■光学工房

ホログラフィックデバイスの光学設計

ホログラムというと，立体写真や，紙幣，クレジット・カードの偽造防止などのセキュリティー分野への応用がよく知られていますが，これら以外の分野でもホログラムの特徴を利用した光学素子の開発が進められています．コンパクトな構成で入射光の波面を複雑に変換できる，波長帯域が狭く特定の波長帯域以外の光束には作用しない，といった特徴を生かして，光通信分野用の複合機能デバイスや，ピックアップ光学系内の補正素子，スクリーンなどへ展開されています[1]．本稿では，ホログラム技術を光学素子に応用したホログラム光学素子（holographic optical device; 以下，HOE と略）の一例として，シースルーヘッドマウントディスプレイの光学系[2,3]について，その仕組みと設計方法を紹介します．

反射型 HOE を用いたシースルーヘッドマウントディスプレイの観察光学系を図 1 に示します．表示パネルからの光が，ライトガイドを伝搬した後，HOE で回折されて瞳に入射することで，使用者は表示パネルの虚像を観察することができます．実際の使用時には，図 1 中で射出瞳に相当するものは，使用者の瞳になります．HOE は，外界からの光と表示パネルからの画像とを重ね合わせるコンバイナーとしての役割と，表示パネルの画像を虚像として拡大する凹面鏡としての役割を果たしています．観察光学系の設計では，HOE の特性を位相関数によって表現し，瞳から表示パネルまでの光路について光線追跡を行って，表示パネル面への光線入射位置が所望の位置となるように最適な HOE 上の位相関数を決定します．

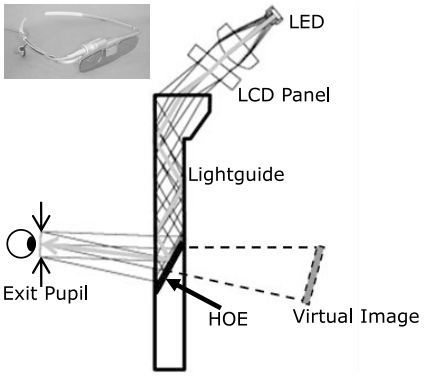

図 1　シースルーヘッドマウントディスプレイ観察光学系．

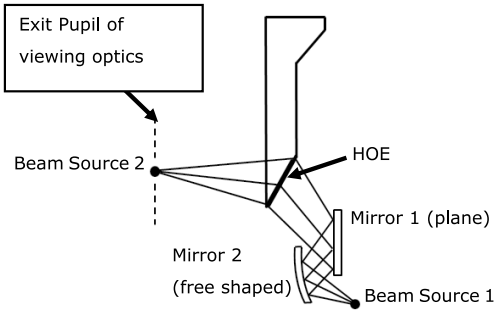

図 2　HOE 製造用光学系．

HOE 内の位相関数は，表示パネルを照明する LED の波長帯域と，HOE での回折効率が大きくなる波長帯域とが一致するように設計します．ホログラムのもつ波長選択性により，表示パネル画像の波長成分のみが HOE で回折され，それ以外の波長帯域の光については HOE の影響はほとんどありません．したがって，外界からの光の光量落ちが抑えられ，良好なシースルー特性と，光源の光を効率よく利用した明るい画像観察とを両立することができます．また，ホログラムの位相関数を設計する際に，光学系で発生する歪曲を補正する機能を同時にもたせることもできますので，画角が大きくなった場合でも歪みの少ない像を得ることができます．

図 2 に，シースルーヘッドマウントディスプレイの HOE を製造する際の光学系を示します．レーザー光源からの光束を 2 つに分割した後の二次光源を Beam Source 1，Beam Source 2 として記載しています．あらかじめ塗布したホログラム材料上で 2 本の光束を干渉させ，干渉縞でホログラム材料を露光して材料内部に屈折率分布を記録することにより HOE を作製します．HOE により再生される波面は，HOE 内部に記録された屈折率分布によって決定されます．Mirror 2 の形状を変化させることによって，Beam Source 1 からの光束のホログラム材料内での波面をコントロールできますので，ホログラム材料内部の屈折率分布と，露光状態での HOE の位相関数が等価となるように Mirror 2 の形状を設計します．

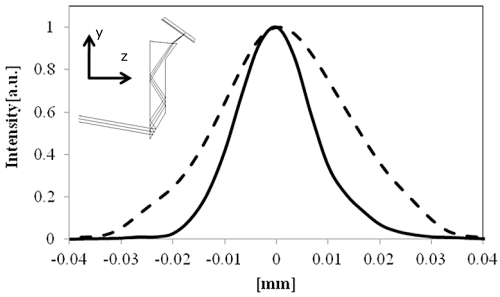

図3　表示パネル上の点像分布（実線：HOE の回折特性の影響込みで計算した場合，破線：HOE の回折効率の影響を考慮せずに計算した場合）．

HOE を有する光学系では，回折効率の影響も加味して観察光学系の光学性能を最適化する必要があります．HOE の回折効率は，HOE に対する入射光の入射角度や波長によって変化するため，光線トレースに基づいた光学性能のみでは観察光学系の性能を正確には評価できないためです．HOE の回折効率は，製造光学系の構成および画面表示時の光線入射条件から計算され，露光時に用いた光束のうちの一方が，露光時と同じ条件で入射した場合に最大となります．したがって，製造時の構成によって，画像観察時の光学性能が変化するため，観察光学系の性能を評価する際には，製造光学系の影響を含んだ計算が必要となります．製造光学系の構成と観察光学系での入射光の入射角，波長から回折効率は計算できますので，具体的には，観察光学系の瞳上での回折効率の二次元分布を計算し，観察光学系における波面の振幅を回折効率の分布で変調した上で，瞳から表示パネルに光線トレースしたときの点像分布関数を計算することで，製造光学系の影響を含んだ性能評価が可能です．観察光学系の瞳上での回折効率分布は，HOE の各位置での回折を 2 つの平面波による三次元的な干渉縞による回折と近似することにより，RCWA（rigorous coupled wave analysis）法等を用いて計算します．

実際に観察光学系の光学性能を，回折効率の影響を考慮して計算した例を紹介します．図 3 に，挿入図に示す画角について，瞳側から表示パネルに向かう方向に光束をトレースし，表示パネル面における点像分布関数を挿入図と同じ断面上で計算した結果を示します．点像分布の幅から，観察光学系の解像度が求められます．計算時には，HOE 作製時の露光波長を 532 nm，ホログラム材料の厚さを 20 μm，ホログラム材料の屈折率を 1.5，材料内に記録される屈折率差を 0.02 としました．観察光学系の瞳サイズを直径 3.0 mm とし，観察光学系の光源の波長分布は，中心波長 532 nm，半値幅 16 nm のガウシアン分布としています．光線トレースのみに基づいたものと比較すると，回折効率の影響を加味した結果は点像分布の幅が小さくなります．これは，HOE の回折効率が入射する光束の波長が製造時の露光波長と一致するときに最大となり，入射光の波長が製造時の露光波長から離れるに従って減少するために，HOE が一種の波長フィルターとして働き，倍率色収差による点像分布関数の広がりが緩和されるためです．一方で，射出瞳上の回折効率の分布は，波長ごとにピークの位置が異なりますので，波長帯域の狭い光源を用いると射出瞳が小さくなり，波長帯域の広い光源を用いるとより広い射出瞳となります．観察光学系で用いる光源の波長分布と回折効率のバランスをとりながら HOE を設計することにより，高い解像度と大きな射出瞳サイズを両立した観察光学系を実現することができます．

HOE を用いた光学系では，使用時の光学系だけではなく，HOE を製造する際の光学系の影響も考慮して光学性能を評価し，設計にフィードバックすることにより，製品性能の正確な予測が可能となります．従来のレンズやミラーとは一味違う特性をもった HOE ですが，HOE ならではの特性を生かした今後の展開が期待されます．

（コニカミノルタオプト(株)　生野恵子）

文　　献

1）例えば，辻内順平：ホログラフィ（裳華房，1997）pp. 79–89.
2）I. Kasai, Y. Tanijiri, T. Endo and H. Ueda: “A practical see-through head mounted display using a holographic optical element,” Opt. Rev., **8**（2001）241–244.
3）笠井一郎，森本隆史，野田哲也，谷尻　靖：“HOE を用いた眼鏡型ウェアラブルディスプレイの開発”，KONICA MINOLTA Tech. Rep., **1**（2004）39–44.