

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 15 日現在

機関番号：24506

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24300041

研究課題名(和文) 離散結像光学素子における波動性の利用に関する研究

研究課題名(英文) Study on the use of the wave nature in the discrete imaging optical element

研究代表者

前川 聡 (Maekawa, Satoshi)

兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・非常勤研究員

研究者番号：60358893

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：素子面に垂直配置されたマイクロミラー面の非破壊角度計測については、青色レーザーを利用した反射角計測光学系を構築し、角度精度1分の計測が可能であることを確認した。波面合成については、後進波の領域を避け、2段結像による進行波領域において光学シミュレーションを実施したが、先鋭化は未確認となった。また、波面合成以外の高解像度化手法の検討を行ない、実測した点拡がり関数によりウィナーフィルタを作成することで事前補正画像を取得し像のボケを補正する手法を提案しその効果を確認した。さらにX線リソグラフィーによる高アスペクト比の光学素子を作成し、2回反射による結像を確認した。

研究成果の概要(英文)：For the nondestructive angle measurement of the micro-mirror surfaces which are arranged perpendicular to the element surface, a reflection angle measuring optical system using blue laser is constructed and it was confirmed that it is possible to measure the angular accuracy 1 minute. To improve resolution with wavefront synthesis, avoiding the region of the backward wave that has passed through DCRA once, it was carried out optical simulation in forward wave region that has passed through DCRA twice. However it has not been unconfirmed to sharpen the image forming. Also a study of the high-resolution method other than the wave-field synthesis is performed, and we propose a method for correction of blurred aerial image formed by a DCRA. This method is based on prior inverse filtering with a point-spread function. For the fabrication of DCRA, we have tried to use deep X-ray lithography due to synchrotron radiation.

研究分野：情報光学

キーワード：マイクロミラーアレイ 実像 2面コーナーリフレクタアレイ 位相 波面

1. 研究開始当初の背景

本来鏡の中に虚像として結像する鏡映像，すなわち面対称位置に結像する像を，空間に実像として結像させることができる結像光学素子2面コーナリフレクタアレイ(DCRA)が開発されている．面対称結像であるので，物体と素子面との距離に依らずに等倍結像し，無歪の三次元実像結像光学系となる．この性質により，視点を変えても定位が全く変化しない映像を空中に表示させることができ，映像でありながら高い実在感を与える事が可能となる。

DCRAは，離散的な単位光学素子によって光線を細かく分割し，幾何光学的にそれらを集めて結像させるものである．単位光学素子を小さくすると，幾何光学的には光線の広がりを抑えられるが，小さくしすぎると光の波動性によって回折が起こり，広がってしまう．そのため，結像点における波面は位相が揃わないため，解像度は光線の広がりをそのまま反映したものととなる。

2. 研究の目的

本研究では，以下のような目的を設定する．

(1)精密計測

DCRAの性能評価を行うための手法を確立する．結像性能によるマクロな評価ではなく，個別のマイクロミラー毎の形状精度，角度精度等について，非破壊計測が行えるようにする．

(2)高解像度化

波動性を積極的に利用し，結像点において波面を揃えることによって高解像度化を目指す．

(3)DCRAの微細化

より微細化したDCRAを高精度に作成する手法の開発を行う。

3. 研究の方法

(1)非破壊マイクロミラー精密計測のため，マイクロミラーに対する斜入射による計測手法の開発を行う。

(2)幾何光学的にのみ機能しているDCRAに対して，単位光学素子(一つのDCR)毎に光路長の角度依存性を制御することで，波面合成による高解像度化を試みる．

(3)波面合成を効果的なものとするため，開口を微細化したDCRAの製造手法の開発を行う。

4. 研究成果

(1)精密計測

素子面に垂直配置されたマイクロミラー面の角度計測については，回折の影響を受けにくい青色レーザーを利用した反射角計測光学系を構築した．絶対角を計測するには，正確な角度基準が必要となるため，相対角度計測を実施．DCRA素子面を基準面として，裏側と表側の相対角度を計測することとした。

これによってマイクロミラーの素子面に対する垂直からのずれ角度に対して，レーザーの反射角度の違いは4°となって現れる．実際の計測によって，角度精度1分の計測が可能であることを確認した。

(2)高解像度化

波面合成

位相変調による波面合成を光学シミュレーションソフト ASAP を用いて実施した．単位光学素子である各2面コーナリフレクタ個別に位相変調を行った結果，一般的な光学素子同様，点光源を回折限界に至る高解像度で結像可能であることを確認した．しかしながら，波面合成による結像は，一般的な回折光学素子と同様の特性をもち，点光源の移動に対しては本来存在しなかったはずの「光軸」に対する対称位置への結像となり，DCRA素子面に対する面対称位置への結像とはずれが生じてしまう。

また，高次回折光の影響を軽減するために，開口径の微細化を行うと，回折光による結像力が強くなり，結果として結像点の面対称位置からのずれが大きくなるため高解像度での面対称位置への結像範囲を広げることは困難であることがわかった．なお屈折率楕円体を用いたとしても，必要な屈折率変化を実現することはできなかった。

2段結像系

面対称結像を屈折で行うためには，屈折率-1のメタマテリアルが必要となるが，このとき結像側においては位相速度が-cとなる後退波となっていなければならない．そのため，1段結像での波面合成では通常の進行波を使う限り，点以外には面対称結像の高解像度化

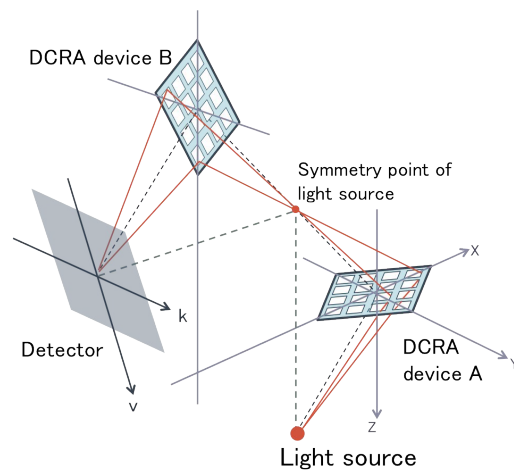


図1 2段結像系

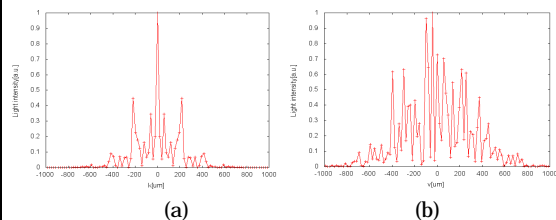


図2 結像強度分布 (a) k 方向、(b) v 方向

が不可能となる。一方、2 段結像を行った場合には、これが元に戻り、通常の進行波での結像が可能である。これは、波面合成での自然な高解像度化が可能であることを示唆する。そこで、同時高解像度結像範囲を広げるために、2 段結像での波面合成を試みた（図 1 参照）。

解析に用いる素子のリフレクタの個数は 10×10 個である。リフレクタの一辺は $150 \mu\text{m}$ 、厚さは $170 \mu\text{m}$ である。また、光源から DCRA 素子 A までの距離、素子 A から素子 B までの距離、素子 B から観測面までの距離はそれぞれ 50mm , 100mm , 50mm である。2 枚の DCRA は共に屈折率分布を設定して点光源の面対称位置で高解像度結像するようになっている。ASAP を用いてガウスビーム分解法による近似解析を行った結果を図 2 に示す。

この結果からは、先鋭化は認められなかった。現時点で原因は明確ではないが可能性としては以下が考えられる。ひとつは高次回折光の影響であり、設定された開口の大きさでは回折光の存在は無視できない。ただし、計算量の問題によって、これ以上開口を小さくすることが困難であったため、シミュレーション手法そのものの検討が必要である。また、用いた近似手法がガウスビーム分解法であるが、近似可能領域での計算であったかどうかを詳細に検討する必要がある。

波面合成以外の手法

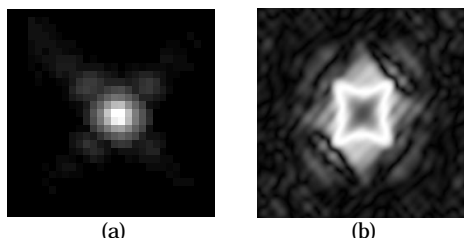


図 3 (a)PSF と(b)ウィナーフィルター



図 4 実験結果

波面合成以外の高解像度化手法の検討を行った。実測した点拡がり関数によりウィナーフィルターを作成することで事前補正画像を取得し像のボケを補正する手法を提案し

た。図 3 (a)に DCRA の PSF を実際に測定した結果を、(b)には、これを元に構成したウィナーフィルターを示す。図 4 (a)に原画像および(b)に DCRA による結像画像を示す。また、原画像に対して図 3 (b)のウィナーフィルターを用いて画像を生成し、負の値を 0 とした事前補正画像(c)およびこれを結像させた場合の画像を(d)に示す。このことから、ウィナーフィルターによる事前補正画像を用いることで、解像度がある程度改善できることが示された。

(3)DCRA の微細化

DCRA の微細化については、兵庫県立大学の放射光施設であるニュースバルを用いて X 線リソグラフィによる製作を試みた。X 線リソグラフィの場合、2 次元面での設計自由度が高く、たとえば波面を揃えるために開口選択による波面合成実験が簡単に実現できる。また、高アスペクト比の構造が作成できるため、DCRA においては開口率を上げて透過率を向上できる。

図 5 に X 線リソグラフィによって作成した DCRA の側壁顕微鏡写真および実際の結像の様子を示す。構造は貫通穴タイプであり、側壁にはアルミ反射膜を成膜している。反射面となる側壁の角度精度は、約 10° 分であった。目標精度の 1° 分を実現するには、さらなる改

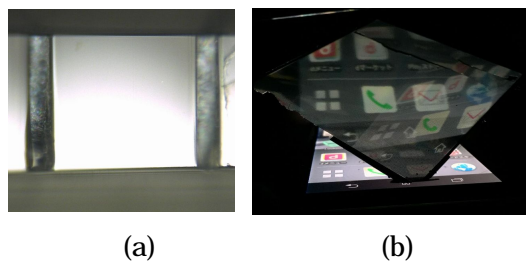


図 5 (a)側壁顕微鏡写真と(b)結像

善が必要である。

5 . 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

Akinobu Yamaguchi, Satoshi Maekawa, Tomohisa Yamane, Ikuo Okada, Yuichi Utsumi, Fabrication of a dihedral corner reflector array for a floating image, Transaction of Japan Institute of Electronics Packaging, 査読有, Vol.8, 2015, pp.23-28, DOI:10.5104/jiepeng.8.23

Hirotsugu Yamamoto and Shiro Suyama, Floating aerial LED signage based on aerial imaging by retro-reflection(AIRR), Optics Express, 査読有, Vol.22, 2014, pp.26919-26924, DOI:10.1364/OE.22.026919

Hirotsugu Yamamoto, Screen-free display formed using retro-reflector, SPIE Newsroom, 査読無, 2015, DOI:10.1117/2.1201502.005769

〔学会発表〕(計17件)

Daisuke Miyazaki, Yuuki Maeda, Shinji Onoda, Y Tokubo, S Murakami, R. Tamaki, T. Mukai, Aerial Three-Dimensional Display Based on Retro-Reflective Optical Imaging, 22nd International Display Workshop, 2015年12月9日~11日、大津プリンスホテル(滋賀県大津市)

斧田慎二、前田夕希、宮崎大介、向井孝彰、ウィナーフィルターにより取得した事前補正画像を用いた2面コーナーリフレクタアレイによる空中像のボケの補正、日本光学会年次講演会、2015年10月28日~30日、筑波大学東京キャンパス文京校舎(東京都文京区)

Daisuke Miyazaki, Shinji Onoda, Yuuki Maeda, Takaaki Mukai, Blurring Correction for Aerial Image Formed by Dihedral Corner Reflector Array, the 11th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2015年8月24日~28日、Busan(Korea)

Daisuke Miyazaki, Floating Volumetric Display Using Retroreflective Optical Elements, International Optical Seminar, 2015年5月18日~21日, St. Petersburg(Russia)

Tomohisa Yamane, Satoshi Maekawa, Yuichi Utsumi, Ikuo Okuda, Akinobu Yamaguchi, Fabrication and evaluation of Dihedral Corner Reflector Array for floating image manufactured by synchrotron radiation, Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference, 2015年4月14日~17日, 京都テルサ(京都府京都市)

藤原加奈、仁田功一、前川聡、的場修、コーナーリフレクタアレイによる多段結像の検討、第13回日本光学会情報フォトンクス研究グループ関西学生研究論文講演会、2015年3月9日、大阪市立大学学術情報総合センター本館(大阪府大阪市)

斧田慎二、前田夕希、宮崎大介、向井孝彰、2面コーナーリフレクタアレイによる空中像のボケの補正、第13回日本光学会情報フォトンクス研究グループ関西学生研究論文講演会、2015年3月9日、大阪市立大学学術情報総合センター本館(大阪府大阪市)

松元健、村上元規、山根朋久、前川聡、岡

田育夫、山口明啓、内海裕一、空中映像生成のための放射光を用いたミラーアレイデバイスの作製、合同シンポジウム2014-放射光とレーザーの協働による新産業創生-、2014年11月14日、神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

Yuka Tomiyama, Hirotsugu Yamamoto and Shiro Suyama, LED aerial-image size dependence on floating distance by Retro-Reflection, IMID 2014, 2014年8月26日~29日、Dague(韓国)

山本裕紹、空中三次元像形成技術への補償光学導入の可能性、すばる望遠鏡から顕微鏡へ次世代三次元補償光学系を、2014年8月20日~21日、国立天文台(東京都三鷹市)

Hirotsugu Yamamoto, Yuka Tomiyama and Siro Suyama, Directivity of floating LED formed with aerial imaging by retro-reflection (AIRR), Digital Holography & 3-D Imaging, 2014年7月13日~17日, Seattle(USA)

富山裕香、山本裕紹、陶山史朗、再帰反射による空中結像(AIRR)におけるLED空中像の大きさ、3次元画像コンファレンス2014、2014年7月10日~11日、東京大学(東京都文京区)

前川聡、空中映像光学素子の開発、先端技術セミナー2014、2014年3月11日、イーグル姫路(兵庫県姫路市)

前川聡、山根朋久、山口明啓、内海裕一、放射光微細加工技術を用いた空中映像生成用ミラーアレイデバイスの作製、光ビームプラットフォーム年度末報告会、2014年2月28日、TKP品川カンファレンスセンター(東京都品川区)

前川聡、放射光による空中映像光学素子の開発、NewSUBARU/立命館SRセンター合同シンポジウム2013、2013年11月1日、京都リサーチパーク(京都府京都市)

仁田功一、コーナーリフレクタアレイを用いた3次元結像、第1回情報フォトンクスシンポジウム、2013年6月11日、東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区)

堀川裕太、小倉拓也、陶山史朗、山本裕紹、直交ミラーアレイを用いた空中浮遊像観察時の目の調節と奥行き知覚、LED総合フォーラム2013 in 徳島、2013年4月27日、あわぎんホール(徳島県徳島市)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0件）

取得状況（計 0件）

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前川 聡 (MAEKAWA, Satoshi)
兵庫県立大学・高度産業科学技術研究所・
非常勤研究員
研究者番号：60358893

(2) 研究分担者

仁田 功一 (NITTA, Kouichi)
神戸大学・大学院システム情報学研究科・
准教授
研究者番号：20379340

陶山 史朗 (SUYAMA, Shirou)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス
研究部・教授
研究者番号：70457331

山本 裕紹 (YAMAMOTO, Hirotsugu)
宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00284315

宮崎 大介 (MIYAZAKI, Daisuke)
大阪市立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60264800