

ホログラム素子を用いた視差バリア方式反射型立体表示装置

西田 雅貴, 阪本 邦夫

島根大学総合理工学部 数理・情報システム学科

Parallax Barrier 3D Reflection Display using Holographic Optical Element

Masataka NISHIDA and Kunio SAKAMOTO

*Department of Mathematics and Computer Science,
Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University*

Abstract

The 3D reflection display system using LCD projector has superior characteristics, such as having a large screen with wide field of view. However conventional projection 3D display system has such disadvantage that the observers need to wear special glasses for viewing stereoscopic images. This paper describes the 3D reflection display system with a holographic screen. The holographic screen can avoid the problem of conventional system. The trial hologram records the parallax rays, which is generated by the slit, and its screen enables observers to view glasses-free 3D images. Moreover this system can solve the pseudoscopic problem when the holographic screen is appropriately designed.

1. ま え が き

近年、バーチャルリアリティの研究が盛んになり、医療、教育、設計・デザインなど様々な分野へ、3次元画像技術が応用されるようになってきた^{1)~3)}。メガネなどの補助器具を必要としない立体ディスプレイは、内外で研究開発が活発に行われており、左右映像を分離する仕組みとして、パララックスバリア方式やレンチキュラ方式をはじめ、回折格子⁴⁾⁵⁾や同等の機能を実現するホログラム光学素子^{6)~8)}を利用する方式など多様な方式が提案されている。筆者らは、ドライブコースのルート情報を実空間へ重畳表示する図1(a)のようなナビゲーションシステムや、指差し動作により選択した魚についての各種情報を、水槽中を遊泳する魚の位置に合わせて表示する図1(b)のようなシステムへの利用を目指し、立体映像表示装置やインタラクションについての研究^{9)~11)}を行っているが、図1に示した用途では、情報の表示位置は観察者から見てスクリーン後方となり、使用環境を考慮すると、映像投影装置はスクリーンに対して観察者と同じ空間に設置するため、反射型(フロント投写型)の立体表示装置が必要となる。

ホログラフィ技術を応用して立体表示を行う場合、ホログラム映像を利用すれば両眼視差、輻輳、焦点調節などの3次元知覚情報を備えた立体映像が得られるが、任意の映像表示を行うための動画ホログラフィの実現は、

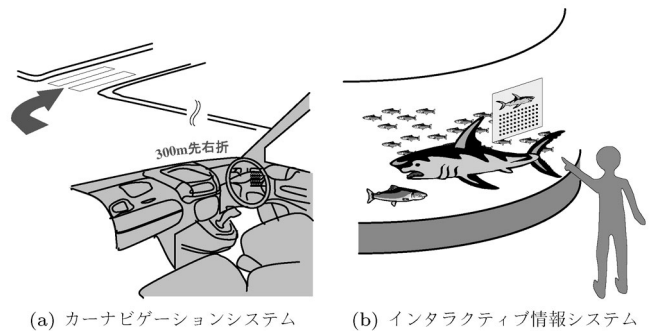


図 1 3D ワークスペースシステム

表 1 各種立体表示装置の特性

	視差数	多視点	表示方式	逆視防止
文献 4) の方式	32	×	画素分割	△
文献 5) の方式	4	×	画素分割	△
文献 6) の方式	4	×	多重投影	△
文献 7) の方式	2	×	多重投影	△
文献 8) の方式	2	○	画素分割	×
本提案方式	2	○	画素分割	○

大画面化など光学系の制約で現在のところ困難であり、両眼視差を利用するステレオ方式での実現が現実的である。表 1 に、これまでに提案されている代表的な表示装置の特性を示す。ステレオ方式での立体表示では、多視差・多視点の表示、高解像度・高画質の表示、カラー化、逆視の防止等の技術要件があるが、多視差表示と画質などのように両者の実現にはトレードオフの関係となるも

のも存在し, 使用用途に応じて実現機能を適宜選択する必要がある. 本研究では, 図 1 に示した用途で使用するため, 左右 2 視差の多視点表示, 逆視防止の機能を備え, フロント投写映像 1 画面を画素分割することで両眼立体視を実現する反射型のホログラムスクリーンを使用した立体表示を行うことを目的とした.

本論文では, まず 2 章において, 直視型やリアプロジェクション型など立体映像モニタ装置を構成する透過型の従来技術について簡単に説明し, 3 章において反射型立体表示の原理, 4 章では, 逆視防止の機能を備えた反射型ホログラムスクリーンの実現方法と, 映像表示装置の試作実験を行った結果について述べる.

2. 画素分割による両眼立体視

文献 6)7) のように, 複数台のプロジェクタ映像等を利用して高解像度の両眼立体視を実現するシステムも提案されているが, 本章では, 1 画面の映像を画素分割して両眼立体視を実現するスクリーン透過型のモニタ型表示装置を構成する技術について簡単に述べる.

2.1 パララックスバリア方式の原理

図 2 は遮光スリットにより視差映像が分離される原理を示したものである. パララックスバリア方式は図 2(a) に示すように, ストライプ状の左右の眼に対応する画像の前に配置したスリットを通して, この画像を分離して観察する方法である. このスリットの位置, 幅, ピッチはストライプ状の画像の幅によって変わる. 視差画像の水平画素ピッチを P_L , 観察者の眼間距離を E , 観察距離を Z_E とすると, パララックスバリアの幅 P_B と設置位置 Z_B は幾何学的に決定され, それぞれ $P_B = P_L E / (E + P_L)$, $Z_B = P_L Z_E / (E + P_L)$ と求められる. 図 2(a) は, ストライプ状の左右混成画像の前面にスリットを配置することで, 左右映像を分離し視差光束を生成する原理を示したものであるが, LCD のように照明用のバックライトを有する場合には, バックライト前面にスリットを配置することにより, 図 2(b) に示すように左右映像を分離することも可能である. この場合, 液晶セル (映像表示面) に対してはスリットの設置位置は後方となり, パララックスバリアの幅 P_B と設置間隔 Z_B は, それぞれ $P_B = P_L E / (E - P_L)$, $Z_B = P_L Z_E / E$ と求められる.

2.2 回折格子を利用した映像分離方式

画素分割により両眼立体視を実現する方式では, スリットやレンチキュラレンズ板などを使用する以外に, 回折格子やホログラム光学素子を使用して左右映像の分離を行うことができる. 文献 4)5) の方法では, 電子線描画装置を利用して作製した回折格子を LCD 等に直接貼付することにより, 左右映像の分離を行っている. しかし, 電子線描画装置は回路パターンの描画など半導体プロセスに利用されているもので, 基板サイズの制限, 大型化に伴う描画時間の増加などの問題があるため, 同様

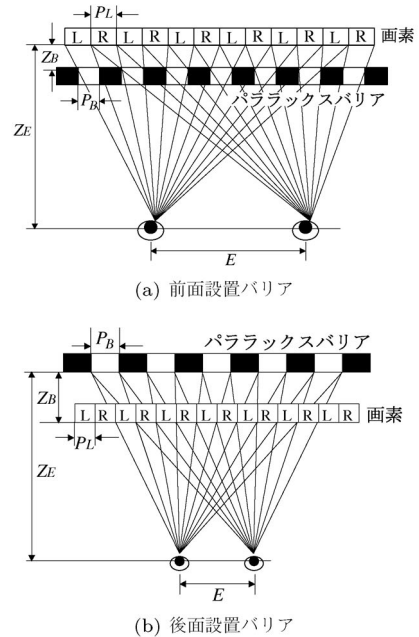


図 2 パララックスバリア方式立体ディスプレイ

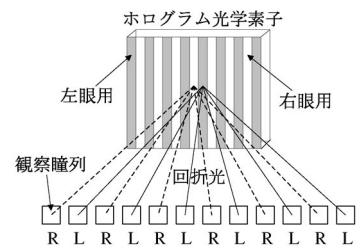


図 3 ホログラムスクリーン方式立体ディスプレイ

の機能をホログラフィックに作製する文献 8) の方法などが提案されている. このホログラム光学素子を利用する方法では, 図 3 に示すように, 左眼・右眼用にそれぞれ 1 対多の画素視点対応方式とし, 遮光マスクを施し, 観察瞳孔の位置に平面状の物体光源を配置して露光・記録を, 左眼・右眼用交互に行うことで, 所望のホログラムスクリーンを作製する. しかし, 実際には光学実験台上に, 複数の物体光源を配置することは難しい. 文献 8) では, 平行平板ミラーを配置して, 物体光源の鏡映複焦点像を記録する方法が提案されているが, 1 回の露光記録では, 左右の眼間距離に等しい幅のホログラムしか作製することができないため, 記録材料の大きさに応じて複数回の露光プロセスが必要となる. また, 文献 8) の方式および文献 4)5) の方式を多視点化した場合は, 従来の 2 眼式または多眼式のパララックスバリア方式やレンチキュラレンズ方式と同様に, 観察者の視点位置によっては, 左 (右) 眼用画像を右 (左) 眼で観察する可能性があるため, 左眼と右眼の映像が入れ替わる「逆視」の問題が発生する. 本論文では, この逆視問題を解決したホログラムスクリーン作製方法についても提案するが, 詳細は 4 章で述べる.

3. 反射型立体映像システム

2章では、透過型ディスプレイの左右映像分離の基本原理を説明したが、本章では、偏光子スリットを利用した反射型ディスプレイと、それと同等の機能を有するホログラムスクリーンの作製方法について述べる。

3.1 一方向透過性遮光バリアの構成

通常、図2(a)に示すように前面に配置されるパララックスバリアは、光の通過を遮断する遮光バリアが用いられるが、視差映像の投影を行うフロント投写システムの場合、スクリーンへ投影される映像(光)は透過し、スクリーンで反射し観察者の眼に届く映像(光)は、視差分離を行うため適切に遮光されなければならない。そこで、偏光の方向により光の透過、不透過の選択性を有する偏光子を利用してパララックスバリアを構成する。図4は、偏光板による光の透過、不透過の原理を示したものである。LCDに装着された偏光子を通過する際に、一定方向のみに振動する光(直線偏光)が透過しているため、液晶プロジェクタにより投影される映像は、偏光特性を有している。このような直線偏光の光が再び偏光板に入射すると、偏光軸が平行な場合は、図4(a)に示すように光は透過し、偏光軸が直交している場合は、図4(b)に示すように光は透過できない。したがって、スクリーンへ投影する映像は、偏光軸を平行にしてパララックスバリアを透過させ、スクリーンの反射光は、偏光軸を直交させることにより、パララックスバリアにより遮光することができるようになる。

スクリーンへの投影光は偏光子を通過させ、反射光を遮光するためには、スクリーンの入射光、反射光で偏光方向を90°回転させる必要がある。そこで、円偏光がミラーなどの反射面で右(左)円偏光が左(右)円偏光に変化する特性を利用する。図5は、直線偏光の偏光方向を90°回転させる原理を示したものである。図5において、1/4波長板は直線偏光を円偏光に、円偏光を直線偏光に変化させることができる。円偏光の光は反射面で偏光の回転が逆向きになるため、直線偏光の光を1/4波長板に入射させ円偏光に変換して反射板で反射すると、反射面で反射された円偏光は1/4波長板で再び直線偏光に変換されるが、入射光と反射光の偏光方向は直交する。このため、偏光板を透過した直線偏光を1/4波長板に入射させ反射板で反射させると、反射光は偏光板により遮断される。このように直線偏光と円偏光の特性を利用すると、図6に示すように、スクリーンへ投影する映像の光は透過し、スクリーンで反射された光は遮断できる。一方向透過性の遮光バリアを偏光子を用いて実現でき、投影された視差映像の分離機能を備えた反射スクリーンを構成することができる。

このような一方向透過性遮光バリアを利用することにより、偏光を利用して視差映像投写、左右映像分離が可

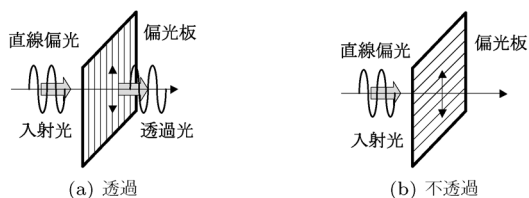


図4 偏光板を用いた遮光バリア

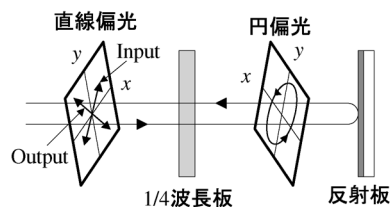


図5 反射板による偏光方向の回転

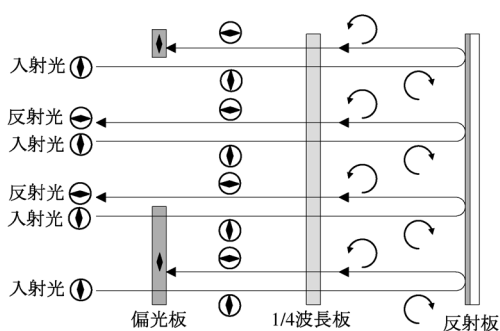


図6 偏光パララックスバリアの光学特性

能なため、スクリーンへのフロント投写方式でも、メガネなしで立体映像を観察することが可能になる。しかし、リア投写方式の実現方法に比べ、偏光板、1/4波長板など複数の光学素子を利用する必要がある。左右に分離された視差光束が生成できれば両眼立体視を行うことが可能であるため、同等の機能をホログラム光学素子により実現する。ホログラムを利用した場合には、ホログラム記録面のみにスリット部分を通過する光束を生成できるため、スクリーン部分を非常に薄くコンパクトにできるとともに、ホログラム自体がほぼ透明であるため容易にシースルー表示も実現可能である。

3.2 ホログラムを用いた反射型スクリーン

文献6)7)のように、複数台のプロジェクタ映像等を利用する方式では、透過型スクリーンの記録光学系において、参照光の入射方向を変更するだけで、反射型のホログラムスクリーンを容易に作製できる。しかし画素分割方式では、ホログラムスクリーンの作製には様々な方法が考えられ、本論文ではスリットにより生成される光束を記録する方法を採用した。作製方法は異なるが、文献8)と同等の左右映像の分離機能を有するホログラムスクリーンを、本作製方法によれば1回の露光・記録プロセスにより作製することができる。

ホログラムを利用して左右視差分離を行うスクリーン

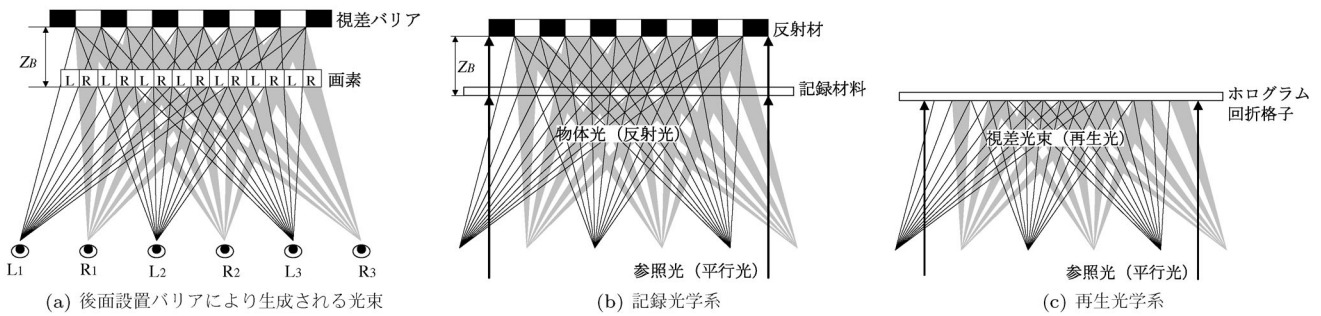


図 7 反射型立体表示装置とホログラムスクリーンの光学系

を作製する場合、ホログラムスクリーン上へ映像画素の情報投影されるため、ホログラムの設置位置を図 2 に示した原理図の画素位置とする。ホログラムの設置位置となる画素位置を基準に考えると、ホログラムにより再現すべき視差光束は、図 2(a), (b) いずれでも同一であるが、反射型のホログラムスクリーンを作製する場合は、図 2(b) に示した後面設置の原理を適用するほうが、ホログラム記録用光学系を構成する上で、作製作業が簡便となる。図 7 は、図 2(b) に示した後面設置の原理を適用した、ホログラムの記録・再生光学系を示したものである。図 7(a) に示すような、後面設置の遮光バリアにより生成される視差光束と同一の光束をホログラムにより生成するため、図 7(b) に示すように、画素位置にホログラム記録材料を配置し、遮光バリアの開口径と同一のスリット幅、間隔で、反射材を記録材料の後方 Z_B の位置に配置する。ホログラムスクリーンを反射再生型とするため、図 7(b) に示す方向から平行光を照射すると、この平行光がホログラム記録時の参照光になるとともに、反射材により生成された反射光が物体光（所望の視差光束）となり、ホログラム記録面上で干渉するため、物体光と参照光により生じる干渉縞をホログラムとして記録する。記録材料の露光（ホログラム記録）、現像・漂白処理の後、図 7(c) に示すように、再び同一位置に作製したホログラムを配置し平行光を照射すると、図 7(a) に示した視差光束と同一の光束が、ホログラムにより再現される。

4. 逆視のない反射型立体表示装置

4.1 逆視防止を実現する反射型スクリーン

2 眼式の多視点立体表示では、眼間距離 E ごとに左眼用、右眼用画像の観察位置が交互に現れるため、「逆視」が生じる。この逆視の問題を解決する方法として、パララックスバリアにより 3 眼式の立体表示を行い、このうち 1 つの観察位置で何も映像が観察されないように、左眼・右眼の画素対の間に黒画素を設けることで、正立体視領域のみ構成する方法や、ヘッドトラッキング機能を利用して、逆視領域では左右の映像を逆に表示することで、逆視を防止する方法が用いられていた³⁾。筆者ら

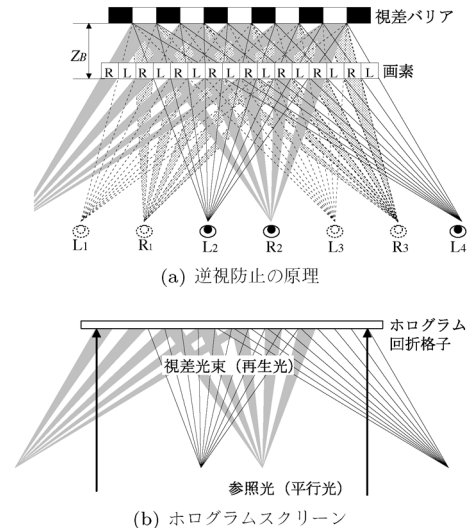


図 8 逆視領域のない反射型立体表示装置

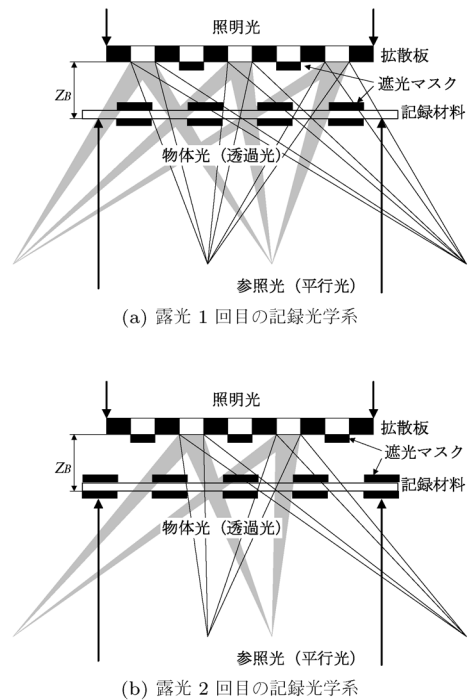


図 9 ホログラムスクリーンの記録作製

も、2 眼式立体表示と同等の解像度で多人数鑑賞を実現するため、偏光子を利用してスリットを通過する視差光

束を制御することにより、逆視を防止する方法を提案した¹⁴⁾。図7(a)に示す2眼式立体表示において、左(右)眼の映像観察位置が1つおきに可視領域と不可視領域が入れ替わるように、 $L(R)_1$, $L(R)_3$ を不可視領域に設定すれば、図8(a)に示すように、左(右)眼用画像を右(左)眼で観察するが生じないため、逆視を防止することができる。両眼立体視による立体映像の観察には、左右に分離された視差光束が得られれば良いため、ホログラムで再現する光束を所望の特性が得られるように設計して選択的に記録できれば、3章で作製したものと見た目は変わらないが、逆視防止の機能を有するホログラムスクリーンを作製できる。

立体映像を逆視を生じることなく観察するためには、図8(a)に示すような視差光束をホログラムに記録し、図8(b)に示すような視差光束をホログラムにより再現すればよい。このような特性のホログラムスクリーンを作製するために、図9に示すようなホログラム記録光学系を用いて、ホログラム記録材料にマスクによる遮光処理を施し、2回に分けて露光作業を行う。図9(a)に示すように、拡散板の開口部が交互に遮光されるように遮光マスクを施し、拡散板により生じる視差光束を選択的に制御する。この視差光束をホログラム面上の適切な位置に記録するため、ホログラム面上にもマスクにより遮光処理を施す。なお、ホログラム記録材料には、拡散板側から入射する物体光(透過視差光束)とともに、背面より参照光も入射するため、記録材料の両面に遮光マスクを施す必要がある。なお、ホログラム記録材料面にも遮光マスクが施されるため、視差光束の生成には、図7(b)に示したような反射板ではなく拡散板を使用し、背面から照明することで拡散板を透過した光束を利用する。図9(a)に示した遮光マスクの配置でホログラム記録を行った後、図9(b)に示すようにマスクの配置を変更して、記録材料の異なる位置に物体光(視差光束)を記録するため2回目の露光を行う。適切にマスクを施し、2回に分けて露光を行い、現像・漂白処理の後、再び同一位置に作製したホログラムを配置し平行光を照射すると、図8(a)に示した視差光束と同一の光束が、図8(b)に示すようにホログラムにより再現される。

4.2 ホログラムの再生光束を用いたスクリーンの作製

前節で述べたホログラムスクリーン作製方法により、逆視防止を実現する視差光束を生成する投影スクリーンを作製できるが、遮光マスクを3箇所精度良く配置する必要があるなど、作製する上で作業が煩雑になる。ホログラムスクリーンを作製するには、再生すべき視差光束が再現できていれば良いため、図9に示した拡散板により生成される光束を、ホログラムを用いて再現できれば、ホログラムにより再現される視差光束を、露光作業によりホログラム材料に記録することで、所望のホログラム

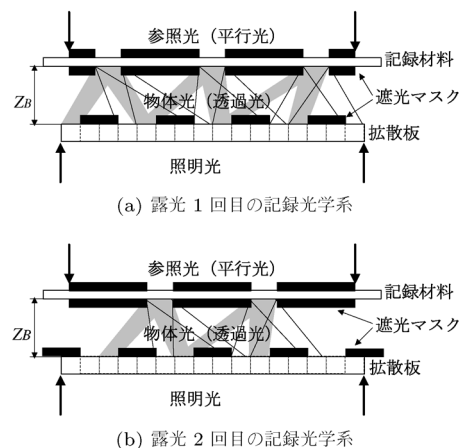


図10 マスターホログラムの記録作製

ラムスクリーンが作製できる。

図10は、拡散板により生成される視差光束と同等の光束を、ホログラムにより再現するための記録光学系を示したものである。ホログラム作製時には、記録材料にマスクによる遮光処理を施し、2回に分けて露光作業を行う。図10(a)に示すように、画素部分を通過する視差光束を、拡散板を利用して生成し、拡散板の開口部が交互に遮光されるように遮光マスクを施し、拡散板により生じる視差光束を選択的に制御する。この視差光束をホログラム面上の適切な位置に記録するため、ホログラム面上にもマスクにより遮光処理を施す。この記録する視差光束を反射型ホログラムとして再生するため、記録材料の両面に遮光マスクを施し、露光作業を行う。図10(a)に示した遮光マスクの配置でホログラム記録を行った後、図10(b)に示すようにマスクの配置を変更して、記録材料の異なる位置に物体光(視差光束)を記録するため2回目の露光を行う。

2回の露光を行った後、現像・漂白処理を行うと、図9に示した拡散板により生成される光束を再現するホログラムとなり、これをマスターホログラムとする。図11(a)に示すように、このマスターホログラムを再び同一位置に配置し、記録時とは逆方向からの照明となる共役参照光を照射すると、逆視防止の視差表示に利用できる視差光束が再現できる。このマスターホログラムを利用すると、図11(b)に示すように、ホログラム記録時に使用する参照光により、マスターホログラムから物体光となる視差光束が再生され、記録面上で干渉する物体光と参照光により生じる干渉縞をホログラムとして記録する。マスターホログラムの作製には、前節と同様に3箇所マスク処理を施す必要があるが、一度マスターホログラムの作製が完了すれば、図7(b)と同様にコンパクトな図11(b)に示すようなホログラム記録光学系で、露光作業が可能になり、図8(b)に示したホログラムスクリーンと同一のものを作製することができる。

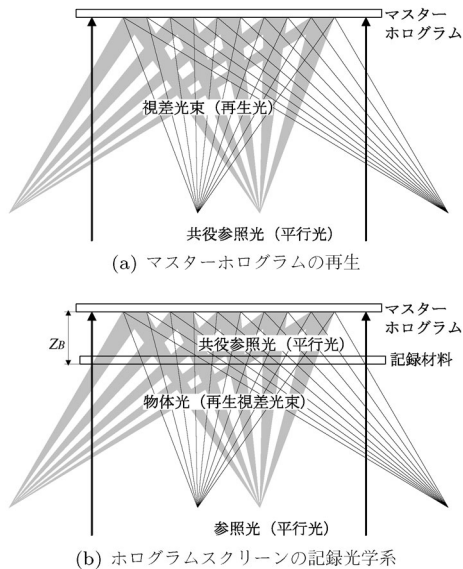


図 11 マスターホログラムを用いた記録作製

4.3 メガネ無し反射型立体映像表示装置の試作

今回試作した表示システムでは、眼間距離 E を 65mm と仮定し、画像投影部のストライプ幅を $P_L = 2.5(\text{mm})$ 、パララックスバリアのストライプ幅を $P_B = 2.6(\text{mm})$ と設定した場合に生成される視差光束を、ホログラムに記録し、投影用のホログラムスクリーンとして使用した。ホログラムの記録材料には、銀塩系感光材料である PFG-01 を使用し、波長 650nm の赤色半導体レーザを使用して記録を行った。記録時の光学系により、ホログラムスクリーンは反射型ホログラムとなっており、照明により記録時のレーザと同波長の視差光束が生成されるため、観察映像は赤色のモノクロ映像となる*。試作では、 4×5 インチ大のホログラム乾板を使用したため、画素に対応する要素ホログラム数は縦 $40 \times$ 横 50 の計 200 個である。また、記録時にホログラム記録材料と視差光束生成部（後面遮光バリア設置位置）との間隔 Z_B を 10mm としたため、観察距離 Z_E は 260mm となっている。

このホログラムスクリーンへストライプ状の左右混成視差画像を投影すると、図 12 に示すように、左右両眼へ映像が分離され、各視点位置において視差画像が観察できる。これら視差画像を両眼で観察することにより、両眼視差を利用して立体視を行うことができるため、スクリーンに投影表示された立体映像をメガネなしで観察することができる。また、使用したホログラム記録材料は、現像・漂白処理の影響で少し白濁するため、試作したスクリーンはガラスのように透明ではないが、図 12 に示すように、スクリーン後方の実空間映像も観察でき、シースルー表示可能な映像システムも構築できることが

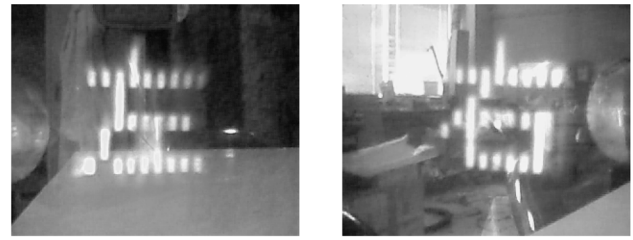


図 12 ホログラムスクリーンにより分離された映像

確認できた。

5. む す び

フロント投写型の立体映像表示を実現するため、ホログラムスクリーンを利用した反射型 3D ディスプレイの試作について述べた。本システムは、投影光学系を使用して視差映像をスクリーンへ投影する方式であるため、スクリーンを大きくすることで広視野を実現でき、反射型であるため壁面へスクリーンの設置が可能など、省スペースでも臨場感を伴った立体映像空間の提示が可能であると考えられる。表示立体映像は左右 2 視差の多視点表示とし、スリットにより生成される光束を記録する方式を考案した。本方式によれば、従来方式の作製方法⁸⁾とは異なり、作製するスクリーンの大きさに関わらず、同等の左右分離機能を有するホログラムスクリーンを 1 回の露光記録作業で作製することができる。また、外観は変わらないが、逆視防止機能を有する特性の異なるスクリーンを作製することもでき、逆視の生じない立体映像表示も可能なことを確認した。今回の試作では、乳剤面を持つ記録材料を使用して、写真撮影法によりホログラムの作製を行っているため、現像・漂白処理の影響でスクリーンには若干の白濁が見られるが、シースルー表示を実現できることも確認した。ガラスのように透明なホログラムの作製には、記録材料の選定、転写方式など写真撮影によらないホログラムの作製、外界の透過光と投写映像の反射光の光量比設計のための回折効率の調整などが必要である。今後はホログラムスクリーンの大型化、映像スクリーンで提示された仮想空間内のオブジェクトへの操作の実現などの 3D ワークスペースシステムの機能拡張、スクリーンの多面設置による仮想空間の構築などについて検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（課題番号 17700115）、独立行政法人科学技術振興機構「平成 17 年度実用化可能性試験」の補助を受けて行われたものであり、ここに関係各位に謝意を表する。

* 赤色以外に青および緑の 3 波長のレーザ光を使用し、パンクロマチックの記録材料 PFG-03C を用いて、同じ光学系でホログラムを記録すれば、同様の原理でフルカラー表示が可能である。

〔参 考 文 献〕

- 1) 大越孝敬：“三次元画像工学”，朝倉書店（1991）
- 2) 泉武博監修：“3次元映像の基礎”，オーム社（1995）
- 3) 谷千束編著：“高臨場感ディスプレイ”，共立出版（2001）
- 4) J. H. Kulick：“ICVision: a VLSI-based diffractive display for real-time display of holographic stereograms”, SPIE proc. **2176**, pp.2-11 (1994)
- 5) T. Toda：“3D video system using grating image”, SPIE proc. **2406**, pp.191-198 (1995)
- 6) C. Newswanger：“Real time autostereoscopic displays using holographic diffusers”, U.S.Patent **4799739**, Jan. 24, 1989
- 7) 北川哲也：“レインボーホログラフィック光学素子を用いたカラー立体映像システムの試作”，映情学誌, **54**, 3, pp.417 - 419 (2000)
- 8) 魏臻：“多焦点ホログラムによる交互連続視点ステレオディスプレイ”，3次元画像コンファレンス 2001, pp.133 - 136 (2001)
- 9) 阪本邦夫, 木美和：“立体映像へのインタラクションのための3次元位置計測の一手法”，映情学誌, **57**, 9, pp.1152 - 1154 (2003)
- 10) 阪本邦夫, 木村理恵子：“偏光バララックスバリア方式透過型立体ディスプレイ”，映情学誌, **59**, 2, pp.296 - 301 (2005)
- 11) 阪本邦夫, 木村理恵子：“逆視領域の無いメガネなし立体ディスプレイ”，映情学誌, **59**, 8, pp.1199 - 1203 (2005)

