



車載用ヘッドアップディスプレイの設計パラメータと ヒトの視覚情報処理負荷の関係

On the Relationship between Design Parameters of Automotive Head-up Display
and Human Visual Information Processing Load

山田和佳¹⁾, 上田一貴¹⁾, 高田真也¹⁾, 中尾政之¹⁾

Nodoka YAMADA, Kazutaka UEDA, Shinya TAKADA, and Masayuki NAKAO

1) 東京大学 大学院工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, ueda@hnl.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 車載用ヘッドアップディスプレイを自動車の運転中に安全に使用するためには、短い時間で映像から情報を受容できるよう、運転者の視覚情報処理を考慮した設計を行う必要がある。装置の設計パラメータである映像投影方法と、提示する映像の情報量を変化させ、視覚情報処理にかかる時間を眼球運動と脳波の計測により評価した。

キーワード: 視覚情報処理, ヘッドアップディスプレイ, 情報量, 眼球停留関連電位 (EFRP)

1. はじめに

昨今、先進安全自動車 (Advanced Safety Vehicle, ASV) の開発が国を挙げて進められている。ASV に搭載される技術のうち、ドライバーに適切なタイミングで情報を提供し、運転行動の助けとしてもらうためのシステムは、情報の受け取りやすさなど、使用者であるヒトの情報処理を考慮して設計する必要がある。情報提示システムの 1 つであるヘッドアップディスプレイ (head-up display, HUD) は、従来の自動車のダッシュボードに取り付けられていたカーナビモニタに代わり、運転中の上下方向の視線移動を極力減らして視覚情報を提供できる技術として注目されている。

運転中に HUD 映像を見る際のヒトの視覚情報処理は、映像に目を向ける「視覚入力」、映像の内容を理解する「認知判断」、映像の指示に従った行動をする「運動出力」の、3つのプロセスに分けることができる。運転中は可能な限り常に、前方の交通環境に注意を払う必要があるため、これらのプロセスは素早く行われる必要がある。著者らの研究 [1] では、HUD 映像の投影方法である実像投影と虚像投影の違いが視覚入力プロセスに与える影響を、視線計測を用いて調べ、映像の表示位置が近距離の場合に視覚入力プロセスにかかる時間は虚像投影のほうが長くなることを報告した。また実像投影を用いた HUD 映像で、映像の情報量が認知判断プロセスに与える影響を脳波計測により調べた研究 [2] では、情報量が増えるほど認知判断プロセスにかかる時間が長くなることが報告されている。

本研究では、HUD 映像の投影方法と情報量が、視覚情報処理の各プロセスおよび全体に与える影響を調べる目的で実験を行った。

2. 実験

本研究の実験は、東京大学大学院工学系研究科研究倫理委員会の承認を受け実施した (承認番号 KE19-56)。

2.1 参加者

実験参加者は、視力が正常で (矯正視力を含む)、眼に関わる疾病を持たず、普通自動車運転免許を所持している 20 代以下の男性 16 名 (平均年齢 21.6 歳, 標準偏差 2.1 歳, 裸眼またはソフトコンタクトレンズを装着) であった。実験開始前に実験の主旨を説明し、書面により参加の同意を得た。

2.2 装置

約 50 m 四方の室内にて実験を行った。実験は午前 9 時～12 時・午後 0 時半～3 時半・午後 4 時～7 時の時間帯に行われ、各時間帯における実験中の室内の照度はそれぞれ 1.55 lx, 0.22 lx, 0.22 lx (晴天時に計測) であった。実験装置は、交通環境投影装置, HUD 装置, 課題操作入力装置, および計測装置からなる。実験装置の概観を図 1 に示す。

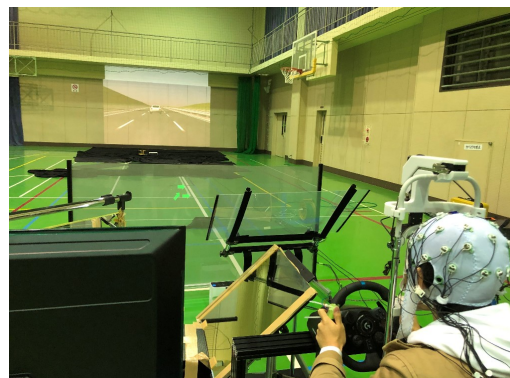


図 1: 実験装置の概観 (撮影のため照明を点灯)

2.2.1 交通環境投影装置

実験参加者のアイポイントから 20 m 前方のスクリーンに、ドライビングシミュレータ (UC-win/Road Ver14.2 Drivinig Sim, フォーラムエイト) の映像を投影した。映像のアスペクト比は 4:3、映像の高さは約 3 m であった。

2.2.2 HUD 装置

実験参加者のアイポイントから 1 m 前方に、自動車のフロントガラスを模した透明ガラス板が設置された。実験参加者はこのガラス板越しに前方を見ることで、ドライビングシミュレータ映像の投影域外左下に HUD 映像を見ることができた。

虚像投影装置 鏡 2 枚と、液晶モニタを用いた光学系を作製した。モニタに表示された HUD 映像の光は 2 枚の鏡と前述のガラス板表面で鏡面反射し、実験参加者の目に入射した。実験参加者のアイポイントから液晶モニタまでの光路長は 2.5 m であった。

実像投影装置 透明アクリル板の表面に拡散反射加工を施した HUD 用スクリーン (透過率 35%) を、実験参加者のアイポイントから 2.5 m 先に設置した。HUD 映像はプロジェクタにより、HUD 用スクリーンに投影された。

2.2.3 課題操作入力装置

運転席を模した座席部を作製し、ドライビングシミュレータへの操作の入力のため、ハンドルコントローラ・アクセルペダル・ブレーキペダルを設置した。ハンドルコントローラの上部に押しボタンスイッチを左右に 1 つずつ取り付け、このスイッチ入力を HUD 映像課題の回答入力として使用した。HUD 映像課題の呈示と回答入力の取得の制御は Presentation (Neurobehavioral Systems) で行った。

2.2.4 計測装置

実験参加者のアイポイントを固定するため、座席正面にあご台が設置された。実験参加者の頭部にはアクティブ電極を取り付けた脳波キャップ (Acticap, Brain Products) を装着し、課題遂行中の脳波を脳波計 (BrainAmp DC, Brain Products, fs: 500Hz) により計測した。電極配置は拡張国際 10-20 法に従い、頭皮上の 26 部位を選択した。さらにオフラインでの再基準化のため両耳朶の各 1 か所と、眼電位計測のため左右の外眼角外および眉上縁・下眼瞼下縁から各 10 mm の 4 か所に、アクティブ電極を装着した。

2.3 実験課題

実験参加者は、ゆるやかなカーブと直線からなる、視界の開けた片側 3 車線道路の第 2 走行帯を、定速で走行する 1 台の先行車を見ながら一定の車間距離を空けて走行した。運転中、2~3 秒の間隔で HUD 映像が 1.5 秒間表示された。HUD 映像は、先行研究 [2] を参考に作成した、上下左右および斜めの 8 方向のいずれかを向いた 1~3 つの矢印図形であった。矢印の個数は HUD 映像の情報量の水準に対応していた。実験参加者は、HUD 映像が表示されたら素早く映像に目を向け、映像に真右を向いた矢印が 1 つだけ含まれる場合 (target 映像) にはハンドル右のボタンを、そのほかの場合 (non-target 映像) にはハンドル左のボタンを押し

て、課題に回答した。課題に回答したら素早く先行車に視点を戻した。各情報量水準について、target 映像は 18 試行、non-target 映像は 42 試行表示され、各条件で HUD 映像は全 180 試行表示された。各投影水準で全ての情報量水準の映像がランダムに表示され、60 試行ごとに 90 秒間、HUD 映像は表示されず運転のみ遂行する時間が与えられた。

2.4 実験手続き

実験参加者は実験についての説明を受け、同意書に署名後、運転席を模した座席に着席した。まず脳波計の装着と視機能の検査、運転経験などのヒアリングを行った。次にあご台の高さを調整し、以後休憩時を除いてあご台に顔を固定した姿勢を維持した。シミュレータでの運転練習を十分に実施し、HUD 映像課題の練習と表示位置の調整を実施したのち、2 つの投影水準で実験課題に取り組んだ。投影水準は、虚像・実像の順で行うグループと、実像・虚像の順で行うグループに実験参加者を分け、カウンタバランスを取った。各投影水準の課題終了後、HUD 映像の情報量水準別の課題の難易度、HUD 映像の見えやすさおよび明るさ、目の疲労度について主観評価を行った。全投影水準の終了後、実験全体についてのヒアリングを行った。

2.5 解析

データの数値解析には MATLAB R2019b (MathWorks) を、また脳波データのノイズ処理などには EEGLAB 2019_1 (SCCN, オープンソース) を使用した。

前処理 脳波データから体動や電気的なノイズの影響を除外するため、0.1~20 Hz のバンドパスフィルタを用いて脳波データのフィルタリングを行った。その後、target 映像を表示した全 54 試行について、映像表示の 0.5 秒前から 2 秒後までの脳波データを切り出した。各試行について目視によるチェックを行い、映像表示後の眼球運動が検出できなかった試行、眼球運動を行いながら瞬目を行った試行、修正サッケードが見られ眼球運動が複数段階にわたっていた試行について解析対象から除外した。その後、Gratton らの提唱する方法 [3] で、脳波データから眼電位の影響を除去した。影響除去後の脳波データについて、 $\pm 100 \mu V$ を超える電位変動があった試行についても、解析対象から除外した。

解析 「視覚入力」の評価指標として、眼電位から眼球運動の検出を行い、HUD 映像が表示されてから、先行車から HUD 映像に視点が移動して視線が安定するまでにかかった時間 (gaze stability latency, GSL) を算出し、各情報量水準の平均を取った。また、「認知判断」の評価指標として、GSL の算出に用いた視線の安定時刻でオンセットした脳波を各情報量水準で加算平均し、P300 潜時を算出した。解析対象の試行について、HUD 映像が表示されてからボタン押しがされるまでの、視覚情報処理全体にかかる反応時間を算出し、各情報量水準の平均を取った。

統計検定 SPSS Statistics バージョン 25 (IBM) を使用した。有意水準は 5% とした。

3. 結果

3.1 主観評価

各主観評価項目は、後述する方法で点数化した。全参加者の評価の平均と標準誤差を図2に示す。

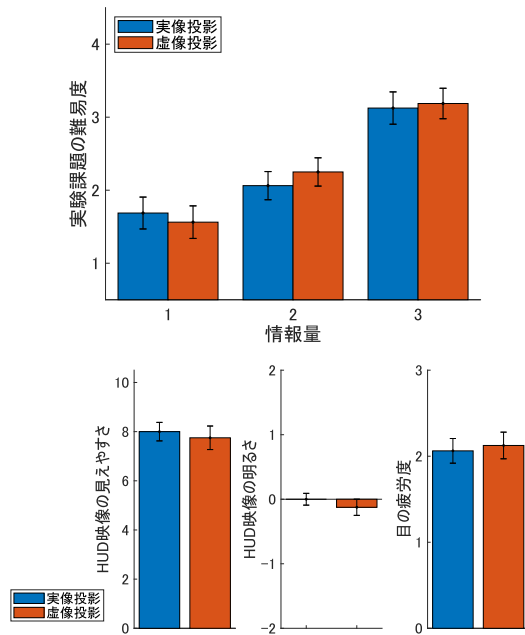


図2: 主観評価

実験課題の難易度 「易しい、やや易しい、やや難しい、難しい」の4件法で評価し、それぞれ1から4までの点数をつけた。点数が高いほど難しいと感じていることを表している。いずれの投影方法も、情報量が増えると、より難しいと評価する傾向がみられた。難易度の評価を目的変数、投影方法と情報量を説明変数とする二要因分散分析を行ったところ、情報量の主効果 ($p < .01$) のみ有意であった。Bonferroniの多重比較を行ったところ、情報量1と3 ($p < .01$)、2と3 ($p < .01$) の差が有意であった。

HUD映像の見えやすさ 「見えにくい」を0、「見えやすい」を10とした、11段階の整数値で評価した。点数が高いほど見えやすい(良い)ことを表している。

HUD映像の明るさ 「極めて暗い・やや暗い・ちょうど良い・やや明るい・極めて明るい」の5件法で評価し、それぞれ-2から+2までの点数をつけた。点数が0に近いほど明るさがちょうど良いことを表している。

目の疲労度 「全く疲れを感じない、あまり疲れを感じない、やや疲れを感じる、疲れを感じる」の4件法で評価し、それぞれ0から3までの点数をつけた。点数が低いほど目の疲労度が少ない(良い)ことを表している。

HUD映像の見えやすさ・明るさ、目の疲労度の3項目について、いずれも虚像の方がわずかに悪い評価であった。それぞれを目的変数、投影方法と情報量を説明変数とする二要因分散分析を行ったところ、すべての分析において主効果と交互作用のいずれもみられなかった。

3.2 行動・生理指標による評価

2.5に示す方法に従って解析を行ったところ、虚像を先行実施した1名と実像を先行実施した1名について、計測不良によりP300潜時の算出ができなかった。以下の解析では、この2名を除いた14名のデータを用いた。

GSL GSLの平均と標準誤差を図3に示す。実像投影では情報量によってGSLが変化せず、虚像投影では情報量が増えるとGSLが短くなる傾向がみられた。GSLを目的変数、投影方法と情報量を説明変数とする二要因分散分析を行ったところ、投影方法の主効果 ($p < .05$) と情報量の主効果 ($p < .05$) が有意であった。情報量についてBonferroniの多重比較を行ったところ、情報量1と3 ($p < .05$) の差が有意であった。

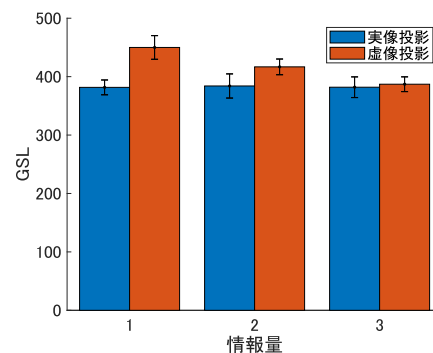


図3: Gaze Stability Latency

P300潜時 P300潜時の平均と標準誤差を図4に示す。いずれの投影方法も、情報量が増えるとP300潜時が延長する傾向がみられた。P300潜時を目的変数、投影方法と情報量を説明変数とする二要因分散分析を行ったところ、情報量の主効果 ($p < .01$) のみ有意であった。Bonferroniの多重比較を行ったところ、全ての情報量の組合せ ($p < .01$, $p < .01$, $p < .01$) で差が有意であった。

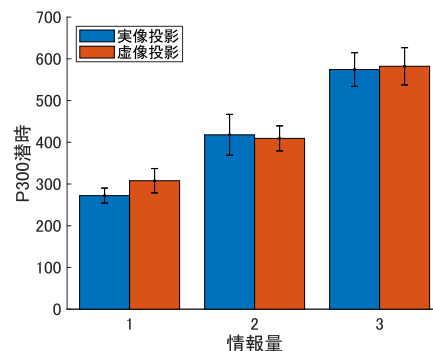


図4: P300潜時

反応時間 反応時間の平均と標準誤差を図5に示す。虚像投影の方が実像投影より反応時間が長い傾向がみられた。またいずれの投影方法でも、情報量が増えると反応時間が延長する傾向がみられた。反応時間を目的変数、投影方法と情報量を説明変数とする二要因分散分析を行ったところ、投影方法の主効果 ($p < .01$) と情報量の主効果 ($p < .01$) が有意であった。情報量についてBonferroniの多重比較を

行ったところ、全ての情報量の組合せ ($p < .01$, $p < .01$, $p < .01$) で差が有意であった。

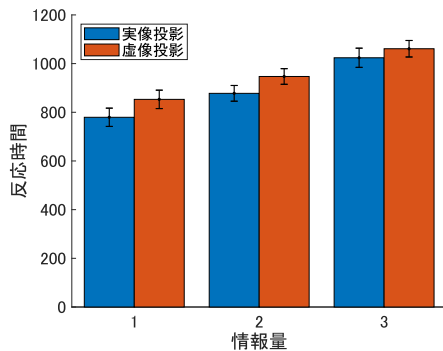


図 5: 反応時間

4. 考察

本研究では、主観評価に加えて行動・生理指標を評価に用いることで、視覚情報処理を「視覚入力」「認知判断」「運動出力」の3つのプロセスに分けて検討した。GSLは視覚入力に、P300潜時は認知判断に、反応時間は3つのプロセス全てにかかる時間を反映した指標である。

HUD 映像について HUD 映像の見えやすさおよび明るさについて、投影水準間で有意な差はみられなかった。このことから、HUD 映像そのものは投影方法によらず実験参加者に同じように見えていたと考えられる。そのため、投影方法の主効果がみられた各指標について、HUD 映像そのものの違いではなく、装置の違い、具体的には映像表示位置の表示体の設置有無が結果に影響を与えていたと推測される。

視覚入力 GSL について、投影方法と情報量の主効果がみられた。全体としては虚像投影のほうがGSLが長く、また情報量が少ないほうがGSLが長いという結果であったが、特に虚像投影において情報量の影響が顕著であった。情報量が1のときの投影水準間の違いは、著者らの過去の研究[1]でみられたものと同じであった。これは実像投影において、映像表示位置に設置された表示体に対する空間定位が、映像に対する空間定位を補助することによると考えられる。一方、情報量が増えることで投影水準間のGSLの差が小さくなる傾向について検討するうえでは、上述の理由は不足がある。今回の課題では、HUD 映像の情報量が増えると矢印図形の数が増えた。これにより、図形全体のエッジの数が増え、映像の形状が複雑になった。また、映像の占める面積が大きくなり、映像の光度が高くなった。これらの変化により、映像そのものに対する空間定位がしやすくなったことで、GSLが短くなったのではないかと考えられる。実像投影では表示体による空間定位の補助が十分であったことから、情報量の影響によるGSLの短縮は小さかったことが考えられる。

認知判断 P300 潜時について、先行研究[2]と同様に情報量の主効果がみられ、情報量が増えると潜時が延長する傾向がみられた。これは、表示された映像がtarget映像であるか判断をするために確認すべき図形の数が増え、判断の

ために参照する情報が増えたことで、それぞれの処理にかかる時間が付加されたことによるものと考えられる。同様に情報量の主効果がみられた難易度の主観評価では、情報量が増えると課題を難しく感じるようになった。実験後のヒアリングで、「ボタン押しの判断に時間がかかり、HUD 映像から目を戻したら車間距離が詰まっていたので慌ててブレーキを踏んだ」といった報告をした実験参加者が複数いた。このことから、判断そのものの難易度に加え、運転しながら映像を見て回答するという課題であったことから、映像を判断するのにかかる時間が長くなるほど、運転自体も難しく感じたことが考えられる。

プロセス全体 反応時間について、投影方法と情報量の両方の主効果がみられた。虚像投影のほうが反応時間が延長する傾向であり、これはGSLにみられる視覚入力プロセスの傾向と同じであった。また情報量は増加するほど反応時間が延長し、これはP300潜時にみられる認知判断プロセスの傾向と同じであった。また、GSLでは情報量が増加すると投影水準間の差が小さくなる傾向であったが、反応時間においても同じ傾向がみられた。今回の課題ではすべての条件でボタン押しによる回答を行ったため、運動出力プロセスには条件間で差がなかったと考えられる。このことから、プロセス全体に反映されたHUD設計パラメータの影響を、GSLとP300潜時を用いて視覚入力と認知判断のそれぞれに対する影響に分けて評価することができたといえる。

5. おわりに

HUDの設計パラメータである投影方法は視覚入力プロセスに、情報量は認知判断プロセスにそれぞれ影響を与えることが確認された。また、情報量の増加に伴って映像の形状や光度が変化することで、視覚入力プロセスにも影響を与えている可能性が示唆された。今後さらに様々な設計パラメータの検証を進めることで、ASVに適したHUDの開発に寄与することが期待される。加えて、視覚情報処理をプロセスごとに分割評価する手法により、広く透明表示体を用いたAR映像の視覚情報処理について明らかにすることができよう。

参考文献

- [1] 山田, 上田, 中尾. (2020). ヘッドアップディスプレイの映像投影方法がヒトの視覚情報処理に与える影響. 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 1B3-5.
- [2] Takada, S., Ueda, K., et al. (2019). Evaluation of driver's cognitive load when presented information on the windshield using p300 latency in eye-fixation related potentials. In *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 4006-4011.
- [3] Gratton, G., Coles, M. G., & Donchin, E. (1983). A new method for off-line removal of ocular artifact. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 55(4), 468-484.