

文章编号:1004-4213(2010)01-0071-5

基于液晶可调谐滤光片的便携式多光谱成像仪*

王新全^{1,2}, 黄旻¹, 高晓惠¹, 肖相国¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 选用商品化照相机镜头、液晶可调谐滤光片和单色面阵 CCD 相机, 将液晶可调谐滤光片置于由镜头和 CCD 相机组成的照相光路中构成便携式多光谱成像仪. 该多光谱成像仪能够在被动和主动光源下进行多光谱图像数据采集, 工作波长范围是 400~720 nm, 光谱分辨率为 10 nm. 建立了多光谱成像仪系统多光谱图像采集数值模型, 分析了误差源, 为系统定标提供了理论依据. 在自然光照条件下进行了盆景植物的多光谱图像采集试验, 重建出多光谱数据立方体, 绘制了典型目标点的光谱曲线.

关键词: 多光谱成像; 液晶可调谐滤光片; 数值模型; 数据立方体

中图分类号: TP73

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103901.0071

0 引言

多光谱成像技术是当前图像获取及处理的前沿技术. 由于能够获得同一景物多个光谱通道的图像, 并利用多个通道的图像数据组成多光谱图像数据立方体, 为图像处理提供更多的信息量, 在遥感、环境监测、食品安全、生物医疗、颜色信息处理等方面具有广泛的应用.

目前, 按照分光方式的不同, 多光谱成像技术主要有色散型、干涉型和滤光片型等. 色散型多光谱成像技术以棱镜或光栅作为色散元件, 将通过狭缝的入射光按波长分散开来, 再由成像系统将狭缝按波长成像在探测器的不同位置上; 干涉型以干涉仪作为色散元件, 利用双光束干涉原理获得入射狭缝的干涉图, 然后通过傅里叶变换从干涉图中复原出狭缝的光谱. 色散型和干涉型多光谱成像技术都是通过推扫或摆扫方式获得二维目标的三维光谱图像信息, 对平台的稳定性要求很高, 且在同一次曝光中获取所有波段光谱信息. 采用滤光片的多光谱成像系统是在照相系统光路中加入滤光片, 主要采用两种方式: 第一种是将多个相同的相机放置在一起, 镜头前分别放置不同波长的滤光片, 这种方式能够并行获取多个波长图像, 但是给图像配准带来困难, 且体积庞大; 第二种方式是将不同种滤光片安装在一个转轮上, 通过转轮来切换滤光片, 这种方式体积较大, 且需要机械结构, 比较耗时, 对结构稳定性要求

较高. 这两种采用滤光片的方式都可以根据系统的光谱响应来设置合适的曝光时间, 从而获得最大的信噪比, 但体积较大, 不易携带. 采用电调谐的液晶可调谐滤光片代替机械转轮, 可实现快速调谐波长, 相对于传统的滤光片, 具有体积小、重量轻、功耗小、调谐时间短且无运动部件的特点^[1-7]. 文中采用液晶可调谐滤光片 (Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF) 作为分光元件, 制作了多光谱成像仪, 具有体积小、便携的突出优点, 能够满足实验室及野外的多光谱图像采集工作.

1 系统设计

1.1 系统原理

滤光片型多光谱成像仪的工作原理为, 在照相光路中加入滤光片作为分光元件, 通过更换滤光片来获得不同的光谱通道. 以 LCTF 作为分光元件置于照相系统中, 以电调谐的方式改变通过中心波长, 每调整一次波长后相机曝光一次, 系统记录下该波段的二维图像数据, 然后再设定下一透过中心波长, 如此循环, 直到完成所有预定波长的图像采集任务, 将上述数据按照波长顺序组合起来即可获得目标的包括二维图像信息和一维光谱信息的光谱图像数据立方体.

1.2 系统结构

基于 LCTF 的便携式多光谱成像仪由光学镜头、LCTF 和单色 CCD 相机三部分组成. 光学镜头和 CCD 相机组成照相系统, LCTF 作为分光元件与照相系统的组合有两种可能的方式^[3], 一种是将 LCTF 置于镜头的前方, 如图 1(a), 另一种是将

*“西部之光”项目资助

Tel: 029-88887632

Email: wangxinquan@opt.ac.cn

收稿日期: 2009-02-26

修回日期: 2009-06-23

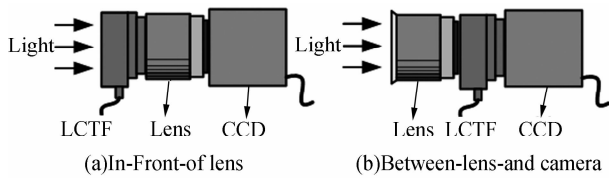


图1 基于LCTF的多光谱成像仪结构

Fig.1 Layout of the multi-spectral imager based on LCTF
LCTF 置于镜头和 CCD 相机之间,如图 1(b).

这两种连接方式各有优缺点.将 LCTF 置于镜头的前方的优点是:镜头直接与 CCD 相机连接,能够准确调焦使成像清晰;缺点是:由于 LCTF 有一定的厚度,当镜头的通光口径大于 LCTF 的孔径时会有光能损失并产生渐晕,LCTF 的重量也会影响成像系统的设计,为保证光路共轴,必要的情况下需要对 LCTF 加上支撑机构.将 LCTF 置于镜头和相机之间的优点是:LCTF 的重量与相机直接相连,不会对机械结构产生影响,由于镜头和焦平面之间的光束口径通常小于镜头的入瞳口径,LCTF 的口径可以稍微小一些;缺点是:由于商品化的镜头是按照与相机直接相连的情况设计的,当镜头和相机之间加入有一定厚度的 LCTF 后,会使图像产生畸变、色差等,并改变系统的放大率,镜头的刻度值将不再准确等.这两种方案的共同特点是可以选用有标准接口的商用镜头和 CCD 相机.由于选用 LCTF 的通光口径有限,文中采用第二种结构方式.

1.2.1 LCTF

LCTF 基于偏振光的干涉原理而制成,是一种 Lyot 型可调谐双折射器件,由依次排列的许多级级联而成,每一级包含有两个相互平行的偏振片,中间夹着液晶延迟片.当光源通过其中一级单元时,由于沿着液晶快、慢轴传播的两束光振动方向相同,而位相差一定,因此发生干涉作用,干涉波长取决于 e 光和 o 光.光通过液晶产生光程差(相位差),由于双折射液晶造成的相位差可以通过电压进行调节,即通过施加不同的电压可以使其不同的光发生干涉,可以实现不同波长的扫描,因此液晶延迟片选择了可以透过的波长,真正起调谐作用的是液晶元件^[2].

选用了美国 CRI 公司的 VariSpec™ VIS LCTF,工作光谱范围是 400~720 nm,半峰全宽为 10 nm,工作孔径为 20 mm,可通过电调谐获得 400~720 nm 范围内任意中心波长的半峰全宽为 10 nm 的透过率曲线.图 2 为该 LCTF 在 400~720 nm 范围内间隔 10 nm 的各中心波长的光谱透过率曲线(来自 CRI 公司产品出厂检测报告单),在 710 nm 处具有最高的透过率,接近 65%,而在 410 nm 处不到 5%,这将最终导致短波方向的动态范围受到限制,在实验中通过增加短波方向的曝光

时间来补偿.LCTF 通过外置控制盒进行控制,通过 USB 接口与计算机连接,利用 COM 接口进行双向通信,传输控制指令和状态请求.

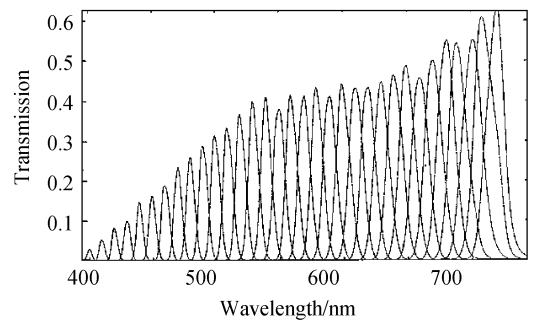


图2 VariSpec™ VIS LCTF 光谱透过率曲线

Fig.2 Spectral transmittances of the VariSpec™ VIS LCTF

1.2.2 单色面阵 CCD 相机

选用了 Point Grey Research 公司 Grasshopper 单色面阵 CCD 相机,该相机采用 Sony ICX285 CCD 芯片,2/3 英寸,1 392×1 040 有效像素,在 400~720 nm 范围内有较高的光谱响应度,能够获取 140 万像素高分辨多光谱图像,同时具有在感兴趣区域开窗功能.该相机采用标准 C 接口,可以与 LCTF 通过 C 口适配器连接,采用火线接口与计算机相连,可实现相机供电以及参量控制和多光谱图像数据的快速获取、显示和保存.

1.2.3 镜头

选用商品化 Nikon AF NIKKOR 50 mm 镜头,F 接口,能够与配备 F 接口适配器的 LCTF 连接,通过调焦可以实现无穷远合焦,成像视场角为 10.2°×7.7°,对焦环标注需重新定标后修改,镜头光圈数取最小值,在多光谱图像采集过程中不能改变.

由 LCTF、单色 CCD 相机和镜头可组成便携式多光谱成像仪,配备便携式电脑和数据采集卡等控制与数据处理部件即可组成便携式多光谱成像系统,如图 3.

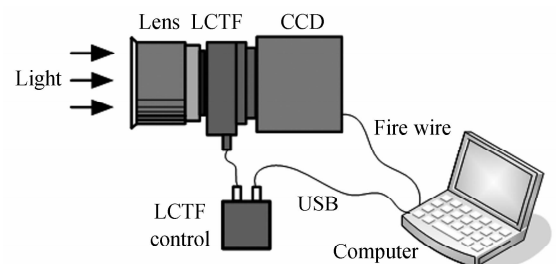


图3 基于LCTF的便携式多光谱成像系统

Fig.3 Schematic view of portable multispectral imager based on LCTF

2 数值模拟分析

2.1 基于 LCTF 的多光谱成像系统的数值模型

基于 LCTF 的多光谱成像系统的图像获取过

程如图 4,整个系统包含有光源、目标和多光谱成像仪,其中多光谱成像仪又由镜头、LCTF 和单色面阵 CCD 相机组成.光源发出的光照射在被拍摄目标上,目标表面将一部分光反射,利用多光谱成像仪可记录下目标的单波长二维图像,通过调节 LCTF 的透过波长,可得到一系列不同波长单色图像,将这些单色二维图像按波长顺序排列组成三维的多光谱图像立方体^[5-6].

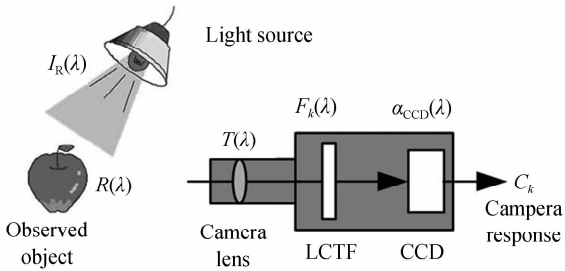


图 4 多光谱相机获取多光谱数据过程示意图
Fig. 4 Schematic view of the multispectral image acquisition process

假定上述为一线性光电转换系统,那么 CCD 每个像素点的响应可表示为(假定 CCD 各像素点光谱响应曲线一致,像素点之间没有差别)

$$C_k = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} [I_R(\lambda)R(\lambda)T(\lambda)F_k(\lambda)\alpha(\lambda)]d\lambda + n_k \quad (1)$$

式中 C_k 表示 CCD 相机在第 k 个波长通道的输出值, $I_R(\lambda)$ 为光源的光谱功率分布, $R(\lambda)$ 为目标表面光谱反射率, $T(\lambda)$ 为镜头的光谱透过率, $F_k(\lambda)$ 为 LCTF 第 k 个波长通道的光谱透过率, $\alpha(\lambda)$ 为 CCD 的相对光谱响应. n_k 为第 k 个波长通道的加性噪声.

在采集过光谱图像过程中, LCTF 不可能也没有必要在整个光谱范围内连续调谐,而是在等间隔的离散波长处进行图像采集.由于该液晶光阀在整个波长调谐范围内的半峰全宽为 10 nm,当以 10 nm 等间隔进行波长调谐时,可以认为 CCD 响应值为该中心波长处的光谱响应值,误差可以忽略掉.此时,在 400~720 nm 范围内,以 10 nm 等间隔调谐可以获得 33 个单波长的二维图像, CCD 的像素响应值可改写为

$$C_k = I_R(\lambda_k)R(\lambda_k)T(\lambda_k)F_k(\lambda_k)\alpha(\lambda_k) + n_k \quad (2)$$

$(k=1, 2, \dots, 33)$

对于多光谱成像仪本身来说,镜头光谱透过率、LCTF 和 CCD 的光谱响应经标定后都是固定值,因此,式(2)可改写为

$$C_k = I_R(\lambda_k)R(\lambda_k)\omega(\lambda_k) + n_k \quad (3)$$

式中 $\omega_k(\lambda) = T(\lambda)F_k(\lambda)\alpha(\lambda)$, 代表多光谱成像仪第 k 个通道的光谱响应函数,其中各个参量可通过实验测量获得.噪声 n_k 可通过消除暗电流、相对辐射

定标处理等方法进行去除,经修正后式(3)可近似为理想情况,即

$$C_k = I_R(\lambda_k)R(\lambda_k)\omega(\lambda_k) \quad (4)$$

在实际中,多光谱成像技术主要有两个方面的应用.一种是直接采集目标多光谱图像并对其进行图像处理,另一种是在严格的光照条件下,获取目标的多光谱图像,根据光源光谱功率分布和多光谱成像仪的光谱响应函数来重建目标的光谱反射率.对于第一种情况,对光源没有严格要求,利用多光谱成像仪采集多光谱图像数据,即 CCD 输出图像数据 C_k 经过校正后即可作为目标的多光谱图像,再根据需要进行进一步处理.对于第二种情况,需要在已知光源下进行多光谱图像采集,由式(4)可知,目标表面的光谱反射率可以表示为

$$R(\lambda_k) = \frac{C_k}{I_R(\lambda_k)\omega(\lambda_k)} \quad (5)$$

2.2 系统误差分析

由式(1)可知,在多光谱成像仪成像过程中存在加性随机噪声.对各种噪音源的分析有助于对系统进行有效的定标处理,修正多光谱图像数据.

多光谱成像仪主要由镜头、LCTF 和单色 CCD 相机组成,与 CCD 有关的噪音可分为两类,包括时间的和空间的.时间噪音包括散粒噪音、输出放大噪音和暗电流散粒噪音,可通过帧频平均来降低,而空间噪音包括光子响应非均匀性和暗电流非均匀性噪音,可通过帧频相减或增益/偏置校正技术来去除.另外,CCD 将模拟信号转换为数字信号时也会产生量化误差.由图 2 可以看出, LCTF 的光谱透过率在短波方向上明显小于长波方向,倘若采用相同的光圈数和曝光时间来采集图像,那么在短波方向上信噪比会比较低.另外 CCD 的光谱响应在 400~720 nm 区间也不相同,镜头的光谱透过率曲线也是波长的函数,由于多光谱成像仪的光谱响应与镜头、LCTF 和 CCD 相关,可将其视为一个整体,通过实验测出其综合光谱响应.由于在一次拍摄过程中光圈出不能改变,因此可以根据综合响应值确定曝光时间,在光谱响应值较低的波长处增加曝光时间,通过这种方式可以有效的提高信噪比.

当该多光谱成像仪与光源组合测量目标表面光谱反射率时,为减小误差,对光源有较为严格的要求,要求光源稳定性好,在整个测量光谱范围内有比较均匀的光谱功率分布,必要时光源前方应加入滤光片,滤除紫外光,避免荧光的影响.

3 试验及结果

在自然光照条件下进行了多光谱图像采集实

验. 目标为盆景植物, 光谱范围是 440~720 nm, 采样波长间隔为 10 nm, 共 29 个谱段, 拍摄距离为 1 m. 图 5 为采集到的光谱图像数据立方体及典型目标的光谱曲线, 其中(a)为目标的光谱图像数据立

方体, 由 ENVI 软件合成, (b)为背景的光谱曲线, (c)为盆景花朵的光谱曲线, (d)为盆景植物叶子的光谱曲线.

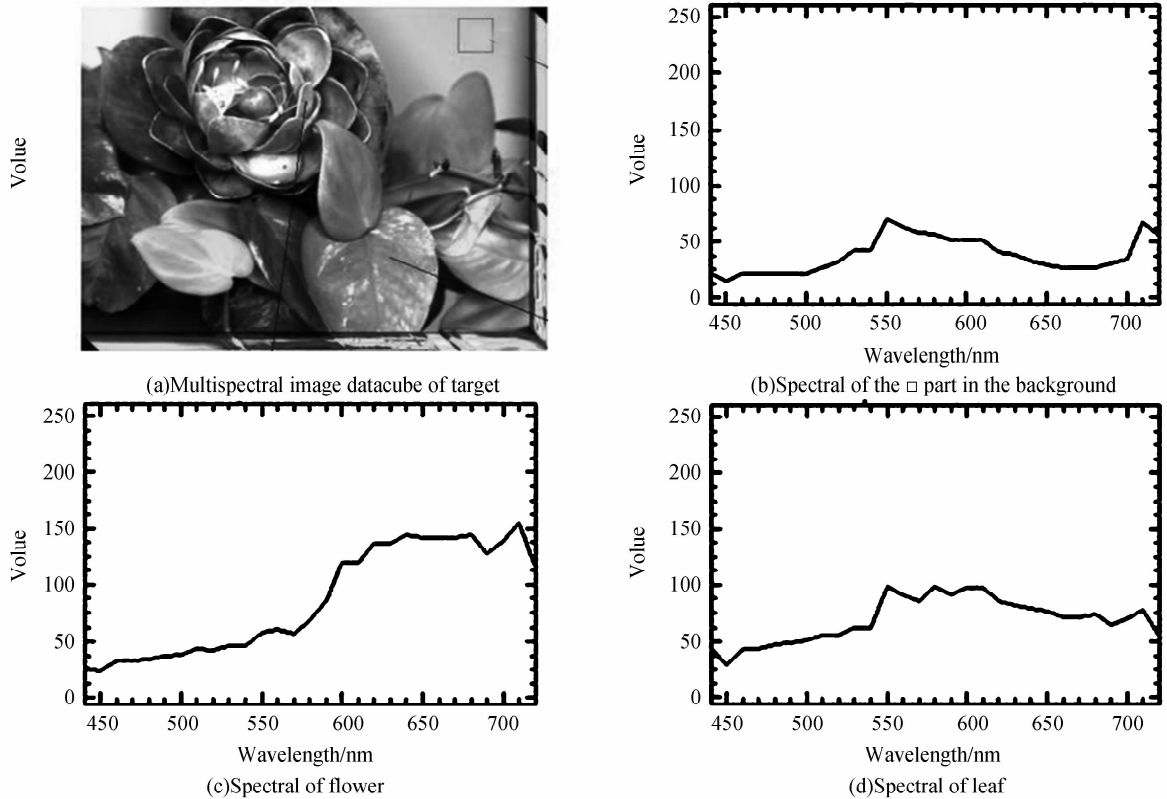


图 5 目标的光谱图像数据立方体和典型目标的光谱

Fig. 5 Multispectral image datacube of target and the spectral of the representative targets

4 结论

利用商品化的照相镜头、LCTF 和单色面阵 CCD 相机组成便携式多光谱成像仪, 该多光谱成像仪能够在主动或被动光源下获得 400~720 nm 范围内光谱分辨率为 10 nm 的光谱图像, 建立了获取多光谱图像序列的数学模型, 分析了误差来源, 为该多光谱成像仪标定提供了理论依据. 对自然光下的目标进行了多光谱图像数据采集试验, 获取了 440~720 nm 的可见光范围内间隔为 10 nm 的 29 个波长的多光谱图像序列, 成像质量良好, 经过初步数据处理组合成光谱图像数据立方体, 绘制了 3 个典型区域的光谱曲线. 利用该便携式多光谱成像仪可以方便地在野外进行多种多光谱图像采集实验; 在室内, 配备标准光源, 可进行主动多光谱成像实验, 利用光源光谱信息和系统光谱响应反演出目标的光谱反射率.

参考文献

[1] ZHAO Jing, PANG Qi-chang, MA Ji. Design of continuous spectrum imaging apparatus based on LCTFs [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 758-762.

赵静, 庞其昌, 马骥, 等. 基于液晶滤波器的连续光谱成像测试装置[J]. 光子学报, 2008, **37**(4): 758-762.

- [2] ZHANG Dong-ying, HONG Jin, TANG Wei-ping, *et al.* Design of hyperspectral imaging system based on LCTF [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(10): 2455-2458.
张冬英, 洪津, 汤伟平, 等. 基于 LCTF 调谐的高光谱成像系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(10): 2455-2458.
- [3] DU Pei-sheng, GUO Jing, DONG Qian-min. Application of liquid crystal tunable filter in multispectral imager [J]. *Infrared*, 2007, **28**(11): 4-8.
杜陪胜, 郭靖, 董前民. 液晶可调谐滤光片及其在光谱仪上的应用[J]. 红外, 2007, **28**(11): 4-8.
- [4] MIGUEL A, ÁLVAREZ L, JAVIER H A, *et al.* Developing an optimum computer-designed multispectral system comprising a monochrome CCD camera and a liquid-crystal tunable filter [J]. *Appl Opt*, 2008, **47**(24): 4381-4390.
- [5] MIYAZAWA K, MARKKU H K, TOYOOKA S. Rewritable broad-band color filter for spectral image analysis[J]. *Opt Rev*, 2001, **8**(2): 112-119.
- [6] HARDEBERG J Y, SCHMITT F, BRETTEL H. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter[J]. *Opt Eng*, 2002, **41**(10): 2532-2548.
- [7] HAHIWEG C, ROTHE H. Spectroscopic imaging from 400 nm to 1 800 nm with liquid crystal tunable filters[C]. *SPIE*, 2007, **6503**: 650307.

Portable Multispectral Imager Based on LCTF

WANG Xin-quan^{1,2}, HUANG Min¹, GAO Xiao-hui¹, XIAO Xiang-guo¹

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: A new type of portable multispectral imager consisting of off the Shelf focal plane arrays CCD camera, camera lens and Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF) is presented. The LCTF used as a dispersion element is placed between the camera lens and CCD. This multispectral imager can perform multispectral image data acquisition experiment under active and passive illuminating condition, the spectrum range is 400~720 nm, and the spectral resolution is 10 nm. The numerical model of multispectral image acquisition is formulated, and the source of error is analyzed. A multispectral image data acquisition experiment under natural lighting condition is carried out, the target is a plant in pot, a multispectral image datacube is constructed and the spectrum of typical object point is illustrated.

Key words: Multispectral imaging; Liquid Crystal Tunable Filter (LCTF); Numerical model; Datacube



WANG Xin-quan was born in 1982. Now he is pursuing Ph. D. degree at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, CAS. His current research interests focus on spectral imaging and data processing technology.