

## 27 多機能集積型ホログラフィック光学素子を用いた 3 次元視線検出めがねの開発

瀧澤由佳子, 北川洋一, 松本哲也, 三浦久典

### 1 目的

視線検出は、人が「何処を見ているのか」を解析する技術であり、障がいをもつ人のためのヒューマンインタフェースや自動車の運転者の居眠り監視などへの応用についても研究されている。これらの視線検出技術を応用した研究において、カメラで撮像した目の画像より目の動きを解析する光学的な計測法を用いる場合が多い。このうち歩いたり、作業をしたりする人の目の動きを計測する場合、その人の視界の情報は既知でないために、目を撮像するための光学系とは別の視界を撮像するための光学系が必要となり、装置構成が大きくなることに課題がある。また、人の目にカメラを向けると、人の視界がカメラによって妨げられる可能性がある。

一方、ホログラフィック光学素子 (Holographic Optical Element 以下、HOE) は光の回折・干渉を利用した光学素子であり、素子に入射した波面を所望の波面に変換できる。我々は軽量・小型であり、シースルーなめがね型の視線検出システム (以下、視線検出めがね) の実現のために、HOE に反射型結像機能、透過型結像機能、背景光ノイズ低減機能を集積した、集積型 HOE を用いた撮像光学系を提案してきた<sup>1-3)</sup>。

本事業では、視線検出めがねのための集積型 HOE を作製し、人の黒目の中心位置を検出するための画像処理を開発して視線検出システムを開発した。

### 2 多機能集積型 HOE を用いた視線検出めがね

集積型 HOE を用いた視線検出めがねの光学系と集積型 HOE の構造を図 1 に示す。集積型 HOE は反射・結像機能をもつ反射型結像 HOE、透過・結像機能をもつ

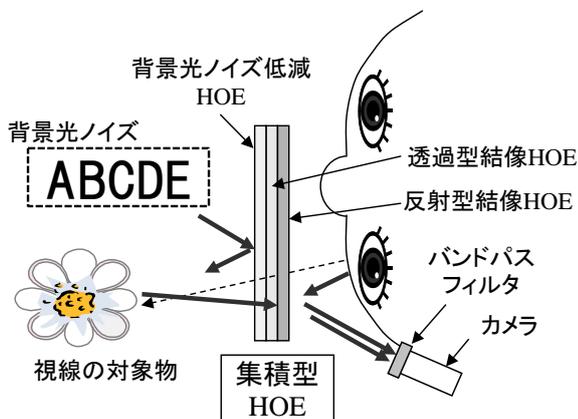


図 1 多機能集積型 HOE を用いた視線検出めがね

透過型結像 HOE、および背景光ノイズ低減機能をもつ HOE を積層した構造となっており、目と視線の対象物の像を図に示すように 1 つのカメラの撮像面に結像させる。すなわち、1 枚の画像に目と対象物の両方の像を得ることができる。

視線検出めがねが用いられるのは室内光等の白色光の環境下である。HOE を結像に用いた場合、波長によって結像位置が変わるため、結像機能をもつ HOE に白色光を入射させてもそのままでは像を得ることができない。このため、視線検出めがねの撮像光学系では作製に用いた光源の波長にあわせた狭帯域のバンドパスフィルタをカメラに取り付けて目からの像と視線の対象物の像を得られるようにしている。

背景光ノイズ低減機能は視線検出精度を向上させるために集積型 HOE に集積している。透過波長域にあるカメラの光軸方向からカメラに入射する光 (以下、背景光ノイズ) のうち、バンドパスフィルタの透過波長域の光が所望の光である目からの光と重畳する。これにより目の像と背景の像が重なってしまい視線検出精度が低下する。背景光ノイズ低減 HOE は背景光ノイズのうち、バンドパスフィルタの透過波長域の光を反射する機能を有しており、これにより背景光ノイズを低減させている。

本研究では、以上の 3 種類の機能をもつ集積型 HOE を作製し、これを搭載した撮像光学系により得られた画像を用いて黒目の位置を検出する画像処理を開発し、視線検出めがねを構築した。

### 3 集積型 HOE の作製と評価

#### 3.1 作製

集積型 HOE の作製光学系を図 2 に示す。図 2 中の記号は M: ミラー、MM: 可動ミラー、L: レンズ、OL: 対物レンズ、PH: ピンホール、SH: サンプルホルダー、BS: ビームスプリッターである。HOE を作製するレーザー光源の波長は 532nm であり、これをビームスプリッターにより 2 つに分け、可動ミラーにより透過型結像 HOE、反射型結像 HOE および背景光ノイズ低減 HOE を作製するための物体光と参照光の経路を切り替えた。これらの物体光と参照光の干渉縞をサンプルホルダーに固定したフォトポリマー ((株)ダイソー製、サイズ 40mm×40mm、厚さ 20 $\mu$ m) に記録して各 HOE を作製した。透過型結像 HOE の作製の際には図 2 中の物体光 1 と参照光 1 を用いた。これらを用いて作製され

る HOE は、参照光 1 と同様の光が HOE に入射するとその光を物体光が伝搬する方向である z 軸方向へ伝搬させることができる。すなわち、視線が捉えている対象物からの光が参照光 1 と同様であるとき、その光を z 軸上にあるカメラで捉えることができる。反射型結像 HOE の作製の際には物体光 2 と参照光 2 を用いた。参照光 2 は目からの光を想定している。物体光 2 も z 軸を伝搬する光である。従って、参照光 2 と同様の光が反射型 HOE に入射して物体光 2 の伝搬する方向にカメラがあれば、反射型 HOE によりカメラの撮像面に参照光 2 を捉えることができる。実際の視線検出がね用の HOE は、目と HOE との距離を 90 mm として作製した。背景光ノイズ低減 HOE の作製の際には図 2 中の物体光 3 と参照光 3 を用いた。

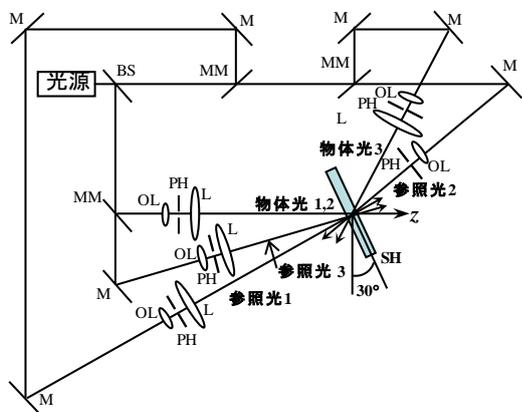


図 2 作製光学系

### 3.2 評価

作製した集積型 HOE によって撮像した画像の例を図 3 に示す。図 3 の場合、反射型結像 HOE により義眼(図 3(d))を結像させ、透過型結像 HOE により鳥の模型(図 3(c))を結像させた。つまり、鳥の模型を見ている人の目を撮像することを模した。また、図 3(a)は背景光ノイズ低減 HOE が無い場合であり、(b)は背景光ノイズ低減 HOE も集積した場合の撮像結果である。(a)の場合、背景にあるアルファベットの文字列「ABCDEFG」が白目の下部に重畳してノイズとなっているが、(b)の場合はこのノイズを低減できていることがわかる。

次に、目の像を撮像するための反射型結像 HOE の結像性能の評価を行った。結像素子の結像性能を表す指標である MTF (Modulation Transfer Function) を実験により求めた。MTF の測定方法のために、まず、ラインパターンの空間周波数が既知である USAF テストチャートを対象として白色光環境下で反射型 HOE を用いて撮像した。そして、画像中のラインパターンを横切る 1 ライン上の画像の階調値を切り出し、これをフーリエ変換して画像のコントラストを求め、MTF を算出した。測定した結果を図 4 に示す。図 4 より、水平方

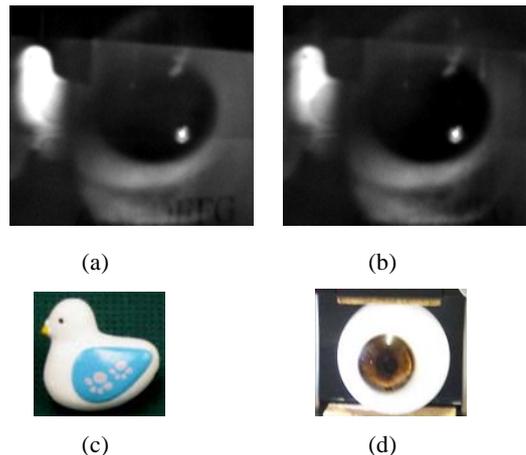


図 3 集積型 HOE による撮像  
(a) 背景光ノイズ低減 HOE なしの場合  
(b) 背景光ノイズ低減 HOE がある場合  
(c) 視線の対象物  
(d) 義眼

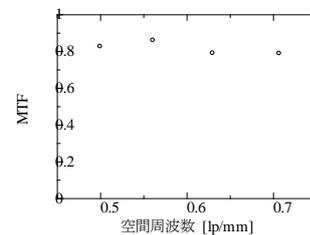
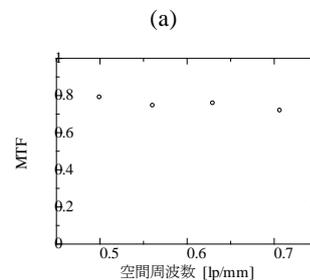
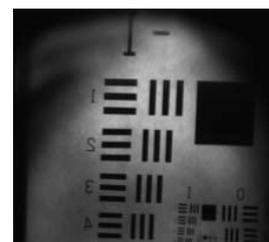


図 4 反射型結像 HOE の MTF の測定結果  
(a) USAF テストチャートを撮像したときの画像、  
(b) 水平方向の MTF、(c) 垂直方向の MTF

向および垂直方向の MTF は 0.7 lp/mm において 0.7 となっている。人の黒目の直径はおよそ 10mm であるため、反射型結像 HOE の結像性能は人の目を撮像するのに十分であることがわかる。

#### 4 視線検出

作製した反射型結像 HOE を用いた撮像光学系を構築し、これを用いた視線検出めがねを図 5(a)に示す。撮像光学系には CCD (ソニー(株)、1/3 inch EX-VIEW CCD、有効画素数 510×492) を搭載したカメラ((株)ケイヨーテクノ、KPC-EX500BA) を用いた。また、中心波長 540nm、半値全幅が 10nm のバンドパスフィルタをカメラレンズの前に取り付けて用いた。また、通常の室内光の環境下でこの撮像光学系により人の目を撮像した画像を図 5(b)(c)(d)に示す。(b)は正面前方を見ているときであり、(c)は左を見ているとき、(d)は右を見ているときである。これらの画像より人の目が撮像できていることがわかる。

本研究では、目の画像から黒目の中心位置を検出するための画像処理についても構築した。黒目の中心位置を検出するための画像処理は次のとおりである。まず、黒目の領域を抽出するため、しきい値によって画像の階調値を 2 値に分別する 2 値化処理を行う。黒目の存在する画素は他と比べて階調値が小さく、ほぼ抽出できるが、若干の照明むらや光沢等のある部分は抽出が困難である。そこで、局所領域のオープニング・クロージング処理を行うモルフォロジーフィルタ演算を行い、黒目の領域を抽出する。そして、抽出した領域の重心を求め、黒目の中心位置として検出する。なお、これらの一連の処理を画像処理ユニット ((株)ルネサス北日本セミコンダクタ製、SVP-330) に構築した。図 5(b)(c)および(d)中の×印は構築した画像処理ユニットによって検出された黒目の中心位置を示し、数字は画像中の位置座標を示している。また、一回の目の中心位置の検出に要する処理時間は 0.17~0.33 秒であった。これらの結果から、開発した画像処理により視線の方向に伴って変化する黒目の中心位置を検出できることを確認した。今後、既知の位置にある視線の対象物を見ているときの目の画像についても同様の処理を行い、検出の分解能を評価する予定である。

#### 5 結 論

本研究では、目の像と視線の対象の像を同時に結像し、視線検出精度に影響を及ぼす背景光ノイズ低減する機能をもつ集積型 HOE を開発した。そして、HOE を用いた視線検出めがねのための撮像光学系を構築した。さらに、黒目の中心位置を検出する画像処理を開発して視線検出めがねを作製した。本めがねを用いて撮像した人の目の画像より、黒目の中心位置が検出できることを確認した。今後、視線検出の分解能の評価や環境光の変動への対策の検討を行い、福祉分野のインタフェースの開発を目指す。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 5 視線検出めがねと黒目の中心位置の検出例  
(a)視線検出めがね、(b)正面前方を見ているとき、  
(c)左を見ているとき、(d)右を見ているとき  
反射型 HOE によって結像された像の位置は画像中で左右反転する。

#### 謝 辞

本研究は(独)科学技術振興機構 研究成果最適展開支援事業により実施しました。

共同研究機関の(株)共和電子製作所、神戸大学大学院システム情報学研究科的場研究室の関係各位に深く感謝いたします。

#### 参 考 文 献

- [1] M. Zhou, Y. Kitagawa, O. Matoba, Y. Takizawa, T. Matsumoto, H. Ueda, A. Mizuno, and N. Kosaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 48, 09LE04-1-4, (2009).
- [2] M. Zhou, O. Matoba, Y. Kitagawa, Y. Takizawa, T. Matsumoto, H. Ueda, A. Mizuno, and N. Kosaka, *Appl. Opt.*, 49, 3780-3785 (2010).
- [3] Y. Takizawa, Y. Kitagawa, T. Matsumoto, A. Mizuno, T. Sato, and O. Matoba, *Opt. Review*, 18, 187-190,(2011).

(文責 瀧澤由佳子)  
(校閲 松本 哲也)