

平成21年 5月16日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18760047
 研究課題名(和文) 補償光学系の空間周波数領域でのエイリアジング除去による性能向上の検討
 研究課題名(英文) Studies on improvement of adaptive optics by use of aliasing filter in spatial frequency domain
 研究代表者
 服部 雅之 (HATTORI MASAYUKI)
 国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員
 研究者番号：20308208

研究成果の概要：空間周波数フィルターを導入してエイリアジング成分を除去して性能向上を図る手法を提案した。特に曲率型(ロジェ方式)の補償光学系で、周期性と等方性の良好な六方配置の素子開口とそれに合わせた空間周波数フィルターの利用、および、波面センサー内の像面へのフィルターの配置を提案し、計算機シミュレーションで像の分解能の向上を確認した。さらに、回折光学的な空間周波数帯域の分割との組み合わせを検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900,000	0	900,000
2007年度	300,000	0	300,000
2008年度	100,000	30,000	130,000
年度			
年度			
総計	1,300,000	30,000	1,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：補償光学、波面計測、波面補正、位相計測、結像系

1. 研究開始当初の背景

補償光学は、光学機器において入射光の波面に揺らぎがある場合にも、入射瞳面上で実時間補正を行い、分解能の低下を防ぐ装置であり、応用としては天体望遠鏡、眼底用カメラが知られる。本研究のきっかけとして着目したのは、補償光学系の波面センサーや可変形状鏡の素子が空間的に離散系をなしていることである。特に、入射波面揺らぎに対してサンプリング限界が必ずしも高く取られてはいない場合も多く、波面補正後の残差で空間領域での高周波の折り返しに起因する成分は無視できないほどに大きく、性能低下の原因のひとつとなっている可能性がある

ということである。研究を計画した当初、簡単な計算機シミュレーションを行ったところ、たとえば、すばる望遠鏡で用いられていたような36素子程度であっても、素子配置に周期性が存在する軸を見出して、適切に空間周波数フィルターをかければ、相当の性能改善が図りうるということが判明した。逆に言えば、補償光学系において空間周波数領域でのエイリアジングの影響は大きく、それらの抑制は今後必須となる可能性が高いと考えられた。補償光学系の性能の向上に伴い、初等的な幾何光学から波動理論や回折光学に基づいたより精密な考察が必要になってきているとも捉えられる。

研究開始時期、天文用途において多素子補償光学の高解像度を生かし、太陽系外の恒星を回る惑星の直接撮像の検討が、海外のグループ (Poyneer and Macintosh, JOSAA, 21, p. 810, 2004 等) でも始まりつつあった。それにおいては、中心にある恒星の周囲にある非常に暗い惑星を捕らえるため、中心の恒星からの散乱成分を抑えてコントラスト性能を高めることに殊に重点が置かれていた。それらの研究では、波面傾斜型であるシャックハルトマン型の波面センサーの前段にフーリエ変換型の空間フィルターを別置する手法を用いている。一方、研究代表者の検討していたものは曲率形の補償光学系を考慮し、ロジェ式の光学系にマスクを追加する簡素かつ自然に空間フィルターを構成するものであった。その上、曲率型の自由度を利用した波面センサーや波面変調器の素子配置が正方で無い場合のマスク形状の設計法も考慮されていること、さらには、マスクの工夫により、明るい物体でのコントラスト性能の向上とともに、比較的暗い物体での分解能の向上にも効果が確認出来ているなど、多くの新規性があった。そこで表題のエイリアジグ効果を中心に、補償光学系における回折光学的効果を総合的に研究することを計画し、研究代表者がすばる望遠鏡の補償光学系の開発に実地で携わる環境も生かしつつ、短期に重要な成果をえられるという期待に元づき、本研究は開始された。

2. 研究の目的

本研究の主な目的は、ロジェ式の曲率型補償光学系について、振動鏡にマスク重ねて挿入して波面センサー内に空間周波数フィルター (スペーシャルフィルター) を構成し、空間周波数領域でのエイリアジグ成分を抑圧して性能を向上する方法を検討する。その際、重要となるのは、離散開口を持つ波面センサーや波面変調器の素子配置に対応して効率の良いマスク形状を設計する方法である。このような指針で、補償光学系全体での波面補正の性能が向上できることを明らかにする。また、関連して発展的な課題が見つければ、それに関しても検討を加える。

3. 研究の方法

曲率型の補償光学系のエイリアジグ抑制による性能の向上に関して、計算機シミュレーションにより基礎的な事柄を検討した。最初に問題となるのは、シミュレーションの速度である。実用的な補償光学系の速度は、補正すべき揺らぎの速度に十分となるよう設計される。さらに、曲率型の場合は波面計測の速さを生かして精度向上を図るべく、一秒間に数千回もの波面誤差の計測と補正を繰り返す。そのため、回折光学的なシミュレ-

ーションを行うには相応の計算容量が必要となる。そのため、本研究では計算容量の大きいワークステーションを入手した。研究は、これに自作のシミュレーション用のソースコードを導入して行った。シミュレーション用のコードは、研究開始の時点までの予備的研究ですでに開発されたものを移植して使用した。次章では、得られた主な成果を報告するが、流れは以下になる。(1)比較的素子の少ない系 (36素子を想定)での検討 (2)比較的素子の多い系での検討

(100-200素子程度) (3)発展的な課題として、波面センサーの空間周波数分割の可能性である。次章では、それら研究の成果について順を追って説明する。

4. 研究成果

(1)少数の素子を持つ系での効果の検討

素子数の少ない曲率補償光学系で、特に、同心円状の素子配置を持つような系は、天文用途等で PSF の等方性を保ちつつ限られた素子数で波面補償の効果を得るべく、初期の多くの設計で取り入れられたと考えられる。すばる望遠鏡の 36 素子系もそのようになっており、本研究を始める一つのきっかけにもなった。そのような系では、素子配置の周期性を視覚的には見出しにくく、像や PSF を見てもエイリアジグの影響は直感的に想起しにくい。しかし本章では、回折光学的シミュレーションにより、空間フィルターの使用で性能改善の見込めることが示される。

まず、本研究で用いた同心円状素子配置による部分開口の分割を図 1(a) に示す。中心部分は二次反射鏡面の陰を想定している。それに対して各素子開口の重心分布を計算したものが図 1(b) であり、そこから周期性を抽出す

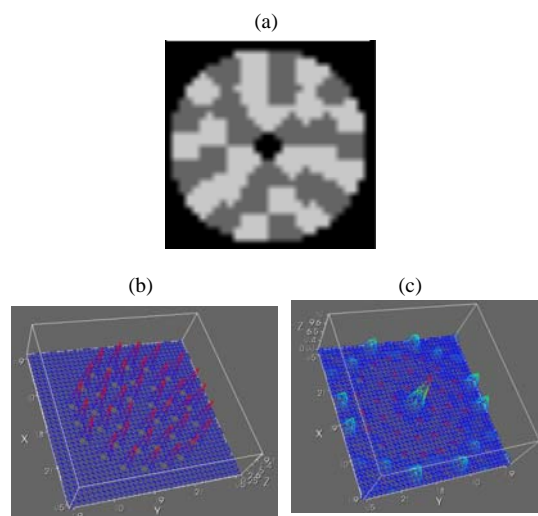


図 1、研究で用いた同心円状の素子配置の二色塗りわけ表示(a)と、その重心分布(b)と、パワースペクトル(c)

るため、二次元のフーリエパワースペクトルを求めたものが図 1(c)である。中心の0次成分の周りには周期成分から生じた中心対称な4組のスポットが見えるが、それらに対して半分の幅となるナイキスト標準化周波数領域の和集合が、今回の素子配置に対し回折光学での0次の領域に相当することになる。このような0次の領域として、エイリアジング抑制用の空間周波数フィルターに用いるマスクの形状を算出したものが、図 2の(a)である。このマスクの設計の元となった素子配置の周期性は肉眼では見出し難いが、両者整合性を視覚的に確認するため、図 2(b)(c)では図 1(c)のパワースペクトルに現れた4組の主要な周期成分から二組ずつを取り出して周期格子を再現し、図 1(a)の素子配置と重ねて比較したのが図 2の(b)および(c)である。このように、一見同心円状の素子配置であるが、方向を選べば実は周期格子と良く一致する場合のあることが分かる。

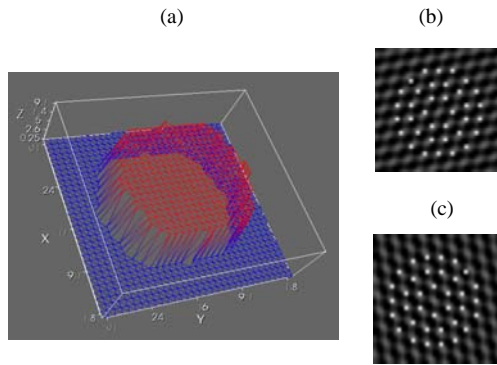


図 2、空間フィルタのマスクとして用いる0次領域の形状(a)と、主要な周期成分から構成したグリッドと素子中心配置との整合性(b)(c)

シミュレーションに用いたマスクの透過率分布には、さらに以下のような工夫を加えている。まず、マスクの外周の不透明部分には若干の透過率(5%-10%程度で調整を行う)を持たせた。さらに、遮光部と透過部分の境界は回折を防ぐために、透過率が滑らかにつながるようにした。(図 3 参照) これらは、波面傾斜が増えて光軸にずれが出てきた際にも波面センサーの安定性を確保し補償光学系の発散動作を防ぐのに効果的であること

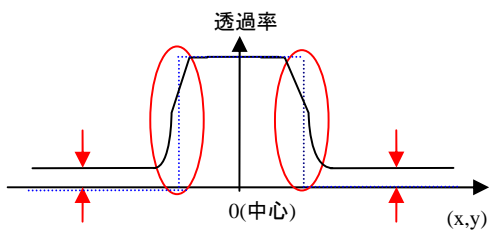


図 3、空間フィルタ用マスクの透過率の調整

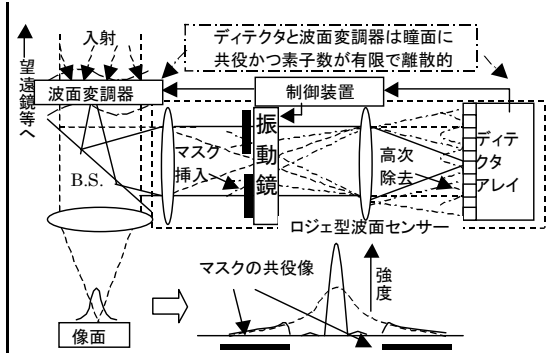


図 4、曲率型補償光学系と空間フィルターによる高次信号の除去

がわかった。これらを用いた補償光学系のシミュレーション(図 4 参照)を行い、性能の向上を調べた。入射波面には、コルモゴロフ則に従う大気乱流による波面揺らぎを想定した。その場合の PSF を比較したのが、図 5 で、空間周波数フィルターの挿入により、PSF 周囲のエイリアジングによる散乱成分が抑えられ、エアリーディスクの輪帯状の回折成分が見えてきていることがわかる。

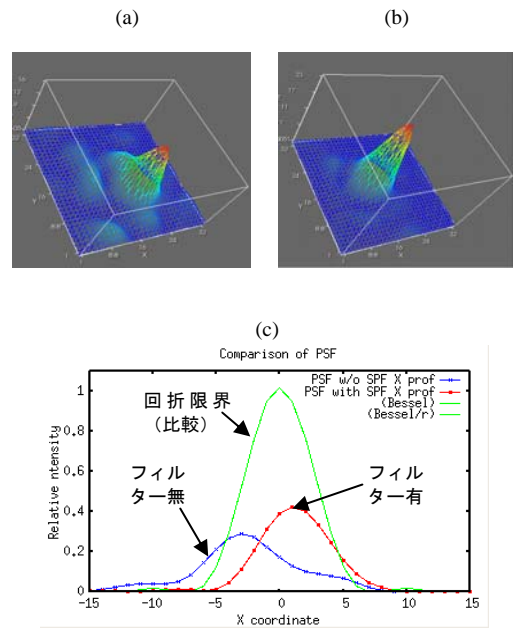


図 5、エイリアジングを抑圧した場合の PSF の向上 (a)空間周波数フィルター無しの場合に比べて、(b)では散乱成分が減少しエアリーパターンが見えてきている。

さらに、光源を明るくして光子ノイズを減らし高精度の波面補正を行った場合のシミュレーションの結果が図 6 であり、フィルターにより図 6(a)の断面図から、1次から2次の回折光成分付近で、およそ一桁弱ほど散乱成

分がおちてコントラストが向上していることがわかる。また、図 6 (b) の俯瞰図により、Dark Hole と呼ばれるマスク形状に相似な暗領域が確認できる。これらの結果により、少数素子の曲率光学系においても実はエイリアジングの問題が内在するが、それが同心円配置をもつ場合でも適切に設計された空間

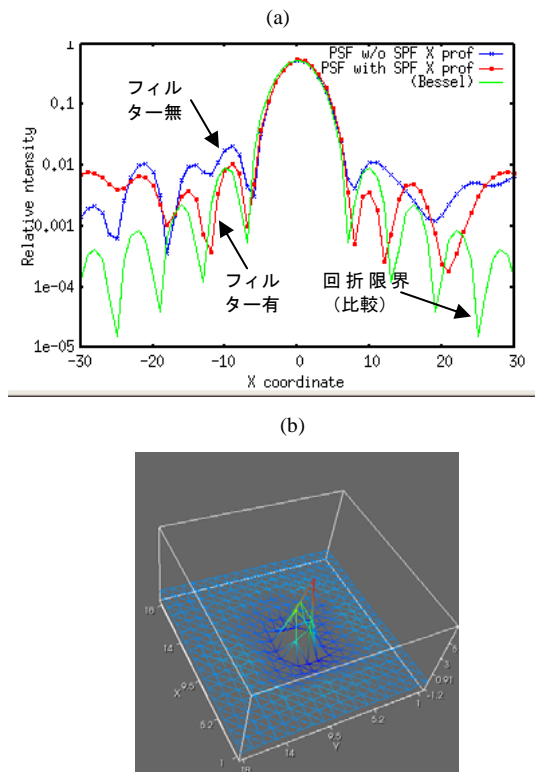


図 6、高精度の波面補正における効果 (a) PSF の断面図、および (b) 俯瞰図ではマスクの透過部と形状の相似した暗領域 (Dark hole) が確認できる

フィルターによってエイリアジング成分を抑圧することで、波面補正性能を向上する可能性が示された。

(2) 多素子系における検討

この研究における最初の問題は、エイリアジングの分離のため周期性の良い素子配置であり、一般的に六方格子状として、等方性と周期性の両立を図る。ただし、瞳外縁の影響があるため、外周部のみ独立に円周配置にし、隣接素子間で距離が同程度、特に、内部と六辺で滑らかに接続されるように密度を調整した。このように素子開口の中心を配置した後、小開口の形状はボロノイ分割により求めた。これは、ある i 番目の素子に対応する領域を、その他の全ての n 番目 ($n \neq i$) の素子中心と比べて i 番目の素子中心がもっとも近い点の集合とするものである。このような手法で素子配置に十分な整合性を持たせる

ことが分かった。今回用いた素子配置は図 7 の通りで、計算速度との兼ね合いもあり 132 素子となった。

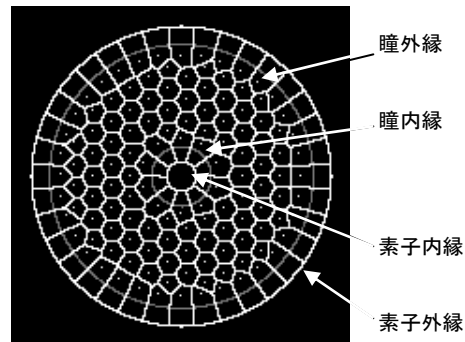


図 7、六方格子状の素子配置と素子開口の分割

素子配置に合わせて、エイリアジング防止用のマスクを作った。算出手順は図 8(a) の通り、周期性を抽出するために、素子開口の重心配置を二次元フーリエ変換してスペクトル分布を取り、各方向ごとに最低の空間周波数を示すスポットの組にナイキストの標本化限界を考えて中心からの二等分線を引き、それらに囲まれた 0 次領域を求めた。その結果を用いて作成したエイリアジング防止用のマスクが図 8(b) であり、正六角形状の 0 次透過領域に。前節と同様、外側のマスク部分にも 5% 程度の透過率を持たせた上、透過部分と透過率が滑らかに接続するように補正した。

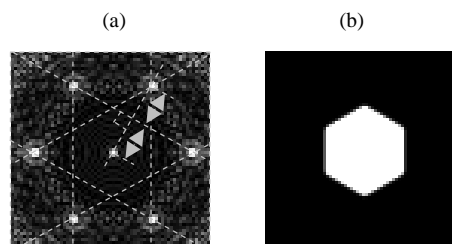


図 8、0 次領域の算出 (a) とマスク形状 (b)

このマスクおよび前述の素子配置を、前章で用いた計算機シミュレーターの素子数を拡張したものに導入して、空間フィルターと PSF 向上の関係を調べたところ、光源の明るい場合と暗い場合の概ね二通りの様相で効果が確認できた。比較的光源が明るい場合は、波面計測での光子ノイズが少なく補正精度も高い筈であるが、図 9 (a) の PSF には、補正された波面のエアリー像とともに、エイリアジングによると見られる成分が素子配置

からのサンプリング限界付近に分布し、かすれたノイズ状の輪帯をなしている。これに、空間周波数フィルターを適用すると、図 9 (b) のようにマスク内側ではノイズが除去され、エアリー回折像の高次成分が浮き出て見えるようになる。

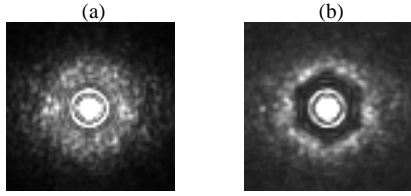


図 9、明るい光源での PSF の比較 (a) フィルター無 (b) フィルターをあり

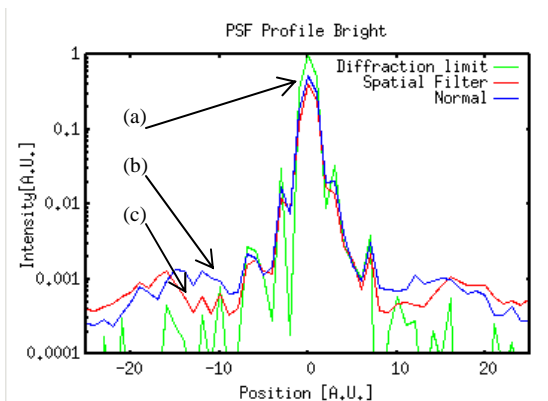


図 10、明るい光源での PSF 断面 (a) 揺らぎ無し (参考) (b) 空間フィルター無 (c) 空間フィルター有

光源が暗い場合についてもエイリアジグ抑制の効果を示した結果が図 11、図 12 である。図 10 (a) はエイリアジグをフィルターで抑制しない状態であるが、PSF が素子配置の 0 次領域を覆い隠すように広がってしまっている。ここで、空間周波数フィルターを挿入してエイリアジグを抑制したのが図 11 (b) で、PSF は集束して 0 次領域の中心部に収まってしまふ程に収斂することが分かった。従来注目されてきた明るい場合のコントラスト向上に加えた新しい知見と言えよう。なお、波長特性など像向上の詳しい仕組みの解明は、今後の研究課題である。

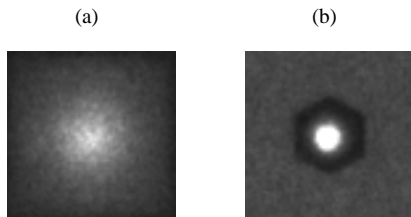


図 11、暗い光源での PSF の比較 (a) フィルター無しに比べ、(b) フィルター有り

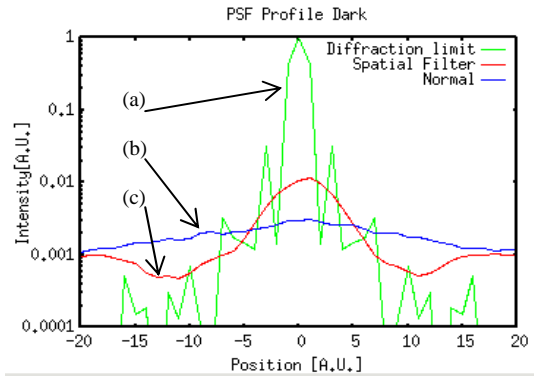


図 12、暗い光源での PSF 断面 (a) 揺らぎ無 (参考) (b) 空間フィルター (c) 空間フィルター有

(3) 空間周波数分割の可能性

これまでの研究は、空間周波数フィルターをエイリアジグの防止にのみ用いるものであったが、発想を一步進めて、空間周波数帯域の分割の可能性を検討した。従来まで、補償光学系の帰還量の最適化が提案され (E. Gendron and P. Lena, Astron. Astrophys. 337 (1995) 等)、すばる望遠鏡用の新 AO でも波面センサーの感度調整まで拡張しての利用が検討されているが (服部雅之ら、2006 年春季天文学会年会 V02C 等)、もし、波面検出前の光信号の時点で、エイリアジグの防止とともに空間周波数領域ごとに感度調整ができれば、補償光学系の抜本的な高性能化を図れるはずとなる。ここではそのために、回折光学的な空間周波数フィルターを導入して、フーリエ面上で帯域の分割を行うことを考える。(図 13 参照) まず帯域分割の如何に

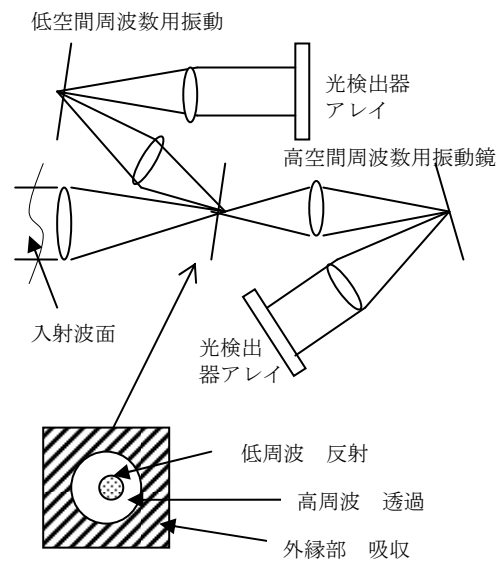


図 13、帯域分割型曲率面センサー

よらず、エイリアジングを防止するため、素子配列により決まるサンプリング周波数以上の成分に関してはマスクにより遮断する。その上でサンプリング周波数以下の領域に関しては帯域分割をするが、その場合に、光子の損出を出さないような方法としては、鏡面を加工して用いて、たとえば、輪帯上の高空間周波数領域は透過、中心の低周波領域は反射などとする方法が考えられる。今回、原理を確認するため行った計算機シミュレーションの結果を示す。原理上、回折光学系による一般の空間周波数フィルターを波面センサーの前に入れた場合に、曲率型の波面センサーが動作しうるかということになる。縦横に高周波と低周波成分を重畳した図 14(a)の入射波面に対して、図 14(b)低周波成分および図 14(c)の高周波成分が綺麗に帯域分離出来ていることが分かる。

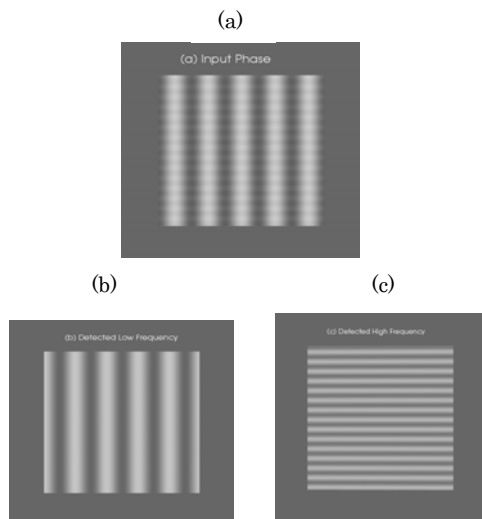


図 14、高周波成分と低周波成分の分離
(a)縦横に高周波と低周波の波面誤差を重畳した入射波面、(b)低周波出力、(c)高周波出力

しかしながら、この手法にはいくつかの問題も指摘できる。まず、位相分布を空間周波数でフィルタリングするため、位相分布が大きい場合には非線形性の影響が出てしまう点がある。ただし、この点に関しては、補償光学系全体として用いた場合なら一旦波面補正の帰還がかり始めれば波面残差の位相分布はかなり小さな範囲に収束するため、それほど大きな問題にはならないと考えられる。その他の問題として、今回のシミュレーションでは検出器面状での強度分布の生成に必要なバイアス成分となる 0 次回折光、つまり、中心付近の光束を、低周波および高周波それぞれに適宜分配するような方法を取っているが、この割合の調整を実際にどのようにするかは今後の課題である。また、実際の応用のように入射波面に瞳面の開口を挿入した場合、出力側の特に高周波側で瞳形状に相似

したアーティファクトが発生する場合があります、その防止策を検討する必要があります。その他、未解決の問題が多くありうるものの、従来、幾何光学的な考察が主であった曲率型の波面センサーに回折光学的な手法が十分適用しうるということがわかったのは、非常に興味深いと言える。

また、今後の発展の方向性として、曲率型の波面センサーに対する回折光学的な手法の適用をさらに推し進めて、本報告書の各節に示したような各手法を発展的に統合し、より実用性の高い簡便な系とする方法も考案中である。

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 2 件)

- ① 服部雅之、多素子曲率型補償光学系における空間周波数領域でのエイリアジングの抑圧、OPJ2007 (日本光学会年会) 予稿集、(28pB6, 2 頁)、査読無
- ② 服部雅之、波面曲率型補償光学系におけるエイリアジングの抑圧と性能の向上、OPTICS & PHOTONICS JAPAN 2006 講演予稿集、pp. 580-581、査読無

〔学会発表〕(計 2 件)

- ① 服部雅之、波面曲率型補償光学系におけるエイリアジングの抑圧と性能の向上、OPJ2007 (日本光学会年会)、2007 年 11 月 28 日、大阪大学吹田キャンパス
- ② 服部雅之、波面曲率型補償光学系におけるエイリアジングの抑圧と性能の向上、OPTICS & PHOTONICS JAPAN 2006 (日本光学会年会)、2006 年 11 月 10 日、学術総合センター、東京都千代田区

6. 研究組織

(1) 研究代表者

服部 雅之 (HATTORI MASAYUKI)
国立天文台・ハワイ観測所・RCUH 職員
研究者番号：20308208

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし