

HOE を用いた眼鏡型ウェアブルディスプレイの開発

The Development of a Head-Mounted Display (HMD)
Incorporating a Holographic Optical Element (HOE) and Worn like Eyeglasses

笠井 一郎*
Kasai, Ichiro

森本 隆史*
Morimoto, Takashi

野田 哲也*
Noda, Tetsuya

谷尻 靖*
Tanijiri, Yasushi

要旨

反射型ホログラム光学素子の特長を活かすことで、装着に違和感のない、眼鏡並の大きさ、重さとシースルー性能を持ったウェアブルディスプレイを開発した。HOEの設計手法と、製造技術、特にカラーHOEの回折効率とカラーバランスの解析手法を確立したことで、従来にないシースルー性と明るさを実現した。本稿ではHOEの設計、解析手法と試作結果を紹介する。

Abstract

We have designed and developed a head-mounted display (HMD) with a reflective holographic optical element (HOE). Because this HMD is virtually identical to a pair of eyeglasses in size, shape, and weight, it can be worn like eyeglasses. Further, this HMD maintains image brightness and provides excellent see-through performance. The key to this achievement lies in the techniques developed for the design and manufacturing of the HOE, and especially in the techniques used to analyze diffraction efficiency and color balance. Presented here are these key techniques and the prototype HMD which they made possible.

1 はじめに

ホログラムは、SF映画に登場するように立体を表示できる夢の光学素子との期待が大きいが、産業分野では立体表示ではなく、光ディスク装置用の光学素子などでホログラム光学素子 (HOE) と呼ばれて、広く用いられている。これらのHOEは、古くから設計手法が知られた透過回折型で、光の集光や分光の機能を持っている¹⁾。一方、リップマンタイプなどの2光束法により作製される反射型ホログラムには、腕時計のバックライトや立体像を表示するディスプレイホログラムがあるが、その厳密な設計手法は知られておらず、利用分野が限られている。

さて、次世代の情報アクセス手段としてウェアブルコンピューティングが話題になっているが²⁾、従来のような携帯性を優先した直視型の小型ディスプレイでは、表示が小さく使いにくい。より見やすいディスプレイとしてヘッドマウンテッドディスプレイ (HMD) が提唱され

てきたが、従来のHMDは大きい、重い、視界を遮るという問題があった。筆者らは、これらの課題を反射型HOEの波長選択性と波面再現機能を用いて解決し、超小型でシースルー性能を持った眼鏡型ディスプレイを開発した³⁻⁶⁾。また反射型ホログラムの光学特性の設計、解析手法を確立しカラー化に成功した^{7, 8)}。本稿ではその設計手法と試作について報告する。

2 従来のHMD

従来のHMDの主な光学系の基本構成をFig. 1 に示す。いずれも、原理的には小型の表示素子に表示された映像を拡大光学系で拡大して、観察者眼に導いている。Fig. 1 a は単純な凸レンズを用いた構成である。単玉レンズでは収差補正の限界により、画角を大きくできない。また光軸方向に長くなるため、装着するとモーメントが大きく、重量以上に重く感じる。Fig. 1 b は凹面ミラーを用いた折り返し構成である。Fig. 1 a の構成に比較してコンパクトになるが、光学系が回転対称でないため、複雑な光学反射面が必要である。また偏心反射面1面の収差補正

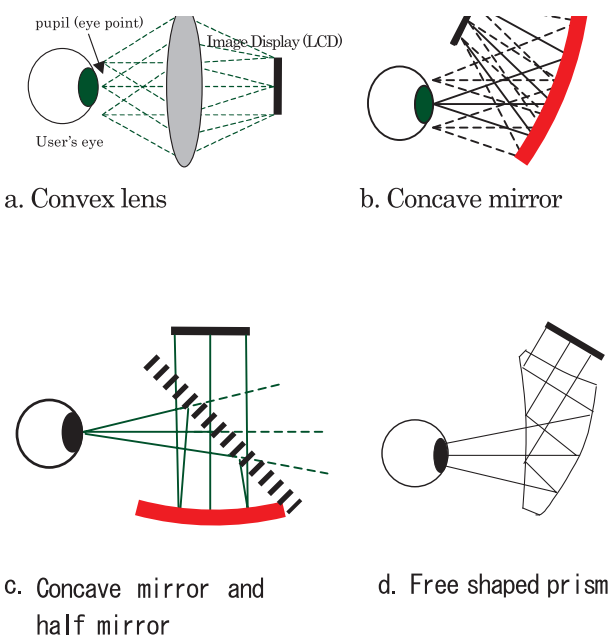


Fig.1 Conventional HMD Optics

* コニカミノルタテクノロジーセンター(株)
デバイス技術研究所 イメージングデバイス開発室

限界により、大きな画角はとれない。

Fig. 1 cは、凹面とハーフミラーを組合せることで光学系を回転対称とし、光学面が1面でも比較的良好な性能が得られ、前方視野も確保（シースルーが可能）しているが、表示素子からの光量は1/4に、外界の光量は1/2になってしまい全体サイズも大きい。Fig. 1 dは全反射を巧みに利用した、自由曲面プリズムを用いた光学系で、比較的小型コンパクトになっているが、シースルーができず前方視野を確保できない。

いずれの方式においても、光学系を目の前に配置するため、表示画角だけでなく保持筐体部分が死角になり、装着時に視界を遮り危険である。また、使用している様子は、他人から見てきわめて不自然である。理想的なウェアラブルディスプレイには、小型軽量であると同時に、周囲はもちろん目の前の表示部分も見通すことができ、画像は明るくクリアに表示されるという、全く矛盾した機能が要求される。

3 ホログラムの特徴

反射型ホログラムの特長を利用することで、この矛盾した要求に応えることができる。反射型HOEは、外界光と表示光を合成するハーフミラーのような機能と、表示素子を拡大する凹面や自由曲面の機能とを併せ持つことが可能である。前者はホログラムの波長選択性によって、後者は波面再現性によって実現できる。

3. 1 波長選択性

ホログラムは、2つの光束を干渉させその干渉縞を感材に記録する、いわゆる2光束干渉法により作製される。ホログラムは、作製の時に使用した光と同じ波長、入射角の光で再生照明を行うときにもっとも回折効率が上がる。Fig. 2に示すように、ホログラムを白色光で照明すると、作製光と同じ波長の光が作製時の物体光の方向と同じ方向へ再生され、近傍の波長光は近傍の方向へ再生される。これを波長選択性と呼び、主としてホログラムを作製する2つの光束のなす角度に依存する。

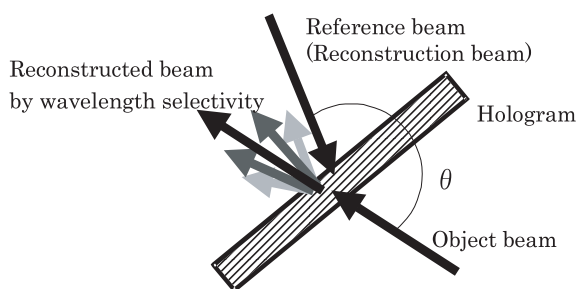


Fig.2 Reconstruction of hologram

物体光をホログラム材料に垂直とすれば再生光の波長範囲 $\Delta\lambda$ は、 λ を作製波長、 t をホログラムの厚さ、 θ を二光束がホログラム媒質内でなす角、 n をホログラムの屈折率として近似的に式(1)で示される⁹⁾。

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{nt(1-\cos\theta)} \quad (1)$$

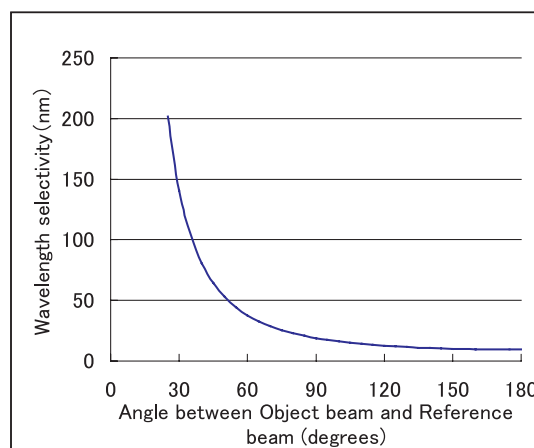


Fig.3 Wavelength selectivity

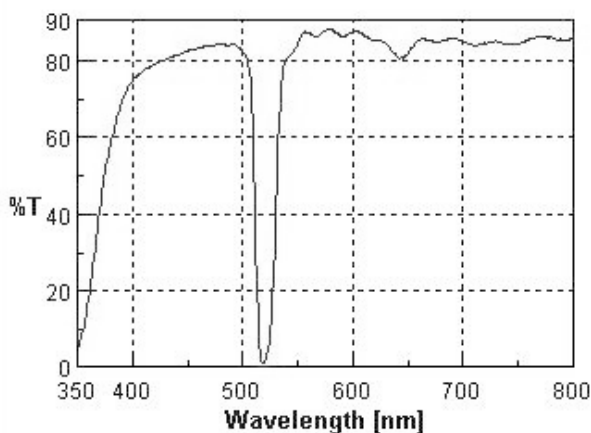


Fig.4 Diffraction efficiency of the HOE

Fig. 3に、2光束がなす角度に対する再生波長範囲の計算例を示す。作製波長を532nm、ホログラムの厚さを10 μ m、平均屈折率を1.5、屈折率変調を0.05、物体光をホログラムに垂直とした。Fig. 4に、代表的なホログラム材料であるフォトポリマーの回折効率の例を示す。Fig. 4は透過率を測定しており520nm付近の透過率の低下が回折効率に相当する。これらから反射型ホログラムは特定の波長だけを反射し、その他の光を透過することがわかる。したがって、RGB3色のレーザでホログラムを作製すれば、各色の反射率（回折効率）や後述する波面再現特性を独立に制御することができる。

3. 2 波面再現性

簡単な例として、Fig. 1 bの凹面に相当するホログラムでの波面再現性を考える。Fig. 5に示すように、平行光を凹面ミラーで反射して瞳に集光する光束とし、凹面の前にホログラム材料を配置する。もとの平行光と、収束する光を各々参照光と物体光と考えれば、凹面に相当するHOEが作製できる。再生時において、表示素子側からの光はホログラムによって瞳へ集光する光に変換されるので、Fig. 6に示すように、集光点の位置から観察すれば表示素子が拡大されて見える。

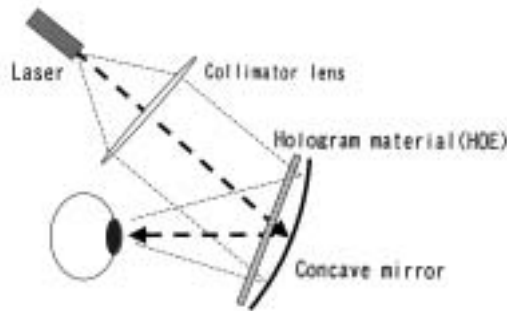


Fig.5 Making an HOE equivalent to a concave mirror

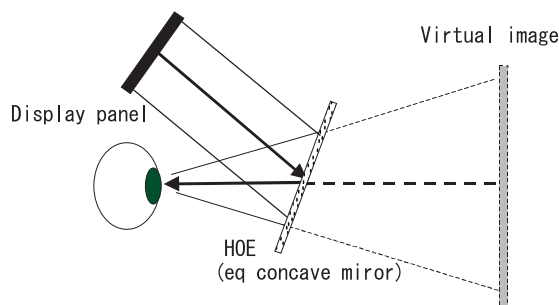


Fig.6 Observation of virtual image using HOE

ただし、実際の映像観察に対しては最適化がなされておらず収差が発生する。映像観察時の表示素子からの光束は、Fig. 6に代表的に示した光束とは異なるからである。このような単純なホログラムの設計では、所望の性能や回折効率が得られない。表示全域での収差補正、及びホログラムの原理と特長を理解した設計、製造手法が必要である。

4 設計

4. 1 構成

真にウェアラブルと呼べるディスプレイを目標として、できるだけ小型軽量で、シースルーに適した基本構成を検討した。Fig. 7に構成の断面図を示す。目の前を機構部品が蔽うことがないように、表示素子を上方へ配置

し、全反射プリズムで導光する構成とした。ホログラムは斜面に配置し、この部分で外界光が屈折しないよう補正プリズムを接合した。これにより、透過光に対しては単なる平板ガラスとして機能する構成となっている。

光源LEDから照射された光束は、空間光変調素子LCDにより変調され映像光束となり、入射面P1よりプリズム内に入射し、プリズムのP2、P3面で合計3回全反射してHOEに導かれる。HOEは映像光束の波長に一致した回折ピークを持ち、これにより映像光束は瞳側へ回折反射される。ここで、HOEは波長選択性によるコンバイナ機能を有しており、映像光束は外界光束と重畳される。HOEの回折反射は反射凹面と等価な波面変換機能からなっており、回折波長と一致した映像光束に対して接眼レンズとして作用し、表示像は瞳へ拡大して導かれる。なお回折波長以外の外界像には光学的な作用をおよぼさない。外界光束と、回折反射された映像光束はほぼ垂直に光束選択面P3に入射して透過し、観察者の瞳に導かれる。次節でこのHOEの設計の詳細を述べる。

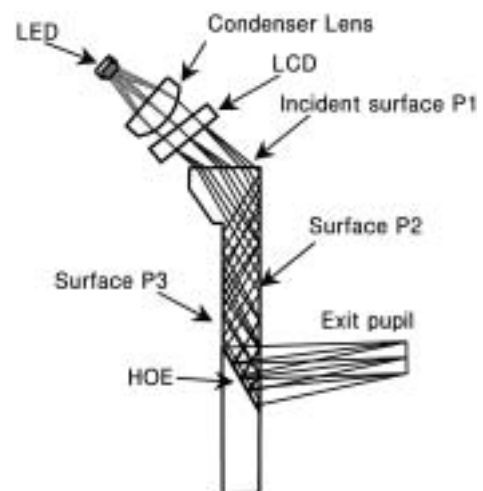


Fig.7 Optics layout of wearable display

4. 2 設計

設計は、HOEを表示像の観察に用いる状態（使用状態）と、そのHOEを作製する状態（製造状態）の2つのステップで進める。本構成では、HOEは映像光束に対して傾いた非軸対称な光学系となっている。非軸対称光学系において良好な映像を表示するためには、HOEに自由曲面ミラーに相当する複雑な波面再現性を持たせる必要がある。

まず、使用状態の目標仕様を満たすHOEを設計する。ホログラムを、入射光と回折光の波面の位相ずれをあらわす位相関数として表現する。設定した瞳からの光束をこの位相関数によって変換し、表示素子上に集光させ、画角に応じた表示素子上の各点への集光度合いで表示像の収差を評価する。瞳の大きさと表示素子の画素サイ

ズを考慮して最適なHOEを定義する。

次に製造状態を考える。ホログラムは、前述のように二光束法により作製される。使用状態の設計では、ホログラムは位相関数として定義されており、このホログラムの作製に必要な光束は直接的にはわからない。しかし、そのホログラムにある波面を入射させたときにどのような波面変換がなされるかはトレースにより知ることができる。ホログラムを作製する2つの波面の差は、そのホログラムの波面変換と等価であるので、作製光のうちひとつの光束を決定すれば、もうひとつの作製光束は一義的に決まる。すなわち、作製において与えるべきふたつの光束が定義できる。第二の光束は複雑な波面を持つので、点光源や平行光をもとに複数のレンズや自由曲面ミラーで波面を変換する必要がある。上記トレースによりこの光学系を設計する。これをホログラム作製光学系と呼ぶ。これらの二光束を干渉させれば所望のホログラムが作製できることになる。瞳へ向かう収束光を作製するのは実験的に難しいので、実際の作製においては共役光である瞳からの拡散光を用いる。共役再生などホログラムの原理については文献を参照されたい¹⁰⁾。

4. 3 カラーホログラムの設計

カラーホログラムの設計には、通常の光学系の色収差補正とは異なる設計が必要である。本構成における色収差の発生要因は、入射面P1における分散、HOEとプリズム材料界面での分散、射出面P2での分散であるが、発生する色収差を、RGB各々のHOE波面再現性を異ならせることで補正する。前述のように、本構成は高い波長選択性を持つ反射型HOEを用いている。表示光源に用いたLEDは発光中心波長が各々634nm、521nm、467nm、発光波長半値巾は約30nmであり、HOEの波長選択性を考慮すると、HOEは対応する波長光束にのみ独立に作用する。これを利用して、各々の波長においてHOEに独立した波面再現性を持たせ、他の光学部材により発生する色収差を補正することができる。他の面で発生する色収差をキャンセルするようにR,G,B 3色のHOEを独立に設計を行い、これらのHOEを作製する光束を発生する製造光学系を設計する。

ホログラムの作製において、波長ごとに光学系を交換したり、3種類の個別の光学系で次々露光したりすることは現実的ではない。カラーホログラムの作製はR,G,Bのレーザを1本にまとめたひとつの光学系で露光を行なうのが一般的である。したがって、位相関数はR,G,B独立に設計しつつ、製造光学系をひとつとする必要がある。

これらの考え方に基づいて設計を行い、目標仕様を満たすHOE、およびそのHOEを作製する製造光学系を得た。Fig. 8 に、得られた製造光学系の構成を示す。R,G,B各々の波長を発振するレーザ光束をひとつに束ね、ふ

たつに分岐し、各々をスペイシャルフィルタリングのために配置されたピンホール上に集光して、第1、第2の点光源とする。第1の点光源は、表示像の観察時における瞳と一致している。ホログラムは作製光と同じ光束を再生する場合、最も回折効率が高くなり、再生時の瞳と光源位置を一致させておけば、再生において視野周辺まで最も明るい表示像が得られる。第2の点光源から射出された光束は、自由曲面で構成された凹面反射面で複雑な波面に変換され、平面ミラーで折り返され、色補正プリズムを介してHOEを照射する。色補正プリズムは、その分散によりR,G,BのHOE作製光束に色収差を与え、これによりHOEを照射する波面を異ならせている。この色補正プリズムの光路長と角度を調整することにより、R,G,B各々の波長に対して異なる所望の波面再現性をHOEに与えることができる。

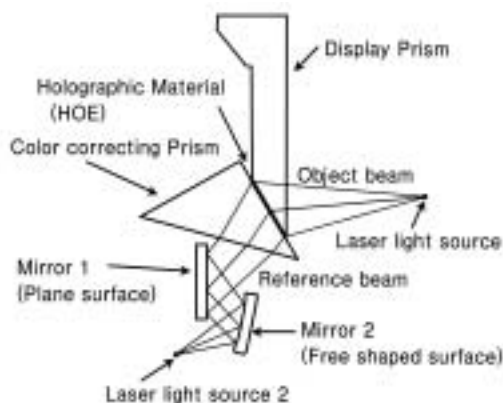


Fig.8 Exposing optics layout

5 回折効率

3. 1で述べたように、ホログラムを白色光で照明した場合、設計された方向に作製したレーザと同じ波長の光を再生すると同時に、その近傍の角度に近傍の波長の光を再生する。このため、光学系全体についてRGBすべての設計波長で色収差が除去されていても、HOEの波長選択性によって発生する波長と強度の分布によって、瞳上での色むらが発生する。以下この解析手法⁸⁾について述べる。

5. 1 ホログラムの定義

HOE再生時のシミュレーションにおいて、回折方向はHOEの位相関数を用いて計算できるが、強度すなわち回折効率の計算はできない。回折効率を求めるにはまず、体積型としての、いわゆる厚いホログラムとして再定義する必要がある。

厚いホログラムは、そのホログラムを作製するふたつの光束により定義できる。ホログラム素子を領域分割

し、前述の製造光学系を設計する際に求めたトレースにより、二光束干渉のふたつの光を定義する。

前述のように、参照光を、瞳位置に収束する光束とすれば、この光束を位相関数で変換した光束が物体光となる。この二光束でホログラムが作製されるので、これからHOE媒質内の回折格子の向き、ピッチが厳密に算出できる。

5. 2 回折効率のシミュレーション

定義した厚いホログラムを用いて、回折光をシミュレーションする。まず、表示素子の一つの画素から領域分割したHOEまで到達する光線の角度と強度を求める。ここでは強度はほぼ一定である。次に定義されたHOEの厚さ、屈折率および入射光から、RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis)¹¹⁾を用いて、再生される回折光の角度と強度を求める。

画素からHOEに到達する光線を、分割された領域すべてについてトレースし、瞳位置における輝度分布を計算する。これを、波長選択性を考慮した波長範囲について計算すれば、瞳上の色と強度の分布がわかる。

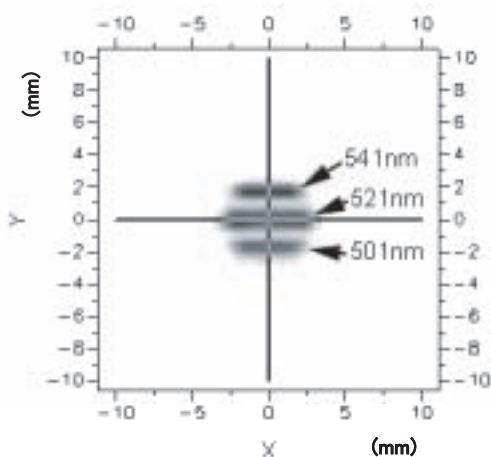


Fig.9 Intensity distribution by diffraction efficiency

Fig. 9 に、画面中心の画素を見たときの瞳位置における輝度分布のシミュレーション結果を示す。ホログラム材料の収縮を考慮し、532nmのレーザーで作製するホログラムが521nmを中心とする波長域で再生する範囲を求めた。Fig.10に示す、回折効率を考慮しない場合の輝度分布に比べて、瞳が縦方向に縮小していることがわかる。また、波長によって瞳の位置が変わっており、この例では瞳を上方へずらせば長波長側へ色が変わることがわかる。

色むらのない表示のためには、赤、青についても同様の計算を行い、瞳位置でのカラーバランスを取る必要がある。観察される瞳上での強度は、この他に照明光源であるLEDの発光特性、液晶の分光透過率が関係し、HOEの回折効率をあわせた三つの分光特性の積となる。つま

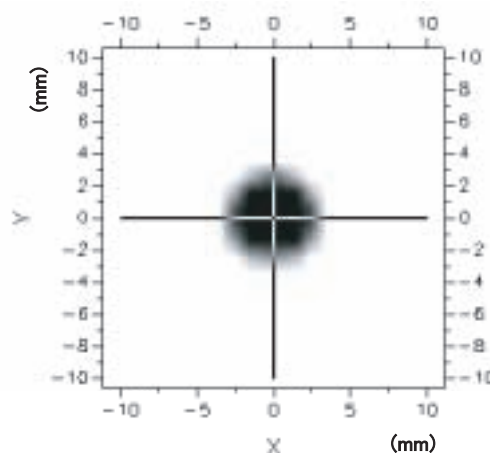


Fig.10 Intensity distribution without diffraction efficiency (521nm)

り、良好なカラー画像観察のためには、HOEの設計だけでなく、光源の発光波長分布、液晶の分光特性の設定が非常に重要である。

これらのシミュレーションに基づいてHOE、およびそのHOEを作製する作製光学系を設計し、HOEを二光束干渉法で作製した。これを補正プリズムに接合し、機構部品と組合せてディスプレイを試作した。外観をFig.11に、装着した様子をFig.12に示す。装着時にも他人から装着者の目が見えるので違和感がない。もちろん観察者の見ている映像は外部からは見えない。主な仕様をTable 1 に、観察者の視界イメージをFig.13に示す。前方と表示映像が同時に見え、電車の中などでも、安全にハンズフリーで映像を楽しむことができる。

Table 1 Specifications

FOV	16degrees (diagonal)
Resolution	320x240dots
Intensity	200cd/m ²
Color	24bit
Weight	27g (w/o cable)
Thickness	3.5mm (Prism)
Transmittance	>85%



Fig.11 The wearable display



Fig.12 Using wearable display



Fig.13 Observer's view

6 まとめ

体積型ホログラムを作製するには、HOEの位相関数の設計だけでなく、二光束干渉露光のための作製光学系を設計製造する必要がある。HOEの波長選択性は、シースルーコンバイナとして有効に働く一方、原理的に瞳位置での色むらを発生させる。

これらの諸要件を考慮した設計、解析手法を確立しHOEを用いた超軽量、コンパクトな眼鏡型のディスプレイを開発した。良好なカラー映像が観察できると同時に、視界をさえぎることなく外界を確認できるものであり、近い将来のウェアラブルディスプレイの本命となることが期待される。

謝辞

本稿をまとめるに当たって、当社デバイス技術研究所ナノ加工開発室の上田裕昭博士に多大なご協力をいただいたことに感謝します。

また、本研究の一部は経済産業省による平成15年度地域新規産業創造技術開発費補助事業の補助を受けて行った。

●参考文献

- 1) Lohmann A.W., "Binary Fraunhofer holograms generated by computer", Appl. Opt. 6, pp.1739-1748, (1967)
- 2) たとえば、情報処理学会第65回全国大会講演論文集 特別トラック(4) ウェアラブルコンピューティング (2003)
- 3) I.Kasai, Y.Tanijiri, T.Endo and H.Ueda, "A Forgettable Near Eye Display", Proc. Fourth International Symposium on Wearable Computers ISWC2000 pp.115-118, (2000)
- 4) I.Kasai, Y.Tanijiri, T. Endo and H.Ueda, "Actually wearable see-through display using HOE", ODF 2000 pp.117-120, (2000)
- 5) 笠井一郎, 谷尻 靖, 遠藤 毅, 上田裕昭 "HOEを用いた小型シースルーディスプレイの開発" 第26回光学シンポジウム講演予稿集 pp.29-32, (2001)
- 6) 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) .
- 7) 笠井一郎, 野田哲也, 遠藤 毅, 上田裕昭 "HOEを用いた小型フルカラーシースルーディスプレイの開発" 第28回光学シンポジウム予稿 pp.29-32, (2003)
- 8) 森本隆史, 谷尻 靖, 野田哲也, 笠井一郎, 上田裕昭 "HOEを用いた観察光学系における回折効率解析" 第28回光学シンポジウム予稿 pp.33-36, (2003)
- 9) H.Ueda E.Shimizu and T.Kubota "Image blur of edge-illuminated holograms" Opt. Eng. Vol.37 No.1 pp.241-246, (1998)
- 10) 例えば 久保田敏弘 「ホログラフィ入門」 pp.21-43 朝倉書店 ISBN4-254-20086-2, (1995)
- 11) M.G.Moharam and T.K.Gaylord, "Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction," J.Opt.Soc.Am. vol.71, No.7, pp.811-818, (1981)