

# 数字式透镜调制传递函数测试系统设计

周哲海<sup>1,2</sup>, 吕乃光<sup>1</sup>

(1. 北京机械工业学院电子信息工程系, 北京 100085; 2. 清华大学, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100085)

**摘要:**设计了一种数字式透镜调制传递函数(MTF)测试系统,分析了MTF测试算法,开发了CCD数据采集与处理系统,提供了用户操作界面;利用设计的测试系统,对已标定透镜的MTF值进行了测量,测试误差低于6%。

**关键词:**调制传递函数(MTF);直方图;CCD数据采集与处理系统

**中图分类号:**TH741.4;TB851 **文献标识码:**B

## Design of Digital Lens MTF Measurement System

ZHOU Zhe-hai<sup>1,2</sup>, LÜ Nai-guang<sup>1</sup>

(1. Department of Electronics Information Engineering, Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085;  
2. State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** A digital Lens MTF measurement system is designed, the MTF measurement algorithm is analyzed, and a CCD data sampling and processing system is developed, while a user operation interface is provided as well. The MTF of one calibrated lens is tested by using this designed measurement system, and the measurement error is less than 6%.

**Key words:** modulation transfer function (MTF); histogram; CCD data sampling and processing system

### 1 引言

调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是表征透镜成像性能的一个非常重要的指标,它反映了在某些空间频率下透镜从物面到像面传递图像对比度的能力。在过去的几十年,已经提出了很多MTF的测试方法,包括扩展函数法、激光散斑法、正弦光栅法,等等<sup>[1-4]</sup>,但是这些方法并不总是很方便,都存在一定的不足。目前,商用的MTF测试仪很昂贵,测试成本比较高,很难用于去测试一些普通透镜的MTF值;但是沿用一些传统方法,测试精度又比较低。因此有必要开发一种成本较低但是测量精度相对较高的测试系统,来测试一些普通透镜的MTF,用于教学实验和对测试精度要求不是非常高的场合。论文正是针对这样的需求,设计了一种数字式透镜MTF测试系统,引入CCD数字采集与处理系统,对透镜的MTF进行了在线测试。为了便于应用,还开发了用户操作界面。

### 2 测试系统及工作原理

#### 2.1 测试系统

图1给出了数字式透镜MTF测试系统的结构示意图,其中,S是光源,F是滤光片, $L_1$ 是准直透镜,T是测试靶, $L_2$ 是成像透镜,P是成像面, $MF_1$ 和 $MF_2$ 是移动平台。从光源发出的光经过滤光片后变为单色光,该光束经过准直透镜变为平行光束,该平行光束垂直照射到测试靶上,经过成像透镜 $L_2$ 后,测试靶的像就成在像面P上。在像面上放置一面阵CCD,并通过后续的数据采集卡将成像采集进计算机进行分析处理,通过对采集图像的分析处理,最终可求得成像透镜 $L_2$ 的MTF值。整个光路采用物方无限远的方式,即用平行光照明测试靶的方式。

在本设计中,光源采用普通钨灯,为了分析不同

基金项目:北京机械工业学院校科研基金(No.0725016)资助。

作者简介:周哲海(1978-),男,讲师,主要研究领域包括信息光学,光谱学及衍射光学。E-mail:jelly20050601@yahoo.com.cn

收稿日期:2007-08-28

颜色光照明情况下透镜的 MTF 值,系统设计了滤光片组合,可以通过旋钮调整在光路上放置不同颜色的滤光片,以实现多种颜色光照明。本系统可以调整得到的单色光有三种,分别是红光( Red:600nm)、绿光( Green:545nm)和蓝光( Blue:345nm)。

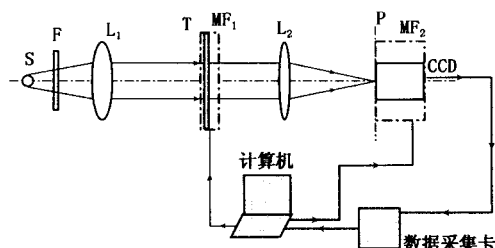


图1 数字式透镜 MTF 测试系统结构示意图

测试靶被设计成如图2所示的结构,整个靶片上包含四种不同空间频率的矩形光栅,分别是 8lp/mm, 20lp/mm, 40lp/mm 和 80lp/mm。每种矩形光栅区域包括四部分,分别是全透区域(图中白色方框)、全不透区域(图中黑色方框)、横向光栅条纹区域和纵向光栅条纹区域。之所以设计全透和全不透区域是为了界定入射光束的灰度范围,更好地确定透镜的 MTF 值;设计横向条纹和纵向条纹则是为了测量透镜横向 MTF 值和纵向 MTF 值。同时,为了在测量过程中可以更换不同空间频率的矩形光栅,测试靶被放置在一个移动平台  $MF_1$  上,并用步进电机驱动,可以通过计算机控制平台的移动量,实现自动更换。

另外本设计还引入了自动对焦功能,将 CCD 放置在移动平台  $MF_2$  上,用一台步进电机驱动;计算机分析采集到的图像,可判别像是否成在理想像面上,并根据分析结果驱动步进电机,使移动平台移动,最终使 CCD 接收面处于理想像面处。

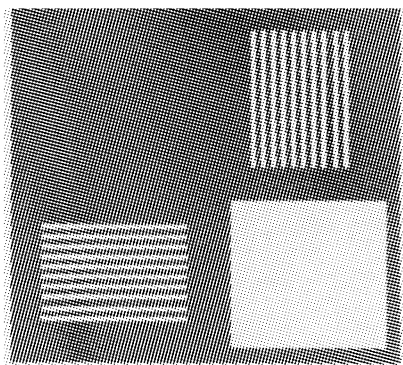


图2 测试靶结构

## 2.2 测试算法介绍

因为衍射效应,没有一个透镜(即使理论上是完美无缺的)能在某一空间频率下将图像信息从物面完全地传递到像面。MTF 的测试方法很多,主要有线扩展函数法、对比法和自相关法,本设计采用对

比法。计算机将采集到的图像进行分析处理,得到图像对应的归一化直方图,通过对该归一化直方图的分析可获得图像的对比度,从而获得透镜的 MTF 值。

如图3所示,理论上,归一化直方图的两个边峰的间距就是测试透镜在该空间频率下的 MTF 值。但是对于实际的测试系统,不可能得到如此完美的结果。归一化直方图在两个边峰外各有一个“尾巴”,此时两个边峰的间距就不再是测试透镜的 MTF 值了。因此需要确定一个合理的域值系数(如图3中的“Threshold L/Max L”和“Threshold H/Max H”)来确定一个与理论值较为接近的结果。

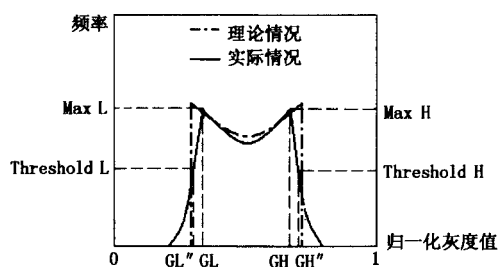


图3 实际测试对应的归一化直方图

当确定了一个优化的域值系数后,对应的归一化直方图灰度值差( $GH' - GL'$ )就是最终确定的一个合理的透镜 MTF 值。通常,测试得到的直方图的两个边峰并不相等,而是有一些偏差,所以归一化的灰度级直方图并不完全对称。选定几个典型的空域频率,测试透镜在不同域值比例系数下的 MTF 值,并将结果与标定结果进行对比,可确定出测试系统优化的域值系数。然后可利用得到的优化域值系数进一步测试其他透镜在各种空间频率下的 MTF 值。

## 2.3 用户操作界面开发

为了便于操作,开发了用户操作界面,如图4所示。整个界面由三部分组成,分别是窗口工具栏部分、图像显示部分、命令操作按钮及结果显示部分。主要完成的操作包括:

(1)点击“读入图像”按钮,即可在左边的图像显示区域显示待处理的四副图像;

(2)点击“横平均值”和“列平均值”按钮,在1和3窗口显示横纵图像,2和4窗口分别显示其对应的归一化平均值图;

(3)点击“Black”和“White”按钮,分别显示全不透和全透两副图像的灰度平均值;

(4)点击“横向条纹”和“纵向条纹”按钮,在左边图像显示区域显示横纵图像以及它们的灰度直方图,同时在右下脚的显示框内显示横纵图像的 MTF 值。

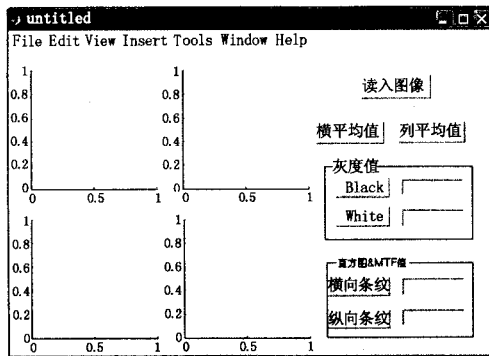


图4 测试系统用户操作界面

另外,通过窗口工具栏部分的下拉菜单也可以完成同样的操作,在“帮助”菜单中还提供了系统操作的指导,介绍了系统的基本结构和工作原理以及开发者的相关信息。

利用开发的用户操作界面,方便了测试,非专业人士也能通过这个操作界面很容易的对待测的透镜进行测试,而不用深入了解整个测试的过程和测试的原理。

### 3 测试及分析

为了验证设计系统的有效性和可行性,我们对一已标定透镜进行了测试。该透镜在中国计量科学研究院进行了标定,标定透镜是双胶合透镜,焦距是90mm,孔径为 $\phi 30\text{mm}$ 。标定的结果如表1所示。

表1 标定结果(中国计量科学研究院提供)

孔径/mm	视场	方位	光谱	空间频率/mm <sup>-1</sup>										
				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
30	0°	R	白光	0.88	0.75	0.62	0.51	0.41	0.34	0.29	0.25	0.23	0.21	
30	0°	T	白光	0.88	0.76	0.64	0.51	0.43	0.36	0.30	0.27	0.24	0.22	
30	0°	R	546nm	0.94	0.88	0.79	0.73	0.67	0.60	0.55	0.51	0.47	0.43	
30	0°	T	546nm	0.94	0.85	0.79	0.73	0.67	0.60	0.54	0.49	0.45	0.41	

说明:①测量条件是物方无限远;滤光片中心波长是546nm;焦距为50mm<sup>-1</sup>时R方向调焦,取得MTF的最大响应。上面中的R代表纵向值,T代表横向值。

②MTF测量不确定度:0.03(k=2)

利用设计的测试系统,对标定透镜进行了测试,测试结果如表2所示。

表2 测试结果

孔径/mm	视场	方位	光谱	空间频率/mm <sup>-1</sup>										
				10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
30	0°	R	白光	0.88	0.76		0.49					0.26		
30	0°	T	白光	0.90	0.78		0.54					0.26		
30	0°	R	546nm	0.92	0.88	未测	0.72			未测		0.48	未测	
30	0°	T	546nm	0.91	0.83		0.70					0.46		

因为设计的测试靶只有4种空间频率,所以测试只提供了四种空间频率对应的值。而且只选用了两种光源,即白光和绿光。

测试结果与标定结果的比较如图5所示。

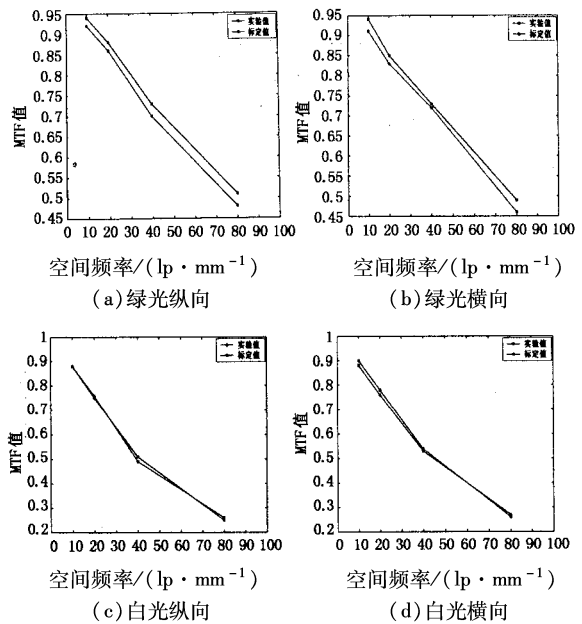


图5 测试结果与标定结果的比较

通过以上的分析比较发现,测试结果与标定结果吻合的非常好,误差在6%以内。这样的测试系统完全满足实验教学以及对测试精度要求不高的场合。而且这样的测试精度也使设计系统基本达到了实际生产过程中对透镜进行初步检测筛选的要求,因此该测试系统有望在实际的生产中得到广泛的应用。

### 4 结束语

本文设计了一种数字式透镜MTF测试系统,可以对透镜在4种不同空间频率、4种不同光源照明情况下的MTF值进行测试。系统采用CCD数据采集与处理系统实现了测试的实时处理,并利用开发的用户操作界面,简化了测试过程。同时通过对测试靶和CCD的反馈控制,实现了测试靶空间频率自动更换以及CCD自动对焦的功能,提高了系统的自动化程度和测试精度。利用设计的测试系统对已标定的透镜进行了重复测试,结果表明,测试结果与标定结果非常吻合,误差在6%以内,完全达到了设计系统的最初目标。同时,该测试系统还有望在实际生产过程中得到应用。

### 参考文献:

- [1] Wittenstein W, Fontanella J C, Newbery A R, et al. The definition of the OTF and measurement of aliasing for sampled imaging systems [J]. Opt Acta, 1982, 29 (1): 41 - 45.
- [2] Astar W. New power-efficient optical filter for detector array modulation transfer function measurement by laser speckle [J]. Opt. Eng., 1996, 35(9): 2761 - 2764.
- [3] Campana S B. Techniques for evaluating charge coupled imagers [J]. Opt. Eng., 1977, 16(3): 267 - 274.
- [4] 杨红. 大口径可见光到红外波段光学传递函数测试仪的标定 [J]. 光学技术, 2001, 27(1): 87 - 94.