

# レーザープロジェクターによる拡張現実型 ヘッドアップディスプレイ

柳澤 琢磨\*・靱矢 修己\*\*

## Head-Up Display Adopted Augmented Reality by a Laser Projector

Takuma YANAGISAWA\* and Utsuboya OSAMI\*\*

A principle and a composition of the world's first vehicle head-up display that creates augmented reality beyond the windshield are explained. High brightness and a low speckle noise are realized by combining a laser projector and a transparent screen with micro lens arrays. The installation to a sun visor position contributes to expansion of a viewing angle.

**Key words:** head-up display, augmented reality, laser projector, micro lens array, speckle noise

ヘッドアップディスプレイ (HUD) とは、小型ディスプレイに表示した画像をレンズやミラーなどを用いて運転者の見ている風景と一緒に視認させる装置である。運転中に速度情報や経路案内などを得る際、視線移動や焦点調節の時間を短縮できることから安全性への貢献が期待され<sup>1)</sup>、近年、自動車への搭載が進んでいる。

一般的な HUD は小型ディスプレイをダッシュボードの内部に設置し、その画像を凹面鏡とウインドシールドで反射して運転手に視認させる。この場合、運転者は前方やや斜め下に情報を視認する (図1)。これに対して、パイオニアが 2012 年 7 月に市場導入した HUD (以降、AR-HUD とよぶ) はサンバイザーの位置に小型ディスプレイと凹面ハーフミラーを一体で設置するもので、運転者は前方やや斜め上に情報を視認する (図2)。これにより、従来の HUD が速度の数字や方向指示矢印などの単純な表示のみであったのに対して、AR-HUD では図3に示すような拡張現実 (AR) 表示を可能にしている<sup>2,3)</sup>。

HUD を小型軽量化して上部設置を実現したことが AR 表示を可能にした大きな要因になっているが、同時に、背景となる空の明るさに負けないための画面の高輝度化や、かつてないほど広い視野角を実現できたことも大きな要因に

なっている。

本稿では、AR 表示を可能にした技術を中心に AR-HUD に搭載されているレーザープロジェクター、マイクロレンズアレイ方式スクリーン、凹面コンバイナーについて解説する。

### 1. AR-HUD の構造と仕様

AR-HUD の構造を図4に示す。レーザープロジェクターから出射した光は折り返しミラーで反射した後、マイクロレンズアレイによる透過型スクリーン上に画像を生成する。この画像からの光はフィールドレンズを通過してコンバイナーに向かい、コンバイナーで反射した後、運転手の頭部へ向かう。運転手はスクリーン上の画像を、コンバイナーを介することで約 3 m 前方に虚像として視認する。AR-HUD の仕様を表1に示す。

### 2. レーザープロジェクター

前述したように AR-HUD では前方やや斜め上に情報を表示するため、昼間の青空を背景にしても虚像をしっかりと視認できるように高輝度な画像を表示できる描画デバイスが必要になる。一方、夜間の暗い条件下では迷光等によ

\*パイオニア(株) 研究開発部 (〒212-0031 川崎市幸区新小倉 1-1) E-mail: takuma\_yanagisawa@post.pioneer.co.jp

\*\*パイオニア(株) カーエレクトロニクス事業統括部 (〒350-8555 川越市山田字西町 25-1)

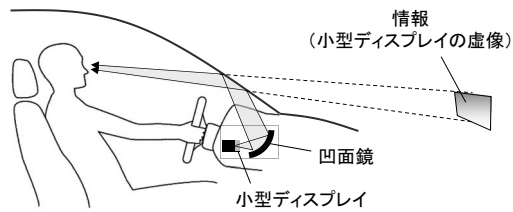


図1 一般的な HUD のレイアウト。

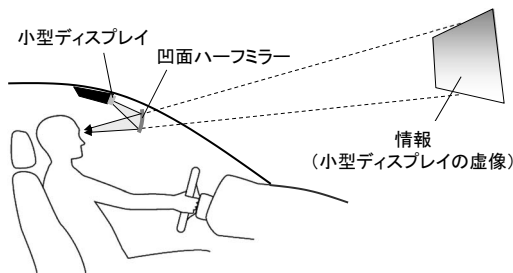


図2 AR-HUD のレイアウト。



図3 AR 表示の例。

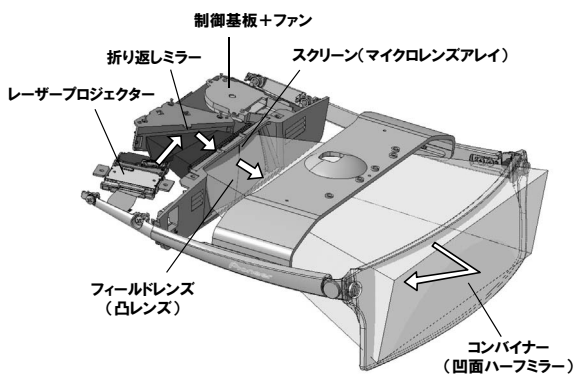


図4 AR-HUD の構造。

り描画領域全体に白い霧がかかる“黒浮き”が生じると、前方視界を悪化させて安全性を損なう恐れがあるため、可能な限り“黒浮き”しないことも描画デバイスを選定する上で大きな指標となる。

どんな描画デバイスでも光源の出力を上げることで画面輝度を上げることはできるが、その場合、放熱機構も大型化してしまう。サンバイザー部分に装着するためには小型

表1 AR-HUD の仕様。

本体サイズ (mm)	260(W) × 123(H) × 257(D)
表示画素数	780(H) × 260(V)
リフレッシュレート (Hz)	60
フレームレート (fps)	最大 24
ディスプレイ輝度 (cd/m <sup>2</sup> )	12,000
レーザークラス	クラス 1
虚像の画角 (度)	17.1(H) × 5.7(V)
コンバイナーから虚像までの距離 (m)	2.5
虚像サイズ (mm)	900(H) × 300(V)

表2 超小型プロジェクターのおもな方式。

方式	LCOS 方式	DLP 方式	ラスタースキャン方式
おもな部品	高出力 LED LCOS インテグレーター 投影レンズ	高出力 LED DMD インテグレーター 投影レンズ	RGB レーザー MEMS ミラー
画角	△	△	○
光利用効率	△	△	○
黒浮き	×	△	○
製造難易度	○	○	△

軽量化が必須であり、この点から HUD 用の描画デバイスとしてはパネル方式よりもプロジェクター方式が有利になる。なぜなら、プロジェクター方式は光源出力が同じでもスクリーンの拡散角を制御することで画面輝度を大きく変えられるからである。特に HUD の場合は、運転手だけが視認できればよいのでスクリーンの拡散角はかなり狭くでき、必要最低限の放熱機構で高輝度化を実現できる。

プロジェクターはここ数年で急速に小型化が進んだ。現在、ポケットサイズの超小型プロジェクターはおもに3つの方式が存在している(表2)。

LCOS方式とDLP方式は、搭載するマイクロディスプレイが反射型液晶(LCOS)かデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)かが異なるだけで、基本的な原理は同じである。高出力LEDの出射光はインテグレーターとよばれる光学素子で均一化され、マイクロディスプレイの全画素を照明する。マイクロディスプレイは画素ごとに照明光を変調(カット)して画像を形成、それを投影レンズによってスクリーン上に結像させる。この方式は後述するラスタースキャン方式と比べると、投影レンズが必要な上光の利用効率が低いことや、“黒浮き”が起りやすいなどの特徴がある。特にHUDでは、パソコンモニターなどのように常に画面全体が光っている状態はほとんどなく、どちらかといえば描画しない画素(黒色)のほうが多いため、これらの特徴はかなり不利になる。

このことから、AR-HUDでは描画デバイスとしてラス

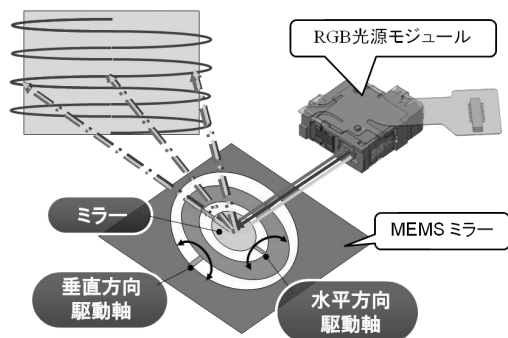


図5 ラスタースキャン方式.

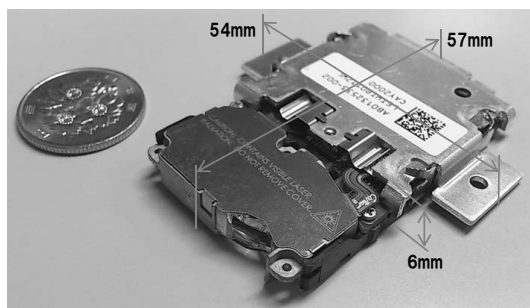


図6 レーザープロジェクターの外観写真.

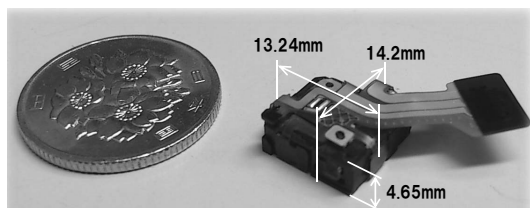


図7 RGB光源モジュールの外観写真.

タースキャン方式(図5)のプロジェクターを採用している。この方式はRGB光源モジュールから赤、緑、青の直径各1mm程度のレーザー光をMEMSの中心部に構成された微小ミラーに照射する。微小ミラーは水平方向には共振周波数で、垂直方向にはノコギリ波で連続的に傾斜しているため、反射レーザー光が二次的にその向きを変え、スクリーン上に画像を描画することができる。投影レンズが必要ないことに加え、描画しない画素(黒色)ではレーザーをOFFにするため光の漏れ込みによる黒浮きが少なく、光の利用効率が高いことが特徴である。

図6に、AR-HUDに搭載されているレーザープロジェクターの外観写真を示す。サイズは54mm(W)×57mm(D)×6mm(H)で、プロジェクターとしての明るさは約14lm、投影画素数は848×300、描画位置調整、台形補正等の画面形状の調整機能等を備えている。

図7に、レーザープロジェクターに内蔵されているRGB光源モジュールの外観写真を示す。また図8にその内部構

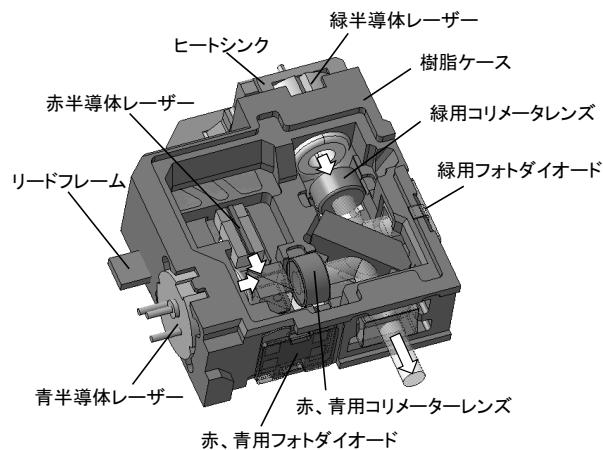


図8 RGB光源モジュールの構造.

表3 RGB光源モジュールの仕様.

	赤	緑	青
波長 (nm)	632~643	510~525	440~460
パワー (mW)	93	59	49
PD 感度 (mA/mW)	4.1~30	2.9~23.2	4.1~23.2
サイズ (mm)	13.2(W)×4.65(H)×14.2(D)		

造を、表3にその仕様を示す。約0.9ccという体積中に赤、緑、青の半導体レーザーと各レーザーの出力をモニターするフォトダイオードを搭載している。

### 3. スクリーン

透過型スクリーンといえば、“すりガラス”のようなランダム拡散板が一般的であろう。ランダム拡散板はその表面がランダムな形状をしていたり、内部に散乱体がランダムに分散していたりするもので、近年、LED照明の普及に伴ってコストも急激に下がっている。しかしながら、そのようなランダム拡散板をレーザープロジェクターのスクリーンとして利用すると、2つの大きな弊害が生じる。1つはレーザーディスプレイ特有のスペックルノイズ、もう1つはスクリーン透過光の輝度がガウシアン分布になってしまうことである。

図9は、(a)ランダム拡散板の表面を顕微鏡で観察した写真、(b)ランダム拡散板の中心部にレーザー光を照射したときの透過拡散光を撮影した写真、(c)その断面輝度分布である。図9(c)をみると、ガウシアン分布を基本としてその上にランダムなスパイク状の輝度分布が乗っていることがわかる。理由は後述するが、ガウシアン分布は視域(虚像が見える範囲)を狭くし、ランダムなスパイク状の輝度分布はスペックルノイズとして視認性の低下を招く。

透過光のガウシアン分布を均一化するために、マイクロレンズアレイ(MLA)を1枚ないし複数枚重ねて利用する

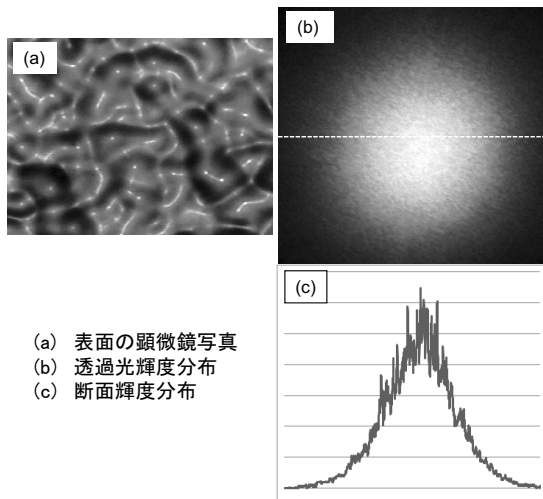


図9 ランダム拡散板とその透過光分布.

方法はよく知られている。前章で紹介した LCOS 方式や DLP 方式プロジェクターで、LED 光源とマイクロディスプレイの間に配置するインテグレーターとよばれる光学部品がそれである。AR-HUD ではこの技術をレーザープロジェクター用のスクリーンとして利用している<sup>4)</sup>。

図 10 は、(a) MLA を顕微鏡で観察した写真、(b) MLA の中心部にレーザー光を照射したときの透過光シミュレーション結果、(c) その断面輝度分布である。図 10 (b) をみると、小さなビームレットとよばれるスポットが複数集まって全体として六角形の透過光分布を形成していることがわかる。これはマイクロレンズがハニカム状に整列しているため、仮に基盤の目状に整列させれば、透過光分布は四角形になる。

この例では、ビームレット同士が多少の隙間をもって並んでいるため、図 10 (c) に示した断面強度分布にはスパイク状の輝度分布がみられるが、その空間周波数は図 9 (c) のようにランダムではなく一定である。理由は後述するが、このことを利用するとスペックルノイズを低減できる。

ところで、図 9 (b) や図 10 (b) はスクリーンの中心 1 画素のみを表示したときの運転手の頭部付近での透過光分布であり、運転手が直接視認する画像ではないことに注意されたい。図 9 (b) や図 10 (b) は視域を表しており、運転手の瞳孔がこの分布の中にあるときだけ 3 m 先に 1 つの輝点を視認できることを意味している。また、図 9 (b) や図 10 (b) の輝度分布を瞳孔の大きさで畳み込むことで、運転手が視認する輝点の明るさが決まることにも注意されたい。つまり、図 9 (c) や図 10 (c) のスパイク状の輝度分布のうち、その空間周波数が高い成分は瞳孔によって平均化することが可能であり、低い成分は瞳孔では平均

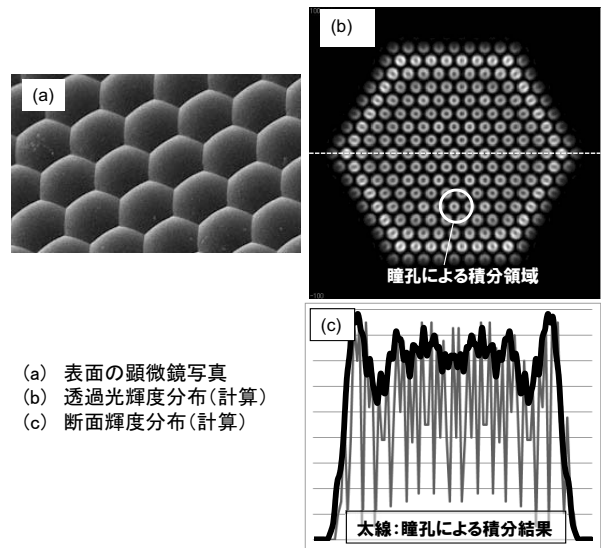


図 10 マイクロレンズアレイとその透過光分布.

化できず、運転手の眼の位置が動くとき輝点の明るさが変化して見えることになる。これがスペックルノイズとして認識される。

図 9 (c) のスパイク状輝度分布はランダム拡散板の表面形状がランダムであることに起因しているため、その空間周波数もランダムであり高周波成分から低周波成分まで含まれている。したがって瞳孔の平均化効果だけではスペックルノイズは取りきれない。またガウシアン分布も瞳孔では平均化されないため、視域中心では明るく見える輝点も視域の端のほうでは暗くなってしまう。

一方、図 10 (c) のスパイク状輝度分布は振幅こそ大きいものの、その空間周波数は MLA のピッチで決まるため十分制御可能で、うまく設計すれば瞳孔による平均化効果によってスペックルノイズを減らすことができる。例として、図 10 (b) に示した瞳孔サイズで畳み込んだ結果を図 10 (c) に太線で示した。

以上のことから、AR-HUD のスクリーンには MLA 方式が採用されている。図 11 に実際に運転手が視認する画像(「徐行」看板)を撮影した写真を示す。瞳孔径が 2.0 mm 相当になるようにカメラの F 値を設定した。図 11 (a) がランダム拡散板、図 11 (b) が MLA 方式のスクリーンを用いた場合である。MLA を用いた場合もわずかに周期的な輝度分布が観察されるが、ランダム拡散板と比較するとその振幅は小さく、レーザープロジェクター特有のスペックルノイズを低減できていることがわかる。

#### 4. コンバイナー

HUD 本体を上部設置にしたことで AR 表示が可能になったことは前述したが、上部設置にはもうひとつ大きなメ

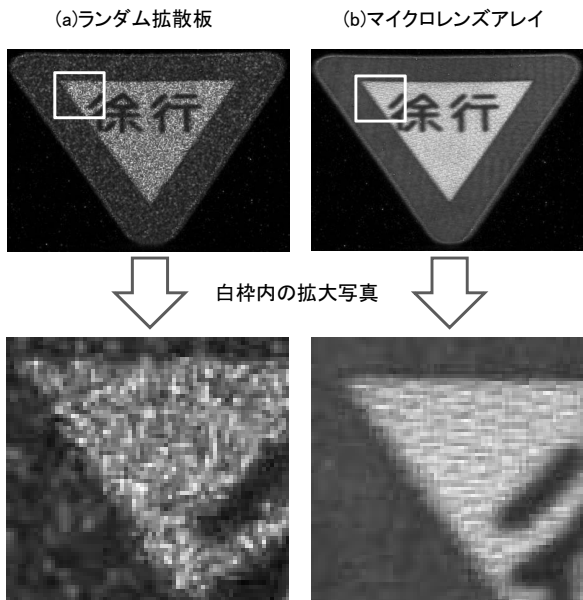


図11 スクリーン違いによる虚像比較。

リットがある。それは視野角を大きくできることである。

図1に示した一般的な HUD レイアウトでは、ダッシュボード内に HUD 本体を入れ、ウインドシールドをコンバイナーとして利用している。この場合、ウインドシールドは非常に曲率が緩いため、虚像を 3 m 前方に表示させるためには小型ディスプレイとコンバイナーの間に凹面鏡を入れて倍率を稼ぐ必要がある。

一方、図2に示した AR-HUD は本体を上部に設置するため、ウインドシールドをコンバイナーとして利用することはできない。ウインドシールドで反射した光が運転手の頭部方向に反射しないからである。そのため本体と専用コンバイナーを一体にしてサンバイザー部分に取り付ける構成にしている。専用コンバイナーが必要になる点は不利だが、コンバイナーを凹面形状にすることで倍率が稼げるため、一般的な HUD で必要な凹面鏡が省略できる利点がある。

このように下部設置では凹面鏡が、上部設置では凹面コンバイナーがおもに倍率を稼ぐ役割を担っている。HUD 接眼光学系は、この倍率を稼ぐための光学素子の位置とサイズで視野角が決定する。

図12は、凹面鏡による拡大効果を等価的に凸レンズで表現した HUD 接眼光学系モデルである。つまり、図中の凸レンズは図1では凹面鏡、図2では凹面コンバイナーに相当する。 $\theta_{max}$  は視野角(虚像の見込み角)である。この図は、同じ  $\theta_{max}$  を得る場合、運転手とレンズの距離が離れるほどレンズサイズを大きくしなければならないことを示している。また運転手とレンズの距離を近づけることで、同じレンズサイズでも視野角を広げられることを意

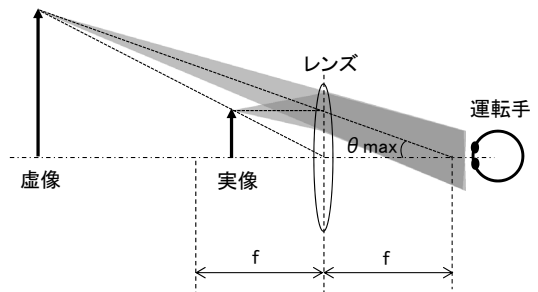


図12 HUD 接眼光学系モデル。

味している。

車種や運転姿勢にも依存するが、一般的な HUD (下部設置) では運転手と凹面鏡の距離はおおよそ 1 m 程度であるのに対して、AR-HUD (上部設置) では運転手とコンバイナーの距離はその半分程度になる。これにより AR-HUD の視野角は水平 17.1 度、垂直 5.7 度、虚像距離が運転手から約 3 m なので虚像サイズとしては水平 900 mm、垂直 300 mm (約 37 インチ) という圧倒的なサイズを実現している (表1)。

拡張現実型ヘッドアップディスプレイである AR-HUD について、構成・原理を紹介した。またレーザープロジェクターを採用した理由、マイクロレンズアレイ方式スクリーンを採用した理由、専用コンバイナーを上部に設置したことが拡張現実表示に必要な大きな視野角の実現に繋がったことなどを解説した。今回は触れなかったが、虚像を視界やや上に表示するという点で、安全性についても十分検討が行われている。

冒頭で述べたように、HUD はもともと安全性への貢献が期待されて自動車への搭載が始まったものである。このことを忘れずに、さらなる技術革新が行われることを期待したい。

## 文 献

- 1) 川守田拓志, 魚里 博, 古賀哲郎, 橋田雅也, 清水公也: “次世代カーナビゲーションシステムヘッドアップディスプレイにおける視線解析”, 第 48 回日本眼光学学会総会講演予稿集 (2012) 41.
- 2) Y. Tanahashi, O. Kasono, T. Yanagisawa, T. Nomoto, I. Kikuchi, T. Ezuka, K. Nakamura, H. Takahashi, Y. Imasaka, Y. Tsuchida and T. Shimizu: “Development of full-color laser head-up display,” *International Display Workshop / Asia Display (IDW/AD'12)* (2012) pp. 1987–1990.
- 3) O. Utsuboya, T. Shimizu and A. Kurosawa: “Augmented reality head up display for car navigation system,” *Soc. Inf. Disp. Int. Symp. Dig. Tech. Pap.*, **44** (2013) 551–554.
- 4) H. Urey and K. D. Powell: “Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays,” *Appl. Opt.*, **44** (2005) 4930–4936.

(2014 年 5 月 9 日受理)