

網膜投影立体ディスプレイ

安東 孝久

Retinal Projection Stereoscopic Display

Takahisa ANDO

We have developed the retinal projection display that has the feature of the Maxwellian View using the HOE (holographic optical element) and the LCD (liquid crystal display) which back-light is the laser. When we observe this display that has extremely deep focal depth, we do not need the accommodation of our eye's crystalline lens, therefore we can see binocular stereoscopic virtual object clearly wherever the convergence changes. In addition, we can see both real world and virtual objects at the same time by using HOE as the see-through combiner, because the HOE is the grating that has high efficiency of both transparency and diffraction.

Key words: HOE, LCD, accommodation, Maxwellian view

従来から各種方式の立体映像表示装置が開発されてきたが、現在の立体像表示方式は、左右の各眼に異なる映像を提示する両眼視差方式が主流となっている。われわれが日常生活で知覚する立体感は、調節と輻輳が一致した状態であるが、両眼視差方式の立体表示では調節と輻輳が一致しないので、疲労感を伴うなどの問題が指摘されている。スクリーン位置に対する調節と輻輳が一致しなくても立体視できる許容範囲がある¹⁾ことは知られているが、この範囲を超えた視差映像を提示することは避けるよう提唱されている。したがって、これまでの両眼視差方式の立体ディスプレイでは、輻輳を変化させる範囲が狭い、すなわち奥行き方向のダイナミックレンジが狭い立体表現になっていたと考えられる。そこで、水晶体の焦点調節機能の影響を受けない光学系で映像を提示すれば、観察者は調節に関係なく映像を観察できるので、輻輳を変化させる範囲を広くとることができると考えられる。また、複合現実感²⁾のように現実世界と電子映像を同時に見る場合、現実世界を見るときの水晶体の調節変化に影響されないで、常に電子映像が鮮明に観察できると考えられる。

本稿では、焦点深度が深い電子映像を両眼に提示できるホログラフィック光学素子 (HOE: holographic optical element) を用いたシースルー型ディスプレイ (網膜投影ディスプレイ) について述べる。

1. 網膜投影ディスプレイの構成

網膜投影ディスプレイは、空間光変調素子に LCD (liquid crystal display)、光源にレーザー光線、接眼光学系に HOE を使用して実現した。図 1 に構成を示す。点光源として使用するレーザー光線はコリメーターレンズで平行光線となり、バックライトとして LCD を照明する。LCD を透過した光線は、LCD の画素の開口によって回折するので、開口を通過したレーザー光は、0 次光 (透過光) と高次回折光が混在した光線となる。この状態で LCD の発光面を観察すると、焦点深度が浅い映像を観察することになる。そこで、焦点深度を深くするために、再回折光学系³⁾を用いた。再回折光学系は、レンズとピンホールで構成される。レンズ 1 の前焦点面に LCD を置くと後焦点面にフーリエスペクトル面が形成される。このフーリエスペクトル面には 0 次の回折光と高次回折光の多数の点像が形成され、この位置に 0 次光だけを通過させるローパスフィルター (ピンホール) を配置する。そしてレンズ 2 の前焦点をレンズ 1 の後焦点の位置に合わせると、レンズ 2 から出る光は、LCD の開口による 0 次回折光だけの平行光線束となる。

再回折光学系によって高次回折光が除去された平行光線束は、リレーされて接眼光学系に導かれる。接眼光学系は、観察者にマクスウェル視⁴⁾させることができる光学レンズで構成される。マクスウェル視とは平行光線束をいったん

三洋電機(株)研究開発本部ハイパーメディア研究所ビジュアルインフォメーション研究部 (〒574-8534 大東市三洋町 1-1)
E-mail: t.andou@rd.sanyo.co.jp

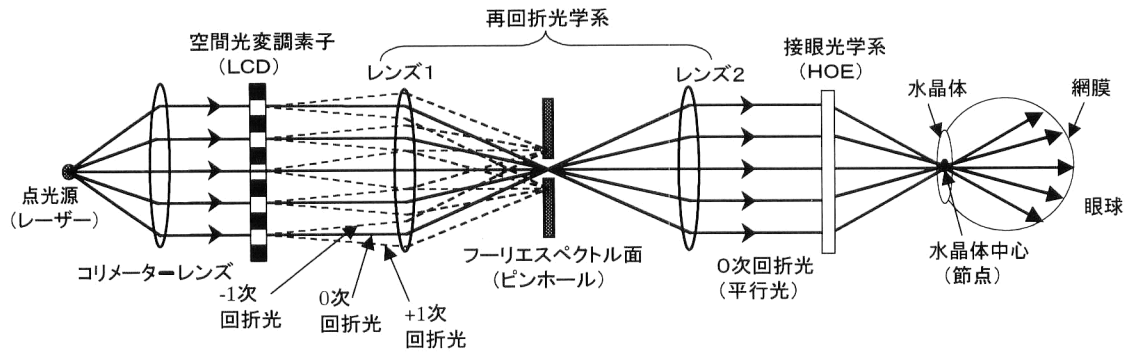


図1 網膜投影ディスプレイの構成。

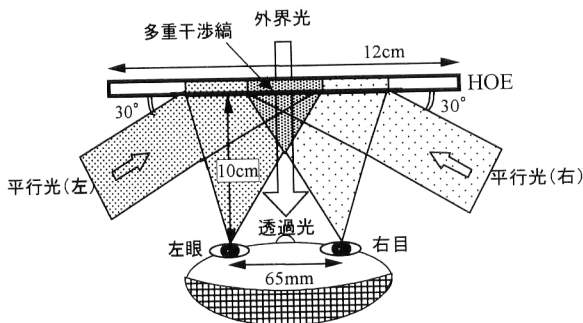


図2 HOEの光学仕様。

レンズで集光させ、その集光点に瞳孔中心を置いて光を観察する方法で、網膜上の広い範囲に均一の光を照射できる。

再回折光学系を通過した光線束は、LCDの1画素で見ると、1画素の開口幅をもつ細い光線（面光源のように拡散しない光）がLCD面に垂直な方向に飛び出していることになる。LCD上の全画素から発せられるそれぞれの光をマクスウェル視で観察すると、LCD上の各画素の光が直接網膜上のある1点を刺激することになり、全画素の光はすべて網膜上に投影される。このとき、水晶体の屈折力の変化に関係なく、観察者はLCD上の映像を観察することができる。

2. ホログラフィック光学素子 (HOE)

マクスウェル視によって深い焦点深度の映像が提示できるシースルー型ディスプレイを実現するには、平行光線束を収束させるレンズと外界光に電子映像を重畳表示させるコンバイナーが必要になる。従来からコンバイナーとして多用されているハーフミラーは、外界光の透過と電子映像の反射がトレードオフの関係にあることから、外界と電子映像のどちらも明るく観察することができない。そこで、シースルー用のコンバイナーにHOEを使用することにした。HOEは、ホログラム乾板に2つのレーザー光を照射して生成される干渉縞を記録した回折格子であり、1つのホログラムにレンズ機能、干渉フィルターなどの多機能性を

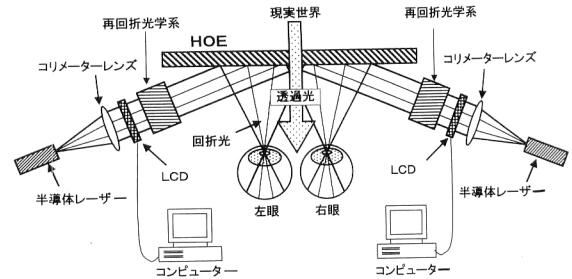


図3 立体視対応型網膜投影ディスプレイの構成。

もたせることができる⁵⁾。ここでは、マクスウェル視させる接眼レンズにHOEを用い、さらにシースルー機能を実現するコンバイナー、ならびに両眼視差映像をそれぞれ左右の眼に分離、提示する機能をもたせた。図2にHOEの光学仕様を示す。

HOEは、特定方向から入射した光しか回折しない角度選択性をもっているため、図2に示すように、右方向からHOEに入射した平行光は右目に収束するように回折し、左方向からHOEに入射した光は左目に収束するように回折させることができる。観察者は、左右の瞳孔をそれぞれの収束点に置くと、マクスウェル視として提示される光を感じることができる。HOEに入射させる平行光に空間的な光強度変調をかけておくと、変調に応じた映像のパターンが知覚できる。シースルーで電子映像がマクスウェル視できる本HOEの光学性能は、空間光変調素子にDMD (digital micro mirror device) を用いて実現した単眼型の網膜投影ディスプレイ⁶⁾によって実証された。

3. 網膜投影立体ディスプレイの構成

図3に、二眼立体視に対応させた網膜投影ディスプレイの構成を示す。本ディスプレイでは図2に示したHOEを使用し、空間光変調素子には、0.7インチ27万画素LCDを用いた。2台のコンピュータから出力される視差映像をLCDに表示する。LCDに表示した映像を両眼に網膜投影させるには、観察者ごとの眼間距離が調整できなければ

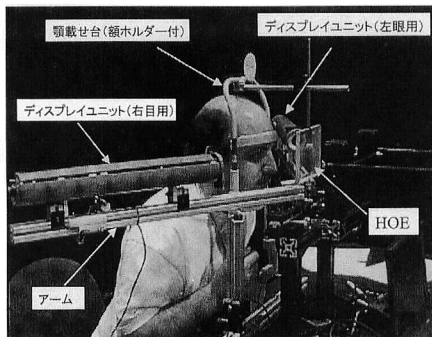


図4 ディスプレイの外観。

ならないので、顎載せ台を装備して観察者の瞳孔位置を固定し、光学系を動かすことで眼間調整を行うようにした。左右方向から入射させる平行レーザー光は、HOE に対して 30° の角度で入射するが、この角度をわずかにずらすと光線の収束点が動くので、観察者ごとの瞳孔間距離に2つの収束点の位置を調整することができる。図3の光学系の外観を図4に示す。レーザー光源とLCD、ならびに再回折光学系からなるディスプレイユニットはアーム上に取り付けられ、左右両方ともHOE に対する角度が変更できるように手で回転させることができる。

4. 眼間距離調整方法

本光学系でLCDの映像をマクスウェル視で立体視する場合、2つの収束点に瞳孔の中心をもってこなければならぬ。眼間距離には個人差があるため、収束点の位置を調節する機構が必要である。HOE 面に入射させる平行光線の角度を変えれば、ホログラムの結像式に応じて収束点が移動する。HOE への平行光線の入射角度を設計時の角度 30° から $\pm 3^\circ$ 動かすと、100 mm 先の収束点は、図5に示すように左右に3 mm ずつ移動する。すなわち左右両方の平行光線の角度を調節することにより眼間距離を59~71 mm まで対応できる。しかしHOE の角度選択特性のため、HOE への入射角度が設計値からずれると回折効率が低下するという問題がおきる。そこで、HOE への再生照明光の入射角の変動と回折効率の関係を検討した。

本HOE の条件において、回折光の強度が最大になるところから0になるまでの角度を理論計算式⁷⁾で求めると約 11° と計算された。この値は設計値の入射角度から 11° 動かすと回折効率が0になり、映像が観察できなくなることを意味している。これに対して、網膜投影立体ディスプレイでは、 3° 動かせば人間の眼間距離の差を補うことができる。 3° の差異は、回折光強度が0になる角度 11° よりも小さいので、回折光の強度低下は許容範囲内と考えられる。実測した回折効率は、設計時の入射角度 30° で35.9%、こ

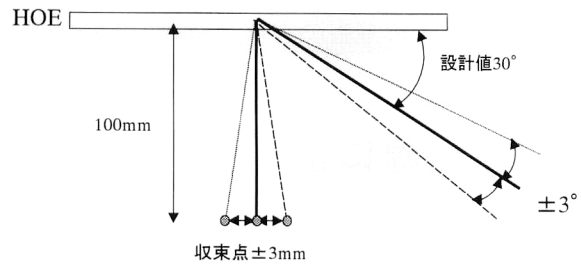


図5 入射光線の角度と収束点の関係。

こから $+3^\circ$ 動かした時に34.8%、 -3° 動かしたときも34.8%であった。したがって、HOE への平行光線束の入射角度を変えることで、回折像の効率を損なうことなく眼間距離の個人差を補うことができた。

二眼視機能を有するHOE を用いて、焦点深度が深い電子的な画像を左右それぞれの眼に入射させる二眼立体視対応型の網膜投影立体ディスプレイを試作した。マクスウェル視では、観察者は瞳孔中心を光線の収束点に置かなければならぬので、二眼立体視する場合、観察者ごとの眼間距離調整を高精度に行う必要がある。ここでは、1枚のHOE に二眼分離機能をもたせ、HOE へ入射させる光線の角度を変えて、収束点の位置を制御することを提案し、この機能の有効性を示す光学系を実現した。観察者はシースルーで外界を観察できるだけでなく、LCD 画面に表示された焦点深度が深い電子映像を両眼立体視できるようになったので、本ディスプレイはウェアブルコンピューター用ディスプレイ、複合現実感用シースルーHMD (head mounted display) へ適用できると考えられる。

今後は、本ディスプレイの小型化、ならびにフルカラー化の改良を行う予定である。

最後に、本研究のご指導をいただきました、大阪市立大学工学部電気工学科志水英二教授に深く感謝します。

文 献

- 1) 畑田豊彦：“疲れない立体ディスプレイを探る”，日経エレクトロニクス，444 (1988) 205-223.
- 2) 田村秀行，大田友一：“複合現実感”，映像情報メディア学会誌，52，(1998) 266-272.
- 3) 鈴木達郎：応用光学I (朝倉書店，1952) pp. 165-176.
- 4) 久保田広，浮田祐吉，會田軍太夫：光学技術ハンドブック (朝倉書店，1990) pp. 732-736.
- 5) 辻内順平：ホログラフィー (裳華房，1997) pp. 295-331.
- 6) 安東孝久，松本敏昭，志水英二：“ホログラフィック光学素子によるマクスウェル視を用いたシースルーディスプレイ”，映像情報メディア学会誌，54 (2000) 1466-1473.
- 7) 久保田敏弘：ホログラフィー入門 (朝倉書店，1997) pp. 40-43.

(2001年10月29日受理)