

フィールドガイド 赤外線システム

Arnold Daniels／著
小檜山 光信／訳



株式
会社

オプトロニクス社

Field Guide to Infrared Systems
by Arnold Daniels

Originally published by

SPIE
P.O. Box 10
Bellingham, Washington 98227-0010 USA
Phone: +1 360 676 3290
FAX: +1 360 647 1445
Email: Books@SPIE.org
Web: spie.org

Copyright © 2006 The Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from SPIE.

Translated and published in Japan by special arrangement with SPIE Press, 1000 20th Street, Bellingham, WA 98225 USA.

Authorized Japanese-language edition

SPIE フィールドガイドシリーズについて

SPIE フィールドガイドシリーズへようこそ。本書は現場の技術者や研究者に向けた新シリーズ「SPIE フィールドガイド」の1冊です。

光の原理や技術に関しては、これまでも専門家を対象とする優れた参考書、専門書が数多く出版されています。本シリーズでは、先人の英知に学び、その重要な原理や技術を採り上げて、ラボや現場でもすぐに参照できるわかりやすい実用書として作成しました。机上で使用するにも、持ち運ぶにも便利な参考書兼ハンドブックです。現場の技術者や研究者の実務および作業効率の向上を図るものでもあります。シリーズの各書籍とも、光学の基礎原理などの基本的事項から、技術および実用面、さらに参考文献に至るまで、項目別に参照しやすい配列でまとめています。また、共通の統一されたレイアウトと記号を使用し、読者への平易な解説に努めています。

本「SPIE フィールドガイドシリーズ」では、個々一編で主要な光技術一題を取り扱っています。モジュール形式によって、大方の場合、1ページに1つのトピックを置き、そのページの中でそのトピックをほぼカバーできるよう構成しました。そのため、検索も容易で、しかも、図や式を原理的に理解することが可能です。また、巻末には付録として、関連する文献、基本となる公式集、あるいは、本文で言及していない他の方法などについての情報も掲載されており、各分野を完全にカバーするように努めています。但し、最新のトピックは、十全に認知されていないものとして省きました。

「SPIE フィールドガイドシリーズ」はまた常に生きたドキュメントであるよう心がけています。モジュールページ形式の採用により、本文の改訂や増補が容易に行なえることから、新しいテーマや各巻への追加が望ましいと思われるトピックなどについては、ご意見、ご提案などメールにてお寄せ下さい。

(Email: fieldguides@SPIE.org)

John E. Greivenkamp, シリーズ編集者
Optical Science Center
The University of Arizona

The Field Guide Series
フィールドガイド刊行リスト

Field Guide to Geometrical Optics, John E. Greivenkamp (FG01)

Field Guide to Atmospheric Optics, Larry C. Andrews (FG02)

Field Guide to Adaptive Optics, Robert K. Tyson & Benjamin W. Frazier (FG03)

Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, Jim Schwiegerling (FG04)

Field Guide to Polarization, Edward Collett (FG05)

Field Guide to Optical Lithography, Chris A. Mack (FG06)

Field Guide to Optical Thin Films, Ronald R. Willey (FG07)

Field Guide to Spectroscopy, David W. Ball (FG08)

Field Guide to Infrared Systems, Arnold Daniels (FG09)

Field Guide to Interferometric Optical Testing, Eric P. Goodwin & James C. Wyant (FG10)

Field Guide to Illumination, Angelo V. Arecchi; Tahar Messadi; R. John Koschel (FG11)

Field Guide to Lasers, Rüdiger Paschotta (FG12)

Field Guide to Infrared Systems まえがき

この「フィールドガイド赤外線システム」 **Field Guide to Infrared Systems** は、赤外線テクノロジーの理論的原理を明確にして、まとめたものである。赤外線に関する設計、製作などの種々の応用に役立つ実地的な情報を必要としている実務に携わっている技術者や研究者にとって、参考となるように努めた。

本書では、赤外線システムの開発に必要な多くの技術的分野についても解説している。結像、像性能、放射測定および光束伝達を含む基本的要素について述べ、そして検出器の性能を含むメリット指数について解説している。そして、赤外線探索システムの開発について考察し、熱イメージングシステムを述べるのに使用されている主な図を示した。さらに、本書では、赤外線システムの設計の技術的トレードオフを明確にして評価している。

ここで、私を指導し、その経験を丁寧に教えてくれた私の師である Dr. Glenn Boreman 教授に感謝致します。私の CREOL 大学院生時代、先生が指導してくれた内容が、本書の執筆の基となりました。また、困難な編集作業に尽力してくれた Merry Schnell に感謝致します。そして執筆の間、我慢してくれた私の子供達 Becky と Alex、そして最愛の妻 Rosa に心から感謝します。

最後に、この本を選び、この興味深く、刺激的な分野に関するトピックスを探検する時間を持ってくれた読者の皆様に感謝致します。私は読者が本書の内容に興味を持ち、役に立ったと実感されることを切に望みます。

この「フィールドガイド」を、私の父と私の兄弟達の思い出に捧げる。

Arnold Daniels

訳者まえがき

すべての物体は赤外線を放出しており、その赤外線を像として捉えて可視化することができる。この赤外線システム技術は、主に米国で軍事用として開発・発展したものであるが、現在ではビルや街頭における防犯監視、豪雪地帯の融雪監視、ビル・機械などの構造物の非接触・非破壊診断、工場や家庭のガス漏れ・煙などの検知、夜間の車の衝突事故防止（車載ナイトビジョン）、医療、そして有機物の成分の分析を行う赤外分光法などの多くの分野で利用されている。

これらの赤外線システム技術には、物体が放出する赤外線を検知するパッシブシステムと赤外線を放射して、その反射を検知するアクティブシステムがある。著者は、長年、赤外線システムの種々の分野で先進かつ独創的な研究・開発を行ってきた。本書では、これらの赤外線システムを検討・開発するのに必要なレンズ系の結像、赤外材料、光源の配置、プランクやステファン・ボルツマンなどの放射則、種々の検出器の雑音や応答速度、そして実際のシステムのMTF測定技術などを項目別に分かり易く解説している。本書が、赤外線システムの勉強、研究そして開発に関する学生や技術者の方々に役立つことを願っている。

翻訳にあたっては、読者の理解の一助となるように、できるだけ訳注を加えた。索引は和英、英和の両用辞書としても活用していただけるように、原著の索引に多くの単語を追加した。

最後に、訳者の質問に対して素早く返事をくれた著者のDr. Arnold DanielsおよびSPIE Pressの編集主任Mrs. Merry Schnell、そして訳者が翻訳した原稿を詳細にチェックしてくれた(株)オプトロニクス社 国際部部長 柴崎 栄氏に心から感謝致します。

訳者 小檜山光信

電磁スペクトル Electromagnetic Spectrum

電磁スペクトル electromagnetic spectrumは、エネルギー、周波数あるいは波長による**電磁放射 electromagnetic radiation**の分布である。電磁放射は光速で波動のように進む粒子である**光子 photon**の流れとして表すことができる。

放射線の種類	周波数範囲	波長範囲
ガンマ線 Gamma rays	$< 3 \times 10^{20}$	$< 1\text{fm}$
X線 X rays	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{20}$	$1\text{ fm} - 1\text{ nm}$
紫外線 Ultraviolet	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$1\text{ nm} - 400\text{ nm}$
可視光 Visible ^{※1}	$4 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$0.4\text{ }\mu\text{m} - 0.75\text{ }\mu\text{m}^{※1}$
近赤外線 Near-infrared	$10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$0.75\text{ }\mu\text{m} - 3.0\text{ }\mu\text{m}$
中赤外線 Midwave infrared	$5 \times 10^{13} - 10^{14}$	$3.0\text{ }\mu\text{m} - 6\text{ }\mu\text{m}$
遠赤外線 Long wave infrared	$2 \times 10^{13} - 5 \times 10^{13}$	$6.0\text{ }\mu\text{m} - 15\text{ }\mu\text{m}$
極遠赤外線 Extreme infrared	$3 \times 10^{11} - 2 \times 10^{13}$	$15\text{ }\mu\text{m} - 1\text{ mm}$
マイクロ波・無線波 Micro and radio waves	$< 3 \times 10^{11}$	$> 1\text{ mm}$

可視および赤外スペクトルバンドの周波数は、数100万メガヘルツであり、通常は周波数よりも波長で表される。波長は干渉法により高精度で測定でき、それは普遍式

$$c = \lambda \nu$$

により光学的振動数と関係付けられている。ここで、 λ は波長、 ν は光学的振動数、 c は自由空間における光の速さ ($3 \times 10^8\text{ m/sec}^{※2}$) である。

電磁放射で重要なのは、光子が持つエネルギー量であり、1個の光子が持つエネルギーは、波長に逆比例しており次式で与えられる。

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

ここで、 h はプランク定数 ($6.62 \times 10^{-34}\text{ J}\cdot\text{sec}$) である。

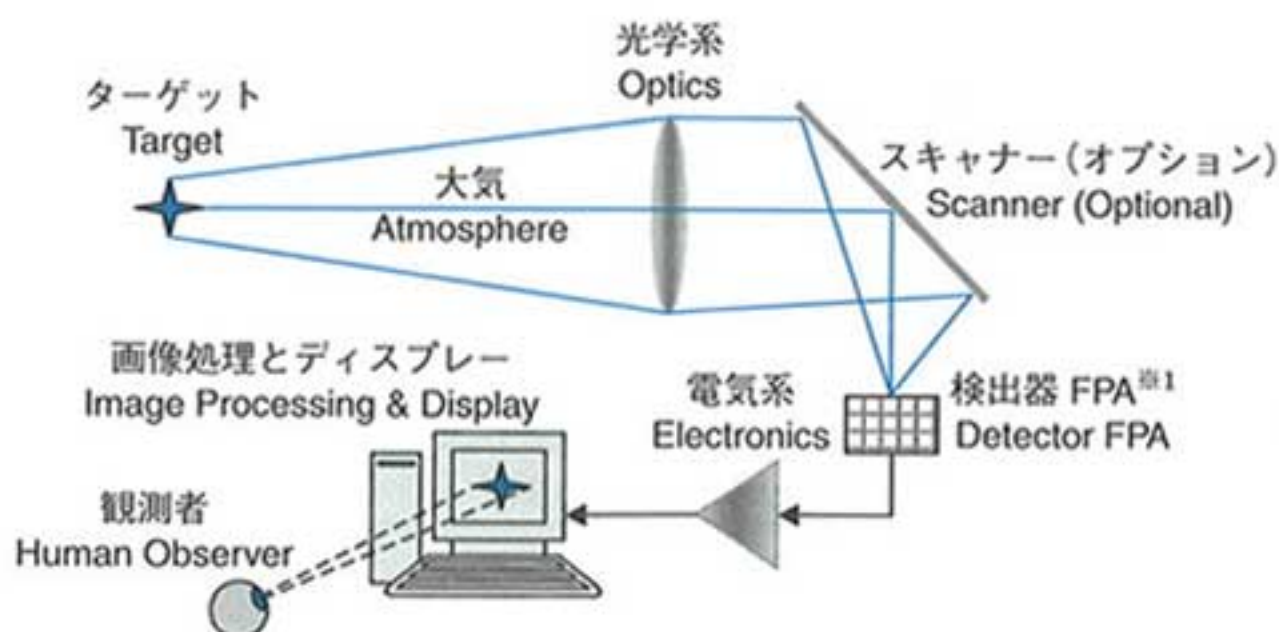
無線波は非常に小さいエネルギーの光子を持っており、一方、ガンマ線はすべての電磁波の中でエネルギーが最も大きい。電磁スペクトルは各スペクトル範囲で利用される光源、検出器および材料の技術に基づいて分類されている。

※訳注 1：CIE（国際照明委員会、仏：Commission Internationale de l'Éclairage、英：the International Commission of Illumination）では、 $0.38 - 0.78\text{ }\mu\text{m}$ と定義している。
2：光通信の国際機構ITU（International Telecommunication Union）では、正確な値 $299,792,458\text{ m/s}$ を使用することを規定している。

赤外線概念 Infrared Concepts

赤外線イメージングシステム **infrared-imaging systems** は、夜間にターゲットの映像を作製するのに利用されることが多い。ターゲットは太陽からの反射された放射ではなく、**自己放射 self-radiation** により見ることができ、自己放射は絶対ゼロ度（すなわち、 $0\text{ K} = -273.15^\circ\text{C}$ ）より高い温度のすべての物体の物理的特性である。

この放射を可視域に変換するために、赤外線システムは、いくつかのサブシステムによって構成されている。



自己放射の様子はターゲットの**温度 temperature** および表面特性によって決まるが、この放射の伝播される周波数は大気中の気体によって規制される。

光学システムの相関位置によって、その**視野 field-of-view (FOV)**、**光束集光効率 flux collection efficiency** および**結像性能^{※2} image quality**が決まるが、検出器との間のこれらのパラメーターが、放射計測の精度および最終的な画像の**解像度 resolution**に大きな影響を及ぼす。検出器は光エネルギーを電気信号に変換するエネルギー変換器であり、そしてエレクトロニクスにより、この信号を利用できるレベルに増幅する。

地上や空中の代表的なターゲットの場合、その温度が 300 K から 1000 K の範囲内では、主に赤外スペクトルの放射が起きることが**プランクの式 Planck's equation**からわかる。しかしながら、そのバックグラウンドも自己発光 (self-luminous) であり、地上のターゲットは同様な温度のバックグラウンドクラスターと競合してしまう。可視光の反射率および放射力 (emittance) は赤外線放射よりも桁違いに大きいので、赤外線画像の**コントラスト contrast**は、それに相当する可視画像よりも悪い。

※訳注 1：FPA；二次元受光素子，focal plane array

2：像性能とも言い、光学像が元の物体とどの程度まで類似するかの尺度。

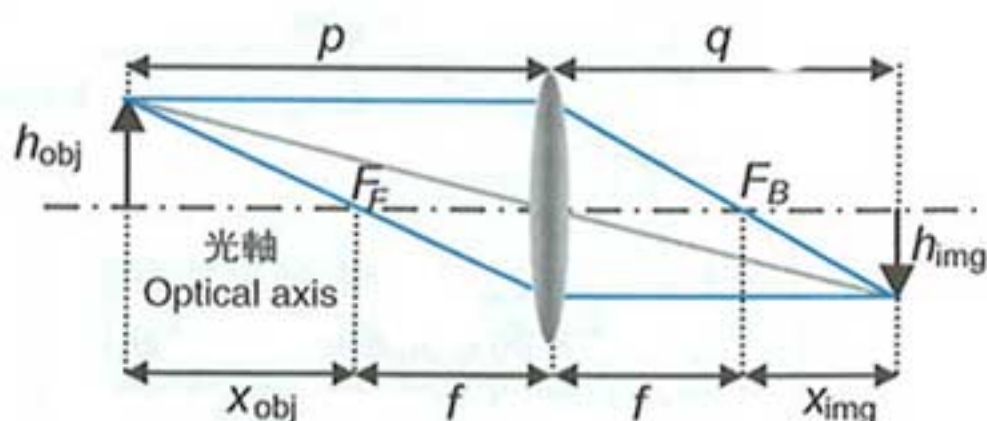
結像の概念 Imaging Concepts

1つの物体は独立した光源の集合体であり、その各部からは全方向に光線を放出すると考える。物体の各点から広がる光線は**スネルの法則 Snell's law**にしたがって屈折して、対応する像平面点 (image plane point) と交差し、その像は既に構築された理論により作製することができる。像の各位置におけるパワーは物体の各点の幾何学的に分布したパワーの強さに比例する。

すべての光学表面の曲率中心を含めた対称な線を**光軸 optical axis**という。物体に対応するその像の位置を求めるには、3つの光線追跡 (ray trace) 則が用いられる。

1. 光軸に平行に入射する光線は後側 (ウシロガワ) 焦点 (back focal point) F_B を通る。
2. 前側 (マエガワ) 焦点 (front focal point) F_F を透過して入射する光線はレンズを通過後、光軸に平行に進む。
3. レンズの中心を通る光線 (主光線 chief ray) は直進する。

像平面の位置および大きさを求めるには、薄肉レンズと小さな入射角、つまり**近軸近似 paraxial approximation**が利用され、光学システムの光路を決める光線追跡式は線形となる (つまり、 $\sin\theta \approx \tan\theta \approx \theta$)。



ガウスレンズ方程式 Gaussian lens equation : $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$

ニュートンレンズ方程式 Newtonian lens equation : $x_{\text{obj}}x_{\text{img}} = f^2$

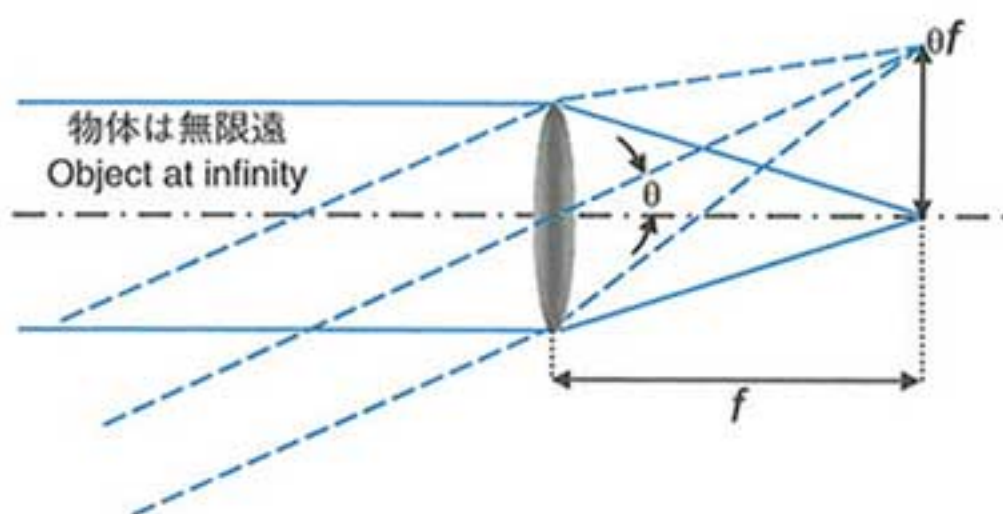
薄肉レンズ thin lens では、その厚みは焦点距離に較べて無視できる。

倍率ファクター Magnification Factors

物体が遠方にあるときは、像距離 (image distance) は f ($f \rightarrow \infty$, $q \rightarrow f$) に近くなり、物体がレンズの前側焦点にあるときは、その像は遠方となる ($p \rightarrow f$, $q \rightarrow \infty$)。光学システムの**横倍率 lateral or transverse magnification**は次式で与えられる。

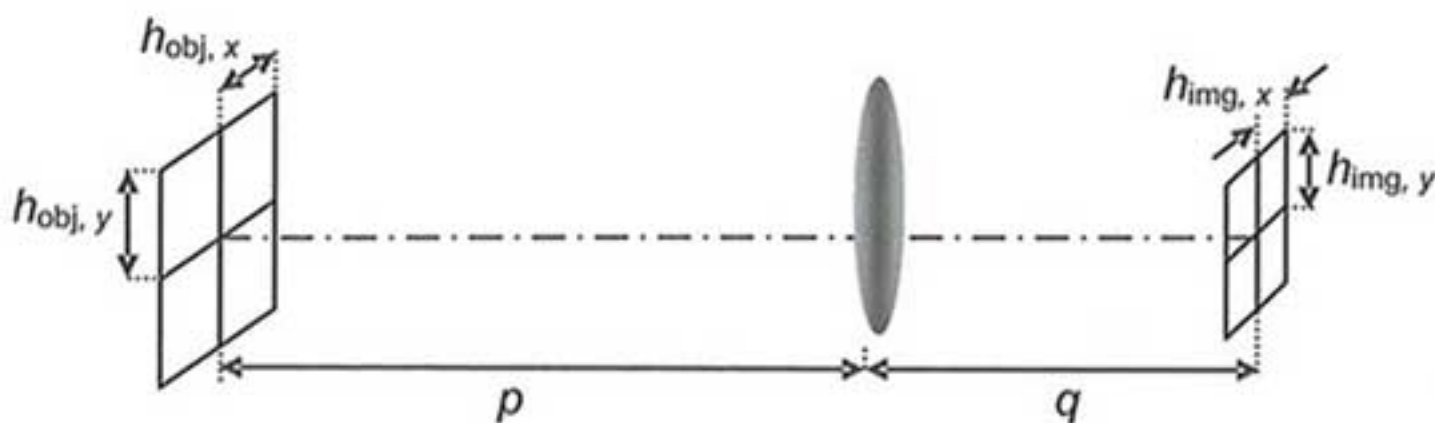
$$\mathcal{M} = -\frac{q}{p} = \frac{h_{\text{img}}}{h_{\text{obj}}}$$

ガウスレンズ方程式を利用すると、実物体 (real object) とその像の最小距離は $4f$ (すなわち, $p = q = 2f$ であり, その場合, $\mathcal{M} = -1$ となる) であることが証明できる。



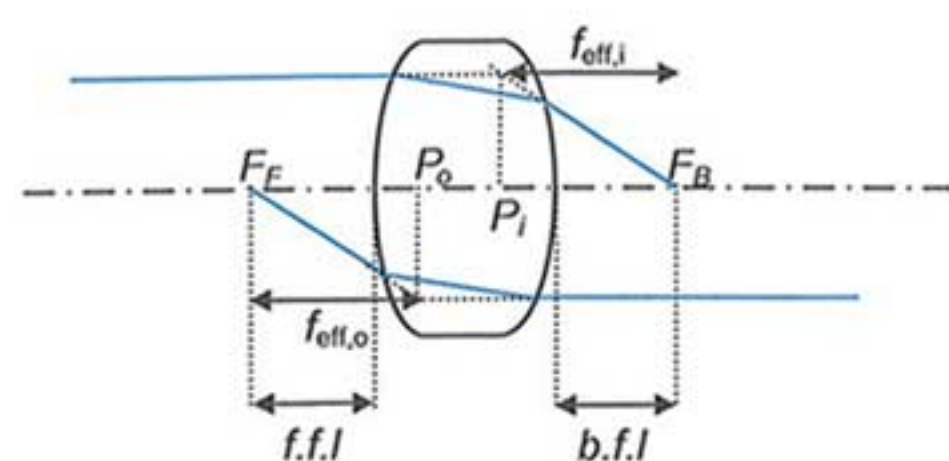
光源が光軸上ではなく、しかもレンズから無限遠にあるときは、コリメートされた光線方向と光軸の角度は θ [rad] となり、光線は光軸から離れた距離 θf に焦点を結ぶ。横倍率を2乗すると、**縦倍率 area or longitudinal magnification** が得られ、放射計算に広く利用される。

$$\mathcal{M}^2 = \frac{A_{\text{img}}}{A_{\text{obj}}} = \left(-\frac{q}{p}\right)^2$$



厚肉レンズ Thick Lenses

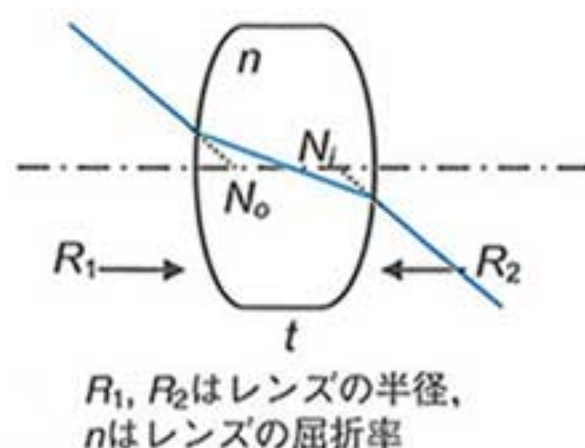
レンズの厚みが無視できないときは、厚肉レンズとして扱う。 F_F および F_B は前側焦点 **front** および後側焦点 **back focal points** であり、レンズの頂点 (vertex) からこれらの焦点までの距離がわかると、光学要素である前側焦点距離 **front focal length (f.f.l)** および後側焦点距離 **back focal length (b.f.l)** が求まる。 F_F から発散する光線はレンズ



から光軸に平行に出て行き、一方、光軸に平行に入射する光線は、 F_B に向かう。この場合、入射光線と射出光線を延長すると、図に示すようにレンズ面間で交点を持つ。これらの交点を通る横断面 (transverse plane)

を第一および第二主平面 **primary and secondary principal planes** と言い、その位置はレンズの内側あるいは、場合によっては外側である。これらの平面が光軸と交差する点を第一および第二主点 P_o , P_i **first and second principal points P_o and P_i** と言う。

入射および射出する主光線を光軸まで延長した点が、節点 N_o および N_i **nodal points N_o and N_i** である。これらの2つの焦点、2つの主点および2つの節点の計6点を光学システムの**主要点 cardinal points** と言う。



R_1, R_2 はレンズの半径、
 n はレンズの屈折率

有効焦点距離 effective focal lengths $f_{eff,o}$ および $f_{eff,i}$ とは、焦点からそれら各自の主点までの距離であり、もし、レンズ両面の媒質の屈折率が等ければ、それは等しくなり、次式で表される。

$$\frac{1}{f_{eff}} = (n-1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)t}{n} \frac{1}{R_1 R_2} \right]$$

経験上、空気中にある通常のガラスレンズの場合、主点間の間隔はレンズの厚み (t) の3分の1にほぼ等しい。