

レーザープロジェクターを用いたフルカラーヘッドアップディスプレイの開発

Development of Full-Color Laser Head-Up Display

棚橋 祥夫, 加園 修, 柳澤 琢麿, 野本 貴之, 菊池 育也,
Yasuo Tanahashi, Osamu Kasono, Takuma Yanagisawa, Takayuki Nomoto, Ikuya Kikuchi,
江塚 敏晴
Toshiharu Ezuka

要旨 我々は車両天井への設置が可能な小型ヘッドアップディスプレイ（HUD）を開発した。光学系は、レーザープロジェクター、透過型スクリーン、コンバイナー（凹面ハーフミラー）から構成され、これらの組み合わせにより、水平17.1、垂直5.7度という、従来のHUDよりもはるかに広い視野角を達成した。また、このHUDによって、光学シースルー方式のARナビゲーションが可能となった。なお、本報告はIDW/AD'12で発表した内容⁽¹⁾を元にしたものである。

Summary A compact head-up display (HUD) system, which can be attached on a car's ceiling, is developed. Wider field of view (FOV, 17.1° x 5.7°) is achieved in combination with a laser projector, a transparent screen, a field lens and a combiner which is concaved half mirror. Optical see-through AR navigation can be realized with it. This paper is based on a report in IDW/AD'12⁽¹⁾.

キーワード：ヘッドアップディスプレイ、レーザープロジェクター、ARナビゲーション、光学シースルー

1. はじめに

HUDとは、視線の先の背景に情報を重ねて表示する装置である。元々は航空機のコックピット内の表示器として使用されるものであったが、近年、運転時の安全性向上のために自動車への搭載が進んでいる。運転者からはHUDの映像がウインドシールド前方に映し出されているように見える（図1）。そのため、運転者は視線を前方の車両や路面に保ったまま必要な情報を認識できる。現在、HUDによって、速度、回転数、警報、ナビ情報、燃費などが表示されている。

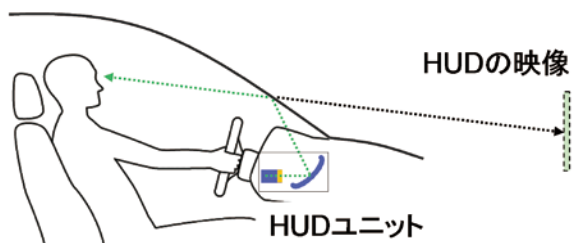


図1 従来のHUD

従来の自動車用HUDはダッシュボードに埋め込まれるものであり、次のような問題点があった。まず、HUDユニットのサイズが大きいため、搭載にはHUD専用のスペースを車両に設ける必要があった。また、

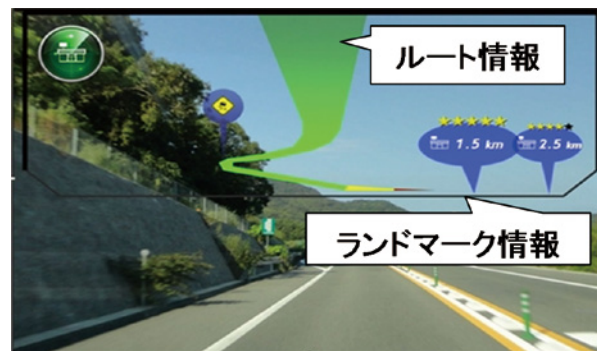


図2 ARナビゲーションのコンセプト

光学系サイズの制約から表示できる画像が小さかったため、多様な情報の表示が難しかった。

今回、我々は市販向けのHUDを開発するにあたり、“多様な車種への搭載”、“光学シースルー方式のARナビゲーション”（図2）を達成したいと考えた。それには、小さなユニット、広い視野角を有する光学系が必要となる。そこで、光源に発光効率の高いRGBレーザープロジェクターを採用し、取付けを車両天井とした。本論文では、取付け場所の検討、本体の小型化、光学系の設計、各光学部品の仕様について報告する。最後に2012年7月に発売した製品の仕様と、今後の展望について述べる。

2. 取付け場所の検討

HUDの最適な取付け場所を決めるにあたり、様々な車種の天井（サンバイザー近傍）とダッシュボード形状の調査を行った。この調査にはモックアップモデルを用いた（図3）。これは、本体（レーザープロジェクター等の光学系が搭載される）と、映像を背景と重ねるためのコンバイナーをアームで固定したものである。

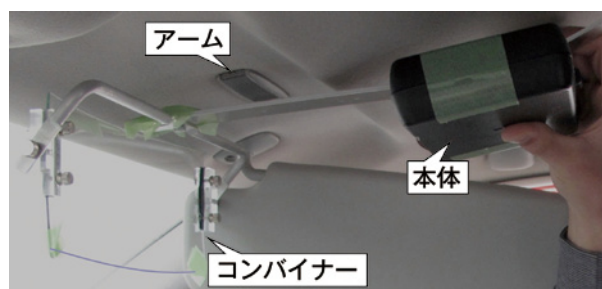


図3 HUDモックアップ

評価の結果、ダッシュボード上の形状は車種によって様々なものに対して、天井はほぼ同じ形状だった（図4）。そのため、我々はHUDの設置場所を車両の天井に決定した。また、運転者のヘッドクリアランスの確保を考慮すると、サンバイザーを取り外して、その収納部に本体を納めるのが望ましい事がわかった。

サンバイザー近傍の形状：ほぼ同じ形状



ダッシュボード上の形状：車種毎に異なる形状



図4 車両調査の結果

3. 本体の小型化

冒頭で述べたように、HUD本体の小型化のために光源にレーザープロジェクターを採用した（図5）。これは、幅35.1mm、高さ6mm、奥行き57.9mmと小型で、且つHUDに必要な輝度を有している。また、フルカラーで鮮明な画像を表示できる。

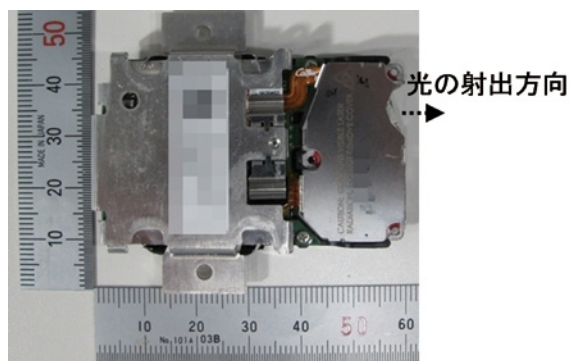


図5 レーザープロジェクター

なお、フルカラーの表示素子としては、LCOSやLCD等の選択肢もあるが、これらは高輝度で画像を表示する際の発熱が大きいいため、放熱機構が大きくなり本体の小型化が難しい。それに対してレーザーは発光効率が高いため⁽²⁾、比較的小さな放熱機構で済む。それにより、薄くて小さな本体を実現できた。

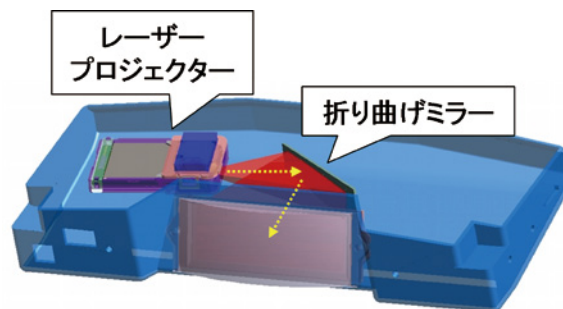


図6 本体内部の光学系

また、サンバイザー収納部に本体を納めるには、コンバイナーがウインドシールドと干渉しないように本体の奥行きを短くする必要がある。そのため、レーザープロジェクターから射出された光を折り曲げるミラーを使用している（図6）。

4. 光学系の設計

光学シースルー方式のARナビゲーションを実現するには広い視野角が必要になる。例えば、人間の有効視野に相当する水平30度、垂直20度程度の視野角が望ましい⁽³⁾。しかし、そのような広い視野角を実現しようとすると光学系が非常に大きくなり、大きな部品が必要である。製造難易度、コスト等を考慮すると、現時点では実現が難しい事がわかった。

当初のコンセプトをできるだけ維持するように、実現可能なレベルで最大限広い視野角が得られる光学系を考案し、設計を行った。以下、HUD光学系の設計について、映像を拡大する光学系（以下、接眼光学系）を中心に紹介する。

4.1 基本的な光学系レイアウト

我々の提案するHUDは、レーザープロジェクター、透過型スクリーン、フィールドレンズ、コンバイナーで構成される（図7）。まず、コンバイナーの前方にHUDの映像が虚像として表示される仕組みについて説明する。

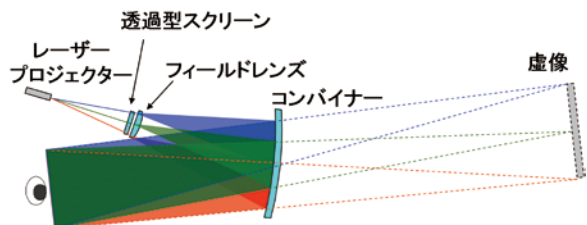


図7 光学系の基本構成

初めに、レーザープロジェクターが透過型スクリーン上に実像（中間像などと呼ばれる）を描画する。透過型スクリーンに入射したビームは拡散され、フィールドレンズで方向が調整され、最後にコンバイナーで反射される。この時、運転者からは、コンバイナーを通して画像が遠方に拡大して表示されているように見える。それは、コンバイナーの反射面は凹面形状であり、凹面ミラーは凸レンズと同様の動きをするためである（図8）。この画像は虚像であり、実際にはコンバイナーの前方には存在せず、そこにあるように見えるだけである。

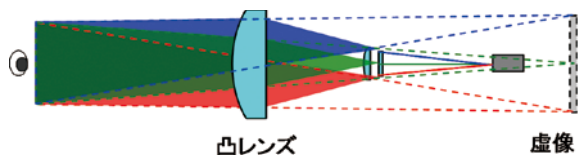


図8 凸レンズによる虚像生成

4.2 虚像の距離、サイズ、視野角

HUDの視野角は以下のパラメータ（図9を参照）から決定される。

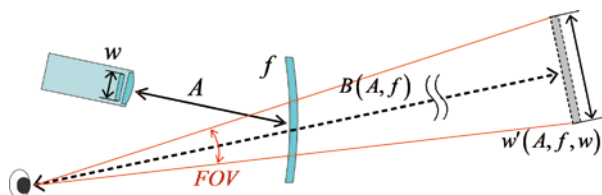


図9 視野角 (FOV) を決めるパラメータ

- 透過型スクリーンのサイズ： w
- コンバイナーの焦点距離： f
- 本体とコンバイナーの間隔： A
- 運転者の眼から虚像までの距離： $B(A, f)$
- 虚像サイズ： $w'(A, f, w)$

ここで、運転者の眼から虚像までの距離 B は、本体とコンバイナーの間隔 A とコンバイナーの焦点距離 f から決まる。また、虚像サイズ w' は A と f と透過型スクリーンのサイズ w から決定される。さらに、視野角 (FOV) は以下の式から求められる。

$$FOV = 2 \arctan \left(\frac{0.5w'}{B} \right)$$

接眼光学系の設計を行うにあたって、まず虚像の位置を決定した。通常、運転者は遠方に焦点を合わせており、虚像の位置は可能な限り遠い方が望ましい。それにより、視点を虚像から切り替えた時の調節にかかる時間を僅かにできる。しかし、虚像を遠方に表示するには本体とコンバイナーの間隔を広く取る必要があり（図10）、HUDの奥行きが長くなってしまう。

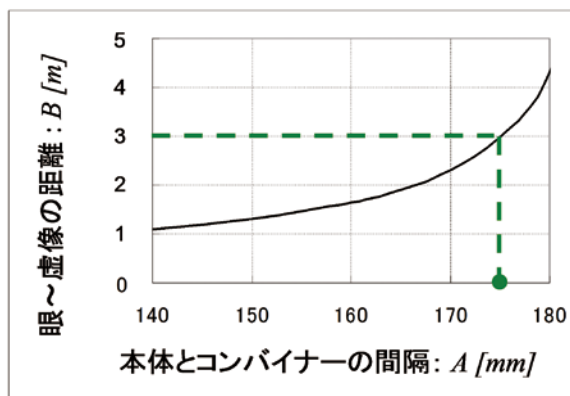


図10 本体～コンバイナー間と虚像距離の関係

実車を用いた評価を行い、虚像の位置は眼からおおよそ3m（コンバイナーから500mmの位置で見た場合）が適切と判断した。同時に、本体とコンバイナーの間隔はおおよそ175mmとなった。

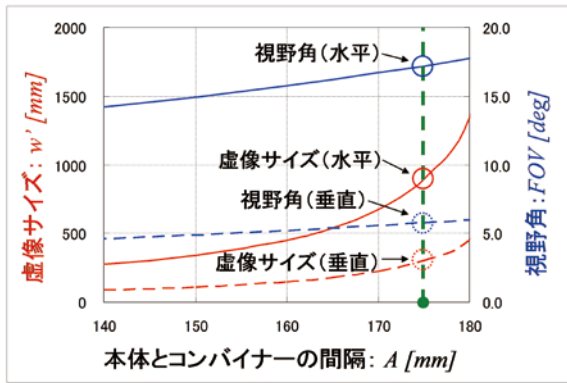


図11 本体～コンバイナー間と虚像サイズ，視野角

透過型スクリーン上に描画される画像サイズと虚像の位置から、虚像のサイズと視野角が決定される（図11）。先のAの値より、虚像のサイズはおよそ水平900mm，垂直300mm，視野角は水平17.1度，垂直5.7度となり，従来のHUDと比較して3～4倍程度の視野角を達成した。

4.3 虚像の歪曲

凹面ミラーは凸レンズと比較すると薄くて軽量に作製できる。ただし，光軸に対して傾いた凹面ミラーは虚像を歪曲させる（図12右上）。虚像の歪曲は運転者に違和感を与えるため，次のような手段で歪曲を補正した。まず，歪曲の台形成分を透過型スクリーンの傾きで除去した（図12左下）。さらに，透過型スクリーン射出側のフィールドレンズにより残留した成分もほぼ問題の無いレベルまで削減できた（図12右下）。

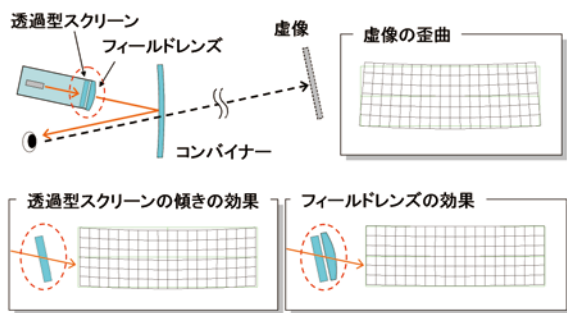


図12 歪曲の補正

4.4 輝度とEyeboxサイズ

HUDにおいて，輝度は重要な仕様である。特に，晴天の昼間でも見えるようにするには高い輝度が必要とされる。一方で，両眼視に必要なEyeboxサイズも確保しなければならない。Eyeboxとは運転者が虚像

を視認できる範囲を表している。輝度とEyeboxはトレードオフの関係にあり，両者のバランスを考慮する必要がある。

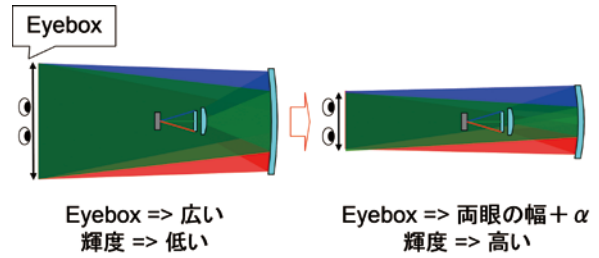


図13 輝度とEyeboxの関係

例えば，Eyeboxが広ければ眼が大きく動いても虚像が欠けたり見えなくなったりすることは無いが，光が広い範囲に広がっているため輝度は低くなってしまふ（図13左）。そこで，透過型スクリーンから射出される光線の広がりや，フィールドレンズ，コンバイナーの形状を適切な値にして，両眼視に必要な大きさまでEyeboxを縮小した（図13右）。それによって，非常に明るい環境下でも虚像が視認可能な輝度を達成できた。

4.5 Eyebox位置の調整

我々のHUDでは，運転時の視界を妨げないようにコンバイナーの縦幅を必要最小眼の大きさにしている。そのため，運転者の違いで眼の高さが大きく変わった際に，虚像が全く見えなくなる，または一部が欠けてしまう場合がある。そこで，アームの先端にコンバイナーの角度を調整する構造を設け，Eyeboxの位置を上下に動かせるようにした。これにより，運転者毎の眼の高さ違いに対応できるようになった（図14）。

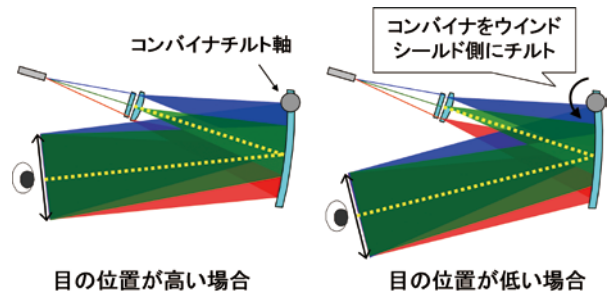


図14 Eyebox位置の調整

5. 光学部品の仕様

本項ではHUDを構成する主要な光学部品について述べる。

5.1 レーザープロジェクター

レーザープロジェクターはRGBのレーザーモジュール（赤638nm、緑515nm、青450nm）を搭載しており、ビームをMEMSミラーでスキャンする事によって透過型スクリーン上に画像が描画される（図15）⁽⁴⁾。なお、今回開発したHUDでは、描画されるラインは260本、1ラインあたり描画可能な点は780個である。

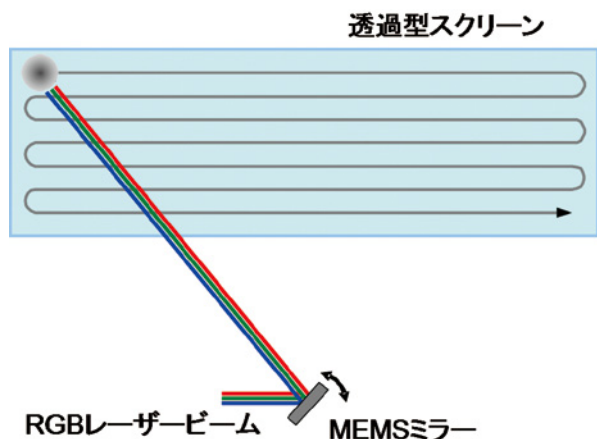


図15 レーザースキャンによる画像描画

5.2 透過型スクリーン

前述のように透過型スクリーンは入射ビームを広げる役割を持つ。これはマイクロレンズで構成されているため（図16）、透過率が高く、レーザーによるスペckルノイズを低減できる、という特徴を持っている⁽⁵⁾。なお、ビームが広がる角度は、マイクロレンズのサイズ、焦点距離などから決定される。

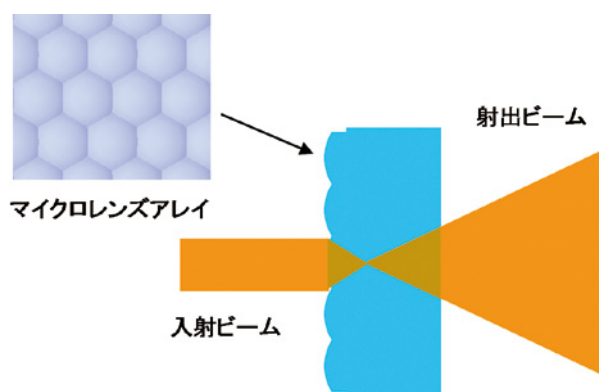


図16 透過型スクリーン

5.3 フィールドレンズ

フィールドレンズは前述の歪み補正の他に、透過型スクリーンから射出される光線の変え、最適なEyeboxをコンバイナーから500mm近傍に形成する役割を持っている。

5.4 コンバイナー

コンバイナーは2つの機能を持つ。一つはすでに説明したように、透過型スクリーン上に形成された画像を遠方に拡大して表示する機能。もう一つは背景に情報を重ねて表示する機能である。コンバイナーの凹面側はビームスプリッターコートで覆われていて、入射するレーザービームの一部が運転者に向けて反射され、外光の一部が透過して運転者の目に届けられる。それにより、運転者は虚像と背景の両方を同時に見ることができる（図17）。

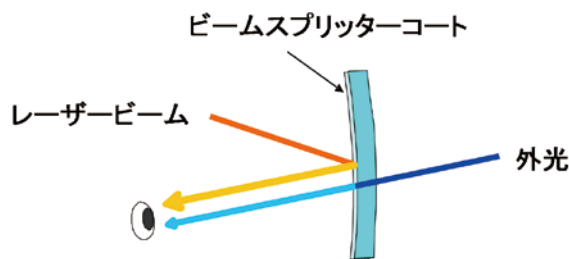


図17 ビームスプリッターコートの効果

また、反射面の裏側は凹面とほぼ同じ曲率を有した凸面になっておりコンバイナーを透過する光に対してレンズ効果を持たないため、背景は歪まない。さらに、凸面は反射防止コートで覆われていて、これにより二重像が抑制される（図18）。

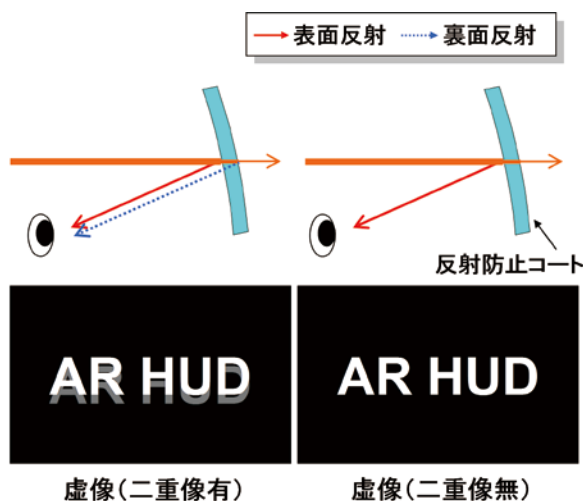


図18 反射防止コートの効果

なお、コンバイナーは運転者の頭の近くに配置されるため、安全性を考慮して耐衝撃性に優れた樹脂素材で作製されている。

6. おわりに

レーザープロジェクターを光源に用いた小型、薄型のHUDユニット「ND-HUD1」を開発した（図19）。ユニット全体のサイズはコンバイナーとアームを含

めると、幅260mm、高さ123mm、奥行き257mmになった。



図19 HUDユニット製品イメージ

HUDを取り付ける際は、サンバイザーを外し、取り付けキットを設置、車両の天井の傾きとハンドルの位置に合わせて調整し固定する(図20)。



図20 HUDユニット取付け

また、虚像は眼からおおよそ3m先に表示されていて(コンバイナーから500mmの位置に運転者の眼があった場合)、虚像サイズは水平900mm、垂直300mmである(図21)。

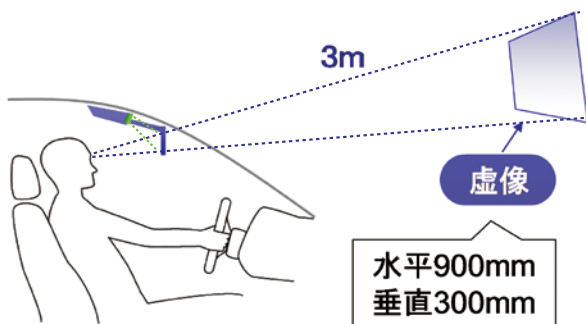


図21 虚像の位置と大きさ

視野角はおおよそ水平17.1度、垂直5.7度であり、これにより光学シースルー方式のARナビゲーションを実現できた(図22)。

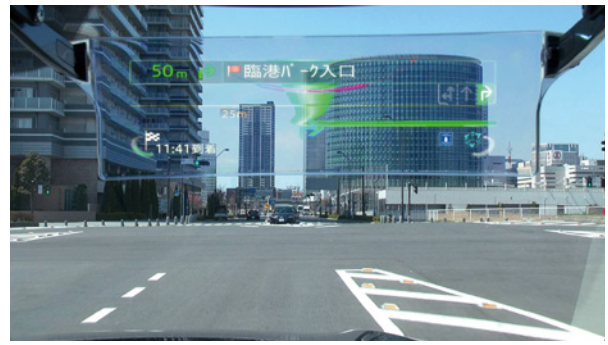


図22 ARナビゲーションコンテンツ

今後はより高い解像度で視野角の広いHUDを目指して、各光学部品の性能向上に取り組み、さらに進んだARナビゲーションシステムを提案していきたいと考えている。

参 考 文 献

- (1) Y.Tanahashi, O.Kasono, T.Yanagisawa, T.Nomoto, I.Kikuchi, T.Ezuka, K.Nakamura, H.Takahashi, Y.Imasaka, Y.Tsuchida, T.Shimizu, "Development of Full-Color Laser Head-Up Display", IDW/AD'12, pp.1987-1990 (2012)
- (2) Mark O. Freeman, "MEMS Scanned Laser Head-Up Display", Proc. SPIE 7930, 79300G-79300G-8 (2011)
- (3) "眼・色・光 より優れた色再現を求めて", 日本印刷技術協会, 2007, Chapter1 p8-9
- (4) Josh Miller, Scott J. Woltman, Thomas Byeman, "Laser Based Scanned Beam Display System", LDC'12, Yokohama, Japan, 2012
- (5) Hakan Urey, Karlton D. Powell, "Microlens-array-based exit-pupil expander for full-color displays", Appl.Opt.Vol.44, No.23, 4930-4936 (2005)

筆 者 紹 介

棚橋 祥夫 (たなはし やすお)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光学シミュレーション技術の研究開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。

加園 修 (かその おさむ)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光ディスク・高密度磁気記録ディスクメディアのマスタリング装置開発・プロセス開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。

柳澤 琢磨 (やなぎさわ たくま)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光ディスクの高密度化技術の研究開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。

野本 貴之 (のもと たかゆき)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光学シミュレーション技術の研究開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。

菊池 育也 (きくち いくや)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光ピックアップの研究開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。

江塚 敏晴 (えづか としはる)

研究開発部 第四研究部 研究三課に 所属。
光ピックアップの研究開発を経て、現在ヘッドアップディスプレイの開発に従事。