

注意散漫状態下の運転者の周辺車状況変化に対する 注視反応タイミングの分析

Timing Analysis of Driver Gaze under Cognitive Distraction toward Peripheral Vehicle Behavior

平山 高嗣*1*2 間瀬 健二*1 武田 一哉*1
Takatsugu Hirayama Kenji Mase Kazuya Takeda

*1名古屋大学大学院情報科学研究科 *2JST CREST
Graduate School of Information Science JST CREST

One's state of mind is subconsciously exposed as a reaction reflecting it by external stimuli. In this work, we focus on a car driver's cognitive distraction, specifically by analyzing a driver's internal state induced during a music-retrieval task using an automatic speech-recognition system. A visual event that occurs in front of the driver when a peripheral vehicle overtakes the driver's vehicle is regarded as the external stimulus. The analysis result showed that the temporal relationship between the driver's eye gaze and the peripheral vehicle behavior depends on the driver's state. Specifically, we confirmed that the timing of when the gaze is turned toward the stimulus under the distracted state is later than under the neutral state without the secondary cognitive task.

1. はじめに

自動車運転者の注意散漫状態とは、運転行動に集中せずに注意資源が分散している状態であり、事故を引き起こす重大な危険要因である [1]。それは、注意資源が減少し、運転行動の継続が困難な状態として定義される疲労状態とは異なる [2]。National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) は、注意散漫をその要因に基づいて (1) 認知性、(2) 視覚性、(3) 聴覚性、(4) 生体力学性の注意散漫に分類している [3]。認知性注意散漫は運転者の内的状態に起因するため、外から観測して推定することが難しい。その他の注意散漫は運転を阻害する外的な要因に起因するため、外環境を計測することで比較的容易に推定することができる。本研究では、認知性注意散漫に注目し、それを自動検出するための新たな知見を追求する。

これまでに注意散漫を検出する手法は多く提案されている [2]。それらは計測するモダリティに基づいて (1) 運転者主観評価ベース、(2) 運転者生理情報ベース、(3) 運転操作情報ベース、(4) 運転者身体情報ベースに分類される。主観評価ベースと生理情報ベースは、運転者の負担を考慮すると現実の運転状況で適用することが難しい。ハンドル、ブレーキ操作などに基づく運転操作情報は視覚性注意散漫を検出するために適している [4]。運転操作情報はまた、危険に直接的に関係するが、それに基づいて注意散漫状態を検出した後に運転者を支援しても、タイミングが遅すぎる可能性がある。

身体情報ベース、特に視線情報は認知性注意散漫の予兆を推定する能力を秘めている。従来研究において、Angell らは視線パターンに基づいて、サブタスク遂行運転シーンと運転集中シーンを識別した [5]。Harbluk らは、認知性注意散漫状態での運転で単位時間当たりのサッケード頻度が減少することを明らかにした [6]。つまり、運転環境への視覚探索行動が減少すると言える。Miyaji らは、注視の偏在を引き起こす認知性注意散漫を検出するために、視線方向と頭部方向の分散とサッケード速度を指標とすることが適していることを示した [7]。また、Kircher らは、道路中央への注視の割合 (PRC) が認知性注意散漫によって 92%以上になるという分析結果を得た [8]。

これらの身体情報ベース手法は主に、運転者の視線だけを

計測し、散乱した視覚刺激を含む周辺状況を計測しない。または、視線方向と周辺状況の空間的な相関を大まかに計算するだけであり、比較的長い時間の計測も必要である。柔軟に運転者を支援するためには、時間分解能が高い注意散漫状態検出も必要である。本研究では、視線と周辺状況それぞれの変化の短い時間間隔での関係を扱う。ヒューマンコンピュータインタラクションの分野では、視覚情報変化と視線運動の時間的關係を分析することで人間の潜在的状態を推定する手法が提案されている [9]。潜在的な状態は、外的刺激によって無意識的に反応として引き出されると言える。本研究の狙いは、運転者の視線と周辺状況の変化との時間的關係の分析であり、具体的には、周辺車によって生じる視覚刺激への注視反応のタイミングの分析を行う。

2. 運転者の注視行動と周辺車状況変化との時間的關係の分析

2.1 追い抜きイベントに対する注視反応のタイミング

1. で述べた時間的關係を分析するために、本研究では周辺状況の変化を起こす対象として視認性が高い周辺車両に注目する。運転者が運転する自車を周辺車が追い抜く際、運転者の視野斜め前方に注意を引く視覚変化が生じる (この周辺車を追い抜き車と呼ぶ)。我々はこの追い抜きイベントを分析の対象とする。追い抜きイベントは、基準時刻 $t_0 (= 0)$ 、開始時刻 $t_b (= t_0 - T_d/2)$ 、終了時刻 $t_e (= t_0 + T_d/2)$ を持つ。 t_0 は、進行方向における追い抜き車の位置 y_o が自車の位置 y_h と等しくなった時刻とする。 T_d は追い抜きイベントの持続時間を表す。図 1 は追い抜きイベントの模式図である。また、運転者が追い抜き車に視線を向ける時刻と基準時刻 t_0 の時刻差を注視反応タイミング t_g とする (図 2)。

2.2 仮説

従来研究では、運転者の視線方向と道路上の物体位置との空間的な相関が分析され、運転集中時には高い相関が示されている [10]。時間的な関係については、目標刺激に対する潜在的注意が視覚探索時間を短くし、妨害刺激による注意の分散がそれを長くすることが明らかになっている [11]。これらに倣うことで以下の仮説を立てることができる：**注意散漫状態の運転者**

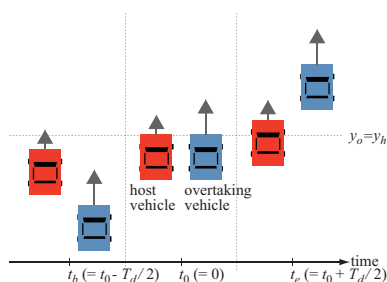


図 1: 追い抜きイベント

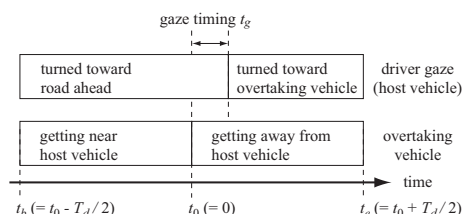


図 2: 運転者の視線が追い抜き車に向けられるタイミング

の視線が追い抜き車に向けられるタイミングは、運転集中状態の場合より遅い。

3. 運転行動データベース

3.1 データ計測実験車両

図 3 に示す実験車両を運転操作（アクセルペダル踏力、ブレーキペダル踏力、ハンドル操作角、速度、加速度、車両位置）、車間距離、生体信号、映像、音声を同期計測するために設計した。それぞれのマルチモーダル情報を計測するセンサをトヨタ自動車のハイブリッドエスティマに搭載した。

3.2 実験参加者

21 名が実験に参加した（男性 10 名、女性 11 名）。平均年齢は 40.3 歳（29 歳から 50 歳）、運転経験平均年数は 19.1 年（8 年から 32 年）であった。

3.3 実験手続き

参加者は最初に車両とセンサに慣れるために数分間走行した。この区間の走行データは分析に用いなかった。実験者は後部座席から観察し、参加者に走行ルートを指示した。特定の走行区間において、参加者はサブタスクとして音声認識システムを用いた楽曲検索を 248 歌手、635 曲から行った。参加者はできる限り多くの検索を求められた。このサブタスクは、人工的に注意散漫状態を引き起こす。全ての実験における走行ルートは参加者間で同じであり、2, 3 車線の高速道路で設定された。



図 3: データ計測実験車両

3.4 計測データ

レーザスキャナによって計測された車間距離と映像から抽出された運転者の視線方向を分析した。以下では、分析データの詳細を説明する（他のセンサデータについては割愛）。

3.4.1 車間距離計測

2 台のレーザスキャナが自車の前面と背面のバンパに設置され、前方と後方それぞれ水平角 80 度、前方 100m、後方 55m の範囲の幾何情報を 10Hz で計測した。レーザスキャナの死角領域における周辺車の移動軌跡は、計測された時系列データにカルマンフィルタを適用することで予測された。このデータの座標系は、道路を平面と仮定して、進行方向を y 、道路平面上でのその直交方向を x 、前方のレーザスキャナの中心を座標中心とした。本研究では、分析データを y 方向を前後 80m ($-40 \leq y \leq 40$)、 x 方向を左右 9.9m ($-4.95 \leq x \leq 4.95$) に制限した。

3.4.2 映像撮影

運転席からの前方視野をダッシュボード上に設置したカメラを用いて撮影した（692 × 480 画素、29.41fps）。

3.4.3 運転者視線方向計測

運転者の視線方向をアノテーションツール ELAN を用いて手作業でラベル付けした。低解像度映像から抽出可能な視線方向として、以下の 8 つのラベルを定義した。

- g_0 : *right-side* (頭部回転が付随する右ミラーから外側への注視)
- g_1 : *right-front* (*front* から右への注視)
- g_2 : *rear* (ルームミラーへの注視)
- g_3 : *front* (前方への注視、基準方向)
- g_4 : *left-side* (頭部回転が付随する左ミラーから外側への注視)
- g_5 : *left-front* (*front* から左への注視)
- g_6 : *up* (*front* から上への注視)
- g_7 : *down* (*front* から下への注視)

アノテータはそれぞれの注視行動のサッケード開始を検出した。本研究では手作業によってラベル付けを行ったが、FaceLab などの既存の視線計測システムを用いることで、十分に精度良く安定に映像データにラベルを付与することができる。図 4 にそれぞれのラベルとそれらに対応した顔画像を示す。

4. 注意散漫状態下の運転者の周辺車状況変化に対する注視反応タイミングの分析

4.1 追い抜きイベントの抽出

車間距離データから追い抜きイベントを、運転集中タスク (C_N) において 160 イベント、楽曲検索タスク (C_M) において 63 イベント抽出した。

4.2 周辺車状況の分類

本研究で分析するデータには、追い抜き車以外の周辺車が多く含まれ、それらは視覚刺激である。視覚探索課題の観点で言うならば、追い抜き車を目標刺激、それ以外の周辺車を妨害刺激とみなすことができる。探索性能は目標刺激に対する妨害刺激の特性に依存する [12]。つまり、本研究では周辺車状況の特性を定義する必要がある。そこで、周辺車が図 5 に示す部分領域に存在する滞留時間に応じて周辺車状況を分類する。部分領域は 6 つの視線方向ラベル $g_j (j = 0, \dots, 5)$ に対応した 6 領域を設定した。それぞれの部分領域にはブール変数 a_j を割り当て、周辺車状況を 6 つのブール変数で構成されるベクトル $e = (a_5, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0)$ として表現する。本研究では、周辺車が部分領域 a_j に T_d の 50% 以上存在する場合に $a_j = 1$ 、未満の場合に $a_j = 0$ とする。注視反応タイミングの分析は、追い抜きイベントの t_0 を基準にした視線方

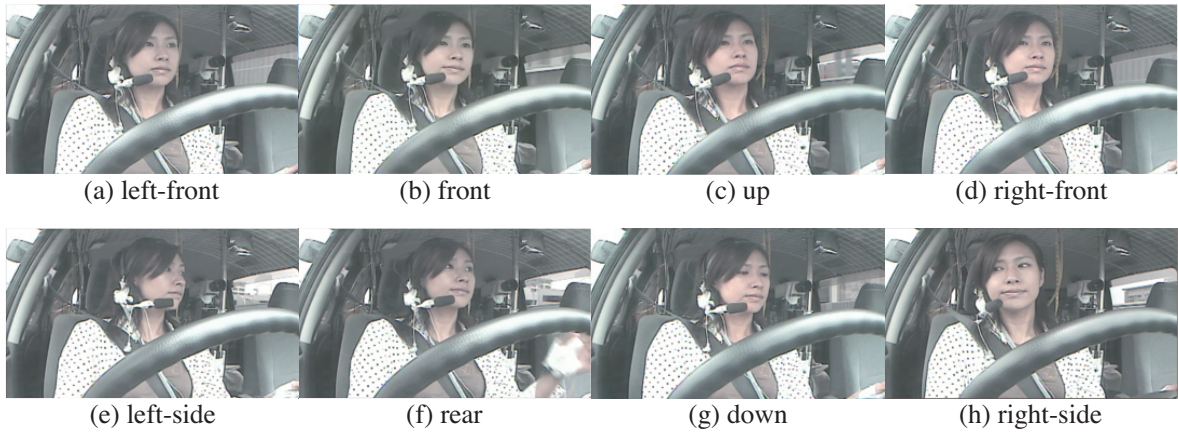


図 4: 視線方向ラベルと顔画像の一例

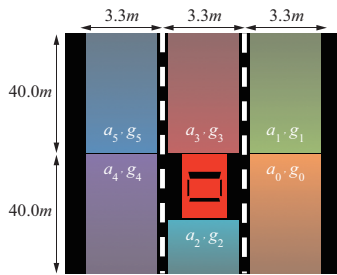


図 5: 6つの部分領域の定義

向の変化に注目して行うため、イベント時区間 T_d を t_b から t_0 までの前半 e_1 と t_0 から t_e の後半 e_2 に分割した。なお、 $T_d = 10, t_0 = 0, t_b = -5, t_e = 5$ (秒) とした。

追い抜きイベントを含む全てのデータから、 e_1 および e_2 のような頻度分布を得られなかった。また、特異な注視行動を誘発するカーブと車線変更を含むシーンを除外したため、十分なサンプル数が得られた周辺車状況は以下の \mathcal{E}_A と \mathcal{E}_B の2つとなった： $e_1 = (0, 0, 0, 0, 0, 1)$ から $e_2 = (0, *, 0, *, 1, *)$ への遷移で表される周辺車状況 \mathcal{E}_A が C_N に対して 109 サンプル、 C_M に対して 29 サンプル、 $e_1 = (0, 0, 0, 0, 1, 1)$ から $e_2 = (0, *, 0, *, 1, *)$ への遷移による周辺車状況 \mathcal{E}_B が C_N に対して 37 サンプル、 C_M に対して 18 サンプル。なお、* は任意の二値を示す。前者は右車線で追い抜き車が自車を追い抜く前に、他の周辺車がどの部分領域にも 2.5 秒 (= 50% of $T_d/2$) 以上存在しない状況を示し、後者は右車線で追い抜き車が自車を追い抜く前に、右車線前方に他の周辺車が 2.5 秒以上存在する状況を示す。前者と後者を比較すると、前者の方が視覚的な妨害刺激が少ないことになる。

4.3 仮説の検定

周辺車状況 \mathcal{E}_A における視線方向の相対的頻度分布の時間変化を図 6 に示す。この図から、タスクによらず t_0 の直後に急激に *right-front* が増加していることを確認できる。つまり、周辺車による視覚的な妨害刺激が少ない状況である \mathcal{E}_A では、運転者は右車線の追い抜き車の方向に視線を向ける傾向があると言える。そこで、提案した仮説を検証するために、運転集中タスク C_N と楽曲検索タスク C_M 間の相対的頻度分布の時刻に関する差に統計的検定を適用する。ここで、本研究では検定のための時区間として $t_s = t_0 (= 0)$ から $t_f = 2$ (秒) に着目する。この時区間における平均の注視反応タイミング \bar{t}_g は C_N

に対して 1.15 秒、 C_M に対して 1.46 秒であった。また、両タスクの相対的頻度分布には正規性があり、等分散であることが認められた。t 検定を適用した結果、運転集中タスクに対する注視反応タイミングが楽曲検索タスクに対するものより有意に早いことが明らかになった ($t(136) = -3.15, p < .005$)。

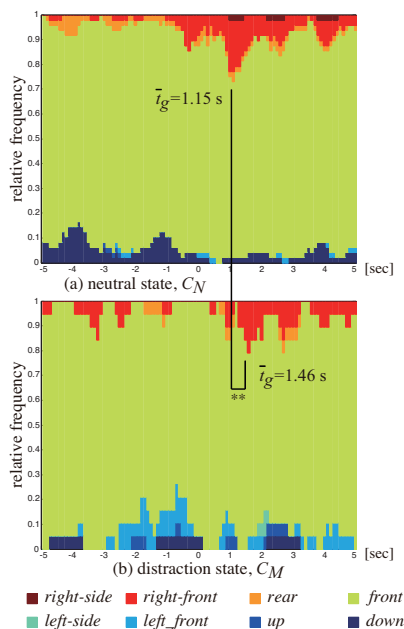
一方、図 7 は周辺車状況 \mathcal{E}_B における視線方向の相対的頻度分布の時間変化を示し、周辺車による妨害刺激が多い状況 \mathcal{E}_B では、運転者が楽曲検索タスクを遂行している時にはほとんど追い抜き車の方向に視線を向けない傾向があることを確認できる。運転集中時には \mathcal{E}_A と同様の分布である。 \mathcal{E}_A に対する分析と同様に時区間を制限し、平均の注視反応タイミング \bar{t}_g は C_N に対して 0.92 秒、 C_M に対して 1.34 秒であった。t 検定を適用した結果、 \mathcal{E}_B でも運転集中タスクに対する注視反応タイミングが楽曲検索タスクに対するものより有意に早いことが明らかになった ($t(53) = -3.25, p < .005$)。これらの結果により、周辺車状況が \mathcal{E}_A と \mathcal{E}_B に限定されるが、本研究で提案した仮説が支持された。

5. 討議

本研究では、提案した仮説を支持する分析結果を得た。今後は追い抜き車への注視反応タイミングが運転集中状態と楽曲検索状態を識別する特徴量として有効かどうかを検証する必要がある。図 6 と図 7 は、タスクと周辺車状況に依存した視線方向の尤度を表すため、ベイズ理論を適用することでタスクの事後確率に基づく識別器を設計することが適当である。この識別手法は、追い抜きイベントに対する運転者の注視反応を必要とするが、短い時間単位での識別が可能である。

図 6 と図 7 から、 C_N と C_M の間の注視反応タイミング以外の差を抽出できる可能性がある。それは、運転者の下方向への注視、すなわち、*down* の頻度である。運転者は頻繁に計器類もしくはナビゲーションシステムに視線を向けたものと考えられる。これは PRC についての従来知見 [8] を裏付ける。追い抜き車が存在しない時区間では、注意散漫状態を検出するために PRC を用いることが有効である可能性がある。

また、 \mathcal{E}_A と \mathcal{E}_B 間の *right-front* の発現タイミングの差を比較すると、前者より後者の方が早いことが分かる。 \mathcal{E}_B では、追い抜き車に先行する車両が存在するため、運転者はその先行車に注意を向けたままで、追い抜き車に反応した可能性がある。つまり、反応を遅らせる復帰抑制 [13] が起こらなかったと言える。

図 6: 視線方向の相対的頻度分布の時間変化 (周辺車状況 \mathcal{E}_A)

これらの結果は、2つの周辺車状況 \mathcal{E}_A と \mathcal{E}_B に限定されたものである。今後は、より網羅的な分析を行うために他の周辺車状況のデータを増やし、より詳細な分析を行うために衝突予測時間や相対速度、相対加速度を考慮した周辺車状況のダイナミクスをモデル化する必要がある。また、他のサブタスクでの検証や個人差についての分析を行う必要もある。

6. おわりに

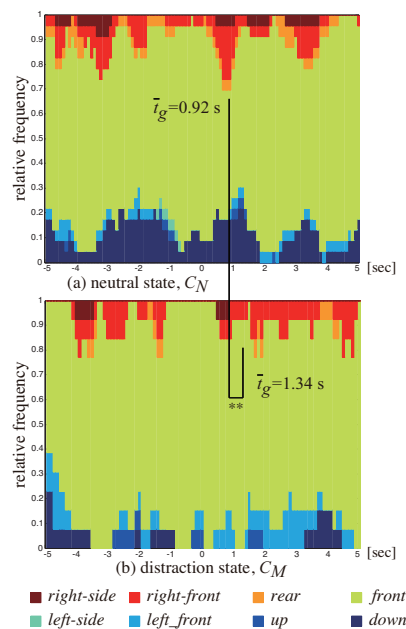
外環境のダイナミクスは人間の内的状態を反映した反応を引き出すことができる。本研究では、自動車運転状況における注意散漫状態を分析することによって、視覚刺激に対する反応の時間要素、すなわち、タイミングが内的状態を理解するために重要であることを示した。具体的な貢献として、注意散漫状態の運転者が追い抜き車に視線を向けるタイミングは運転集中状態より遅いという仮説を支持する結果を得た。しかしながら、限られた周辺車状況で検証された結果であるため、より多様な状況での検証が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人科学技術振興機構 CREST 「共生社会に向けた人間調和型情報技術の構築」における「行動モデルに基づく過信の抑止」の支援によるものである。

参考文献

- [1] M. Regan et al., “Defining driver distraction,” in *Driver Distraction: Theory, Effects, and Mitigation*. CRC, 2008, ch.4, pp.42–54.
- [2] Y. Dong et al., “Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: a review,” *IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems*, vol.12, no.2, pp.596–614, 2011.
- [3] T. Ranney et al., “NHTSA driver distraction research: Past, present, and future,” *National Highway Traffic Safety Administration*, pp.1–8, 2001.

図 7: 視線方向の相対的頻度分布の時間変化 (周辺車状況 \mathcal{E}_B)

- [4] Y. Liang et al., “Combining cognitive and visual distraction: less than the sum of its parts,” *Accident; analysis and prevention*, vol.42, no.3, pp.881–90, 2010.
- [5] L. Angell et al., “Driver workload metrics project—Task 2 final report,” *U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration*, 2006.
- [6] J. Harbluk et al., “The impact of cognitive distraction on driver visual behavior and vehicle control,” *Ergonomics Division, Road Safety Directorate and Motor Vehicle Regulation Directorate, Canada*, 2002.
- [7] M. Miyaji et al., “Driver’s cognitive distraction detection using physiological features by the Adaboost,” *Proc. 12th Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems*, pp.1–6, 2009.
- [8] K. Kircher et al., “Comparison of two eye-gaze based real-time driver distraction detection algorithms in a small-scale field operational test,” *Proc. 5th Int. Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, pp.16–23, 2009.
- [9] R. Yonetani et al., “Mental focus analysis using the spatio-temporal correlation between visual saliency and eye movements,” *Journal of Information Processing*, vol.20, no.1, pp.267–276, 2012.
- [10] L. Fletcher et al., “Driver inattention detection based on eye gaze-road event correlation,” *Int. Journal of Robotics Research*, pp.774–801, 2009.
- [11] M. Posner, “Orienting of attention,” *The Quarterly Journal Of Experimental Psychology*, vol.32, no.1, pp.3–25, 1980.
- [12] J. Wolfe et al., “What attributes guide the deployment of visual attention and how do they do it?” *Nature Reviews. Neuroscience*, vol.5, no.6, pp.495–501, 2004.
- [13] M. Posner et al., “Components of visual orienting,” pp.531–556, 1984.