

文章编号 1004-924X(2014)10-2691-07

基于人造复眼的多谱成像系统

金 建, 邸 思*, 陈贤帅, 杜如虚

(中国科学院 广州先进技术研究所, 广东 广州 511458)

摘要:针对采用滤光片转轮配合普通相机实现光谱分离与成像的多谱成像系统体积大, 结构复杂, 操作不便等问题, 本文基于微机电系统技术提出了一种新的多谱成像系统的设计方案和加工方法。该方法将人造复眼结构和多通道彩色滤光片集成在同一块基片上来实现多谱成像结构。该结构具有多个光通道, 分别对应红、绿、蓝、近红外4个波段, 每个通道能独立获取对应波段的图像信息。以这种复眼结构作为镜头搭建了多谱成像系统并进行了成像实验, 获取了多组对比图像。得到的图像说明该结构能够实现预期的色彩分离和多通道成像。由于这种复眼结构高度集成且具有可见光及近红外多波段图像并行捕捉能力, 因此在多谱成像领域很有应用前景。

关键词:人造复眼; 多谱成像; 微透镜阵列; 多通道滤光片

中图分类号: TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142210.2691

Multi-spectral imaging system based on artificial-compound-eye

JIN Jian, DI Si*, CHEN Xian-shuai, DU Ru-xu

(Guangzhou Institute of Advanced Technology, Chinese Academy
of Sciences, Guangzhou 511458, China)

* Corresponding author, E-mail: si.di@giat.ac.cn

Abstract: As current multi-spectral imaging system implements spectral separation and imaging by a filter wheel combined a common camera, it has larger volume, complex structure and is difficult to operate. To avoiding these shortcomings, this paper presents a novel design method for multi-spectral imaging system based on Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS). The method integrates a artificial-compound-eye structure and a multi-channel filter on one substrate to develop a compact multi-spectral imaging lens. The structure has several optical units, and each unit is used to capture the information for a certain band corresponding to red, green, blue, near-infrared bands. Based on this special artificial-compound-eye lens, a multi-spectral imaging system is setup. With this system, several contrast images are acquired. The imaging experimental results demonstrate that the structure realizes color separation and multi-unit imaging as expected. Because of its high level of integration and ability of capturing the multi-band image, the novel artificial-compound-eye structure is suitable for smart multi-spectral imaging systems.

Key words: artificial-compound-eye; multi-spectral imaging; microlens array; multi-channel filter

收稿日期: 2014-01-20; 修订日期: 2014-03-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61204125); 广州市南沙区自主创新计划资助项目(No. 201201020)

1 引言

多谱成像系统^[1-2]能够实现准确的谱分离并获得多个单一波段的图像信息,结合数字图像处理技术,其能够观察到普通相机观察不到的隐藏信息,故在高精度色彩重构^[3-4],遥感测量^[5],生物医学成像^[6-8]等诸多领域具有广泛的应用。

现有的多谱成像系统通常将一个滤光片转轮^[9-10]或者液晶可谐调滤波器^[11-12]置于普通相机前来实现光谱的分离;但这样做不可避免地增加了系统的复杂性和设备的体积,而且这种多谱成像系统每次只能获得一个波段的图像信息,操作繁琐。人造复眼^[13-15]具有多个光通道,且每个光通道可以同时独立成像,因此非常适合用于多谱成像。日本学者 Rui Shogenji 提出了一种基于人造复眼的多谱成像系统^[16],通过将多通道滤光片置于微透镜阵列之前来实现光谱分离。但这会带来多通道滤光片与人造复眼结构对准的问题,集成度也欠佳。二者的位置失配将会影响分光和成像质量。因此,需要新的方法来改善现有的系统。

本文基于微机电系统技术,利用颜色光阻剂法^[17]和热熔法^[18-19]将人造复眼结构和多通道彩色滤光片集成在同一块基片上,实现了紧凑型多谱成像镜头的研制。该结构具有多个光通道,分别对应红、绿、蓝、近红外 4 个波段,每个通道能独立获取对应波段的图像信息。通过该方法,整个成像系统得到了简化,系统集成度更高,并且避免了多通道滤光片与人造复眼的对准问题。此外,还使其工作波长扩展到了近红外波段,提高了系统的适用性。针对该多谱复眼结构,进行了一系列测试。结果证明,不管是多通道滤光片的滤光性能还是人造复眼微透镜阵列的表面轮廓都达到了预期的制作效果。

为了验证该滤光人造复眼的光学性能,将该集成结构置于 CMOS 传感器前,组成了一个简易的多谱成像系统。在此系统下,同一时间内可以观测到多张光谱图。从多组对比图像结果可以看出,该多谱人造复眼能够实现预期的色彩分离和多通道成像。由于这种复眼结构具有可见光及近红外多波段图像并行捕捉能力且高度集成,因此在多谱成像领域具有重要的应用前景。

2 多谱人造复眼结构的制作

制作多谱人造复眼主要包括两个步骤,第一是多通道滤光片的制作,第二是人造复眼与多通道滤光片的集成。

2.1 多通道滤光片的制作

图 1 所示为多通道集成滤光片加工工艺流程(彩图见期刊电子版)。该方法通常用于加工液晶显示器的滤光片组件,称作颜色光阻剂法。颜色光阻剂购买于深圳惠乐公司,包括红色、绿色、蓝色三种光阻剂。

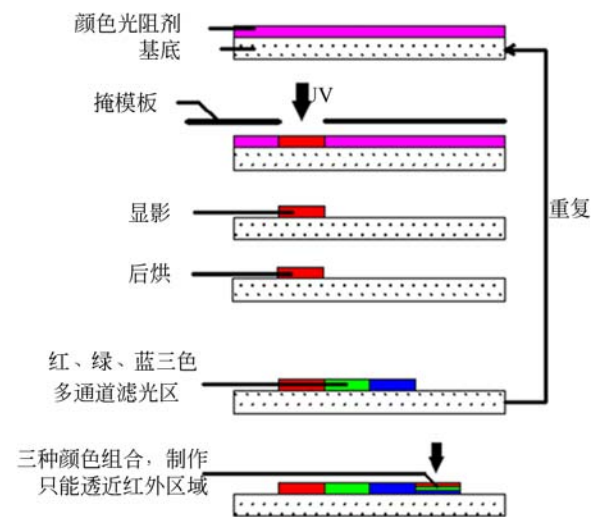


图 1 多通道滤光片制作工艺流程图

Fig. 1 Fabrication process of multi-channel filter

加工具体步骤如下:

(1)取一片干净的玻璃片,经丙酮擦洗和去离子水冲洗后,置于 120 °C 烘箱内烘烤 5 min 至完全去除水汽。

(2)通过甩胶机将颜色光阻剂(红色)均匀地旋涂在玻璃基片上。甩胶机转速为 550 r · min⁻¹,甩胶时间为 30 s,光阻剂厚度为 1 μm 左右。旋涂后,将基片置于烘箱中,在 85 °C 下烘烤 4 min,以除去光阻剂中的溶剂。

(3)在预先设计好的掩模板下紫外(365 nm)曝光,曝光时间为 12 s,曝光强度约为 20 mW/cm²。该掩模板透光部分为 0.8 cm × 0.8 cm 的方块,同时掩模板上带有对准标记,以实现后续不同颜色光阻剂的集成。

(4)将曝过光的基片置于质量百分比浓度为 0.5% 的 KOH 显影液中显影,显影时间大约为 40 s,此时即获得一块方形的滤光区域。

最后,将显影后的基片用去离子水冲净、氮气吹干,置于烘箱内在 230 °C 下后烘 1 h 以完全固化光阻剂,并增加光阻剂与基底的结合力度。完全固化后的颜色光阻剂性能非常稳定,对于制作其它滤光区没有影响。

以上步骤需要重复数次,利用对准标记,将其它颜色光阻剂(绿、蓝)都集成在该基片上,形成多通道集成滤光片。另外,将红、绿、蓝三色光阻剂经过 3 次光刻集成在同一区域,该区域只能透过近红外光,称之为近红外区。

2.2 人造复眼结构的制作

从结构上讲,人造复眼为一组微透镜阵列^[20]。多通道滤光片制作完成后,需要制作微透镜阵列并将其与滤光片集成。对于单透镜成像系统,理论上其透镜越薄,几何像差会越小;孔径越大,其数值孔径越大,衍射效应越小,成像质量越高。因此,制作孔径和曲率半径尽量大的微透镜是保障成像质量的必要条件。然而,受光刻胶材料性质和热熔工艺的制约,实际制作中上述参数会受到限制。因此,根据多次实验,选择了一组最佳的实验参数,以保证获得尽量大孔径和曲率半径的微透镜阵列。其加工工艺流程如图 2 所示。

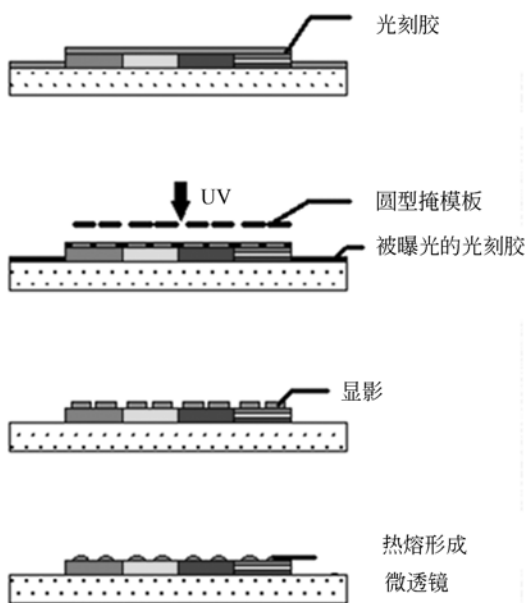


图 2 人造复眼的制作及集成工艺

Fig.2 Fabrication and integration processes of ACE

(1)将正光刻胶(AZ4620)旋涂于上述制作好的多通道滤光片上,光刻胶需要一定的厚度,采用两次甩胶工艺来实现。每次甩胶都以 $1\ 200\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速旋涂 45 s,紧接着以 $2\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的转速甩胶 30 s;第一次甩胶完成后,需在烘台上以 85 °C 烘烤 2 min,然后再继续甩第二层胶。两次甩胶后,正光刻胶的涂覆厚度约为 20~23 μm 。

(2)将旋涂光刻胶后的基片置于烘箱内,在 85 °C 下烘烤 8 min,以完全除去光刻胶内溶剂。

(3)将光刻胶置于带有对准标记的掩模板下,对准后进行紫外(365 nm)曝光。其中掩模板不透光部分设计为直径 700 μm 的圆形阵列,可保障获得最大孔径的微透镜。曝光时间为 12~14 s,曝光强度约为 20 mW/cm^2 。

(4)将曝光后的基片放入 AZ400 型显影液中,制作出 AZ4620 圆柱形阵列。显影时不能完全显影到底,应该预留 2~3 μm 的光刻胶,这样可使热熔后形成的透镜球面具有最大的数值孔径。通过多次显影,并用台阶仪测量圆柱高度,最后得到的圆柱高度在 20 μm 左右。显影完成后用去离子水清洗基片上存留的显影液后,用氮气吹干。

最后,将基片置于 128 °C 烘台上,热熔 115 s,圆柱形 AZ4620 会在表面张力的作用下形成凸型微透镜形状。至此多谱人造复眼结构制作完成。

3 制作结果与讨论

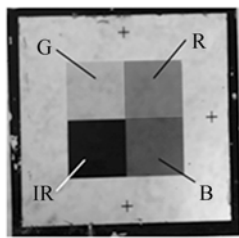
3.1 多通道滤光片制作关键点

在制作多通道滤光片时,首先应准确控制曝光剂量,如果曝光过少,在显影时光阻剂很容易从基底脱下来。第二,后烘时间应该足够,否则光阻剂与基底结合不强,在后续工艺过程中也容易脱胶。第三,由于曝光显影过程需要重复数次,因此,显影过程一定要充分且用去离子水彻底冲洗,防止遗留下来的光阻剂影响其它区域的滤光性能。

3.2 多通道滤光片光学属性

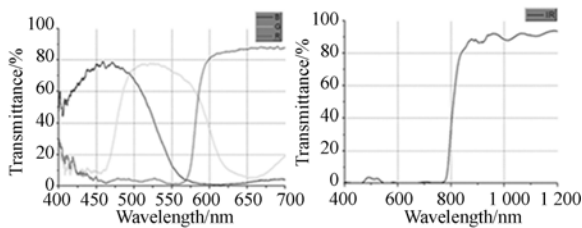
图 3 所示为制作好的多通道滤光片及各滤光区透射率曲线。图 3(a)为不同滤光属性的颜色光阻剂被集成在同一基片上,其边界非常清晰且

没有交叠。图 3(b)为 3 块可见光滤光区(红、绿、蓝)透射率曲线图,该图说明它们对红、绿、蓝具有很好的滤光效果,适合用于多谱成像系统进行色彩分离。图 3(c)是经过红、绿、蓝三色叠加后的透射率曲线。图中可以看出,该区域基本不能透过可见光(400~800 nm),而近红外波段(800~1 200 nm)则完全可以透过,说明该区域可以用来滤掉可见光从而进行近红外成像。



(a) 多通道滤光片

(a) Multi-channel filter



(b) 可见光滤光区透射率曲线 (c) 近红外区透射率曲线

(b) Transmission curve of visible light bands filter (c) Transmission curve of near-infrared bands filter

图 3 多通道滤光片样品及不同区域透射率曲线

Fig. 3 Sample of multi-channel filter and its transmission curves of different parts

3.3 微透镜阵列制作关键点

制作微透镜阵列时 also 需要注意几点。

第一,热熔条件。热熔形成微透镜主要作用是光刻胶表面张力,而表面张力大小受到温度的影响。如果温度过高(大于 140 °C),AZ4620 光刻胶由于流动性太大而无法控制热熔过程。如果温度太低(低于 120 °C),达不到光刻胶的玻璃化温度,光刻胶由于流动性太差而不能发生热熔过程。同时,热熔时间必须控制准确。对于圆柱高度为 20 μm 的光刻胶,采用的热熔参数是在 128 °C 烘台上,热熔 115 s。热熔时间结束时,必须立刻将基片取出,并自然冷却。如果热熔时间

太长,其所形成的凸微透镜表面轮廓将不理想。另外,热台表面需要平整,保证热熔时每个圆柱能均匀受热。

第二,显影过程。在基底上残留一部分 AZ4620 光刻胶能减小光刻胶与基底的接触角,这有利于圆柱孤岛形成透镜球面。因此,在显影过程中,应根据实际显影情况,适当地控制显影时间,在基底上余留 2~3 μm 的光刻胶。

另外,根据 AZ4620 光刻胶的厚度及热熔工艺的限制,设计的掩模板圆形直径应小于一定的阈值,如果制作的圆柱直径太大,由于光刻胶厚度不够,将不能形成完整的球面形状,还可能形成驼峰形状,严重影响成像质量。本文的掩模板透光圆形直径为 700 μm 。

3.4 人造复眼结构的几何特性

通过选择合适的参数,多通道滤光片和微透镜阵列被集成在同一块基片上,如图 4 所示。图中每块滤光区域都有 3×3 个微透镜阵列,各区域之间没有出现任何干涉。透镜表面轮廓与理想球面符合程度,决定了该透镜的光学属性,符合程度越高,聚光性能越好。如图 5(a)所示,可以根据透镜的直径 D 和高度 h ,计算出相应的理想球面的形状及焦距 R 。因此利用表面扫描仪(美国 Ambios 型号 XP-1 型表面扫描仪)对微透镜表面轮廓进行了扫描,根据实际透镜轮廓计算出对应的理想球面形状,并将实际轮廓与对应理想球面进行了对比。如图 5(b)所示,图中点线代表实际微透镜表面曲线,实线代表对应的理想球面。从图中可以看出,实际制作的透镜大小为 760 μm ,略微大于掩模板圆形直径(700 μm)。透镜高度 h 为 14 μm ,计算可知其焦距为 5.15 mm。实际测得的曲面轮廓与其对应的理想球面吻合得很好,说明该微透镜具有较好的光学性能。

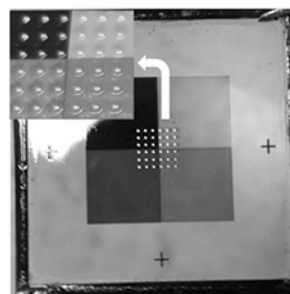
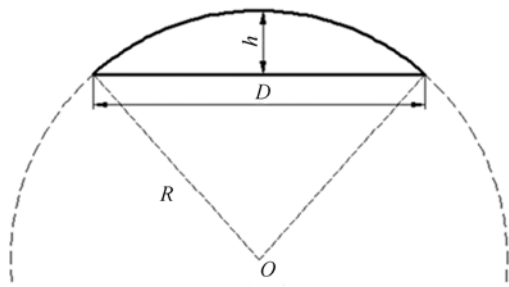


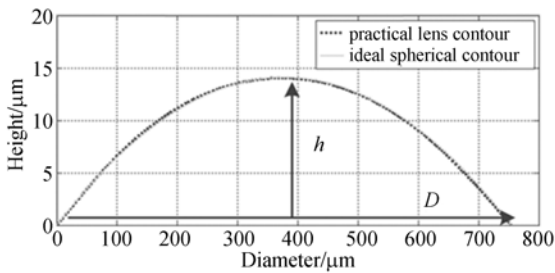
图 4 滤光人造复眼

Fig. 4 Sample of filtering artificial-compound-eye



(a)理想球面示意图

(a)Schematic diagram of ideal sphere



(b)复眼微透镜表面轮廓与理想球面对比

(b) Comparison of practical lens contour and ideal spherical contour

图 5 理想球面及实际微透镜表面轮廓与理想球面对比
Fig. 5 Ideal sphere and the comparison of practical microlens contour with ideal spherical contour

4 多谱人造复眼结构的成像性能

为了验证多谱复眼结构的成像性能,本文搭建了一台多谱成像系统。如图 6 所示,该实验系统包括光源、目标物、与滤光片集成的人造复眼、CMOS 光传感器和电脑等。该系统的图像获取原理如图 7 所示。在该系统中,每组微透镜、其后的滤光区、感光芯片区构成一个成像单元,每一个成像单元都能独立成像。目标物反射光源射来的光线,经过微透镜的聚光和滤光片的光谱分离,最后在 CMOS 传感器上被监测,经过软件处理在电脑上显示出经过不同通道得到的多谱成像结果。为了证明该系统的准确性,系统中分别采用了黑白和彩色传感器对目标物进行成像,并对比了成像结果。另外根据获得图像的灰度值大小,为该系统配备了自动对焦软件。通过调节 CMOS 与多谱复眼结构的距离来实现对焦。成像结果如图 8~10 所示。

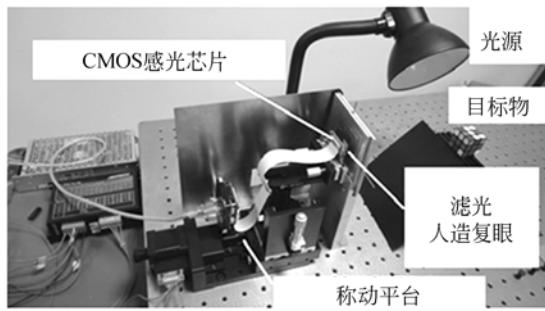


图 6 多谱成像系统实物图

Fig. 6 Setup of multi-spectral imaging system

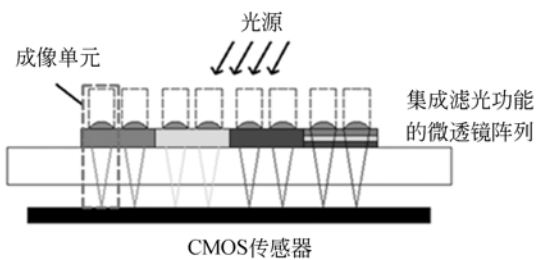
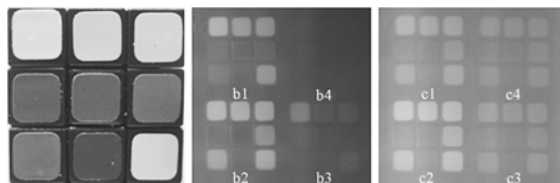


图 7 多谱成像原理图

Fig. 7 Principle of imaging



(a)魔方原图 (b)冷光源下结果 (c)热光源下结果
(a)Origin image (b)Cold light result (c)Warm light result

图 8 魔方在不同光源下的多谱成像结果

Fig. 8 Multi-spectral imaging results of cube in different lights

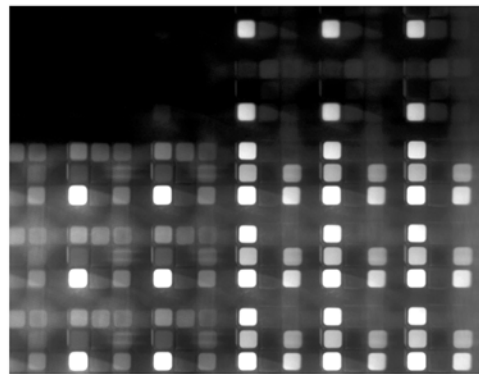


图 9 魔方多谱成像结果

Fig. 9 Multi-spectral imaging result of cube

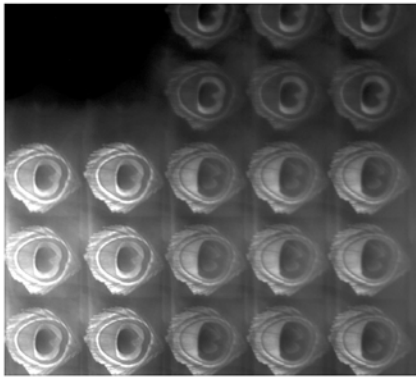


图 10 孔雀羽毛多谱成像结果

Fig. 10 Multi-spectral imaging result of peacock feather

图 8(a)为在商业相机下拍摄的魔方原始图片,用于对照。图 8(b)是在该多谱成像系统下所成的图像,该组试验是在冷光源下(无近红外光)进行的。可以看出,图片明显的分成了 4 块区域,对应于不同滤光微透镜阵列。实际上,由于每块区域都有 3×3 个微透镜,因此每块区域应该会有 3×3 张图片,但是由于 CMOS 图像传感器芯片大小限制,只取最中间的 4 张图片(图 8b1~8b4)进行分析。分别对应绿色、红色、蓝色和近红外区下的成像结果。图中可以看出红色滤光片下所成的像比其它滤光片下所成像亮度高,这是因为光源中包含更多的红色光,另外魔方盖面也包含比较多的红色色块。同时,在近红外区域下没有得到任何图像,如图 8b4 所示。图 8c 是在包含近红外光线的热光源下所成的像,相比图 8(b),每块区域都更加明亮。与图 8(b)不同的是,近红外区域也有成像(图 8c4)。测试结果说明,该多谱复眼结构有较好的分光 and 成像性能,且可以同时工作在可见光区和近红外区。

进一步测试该多谱成像系统时,选择了高像素彩色 CMOS 芯片,并选择魔方和孔雀羽毛为目标物在冷光源下成像,成像结果如图 9、10 所示,图片依然清晰的分为 4 块,并明显分谱成红、绿、蓝三色。近红外高通滤光区下没有图像。这几幅图依然可以验证所搭建的多谱成像系统的可靠

参考文献:

- [1] PETERI T. *Multispectral imaging* [M]. Course project for imaging and display technology in helsinki university of technology, 2007.
- [2] THEMELIS G, YOO J S, NTZIACHRISTOS V.

性,当然该系统还需要后期包括滤光片性能、微透镜镜头、软件、机械结构等的优化,以达到可商用的程度。

5 结论与后期工作

5.1 结论

本文提出了一种新颖的设计方案和加工工艺,利用微机电系统技术将多通道滤光片和人造复眼结构集成在同一块基底上,研制了多谱人造复眼结构。该结构具有多个光通道,每个通道能独立获取不同波段的图像信息。详细讨论了该结构的制作工艺及结构特性。为了证明这种复眼结构的成像能力,搭建了多谱成像系统。成像结果表明多谱复眼镜头达到了预期的滤光和成像效果。总之,由于该结构具有从可见光到近红外的多波段图像并行捕捉能力且高度集成,因此它在多谱成像领域具有重要的应用前景。

5.2 后期工作

从成像结果可以看出,该滤光人造复眼仍然存在很多缺陷,主要表现在透镜之间有很多透光区域,这造成了成像时有很多背景光,严重影响了成像质量。此外,光源中各光谱强度差别很大,造成图像明亮不一。对于这两个问题,将来会从软硬件两方面去改善:

- (1)在透镜之间填充不透光的光阻剂以减少杂散光的入射。
- (2)采用光谱强度更加均匀的光源以丰富目标的光谱图像信息。
- (3)在人造复眼结构后面插入多孔光阑,以消除通道间的串扰。
- (4)对多谱图像进行锐化和融合算法研究,提升系统观测隐藏图像信息能力。

经过这些改进措施,以本文介绍的多谱人造复眼结构为基础的多谱成像系统将更加完善,其成像性能和适用性将大大提高。

Multispectral imaging using multiple-bandpass filters [J]. *Optics Letters*, 2008,33(9):1023-1025.

- [3] MURAKAMI Y, OBI T, YAMAGUCHI M, *et al.*. Nonlinear estimation of spectral reflectance based on Gaussian mixture distribution for color im-

- age reproduction [J]. *Applied Optics*, 2002, 41: 4840-4847.
- [4] YAMAGUCHI M, TERAJI T, OHSAWA K, *et al.*. Color image reproduction based on the multi-spectral and multiprimary imaging: Experimental evaluation[C]. *SPIE* 4663, 2002, 15-26.
- [5] WABOMBA M J, SMALL G W. Remote detection of volatile organic compounds by passive multispectral infrared imaging measurements [J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, 61(4): 349-358.
- [6] PAQUIT V C, TOBIN K W, PRICE J R. 3D and multispectral imaging for subcutaneous vein detection [J]. *Optics Express*, 2009, 17(14): 11360-11365.
- [7] CHUNG S, FRIED D, STANINEC M, *et al.*. Multispectral near-IR reflectance and transillumination imaging of teeth [J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(10):2804-2814.
- [8] ANNA P, PASQUALE F, LEONARDO P, *et al.*. Multispectral imaging for early diagnosis of melanoma [C]. *Proc. of SPIE*, 2013,8668:86684A.
- [9] EICHENHOLZ J M, BARNETT N, JUANG Y, *et al.*. Real time Megapixel Multispectral Bioimaging [C]. *Proc. SPIE*, 2010,7568:75681L.
- [10] PAL H S, NEIFELD M A. Multispectral principle component imaging [J]. *Optics Express*, 2003, 11(18):2118-2125.
- [11] JON Y. HARDEBERG, Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41(10):2532-2548.
- [12] 赵慧洁, 程宣, 张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20: 1945-1952.
- ZHAO HUI-JIE, CHENG XUAN, ZHANG YING. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20:1945-1952. (in Chinese)
- [13] HORRIDGE G A. The Compound Eye of Insects [J]. *Scientific American*, 1977, 237:108-120.
- [14] 郭方, 王克逸, 吴青林. 多通道大视场目标定位仪的研制 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1):26-33.
- GUO F, WANG K Y, WU Q L. Development of target positioning instrument with multi-channels and large field of view [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):26-33. (in Chinese)
- [15] 张红鑫, 卢振武, 王瑞庭, 等. 曲面复眼成像系统的研究 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(3):346-350.
- ZHANG H X, LU ZH W, WANG R T, *et al.*. Study on curved compound eye imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):346-350. (in Chinese)
- [16] SHOGENJI R, KITAMURA Y, YAMADA K, *et al.*. Multispectral imaging using compact compound optics [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1643-1655.
- [17] SABNIS R W. Color filter technology for liquid crystal displays [J]. *Displays* 20, 1999, 119-129.
- [18] POPVIC Z D, SPRAGUE R A, CONNELL G A N. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(7): 1281-1284.
- [19] ALDALALI B, LI C, ZHANG L, *et al.*. Micro Cameras Capable of Multiple Viewpoint Imaging Utilizing Photoresist Microlens Arrays [J]. *Journal of microelectromechanical systems*, 2012, 21(4):945-952.
- [20] LI L, YI A Y, Design and fabrication of a free-form microlens array for a compact large-field-of-view compound-eye camera [J]. *Applied optics*, 2012, 51(12):1843-1852.

作者简介:



金 建(1987—),男,江西九江人,研究助理,2009年、2012年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事微纳米加工技术方面的研究。E-mail: jian.jin@giat.ac.cn



邸 思(1981—),男,北京人,助理研究员,2007年于北京交通大学获得硕士学位,2011年于中国科学院深圳先进技术研究院获得博士学位,主要研究方向为微细加工技术,微光机电系统。E-mail: si.di@giat.ac.cn