
超至近投影光学系の開発

A Development of Optical System for Ultra-Close-Range Projection

高橋 達也* 藤田 和弘* 安部 一成*
Tatsuya TAKAHASHI Kazuhiro FUJITA Issei ABE

要 旨

近年、設置性・利便性の観点から超至近投写プロジェクターの開発が求められている。しかしながら、このようなプロジェクターは拡大倍率及びスクリーンへの光線入射角が大きいため、解像度の向上、ディストーションの低減が困難である。そこで、小型、高画質、超至近投写を達成するために、自由曲面ミラーを採用した投影光学系を開発した。本光学系における、投射距離の光学系サイズ、画質との関係を明らかにする。更に、折り返しミラーを配した光学系小型化を説明する。この光学系を2011年11月発売の超至近投写プロジェクター「IPSiO PJ WX4130」に適用し、世界最小・最軽量を実現した。

ABSTRACT

Recently, an ultra-short-throw projector is required in terms of setting up and using easily. However it is difficult for this projector to improve resolution and to decrease distortion because the incidence angle of the light onto the projection surface is large and the magnification ratio is high.

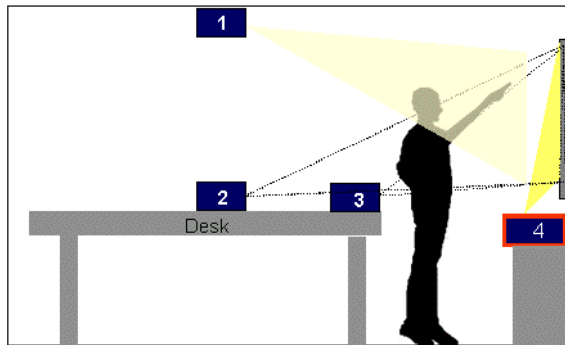
Therefore, we have developed the projection optical system with free-form mirror to achieve small size, high picture quality and ultra-close-range projection.

This paper shows the relation between the projection distance and the optical system size, picture quality. Furthermore, we show that the configuration in which a folding mirror is disposed between a first optical system and a second optical system decreases the optical system size.

This optical system was applied to IPSiO PJ WX4130 released in November, 2011, which is the smallest and lightest in the world.

* グループ技術開発本部 デバイスモジュール技術開発センター
Device and Module Technology Development Center, Corporate Technology Development Group

1. 背景と目的



問題点	設置パターン			
	1	2	3	4
a. 熱い	○	×	×	○
b. うるさい	○	×	×	○
c. まぶしい (話者)	×	×	×	○
d. まぶしい (参加者)	○	×	○	○
e. 影が入らない	×	×	×	○
f. 設置費	×	○	○	○
g. 共用 (可搬性)	×	○	○	×

Fig. 1 Problems of installation pattern.

近年オフィスではプロジェクターを使つての会議は日常的に行われるようになった。利用される状況を整理してみるとプロジェクターの設置パターンとしてはいくつかに分類されることが分かる。Fig. 1にプロジェクターの設置パターンに対する問題点を示す。1~3は従来のプロジェクター設置方法である。1は天吊り設置、2, 3はデスク上に設置している様子を示している。3は2よりも投写距離の短いプロジェクターを意味する。Fig. 1に示すとおり、これらの設置方法は話者が眩しいなどの問題点を抱えている。

そこでこれらの問題点を解消すべく、最近3よりも更に投写距離の短い超至近投写プロジェクター4が開発されている。これは話者よりもスクリーンに近い位置に設置して使用するため、話者が眩しくなく、影が入るといった問題も低減される。加えて、デスク上に置く必要がないため、使用者にとってプロジェクターが熱い・うるさいといった問題も解消される。しかしなが

ら、4に示す通りこれまでの超至近投写プロジェクターはサイズが大きく、重いため、共用（可搬性）が低く使い勝手が悪いという課題が残っていた。

リコーでも超至近投写プロジェクターの開発に取り組んでおり、投影光学系としてレンズ群+凹面ミラー方式を採用している。この光学系は、レンズ群により中間像を一旦形成し、凹面ミラーによって拡大投写していることが特徴的である。本稿では、前述の共用（可搬性）の低い課題を解決すべく、中間像とスローレシオの関係に着目し、投影光学系の小型化・短焦点化・高画質化を両立する条件を見出すことを目的とした。

2. 光学系

2-1 基本構成

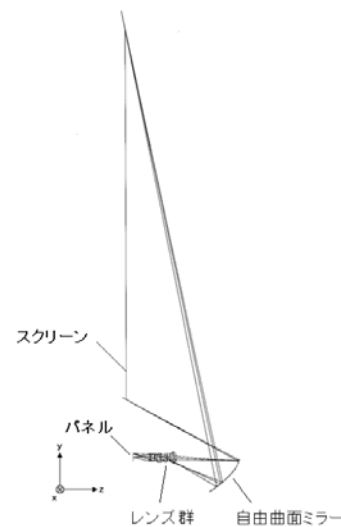


Fig. 2 Optical path.

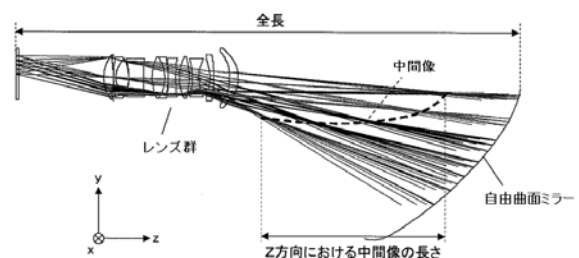


Fig. 3 Enlarged view of an optical system.

Fig. 2に投影光学系の光路図を示す。Fig.3はFig2の投影光学系を拡大したものである。本光学系は、パネルでの像とスクリーンが共役になるように設計されている。リコーでは凹面ミラーの面形状を自由曲面化することで、回転対称形状よりも更に収差補正、広角化性能を高めている。レンズ群と自由曲面ミラーの間には、パネルにおいて形成された画像からの複数の光束により中間像が形成される。パネルにおいて形成された画像は、レンズ群と自由曲面ミラーとの間に中間像として結像されると共に、スクリーンに中間像を拡大することによって得られる画像が投写される。この構成によって、投影光学系の投写距離を低減することができる。なお、『自由曲面』とは、一般的に採用されている回転対称な曲面と異なり、左右方向(X方向)と上下方向(Y方向)の形状がそれぞれ独立な多項式で定義される面である。ただし、投影光学系はY軸に対して対称であるため、自由曲面ミラーのX方向形状はY軸に対して対称である。反射屈折力の高い反射ミラーに自由曲面形状を採用することにより、それぞれの像高に対する反射領域ごとに反射面の曲面形状を調整することができるため、収差補正機能を向上できる。

2-2 小型・超至近投写の両立条件

2-2-1 スローレシオの定義

超至近投写プロジェクターの性能を評価する際、投写距離だけでなく、スクリーンでの画面サイズも重要である。そこで、プロジェクターにおける投影光学系の投写距離及び投影光学系の拡大倍率を表す指標としてスローレシオ(Tr とする)を定義する。 Tr は、スクリーンに投写された画像の水平方向サイズに対する投影光学系の投写距離の比とする。ここで投写距離は投影光学系に含まれるレンズ群の光軸に最も近い光束の主光線についての、自由曲面ミラーの最終端からスクリーンまでの投写方向の距離である。1で述べた通り、話者によって投写光が遮られる等の問題を低減し、かつ大画面な画像を得るために、投影光学系の Tr を低減する必要がある。

2-2-2 スローレシオの目標設定

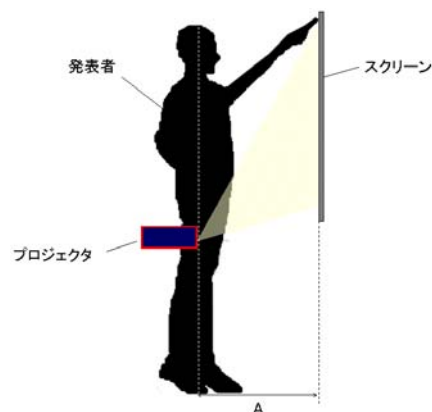


Fig.4 Throw ratio.

Fig. 4に示されるように、プロジェクターに含まれる投影光学系の投写距離が話者の体の中心から話者の指先までの距離Aよりも短いものである場合には、話者による投写される光の遮断の問題を低減することが可能になる。一般的な成人を想定して距離Aを900mmとし、16：10のアスペクト比を備えた60インチの画像が投影光学系によって投写される場合には、投影光学系についてのスローレシオ Tr は、

$$900 / \left(60 \times 25.4 \times 16 / \sqrt{16^2 + 10^2} \right) \cong 0.7$$

である。よって、話者による投写される光の遮断の問題を低減するためには、プロジェクターに含まれる投影光学系についての Tr は、0.7以下であることが望ましい。

2-2-3 スローレシオと Im の関係

Fig. 2及びFig. 3に例示された投影光学系において、レンズ群の焦点距離で割られたZ方向における中間像の長さの値として Im を定義する。Z方向における中間像の長さは、パネルで形成された画像からの各々の光束のメリジオナル光線及びサジタル光線の中間像の像点のうち、Z方向におけるレンズ群に最も近い像点の位置とZ方向における自由曲面ミラーに最も近い像点の位置の間の距離である。

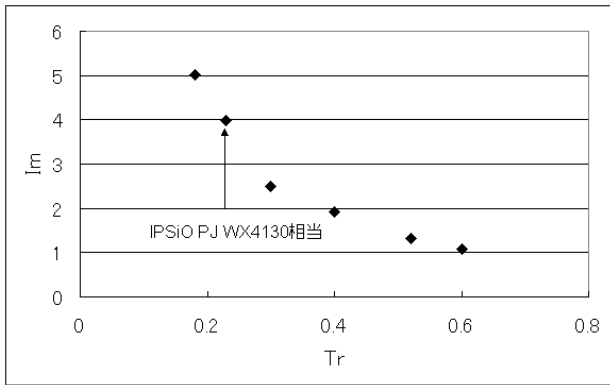


Fig. 5 Im dependence on throw ratio.

今回、拡大倍率94、スローレシオTrが0.18~0.6となる6パターン設計をおこない、それぞれのImを求めた。Fig. 5にスローレシオTrに対するImを示す。具体的な設計例は後述するが、それぞれの設計において良好な光学性能が得られている。図より、Trを低減するとImは増加する傾向のあることがわかる。これは中間像での像面湾曲の増大を意味する。この原因を詳しく説明する。

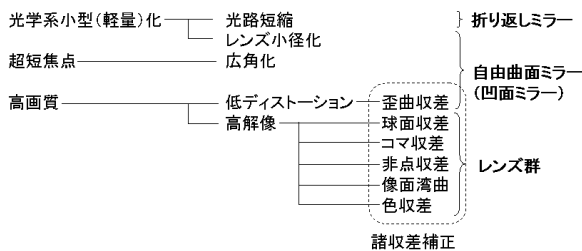


Fig. 6 Influence of optical parts to optical quality.

Fig. 6は、各光学部品の光学特性に及ぼす影響を大まかに分類したものである。図に示すとおり、高画質な画像を得るためには、諸収差を補正する必要がある。ここで、自由曲面ミラーは主に歪曲収差補正の役割を担っている。また、レンズ群は歪曲収差以外の諸収差補正の役割を担っている。

Trを低減するほど、光線のスクリーンへの光線入射角は増大するため、歪曲収差は増大する。前述の通り歪曲収差は主に自由曲面ミラーで補正している。歪曲収差を補正した結果として、自由曲面ミラーでの歪曲収差以外の収差、特に像面湾曲が増大する。この増大

した像面湾曲を補正するために、レンズ群において自由曲面ミラーで発生するものと「逆方向」の像面湾曲を発生させる。結果として互いの像面湾曲を打ち消し合い、スクリーンでは良好な画像を得ることができる。このレンズ群で発生させるべき「逆方向」の像面湾曲量はTrを低減するほど増大する。結果としてTrを低減するほどImは増大する。

2-2-4 スローレシオと光学系サイズの関係

Trは、製品搭載に鑑みて投影光学系の小型化・短焦点化・高画質化を両立する値にする必要がある。そこで、小型化に関係する全長、自由曲面ミラーサイズ(面積)とTrの関係を明らかにし、最適なTrを決定する。

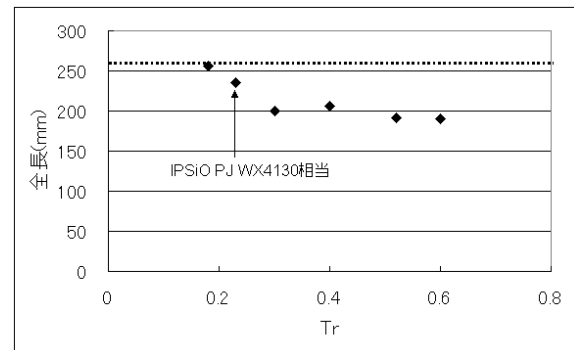


Fig. 7 Total length dependence on throw ratio.

はじめに、Trの全長に与える影響を説明する。Fig. 7にTrに対する投影光学系の全長を示す。Fig. 3に示されるように、投影光学系の全長は、投影光学系に含まれるレンズ群の光軸に最も近い光束の主光線についての、レンズ群の光軸の方向における物点から自由曲面ミラーの最終端までの距離である。Fig. 5, Fig. 7より、Trが小さくなるほど中間像の長さは大きくなり、結果として光学系全長の大きくなるのがわかる。製品搭載に鑑みると、小型化の観点では全長260mm以下が望ましく、今回設計した6パターンはこの条件を満たすものである。

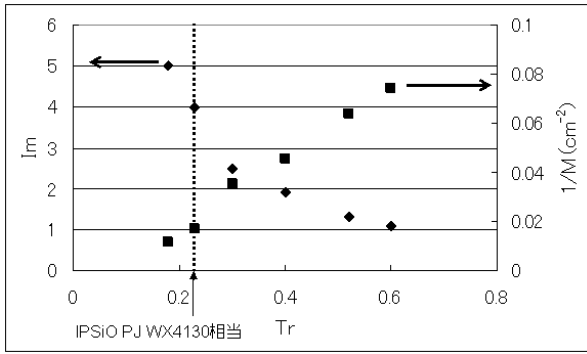


Fig. 8 Mirror sizes dependence on Tr.

次に、Trのミラーサイズに与える影響を説明する。
 Fig. 8にTrに対するミラーサイズを示す。四角のシンボルはTrに対するミラーサイズの逆数(1/M)を示している。ひし形のシンボルはTrに対するImを示しており、Fig. 5を再掲している。図より、Trを低減するとImは増大し、ミラーサイズの大きくなる事が分かる。つまり、光学系全長と同様、ミラーサイズの観点からも投写距離を低減するほど投影光学系サイズは大きくなる。小型化のためには、1/Mは0.02cm²以上であることが望ましい。

Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8より、良好な光学性能を得ながら全長260mm以下、1/M 0.02cm²以上を満たすImは4以下である。この条件を満たし、かつ最小の投写距離となるのはTr = 0.23であり、これはIPSiO PJ WX4130に採用した投影光学系に相当する。

2-3 設計代表例

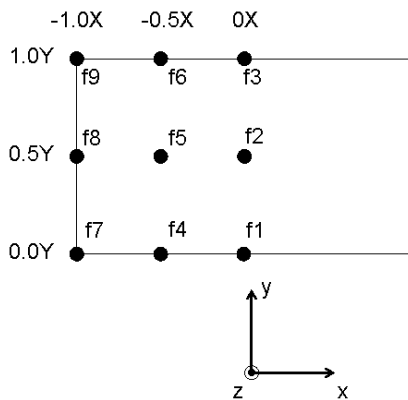


Fig. 9 Object point position.

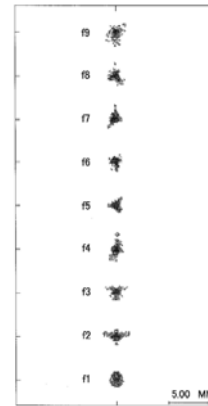


Fig. 10 Spot diagram (Tr = 0.23).

代表例として、Tr = 0.23の投影光学系の設計結果を示す。Fig. 9にパネルにおける物点の位置の例を示す。投写画像の特性は、Y軸を基準として±X方向に対称である。よって、本稿では-X方向における性能のみを示す。図には、XY平面にある像面のうちX ≤ 0のエリアをX方向に3等分割すると共にY方向に3等分割することによって得られた9個の格子点(物点)f1からf9までを示している。

Fig. 10はf1~f9に対応したスクリーンでのスポットダイアグラムである。図より、スクリーン上でのスポットは良好に集束しており、WXGAクラスの解像度が得られる。WXGAの解像度の周波数についての白色の変調伝達関数(Modulation Transfer Function (MTF))の値は、スクリーンに投写される画像の全域にわたって50%以上である。

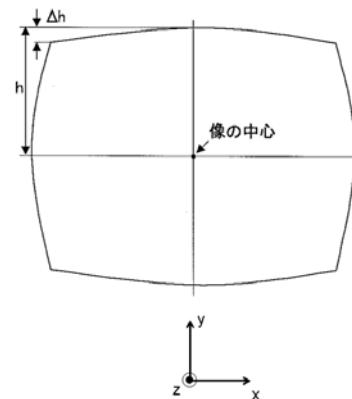


Fig. 11 TV distortion.

Fig. 11は、TVディストーションを説明する図である。TVディストーションは、スクリーンに投写された像についてのY方向の歪みを表す数値であり、 $Dh = (\Delta h/2h) \times 100$ によって定義される。ここで、 Dh はTVディストーションである。 h は、像の中心から像のY方向における像の端までの長さである。 Δh は、像の頂点を通って像のX方向に延びる直線及び像のY方向における像の端を通って像のX方向に延びる直線の間における間隔である。

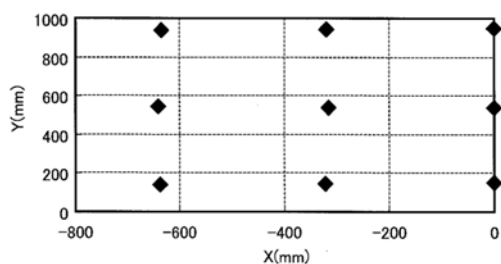


Fig. 12 Distortion ($Tr = 0.23$).

Fig. 12は、 $Tr = 0.23$ の投影光学系における、 $f1 \sim f9$ に対応したスクリーンでの結像位置である。TVディストーションは2%以下であり、歪曲収差は良好に補正されている。なお、本論文では1例として投影光学系の小型化・短焦点化・高画質化を両立する $Tr = 0.23$ において良好な光学性能の得られていることを示した。Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8に示したその他の光学データについても同様に良好な光学性能の得られることを確認している。

3. 製品搭載事例

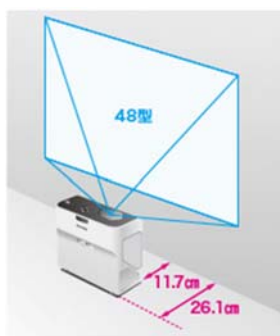


Fig. 13 IPSiO PJ WX4130.

Fig. 13はIPSiO PJ WX4130の製品説明図である。IPSiO PJ WX4130では2-1節で説明した基本構成に加えて、レンズ群と凹面ミラーの間に折り返しミラーを配することで投影光学系サイズの低減を図った。

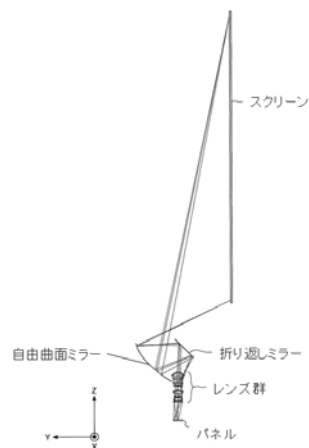


Fig. 14 Optical path.

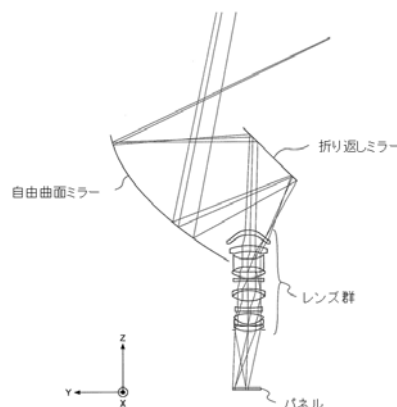


Fig. 15 Enlarged view of an optical system.

Fig. 14は折り返しミラーを配したときの光路図である。Fig. 15はFig. 14の投影光学系を拡大したものである。図に示すとおり、レンズ群と自由曲面ミラーの間に平面ミラーを配している。これにより、レンズ群から自由曲面ミラーまでのZ方向の距離をY方向とZ方向に分割できるため、結果として光学系をコンパクトにすることができる。この折り返しミラーにより、従来にない投写スタイルを実現し、セットの奥行きを格段に低減できた。結果として、サイズ257×144×221mm、質量約3.0kgを達成した。

4. まとめ

リコーの超至近投写プロジェクターに搭載されている、投影光学系の特徴を詳しく説明した。スローレシオの光学系に及ぼす影響を示し、投影光学系の小型化・短焦点化・高画質化を両立する条件を明らかにした。

本光学系はIPSiO PJ WX4130に採用されており、最適なTrを選択すると共に折り返しミラーを配することで、超至近投写と小型・軽量化を実現している。

IPSiO PJ WX4130は2011年11月発売後、コンパクトで持ち運びやすい超至近投写プロジェクターとして国内外で注目されており、国内では2012年度グッドデザイン賞を受賞、更にグッドデザイン・ベスト100に選出され、海外ではPROJECTOR CENTRAL(米国のプロジェクター評価サイト)で5つ星を獲得するなど、高く評価されている。