DLP-PGUを用いた2-Plane HUD

2-Plane Head-up display by using Single DLP-PGU

関谷 俊[†], 諸橋 一夫[†], 川合 健[†], 笠原 毅[†]
Shun Sekiya[†], Kazuo Morohashi[†], Takeru Kawai[†] and Tsuyoshi Kasahara[†]

あらまし HUD (Head-up display) は自動車のフロントガラス越しにスピードや警告を虚像として表示される表示装置である, その視認性の高さから安全にドライバに情報を提示する手段として, 近年急速に搭載車種が拡大している. 今後はより安全かつ直観的に情報提示できる表示装置が求められ, HUDは視認性に加えて認知性が重要になってくる. このような将来的要求に訴求する二つの虚像面を有する2-Plane HUDを考案した. 実現手段として, バイフォーカルミラーによって一つのDLP-PGU (Picture Generation Unit) から二つの中間像を得る手法および二つの中間像を一对の自由曲面鏡で拡大投影する手法を採用した. 虚像の幾何光学的なシミュレーションの結果として, 像歪み, 結像性能を満足するHUDの成立性を示した.

キーワード: HUD, PGU (Picture Generation Unit), DLP, HMI (Human Machine Interface)

1. ま え が き

1.1 HUDとは

HUDは航空機用表示装置として開発され, 1980年代に自動車用HUDの実用化がスタートした.

HUDは大きく二つの特徴を有している. 一つ目はメータやCID (Center Information Display) と比べて, ドライバが情報取得するための視線移動時間を低減できることである. HUD表示像はドライバの有効視野に情報を表示するため, 運転に必要な情報を頭の位置や姿勢を変えることなく容易に情報取得することが可能である.

二つ目は焦点調整時間を低減できることである. 一般的にメータがドライバから1 m未満の前方に位置しているのに対し, HUDは約2.5 m程度に位置している. そのため数10 m以上遠方を見て運転しているドライバにとって情報取得のための焦点調整負荷を低減できる.

このような特徴からHUDは視認性に優れており, 安全に情報を取得できる表示装置であると言える. 近年, 技術革新や快適性, 利便性の追求に伴い運転中の情報量が増加しているが, それらを適切にドライバに伝達するHMI (Human Machine Interface) としてヨーロッパや北米を中心に搭載されるケースが増加してきており, 今後も需要拡大が見込まれている¹⁾.

1.2 次世代HUD

現在HUDは各メーカのオプション設定にとどまっているケースが多く, メータやCIDのサブディスプレイとしての

位置付けが大きいのが現状である. しかしながら, 今後は運転時の実質的な表示機能を担うプライマリーディスプレイへとその存在感が増えていくと予想する. これは, 近年の安全志向の高まりや各種ADAS (Advanced Driver Assistance System) を搭載した車両における適切なHMIの必要性に由来する. 現在ADASを備えた車両においては, 取得したセンシング情報や警告は音や振動とともにドライバの有効視野から外れた位置に提示されるケースが多く, 必ずしもドライバが瞬時に状況を認識できるとは限らない. このような点からHMIとして単に視認性が良いだけでなく, 周囲状況や車両が何をセンシングしているのかわかりやすい認知性の高いHUDが求められる.

AR (Augmented Reality) 技術はそのようなHUDを実現する手段の一つと考えられる. AR-HUDはドライバが見ている実空間に一致させるようにHUD表示を重畳させるものである²⁾. そのため, ドライバは実空間に存在する対象物と表示コンテンツ間の視線移動時間をなくすることができるのはもちろん, 対象物と表示コンテンツとの関連性を認知する負荷を低減できると考えられる. 特に時間的, 空間的にドライバが見えていない, あるいは気づいていない物や事を重畳表示することで認知性に対してより大きなメリットがあると考えられる.

1.3 AR-HUDの課題

実空間に重畳するようにHUDコンテンツを表示させることから, AR-HUDは従来よりも広画角, 遠方に虚像を映し出す必要が出てくる. 例えば, 縦方向の画角は4 deg, 表示距離は10 mといった報告がなされている³⁾. 仮に15 m先で1車線分の重畳範囲を得るには, 横方向の画角で約10 deg 必要になる計算である. HUDの光学的な原理からすると,

2018年4月2日受付, 2018年8月31日再受付, 2018年9月6日採録

[†] 日本精機株式会社

(〒940-2141 長岡市藤橋1-190-1, TEL 0258-47-1577)

このような広画角・遠方表示を実現するには必然的に外装パッケージサイズが大型化する。当然ながら搭載可能な車種は著しく限定されることになり、AR-HUDの普及を妨げる大きな課題の一つとなっている。

このような状況から、AR-HUDの技術課題解決に至る前の代替案として、現実的なパッケージサイズで高い認知性を備えた2-Plane HUDを検討した。

2章、3章では2-Plane HUDの優位性仮説とわれわれが実際に設計した2-Plane HUDの仕様、実現手段、設計結果について示す。

2. 2-Plane HUD コンセプト

2.1 2-Plane HUDの虚像の構成

2-Plane HUDは図1 (a), (b) に示すように虚像である表示像面を2面有するHUDである⁴⁾。各表示像面はドライバーから近いNear表示像面と遠いFar表示像面の異なる表示距離に存在している。さらにFar表示像面は、路面に垂直な面に対して大きく傾斜しているといった特徴を有する。2-Plane HUDの基本的な仕様は表1に示す通りである。

2.2 2-Plane HUDの優位性仮説

ここでは2-Plane HUDの優位性と考えられる仮説を紹介する。

一つ目は、ドライバーにとって有益なさまざまな情報をその種類に適した位置と距離に切り分けて表示できる点である。ルートガイダンスやADASによるセンシング情報、警告といった運転支援情報はより遠方のFar表示像面に表示するのが好ましい。これらの表示コンテンツはドライバーが運転のさなかに周囲状況の変化に応じてリアルタイムに把握すべき情報である。より視線移動、焦点調整負荷が小さいことが求められると考えられる。そのため従来よりも遠方に、かつドライバーの視野中心近くに提示することが望ましい。基本的には適切なタイミングにおいてのみ表示されるコンテンツと想定し、運転の妨げにはならないと考えられる。

一方、車速やADAS、警告インジケータは従来HUD同様の位置と距離であるNear表示像面の表示を想定する。これらは基本的にドライバーが必要に応じて取得する情報であるため、常時表示されるべき情報である。そのため、遠方かつドライバーの視野中心近くに表示すると意図せず常に視覚に情報が入り続ける形となり、逆に運転の妨げになる可能性が否定できない。したがって、従来HUDと同様の表示距離と俯角を踏襲する形としている。

優位性の二つ目は、Far表示像面が路面に対して垂直ではなく遠方に向かって倒れていることで、運転支援情報をより認識し易くなる点である。運転支援情報の表現の仕方としては、実空間に対してスケールを縮小した空間俯瞰表現を想定している。空間俯瞰表現は自車と他車あるいはさまざまな対象物との空間的な関連性を瞬時に認識することに適しており、ARとは異なる認知性向上のアプローチと

図1 HUD表示像面の (a) 横断面と (b) 表示サイズイメージ

表1 HUD表示像面の (a) 横断面と (b) 表示サイズイメージ

項目	Near	Far
表示距離 [mm]	2,500	3,000 - 5,000
画角 [deg]	4.5 x 0.9	7.8 x 3.3
表示像サイズ [inch]	8	29
俯角 [deg]	5.7	4.5
表示像チルト角 [deg]	4.5	88
アイボックスサイズ [mm]	130 x 55	80 x 40

捉えることができる。しかしながら、従来のように路面に対して垂直な表示像面では実空間に対して表現できる奥行き方向が異なるため、ドライバーにとっては方向を変換する負荷が生じると予想される。これに対し、倒れた表示像面であれば実空間の奥行き方向と概ね一致させることができる。ドライバーが見ている実際の風景と表示像面とが目の焦点調節や輻輳の処理において連続的なつながりを持つことによって奥行き方向の変換負荷が抑えられるとの仮説によるものである。今回Far表示像面の傾斜角度は88 deg、すなわち路面との角度差は2 degであり概ね奥行き方向は一致している。より傾斜角度が大きい方が方向の変換負荷に寄与すると予想されるが、パッケージサイズの大型化も考慮して決定した。

3. 2-Plane HUDの実現手段と設計結果

3.1 二つの表示像面形成

まず虚像である表示像面の形成方法についてHUD光学系の構成を交えて説明する。

図2に示すように構成要素はNear表示器、Far表示器、平面鏡、凹面鏡、ウィンドシールドである。一般的に表示器上に映し出された画像を凹面鏡とウィンドシールドで拡大、反射し、虚像としてウィンドシールド越しに投影する。

図2 2-Plane HUDの光学系構成

ドライバはアイボックスと呼ばれる領域内で虚像を視認することができる。

通常、虚像の投射距離と倍率は、凹面鏡の焦点距離と表示器～凹面鏡の距離に応じて決定される。ここでは部品点数増加や大型化に配慮し、Near, Far表示器に対して共通の凹面鏡を用い、表示器から凹面鏡の距離および表示器のチルト角を最適化する手法を採用することで表1の仕様実現を目指した。具体的にはNear表示器からFar表示器の光路差を27mm, Near表示器チルト角を28deg, Far表示器チルト角を50degとした。また、ウィンドシールドの自由曲面形状や光学部品の偏心による収差で発生する虚像の歪みを除去するため、幾何光線追跡ソフトを用いて凹面鏡の形状最適化を行った。

実際に設計した虚像のシミュレーション結果を図3に示す。(a), (b)はそれぞれNear表示像面とFar表示像面に対してアイボックス内の9視点における格子像をシミュレーションで可視化した結果である。黒線がまったく歪みのないターゲット格子であり、赤線が設計した格子像の結果を示している。Far表示像面が左右の視点で平行四辺形に歪んで見えるのは虚像が斜めに倒れている故に自然に発生するものであり、黒線に対する赤線の差が実質的な歪みとなる。なお、シミュレーションでは、アイボックス中心から見た虚像の歪みを打ち消すようにワーピング処理を施している。

また、図4はシミュレーション結果から格子点座標を抽出し、像歪みの指標値を算出した結果である。各歪み指標に対する定義は表2に示す通りである。図4の各指標はそれぞれの許容値で正規化しており、1以下であればドライバにとって違和感を与えないレベルと言える。結果的にHORIZONTAL DISPARITY (H-DISP), VERTICAL DISPARITY (V-DISP)で許容値を上回っている結果となった。HORIZONTAL DISPARITYは右目から見た像と左目から見た像がどれだけ水平方向にずれているかを表したものであり、VERTICAL DISPARITYは垂直方向へのずれを表したものである。右目で見えた虚像の格子点x座標

図3 表示像の格子像シミュレーション結果
(a) Near表示像面, (b) Far表示像面

図4 歪み指標 (左: Near表示像面, 右: Far表示像面)

を x_R mm, y座標を y_R mm, 左目で見えた虚像の格子点x座標を x_L mm, y座標を y_L mm, 表示距離を L mmとしたとき、HORIZONTAL DISPARITYとVERTICAL DISPARITYはそれぞれ近似的に以下の式で表される。

$$\text{HORIZONTAL DISPARITY} = \frac{x_R - x_L}{L} * 1000 \text{ [mrad]}$$

$$\text{VERTICAL DISPARITY} = \frac{y_R - y_L}{L} * 1000 \text{ [mrad]}$$

像歪みに対する改善の試みとして、表示器と凹面鏡の間に配置されている平面鏡を自由曲面化し、歪みの補正力を強化することとした。表示器、自由曲面鏡、凹面鏡の位置関係は同様に自由曲面鏡と凹面鏡の両方の形状を最適化した。シミュレーション結果を図5に示す。(a), (b)はそれぞれNear表示像面とFar表示像面に対する結果である。黒

表2 像歪みの指標値定義

項目	単位	定義		項目	単位	定義	
ROTATION	deg		A	ASPECT	%		$X / Y \times 100$
X DISTORTION (X-DIST)	deg		B	X-SHIFT	mrاد		$\Delta X / L \times 1000$
X TRAPEZOID (X-TRPZ)	deg		$ B_{LEFT} - B_{RIGHT} $	Y-SHIFT	mrاد		$\Delta Y / L \times 1000$
Y DISTORTION (Y-DIST)	deg		C	HORIZONTAL DISPARITY (H-DISP)	mrاد		$\Delta x / L \times 1000$
Y TRAPEZOID (Y-TRPZ)	deg		$ C_{TOP} - C_{BOTTOM} $	VERTICAL DISPARITY (V-DISP)	mrاد		$\Delta y / L \times 1000$
SMILE	%		$D / Y \times 100$	ROTATION DISPARITY (ROT-DISP)	deg		$A_L - A_R$

図5 改善後の表示像の格子像シミュレーション結果
(a) Near表示像面, (b) Far表示像面

線は歪みのない理想的な表示像のターゲット格子を、赤線はシミュレーションで得られた表示像の格子像を示している。図の縦横軸はそれぞれ表示像の画角を示している。また、像歪みの指標値結果を図6に示す。アイボックス全域

図6 改善後の歪み指標 (左: Near表示像面, 右Far表示像面)

で格子像はターゲット格子とほぼ一致しており改善が確認できる。また、像歪みの指標も許容値内に収めることができ、成立性を確認できた。一方で、曲面を有する反射面が1面増加したことは各部件のアライメントや曲面の形状管理の観点で製造上のばらつきを生じやすくなるため注意が必要である。

3.2 DLP-PGUによる2表示器形成

2-Plane HUDを実現する上で、いかにNear, Far二つの表示器を形成するかは重要なポイントである。なお、HUDにおいては表示器とその駆動回路を含む表示装置を総称してPGU (Picture Generation Unit) と呼ばれている。一般的に従来のHUDでは表示器としてLCD (Liquid Crystal Display) を用いたPGUが用いられることが多いが、2-Plane HUDに用いる場合には二つのLCD-PGUが必要となる。PGUを二つ用いることで大型化やシステムの複雑化が懸念される。そこで、一つのDLP (Digital Light Processing) -PGUを用いて、プロジェクタの投射光を2分割し、二つのスクリーンの各々に画像を投射する方式を考

図7 DLP-PGUの光学系構成

表3 投射像の目標値

項目	Near	Far
スクリーンサイズ [mm]	32.9 x 8.4	52.1 x 37.4
解像度 [px]	305 x 69	597 x 293

案した。DLP-PGUはDLPを用いたプロジェクション方式の表示方法であり、従来の液晶パネルの位置に配置したスクリーン上にプロジェクタからの画像を投射して表示器を形成するものである。

PGUの構成を図7に示す。フィールドレンズはプロジェクタ側からNearスクリーンに入射する光線角度を調整するために設けており、アイボックスに向けて効率よく光を導く役割を果たしている。表示像面の設計の結果、Near, Farそれぞれの表示器に相当するスクリーンは光路差27mm、チルト角差22degで配置する必要がある。これら二つのスクリーンに投射画像を結像させる工夫としてバイフォーカルミラーを用いた。バイフォーカルミラーはNear用の光線を反射する領域とFar用の光線を反射する領域とに分けられ、スクリーン上で投射光が結像するように各々の焦点距離とミラー形状を自由曲面として最適化している。DMD (Digital Mirror Device) は0.3", 解像度854×480を用い、これを表3に示すスクリーンサイズ、解像度で結像するように設計した。

この時のDMD上におけるMTF (Modulation Transfer Function) を逆光線追跡によって求めた結果を図8に示す。グラフ中には異なる色で複数の曲線が存在しているが、これはDMDの使用領域内での異なる位置におけるMTF曲線を示している。結果として、DMD上での空間周波数50 LP/mmにおいてNearスクリーンで44%, Farスクリーンで40%であった。DMDにおける50 LP/mmは表示可能な

図8 DMD上におけるMTF (上: Near, 下: Far)

図9 パッケージサイズ比較 (左: 量産品, 右: 2-Plane HUD)

最小のLPに相当しており、実用には足るレベルと考えている。なお、DMD上の50 LP/mmをHUDの虚像に換算すると約25 LP/degであり、ドライバに求められる視力0.8から計算される空間周波数に相当する。

3.3 パッケージサイズ

外装部品まで含めたHUDのパッケージ検討結果を図9に示す。左は現行量産HUD、右は今回設計した2-Plane HUDであり、略同等のパッケージサイズで実現できることを確認した。

4. む す び

自動車用HUDには従来の視認性に加えて認知性が要求されるとの予測から2-Plane HUDを考案した。バイフォーカルミラーにより一つのDLP-PGUから二つの表示器を生成し、これを一對の自由曲面鏡を用いることで距離と角度の異なる二つの表示像面が生成可能なことを確認した。

今後の展開としては、これまで述べてきた2-Plane HUDの優位性仮説を検証する取り組みが挙げられる。表示像面として2面有することの有効性、傾斜したFar表示像面に空間俯瞰した自他の関連性を表現することの有効性を検証していく。

〔文 献〕

- 1) Techno System Research: "Head-up Display Market Research 2017"
- 2) R. Ando and S. Okabayashi: "The Superiority of Display Systems Employing AR (Augmented Reality) Technology in Driver's Cognitive Performance", Proceedings of Society of Automotive Engineers of Japan Annual Congress, 81-12, pp.7-12 (2012)
- 3) Y. Hatanaka and N. Kanamori: "Head up Display for Automotive Visibility and Trend", Proceedings of Society of Automotive Engineers of Japan Annual Congress, 35, pp.184-186 (2016)
- 4) J.H. Seo, C.Y. Yoon, J.H. Oh, S.B. Kang, C. Yang, M.R. LEE and Y.H. Han: "Study on Multi-depth Head-Up Display", SID, 48, 1, pp883-885 (2017)

関谷 俊 2005年，新潟大学理学部物理学学科卒業。
2007年，新潟大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。現在，日本精機(株)。

諸橋 一夫 1982年，近畿大学理工学部数学物理学
科卒業。現在，日本精機(株)。

川合 健 2012年，金沢大学理工学域機械工学類
卒業。2014年，金沢大学大学院自然科学研究科博士前期
課程修了。現在，日本精機(株)。

笠原 毅 1993年，長岡技術科学大学電気電子シ
ステム工学課程卒業。1995年，長岡技術科学大学大学院
修士課程電気電子システム工学専攻修了。現在，日本精
機(株)。