

ホログラム方式ヘッドアップディスプレイ

Head-up Display with Holographic Combiner

江口	伸	<i>Shin Eguchi</i>
松本	剛	<i>Tsuyoshi Matsumoto</i>
末包	和彦	<i>Kazuhiko Suekane</i>
林	新一	<i>Shinichi Hayashi</i>
柴田	浩	<i>Hiroshi Shibata</i>
高島	淳行	<i>Atsuyuki Takashima</i>



要 旨

我々は、世界で初めてホログラムコンバイナを採用した車載用のヘッドアップディスプレイ（Head-Up Display 以下HUD）を開発した。

コンバイナにホログラムを採用することで非常にコンパクトになり、多くの車に容易に搭載する事ができるようになった。さらに、表示が非常に明るくなり、日中でも容易に表示を視認することができる。本稿ではこの小型HUDの概要とホログラムコンバイナの開発について述べる。

Abstract

We have developed a new Head-Up Display(HUD), which is the first product in the world for vehicles applied hologram as its combiner.

This HUD is very compact and can be installed easily on the dashboard of many kinds of vehicles. And, because of the high luminance of its reflected image, we can see the information even in the daytime.

This paper outlines HUD and describes development of holographic combiner.

1. まえがき

近年、航空機用表示装置として開発されたヘッドアップディスプレイ（Head-Up Display、以下HUD）が、自動車にも応用され始めている。これは、多様化する情報を安全にドライバーに伝達する新しい車載情報表示装置としてHUDが注目されているからである。

HUDは情報を前方景色付近に重畳し、遠方に表示できるため、表示を見るときでも前方からの視線移動量が低減でき、その結果運転中でも安全に情報の確認が行える。

現在までに実現されている車載HUDは、搭載できる車両が限定されているものが多く、表示内容も魅力に乏しいものが多かった。そこで当社では、ナビゲーションの情報が表示でき、小型後付けタイプで多車種に対応できる、世界初のホログラムコンバイナを採用したHUDを開発したので報告する。

2. HUDとは

2. 1. HUDの構成

HUDは、表示源、光学系、コンバイナの3つの要素で構成されている。表示源はHUDの表示の実体部分であり、表示の光を射出する。光学系は、表示源の表示を拡大し、遠方に結像させる部分である。またコンバイナは、光学系の最後に位置している半透明の反射板で、前方景色からの光を透過し、表示源からの光を反射することで前方景色と表示像を重畳させる機能を有する部分である。（図-1）

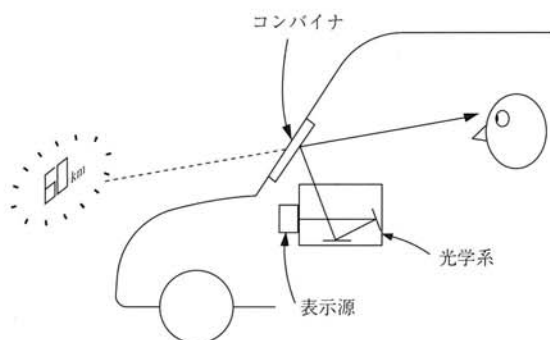


図-1 HUDの構成
Fig. 1 Structure of HUD

表示源から射出された表示光は、光学系を通過した後、コンバイナで反射して目に届くが、このとき、コンバイナと表示源の間の距離、そして光学系による拡大倍率に比例して表示像が遠方に大きく表示される。

表示の視認性、前方景色の視認性はコンバイナの透過

率と反射率によって決定される。例えば、全波長領域において反射率50%（透過率50%）の反射板（ハーフミラー）をコンバイナとした場合、前方景色からの光の50%を透過光として視認し、コンバイナに到達した表示光の50%を反射光として視認することになる。つまり、透過率に比例して前方景色の視認性が向上し、反射率に比例して表示像の視認性が向上することになるが、透過率と反射率は相反する性質であり両方を同時に高くすることはできない。

2. 2. HUDの効果¹⁾²⁾

HUDは、表示像をドライバーの前方景色付近に重畳し、遠方に表示する。そのため表示を見ている時でも前方の景色が視界内にあり、さらに前方の景色から表示へ視線を移動したときの視線移動時間・眼が焦点を再調節する時間が低減できる。これは情報を安全に素早く認知できることを示している。

また、シルバーエイジでは、眼の近点に対する焦点調節能力が徐々に低下していき、年齢50歳では、焦点を合わせることができる最短距離が約1mになる。ところが従来の車室内の情報表示器の位置は、眼から70cm～80cmの距離にあるため、それらの情報を視認するのは困難である。しかし、HUDで1m以上遠方に情報を表示すれば容易に情報を視認できる。（図-2）

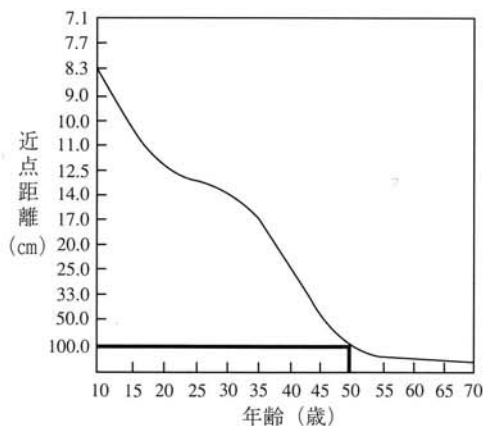


図-2 年齢と焦点調節能力
Fig. 2 Age vs. in focus range

3. 開発のねらい

3. 1. 従来のHUD

従来のHUDはコンバイナとしてハーフミラーを用いるタイプが多かった。ハーフミラーは全波長領域において、一部の光は反射し残りの光は透過する光学素子であ

る。またそれ自身にはレンズ機能（遠方・拡大表示機能）を持たせることが難しい。そのため、以下のような問題点が発生していた。

①表示像を明るくする（反射率を上げる）と前方景色が暗くなり、逆に前方景色を明るくする（透過率を上げる）と表示像が暗くなってしまう。

②太陽の光が光学系を逆行して表示源に入射し、あたかも表示源が全点灯したような状態になることで表示が分からなくなる現象（ウォッシュアウト）が発生する。

③遠方・拡大表示を実現するために光学系が大きくなり、そのためユニットが大型化し、取り付け可能な車種が限定される。また逆にユニットを小型すると効果的な遠方・拡大表示が行えない。

我々は、以上の問題点を解決するために㈱富士通研究所において研究されているホログラムに注目した。ホログラム素子の波長選択性とレンズ機能（遠方・拡大表示機能）を利用し、上記問題点を解決する方法を㈱富士通研究所と共同で検討した。

3. 2. 開発の目標

㈱富士通研究所のホログラム作成・設計技術を応用したホログラムコンバイナを開発することにより、3. 1. で述べた問題点を解決する、つまり

①表示像と前方景色の明るさの両立

②ウォッシュアウトの低減

③遠方拡大表示とユニットの小型化の両立

を実現し、小型で多くの車種に容易に取り付けることのできるアドオン型HUDを開発することを目標とした。

(図-3)

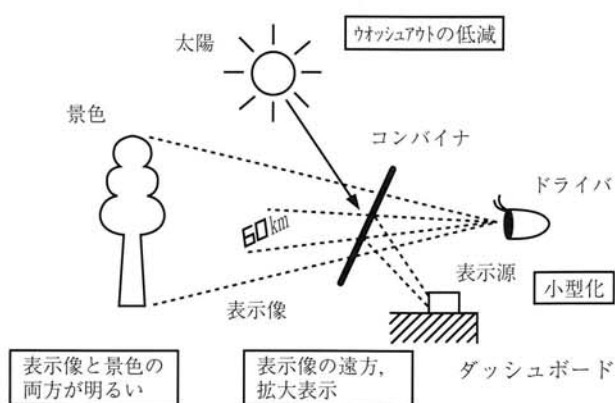


図-3 開発の目標

Fig. 3 Purpose of development

4. ホログラムコンバイナの開発

4. 1. ホログラムの特徴

ホログラムは、2つの光が干渉することにより形成される干渉縞が記録された、厚さが数 μm の非常に薄い特殊な感光材料である。このホログラムに光をあてると、記録された干渉縞の模様により立体画像が浮かび上がったり、入射した光に焦点を絞らせたり（光学レンズの働き）することができる。

このホログラムを応用した光学機器としては、光走査、集光、結像機能を一枚のホログラム薄膜に集約し、高い読み取り率と装置の小型化を実現したPOS用バーコードリーダがある。これはホログラム作成の際、感光材料の片側から光を照射する透過型と呼ばれるホログラムである。

これに対して今回、HUDのコンバイナとして開発したホログラムは、感光材料の両側から光を照射する反射型ホログラムである。反射型ホログラムの特徴は二つある。第一の特徴は波長選択性を持つことである。反射型ホログラムは屈折率の異なる層が数十層積み重なっているため、特定の波長の光を反射し、それ以外の光は透過させる波長選択フィルタの働きをする。反射する光の波長は、層と層の間隔を変えるだけで、容易に制御できる。表示源のスペクトル分布のピーク波長とホログラムにより反射される光のピーク波長を合わせれば、表示像を明るくすることができる。また、ピーク波長付近の一部の色以外の光は透過するため、前方景色からの光は、その大部分が透過し、背景も明るくすることができる。(図-4 (a))

第二の特徴はホログラム自身にレンズ機能を与えることが可能なことである。反射型ホログラムは、感光材料の両面からレーザ光を照射し、干渉縞を記録する。そのとき、一方のレーザ光を平面波、他の一方を球面波とする。そして、再生の時、作成に用いた光と同じ平面波を照射すれば、もう一つの光である球面波が射出する。即ち、平行な光が入射すると広がった光が射出するため、一種の凹レンズとしての働きを持つ。この機能により、表示像を拡大したり遠方に表示することができる。また、コンバイナに表示を投影する光学系も小型化することができる。(図-4 (b))

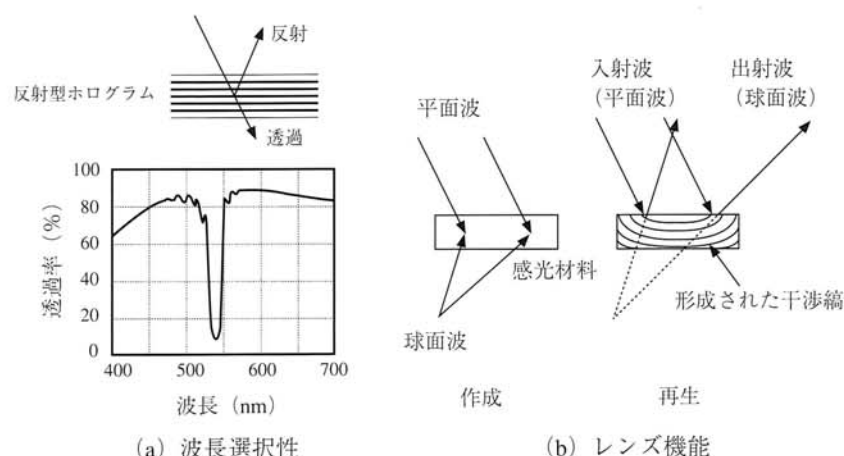


図-4 ホログラムの特徴
Fig. 4 Features of hologram

4. 2. 表示像と景色の明るさ

表示像を如何なる状況でも判読できるようにするためには、背景が最も明るい場合、即ち晴れた日の雪面でも十分に認識できる明るさ（輝度）を持つことが必要となる。このときの表示輝度は実験により 3000cd/m^2 であることがわかっているため、この値を目標値とした。また、前方景色の明るさを決める透過率は、自動車のフロントウインドウの透過率の基準に準ずる、即ち、人間の眼の感度を考慮した視感度透過率がホログラムコンバイナ単体でも70%以上となることとした。

使用する表示源は、輝度が 24000cd/m^2 で発光スペクトル中心が 535nm の超高輝度タイプ蛍光表示管（以下VFD）とした。表示源の明るさを有効に使い表示の輝度を高くするため、ホログラムの中心選択反射波長を 535nm とした。図-5に中心の選択波長と規格化した表示輝度の関係を示す。中心の選択波長が目標の 535nm からずれるにつれ、輝度が徐々に低下するのがわかる。また、計算と試作により回折効率を70%以上、半値幅（回折効率がピーク時の半分になる波長の範囲）を 20nm とすれば、表示輝度、視感度透過率共に目標値の 3000cd/m^2 以上、70%以上となることが分かった。

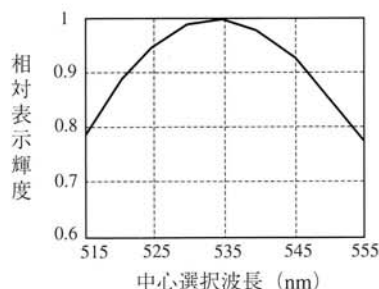


図-5 中心選択波長と表示輝度の関係
Fig. 5 Image brightness vs. center wavelength of differentiated light

以上の検討に基づき、作成したホログラムコンバイナの分光特性を示す。（図-6）透過曲線のベースを基準に最も透過率の下がったところまでを回折効率と定義すると、回折効率は80%、半値幅は 20nm であった。また、表示源のスペクトル分布とホログラムの中心の選択波長が 535nm で一致した。このホログラムをコンバイナとして評価した結果、表示像の輝度は 4300cd/m^2 、視感度透過率も75%であることを確認した。

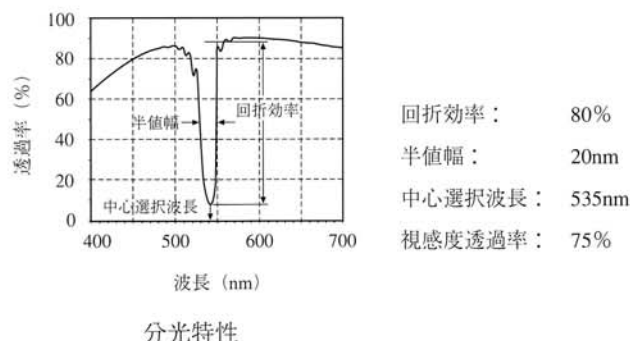


図-6 ホログラムコンバイナの分光特性
Fig. 6 Optical characteristic of hologram combiner

表示源からの光は波長 535nm 付近にエネルギー中心を持つため効率よく回折される。そして前方の景色からの光も緑色の部分が高い回折効率で反射されるが、反射される光はスペクトル上で僅かの領域（半値幅 20nm ）であるため、視感度透過率を高く保つことができ、前方景色を視認する上で支障はない。

4. 3. ウォッシュアウトの抑制

ウォッシュアウトの低減にもホログラムの持つ波長選択性が効果がある。

コンバイナに入射した太陽光の内 535nm 付近の光は、ホログラムの波長選択性により効率よく反射される。そのため、ホログラムコンバイナを透過して表示源で反射

し、再び射出してくる時には535nm付近の光が抜けたものとなる。しかし、コンバイナは535nm付近の光以外は反射しないため、その光はコンバイナを透過してしまいドライバーに到達しない。これにより、VFDの点灯セグメントと非点灯セグメントのコントラストを保持することが可能になり、表示を視認出来なくなる状態を回避することができた。

5. 光学系の設計

(遠方拡大表示と光学ユニット小型化の両立)

5. 1. 光学設計の条件

今回開発したHUDは、当社製市販ナビゲーションに対応することを前提としているため市販市場をターゲットとした。そのため多車種への対応が課題であった。

まず、代表的な車種(30車種)の形状調査を行った。HUDユニットはダッシュボード上に取り付けられることを想定しているので、ダッシュボードの形状と、ダッシュボードとフロントウィンドウの間の空間の大きさを調査した。(図-7)

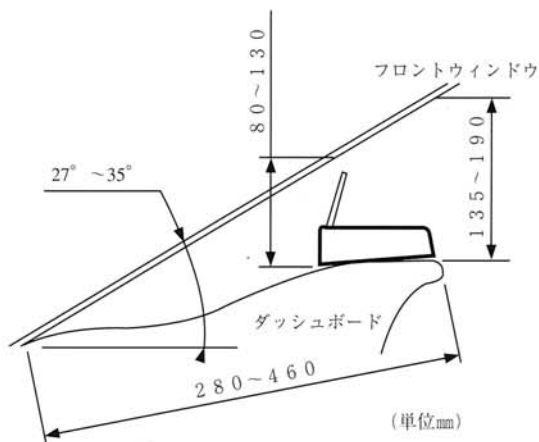


図-7 ダッシュボード断面図
Fig. 7 Sectional view of dashboard

調査の結果より、ユニットの外形の制約を定めた。(図-8) 全体の高さを80mm以下にすることがダッシュボード上に取り付け可能にするための第一条件であり、すべての光学設計は、この条件を前提として行った。コンバイナに表示源の光を投影する光学ユニットは、ダッシュボード上の視野範囲内に置かれることから、前方景色の視認性を考慮して厚さ40mm以下を目標にした。(図-9)

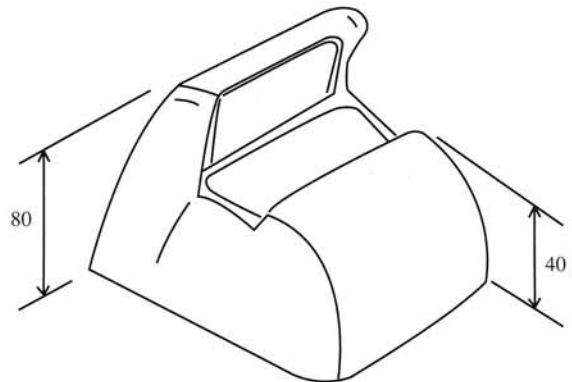
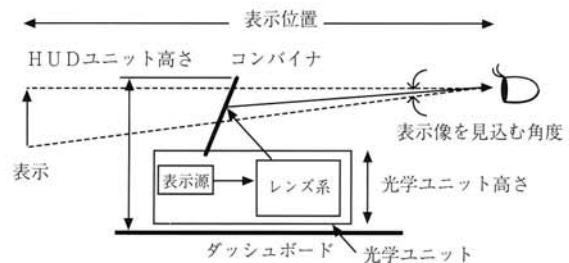


図-8 HUDユニット外形制約
Fig. 8 Size limitation of HUD unit



目標

- 光学ユニットの高さ： 40mm 以下
- HUDユニットの高さ：80mm 以下
- 表示位置： 1m以上(ドライバーより)
- 表示像を見込む角度： 1度以上

図-9 遠方拡大表示とユニットの小型化
Fig. 9 Large image at far and small optical unit

5. 2. 光学ユニットの小型化

表示源から射出された光をコンバイナで反射させるためには、下方よりコンバイナに光を投射する必要がある。しかし、図-10に示すように表示源から直接表示光をコンバイナに射出すると、ユニットの厚みが110mmとなり、目標を満足できない。そこで、光路を2枚のミラーで折り畳み、薄型化を検討した。これにより表示源の光を直接コンバイナに投射する場合に比べ光学ユニットの厚みを薄くでき、光学ユニットの厚さを目標とする40mmとすることができた。

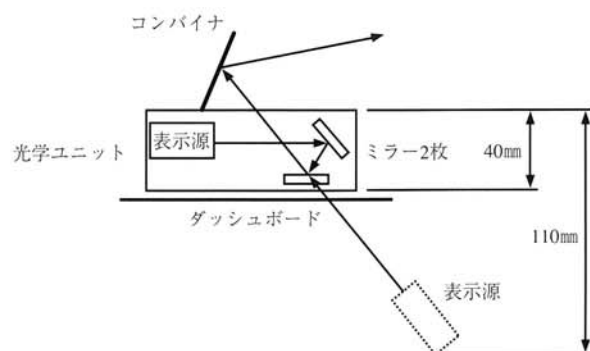


図-10 光学系の配置
Fig. 10 Arrangement of optical system

5. 3. 遠方拡大表示

視認性を確保するためには表示距離1m以上、表示の大きさは、ドライバから表示像を見込む角度として 1° 程度が必要条件となる。しかし、このための遠方・拡大表示を実現するには光学系の体積が大きくなる。そこでこの遠方・拡大表示は、ホログラムと光学ユニット内のレンズ系により実現することとした。光学シミュレーションにより、レンズ系には二枚の凹レンズが必要となることが分かった。そこで今回、光路折り曲げミラーを凹面ミラーとし、凹レンズの代用とした。これにより光学ユニットが小型で、かつ遠方・拡大表示が可能となった。試作したHUD光学系では、表示像の位置はコンバイナから435mmでドライバーからは約1.2mである。表示像を見込む角度はドライバから見て約 1° 、これは表示像の大きさとしては、19mmに相当する。拡大率は、トータルでは縦方向に3.4倍、横方向に3.9倍である。また、ホログラム単体では倍率はそれぞれ2.1倍と1.5倍である。

6. その他の開発要素

6. 1. 視認範囲³⁾

視認範囲とはHUDの表示を見ることができる範囲(頭を動かしても表示が見える範囲)のことである。今回開発したHUDは多車種に対応するので様々な形状のダッシュボード上に設置される。そのためHUDユニットとドライバーの目の位置関係が多様になり、HUDユニットに対し縦方向に広い視認範囲を確保する必要があった。これにはコンバイナの角度を可変にすることで対応した。図-11にHUDユニットと目の位置関係の例を示す。この調査によりコンバイナの可変角度範囲を $+6^\circ \sim -8.6^\circ$ とすれば99パーセントのドライバーに対応できることが分かった。また、ダッシュボードの様々な角度に対応するためユニットの取り付け角度可変範囲を $0 \sim 14^\circ$ とした。

6. 2. ナビゲーション情報の表示

HUDに表示すべき情報としては、運転中에서도安全に情報を入手できるという特性からナビゲーションの情報が有効であると考えた。ナビゲーションの情報を表示するに当たって、ナビゲーションにおける重要な表示内容の調査を行った。代表的な各社ナビゲーション機器(16機種)について調査した結果を表-1に示す。

表-1 ナビゲーションにおける主要な情報

案内情報の種類	数(トータル16)
交差点・目的地方向案内(矢印)	12
案内地点・目的地までの距離	16
交差点拡大図	8
交差点名称	4
自車位置住所	1

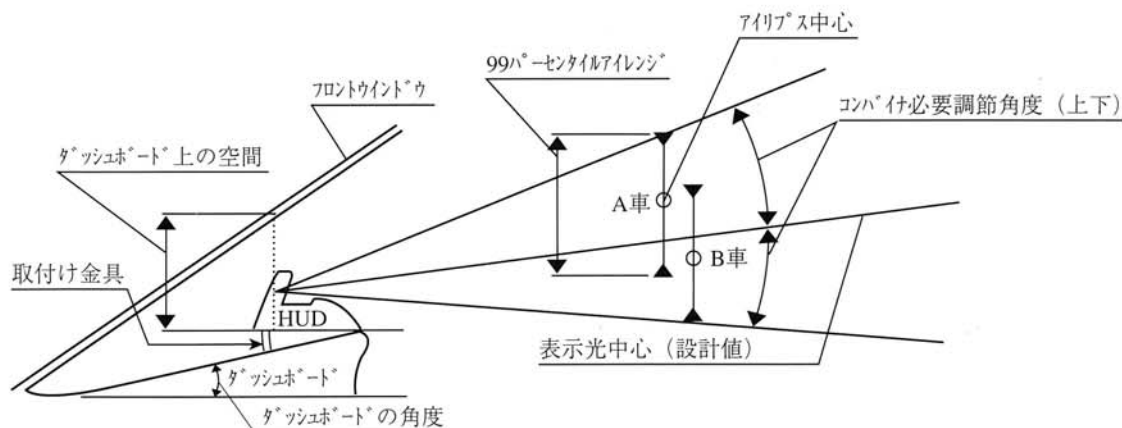


図-11 HUDユニットとドライバーの目の位置関係
Fig. 11 Relationship between HUD unit position and eye-range position

調査の結果、75%以上のナビゲーションで採用されている「経路案内時における案内地点までの距離と進行方向（曲がる方向）」をHUDの表示に採用した。その表示内容を図-12に示す。

表示のデザインには視認性を考慮した。特に矢印の形状は、可能な限り面積を大きく、矢印の三角部分を大きくすることで視認性の向上を図った。そして使用頻度が高いと考えられる左右方向の矢印の面積を大きくすることにも留意した。

また矢印中央下部に四角形のデザインを用いたことにより進行方向（曲がる方向）を的確に表現できるようになった。

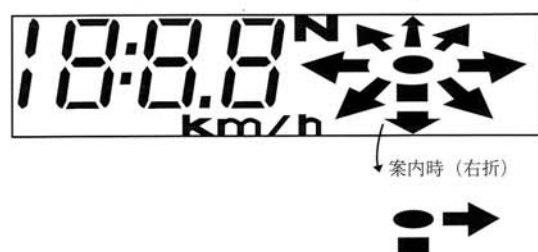


図-12 HUDの表示（全点灯）
Fig. 12 Display design of HUD (all segments on state)

7. 試作したHUDユニット

図-13に試作したHUDユニットの外観を示す。ユニット本体に表示源と凹面ミラーが内蔵されており、その上にホログラムコンバイナがある。実際には、このユニットをダッシュボードの上に載せて運転する。表示像は、コンバイナ越しに前方景色に重畳して緑色でくっきり見える。また表-2に今回開発したHUDの特性値を示す。

表-2 HUDの特性

項目	目標	結果
表示輝度	3000cd/m ² 以上	3000cd/m ² 以上
表示距離	1m以上	1.2m
回折効率	70%以上	80%
視感度透過率	70%以上	75%
HUDユニット高さ	80mm以下	80mm
光学ユニット厚さ	40mm以下	40mm



図-13 HUDユニット
Fig. 13 HUD unit

8. あとがき

以上、ホログラムコンバイナ方式HUDの開発について報告した。今後、HUDは車載情報装置のディスプレイとしてますます重要性が増していくと予想される。今回開発したHUDは、高輝度化を優先してセグメント方式の表示源を採用したが、今後ますます増加するであろう車室内の情報には対応できなくなることが予想される。そのため、ドットマトリックス表示等の表示能力の高いHUDを開発し、安全性の向上・ユーザーの満足感の向上に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 山脇正雄, 比護信正: “視覚 —視認性—” 電装技術会会報, Vol.32, No.1 (1988)
- 2) 福田忠彦: “高齢者の視覚特性” NHK技研R&D, No.1 (1988 5月)
- 3) JIS D0021, 自動車の運転者のアイレンジ

筆者紹介



江口 伸 (エグチ シン)

1984年富士通研究所入社。以来ホログラムの研究開発に従事。現在電子機器研究所入出力研究部在籍。



松本 剛 (マツモト ツヨシ)

1989年富士通研究所入社。以来ホログラムの研究開発に従事。現在電子機器研究所入出力研究部在籍。



末包 和彦 (スエマツ カズヒコ)

1987年入社。以来自動車用電子機器の開発に従事。現在技術開発部在籍。



林 新一 (ハヤシ シンイチ)

1989年入社。以来ディスプレイ関連機器の開発に従事。現在技術開発部在籍。



柴田 浩 (シバタ ヒロシ)

1981年入社。以来音響システム、自動車用電子機器の開発・設計に従事。現在技術開発部在籍。



高島 淳行 (タカシマ アツユキ)

1984年入社。以来音響システム、デジタル信号処理システムの開発に従事。現在技術開発部プロジェクト課長。