



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

数字图像

采集与处理

刘文耀 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内 容 简 介

本书旨在研究光电图像的采集与处理的理论、概念和技术。全书共分 11 章, 其中第 1 章至第 4 章主要讨论了图像的光学形成方法, 即光学成像系统的概念、理论及技术方法, 并且直接触及技术层面。同时对光电图像的采集技术及方法做了详细介绍。第 5 章至第 11 章讨论了数字图像处理的基本概念、理论及方法, 包括图像的数字表征、变换、增强、复原、压缩与编码、分割与描述以及彩色图像处理。

本书可供仪器仪表、遥感技术、生物医学、天文、通信、气象、工业自动控制和国防等行业从事信息科学和计算机相关技术的广大科技工作者以及大专院校的师生参考, 也可以作为高年级大学生或研究生有关课程的教材或教学参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字图像采集与处理 / 刘文耀主编. —北京: 电子工业出版社, 2007.8

(电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业)

ISBN 978-7-121-04764-0

I. 数… II. 刘… III. ①数字图像—数据采集—高等学校—教材②数字图像处理—高等学校—教材 IV. TN911.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112752 号

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 黄志瑜

印 刷: 北京牛山世兴印刷厂

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 22 字数: 528 千字

印 次: 2007 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 33.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

前 言

本书之所以入选为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是因为本书具有鲜明的学科与专业特色。作为全国仪器仪表类学科专业的统编教材，始终贯穿全书的是“光电”。全书深刻地揭示了图像的光学形成方法，即光学成像系统的概念、理论及技术方法，并且直接触及应用层面。同样，本书对光电图像的采集技术和方法，以及各种基本的数字图像处理概念、理论与方法做了描述。

图像采集及图像处理的技术是依靠光学与电子学手段实现的。随着科学与技术的发展，微电子与光电子技术取得了极大成功，这为光电图像采集与处理以及应用带来了空前的机遇，其发展对科学研究、社会生产乃至人类生活的影响是巨大而深远的。

本书共分11章，是根据作者讲授三十余遍的教材及多年来科学研究的成果并参考相关文献编写而成的，全书概括地描述了光电图像的采集与处理理论和技术所涵盖的内容。其中第1章至第5章涵盖了光电图像的生成、采集理论与技术，第6章至第11章探讨了光电图像处理的基础理论与技术。

本书第6章和第7章由肖松山副教授、博士编写，第4章和第7章由陈晓东副教授、博士编写，第3章和第5章由王晋疆副教授、博士编写，第2章和第11章由北京印刷学院徐艳芳副教授、博士编写。其余章节由刘文耀编写。刘文耀对全书进行了统编。本书得到了袁晔硕士的帮助。同时在编写工作中还引用了一些论文和资料，对此，本人深表感谢。由于本人水平所限，书中有许多不足之处，敬请读者批评指正。

刘文耀
2007年于天津大学

目 录

第 1 章 图像生成与采集基础	(1)
1.1 绪言	(1)
1.2 图像的生成	(1)
1.2.1 成像的概念	(1)
1.2.2 理想光学系统和共线成像	(4)
1.2.3 成像光学系统的分辨极限	(5)
1.2.4 成像光学系统质量描述	(8)
1.2.5 感光底片	(12)
1.3 视觉	(17)
1.3.1 视觉原理	(17)
1.3.2 视觉现象	(18)
1.3.3 视觉模型	(21)
习题	(25)
第 2 章 光度学与色度学基础	(27)
2.1 辐射度量与光度量	(27)
2.1.1 基本辐射度量	(27)
2.1.2 人眼的光谱光视效率	(29)
2.1.3 光度量	(29)
2.2 光束传播中光度量的变化规律	(31)
2.2.1 点光源的光通量和对微面元的照度	(31)
2.2.2 朗伯余弦辐射体及其光通量	(33)
2.2.3 光亮度的传递	(35)
2.2.4 光学成像系统像面的光照度	(37)
2.3 颜色的表征和基本色度量	(39)
2.3.1 颜色视觉	(39)
2.3.2 颜色匹配和基本色度量	(40)
2.4 CIE 标准色度系统	(42)
2.4.1 CIE1931 标准色度系统	(42)
2.4.2 CIE1964 补充标准色度系统	(45)
2.5 色差及均匀颜色空间	(45)
2.5.1 色差的观念	(45)
2.5.2 1931CIE-XYZ 颜色空间的视觉非均匀性	(46)

2.5.3 均匀颜色空间及色差公式	(46)
习题	(50)
第3章 成像系统	(51)
3.1 典型光学成像系统	(51)
3.1.1 放大镜	(51)
3.1.2 望远系统	(53)
3.1.3 显微系统	(58)
3.1.4 摄影系统	(60)
3.1.5 成像物镜	(62)
3.2 照明系统	(66)
3.2.1 照明系统设计的基本原则	(66)
3.2.2 临界照明和柯勒照明	(66)
3.2.3 LED 照明系统	(67)
3.3 数字成像系统	(68)
3.3.1 数字照相系统	(68)
3.3.2 数字显微成像系统	(70)
3.3.3 数字望远成像系统	(71)
3.3.4 其他数字成像方法	(71)
习题	(73)
第4章 数字图像的采集	(74)
4.1 概述	(74)
4.2 CCD 图像传感器工作原理	(74)
4.2.1 CCD 工作原理	(75)
4.2.2 CCD 特性参数	(78)
4.3 CCD 图像传感器结构	(81)
4.3.1 线阵 CCD 图像传感器的基本结构	(81)
4.3.2 典型线阵 CCD 图像传感器	(82)
4.3.3 面阵 CCD 图像传感器的基本结构	(84)
4.3.4 典型面阵 CCD 图像传感器	(87)
4.4 CCD 图像数据采集与计算机接口	(89)
4.4.1 CCD 图像数据的量化	(89)
4.4.2 计算机接口	(91)
4.4.3 线阵 CCD 图像数据的采集	(92)
4.4.4 面阵 CCD 图像数据的采集	(95)
4.5 基于嵌入式系统的 CCD 图像数据采集	(97)
4.5.1 线阵 CCD 图像数据的采集	(98)
4.5.2 面阵 CCD 图像数据的采集	(99)
4.6 CCD 数字图像的保存	(100)

习题	(100)
第 5 章 图像的数学表征	(101)
5.1 连续图像的表达式	(101)
5.2 二维线性系统	(102)
5.3 连续图像的统计表征	(105)
5.4 抽样与量化	(107)
5.5 抽样理论	(113)
5.5.1 理想抽样	(113)
5.5.2 实际的图像抽样系统	(117)
5.6 图像的矩阵与向量表示	(120)
5.6.1 图像的矩阵表示	(120)
5.6.2 图像的向量表示	(121)
5.6.3 向量空间中的随机图像场	(121)
习题	(122)
第 6 章 图像正交变换	(124)
6.1 正交变换概述	(124)
6.1.1 一维变换	(124)
6.1.2 二维变换	(126)
6.2 傅里叶变换	(128)
6.2.1 连续函数的傅里叶变换	(128)
6.2.2 离散傅里叶变换	(133)
6.2.3 图像傅里叶变换的性质	(137)
6.2.4 FFT	(145)
6.3 离散余弦变换	(148)
6.4 沃尔什变换	(150)
6.5 阿德玛变换	(154)
6.6 哈尔变换	(158)
6.7 K-L 变换	(161)
习题	(165)
第 7 章 数字图像增强	(167)
7.1 直方图处理	(167)
7.1.1 直方图定义	(167)
7.1.2 灰度级变换	(169)
7.1.3 直方图均衡化	(173)
7.2 图像平滑	(175)
7.2.1 低通滤波法	(175)
7.2.2 中值滤波法	(178)

7.2.3 多图像平均法	(181)
7.3 图像锐化	(182)
7.3.1 微分滤波	(182)
7.3.2 高通滤波	(184)
7.4 伪彩色增强	(186)
7.4.1 基于灰度调色板的伪彩色方法	(186)
7.4.2 基于灰度变换的伪彩色方法	(186)
7.4.3 基于频率滤波的伪彩色方法	(186)
7.4.4 基于区域分割的伪彩色方法	(187)
习题	(188)
第8章 图像复原	(189)
8.1 退化模型	(190)
8.1.1 退化的数学模型	(190)
8.1.2 连续函数退化模型	(191)
8.1.3 离散的退化模型	(192)
8.1.4 循环矩阵对角化	(193)
8.2 经典的图像复原方法	(196)
8.2.1 逆滤波复原	(196)
8.2.2 维纳滤波复原	(197)
8.2.3 等功率谱滤波复原	(199)
8.3 常见的退化模型及其复原过程	(201)
8.3.1 常见的退化现象	(201)
8.3.2 退化系统及退化传递函数实例	(202)
8.3.3 消除匀速直线运动模糊	(205)
8.3.4 几何畸变校正	(208)
8.3.5 消除显微成像景深不足引起的图像模糊	(213)
8.3.6 图像复原的一些新方法	(218)
习题	(223)
第9章 图像压缩编码	(225)
9.1 图像压缩的基本概念	(225)
9.1.1 图像压缩的必要性	(225)
9.1.2 图像压缩的基础	(226)
9.1.3 常用的图像压缩方法及其分类	(229)
9.2 典型的统计编码	(229)
9.2.1 游程编码	(230)
9.2.2 哈夫曼编码	(230)
9.2.3 算术编码	(232)
9.3 预测编码	(233)

9.3.1	预测编码压缩的原理	(233)
9.3.2	无损预测编码	(235)
9.3.3	有损预测编码	(236)
9.3.4	图像的预测编码	(236)
9.4	正交变换编码	(238)
9.4.1	正交变换编码的基本原理	(238)
9.4.2	子图像尺寸的选择	(239)
9.4.3	变换的选择	(239)
9.4.4	比特分配	(240)
9.5	基于小波变换的图像压缩编码	(241)
9.5.1	小波变换	(242)
9.5.2	小波系数编码的实质	(247)
9.5.3	小波系数的能量分布特点	(248)
9.5.4	EZW 编码	(254)
9.5.5	SPIHT 编码	(256)
9.6	图像压缩国际标准简介	(259)
9.6.1	二值图像压缩标准	(259)
9.6.2	静止图像压缩标准	(260)
9.6.3	运动图像压缩标准	(262)
	习题	(268)
第 10 章	图像分割与描述	(270)
10.1	概述	(270)
10.2	图像分割	(272)
10.2.1	灰度阈值分割技术	(272)
10.2.2	基于边界的分割技术	(278)
10.2.3	基于区域的图像分割方法	(288)
10.2.4	匹配检测技术与分割	(289)
10.3	图像描述	(291)
10.3.1	边界描述	(291)
10.3.2	区域描述	(298)
10.3.3	纹理描述	(306)
	习题	(314)
第 11 章	彩色图像处理基础	(316)
11.1	电视系统及数字媒体设备的颜色模型	(316)
11.1.1	电视系统的颜色模型	(316)
11.1.2	多媒体设备的颜色模型	(319)
11.2	彩色图像的常规处理	(323)
11.3	彩色图像的颜色平衡	(324)

11.3.1 白平衡调整	(324)
11.3.2 灰平衡处理	(326)
11.4 彩色图像的颜色增强	(327)
11.4.1 饱和度增强	(328)
11.4.2 其他应用需求的颜色处理	(328)
11.5 彩色图像的色彩管理	(330)
11.5.1 设备颜色的表示及传递	(330)
11.5.2 ICC 色彩管理的基本内容	(333)
习题	(336)
参考文献	(338)

第1章 图像生成与采集基础

自从20世纪50年代电子计算机问世以来,图像科学随着超大规模集成技术以及计算机结构、性能及算法的迅猛发展,也得到了飞速发展,并且越来越广泛地应用于众多科学与工程领域,如遥感、工业检测、医学、气象、侦察、通信、智能机器人等。所有这些成就正在或将要深刻地改善着人们的生产手段、生活方式和人类社会的面貌。

1.1 绪言

当今,在这个人类21世纪的起点上,回顾20世纪,我们的确应该为在过去的一个世纪里于图像科学中取得的巨大成就而自豪。其中影响深远的标志性成就如下。

人造卫星的上天使得人们以无比宏大的视野触目我们赖以生存的地球,并眺望无垠的星云。是精密的哈勃望远镜将天际星空的影像传送给了我们,是各种星载的成像传送设备将地球的面貌、植被、高山大川、地物宝藏和与我们休戚相关的雷电云雨和波涛海浪,以图像的形式呈现给我们。图像是我们连接宇宙万物的“介质”。

人造卫星的上天和电视的发展使我们坐在家中便能同步地观看悉尼奥运会的精彩比赛,分享人类文明的巨大成果——“和平号”空间站凯旋回归的绚烂一幕。图像使我们分享着人类的高度文明。

网络的出现使全球性的电子商务成为现实,我们购物的商店不再是传统的购物场所,而是以图像及其他数据组成的电子商城,图像取代了购物者对商品实物的认知。

图书馆使人类分享知识财富,不分种族,不分语言,信息的传送与显示应用也是以图像的形式进行的。

我们还可以列举很多很多这样的例子。

图像是信息表征的绝好形式,其直观性和易理解性是显而易见的,是其他类信息所不能比拟的。图像是自然界物和物群经可见光的照射,由人的视觉系统所感知的景物。当然,图像的含义远不止于此。广义地讲,任何数据场在空间的有序排列都可转化成可视图像。

1.2 图像的生成

1.2.1 成像的概念

光学系统由一系列的折射和反射表面组成,这些表面可以是平面、球面和非球面。

各个表面的曲率中心在同一直线上的光学系统称为共轴光学系统,该直线称为光轴。相对应的有非共轴光学系统。我们着重讨论前者。

设由 $O_1, O_2, \dots, O_k$ 表示的 k 个面的光学系统如图1-1所示。由一发光点 A_1 发出一个球面波,即以 A_1 为中心的同心光束,点 A_1 称为物点,经过光学系统后,设仍为一球面波,即以

点 A'_k 为中心的同心光束，点 A'_k 是一个几何点，这样的像称为完善像。因此，光学系统成完善像的条件是入射为球面波时，出射也是球面波；或者根据马吕斯定律：由物点发出的经过光学系统到达像点的任意光路的光程相等。如图 1-1 所示的 k 个面的光学系统，则有

$$\begin{aligned}
 & n_1 A_1 O + n_1 O O_1 + n_2 O_1 O_2 + \cdots + n'_k O_k O' + n'_k O' A'_k \\
 & = n_1 A_1 E + n_1 E E_1 + n_2 E_1 E_2 + \cdots + n'_k E_k E' + n'_k E' A'_k = \text{常数}
 \end{aligned}$$

或写为 $(A_1 A'_k) = \text{常数}$ 。

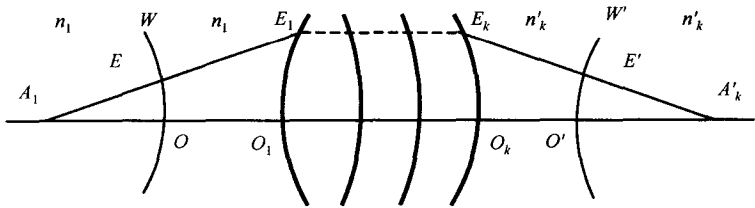


图 1-1 光学系统

发光体 AB 上每一点发出同心光束，经过光学系统后，设均为同心光束，会聚成像 $A'B'$ ，这样的像称为物体 AB 的完善像，如图 1-2 所示。

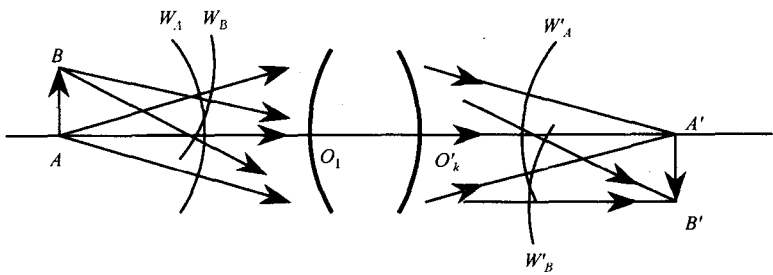


图 1-2 完善的物像关系

由实际光线会聚的点称为实物点或实像点，由这样的点构成的物或像称为实物或实像。实像可以被眼睛或其他接收器（如底片、屏幕等）所接收。

由光线的延长线形成的物点或像点，称为虚物点或虚像点。由这样的点构成的物或像称为虚物或虚像。如图 1-3 所示， AB 为虚物， $A'B'$ 为虚像。虚物一般是另一个光学系统所成的像，虚像能被眼睛看见，但不能被其他接收器（如底片、屏幕等）接收。

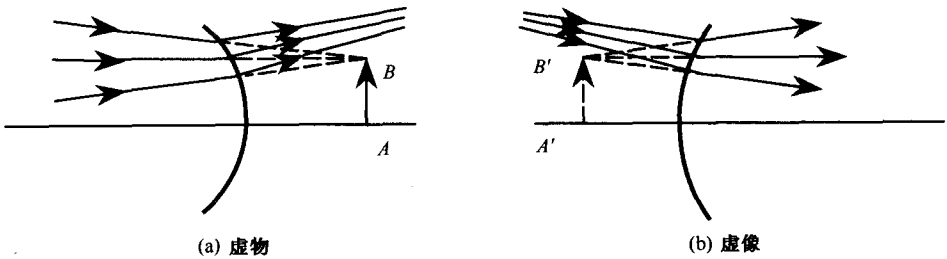


图 1-3 虚物与虚像

物体（包括虚物）所在的空间称为物空间，像（包括虚像）所在的空间称为像空间。

设计对有限大小物体成完善像的光学系统是非常困难的。但是对一个特定点成完善像只需用单个折射面或反射面便可实现。这样的面就是该特定点的等光程面。下面举几个等光程面的例子。

1. 有限距离的物点 A 被反射面反射成像于有限距离的 A' 点，如图 1-4 所示，设 M 为反射面上任意一点，则光程为

$$(AA') = AM + MA'$$

如果是等光程面，则

$$AM + MA' = \text{常数}$$

由解析几何可知，一动点至二定点的距离之和为常数者，动点轨迹是以二定点为焦点的椭圆。将此椭圆绕轴旋转 360° 得一椭球，该椭球面即为 A 和 A' 的等光程面， A 和 A' 与椭球的两个焦点重合，并且可以互换，即如果 A' 点为物点，则 A 为其像。

2. 无限远物点 A 被反射面反射成像于有限距离的 A' 点，此时入射波面为平面波 W ，如图 1-5 所示，光程为

$$(GA') = GM + MA'$$

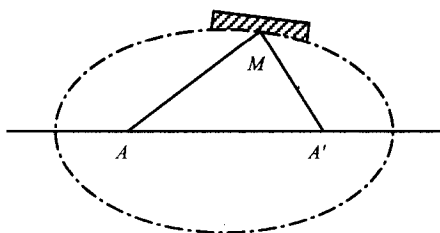


图 1-4 等光程面

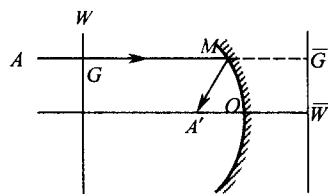


图 1-5 无限远物点成像

若反射镜面对 A 和 A' 是等光程面，则光程 (GA') 应为常数。由解析几何可知，一动点距一定点和一定直线的距离相等者，动点的轨迹为抛物线，图中 $\bar{W}$ 是定直线， A' 为定点， M 为动点，因 $MA' = M\bar{G}$ ，故

$$(GA') = (G\bar{G}) = \text{平行直线 } W \text{ 和 } \bar{W} \text{ 间的距离} = \text{常数}$$

由此可见，此时的等光程面是以 A' 为焦点、 O 为顶点的抛物线绕轴旋转而成的抛物面，平行于轴 AO 入射的平行光束经此抛物面反射镜反射后必会聚于焦点 A' 上，或者自焦点 A' 发出的同心光束，经反射以后必平行地射出。

3. 有限距离物点 A 经折射面折射成像于有限距离的 A' 点，如图 1-6 所示，此时光程 (AA') 应等于常数，即

$$(AA') = nAE + n'EA' = \text{常数}$$

取直角坐标 xOy ， AA' 为 x 轴， y 轴与 AA' 垂直， E 点的坐标为 (x, y) ，并令 $AO = l$ ， $OA' = l'$ ，则有

$$n\sqrt{(l+x^2)+y^2}+n'\sqrt{(l'-x^2)+y^2}=nl+n'l'$$

或

$$n'\left[l'-\sqrt{(l'-x^2)+y^2}\right]+n\left[l-\sqrt{(l+x^2)+y^2}\right]=0$$

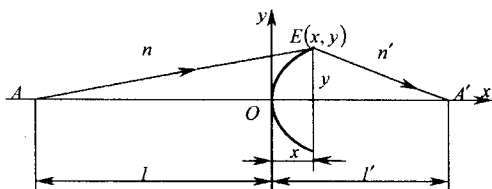


图 1-6 有限距离物点成像

这是一个四次曲线方程，为卵形线，将此曲线绕轴线 AA' 旋转而成的曲面，称为卵形面，它就是 A 和 A' 之间的等光程面。

4. 若上例中的物和像点之一位于无限远，如图 1-7 所示。例如物点 A 在有限距离， A' 点在无限远处。因为折射后的波面为平面波，所以 A 和 A' 的等光程条件为

$$n\sqrt{(l+x^2)+y^2}+n'EG=nl+n'x+n'EG$$

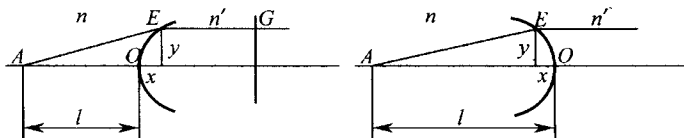


图 1-7 非球面成像

故得

$$n'x+n\left[l-\sqrt{(l-x^2)+y^2}\right]=0$$

这是一个二次曲线方程，当 $n < n'$ 时为双曲线，如图 1-7 的左图所示。当 $n > n'$ 时为椭圆，如图 1-7 的右图所示。所以在两种情况下的等光程面就是双曲线回转面和椭圆回转面。

实际上，上述等光程面由于制造困难，并且当它们对有限大小的物体成像时，轴外点并不满足等光程条件，因而不能达到完善成像。所以实际的光学系统，绝大部分是由一系列球面组成的球面系统。当满足一定的条件时，它们能对光轴附近的小物体等光程成像。

1.2.2 理想光学系统和共线成像

光学系统多用于对物体成像。未经严格设计的光学系统只有在近轴区才能成完善像。由于其成像范围和光束宽度均为无限小，因而没有实用意义。

实际的光学系统要求用一定宽度的光束对一定大小的范围成像。应用光学所要解决的问题就是寻求这样的光学系统。

由工程光学知，光学系统成完善像的条件，就是使物空间的同心光束经过光学系统后仍为同心光束。或者说，物空间一点通过光学系统成像后仍为一点。如果光学系统对任意大的范围以任意大的光束成像都是完善的，这样的光学系统便定义为理想光学系统。

在均匀透明的介质中，除平面反射镜具有上述理想光学系统特性之外，任何实际光学系统都不能绝对完善地成像。因此，理想光学系统的意义就在于利用其成像特性比较和估计实际光学系统的成像质量。

理想光学系统处在均匀介质中，物空间光线和像空间光线都是直线。物空间一点，在像空间仍为一点。其位置是用光线通过一定的几何关系确定下来的。因而把这种几何关系称为“共线成像”、“共线变换”或“共线光学”。

共线成像理论的初始几何定义，可归纳为以下3点：

1. 物空间每一点对应于像空间一点，且只有一点，这两个对应点称为物像空间的共轭点。
2. 物空间中每一条直线对应于像空间的一条直线，这一对相应的线称为物像空间的共轭线。
3. 如果物空间的任意一点位于直线上，那么在像空间内的共轭点也必在该直线的共轭线上。

这些定义可以推广到：物空间中任意平面对应于像空间中一共轭平面。

1.2.3 成像光学系统的分辨极限

这一节，我们按衍射的观点来讨论透镜的分辨极限。根据衍射理论，即使透镜没有像差，一个物点的成像也并不是被透镜折射的诸光线的简单相交，而是呈现一种衍射图样，因此，透镜的分辨有一个最终极限。如果一透镜或一光学系统能把两物点的相应衍射图样分得足够开，我们就说它们能分辨这两个物点。下面来讨论被广泛采用的瑞利分辨判据。这是B·瑞利（Baron Rayleigh）于1888年提出的。

现在来讨论光学成像系统或单透镜对两个靠得很近的物的成像，如图1-8所示。假设透镜是像散的，即从物点 S 出射到透镜上的任何一条光线都将通过像点 P ，且所有从 S 到 P 的光程都相等（光程长度用光波长度量）。尽管通过透镜中心的光线的几何长度比从 S 到 P 的其他光线的长度都短，但因为透镜中心较厚，故各光程的波长数是相等的。因为透镜的折射率较高，所以光波在透镜中的传播比在空气中要慢。

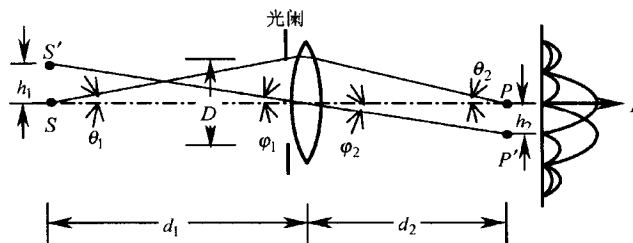


图 1-8 透镜的分辨极限

除了对折射光线做几何追迹外，也要考虑衍射的存在。此时，透镜可视为一圆形开孔，该开孔在远场条件下产生衍射，其结果是在 P 和 P' 点所形成的像不很清晰，围绕该两点各有一个远场的圆形衍射斑。因此，当两个物点靠得很近时，物点的像就叠加在一起，因此要

问物体靠得多近尚能被分辨？

瑞利分辨率判据指出，两个等亮度的物点，如果其中之一的像的衍射斑中央最大正好落在另一衍射斑的第一个最小上，即其暗环上，则说这两个物点能被光学系统的镜头所分辨。换句话说，两个衍射图样中心的距离应该等于中心亮斑的半径。

现在看图 1-8，其中像点 P 和 P' 的辐射照度曲线表示在右边，最小可分辨角间距可写成

$$\varphi_{\min} = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (1-2-1)$$

其中 D 是开孔的直径， λ 是光源的波长。因此，按瑞利分辨率判据，如果分辨角 φ 小于 $\varphi_{\min}$ ，像就无法分辨。

此外，图 1-8 表示出物点的角距离 φ_1 等于像点的角距离 φ_2 。如果镜头是一个天文望远镜，则距离 d_1 将无限大，式(1-2-1)所表示的最小可分辨角间距将是物镜分辨率的最好描述。相反，对物体做近距离观察时，例如显微镜的情形，则用最小分辨间距来表示式(1-2-1)较好，即

$$h_{1,\min} = \frac{1.22\lambda d_1}{D} \quad (1-2-2)$$

其中 $\varphi = h/d_1$ 。

将式(1-2-2)用于光学仪器时，则习惯上用方程表示的阿贝正弦条件

$$h_1 \eta_1 \sin \theta_1 = h_2 \eta_2 \sin \theta_2 \quad (1-2-3)$$

为求显微物镜的分辨率，首先假定光学系统两边都是空气，因此 $\eta_1 = \eta_2$ 。从图 1-8 可看出 $h_1/h_2 = d_1/d_2$ ，因而式(1-2-3)简化为

$$d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_2 \quad (1-2-4)$$

因为在显微镜应用中角 θ_2 非常小，

$$\sin \theta_2 \approx \theta_2 = \frac{D}{2d_2} \quad (1-2-5)$$

将式(1-2-5)代入式(1-2-4)得

$$\frac{D}{d_1} = 2 \sin \theta_1 \quad (1-2-6)$$

因此由式(1-2-2)得

$$h_{1,\min} = \frac{1.22\lambda}{2 \sin \theta_1} = \frac{0.61\lambda}{N.A.} \quad (1-2-7)$$

其中 $N.A. = \sin \theta_1$ 称为物镜的数值孔径。当用透镜聚焦时， $N.A.$ 表示发自物体的光线的角半径。生产厂家为了表示显微物镜的质量，常标出 $N.A.$ 值。

当考虑油浸显微镜时， $\eta_1 \neq \eta_2$ （即 $\eta_2 = 1$ ），阿贝正弦条件则变为

$$h_1 \eta_1 \sin \theta_1 = h_2 \sin \theta_2 \quad (1-2-8)$$

因为 φ_1 和 φ_2 一般不相等，在目前情况下则有 $\eta_1 \varphi_1 = \varphi_2$ ，若用 φ_2 和 λ_2 来表示，式(1-2-1)依然成立，即

$$\varphi_{2,\min} = \frac{1.22\lambda_2}{D} \quad (1-2-9)$$

或

$$\varphi_{1,\min} = \frac{1.22\lambda_2}{\eta_1 D} \quad (1-2-10)$$

于是，物点的最小间距为

$$h_{1,\min} = \frac{1.22\lambda_2 d_1}{\eta_1 D} \quad (1-2-11)$$

因为 $\eta_1 \varphi_1 = \varphi_2$ ，所以有

$$\frac{\eta_1 h_1}{d_1} = \frac{h_2}{d_2} \quad (1-2-12)$$

将式(1-2-12)代入式(1-2-8)得

$$d_1 \sin \theta_1 = d_2 \sin \theta_2 \quad (1-2-13)$$

上式和式(1-2-4)相同。如果用式(1-2-4)和式(1-2-5)代入，则式(1-2-11)可以写成

$$h_{1,\min} = \frac{0.61\lambda_2}{\eta_1 \sin \theta_1} = \frac{0.61\lambda_2}{N.A.} \quad (1-2-14)$$

其中， $N.A. = \eta_1 \sin \theta_1$ 。因此，油浸显微镜的数值孔径可大于 1。

例 1.1 一水平物体放在距人眼 250 mm 附近一点处，人眼对物体能调节的最小距离称为明视距离，而对应这个最小距离的点称为近点。近点是当人眼做最大程度调节使物体在视网膜上正确成像时物体离眼的最近点。

假定眼睛瞳孔的直径是 2 mm，眼球的直径是 25 mm，眼睛玻璃体的折射率 $\eta_2 = 1.33$ ，且物体是用 $\lambda_1 = 550 \times 10^{-6}$ mm 的光源照明的，试求眼睛的数值孔径和最小分辨极限。

参考图 1-9 可知，半角 θ_1 的正弦是

$$N.A. = \sin \theta_1 = \frac{1}{250} = 0.004$$

由瑞利分辨率判据式(1-2-7)得最小可分辨间距为

$$h_{1,\min} = \frac{0.61 \times 550 \times 10^{-6}}{0.004} = 0.084 \text{ mm}$$

这就是一个正常成人眼睛的分辨极限。

例 1.2 用上例的数据，试求眼睛视网膜上的最小分辨率和横向物点的最小角间距。

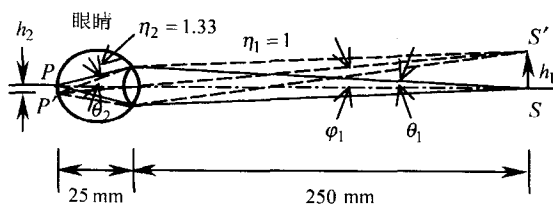


图 1-9 例 1.1 示意图

对于像空间（即在眼睛里），可写出在视网膜上的分辨极限为

$$h_{2,\min} = \frac{0.61\lambda_2}{\sin\theta_2}$$

因为 $\eta_2\lambda_2 = \lambda_1$ （即 $\eta_1 = 1$ ），所以视网膜上的最小分辨极限可计算为

$$h_{2,\min} = \frac{0.61\lambda_1}{\eta_2 \sin\theta_2} = \frac{0.61 \times 550 \times 10^{-6}}{1.3 \times 1/25} = 6.3 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

参考图 1-9 可看出，最小角间距可用式(1-2-10)来确定：

$$\varphi_{1,\min} = \frac{1.22\lambda_1}{\eta_1 D} = \frac{1.22 \times 550 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-1}} = 3.35 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

1.2.4 成像光学系统质量描述

1. 调制传递函数（MTF）

像质评价由于要引进心理上的因素，多数情况难于定量表示。目前，定量表示的一种方法是对比度。对比度 m 的定义是

$$m = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (1-2-15)$$

式中， $I_{\max}$ 是最大光强， $I_{\min}$ 是最小光强。

m 这个定义使用非常方便，即光强分布的表示式为

$$I_0(x) = 1 + A \cos 2\pi f_0 x \quad (1-2-16)$$

当 A 是正实数时， I 的最大值与最小值分别是

$$I_{\max} = 1 + A \quad \text{和} \quad I_{\min} = 1 - A$$

将上面两个等式代入式(1-2-15)，则有

$$m = A \quad (1-2-17)$$

也就是说，把背景的强度作为其单位， m 就正好成为调制振幅。

一般通过光学系统的输出像的对比度总比输入像的对比度要差，这个对比度的变化量与空间频率特性有密切的关系。把输入像与输出像的对比度之比称为调制传递函数（Modulation Transfer Function, MTF），即 MTF 的定义是