

超薄型屈曲ズームレンズの開発

Development of Ultra-Thin Folded Zoom Lenses

尾崎 雄一*
Yuichi OZAKI

大里 昌良**
Masayoshi OOSATO

要旨

近年、CCDやCMOSといった固体撮像素子の高性能化、高画素化に伴い、スマートフォンやタブレット型PCといったモバイル機器に搭載される撮像装置もデジタルカメラ（DSC）と同等の性能が求められている。このような流れの中で、単焦点レンズが主流となっているモバイル機器においても、DSCでは主流となっているズームレンズの搭載を望む声が挙がっている。

モバイル機器にズームレンズを搭載するには、以下の様な課題を解決する必要がある。

1. モバイル機器はDSCよりも薄いため、レンズユニットの薄型化が求められる。
2. DSCと同等の画質が求められる。注意点として、薄型化のためにはセンササイズを小さくする事が望ましいが、センササイズを小さくした場合、同等の画質を得るためにはより明るいFナンバーが必要になるため、逆に薄型化の妨げとなる可能性がある。
3. モバイル機器はDSCよりも出荷数量が多いため、高い量産性が求められる。

我々は、このような課題を解決するズームレンズを開発した。

本ズームレンズでは、屈曲光学系を採用し、さらに薄型化に有利なレンズ構成やメカ構成とすることで、レンズユニットの薄型化を達成した。さらに、誤差感度低減設計や調芯の導入によって、高い量産性を得ることが出来た。

その結果、コンパクトDSCと同等レベルの性能を保持しつつ、モバイル機器に搭載可能なサイズのズームレンズを設計することが出来た。また、試作においても十分な量産性を確認することが出来た。

現在は、第1群の薄型化や調芯の省略により、さらなる薄型化を達成し、さらに手振れ機能を新たに搭載したズームレンズの検討を行っている。

Abstract

In recent years, with the higher performance and higher number of pixels of solid imaging elements such as CCDs and CMOSs, imaging devices incorporated in mobile devices such as smart phones and tablet PCs are expected by users to have performance equivalent to that of digital still cameras (DSCs). Even in mobile devices in which a single focus lens is mainly used, customers also want a zoom lens, as is generally incorporated in DSCs.

To incorporate a zoom lens in a mobile device, the following issues must be dealt with:

1. Since mobile devices are thinner than DSCs, a thinner lens unit is necessary.
2. Image quality equivalent to that of a DSC is essential. To make the lens unit thinner, a smaller sensor is desirable, but, if the sensor is made smaller, a lower F-number lens is required to achieve the needed image quality, which may result in a thicker lens.
3. Since a company's shipping volume of mobile devices is greater than that of its DSCs, higher productivity of a zoom lens thinner than that of the DSCs would be required.

We have developed a thin zoom lens which resolves these issues.

We achieved the thin lens unit by adopting a folded optical system and by designing an advantageous lens configuration and mechanical structure. Further, higher productivity was achieved by introducing an optical design of robust sensitivity to assembly errors and by carrying out optical alignment of lenses in the 2nd group using an optical alignment apparatus. The lens unit has a very high yield in preproduction. In addition, the thin zoom lens unit offers image quality as high as that of a compact DSC but is thin enough to be incorporated in mobile devices.

Further, we are now developing an ultra-thin zoom lens, which is thinner yet than the above thin lens and which incorporates an image stabilization function.

* 開発統括本部 第3技術開発センター

** 開発統括本部 事業開発統括部 デバイス事業開発部

1 はじめに

近年では、スマートフォンやタブレット型PCといったモバイル機器にカメラ機能を持たせることが世界規模で主流となっている。また、CCDやCMOSといった固体撮像素子の高画素化に伴い、レンズユニットに求められる光学性能も年々高くなっており、デジタルスチルカメラ（DSC）に匹敵するような性能が求められてきている。このような流れの中で、単焦点レンズが主流となっているモバイル機器においても、DSCでは主流となっているズームレンズの搭載を望む声が挙がっている。

モバイル機器向けのズームレンズには、DSCと同等の画質と、モバイル機器に搭載可能なサイズの両立が求められる。

本稿では、レンズ構成やメカ構成を工夫する事によって、これらの課題を解決し、モバイル機器に搭載できるような薄型化を達成した屈曲ズームレンズの紹介を行う。

2 薄型屈曲ズームレンズ

モバイル機器はDSCに比べると薄型であることが多く、搭載されるズームレンズもより薄型化する必要がある。また、DSCよりも出荷数量が多いため、より高い量産性が求められる。その一方で、ズームレンズは構造が複雑なことから、手動で組み立てる箇所が多く、モバイル機器向けに小型化すると、組み立てが困難になることが予想される。そこで、モバイル機器に搭載可能なサイズでありながら、量産性の高いズームレンズを設計・試作することで、モバイル機器向けのズームレンズの量産性を確認した。まずは、そのズームレンズの技術紹介を行う。

2.1 目標サイズ

現在、流通しているスマートフォンやタブレット型PCの厚さは10～15mm前後が多く、20mmを超える厚さの物は少なくなっている。また、過去に製品化された携帯電話向けのズームレンズではユニットの厚さが8～10mm程度となっていたことから、モバイル機器に搭載可能なユニットサイズとして、本ズームレンズのユニットの厚さを目標8mm以下と定めた。

2.2 レンズ設計における薄型化検討

2.2.1 屈曲光学系

本ズームレンズでは、ユニットの薄型化のために、第1群内にプリズムを配置し、光軸を90度折り曲げた屈曲光学系を採用した。デジタルカメラで主流となっている沈胴方式では、ユニットの厚みは各レンズの厚みの合計で決まるのに対し、屈曲光学系では、第1群の厚みと折り曲げ後の各レンズ群の径で最終的な厚みが決まるため、ユニットを薄型化しやすい。

2.2.2 センササイズとFナンバー

一般に、DSCでは解像性能をTV本で表現することが多い。TV本とは、センサの水平幅の中に白黒の垂線が何本まで分離して見分けられるかを表す指標であるため、センササイズが小さくなると、同じTV本でもより高い空間周波数での結像性能が必要となる。高い空間周波数で結像するためには、Fナンバーを明るくして回折による性能低下を抑える必要がある。あるコンパクトDSC（1/2.33型、F3.2-5.6）のセンササイズを小さくした時に、同等の性能を得るために必要なFナンバーをTable 1に記す。

また、画素サイズが同一の場合のセンササイズと画素数の関係をTable 2に記す。

Table 1 Relation between sensor size and lens F-number. A smaller sensor requires a lower F-number to maintain equivalent image quality.

Sensor size	1/2.33"	1/3"	1/4"	1/5"
Wide	F3.2	F2.8	F2.5	F2.2
Tele	F5.6	F4.9	F4.3	F3.8

Table 2 Relation between sensor size and number of pixels. A smaller sensor has fewer pixels.

Sensor size	1/3"	1/4"	1/5"
1.4 μm pixel size	8M	5M	3M
1.12 μm pixel size	13M	8M	5M

よって、センササイズを小さくすると、ユニットサイズを小さくすることはできるが、回折による性能低下（Fナンバー同一の場合）や画素数減少（画素サイズ同一の場合）による商品価値低下が生じるため、バランスを考えた最適なセンササイズを決定する必要がある。

Fナンバーを明るくすることによる光学への影響や、市場での画素数のトレンドを考慮した結果、本ズームレンズでは、1/3インチのセンサを採用する事とした。

2.2.3 群構成

コンパクトDSC用ズームレンズでは、第1群に負群を用いた負群先行ズームタイプを用いることが多い。負群先行タイプでは、負の第1群、正の第2群、正の第3群で構成される負正正構成と、負の第1群、正の第2群、負の第3群、正の第4群で構成される負正負正構成が存在する。負正負正構成は、第2群で収束した光線を第3群で発散する形となるため、負正正構成と比べると可動群である第3群の有効径が小さくなり、薄型化に有利となる。そのため、本ズームレンズでは負正負正構成を採用した。変倍の際には、第2群および第3群が移動し、フォーカシングは第3群で行う。第1群および第4群は固定となっている。

2.2.4 レンズ構成

Fig. 1 に本ズームレンズの断面図を示す。

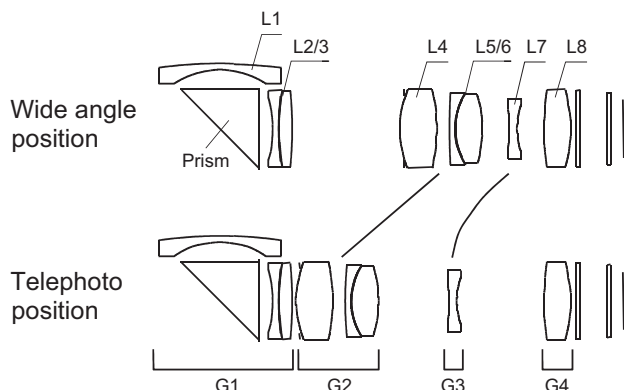


Fig. 1 Cross-sectional view of a thin zoom lens unit attained by adopting a folded optical system and a suitable zoom lens configuration.

本ズームレンズでは、第2群が開口絞りを含み、光束径が最も大きいことから、第2群内で発生する収差を良好に補正する必要がある。よって、球面収差やコマ収差を効果的に補正するために、第2群は、物体側から順に、開口絞り、正の単レンズ、負レンズと正レンズの接合レンズの3枚構成とし、第4レンズと第6レンズにガラスモールド非球面レンズを採用した。最も物体側に正のガラスモールドレンズを用いることで、第1群の負のパワーによって発散されてくる光を効率よく収斂し、球面収差を補正できる。さらに、負レンズと正レンズの接合レンズを配置することで、色収差やコマ収差を効果的に補正できる。特に、望遠端においては、第2群内の各レンズをほぼ同じ径で光束が通過することになるため、正負正の対称形に配置することで、バランス良く収差を補正できる。また、第7レンズと第8レンズは比較的光束径が小さく、温度変化による光学性能への影響を受けにくいことから、プラスチック非球面レンズを使用した。非球面レンズを使用することにより、非点収差や歪曲収差を良好に補正することが可能となった。

2.3 光学性能向上対策による量産性確保

2.3.1 偏心誤差感度低減対策

Fig. 2 に本ズームレンズのレンズ及び各レンズ群の偏心感度をそれぞれ0.01mmシフト時のメリジオナル像面変化量として示す。これによると、第2群内の偏心感度が高い様子がわかる。一般的に、群内の偏心感度と群全体の偏心感度を共に低減しようとする時、ズームレンズが大型化や厚みの増加をもたらすことが多い。よって、薄型化を保ったままでは、群内の感度と群全体の感度はトレードオフになるケースが考えられる。第2群は変倍時に移動する群であり、駆動機構及び樹脂成形品の誤差により、移動時に誤差が発生しやすいため、群全体の偏心誤差感度は低減する必要がある。

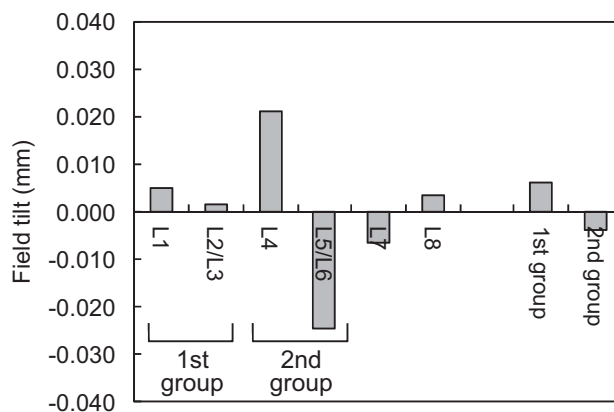


Fig. 2 Decentering sensitivity by variation of meridional image surface. Since only the 2nd group has high sensitivity in this zoom lens, high productivity is obtained by using an optical alignment apparatus with the group.

そこで、本ズームレンズでは、第2群全体の誤差感度を抑えつつ、高くなった群内の偏心誤差感度については、調芯機を用いた群内調芯を行うことで、ズームレンズ全体の良好な光学性能を得ることが出来た。

2.3.2 像面補正対策

本ズームレンズでは、レンズの曲率誤差や芯厚誤差に対する像面変動感度は低く設計されているが、ユニットの薄型化のために、各レンズの径を小さくしているため、面形状誤差（面の微小なうねり）の誤差感度が高く、像面変動が発生してしまう。特に、広角端では、Fナンバーも明るく、焦点深度が浅いことから、面形状誤差による像面変動による性能の劣化が大きいため、像面補正が必要となる。そこで、本ズームレンズにおいて、フォーカス群移動時の広角端での像面変動量が大きいことを利用して、フォーカス群の位置を微調整することで像面補正を行っている。

2.4 メカ設計

2.4.1 レンズユニットの薄型化

屈曲レンズユニットの最大厚みは、第1レンズとプリズムで構成される第1群が支配的であるが、プリズム以降の光学系厚みも影響する。

最も影響するのは、移動群の厚みであり、本光学系は第2群に絞りがあることから、2群内は光線が円形で通過するため、レンズをユニットの厚さ方向でカットをすることが出来ない。また移動するため、鏡胴とのクリアランスが必要であると共に薄型化により鏡胴内壁面反射によるゴーストの懸念がある。

これらを加味し、鏡胴の厚み方向両側に、矩形の開口を設け、そこに2群枠の一部をオーバーラップさせた。開口は薄い反射防止シートで覆う構造にすることにより、鏡胴の厚みを最小限とし、最も光軸から近い内壁の反射を低減させることが出来た。

構造を Fig. 3 に示す。

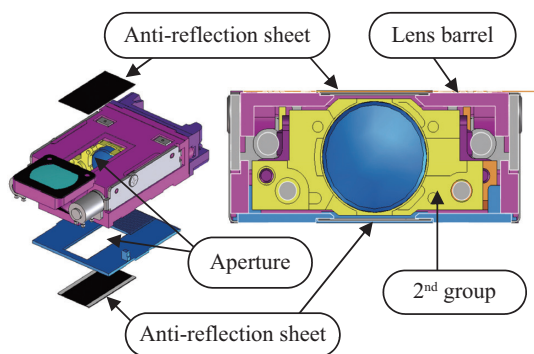


Fig. 3 Mechanical structure of the lens unit. The lens barrel has two apertures, which are covered with a thin anti-reflection sheet to minimize the thickness of the barrel and to reduce inner wall reflection.

第3群、第4群のプラスチックレンズについては、光線が矩形に通るため、ユニットの厚さ方向両側をカットした形状をとることが可能である。

カット量には以下の制約がある。

- ・有効径からカット面が近すぎると成形時にカット部付近の面精度が悪化する。
- ・凸レンズの場合は、カット面の面積が大きくなり、有効径に近い場合、カット面反射が懸念される。

面精度に関しては、従来実績と、光学的な誤差感度を加味し、許容量を検討した。

カット面反射については、光線シミュレーションにて反射の影響を確認しつつマスク位置を調整し、カット量を決定した。

2.4.2 レンズユニットの小型化

本ズームレンズでは、移動群のストロークが長く、ズームの役割を担う第2群と、ズーム+フォーカスの役割を担う第3群の移動範囲がオーバーラップする。

駆動には2つのアクチュエーターが必要となり、光軸に対し、片側に直列配置した方が、レンズユニット全体のフットプリントが小さくなるが、移動範囲がオーバーラップする系は、レンズユニットの厚み方向に重ねて配置する必要があり、ユニットの厚みが増してしまう。

本ズームレンズでは、薄型化を優先するため、アクチュエーターはレンズユニットの左右に配置とした。

薄型優先ではあるが、フットプリントも同時に小さくするため、アクチュエーター、移動群をガイドする軸などは、可能な限り光軸に寄せて配置する必要がある。

アクチュエーターのリードスクリュー、ガイド軸は、金属製であり、摺動性、外径精度が要求されるため、つや消しの表面処理を施すことが難しく、光軸に寄せることにより強い反射ゴーストが懸念される。

3D光線シミュレーションによる影響確認の結果、特定のズームポジションにて第2群を通過した光が、第3群レンズ部を通らずに、リードスクリューに反射して、撮像部に到達し、反射ゴーストとなるケースがあることが判明した。Fig. 4 にシミュレーションイメージを示す。

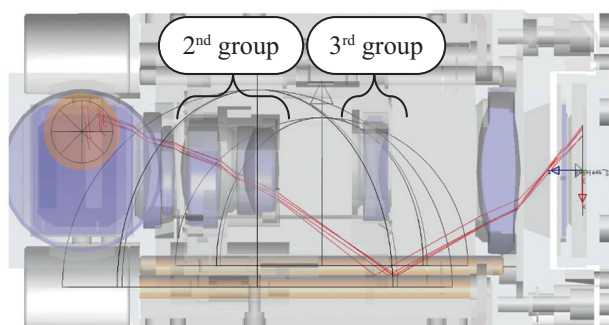


Fig. 4 An example of optical simulation of stray light. In this case, light that has passed through the 2nd group reaches the image sensor after being reflected by the lead screw without passing through the 3rd lens unit, and becomes a reflection ghost.

対策として、第3群枠より壁を追加し光がリードスクリューへ抜けられないような構造とした。Fig. 5 に構造イメージを示す。枠部材は樹脂成型品であり、シボ加工により、壁表面を荒らし、反射率を下げる事が可能である。

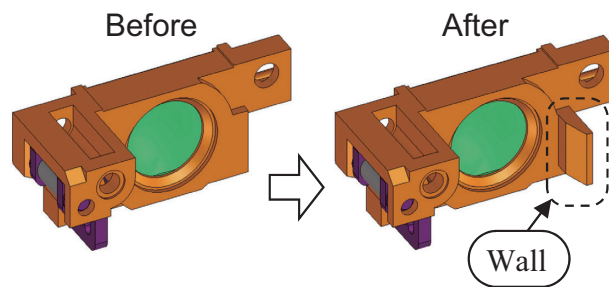


Fig. 5 Modification of the mechanical structure of the 3rd group. After modification, the newly added wall prevents light from reaching the lead screw.

Fig. 6 に効果予想を示す。追加壁により、リードスクリューへの光線が遮断され、低反射率の壁面で反射光は、減衰される。

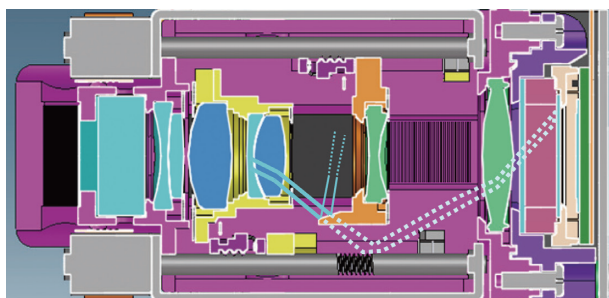


Fig. 6 Effect of the additional wall. The wall blocks stray light from striking the lead screw. Because the wall has low reflectivity, reflected light is attenuated.

試作品でのゴースト評価にて、リードスクリューによる反射ゴーストの発生は無いことが確認され、壁の追加により、反射ゴーストを防止しつつ小型化を達成した。

2.5 仕様と解像性能

以上のようにして設計されたズームレンズの仕様を Table 3 に示す。また、結像性能として、Fig. 7 に MTF 図を示す。Fig. 7 では、実線はサジタル像面を、点線はメリディオナル像面を表す。図中の空間周波数 170 [lp/mm] は約 1200TV 本に相当し、コンパクト DSC と同等レベルの性能を保持している。

Table 3 Specifications of the newly designed thin zoom lens.

CMOS	1/3.06 inches, 13M-pixel
Focal length	3.7~11.1 mm (27.4~82.2 mm equivalent to 35 mm film)
F-number	2.8~4.8
Lens configuration	8 elements in 6 groups (w/o prism)

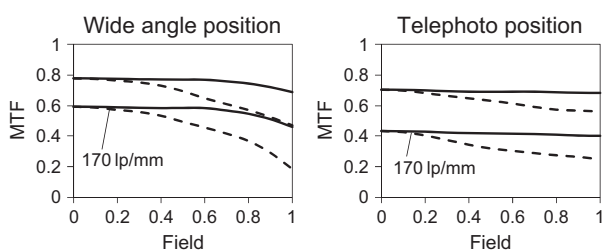


Fig. 7 MTF of the thin zoom lens at infinity. The zoom lens unit has image quality equivalent to a compact DSC. Solid and dashed lines indicate sagittal and meridional image surfaces, respectively.

2.6 課題

Fig. 8 に本ズームレンズのユニット図を示す。

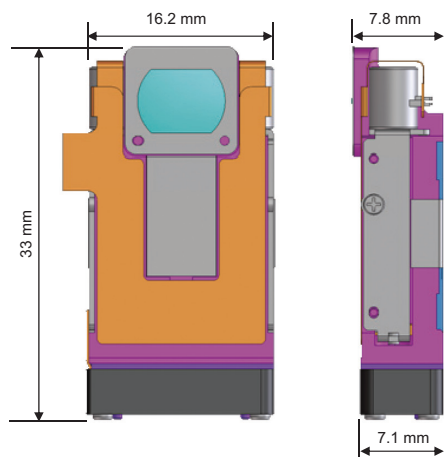


Fig. 8 Projection view of zoom lens unit.

本ズームレンズでは、ユニットの薄型化と量産性向上を両立した設計を行い、ユニットの厚さは目標の 8mm 以下を達成。試作においても十分な良品収率を得ることが出来た。

しかしながら、今後の液晶パネルやバッテリーの発展に伴い、モバイル機器の薄型化がさらに進んでいる可能性は十分に考えられるため、将来に備えてさらなる薄型化が必要といえる。

また、本ズームレンズでは、薄型化優先のために手振れ補正機構は搭載されていないが、一般に、ズームレンズの望遠端は単焦点レンズよりも焦点距離が長いので、手振れの影響が大きく、モバイル機器メーカーの手ぶれ補正機構のニーズは多いといえる。

3 超薄型屈曲ズームレンズ

試作したズームレンズ（以下、試作レンズ）の課題を踏まえ、以下の点について改善を加えた超薄型ズームレンズの検討を現在行っているため、次はその紹介を行う。

- ・ユニットのさらなる薄型化
- ・手振れ補正機構の搭載

3.1 光学設計での薄型化

前述のとおり、屈曲光学系では、第 1 群の厚みと折り曲げ後のレンズの径でユニットの厚みが決まるため、光学設計にあたっては、各項目ごとに対策を講じた。

3.1.1 第 1 群の薄型化

第 1 群の厚さは主に第 1 レンズの厚さとプリズムの厚さで決定する。プリズムを薄くするためには、光軸を 90 度曲げる際に、周辺の光束がプリズムでケラレないように第 1 レンズ及びプリズムの有効径を小さくする必要がある。Fig. 9 で示すように、試作レンズにおいては、プリズムと第 2/3 接合レンズは逆方向から組む構成となっているために、プリズムと接合レンズの間には樹脂枠が存在し、間隔が広がっている。すると、第 1 レンズ及びプリズムが開口絞りから離れてしまうため、有効径が大きくなってしまい、第 1 群が厚みが増加する原因となっていた。

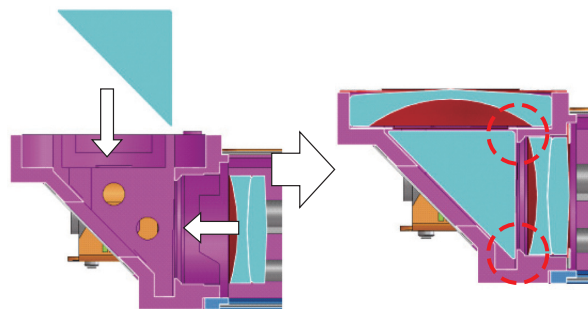


Fig. 9 Cross-sectional view of the 1st lens group of the thin prototype zoom lens. The prism and the L2/3 lens are inserted in the unit from different directions, so the lens holders (shown in dashed circles) make the unit thicker. Therefore, in the ultra-thin zoom lens, which is thinner yet than the thin prototype zoom lens, and is currently under study, to eliminate the holders, the prism and the L2/3 lens are first cemented, and the cemented unit is then inserted as one.

そこで、現在検討中のズームレンズでは、プリズムと接合レンズを有効径外で接着し、同方向から組むことによって、レンズ間隔を縮小し、第 1 レンズ及びプリズム

の有効径を小さくした。また、試作レンズの際にはコストや入手性を考慮して、屈折率が1.85程度の硝材をプリズムに使用していたが、本ズームレンズでは屈折率が2.0を超える硝材を使用することで、周辺光束がより光軸に近い位置を通過することになるため、プリズムの有効径が小さくなる。今回、樹脂枠が無くなったことで、プリズムと接合レンズが直接接触するため、接触部を通過するゴーストの発生が懸念されたが、3D光線シミュレーションの結果、ゴーストが発生しないことを確認した。

また、試作レンズでは第1レンズに物体側に凸のメニスカスレンズを使用している。メニスカスレンズにすると、光線の入射角は小さくなるため、収差の発生を抑えることはできるが、ユニットが厚くなる原因となる。そのため、本ズームレンズでは、物体側が平面の平凹レンズを使用することで、第1レンズの厚さを最小限に抑え、発生した収差は第2/3接合レンズで補正した。

3.1.2 第2群の小径化

試作レンズでは、折り曲げ後のレンズ群の中で厚さ方向の径が最も大きくなっているのは、第2群であるため、第2群の径を小さくする必要がある。

前述のとおり、試作レンズでは第2群の群内偏心感度が高いため、群内調芯を行うことによって光学性能を確保している。しかしながら、調芯レンズを安定させるための保持スペースや調芯する際のシフトスペースを確保する必要があるため、第2群枠が大型化し、結果としてレンズユニットが厚くなる原因の一つとなっていた。

そこで、本ズームレンズでは、第2群を第4～6レンズが3枚接合された1つの接合レンズとした。前述のとおり、群内の感度と群全体の感度はトレードオフになることが多いため、群内調芯を省略できるくらいに群内の偏心感度を低減することは困難である。しかしながら、各レンズを接合することで、それぞれ独立に枠に組むよりもはるかに精度良く組むことができるため、群内調芯の省略による第2群の小径化が可能となった。面の自由度が減ったことによる光学性能の劣化については、非球面形状の最適化及び第4レンズにおける高屈折率硝材の使用等で、最小限に抑えることが出来た。

3.2 手振れ補正機構の追加

一般に、カメラの手振れ補正機能としては、センサを光軸と垂直方向に動かす方法と、レンズを同様に動かす方法がある。本ズームレンズのような屈曲光学系の場合、センサや折り曲げ後のレンズを動かす場合、その分のスペースを確保する必要があるため、レンズユニットの厚み増加の原因となってしまう。そこで、本ズームレンズでは、折り曲げ前の第1レンズを光軸と垂直方向に動かす手振れ補正機構を搭載した。このような構成にすることで、レンズユニットの厚み増加を防ぎつつ、手振れ補正を行うことができる。ただし、第1レンズを動かす場合、第1レンズの色分散が大きいと、特に望遠端で色収

差が発生してしまい、光学性能の劣化に繋がるため、第1レンズには比較的低分散の硝材を使用している。

3.3 設計結果

以上のようにして設計された本ズームレンズの断面図をFig. 10に示す。前述した幾つかの薄型化検討の結果、ユニット厚は7.8mm→6.5mmと1.3mmの薄型化を達成することが出来た。また、結像性能として、Fig. 11にMTF図を示す。Fig. 7と比較すると薄型化による若干の性能低下は見られるが、十分コンパクトDSCと同等レベルの性能を保持している。

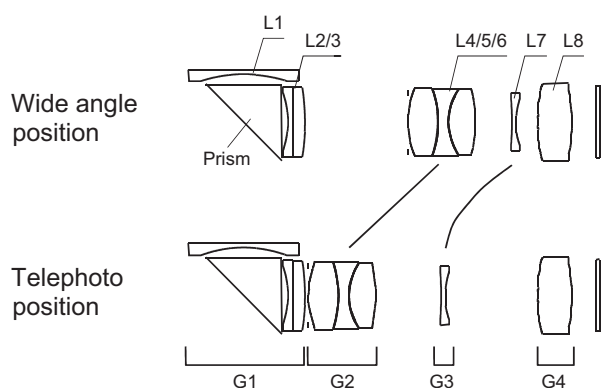


Fig. 10 Cross-sectional view of the ultra-thin zoom lens unit. By cementing all lenses of the 2nd group to eliminate alignment space, and by cementing the prism and the L2/3 lens, the ultra-thin zoom lens unit is 1.3 mm thinner than the thin zoom lens unit shown in Fig. 1.

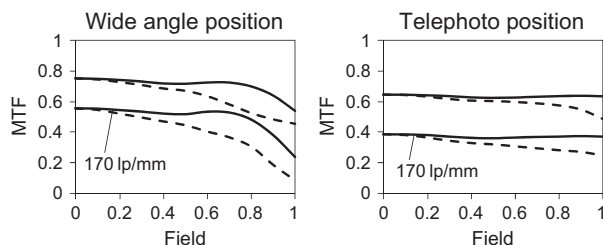


Fig. 11 MTF of the ultra-thin zoom lens at infinity. Compared with the MTF of the thin zoom lens seen in Fig. 7, the ultra-thin unit shows a slightly lower MTF, but still has image quality equivalent to that of a compact DSC.

4 まとめ

今回、コンパクトDSCと同等レベルの性能と、6.5mmのユニット厚を両立したズームレンズの開発を行ったが、今後は6mm以下のユニット厚が必要になってくることが予想されるため、さらなる薄型化の開発を進めていきたい。また、さらなる薄型化、小型化、低コスト化、高耐久性の開発を進めていくことによって、モバイル機器以外にも産業用など様々な用途に発展することが可能になるため、より魅力的なズームレンズユニットの開発に貢献して行きたい。