

実車運転における操作・眼球運動の共変動に基づく 注意・認知の探索的分析

山下 純平
鈴木 雄太
中西 史佳
山高 大乘
寺島 裕貴
丸谷 和史

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

株式会社デンソー

株式会社デンソー

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

NTT コミュニケーション科学基礎研究所

自然運転では視覚環境と運動要求が刻々と変化し、それに応じてドライバの注意・認知状態も変動するため、走行中の状態推定は安全上きわめて重要である。従来研究の多くは、実験者が事前に定義した状態が眼球指標に現れるパターンを検証し、推定手法を構築してきた。これに対し我々は、実環境で自発的に生起する注意・認知と眼球指標の関係を、データ駆動的かつ探索的に抽出することを目指している。本研究では、都市部の実路走行から得た眼球特徴量と車両状態の時系列に独立成分分析（ICA）を適用し、先行知見の再現と同時に、従来の説明では捉えにくい特徴の抽出可能性を検討した。その結果、ワークロード上昇に結び付けられてきた変数群の結合が独立成分として抽出された。当該成分は輝度補正後の瞳孔径および速度・ステアの不安定性に同方向の負荷を示し、先行知見と整合した。一方、サッカードの固視に対する時間比にも正の負荷を示しており、直線路で副課題により負荷を高めた条件で報告される、中央固視の増大現象とは対照的であった。実交通で多くを占める認知的負荷は、むしろ活発な状況認識や、それを支える眼球運動を伴う可能性がある。実環境における注意・認知変動の定量化と、リアルタイムなドライバ状態モニタリングの実現に向けて考察する。

Keywords: eye tracking, pupillometry, naturalistic driving, driver monitoring

問題・目的

視覚環境・運動要求が動的に変化する環境では、注意・認知状態も刻々と変動する。こうした状態の推定は、とりわけ自動車運転などにおいて安全上きわめて重要である。これまで、瞳孔径やサッカードなどの眼球指標による推定可能性が示唆されている。

先行研究の多くは、実験者が事前に定義した認知・注意ラベルと眼球指標を対応づけて推定を試みてきた。たとえば、直線路で副課題を課して誘発したメンタル・ワークロードや、時間経過に伴い増大する疲労と瞳孔指標の関係が検討されている（Marquart et al., 2015）。また、路面曲率を空間的注意のパラメータとし、サッカードの変化を分析した研究もある（Authié & Mestre, 2011）。しかし、より生態学的妥当性の高い、実交通で観察される眼球指標と注意・認知状態の結合構造を、事前の枠組みに依らず探索的に明らかにした研究は少ない。

そこで我々は、自然運転における眼球運動と車両状態の潜在的結合を明らかにし、教師なし手法により注意・認知状態を抽出することを目指す。本研究では、市街地の自然運転データを用い、先行知見の再現を確認しつつ、既存の説明では捉えにくい特徴の抽出可能性も検討した。先行研究によれば、輝度補正後の瞳孔径はワークロードとともに増大し、その影響は約20秒

の時間スケールで顕在化する（Yamashita et al., 2024）。また、ワークロードの増大に伴い運転の不安定性が高まることが報告されている（Papantoniou et al., 2017）。これらを踏まえ、約20秒の窓で集約した眼球特徴量（輝度補正後瞳孔径を含む）と車両状態変数から時系列行列を構築し、独立成分分析（ICA）を適用した。結果として、先行知見に照らしてワークロードに整合的な結合成分が再現されたほか、当該成分に紐づいた眼球運動特性に関する新規な所見が見られた。

方法

参加者：

週1回以上の運転習慣を有する11名（男性10名、女性1名；22-60歳）。

手続き：

参加者は日常同様に運転するよう求められ、同乗の実験者はコース指示のため最小限のナビゲーションのみ行った。走行中、参加者は眼鏡型イトラッカー（Tobii Glasses 3, 100 Hz）を装着し、計測車両で所定の都市ルートを約1時間走行した。

コース：

市街地を周回するコース（約35 km, 10区間；左折6回, 右折5回）。なお、停車・低速（車速<10 km/h）区間を除く平均車速は38.7 km/hであった。

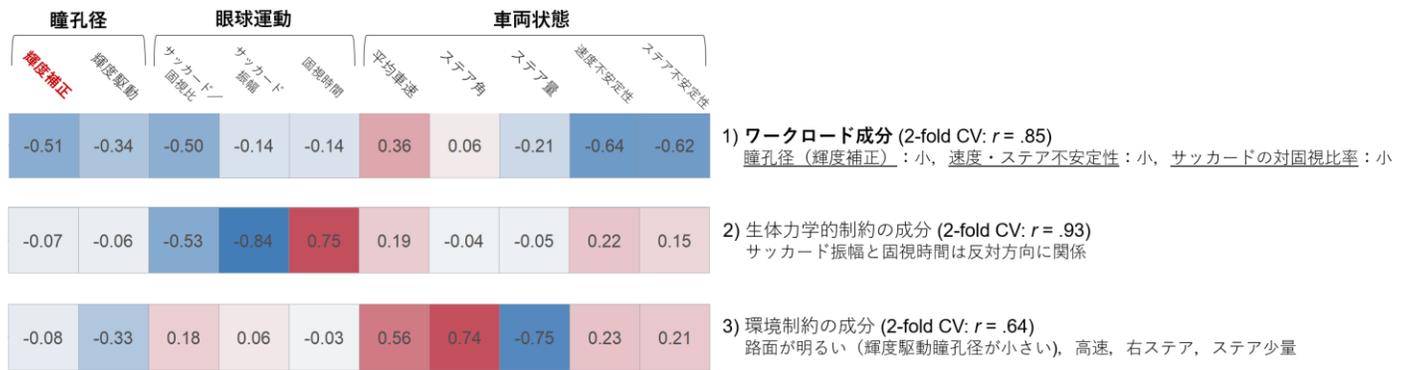


図1. 瞳孔指標・眼球運動指標・車両状況変数にわたる3つの潜在成分について、ICAの混合重みを示したカラーマップ
色スケールは大きさと符号を表す (赤=正; 青=負)

計測:

車速・ステア角を車載CANバスから100 Hzで取得した。固定ゲインの車内固定カメラ画像からシーン輝度を近似した。

前処理・分析:

20秒窓ごとに10種類の特徴量を算出し (合計2,011窓; 総走行時間11時間10分20秒), 各参加者の平均を差し引いて個人内中心化した。瞳孔径・視線・ステア角の外れ値 (1.5×IQR; 四分位範囲) を除去し, 有効窓は98.1% (1,972/2,011) であった。

時系列行列:

眼球特徴量5次元と車両状態変数5次元 (計10変数) から構成された。シーン輝度近似を用いて瞳孔径の輝度駆動成分, 輝度補正後成分の2変数を定義した。視線座標はSavitzky-Golayフィルタで平滑化後, REMoDNaV (Dar et al., 2021) で固視・サッカードを近似的に分類し, 各窓でサッカード/固視比, サッカード振幅, 固視時間中央値の3変数を算出した。運転指標として平均車速, 平均ステア角, ステア量 (絶対角度和), 速度・ステアの不安定性 (一次差分の二乗和) を算出した (5変数)。

結果

行列特性:

特徴量間の絶対相関は概ね小さく (平均 $|r|=0.10$, 最大 $|r|=0.45$), 行列の条件数は $\kappa=2.22$ と良好であった。Q-Qプロットにより非ガウス性を確認し, 固有値に基づき3成分を採択した。

ICA:

ICAにより解釈可能な3成分が得られた (図1)。第1成分は, 輝度補正後の瞳孔径と速度・ステアの不安定性に共通して負荷を示すワークロード様パターンであった。なお, 平均車速およびステア量への負荷は比較的小さく, コースの大きな変化を伴わずとも制御安定性と結び付くことも示唆された。新たに, サッカード/固視比にも正の負荷が認められた。残る2成分は, 眼球運動の生体力学的制約と, コース (環境制約) を主に反映する成分として解釈された。

再現性:

成分の安定性を評価するため, 参加者を5名と6名に分ける全462通りの分割でICAを実行し, 混合行列の

列を絶対相関が最大となるよう対応付けて比較した。対応列間の平均 $|r|$ は成分1-3でそれぞれ0.85, 0.93, 0.64であり, 第1・第2成分は高い再現性, 第3成分は中等度の再現性を示した。

考察

自然運転データにおける眼球指標と車両状態の個人内共変動をICAで分解した結果, ワークロードとして解釈可能で, 参加者分割に対して安定な成分を抽出できた。同成分は, 輝度補正後の瞳孔径と速度・ステアの不安定性に同方向の負荷を示し, ワークロード上昇時の生理・行動指標の結合パターンを再現していた。一方で, サッカードの対固視比にも正の負荷がみられ, これは直線路で副課題により負荷を高めた条件で報告される中央固視の増大 (Marquart et al., 2015) とは対照的であった。このことは, 実交通に由来するワークロード増大は, 状況把握のための視野探索を促しており, むしろ活発な眼球運動を伴う可能性を示唆する。今後は, 成分の一般化可能性の検証および, リアルタイム推定可能性の検討を進め, 実環境におけるドライバ状態モニタリングの実現に向けて取り組む。

引用文献

Authié, C. N., & Mestre, D. R. (2011). Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving. doi:10.1016/j.visres.2011.06.010.

Dar, A. H. et al. (2021). REMoDNaV: robust eye-movement classification for dynamic stimulation. doi:10.3758/s13428-020-01428-x.

Marquart, G. et al. (2015). Review of eye-related measures of drivers' mental workload. doi:10.1016/j.promfg.2015.07.783.

Papantoniou, P. et al. (2017). Review of driving performance parameters critical for distracted driving research. doi:10.1016/j.trpro.2017.05.148.

Yamashita, J. et al. (2024). Pupil Trend Reflects Suboptimal Alertness Maintenance over 10 s in Vigilance and Working Memory Performance: An Exploratory Study. doi:10.1523/ENEURO.0250-24.2024.