

基于光场成像的画幅式多光谱成像方法

沈燕¹ 张磊² 柏财勋¹ 孟鑫¹ 李建欣¹

¹南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

²浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 画幅式多光谱成像技术能够同时获取多波段光谱图像数据,在材料分析及环境监控等领域有广泛应用。采用一种基于光场成像的画幅式多光谱成像方法,利用二次成像的方法将由光场成像系统获取的多光谱图像转接成像到探测器光敏面,不需微透镜阵列与探测器光敏面直接接触,避免了对探测器的损坏,同时降低了系统安装调节的难度。此外,研究了不同通道光谱信息混叠的影响因素,采用像素灰度匹配的方法获取各通道像点的矢量坐标,实现光谱通道信息的提取。在不同光强条件下对灰度进行平场校正,获取各光谱通道的归一化通光率,用以校正通道灰度误差。搭建了实验装置,对室内目标进行多光谱瞬时探测,获取了较为清晰的多光谱图像。

关键词 光谱学; 多光谱成像; 光场成像; 二次成像

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.053007

Frame Multispectral Imaging Based on Light Field Imaging

Shen Yan¹ Zhang Lei² Bai Caixun¹ Meng Xin¹ Li Jianxin¹

¹ School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

² State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract Frame multispectral imaging technology is capable to acquire multi-band spectral images simultaneously, and has been widely used in many fields such as material analysis, environment monitoring and so on. A frame multispectral imaging method based on light field imaging technology is employed, and a secondary imaging system is designed to reimage the multispectral image obtained by the light field imaging system onto the photosensitive surface of detector. It is able to avoid the damage of detector caused by the direct contact between the microlens array and the photosensitive surface, and decrease the difficulty of adjustment and installation for the system as well. In addition, the factors that cause channel spectra aliasing are discussed. Based on the pixel gray matching method, the vector coordinates of each channel points are extracted and the spectral channel information is obtained. Besides, a series of plane calibrations under different light intensities are operated to get the normalized light throughput of every channel for calibrating the gray errors of the system. Eventually, an experimental system is set up, the multi-spectral instantaneous detection to indoor target is realized, and the clear recovered spectral images are obtained.

Key words spectroscopy; multispectral imaging; light field imaging; secondary imaging

OCIS codes 300.6170; 110.4234; 300.6170

收稿日期: 2016-01-13; 收到修改稿日期: 2016-02-25; 网络出版日期: 2016-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(61475072, 61205016, U1231112)、教育部博士点基金(20123219120021, 20133219110008)

作者简介: 沈燕(1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事干涉成像光谱技术方面的研究。

E-mail: 15062205612@163.com

导师简介: 李建欣(1977-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事精密光学测试与干涉成像光谱技术方面的研究。

E-mail: ljx@vip.163.com (通信联系人)

1 引言

多光谱成像技术能够获取探测目标多个波段的光谱图像,被广泛应用于遥感、军事侦察、显微探测、文物保护和研究及园艺作物识别等领域^[1-5]。近年来研究人员对光场成像技术进行了深入的研究,在传统成像系统中加入微透镜阵列等孔径处理器件,能够实现目标位置和方向信息的同时探测^[6-11]。将光场成像技术应用于多光谱成像领域,可以获取目标的多光谱图像,并且具有体积小、无需图像配准等优点^[12-19]。

现有的多光谱光场成像系统直接将探测器光敏面置于微透镜阵列(或针孔阵列,但光通量降低)的后焦面位置^[12-13]。由于微透镜阵列焦距在亚毫米量级,一般做法是直接在探测器光敏面与微透镜阵列之间利用薄的透明基片材料将两者粘合在一起,或者利用精密机械夹具将微透镜阵列固定在探测器光敏面前方。由于可操作距离较短,易出现两个问题:一是调节微透镜阵列时意外碰触探测器光敏面,进而损坏探测器;二是微透镜阵列固定好后无法进行调节,系统精度完全取决于连接器件的精度。

为了简化系统装调难度,本文采用了一种基于光场成像的多光谱成像方法,通过二次成像结构将光场成像系统获取的多光谱图像转接成像到探测器光敏面,并搭建了实验原理样机,结合相应光谱图像重构算法,实现对目标的画幅式多光谱探测。

2 基本原理与系统

2.1 光场多光谱成像

多光谱光场成像系统一般由滤光片阵列、成像物镜、微透镜阵列和探测器组成,系统结构如图 1 所示。其中滤光片阵列位于成像物镜孔径光阑处(该滤光片阵列存在 4 个波段 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$),微透镜阵列位于成像物镜像面位置;探测器光敏面位于微透镜阵列后焦面处。目标物体上某点发出的一束光经滤光片阵列后入射成像物镜,并在某一微透镜上会聚形成像点,位于微透镜后的探测器接收其高聚焦^[12]。

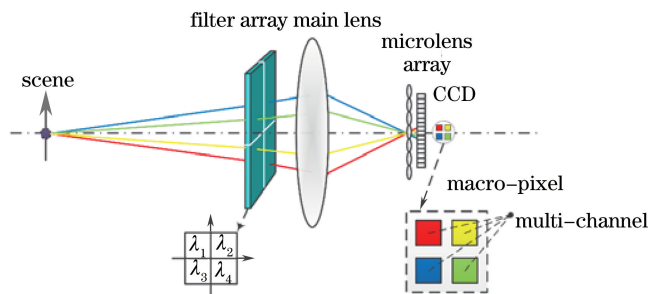


图 1 多光谱光场成像的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multispectral optical field imaging

置于成像物镜孔径光阑位置的滤光片阵列由 $M \times M$ 个不同波段的滤光片组成,每个微透镜在探测器上形成一个子图像,可视为“宏像素”^[14]。则探测器光敏面上各“宏像素”单元被分为 $M \times M$ 个通道,且每个通道接收通过相应滤光片的光,将所有“宏像素”中相同位置的通道信息提取出来,并按照“宏像素”相对于原图的位置进行拼接,即可组成对应波段的光谱图像。

根据多光谱光场成像系统模型,设 $L(\lambda)$ 为物面产生的光谱辐射,则从第 j 个滤光片入射进系统的光强可表示为^[13,15]

$$I_j = \int_{\Delta\lambda} \frac{\mu_0 L(\lambda) A_0}{z^2} \cdot \frac{A_p \lambda_c t}{hc} \cdot \rho_j(\lambda) d\lambda \cdot g_e, \quad (1)$$

式中 μ_0 为系统光学透射率, A_0 为第 j 个滤光片所占子孔径的面积, z 为成像物镜与探测器的距离, A_p 为探测器像素面积, t 为积分时间, $\rho(\lambda)$ 为系统光谱灵敏度, $\Delta\lambda$ 为滤光片带宽, λ_c 为中心波长, h 为普朗克常量, c 为光速大小,同时 g_e 为探测器增益。

任意探测器像素位置的光强信息可看作是对应光谱强度的线性叠加,因此探测得到的光强信息满足

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}\mathbf{I} + \mathbf{b}, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_K]^T$ 为“宏像素”对应的全光口径光强向量, x_i 为像素位置 i 的光强大小, K 为像素个数;

$\mathbf{F}_{K \times M}$ 为系数 $f_{i,j}$ 的构成矩阵, $f_{i,j}$ 是通过第 j 个滤光片到达像素 i 位置光线数的比例系数; $\mathbf{I} = [I_1, \dots, I_M]^T$ 为光谱强度对应向量; \mathbf{b} 为探测器噪声。

对获取的光强信息矩阵 \mathbf{X} 实施线性变换, 便可重建获得光谱特征数据:

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\varphi} \mathbf{X}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{Y} = [y_1, \dots, y_M]^T$ 为获得的光谱特征向量, $\boldsymbol{\varphi}$ 为对应光谱重建矩阵。

与传统分时多光谱成像方法相比, 利用光场成像技术能够实现多光谱图像的画幅式获取; 与分振幅式多光谱成像系统相比, 该系统结构简单, 仅需一个探测器, 并且提取同一个物点光谱信息时无需图像匹配。但是由于微透镜阵列和探测器光敏面之间可操作距离较短, 调节微透镜阵列时容易碰及探测器光敏面, 损坏探测器; 此外, 微透镜阵列固定后无法进行调节, 系统精度完全取决于连接器件的精度。

2.2 基于二次成像的成像模型

为简化系统装调难度, 对基于光场成像的多光谱成像方法进行了改进。利用二次成像结构将由光场成像系统获取的多光谱图像成像至探测器光敏面, 以避免微透镜阵列与探测器光敏面的直接接触, 提高系统装调精度, 系统结构如图 2 所示。

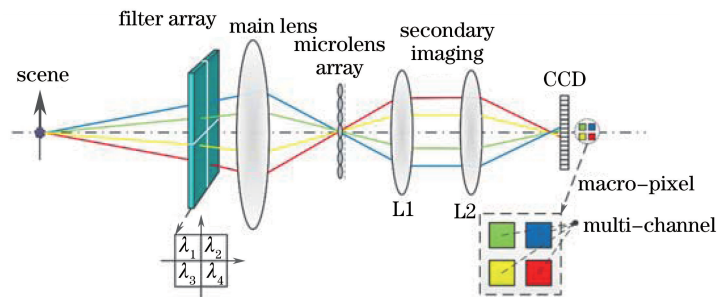


图 2 基于二次成像的画幅式多光谱光场成像系统

Fig. 2 Frame multispectral light field imaging system based on secondary imaging

在探测器与微透镜阵列之间加入二次成像结构, 将光场成像系统获取的光谱图像二次成像至探测器上。二次成像结构可采用单个成像镜头或镜头组的形式, 采用由准直物镜 L1 和成像物镜 L2 组成的成像镜组形式。光场成像系统部分保持不变, 微透镜阵列后焦面与准直物镜 L1 的前焦面重合, 使得一次实像中任意像点对应光束经 L1 准直并以平行光束形式通过成像物镜 L2, 进而成像在 L2 后焦面处的探测器上。光场成像系统所成的一次像与探测器获取的二次像之间满足

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{f'_2}{f'_1}, \quad (4)$$

式中 d_1 和 d_2 分别为光场成像系统所成一次像和探测器获取的二次像的边长; f'_1, f'_2 分别为准直物镜 L1 和成像物镜 L2 的焦距。由于准直物镜 L2 的焦距远大于微透镜焦距, 故可方便地调节微透镜阵列的位置和姿态而不会对任何器件造成损伤。此外, 通过改变 L1 和 L2 的焦距, 调整二次像和一次像的大小比, 可更加灵活地选取微透镜阵列和探测器光敏面大小。

与基于微透镜阵列的光场相机相同, 主成像物镜与微透镜仍需满足像方 F 数匹配的原则, 使所成的像尽可能大且避免图像交叠^[8]。如图 3 所示, F_1, F_2, F_3 为主成像物镜的 F 数, F_s 为微透镜 F 数, 主成像物镜 F 数过大(孔径小)会导致空间分辨率浪费; 主成像物镜 F 数过小(孔径大)则会导致探测器上图像交叠。

在满足 F 数匹配的原则下, 若主成像物镜 L 的通光口径为 D , 滤光片为正方形且边长均为 d_F , 微透镜阵列包含 $N \times N$ 单元, 探测器光敏面边长为 w 。则每个“宏像素”大小 D_p 为

$$D_p = \frac{w}{N}, \quad (5)$$

每个光谱通道对应像素数 D_s 为

$$D_s = \frac{d_F}{D} \times \frac{w}{N}, \quad (6)$$

系统图像分辨率 R_i 可表示为

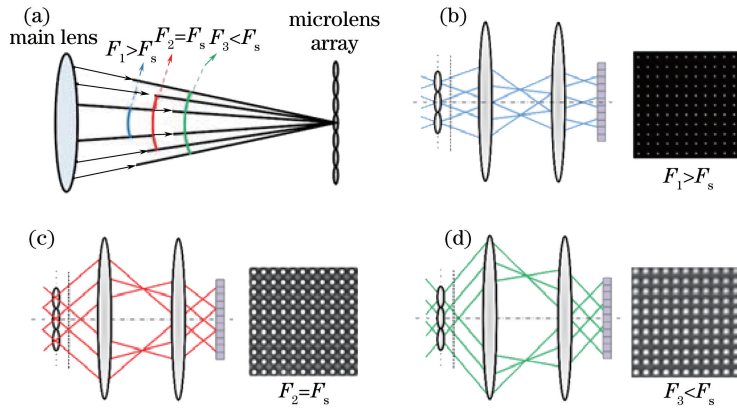


图3 主成像物镜与微透镜 F 数匹配示意图。(a) 主成像物镜 F 数为 F_1 、 F_2 和 F_3 的光线示意图；(b) 主成像物镜 F 数大于微透镜 F 数；(c) 主成像物镜 F 数等于微透镜 F 数；(d) 主成像物镜 F 数小于微透镜 F 数
Fig. 3 Matching illustration of F -number between main lens and microlens. (a) Schematic of light ray when F -number of main lens is F_1 , F_2 and F_3 ; (b) F -number of main lens is larger than that of microlens; (c) F -number of main lens is equal to that of microlens; (d) F -number of main lens is less than that of microlens

$$R_1 = \frac{d_F \cdot \omega}{D}, \quad (7)$$

若不考虑滤光片间的间隔,则波段数 R_s 为

$$R_s = \frac{D}{d_F}. \quad (8)$$

因此,对于相同光谱范围,为提高系统光谱分辨率应增加波段数即滤光片阵列数,但这必定导致同一光谱通道内包含的像素数减少,造成图像分辨率的降低。因此光谱分辨率和图像分辨率之间存在着制约关系。

3 光谱图像的校正

3.1 通道对应像素校正

在提取光谱图像过程中,根据微透镜阵列单元与探测器光敏面单元的空间对应关系,对二维数据矩阵进行重新采样和排列,即可获取对应光谱图像序列。理想情况下,“宏像素”间等间隔分布,并且间隔为整数像素,此时将像素以一定行列间隔提取拼接即可获得同一光谱通道对应的光谱图像,如图4所示。然而实际过程中,微透镜间隔与覆盖探测器像素大小不一定满足整数倍关系,同时微透镜阵列倾斜以及成像系统像差的影响,会造成“宏像素”不等间隔分布。若按照理想的提取方法复原光谱图像,会导致光谱通道间串扰,影响提取图像质量。

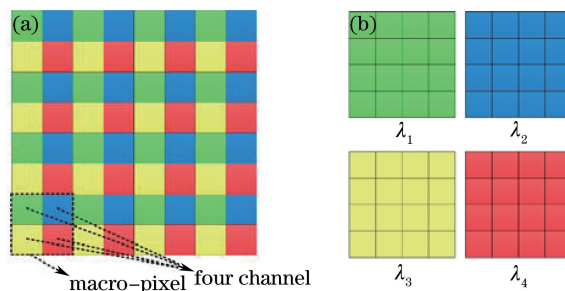


图4 多光谱图像获取过程示意图。(a) 探测器获取的多光谱光场图像示意图；(b) 经过处理得到的4幅多光谱图像
Fig. 4 Illustration of multispectral images acquiring progress. (a) Schematic of the image captured by the detector; (b) four multispectral images after processing

为精确提取各光谱通道信息,提出采用像素匹配的方法获取各光谱通道准确的位置分布矢量,进而精确提取光谱信息。在获取的平场校正图像中,选取中心区域内一物点对应的 $M \times M$ 窗口“宏像素”,记该“宏像

素”坐标为(0,0)。从该“宏像素”向左或向右依次选取 $M \times M$ 的“宏像素”与选定的(0,0)“宏像素”进行灰度匹配。在坐标为($m, 0$)的 $M \times M$ “宏像素”中选取灰度峰值点 $P_{(i_m, j_0)}$, 其中(i_m, j_0)为峰值点像素坐标在“宏像素”中的相对坐标, 坐标原点为“宏像素”左上角第一个像素, j_0 为事先标定的常量, 表示所有峰值点均在“宏像素”同一行, “宏像素”(0,0)中峰值点为(i_0, j_0)。记($m, 0$)相对(0,0)“宏像素”的对应灰度峰值点的偏移量为 q_m , 即对应“宏像素”内坐标($i_0 \pm q_m, j_0$); 同时有“宏像素”平移距离为 $|m|$, 则遍历一行 N 个“宏像素”单元, 对应相邻“宏像素”的平均间隔 P_{shift} 为

$$P_{\text{shift}} = \frac{1}{N} \sum_N \frac{q_{(m,0)}}{|m|}, \quad (9)$$

利用相同方法, 可获取平场图像中任意“宏像素”位置, 在此基础上精确定位每个光谱通道对应像素的位置, 实现各光谱通道信息的准确提取。

3.2 通道辐射光强校正

若在滤光片阵列中不添加滤光片, 则滤光片阵列仅为子孔径分割阵列, 同一窗口即“宏像素”中各通道灰度值应该相同。但由于受视场角以及微透镜阵列装调误差等因素影响, 各通道灰度值与理想情况存在偏差, 即像素亮度的响应具有不均衡特性, 因此需要进行辐射光强校正。平场校正中采用强度可调光源, 在探测器响应范围内, 记录不同辐射光强下每个像素位置光强大小, 在此用灰度值 $g(m, n, i, j)$ 进行表征, 其中(m, n)表征“宏像素”位置坐标, (i, j)表征像素在“宏像素”中的相对位置。则不同辐射下平均归一化光强为

$$\bar{G}(m, n, i, j) = \frac{\sum_k g(m, n, i, j)}{k \cdot g_M}, \quad (10)$$

得到光强校正因子

$$C_{m,n,i,j} = \frac{k \cdot g_M}{\sum_k g(m, n, i, j)}, \quad (11)$$

式中 k 为光源变换次数, g_M 为探测器响应最大灰度(响应峰值)。在光谱测量中, 对提取的通道光谱进行辐射光强校正

$$I'_{m,n,i,j} = C_{m,n,i,j} \times I_{m,n,i,j}, \quad (12)$$

式中 $I_{m,n,i,j}$ 为提取的光谱通道像素光强, $I'_{m,n,i,j}$ 为校正后光谱通道像素光强, 遍历即可得到校正后的多光谱图像。

4 实验与分析

4.1 实验装置

按照上述的基于光场成像的画幅式多光谱成像系统模型, 搭建了实验装置进行成像实验, 如图 5 所示。光学系统参数指标如下: 光谱范围为 400~600 nm, 波段数为 4, 单光谱通道的图像分辨率为 80 pixel × 60 pixel, 光谱分辨率优于 50 nm。

主成像物镜采用了商用 Nikon 镜头, 镜头和装置之间通过标准 F 转接环进行连接。滤光片阵列由 2 × 2 的

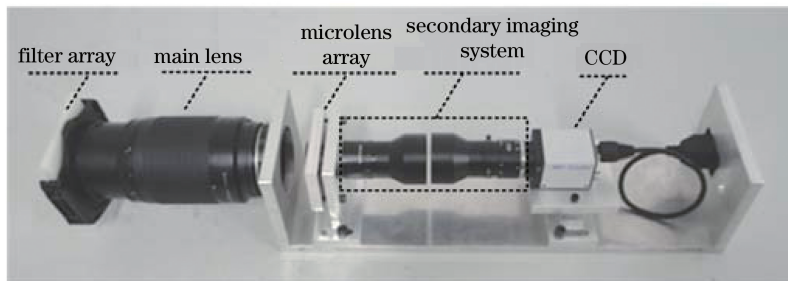


图 5 实验装置

Fig. 5 Experimental setup of the system

滤光膜阵列元件(400~450、450~500、500~550、550~600 nm)组成,安装在方片滤镜支架上,通过插片转接圈与主成像物镜连接。微透镜阵列(18-00060,SUSS公司,德国)阵列大小为10 mm×10 mm×0.7 mm,单元数为100×100,数值孔径为0.17。通过4个螺丝调节与成像物镜L2之间的距离,实现对微透镜阵列3个自由度方向上的微调。二次成像结构采用2个100 mm焦距成像物镜,构成完全对称的结构形式,使得中继成像系统工作在单位放大率下,自动校正彗差、畸变和垂轴色差。另外也可根据情况选择使用不同焦距的镜头,以获取不同的成像放大倍率。探测器采用面阵CCD(TXG14,Baumer公司,德国),分辨率为1392×1040,像素尺寸为6.45 μm。实验中使用的主成像物镜(AF 70-300 mm F4-5.6D, Nikon,日本)镜头使用超低色散玻璃,能有效地抑制色差,根据其调制传递曲线(MTF),30 lp/mm下MTF值超过63%;中继成像系统镜头(100 mm F2.8, Kowa,日本)中点分辨率为100 lp/mm,边缘分辨率为60 lp/mm。因此,相较于CCD的空间截止频率77.5 lp/mm,光学镜头能够保证在探测范围之内成像区域中间有较好的分辨率,但边缘对比度相对较低。

4.2 实验结果及分析

利用搭建的实验装置首先进行平场校正,完成通道光谱像素及辐射光强的校正。获取的平场校正图像如图6(a)所示,目标图像如图6(b)所示。

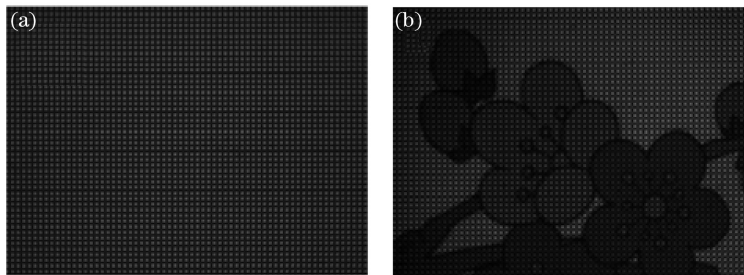


图6 (a)校正用的图片;(b)获取的目标图像(未加滤光膜)

Fig. 6 (a) Calculation image; (b) captured image without filters

利用本文所述的校正方法,对各光谱通道对应的像素进行精确定位,并进行光强校正,处理后得到的目标4个通道的图像如图7所示(提取4个图像为没有加滤光膜的情况)。图中可以看出,经过校正后,4个通道提取的图像清晰,并且光强分布具有较好的一致性。

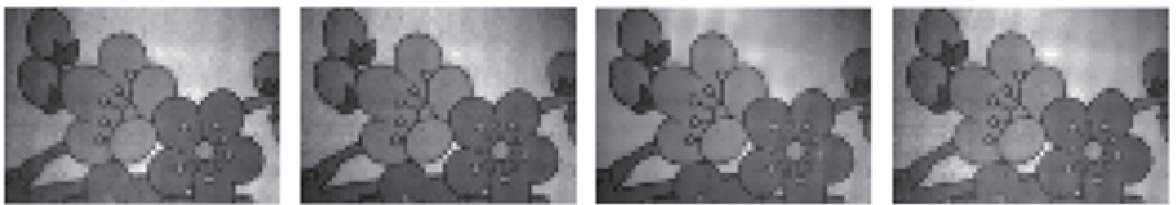


图7 校正后提取的4个通道的图片

Fig. 7 Four images extracted from the captured image after calculation

将滤光膜加入到孔径分割阵列中,并搭配相应的光谱图像重构算法,对室内目标进行画幅式多光谱成像实验,获取的实验结果如图8所示,其中图8(a)、8(b)为实验目标,图8(c)、8(d)为提取的4幅多光谱图像,表明该光场多光谱成像系统能够获取较为清晰的多光谱图像。本实验中由于采用滤光膜进行滤波,光谱通道间存在谱段重叠影响,一些颜色区域肉眼不好区分;同时受微透镜阵列工艺条件、器件参数和F数未能完全匹配等的影响,所成目标像中存在渐晕,影响光谱图像重建效果。通过光谱图像重构程序处理,实现了便携式多通道光谱的视频探测,该方法为多光谱成像技术的实现提供了新的技术途径。

5 结论

利用光场成像技术能够实现对目标的多光谱成像。基于光场成像的画幅式多光谱成像方法,采用二次

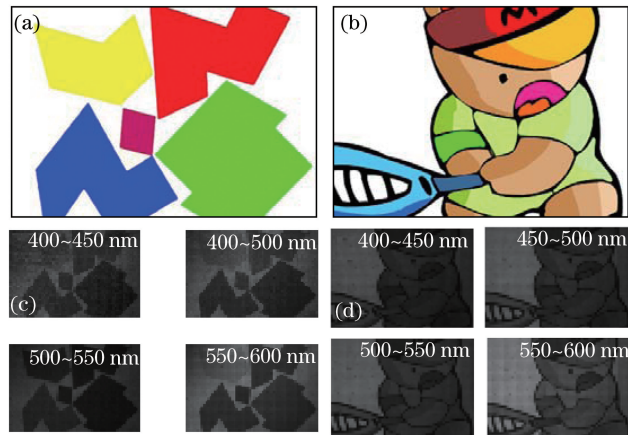


图 8 (a) (b) 探测目标图像; (c) (d) 提取的 4 幅光谱图像

Fig. 8 (a) (b) Images of experimental targets; (c) (d) multispectral images extracted from the captured images

成像的结构,避免了微透镜阵列与探测器光敏面的直接接触,实现了更为简单易调的光谱成像系统。研究了多光谱光场成像系统的成像原理,详细论述了二次成像的成像模型及系统优点。同时采用像素灰度匹配的方法实现了光谱通道信息的精确提取;并在不同光强条件下进行了灰度平场校正,减少通道灰度误差。按照改进后的多光谱光场成像系统模型研制了原理样机,对室内场景目标进行了光谱成像实验,实现了多通道光谱画幅式探测,获得了较好的实验结果。

参 考 文 献

- Garini Y, Young I T, McNamara G. Spectral imaging: Principles and applications[J]. Cytometry Part A, 2006, 69(8): 735-747.
- Wang Jincheng, Kuang Cuifang, Wang Yifan, *et al.*. Multispectral fluorescence microscopic imaging based on compressive sensing[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1204003.
王金成, 匡翠方, 王轶凡, 等. 基于压缩感知的荧光显微多光谱成像[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1204003.
- Wang Xuepei, Zhao Hongxia, Li Qinghui, *et al.*. Relevant fundamental research of colored artworks by multispectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1030003.
王雪培, 赵虹霞, 李青会, 等. 多光谱成像技术分析彩色艺术品的相关基础研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1030003.
- Cao Pengfei, Li Hongning, Luo Yanlin, *et al.*. Selection of feature bands for phaseolus vulgaris leaves based on multispectral imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011101.
曹鹏飞, 李宏宁, 罗艳琳, 等. 基于多光谱成像选取四季豆叶片的特征波段[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011101.
- Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying, *et al.*. Multispectral image acquisition system based on liquid crystal tunable filter [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 187-191.
杜丽丽, 易维宁, 张冬英, 等. 基于液晶可调谐滤光片的多光谱图像采集系统[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 187-191.
- Levoy M, Hanrahan P. Light field rendering[C]. Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, 1996: 31-42.
- Adelson E H, Wang J Y A. Single lens stereo with a plenoptic camera[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1992, (2): 99-106.
- Ren N, Levoy M, Brédif M, *et al.*. Light field photography with a hand-held plenoptic camera[J]. Computer Science Technical Report, 2005, 2(11): 1-11.
- Nie Yunfeng, Xiangli Bin, Zhou Zhiliang. Advances in light field photography technique [J]. Journal of Graduate University of Chinses Academy of Sciences, 2011, 28(5): 563-572.
聂云峰, 相里斌, 周志良. 光场成像技术进展[J]. 中国科学院研究生院学报, 2011, 28(5): 563-572.
- Yuan Yan, Zhou Yu, Hu Huanghua. Registration error analysis for microlens array and photosensor in light field camera

- [J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 123-126.
- 袁 艳, 周 宇, 胡煌华. 光场相机中微透镜阵列与探测器配准误差分析[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 123-126.
- 11 Zhou Yu, Yuan Yan, Hu Huanghua, *et al.*. Focusness evaluation for digital refocusing light field photography[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(6): 1094-1098.
- 周 宇, 袁 艳, 胡煌华, 等. 数字对焦光场成像清晰度评价方法研究[J]. 光子学报, 2010, 39(6): 1094-1098.
- 12 Horstmeyer R, Euliss G, Athale R, *et al.*. Flexible multimodal camera using a light field architecture[C]. 2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), 2009: 1-8.
- 13 Meng L, Sun T, Kosoglow R, *et al.*. Evaluation of multispectral plenoptic camera[C]. IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2013, 8660: 86600D.
- 14 Shroff K, Berkner K. High resolution image reconstruction for plenoptic imaging systems using system response[C]. Computational Optical Sensing and Imaging, 2012: CM2B. 2.
- 15 Meng L, Berkner K. System model and performance evaluation of spectrally coded plenoptic camera[C]. Imaging Systems and Applications, 2012: JW1A. 3.
- 16 Horstmeyer R, Athale R, Euliss G. Modified light field architecture for reconfigurable multimode imaging[C]. SPIE, 2009, 7468: 746804.
- 17 Zhou Z, Yuan Y, Xiangli B. Lightfield imaging spectrometer: Conceptual design and simulated performance [C]. Frontiers in Optics, 2010: FThM3.
- 18 Berkner K, Shroff S A. Design framework for a spectral mask for a plenoptic camera [C]. IS&T/SPIE Electronic Imaging, 2012, 8299: 82990A.
- 19 Skauli T, Torkildsen H E, Nicolas S, *et al.*. Compact camera for multispectral and conventional imaging based on patterned filters[J]. Applied Optics, 2014, 53(13): C64-C71.