

doi: 10.3788/gzxb20174608.0812006

# 分波段照明法实现单透镜大景深成像

丁峥伟, 陈鑫鑫, 范国星, 李萍, 谭叶青, 高淑梅

(江南大学 理学院 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏 无锡 214122)

**摘 要:** 基于透镜色散原理, 提出了运用分波段照明法扩大单透镜成像景深的方法. 理论推导出物距和照明光波长之间存在正相关关系, 据此选择相应波段的照明光源, 通过照明光学设计, 使不同物距的物体均能清晰成像在同一像面上. ZEMAX 软件模拟结果与理论分析吻合. 采用自行设计的图像采集系统, 只用一个 35 mm 焦距普通双凸透镜进行实验测试. 人眼主观和专业软件测试结果均表明: 采用分波段照明方式比用白光照明景深扩大 81.8%, 分辨率最大提升 200.3%; 比只用单色光照明景深扩大了 93.6%, 分辨率最大提升 189.7%.

**关键词:** 机器视觉; 单透镜成像; 波段照明; 色散; 景深; 在线检测

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0812006-8

## Large Depth of Field Imaging Technology of Single-lens Based on Discrete Spectral Illumination

DING Zheng-wei, CHENG Xin-xin, FAN Guo-xing, LI Ping, TAN Ye-qing, GAO Shu-mei  
(*Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China*)

**Abstract:** To enlarge the depth of field of single-lens system, discrete spectral illumination approach based on imaging dispersion was proposed. Firstly, the relation between object distance and illuminating wavelength were theoretically derived. Next, numerical simulation using ZEMAX indicates high-resolution images at various focal planes was obtained via an optimized illumination system with corresponding spectral light sources, and the simulation results were consistent with the theoretical analysis. Finally, an image acquisition system using biconvex lens was designed for practical measurement, and a biconvex len with focus of 35 mm was used to experiment. The results show that compared to monochromatic illumination and white light, the depth of field of proposed method is increased respectively by 93.6% and 81.8%, and the resolution ratio is improved by 189.7% and 200.3%.

**Key words:** Machine vision; Single-lens imaging; Spectral illumination; Dispersion; Depth of field; Online inspection

**OCIS Codes:** 120.4610; 120.4570; 150.0155; 150.2950; 220.2740; 260.2030

## 0 引言

机器视觉技术的出现为实现生产自动化提供了强有力的支撑, 成为了工农业检测及测量中的重要手段<sup>[1-2]</sup>. 在线检测系统中, 摄像头通常在距离目标 1.5 m 范围内, 因此成像景深受到限制, 对较大尺寸物体在纵深方向的质量检测, 会因为离焦产生的误差而影响检测准确度<sup>[3]</sup>; 在进行产品表面瑕疵、机械尺寸等信息

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 11647144)、江苏省自然科学基金(No. BK20130162)和江苏省普通高校研究生科研创新计划(No. SJZZ16\_0215)资助

**第一作者:** 丁峥伟(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为机器视觉、单透镜成像. Email: 294733951@qq.com

**导师(通讯作者):** 高淑梅(1961-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为光学设计与机器视觉. Email: gaosm@jiangnan.edu.cn

**收稿日期:** 2017-03-10; **录用日期:** 2017-05-08

<http://www.photon.ac.cn>

检测时,一般对物件的色彩并不关心,为了提升检测准确度,在线图像检测中优先采用黑白相机,但是仍不能避免白光 LED 照明引起的色差降低测量准确度<sup>[4]</sup>。

目前提升成像系统景深主要包括以下几种方法:1)采用波前编码技术,通过增加相位板扩大成像景深<sup>[5-7]</sup>,其中 Dowski 等提出了一种三次相位板,由于该种相位板能够保留更多高频细节信息,所以相比二次相位板具有更好的效果<sup>[8]</sup>;2)采用数字图像处理技术拓展景深<sup>[9]</sup>,其中有学者通过将 RGB 三色中聚焦颜色分量的锐度信息拓展到其它颜色分量,提升清晰度从而增加景深<sup>[10]</sup>;3)通过成像光学元件的机械运动产生大景深<sup>[11]</sup>。有学者利用透镜的焦点随入射光波长的不同产生偏移这一特性,设计了能在一定景深范围内工作的扫码机系统,其采用红外光和其他波长光搭配照明条形码,图像传感器顺序采集图像,但该系统并不能将具有一定景深的物体同时清晰成像<sup>[12]</sup>。此外在提高成像分辨率上,有学者利用多光谱成像技术,使用一个单透镜及多个检测器,实现两个光谱的同一成像<sup>[13]</sup>。

本文针对机器视觉在线检测中镜头近距离成像景深不足、成本高等问题,提出了一种分波段照明的方法,实现单透镜不同物距的目标物同时成像在同一像方焦平面上,在清晰成像的同时扩大景深,以解决在对色彩没有要求,但对成像景深有要求的大尺寸物体的表面瑕疵检测中近距离成像景深不足、机器视觉镜头价格高的问题,扩大应用范围并且降低检测系统成本。

## 1 基于色散理论扩大景深分析

### 1.1 单透镜成像景深局限

对于单透镜成像,景深范围有限,其形成原理见图 1。

图 1 中  $D$  为入瞳光阑直径, $l$  为基准物平面与入瞳光阑距离, $l_1$ 、 $l_2$  分别为物面  $A_1$ 、 $A_2$  与光阑距离, $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为  $B_1$  和  $B_2$  点在像平面上产生的弥散圆直径。前景深  $\Delta_1$  与后景深  $\Delta_2$  之和为成像系统的景深  $\Delta$ 。设像平面上弥散圆最大直径为  $\sigma'$ ,则焦距为  $f'$  的透镜景深为<sup>[14]</sup>

$$\Delta = l_2 - l_1 = \frac{2Dl^2\sigma' \left( \frac{1}{l} + \frac{1}{f'} \right)}{D^2 - l^2\sigma'^2 \left( \frac{1}{l} + \frac{1}{f'} \right)^2} \quad (1)$$

式(1)表明,景深  $\Delta$  与  $D$ 、 $l$  和  $f'$  都有关。减小  $D$  可以增大  $\Delta$ ,但是减小  $D$  会减小 CMOS 接收的光通量,需要通过增加曝光时间来补偿,这样会降低检测速度;增大  $l$  也可以增大  $\Delta$ ,但是在 CCD 分辨率保持不变的情况下, $l$  越大,物体的像越小,分辨率越低;改变  $f'$  也会影响  $\Delta$ , $f'$  越大  $\Delta$  越小,然而景深随波长的变化很小,对于本文所使用的球面单透镜,通过改变波长,其景深仅有 10 mm 以内的变化。

但是,对于球面单透镜,根据透镜焦距公式有<sup>[14]</sup>

$$\frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (2)$$

式中  $r_1$ 、 $r_2$  分别为透镜前后曲面曲率半径, $d$  为透镜厚度。可见,当  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $d$  确定后,透镜的焦距与材料的折射率  $n$  有关,而  $n$  又与照明光波长  $\lambda$  有关<sup>[15]</sup>,即

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \quad (3)$$

式(3)中  $a$ 、 $b$ 、 $c$  都是和透镜材料有关的参量。显然,当透镜给定后,由式(2)和(3)联立即可得  $f'$  仅与  $\lambda$  的关系,即色散原理为

$$\frac{1}{f'} = \left( a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} - 1 \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{\left( a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} - 1 \right)^2 d}{\left( a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \right) r_1 r_2} \quad (4)$$

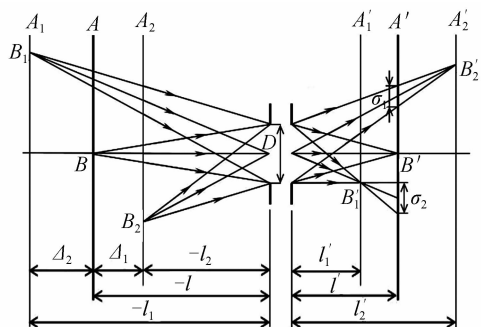


图 1 单透镜成像景深

Fig. 1 Depth of Field of single-lens imaging

### 1.2 基于色散原理扩大景深

基于色散原理式(4)和物像公式,如图2所示,用波长为 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 的光分别照射物面 $A_1$ 和 $A_2$ ,若以 $A_2$ 为基准物面,则 $L_2$ 为其对应的物距, $L_1$ 为后景物距, $L'$ 为像距.为使 $R_1$ 、 $P_1$ 点都成像在像面 $A'$ 上,则有

$$\frac{1}{L_2} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{f_1} \quad (5)$$

由式(2)~(5),可得

$$\frac{1}{L_1} = \frac{1}{L_2} + \left( \frac{b}{\lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_2^4} - \frac{b}{\lambda_1^2} - \frac{c}{\lambda_1^4} \right) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{\left( a + \frac{b}{\lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_2^4} - 1 \right)^2 d}{\left( a + \frac{b}{\lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_2^4} \right) r_1 r_2} - \frac{\left( a + \frac{b}{\lambda_1^2} + \frac{c}{\lambda_1^4} - 1 \right)^2 d}{\left( a + \frac{b}{\lambda_1^2} + \frac{c}{\lambda_1^4} \right) r_1 r_2} \quad (6)$$

可见,对给定的透镜,在 $L_2$ 、 $L_1$ 和 $\lambda_2$ 确定时,由式(6)即可得到 $\lambda_1$ 的取值,使相距 $\Delta L$ 的两个物体可以同时清晰成像在记录平面,间接地扩大了景深,其景深应为 $A_2$ 前景深、 $A_1$ 后景深以及 $\Delta L$ 三者之和.

## 2 应用分析及实验

### 2.1 应用理论分析

设 $\lambda_2 = 530 \text{ nm}$ ,  $L_2 = -700 \text{ mm}$ ,  $f_2' = 34.01 \text{ mm}$ ,  $D = 5 \text{ mm}$ . 透镜参量 $r_1 = r_2 = 34.86 \text{ mm}$ ,  $d = 6.8 \text{ mm}$ , 材质为 H-K9L. 将部分波长对应的折射率根据式(3)拟合,得到  $a = 1.504$ ,  $b = 462$ ,  $c = -4.899 \times 10^7$ . 代入各参量,根据式(6)数据拟合得到 $L_1$ 和 $\lambda_1$ 的关系如图3.

从图3中可以看出 $L_1$ 和 $\lambda_1$ 很接近线性关系,通过 Matlab 拟合得到近似关系式为

$$\lambda_1 = -0.64L_1 + 81.98 \quad (7)$$

利用式(7),根据 $L_1$ 选择对应波长 $\lambda_1$ 的光照明即可清晰成像.

### 2.2 软件模拟

设物距为 $500 \text{ mm}$ 、 $700 \text{ mm}$ 和 $800 \text{ mm}$ 的物体近轴成像,不考虑其它因素引起的像差.在 $700 \text{ mm}$ 物距处选择采用 $530 \text{ nm}$ 波长光照射,由式(7)得到在 $500 \text{ mm}$ 和 $800 \text{ mm}$ 处理论照明波长约为 $402 \text{ nm}$ 和 $594 \text{ nm}$ .用 ZEMAX 软件进行模拟,输入透镜参量建立模型,图4为 ZEMAX 上的设置参量.

	Surf: type		Radius	Thickness	Material	Semi-diameter	
0	OBJECT	Standard	Infinity	0.000		150.000	
1		Standard	Infinity	700.000		7.962	U
2	STOP	Standard	Infinity	9.308		2.500	U
3	(aper)	Standard	34.86000	6.800	H-K9L	12.700	U
4	(aper)	Standard	-34.86000	33.916		12.700	U
5	IMAGE	Standard	Infinity			105.561	U

图4 Zemax 软件设置参量

Fig. 4 Setting parameters of Zemax software

通过调整接收面,使其点列图中的弥散圆均方根半径最小,约为 $4.656 \mu\text{m}$ ;保持其位置不变,在 $500 \text{ mm}$ 和 $800 \text{ mm}$ 处分别设置一个 $402 \text{ nm}$ 和 $594 \text{ nm}$ 点光源,得到其点列图如图5所示.

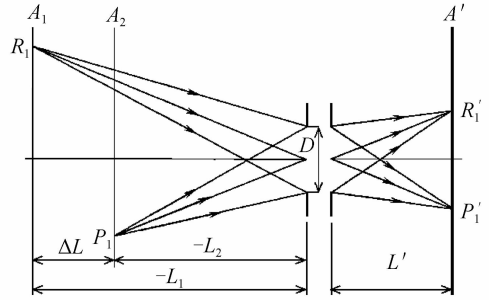


图2 分波段照明成像原理

Fig. 2 Schematic of divided spectral illumination imaging

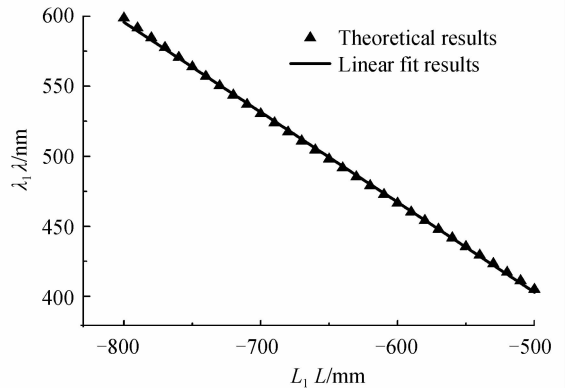


图3  $L_1$ 和 $\lambda_1$ 关系

Fig. 3 Relationship between  $L_1$  and  $\lambda_1$

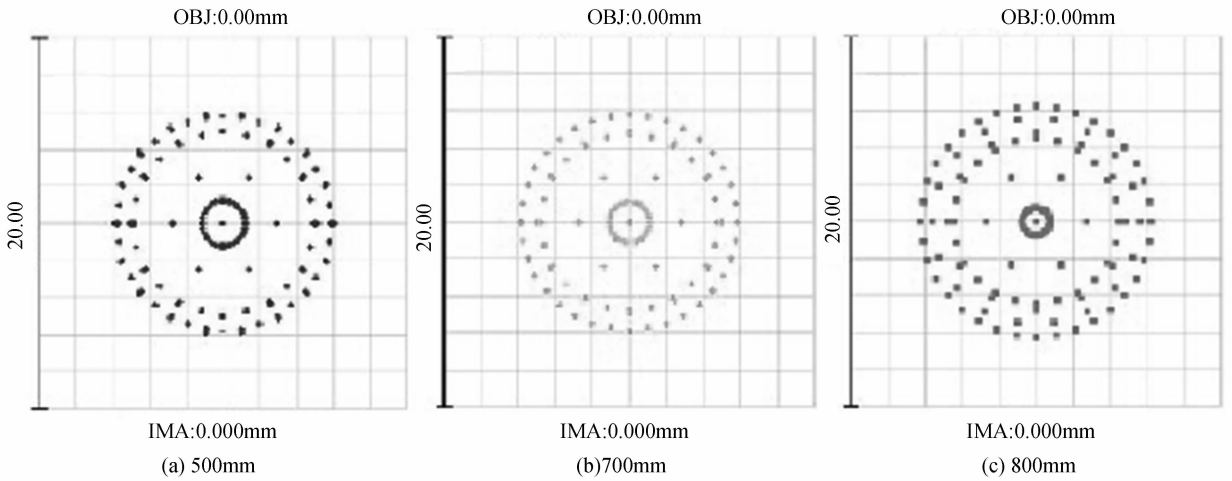


图 5 不同物距像面点列图

Fig. 5 Spot diagram of different object distances

图 5(b)(c)中的弥散圆均方根半径分别为  $4.713 \mu\text{m}$  和  $4.670 \mu\text{m}$ ,与基准平面  $4.656 \mu\text{m}$  相近,满足清晰成像条件,即处在不同物距上的三个物体都能够清晰成像,与理论结果一致.

### 2.3 图像采集系统设计与制作

图像数据采集是目前光信息处理的重要环节,设计并制作了基于 CY7C68013 USB 采集芯片和 MT9M001 传感器的图像采集系统<sup>[16]</sup>,图 6 为其原理图.

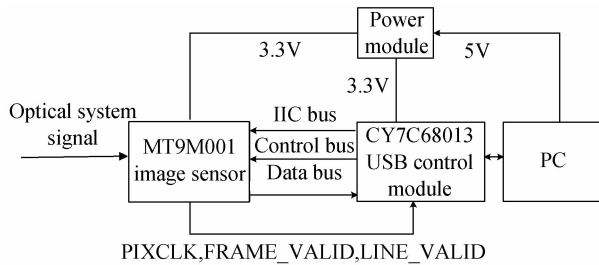
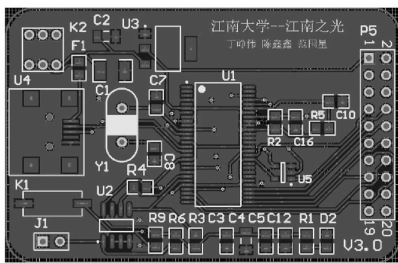


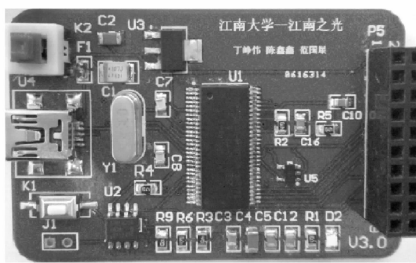
图 6 图像采集系统原理

Fig. 6 Schematic of image acquisition system

其中图像采集卡是用 Altium Designer 软件设计和制作的,如图 7 所示,主要包括电源模块、EEPROM 模块、USB 芯片与图像传感器模块之间的接口电路.图像采集软件包括图像采集卡的驱动程序和图像显示程序,前者是采用 Cyusb.sys 通用驱动程序,完成 Windows 对图像采集设备的识别和添加<sup>[17]</sup>,后者是用机器视觉软件 Halcon 和 VC++ MFC 联合编写,图 8 为图像显示程序界面.



(a) PCB design



(b) Image acquisition card

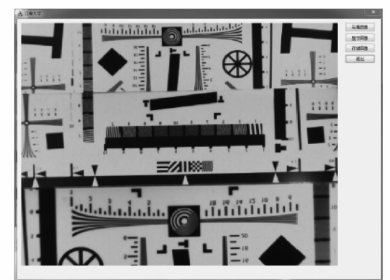


图 8 图像显示程序界面

图 7 图像采集卡

Fig. 7 The image acquisition card

Fig. 8 The interface of image display program

## 2.4 实验及分析

图 9 为采用标准焦距 35 mm 的双凸透镜和 5 mm 直径光阑搭建的成像系统示意图,用 2.3 节设计的图像采集系统进行图像采集。

采用图 10 所示的三种颜色 LED,中心波长分别为 400 nm、530 nm 和 600 nm,并通过照明光学设计软件对 LED 灯的放置位置和角度都进行了模拟优化<sup>[18-19]</sup>,使每一种颜色的光源均实现均匀照明。图11为实测光学系统,图 12是实测的原始图像,图

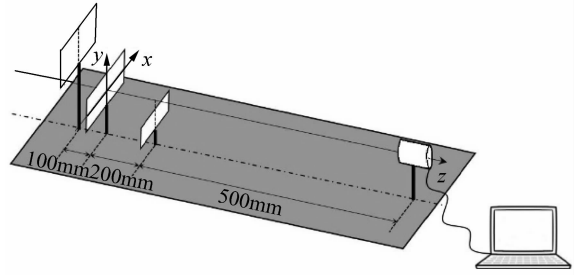


图 9 成像系统示意图

Fig. 9 Schematic diagram of experimental structure

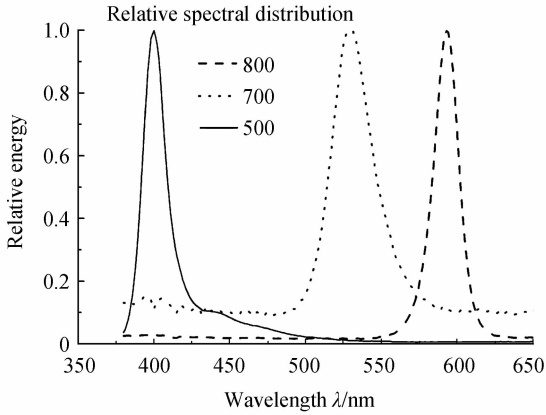


图 10 不同颜色的 LED 灯相对光谱分布

Fig. 10 Relative spectrum distribution of different color LEDs

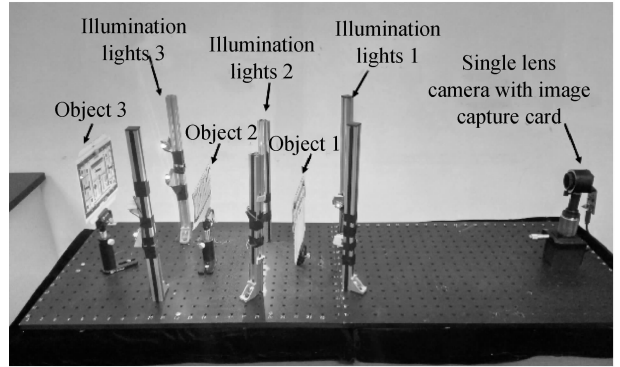


图 11 分波段照明成像系统结构

Fig. 11 Structure diagram of multi-spectral illumination imaging system

(a)、(b)、(c)分别为只采用白光、530 nm 波长单色光和不同波长光分区照明一次成像结果,基准物平面均在 700 mm 处,图像尺寸为 1280×1024 像素。

视觉直接观察,图 12(a)中,700 mm 和 800 mm 处成像清晰度相近,但是在 500 mm 处就较为模糊,说明在使用白光照明时,在 700 mm 处的后景深大于 100 mm,前景深小于 200 mm。在图12(b)中,500 mm 和

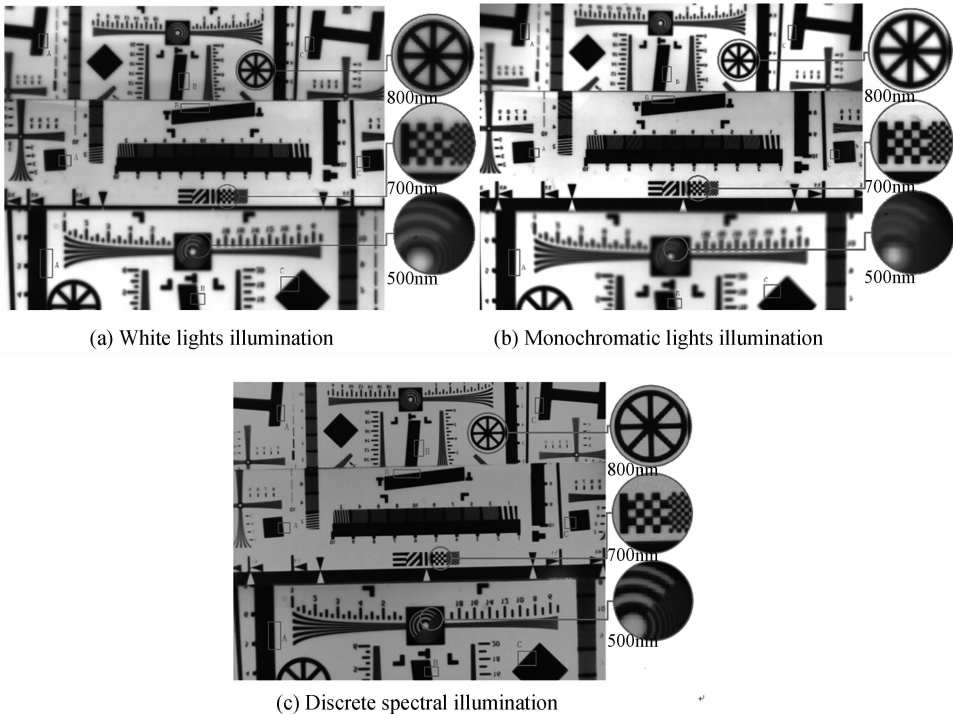


图 12 实测原始图像

Fig. 12 Original images

800 mm 处成像都不如(a)中清晰,说明采用单色光照明景深变小了.而采用分波段照明的图 12(c),分辨率明显提升,不同物距处的目标均能清晰成像.通过观察局部放大图像,也可以发现,对于同一物距中的相同标定物,采用本文所述方法图像的分辨能力有很大提高,尤其是对于 500 mm 物距处的同心圆花纹,在图 12(c)中能够很容易地区分开.另外,通过比较还可以看出,图 12(a)中的基准物平面成像清晰度也低于(b)和(c),分析认为是由于白光照明成像存在色差所致.

使用 Imatest 软件测试图像的分辨率,分别对图像中 500 mm、700 mm 和 800 mm 处各选取三处区域测试其 MTF50 得分.选取的区域如图 12 中红框所示,由于单透镜成像存在较大场曲,所以选择中心和边缘区域取其平均代表该物面客观评分,评价结果见表 1.

表 1 评价结果  
Table 1 Evaluation results

Region	500 mm			700 mm			800 mm		
	White light	Monochromatic light	Multiple spectral	White light	Monochromatic light	Multiple spectral	White light	Monochromatic light	Multiple spectral
A	126.2	136.3	190.4	152.9	306.8	337.1	119.4	105.7	335.8
B	115.3	96.6	292.3	176.3	318.1	309.3	172.4	171.4	442.2
C	114.0	109.2	305.1	147.7	303.7	319.5	136.5	167.0	508.4
Average	118.5	114.0	262.6	159.0	309.5	322.0	142.8	148.0	428.8

表 1 数据表明,软件判断结果与主观测试结果基本相同,均显示出分波段照明成像方法在扩大景深、提升分辨率上的优势:与白光照明相比,各物距分辨率分别提升了 121.6%、102.5%和 200.3%;与单色光照明相比,基准物距处基本相同,500 mm 和 800 mm 处分别提升了 130.4%、189.7%.通过表 1 数据横向对比也可以发现:对于同一物距中的相同测试区域,采用分波段照明分辨率提升显著,与视觉观察结果一致.根据式(1)计算得到在 700 mm 基准物距处采用 530 nm 单色光照明理论景深约为 180 mm,实际测得景深约 155 mm,采用分波段照明方法,景深扩大了 93.6%.同样采用白光照明实际景深约为 165 mm,分波段照明方法将景深提升了 81.8%.

结合主观视觉测试结果和软件分析,单色光照明分辨率较白光略有优势,分析认为是由于前者相比后者减小了色差的影响.但是在 500mm 处,白光照明清晰度大于单色光照明,考虑是因为所使用的白光偏冷色,短波光占比较大,与该物距理论照明波长相近的短波光起主要作用,进而提高了成像清晰度,扩大了景深.在分波段照明成像方法中,由于每个物面照射光波长相对集中,所以减小了色差的影响.同时,根据 1.1 节中讨论的内容,理论上 500 mm 处还存在 44 mm 前景深,在 800 mm 处还存在 134 mm 的后景深,所以实际景深大于 300 mm.

### 3 结论

本文提出了一种利用透镜色散原理扩大成像景深的方法,分析了影响成像景深的原因,得出物距和照明波长之间存在正相关的关系,据此进行的模拟及实验结果表明:单纯使用白光或单色光照明无法满足大景深成像要求,而采用分波段照明成像方法可有效扩大景深,且消除白光照明引起的色差影响,提升成像分辨率.

本文实验中物距是间断式的,而在实际应用中,被测物体大多是跨景深连续的,可以通过进一步细分波段,使用更多种颜色 LED 灯照明,以及利用各物面固有成像景深进行衔接的方法,实现连续大景深物面的清晰成像.在非精密机器视觉检测中,由于该方法是一次成像,因此提高了检测速度,可以利用到对色彩没有要求、但对成像景深有要求的大尺寸物体的表面缺陷检测及尺寸测量中.对小口径、短焦距球面透镜成像,像差和场曲是不可避免的,要根据应用的需求来选择透镜的口径,优化成像透镜结构,结合图像处理算法可降低场曲和畸变.

#### 参考文献

- [1] HOSKE M T. Future of machine vision for robotics[J]. *Control Engineering*, 2015, **62**(2): M1-M3.
- [2] PSAVLIDIS T. The challenge of general machine vision[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2014, **8**(1): 191-195.
- [3] LAI Xian-jia, XU Wen-dong, ZHAO Cheng-qiang, et al. Influence of sample defocus and large thickness on measurement error in machine vision application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(8): 0815002.

- 来先家,徐文东,赵成强,等. 机器视觉应用中物体离焦及过厚对测量准确度的影响[J]. 光学学报,2015,**35**(8):0815002.
- [4] LI Xu, WANG Jun-yuan, ZENG Zhi-qiang, *et al.* Influence of chromatic aberration on the size measurement accuracy of vision[J]. *Packaging Engineering*, 2015, **36**(19): 93-96.  
李旭,王俊元,曾志强等. 色差对机器视觉尺寸测量准确度的影响研究[J]. 包装工程,2015,**36**(19): 93-96.
- [5] LEVIN A, FERGUS R, DURAND, *et al.* Image and depth from a conventional camera with a coded aperture[J]. *Acm Transactions on Graphics*, 2007, **26**(3): 70.
- [6] PAN Chao, CHEN Jia-bi, ZHANG Rong-fu, *et al.* Study on principle and simulation of extending of depth of field with phase plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1679-1682.  
潘超,陈家璧,张荣福,等. 用相位板实现景深延拓的原理与模拟实验研究[J]. 光子学报,2009,**38**(7):1679-1682.
- [7] YANG Qing-guo, LIU Li-ren, SUN Jian-feng, *et al.* Property of wave front coding imaging systems for extending the depth of field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **26**(12): 1807-1812.  
阳庆国,刘立人,孙建锋,等. 扩大景深的波前编码成像系统特性分析[J]. 光学学报,2007,**26**(12):1807-1812.
- [8] DOWSKI E R, CATHEY W T. Extended depth of field through wave-front coding[J]. *Applied Optics*, 1995, **34**(11): 1859-1866.
- [9] GUICHARD F, NGUYEN H P, CAO F. Extended depth-of-field using sharpness transport across color channels[C]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009: 7250.
- [10] EGAWA Y. Depth of field expansion technology using chromatic aberration[J]. *Japanese Journal of Optics*, 2011, **40**(10): 529-533.
- [11] KUTHIRUMMAL S, NAGAHARA H, ZHOU C, *et al.* Flexible depth of field photography[J]. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 2010, **33**(1): 58-71.
- [12] OLMSTEAD B L, SHEARIN A. Extended depth of field imaging system using chromatic aberration: US, US7224540B2[P]. 2007.
- [13] Michael Scholles. Multi-spectral camera with a single lens[EB/OL]. *Fraunhofer Institute for Photonic Microsystems*, (2016-05-24). [2017-04-06]. <http://www.ipms.fraunhofer.de/en/press-media/press/2016/2016-05-24.html>.
- [14] 李林. 应用光学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010. 43,99-101.  
LI Lin, Applied optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2010. 43,99-101.
- [15] WARRAN J S. Modern optical engineering[M]. 4<sup>th</sup> ed. McGraw-Hill, 2008:208.
- [16] CAI Pu-zhao. Acousto-optic tunable imaging spectrometer image acquisition and display system design and implementation[D]. TaiYuan:North University of China, 2015, 13-32.  
蔡普照. 声光可调谐成像光谱仪的图像采集和显示系统设计与实现[D]. 太原:中北大学,2015. 13-32.
- [17] WANG Chu-yang, YUAN Shi-ji, ZHAI Bing, *et al.* Design and implementation of a CMOS imaging system based on CY7C68013[J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2016, **38**(5): 1086-1090.  
王初阳,袁仕继,翟冰,等. 基于CY7C68013的CMOS成像系统设计与实现[J]. 电子器件,2015,**38**(5):1086-1090.
- [18] WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le. Optofluidic varifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*. 2015, **36**(6): 718-723.  
吴雯婷,梁忠诚,仇乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. 发光学报,2015,**36**(6): 718-723.
- [19] LI Xiao, GAO Pei-li, HUANG Yi-feng, *et al.* Rapid optimization design for lighting system based on principles of sequential ray tracing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2015, **36**(6): 873-879.  
李潇,高培丽,黄逸峰,等. 基于序列光线追迹原理的快速优化照明设计[J]. 应用光学,2015, **36**(6):873-879.