

ホログラフィック光学素子を用いた ウェアラブルディスプレイの光学設計

Optical design of head mounted display using holographic optical element

稲垣 義弘*
Yoshihiro INAGAKI

Abstract

We have developed wearable displays using a holographic optical element (HOE). The wearable displays are type of head mounted display which can display virtual image superimposed on scenery utilizing the HOE's high wavelength selectivity. This paper describes a method for optical design of wearable display using HOE.

1 はじめに

ホログラフィック光学素子 (HOE) は、入射角度に応じて特定の波長のみを選択的に回折させ、残りを透過させるという特徴的な光学特性を持った光学素子である。我々はこれまで、反射型HOEを用いて、表示画像を外界からの光と重ね合わせて表示するシースルー型ウェアラブルディスプレイを開発してきた¹⁾。本稿では、ウェアラブルディスプレイに使用するHOEの光学設計に関して紹介する。

2 光学系の概要

ウェアラブルディスプレイの光学系は、液晶のような表示素子の画像を、数m先の虚像として装着者に見せるものである。Fig. 1は、今回開発したウェアラブルディスプレイの光学系の模式図である。

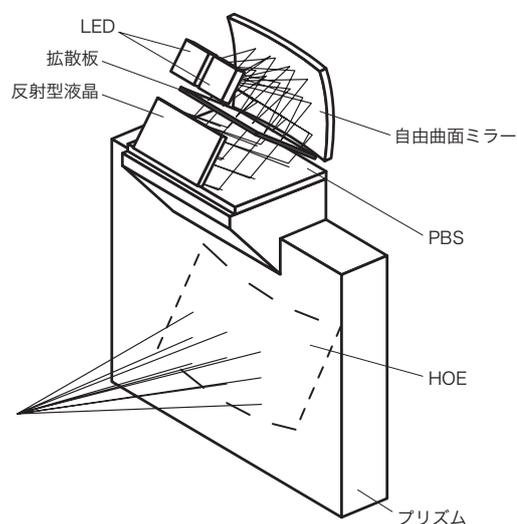


Fig. 1 Optics of wearable display using HOE.

表示素子には反射型液晶を使用しており、これを照明するために、赤、緑、青の3つの光源を一つのパッケージに収めたLEDを用いている。LEDからの光は自由曲面ミラーを用いて拡散板に照射され、拡散されて二次光源となる。拡散された光は偏光ビームスプリッター (PBS)

* 開発本部 製品要素開発センター

によって反射されて、反射型液晶に入射する。反射型液晶は、画像信号に応じて偏光の方向を変えて光を反射し、ONのピクセルからの光のみがPBSを透過して、樹脂のプリズム内に入射する。

プリズムは、画像光が入射する部分以外は平板であり、画像光は二つの平面で1回ずつ全反射した後、平板内に埋め込まれたHOEに入射する。HOEは、赤、緑、青に相当する3つの波長を選択的に回折し、装着者の瞳に向けて射出する。また、外界からの光は、上記の3波長は回折するが残りは透過し、装着者には、液晶の表示画像と外の景色が重なって見えることになる。

3 HOEのみの光学系についての考察

上述のように、我々のウェアラブルディスプレイでは、HOEは樹脂のプリズムの中に埋め込まれているが、考察のために、空中にHOEのみが存在している、架空の光学系を想定する。

まず、簡単な例として、平らなHOEに対して平行光が垂直に入射し、それを反射して1点に集光する例を考える。Fig. 2のように、平行光がx軸に平行とし、HOEをy軸上に置き、さらに、集光点をx軸上の距離hの点に置くと、HOEの特性を示す光路差関数は、光線がx軸となす角度を表す θ を用いて、

$$h\left(1 - \frac{1}{\cos\theta}\right)$$

と表すことができる。これは、集光点からHOE上の各点までの距離について、 θ が0の場合との差をとったものとなっている。

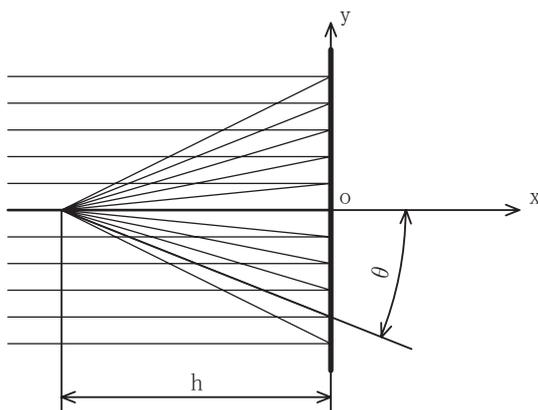


Fig. 2 Schematic drawing of HOE focusing parallel rays on a point.

次に、先の例のHOEをそのまま使い、その例での集光点付近に絞りを置き、平行光が複数の角度で入射する場合を考える。その絞りの位置に眼を置き、回折後の光が集光する位置に表示素子を置けば、表示素子の虚像を見ることができる。その説明図をFig. 3に示す。主光線について見れば、先の例で示した、平行光が1点に集光する場合の光線と一致しているので、反射後の主光線は互

いに平行となっている。また、歪曲は理想的な状態である。このとき、主光線近傍で考えれば、サジタル像面は、

$$h\left(\frac{1}{\cos\theta} - 1\right)$$

と表すことができる。これは、この例で使っているHOEは先の例と同じものであるため、集光点の側から主光線の反対方向に平行光を入射させたときに、瞳を置いた点に集光するためである。式は、瞳からHOE上の点までの距離について、 θ が0の場合との差をとったものとなっている。一方、メリディオナル像面は、

$$h\left(\frac{1}{\cos^3\theta} - 1\right)$$

となる。サジタル像面との違いは、光線とHOEのなす角度の変化に伴う、光の幅の変化による。Fig. 2のように反対側から平行光を入射したときとの比較で言えば、HOEへの入射位置が同じであれば位相付加量は同じであるので、光線角度変化に伴う光の幅の変化がないサジタル面では、反射光の波面の曲率が同じになるのに対し、メリディオナル面では幅が $1/\cos\theta$ 倍となり、反射光の波面は曲率が $\cos^2\theta$ 倍となる。

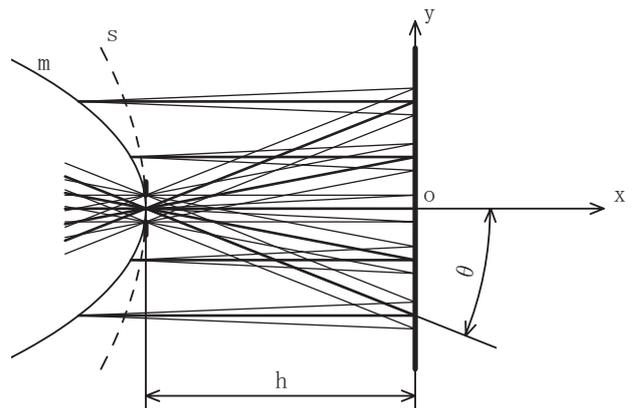


Fig. 3 Schematic drawing of HOE for observation (distortion free, worse field curvature).

表示素子は平坦であるので、このような像面湾曲があつては観察光学系としては望ましくない。そこで、例えば、光路差関数に

$$\frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\cos\theta}\right)$$

をかけて、

$$\frac{h}{2}\left(1 - \frac{1}{\cos^2\theta}\right)$$

とする。これを θ の代わりにyとzを使って表記すると、光路差関数は

$$-\frac{y^2 + z^2}{2h}$$

となり、光路差関数のyの二階偏微分とzの二階偏微分がいずれも $-1/h$ となるため、回折後の主光線がHOEと垂直に近い範囲では、サジタル像面とメリディオナル像面が共にフラットになる。Fig. 4に、像面湾曲を示す。このときHOEは、光路差関数の半径方向の一階偏微分が $-\tan \theta$ となるが、Fig. 3の、像面湾曲があるが歪曲は理想的だった例では、 $-\sin \theta$ である。両者を比較すると、像面湾曲を補正した方が、原点から離れるほど絶対値が増大する形となるために、光はより内側に曲げられることとなる。その結果、像面湾曲が補正された代わりに、樽型の歪曲が発生することになる。絞りに瞳を置き、集光位置に表示素子を置いて見た場合は、反対に、画像は糸巻き型に見える。

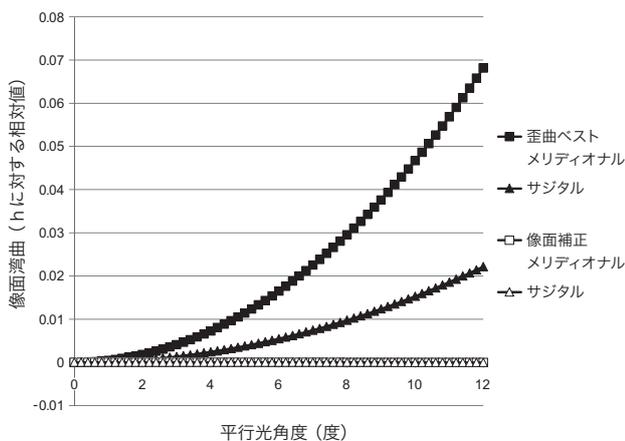


Fig. 4 Field curvature of HOE.

4 HOEに斜入射させる場合

ここまでの例では、表示素子と観察者の瞳が重なっていたが、実際には何らかの方法で分離することが必要である。我々のウェアラブルディスプレイでは、液晶を上置き、上下方向についてHOEに光線を斜入射させている。そこで、上述のHOEのみの架空の光学系において、斜入射させる場合を考える。先ほどの例では、座標系原点では入射光も反射光もHOEに対して垂直であったが、斜入射させる例では、入射光がxy平面内で座標系原点に対して γ だけ傾いて入射し、正反射の方向に回折するようにする。その説明図をFig. 5に示す。

このとき、座標系原点に入射した光が、主光線近傍で見てx軸に平行な距離hだけ離れた位置に集光するような光路差関数は、

$$-\frac{y^2 + z^2 \cos^2 \gamma}{2h \cos^3 \gamma}$$

となる。傾いていない場合と比べると、z二乗の項の係数は主光線に沿った方向の距離が伸びた分のために $\cos \gamma$ で割った形となっており、y二乗の項の係数は、光の幅が広がったために、さらにそれを $\cos \gamma$ の二乗で割った形となっている。

このとき、光路差関数のyの二階偏微分とzの二階偏微分はいずれも一定となり、主光線の角度が一定であればHOEから集光点までの距離も一定となるので、入射光の角度を γ から少し変えたときの像面は、HOEと平行になる。しかし、表示素子に液晶を使う場合、垂直から大きくはずした角度で使用すると、反射光の偏光の状態が変化して消光比が悪化する懸念がある。もし、Fig. 5に点線で示したように、液晶も γ だけ回転して光線が垂直に入射するようにした場合、HOE上の各点から液晶までの距離は液晶上のy方向の位置によって変化することになる。その距離の変化に応じて、光路差関数の二階偏微分について、近い側はより大きく、遠い側はより小さくするような分布を、y方向についてもz方向についても与える必要がある。

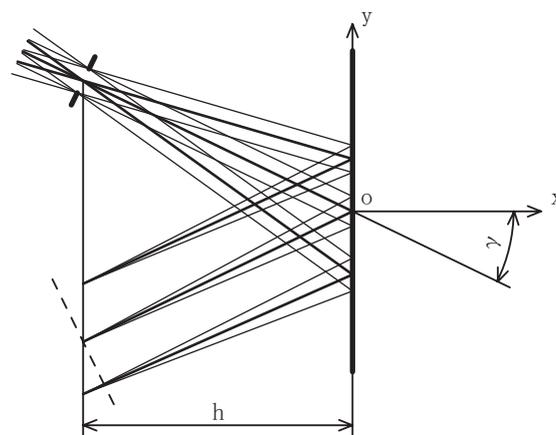


Fig. 5 Schematic drawing of HOE for observation (oblique incidence).

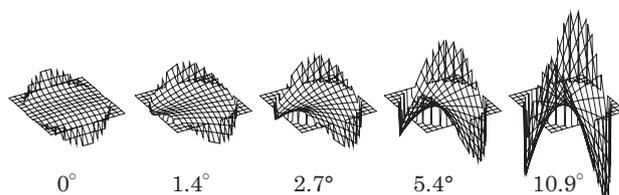


Fig. 6 Wave front aberration of oblique incident HOE.

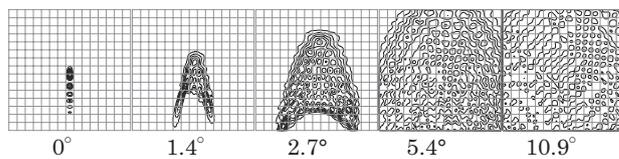


Fig. 7 Point spread function of oblique incident HOE.

そのようにしてy方向とz方向についてだけ像面を平坦にしても、斜め方向は補正されない。二階偏微分の大小に応じて、zが0から離れた位置での傾きの差が生じることに伴って、平行光がxy平面に対して角度を持ったときに、波面がねじれ、結像性能の低下が起こる。Fig. 6に、xy平面に対する平行光の角度を変えた時の波面を、また、Fig. 7に、その波面に対応する点像を示す。角度がゼロの時も、コマ収差によって縦方向にサブピークが見られるが、角度を大きくすると、波面のねじれが増大して結像しなくなる。

実際の光学系では、HOEはプリズムの中に埋め込まれているために、プリズムの入射面を取差補正に使うことが可能であり、その角度をz軸周りに回転することで、液晶に対して垂直に入射させつつ、波面のねじれを補正することが可能となる。前述の、今回開発した光学系では、さらにHOEの回折パワーを左右方向でほぼ0とし、HOEを曲げて集光するように設計している。このときも、入射面の角度を適切に設計することで波面のねじれを除去できる。Fig. 8に、今回開発した光学系の光路図を示す。

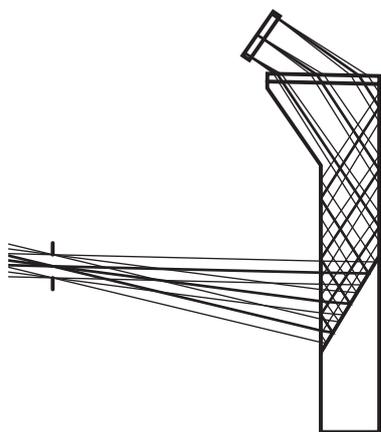


Fig. 8 Optical layout of wearable display using HOE.



Fig. 9 Wave front aberration of newly designed wearable display using HOE.

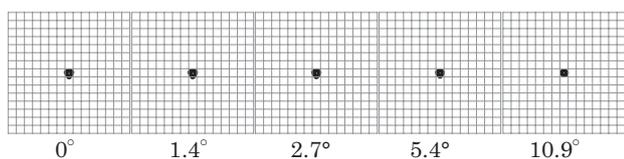


Fig. 10 Point spread function of newly designed wearable display using HOE.

また、Fig. 9に、今回の光学系で角度を変えた時の波面を、Fig. 10に、その波面に対応する点像を示す。Fig. 7で示した例と、平行光の角度や光束径を揃えているが、どの位置で見ても均一な集光状態が保たれていることがわかる。

5 露光光学系の設計

HOEを作成するための光学系を本稿では露光光学系と呼ぶ。露光光学系の設計の手法について、上述の、HOEのみの架空の光学系を用いて説明する。

HOEの特性を示す光路差関数は、使用時には、入射光に対して、HOE上のそれぞれの場所でどれだけの光路長を付加するかを示す関数であるが、同時に、作成時に、干

渉させる二光束間でどれだけの光路差があるかをHOE上の位置の関数として示したのものである。従って、HOE上のある点に入射する光線を、干渉させる二光束の一方について決めると、同じ位置に入射する、もう一方の光束中の光線について、その方向を決定することができるのと同時に、光路長についても知ることができる。露光光学系の設計では、この、方向と光路長の両方を利用する。

ここで使用する露光光学系では、レーザー光源からの光を2分岐し、それぞれをレンズで1点に集光して、位相の揃った二つの点光源を作る。Fig. 11は、その二つの点光源以降、HOEまでの光学系を示した図である。その二つの点光源の一方を、平行光の主光線が交わる位置に置き、そこから発散した光を感材に照射する。これは、使用時に眼に向かう光を反対向きにしたものに相当する。これと干渉させるもう一方の光束は、使用時の画像光を延長した光である必要がある。その延長した光は、そのままでは一点に集まることはないで、何らかの光学素子を用いて集光する必要がある。ここでは、自由曲面ミラーを用いる。

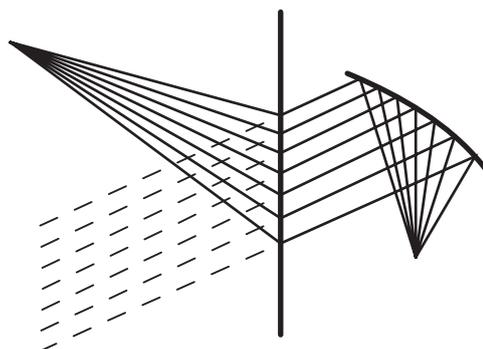


Fig. 11 Schematic drawing of exposing optics.

例として用いるHOEは、原点において光路差関数が0である。露光光学系の設計の際も、この点を通る2光線を基準とする。この点を通る光線の延長線上に位置と角度を決めて自由曲面ミラーを置き、さらに、その反射光の延長線上に点光源を配置する。ここまで決めてしまえば、自由曲面ミラーの形状は一意に決定する。なぜなら、前述のように、HOE上の位置から、その光線の光路長が決定できるからである。具体的には、眼側の点光源からHOEでの回折まで計算し、露光光学系で自由曲面ミラーからHOEに向かう光線を求めておき、その光線の延長線上で反射すべき点を光路長から算出する。光線の角度を変えて計算を繰り返せば、ミラー形状を示す点群データを得ることができる。

前述のように、我々のウェアラブルディスプレイにおいては、HOEは樹脂に埋め込まれており、露光時には樹脂を透過した光を感材に照射することになる。樹脂を透過する部分については、屈折率分の補正を行うが必要になるが、基本的には同様の方法で自由曲面ミラーの設計を行うことが可能である。

6 おわりに

HOEを用いたウェアラブルディスプレイについて、その光学設計の手法について解説した。本稿で説明したような手法を用いることによって、従来のものと比べて、高画角化すると同時に、解像力も向上したウェアラブルディスプレイを作成することが可能となった。Fig. 12 に試作品の外観を示す。



Fig. 12 Wearable display.

●文献

- 1) 笠井一郎, 野田哲也, 遠藤 毅, 上田裕昭: 第28回光学シンポジウム予稿 (2003) pp. 29-32

●出典

本稿の著作権は一般社団法人日本光学会が有する。本稿は日本光学会“第40回光学シンポジウム講演予稿集 (2015) pp. 5-8”の予稿を転載したものである。

