

フィールドガイド 幾何光学

John E. Greivenkamp / 著
オプトロニクス社編集部、張 吉夫 / 訳

Field Guide to Geometrical Optics
by John E. Greivenkamp

Originally published by

SPIE - The International Society for Optical Engineering
P.O. Box 10
Bellingham, Washington 98227-0010 USA
Phone: +1 360 676 3290
FAX: +1 360 647 1445
Email: spie@spie.org
Web: <http://spie.org>

Copyright © 2004 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向けに書かれた新しい光関連のシリーズ、SPIE フィールドガイドの最初の1冊です。光の原理や技術に関しては、従来、優れた教科書や深く掘り下げて書かれた専門家を対象とする優れた参考書、専門書が多く出版されていますが、SPIE フィールドガイドシリーズのねらいは、光の主な分野についての科学や技術のエッセンスを、蒸留濃縮して、机上で広げるにも、持ち運ぶにも便利でハンディーな参考書兼ハンドブックの形にまとめて、現場の技術者や研究者に提供することにあります。シリーズの各書籍とも、光学の基礎、光学原理の基本的事項から技術的、実際の側面、さらに参考文献に至るまでが、項目別に、参照しやすい配列でまとめられています。また、シリーズの各巻の間で、共通の記号とスタイルを保つように努めています。

SPIE フィールドガイドシリーズは光の諸分野で活躍する技術者、研究者を対象として書かれています。フィールドガイドという表題は、簡潔な説明を付けた図と式という共通の統一されたフォーマットを採用したことから来ています。このような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に配慮することができました。また、検索しやすく、しかも、図や式の原理的な理解を容易にすることが可能です。各フィールドガイドの末尾には、付録として、その巻に関連する文献、基本となる数学的取扱い、あるいは、本文以外の方法などについての情報が付け加えてあります。各分野を完全にカバーするように努めています。が、フィールドガイドの簡潔な説明に向かないような最新のトピックは除かれています。

私どもこのシリーズの編集者はSPIE フィールドガイドシリーズが生きたドキュメントであることを願っています。モジュールページ形式の採用により、本文の改訂や増補を容易に行なうことができますので、新しいフィールドガイドのテーマや各巻に付け加えればよいと思われるトピックなどについて、ご提案をメールにてお寄せ下さい。

(Email: fieldguides@SPIE.org)

John E. Greivenkamp, *Series Editor*
Optical Sciences Center
The University of Arizona

Field Guide to Geometrical Optics まえがき

この「フィールドガイド幾何光学」*Field Guide to Geometrical Optics*は、アリゾナ大学オプティカルサイエンスセンターの教育プログラムの一環として開発されてきた幾何光学をベースにまとめたものである。執筆にあたっては、厳密性と自己完結性に充分配慮し、本文中で使われる記号の統一性と符号の取り決めの一貫性に特徴をもたせた。本書の内容はアリゾナ大学の学部と大学院の両方の教材として利用され、ガウス結像光学、近軸光学、1次光学システム設計、システム例題、照明、色の効果、収差論入門などを収録。付録として、放射計測と光計測、ヒトの眼、その他の幾つかのトピックも加えた。

Roland V. ShackとRobert R. Shannonには特に謝意を表したい。「数」年前、私は、はじめて彼らから本書の内容に関連する事柄を教えられた。それ以来、絶えず彼らから教えられ、同僚とか友人となった今もなお、多くのことを学んでいる。本当に言葉では表現できないほどこの二人には感謝している。

この本のいくつかのテーマについて、Jim Palmer, Jim Schwiegerling, Robert Fischer, Jose Sasianらに助けてもらったことにも感謝したい。特に素原稿の段階から全体的な見直しをしてくれたGreg WillibyとDan Smithには感謝しなければならない。多分、そのことによって彼等の論文提出は遅れたことと思うけれど……。最後に、私の講義に出席してくれたすべての学生に感謝する。彼等の学習への意欲が、この本の内容に対する私の情熱を掻き立て、問題に対する私の理解を一層深めたからである。

この「フィールドガイド」を、私が仕事にフォーカス（ほとんど無収差で）することを許してくれた私の妻のKayと子供たちJakeとKatieに捧げる。

John E. Greivenkamp
Optical Sciences Center
The University of Arizona

日本語版へのまえがき

原著者のまえがきにあるように、このフィールドガイド幾何光学 **Field Guide to Geometrical Optics** は、アリゾナ大学オプティカルサイエンスセンターでの教育プログラムの一環として開発された「幾何光学の基礎コース」をベースにして、厳密性と自己完結性を維持しながらも、コンパクトにまとめられたフィールドガイドである。フィールドガイドという語は、あまり馴染みのない言葉であるが、系統的に精選されたトピックについて、図と数式を用いて、詳しい内容を簡潔に説明した図解事典といったものを指すようである。その意図どおり、基礎的なところをしっかりと押さえつつ、本書全体を通して、幾何光学全般をパースペクティブに見通すことができ、かつ、どのトピックもそのページで説明が完結するように構成されている。

本書を使っていたく上で注意していただきたいのは、原著者のまえがきにもあるように、幾何光学全般を統一された符号の取り決めの下に扱っていることである。そのため、通常使われている数式や公式などと符号の一致していない場合が多々見られる。また、距離、角度、屈折率なども有向性変数として扱われている。どのページの数式を参照される場合も、第1ページにある「符号の約束」を、その都度、参照していただきたい。

また、目次、本文、図、索引を通じて、和、英の両単語を併記するように努めた。本書を幾何光学に関する和英、英和の両用辞書としても活用していただければ幸いである。

今日、光学、フォトニクス、オプトロニクスは、広く、物理、化学、生物、医学の基礎科学の諸分野から広範な産業の諸分野にまで、その応用が広がっている。このような光学一般の応用についての基礎となっているのは他ならぬ幾何光学である。本書が幾何光学に関連する多くの分野の研究者、技術者、学生の方々の座右の書として役立つことを願っている。翻訳者の誤解、用語の統一性の欠如などについて不完全をまぬがれ得るものではない。読者のご指摘をお願いしたい。

オプトロニクス社 編集部

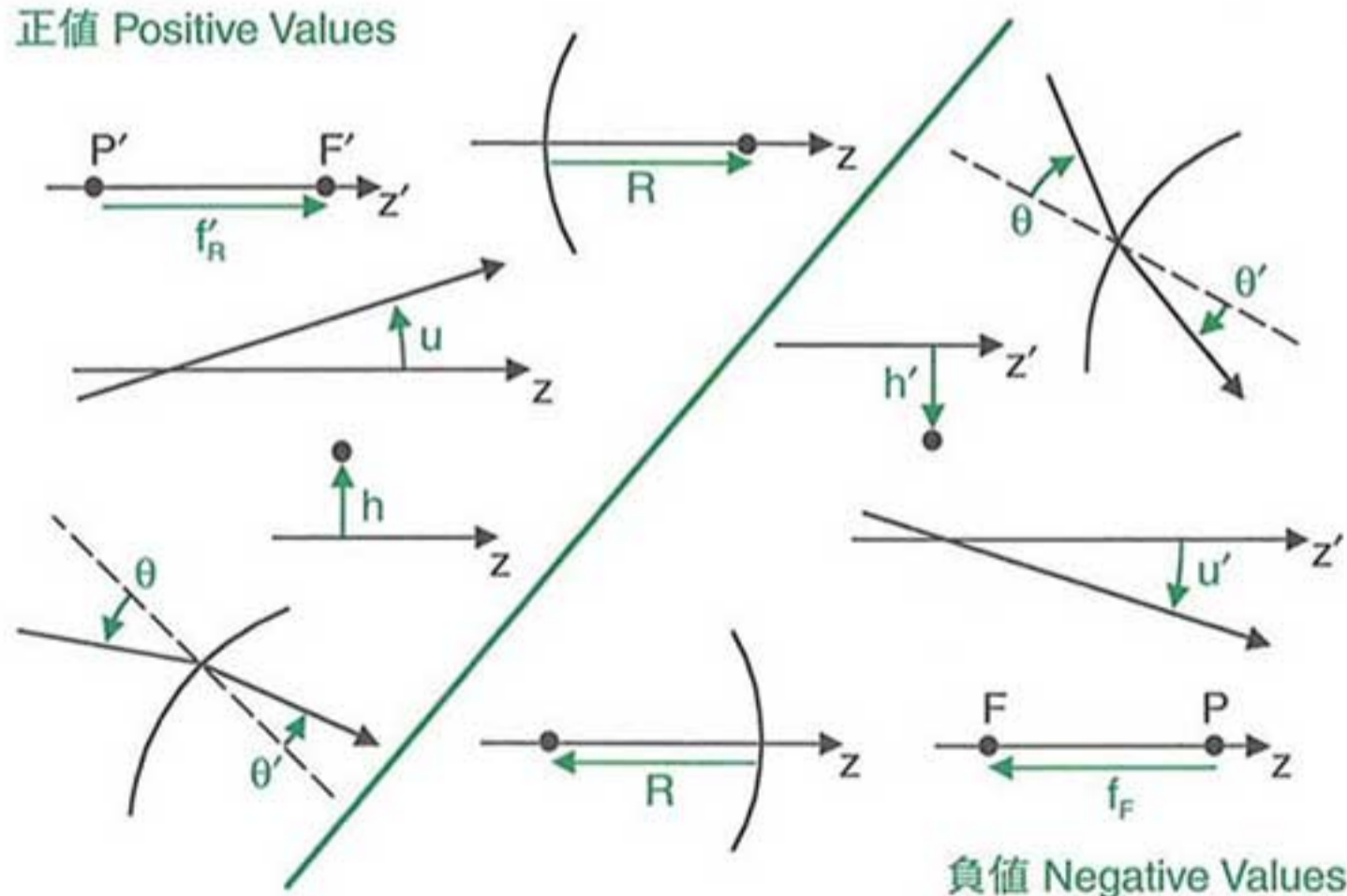
符号の約束 Sign Conventions

このフィールドガイド **Field Guide** では、完全に首尾一貫した符号の約束 **sign conventions** を用いる。このことは変数やそれらから得られる結果（変数）の符号を図や物理的システムへの関連付けを容易にする上で非常に重要である。

- 回転対称な光学システムの対称軸は**光軸 optical axis** と呼ばれ、それは z 軸にとられる。
- すべての距離は基準点、基準線、または基準面に対して直交座標系のやりかたで測られる：上への、あるいは、右への**方向性距離 directed distance** は正、下への、あるいは、左への方向性距離は負である。
- すべての角度は基準線または基準面に対して直交座標のやりかた（右手系のルールを使って）で測られる：反時計方向への角度は正、時計方向への角度は負である。
- 表面の**曲率半径 radius of curvature** はその頂点から曲率中心への方向性距離として定義される。
- 光は正の屈折率を持つ媒質中では左から右へ（ $-z$ から $+z$ へ）進行するものとする。
- 反射に引き続く媒質の全ての屈折率の符号は、その直前の屈折率の符号を反転したものである。

以上に述べた符号の約束を用いる際の補助的手段として図を使うとき、すべての方向性距離と角度は、矢印で表わすものとし、それら矢印のしっぽは、基準点、基準線、または基準面に一致させて表示するものとする。

正值 Positive Values



負値 Negative Values

基礎となる考え方 Basic Concepts

幾何光学 geometrical optics は回折とかあるいは干渉とかを扱わない光の研究方法である。どのような物体も互いに独立に放射する点光源の集まりからなっていると考える。

1次光学 first-order optics は完全な光学システム、すなわち収差のない光学システムを研究する研究方法である。解析の方法はガウス光学と近軸光学を含む。これらの解析の結果は結像の性質（像の位置と倍率）ならびにシステムの放射計測的な性質を含む。

収差 aberration とは光学システムの完全性からのずれである。収差は光学システムの設計に本来的に含まれるもので、それは光学システムが完璧につくられている場合にも存在する。もちろん、その上に製造段階で入る誤差があれば、誤差による収差が加わる。

3次光学（および高次光学） third-order optics (and higher-order optics) はシステムの性能に及ぼす収差の影響を含む。システムの像の品質が評価される。回折の影響は時としてこの解析に含まれる。

屈折率 index of refraction n :

$$n \equiv \frac{\text{真空中光速}}{\text{媒質中光速}} = \frac{c}{v} \quad v = \frac{c}{n}$$

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

反射に引き続く光は右から左へと進む。したがって、その速度は負であると考えることができる。上の屈折率の定義式の中の媒質中光速としてこの負の光速を使えば、反射光については屈折率の符号も負となる。

波長 λ と周波数 ν wavelength λ and frequency ν :

$$\lambda = \frac{v}{\nu} \quad \text{真空中では} \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

波数 wavenumber w は cm 当たりの波の数（かず）（波長の逆数）である。

$$w = \frac{1}{\lambda} \quad \text{cm}^{-1} \text{ 単位}$$

光学経路長 Optical Path Length

光学経路長* **optical path length** OPLは2点間を進む光にとって必要な時間に比例する。

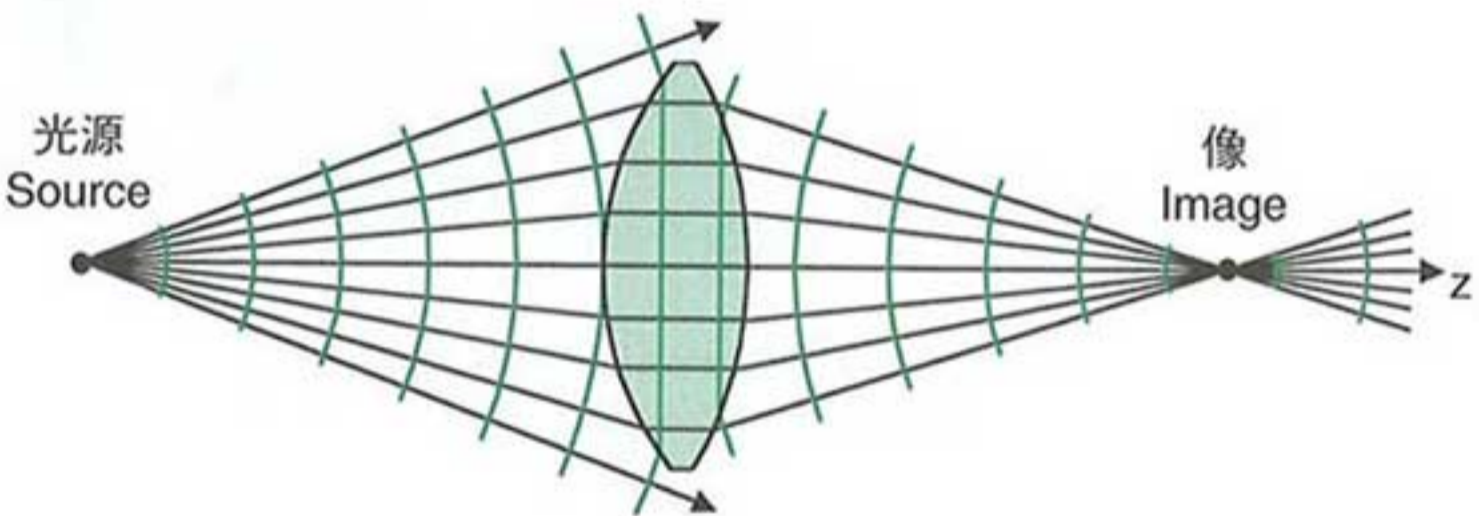
$$OPL = \int_a^b n(s) ds$$

等質な媒質中ではa, b間は直線となり,

$$OPL = nd$$

波面 wavefrontとは光源のある点から一定のOPLにある多くの点によって形成される面のことである。

光線 rayとはエネルギーの伝搬方向を示すもので、波面に対して直交している。



完全な光学システムあるいは1次のシステム中では、すべての波面は球面か平面である。

フェルマーの原理 Fermat's principle：任意の媒質のセット（組）を通過して点aから点bへと進む光線が辿る経路は、1次近似では、その経路のOPL値を実際の経路のまわりにごく接近して配置した多くの他の（実際に光が進む経路ではない）経路のOPL値に等しくなるような経路である。

言い換えれば、実際の光線のOPLは、それに隣接する多くの経路のOPLについての極値（最大値または最小値）になっているか、または隣接する多くの経路のOPLに等しい。

一様な屈折率の媒質中では、光線は直線となる。

1次の光学システムすなわち近軸の結像システムでは、光源のある点とそれの像を結び付けるすべての光線は等しいOPLを持っている。

* 訳注：光学経路長 Optical path length OPLは本文中にあるように、経路長というより経路上所要時間に比例する量であることに注意。

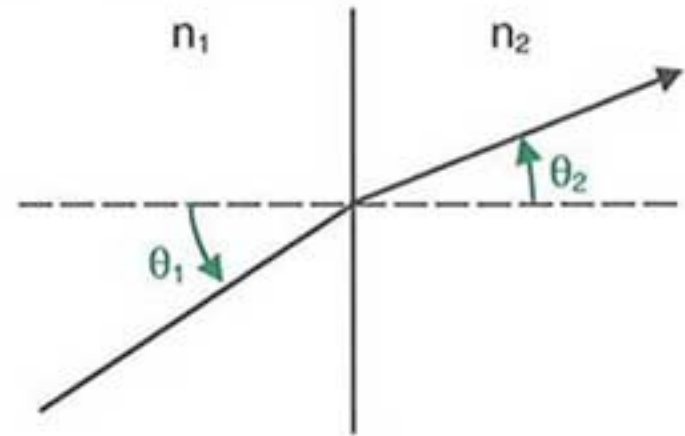
屈折と反射 Refraction and Reflection

スネルの屈折の法則 **Snell's law of refraction** :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

入射光線, 屈折光線, 境界面法線は同一平面内にある。

複数の互いに平行な境界面を通過して伝搬するとき, $n \sin \theta$ という量が保存される。

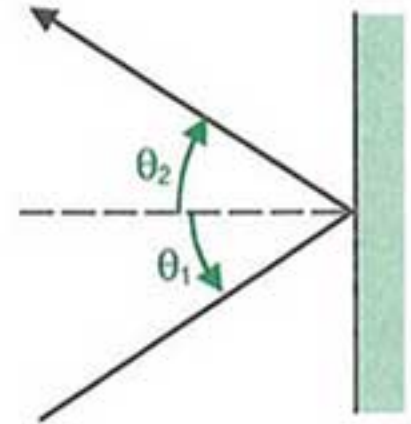


反射の法則 **law of reflection** :

$$\theta_1 = -\theta_2$$

入射光線, 反射光線, 面法線は同一平面内にある。

反射は, $n_2 = -n_1$ とすると, 屈折に等しい。



全反射 (全内面反射) total internal reflection TIR 全反射は, 高屈折率媒質から低屈折率媒質へ進む光線の入射角が**臨界角 critical angle** θ_c を超えると起こる。

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

臨界角での屈折角 θ_2 は 90° である。

n_1 と n_2 との間の**反射率 reflectance** ρ は**フレネル反射係数 Fresnel reflection coefficients** で与えられる。吸収がないときの垂直入射に対して ρ は次式で与えられる。

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

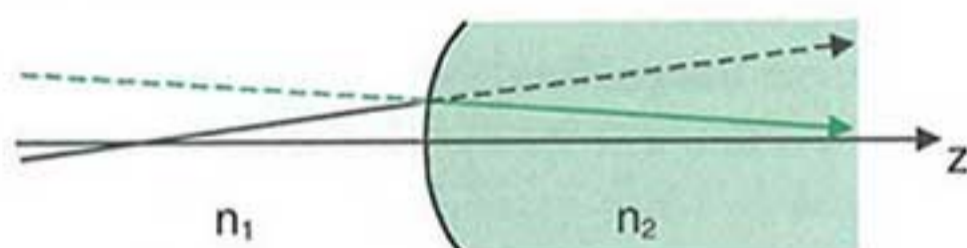
n_1	θ_c
1.3	50.3°
1.4	45.6°
1.5	41.8°
1.6	38.7°
1.7	36.0°
1.8	33.7°
1.9	31.8°
2.0	30.0°

$n_2 = 1.0$ に対する
臨界角

光学空間 Optical Spaces

どのような光学表面も、**物体空間 object space**と**像空間 image space**の2つの**光学空間 optical spaces**をつくる。各光学空間は $-\infty$ から $+\infty$ まで広がっていて、それぞれの光学空間にともなう屈折率を持っている。各光学空間には実部分と虚部分が存在する。

光線を光学空間から光学空間へと追跡することができる。何れの光学空間内においても、1本の光線は真直ぐであり、**実部分 real segment** (図の実線部分)と**虚部分 virtual segment** (図の破線部分)を持っていて、 $-\infty$ から $+\infty$ まで延びている。隣接する空間からの2本の光線はそれらの共通の境界面で交差する。



実物体 real objectは境界面の左にあり、**虚物体 virtual object**は境界面の右にある。**実像 real image**は境界面の右にあり、**虚像 virtual image**は境界面の左にある。負の屈折率を持つ光学空間 (光が右から左へ進む空間) では、実と虚について述べる時、右と左が入れ換わる。

システムが N 個の境界面を持つとすれば、そこには $N + 1$ 個の空間がある。各空間には、ただ1個の物体または像が存在する。光学空間の実部分とは、その空間への入り口と出口で定義される2つの境界面の間にある空間のことである。その外側の空間が虚部分となる。光学空間の決め方には、ある程度の自由度がある。多数の光学境界面をまとめて単一の要素とし、そのまとめた要素についての物体空間と像空間を考えるだけにして、その要素内にある中間の空間を無視するということは、普通よく行なわれる。

複数要素系では、実と虚の用法が少し不明確になるかも知れない。例えば、境界面1で形成される実像は境界面2の右側では虚に変換される。すなわち、この像は、境界面2に対しては物体と見なされるのであるが、虚物体としての働きをする。同じようにして、境界面3によって形成された虚像は境界面4に対しては、実物体と見なされる。

