

接眼型電子ホログラフィにおける視野の拡大と物体の奥行き調節

Enlargement of Visual Field and Control of z-Depth for Eyepiece Type Electro-Holography

ヤン チャンヨン† 坂本 雄児†
Hironobu Sakata Yuji Sakamoto

1. 研究背景

ホログラフィは光の干渉と回折を用いて立体的な記録と再生を可能とする技術である。古典的なホログラフィでは記録と再生にフィルムを用いるが、電子技術の発達とコンピュータの性能の向上により計算機合成ホログラムでのホログラム記録や空間光変調素子 (SLM: Spatial Light Modulator) でのホログラム表示が可能となった。特に SLM などの電子的な表示デバイスを用いたホログラム表示は電子ホログラフィと呼ばれ、近年注目されている3次元表示装置としての利用が期待されている。

2. 電子ホログラフィにおける視野と視域

ホログラムで再生できる像の最大の大きさである視野と再生像を観察できる視域はホログラムの回折角により決定される。また、ホログラムの回折角は記録材料のピッチの細かさによって決定されるが、現在の SLM のピッチの細かさは数 μm 以上と粗いため、視野と視域が大きく制限される。結果として、電子ホログラフィで大きな物体を広い範囲で観察できるようにするには、視野と視域を拡大する必要がある。視域と視野を拡大するためにフーリエレンズを用いた光学系を用いる研究 [1][2] がなされてきたが、視野と視域の拡大は十分ではなく、奥行きのある物体に対するの考慮がなされていなかった。本研究では、視域を制限する事で視野を、人間の目で集中できる限度と言われる 45 度まで拡大し、拡大された視野の中に奥行きのある物体を表現する手法を提案する。

3. 提案手法

電子ホログラフィにおいて視野の拡大を実現するために、2枚の凸レンズを用いた光学系を構成して再生像を拡大する。レンズを用いず SLM だけでホログラムを再生した場合、像の再生位置は観察者から見て液晶の奥側にできるので、観察者は SLM を観察用の窓として液晶の向こうを覗き込む事になる。1枚目のレンズを用いることで再生像の位置を実空間上の特定位置に移動できる [3]。実空間に移動された実像を、2枚目のレンズを用いて虚像として拡大表示する [4]。

3.1 光学系の構成

本研究で用いる光学系は、参照光の球面波光源、ホログラムを表示する SLM、実像を結ぶための対物レンズ L1、拡大するための接眼レンズ L2、ゼロ次光と共役像を除去するためのシングルサイドバンドフィルタ (SSF: Single Sideband Filter) で構成されている (図1)。2つのレンズの配置はケブラ式望遠鏡の配置にして、この光学系の作用を光の経路を辿って説明する。まず、参照光の光源から出た球面波は対物レンズ L1 により平行波となって SLM に入射する。SLM に表示されているホログラムが回折格子として作用し、入射した光を回折反射させる。反射された光は L1 によって実空間の特定位置 z_{RI} に実像 (RI: Real Image) を結ぶ。また、L1 から L1 の焦点距離だけ離れた位置に SSF を置く事で不要な共役像とゼロ

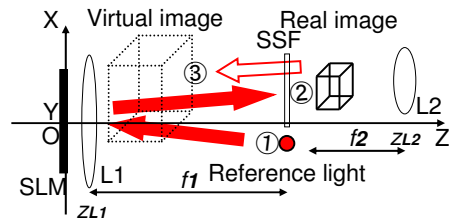
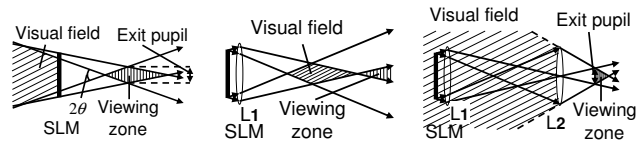


図1 光学系の構成



(a) SLMのみ (b) 対物レンズを追加 (c) 接眼レンズを追加
図2 視野と視域の変化

次光を遮断し、像の観察を容易にする。そして実像 RI を接眼レンズ L2 を用いて虚像 (VI: Virtual Image) へと拡大する。

3.2 視野と視域の変化

図2では電子ホログラフィに対物レンズと接眼レンズを導入する事で視野と視域が変化する様を示している。SLM のみの場合 (図2(a))、視域から見た SLM の反対側に視野が存在し、視野の最大幅を S_{image} とした場合、視域から見た視野の最大角である見掛視界 (afv : Apparent field of view) は回折角の2倍 (2θ) となる。対物レンズを入れる事で (図2(b))、視野を視域と SLM の間に移動させる事ができ、SLM の幅を S_{SLM} 、対物レンズの位置を z_{L1} 、対物レンズの焦点距離を f_{L1} とした場合、見掛視界はレンズにおける光線伝搬のマトリックスを用いて求める事ができる [5]。さらに接眼レンズを入れる (図2(c)) と再生像が虚像となるので、視野が視域から見た接眼レンズの反対側全体へと広がる。接眼レンズの位置を z_{L2} 、接眼レンズの焦点距離を f_{L2} とした場合の見掛視界も対物レンズと同様に光線伝搬のマトリックスを用いて求める事ができる。ただし、見掛視界を大きくするために $z_{L2} > z_{L1} + f_{L1}$ としている。SLM のみの光学系に対物レンズを配置した時と対物レンズと接眼レンズを配置した時の見掛視界の変化を次の式で表している。

$$afv_{SLM} = 2\theta \quad (1)$$

$$afv_{L1} = 2 \tan^{-1} \left(\tan \theta - \frac{S_{SLM} + 2z_{L1} \tan \theta}{2f_{L1}} \right) \quad (2)$$

$$afv_{L2} = 2 \tan^{-1} \left(\frac{f_{L2} + z_{L2} - z_{L1}}{f_{L2}} \tan \theta + \frac{f_{L1} + f_{L2} + z_{L2} - z_{L1}}{2f_{L1}f_{L2}} (S_{SLM} - 2z_{L1} \tan \theta) \right) \quad (3)$$

人間の目の特性を考慮すると、式 (3) で表される見掛視界を 45 度以内で可能な限り大きくすれば表示物体を大きく認識できる。見掛視界を大きくするには、式 (3) で f_{L1} が f_{L2} より十分長くなればよい。また、再生像を欠けることなく観察す

† 北海道大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

表1 再生パラメータ

SLM pixel pitch	8.1 x 8.1 [μm]
Width of SLM S_{SLM}	15.36 x 9.72 [mm]
Wavelength	632 [nm]
Objective lens focus f_{L1}	300 [mm]
Z of objective lens z_{L1}	35 [mm]
Eyepiece focus f_{L2}	50 [mm]
Z of eyepiece z_{L2}	410 [mm]



図3 見掛視界の評価

るためには射出瞳 (Exit pupil) に目を置いて観察する必要がある。射出瞳は、接眼レンズによる対物レンズの像で視野の中に存在し、観察者の目の虹彩より大きくないと再生像の全体を観察できない。

3.3 3次元物体の表示と歪みの補正

図2(c)の通り、再生像を置ける視野は接眼レンズから無限に広がっているため、奥行き方向での制限がなく、理論上では自由な z 座標に物体を再生できる。ただし、実際の再生像は接眼レンズによって非線形的に拡大された虚像であるため、遠すぎる物体は霞んで見えるだけでなく前後に引き伸ばされて歪んで見える。この歪みを補正した実像を用意する事で正しい形の再生像を得る事ができる。 z_{VI} の位置に像を再生させる場合の実像の z 座標 z_{RI} は

$$z_{RI} = z_{L2} - \frac{f_{L2}(z_{L2} - z_{VI})}{z_{L2} - z_{VI} + f_{L2}} \quad (4)$$

となるので、再生像の z_{RI} に合わせて補正された z_{RI} に実像を再生できるホログラムを作成すれば歪みのない再生像を得られる。

4. 実験結果

ここでは、3次元再生像の再生と歪み補正の実験結果と評価を示す。本実験におけるパラメータを表1に示す。

4.1 見掛視界の評価

図3は人間の目と同等の視野角とされる35[mm]フィルム換算画角50[mm]のレンズで撮影した再生像である。左端から右端まで像が見えている事から見掛視界が45度以上へと拡大されている事が確認できる。

4.2 歪み補正の評価

補正なしの場合は実像の z 座標 z_{RI} を等間隔に配置し、補正ありの場合は虚像の z 座標 z_{VI} が等間隔になるように z_{RI} を補正して配置した(表2、図4)。図5(a)は歪み補正を施していない状態の再生像で、図5(b)は歪み補正を施した再生像である。補正前には“4”が“3”より“5”に近い位置に見えていたが、補正後には“4”が“3”と“5”と中間に位置する事が確認できた。また、“4”の z 座標の変化により拡大比率も変化するので補正前には“5”と“4”の大きさがほぼ一緒に見えるが、補正後には“4”が“5”より大きくなっている。

4.3 奥行き表現の評価

図5に歪み補正を施す前と施した後の結果を示す。2つの結果は共に奥行きが十分表現されていた。カメラの焦点を最

表2 歪み補正用物体の再生位置 [mm]

Model	1	2	3	4	5
Normal z_{RI}	364.5	367.5	370.5	374	377
Normal z_{VI}	-95.5	126.5	222	281.5	313
Corrected z_{RI}	364.5	365.5	367	370	377
Corrected z_{VI}	-95	5	103	210	313

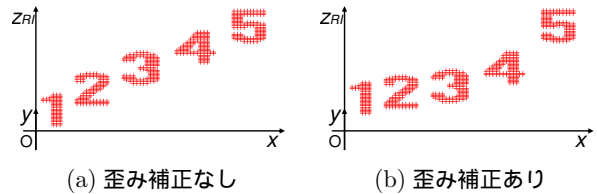


図4 再生モデルの補正

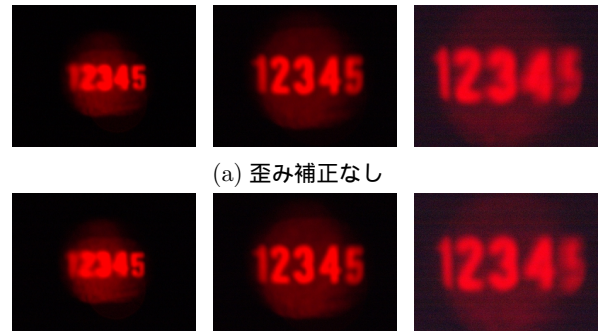


図5 光学再生と歪み補正

短にして撮影した結果(図5(左))では“5”の文字がくっきりと見え、焦点を約400[mm]移動させて撮影した結果(図5(右))では“1”の文字がくっきりと観察できた。また、焦点を最短から約200[mm]移動させた結果(図5(中央))では補正前の結果では“2”の文字がくっきりと見えていたが、補正後の結果では“3”の文字がくっきりと見えた。また、目視の場合、図5(中央)と同様に“1”から“5”までの全ての文字が読める程度にはくっきりと観察できた。

5. まとめ

本論文は電子ホログラフィにおける視野角の拡大の自由な奥行き表現を目的として、ケブラ式望遠鏡を応用した光学系を用いた拡大法を提案し、実験で検証した。本研究では見掛視界を目の限界と言われる45度まで拡大でき、接眼レンズから400[mm]以内の空間で物体像の奥行きを自由に調節できる事を確認した。本研究の一部は日本学術振興会科学研究補助金(課題番号23300032)を用いて行われた。

参考文献

- [1] Atsushi Katou, Yuji Sakamoto, “An electro holography using reflective LCD for enlarging visual field and viewing zone with the Fourier transform optical system in CGH”, SPIE Photonics WEST 2010, 7619-36 (2010)
- [2] 竹森民樹, “液晶パネルを用いた3次元表示 - 高速計算法 -”, Hodic 会報, Vol.17, No.3 (1997)
- [3] 坂本雄児, “3D ホロ TV の現状と展望”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol.34, Issue.31, pp.21-24 (2010)
- [4] 「光学のすすめ」編集委員会, “光学のすすめ”, オプトロニクス社 (1997)
- [5] 羽根一博, “光工学”, コロナ社 (2006)