

Extended Depth of
Field Technology and Applications

景深延拓技术及应用

翟中生 吕清花 许忠保 著



科学出版社

景深延拓技术及应用

Extended Depth of Field Technology and Applications

翟中生 吕清花 许忠保 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书首先介绍了景深延拓的意义,并系统地对景深延拓技术的发展进行了综述,然后从几何光学和傅里叶光学分析了衍射受限系统景深受限的原因。从理论推导、系统设计、模拟仿真、成像实验和图像处理等方面详细论述了二元相位模板、液晶空间光调制器和无衍射光三种景深延拓技术,最后介绍了无衍射技术在几何量测量中的应用。

本书可供从事成像系统、图像处理、显示、传感器、通信、数据存储和光学设计等领域研究的工程人员阅读。亦可作为高等院校光学信息工程、测控技术及仪器等相关专业研究生、高年级本科生及教师的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

景深延拓技术及应用=Extended Depth of Field Technology and Applications/翟中生,吕清花,许忠保著. —北京:科学出版社,2014

ISBN 978-7-03-040655-2

I. ①景… II. ①翟… ②吕… ③许… III. ①景深-延拓-研究
IV. ①TB811②O175.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 101019 号

责任编辑:耿建业 刘翠娜 / 责任校对:胡小洁

责任印制:张 倩 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 6 月第一次印刷 印张:13

字数:259 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

该书作者是湖北工业大学精密测量研究团队的优秀成员。翟中生博士、吕清华博士和许忠保博士,在国家自然科学基金项目“基于无衍射光的大景深视觉检测方法研究(项目编号:51005072)”、“基于二元纯相位光瞳模板的景深延拓方法研究(项目编号:61077086)”等的资助下一直从事于景深延拓方面的研究工作,在理论和工程应用上均取得了一系列的研究成果。

作者根据自身近几年的研究成果,从几何光学和物理光学方面详细分析了普通衍射受限光学系统的景深受限的主要原因。借助傅里叶光学理论,将景深延拓导致的离焦量看成像差的一种,并作为广义光瞳的一部分,分析出景深与成像系统的光学传递函数之间的理论关系。在理论分析基础上,分别从理论分析、系统设计、软件仿真、成像实验等方面,全面阐述和分析了二元相位模板、液晶空间光调制器和无衍射光三种景深延拓技术。

该书详细论述的三种景深延拓方法,通过对成像光线的波前进行相位调制,避免了系统的MTF(调制传递函数)低频部分出现过零点,提升了通频带,既新颖又实用,对成像系统的设计、分析具有借鉴意义,有广泛的应用价值。此外,书中涉及的光学设计方法、干涉条纹相位计算方法、图像处理和复原技术都具有一定创新。

该书对于从事精密测量、视觉测量和大景深的光学成像系统的研究人员来说是一本较为系统的参考书,书中涉及的技术方法具有重要的参考价值。

我希望读者能多提宝贵意见,与该书作者开展学术交流,共同促进景深延拓方面的研究不断取得新的进展。

钟毓宁

2014年4月

前 言

理想光学系统对立体空间的物体成像时,一个一定的像平面只能对其共轭的物平面上的点物成点像,这种系统存在的不足就是一旦离焦,图像迅速模糊。大景深的光学成像系统具有以下几个优点:其一,大的焦深意味着可以拥有更大的成像空间,能获取物方更多的信息量;其二,对焦更加方便,不需要进行机械调焦;其三,可以更好地进行三维显示,如用显微镜来观察三维物体时,更为方便、直观、准确。由于大景深系统这些无可比拟的优点,在实际应用中有着深远的意义,作者结合自己近年来在景深延拓方面的研究工作,撰写了本书。

全书共分6章,系统地论述了二元相位模板、液晶空间光调制器和无衍射光三种景深延拓技术及其在工业测量中的应用。第1章对景深增大方法的发展进行综述;第2章分析衍射受限系统的景深及离焦时成像系统光学传递函数的计算方法;第3章介绍利用“ $0/\pi$ ”相位模板实现景深延拓方法;第4章论述利用液晶空间光调制器实现景深的延拓;第5章论述利用轴锥镜产生无衍射光的方法实现景深的拓展;第6章介绍无衍射在多自由运动误差和视觉测量中的应用。全书从光学成像理论、系统设计、模拟仿真、成像实验和图像处理等方面进行详细论述,力求使本书具有创新性、实用性和先进性。

本书主要由湖北工业大学翟中生副教授、吕清花博士撰写,具体分工为:第1章翟中生、吕清花;第2章吕清花、翟中生;第3章吕清花、许忠保;第4章吕清花;第5章、第6章翟中生。全书由翟中生、吕清花统稿。

本书在国家自然科学基金项目“基于无衍射光的大景深视觉检测方法研究(项目编号:51005072)”、“基于二元纯相位光瞳模板的景深延拓方法研究(项目编号:61077086)”、“基于光楔姿态与条纹分析的多自由度运动误差测量方法(项目编号:51175154)”、“波长轮换与相移扫描相结合的表面形貌干涉测量方法(项目编号:51275157)”、“形状复杂且结构重复零件异变图像的分形测量理论和方法研究(项目编号:51275158)”及湖北省自然科学基金项目“视觉检测系统景深拓展关键技术研究(项目编号:2010CDB03104)”等的科研基础上撰写的,同时也参考了翟中生、吕清花在华中科技大学撰写的博士论文。

作者在从事与本书内容相关的工作中,得到了华中科技大学赵斌教授和朱晓

教授、湖北工业大学钟毓宁教授和王选择教授的悉心指导。本书的出版得到了湖北工业大学何涛教授、杨练根教授、丁善婷副教授、聂磊副教授、湖北省现代制造质量工程重点实验室及湖北工业大学的大力支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,不妥之处在所难免,恳请广大读者给予指正。

作 者

2014 年 1 月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 景深延拓的意义	1
1.2 景深延拓方法概述	3
1.2.1 波前编码	4
1.2.2 光学切趾术	7
1.2.3 数字图像合成法	8
1.2.4 球差法	10
1.2.5 液体透镜法	11
1.2.6 光剑光学元件	12
参考文献	12
第 2 章 衍射受限系统景深分析	15
2.1 几何光学景深分析	15
2.1.1 景深分析	15
2.1.2 景深和焦深的关系	16
2.1.3 显微镜景深	16
2.2 成像系统频谱分析	16
2.3 大景深成像系统传递函数分析	18
2.3.1 无像差系统的光学传递函数	19
2.3.2 离焦成像系统的光学传递函数	20
参考文献	25
第 3 章 二元相位板景深延拓技术	26
3.1 二元光学研究现状	26
3.1.1 二元相位元件的发展和应用现状	26
3.1.2 二元相位模板的研究现状	27
3.2 “0/ π ”相位模板的波前调制原理	28
3.3 最优二元相位板的设计	30
3.3.1 最优算法	30
3.3.2 步幅为 0.1 的粗搜索	32

3.3.3 步幅为 0.01 的精搜索计算	32
3.4 模板相位误差分析	36
3.4.1 最佳半径处误差分析	38
3.4.2 连续物距变化量的最佳半径计算	41
3.5 相位模板对景深内成像的影响	43
3.6 基于二元相位板大景深成像系统设计	44
3.6.1 利用 ZEMAX 实现筒长无限显微镜的设计	45
3.6.2 前组物镜的设计	47
3.6.3 辅助物镜的设计	50
3.6.4 相位模板的设计	53
3.7 系统离焦成像特性及实验分析	56
3.7.1 MTF、PSF 和点列图分析	56
3.7.2 实验结果对比分析	63
3.7.3 相位模板的相位误差引起的成像差异	66
3.7.4 景深分析	68
3.8 与其他方法的比较	70
3.8.1 球差法	70
3.8.2 对数非球面法	73
参考文献	73
第 4 章 液晶空间光调制器景深延拓技术	78
4.1 液晶空间光调制器的光电特性	78
4.1.1 液晶的分类	78
4.1.2 液晶的光电特性	79
4.2 空间光调制器相位调制原理	81
4.2.1 强度及相位调制原理	81
4.2.2 仿真分析	83
4.3 相位调制及标定	86
4.3.1 常用相位调制方法	87
4.3.2 干涉法相位测量原理	90
4.3.3 相位模型及求解方法	90
4.3.4 相位差求解	96
4.4 相位标定实验及结果分析	98
4.5 基于空间光调制器的大景深成像系统设计	105
4.6 成像实验及分析	107
4.6.1 成像试验	107

4.6.2 景深分析	111
参考文献	112
第5章 无衍射光景深延拓技术	114
5.1 无衍射光技术概述	114
5.2 轴锥镜的光学传输特性	115
5.2.1 轴锥镜透过函数	115
5.2.2 单色光下光学特性	115
5.2.3 准单色光照射轴锥镜的特性	124
5.2.4 白光照射轴锥镜的特性	128
5.2.5 轴锥镜在 ZEMAX 中的设计	128
5.3 无衍射光大景深成像系统设计	129
5.3.1 基本原理	129
5.3.2 成像系统设计	130
5.4 大景深成像技术理论分析	137
5.4.1 点扩散函数的分析	137
5.4.2 大景深成像系统的光学传递函数	145
5.4.3 分辨率与对比度	148
5.4.4 景深分析	151
5.5 图像复原方法	154
5.5.1 无衍射光成像系统图像的特性分析	154
5.5.2 常用的图像复原方法	157
5.5.3 点扩散函数的估计	160
5.5.4 算法比较	161
5.5.5 多幅图像叠加法	164
5.5.6 图像复原质量的客观评价方法	166
5.6 成像实验及结果分析	168
5.6.1 大景深 1:1 成像系统的成像实验与结果分析	168
5.6.2 大景深显微系统的成像实验	172
5.6.3 大景深望远系统的成像实验	174
参考文献	175
第6章 无衍射光在几何量测量中的应用	178
6.1 无衍射光在测量中的应用现状	178
6.2 无衍射光的干涉分析	179
6.2.1 两束无衍射光干涉理论分析	179
6.2.2 仿真及实验结果	182

6.3	多自由度运动误差测量	183
6.3.1	测量原理	184
6.3.2	莫尔条纹与中心距的关系	186
6.3.3	莫尔条纹计数方法	187
6.4	大景深视觉检测	188
6.4.1	测量原理	189
6.4.2	成像系统设计	190
	参考文献	196

第 1 章 概 述

1.1 景深延拓的意义

普通光学成像系统,当物面一定时,只能在与物面共轭的像面上成清晰的像。理想情况下,物面上的物点在共轭像面上将形成像点。若物体的位置在光轴方向发生了前后移动,那么物点在成像平面上就不能会聚于一点,而是扩散成具有一定半径的弥散圆,这样整幅图像就变得模糊了。这就是普通透镜成像系统的最大缺陷:一旦离焦,弥散圆迅速变大,导致离焦图像模糊化,如图 1.1 所示。

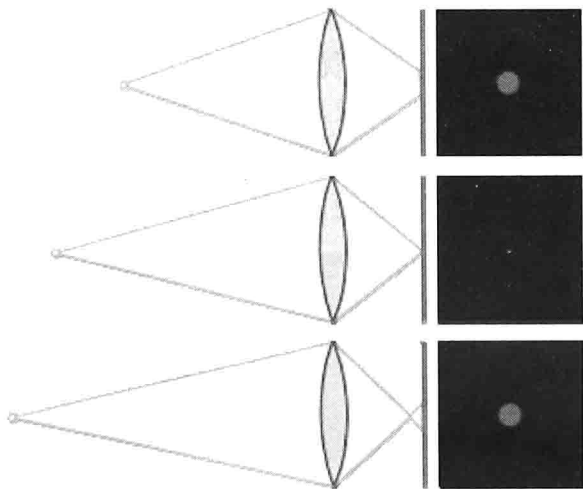


图 1.1 普通透镜系统离焦成像原理图

在现实可视成像系统中,接收器件是探测器或者人眼。对于接收器件来说,由于分辨率和鉴别能力的限制,存在容许弥散圆,可以接受小范围内的成像模糊。根据光学系统的特性,在焦点前后各有一个容许弥散圆。在光学成像系统中,当像面固定,物体在物方空间的前后移动一定距离时,仍然能保证在像平面上获得清晰像,移动的最大距离范围称为景深。所以增大景深可以在一定程度上解决系统成像模糊的问题。

显微镜可以进行微观观察,广泛应用于医学、微生物学等研究领域。在使用普通显微镜时,由于景深很小,每次只能观察到处于同一平面内的部分是清晰的,而其他部分模糊不清,且放大倍数越大,景深范围越小。当观察有一定深度的物体

时,操作人员需不断上下调焦,才能清楚地观察到不同的层面。

随着计算机视觉技术和光电技术的飞速发展,基于光学成像系统的机器视觉技术得以迅速发展。在工业中,机器视觉技术可应用于工件外表面或内部的重要尺寸测量、机器磨损测量等。例如,在汽车制造质量检测中,机器视觉技术被应用于汽车零/部件外形尺寸检测。同时,机器视觉技术在识别、分类、质量和安全控制等方面也有着广泛的应用,如电子工业中印刷电路板、集成电路线路的正误判断,瓷砖等建筑装饰材料的表面质量及颜色的检测,织物及皮革缺陷的检测等。

机器视觉检测系统的核心是光学成像和图像处理部分,其中,目标物体的定位和安装非常重要,稍微的倾斜和位置偏差都可能导致目标物体偏离景深范围,从而得到一张模糊的图像,不利于后续的图像处理。同时,随着科学技术的发展,视觉检测对象越来越多样化、复杂化,如较厚的生物样品或医学样品等。对于这类复杂对象,普通机器视觉系统,由于系统景深的限制,得到的图像只有部分细节良好聚焦,而其他部分则是模糊的。光学成像系统分辨率越高,景深就越短,因此,在普通透镜成像系统中,高分辨率与大景深难以兼得。

研究景深延拓成像系统,有许多优势:

(1) 通过景深延拓光学系统成像,物方在纵深方向的信息可以获取更多。如图 1.2 所示,图(a)为普通光学系统所成的像,图(b)为大景深成像系统所获取的像,很明显图(b)中物体的细节信息更多。

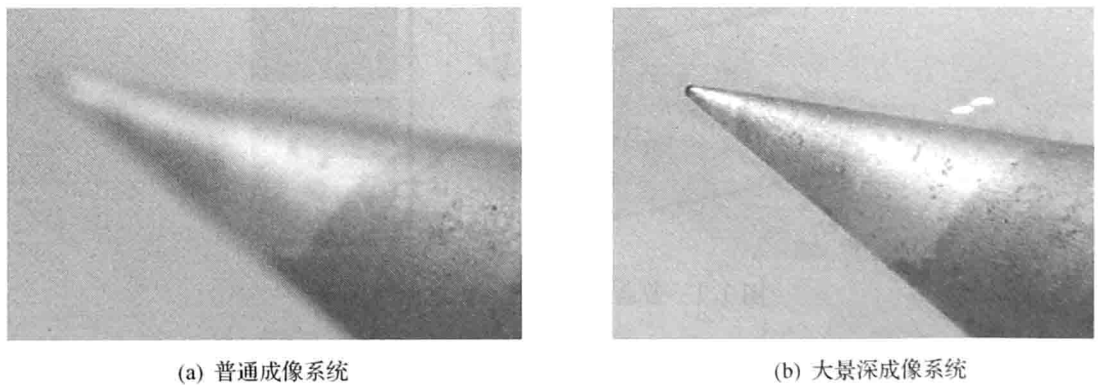


图 1.2 普通成像系统与大量深成像系统信息比较

(2) 可以更好地实现三维显示。如果在生物成像领域使用大景深光学系统,能够对不易切片的活体组织实现三维结构观察,并使高倍显微物镜容许更大的盖玻片厚度偏差,增加了使用的可靠性。在工业自动化生产中,需要对生产零件的质量在线快速检测。如图 1.3(a)所示,需检测串口端子外壳是否变形,内部引脚是否弯曲等,这些检测需要大景深成像系统才能满足。图 1.3(b)中,观察金属表面的腐蚀程度,大景深能够更加完整地观察大视野内的情况。

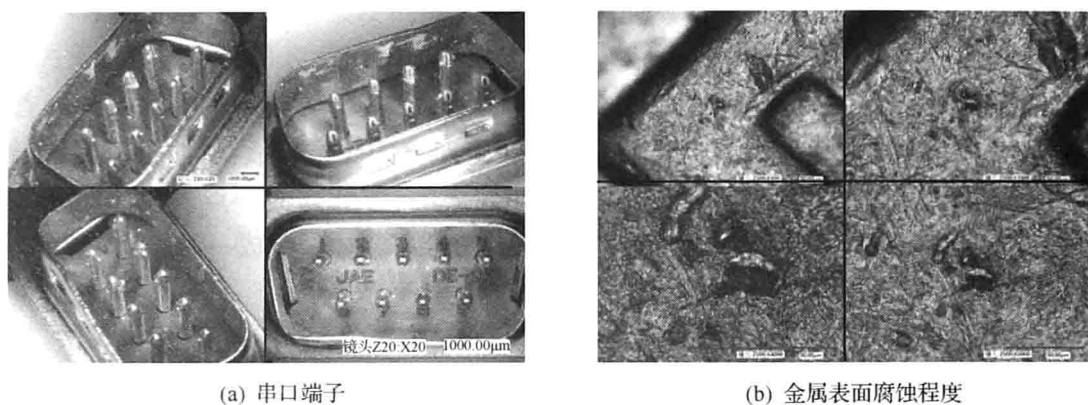


图 1.3 三维观察

(3) 不需机械调焦或缩短对焦时间。景深增大不但可以省略频繁的机械调焦过程,还可以校正由安装误差和温度变化引起的像面离焦模糊。若在内窥镜图像显示、体内成像等领域应用景深延拓光学系统,则不但可避免频繁的对焦过程,减轻病人的痛苦,并且能够显示被测对象的纵深信息,使医生能根据显示图像做出更好的病情判断和分析。

从上面的对比分析实例中可以发现,在实际科研和工业生产中,景深延拓系统的信息获取更全面、设备使用更方便、更人性化,所以研究如何延拓系统的景深具有重要的实际意义和科学价值。

1.2 景深延拓方法概述

一般认为实际光学系统校正像差后,离焦引起的波像差不超过 $\lambda/4$ 时图像仍是清晰的,对应的景深范围为

$$d = 2\Delta l = \frac{4\lambda}{n} \left(\frac{f}{D} \right)^2 \quad (1.1)$$

式中, f 为光学系统的焦距; λ 为入射光的波长; n 为折射率; D 为入瞳直径; (f/D) 为相对孔径的倒数。从式(1.1)可以看出,在其他参数不变的情况下,系统的相对孔径越小,景深越大。但在焦距一定的情况下,减小入瞳直径,伴随的缺点是光通量也减小了,同时分辨率也跟着降低,并且通过这种几何方法来增大景深的效果很有限。

由于景深延拓拥有很多优点,近几十年来得到了国外学者的高度关注,许多增大光学系统景深的方法被提出。这些方法主要有波前编码、光学切趾术、数字图像合成法和无衍射光法等。

1.2.1 波前编码

波前编码成像技术是在 1995 年由美国 Colorado 大学的 Dowski 和 Cathy 首先提出^[1],他们在成像系统的光阑处设置一个奇对称的相位模板,从而可以实现增大系统景深的目的。由于这个相位模板是非球面的,导致物面一点发出的光束不再会聚于共轭焦面上的一点,光线的传播路径发生了变化,变成一束均匀的细光束,从而实现离焦不敏感性,达到延拓景深的目的。

波前编码成像技术是运用傅里叶光学理论,结合模糊函数和静态相位算法,使光学传递函数在整个频率范围内没有零点。但是由于物点的光束不能会聚,从而导致在原景深范围内的成像质量变差。为了得到较好的成像质量,后续必须要通过数字图像处理算法对图像进行滤波、复原和加强等处理^[2]。

图 1.4 所示为利用波前编码法增大成像系统景深的原理图,在前透镜和后透镜中加入相位模板,其作用是实现离焦不敏感。带有物体信息的光线经前透镜、相位模板和后透镜会聚成像于 CCD 的光敏面上,再传输到计算机中,然后采用图像处理的算法对采集到的数字图像进行增强处理,最终得到一副清晰的成像图片。对于该方法,寻找合适的相位模板是关键,通过相位模板对非相干光波前进行编码,从而实现景深延拓。

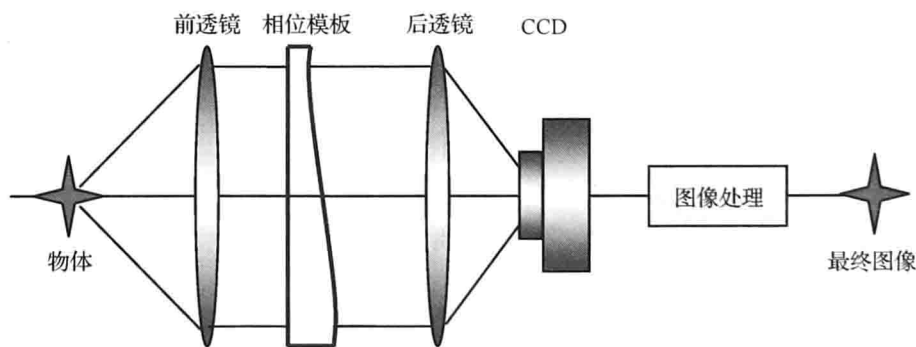


图 1.4 波前编码技术成像原理图

用于波前编码的相位模板种类很多,常用的主要有三次(cubic)和类花瓣(petal-like)两种类型,图 1.5 给出了这两种三次相位掩模板对应的点扩散函数图形(图片参考: <http://www.ub.edu/waveng/tiki-index.php?page=Wavefront+Coding#Publications>)。

图 1.5(a)是应用更多的三次相位板,其广义光瞳函数 $P(x)$ 可以表示为

$$P(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} \exp(i\alpha x^3), & |x| \leq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad |\alpha| \gg 20 \quad (1.2)$$

式中, α 是表示相位偏移程度的参数。结合傅里叶光学的知识, 根据公式(1.2), 系统的光学传递函数可表示为

$$H(u, \varphi) \approx \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12\alpha u} \right|^{1/2} \exp\left(i \frac{\alpha u^3}{4}\right) \exp\left(i \frac{\varphi^2 u}{3\alpha}\right), & u \neq 0 \\ 1, & u = 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

式中, $\varphi = kW_{20}$ 为离焦参数。

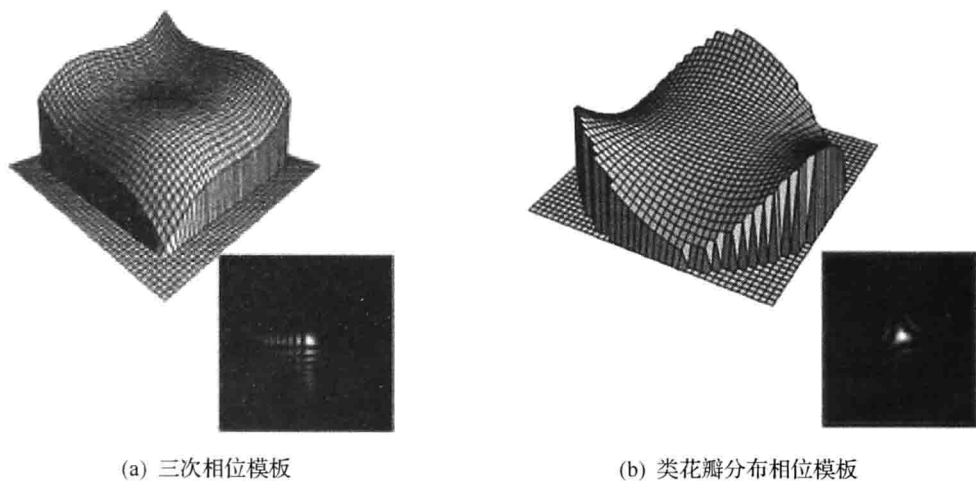


图 1.5 三次相位掩模板

从式(1.3)可知, 相位因子由两项组成, 第一项是与离焦参数 φ 无关的相位因子 $\exp(i\alpha u^3)$; 第二项与空间频率 u 成正比, 同时和离焦参数 φ 成平方关系。关键是第二项相位与相位偏移参数 α 成反比, 即当 α 越大时, 第二项的值越小, 从而可以弱化第二项的影响。在 α 值较大的情况下, 公式(1.3)可以简化为

$$H(u, \varphi) \approx \begin{cases} \left| \frac{\pi}{12\alpha u} \right|^{1/2} \exp\left(i \frac{\alpha u^3}{4}\right), & |\alpha| \gg 20, \quad u \neq 0 \\ 1, & u = 0 \end{cases} \quad (1.4)$$

图 1.6 中的 MTF 曲线是系统加载了三次相位掩模板后成像的模拟结果, 是设定参数 α 分别为 3 和 6, 离焦参数 W_{20} 分别为 $0, 2\lambda$ 和 6λ 时, 得到的仿真结果^[3]。根据图 1.6 的 MTF 曲线对比结果, 可以看出在整个通频带内没有零点, 并且四种情况下得到的 MTF 曲线非常接近, 说明在不同离焦的情况下, 系统的成像效果差不多, 具有离焦不敏感性。但是, 从图 1.6 中同样可以发现, 反映成像轮廓的低频部分, MTF 值并不高, 与衍射极限有很大的差距, 从而导致系统成像模糊, 必须要借助后续的数字图像处理算法才能得到清晰的图像。

文献[4]和文献[5]中提到, 波前编码技术在景深方面的延拓效果显著, 同时, 通过合理的模板设计, 该方法可以改善球差、色差等, 对于实际应用过程中产生的温度误差和安装误差也能起到有效的抑制作用。经过多年的研究, 波前编码技术

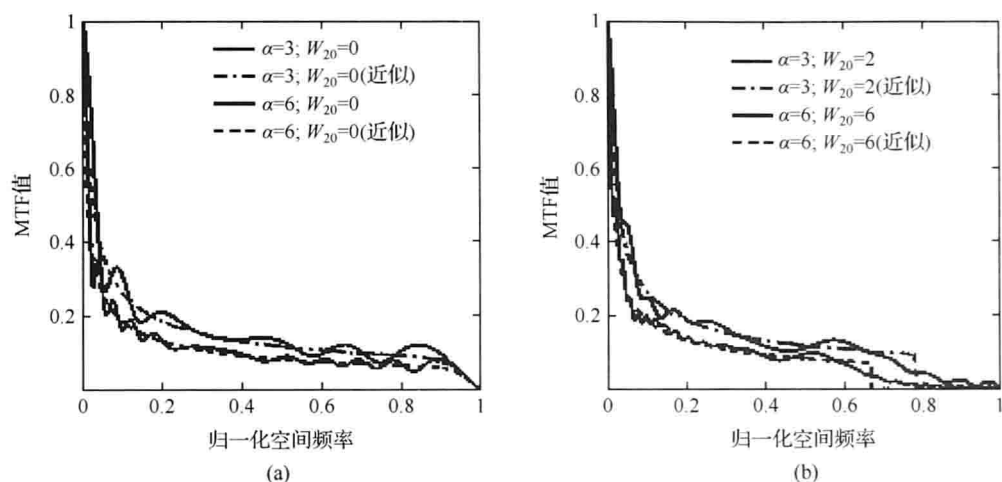


图 1.6 波前编码成像系统的 MTF 曲线

在许多方面得到了广泛的应用^[6-14]。

基于该方法,国际著名的光学仪器公司(如 Ziess、Olympus 等)获得了富有成效的成果^[15]。近年来,国内在该领域也取得了一定的进展,如浙江大学^[16,17]、南开大学^[18]、中国科学院上海光学精密机械研究所^[19]、上海理工大学^[20]等都进行了相关的研究和探索。但由于波前编码元件大部分是非旋转对称的非球面,目前国内外对于这类元件的高精度加工尚无成熟可靠的技术,因此波前编码元件的加工、检测都存在一定的困难。目前的研究主要限于计算机仿真,只有少数研究机构做出了实体透射式相位掩模板。

1999 年,美国 Colorado 大学的 Tucker 等运用波前编码的技术^[4],采用三次相位掩模板对普通显微镜系统进行了景深延拓,得到的效果如图 1.7 所示。

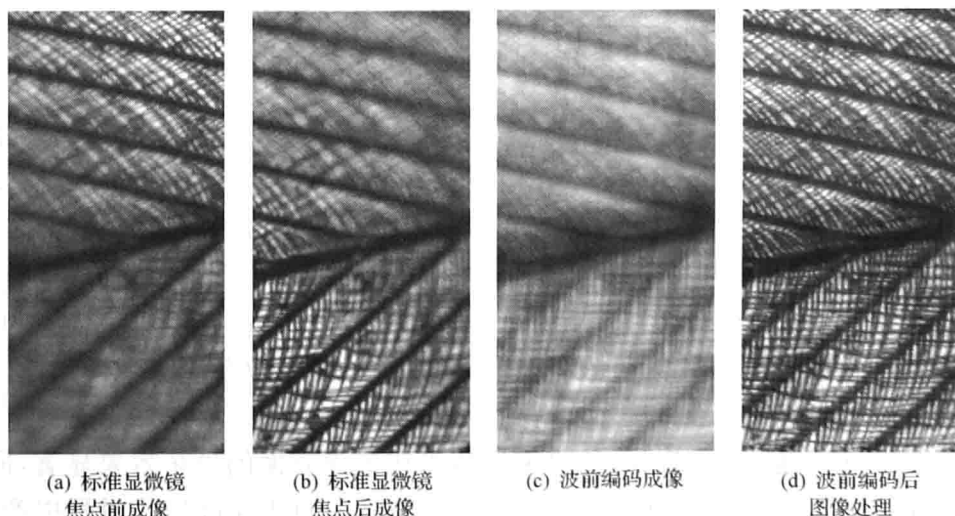


图 1.7 标准显微镜和加了三次方相位模板的大景深显微镜对羽毛的成像对比图

从图 1.7 可以看出,仅经过三次方相位模板调制得到的图像清晰图很差,必须借助后续的图像处理才能达到需要的分辨率。

1.2.2 光学切趾术

光学切趾术是另一种增大景深的方法。根据衍射理论,圆孔透明光瞳函数将产生艾里衍射斑,方孔透明光瞳函数对应于 sinc 平方衍射斑。当插入滤波器时将改变光瞳函数的空间分布,从而改变离焦处的光瞳函数,使中间部分的光通量增大,边缘的光通量减小。减小点扩散函数的主瓣尺寸,提高瑞利分辨率,使得系统的成像具有离焦不敏感性。

对于孔径切趾函数的选择,研究者提出了很多不同的方法来改变离焦处系统的光瞳函数。常用的方法主要有:阴影光圈^[21]、环形孔径^[22]、渐变掩模板^[23]等。本书选择其中的阴影光圈法来进行说明。

为了增加光学系统中间部分的光通量,将阴影光圈置于成像系统的光瞳处,这样可以减少边缘光束参与成像。对于圆形孔径,离焦处的光瞳函数为

$$f(x, y) = \begin{cases} T(x, y) \exp[ikW_{20}(x^2 + y^2)], & x^2 + y^2 \leq 1 \\ 0, & x^2 + y^2 > 1 \end{cases} \quad (1.5)$$

式中, $k = 2\pi/\lambda$ 为波数; W_{20} 为离焦量; $T(x, y)$ 为光瞳处的强度分布函数。Mino 等设计了 T_A 和 T_B 两种透过率变化相反的光瞳透过函数, T_A 光瞳函数的透过率在中间处透过率最大,然后依次递减;而 T_B 的透过率在中间部分透过率最低,边缘部分最高。这两种光瞳函数的变化趋势如图 1.8 所示^[21]。

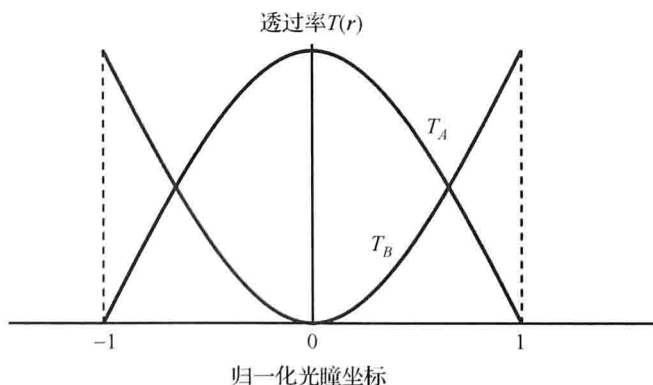


图 1.8 透过率函数

T_A 和 T_B 透过函数的定义为

$$T_A(x, y) = \begin{cases} 1 - (x^2 + y^2), & x^2 + y^2 \leq 1 \\ 0, & x^2 + y^2 > 1 \end{cases} \quad (1.6)$$

和