

フィールドフラットナーを用いたスキャナ光学系の開発

Development of Scanner Optics Using Field Flattener

長能 卓哉*

Takuya NAGANO

田村 麻人*

Asato TAMURA

伊藤 昌弘*

Masahiro ITO

要 旨

近年求められている複合機の省スペース化を実現するために、スキャナに対しては薄型化の要望がある。薄型化には、一体型走査光学ユニット方式が有利であるが、従来は結像性能を得るため明るさを犠牲にしており、消費電力の増大や読み取り速度の低下を余儀なくされていた。我々は、両面非球面の樹脂製フィールドフラットナー光学系を適用することで、小型かつ広角でありつつ、従来の一体型走査光学ユニットに対してF5.3からF4.6と明るくし、「明るい・広角・小型」を兼ね備えたスキャナレンズを実現した。明るい光学系で課題となるピント位置の温度変動に対しては、温度分布を把握し、前群の屈折率温度係数と、前群と後群の距離を最適化することで解決した。

ABSTRACT

We have developed scanner optics for the multifunction printer (MFP). Scanner optics can realize MFP downsizing and high speed document scanning simultaneously. To realize both downsizing and high speed, the scanner optics should have three characteristics: the diameter of each lens should be small, the scanner optics should be wide-angle optics, and the scanner optics should have a small F-number. When we design conventional wide-angle scanner optics, we have to set a large F-number to correct the aberration. When we design conventional scanner optics that have a small F-number, we have to design scanner optics with a large diameter to obtain a large amount of light. Therefore, we have not realized scanner optics with these three characteristics so far. For this reason, we developed scanner optics using a field flattener in the integrated scanning optical unit to overcome these difficulties. However, note that the small F-number optics in the integrated scanning optical unit suffer from focus shift caused by changes in temperature. We have compensated for the focus shift by optimizing some of the optical parameters.

* 画像エンジン開発本部 ICT開発センター

Imaging Core Technology Center, Imaging Engine Development Division

1. 背景・目的

近年、オフィスで使用される複合機は省スペース化が求められている。省スペース化の実現のために、スキャナに対しては薄型化の要望がある。

スキャナの読み取り方式は大きく2つに分けられる。そのうち1つが差動ミラー方式である。差動ミラー方式とは、Fig. 1に示すように、原稿面直下を照明と第1ミラーを含む第1走行体が速度Vで移動し、第2ミラーと第3ミラーを含む第2走行体がV/2の速度で移動することで光路長を一定に保って原稿を走査する方式である。長い光路長が必要であり、かつ、第1走行体が原稿面直下をレンズと衝突せずに走査できる大きな空間が不可欠である¹⁾。レンズを明るくできることが差動ミラー方式のメリットであるが、上記のとおり大きさの点でデメリットがある。

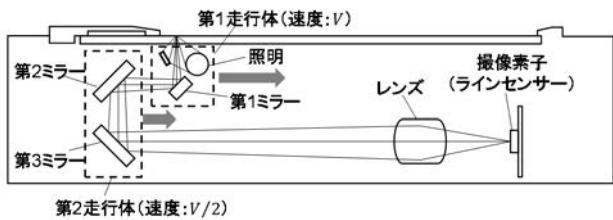


Fig. 1 Configuration of differential mirror type.

もう1つの読み取り方式は一体型走査光学ユニット方式である。一体型走査光学ユニット方式とは、Fig. 2に示すように、レンズ、照明、ミラー、撮像素子を1つのユニットとして集約し、ユニット全体を走査して原稿を読み取る方式である²⁾。メリットとして、集約することでコンパクトな大きさを実現可能なことが挙げられるが、下記に示すとおりレンズが暗くなるデメリットがある。

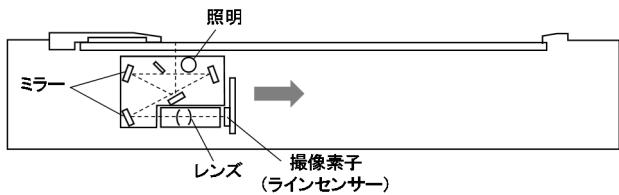


Fig. 2 Configuration of integrated scanning optical unit type.

一体型走査光学ユニットの薄型化を実現するためには、小さな空間に配置できるようにレンズは小型であることが必要である。また、小さな空間とするには光路長は短い必要がある。すなわち、レンズは広角でなければならない。従来は明るさを犠牲にすることで、広角時の周辺までの結像性能を補償しつつ小型化を実現していた。暗い光学系であると、原稿を照らす光量を増やす必要が生じ消費電力の増大や、読み取り速度の低下を余儀なくされる。

以上の背景のもと本論文では、薄型化に優位な一体型走査光学ユニット方式において、従来の一体型方式と同等の大きさ（セル径）で、かつ、差動ミラー方式と同等の明るさを持ったスキャナレンズを実現したので報告する。また、光学系を明るくしたときに課題となる温度変動に対し、光学特性安定化を図るための温度補償構造についても言及する。

2. スキャナレンズの設計

本章では、今回開発したスキャナレンズの設計思想と、実現手段について2-1節、2-2節、2-3節と分けて示す。

2-1節では、「明るい・広角・小型」なスキャナレンズを実現する設計思想とその手段について示す。2-2節では、スキャナユニットを薄型化する方法について、レンズから原稿までの距離に焦点を当てて示す。2-3節では、明るい薄型一体型走査光学ユニットで不可欠となる温度補償の実現手段について示す。

2-1 「明るい・広角・小型」の実現

スキャナレンズにおいて、明るい、広角、小型を達成するために、考慮すべきポイントは以下のとおり3つある。

- A) 明るい：口径に依存する収差補正
- B) 広角：画角に依存する収差補正（像面平坦性）
- C) 小型：レンズを通る光線高さ

これらを考慮し、明るい、広角、小型なスキャナレンズを実現するためにフィールドフラットナーを採用する。

フィールドフラットナーとは、中心から周辺まで平面上にピントを揃える（像面を平坦にする）レンズのことである。Fig. 3に、今回開発したスキャナレンズの構成を示す。物体側から順に、第1レンズ（L1）、第2レンズ（L2）、・・・、第6レンズ（L6）とし、以下ではL1～L5のレンズ群を前群、L6を後群として述べる。本スキャナレンズでは、後群としてフィールドフラットナーを適用し、前群から大きく離して像面付近に配置している。

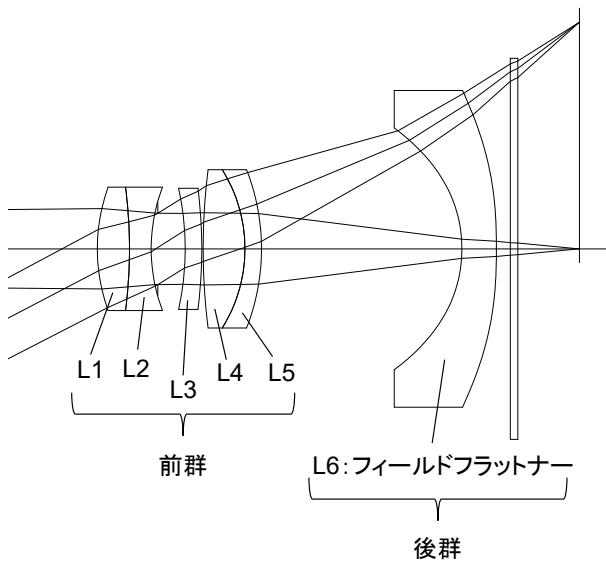


Fig. 3 Novel designed lens configuration.

フィールドフラットナーを像面付近に配置することで、A)～C)を満足できる。その理由を、Fig. 4を用いて説明する。Fig. 4に示すように、レンズを通る光束は、暗いレンズほど細く（青線）、明るいレンズほど太くなる（赤線）。そのため、青線と赤線の矢印の長さの差分が、収差量として性能劣化に影響する。前群ではその差分が大きく、後群では像面付近に配置しているため、光束が細くなり、差分は小さい。このように後群が明るさ、すなわち口径の影響を受けにくいため、前群に口径に関する収差補正を受け持たせ、後群に像面の平坦化をすべて受け持たせることができる。レンズ設計における収差の

考え方として、球面収差は「口径（入射瞳径）の3乗」に比例し、像面湾曲は「口径の1乗×画角の2乗」に比例するなど、口径と画角の両面で設計難易度が増大することが知られている³⁾。そのため、広角レンズが必要な一体型走査光学ユニット方式では従来は口径の小さな、すなわち暗いレンズを使用し、収差を抑えていた。しかしながら、本構成では、従来レンズが口径と画角という2つの次元を考慮して補正していたところを、前群は口径、後群は像面の平坦化（画角）と、それぞれ1つの次元を考慮するだけで良い。それにより、考慮すべきA)およびB)の収差補正を最大限に発揮することが可能となるため、広角でありながらも明るいレンズを実現できる。

また一般的に、周辺画角の光線を良好に収差補正するためには、周辺画角の光線は軸上光線よりもレンズ面の高い位置を伝播することが望ましい。それに加えて、明るいレンズでは周辺画角の光束が太くなるため、同じ画角であっても大型化せざるを得ない。しかし本構成においては、上述したように前群は画角に依存する収差補正をする必要がない。そのため、全画角の光線が大部分重なり合った状態でレンズ内を伝播する構成をとることができる。具体的には、各画角の光束がまとまっている絞り付近に前群のレンズを集中して配置する。それにより、考慮すべきC)の周辺画角の光線高さを前群内において低く抑えることができ、明るく小型なレンズを実現できる。

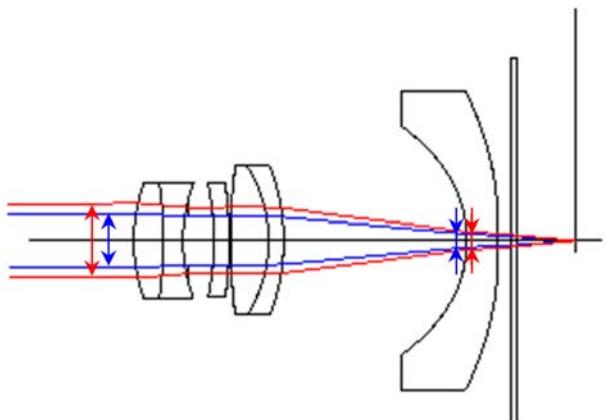


Fig. 4 Wide luminous flux (red line) and narrow luminous flux (blue line) at each lens position.

2-2 薄型化

スキャナユニットを薄型化するためには、レンズが小型であることに加え、ユニット内に光路がケラれることなくミラーを配置するための空間的な余裕が必要である。

スキャナ光学系の模式図Fig. 5を使い、その理由を説明する。原稿面からレンズまでの距離をA、レンズと撮像素子を含む距離をスキャナレンズ全長Bとする。空間的な余裕を生むためには、2-1節の小型化に対する手法と同様に、レンズを撮像素子に寄せ、レンズ全長Bを短縮化することが有効である。原稿面からレンズまでの距離Aが長くなるため、ミラーを配置する空間に余裕が生まれ（=A/Bが大きい），スキャナユニットの薄型化を実現できる。

前群が正のパワーを持ち、フィールドフラッターナーである後群が負のパワーを持つようパワー配分することで、レンズの前方に主点位置を出せ、レンズを撮像素子に寄せることができる。

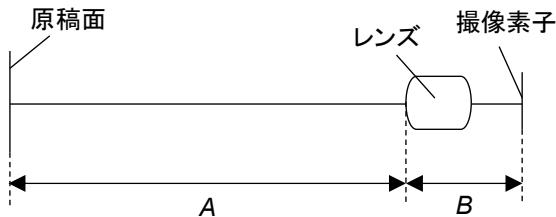


Fig. 5 Pattern diagram of entire length of lens (B) and object distance (A).

2-3 温度補償

本節では、温度補償の必要性、考え方、および対策方法について示す。

レンズの屈折率は温度で変化する。その結果、焦点距離の変化を引き起こす。加えて、一体型走査光学ユニット方式はスキャナ起動後の温度上昇量が大きい構成である。LEDやセンサーなど熱源が集約されているからであり、各部材の熱膨張量も大きくなる。さらには、明るいレンズはピントが合う範囲が狭い。したがって、今回開発するレンズは、温度補償が十分に考慮されている必要がある。

温度補償とは、温度変化前後で結像位置が同じ位置にあれば良い、という考えではない。物体と撮像素子の共役関係を温度変化時でも維持するということである。

前群は屈折率温度係数を、後群は前群との間隔を、それぞれパラメータとして用いて、温度上昇に伴う線膨張により物体位置と像面位置が広がった場合でも、常に撮像素子に結像するように焦点距離を変化させることを行った。上記の温度補償設計時には、熱流体解析と構造変形解析により温度分布を取得し（Fig. 6），撮像素子を実装した基板の熱による撓みを考慮することで、温度補償の精度を向上させた⁴⁾。像面湾曲の温度変動による影響は本構成のレンズでは小さいため、以下では、軸上のピントずれについて前群と後群に分けて報告する。

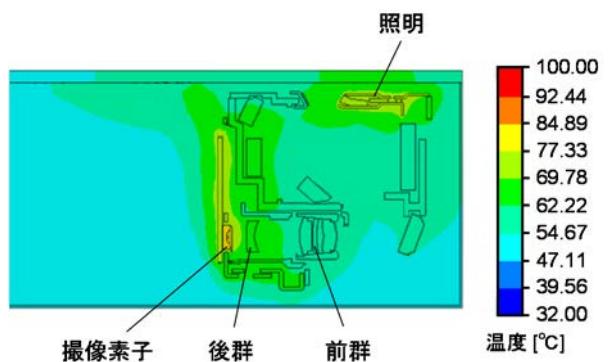


Fig. 6 Temperature distribution in scanner.

2-3-1 前群の温度補償

本構成は負のパワーを持つ樹脂製のレンズをフィールドフラッターナーとして後群に配置している。ガラスに比べ樹脂は大きな負の屈折率温度係数を有するため、温度上昇時には屈折率が大きく低下し、焦点距離が短くなる。温度上昇時も撮像素子から離れることなく結像し続けるためには、レンズ系全体として温度上昇時に焦点距離が伸びるように前群で補正する必要がある。しかしながら、多くのガラスは正の屈折率温度係数を持つ。屈折率温度係数を考慮せずに、前群のすべてのレンズに正の屈折率温度係数を持つガラスを適用すると、温度上昇時に前群

の正のパワーが増すことになり、焦点距離は更に短くなってしまう。そのため、強い正のパワーを持つレンズに負の屈折率温度係数を持つガラスを選択することで、ピントずれを補償した。

2-3-2 後群の温度補償

撮像素子上に結ばれる像は、前群によって作られる仮想像を、後群が仮想物体として捉えることで形成される。しかしながら、温度変化時は前群の変化に加え、前群と後群の間隔が変化するため、前群によって作られる仮想像の位置が変化する。さらに、後群は樹脂製のため大きな屈折率変化およびレンズ厚の変化が生じる。その結果として、ピントずれが発生する。そこで、後群の特性変化および前後群間にある部材の線膨張係数を考慮しつつ、仮想像（仮想物体）と撮像素子の結像関係が温度変化前後で変わらない位置に前群と後群とを配置し、ピントずれを補償した。

3. 結果

3-1 レンズ構成

本スキャナレンズの構成をFig. 3に示す。

以下では、前群と後群についてそれぞれ詳しく述べる。

3-1-1 前群

前群は、正のパワーを持つ接合L1/L2、負のパワーを持つL3、正のパワーを持つ接合L4/L5の3群5枚で構成した。口径が大きな明るいレンズでは球面収差、コマ収差が悪化する。L1の物体側レンズ面を非球面形状とすることで、球面収差を抑え結像性能を高めた。L1/L2およびL4/L5を接合レンズとしたことで正弦条件の不満足量を小さくすることができ、コマ収差を除くことが可能となった。さらには、接合により色収差も十分補正できた。

3-1-2 後群

後群のフィールドフラットナーは、像面の平坦性を効果的に高めるために、両面を非球面形状とした。

像面付近にレンズを配置すると、ラインセンサーのサイズに比例してレンズ径は大きくなるが、スキャナの撮像素子はラインセンサーのアレイ方向に直行する方向のレンズ径は必要ないこと、および、樹脂製とすることで異型化が容易であることから、Fig. 7に示すような短冊形状とした。これにより、レンズ系全体の小型化を実現した。

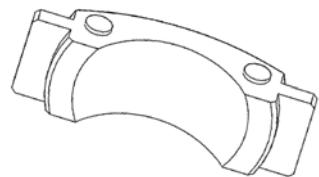


Fig. 7 Shape of field flattener.

3-2 設計結果

Table 1に、設計結果を当社従来機と併せて示す。また、当社従来機の差動ミラー方式のレンズと今回開発した新規レンズの大きさの比較をFig. 8に示す。

従来の一体型走査光学ユニット方式のレンズと同等の大きさ（セル径）を有し、従来の差動ミラー方式とほとんど遜色ない明るさを維持することができた。また、セル径を小さく、A/Bを大きくでき、薄型に優位な構成を達成した。

Table 1 Characteristics of novel designed lens and conventional lenses.

	セル径 [mm]	F値	画角 [°]	レンズ全長に 対する 物体距離の比 A/B
新規設計	15	4.6	59.3	8.0
従来一体型	15	5.3	56.3	6.9
従来差動	30	4.2	36.8	6.4

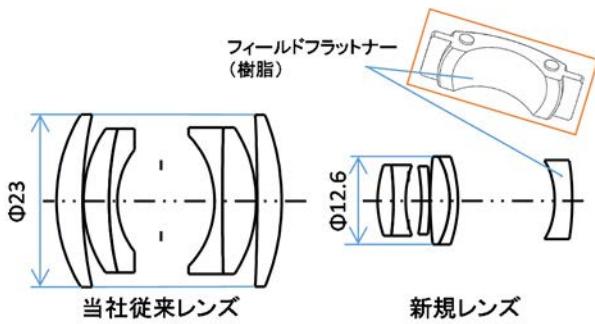


Fig. 8 Comparison of size between conventional lens for differential mirror type and novel designed lens for integrated scanning optical unit type.

3-3 性能評価結果

Fig. 9に、横軸をデフォーカス、縦軸をMTFとした、最大像高に対する像高比1.0, 0.95, 0.90, 0.75, 0.50, 0.35, 0（光軸上）のある評価周波数でのMTFの測定結果を示す。赤線、緑線、青線はそれぞれRED, GREEN, BLUEの光線に対応する。実線はサジタル方向、点線はメリディオナル方向を表す。

スキャナとして十分なMTF深度（紫矢印）を有しており、従来の差動スキャナと比べても像面の平坦性が改善している¹⁾。フィールドフラットナーによって像面を揃えることができたためである。

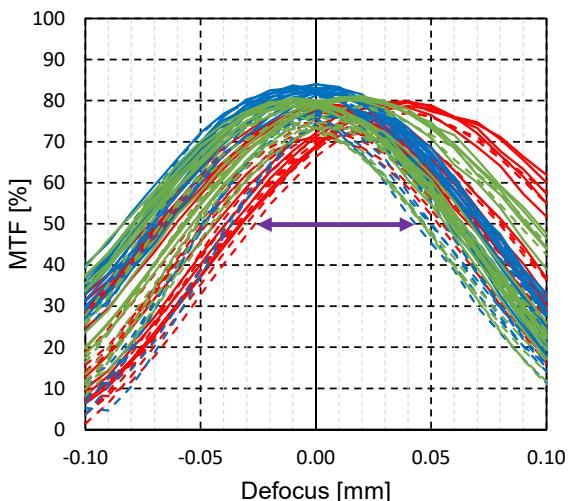


Fig. 9 Characteristics of MTF vs defocus with novel designed lens.

Fig. 10に、今回開発した一体型走査光学ユニットを示す。原稿面からの光を5つのミラーを使い、6回反射させ、レンズへ導く構成である。

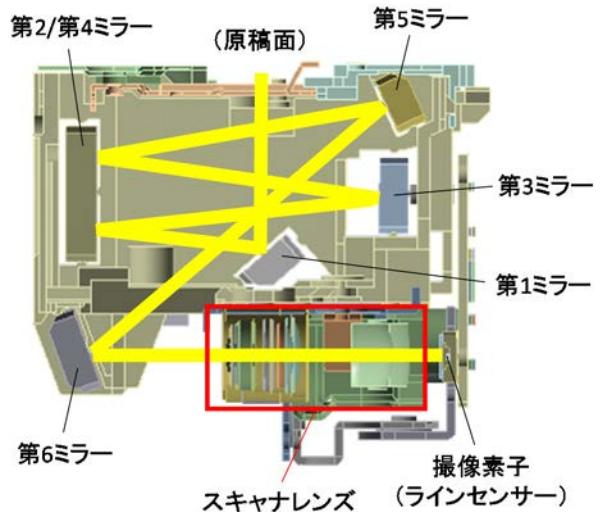


Fig. 10 Configuration of novel designed integrated scanning optical unit.

Fig. 11に、温度変動時のスキャナのMTF評価結果を示す。複合機の中にFig. 10に示すスキャナユニットを入れ、前群付近の温度を測定しながら行った。横軸は前群周りの温度変化、縦軸はMTFを表す。

MTFの変動はRGB各色とも、±1.5%以内に収まっており、温度変動に強いスキャナレンズが実現されていることがわかる。

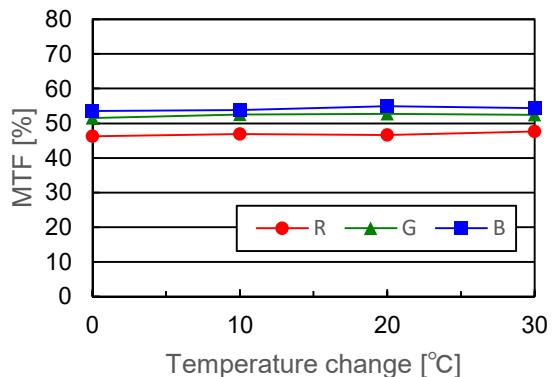


Fig. 11 MTF dependence on temperature change for integrated scanning optical unit.

4. 結論

本稿では、薄型化に優位な一体型走査光学ユニット方式において、従来の一体型方式と同等の大きさ（セル径）で、かつ、差動ミラー方式と同等の明るさを持ったスキャナレンズを実現可能とする光学技術について示した。

フィールドフラットナーを採用することで、以下の3つのポイントを抑えることができた。

- A) 明るい：口径に依存する収差補正
- B) 広角：画角に依存する収差補正（像面平坦性）
- C) 小型：レンズを通る光線高さ

温度変動に対しても、前群の屈折率温度係数と、前群と後群との距離を最適化することで、温度分布発生時でもピントずれがない明るいスキャナレンズを実現した。

参考文献

- 1) 神代敏昭ほか: 4.7μmカラーCCDを用いた読み取りユニットの開発, *Ricoh Technical Report*, No. 32, pp. 83-88 (2006).
- 2) 林出匡生: 画像読取装置, 特開2001-174932 (2001).
- 3) 松居吉哉: 結像光学入門—光学系取扱いの基礎ー, 第7版, p. 68, (社)日本オプトメカトロニクス協会 (2005).
- 4) A. Tamura, T. Nagano, M. Ito: An integrated scan optics having stable characteristics on temperature change, *Technical Digest*, 29S1-09, 10th international conference on Optics-photonics Design & Fabrication (2016).