

博士学位論文

三次元表面の共役結像面に非平面ミラーを配置する
光学像投影および撮影に関する研究

宇都宮大学大学院 工学研究科
博士後期課程 システム創成工学専攻

富永 修一

目次

第1章	序論	1
1.1	背景.....	1
1.2	本論文の目的.....	3
1.3	本論文の構成.....	4
第2章	正のパワーを持つレンズ系による結像光学系	6
2.1	はじめに.....	6
2.2	二点間の近軸結像関係.....	6
2.3	リレーレンズによる一次結像面を持つ3点間での結像関係.....	7
2.4	像の結像と瞳の結像関係.....	8
2.5	テレセントリック光学系.....	10
2.6	テレセントリック光学系による像のリレー.....	11
2.7	おわりに.....	12
第3章	結像面における像質改善	13
3.1	はじめに.....	13
3.2	結像と収差.....	13
3.2.1	球面収差.....	14
3.2.2	コマ収差.....	16
3.2.3	像面湾曲.....	18
3.2.4	非点収差.....	19
3.2.5	歪曲.....	20
3.3	収差の補正.....	20
3.3.1	設計段階での収差補正.....	20
3.3.2	実レンズに対する補正.....	25
3.4	瞳面補正による軸上像補正.....	26
3.5	補償光学.....	29
3.6	瞳共役面補正による軸外像補正.....	30

3.7	物体共役面補正による軸外像補正	32
3.8	瞳共役面での補償と物体共役面での補正の違い	34
3.9	おわりに	34
第4章	物体共役面に配置した反射ミラーによる像補正	35
4.1	はじめに	35
4.2	共役結像面ミラーによる像面補正の原理	36
4.2.1	結像面ミラーによる反射像の形成位置	36
4.2.2	一次結像面に配置した球面ミラーによる像形成	37
4.2.3	一次結像面に配置した球面ミラーのビネッティング条件	39
4.3	共役結像面ミラー補正による球面投影面に対する光学シミュレーション	40
4.3.1	光学シミュレーションにおける光学系配置	40
4.3.2	光学シミュレーションによる MTF 評価	41
4.3.3	像シミュレーションによる補正効果の評価	43
4.4	共役結像面ミラー補正の球面投影面に対する投影実験方法	46
4.5	共役結像面ミラー補正の球面投影面に対する投影実験結果	48
4.6	共役結像面ミラー補正の球面投影面における MTF 特性	51
4.6.1	測定光学系および配置	51
4.6.2	斜めナイフエッジ法	52
4.6.3	斜めナイフエッジ法による MTF 測定結果	53
4.7	おわりに	54
第5章	撮像光学系の光軸に対して傾きを持つ被写体に対する像補正	56
5.1	はじめに	56
5.2	シャインプルーフ光学系の原理	57
5.3	一次結像面ミラーの傾きによる空中像面の変換	58
5.4	共役結像面ミラーの回転による像面補正の光学シミュレーション	60
5.4.1	共役結像面ミラーの回転シミュレーションにおける光学系配置	60
5.4.2	共役結像面ミラー回転による補正の MTF 特性	62
5.4.3	像シミュレーションによるシャインプルーフ補正評価	65

5.5	共役結像面ミラーの回転による像面補正の検証	66
5.6	共役結像面ミラーの回転による像面補正の効果	68
5.6.1	一次結像面ミラー回転による、変化軸方向の補正.....	68
5.6.2	一次結像面ミラー回転による、円周方向の補正.....	72
5.7	撮像による像質の評価.....	74
5.8	おわりに.....	78
第6章	物体共役面補正と瞳共役面補正を組み合わせた像補正	79
6.1	はじめに	79
6.2	物体近傍のゆらぎと瞳近傍のゆらぎによる光学系への影響.....	80
6.2.1	大気揺らぎを想定した実験系	80
6.2.2	実験光学系における揺らぎの像質への影響	82
6.2.3	実験光学系における補償光学装置での像質補正	86
6.3	物体共役面における揺らぎの影響	87
6.4	物体共役面ミラーによる結像位置の結像面内移動.....	88
6.5	物体共役面補正と瞳共役面補正の融合による像補償の地上望遠鏡へ展開	91
6.6	おわりに.....	92
第7章	結論と展望	93
7.1	結論.....	93
7.2	将来の展望	94
	参考文献	96
	謝辞.....	104
	研究業績	105

第1章 序論

1.1 背景

映像表現の多様化により、画像表示において様々な手法がとられている。過去よりプラネタリウムでは、観察者を囲むような凹球面形状のスクリーンに像を投影することが行われており、半球状のスクリーンを天球に見立てて星像を投影する光学系が使われている。プラネタリウム光学系においては、一つの光学系において球状スクリーン全体をカバーすることが出来ないため、複数の光学系に分割した方式が採用されている。このように視野全域をカバーする像表現は、観察者に対して没入感を得られることが特徴であり、半球状のスクリーンの入手も可能となっている。[1] また、テーマパークでの映像表現においても、臨場感・没入感といった感覚が得られることを特長としている。これらは、専用のプロジェクターを使用する場合、市販のプロジェクターを流用する場合など様々である。市販のプロジェクターを使用する場合、一般的な市販プロジェクターは平面スクリーンへの投影を考慮しているため、球面への投影を行う場合においては、球面に対応した投影像形状とするために、プロジェクターとスクリーンとの間に球面ミラーを配置する方式が提案されている。[2-6]

また地球などの球体を像投影により表現するための方式も提案されている。[7] これらも凹球面への投影同様に、市販のプロジェクターを使用する場合においては、投影像形状や画角の変換のために補正レンズをプロジェクターとスクリーンの間に入れることで対応している。[8] これら凹面もしくは球面への投影のために、既存の光学系に対して光学素子を追加することは、投影像の像質に対して少なからず影響が出ることが考えられる。

その他にも球面に対しての像投影には、球全体への投影のために複数プロジェクターを使用した投影方式も行われている。[9] 通常、市販プロジェクターにおいては深度コントロールのために投影レンズの F 値を変更するなどの機能は付加されていないため、球面へ像投影を行う場合には、深度との兼ね合いに注意する必要があると考えられる。

円筒面への像投影も提案されている。[10] 円筒面上方より、円筒側面への投影のために配置した円錐形状ミラーを通して投影が行われている。この場合、円筒内側からの観察に適しているものの、側面から表面を観察した場合にはミラーが邪魔をするといった課題も残る。

球体への投影に対する複数プロジェクターを利用する方式においては、三次元投影面への効果が期待でき、深度方向への対応や遮蔽物が投影機とスクリーン間に存在する場合にも対応が可能となる。[11] しかし、投影機とスクリーンおよび遮蔽物の位置関係が複雑化する問題も残されている。

球面スクリーンへの投影に対して最もシンプルな方法としては、投影レンズ自体を設計段階から球面スクリーンに対して最適化することが考えられる。[12] この方式においては、スクリーン形状と投影レンズの組み合わせ制約を受けることにあるものの、もとより最適化されていることから、高精細な投影像が得られるメリットもある。

いずれの場合においても、追加される光学素子は投影面のサイズや曲率といった形状値に対して最適化されており、形状が変化した場合においては、最適な形状に合わせた素子に変更する必要がある、特に投影面とプロジェクターの間にミラーを配置する場合においては、素子が大型になることから、投影対象を変更した場合への対応は容易ではない。

球や円筒面など、3次元形状を有する表面への投影には、投影レンズの深度を深くすることにより被写界深度を上げ、球面の光軸方向高さ変化にも対応できるような方式も可能である。[13] 深度拡張は一般的に投影レンズの F 値を変えることによるが、液体レンズを利用した焦点可変により深度方向への変換を行う方式 [14-18] や、波面コード化法や符号化開口を利用した深度拡張技術 [19-23] も提案されている。この方式においては、像質の変化は課題となる。

このように、球面や円筒面といった三次元形状を持つ投影面に対して投影を行う、もしくは三次元形状を持つ面を平面素子で撮影するためには、条件に合わせた専用の光学素子を用意することが必要であり、光軸方向に像を簡便に変化させる方式は明らかにされていない。

また上記のように、本来設計により最適化された光学系に対して何等かの光学素子を付加する場合においては、光学性能低下の要因を含んでいる。結像光学系において像質を低下させる要因は様々であり、結像および投影レンズ自体の持つ要因によるもの、外乱によるものなど、様々考えることが出来る。結像および投影レンズによる要因の一つに収差があげられ、これは光学系における理想結像点からのズレであり、像質に影響を及ぼすものである。幾何光学的には、物体面上

の一点から出た光線束が、レンズによって集光された際に一点に集まらず、ある広がりを持った状態となっている。この状態は、多項式にて表すことが可能であり、多項式の各項がそれぞれ固有の収差に対応している。三次の項は、ザイデルの5収差と呼ばれ、球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲を示している。収差は像質低下の要因であるため、光学系を設計する段階から、小さくすることが必要となる。写真撮影に使用される結像レンズや、遠距離観察に使用される望遠鏡などの光学系では、特性の異なる光学材料を複数組み合わせ、レンズ単体の曲率半径や厚みを最適化することによって、これらの収差が所望の数値以下となるようにしている。

外乱による要因として、例えば望遠鏡における大気揺らぎの影響があげられる。特に天体などの遠距離観察では、地球地表面の大気温度による密度差によって発生する揺らぎによって、点光源とみなされる天体からの光線波面が乱されることによる像質低下が起こる。光学系が固有に持つ収差とは異なり、時間的な変化を有することから、設計段階から見込んだ補正を行うことは不可能である。その他外乱による要因としては、振動などの影響によるレンズエレメントに位置変化による像質低下があげられる。許容公差を超える位置変化が起こる場合、所定の性能を得られなくなる。

外乱による要因のうち大気揺らぎの補正には、補償光学とよばれる方式による補正が行われている。波面センサと可変形鏡との組み合わせにより、揺らぎによる波面変化を連続的に補正する方式である。アメリカ・ハワイ島のマウナケア山頂に設置された国立天文台すばる望遠鏡などに、補償光学系は搭載されている。[24-26] この場合、補正は一点から発せられた平面波に対して行われるため、ある補正像点の近傍においては高い補正効果を発揮することが可能である。しかし、補正は望遠鏡瞳面近傍での揺らぎを補正することに主眼が置かれており、補正ミラーも瞳面近傍の共役点に配置されていることから、被写体近傍での外乱に対しての課題については見込まれていない。

1.2 本論文の目的

背景にて述べた内容を踏まえ、本研究では結像面形状を変化させ、三次元形状を持つ面に対して良好な結像を行うことを目的としている。その方式として像面共役点を光学系により設定し、その共役点にミラーを配置する像面補正光学系とすることを特長としている。まず球面への投影に対

して、像共役面補正ミラーによる効果を論ずる。次に円筒面を想定し、その円筒面が傾きを持つ場合についての評価を行い、投影光軸に対して斜めから投影するという非対称な条件についての効果について論ずる。その結果を踏まえ、瞳面補正と像面補正の効果の違いから、地上望遠鏡への応用による大気揺らぎ補正の可能性について論ずる。

1.3 本論文の構成

本研究では、物体と像の間に一次結像面を設け、その結像面に球面や円筒面形状のミラーを配置することにより、三次元形状を持つ被写体の撮像もしくは投影面への投影を可能とする像面補正光学系を提案するとともに、被写体もしくは投影面が投影レンズに対して傾きを持つ場合についても提案する。更に、瞳面補正光学系との融合について述べる。

第1章では、本研究の背景と位置づけを述べ、目的を明示する。

第2章では、結像関係について述べる。二点間の結像関係から三点間の結像関係に拡張する。三点間の結像関係においては、2つの結像レンズによる像のリレーが行われる。しかし、それぞれのレンズにおける瞳の結像関係が維持されていない状態では、光線が入射しない問題が発生する。フィールドレンズの配置により改善が可能であり、それについて述べる。また、テレセントリック光学系による像のリレーは、軸外主光線が像面に対して垂直であることを利用し、フィールドレンズを利用することなく像のリレーが可能となり、それについて述べる。

第3章では、結像面での像補正を論ずるために、まず幾何光学における結像の原理と収差について述べる。本論文では被写体もしくは投影面が三次元形状を有する場合についての結像性能の改善を目的としている。像質の劣化は主に光学系自体の持つ収差が主要因として挙げられることから、ザイデル収差について述べるとともにその補正についても述べる。像質への影響は、外的要因によるものもあり、波面の乱れが結像性能に影響を与える。それらの改善方法の一つとして補償光学系が提案されており、地上における天体観測用望遠鏡に搭載され、大気の影響を受けない宇宙望遠鏡と変わらない結像性能が得られており、高い効果を発揮している。補償光学においては主に瞳面近傍の波面を補正することを主眼に置かれており、一定の点像範囲にて補正効果を発揮することが可能であるが、像面湾曲のコントロールは考慮されていない。本論文において新

たに提案する光学系では、主に補正対象面と共役に補正面ミラーを配置することにより補正を行うことを特長としており、像面湾曲をコントロールすることによる像質改善を行う。本章にてその方式について提案するとともに、瞳面補正との違いについて示す。

第4章では、3章で示した物体共役面に配置したミラーによる像面補正の原理を説明する。像面補正の特長は焦点位置の光軸方向への制御であり、撮影レンズもしくは投影レンズに対して光軸方向の像面位置をコントロールすることが可能となる。更に光学設計ソフトウェアによるシミュレーションの結果を示し、実際の光学系による実験から得られた改善結果を示す。

第5章では、被写体もしくは投影面が光軸に対して傾きを持つような条件に対して、補正ミラーに傾きを持たせることにより、共役面を変化させる方法について提案する。光学系の配置はシャインプルーフの原理によるが、共役結像面にミラーを配置していることによる任意の傾きに対して補正が可能であることを示すため、傾きが変化した場合についての結果についても述べる。

第6章では、これまで論じてきた物体共役面にミラーを配置する補正と瞳共役面における可変形鏡による補正の組み合わせについて提案する。地上望遠鏡においては、大気揺らぎなどの外乱による像質劣化が起こる。特に大気揺らぎは地上付近に存在し、天体観測用の望遠鏡においては瞳面近傍にのみ存在する揺らぎも、地上望遠鏡では被写体近傍にも存在することとなる。地表付近の大気揺らぎのサイズは被写体近傍と瞳近傍で差はなく、望遠鏡開口付近の揺らぎにおいては瞳径全体において影響を与えるものの、被写体近傍の揺らぎにおいては、むしろ画角ごとに揺らぎが影響を与え、像位置の局所歪みとして影響を及ぼす。物体面共役、瞳面共役補償の組み合わせによる像質改善についての展開について論ずる。

第7章では、本論文の結論と将来の展望について述べる。

第2章 正のパワーを持つレンズ系による結像光学系

2.1 はじめに

本章では、レンズの結像関係について述べる。2.2 節にて、二点間の近軸結像関係を述べる。2.3 節では、像をリレーする形での三点間の結像について述べる。2.4 節では 2.3 節にて述べた三点間の結像における瞳の関係について述べる。像をリレーする条件において、瞳の結像関係が重要であり、フィールドレンズによる瞳のリレーについて述べる。2.5 節ではテレセントリック光学系の特長について述べ、2.6 節において、像のリレーにおけるテレセントリック光学系による像リレーの効果について述べる。

2.2 二点間の近軸結像関係

二点間の近軸結像におけるモデルを図 2-1 に示す。結像レンズの焦点距離を f 、物体側の像高 [QP] を y 、像側の像高 [Q'P'] を y' 、前側焦点から物体面までの距離を x 、後側焦点から像面までの距離を x' とする。次に、物体が結像レンズに近づいた場合を考える。点 Q が結像レンズ側に移動した量を Δx 、それにより像側結像点が移動する変化量を $\Delta x'$ とする。光軸に沿って像面が $\Delta x'$ 移動した場合における、物体位置の光軸に沿った移動量 Δx について、近軸計算より次の結果を得る。

$$\Delta x = \frac{-f^2}{x' + \Delta x'} - \left(\frac{-f^2}{x'} \right) \quad (2-1)$$

この結果より、像側の軸方向の変化量を決めることにより、物体側の変化量を決めることが可能となる。

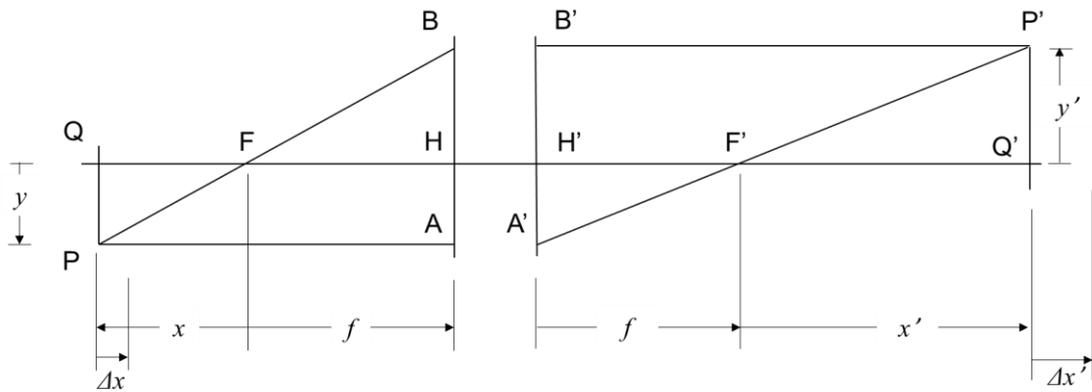


図 2-1 近軸結像

2.3 リレーレンズによる一次結像面を持つ3点間での結像関係

像をリレーする3点間の結像について考える。2つの正のパワーを持つ結像レンズからなる光学系の光軸上の物点に対する結像関係について図 2-2 に示す。この場合、それぞれのレンズによる実像が形成される。図から明らかであるが、レンズ1により結像する光線はそのまま直進しレンズ2に入射する。レンズ1の像側明るさを表す開口数 $N.A_{img1}$ と、レンズ2の物体側明るさを表す開口数 $N.A_{obj2}$ には、

$$N.A_{img1} = N.A_{obj2} \quad (2-2)$$

以上の関係が成立する。 $N.A_{img1}$ がレンズ 2 の開口数 $N.A_{obj2}$ より小さな値となる場合において、レンズ1を射出した軸上物点に対応するすべての光線が、レンズ2に入射することとなる。

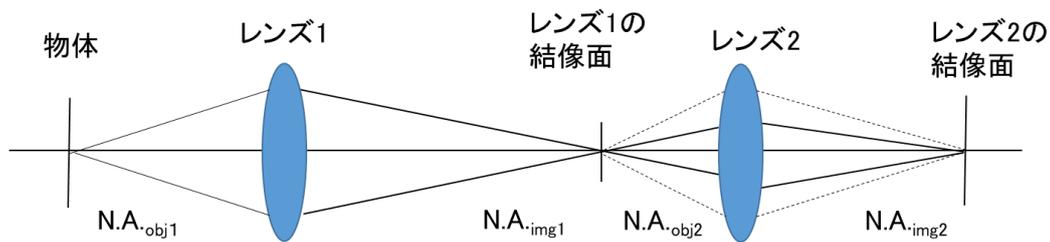


図 2-2 2つの凸レンズによる結像

2.4 像の結像と瞳の結像関係

2.3 節同様に、像をリレーする3点間の結像について、軸外の物点について考える。結像レンズ射出瞳より射出し、像面に入射する光線について、各像高における主光線と、その後の結像レンズに入射する関係を図 2-3 に示す。

レンズ1を射出した光線は、結像面を通りレンズ2に入射する。レンズ1から射出する光線のうち主光線を考えた場合、その主光線はレンズ1の射出瞳位置と光軸の交わる点から射出することとなる。光線はレンズ1の結像面に向かい、その後は直進することとなる。直進した光線はレンズ2に入射することとなるが、レンズ2はその光線を取り込むのに十分な大きさが必要となる。言い換えると、レンズ2の入射瞳の位置はレンズ1の射出瞳位置と一致している必要がある。そのような配置が取れない場合においては、図 2-4 のようにレンズ2に光線が入射せず、像をリレーすることが出来ない。このことは、像面にミラーを配置して折り返す場合においても同様となる。

このように、像をリレーする際の瞳の位置関係を補正するレンズとして、フィールドレンズが使われる。図 2-5 に示すように、像近傍に配置しレンズ1とレンズ2の瞳の結像関係が成立するように配置することにより、レンズ1の射出光線をレンズ2に入射させることが可能となる。

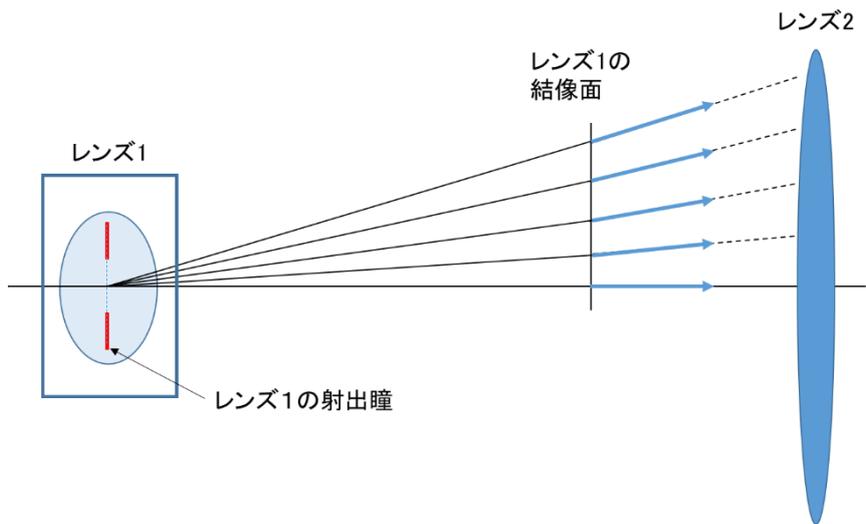


図 2-3 2つのレンズ間における主光線

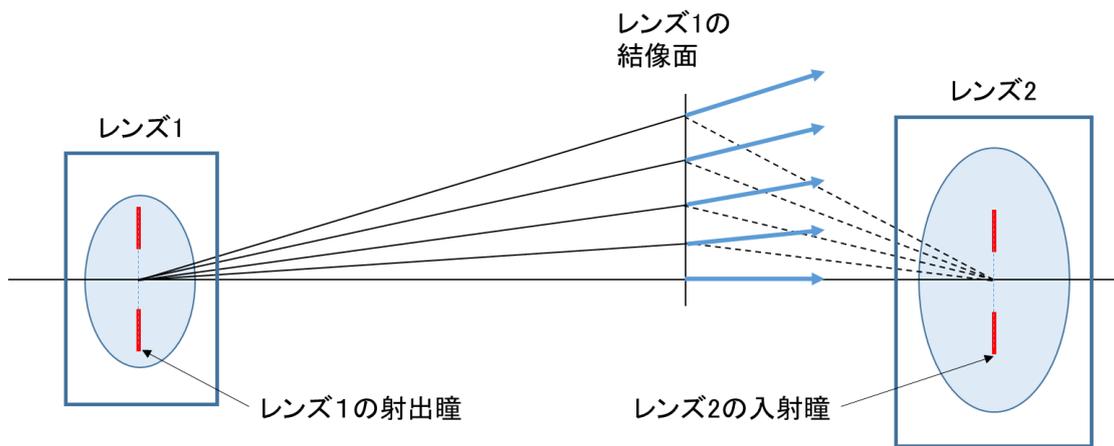


図 2-4 2つのレンズにおける射出光と入射光の関係

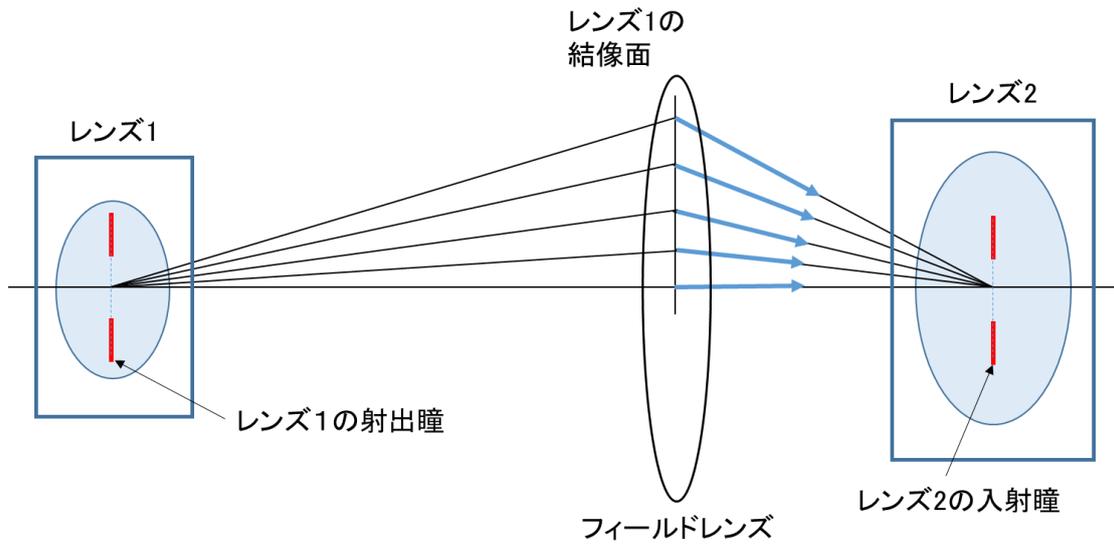


図 2-5 フィールドレンズによる入射瞳の結像

2.5 テレセントリック光学系

前節においては、レンズから射出した主光線は広がる方向に向かう光線として考えたが、図 2-6 に示すように、射出瞳位置の設定によって光軸に対して主光線が平行となる光学系を考えることが可能であり、テレセントリック光学系と呼ばれている。

テレセントリック光学系においては、各画角における主光線が光軸に対して平行となり、垂直に結像面に入射することを特長としている。瞳収差を無視した場合、結像レンズの前側焦点位置に絞りを配置することによって、主光線が結像面に垂直に入射することとなる。

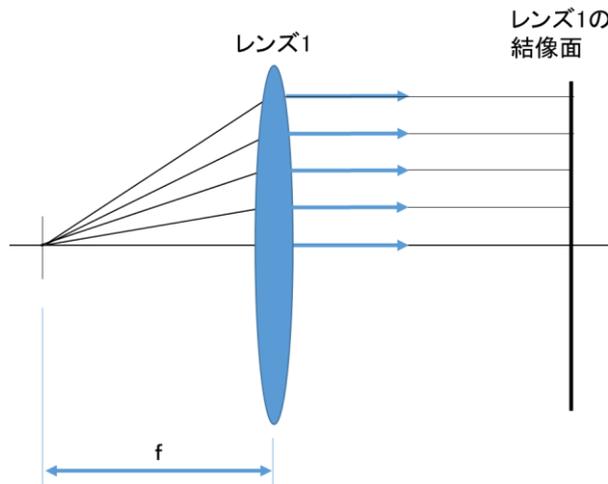


図 2-6 テレセントリック光学系における主光線

2.6 テレセントリック光学系による像のリレー

2.4 節にて示したように、像をリレーする光学系においては、各レンズ間における瞳の結像関係に注意する必要がある。フィールドレンズを配置することは、像の共役関係と同時に瞳の共役関係を作ることができ、前側のレンズからの射出光線を次のレンズに入射させることが可能となる。その一方、像面近傍にレンズを配置しなければならない。ここで 2.5 節にて述べたテレセントリック光学系を考える。図 2-7 に示すように、レンズ1の像面側とレンズ2の物体側をテレセントリック光学系とし、2.3 節にて示したようにレンズ1の開口数をレンズ2がカバーしている条件を満たせば、フィールドレンズを配置することなく、像のリレーが可能となり、レンズ1より射出した光線はレンズ2に入射することとなる。この場合、双方のレンズがテレセントリックであることは理想であるが、レンズ2に光線が入射する範囲内においては、主光線の傾きは許容されることとなる。言い換えると、レンズ1に対してレンズ2が十分な明るさを有する場合、傾きを持った主光線を入射させることが可能となる。

図 2-7 の光学系において、レンズ1の結像面にミラーを配置した場合、主光線が像に対して垂直であることから、そのままの状態でもレンズ1に戻ることが可能となる。この場合、光路内にビームスプリッターもしくはハーフミラーのような分光素子を入れることにより、戻り光を分ける光学配置が可能となる。

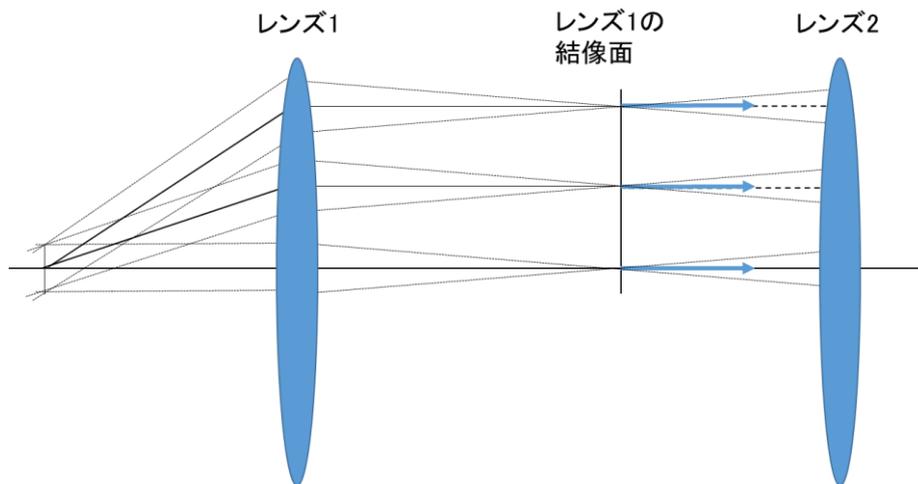


図 2-7 テレセントリック光学系における像のリレー

2.7 おわりに

本章では、正のパワーを持つレンズによる結像関係について述べた。近軸結像の関係から単レンズによる結像、2つのレンズによる像のリレーについて述べた。2つもしくはそれ以上のレンズによる結像においては、瞳の関係に注意する必要がある、像リレーの関係のみならず瞳の結像関係を作る必要がある。フィールドレンズを配置することは、瞳の結像関係を維持しながら像をリレーすることが可能であり、ビネッティングが発生しないことを示した。またテレセントリック光学系による像のリレーも可能であり、その場合には結像面に対して垂直に主光線が入射することを利用して、フィールドレンズを使用することなく像がリレーできることを示した。

テレセントリック光学系を使用した場合、結像面にミラーなどの光学素子を配置することが可能となる。結像面に光軸に対して垂直にミラーを配置した場合には、そのままの光線を維持した反射が可能となる。反射した光線はその後にビームスプリッタ等を配置することにより光路を分けることが可能となる。

第3章 結像面における像質改善

3.1 はじめに

本章では、レンズによる結像関係における光線の集光状態について述べる。物点から出た光線は、レンズを通して像点に集光する。一点に集光することが理想だが、そのような条件を完全に満たすことは一般的に不可能であり、収差としてある程度の広がりをもった集光状態となる。

3.2 節では、無限遠および有限物体からレンズに入射する光線に対する、その収差について述べる。3.3 節では、3.2 節にて述べた収差について、収差補正の観点から単レンズと組レンズにおける収差量の違いによる結像性能の違いについて述べる。3.4 節では、具体例として瞳面に波面補正ミラーを配置した場合の、平面波に対しての補正について述べる。3.5 節では 3.4 節を踏まえ、天体観測用の望遠鏡にて使用されている補償光学について述べる。3.6 節では、3.5 節での瞳共役面での補正結果を踏まえ、その補正が軸外像に対する像面湾曲補正への影響を与えないことを示す。3.7 節では像面湾曲補正方式の提案として、物体面共役補正について述べる。3.8 節では、瞳面共役補正と物体面共役補正との違いについて述べる。

3.2 結像と収差

結像光学系において、物点から出た光は一点に集光される。理想的な光学系を考えた場合、光はある一点に集まることとなるが、実際の光学系においては広がりを持った範囲に集まることとなる。これは収差と呼ばれ、像質に影響を与えることとなる。

収差は、理想結像点からのズレ量として、奇数項のベキ級数として表すことが出来る。特に3次の項は、2.2 節で述べた近軸領域外に現れる様々な収差の中で特に基本的なものであり、その特徴から5種類の異なる収差に分類することができ、ザイデルの5収差と呼ばれている。それぞれが、「球面収差」、「コマ収差」、「像面湾曲」、「非点収差」、「歪曲」と呼ばれている。入射瞳の半径を d

とし、光学系の入射瞳に入射する光線の角度を ω とした場合、それぞれの収差が、 d および ω とどのような関係にあるかを、表 3-1 に示す。

表 3-1 ザイデルの5収差

収差の名称	d, ω との関係
球面収差	d^3 に比例
コマ収差	d^2, ω 比例
像面湾曲	d, ω^2 比例
非点収差	d, ω^2 比例
歪曲	ω^3 比例

このことより、画角 ω の小さい領域においては、球面収差およびコマ収差の影響を考慮すればよいが、画角が広がるにつれて他の収差も影響も考慮する必要があるが生じる。

3.2.1 球面収差

光軸上のある一点から出た光は、レンズを通して光軸上のある一点に集光する。その集光は実際の光学系においては、近軸結像点と異なる位置にて光軸と交わることとなる。これは球面収差と呼ばれ、軸上の像質に影響を与えることとなる。

単レンズを例として球面収差を考える。シミュレーション光学系のパラメータを表 3-2 に示す。

無限遠の軸上一点から出た光はレンズを通過して集光するが、図 3-1 に示すようにレンズ周辺に行くほど、レンズに近い位置で光軸と交わっている。

光線の状態を縦軸に開口高さ、横軸に近軸結像点からのズレ量としてグラフ化したものを図 3-2 に示す。軸上の、どの位置に光線が到達するかはレンズ系によって異なるが、画質低下の原因となり補正が必要となる。

球面収差による点像の広がりシミュレーションの結果を図 3-3 に示す。光線図が示す結果と同様に、中心付近に光線が集中し、周辺に広がりがある結果となることが見て取れる。

表 3-2 シミュレーション光学系の各値

面タイプ	曲率半径	面間隔	材質	アパーチャー半径
球	Inf	5.00		10.00
球	50.00	5.00	S-BSL7 (OHARA)	12.23
球	-50.00	47.58		

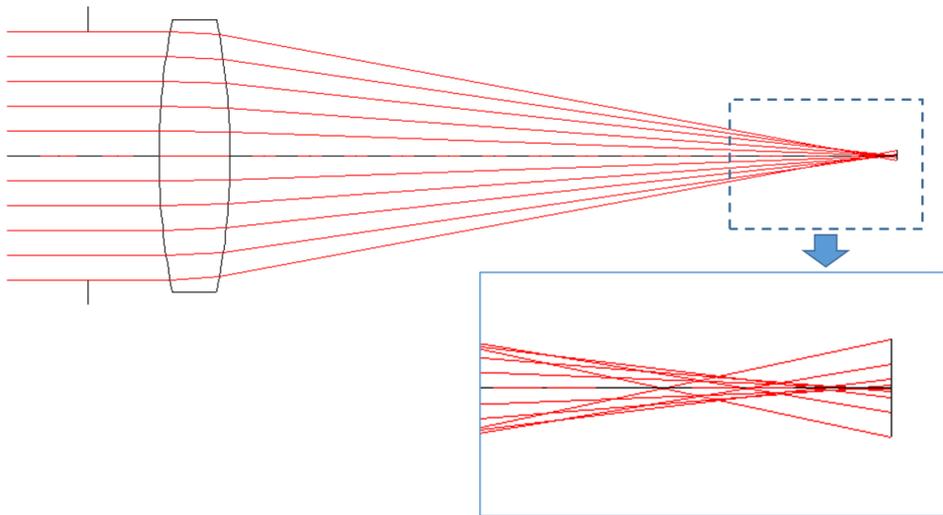


図 3-1 球面収差による光線の集光状態

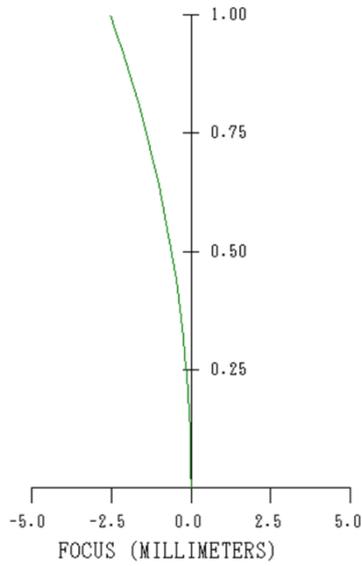


図 3-2 球面収差チャート

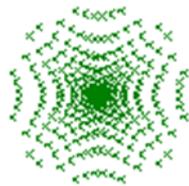


図 3-3 球面収差のある状態におけるスポットダイヤグラム

3.2.2 コマ収差

結像光学系において光軸外のある一点から出た光は、レンズを通して光軸外のある一点に集光する。その集光は実際の光学系においては、光軸上での結像と同様にある程度の広がりを持った状態で集まることとなる。これはコマ収差と呼ばれ、彗星(Comet)状の像点分布となる。この収差は軸外の像質に影響を与えるものとなる。3.2.1 節にて使用した光学系と同じパラメータによる軸外シミュレーションの結果による光線の集光状態を図 3-4 に示す。

瞳中心を通る主光線に対しての対称性が失われ、開口の上側と下側を通る光線の像面付近での通過点が異なることが分かる。像点の分布をスポットダイヤグラムとして図 3-5 に示す。光線図が示す結果と同様に、下側に光線が集まる場所があり、外側(図の上方向)に向かって広がっていることが分かる。

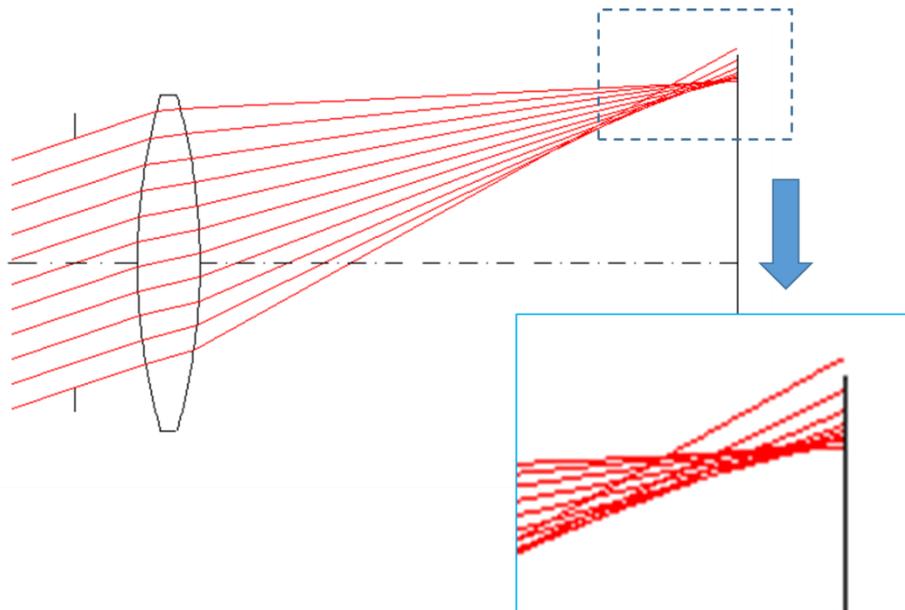


図 3-4 コマ収差



図 3-5 コマ収差のある状態におけるスポットダイヤグラム

3.2.3 像面湾曲

平面物体を結像する光学系において、その結像面が光軸方向に変形した状態が発生する。そのような収差を像面湾曲と呼び、画像中心と周辺で集光点が平面から離れていく状態を発生させる。光路図による像面湾曲の状態を図 3-6 に示す。

理想的には平面上に集光するべき光線が、画角が増えるに従いレンズ側に集光点がシフトした湾曲状態の像面となっている。必要とされる解像力によって定義された最小錯乱円による深度内においては、像面湾曲による解像力変化は無いとみなすことが可能であるが、深度を超える範囲においては、像面のズレとして認識され画像の中心では良好な画質であるにも関わらず、周辺部では像質が低下している結果となってしまったため、補正が必要となる。縦軸に像高、横軸に近軸像面からのズレ量を取ったグラフを図 3-7 に示す。

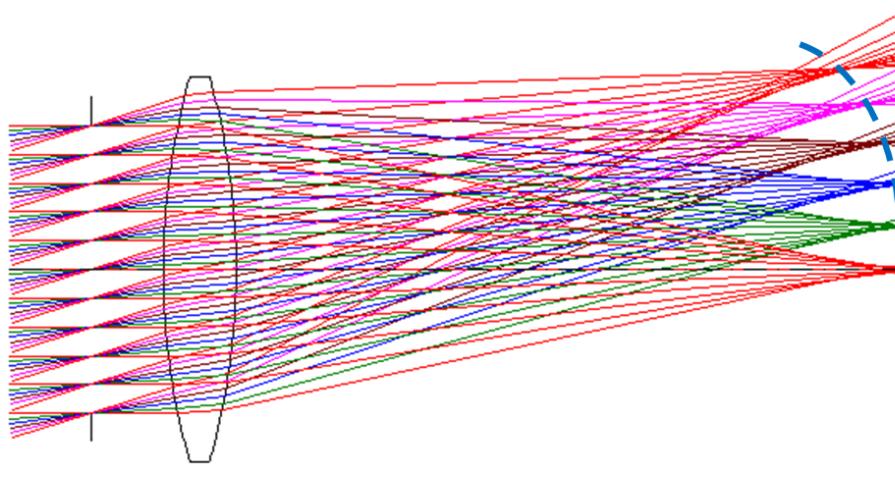


図 3-6 像面湾曲

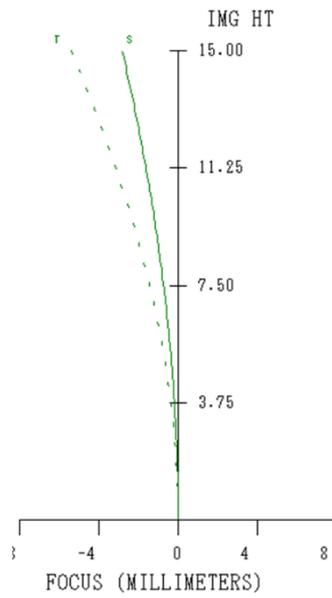


図 3-7 像面湾曲チャート

3.2.4 非点収差

軸外における非対称性を示す収差であり、概念図を図 3-8 に示す。サジタル面の集光点とタンジェンシャル面の集光点が異なる結果となり、像面湾曲と密接な関係がある。

非点収差は図 3-7 のグラフにおいて実線S(サジタル光線)、破線T(タンジェンシャル光線)として表されており、この光学系においてはグラフから、SとTで像面が一致していないことが読み取ることが可能である。

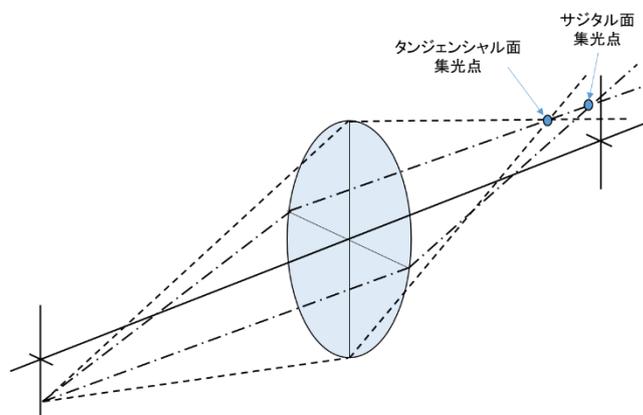


図 3-8 非点収差

3.2.5 歪曲

平面物体状に方眼を考えた際、平面像面上に結像した像が方眼形状から崩れた状態を指す。マイナスの場合には樽型、プラスの場合には糸巻き型の像となる。その状態を図 3-9 に示す。歪曲収差の補正は、投影光学系においてはあらかじめ表示画像を投影レンズの歪曲収差に合わせて歪ませた像を使用することがある。また撮像光学系においては、撮影画像に対する画像処理によって行われる場合がある。

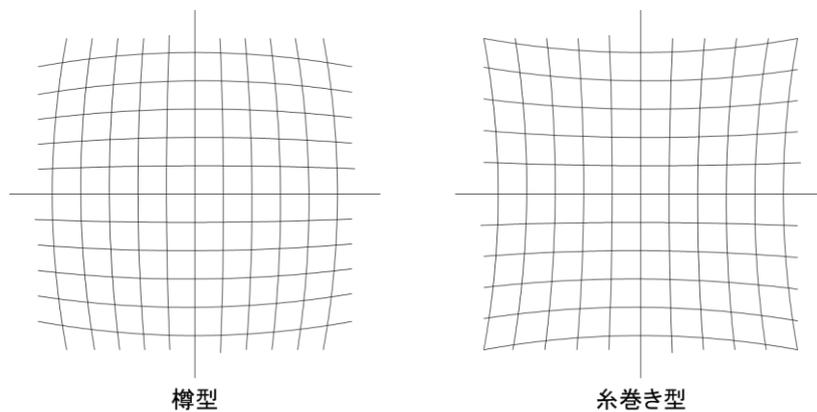


図 3-9 歪曲収差

3.3 収差の補正

収差補正の観点から単レンズと組レンズにおける収差補正量の違いによる結像性能の違いについて述べる。

3.3.1 設計段階での収差補正

収差の補正は、光学系の像質改善において重要な要素となる。一般的には異なる材料の硝材による凸レンズおよび凹レンズの組み合わせにより、収差係数を小さくすることが光学設計として行われる。また球面光学系の組み合わせのみでは十分な補正が得られず、場合によっては非球面光学系を組み合わせることによる収差補正も行われる。

焦点距離 $f=50\text{mm}$ における、単レンズおよび組レンズにおける球面収差の比較を図 3-10 に、コマ収差の比較を図 3-11 に、像面湾曲および非点収差の比較を図 3-12 に、歪曲の比較を図 3-13 に示す。組レンズによる効果的な収差補正により、球面収差およびコマ収差においては $1/40\sim 1/50$ 程度、像面湾曲、非点収差および歪曲は $1/10$ 程度まで小さくなっている。

また、コントラスト比較として、 10lp/mm での MTF の比較を図 3-14 に、 100lp/mm での MTF の比較を図 3-15 に示す。縦軸に MTF、横軸に空間周波数を取る。単レンズにおいては、 10lp/mm までの間に MTF 値が低下していくが、組レンズにおいては、 10lp/mm においては 95% 程度、 100lp/mm においても 40% 以上となっており、高い値となっている。本組レンズでは、10 枚のエレメント構成となって、理論限界までは到達していないことがグラフからも読み取れる。

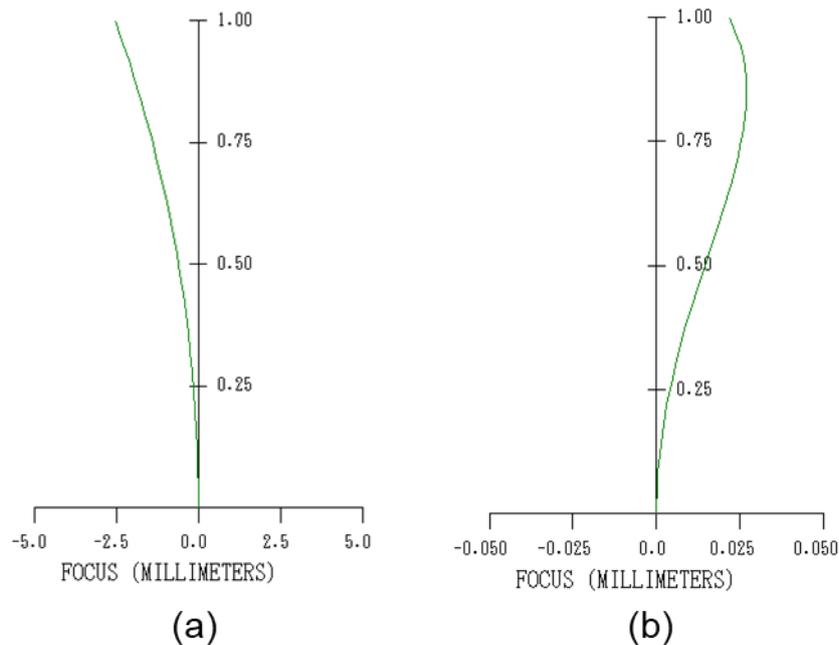


図 3-10 単レンズと組レンズにおける球面収差の比較 : (a)単レンズ、(b)組レンズ

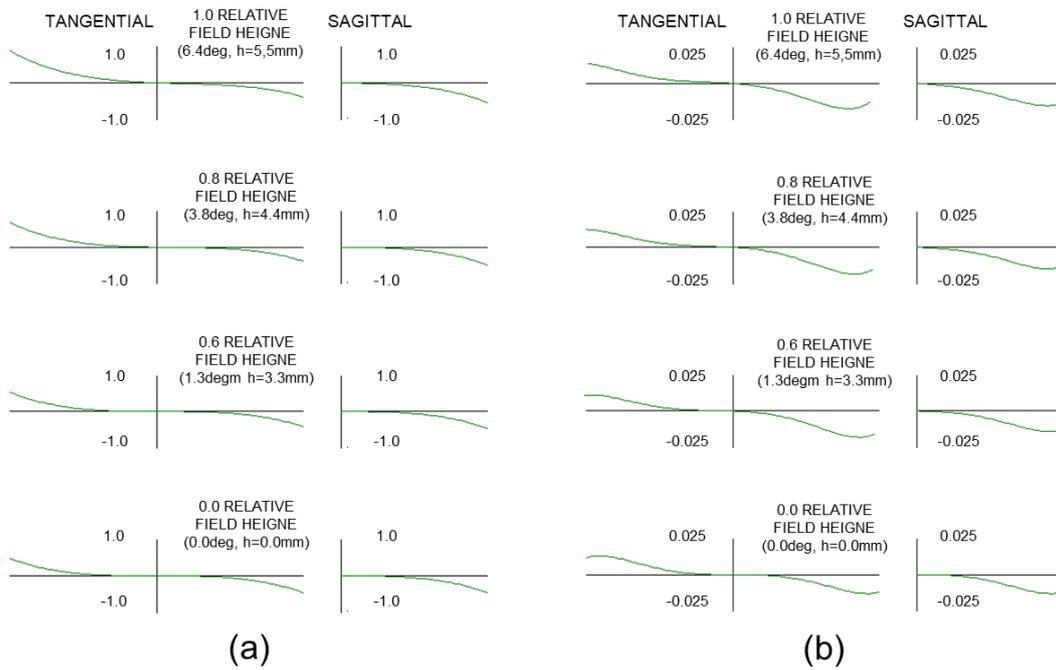


図 3-11 単レンズと組レンズにおけるコマ収差の比較 : (a)単レンズ、(b)組レンズ

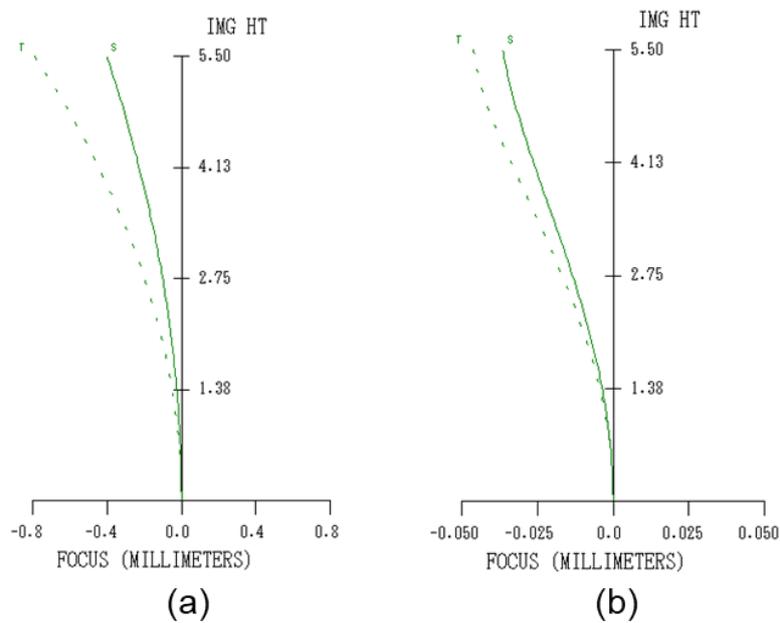


図 3-12 単レンズと組レンズにおける像面湾曲および非点収差の比較

(a)単レンズ、(b)組レンズ

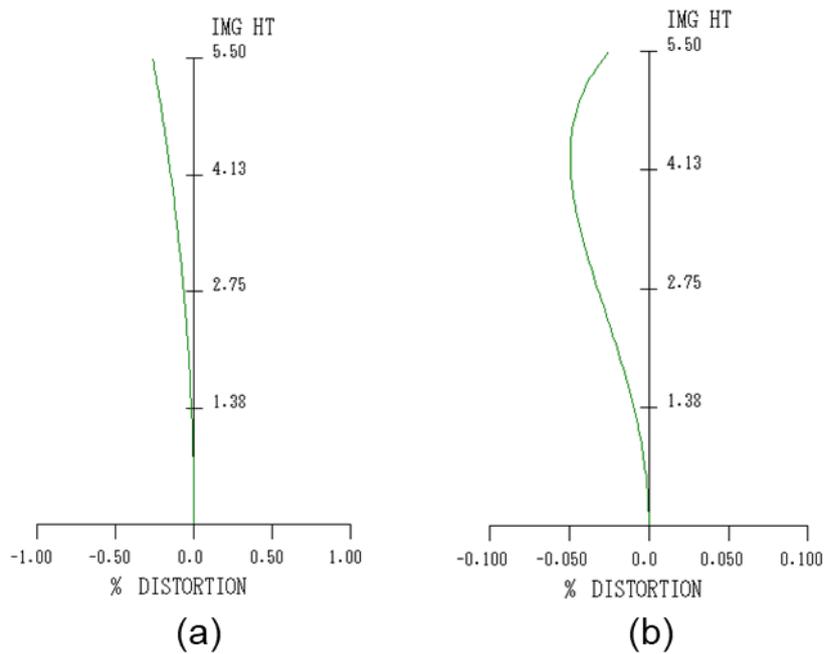
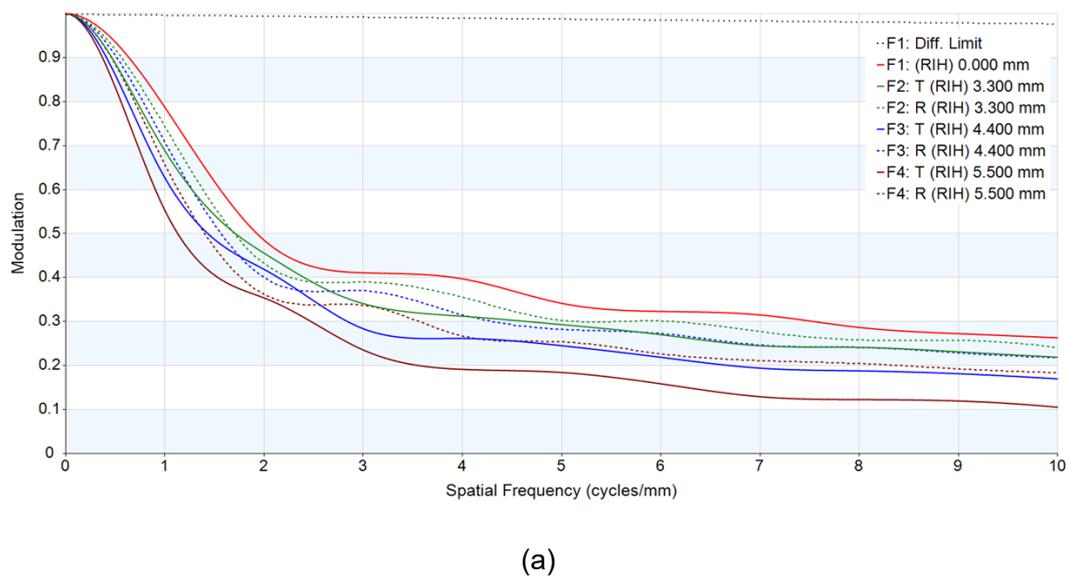
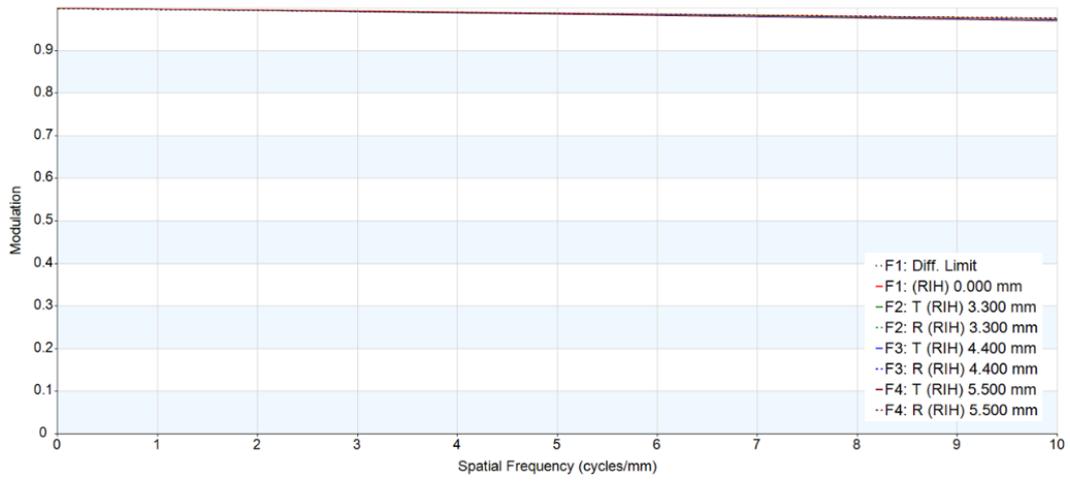


図 3-13 単レンズと組レンズにおける歪曲収差の比較 : (a)単レンズ、(b)組レンズ

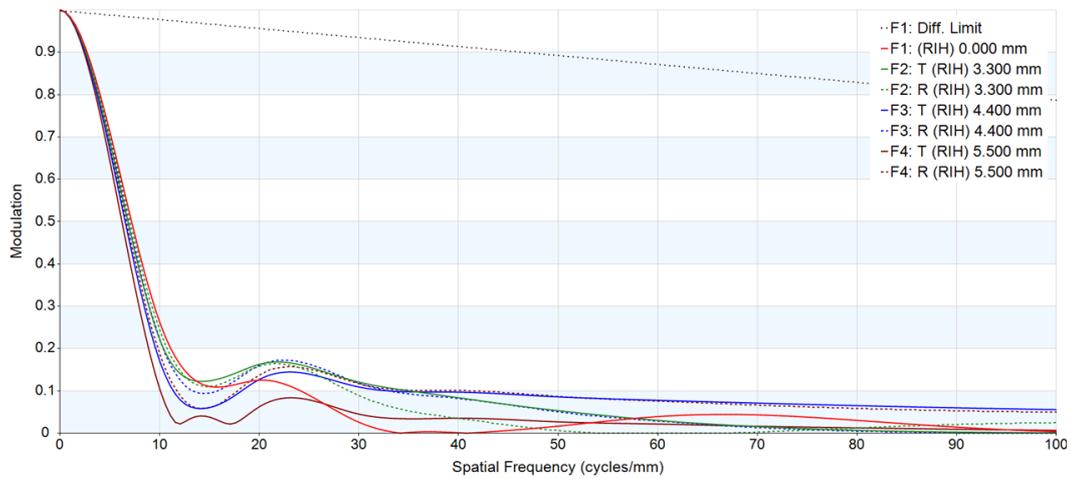




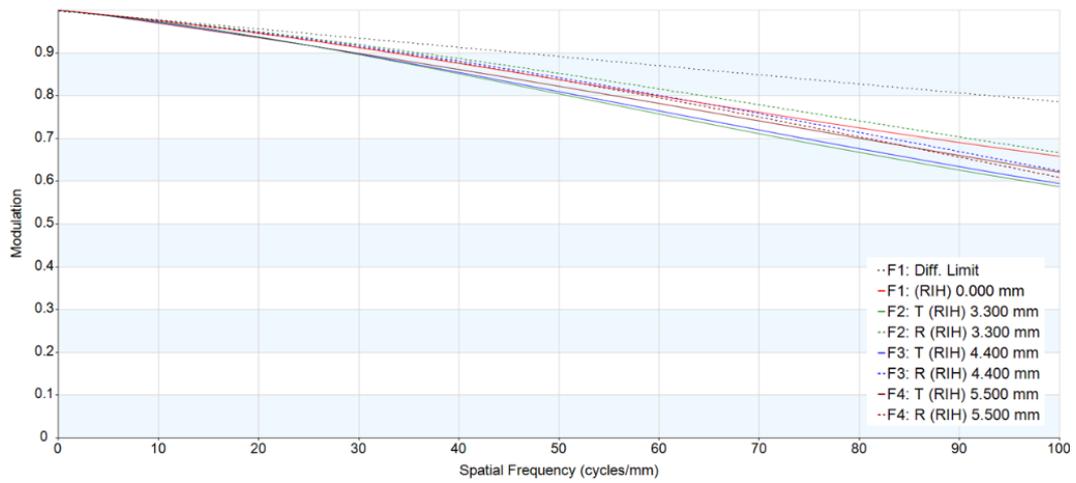
(b)

図 3-14 単レンズと組レンズにおける 10lp/mm における MTF 比較

(a)単レンズ、(b)組レンズ



(a)



(b)

図 3-15 単レンズと組レンズにおける 100lp/mm における MTF 比較

(a)単レンズ、(b)組レンズ

3.3.2 実レンズに対する補正

実レンズに対して、特に球面収差を補正することは行われている。収差量が既知である場合、その収差を打ち消すようなレンズを組み込むことによる補正や、可変形鏡などの非球面形状素子を利用したものがある。また映像表現の世界においては、収差低減による高コントラストな画像が必要でない場合もあり、ソフトフォーカスレンズのような球面収差の補正不足状態を作り出し、コントラストが低い像としての表現も行われている。

3.4 瞳面補正による軸上像補正

3.2.1 節において、軸上の一点から光線が光学系により集光する程度を、開口高さに関連付けた球面収差として述べた。また、3.2.2 節においては、軸外での集光する程度を、コマ収差として述べた。通常の光学系においては比較的広い画角が求められ、各画角における収差も一様ではない。しかし、例えば軸上近傍の一定の範囲においては、軸上と同程度の収差であると考えられる。単レンズにおける、 $f=50\text{mm}$ 、最大画角 0.5deg の範囲での横収差の計算結果を図 3-16 に示す。この横収差の計算結果からも軸上と同程度の収差であることが見て取れる。このことから、瞳面において軸上での収差を補正することにより、軸上近傍の像質も同時に改善可能となることが期待できる。フレキシブルな補正を考えた場合、瞳面を反射面として、可変形鏡を配置した光学系が考えられる。

単レンズにおいて瞳面に非球面反射鏡を配置した光学系を考え、配置図を図 3-17 に示す。無限遠物体からの光線が平面波として上方から入射している場合を想定している。光線はビームスプリッタに入射する。その後可変形鏡に入射し、結像レンズにより結像される。

球面収差の補正効果を確認した結果を図 3-18 に示す。反射面の形状を最適化することにより、球面収差は効果的に補正されていることが分かる。

MTF も同様に比較を行う。10lp/mm の条件において計算を行った。MTF の結果は大幅に改善していることが分かる。補正前の計算結果を図 3-19 に、補正後を図 3-20 に示す。

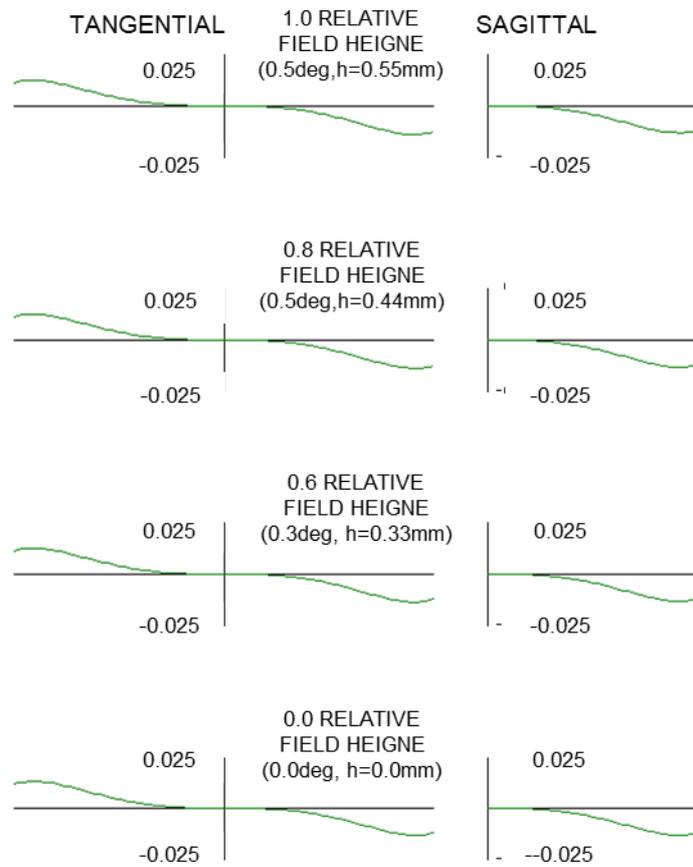


図 3-16 狭画角における、単レンズの横収差

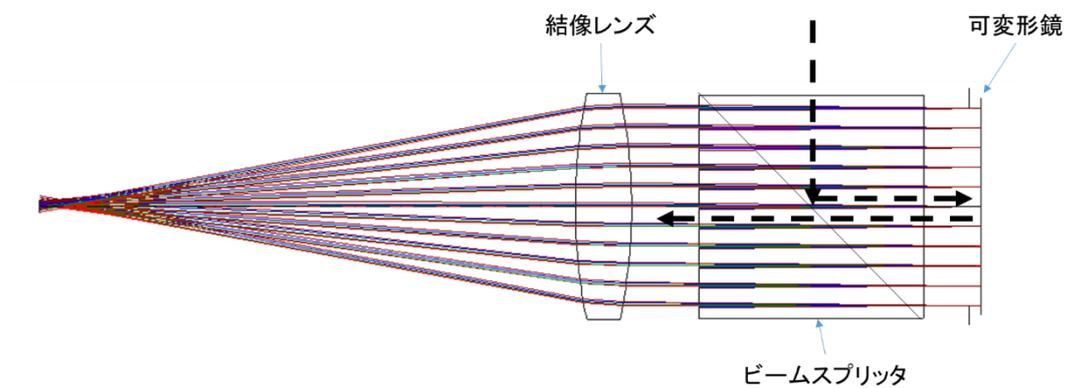


図 3-17 瞳面近傍に配置された可変形鏡による波面補正光学系の配置図

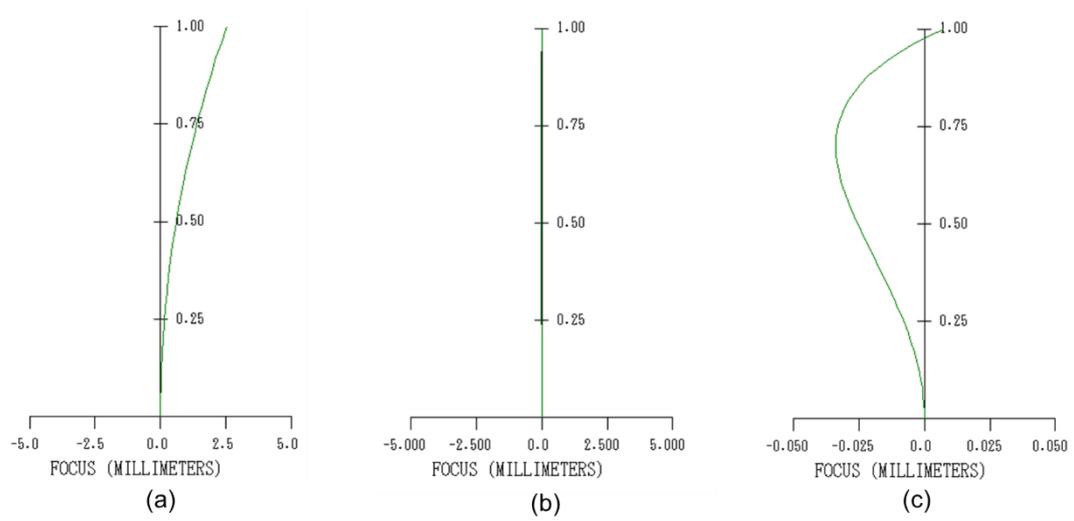


図 3-18 瞳面に配置したミラーによる球面収差補正の効果

(a)補正前、(b)補正後、(c)補正後(スケール変更)

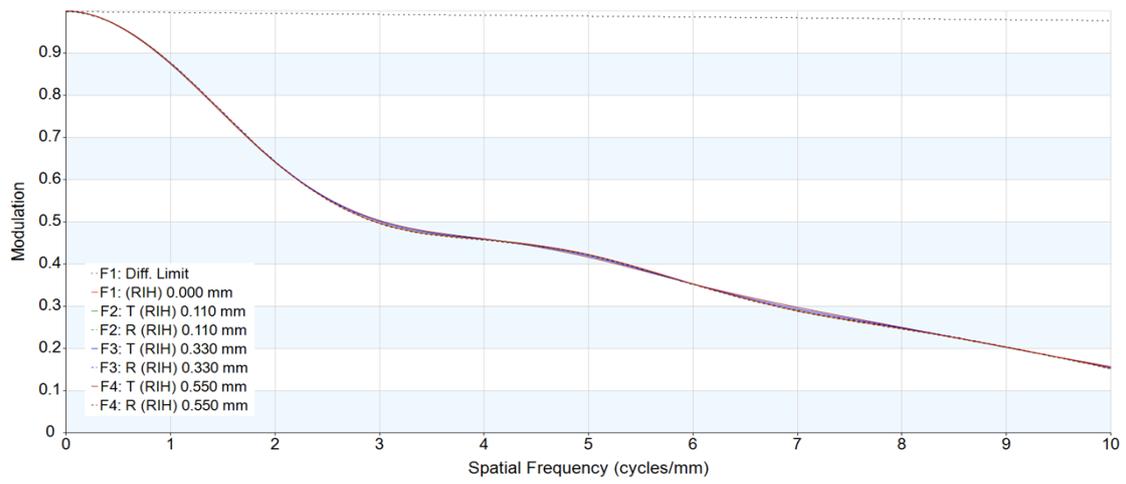


図 3-19 瞳面にミラーを配置した状態での MTF (補正前)

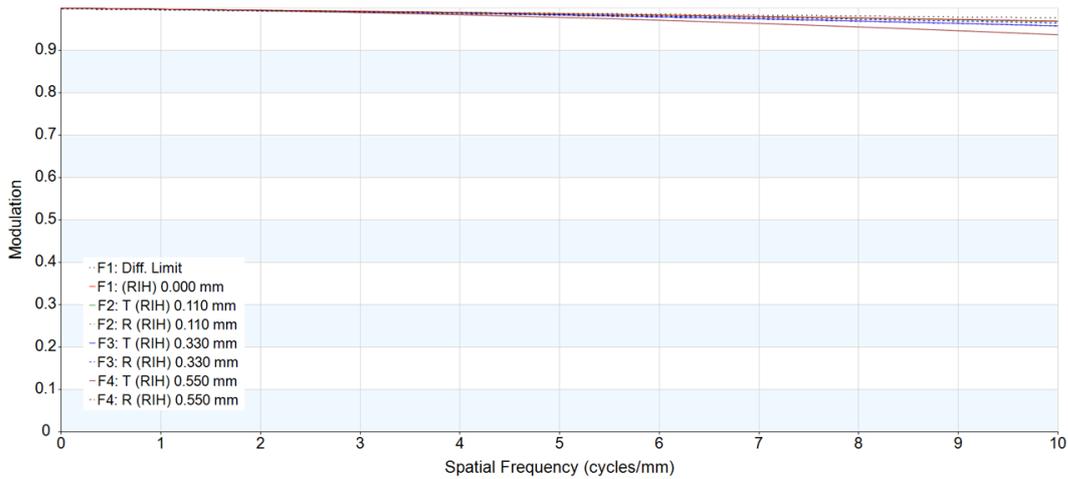


図 3-20 瞳面にミラーを配置した状態での MTF (補正後)

3.5 補償光学

3.4 節にて述べた瞳面での補正による像改善は、補正する画角の光線を中心として、その近傍の範囲において一定の効果がある。天体望遠鏡など長焦点距離の光学系においては、一般的に焦点距離が長く画角が狭いことから、像質の改善効果を期待することが出来る。

その例として、補償光学があげられる。地上に設置された望遠鏡においては、大気揺らぎによる像質低下が避けられない。大気揺らぎは概ね地表層の近くにて発生し、観察対象となる天体からの入射波面を乱すこととなり、その乱れた状態の波面が望遠鏡に入射することとなる。乱れた波面は結像性能に直結することから、波面乱れを除去することが出来れば像質の改善が期待できる。大気揺らぎは時間変化を持つことから、連続的な波面の計測と補正が必要となり、波面センサと可変形鏡の組み合わせによるフィードバック制御系により、大気揺らぎの時間変化に対して連続的に波面補正が行われている。国立天文台「すばる望遠鏡」など地上に設置された大型望遠鏡には補償光学系が像質改善に使われており、宇宙望遠鏡と同程度の画質を得ることが可能となっている。その概念図を図 3-21 に示す

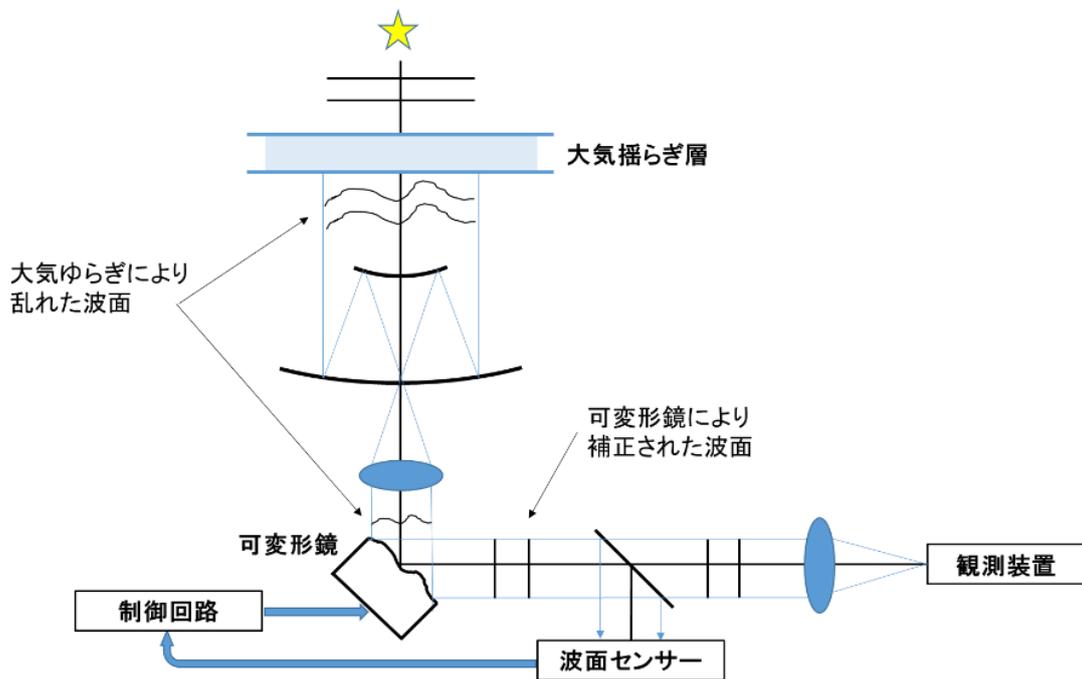


図 3-21 補償光学系の概念図

3.6 瞳共役面補正による軸外像補正

3.5節において、瞳面における収差補正について述べた。瞳面に配置されたミラーによって光軸近傍における収差補正を行い、結像性能が改善できることを示した。しかし画角が広がるにつれて、コマ収差の影響が大きくなることから、改善効果が小さくなる。図 3-17 に示した瞳面補正の光学系において、画角を 6.4deg (像高 5.5mm) と、10 倍まで広げた場合における波面補正後の光学系における光軸中心にピントを合わせた際の像面湾曲の計算結果を図 3-22 に、MTF 計算結果を図 3-23 に示す。

MTF 値が画角 0.64deg (像高 0.55mm) と比べ、 6.4deg (像高 5.5mm) の数値が上がっていないことが分かる。同様に横軸をデフォーカスとした場合の MTF 計算結果を図 3-24 に示す。軸上のベストフォーカス点と周辺部のフォーカス点にズレが生じている。このことは、瞳面での波面補正は点像の集光状態を改善することは可能であるが、像面湾曲を補正出来ていないことが分かる。

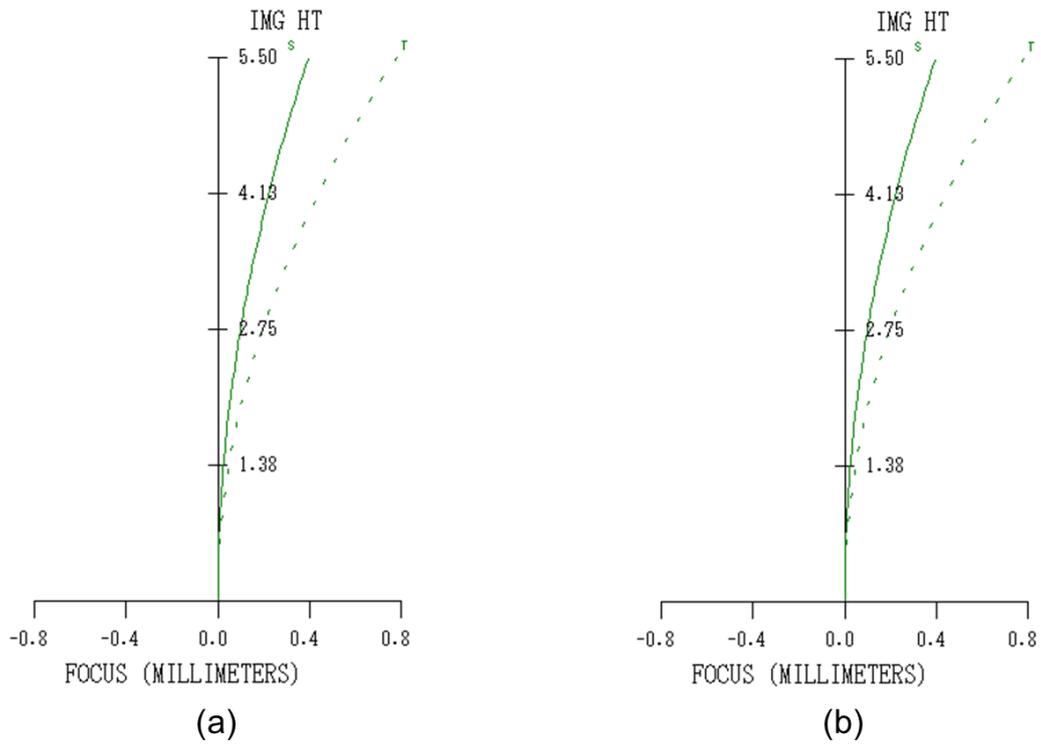


図 3-22 波面補正前後の像面湾曲 : (a) 補正前、(b) 補正後

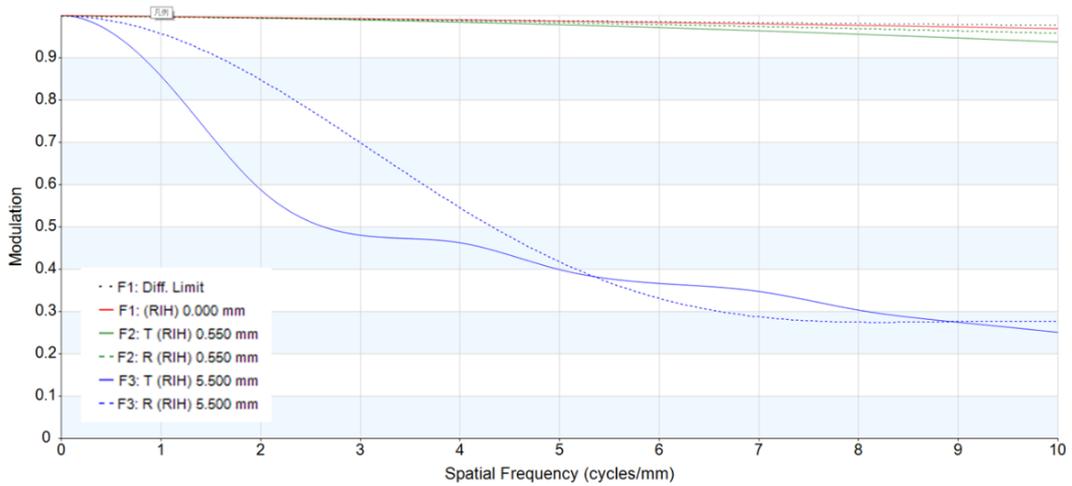


図 3-23 波面補正後の MTF

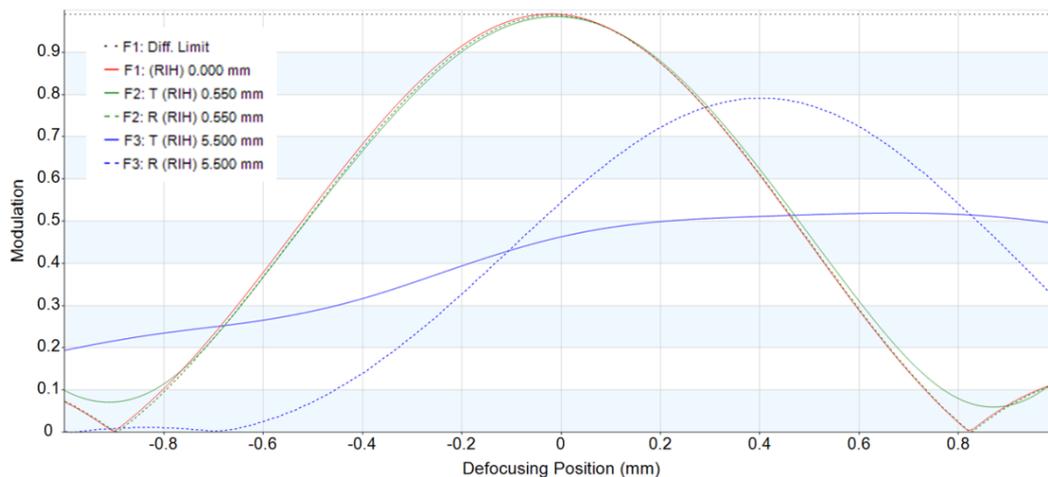


図 3-24 波面補正後のスルーフォーカス MTF

3.7 物体共役面補正による軸外像補正

3.6 節において、瞳共役面補正による像質改善は、補正対象とする像点とその近傍に対して効果があるが、像面湾曲は残存することが分かった。また 2.2 節において、2 点間の結像関係について述べた。言い換えると像面湾曲のコントロールには、結像共役点の位置関係を利用したコントロールが必要となることが考えられる。

焦点距離 $f=50\text{mm}$ のレンズによる有限結像光学系を考える。レンズ構成を表 3-3 に示す。シミュレーション上、絞り面を反射面として非球面ミラーを配置し、軸上収差を補正する光学系としている。

物体および像面を共に平面とした場合の、シミュレーションによる 4lp/mm の条件における結果を図 3-25 に示す。軸上および軸外像高 0.5mm のピーク位置は一致しており、像面が一致していることを示している。しかし像高 5.5mm においては、ラジアル方向で 1.5mm およびタンジェンシャル方向で 0.75mm 、軸上近傍の像面から離れている。特にタンジェンシャル方向の結果は、軸上近傍の像面とは完全に離れた状態となっており、解像していないことが読み取れる。

次に、物体面を曲面とした場合の MTF 計算結果を図 3-26 に示す。物体面の曲率を $r=13\text{mm}$ とした場合、ラジアル、タンジェンシャルの方向で元の光学系が持つ非点収差は残るものの、像面湾曲を補正することができ、結果として軸上近傍の焦点面と一致する平面上において 65%程度の

MTF 値を得ることが可能となる。中間像高となる $h=3.3\text{mm}$ においても、90%を超える MTF 値となっている。

表 3-3 レンズ構成

面タイプ	曲率半径	面間隔	材質	アパーチャー半径
球	Inf	47.58		10.00
球	50.00	5.00	S-BSL7 (OHARA)	10.00
球	-50.00	5.00		8.91
非球面	Inf	-5.00	(補正反射面)	10.00
球	-50.00	-5.00	S-BSL7 (OHARA)	10.00
球	50.00	-47.58		

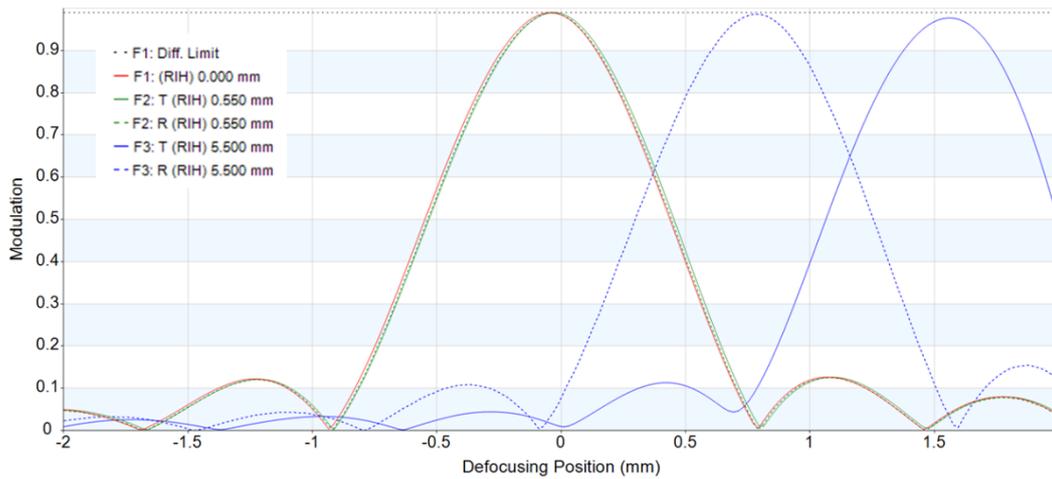


図 3-25 物体面形状補正前のスルーフォーカス MTF

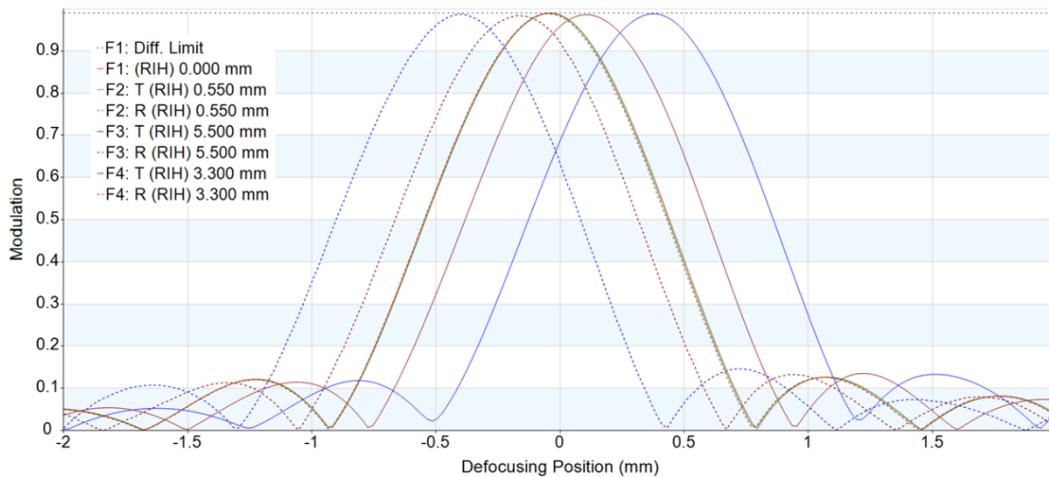


図 3-26 物体面形状補正後のスルーフォーカス MTF

3.8 瞳共役面での補償と物体共役面での補正の違い

瞳共役面において波面を補正する場合、瞳面を通過する波面の形状をコントロールすることが可能となる。瞳面および瞳共役面において軸上波面も軸外波面も同一の開口範囲を通過することとなる。2次元撮像素子による撮像を考える場合、光軸上および周辺部においては同じ時間にて撮像が行われることが一般的である。そのため、同一な波面補正形状によって軸上および軸外の補正を行うこととなる。軸上と軸外においては、異なる波面収差を持っており、同一の補正面形状では補正が困難である。また、軸外においては像面湾曲の補正が必要であり、瞳面での補正は不可能となる。軸外における像面湾曲の補正には、物体面と結像関係にある共役面形状を変化させることにより、像面湾曲をコントロールすることが可能となる。

3.9 おわりに

本章では、レンズの結像において結像性能を表す収差について述べた。光学系の結像性能を上げるためには、収差の低減が必要不可欠である。特にザイデルの5収差の低減は、光学性能の改善に直結しており、5収差はそれぞれ入射瞳の径と画角に関連している。入射瞳の径に影響を受ける球面収差については、瞳面もしくはその共役面に配置したミラーによって補正が可能であることをシミュレーションにより確認した。この収差補正は、波面センサと可変形鏡を組み合わせた補償光学装置によって、天体望遠鏡などで実用化され、観測成果に貢献している。

一方、像面湾曲は画角の二乗に比例することから、画角毎の補正が必要となり、瞳面での補正のみでは、像面湾曲収差量が大きい場合には十分な効果が得られない。そのことから、本章において物体形状を変形することにより、像面湾曲を変化させることが可能かを確認した。光学シミュレーションの結果から、物体面形状を変化させることにより、像面湾曲のコントロールは可能となることを示した。しかし実際の装置・設備において、投影表示機や撮像素子は平面であり、容易に形状を変化させることが出来ないことから、新たな方法による物体形状補正が必要となる。

第4章 物体共役面に配置した反射ミラーによる像補正

4.1 はじめに

第3章において、瞳共役面において非球面ミラーを配置することにより、入射波面を変化させることが可能となり、光学系自体が持つ収差や大気揺らぎなど外乱による波面乱れを補正し、良好な波面形状へ補正することが可能であることを述べた。しかし瞳共役面のミラーにおいては、像面湾曲のコントロールを行うことが出来ないことから、物体面自体の形状補正が必要となり、物体面形状変化による像面補正について述べた。

本章では、物体形状を補正するために、リレー光学系により物体と等倍の一次結像面を形成することにより、その一次結像面に配置したミラーによる像面湾曲のコントロールについて述べる。像面湾曲のコントロールによる結果として、球面物体の撮像ないし球面物体への像投影について述べる。第3章の 3.7 節では、物体自体を球形状にすることによる像面湾曲の補正により、光軸中心近傍の像平面に軸外像面を合わせる補正について述べた。像面湾曲のコントロールが可能であれば、任意の球面形状への像変換可能であることであり、例えば球体面への撮像や投影、球面スクリーンへの投影が可能となる。通常、DMD や LCD といった投影素子や、CCD および CMOS といった撮像素子は平面形状を有しており、任意の球面形状に形を変えることは不可能である。そのことから、新しく一次結像面を有するリレー光学系の結像面にミラーを配置することによる像形状変換について提案する。一次結像面に配置したミラーによる空中像形状を変換し、球面空中像もしくは円筒面空中像を形成する。その空中像を投影レンズにより球面もしくは円筒面に投影する。撮像系においては、球面もしくは円筒面被写体を撮像レンズにより撮像し、一次結像面ミラーにより平面像に変換する。その変換像を平面の結像関係として、撮像素子に結像する。

4.2 共役結像面ミラーによる像面補正の原理

4.2.1 結像面ミラーによる反射像の形成位置

図 4-1 に示すように、テレセントリックな光学系において結像面近傍の軸上像位置および軸外像位置に対して、光軸に垂直にミラーを配置する条件を考える。それぞれのミラーは結像レンズに対して異なる距離で配置する。軸上付近に対しては、反射面が結像面と一致する位置にて配置し、軸外像に対してはレンズに近い位置で配置する。

その場合における反射像の位置を図 4-2 に示す。軸上付近に配置したミラーにおいては、反射面と結像面が一致していることから、そのままの像位置を維持した状態で反射光線を形成する。一方、結像レンズに近い位置でミラーを配置した軸外像においては、反射により像位置がレンズに近い位置で形成される。その像を一次像として光線が広がっていく。

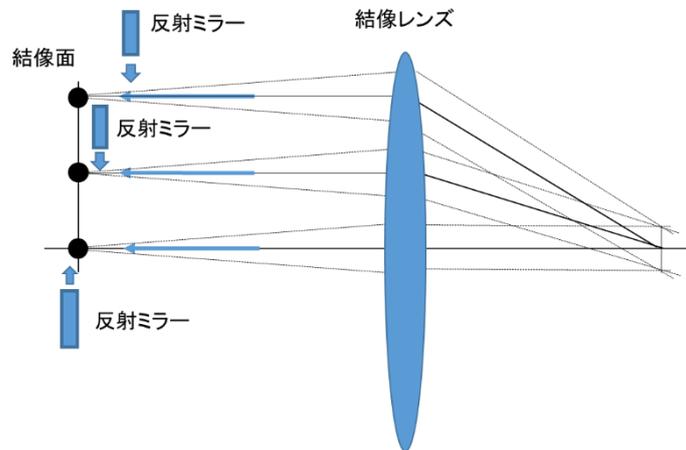


図 4-1 テレセントリック光学系に配置するミラー

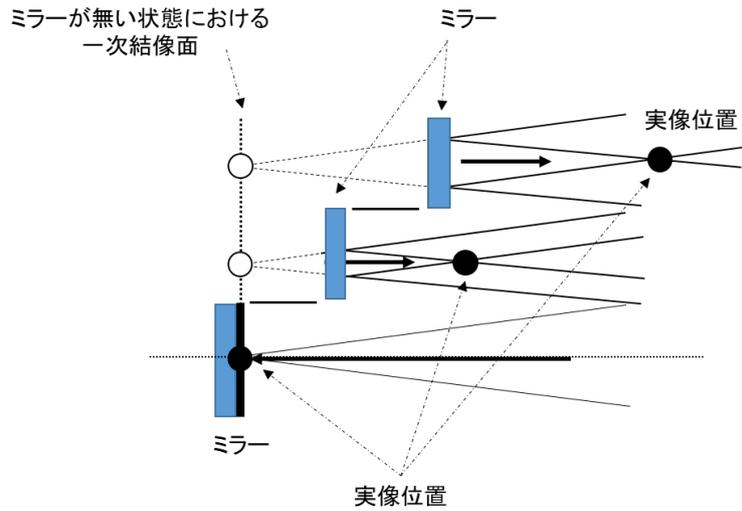


図 4-2 結像面に配置したミラーによる反射像の位置関係

4.2.2 一次結像面に配置した球面ミラーによる像形成

このように、結像位置に対してミラーを配置することにより、像形状の変換が可能となる。図 4-2 では、離散的にミラーを配置した場合の結果を示した。同様の考え方を、球面もしくは円筒面ミラーを配置した際に拡張した場合、像位置がどのように変化するかを図 4-3 に示す。

ミラー面での反射により、連続的に像面位置が変化していき、一次空中像として結像することとなる。これにより結像レンズによる平面物体を平面像として結像する関係を、平面物体を球面もしくは円筒面として像形成することが可能となる。

一次結像面の曲率半径を " r " とし、式(2.1)より算出が可能であり、次の結果を得る。

$$r = \frac{y^2 + \Delta x^2}{2(\Delta x)} \quad (4-1)$$

光学シミュレーションに当たり、表 4-1 に示す条件にて、一次結像面の曲率を計算した。その結果として一次結像面高さ " y " 毎の一次像曲率 " r " の関係を、図 4-4 に示す。

一次結像面の高さが増すごとに曲率半径が変化していくことが読み取れる。結果より近軸付近においては $r=25\text{mm}$ となっており、この値をシミュレーションにて使用する。

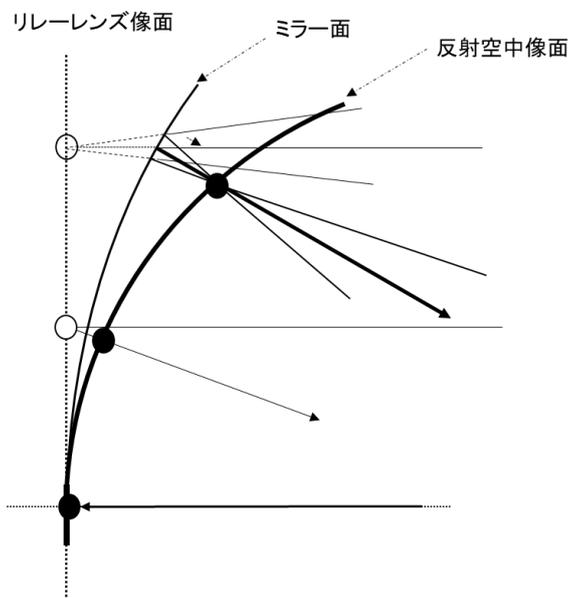


図 4-3 結像面に配置した球面ミラーによる反射空中像

表 4-1 シミュレーション条件

投影面半径 R	投影レンズ	光学倍率 β
	焦点距離 f	
25.00	50.00	2.00

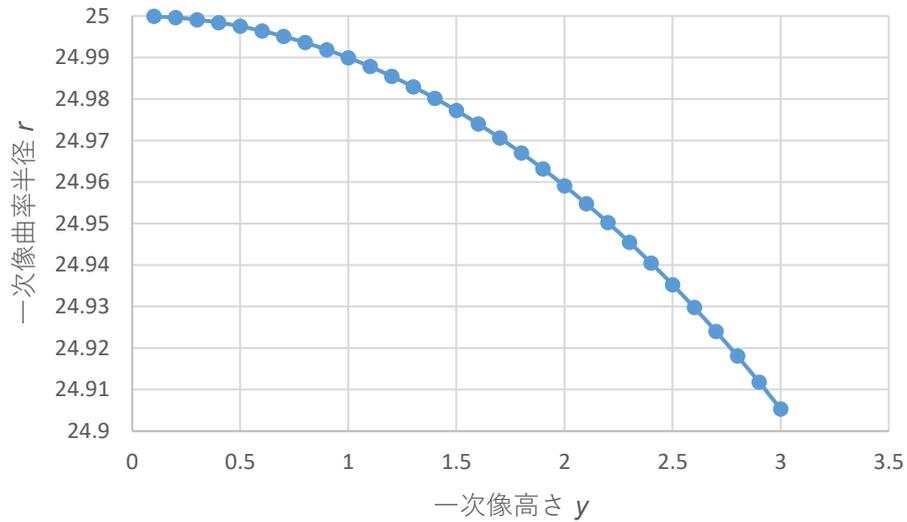


図 4-4 シミュレーションによる一次結像面曲率半径

4.2.3 一次結像面に配置した球面ミラーのビネッティング条件

テレセントリック光学系において結像位置に平面ミラーを配置することにより、主光線角度は変化することなく反射を行うことが可能となる。しかし、球面もしくは円筒面ミラーを配置した場合、反射により主光線方向が変化することとなる。2つの結像レンズによる点間の結像関係を考える。「物体」-「リレーレンズ」-「ビームスプリッタ」-「一次結像面」-「投影レンズもしくは結像レンズ」による配置とし、一次結像面にミラーを配置する。図 4-3 のように凹面ミラーを配置した場合、主光線は光軸方向に向くこととなり、角度によっては「投影レンズもしくは結像レンズ」に対して、ビネッティングを生じるもしくは入射しない条件となる。入射および反射による光線の取り込み状態を図 4-5 に示す。

反射面におけるミラー面角度を θ_m 、リレーレンズの Numerical Aperture (N.A.)を $N.A.r = \sin \theta_r$ 、投影レンズもしくは撮像レンズの N.A.を $N.A.i = \sin \theta_i$ とした場合、ビネッティングの無い状態で投影もしくは撮像レンズに入射する条件は、

$$\sin \theta_i \geq \sin \theta_r + \sin(2\theta_m) \quad (4-2)$$

となる。

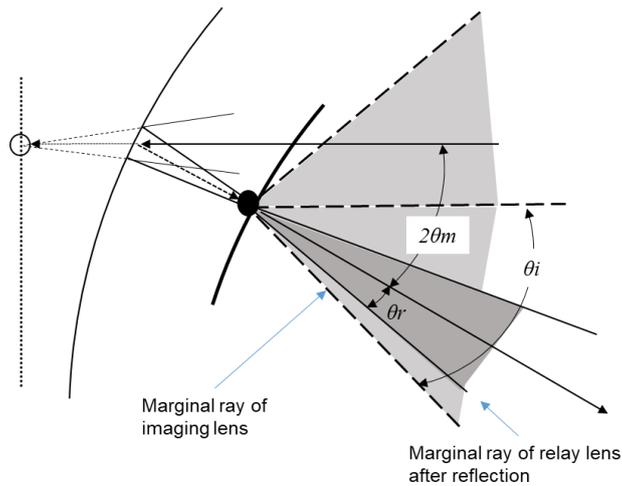


図 4-5 一次結像面ミラーにおける反射後の投影レンズ入射条件

4.3 共役結像面ミラー補正による球面投影面に対する光学シミュレーション

本節では、一次結像面にミラーを配置した際の光学系に関する、光学設計ソフトによるシミュレーション結果について、MTF および像シミュレーションの結果を述べる。

4.3.1 光学シミュレーションにおける光学系配置

4.2 節にて述べた共役結像面ミラーによる像面湾曲補正について、光学設計ソフトウェアによるシミュレーションを行う。シミュレーションには Code-V を使用した。シミュレーションに使用した光学系配置を図 4-6 に示す。光学系は投影光学系を想定し、物体、リレーレンズ、ビームスプリッタ、一次結像面ミラー、投影レンズおよび投影面からなる光学系である。物体から出た光線はリレーレンズにより一次結像面を形成する。一次結像面は投影レンズの物体としての位置づけとなり、投影面に投影される。一次結像面に反射ミラーを配置するが、リレーレンズと投影レンズの光軸を合わせるためにビームスプリッタを配置している。

リレーレンズの一次結像面側 N.A.を $N.A. = 0.1$ としている。また投影レンズの一次結像面側 N.A は $N.A. = 0.278$ となる。F 値に換算すると F1.8 となるが、これは無限遠被写体での値であり、

今回のシミュレーション条件である有限系の結像関係においては、投影倍率からの換算による、実効値への変換が必要となる。投影倍率は 0.5 倍としている。

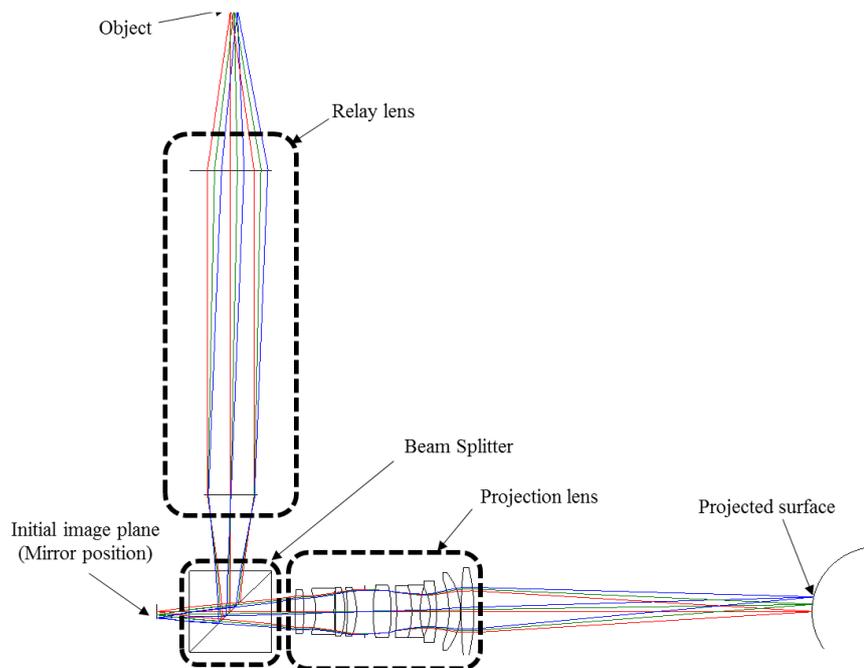


図 4-6 光学系配置図

4.3.2 光学シミュレーションによる MTF 評価

物体高 $H = 3.0\text{mm}$ を最大として、平面物体を平面投影面に投影した場合の MTF シミュレーション結果を図 4-7 に示す。一次結像面ミラーには平面を想定した光学配置としており、横軸にデフォーカス、縦軸に MTF とした結果となる。シミュレーション結果より、軸上と軸外において、ピーク位置が Defocus Position 0mm の位置で一致しており、このことは平面投影面に対して中心と周辺部で同一の面内で投影が行われていることを示している。MTF 計算結果は、 20lp/mm としている

次に、球面に投影する場合を想定する。投影面を $R = 25\text{mm}$ の凸球状投影面を考え、平面物体を一次結像面に平面ミラーを配置した条件における投影像シミュレーション結果を図 4-8 に示す。

像高が高くなるにつれて、チャートのピークがマイナス方向にシフトしていることが読み取れる。これはソフトウェアシミュレーション上において、投影面を $R=25\text{mm}$ の凸球面として設定し、実際の投影像は平面として結像していることから、凸球面に対して投影像平面がレンズ側に出来ていることを表している。その差は約 0.9mm となっていることが、グラフから読み取ることが出来る。投影倍率が 0.45 倍であることから、物体高さ $h=3\text{mm}$ における投影像高さは、 $3/0.45=6.67\text{mm}$ となる。 $R=25\text{mm}$ において平面との差は、 0.91mm となり、MTF ピークのズレ量と一致する。軸上においてもっとも解像力の高い位置を基準とした場合、物体高さ $h=3\text{mm}$ における MTF 値は、20%まで低下している。

周辺像と中心像が球面上で同じ像面をもつために、一次結像面ミラーを曲面とする。4.2 節にて計算した一次結像面 $r_1=25\text{mm}$ より、ミラー曲率半径 $r_m=50\text{mm}$ とする。MTF シミュレーション結果を図 4-9 に示す。

$R=25\text{mm}$ の投影面を想定した結果として、軸上 MTF のピークと軸外 MTF のピークがデフォーカス 0mm の位置で一致していることが分かる。このことは球面投影面に対して投影像が一致していることを表しており、球面への投影が効果的に行われていることを示している。

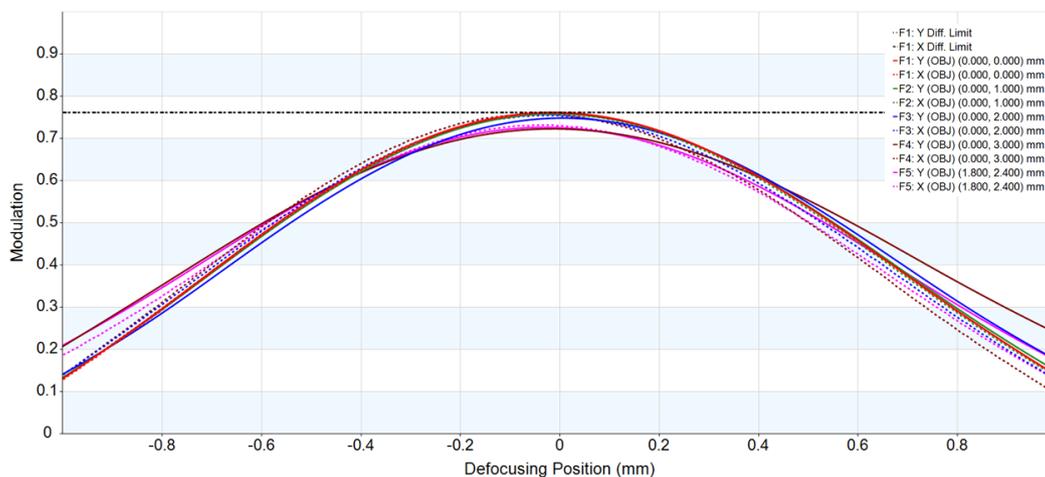


図 4-7 平面物体・平面ミラー・平面投影面の組み合わせにおける MTF

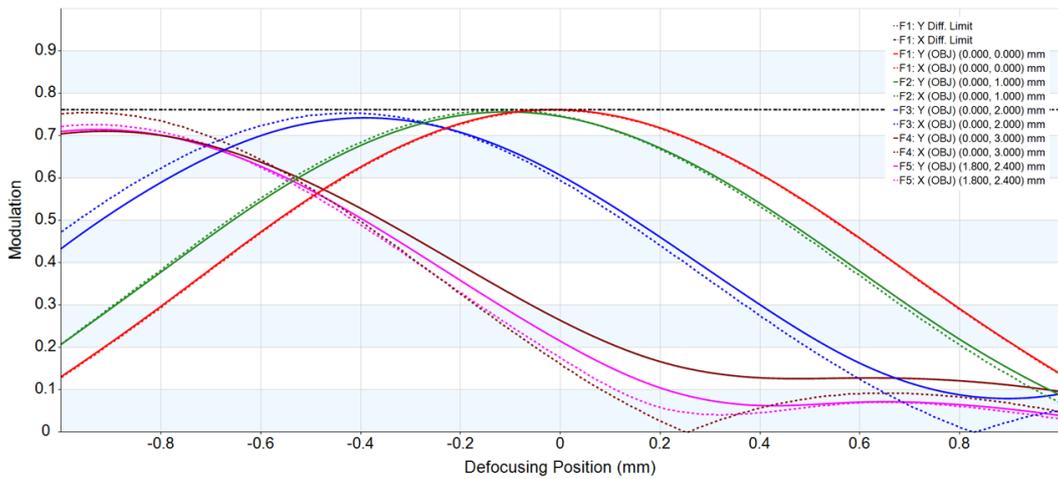


図 4-8 平面物体・平面ミラー・球面投影面の組み合わせにおける MTF

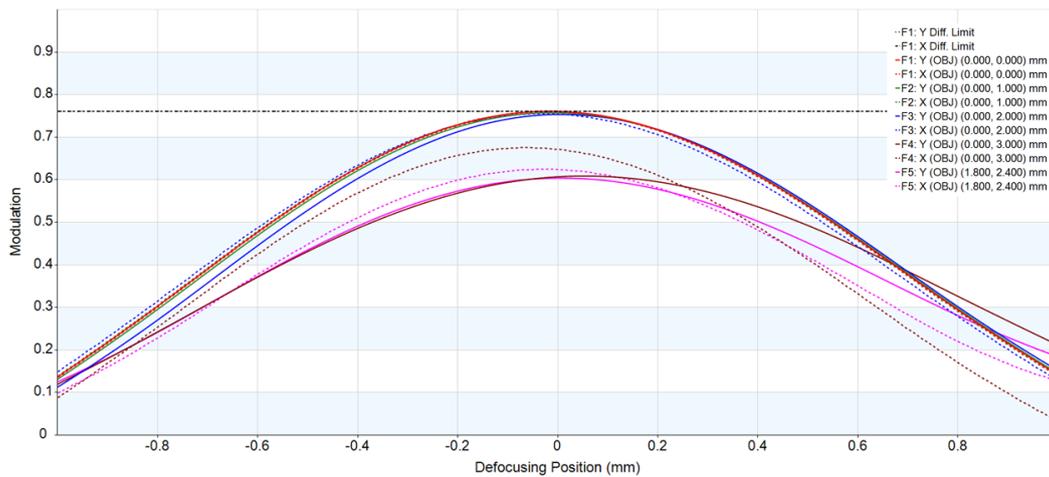


図 4-9 平面物体・球面ミラー・球面投影面の組み合わせにおける MTF

4.3.3 像シミュレーションによる補正効果の評価

効果を視覚的に確認するため、光学設計ソフトウェアに実装されている2次元像シミュレーション機能を利用する。光学系からの点像関数を計算し、入力画像に対して演算を行い、実際の画像に対しての効果を確認する機能である。入力画像には、図 4-10 に示す解像力チャートを使用する。

また、光学設計ソフトウェアによるシミュレーションの中心部における結果を図 4-11 に示す。

それぞれ、(a)は「平面物体」、「平面ミラー」、「平面投影面」の組み合わせによる結果。(b)は、「平面物体」、「平面ミラー」、「球面投影面」の組み合わせによる結果。(c)は、「平面物体」、「球面ミラー」、「球面投影面」による結果となる。MTFの計算では、中心付近においては、それぞれの条件において大きな変化が無いが、像シミュレーションにおいても同様の結果となり、一次結像面ミラーの形状および投影面の形状によらず、中心付近においては同様の結果を得られることがシミュレーションからわかる。

次に周辺部の比較を行う。シミュレーションの結果を、図 4-12 に示す。

中心部での結果と同様に、(a)は「平面物体」、「平面ミラー」、「平面投影面」の組み合わせによる結果。(b)は、「平面物体」、「平面ミラー」、「球面投影面」の組み合わせによる結果。(c)は、「平面物体」、「球面ミラー」、「球面投影面」による結果となる。MTFでの計算結果においては、(a)の平面どうしの組み合わせにおいては、周辺部のMTFピークの像面位置が中心部と一致していたことから、周辺部においても良好なコントラストが得られることが予想できる。結果からも像のボケは見られないことが分かる。

次に、投影面を球面とした場合の周辺部の結果(b)を見ると、(a)と比較した場合、コントラストが低下していることが見て取れる。これは投影像が平面となっているのに対して、投影面が球面としているため、球面上においては像ボケが発生し、像面が一致していないことを表している。次に一次結像面ミラーを球面とした場合のシミュレーション結果(c)の周辺部を見ると、(a)と同程度の画像であることが見て取れる。これは、一次結像面ミラーを球面に置き換えたことで結像面が球面となり、球面である投影面と一致したことを意味している。

このように、MTFおよび像シミュレーションの結果から、一次結像面ミラーを球面に置き換えることが、球面投影面に対して良好な投影像を投影することが可能となることが分かった。

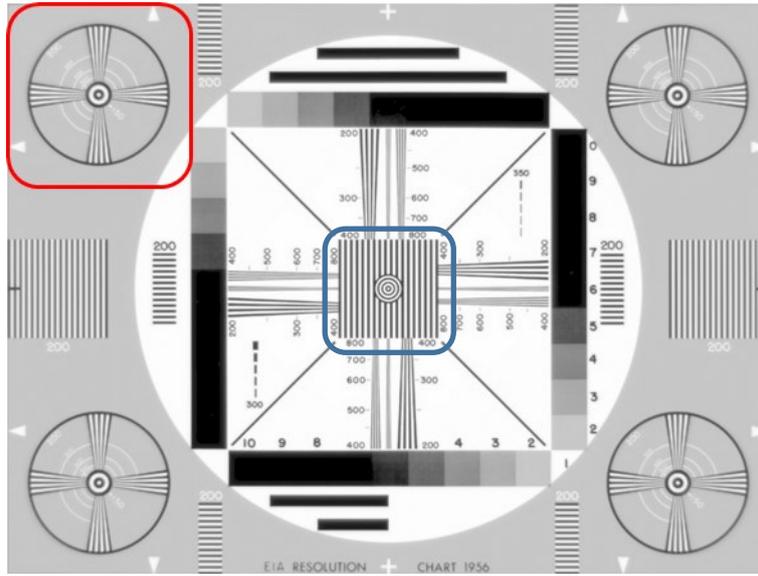


図 4-10 像シミュレーションチャート

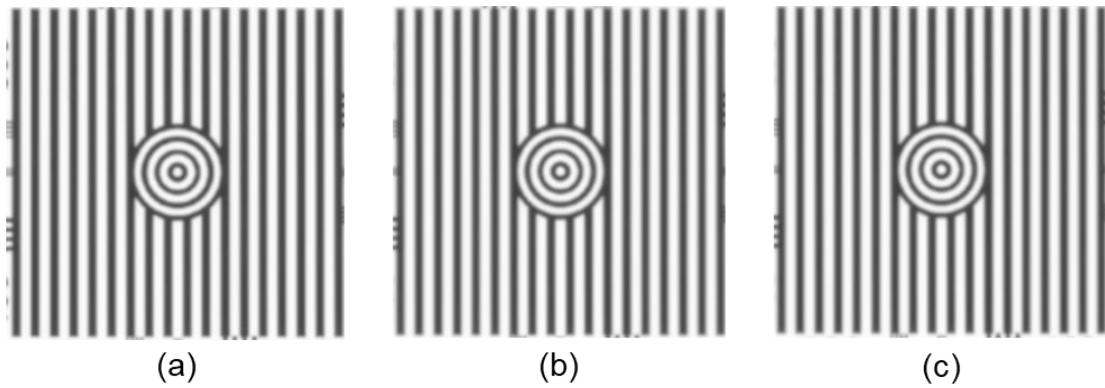


図 4-11 像シミュレーションによる中心部の比較 : (a) 平面ミラーによる平面への結像結果、
(b) 平面ミラーによる球面への結像結果、(c) 球面ミラーによる球面への結像結果

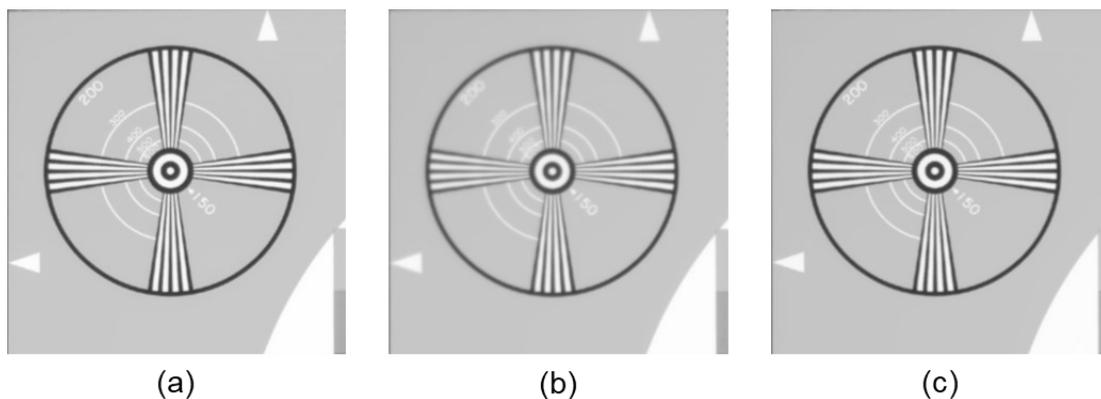


図 4-12 像シミュレーションによる周辺部の比較 : (a) 平面ミラーによる平面への結像結果、
(b) 平面ミラーによる球面への結像結果、(c) 球面ミラーによる球面への結像結果

4.4 共役結像面ミラー補正の球面投影面に対する投影実験方法

シミュレーションの結果を踏まえ、実際の光学系を使用し、投影像確認の実験を行った。実験光学系を図 4-13 に示す。

実験光学系は、物体に USAF テストチャートを使用している。その物体をリレーレンズにて結像させる。リレーレンズによる結像は、像側レンズと像の間にビームスプリッタを配置し、光路を 90° 折り曲げる形としている。それにより投影レンズの光軸とリレーレンズの光軸を一致させることが可能となっている。リレーレンズによる結像面は一次結像面として、投影レンズの物体に置き換えられる。その一次結像面にミラーを配置することにより、反射した光線は再びビームスプリッタを通り、投影レンズを通して投影面に像を形成する。投影像は、CMOS カメラにて撮像し評価する。

実験に使用した機材を、表 4-2 に示す。

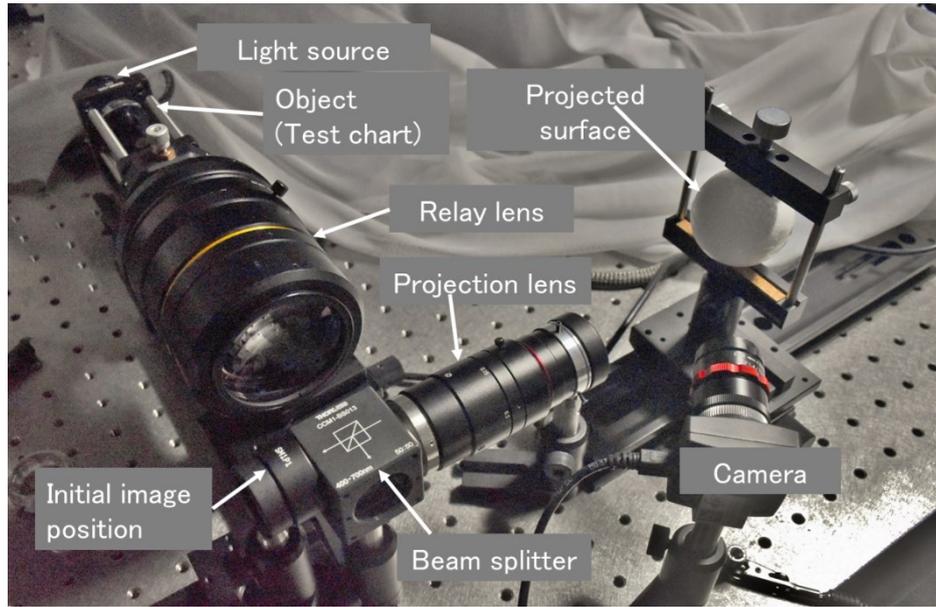


图 4-13 实验光学系

表 4-2 实验器材

Name	Product name	Brand
Test chart	USAF Positive Test Chart	----
Relay lens	LM1119TC	Kowa
Beam splitter	50:50 Non-Polarizing Beamsplitter Cube	Thorlabs
Mirror	Φ1" Silver-Corted Concave Mirror f=25.0mm	Thorlabs
Projection lens	LM50JC10M	Kowa
CMOS camera	uEye LE	Kowa

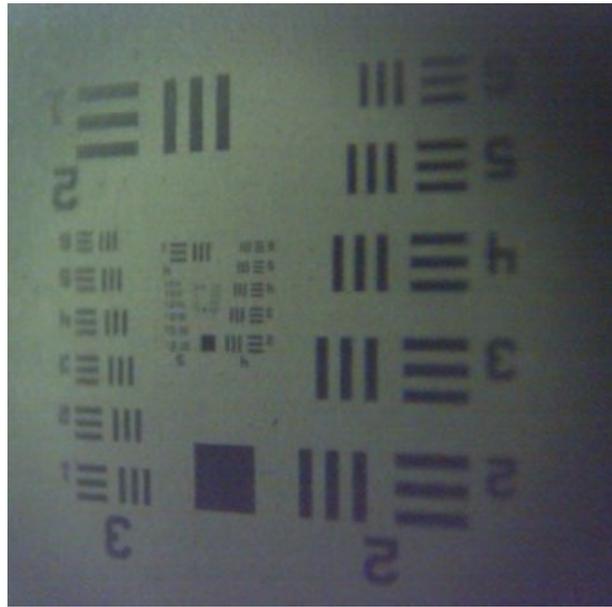
4.5 共役結像面ミラー補正の球面投影面に対する投影実験結果

実験機による投影結果を、図 4-14 に示す。一次結像面に平面ミラー、投影面を平面とした場合の結果を(a)に、投影面を球面とした場合の結果を(b)に、投影面を球面とし、投影面曲率に最適となる球面ミラーを一次結像面に配置した場合の結果を(c)に示す。

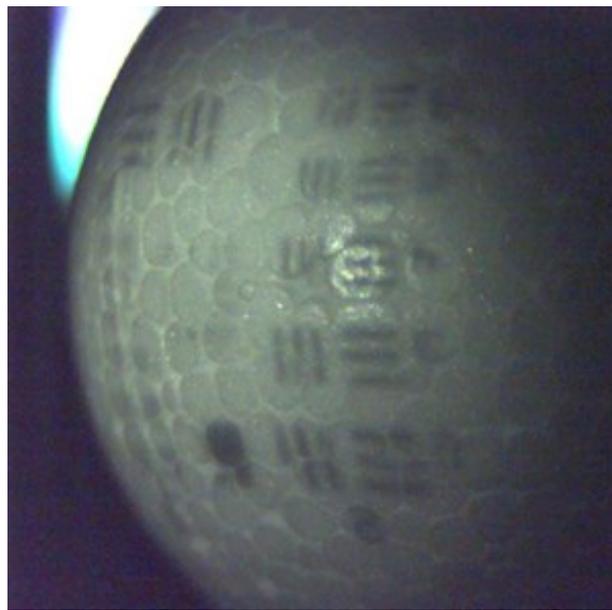
それぞれ、球面投影面に投影した場合における、周辺部の投影結果を拡大したものを、図 4-15 に示す。投影面を球面とし、平面ミラーを使用した場合の投影像結果を(a)に、投影面を球面とし、投影面曲率に最適となる球面ミラーを一次結像面に配置した場合の投影像結果を(b)に示す。

球面投影面に対して、平面ミラーを使用した場合、像面湾曲の補正による球面投影面へのフィッティングが行われていない状態にある。そのため、白黒チャートのエッジ部分が鮮明でない状態にある。一方、一次結像面に球面ミラーを配置した投影像の結果においては、平面ミラー使用時と比較して、白黒チャートのエッジ部分のコントラストが向上していることが見て取れる。これは、一次結像面に配置した球面ミラーにより、一次像が平面から球面へと変換され、その球面像を物体として投影面にプロジェクションした結果である。

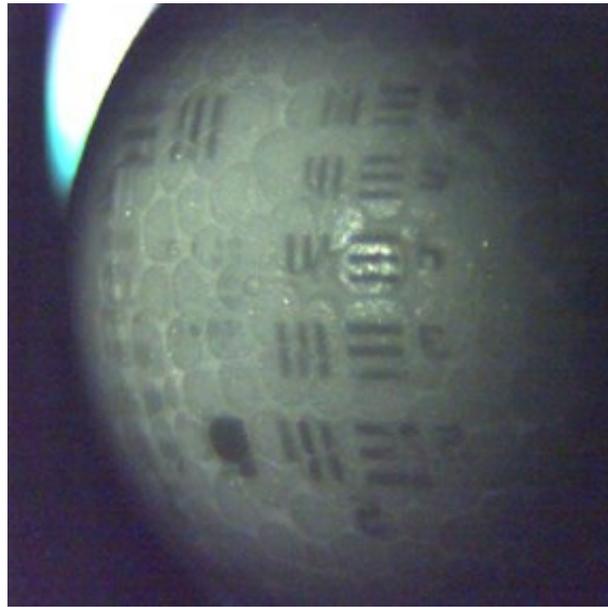
この結果より、一次結像面に配置した球面ミラーにより、球面形状へ像面を合わせる事が可能であるという結果が得られた。



(a)

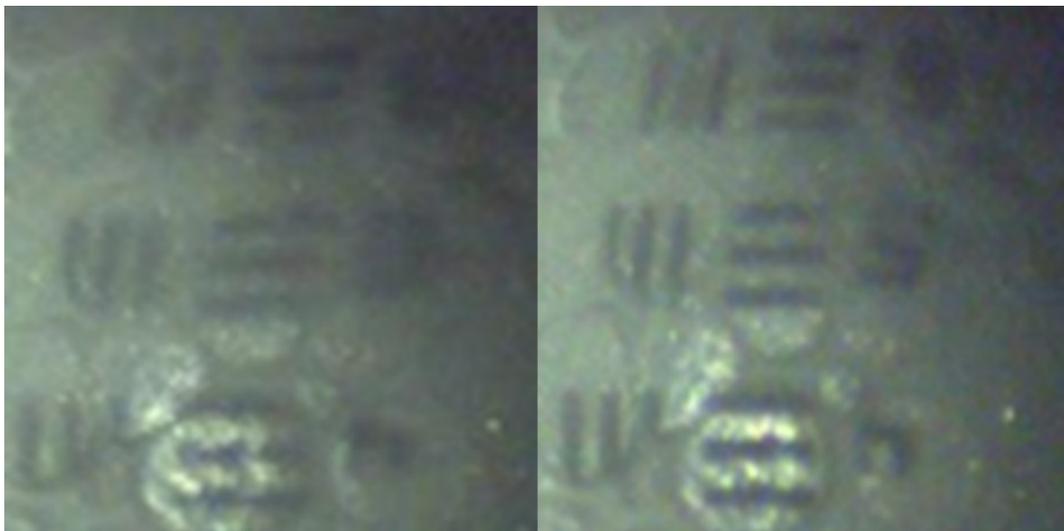


(b)



(c)

図 4-14 実験光学系による投影像 : (a) 平面ミラーによる平面への投影、(b) 平面ミラーによる球面への投影、(c) 球面ミラーによる球面への投影



(a)

(b)

図 4-15 周辺部の比較 : (a) 平面ミラーによる球面への投影、(b) 球面ミラーによる球面への投影

4.6 共役結像面ミラー補正の球面投影面における MTF 特性

4.6.1 測定光学系および配置

4.4 節の実験光学系により、投影像の撮像結果による比較を 4.5 節にて行った。投影結果の数値比較のために、MTF による測定を行う。図 4-16 に実験光学系の配置図を、図 4-17 に実際の実験光学系の写真を示す。MTF 評価には、斜めナイフエッジ法を利用する。投影面となる位置に積分球と組み合わせたナイフエッジを配置する。そのナイフエッジ像を撮影し、その結果を変換する。

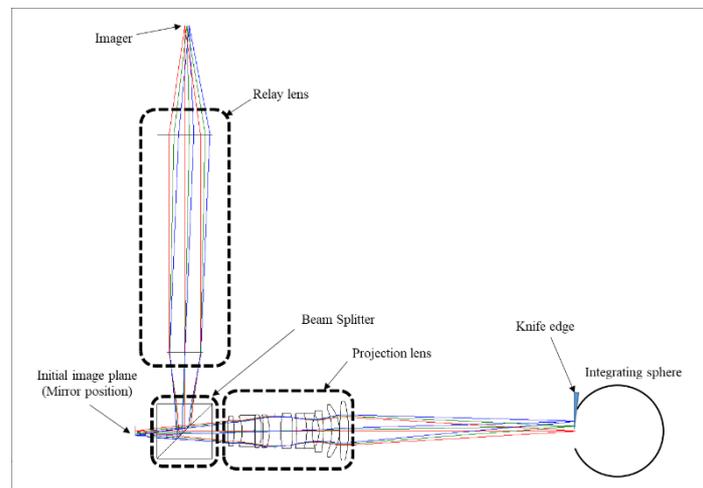


図 4-16 光学系配置図

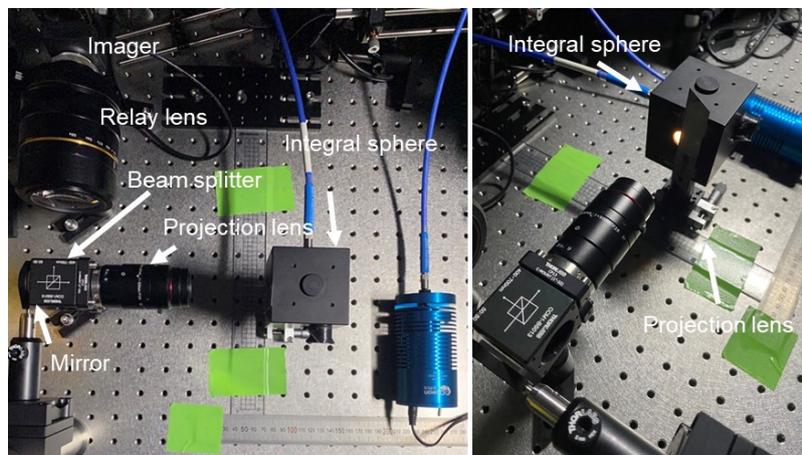


図 4-17 斜めナイフエッジによる MTF 測定光学系

4.6.2 斜めナイフエッジ法

測定に使用した斜めナイフエッジ法について示す。光源と組み合わせたナイフエッジが撮像素子上にて斜めとなるよう、撮像素子を配置する。ナイフエッジ像の撮像素子上における状態を図 4-18 に示す。撮像素子間隔を p とし、ナイフエッジ傾きを θ とした場合、それぞれの像信号を一軸に投影した場合、各位置の距離はそれぞれ $p \sin \theta$ および $p \cos \theta$ として表される。得られた ESF (Edge Spread Function) 曲線を平均化し、そこから LSF (Line Spread Function) を求める。LSF は ESF の導関数として次の式で表される。

$$LSF(x) = \frac{d}{dx} ESF(x) \quad (4-3)$$

また、LSF のフーリエ変換により MTF を次の式により得る。

$$MTF(u) = |\hat{f}[LSF(x)]| \quad (4-4)$$

それぞれの変換における概念図を、図 4-19 に示す。(a) は ESF 曲線、(b) はエッジ曲線の導関数として表される LSF 曲線、(c) は LSF 曲線のフーリエ変換により得られる MTF 曲線である。

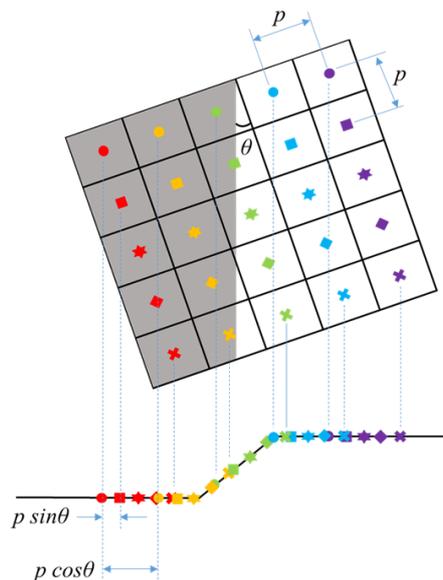


図 4-18 撮像素子上におけるナイフエッジ像

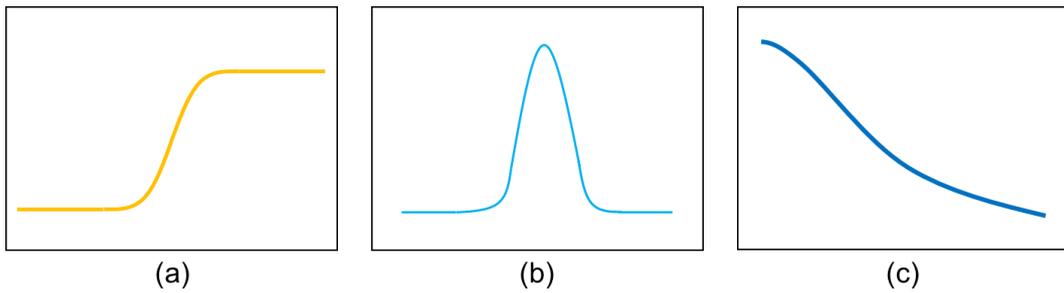


図 4-19 斜めナイフエッジ法による各関数 (a) ESF 曲線、(b) LSF 曲線、(c) MTF 曲線

4.6.3 斜めナイフエッジ法による MTF 測定結果

斜めナイフエッジ法により、投影面において平面上および球面上での MTF 特性を測定した。測定位置を図 4-20 に示す。測定位置は座標として表しており、最適球面となる投影面曲率半径 $R=25\text{mm}$ を含む位置としている。

測定結果を図 4-21 に示す。グラフは横軸に空間周波数、縦軸に MTF 値としている。球面投影面上の各点における実線のグラフが最も高い値を示し、その前後となる破線および一点鎖線のグラフが低い値となっている。このことは、球面投影面付近をピークとしてその前後のデフォーカス位置においてコントラストが低下しており、一次結像面ミラーによる球面への像補正が効果的に行われていることを示している。

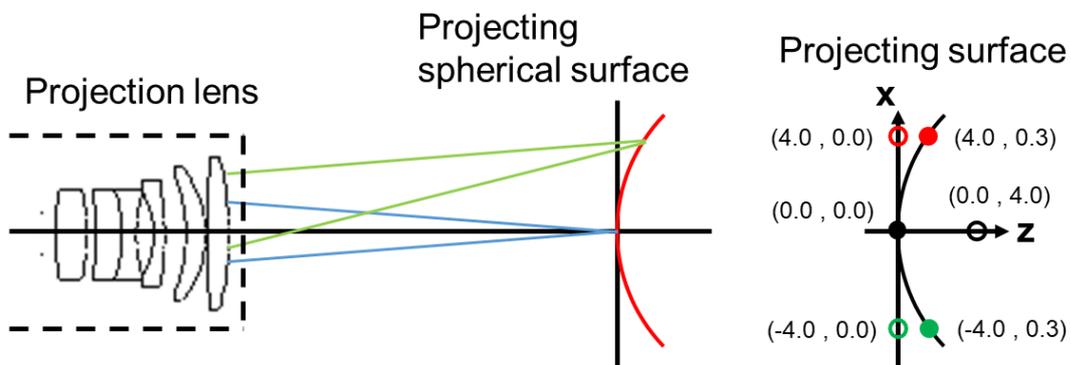


図 4-20 斜めナイフエッジ法による測定位置

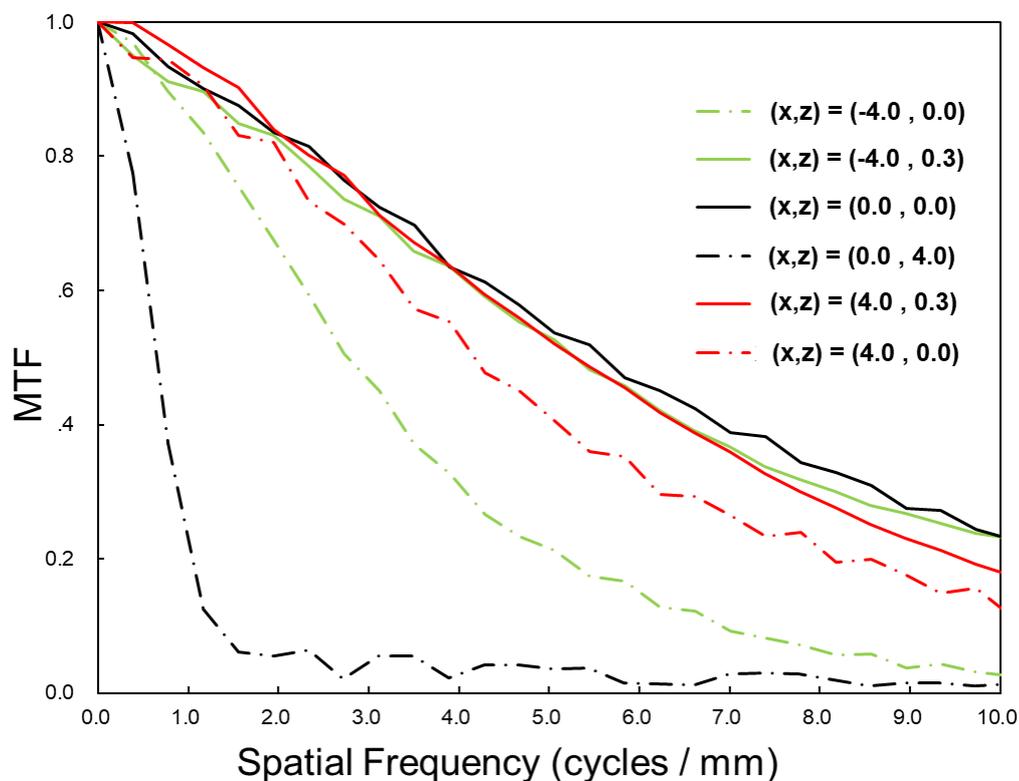


図 4-21 MTF測定結果

4.7 おわりに

物体および像と共役にある中間点に、一次結像面をリレーレンズ系により形成する3点間の結像系において、球面全体にコントラストの高い像を投影する光学系を提案した。投影レンズの共役関係から、一次結像面が投影面の曲率および倍率より計算される曲面形状の空中像となっていれば、球面同士の結像関係を形成可能であることを示した。

一次結像面を曲面形状とするために、一次結像面に反射ミラーを配置し、そのミラーを球面形状とすることにより、反射像を球面形状とすることが可能であることを提案した。計算結果より得られた形状から、光学設計ソフトウェアによるシミュレーションを行い、球面投影面に対して一次結像面ミラーが像面湾曲をコントロールし、球面投影面にフィットした投影を行うことが可能であることを確認した。

そのシミュレーション結果より、実際の光学系を用いて投影実験を行い、一次結像面ミラーを平面から球面に変えることにより、球面投影面に対して投影像の質を改善できることを確認した。また斜めナイフエッジ法による MTF 測定により定量的な変化を測定し、球面投影面付近にてコントラストが上昇していることを確認した。

これらは、凹形状の球面ミラーと凸形状の球面投影面による結果であるが、リレーレンズの射出 N.A.と、投影レンズの入射 N.A.の制約関係を維持していれば、凸形状の球面ミラーと凹形状の球面投影面においても、同様の結果が得られることが予想できる。

第5章 撮像光学系の光軸に対して傾きを持つ 被写体に対する像補正

5.1 はじめに

第4章にて、リレーレンズおよび投影レンズからなる一次結像面を有する結像光学系において、球面投影面にコントラストの高い像を投影することが可能であること示した。一次結像面に、投影面の曲率半径と投影レンズ倍率から計算される形状に対応したミラーを配置することにより、投影レンズによる結像関係を、「球面物体」 - 「球面像」の関係とし、投影面にフィットする形で投影像を形成した。

これは球面に対しての結果であったことから、軸対象な関係における結果であった。軸対象とならない条件、例えば物体に対して光学系の光軸が角度を持つ投影系および撮像系については、一般的にシャインプルーフ光学系が利用される。市販のカメラ用レンズなどにおいても、シャインプルーフ配置を利用して、ビルなどを撮影する斜めからの撮像に対して近距離側と遠距離側の全域でフォーカスのあった撮像を可能とするレンズが用意されている。交換式レンズの場合、ボディとレンズマウント面は平行であることから、レンズ自体に傾きを持たせることが可能な機構を有している。

シャインプルーフ光学系は、物体および像面を傾けることにより斜め方向の結像関係を得ることが可能であることから、本論文にて提案している一次結像面ミラーによる空中像に対しても、ミラーを光軸に対して角度を持たせることによる一次像の傾きにより、斜め方向からの撮影もしくは投影が可能となることが考えられる。一般的には平面であるが、球面もしくは円筒面ミラーのシャインプルーフ配置により、三次元形状を持つ被写体のシャインプルーフ撮像について、またその一次結像面ミラーによるシャインプルーフ配置による深度方向変換について論ずる。

5.2 シャインプルーフ光学系の原理

一般的な有限結像による投影光学系を考える場合、投影レンズを基準としてその光軸に対して垂直になる状態で投影素子を配置し、平面のスクリーンに投影することが一般的である。物体と像は平行な関係にあり、光軸は物体および像に対して垂直となっている。

一方、投影面に対して垂直とならない斜め方向からの投影もしくは撮影を行う場合、投影物体もしくは撮像素子を光軸に対して傾ける必要がある。それにより、傾きをもつ各周辺部においても共役関係を維持し、像を得ることが可能となる。

シャインプルーフによる光学配置を、図 5-1 に示す。レンズから物体までの距離を L 、レンズから像までの距離を L' 、物体の投影レンズ光軸に対する傾きを α 、像の投影レンズ光軸に対する傾きを β とすると、傾き α と β の関係は、光学倍率を m として、式(5.1)に示す関係となり、その比は光学倍率として表される。

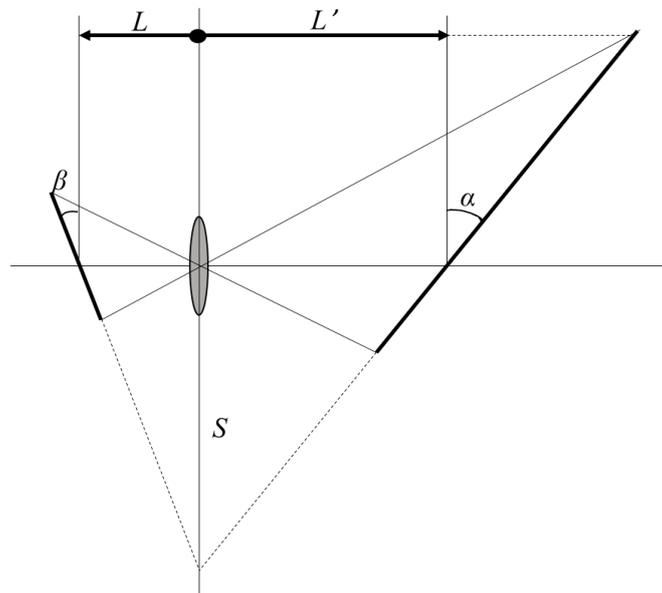


図 5-1 シャインプルーフ光学系の配置

$$\frac{\tan(\alpha)}{\tan(\beta)} = \frac{L'}{L} = \frac{y'}{y} = m \quad (5-1)$$

5.3 一次結像面ミラーの傾きによる空中像面の変換

一次結像面に配置したミラーにより、ミラー面に入射した光線はミラー面上に像を形成し、ミラー面を一次像として、次の光学系の物体としての位置づけとなる。第 4 章においてミラーが球面もしくは円筒面とした場合の、一次結像面ミラーによる反射像について述べた。シャインプルフ配置を考える場合、一次結像面ミラーを傾けることが必要となる。それによりミラー面で反射した像は、更に傾きを持った空中像となる。その状態を図 5-2 に示す。

ミラーでの反射により一次像が形成されることから、一次像の光軸に対する角度はミラー角度の 2 倍になると考えられる。

光学倍率 0.5 倍の系を想定し、像周辺部におけるピークの差を Δ 、各物体面角度 α における一次結像面ミラー角度 β とした場合の、ミラー角度 β と、ピークの差を Δ とした場合の MTF ピーク差の関係を図 5-3 に示す。

物体面のシャインプルフ角度を、2.5deg から 10.0deg まで比較している。一次結像面ミラーが傾きを持つごとに、像中心と周辺位置のズレ量は小さくなってき、ズレ量が 0 となるのは概ねミラー角度の 1/4 となっていることが読み取れる。一次結像面にミラーを配置しており、その反射によって一次像が形成されることから、倍率から計算されるシャインプルフ角度の半分になっていることが分かる。

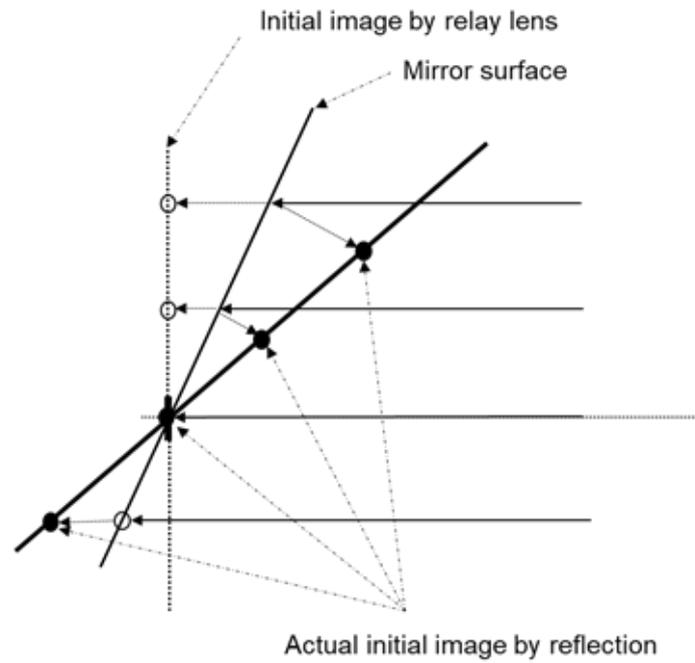


図 5-2 一次結像面ミラーが傾きを持つ場合の像位置

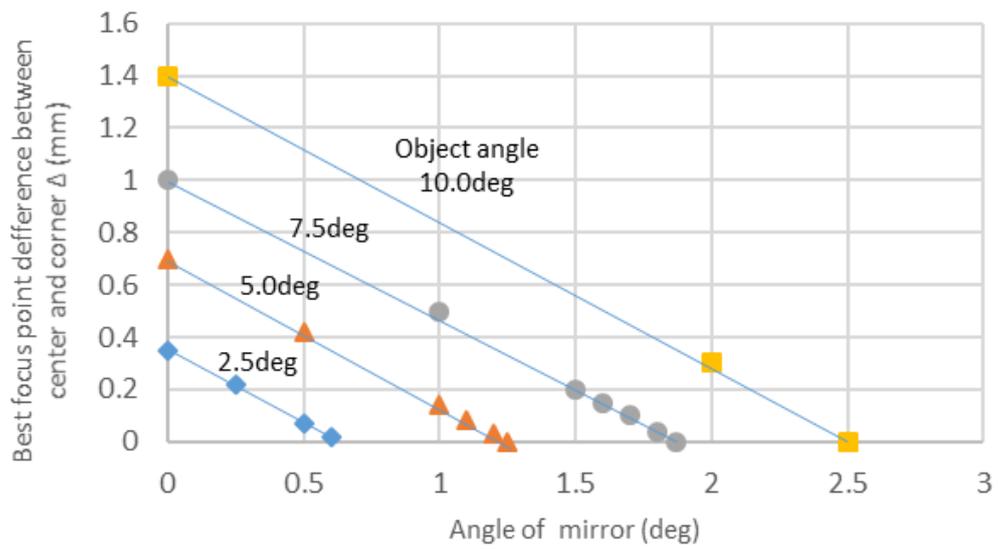


図 5-3 各投影面角度における一次結像面ミラーの角度と投影面ズレの関係

5.4 共役結像面ミラーの回転による像面補正の光学シミュレーション

本節では、一次結像面にミラーを配置したミラーの回転による、投影面もしくは撮影面との間においてシャインプルーフ配置とした際の、光学設計ソフトによるシミュレーション結果について、MTF および像シミュレーションの結果を述べる。

5.4.1 共役結像面ミラーの回転シミュレーションの光学系配置

シミュレーションに使用した光学配置を、図 5-4 に示す。光学系は、撮像光学系とする。

シミュレーションの光学配置は、第4章でのシミュレーションと同様に、2つの結像レンズ系による3点間の共役配置を有する。光学系は、球面もしくは円筒面被写体を撮像する系を想定する。球面もしくは円筒面を物体として想定し、結像レンズにより結像させる。この像は一次結像として、リレーレンズの物体に置き換わる。その物体をリレーレンズによって撮像素子面に結像させる。

シミュレーション光学系には理想レンズを想定し、リレーレンズ倍率を1倍、撮像レンズの倍率を0.5倍とした。またシミュレーションには光学設計ソフトウェアである Code-V を使用した。撮影物体面を円筒面とし、各パラメータを表 5-1 に示す。

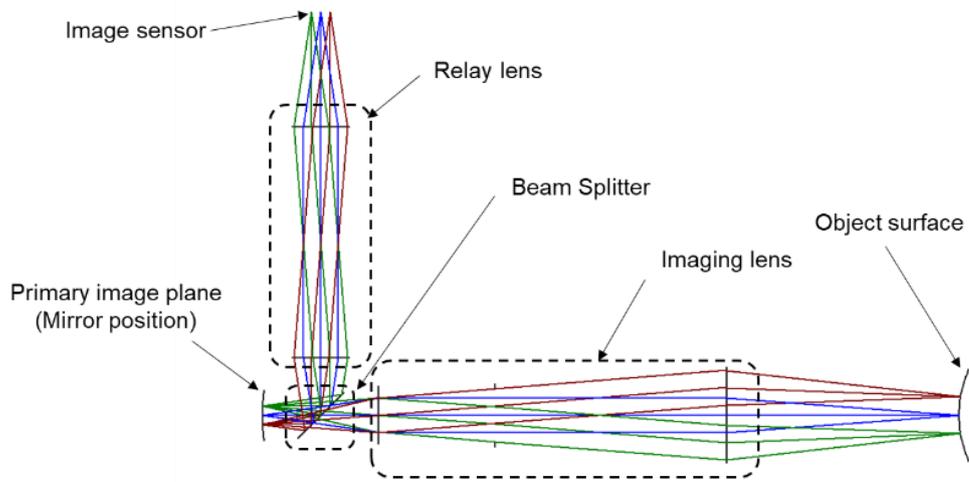


図 5-4 シミュレーション光学系

表 5-1 シミュレーション条件

投影面半径 R (円筒面)	一次結像面 ミラー曲率半径 r (円筒面)	投影レンズ 焦点距離 f	光学倍率 β
25.00	50.00	50.00	0.5

5.4.2 共役結像面ミラー回転による補正の MTF 特性

シャインプルフ条件となる撮影面傾きを 5deg、一次結像面ミラーの傾きを 0deg とした場合の、撮影面上 4lp/mm におけるデフォーカス MTF の計算結果を図 5-5 に示す。撮像範囲は、X=4mm、Y=4mm としている。投影面傾きを光軸に対して 5deg、一次結像面ミラーの傾きを 0deg とした場合、中心部より±0.7mm ほどのピーク位置ズレとなっていることが読み取れる。また MTF 値としては 20%の低下となっており、傾いた面上においては、中心部と周辺部で解像力に差があることを表している。

次に一次結像面ミラーの傾きを、図 5-3 から読み取れる 1.25deg とした場合の MTF 計算結果を、図 5-6 に示す。中心部と周辺部のピーク位置が一致しており、シャインプルフ角度が合っていることを表している。

同様に、投影面傾きを光軸に対して 10deg、一次結像面ミラーの傾きを 0deg とした結果を、図 5-7 に示す。投影面傾きが 5deg の場合における結果同様、像周辺部のピーク位置が中心像のピークと比べて、デフォーカス前後方向にズレを生じていることが読み取れる。その量は傾き量の増加のため 5deg の場合と比較して大きくなっており、±1.6mm 程度となっている。

また像中心位置での MTF 値を比較すると、周辺部においては 35%程度と大きく低下しており、実際の画像においてもコントラストの低下を認識できるレベルであろうと予想される。

次に図 5-3 より、傾き 10.0deg においてはミラー傾き角度が、2.5deg とすることで、投影面の傾きを補正出来ることが予想される。光学シミュレーションソフトにて、投影面傾きが 5.0deg の場合と同様の評価を行った。その結果を、図 5-8 に示す。

5.0deg での結果同様、像中心のピークと像周辺のピークがデフォーカスポジション 0 の位置で一致している結果を得た。これは、シャインプルフにより投影面傾きに対して投影像が一致し、像全体で投影面上において良好なコントラストを得ることが出来る結果を示している。

結果から、適切なシャインプルフ角度を設定することにより、円筒面形状を有する投影面に対して、像全体でフォーカスの一致した像を投影することが可能であることが確認できた。

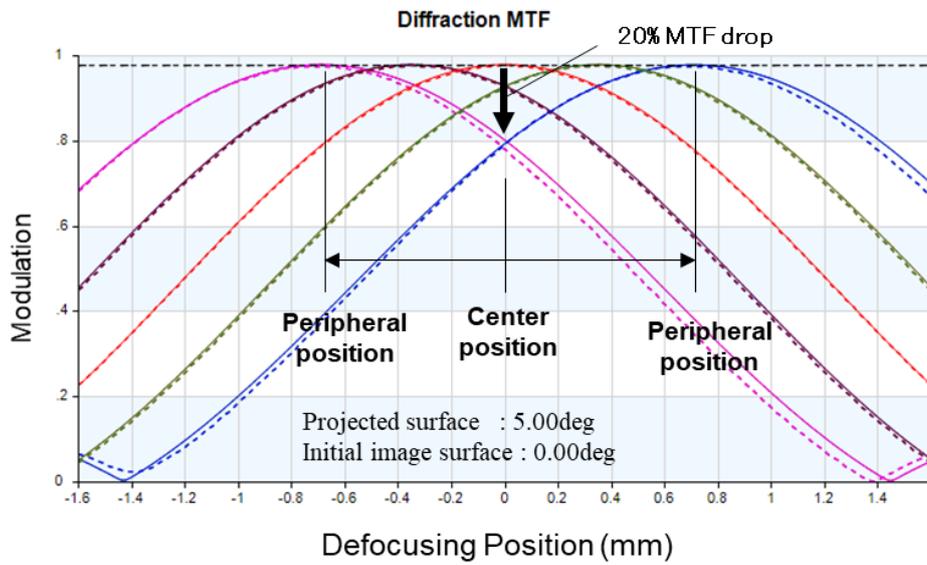


図 5-5 投影面角度 5.0deg および一次結像面角度 0.0deg における MTF

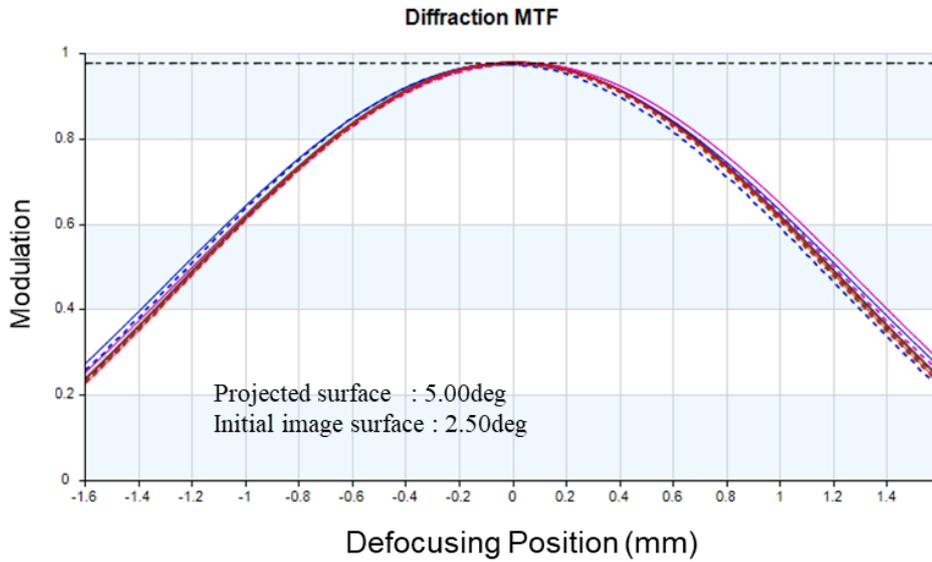


図 5-6 投影面角度 5.0deg および一次結像面角度 2.5deg における MTF

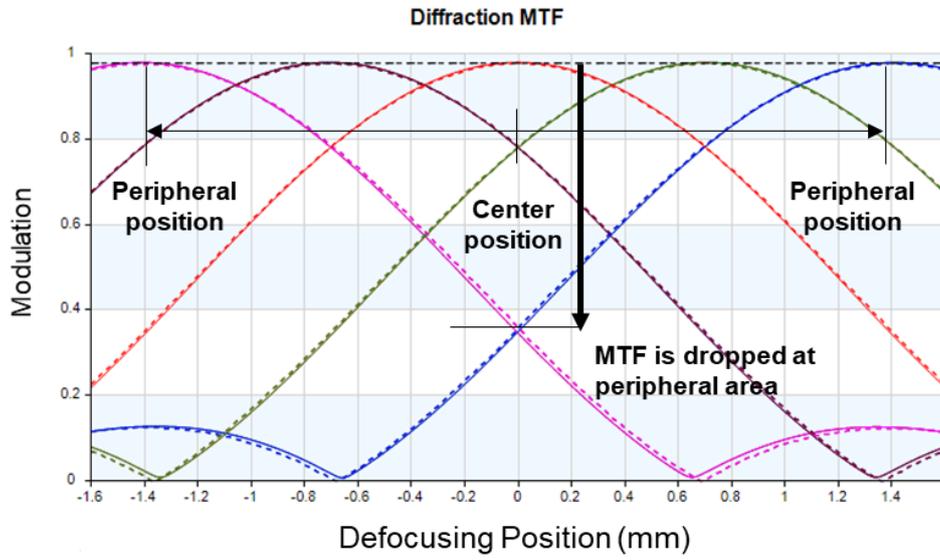


図 5-7 投影面角度 10.0deg および一次結像面角度 0.0deg における MTF

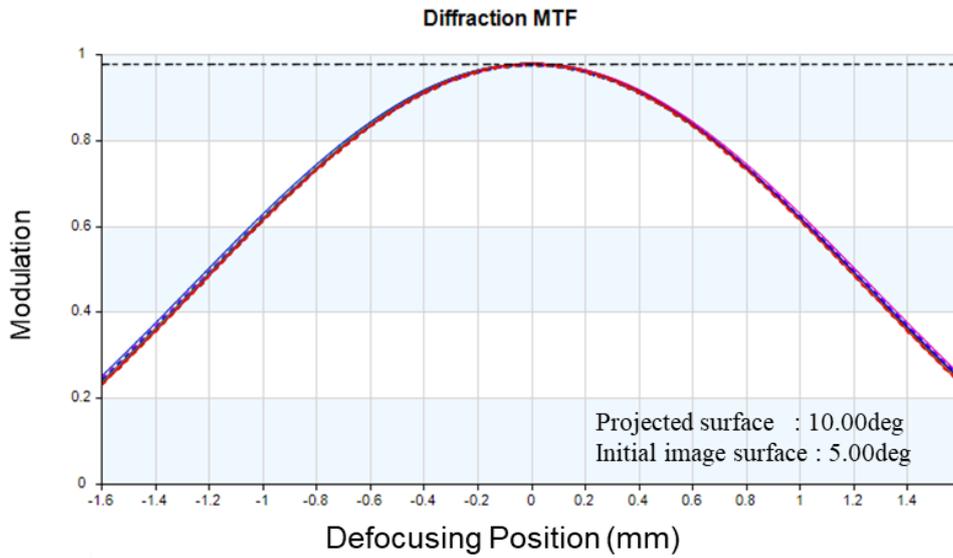


図 5-8 投影面角度 10.0deg および一次結像面角度 5.0deg における MTF

5.4.3 像シミュレーションによるシャインプルフ補正評価

次に、光学ソフトウェアに実装されている2次元像シミュレーション機能により、視覚的に像質の変化を確認した。投影面を円筒とし、投影面 $R=25\text{mm}$ とする。ミラー曲率半径を $r=50\text{mm}$ とし、投影面角度を 5.0deg とした。その結果を、図 5-9 に示す。水平方向中心がシャインプルフ回転軸となっていることから、赤枠で囲われた部分については、大きな変化は無い。しかし青枠で囲われた周辺部においては、コントラストが低下している。これは、シャインプルフ配置により傾きを持った系と光学結像面が一致していないことを表している。

次に、一次結像面ミラーを 1.25deg 傾けた状態でのシミュレーション結果を、図 5-10 に示す。一次結像面ミラーを傾けることにより、シャインプルフ配置となる。投影面傾きと一次結像面傾きの関係が一致することにより、投影面上でコントラストの改善が期待できる。シミュレーション結果より、中央水平軸付近の赤枠部は回転軸のため、変化は無いことが見て取れる。また周辺部を示す青枠内を確認すると、傾き 0deg の場合と比べて、改善していることが見て取れる。

このように、傾きを持つ円筒投影面に対して一次結像面に円筒ミラーを配置し、シャインプルフ配置に合わせるようミラー角度を決定することにより、画像全域で良好なコントラストの投影像が傾きを持つ円筒面に対して得られることが分かった。

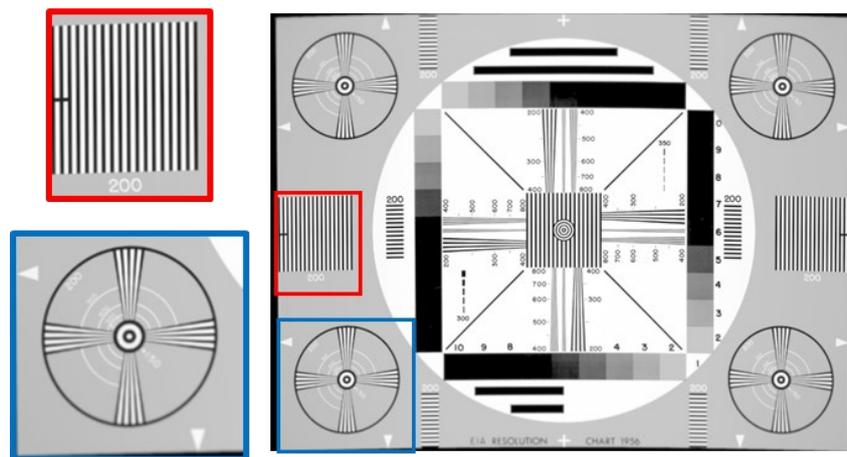


図 5-9 像シミュレーションによる一次結像面ミラー 0.0deg における計算結果

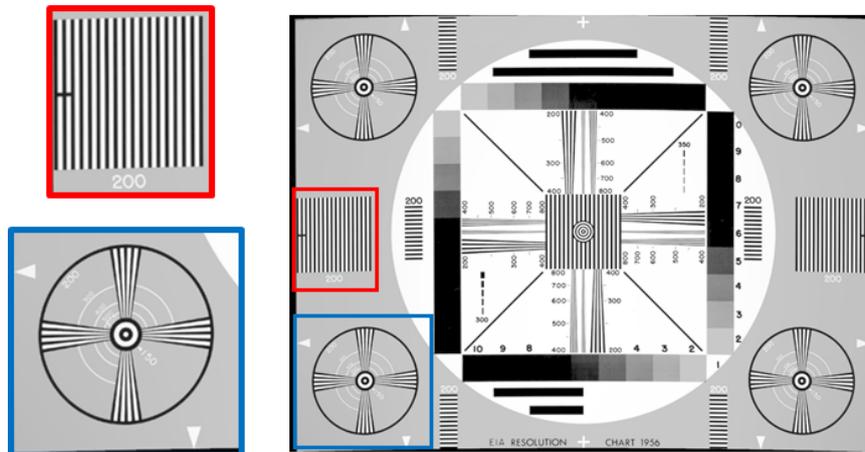


図 5-10 像シミュレーションによる一次結像面ミラー1.25deg における計算結果

5.5 共役結像面ミラーの回転による像面補正の検証

シミュレーションの結果を確認するため、実際の光学系を使用した投影像確認の実験を行った。実験光学系を図 5-11 に示す。図においては、投影系における状態にて説明しているが、テストチャートを撮像素子に変更し、投影面を撮影物体に変更することにより、撮像光学系としての評価も可能となっている。

実験光学系は、テストチャートを円筒面に投影する系となっている。物体面に USAF テストチャートを配置し、リレーレンズにより結像させる。リレーレンズの像側にはビームスプリッタを配置し、90deg 光軸を折り曲げる系としている。リレーレンズの結像面がビームスプリッタ後に形成されており、その像を一次結像面としている。一次結像面にミラーを配置し光線を反射させ、その光軸を投影光学系の光軸としている。投影面には円筒面を配置し、一次結像面のミラーも円筒形状ミラーとすることにより、投影面が深度方向に形状を持つ状態に対しても対応している。一次結像面ミラーおよび投影面は、回転可能な形で保持されており、任意の角度に回転可能となっている。

またチャートは図 5-12 で示すように、面内で x 方向および y 方向に移動が可能となっており、より広い範囲における投影像の確認が可能となっている。投影像は、CMOS カメラにて撮像し評価する。

実験に使用した機材を、表 5-2 に示す。

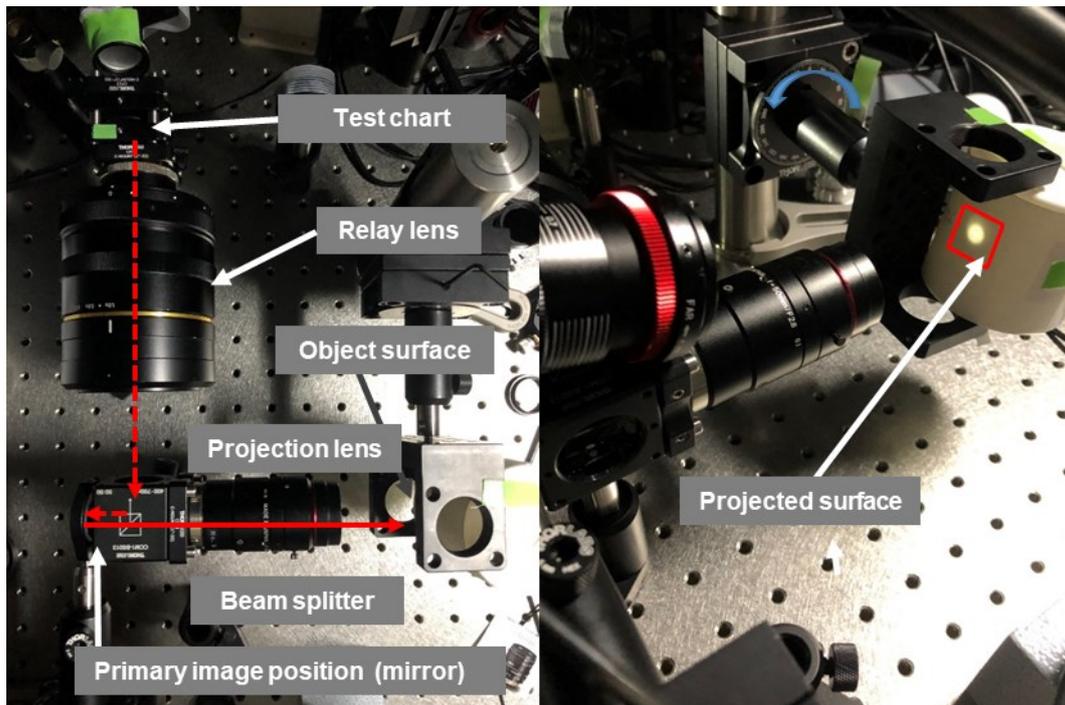


図 5-11 実験光学系

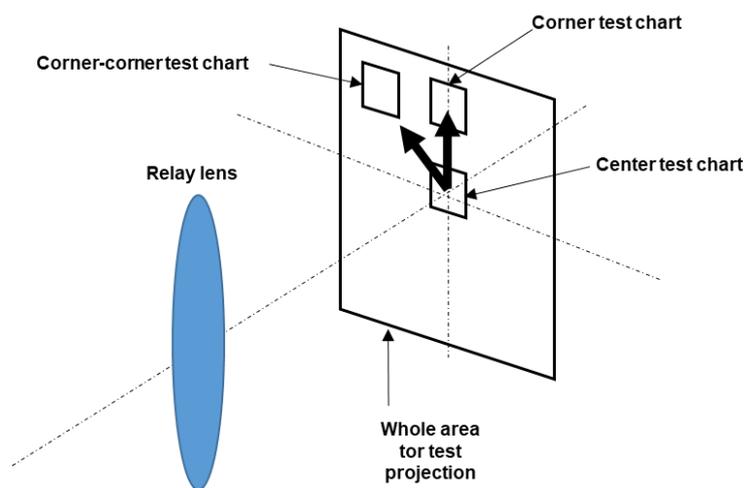


図 5-12 実験光学系における周辺像の生成方法

表 5-2 実験機材

Name	Product name	Brand
Relay lens	LM1119TC	Kowa
Beam splitter	50:50 Non-Polarizing Beamsplitter Cube	Thorlabs
Mirror	Φ 1" Silver-Corted Concave Cylindrical Mirror f=25.0mm	Thorlabs
Imaging lens	LM50JC10M	Kowa
CMOS camera	uEye LE	Kowa

5.6 共役結像面ミラーの回転による像面補正の効果

本節では、実験系の撮像結果から、一次結像面のシャインプルーフ光学系における像回転における効果について確認するとともに、投影面が傾きを持つ光学系における、一次結像面の球面補正の結果について評価する。

5.6.1 一次結像面ミラー回転による、変化軸方向の補正

5.5 節において説明した実験光学系を利用し、シャインプルーフ配置による円筒面への投影を行った。投影面のみを 5.0deg 傾け、その条件における投影像結果に関して、像中心部を図 5-13 に、円筒軸方向の軸外画像を図 5-14 に示す。

画像の中央横軸方向がシャインプルーフ回転軸となっている。投影面のみが角度を持っていることから、シミュレーションでの結果と同様に、回転方向により光軸に対して垂直な面から離れる図 5-14 では、コントラストが低下していることが分かる。番号 "6" のチャートについて、輝度値を取得した結果を、投影像中央部については図 5-15 に、投影像周辺部については図 5-16 に示す。図の矢印方向に沿う形で輝度値を取得している。白から黒へと切り替わる結果が投影像中央部分を表している図 5-15 においては、明確に黒が出ているものの、投影像周辺部となる図 5-16 においては、一部のチャートで明確に切り替わりが出ていないことが分かる。投影面の

みが光軸に対して傾きを持ち、実際の投影像は光軸に対して垂直となっているため、ピント面が異なる結果となっている。

次に、計算結果から得られた投影面角度 5deg に対応した一次結像面角度 1.25deg を使用し、一次結像面ミラーを傾けた結果を、図 5-17 に示す。

チャート投影像を確認すると、わずかではあるが像質の改善が見て取れる。拡大比較を図 5-18 に示す。

ミラーをシャインプルーフ配置に合わせて傾きを持たせることにより、白黒の切り替わりの部分が、少し改善しているとみられる。

輝度値を取った結果を、図 5-19 に示す。一次結像面ミラーに傾きを持たせていない場合には、黒部が浮き上がっていたものが、傾きを合わせることにより白と黒の差が出る結果となっていることが分かる。

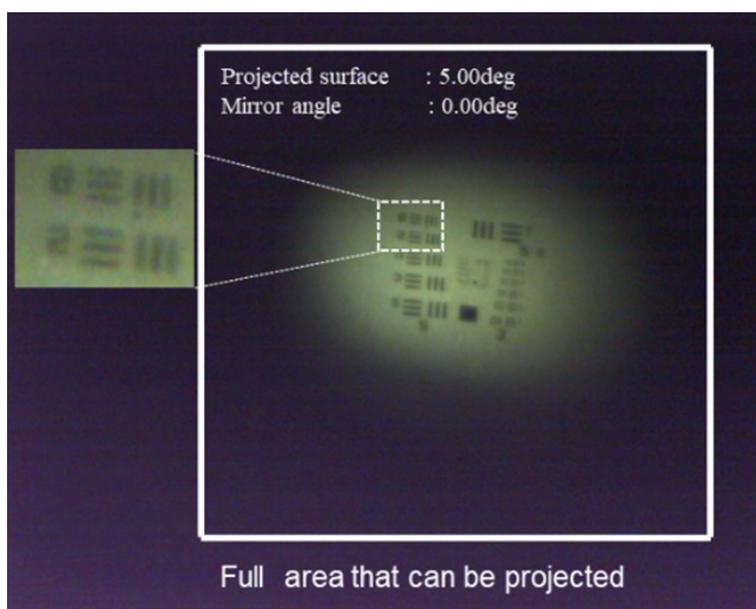


図 5-13 投影面を 5.0deg 傾けた際の中心投影像

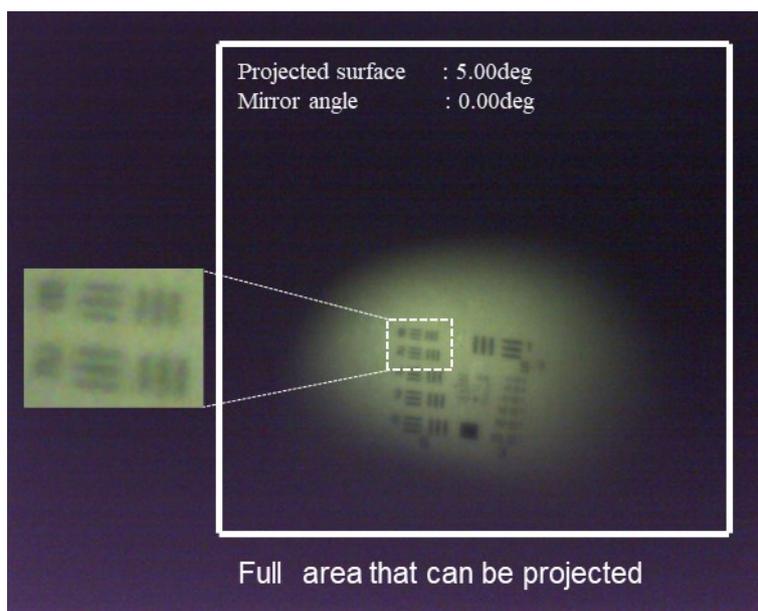


図 5-14 投影面を 5.0deg 傾けた際の円筒軸方向周辺部の投影像

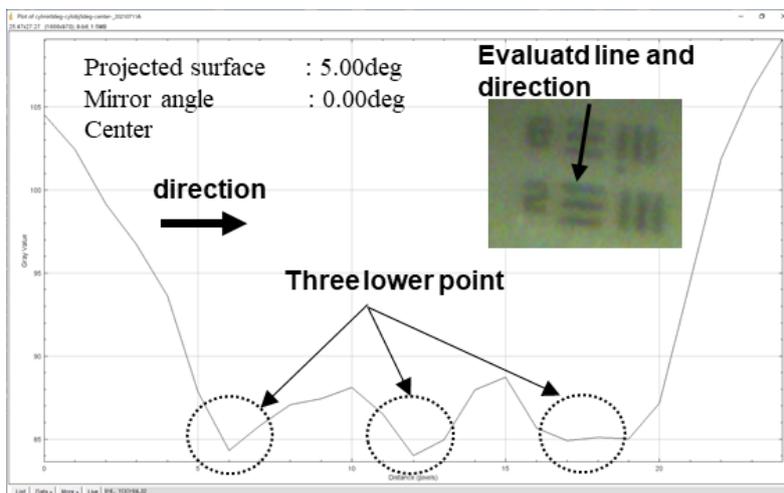


図 5-15 投影面を 5.0deg 傾けた際の中心投影像チャート輝度

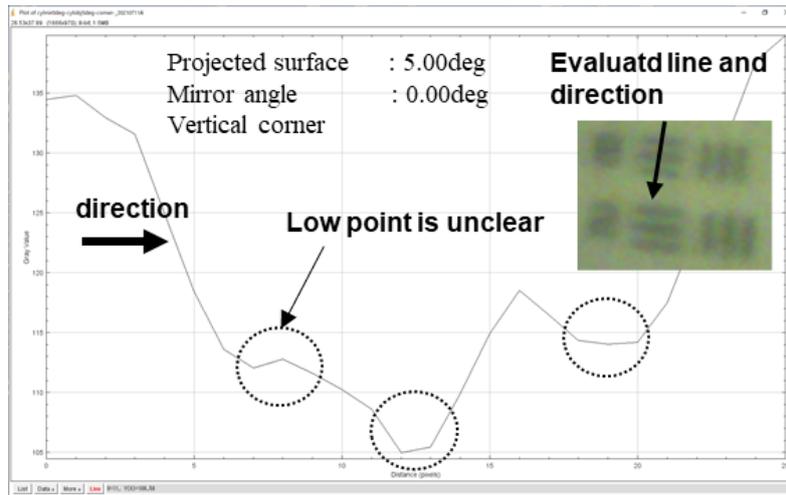


図 5-16 投影面を 5.0deg 傾けた際の円筒軸方向周辺部投影像のチャート輝度

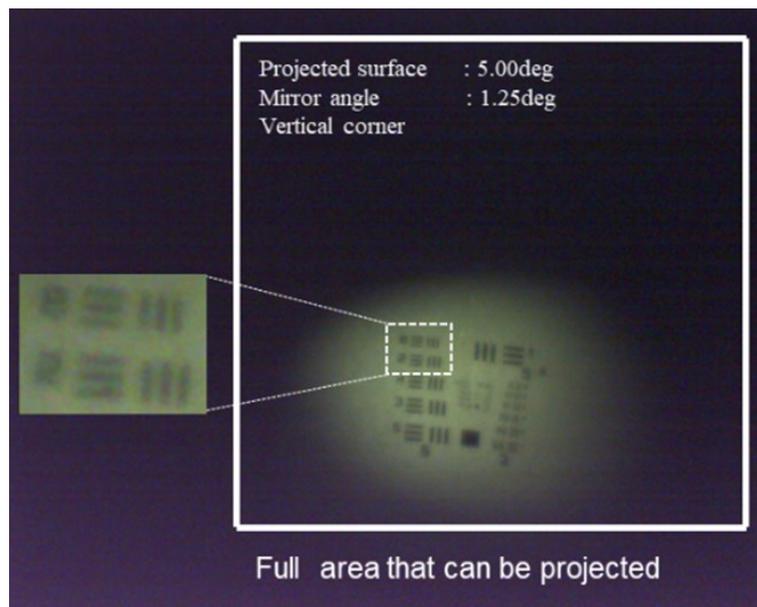


図 5-17 投影面を 5.0deg、一次結像面ミラーを 1.25deg 傾けた際の円筒軸方向
周辺部の投影像

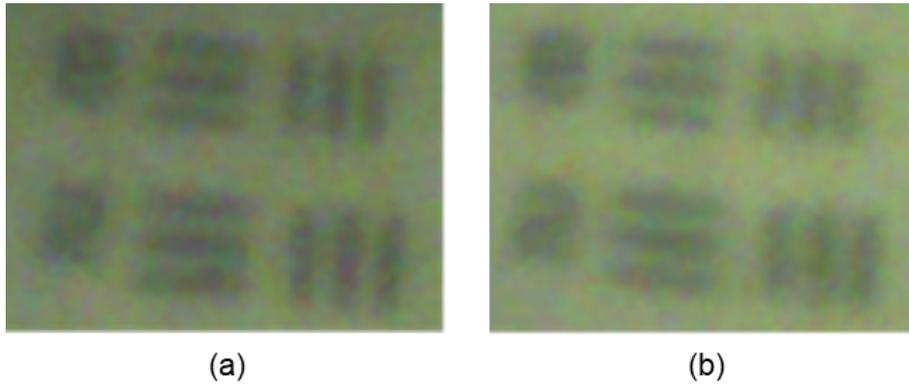


図 5-18 一次結像面ミラーを傾ける前後でのチャート比較 :
(a) ミラー傾きあり、(b) ミラー傾き無し

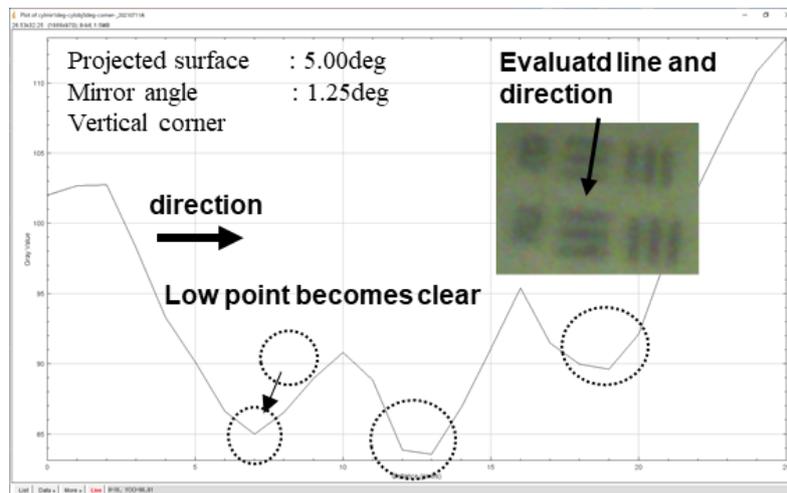


図 5-19 ミラー傾き 1.25deg にて補正後のチャート輝度

5.6.2 一次結像面ミラー回転による、円周方向の補正

本光学系による実験は、投影面の曲率半径を $R=25\text{mm}$ の円筒面としており、同時に一次結像面ミラーを $r=50\text{mm}$ の円筒面ミラーとして、円筒投影面に対して結像関係を維持した光学系により行われている。その結果に変化が無いかの確認のため、円筒軸方向に加えて円筒円周方向も加味した位置での投影像を確認した。その結果を図 5-20 に示す。また拡大比較した画像を図 5-21 に示す。

円筒軸方向端での投影像結果と、円筒軸方向端に加えて円周方向端方向も加味した投影像を比較し、概ね同じ程度のチャート像であると見られる。

同様に、輝度値による結果を図 5-22 に示す。白と黒が明確に分かれており、円筒軸方向端での結果となる図 5-19 と比べ、同様の結果となっており、チャートコントラストが維持されていることが確認出来る。

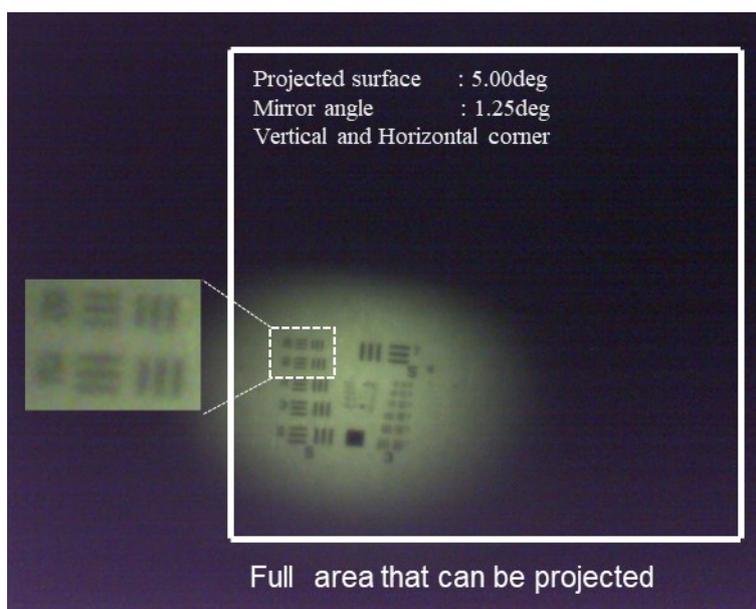


図 5-20 投影面傾き 5.0deg およびミラー傾き 1.25deg における円周方向端におけるチャート像

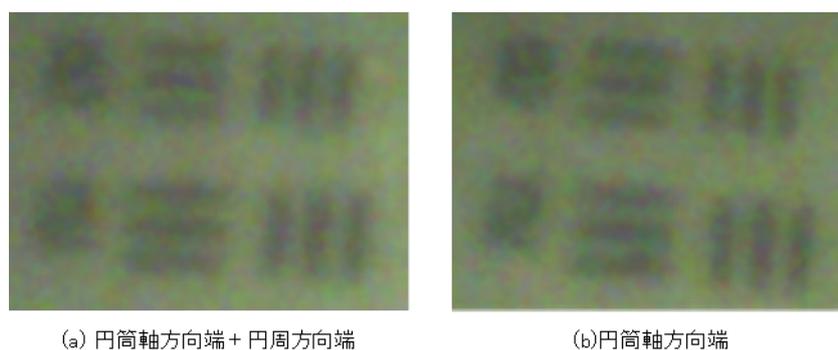


図 5-21 周辺部における円筒面補正効果のチャート比較 : (a) 円周軸方向および円周面方向端、(b) 円筒軸方向端

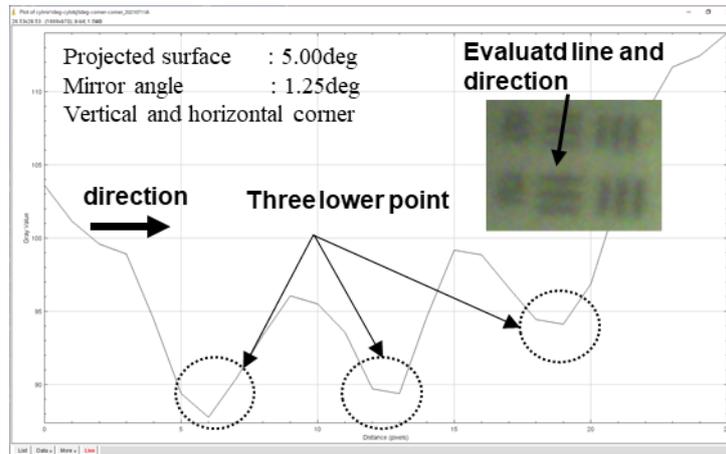


図 5-22 円周軸方向および円周面方向端におけるチャート輝度

5.7 撮像による像質の評価

本実験光学系は、チャートを撮像素子に置き換え、投影面を被写体に置き換えることにより、撮像光学系とすることが可能である。そのことから、一次結像面ミラーの円筒面化に加えて、シャインプルーフ配置による効果を確認した。

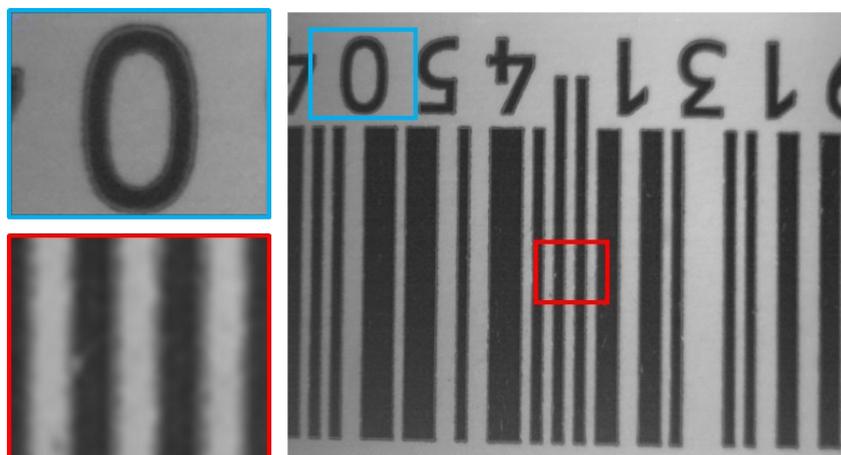
被写体円筒面の曲率半径は、投影実験時と同じ $R=25\text{mm}$ とし、一次結像面ミラーも同じ条件の $r=50\text{mm}$ としている。撮像結果を図 5-23 に示す。(a)は被写体および一次結像面ミラーの両方が傾き 0deg の状態、(b)は撮像面が 10.0deg の傾きを持った状態、(c)は撮像面が 10.0deg の傾きを持ち、一次結像面ミラーを 2.5deg 傾けて撮像した状態である。被写体には、コントラストの分かりやすいバーコードを利用している。

それぞれの画像において、赤枠の部分はシャインプルーフ配置における回転の中心となるため、変化が無い。しかし、周辺部にある数字の「0」を比較した場合、光学シミュレーションにおけるMTF結果や、画像によるシミュレーション結果と同様に、一次結像面ミラーに傾きを持たせていない(b)の結果においては、白と黒の切り替わりのエッジ部分にボケが生じていること見て取れる。その後一次結像面ミラーの傾きにより結像関係が改善され、(c)においては傾きを持たせていない(a)と同程度の結果となっていることが画像から見て取れる。

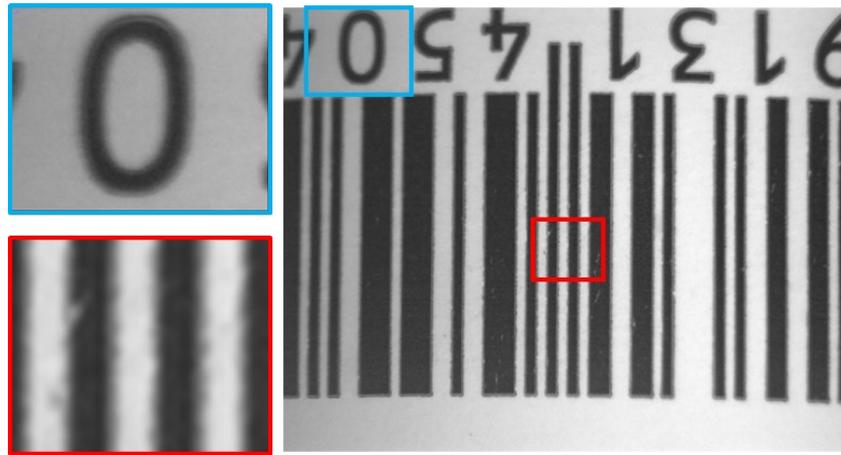
この結果から、一次結像面ミラーの傾きによるシャインプルーフ配置が、撮像光学系の光軸に対して傾きを持つ被写体に対して、効果を発揮することが分かる。

投影時の結果と同様に、輝度比較を行った。像中央部の結果を図 5-24 に、周辺部の結果を図 5-25 に示す。

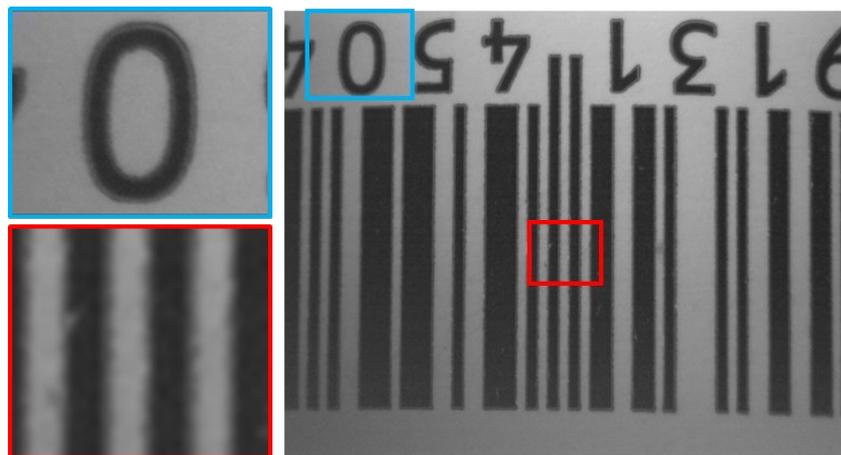
画像中央部においては、被写体および一次結像面ミラーに傾きの無い状態、被写体が傾きを持った状態、被写体傾きに合わせて一次結像面ミラーが傾きを持ったシャインプルーフ配置による状態の三つの結果において、輝度変化に大きな差は見られない。しかし周辺部を示した図 5-25 の結果においては、被写体のみが傾きを持った状態においては、それぞれ白から黒へ、黒から白へ切り替わる部分に、勾配が緩やかになっている部分がみられる。切り替わりの部分が緩やかになっているということは、同じ輝度の差を得るためにより多くのピクセル数が必要であることを表しており、にじみが生じているということが言える。本結果から、被写体のみが傾きを持つ場合においては、そのようににじみが出ているということが分かる。



(a)



(b)



(c)

図 5-23 撮像によるシャインプルーフ配置における一次結像面補正効果の確認 : (a) 被写体面傾き 0.0deg および一次結像面ミラー 0.0deg 、(b) 被写体面傾き 10.0deg および一次結像面ミラー 0.0deg 、(c) 被写体面傾き 10.0deg および一次結像面ミラー 2.5deg

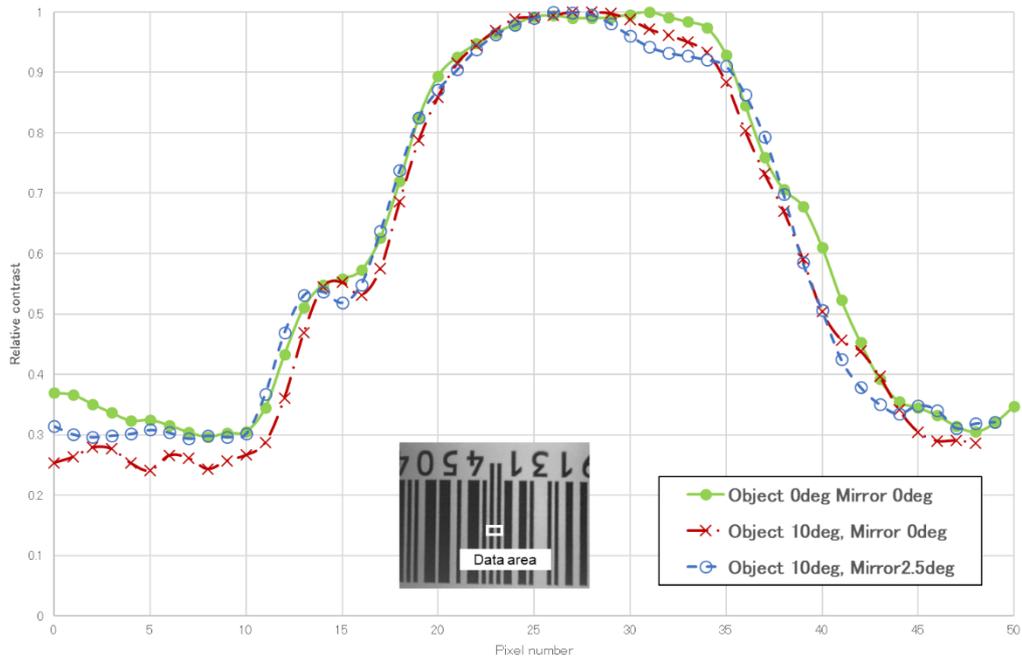


図 5-24 撮影における像中心部の輝度比較

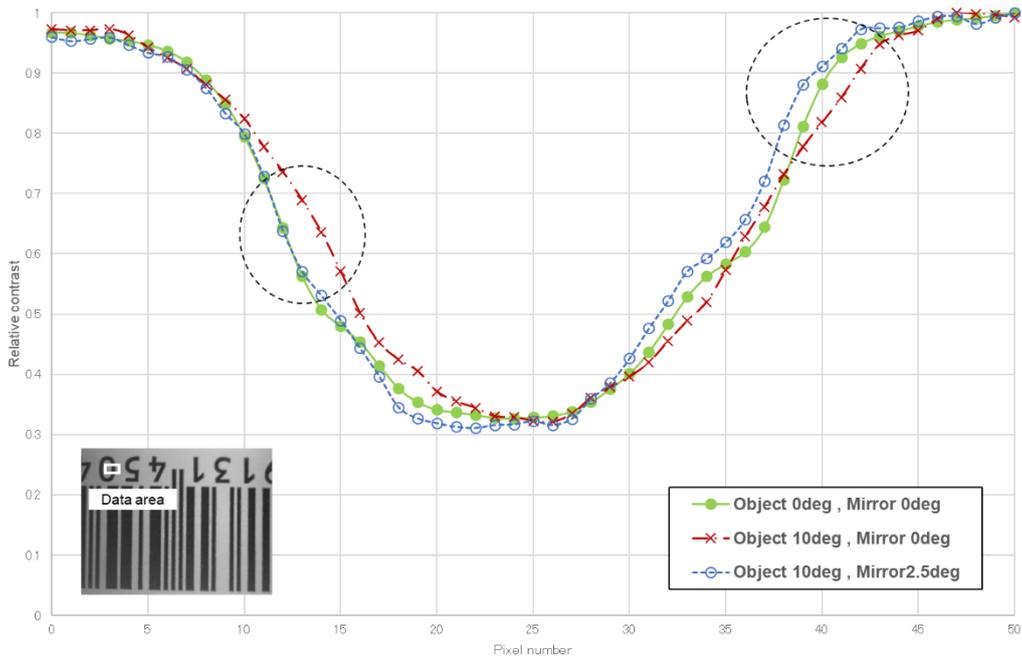


図 5-25 撮影による像周辺部の輝度比較

5.8 おわりに

本章では、第4章にて述べた一次結像面ミラーを利用した像補正による投影像改善に加えて、一次結像面ミラーを回転させ、光学系光軸に対して傾きを持たせることにより、投影面が光軸に対して傾きを持つ、もしくは撮像面が光軸に対して傾きを持つ系に対して、シャインプルーフ配置を構成することが可能であることを示した。またその配置において投影素子や撮像素子は光学系の光軸に対して垂直な状態のままで良いこと、投影面や撮像面の任意の傾きに対して、ミラーの傾きを調整することで光軸に対して傾きを持つ被写体の撮影、もしくは投影面への投影を行うことが可能であることを示した。

投影面の曲率半径に対してミラー曲率半径を合わせることで、円形状にもフレキシブルに対応可能であることから、任意の形状に対して、様々な角度からの投影や撮影に対しても、本章の結果を踏まえて対応可能であることを示した。

これにより、例えば球面に像投影を行う場合、像面湾曲を最適化しておいた投影光学系が必要であり、投影面形状の変化には対応できなかったものが、ミラーの変更のみで容易に対応が可能となる。

第6章 物体共役面補正と瞳共役面補正を組み合わせた像補正

6.1 はじめに

第3章において、光学系に発生する各収差と、その補正について述べた。光学系の収差は、設計の段階で補正されている必要があり、その補正状態は結像性能に大きく影響を与えることが分かっている。その一方、外乱による光学性能への影響も存在する。天体観測に使用される地上望遠鏡においては、地球の大気揺らぎが観測結果に大きく影響を与える。回折限界レベルでの性能が必要とされる光学系において、大気揺らぎによる像質低下は大きな問題であり、その影響を回避するため、ハッブル宇宙望遠鏡やジェームスウェッブ宇宙望遠鏡は、宇宙空間において大気揺らぎの影響を受けない観測を行うことを目的として配置されている。一方、地上望遠鏡に対しても大気揺らぎの影響低減のために、補償光学系と呼ばれる波面補正技術が効果を発揮し、高い観測性能を得ることとなった。大型の地上望遠鏡に数多く搭載されている。

補償光学系においては、補正対象を望遠鏡の瞳近傍における外乱としており、主には平面波が大気擾乱によって乱れることに対する補正を主目的としている。補正効果は天体観測という特性上、望遠鏡の瞳近傍としている。

一方、収差には像面湾曲や歪曲といった収差も存在するが、天体望遠鏡においては問題とならないものの、地上観測に用いられる望遠鏡においては、その視野が広いことから、その収差補正は光学性能において重要な要素となる。さらには、大気の揺らぎは望遠鏡近傍のみならず、その先の被写体までの間に広く存在することとなり、補正対象となる共役面が広く存在する。そのため、波面の補正範囲も広く存在することとなる。その比較概念図を図 6-1 に示す。

本論文の第4章および第5章において、物体共役面に配置した像補正ミラーによる像面湾曲のコントロールについて述べた。この効果は、波面の直接的な補正ではなく、幾何的な光路シフトの補正に効果がある。

本章では、揺らぎに相当する外乱を想定し、地上望遠鏡に対する影響を考察するとともに、像面補正光学系の地上望遠鏡に対する揺らぎ補正への可能性、瞳面補正光学系との組み合わせについて論ずる。

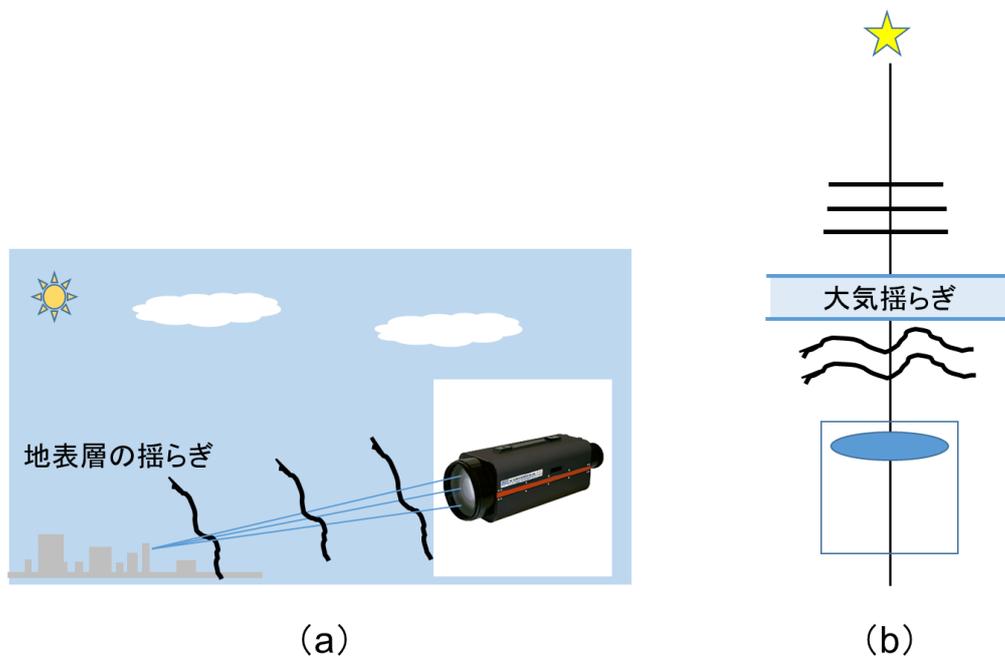


図 6-1 被写体位置による大気揺らぎの影響比較 : (a) 地上望遠鏡におけるゆらぎ、
(b) 天体望遠鏡におけるゆらぎ

6.2 物体近傍のゆらぎと瞳近傍のゆらぎによる光学系への影響

本節では、揺らぎを想定した実験系により、被写体面近傍での揺らぎと結像レンズ近傍での揺らぎが、それぞれ像質にどのような影響を与えるかについて検証する。

6.2.1 大気揺らぎを想定した実験系

大気揺らぎは、概ね地表面高さ 20km 程度とされている。そのため天体観測用の望遠鏡においては、観測対象となる天体までの距離に対して、揺らぎの位置は望遠鏡瞳位置とほぼ同じと見るこ

とができ、瞳付近での補正が結像性能の改善に効果を発揮する。しかし地上望遠鏡においては、地表面を横方向に観察するため、被写体近傍から光学系近傍までのすべての範囲において、大気揺らぎが存在すると考えることができる。

大気揺らぎを想定した歪ませたアクリル板を利用し、光学系の近傍から被写体の近傍までの範囲において、波面にどのような影響を与えるかを評価した。

実験光学系の配置図を図 6-2 に示す。

焦点距離 $f=50\text{mm}$ のレンズを結像レンズとして使用し、被写体までの距離を 400mm とする。 $f=50\text{mm}$ の結像レンズにより結像した像はコリメータレンズにより平行光となり波面センサに導かれる。外乱を想定し、アクリル板を歪ませたものを使用している。

結像レンズには KOWA 製「LM50JC10M」を使用し、波面センサには THORLABS 社製 シャックハルトマン型波面センサ「WFS20-5C」を使用している。

光学系のスケールリングを 40 倍として想定すると、 $f=2000\text{mm}$ 、被写体距離は 8000mm に相当する。また被写体は点光源を想定し、波長は $\lambda=633\text{nm}$ としている。

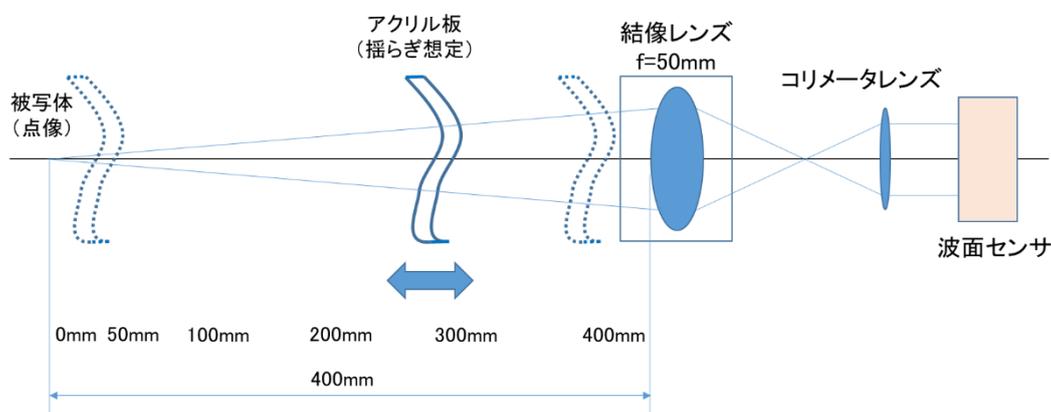


図 6-2 実験光学系の配置

6.2.2 実験光学系における揺らぎの像質への影響

揺らぎを想定したアクリル板による影響が、被写体距離によってどのように変化するかを波面センサの出力により測定した。その結果を図 6-3 に示す。

物体近傍においては、揺らぎを想定したアクリル板の無い状態の波面と比較して、波面の PV 値として約2倍程度の変化であるのに対して、結像レンズに近づくにつれて波面 PV 値は大きくなっていき、レンズ入射面近傍では、約17倍と非常に大きな変化となっている。

これは、地上近傍の水平方向での揺らぎを考える場合、被写体近傍とレンズ近傍において、地表からの高さ方向に大きな違いが無いことを想定すると、揺らぎの程度には大きな違いが無いことから、ほぼ同サイズの擾乱が影響を及ぼすことを想定している。

点光源像の撮像結果を図 6-4 に示す。

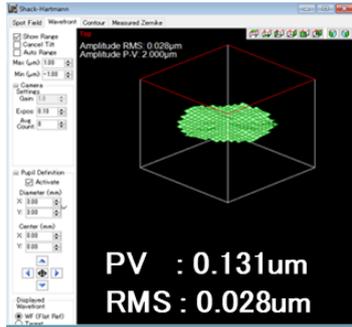
波面の乱れに連動して、点光源像質が変化している。揺らぎ想定位置 300mm から 400mm のレンズ近傍での結果においては、点像が大きく流れており、結像性能に大きく影響を及ぼしていることが分かる。一方、被写体近傍においては点像の乱れは小さく、瞳近傍で影響を与える揺らぎが点像性能に対して揺らぎが影響を及ぼしていないことが分かる。

これは、被写体近傍においては光束の大きさに対して、揺らぎの大きさの方が十分大きいため、波面に対しての影響が小さいことを意味している。

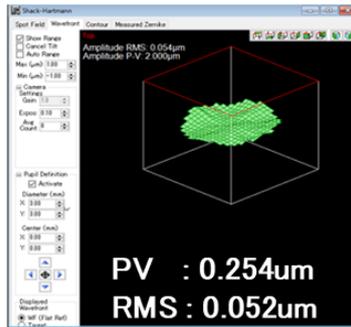
点像の結像性能を考える場合、(e)および(f)の結果は結像性能として不十分であり、瞳面補正効果が期待できる。

ピンホールの撮像と同様に USAF テストチャートを撮像した結果を、図 6-5 に示す。揺らぎ想定位置 200mm 以降においては、チャートが解像出来ていないことが分かる。ピンホール像では像に中心の核があるもののフレア成分が発生しており、それが解像に影響を与えていると考えられる。

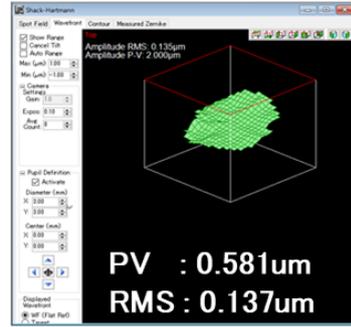
揺らぎ想定位置 300mm および 400mm においては、ピンホール像、チャート像共に像質が低下しており、一致した結果となっている。



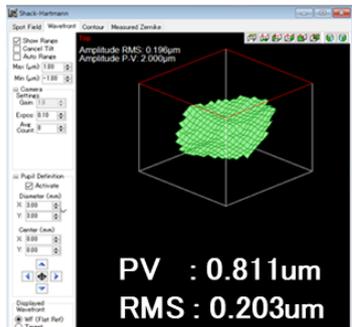
(a) アクリル板無し



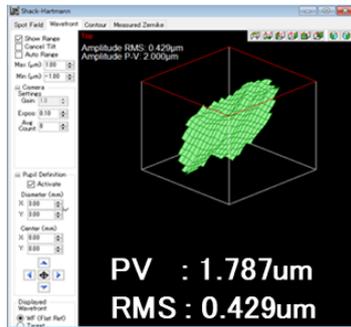
(b) 0mm



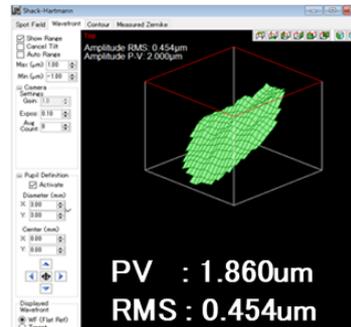
(c) 50mm



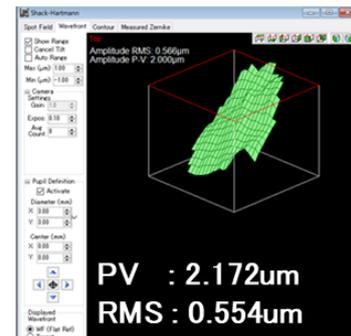
(d) 100mm



(e) 200mm



(f) 300mm



(g) 400mm

図 6-3 ゆらぎ位置を変化させた場合の波面変化

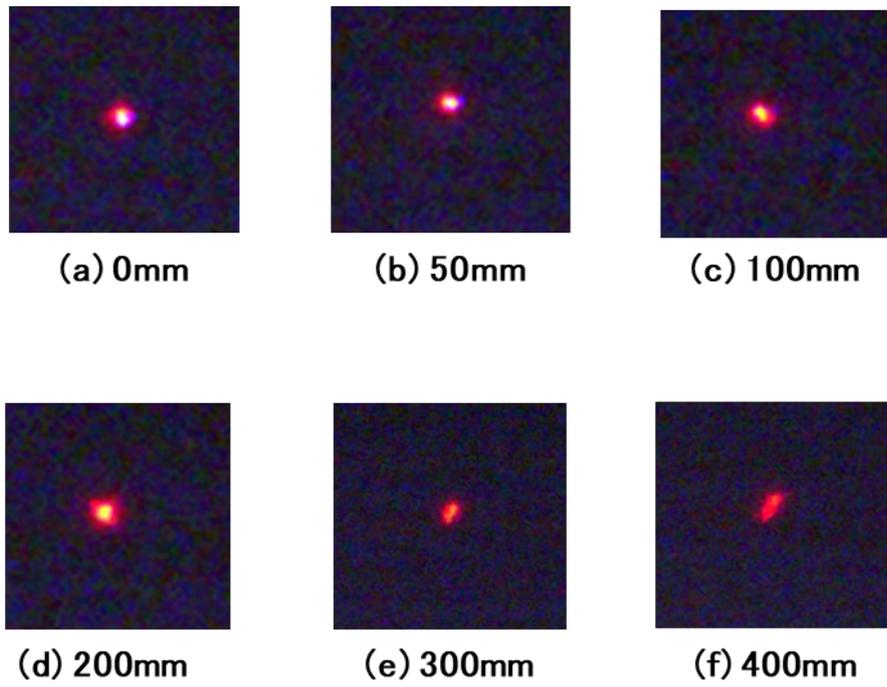
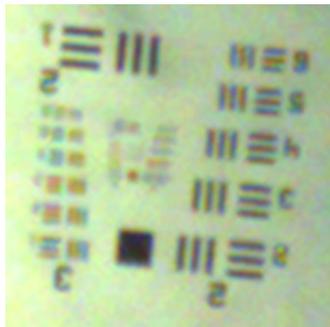


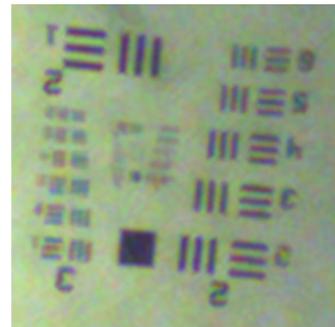
図 6-4 揺らぎ位置を変化させた場合の点像変化



(a) アクリル板無し



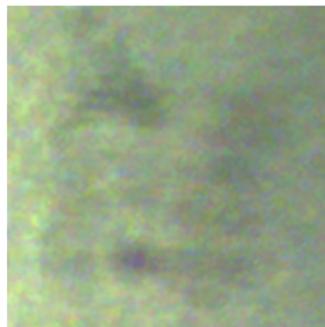
(b) 0mm



(c) 50mm



(d) 100mm



(e) 200mm



(f) 300mm



(g) 400mm

図 6-5 揺らぎ位置を変化させた場合のチャート像の変化

6.2.3 実験光学系における補償光学装置での像質補正

揺らぎ想定位置 400mm における、補償光学系の効果確認の結果を図 6-6 に示す。可変形鏡は瞳面と共役な位置に配置して補正を行っている。補償光学装置を On にした状態においては、チャート像の像質が改善しており、瞳面における波面補正の効果が出ていることが分かる。

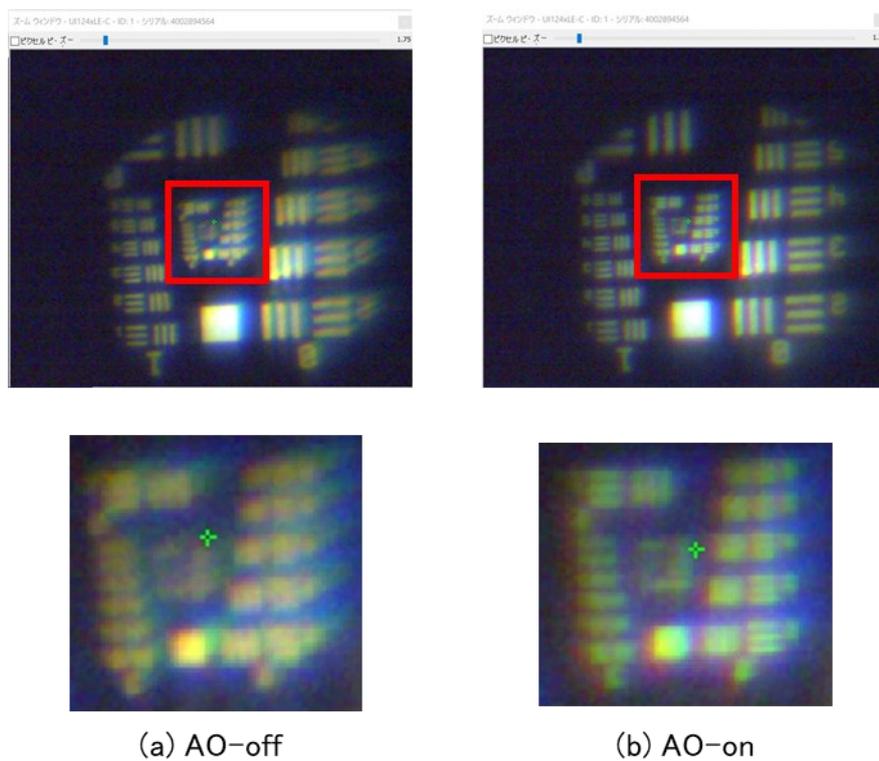


図 6-6 補償光学系による撮像レンズ近傍におけるゆらぎを想定した場合のチャート像 :
(a) AO-on 、 (b) AO-off

6.3 物体共役面における揺らぎの影響

6.2 節の結果より、撮像レンズ近傍の外乱に対して、瞳面共役の補償光学系により結像性能の改善が可能であることを確認した。また被写体近傍の揺らぎに対しては、大きな像質低下につながることを述べた。

しかし、被写体近傍の揺らぎについては、屈折による結像位置の変化が発生することが予想される。図 6-7 に、被写体近傍の揺らぎを想定した撮像結果から像形状がどのように影響を与えているかを示す。

撮影画像は、揺らぎを想定したアクリル板を横方向に連続的に被写体近傍で移動させている。画像から、解像感維持しているものの形状が変化していることが分かる。これは、被写体近傍での揺らぎが結像位置を変化させていることを表している。

このことから、被写体近傍の揺らぎの補正には、像ひずみを画像の位置毎に補正する必要があると言える。像ひずみ補正のためには結像点の焦点面内での移動が必要であり、一次結像面に配置したミラーにより補正が可能となることが予想できる。

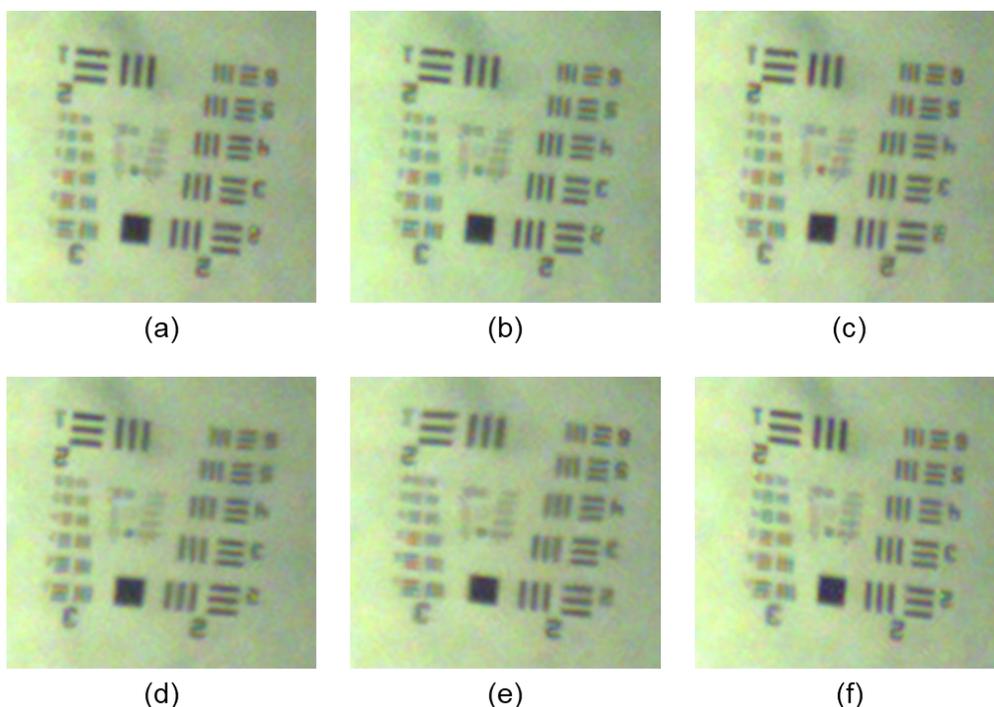


図 6-7 被写体近傍における揺らぎを想定した場合のチャート像変化

6.4 物体共役面ミラーによる結像位置の結像面内移動

第4章および第5章において、一次結像面に配置したミラーにより、投影面の光軸方向への像面形状の変換が可能であり、球面などの三次元形状に対してフォーカスのあった投影が可能となることを述べた。一次結像面ミラーは図 6-8 に示すように、結像面に平行に像を移動させることが可能となる。本光学系においては、被写体および撮像素子は光軸に垂直な平面であり、光軸方向への結像位置の変換は不要である。焦点深度が十分確保できる状態においては、一次結像面ミラーの傾きによる深度方向の変化は無視することが出来、平面内でのシフトによる影響のみを考慮すればよい。

一次結像面ミラーが、可変形鏡のように任意形状にミラーを形状変化させることが可能な素子である場合には、図 6-9 に示すように、焦点深度内において、面方向への像位置コントロールが可能となる。

実際には可変形鏡のストロークに影響を受けるが、シフト量 $\Delta H(x,y,z)$ は、ミラーストロークを L 、ミラー傾きを $\theta(x,y,z)$ として、次の式により算出が可能となる。

$$\Delta H = L \cdot \sin 2\theta \quad (6-1)$$

一次結像面に可変形鏡を配置し、ミラーストロークにより像面内で像位置を移動させることが可能かどうかの確認を行った。実験光学系を図 6-10 に示す。光学倍率は1倍にて配置している。可変形鏡の中心部を凸形状および凹形状とし、その前後の画像比較から移動の確認を行った。凸形状における結果を図 6-11 に示す。

赤丸のマークはミラーがフラットな状態での特徴点を表し、緑十字のマークは可変形鏡の中心部を凸形状とした場合の特徴点の移動後の位置を表している。画像から、それぞれの斜面に相当する部分において、斜面方向に合わせて像が移動していることを、マークのズレが表している。

同様に、凹形状とした場合の結果を図 6-12 に示す。

一次結像面ミラーを凸形状とした場合とは逆方向に、緑十字のマークが動いている。これは、ミラー斜面が内側に向く方向に像を動かしていることを表している。

この結果から、可変形鏡の変化によって結像点を結像面内で移動させることが可能であることが分かる。

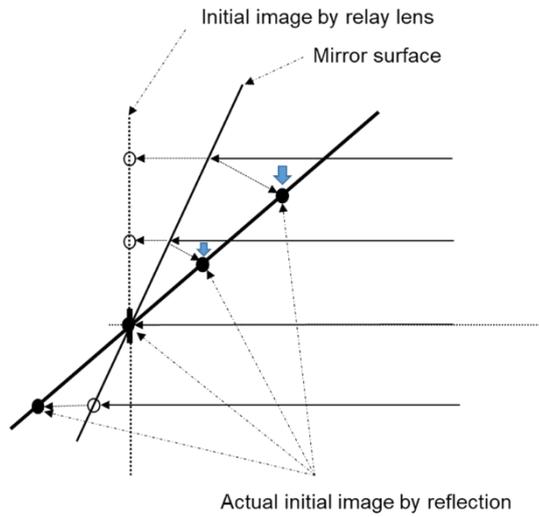


図 6-8 物体共役面にミラーを配置した場合の空中像形

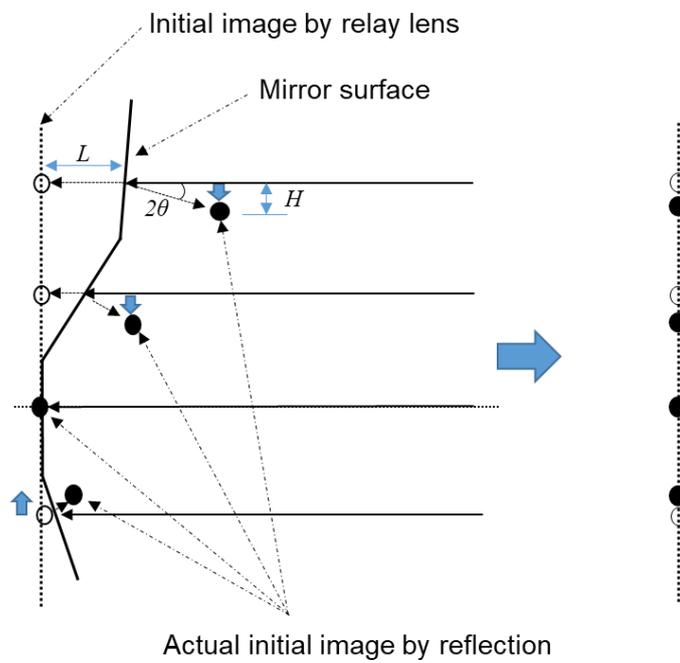


図 6-9 一次結像面ミラーを任意形状に変化させた場合の像シフト



図 6-10 実験光学系

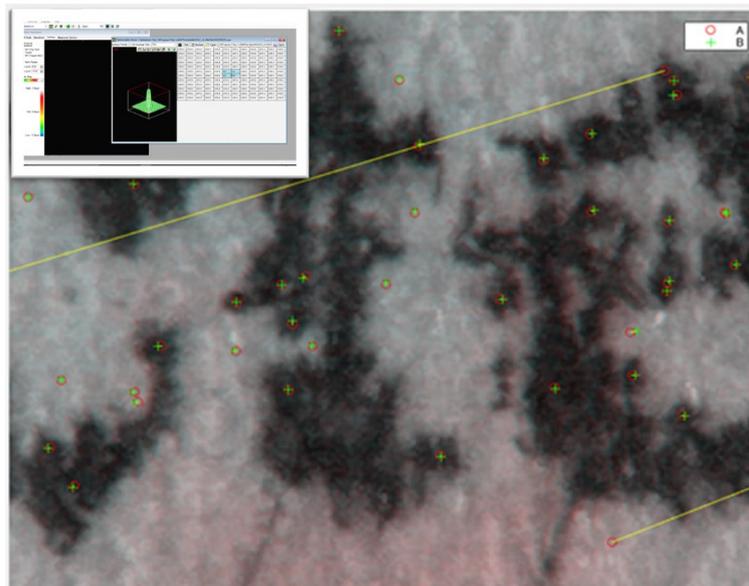


図 6-11 可変形鏡を凸形状とした場合の像シフト

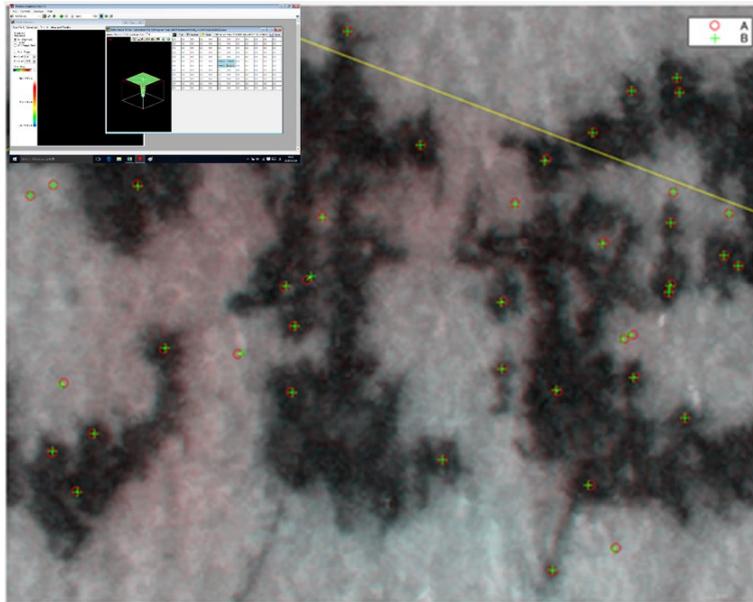


図 6-12 可変形鏡を凹形状とした場合の像シフト

6.5 物体共役面補正と瞳共役面補正の融合による像補償の地上望遠鏡へ展開

地上望遠鏡において、大気揺らぎによる像質低下を改善するためには、天体望遠鏡にて採用されている補償光学系を利用した結像性能改善では不十分であることを述べた。その原因としては、地上望遠鏡においては、地表面にある物体を観察するため、大気揺らぎは撮像レンズ近傍のみではなく、被写体までの全域にわたり存在する可能性があり、特に被写体付近の揺らぎは、波面乱れに影響を与えるよりも、むしろ結像点の位置が像面内で移動することで、像形状を変化させるといった影響が考えられる。

そのため補正面としては、瞳面のみならず、結像面での補正が必要となる。本論文にて論じている物体と像との共役結像面にミラーを配置し、そのミラーを可変形鏡にすることによって、像形状の局所的な位置変化に対する補正が可能であると考えられる。

天体望遠鏡に搭載されている瞳面補正の補償光学系では、理想状態の点像からどの程度離れているかを確認するために、ガイドスターと呼ばれるレーザーによる点像を観測対象の近傍視野外

に作り出す。その点像を波面センサにより計測することで、実際にどの程度大気揺らぎにより波面が乱れているかを計測し、可変形鏡の形状変化にフィードバックしている。

地上望遠鏡において、瞳面補正の補償光学系を搭載するためには、ガイドスターに相当する対象をどのように作り出すかが課題となる。また地上望遠鏡においては、物体近傍の揺らぎによる像形状の変化を補正する必要がある。像面共役面に配置した可変形鏡により、像形状の変形が可能であることを提案した。可変形鏡の変形量を算出するためには、画像処理を用いる必要があるが、参照画像をどのように設定するかが課題となる。

6.6 おわりに

本章では、地上望遠鏡における大気揺らぎの影響による像質低下に関する問題点を述べた。天体観測用の望遠鏡において、像質低下の要因となる大気揺らぎの成分は観察対象までの距離と比べ、望遠鏡に非常に近い位置に存在する。大気揺らぎは、波面を乱すこととなり望遠鏡による像の像質に影響を与えることとなる。波面の補正には可変形鏡と波面センサによる補償光学系が使われるが、揺らぎ位置の性質上、波面の補正は瞳に近い位置により行うことが可能である。一方地上望遠鏡では、地上面上の大気を通した観察となるため、物体近傍の大気揺らぎが像形状に影響を与えることとなる。そのため物体から瞳までの広い範囲での補償が必要となる。

物体近傍での揺らぎは、瞳近傍での揺らぎと比べ、光束が狭くなることから、波面の乱れ以上に像の局所歪みとして現れることとなる。揺らぎを想定したアクリル板により、物体から瞳近傍までの範囲において、結像結果がどのように変化するかを、波面および実際の画像により確認を行った。

物体面での局所歪みに対しては、像位置の変換が必要となり、本論文で述べた物体共役面ミラーによる像面補正を応用した像面形状補正が可能であることを述べた。

一方、参照点や参照像をどのようにするかについての課題がある。天体観測用の補償光学装置においては、大気中のナトリウム層をレーザー光により励起し、視野外に参照用のガイドスターを自己生成し波面補正に利用している。揺らぎの少ないシーイング時の画像を参照画像として、その比較から移動量を算出し、補正することは可能と考えられる。

第7章 結論と展望

7.1 結論

本論文では、投影光学系および撮像光学系において、三次元形状を有する投影面に対して、その形状に合わせたフォーカス面を持つ光学系を提供するために、物体と像との間に一次結像面を生成するリレー光学系を加え、そのリレー光学系の間結像面にミラーを配置し、そのミラー形状を投影面形状に合わせた形状とすることにより、視野全体でフォーカスのあった光学系とすることが可能であることを明らかにした。投影面を球面もしくは円筒面として、その面に適した形状のミラー曲率の選択について述べた。また、光学系光軸が投影面に対して傾きを持つ場合、一次結像面ミラーを傾けることにより、シャインプルーフ配置を形成し、投影光学系においては投影表示素子やその光源を傾けることなく、一次結像面ミラーのみを傾けるこという簡便な方法で、投影像質を改善できることを明らかにした。またこの光学系は撮像光学系においても同様の結果を得られることを確認した。さらに、像質改善の効果として、像面の局所歪みに対しての効果について調べた。

以下、各章にて得られた結果をまとめる。

第2章では、結像光学系について述べた。一般的な2点間の結像関係から、像をリレーする3点間の結像について述べ、像のリレー時に起こる問題について述べるとともに、その解決方法について述べた。

第3章では、結像光学系における像質について述べた。結像光学系においては、1点に集光することが理想であるが、実際の光学系においては収差としてあらわされる理想状態との乖離がある。光学系における収差のうち、特に3次収差と言われるザイデルの5収差について、その特徴を述べるとともに、その収差の補正について、設計段階からの補正と実際の光学系配置後の収差補正について述べた。波面補正のみでは補正しきれない収差もあることから、物体共役面での補正について提案を行った。

第4章では、第3章にて提案した物体共役面補正の原理について述べ、光学シミュレーションによる確認を行い、さらに実際の光学系による実験を行うことにより、効果を確認した。投影対象面は球面として、光学系の倍率により一次結像面ミラーの倍率が決定することを確認した。

第5章では、第4章の結果を拡張し、投影面が投影光学系の光軸に対して傾きを持つ場合について、一次結像面ミラーと投影面の間をシャインプルーフの配置とすることで、任意の角度に対して対応が可能であることを述べた。また投影光学系のみならず、撮像光学系においても同様の結果が得られることを確認した。

第6章では、前章までの結果を踏まえ、共役結像面ミラーの地上望遠鏡への応用可能性について述べた。性能劣化の外的要因の一つとして挙げられる大気揺らぎについて、物体近傍における揺らぎの光学結像に対する影響を明らかにするとともに、天体望遠鏡で採用されている補償光学系においては補正しきれない、物体近傍での局所像ひずみについて、一次結像面ミラーによる補正について提案した。

7.2 将来の展望

本研究による結果を踏まえ、以下に将来展望を示す。

本研究において、リレー光学系による物体および像の一次共役面形成とその位置へのミラー配置による像面湾曲形状の変換について述べた。従来、曲面や円筒面への投影およびその撮像には、あらかじめ最適化された光学系が必要であり、投影や撮影対象の形状が変化した場合には、光学系全体を変える必要があったものを、本研究による一次結像面にミラーを配置する光学系によって、そのミラー変更するという簡便な方法により、球面や円筒面、また様々な曲率半径に対してフレキシブルに対応が可能であることを示した。特に円筒面においては、非対称であることから投影・撮像レンズに対してシリンダリカルミラーを入れる必要があるものを、一次結像面ミラーの形状による像形状変換のみで対応可能であり、より結像性能改善の効果が大きい。その点については、更なる比較により改善の効果を明らかにできれば、実際の光学装置への応用展開が期待できる。円筒面は、例えば建築構造物の柱やトンネル内壁など日常の様々な場所に存在し、投影について

はサイネージへの応用、撮影では形状計測や表面状態などの確認への利用に、本光学系の効果が期待できる。

また、地上望遠鏡への補償光学系としての応用も可能性として考えられる。第6章において、被写体面近傍における揺らぎの像質への影響について述べたが、通常の補償光学系は瞳面上での波面補正による点像およびその近傍の像質改善に主眼が置かれている。特に天体望遠鏡では、観察対象が無限遠相当のため、広視野化においても画角の異なる波面をどのように補正するかが課題となっている。一方、地上望遠鏡においての高画角化は、波面歪みによる結像性能への影響よりも、光路のズレによる局所歪みによる像質変化が問題となる。一次結像面ミラーは任意形状にミラー面形状を変化可能な素子を用いれば、局所像位置の変化も可能であるため、その補正への効果が期待できる。

さらに一次結像面ミラーにより投影面の形状を光軸方向に変換し、球形状や円筒形状の像とすることが可能であることから、スクリーンが無い状態の投影空中像は三次元形状を有していると言える。この結果を空中像表示の光学系と組み合わせることにより、空中像に奥行を持たせた像に変換することが可能と考えられる。その結果として、より現実感を持った空中像表示を行うことが可能であることが期待できる。

参考文献

1. Soupstudio Architect Inc., “PAPER DOME HD150”, <https://paper-dome.com/products/hd150/>
2. R. Hayashi, H. Yano and H. Iwata, “Improvement of Image Quality for Spherical Immersive Projection Display”, 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集 (2004/9).
3. R. Hayashi, F. Nakaizumi, H. Yano and H. IWATA, “Development of a Full-surround Stereo Spherical Immersive Display Using Multiple Projectors” 日本バーチャルリアリティ学会 vol.10, No.2, pp.163-172 (2005).
4. W. Hashimoto and K. Yoshida, “凸面鏡を用いた可搬型没入ディスプレイ環境”, 日本バーチャルリアリティ学会第9回大会論文集 pp.365-368 (2004).
5. P. Bourke, “Spherical Mirror : A New Approach to Hemispherical Dome Projection” PLANETARIAN Vol.34, No.4 (2005).
6. US Patent 6,327,020 B1
7. 株式会社オーエス, “球体スクリーンの納入例” (2021.12.04 access), <https://jp.os-worldwide.com/solution/solution/jirei/event-02.html>
8. T. Yumura, T. Hirata and M. Kimura, “Projection for Spherical-shaped Display of Map with D3.js” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2014).
9. Discovery Center “SOS (サイエンス・オン・ア・スフィア)について” (2021.12.04 access), <https://sos-discovery.com/sos.html>
10. S. Onose and H. Yamamoto, “Omnidirectional projection display by use of a cone mirror and a cylindrical screen”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会 (2017).
11. M. Nagase, D. Iwai and K. Sato, “Dynamic Defocus and Occclusion Compensation of Projected Imagery by Model-Based Optimal Projector Selection in Multi-projection Environment”, Virtual Reality 15, Issue 2-3, pp. 119-132 (2011).
12. J. Yamaguch, S. Hase, M. Shibuya, K. Maehara, T. Mizuno and S. Nakadate, “A Novel Design of Projection Optics for Dome Display”, 光学 42, 1 (2013) 38-47

13. 宮島泰史, 加藤一寿, 大沼和彦, “被写界深度延長レンズ Extended Depth of Field 設計” 視覚の化学 第37巻 第4号, 142-144 (2016).
14. S. Liu and H. Hua, “Extended depth-of-field microscopic imaging with a variable focus microscope objective” *Opt. Express* 4 (11) 353-362 (2011).
15. N. Mizoguchi, H. Oku, M. Ishikawa, “High-speed-variable-focus optical system for extended depth of field” : *Proc. IEEE Int. Symp. On Industrial Electronics (ISIE) 2009*, pp.1668-1673 (2009).
16. H. Deguchi, H. Oku and M. Ishikawa, “Arbitrarily focused image synthesis using High-speed liquid lens” 2011年映像情報メディア学会冬季大会 (2011).
17. J. P. L. Torre, N. Mayes, N. A. Risa, “Laser display system for multi-depth screen projection scenarios” , *Opt. Lett.* 56 (32) 1515-1517 (2008).
18. D. Iwai, S. Mihara and K. Sato, “Extended Depth-of-Field projector by Fast Focal Sweep Projection” , *IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics* 21 (4) 462-470 (2015).
19. E. R. Dowski Jr, and W. T. Cathy, “Extended depth of field through wave-front coding” , *Appl. Opt.* 34(11), 1859-1866 (1995).
20. Y. Takahashi, and S. Komatsu, “Optimized free-form phase mask for extension of depth of field in wavefront-coded imaging” , *Opt. Lett.* 33 (13) 1515-1517 (2008).
21. S. Komatsu, “Extended depth of Field in Wavefront Coded Imaging” IPSJ SIG Technical Report, Vol.2010-CVIM-174 No.5 (2010).
22. M. Grosse, G. Wetzstein, A. Grundhofer, and O. Bimber, “Coded aperture projection,” *ACM Trans. Graph.* 29(3), 1–12 (2010).
23. C. Ma, J. Suo, Q. Dai, R. Raskar, and G. Wetzstein, “High-rank Coded Aperture Projection for Extended Depth of Field,” In: *Proceedings of IEEE international conference on computational photography (ICCP) 2013*, pp. 1–9 (2013).
24. すばる望遠鏡 (2018.02.05 access),
<https://subarutelescope.org/jp/about/instrument/ao36/index.html>

25. Hideki Takami, Naruhisa Takato, Yutaka Hayano, Masanori Iye, Yukiko Kamata, Yosuke Minowa, Tomio Kanazawa, Wolfgang Gaessler, “Performance of Subaru adaptive optics system and the scientific results” , Proceedings of SPIE Vol. 4839 p21-31
26. Masayuki Akiyama and Yoshito Ono, “Wide-Field Multi-Object Adaptive Optics for Next Generation Extremely Large Telescope TMT” , 光学 Vol.44, No.28 pp. 396-398 (2015)
27. M..Hattori and Y. Hayano, “Adaptive Optics in Subaru Telescope and the Application to Microscopy” , 光学 Vol 44, No.10 pp. 370-378 (2015).
28. Y. Egawa, “Depth of Field Expantion Technology Using Chromatic Aversion” , 光学 Vol 40, No.10 pp.528-533 (2011).
29. Y. Kamiishi, R Okamoto, Y. Kose, Y. Mikami and A Shirai, “Entertainment exhibition development and evaluation for science contents using spherical display and motion analysis” エンタテインメントコンピューティングシンポジウム (EC2014) (2014/09)
30. H. Benko, D. Wilson and R. Balakrishnan, “Sphere: Multi-Touch Interactions on a Spherical Display” , Proc. the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST) 2008, pp. 77-86 (2008).
31. T.Nakamura, R. Horisaki and J. Tanida, “Computational superposition projector for extended depth of field and field of view” , Opt. Lett. 38 (9) pp.1560-1562 (2013).
32. 松居吉哉, “レンズ設計法” (共立出版, 1972)
33. 岸川利郎, “光学入門” (オプトロニクス社, 1990)
34. 松居吉哉, “収差論” (社団法人日本オプトメカトロニクス協会, 1989)
35. 松居吉哉, “結像光学入門” (啓学出版, 1988)
36. R. H. Tyson, “PRINCIPLES OF ADAPTIVE OPTICS 4th Edition” (CRC Press, 1991).
37. J. W. Hardy, “Adaptive Optics for Astronomical Telescopes” (Oxford University Press, 1998).
38. N. Miura, “Adaptive Optics for Solar Observation Using Image Correlation” 光学 Vol 44, No.10 pp.379-383 (2015).
39. A. Ohishi, N. Miura, T. Suzuki, S. Kuwamura, S. Ueno, Y. Nakatani and K. Ichimoto, “Solar SLODER Tehnique for Measuring Height Profiles of Atmospheric Turbulence” , 光学 Vol 47, No.6 pp.262-268 (2018).

40. Y.Tamada “Adaptive-Optics Live Imaging Using a Chloroplast Laser Guide Star” 光学 Vol 44, No.10 pp.384-390 (2015).
41. 服部雅之、玉田洋介、村田隆、亀井保博、長谷部光泰、早野裕、大屋真 “補償光学系及び光学装置” 特許 6394850
42. “興和オプトロニクス株式会社” (2018.07.19 access) , <https://kowa-optical.co.jp>
43. “Thorlabs, Inc.” (2017.03.10 access) , <https://www.thorlabs.co.jp/>
44. 磯部圭佑, 緑川克美 “波面歪み量測定装置、波面補償装置、光学測定装置、および方法” 特開 2016-125895
45. キヤノン株式会社 “眼底撮像装置” 特開 2017-127459
46. K. Matsushima, Sato, M. Kasuga and N. Hashimoto, “Immersive Projection Using a Fish-Eye Lens in an Indoor Space”, 映像情報メディア学会誌 **65** (7) pp. 1011-1015 (2011).
47. N. Hashimoto, S. Hasegawa and M. Sato, “A Development of Multi-Projection Display "D-vision", 映像情報メディア学会誌 **58** (3) pp.409-417 (2004).
48. W. J. Shain, N. A. Vickers, B. B. Goldberg, T. Bifano and J. Mertz, ” Extended depth-of-field microscopy with a high-speed deformable mirror”, Opt. Lett. **38** (9) pp. 995-998 (2017).
49. S. Matsunaga and S. K. Nayar, “Field Curvature Correction Using Focal Sweep” , IEEE Transactions on Computational Imaging **1** (4) pp. 259-269 (2015).
50. D. J. Brady and N. Hagen, “Multiscale lens design” , OPTICS EXPRESS **17** (13) pp.10659 - 10674 (2009).
51. H. S. Son, D. Marks, J. Hahn, J. Kim and D. J. Brady, “Design of a spherical focal surface using close-packed relay optics” , Opt. Express **19** (17) pp.16132 -16138 (2011).
52. D. Dumas, M. Fendler, N. Baier, J. Primot and E. Coarer, “Curved focal plane detector array for wide field cameras” , Appl. Opt. **51** (22) pp.5419-5424 (2012).
53. S. B. Rim, P. B. Catrysee, R. Dinyari, K. Huang and P. Peumans, “The optical advantages of curved focal pane arrays” , Opt. Express **16** (7) pp.4965 -4971 (2008).
54. M. R. Ackermann, J. T. McGraw and P. C. Zimmer, “Are curved focal planes necessary for wide-field survey telescopes?” , Proc. SPIE **6267**, pp.626740-626749 (2006).

55. L. Zhang, Y. Yang, X. Zhao, Z. Fang and X. Yuan, “Enhancement of depth-of-field in a direct projection-type integral imaging system by a negative lens array” , Opt. Express **20** (23) pp.26021-26026 (2012).
56. R. Martines-Cuenca, G. Saavedra, M. Martines-Corral and B. Javidi, “Progress in 3-D Multiperspective Display by Integral Imaging” , Proceedings of the IEEE Journal **97** (6), pp.1067-1077 (2009).
57. J. Jang and B. Javidi, “Three-dimensional projection integral imaging using micro-convex-mirror arrays” , Opt. Express **12** (6), pp.1077–1083 (2004).
58. M. Wang, Y. Yin, D. Deng, X. Meng, X. Liu, X. Peng, “Improved performance of multi-view fringe projection 3D microscopy” , Opt. Express **25** (16), pp.19408–19421 (2017).
59. P. Fasogbon, L. Duvieubourg and L. Macaire, “Scheimpflug camera calibration using lens distortion model” , Proceedings of International Conference on Computer Vision and Image Processing, pp.159-169 (2016).
60. S. Bae, F. Durand, “Defocus magnification” , EUROGRAPHICS 2007 **26**(3)
61. A. Legarda, A. Izaguirre, N. Arana and A. Iturraspe, “A New Method for Scheimpflug Camera Calibration” , International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals (2011)
62. 家正則 “8m すばる望遠鏡から次世代 30m 望遠鏡 TMT へ” , 応用物理 83 (12) pp.976-985 (2014).
63. 大野良人 “多天体補償光学のためのトモグラフィック推定の広視野化” 2013 年度 第 43 回 天文・天体物理岩手夏の学校
64. “株式会社後藤光学研究所” (2022.01.09 access) <https://www.goto.co.jp/planetarium/>
65. “コニカミノルタプラネタリウム株式会社” (2022.01.09 access) , <https://www.konicaminolta.jp/planetarium/index.html>
66. 愛知県立豊川工科高等学校 “プラネタリウムの投影方式” (2022.01.09 access), <https://toyokawa-th.aichi-c.ed.jp/ext/kagaku/pinhole.htm>
67. 西田信夫 “プロジェクターの技術と応用” (シーエムシー出版, 2005)
68. C. Sun, H. Liu, M. Jia and S. Chen “Review of calibration Methods for Scheimpflug Camera” , Journal of Sensors (2018).

69. 近藤博文 “シャインプルーフの原理を用いた汎用カメラキャリブレーション”, 写真測量とリモートセンシング 56 (5) pp.225-233 (2017).
70. K. J. Fernandes, V. Raja and J.Eyre, “Cybersphere : The Fully Immersive Spherical Projection System”, COMMUNICATIONS OF THE ACM **46**(9) pp.41-46 (2003).
71. M. J. Booth, “Adaptive Optics in Microscopy”, Philosophical Transactions of the Royal Society A (2007).
72. R. G. Gonales-Acuna and H. A. Chaparro-Romo, “General formula for bi-aspheric singlet lens design free of spherical aberration”, Appl. Opt. **57** (31) pp.9341-9345 (2018).
73. J. Kwon, H Rhee Y. Ghim and Y. Lee, “Field -Curvature Correction According to the Curvature of a CMOS Image-Sensor Using Air-Gap Optimization”, Journal of the Optical Society of Korea **19** (6) pp.658-664 (2015).
74. S. Horiuchi, S. Yoshida and M. Yamamoto, “Simulation of modulation transfer function using a rendering method”, Opt. Express **21** (6) pp.7373-7383 (2013).
75. Nikon Instruments Inc. (2022.01.09 access),
<https://www.microscopyu.com/tutorials/curvatureoffield>
76. R. Kingslake, R. B. Johnson, “Lens Design Fundamentals”, SPIE PRESS
77. P. Zavyalov, “3D Hole Inspection Using Lens with High Field Curvature”, Meas. Sci. Rev. **15** (1) pp.52-57 (2015).
78. N. Wu, W. Zhao, X. Wang, Y. Tao and Z. Hou, “A Novel Design of Through-Hole Depth On-Machine Optical Measuring Equipment for Automatic Drilling and Riveting”, Appl. Sci. 2018, **8**, 2671
79. C. Gaschet, W. Jahn, B. Chambion, E. Hugot, T. Behaghel, S. Lombardo, S. Lemared, M. Ferrari, W. Caplet, S. Getin, A. Vaneneynde, D. Henry, “Methodology to design optical systems with curved sensors”, Appl. Opt. **58** (4) pp.973-978 (2019).
80. Throwing a Curve at CMOS Sensor , (2022.01.09 access) ,
https://www.opticaopen.org/home/newsroom/2017/june/throwing_a_curve_at_cmos_sensors/?feed=News

81. B. Guenter, N. Joshi, R. Stiajkey, A. Keefe, K. Geary, R. Freeman. J, Hundley, P. Patterson, D. Hammon, G. Herrera, E. Sherman, A. Nowak, R. Schubert, P. Bewer, L. Yang, R. Mott and G. McKnight, “Highly curved image sensor : a practical approach for improved optical performance” , Opt. Express **25** (12) pp.13010-13023 (2017).
82. C. Gaschet, B. Chambion, S. Getin, G. Moulin, A. Vaneneynde, S. Caplet D.Henry, E. Hugot, W. Jahn, T. Behaghel, S. Lombardo, M. Roulet, E. Muslimov, M. Ferrari, “Curved sensors for ompact high-resolution wide field designs” , Proc. of SPIE Vol. 10376 (2017).
83. 山本裕紹, “再帰反射による空中結像 (AIRR) による空中ディスプレイ” , 日本画像学会誌 **56** (4) pp.341-351 (2017).
84. 秋山正幸、大野良人, “次世代超大型望遠鏡 TMT のための広視野多天体補償光学” , 光学 **44** (10) pp.396-398 (2015).
85. 江川佳孝, “色収差を利用した被写界深度拡大技術” , 光学 **40** (10) pp.528-533 (2011).
86. CodeV リファレンスマニュアル バージョン 10.7
87. “リコーの一般車用トンネル点検システムが「NETIS」に登録” (2022.01.10 access),
<https://built.itmedia.co.jp/bt/articles/1911/13/news082.html>
88. 日本板硝子株式会社 “マシンビジョン向け SELFOC® Lens Array 「SLA 5DG」の開発に成功” (2022.01.10 access),
<https://www.nsg.co.jp/ja-jp/media/ir-updates/announcements-2021/sla5-ag-for-machine-vision>
89. BOSTON MICRO MACHINES CORPORATION (2022.01.10 access),
<https://bostonmicromachines.com/>
90. ALPAO (2022.01.10 access) , <https://www.alpao.com/alpao/>
91. 峰崎岳夫, “小口径望遠鏡用可視補償光学の開発” , 第 11 回 光赤外線大学関連ワークショップ
92. M. Imaki, S. Kameyama, J. Suzuki, Y. Tamagawa and Y. Hirano, “Development of simulator for laser beam propagation in atmospheric turbulence” , 25th Laser Sensing Symposium (2007).
93. J. Kim, “Depth-enhanced three-dimensional integral imaging by use of multilayered display devices” , Appl. Opt. **45** (18) pp.4334-4343 (2006).
94. 株式会社渋谷光学 “Glomal.jp” (2022.01.10 access) , <https://glomal.jp/>

95. Y. Kuniyoshi, N. Kita, K. Sugimoto, S. Nakamura and T. Suehiro,, “A Foveated Wide Angle Lens for Active Vision” , IEEE International Conference on Robotics and Automation vol.3 pp.2982-2988 (1995).
96. R. Raskar, M. S. Brouwn, R. Yang, W. Chen, G. Welch, H. Towles, B. Seales and H. Fuchs, “Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration” , IEEE Proceedings Visualization '99.
97. P. Bourke, “Low Cost Projection Environment for Immersive Gaming” , Journal of Multimedia **3** (1) pp.41-46 (2008).
98. B. Sajadi and A. Majumder, “Auto-Calibration of Cylindrical Multi-Projector Systems” , IEEE Virtual Reality Conference 2010.
99. E. Lants, “A Survey of Large-Scaale Immersive Display” , ACM SIGGRAPH 2007.
100. N. Kawagishi, R. Kakinuma and H. Yamamoto, “Aerial image resolution measurement based on the slanted knife edge method” Opt. Express **28** (24) pp.35518-35527 (2020).
101. N. Kawagishi, R. Kakinuma, M. Yasugi and H. Yamamoto, “MTF measurement of aerial image formed by retro-reflection with polarization”, IMID, 85 (2021).
102. H. Guo, K. Takiyama, R. Kakinuma, M. Yasugi and H. Yamamoto, “Influence of Floating Distance on Imaging Resolution in Aerial maging by Retro-Reflection (AIRR)”, IMID, 86 (2021).
103. K. Takiyama, H. Guo, M. Yasugi, S. Suyama and H. Yamamoto, “Factors Affecting the Modulation Transfer Function (MTF) in Polarized Aerial Imaging by Retro-Reflection (AIRR)” Proc. IDW **28**, pp.272-275

謝辞

本論文の執筆にあたり、論文審査委員としてご指導賜りました、宇都宮大学 山本裕紹 教授、大谷幸利 教授、杉原興浩 教授、湯上 登 教授、玉田洋介 准教授、ならびに多くのご支援を頂きました同大学の皆さまに深く感謝いたします。

本研究は、筆者が宇都宮大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に山本研究室において、同大学工学部 山本裕紹 教授のご指導のもとに行ったものであります。山本先生には、長期履修期間含め6年の間、研究活動に関しまして様々な指導を頂きましたこと、深く感謝いたします。

副指導教官としてご指導いただきました同大学工学部 大谷教授には、宇都宮大学での博士後期課程へ進むきっかけを頂き、また在籍中にも常に気にかけていただきましたこと、深く感謝致します。また、同じく副指導教官としてご指導いただきました、同大学工学部 杉原興浩 教授には、研究進捗など常にお声がけ頂き、自身の研究を振り返るきっかけとなりましたこと、深く感謝いたします。

山本研究室の皆様には6年の間、研究活動および論文執筆、学会発表などの様々な面でご協力頂きましたこと、感謝いたします。

また、宇都宮大学 稲秀樹 客員教授には、同大学との関係に関しまして様々な面でご尽力いただき、またご相談に乗っていただきましたこと、感謝致します。

本研究は、興和株式会社および興和オプトロニクス株式会社の理解のもとに行われました。そして本論文を執筆する機会を与えていただきました興和株式会社代表取締役 三輪芳弘 社長 には心よりお礼申し上げます。また興和オプトロニクス株式会社 三輪尚巨 代表取締役には、業務との時間調整についてご配慮いただきましたこと、心よりお礼申し上げます。また、興和株式会社ならびに興和オプトロニクス株式会社の皆様には、宇都宮大学での研究につきましてご協力いただきましたこと、感謝申し上げます。

最後に、本論文の執筆にあたり、会社業務と研究の両立という状況の中、常に心の支えとなってくれた家族(佳子、莉那、修平)に感謝致します。

2022年1月 富永 修一

研究業績

A. 学術論文

- [1] S. Tominaga, K. Kawai and H. Yamamoto, “Projecting a flat plane to a spherical surface by use of a compensation mirror.” , Opt. Review **26** pp.411-421 (2019).

B. 国際会議論文

- [1] K. Kawai, S. Tominaga and H. Yamamoto, “Projecting a Flat-Surface Object to a Spherical Surface” , Proc. ODF’18, (2018).
- [2] S. Tominaga, K. Kawai and H. Yamamoto, “Projecting Method for Flat Surface Object to Spherical or Cylindrical Surface” , Proc. IDW **25**, (2018).
- [3] S. Tominaga and H. Yamamoto, “Projecting onto a Slanted Cylindrical Surface by Use of a Curved Mirror and Schempflug Optics” , Proc. IDW **28** (2021).

C. 国内学会発表

- [1] 齊藤輝樹, 富永修一, 佐事郁弥, 八杉公基, 陶山史朗, 山本裕紹,
“一次結像面に球面ミラーを持つ結像光学系の MTF 特性”,
レーザー学会学術講演会 第 42 回年次大会

D. 特許出願

- [1] 公開番号：特開 2021-67834 (P2021-67834A), 発明の名称：光学システム及び投影機