

HOEを有するシースルー表示光学系の性能シミュレーション

Optical Performance Simulation of See-through Displays with Holographic Optical Element

生野 恵子*
Keiko IKUNO

清水 佳恵**
Yoshie SHIMIZU

笠井 一郎**
Ichiro KASAI

要旨

これまで我々は反射型体積位相ホログラフィック光学素子（以下、HOEと略す）を用いて表示画像と外界像とを重ね合わせるシースルータイプの表示光学系を開発してきた。HOEは特定の波長成分で反射率が上がるという波長選択性を有しており、それ以外の波長成分にはほとんど影響を及ぼさない。この特徴を利用することによって、外界から入射するシースルー光の強度低減を抑制しつつ、明るい画像を表示することが可能となる。HOEの回折効率は入射する光線の波長および入射角度に依存するため、HOEを有する光学系の性能評価には、HOEの回折効率を考慮に入れる必要がある。

本稿では、HOEを有する光学系の光学性能評価方法を提案し、実際にシースルー表示光学系の評価に適用した結果について報告する。

Abstract

We have developed optical see-through displays in which the display image and the outside image are superimposed using a reflective volume phase holographic optical element (HOE).

By utilizing the HOE's ability to selectively reflect specific wavelengths, a viewing optical system can be realized in which a bright image display can coexist with excellent see-through properties. Since the diffraction efficiency of the HOE depends on the wavelength and the incident angle of incident rays, the diffraction efficiency of the HOE must be taken into consideration when evaluating the properties of the optical system having an HOE.

In this paper, we propose a method of evaluating the optical performance of optics having the HOE, and report the results when the evaluation method was applied to the evaluation of an optical see-through display.

1 はじめに

ホログラフィック光学素子（HOE）は、コンパクトな構成で複雑な波面を生成できるという特徴から、ピックアップ光学系等の分野で応用が進められている¹⁾。我々はこれまで、反射型HOEを用いたシースルー型の表示光学系の開発を進めてきた^{2) 3) 4)}。Fig. 1に表示光学系の外観、Fig. 2に表示光学系の機能の概念図を示す。Fig. 1、Fig. 2の表示光学系では、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としてHOEを使用している。HOEは、入射光線の波長が、製造の際に用いた波長近傍である場合に限り、大きな回折効率を持つという波長選択性を有している。回折効率の大きな波長域はHOEにより回折反射されるが、それ以外の波長域についてはHOEの影響を無視することができる。HOEを用いたコンバイナとHOEでの回折効率が大きい波長成分を有する光源とを組み合わせることで、外界からの光の光量落ちを抑制した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投影とを両立できる。

HOEの回折効率は、入射光線の波長、および入射角度に依存する。また、HOEはスネルの法則に従うレンズ等の光学部材と比較すると波長分散が大きく、わずかな波長差であっても回折角度が大きく変化する。HOEを用いた光学系の性能は、HOEの波長分散に起因する色収差、およびHOEの波長選択性により大きく影響を受ける。HOEを有する光学系を取り扱う際には、光源の波長分布や入射角度に依存する回折効率を詳細に計算し、HOEの波長選択性を光学性能に反映することにより、製品性能の予測や、設計へのフィードバックが可能となる。

本稿では、入射光の波長や入射角度によって変化するHOEの回折効率の影響を考慮した、HOEを有する光学系の性能評価方法を紹介する。また、実際にコンバイナとしてHOEを用いたシースルー表示光学系に対して、本手法を適用した結果について報告する。



Fig. 1 See-through display with HOE.

* コニカミノルタオプト(株)
技術開発本部 技術開発センター 基盤技術部
** コニカミノルタオプト(株)
技術開発本部 技術開発センター 事業開発部

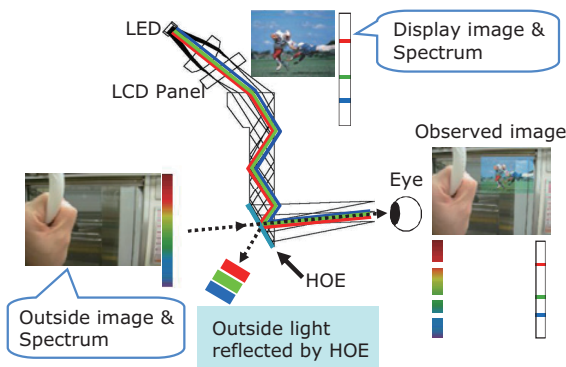


Fig. 2 Functioning of the see-through display.

2 HOEの基本性質

まず、HOEの基本特性について説明する。Fig. 3 (a), (b) はそれぞれ、HOEを作製するための露光光学系、およびHOEを用いた波面再生光学系の概念図を示している。Fig. 3 (a)に示すように、HOEは、2本の光束をホログラム材料上で干渉させ、干渉縞でホログラム材料を露光して屈折率分布を材料内部に記録することにより作製する。Fig. 3 (b)は、再生光学系において、屈折率分布を記録したHOEに対して、露光に用いた光束のうち一方を入射したときの様子を示している。HOEに入射した光束は、HOE内部の屈折率分布によって回折され、製造時に用いたもう一方の光束の波面が再生される。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るため、HOE露光時における干渉縞をコントロールすることにより、レンズと同様に、HOEに入射した光束の進行方向を変更できる。

再生光学系におけるHOEの回折効率、露光時に用いた光束のうち一方が、露光時と同じ条件で入射した場合に最大となる。HOEの露光に用いた光束と入射角度や波長が異なる光束を入射した場合には、その条件に応じて回折角および回折効率が変化する。回折効率を考慮しない、光線トレースに基づいた光学性能の評価では、波長や入射角度に依存する回折効率が光学性能に及ぼす影響を考慮できないため、HOEを有する光学系の評価としては不十分である。HOEを有する光学系の開発には、回折効率の影響を考慮に入れた光学性能の評価が必要となる。

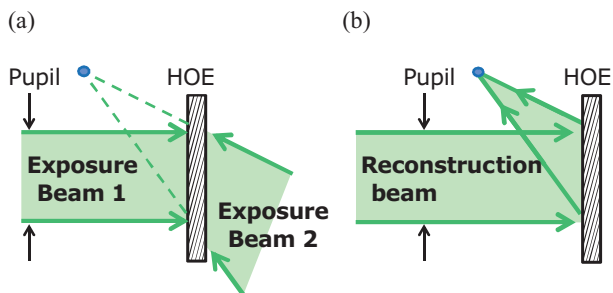


Fig. 3 Schematic images of (a) exposure optics for HOE fabrication, and (b) reconstruction optics.

3 性能評価方法

HOEを用いた再生光学系は、集光位置における回折効率を考慮した点像強度分布（以下、PSFと略す）を求めることにより、性能を評価できる。HOEを有する光学系では、光学系設計時および性能評価シミュレーション時にはHOEを位相シフト関数として取り扱う。位相シフト関数を用いた表現では、HOEに入射する光線の回折方向を計算することはできるが、回折効率は計算できない。光学系の瞳上での回折効率の分布をあらかじめ計算し、光学系における波面の振幅を回折効率の分布で変調することにより、HOE上での入射光線の回折効率変化を考慮した性能を評価できる。HOEの回折効率は、再生光学系の構成だけではなく、HOE作製時に露光される屈折率分布にも依存するため、再生光学系の性能をシミュレーションする際には、露光光学系の情報も必要となる。Fig. 4を用いて、入射光が単一波長の場合の、所望の表示画角における、HOEの回折効率の影響を含んだ集光位置でのPSFを求める手順を説明する。

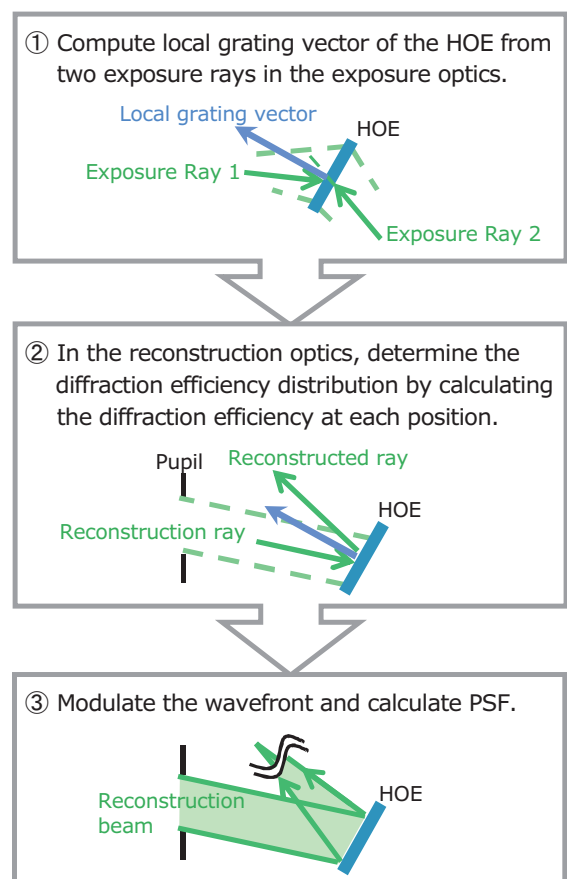


Fig. 4 Steps of simulation process at single wavelength.

①露光光学系において、HOE面を格子状に分割し、各格子点に入射する2本の露光ビームの方向ベクトルから、HOE内部の屈折率分布によって形成される局所的な回折格子ベクトルを計算する。

- ②手順①で得た結果を用いて、再生光学系でのHOE面上での回折効率分布を求める。再生光学系において、①で計算した各格子点における回折格子ベクトル、該格子点に入射する再生光線の方向ベクトル、および再生光線の波長から、再生光線がHOEに入射したときの回折効率を計算する。同様の計算を各格子点について繰り返すことにより、HOE面状での回折効率の分布を得る。
- ③再生光学系の瞳面における波面各点の振幅をステップ②で求めた回折効率分布で変調し、PSFを計算する。

手順②において、回折効率を計算するアルゴリズムとしてRCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) を用いた⁵⁾。画角が変化した場合には、HOEに対する光線の入射角度が変化するため、②、③の計算を再度実施する。また波長分布を有する光源を用いる場合には、②、③の計算を各波長について実施し、波長毎のPSFを、光源の波長分布で重みづけした上で重ね合わせることでPSFを求める。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーション構成

Fig. 5 に、今回シミュレーションを実施したシースルー表示光学系、および表示光学系のHOEを露光するための露光光学系の断面図を示す。ここでの表示光学系は2節、3節で述べた再生光学系に相当する。

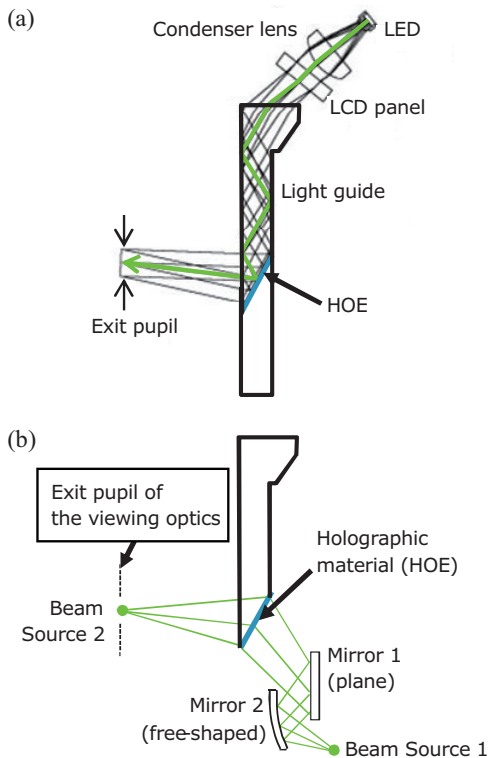


Fig. 5 Layout of (a) see-through viewing optics with HOE, and (b) exposure optics to fabricate the HOE of the viewing optics.

表示光学系は、照明用のLED、コンデンサーレンズ、液晶表示パネル、HOE面を有するライトガイドにより構成される。表示パネルから射出した光束は、ライトガイド内を伝搬した後、HOEにより回折され、観察者の瞳に到達する。HOEは、表示パネルからの光束を瞳方向に回折するだけでなく、凹面鏡の様に表示画像を拡大する作用を持つように設計されている。

Fig. 5 (b)の露光光学系では、レーザー光源からの光束を2つに分割し、分割後の2次光源をBeam Source 1, Beam Source 2として記載している。HOE材料内でビームを干渉させることにより、HOE内部に屈折率分布を記録する。Fig. 5 (b)に示すように、一方の光束は表示光学系の瞳中心相当位置から射出する発散光としてHOE材料内に入射する。もう一方の光束は、自由曲面ミラーによって波面を変調された後に、HOE材料内に入射する。自由曲面ミラーの形状は、HOE内に作製する屈折率分布に合わせて設計する。

4.2 シミュレーション結果

3節で紹介した評価方法を用いて、表示光学系の光学性能をシミュレーションした。Fig. 6 にシミュレーション時の構成を示す。Fig. 6 に示す画角の平行光束を、瞳側からHOE面を介して表示パネル側に逆トレースし、表示パネル上でのPSFを求めた。シミュレーションでは、HOE作製時の条件として、露光波長を532nm、ホログラム材料の厚さを20 μm 、ホログラム材料の露光波長における屈折率を1.5、ホログラム材料内に記録される屈折率差を0.02とした。

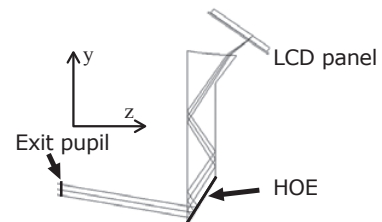


Fig. 6 Optical layout of the simulated condition on the yz plane.

Fig. 7 および Fig. 8 に、LCDパネル面上でのPSFシミュレーション結果のyz断面図を示す。それぞれの結果は、ピーク値を用いて規格化している。緑実線は今回提案した手法を用いてHOEの回折の影響を考慮した場合の結果を示し、赤破線は従来の手法によって求めた結果を示す。従来の性能評価手法では、HOEによる光線の回折のみを考慮に入れ、回折効率は全瞳上で均一なものとしてパネル上でのPSFを計算している。

Fig. 7 に、Fig. 6 の表示光学系に波長532nmの光束を入射したときの場合の結果を示す。Fig. 7によれば、単一波長においては、今回の提案手法で求めた場合の方が、従来手法で求めた場合よりもPSFが広がる。これは、HOEの回折効率分布に起因するものである。HOE作製時には、Fig. 5 (b) に示すように、一方の光束は瞳の中心位置を起

点する発散光としてHOEに入射する。yz断面上における露光時と観察時でのHOEに対する光線入射角度の差は、光線が瞳中心を通過するときに最小となり、光線の通過位置が瞳中心から離れるに従って大きくなる。このことにより、表示光学系におけるyz断面上での回折効率率は、瞳中心を通過する光線で最大となり、瞳中心から離れるに従って低下する。回折効率が瞳中心をピークとする分布を持つことによって、実効的な開口率が小さくなるため、回折効率の影響を考慮した場合には、従来の光線トレースのみによる手法の場合よりもPSFが広がる。

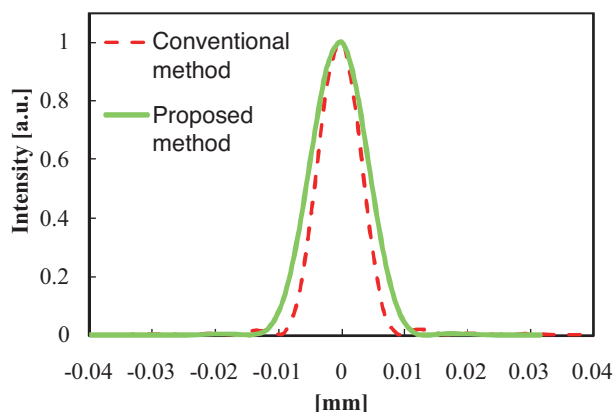


Fig. 7 The yz cross section of simulated point spread function at a single wavelength (532nm).

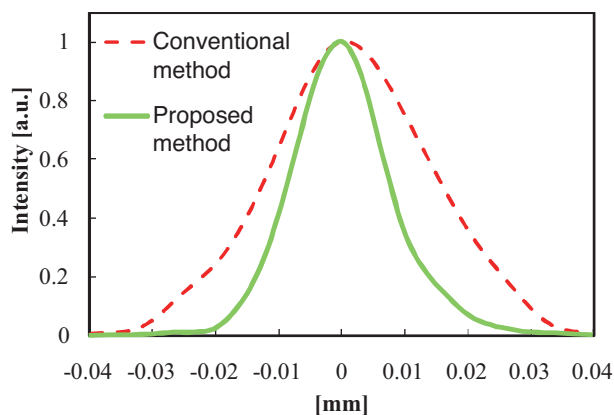


Fig. 8 The yz cross section of simulated point spread function at broad spectrum (524-540nm).

Fig. 6 の表示光学系に、524nmから540nmまでの分布を持った波長の光束を入射した場合の結果をFig. 8に示す。シミュレーションでは、波長524nmから540nmまで、各波長におけるPSFを1nmピッチで計算した上で、光源の強度分布を考慮して各波長のPSFを重ね合わせるにより、波長幅がある場合のPSFを計算した。Fig. 8によれば、波長幅のある光束を入射した場合には、今回の提案手法によって求めたPSFは、従来手法によるものよりも幅が小さい。これは、HOEの波長選択性に起因するものである。HOEの回折効率は、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、HOEは波長フィルターとしての作用を持つ。HOEは波長分散が大きいため、光源の波長幅が広がるとパネル上でのPSFは倍率色収差によって広がるが、HOEの回折効率を考慮した場合には、HOEの波長選択性によってPSFの広がりが抑制される。

Fig. 7, Fig. 8より、HOEを有する光学系において、HOEの回折効率の影響を考慮した場合と、しない場合とでは、光学系の性能シミュレーション結果が大きく異なることがわかる。

5 まとめ

本稿では、HOEを有する光学系について、回折効率の影響を考慮した光学性能の評価手法を紹介した。表示画面角、波長に応じた回折効率分布で波面を変調することにより、HOEの回折効率がPSFに及ぼす影響を計算できる。提案した手法を用いることにより、回折効率を考慮しない従来の評価では考慮できていなかった、HOEの回折効率が光学性能に及ぼす影響を評価することができ、HOEを有する光学系の性能のより正確な予測が可能となる。

●参考文献

- 1) 例えば、辻内順平、「ホログラフィ」pp.79-89 裳華房ISBN4-7853-2323-X, (1997)
- 2) I.Kasai, Y.Tanijiri, T.Endo and H.Ueda, "A Forgettable Near Eye Display," Proc.Fourth International Symposium on Wearable Computers ISWC2000, 115(2000)
- 3) I.Kasai, Y.Tanijiri, T.Endo and H.Ueda, "A Practical See-Through Head Mounted Display Using a Holographic Optical Element," Optical Review Vol.8, No.4, pp.241-244(2001)
- 4) 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., Vol.1, pp.39-44(2004)
- 5) M.G.Moharam and T.K.Gayload, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," J.Opt.Soc.Am Vol.71, No.7, pp.811-818(1981)

●出典

本稿は日本光学会微小光学研究グループ主催“Microoptics Conference 2010”予稿集からの転載である。