

# 超広角反射光学系の設計技術

中野貴敬\*  
松本佳宏\*  
玉川恭久\*\*

*Design Technology of Ultra Wide-angle Reflective Optical System*

*Takayuki Nakano, Yoshihiro Matsumoto, Yasuhisa Tamagawa*

## 要旨

近年、世界的な安全意識の高まりからセキュリティ関連技術が注目され、社会の安全安心を支えるインフラとしてサーマルイメージャの需要が高まっている。建造物への不審者の侵入検知や船舶の安全運行のための海上監視、夜間車両運転時の視認性向上を目的としたナイトビジョンシステム、さらにSARS(重傷急性呼吸器症候群)や新型インフルエンザの流入を水際で防止するため空港に導入されたスクリーニング装置など、適用分野が拡大している。

これまで、サーマルイメージャの光学系にはゲルマニウムレンズなどの特殊なレンズが使用されており、製品コストを押し上げる一要因になっていた。一方、大型の天体望遠鏡などに用いられている反射光学系はコスト面で優れるが、サーマルイメージャに使用する場合、広角化と低Fナンバー化の両立がキーとなる。

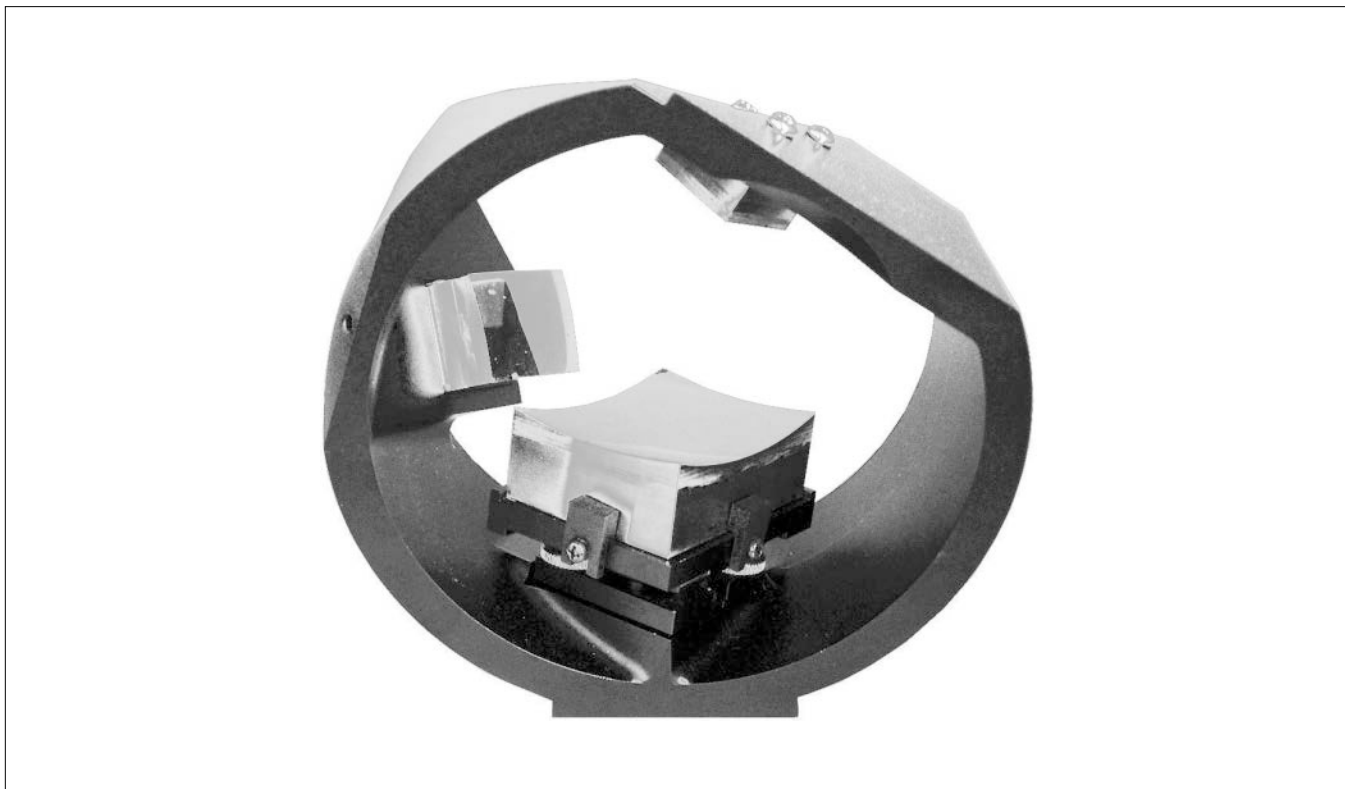
本稿では、3枚の反射鏡を三次元的に配置することで広角化と低Fナンバー<sup>(注1)</sup>化を実現するイメージャ用の反射光学系設計技術について述べる。この設計技術は次の3技術をコアとして開発した。

- (1) 三次元構造の低次元化によるミラー配置の最適化
- (2) 偏心収差<sup>(注2)</sup>解析/低減手法の確立
- (3) 公差解析に基づいた調整機構の決定

この技術を適用して実際に反射光学系を設計し、サーマルイメージャと組み合わせていった撮像実験の結果も述べる。試作光学系はFナンバー2でありながら画角 $30^{\circ} \times 24^{\circ}$ という従来にない広い視野角を実現し、日本光学会 光設計研究グループの光設計優秀賞(2009年度)を受賞した。

(注1) 光学系の焦点距離を開口径で割った値。Fナンバーが小さい光学系ほど多くの光を集めることができる。

(注2) ミラーが本来の位置と外れて配置されることによって発生する像のボケや歪(ひず)み。



## 超広角反射光学系の設計技術を適用した光学系の試作例

超広角反射光学系の設計技術を適用してサーマルイメージャ用に設計した光学系の試作例である。右方から入射した光線が光学系の中を時計回りに渦を描くような光路で伝搬し、上方の像面上に結像する。画角 $30^{\circ} \times 24^{\circ}$ 、F/2のこれまでに類を見ない広角化と低Fナンバー化の両立を実現した。従来サーマルイメージャに用いられてきた高価なゲルマニウムレンズの置き換えによる光学系の低コスト化が期待される。

## 1. ま え が き

近年、世界的な安全意識の高まりからセキュリティ関連技術が注目され、社会の安全安心を支えるインフラとしてサーマルイメージャの需要が高まっている。サーマルイメージャは熱画像を得る用途以外に、夜間に照明光なしで画像を得ることができるため、建造物への不審者の侵入検知や船舶の安全運行のための海上監視、夜間車両運転時の視認性向上を目的としたナイトビジョンシステムへと用途を広げている。熱画像を得る用途でも、SARSや新型インフルエンザの流入を水際で防止するため空港に導入されたスクリーニング装置など、身近なセンシング技術になりつつある。

サーマルイメージャは1992年<sup>(1)</sup>に熱型赤外線検出器を集積した非冷却タイプのイメージセンサが発表されたことによって、それまでの冷却タイプの量子型検出器を用いたイメージャと比べて、大幅な低コスト化が進んだ。一方、光学系にはゲルマニウムレンズなどの特殊なレンズが使用されており、製品コストを押し上げる一要因になっている。このため、光学系の低コスト化を目的とし、超広角反射光学系の設計技術の開発を行った。

反射光学系はミラー表面にコートされた薄膜で光線を反射するためミラー母材の材料に対する制約がなく、コスト面で優れるが、サーマルイメージャに使用する場合、広角化と低Fナンバー化が必要となる。そこで、3枚の反射鏡を“スパイラル構造”と呼ぶ三次元配置を行うことで広角化と低Fナンバー化が両立できる構造に考案し、次の3つの技術をコアとした設計手法の開発を行った。

- (1) 三次元構造の低次元化によるミラー配置の最適化
- (2) 偏心収差解析／低減手法の確立
- (3) 公差解析に基づいた調整機構の決定

## 2. 設 計 手 法

### 2.1 スパイラル構造

まず、光学系の構造を表すために使用する言葉の定義を行う。ここでは、光学系の開口絞りの中心を通る光線を“主光線”と表記し、主光線の中で像面の中心に結像するものを“中心主光線”又は“光軸”と表記する(図1)。3枚のミ

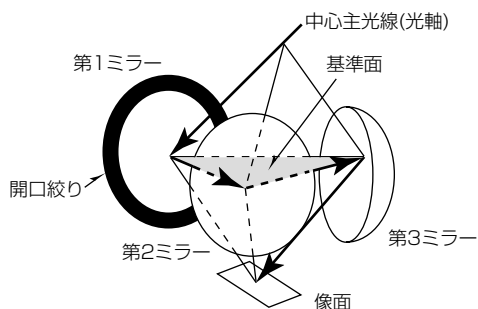


図1. スパイラル構造

ラーにおける中心主光線の3つの反射点を含む平面を“基準面”と呼ぶ。

光学系に入射する中心主光線と、光学系から射出する中心主光線が、基準面に対して反対側にある構造に反射光学系を設定する。光線が光学系内部を渦を描くように伝搬することから、この構造を“スパイラル構造”と名付ける。このように、スパイラル構造に光学系を設計することによって入射光線と射出光線は三次元的に反射鏡とは異なる方向を通ることになり、光線の遮蔽(しゃへい)が起こりにくい構成にすることができる。また、三次元構造の光学系は設計の自由度(パラメータ)が多いため、それによって光学系の小型化や収差の低減を行うことができる。例えば、カセグレン光学系などの共軸光学系では反射鏡は常に同じ軸上にあるため、ミラー配置のパラメータは1面あたり1つだけであるが、スパイラル構造では三次元的に配置することができるようになるため、配置パラメータが1面あたり3つに増加する。

一方で、スパイラル構造な光学系の設計・製造を難しくしている問題として

- (1) ミラーや光線の三次元的な位置の把握が必要
  - (2) 共軸構造より低次の収差が発生する
  - (3) 配置パラメータ増加による調整の複雑化
- という点があげられる。これらの課題を克服するために開発した設計技術を次に述べる。

### 2.2 三次元構造の低次元化

光学系の三次元配置を容易に把握するため、基準球という考え方を導入した(図2)。基準球は各ミラー上での中心主光線の反射点を結んでできる三角形の外接円を大円とする球として定義する。

基準球を用いることで反射鏡や光線の三次元的な相対関係を二次元での相対関係に還元する。まず、図2に示すように、各ミラーを中心主光線の反射点で基準円に接し、半径がミラーの半径と等しい円領域で置き換える。次に、光学系に入射する光束と光学系から射出する光束についても同様に、中心主光線の基準球との交差点で接する円領域に置き換える。円領域の半径は光束が基準球と交差する断面

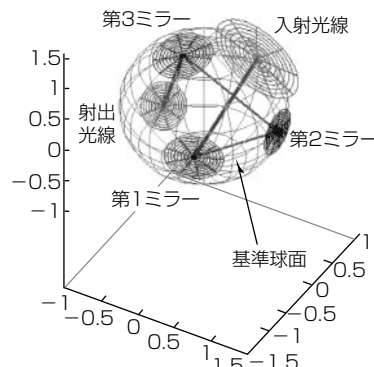


図2. 基準球面の定義

の半径を使用する。

各ミラーは光学系中を伝搬する光線を遮らないように配置する必要がある。図2から基準球の中にはミラーはないため、基準球の中で光線遮蔽が起こることはない。ミラーはすべて基準球上にあり、光線遮蔽は常に基準球上で起こることになる。したがって、基準球上でミラーと入射・射出光束を表す円領域に重なりがないように各配置を決めることで、光線遮蔽がない反射光学系を設定することができる。球面上の点は二次元座標で表されるため、光学系の三次元構造は二次元の関係へと変えることができ、ミラーと光束の位置把握が格段に容易になる。

### 2.3 偏心収差の低減手法

共軸構造の光学系では三次のザイデル収差(球面収差, コマ収差, 非点収差, 像面湾曲, 歪曲(わいきょく))が最低次数の収差となるのに対して, スパイラル構造では二次の収差(偏心収差)が最低次数となり<sup>(2)</sup>, 補正を行うべき収差の数が増加する。

スパイラル構造の光学系に発生する二次収差は像面上に一樣に発生する収差(ここでは“球面収差”という。)と, 像高に応じて増加する収差(非点収差), 歪曲の3種類に分けることができる。歪曲は被写体の像に歪みを与えるだけで像の先鋭さには影響を及ぼさない。また, 取得後の画像に逆方向の歪曲を加える画像処理を行うことで補正を行うことができるため, 一般的に歪曲の低減は行う必要はない。

球面収差はミラー形状に円錐(えんすい)曲面を使用することで容易に除去することができる。円錐曲面の一方の焦点から放射された光線は鏡面反射のあと他方の焦点に集光するという特性があり, 円錐曲面のミラー焦点を連結して配置することで原理的に球面収差を除去することができる。

非点収差の発生を抑制するため, 非点収差の解析モデルを導出した。円錐曲面に発生する非点収差は, 円錐曲面の対称面に平行な光線と垂直な光線とで像面の傾きが異なる収差として現れることが知られている<sup>(3)</sup>。スパイラル構造では像面の傾きの方向も回転して変化するため, 非点収差の補正には像面の傾きの大きさと方向を別々にモデル化し, それぞれを相殺するようにミラーの屈折力配分と配置を設定することで非点収差の発生を抑制した。図3に導出した

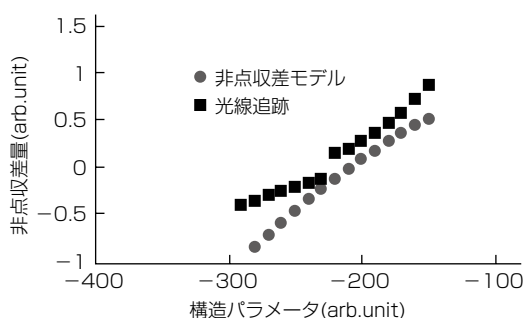


図3. 非点収差モデルの検証

モデルによって見積もった非点収差の大きさと, 光線追跡計算を行って非点収差を算出した結果を比較した例を示す。図から, 非点収差が0となる点はモデルと光線追跡で一致しており, 今回導出したモデルが非点収差を相殺する設計を行うために使用できることが確認できた。

### 2.4 調整機構の決定

光学系の組立て工程で調整要素が少ないことは, 実用上重要である。

スパイラル構造は配置パラメータが多いため効率的な調整が必要であり, ミラーの配置誤差に対する結像性能のシミュレーション解析に基づいた調整要素の最適化を行った。その結果, 第2ミラーと第3ミラーの相対的な傾き公差が結像性能に対して最も感度が高く, 第3ミラーに傾きの調整要素を持たせることで公差条件を緩和できることが分かった。このため, 試作光学系として第3ミラーに傾き調整機構をもつ鏡筒構造を採用した。

図4に第3ミラーに傾き調整機構がない光学系での結像性能のモンテカルロ・シミュレーション結果を示す。公差量として各面の並進0.05mm, 傾き0.01°を設定した。このときの結像性能は, 像ボケの増加量の指標となるMTF (Modulation Transfer Function)の低下率で0.1以下である。一方, 第3ミラーに調整機構を持たせ, 公差量を各面の並進0.2mm, 傾き0.2°を設定したときのシミュレーション結果を図5に示す。この条件でも図5と同様にMTF低下率を0.1以下に抑制することができており, 第3ミラーに傾き調整機構を付加するだけで公差条件を著しく緩和できることが確認できた。

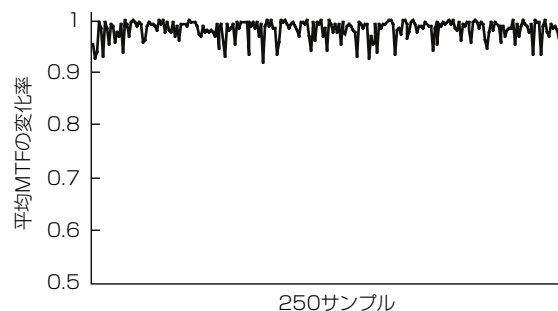


図4. 結像性能のシミュレーション結果 (公差: 並進0.05mm, 傾き0.01°, 傾き調整なし)

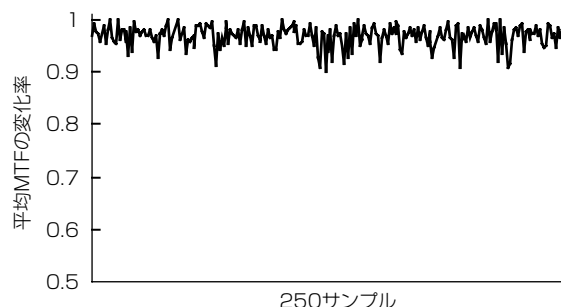


図5. 結像性能のシミュレーション結果 (公差: 並進0.1mm, 傾き0.2°, 傾き調整あり)

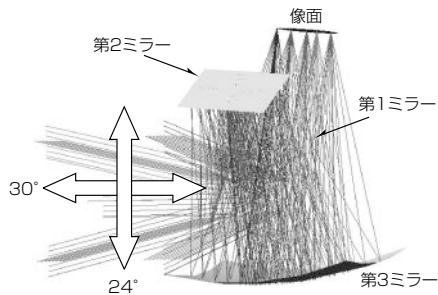


図6. 試作光学系の光線図

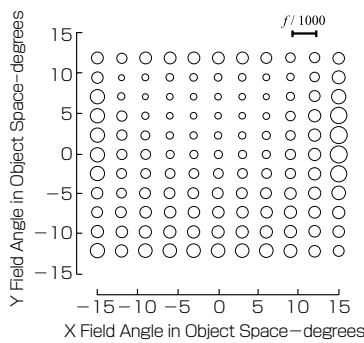


図7. スポットダイアグラム

### 3. 光学系の試作例

2章の設計手法に基づき、 $F/2$ 、画角 $30^\circ \times 24^\circ$ のスパイラル構造の光学系の設計を行った。図6に光線図を、図7に点像に対するRMS(Root Mean Square)直径を円の直径で表したスポットダイアグラムを示す。RMS直径は像面全体で光学系の焦点距離 $f$ の $1/1000$ 未満である。

設計光学系の試作による性能検証を行った。ミラーは高精度金型加工技術を利用して、金属鏡で作成した(図8)。ミラー形状を粗加工したステンレス材に無電解ニッケルコートをし、そのコート上に高精度な鏡面を切削加工した。金属鏡の外形状は軸出しを容易にするため、矩形(くけい)形状とした。ここでの試作は金属鏡を用いたが、もちろんガラス・プラスチックなどもミラー材料として用いることができる。

図9に試作したスパイラル構造の光学系を示す。鏡筒は筒を輪切りにしたような形状の1つの部品だけでできており、この筒の内側に各反射鏡を配置することで加工機械の公差範囲での組立てを行った。第3ミラーには2.4節で述べたとおり調整機構があり、傾きを調整することで効率的な結像性能の補正を行うことができる。被写体からの光線は紙面右側の手前の方から入射し、スパイラルを描くように第1ミラーから第3ミラーへと反射しながら伝搬した後で、光学系の左上の位置で結像する。

図10に試作光学系によって取得したサーマルイメージャの撮像例を示す。撮像例から、被写体の服のしわや腕の血管が見られ、良好な結像性能が得られていることが確認できる。

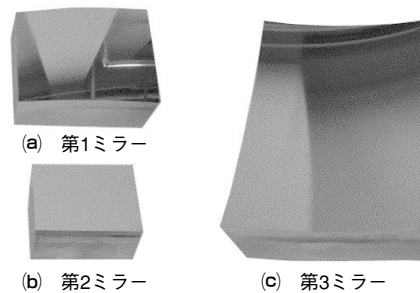


図8. 加工金属鏡

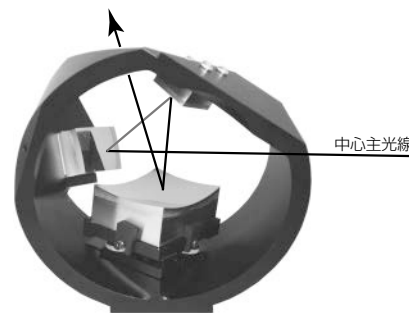


図9. 試作光学系



図10. サーマルイメージャでの撮像例

### 4. む す び

3枚の反射鏡をスパイラル構造に三次元配置することで広角化と低Fナンバー化を実現する、イメージャ用の反射光学系設計技術について述べた。実際に $F/2$ の光学系設計に適用し、視野角 $30^\circ \times 24^\circ$ の従来にない広角化と低Fナンバー化の両立した設計例を得ることができた。この光学系は日本光学会 光設計研究グループの光設計優秀賞(2009年度)を受賞した。

今後は開発した光学設計のコア技術の適用範囲を幅広い光学センサの設計技術へと展開していき、光学センサの広角化・高スループット化によるセンシング技術の向上を図っていく。

### 参 考 文 献

- (1) Hanson, C., et al.: Uncooled Thermal Imaging at Texas Instruments, Proc. of SPIE, **1735**, 17~26 (1992)
- (2) Sasian, J. M.: How to approach the design of a bilateral symmetric optical system, Opt. Eng., **33**, No. 6, 2045~2061 (1994)
- (3) Nakano, T., et al.: Design of Plane-Symmetric Low F-number Reflective system Based on Perturbation Model, Opt. Rev., **14**, No. 6, 376~383 (2007)