

特集 運転者の視覚認知機能の解明とモデル化の研究*

Analysis of Visual Cognitive Functions while Driving and an Approach to Driver Modeling

津留直彦
Naohiko TSURU

伊佐治和美
Kazuyoshi ISAJI

金子 弘
Hiroshi KANEKO

土居俊一
Shun'ichi DOI

Drivers realize safe driving through performing cognition, judgment, and operation sequences appropriately. The probability that drivers will be involved in traffic accidents increases when important visual information is missed in the visual cognition phase. In this research, we clarify two visual cognitive functions that are related to traffic accidents. The first function is represented by the performance index (KdB) for approach and alienation and the second function is represented by the dynamic visual field. A conceptual driver behavioral model will be proposed using this new performance index KdB as the index strongly reflects driver visual inputs.

Key words: Visual cognitive functions, Performance index for approach and alienation, Dynamic visual field, Rear-end collision, Driver model

1. はじめに

政府内閣で構成する中央交通安全対策会議は、第8次交通安全基本計画において2010年の交通事故死者数の目標を5600人以下とする方向で検討している。また交通政策審議会技術安全ワーキンググループによれば、2010年以降は現在の衝突安全を中心とした対策効果が飽和状態に近づくため2015年までには予防安全対策を中心とする新技術が主になると方向性を提示している。¹⁾

ドライバが運転の際に獲得する情報のうち80%以上は視覚情報と言われている。また財団法人交通事故総合分析センター（以下ITARDA）の分析による1997年の300件の事故調査事例における交通事故にみられるミスの特徴を見てみると、A当事者については認知段階でのミスが一番多く、²⁾ 事故を防ぐには、まず危険の兆候に対する認知能力を向上させるのが有効であることを示している（Fig. 1）。

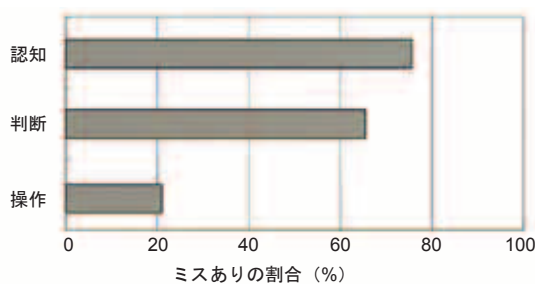


Fig. 1 Rate of drivers' mistakes

認知段階でのミスが一番多くなっている。複合のミスもカウントしている。

なお、A当事者（A当）とは、その事故のきっかけとなるエラーを犯した当事者とし、相手側をB当事者（B当）と呼ぶ。

交通事故を引き起こす原因を追究するためにはドライバの視覚認知機能を把握することが重要であり、その結果に基づく適切な評価指標を用いたドライバモデルを構築し、最終的に効果的な安全運転支援システムへつなげることが重要である。

2. 視覚認知機能と事故発生メカニズム

自動車運転においてドライバは認知・判断・操作を適切に繰り返すことによって安全運転を実現している。そのため多くの情報量を獲得する視覚認知のフェーズにおいて何らかの原因で情報欠落があると事故につながる確率が高くなる。安全運転に必要な情報を得るべき視覚機能として重要なものにFig. 2に示す「接近離間検出」と「動体検出」があげられる。

接近離間検出とは、たとえば追従走行時の前車あるいは右折時の対向車との距離・速度感を中心視で感ずるものであり、この機能の低下により追突事故や右直事故につながることになる。追突事故や右直事故において追従走行時の前車あるいは右折時の対向車との距離・速度感を喪失する要因として以下のものが考えられる。

- (1) 明るさ・コントラストあるいは雨・霧等により、前車あるいは対向車の輪郭が分かりづらい。
- (2) 自転車や二輪車等の被視認性が悪い対象物である。
- (3) 視覚機能そのものの衰えによるもの。

*（社）計測自動制御学会の了解を得て、「計測と制御」Vol.45 No.8（2006年8月号）より転載

	視覚認知機能	安全運転に必要な機能	代表的な事故事例
① 前	接近離間検出	対象物の距離/速度	距離・速度感機能 ・追突 ・右直
② 横	動体検出 ↓ 認識	危険に気付く ↓ 対象物の認識	動体視野範囲 ・出会い頭 ・歩行者横断

Fig. 2 Visual functions for safe driving

接近離間検出は前車との距離・速度感を中心視野で感じるものであり、動体検出は歩行者などの飛び出しを周辺視野で気付く機能である。

一方、動体検出とは周辺視野部で周囲の歩行者や自転車等の危険対象物の動きに気づき認識できるかという機能である。具体的にはドライバの中心視に向かってくる危険を検出できるかどうかの機能である。この機能の低下により出会い頭事故や、歩行者や自転車などの飛び出し事故につながることになる。

3. 接近離間検出

3.1 危険の感じ方

接近離間検出では直進走行時に先行車が、あるいは右折時に対向車が自車に対して相対的に近づいてくるときにドライバは危険と認識し、その中でも速い速度で接近してくるときはより危険と感じ、逆に自車から相対的に遠ざかっていくときは危険を感じていないと考えられる。ではドライバは先行車あるいは対向車の接近・離間をどのように感じているのであろうか。一例として先行車に対し追従走行している場面を考えてみる。ドライバは先行車の接近・離間に対し、先行車を「質点」「幅・線」あるいは「面積」という視覚的感覚量として捉え、これらのいずれかの変化を感じていると考えられる。質点は向かってくるボールのようなもの、幅・線は自転車や二輪車など、面積は四輪車などの接近・離間の感じ方と考えられる。

同一の速度で接近してきた場合、質点では大きさの変化はなく、感覚量は距離感となり一般的には距離の対数で感じているとされている。一方、幅・線は長手方向の寸法の増大、面積は縦×横寸法つまり面積の増大として視覚的に認識されることになる。

先行車の接近・離間による視覚的感覚量の時間変化

率として、質点の時間変化率は相対速度 V_r と、距離 D の逆数に比例し、これはTTC (Time To Collision) の逆数と等価となる (式(1))。

$$\frac{d(\text{質点の感覚量})}{dt} = \frac{d(\log D)}{dt} = \frac{d(\log D)}{dD} \times \frac{dD}{dt} \propto \frac{V_r}{D} = -\frac{1}{TTC} \quad (1)$$

幅・線の時間変化率は相対速度 V_r と、距離 D の2乗の逆数に比例し (式(2))、面積の時間変化率は相対速度 V_r と、距離 D の3乗の逆数に比例する (式(3))。

$$\frac{d(\text{幅/線の感覚量})}{dt} = \frac{d(1/D)}{dt} = \frac{d(1/D)}{dD} \times \frac{dD}{dt} = -\frac{V_r}{D^2} \quad (2)$$

$$\frac{d(\text{面積の感覚量})}{dt} = \frac{d(1/D^2)}{dt} = \frac{d(1/D^2)}{dD} \times \frac{dD}{dt} = -2 \times \frac{V_r}{D^3} \quad (3)$$

3.2 接近離間状態評価指標の定義

そこで、ドライバは先行車の視覚的な面積変化をもって接近・離間検出をおこなっているという仮説のもと、ドライバ状態推定のための接近離間状態評価指標を導入する。つまり「ドライバは前車との車間距離変化を前車の視覚的感覚量として認識し加減速操作をおこなっている」ということから、先行車面積の変化を認知し加減速などの操作を行った時点の『先行車面積の時間変化率』を指標として用いることにする。Fig. 3に示すような先行車に追従走行しているような場面を考えるとドライバの網膜上に投影される先行車の見かけ上の面積は式(4)のように表される。

$$\begin{aligned} W &= W_p \times \frac{f}{D} \\ H &= H_p \times \frac{f}{D} \\ S &= W \times H \\ &= W_p \times H_p \times f^2 \times \frac{1}{D^2} \end{aligned} \quad (4)$$

このときのドライバの網膜上に投影される先行車の見かけ上の面積時間変化率は式(5)のように表すことができ、これを先行車面積の時間変化率 K とする。

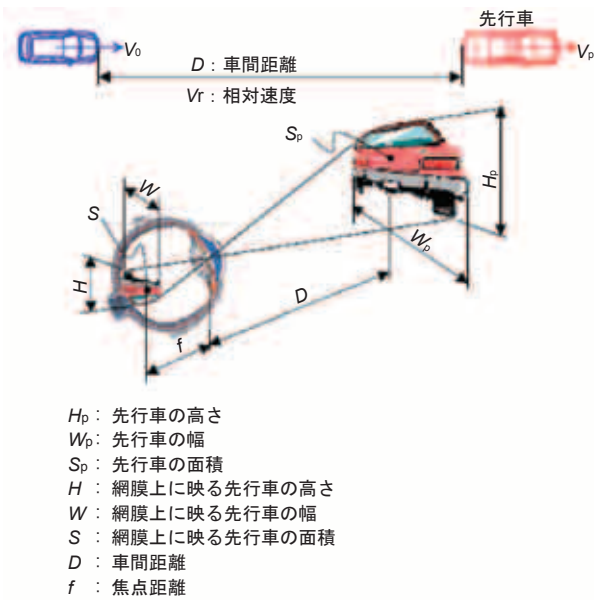


Fig. 3 Illustration of visual input on retina in car following

先行車が網膜上に投影される時の関係図である。

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= \frac{d(W \times H)}{dt} \propto \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{D^2} \right) \\
 &= \frac{d}{dD} \left(\frac{1}{D^2} \right) \times \frac{dD}{dt} \\
 &= -\frac{2}{D^3} \times Vr \\
 &= K
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

この先行車面積の時間変化率 K は、たとえば車間距離 $D = 1 \sim 100\text{m}$ の間で 10^6 のオーダーで大きく変化する指標となるため扱いやすいデシベル表示とすることとした。自車の100m前方に存在する相対速度 $Vr = -0.1\text{km/h}$ で接近してくる先行車面積の時間変化率 K_0 をドライバーが面積変化に気づくことができる最小検出限界と仮定し、このときの値を 0dB と定義する (式(6))。

$$\begin{aligned}
 Vr &= -\frac{0.1}{3.6} \text{ m/s} \\
 D &= 100 \text{ m} \\
 K &= -\frac{2}{D^3} \times Vr \\
 &= -\frac{2}{100^3} \times \left(-\frac{0.1}{3.6} \right) \\
 &\doteq 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

つまり、先行車面積の時間変化率 $K_0 = 5 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ のときのデシベル値を 0dB とし、式(7)のように表す指標を接近離間状態評価指標 $K\text{dB}$ と定義することにする。なお接近離間状態評価指標は前車が相対的に近づいてくるときを正の値、離れていくときを負の値とした。

$$\begin{aligned}
 K\text{dB} &= 10 \times \log \left(\left| \frac{K}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) \text{ dB} \\
 &= 10 \times \log \left(\left| -2 \times \frac{Vr}{D^3} \times \frac{1}{5 \times 10^{-8}} \right| \right) \text{ dB}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

3.3 接近離間状態評価指標の有効性検証

この接近離間状態評価指標の有効性を検証するため、まず実際の事故データにより追突事故における危険認知時点での接近離間状態評価指標の算出を試みた。ITARDAへ依頼しITARDAがつくば地区で年間約300件収集しているマイクロデータより1993年から2003年までの追突事故342件を道路形態別にA当危険認知速度、危険認知距離、衝突速度、B当衝突速度を集計していただき、以下の手順で接近離間状態評価指標を算出した。

- (1) 危険認知時のA当・B当の相対速度は $Vr = -(A\text{当危険認知速度} - B\text{当衝突速度})$ と仮定。
- (2) 危険認知距離の $0 \sim 10\text{m}$ は 7.5m 、危険認知速度の $0 \sim 25\text{km/h}$ は 12.5km/h と仮定。
- (3) 危険認知速度、危険認知距離不明等のデータは除外。
- (4) 前車との車間距離 $D = \text{危険認知距離}$ として(1)で求めた相対速度 Vr とともに式(7)により接近離間状態評価指標 $K\text{dB}$ を算出。

なお、危険認知速度および危険認知距離不明のデータを除外することにより全データ342件中有効データは214件となった。

つぎに安全運転時における接近離間状態評価指標を実験的に求めた。平均的なドライバーの日常における安全運転行動を計測し、追突事故データから算出された危険認知時の接近離間状態評価指標と比較し層別可能かどうかを検証することを目的として実験を行った。

調査コースは自動車専用道・一般道を含む合計で1.5h程度のコースを選定し、被験者は20代1名、30代2名、40代1名、50代1名の計5名の男性とした。安全のため普段通りの運転をしてもらうように教示し

た。全走行時間にわたり前車との車間距離，車両状態量データ，前方画像等を記録した。オフライン解析によりドライバが先行車に接近しアクセルをオフした時点，及びブレーキを開始した時点の718ポイントのデータを抽出し，各々のポイントの車間距離 D の時間微分により前車との相対速度 V_r を求め，式(7)により接近離間状態評価指標 KdB を算出した。

事故データと実験データを重ねるとFig. 4に示すようになり，追突事故における危険認知時点の接近離間状態評価指標は，安全運転時におけるアクセルオフ時点あるいはブレーキ開始時点の接近離間状態評価指標より大きい領域に分布していることが分かる。

ここで図中の太線は接近離間状態評価指標 $KdB = 50dB \rightarrow$ 相対速度 $V_r = -20km/h \rightarrow$ 接近離間状態評価指標 $KdB = 36dB$ のラインであり，追突事故データは211件/214件中がこのスレッシュホールドラインより上の領域に，通常安全走行時のデータは707データ/718データ中がこのスレッシュホールドラインより下の領域に存在することが分かる。つまりこの車間距離に対する接近離間状態評価指標と相対速度のスレッシュホールドラインで追突事故3件/214件中（1.4%），通常走行11データ/718データ中（1.5%）の誤判別にて両者の切り分けが可能である。このことから接近離間状態評価指標は追突事故と安全運転を切り分けるための有効な指標であると

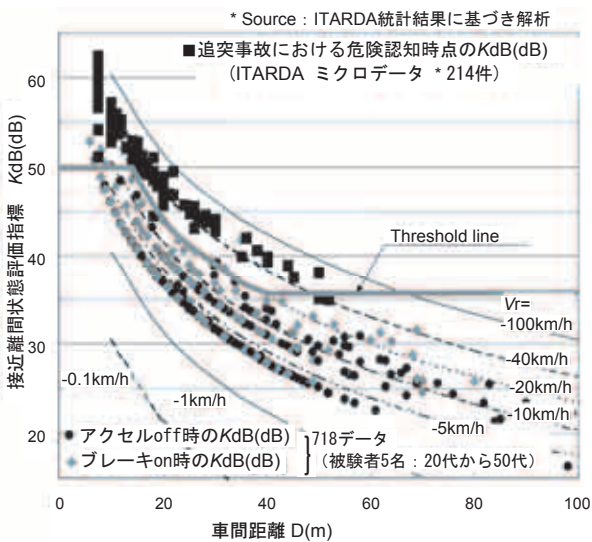


Fig. 4 Comparison of KdB of crash and normal driving data

追突事故における危険認知時点の接近離間状態評価指標は，安全運転時におけるアクセルオフもしくはブレーキ開始時点の接近離間状態評価指標より大きい領域に分布している。

いえる。

例えば脇見をしていたり，漫然運転をしていたりしてブレーキ操作が遅れるような場合は追突事故の分布状態に近づき事故の危険性が增大する。つまり接近離間状態評価指標を視測することでドライバが正しく車を運転しているか否かを推定できることになり，ドライバ状態推定を行える可能性が高い。

4. 動体検出

4.1 従来の研究

従来の見落としに関係するとされている視覚機能の研究の多くは，物体の有無の検出能力を主に扱っている³⁾⁴⁾ また見落としにおいては，物体の運動を周辺視によって検出する能力が重要と考えられている。そして，周辺視野における視覚特性のモデル化が行われている⁵⁾⁶⁾

4.2 動体視野

危険に対する気づきを考えると危険物体が自分の車の正面に動いてくる状態が一番危険と考え，ドライバの中心視に向かってくる危険を検出する能力を評価しようと考えた。ドライバは最初に周辺視野において自分に向かってくる危険を，中心視に向かってくる「動き」で感じ，次に危険物体が何であるか認識するために視線を動かし中心視で危険対象物を見ることになる。

そこで，運動する物体の検出能力を評価する新しい視覚機能としての動体視野について注目した⁷⁾¹⁰⁾ 注視点を中心に点をランダムに配置し，その点のうちの一つが瞬時に内側に微動する際，被験者がこの微動をどの程度認知できるかを計測した。またタスク付加による動体視野の変化を調査するため，動体視野計測に加え，数字記憶・暗算課題および，40km/h走行を模擬した流動視覚タスクを課し，比較を行った。被験者から0.5m前方にスクリーンを設置する。そこに画像作成ソフトを用いたプログラムにより作成したFig. 5に示すような画像を呈示する。実験では黒い背景上に固視点を中心として同心円上にそれぞれ8個の白い点がある。流動視覚タスク付加の実験ではランダムに無数の点が飛んでくる。その点のうちの一つが瞬時に内側に微動する。この微動は40m前方に直立している身長1.6mの人が4 km/hで一歩踏み出すのに相当する。男子学生10名(21-25歳)で計測を実施した。

暗算タスク付加時の10名の平均では，個人差はあるものの，タスク無し時と同様に注視点から遠ざかるに

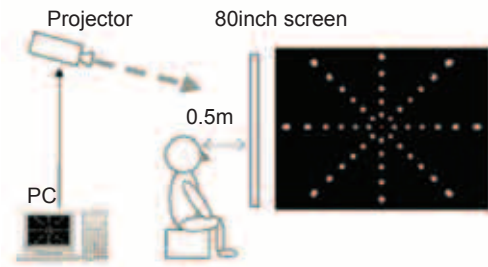


Fig. 5 Experimental method of dynamic visual field

注視点を中心に点をランダムに配置し、その点のうちの一つが瞬時に内側に微動（40m先の1.6m身長歩行者が4 km/hで一歩踏み出す状態を模擬）する際、被験者がこの微動をどの程度認知できるかを計測。各点5回実施。

つれ正答率は減少しており、特に視野上部において正答率が減少した。また注視点に近い点においては、90%以上の確率で微動を認知できた（Fig. 6）。

流動視覚タスク付加時の10名の平均では、タスク無し時と同様、注視点から近い点においてはほぼ正答率100%であり、注視点から遠ざかるにつれ、正答率が減少していた。しかし、視野角30°より遠い点では見落としが発生する確率が高くなり、特に視野上下部の視野角50°付近では多くの被験者が微動を認知できなかった。ドライバに流動視覚タスクが加われば、視野周辺部における点の微動認知の正答率が低下し、動体視

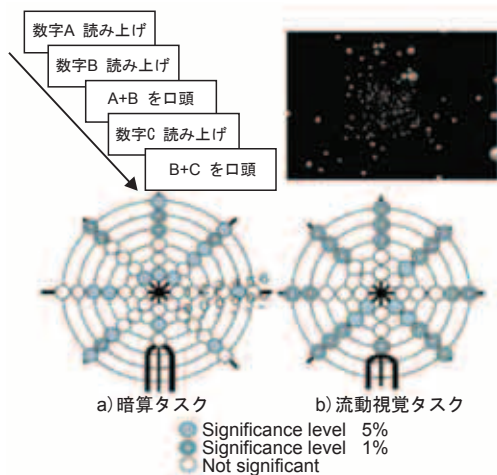


Fig. 6 Arithmetic task (left) and visual optical flow task (right)

被験者10名の検定結果である。タスク付加がない状態に比べ見落としが増加している。特に流動視覚タスクの場合、静止状態に比べかなり動体視野が狭くなることが確認できた。

野が狭くなることが示された。自車速度が高くなれば、中心視に向かってくる危険に対しさらに気づきにくくなるものと考えられる。

5. 追従走行時のドライバモデル

接近離間状態評価指標(KdB)を用いたドライバモデル（Fig. 7）を紹介する。現時点では検証されたものではないので定性的な解説を行う。

5.1 認知ブロック

認知ブロックにおいては、霧・雨、明るさといった外部環境により先行車に対する接近離間状態評価指標(KdB)の感度に変化する。つまりドライバ覚醒度が高くても外部環境の影響により適切なKdBを取得できないことになる。またドライバの覚醒レベルが下がったり、脇見や漫然運転をしているときにも適切なKdBを取得できないことになる。

5.2 判断・操作ブロック

一方判断ブロックにおいては自車速度、路面 μ 、自分の体調に合わせたKdBの目標値がドライバによりマネージメントされる。例えば路面 μ が低い雪道などの

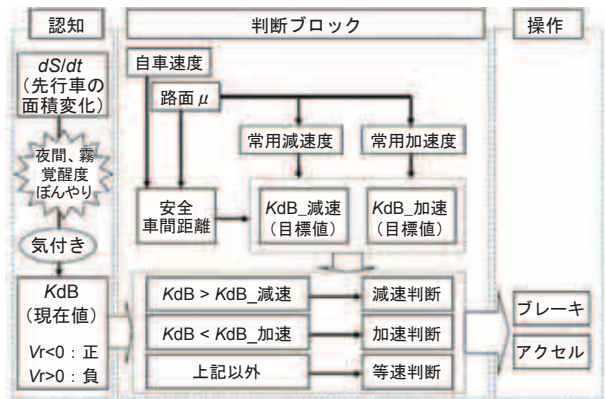


Fig. 7 Conceptual driver behavioral model in car following

認知ブロックにおいて、霧や雨や明るさといった外部環境により先行車の接近離間状態評価指標(KdB)の感度に変化する。判断ブロックにおいては自車速度、路面 μ 、自分の体調に合わせたKdBの目標値がマネージメントされる。マネージメントが正しく行われないと急ブレーキなどで危険を回避することになる。

運転においては、高 μ 路に比べ車間距離を長くとり、さらにはブレーキ操作開始タイミングが高 μ 路に比べ早くなる傾向がある。式(7)において D が大、 $|Fr|$ が小と考えると、ドライバがマネージメントしているKdBの目標値が小さいことを示している。このマネージメントが正しく行われないと、路面状態に応じて常用している制動減速度より高い急ブレーキなどの操作を行うことになる。また操作ブロックにおいて正しく操作されない場合はその操作結果として認知ブロックのKdBが上昇し危険レベルに向かってしまうことになる。

従ってKdBを常時観測できればドライバの認知・判断・操作ブロックのいずれかでエラーが発生しても、車両が危険状態にあるかないかの状態を推定できることになり、ドライバ状態推定が可能であるといえる。

今後はドライビングシミュレータや実車を使用して検証を進めていきドライバモデルを発展させる予定である。

6. 今後の課題

6.1 特異な事故形態

今まで解説してきた機能では説明できない事故形態がある。田園型事故と呼ばれている見通しの非常に良い交差点での出会い頭事故と一時停止などの重要な標識の見落としである。これらについては危険対象物が移動せずにその場で大きくなる、または標識自体が周辺視野に遠ざかっていくため、中心視に向かう危険の気づきを評価する動体視野では説明がつかない。別の観点からのアプローチが必要である。

6.2 今後の計画

接近離間状態評価指標を用いてドライビングシミュレータでの先行車への追従走行時を想定した接近・離間状態の評価により、先行車との距離や状況変化に対するドライバの応答時間など接近・離間状況の解析をおこなう。

またリアルタイムなドライバ状態推定による情報提供装置、安全運転支援装置などの開発を行いたいと考えている。

<参考文献>

- 1) 交通毎日新聞: 2006年2月3日 記事 (2006)
- 2) 財団法人交通事故総合分析センター: イタルデザインフォーメーション, No.31 (2001)
- 3) 小口芳久編: Text眼科学, 南山堂 (1995), pp. 32-33.
- 4) Ikeda, M. and Takeuchi, T.: Influence of foveal load on the functional visual field, Perception & Psychophysics, Vol.18, No.4 (1975), pp. 255-260.
- 5) 三浦利章: 行動と視覚的注意, 風間書房 (1996)
- 6) 舟川政美: ドライバの視野特性と視覚行動, 自動車技術, Vol.58, No.12 (2004), pp. 16-21.
- 7) 和田, 伊佐治, 津留, 金子: 運転時における視覚機能としての動体視野の提案, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.84-04 (2004), pp. 17-20.
- 8) 高橋, 和田, 土居, 津留, 伊佐治, 金子: 自動車走行中における視覚機能としての動体視野の提案, 日本機械学会中四国支部学術講演会論文集 (2005), pp. 417-418.
- 9) 伊佐治, 津留, 和田, 高橋, 土居, 金子: ドライバの視覚情報としての動体視野の解析, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.10-05 (2005), pp. 1-4.
- 10) Wada, T., Doi, S., Takahashi, Y., Tsuru, N., Isaji, K. and Kaneko, H.: A Proposal of Dynamic Visual Field as A New Measure of Visual Function while Driving, 12th World Congress on ITS, San Francisco, Paper 3239 (2005).



<著者>



津留 直彦
(つる なおひこ)
システム開発部
ドライバ特性研究, 安全運転支援
システムの開発に従事



伊佐治 和美
(いさじ かずよし)
システム開発部
ドライバ特性研究, 安全運転支援
システムの開発に従事



金子 弘
(かねこ ひろし)
(株) 三城 光学研究所 所長
博士(工学)
快適なメガネの光学特性と
フィッティングの研究に従事



土居 俊一
(どい しゅんいち)
香川大学工学部 知能機械システム
工学科 教授
博士(工学)
機械振動および車両運動力学およ
び交通予防安全技術分野の研究に
従事