



ヘッドアップディスプレイ (HUD) の映像投影方法が ヒトの視覚情報処理に与える影響の評価

Evaluation of The Impact of Image Projection Methods in Head-up Display (HUD)
on Human Visual Information Processing

山田和佳¹⁾, 上田一貴²⁾, 中尾政之³⁾

Nodoka YAMADA, Kazutaka UEDA, and Masayuki NAKAO

東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)

1) yamada.n@hnl.t.u-tokyo.ac.jp 2) ueda@hnl.t.u-tokyo.ac.jp 3) nakao@hnl.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 自動車の運転支援技術の一つであるヘッドアップディスプレイ (HUD) は、情報を提示するときだけフロントガラス上に表示され、ドライバは運転中に道路環境から HUD 映像へ目を向けることで脳内への視覚情報入力を行う。よりユーザフレンドリな HUD を設計するためには、ドライバの視覚情報入力プロセスについて理解する必要がある。本研究では HUD の映像投影方法に着目し、実像表示と虚像表示の機器構成の違いが入力プロセスにどのような差を与えるかを視線計測により検証した。

キーワード: ヘッドアップディスプレイ (HUD), 虚像, 実像, 視線計測

1. はじめに

ヘッドアップディスプレイ (heads-up display, HUD), ヘッドマウントディスプレイなどの複合現実デバイスや、ウィンドウガラススクリーンを用いた広告表示といった、背景の透過を特長とした映像表示に関する試みが盛んである。光透過率の高いガラスやアクリルなどの素材を表示体とする映像表示においては、その表面反射を用いた虚像投影が主流である。近年では、拡散反射を実現した実像投影の技術も増えてきた。

自動車や作業機械に搭載される、運転操作のリアルタイム支援を目的とした HUD においては、ドライバや作業者がスクリーン前方の環境を見ながら遂行するメインの操作を妨げられることなく、速やかに映像表示から情報を取得できることが求められる。虚像投影の HUD について調べた先行研究では、ドライバの視覚情報処理プロセスが低負荷となる最適な表示パラメータの探索が行われている。犬塚ら (1991) は、高齢者を対象とした研究において、映像の呈示距離を 2.0~2.5 m で変化させた際の呈示された映像に対する反応時間を計測したところ、映像の呈示距離が遠くなるほど反応時間が短くなったと報告している [1]。また小川ら (2018) は、運転時に注意を向けるべき前方車両に相当する注視点をドライバから 20 m・40 m・60 m の距離に設け、HUD 映像の実際の表示距離を 2 m から 50 m まで変化させた際の、映像の形状認識にかかった時間および見やすさの主観評価を測定した [2]。すべての注視点距離において、15 m 以上の HUD 映像表示距離では映像の認識時間が短く、主観的に見やすいという結果が報告されている。

これらの研究が示すように、前方環境を見ている状態から手前の映像に目を向けるときの焦点の移動距離は短い方がドライバにとって低負荷であり、虚像投影の HUD では映像を遠方に表示させた方が良いと考えられている。

一方で、虚像投影の車載 HUD では映像の表示距離を遠方にしても、透明表示体の距離は変化せず、フロントガラスまたはダッシュボード上に設けられたコンパインスクリーンの位置で固定である。そのため、映像表示が遠方になるほど、映像と表示体との距離は開いていく。志和ら (1996) は透過型の立体映像表示装置において、スクリーンを映像表示位置に移動させることで視覚疲労を低減させる機構を提案し [3]、杉原ら (1999) がその設計思想をもとに作製した焦点調節を補償する機能を有する映像表示装置を用いた実験で、補償がない場合に比較して映像の視認性が向上することを報告している [4]。大森ら (2004) は立体映像の見え方が 2D の場合よりも 3D の場合のほうが、焦点の調節量が大きいことを報告している [5]。これらの結果からは、虚像投影の HUD においても、映像位置と表示体が離れて空中像として表示され、映像をそこに存在する実物体のように感じないことにより、焦点調節機能が弱まり、視覚情報処理負荷が高まる可能性が考えられる。

本研究では HUD の映像投影方法に着目し、虚像投影と実像投影の違いがヒトの視覚情報処理に与える影響を検証した。検証においては、視覚情報処理プロセスを「入力」「認知」「出力」のサブプロセスに分けたうち [6]、入力プロセスにあたる処理を視線計測を用いて評価した。

2. 実験方法

2.1 目的

視覚情報処理に影響を与える可能性のある HUD の映像表示方法の特性として、虚像と実像の光学的な違い、すなわち反射光を見るのか拡散光を直接見るのかという違いと、映像表示位置と表示体の距離の関係が異なることによる違いの 2 つが考えられる。そこで虚像条件、実像条件に加え、投影方法は虚像だが映像の表示位置に透明体を設置した比較用虚像条件の 3 つの方法間で、視覚情報処理の入力プロセスにどのような違いがみられるか調べることを目的とした実験を行った。入力プロセスの評価指標として、視線計測を行い、HUD 映像が表示されてから HUD 映像に視線が移動し安定するまでの時間 (gaze stability latency, GSL) を算出し用いた。

2.2 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ない大学生 8 名 (男性 6 名・女性 2 名、平均年齢 21.8 歳、標準偏差 1.2 歳、メガネまたはソフトコンタクトレンズを装着) であった。本実験は、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)。実験参加者には、実験開始前に実験の主旨を説明し、書面で参加の同意を得た。

2.3 実験装置

実験装置は、実験参加者の座席となる計測装置部と、後述する 2 つの実験課題にそれぞれ対応した 2 つの呈示装置部に分けられる。

実験中、参加者はあご台にあごと顔を固定するようにして椅子に着席した。あご台には視線計測装置 (ナックイメジテクノロジー社製 EMR-9) が取り付けられ、課題遂行中の参加者の視線を計測した。視線計測装置のサンプリング周波数は 240Hz で、キャリブレーション距離は 1.5m であった。

ドライバが運転時に前方環境を見る状態を模した、遠点注視課題を呈示するため、1 台のプロジェクタ、スクリーン、鏡から成る遠点注視課題呈示装置を構築した (図 1)。実験参加者からは、遠点スクリーンに投影されたプロジェクタの映像が鏡に反射して、アイポイントから 10 m 離れた正面に見えた。

またドライバが HUD 映像から情報を取得する状況を模した HUD 課題を呈示するため、2 台のプロジェクタ、虚像投影および実像投影の可能な HUD 用アクリル製スクリーン (透過率 71%, スクリーンゲイン約 0.5) およびリアスクリーンを用いて HUD 課題呈示装置を構築した (図 2)。いずれの投影条件においても HUD 映像は実験参加者のアイポイントから 1.5 m 離れた正面に表示された。

課題映像の刺激呈示と反応取得の制御は Neurobehavioral Systems 社製ソフト Presentation 18.2 で行った。

2.4 実験課題

実験課題は 1 試行ごとに以下の 2 つの課題からなり、各投影条件で 6 通りの HUD 課題を 2 試行ずつ含む 12 試行を連続して行った (図 3)。

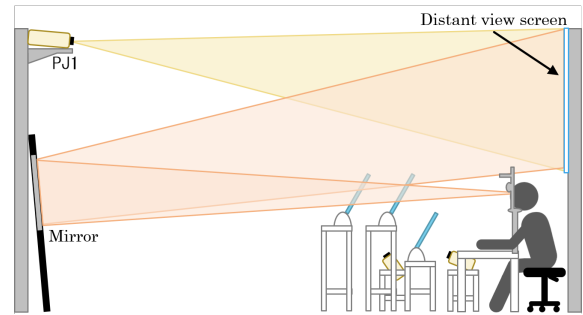


図 1: 実験装置概観および遠点注視課題呈示装置

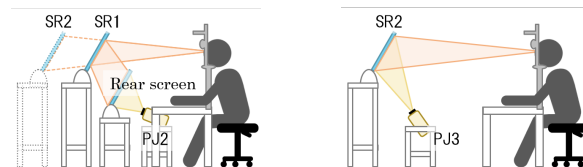


図 2: HUD 課題呈示装置 (左: 虚像条件, 右: 実像条件)

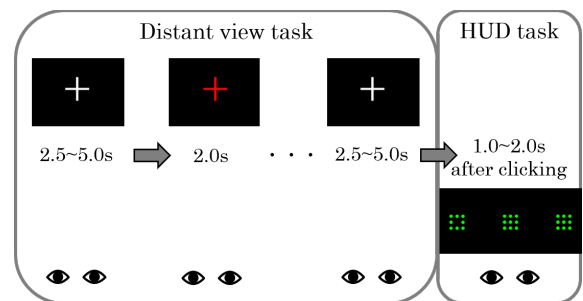


図 3: 1 試行ごとの実験課題の流れ

2.4.1 遠点注視課題

遠点スクリーンの中央に大きさ視角 0.4 度の白色十字図形が呈示された。実験参加者の課題への注意を維持するため、十字は 2.5~5 秒のランダムな時間後に赤色へ変化し、2 秒経つと白色に戻った。実験参加者は課題中常に十字を注視し、十字が白から赤に変化したら素早く手元のマウスをクリックした。1 試行につき赤色の十字は 3~6 回呈示され、白色に戻ったのち 2.5~5 秒のランダムな時間後に消失した。

2.4.2 HUD 課題

遠点注視課題の消失と同時に、HUD スクリーンの中央に大きさ視角 1 度の正方形の緑色点列が 3 つ呈示された。3 つの点列は、遠点注視課題に焦点を合わせた状態では複視の効果により隣り合った点列が重畳して 4 つに見えるため、形状を判断するためには HUD 映像に焦点を合わせる必要があった。それぞれの点列は 8 つまたは 9 つの点からなり、3 つの点列はその両方が含まれるような 6 通りの組み合わせがランダムで呈示された。実験参加者は HUD 映像が呈示されたら素早く焦点を合わせ、中央の点列の点の数が 8 つならばマウスを右クリック、9 つならば左クリックした。点列はクリック後 1~2 秒後に消失し、同時に次の試行の遠点注視課題が開始した。

2.5 実験手続き

実験参加者は実験についての説明を受け、視力測定を行った後、実験用の座席についた。まずあご台に顔を固定し

た状態で視線計測装置のキャリブレーションを行い、実験課題の練習を行った。その後3つの投影条件で実験課題に取り組んだ。投影条件は、虚像・実像・比較用虚像の順で行うグループと、実像・虚像・比較用虚像の順で行うグループに実験参加者を分けて、虚像条件と実像条件間のカウンタバランスを取った。

実験参加者は各条件の課題終了後に、HUD映像の見えやすさについての Visual Analog Scale (VAS) 評価および目の疲労度についての4件法評価を行った。実験課題は各条件で7分ほど要し、各条件の間には3~5分の休憩を取った。実験後には実験全体についての聞き取り調査を行った。

2.6 視線解析

解析では、各条件で1試行めの遠点注視課題を実施中の視線データから、瞬きのない連続した1秒間のデータを抽出し、それぞれの基準注視データとした。基準注視データの視線変動の振幅を注視判定の振幅閾値として使用し、実験課題中の視線データに対して適用した。各試行のHUD課題の映像呈示がされてから、最初に注視が開始するまでの時間をGSLとした。

各条件の12試行のうち、最初の2試行は実験参加者が条件に慣れていないことから解析から除外した。またHUD課題が不正答であった試行も解析から除外した。さらにGSLがHUD課題のマウスクリック反応時間よりも遅い試行、および200ミリ秒[7]よりも短い試行は、遠点注視課題を注視した状態からHUD課題を注視した状態への視線移動を正しくとらえられていないと考えられるため、解析から除外した。統計検定の有意水準は5%とした。

3. 実験結果

3.1 主観評価

投影条件ごとの実験参加者8人の主観評価の平均を表1に示す。

目の疲労度の評価は「全く疲れを感じない」から「疲れを感じる」までを0~3の点数に換算した。投影条件間で目の疲労度の評価に有意差はみられなかった ($F(2, 14) = .724, p = .502$)。

HUD映像の見えやすさの評価は0~12の点数に換算した。点数が大きいくほど、HUD映像が見えやすいことを示す。投影条件を説明変数、HUD映像の見えやすさの評価点数を目的変数とする1要因分散分析(ANOVA)を行ったところ、投影条件の主効果がみられた ($F(2, 14) = 4.889, p = .025$)。Bonferroniの方法で多重比較を行ったところ、比較用虚像条件と実像条件間で有意傾向がみられ ($p = .059$)、比較用虚像条件よりも実像条件でHUD映像が見えやすい傾向のあることが示された。

3.2 正答率

投影条件ごとのHUD課題の正答率を、各条件最初の2試行を除く10試行から算出した。実験参加者のうち1人は全条件にわたって正答率が極端に低かったため以下の分析から除外した。残りの7人の正答率の平均は表2に示した通

表 1: 主観評価 (n = 8)

| | 投影条件 | | |
|-------------|-----------------------|------------|------------|
| | 虚像 | 比較用虚像 | 実像 |
| 目の疲労度 | 1.38 (.26) | 1.63 (.26) | 1.50 (.33) |
| HUD映像の見えやすさ | 8.79 (.66) | 7.69 (.89) | 9.56 (.72) |
| | mean (standard error) | | |

表 2: 正答率, 反応時間, GSL (n = 7)

| | 投影条件 | | |
|-----------|-----------------------|--------------|--------------|
| | 虚像 | 比較用虚像 | 実像 |
| 正答率 (%) | 94.3 (2.0) | 97.1 (2.9) | 97.1 (1.8) |
| 反応時間 (ms) | 916.5 (36.7) | 864.8 (49.1) | 795.0 (21.4) |
| GSL (ms) | 515.7 (22.0) | 470.6 (16.6) | 390.4 (13.5) |
| | mean (standard error) | | |

りで、条件間に有意差はみられなかった ($F(2, 12) = .774, p = .483$)。

3.3 反応時間と GSL

各投影条件における実験参加者別のHUD課題のマウスクリック反応時間の平均とGSLの平均の対応を図4に示す。いずれも虚像表示と比較して実像表示の方が時間が短く、プロットの全体にわたって正の関係が見られたが、統計的な相関は認められなかった。

投影条件ごとの7人の反応時間とGSLそれぞれの平均を表2および図5に示す。反応時間とGSLのいずれも、虚像・比較用虚像・実像条件の順に時間が長かった。虚像・比較用虚像条件間では、反応時間の差が約50ミリ秒、GSLの差が約45ミリ秒であった。比較用虚像・実像条件間では、反応時間の差が約70ミリ秒、GSLが約80ミリ秒であった。投影条件を説明変数、反応時間を目的変数とするANOVAを行ったところ、投影条件の主効果が認められた ($F(2, 12) = 5.598, p = .019$)。Bonferroniの方法で多重比較を行ったところ、虚像条件と実像条件の間に有意差がみられ ($p = .050$)、虚像条件のほうが反応時間が長い傾向のあることが示された。同じくGSLを目的変数とするANOVAを行ったところ、こちらも投影条件の主効果が認められた ($F(2, 12) = 13.955, p = .001$)。Bonferroniの方法で多重比較を行ったところ、虚像条件・実像条件間 ($p = .012$) および比較用虚像条件・実像条件間 ($p = .024$) に有意差がみられ、虚像条件および比較用虚像条件でそれぞれ実像条件よりGSLが長い傾向のあることが示された。

4. 考察

本実験では、HUD映像から情報を取得するヒトの視覚情報処理プロセスのうち入力プロセスを、視線計測によって算出したGSLで評価することを試みた。また、実験結果に示した正答率は認知プロセス、主観評価および反応時間は

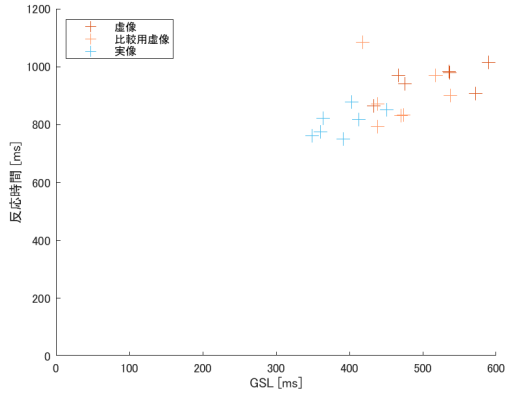


図 4: 反応時間と GSL の関係 (n=7)

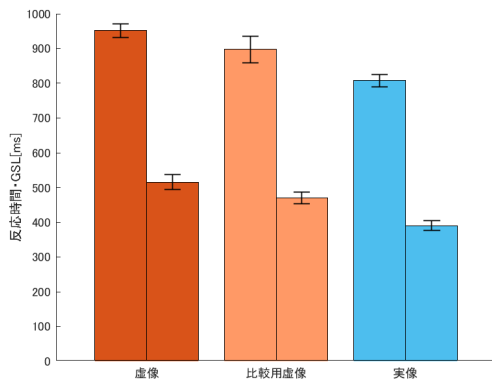


図 5: 反応時間 (左), GSL (右) (n=7)

入力から出力までのプロセス全体の処理を反映した評価指標であったと考えられる。

正答率に投影条件間で差がなかったことから、投影条件の違いは認知プロセスの処理に影響を与えない可能性が示唆された。また実験課題は単純なマウスクリック課題であるため、出力プロセスにおいては条件間で差が認められなかったと考えられる。

GSL および反応時間の結果では、投影条件間で同程度時間の差が見られた。反応時間はプロセス全体の処理を反映しているが、認知プロセスと出力プロセスには条件間で差がないことが考えられるため、GSL と同様に条件間の差は入力プロセスに起因するものである可能性が高い。これより、HUD の投影条件は入力プロセスに影響を及ぼすことが示唆された。虚像がもっとも入力プロセスに時間がかかっている原因として、映像の結像する表示位置に表示体が置かれておらず、空中に像が浮かんでいるように見えるため、映像位置の奥行きを弁別するための手がかりが少ないことが考えられる。サッケードと呼ばれる、対象に目を向け視線を移動する眼球運動についての研究では、事前に手がかり情報を与えることでサッケードの時間が短くなることが報告されている [8]。このことから、比較用虚像や実像では結像位置に表示体が置かれることで、入力プロセスと同時にまたは先立って行われる目標の空間定位が高精度に行われたために、より高速に入力プロセスが行われた可能性がある。

HUD 映像の見えやすさでは比較用虚像がもっとも見えにくいという評価であった。これは比較用虚像の装置のみ表示体のアクリルが 2 枚使用された構成であったため、映像と背景のコントラストが下がった可能性が考えられる。GSL および反応時間の結果で、実像より比較用虚像のほうが時間が長くなっているのはこのためだと推測される。また、比較用虚像条件のみ実施順のカウンタバランスがとられておらず、全実験参加者が 3 番目に実施したため、疲労の影響を受けた可能性もあるが、目の疲労度の主観評価では条件間に差が見られなかったため、その影響は小さいものと考えられる。

5. おわりに

透明表示体を用いた映像表示システムである HUD を対象として、映像投影方法が視覚情報処理に与える影響を調査するため、視線計測を用いた評価実験を行った。その結果、虚像投影と実像投影では視覚情報処理プロセスにかかる時間が異なることがわかった。この差は映像が空中像として表示されているか、実物体上に表示されているかの違いが、空間定位に影響を与えることによるものだと考えられる。

今後は実験参加者を増やし検証を進めるとともに、投影方法が視覚情報処理プロセスに影響を与えるメカニズムについて明らかにするため、映像の表示距離を変化させて比較を行う必要がある。特に HUD においては、虚像の遠方表示に関する研究が多く取り組まれているので、実像の遠方表示との比較を行うことで、遠方に表示された映像の視覚情報処理についての知見獲得を目指す。

参考文献

- [1] Inuzuka, Y., Osumi, Y., & Shinkai, H. (1991). Visibility of Head up Display (HUD) for Automobiles. *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, 35(20), 1574-1578.
- [2] 小川, 村瀬, 他. (2018). AR-HUD の最適表示距離の提案. *自動車技術会論文集*, 49(2), 378-383.
- [3] 志和, 大村, 岸野. (1996). 視線検出により焦点調節を補償する立体表示装置. *テレビジョン学会誌*, 50(9), 1292-1299.
- [4] 杉原, 宮里, 中津. (1999). 焦点調節補償機能を有する HMD : 3DDAC Mk.4 (<特集> HMD). *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, 4(1), 261-268.
- [5] 大森, 宮尾, 他. (2004). 立体映像に対する水晶体調節の測定. *VISION*, 16(4), 223-226.
- [6] 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 ITSC*, 4006-4011.
- [7] Salthouse, T., Ellis, C. (1980). Determinants of Eye-Fixation Duration. *The American Journal of Psychology*, 93(2), 207-234.
- [8] 伊佐. (2000). 注意の脳内表現へのボトムアップ的アプローチ. *VISION*, 12(3), 123-130.