を実験車両として計測実験を行い、図 6-1-10 に示す車両の高さ方向の加速度、車両前方映像のほか、GPS による位置情報、ドライバ顔画像が同期収録可能であることを確認した。

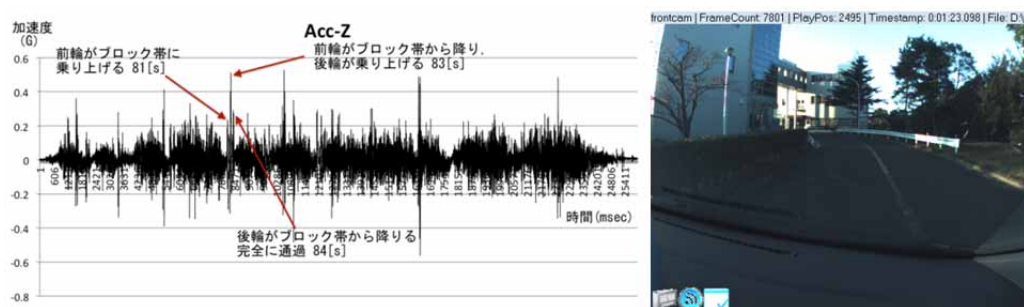


図 6-1-10 試作したドライブレコーダによる走行実験時の加速度・車両前方映像

(章 忠, 三宅 哲夫, 今村 孝, 藤本 準, Ahmad Fathullah Bin Rahim, 松永 惇, 松本 卓也, 竹内 優斗, 岩本 拓馬, 秋月 拓磨, 佐々木 大慶, 古市 平)

6-2 ドライバ内部状態推定技術

(1) はじめに

6-1 で示したように、運転時の周辺環境やドライバ行動の多くは、カメラやセンサとそれら情報を処理する計測システムによって定量化が可能となってきた。一方で、交通事故の要因となる「眠気」や「ぼんやり」、あるいは運転時の「あせり」「いらいら」などの心理状況の分析、ドライバの行動意図の理解も重要となっている。例えば、近年実用化の進む先進安全装置 (ブレーキ支援, 巡航支

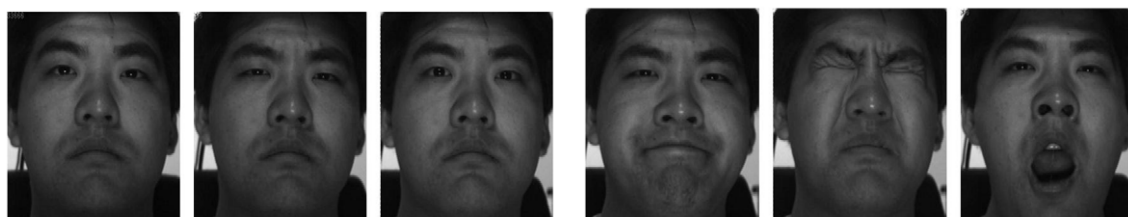
援、車線維持など)は、行動や環境情報の分析によって動作の開始を判断し、支援を行うが、この判断は必ずしもドライバの意図を反映するものとは限らない。場合によっては、ドライバの判断や操作に対して競合・相異となることで、支援システムに対する不信感を招いたり、あるいは、過剰な支援を行うことで、ドライバが支援システム(あるいは自身の運転能力)を過信したりする、支援システムとドライバとの不整合が生じる恐れがある。

本節では、前節のドライバ計測の基礎技術に立脚し、眠気や漫然度を定量化する手法、および、ドライバの運転行動からその意図を推定する手法の各開発状況について報告する。

(2) 眼球運動と表情変化を用いた入眠時期推定

ドライバの眠気は、交通事故要因の上位に位置するものの一つであり、ドライバの感覚器官を鈍感にし、注意力の散漫、判断力の減衰を引き起こす。いくつかの眠気防止に関わる装置が実用化されているが、瞼の閉じた時間や首の傾きなど、眠気の発生に伴う身体行動を判定材料としている。これらは、厳密には眠気の発生後に生じるもので、より予防的な判定を行うためには、眠気の初期(あるいは発生前)にその予兆を捉えることが重要である。

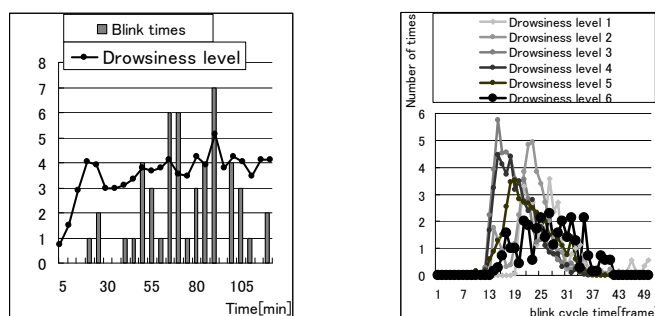
本研究では、前節に示した眼部および表情の検出結果のうち、瞼の動きと表情変化に着目し、覚醒のための努力を表す独特の表情である、覚醒努力表情を分析し、早期の眠気検出を試みた。図 6-2-1 には、分析の対象とした6表情を示す。このような表情を認識する従来手法では、個人差に対応するために平常時の表情を標準値として、各表情との差異を求めるものが多いが、標準値の取得が困難・煩雑となる問題点がある。そこで各表情間の遷移・変化に寄与する顔の部位の変化量を定量化し、ニューラルネットワークを用いた学習・認識するシステムを構築し、標準値を必要としない識別システムを構築した。



(a) 平常 (b) 眉間をよせる (c) 目を見開く (d) 口を動かす (e) 強い瞬き (f) 欠伸

図 6-2-1 ドライバ表情の例

また、被験者実験を通じて、瞼の動き(閉眼時間と瞬きの周期)と各表情の遷移パターンを分析するために、被験者の自己申告による眠気のレベルと分析結果の比較実験をおこなった。この結果、図 6-2-2 に示すような、15[frame]以下の瞬き周期が頻出することと、これに伴う「強く目をつぶる」「目を見開く」などの覚醒努力表情が得られることが、眠気の予兆として情報として利用可能なことを確認した。



(a) 閉眼時間と目視の眠気レベル (b) 瞬き周期の変化

図 6-2-2 瞬きと眠気レベルの関係解析結果

（３）ファジィ推論を用いた運転集中度の評価

前項と同様に、前節のドライバの視線方向検出技術に立脚した研究として、ファジィ推論による運転集中度の定量化を試みた。ファジィ推論とは、定量的に規定できない「あいまいさ」をルール条件や結論に記述できる推論方式である。本研究では、ドライバの視線と注視対象との距離、およびドライバの視線と走行している車線の前方遠点との距離を判定条件として、各判定条件に相当する運転集中度を出力するものとした。特に、計測されるドライバの視野角のほかにも有効視野を図 6-2-3 のように考慮することで、単純な注視対象との一致ではなく、運転中の視線変動を考慮するものとした。

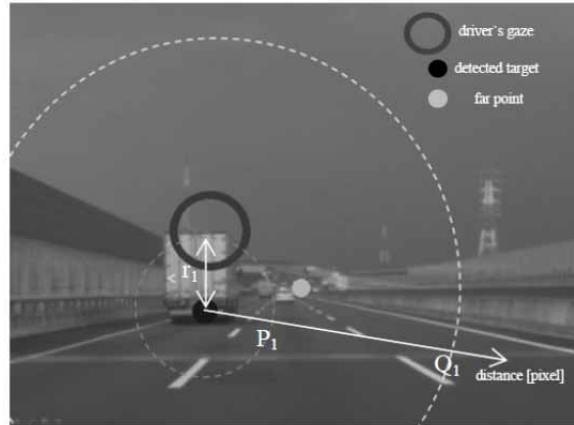


図 6-2-3 視野角等の変数の定義と有効視野との関係

このシステムの妥当性を検証するために、ドライビングシミュレータを用いて、通常運転と運転中に Q&A 方式の副次タスクを付与した運転をそれぞれ実施し、ファジィ推論結果を図 6-2-4 のように比較した。図の左 2 点が通常運転、右 2 点が副次タスク付の運転によるものであり、副次タスクを付与した図の網掛け部分において、運転集中度の低下が確認できた。さらに、この情報に対して、図 6-2-5 に示すように瞬きの変化率が運転集中度の変化と関連性の高い情報であることを明らかにした。

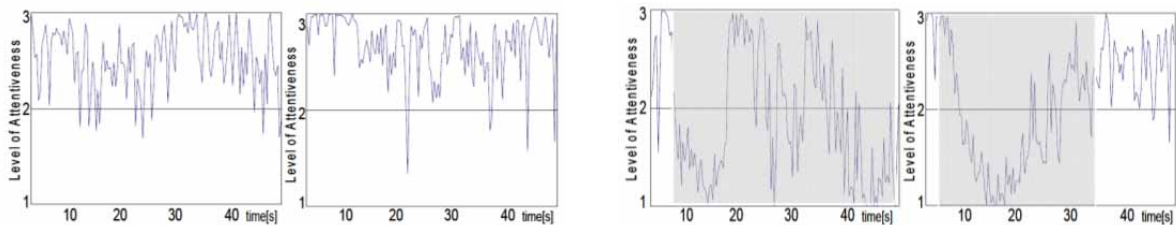


図 6-2-4 視野角等の変数の定義と有効視野との関係

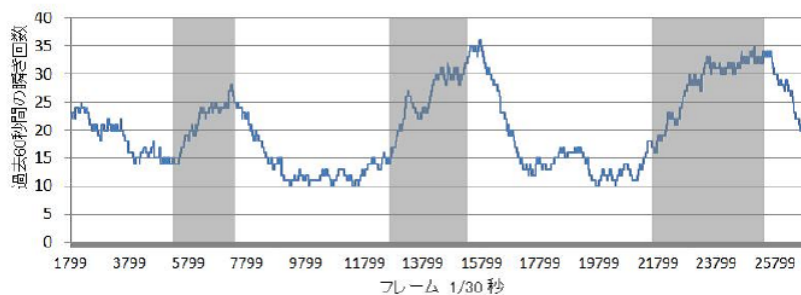


図 6-2-5 副次タスクの発生と瞬き回数との関係

（４）ドライビングシミュレータを用いた運転行動意図推定

前出のとおり、種々の運転支援システムの開発・実用化が進んでいるが、ドライバ意図を考慮した運転支援システムは未だ実用化に至っていない。近い将来における運転支援システムあるいは自動運転システムにおける、システムの価値や信頼性の低下を防止し、より安全に支援システムを運用する

ための基礎技術として、パターンマッチング手法を用いたドライバの運転行動意図の推定に関する研究を進めてきた。

本研究ではドライバが交通規則を遵守することを前提に、ドライバを取り巻く走行環境を制御することによって、ドライバの意図を誘導する実験を行う。この実験によりドライバを誘導する所定の意図を、推定すべき意図の真値と仮定することで、パターンマッチング手法を用いた意図推定精度の検証を行った。また、このドライバ意図推定をリアルタイムで実現するシステムを構築し、その有効性を検証した。本研究で対象とするドライバ意図とは、ドライバが今まさにしている運転に関わる動作のうち「停止・加速・走行・減速・左折・右折」とした。

本システムの構築には、Forum8 社製の UC-win/Road 9.0.0 を用い、図 6-2-6 に示すような 3 方向にスクリーンを配置したドライビングシミュレータを構成した。



図 6-2-6 本研究で構築した
ドライビングシミュレータ装置

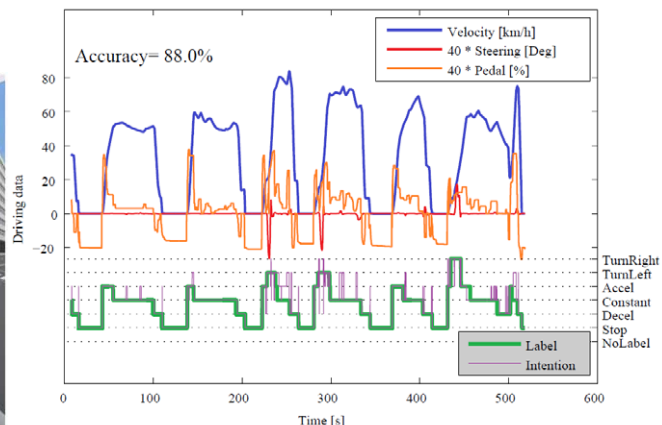


図 6-2-7 被験者を対象とした
意図推定結果

シミュレータが提示する走行環境内には、「視認した信号が赤であれば停止に至る」など、自動車運転における基本的な交通規則の遵守を前提に、信号や周辺車両の交通量などの環境制御量を配置した。これにより、被験者は通常どおりの運転と違和感なく、所定の運転行動意図へと誘導されるようにした。シミュレータシステムでは、約 500[s]・10,000 点の運転・走行データ（ハンドル等の操作量、および車両の速度や位置）を取得し、運転行動を分類する意図ラベルを分析・パターン化する。次に、速度・加速度・ステアリング角度・ペダル操作量の各値を 4 次元の学習データとして、停止・加速・走行・減速・左折・右折の意図ラベル毎に計 6 つの混合正規分布（GMM : Gaussian Mixture Models）を構築する。この混合正規分布モデルを用いることで、平均で 83.3 %の精度で意図推定ができることを被験者実験により確認した。この結果を図 6-2-7 に示す。さらに、図 6-2-8 に示すように、ドライビングシミュレーションの演算と併行して、ドライバの意図推定を行うシステムを構築することで、被験者ドライバが運転をしながら、逐次各時点での意図を推定するリアルタイム推定システムを構築した。

そして、リアルタイム推定システムを用いて、シミュレーション映像を提示するスクリーンのサイズや操作用のハンドルなどのサイズの異なる環境での実験を行った。本実験により、環境制御量とその提示方法によってドライバの運転行動への変化が生じるものと仮定し、その変化を運転行動意図の推定精度の変化として捉えた。実験では 6 名の被験者を 3 名ずつに分割し、図 6-2-8 にあるような、前方と左右を幅・高 2m 角のスクリーンで囲まれたシミュレータ A (Wide) と、24 インチ液晶モニタ 3 面を用いたシミュレータ B (Narrow) を各グループの運転行動意図ラベルの学習用にそれぞれ適用した。その後、すべての被験者に、シミュレータ A/B それぞれでの運転シミュレーションと意図推定を実施し、意図推定精度を算出した。さらに実験後の被験者にリアルタイム意図推定の様子をビデオで提示し、自身の運転を振り返りながら、運転行動意図推定の合致率の自己評価を依頼した。その結果、図 6-2-9 に示すように、いずれのグループにおいても、学習用に適用したシミュレータにお

ける推定精度が、学習用に適用しなかったシミュレータにおける推定精度を上回る結果となった。このことから、環境制御量とその提示方法、さらにこれによる推定精度の関連性が明らかとなり、想定した運転行動意図の付与が十分になされていることが確認できた。

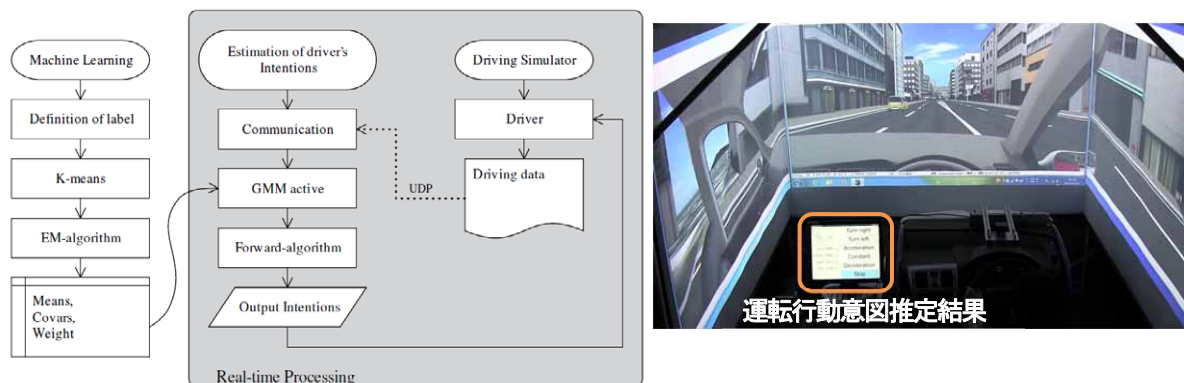
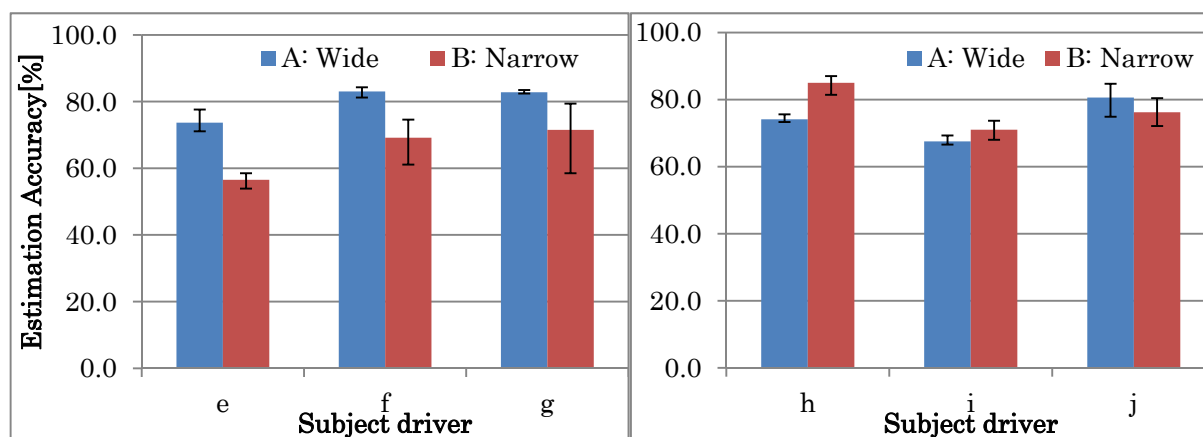


図 6-2-8 リアルタイム意図推定システムのフローチャートと実行結果



A を学習に用いたグループ

B を学習に用いたグループ

図 6-2-9 リアルタイム意図推定を用いた走行環境提示効果の評価

(章 忠, 三宅 哲夫, 今村 孝,

藤本 準, 松本 卓也, 福山 育也, Elvin Tiong Chew Lun, 荻 智成, 浅川 祐樹)

6-3 おわりに

本研究では、工学的な計測技術に立脚した自動車の運転支援システムのための基礎技術として、ドライバ計測技術とドライバ内部状態推定技術を構築した。カメラやコンピュータなどの基本要素の性能の向上、低価格化により、高精度・大容量の情報収集が可能となるとともに、これらの情報から、ヒトの判断に近いドライバ状態評価を実現しうる基礎技術を模索した。これにより、直接計測が困難な、眠気、疲労、意図などを定量化するための基本システムとその開発方向性を示した。今後とも、これらのドライバ計測システムの性能向上、実験・実証を進め、安全運転支援はもとより、自動車の有効活用に寄与する技術の実現に向けて研究を継続する所存である。

(章 忠, 三宅 哲夫, 今村 孝)