

文章编号: 1001-4888(2022)05-0597-13

CCD/CMOS 彩色数字相机颜色串扰效应研究^{*}

上官志浩, 周士潮, 马少鹏

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 彩色数字相机的图像通道分离原理在单相机三维变形测量以及温度、变形同步测量等实验力学领域中有重要应用。在进行 R、G、B 通道分离时, 颜色串扰效应会显著影响测量的精度。采用 3CCD/CMOS 彩色相机和拜尔彩色相机进行滤光拍摄对比实验, 发现拜尔彩色相机中存在较为严重的颜色串扰效应, 而 3CCD/CMOS 彩色相机基本无此效应。基于两种彩色数字相机的成像原理与特点, 结合其光谱响应特性, 进行了成像模拟和色彩还原插值模拟。研究结果表明, 相机的光谱响应特性是颜色串扰效应产生的关键因素, 而后处理色彩插值过程对其影响较小。上述研究结果可为基于图像通道分离的高精度测量设备研制提出改进方向和建议。

关键词: 3CCD/CMOS 彩色相机; 拜尔彩色相机; 颜色串扰; 光谱响应特性; 色彩插值

中图分类号: TH744

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-22-070

0 引言

由于 CCD(Charge Coupled Device)/CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)传感器只能响应光场的强度, 无法记录物体的颜色信息, 彩色数字相机一般需要在成像系统中加装分光棱镜装置或彩色滤波阵列, 以完成对颜色信息的过滤和分类^[1, 2], 实际应用中这两种方式分别对应 3CCD/CMOS 彩色相机和拜尔彩色相机的成像模式^[3]。3CCD/CMOS 彩色相机成像系统由一个三色分光棱镜和三个独立的 CCD/CMOS 传感器组成, 每个 CCD/CMOS 传感器分别接收分光棱镜过滤的红、绿和蓝颜色信息, 并产生 R、G 和 B 单色通道数据, 最终合成为真彩色图像。拜尔彩色相机中仅装一个 CCD/CMOS 传感器, 通过传感器表面覆盖的彩色滤波阵列, 过滤单一颜色信息至传感器像素点, 随后利用色彩还原手段重建三维颜色信息, 三通道颜色数据最终合成“伪”彩图像。拜尔彩色相机仅需单片图像传感器即可获得全彩图像的设置, 降低了相机的设计难度与制造成本, 因此在使用彩色图像进行多通道测量的研究中最常见。然而, 拜尔彩色相机通常会降低图像的物理分辨率^[4], 在高分辨率要求领域, 如专业的影视拍摄, 需采用 3CCD/CMOS 彩色相机。此外, 拜尔滤色镜的滤光性质及色彩重建手段会导致通道间颜色信息重叠, 极有可能产生颜色串扰现象^[5], 这对于有高精度测量需求的特殊专业领域极为不利。

在光测实验力学研究领域, 现代高速高分辨率彩色数字相机已成为十分重要的图像获取工具^[6-8]。围绕彩色数字相机获取三维颜色通道的能力, 科研人员巧妙地将单个通道图像分离出来做进一步信号处理, 实现了单彩色相机多参量同时测量的技术手段^[9]。如 Huang 等^[10]提出的双色法理论, 以 R、G 通道图像测温度, B 通道图像测变形, 实现了温度与变形的同步测量, 目前该理论已在航空航天、燃气轮机

^{*} 收稿日期: 2022-03-25; 修回日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(11727801, 12102257)和电子元器件可靠性物理及其应用技术重点实验室开放基金课题(02022022004)资助

通信作者: 马少鹏(1974—), 男, 博士, 教授。主要研究领域: 光测实验力学。Email: mashaopeng@sjtu.edu.cn

等高温材料的变形测量中得到广泛应用^[11]。然而,已有研究指出,通道间颜色串扰产生的“伪强度”对温度的测量会产生严重影响,同时造成 B 通道中图像相关匹配失败,进而影响变形场的计算精度^[12]。此外,根据彩色相机的通道分离特性,并结合分光光路与颜色光源等设置,学者们还发展了单彩色相机三维数字图像相关方法和电子散斑干涉三维变形测量等^[13, 14],这些技术都十分依赖于相机的图像通道分离方法。在采用普通彩色相机即拜尔彩色相机时,通道间颜色串扰可能会在立体匹配中引起较大的系统误差,甚至导致匹配失败,对于实验研究和工程应用往往是难以接受的。颜色作为评价成像质量的重要指标,在工业测量中有着严格的标准。彩色数字相机中的颜色失真、颜色串扰等问题,对工程测量有着难以预估的影响,因此,充分了解彩色数字相机的颜色串扰现象,对科研实验及工程应用具有较高的理论价值与应用前景。

本文首先对比 3CCD/CMOS 彩色相机和拜尔彩色相机的结构特点,分别介绍了其彩色成像原理与优势,并分析了相机各通道间颜色串扰效应的产生原因。然后通过滤光拍摄对比实验,发现拜尔彩色相机中存在颜色串扰效应,而 3CCD/CMOS 彩色相机无此效应的结论。最后进行了相机的光谱响应特性模拟和色彩还原插值模拟,基于此总结了颜色串扰效应的产生原理与影响因素。本文研究结果可为应用图像通道分离的高精度测量设备研制提供改进建议。

1 CCD/CMOS 彩色相机成像原理与颜色串扰效应原因分析

1.1 拜尔彩色相机构造及成像原理

如引言所述,拜尔彩色相机采用单个 CCD/CMOS 芯片进行光电转换,由于 CCD/CMOS 传感器只能接收光强,通常使用一种 R、G、B 规律排布的拜尔滤色镜覆盖在 CCD/CMOS 传感器表面,以过滤获取颜色信息,滤光点和像素位置一一对应,如图 1(a)所示。拜尔滤色镜基于人眼对绿色信息较为敏感的原理,滤色器分布为 50%绿色、25%红色和 25%蓝色,根据排列方式的不同分为多种拜尔模板(RG-GB、BGGR、GRBG 和 GBRG 等)。拜尔滤色镜的过滤使得传感器上每个像素只能记录一种颜色信息,为得到全色图像,通常需要根据周围像素的颜色信息进行插值,这一过程称为去马赛克。如图 1(b)所示,在以 2×2 为感光子单元的 RGGB 采样模式中,通过对奇数间距的 B、G 和偶数间距的 R、G 进行过滤采样,再采用插值恢复以获取颜色信息。随着成像传感器和优化算法的改进,拜尔相机的成像质量得到了显著提高^[15]。图 1(c)展示了拜尔滤色镜的颜色过滤及插值生成“伪”彩图像的完整过程。

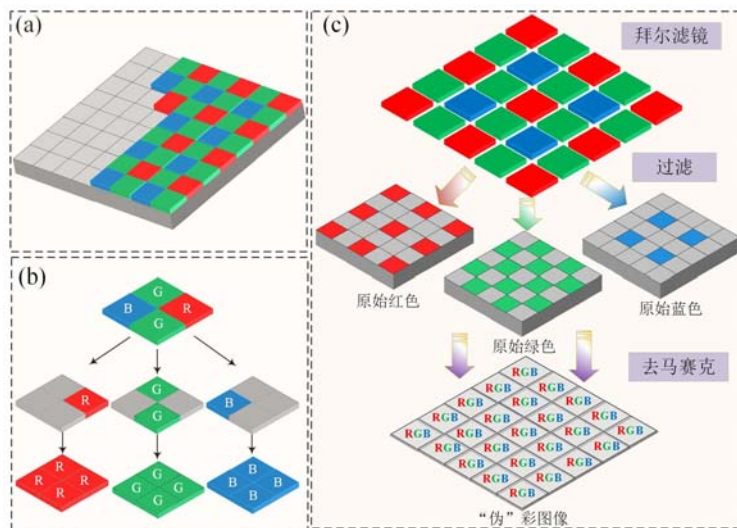


图 1 拜尔彩色相机成像原理: (a) 拜尔滤色器阵列; (b) 颜色过滤与恢复; (c) “伪”彩图像成像过程

Fig. 1 Bayer color camera imaging principle: (a) Bayer color filter array;

(b) color filtering and restoration; (c) pseudo-color image imaging process

相机的光谱响应曲线是反映物体光谱信息的一种重要指标,描述了各通道对不同波长光的相对响应强度。图 2 展示了一种典型拜尔彩色相机的光谱响应曲线,三条曲线分别代表相机三通道对波长的

响应情况,不同波长光的通道响应强度不一。从图 2 中可看出,拜尔光谱曲线中存在较多的重叠响应区域,当相应通道采集到不需要的信号时,即会产生颜色串扰^[14]。此外,在进行颜色信息重建的去马赛克过程中,在颜色或亮度突变处会产生噪声,并于图像边缘及细节处出现较大误差,色彩插值过程亦可能会带来颜色串扰效应^[12]。对于光谱区分要求较高的测量技术,这些额外信号的重叠将造成通道污染,降低测量精度。

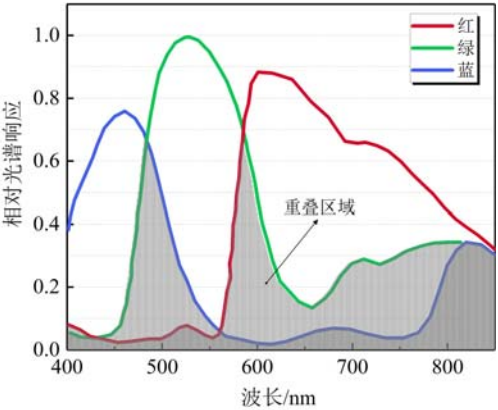


图 2 拜尔彩色相机光谱响应曲线

Fig. 2 Bayer color camera spectral response curves

1.2 3CCD/CMOS 彩色相机构造及成像原理

3CCD/CMOS 彩色相机由三个独立的图像传感器和三色分光棱镜组成,每个芯片只能接收一种颜色的光,三个 CCD/CMOS 同频同步工作。图 3 展示了 3CCD/CMOS 彩色相机内部的棱镜技术及成像原理。当一束白光进入相机内部后,经棱镜折射分离,将光谱分为红色、绿色和蓝色区域,不同颜色区域的光随即到达指定的 CCD/CMOS 传感器进行光电转换,在各通道中形成单色数据并最终合成为真彩色图像。

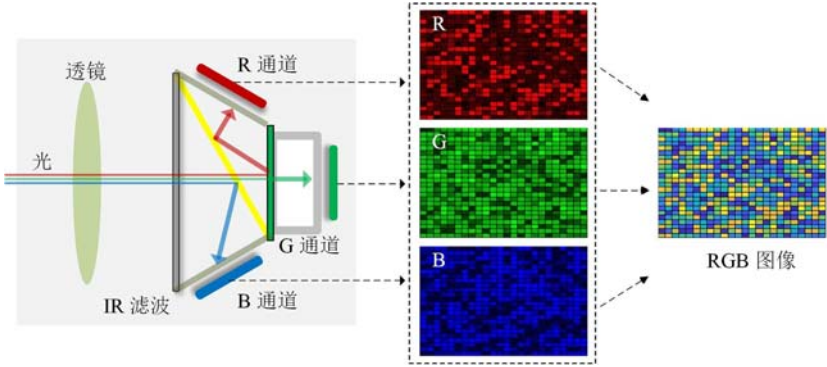


图 3 3CCD/CMOS 彩色相机成像原理

Fig. 3 3CCD/CMOS color camera imaging principle

棱镜分光技术使得各通道保有真实完整的色彩深度与对比度,因此每个像素均可完整捕捉真实色彩信息。同时,棱镜块顶部配有红外截止滤光片,可将红外光和可见光有效分开,使得各通道中信号源较为纯正,从而可提供更好的色彩准确度和空间精度。图 4 展示了 3CCD/CMOS 彩色相机的光谱响应曲线,由图可知各通道的区分性较好,几乎无光谱响应重叠,光谱可识别性较好,大大降低了各通道间的颜色串扰程度。同时,3CCD/CMOS 彩色相机不需要对颜色采样缺失进行插值,因此在各通道中基本不会产生颜色串扰效应。

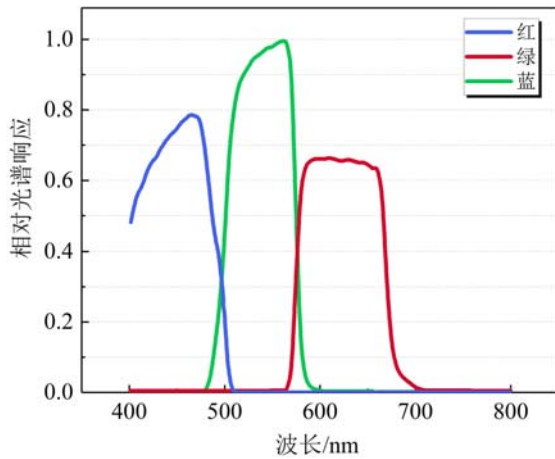


图 4 3CCD/CMOS 彩色相机光谱响应曲线

Fig. 4 3CCD/CMOS color camera spectral response curves

器的光电转换能力将光信号转化为电信号。最终通过放大、模/数转换等,得到相机的像素输出灰度值:

$$\mu = \frac{GA\pi t_{\text{exp}}}{4F^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K(\lambda) \eta(\lambda) L(\lambda) \lambda d\lambda \quad (2)$$

式中: $\eta(\lambda)$ 为传感器量子效率; G 为传感器增益; A 为像元尺寸; h 为普朗克常数; c 为真空中光速; t_{exp} 为传感器曝光时间。

式(2)表征了外界光能量至相机输出灰度值的基本映射模型。一般情况下,传感器量子效率 $\eta(\lambda)$ 与镜头光谱透过率 $K(\lambda)$ 的乘积即为相机的绝对光谱响应,同时取相机的单色响应值与单色辐射通量 $P(\lambda)$ 的相对比值表示相机的相对光谱响应函数 $R(\lambda)$:

$$R(\lambda) = \frac{K(\lambda) \eta(\lambda)}{P(\lambda)} = \frac{4F^2 hc \mu}{GA\pi t_{\text{exp}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P(\lambda) L(\lambda) \lambda d\lambda} \quad (3)$$

相机 R、G、B 各通道的光谱响应模型可简单描述为

$$\begin{cases} \mu_R = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_R(\lambda) L_R(\lambda) d(\lambda) \\ \mu_G = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} R_G(\lambda) L_G(\lambda) d(\lambda) \\ \mu_B = \int_{\lambda_5}^{\lambda_6} R_B(\lambda) L_B(\lambda) d(\lambda) \end{cases} \quad (4)$$

式中, μ_R 、 μ_G 和 μ_B 表示三通道像素输出; $R_R(\lambda)$ 、 $R_G(\lambda)$ 和 $R_B(\lambda)$ 表示三通道中的光谱响应, $L_R(\lambda)$ 、 $L_G(\lambda)$ 和 $L_B(\lambda)$ 表示辐射亮度; $d(\lambda)$ 表示单位波长微变量。

从式(4)可看出,各通道的光谱响应决定像素数据的输出。对于拜尔彩色相机,图像传感器上覆盖的滤色镜影响着相机的光谱表达。拜尔滤色镜的制造工艺通常有染色法、印刷法、电镀法和喷墨法等^[17],这些方法的滤色手段均基于彩色颜料或染料着色剂,它们具有较高的色饱和度及透过率,峰值波长清晰,但存在着光谱较宽的问题^[18],导致其无法较好地地区分颜色波段,从而在相机各通道间出现光谱响应重叠。从图 2 中可以看出,拜尔彩色相机的光谱响应曲线重叠较为严重,当进行单通道表示时,颜色在通道间的串扰具有不确定性。

与拜尔彩色相机相比,3CCD/CMOS 彩色相机的优势在于能直接将颜色信息分离为 R、G、B 三个分量,并导向三个精确对齐的 CCD/CMOS 传感器,从而进行独立感光成像。分光棱镜的每个棱镜块上均配有二向色硬质涂层,其透射特性和镀膜特性可产生更陡的光谱曲线。从图 4 中可以看出,3CCD/CMOS 彩色相机具有较为独立的光谱感应波段,可最大限度地减少由色彩串扰引起的不确定性。相机光谱响应特性是颜色串扰产生的关键因素。下文将针对这一原因进行实验验证。

1.3 两种制式彩色相机颜色串扰原因分析

拜尔彩色相机和 3CCD/CMOS 彩色相机内部结构及成像原理的差异,是导致两种制式彩色相机颜色串扰特征不同的关键。相机的光谱响应曲线差异即成为最主要的影响特征。

相机光谱响应特性的测定一般基于外界光能量与相机输出灰度值之间的映射,该映射主要包括两个过程模型。首先是光能量传递模型,即光信号在传感器像元上产生辐射照度^[16]:

$$E(\lambda) = \frac{\pi K(\lambda) L(\lambda)}{4F^2} \quad (1)$$

式中: λ 为波长; $E(\lambda)$ 为辐射照度; $K(\lambda)$ 为镜头光谱透过率; $L(\lambda)$ 为辐射亮度; F 为光圈数。

其次是传感器物理模型,即根据图像传感

2 颜色串扰验证实验

2.1 实验方案

采用滤光拍摄方案,并设置对照组和实验组,分别验证拜尔彩色相机和 3CCD/CMOS 彩色相机中的颜色串扰效应。实验系统示意图如图 5 所示,测试系统包括:图像采集设备为一个 3CMOS 彩色相机(AP-1600T-USB,JAD)和一个拜尔彩色相机(UC60);滤光设备为红、绿和蓝色带通滤波片(中心波长分别为 650nm、540nm 和 450nm;半带宽均为 30nm);拍摄物选择纯色物体(红板、绿板和蓝板),使得相机在拍摄时具有较好的光谱响应。实验采用亮室中的自然光进行充足照明。

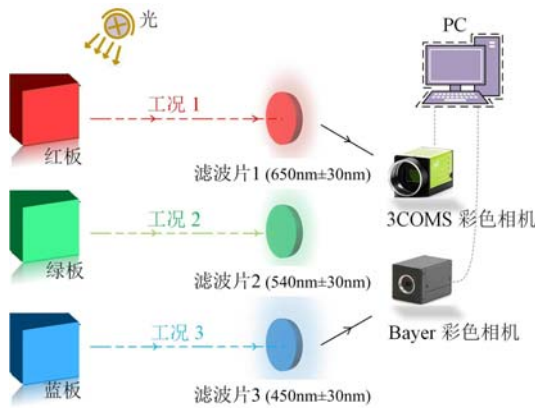


图 5 实验系统示意图

Fig. 5 Experimental system diagram

实验方案见表 1。实验具体流程为:在相机镜头前分别放置红、绿和蓝色带通滤波片,并依次拍摄红、绿和蓝板进行图像采集。纯色物体的发射光谱较为集中,同时由于带通滤波片的滤波效果,因此保证了特定波长段到达相机内部。从图 6 可直观地看出 3CMOS 彩色相机光谱响应曲线在滤波片的带通范围内没有任何重叠,而拜尔彩色相机光谱响应曲线在滤波片带通范围内仍有较大重叠。

表 1 实验方案

Tab. 1 Experimental conditions

实验工况	滤波片	拍摄物体	彩色相机
工况 1	滤波片 1 (650nm±30nm)	红板	3COMS 彩色相机、拜尔彩色相机
工况 2	滤波片 2 (540nm±30nm)	绿板	
工况 3	滤波片 3 (450nm±30nm)	蓝板	

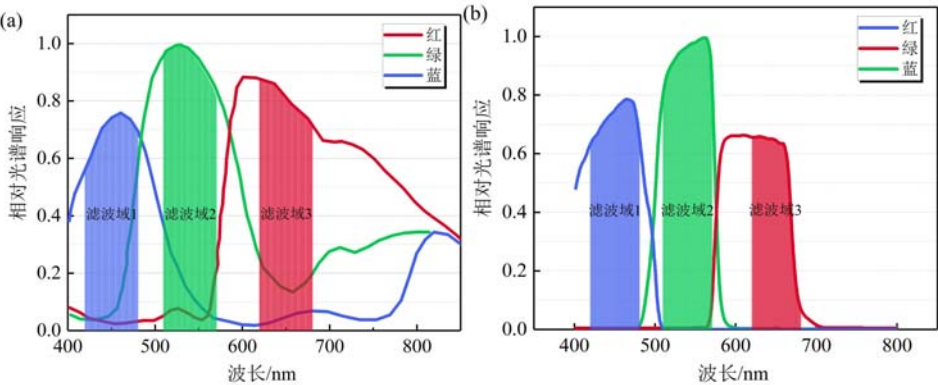


图 6 光谱曲线滤光重叠: (a) 3CMOS 彩色相机; (b) 拜尔彩色相机

Fig. 6 Spectral filter overlap: (a) 3CMOS color camera; (b) Bayer color camera

数据处理与分析:将相机拍摄的实验图片进行三通道分离与显示,记录各实验工况下的通道响应,

观察采用滤波片时其他不相干通道是否有灰度响应。同时,针对 R、G 和 B 三个通道的被测物采集图像,绘制灰度直方图,定量分析其灰度级范围,进一步验证各通道是否有颜色串扰效应存在。

2.2 实验结果分析

2.2.1 3COMS 彩色相机实验结果

将 3COMS 彩色相机拍摄的图像进行通道分离,处理得到的各组实验中子通道图像及其灰度直方图如图 7 和图 8 所示。

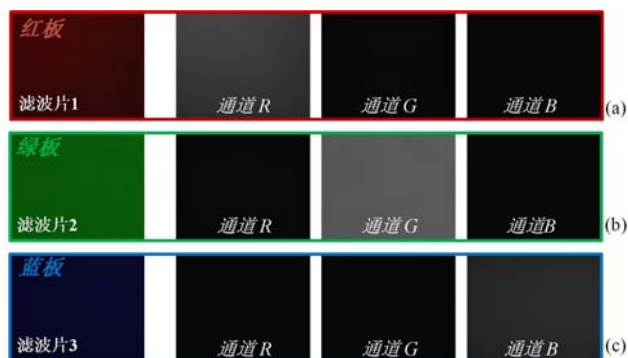


图 7 3COMS 彩色相机通道分离图像: (a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3

Fig. 7 Channel separation image of 3COMS color camera: (a) conditions 1; (b) conditions 2; (c) conditions 3

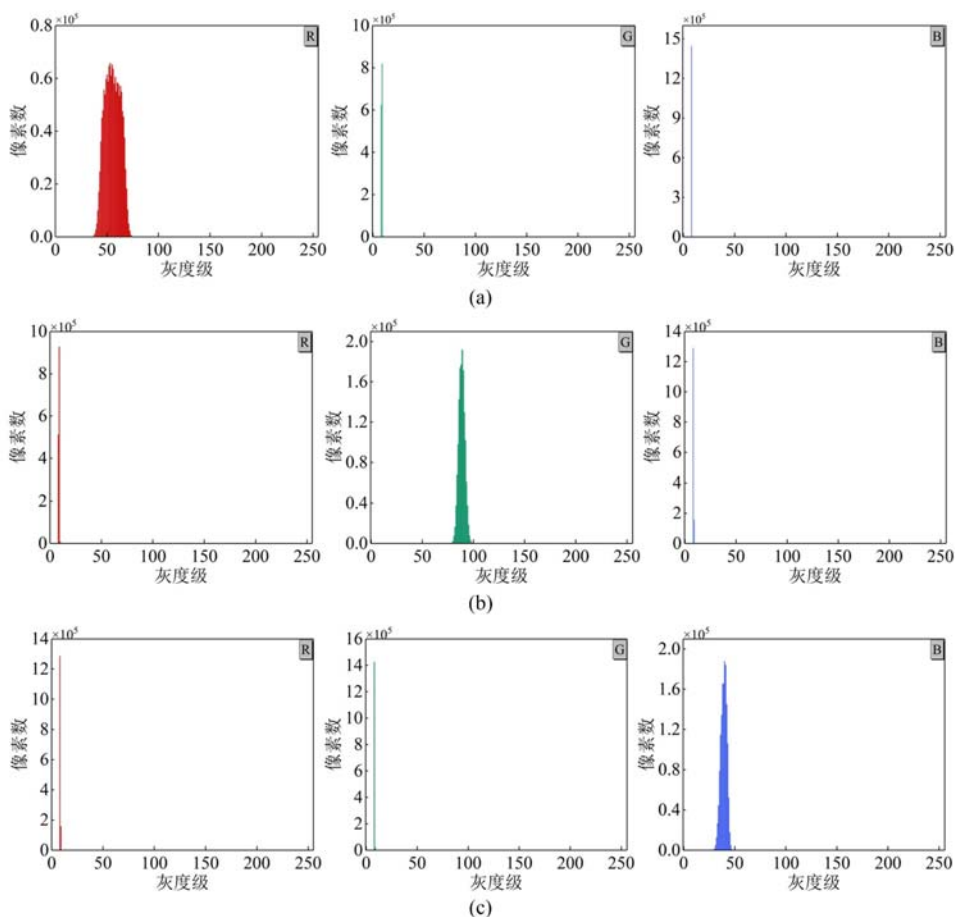


图 8 3COMS 彩色相机子通道灰度直方图: (a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3

Fig. 8 Sub-channel gray histogram of 3COMS color camera: (a) conditions 1; (b) conditions 2; (c) conditions 3

以工况 2 实验结果为例进行分析,通过在 3CMOS 彩色相机前放置一绿色滤波片,同时拍摄绿板,使得只有特定波长(510nm~570nm)的光波到达相机内部感光芯片上。结果表明,将图像进行通道分

离后只有 G 通道响应强烈,而在 R 和 B 通道中几乎无响应(个别灰度级响应为图像传感器的暗信号输出效应所致,即无光照条件下图像传感器输出灰度值并非严格意义上的全“零”)。同时,G 通道的灰度直方图显示其灰度级数分布较为广泛,而在 R 和 B 通道中基本无响应。工况 1、工况 3 的实验结果也与上述规律一致。这一现象直观地表明了滤光拍摄下 3CMOS 彩色相机各通道中不存在颜色串扰效应。

2.2.2 拜尔彩色相机实验结果

拜尔彩色相机的图像通道分离处理与灰度级数统计分析结果如图 9、图 10 所示。以其中一组为例(工况 2)进行分析,经过滤光片的滤波作用后,波长为 510nm~570nm 的光波到达相机内部感光芯片,拜尔模式相机拍摄获得的图像在经通道分离后,不仅在 G 通道中灰度响应强烈,且在 R、B 通道中也有响应。同时灰度直方图更为直观地展示了在不相干通道 R、B 中,灰度级分布较为广泛。工况 1 和工况 3 均体现出一致的实验规律。不相干通道的多灰度级响应表明拜尔彩色相机中存在着严重的颜色串扰效应。

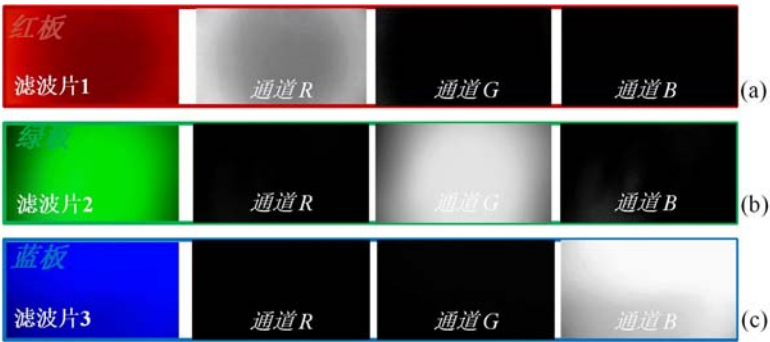


图 9 拜尔彩色相机通道分离图像

Fig. 9 Channel separation image of Bayer color camera

2.2.3 实验结果对比与总结

实验组 and 对照组中滤光拍摄图像的灰度级分布见表 2 和表 3。

表 2 拜尔彩色相机各通道灰度级分布统计

Tab. 2 Gray level distribution statistics of Bayer color camera

实验工况	通道 R	通道 G	通道 B	串扰通道
工况 1	120 (116~235)	55 (1~55)	10 (1~10)	G、B
工况 2	4 (1~4)	111 (85~196)	94 (1~94)	R、B
工况 3	5 (1~5)	8 (1~8)	102 (149~251)	R、G

表 3 3CMOS 彩色相机各通道灰度级分布统计

Tab. 3 Gray level distribution statistics of 3CMOS color camera

实验工况	通道 R	通道 G	通道 B	串扰通道
工况 1	43 (35~77)	3 (9~11)	3 (8~10)	—
工况 2	3 (9~11)	27 (76~103)	2 (9~10)	—
工况 3	3 (8~10)	2 (9~10)	23 (28~50)	—

本文结合带通滤波片遴选出窄带波段,通过滤光拍摄对比实验,定性验证了两种制式相机中的颜色串扰效应。从表 2 和表 3 中各工况灰度级分布可以看出,拜尔彩色相机在不相干通道有多灰度级响应,而 3CMOS 彩色相机基本无响应,因此可以认为,滤光拍摄下 3CCD/CMOS 彩色相机基本不存在颜色串扰效应,而拜尔彩色相机存在严重的颜色串扰效应。为探讨实验所测拜尔相机中颜色串扰与相机光谱响应曲线间的关系,首先通过式(4)计算相机中各通道的光辐射能量(辐射亮度一致,简化为响应曲线在各通道中的积分面积),将其视为各通道对光谱的响应能力,并以最大值为参照,将三通道信号进行归一化处理^[19]。其次将实验所得三通道灰度级与像素值进行加权均值处理,以作为各通道中的响应情

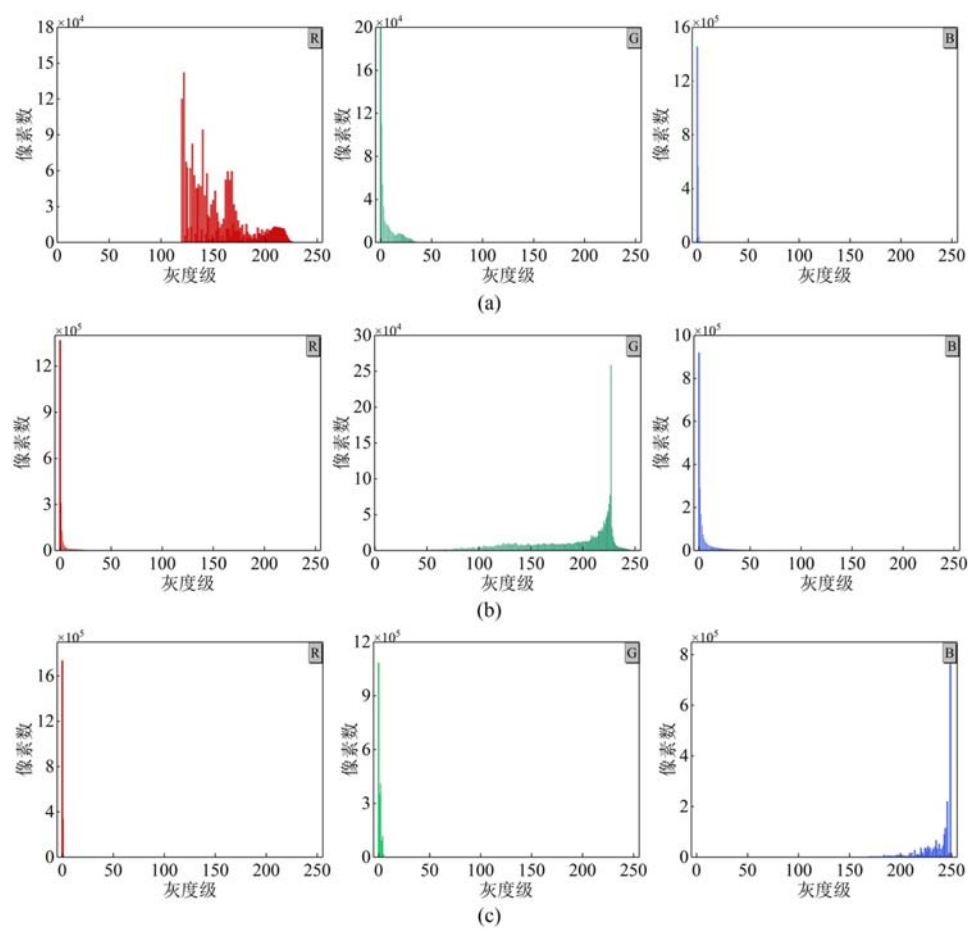


图 10 拜尔彩色相机子通道灰度直方图：(a) 工况 1；(b) 工况 2；(c) 工况 3

Fig. 10 Sub-channel gray histogram of Bayer color camera; (a) conditions 1; (b) conditions 2; (c) conditions 3

况,考虑到每组工况的具体拍摄物不同,在各工况下进行归一化处理并方便对比^[19]。忽略相机传感器老化、环境光等因素的影响,从表 4 中可看出,依据拜尔彩色相机光谱响应曲线计算的颜色串扰程度,与实验所得各通道间串扰程度近似一致,不相干通道中的光谱响应越强,串扰程度就越高。实验结果和理论计算结果表明,相机颜色串扰主要由其光谱响应特性决定。

表 4 相机理论计算各通道响应与实验各通道响应对比(归一化)

Tab. 4 Comparison between theoretical calculation and experimental response of each channel (normalization)

实验工况	理论计算各通道响应值			实验所得各通道响应值		
	μ_R	μ_G	μ_B	μ'_R	μ'_G	μ'_B
工况 1	1	0.2133	0.0825	1	0.2386	0.0883
工况 2	0.0964	1	0.1450	0.1014	1	0.1690
工况 3	0.0716	0.2544	1	0.0778	0.2748	1

注： μ_R 、 μ_G 、 μ_B 代表式(4)中理论计算的三通道输出； μ'_R 、 μ'_G 、 μ'_B 代表实验所得三通道响应。

颜色串扰效应在图像分离应用等高精度测量中会产生十分严重的影响,如采用双色法进行高温和变形的同步测量研究、单相机三维数字图像技术,以及其他采用通道分离原理进行的研究应用等,因此在实验中应尽量采用 3CCD/CMOS 彩色相机实现精密测量,避免通道间的颜色串扰效应,提升实验测量精度。

3 颜色串扰模拟验证

由滤光拍摄对比实验分析可得,拜尔彩色相机存在严重的颜色串扰效应,而 3CCD/CMOS 彩色相

机中基本不存在。拜尔彩色相机中颜色串扰效应产生的因素有两个方面：(1)相机自身的光谱响应特性影响(已在实验中得以验证)；(2)去马赛克插值过程的影响。本部分将对这两个因素分别进行模拟验证。

3.1 光谱响应特性对颜色串扰的影响模拟

依据 3COMS 彩色相机和拜尔彩色相机的光谱响应规律，简单模拟两种彩色相机的成像过程。模拟原理和思路如下：物体受光照射反射出不同波长的光波，被镜头捕获进入相机内部，相机内部的感光元件将光子转换为电子(电流大小与光照强度成正比)，同时根据相机自身的光谱响应函数在各通道间进行响应，经后续处理输出为数字图像矩阵。为体现拜尔彩色相机和 3COMS 彩色相机光谱响应特性的影响规律，该模拟根据灰度的可视化结果做了简化处理。假设有一光强场照射纯色物体，物体反射出某一波长(段)，该波长(段)经过相机光谱响应特征曲线表达后，在 R、G 和 B 三通道中呈现不同的光强表达，假设光强与灰度之间为简单线性变化关系，将相机在各通道上的光强表达线性转换为灰度显示。通过对比各通道前后的灰度(光强)变化，来反映各通道间的颜色串扰情况。

结合光谱学及色度学原理，并基于 1931CIE 标准色度系统^[20]，进行颜色翻译与转换三刺激值，将光波长与 rgb 三色值进行相互映射^[21]，其映射关系见表 5。根据映射关系，可将光波进行图像可视化表达，以方便后续直观展示不同光波经光谱响应函数转换后的情况。

表 5 光波长与 rgb(0~255)三色值映射

Tab. 4 Mapping relationship between wavelength and rgb intensity value (0~255)

波长/nm	颜色分量强度值		
	<i>r</i>	<i>g</i>	<i>b</i>
400	125	10	251
450	0	70	255
500	17	251	143
550	163	255	13
600	252	190	3

具体模拟过程如下：首先选取 470nm~480nm 的光波进行 rgb 三色值关系映射，并将该波段映射的图像作为原始图像(100pixel×100pixel)，该波段包含于实验的带通范围内，且在两种制式彩色相机的光谱响应曲线中均具有较好的代表性。然后采用均匀变化光强场函数(图 11 所示)照射原始图像，本

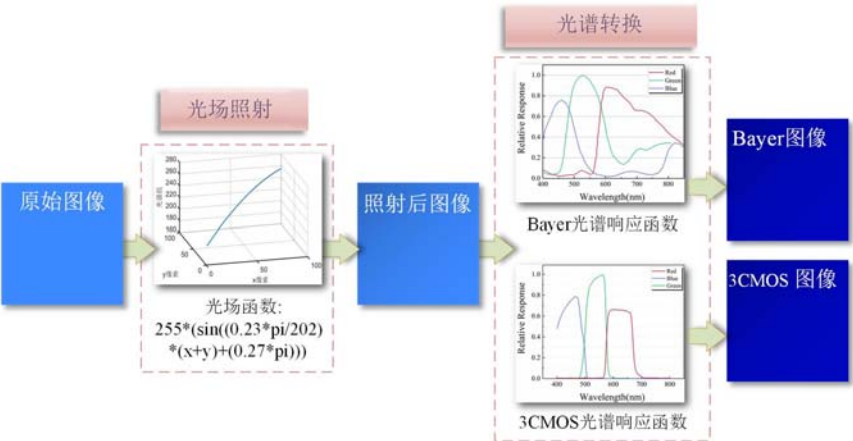


图 11 光谱响应转换模拟流程

Fig. 11 Schematic diagram of spectral response conversion simulation

文假设光强与灰度为简单线性转化关系，因此照射后的图像灰度出现了均匀性变化。紧接着根据 3COMS 彩色相机和拜尔彩色相机的光谱响应函数(采用实验所用相机的光谱响应函数)，分别模拟两

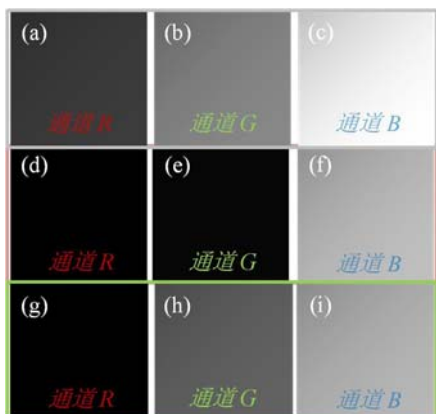


图 12 光谱转化前后通道分离图像对比：
(a)~(c)光照后图；(d)~(f)3CMOS 光谱转化图；
(g)~(i)拜尔光谱转化图

Fig. 12 Separation and comparison of channel images before and after spectral transformation; (a)~(c) after illumination; (d)~(f) after 3CMOS spectrum transformation; (g)~(i) after Bayer spectrum transformation

种相机的光电转化,将灰度值在各通道间进行输出。忽略实际过程中感光器件的胖零模式和噪声影响,最终对比两种模式下各颜色通道在转化前后的灰度变化,总结光谱响应特性对颜色串扰的影响。

将光谱转化前后的图像进行通道分离,各子通道图像如图 12 所示。由图可发现在光谱响应不重叠的 3CMOS 彩色相机中,R、G 通道无响应,B 通道出现了转换响应;而在拜尔转化过程中,B、G 通道均出现了响应。同时,各通道的灰度直方图(图 13)也直观展示出原始图像经光谱响应转化后,在 3CMOS 模式中只在相关通道(B 通道)出现响应,在其他通道无响应;而拜尔模式中则在三通道均有灰度响应。由于拜尔光谱响应曲线在波段中互相重叠,导致了光在变换过程中不仅在相关通道(B 通道)出现了响应,而且在其他非相关通道(R、G 通道)也出现了响应;3CMOS 光谱响应曲线中该波段的通道响应互不重叠,因此各通道间的响应不

会发生串扰现象。同实验结果一致,该模拟也验证了拜尔模式中存在着颜色串扰效应,而 3CMOS 模式中不存在,同时光谱响应函数的差异也表明相机的光谱响应特性是通道间颜色串扰的重要原因。

3.2 色彩插值对颜色串扰的影响模拟

本节讨论拜尔彩色相机后处理模块的去马赛克过程对颜色串扰效应的影响。模拟思路如下:对标准样本图像进行降采样处理得到 Bayer 图像,以模拟拜尔彩色相机中的 Raw 图片数据,随后采用两种插值算法对降采样图像进行色彩恢复,最终将标准样本图像与插值恢复图像进行对比,分析各通道间的串扰情况,以模拟色彩插值对各通道间颜色串扰的影响。

以 RGGB 格式为例,对国际标准图像(Lena 图像)进行降采样处理,选用 2×2 邻域像素复制插值法和 3×3 邻域双线性插值法实现色彩还原。通过比较原始标准图像和插值后图像的各通道灰度级分布,揭示色彩插值对通道间颜色串扰的影响程度。图 14 展示了 RGGB 拜尔格式下,色彩还原后各通道的分离对比图像。从结果可以看出,这两种插值算法对图像均有较好的恢复效果,其中双线性插值法的锯齿现象较为轻微,恢复效果更佳。

表 6 展示了标准原始图像和色彩插值恢复图像的各通道灰度级分布。取各通道灰度级的增缺率 η 来量化表达插值对各通道灰度级分布的影响:

$$\eta = \frac{N_i + N_m}{N_{\text{total}}} \quad (5)$$

式中: N_i 代表增加的灰度级数量; N_m 代表缺失的灰度级数量; N_{total} 代表总灰度级数 256。

表 6 插值恢复前后各通道灰度级分布(0~255)

Tab. 6 Gray level distribution (0~255) before and after interpolation restoration

通道	标准原始图	2×2 插值恢复	3×3 插值恢复	增缺率 η
R	55, 57~255	60~255	60~255	1.56%
G	4~235, 237, 243, 246, 249	4~230, 232, 237, 246	4~233, 235, 237, 246, 249	0.78%~2.34%
B	9, 13, 42~220	44~215, 217, 220	44~215, 217, 220	2.34%

从表 6 中可以看出,插值恢复图像中各通道的灰度级增缺变化很小,增缺率集中在 1.56%~2.34%之间,其中 G 通道中 3×3 插值法的灰度增缺率仅为 0.78%。相较于相机光谱响应特性这一颜

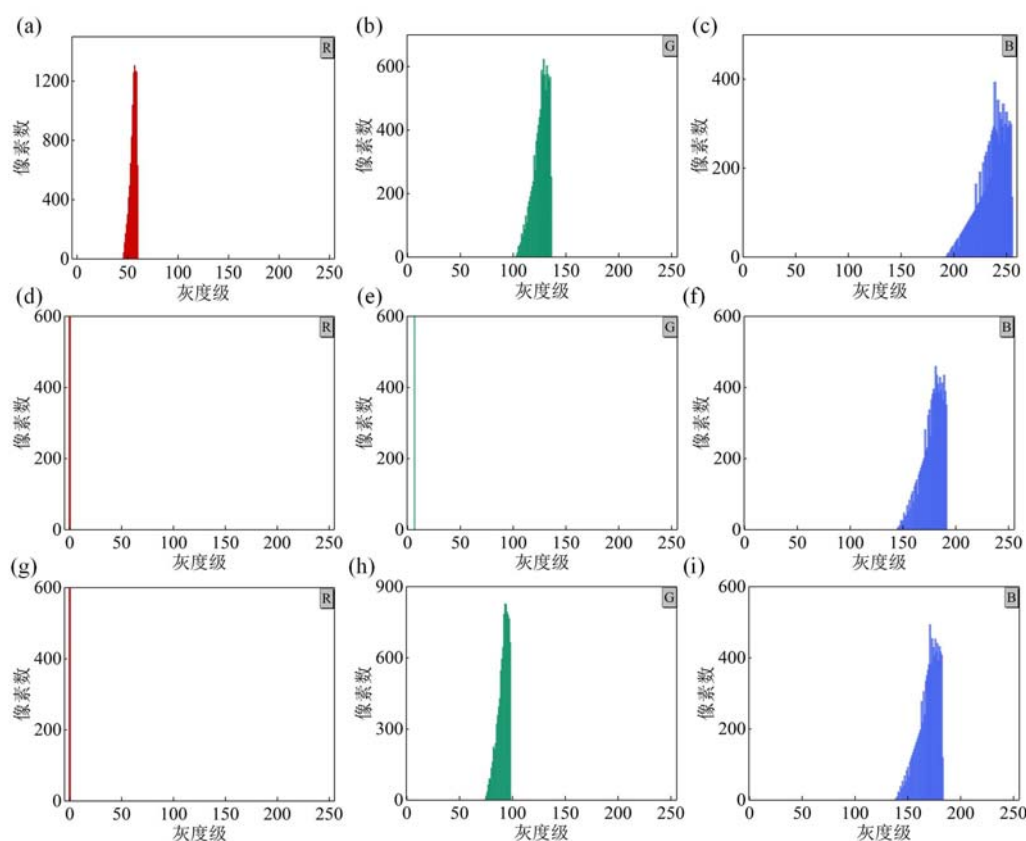


图 13 光谱转化前后各通道灰度直方图: (a)~(c)光照后图像;

(d)~(f)3CMOS 光谱转化图像; (g)~(i)拜尔光谱转化图像

Fig. 13 Gray histogram of each channel before and after spectral transformation: (a)~(c) after illumination; (d)~(f) after 3CMOS spectrum transformation; (g)~(i) after Bayer spectrum transformation

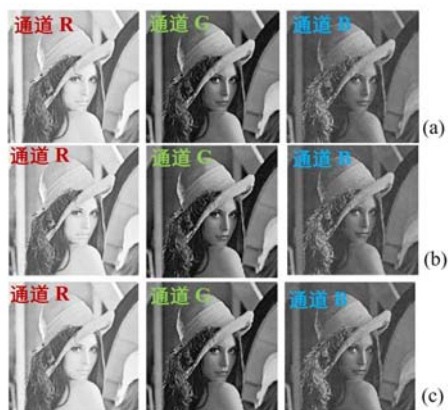


图 14 插值恢复图像各通道分离结果: (a) 标准样本图像; (b) 2×2 插值恢复图; (c) 3×3 插值恢复图

Fig. 14 Each channel separated image after interpolation recovery: (a) standard sample image;

(b) 2×2 interpolation recovery image; (c) 3×3 interpolation recovery image

色串扰产生因素,色彩插值对各通道间的灰度级增缺影响较小,为单像素级别。然而,当测量物体的尺寸为像素级时(如彩色粒子阴影测速法),色彩插值导致的颜色串扰也会对测量结果造成一定的影响。McPhail 等^[22]曾对彩色粒子图像进行插值测试,发现色彩插值会在不相干通道中产生“伪粒子”,因此在对真正彩色粒子追踪时引入了伪像误差。

结合上述颜色串扰模拟验证的分析可知,相机的色彩插值过程对图像通道间的颜色串扰效应影响较小,而相机的光谱响应特性是造成颜色串扰效应的主要因素。

4 总结与讨论

本文采用中心波长为 450nm、540nm 和 650nm,半带宽为 30nm 的三种滤波片,结合拜尔彩色相机与 3COMS 彩色相机进行了滤光拍摄对比实验,发现拜尔彩色相机中存在严重的颜色串扰效应,而 3CCD/CMOS 彩色相机中基本不存在。同时对比了两种相机的构造差异与成像特点,分析了颜色串扰效应的产生原理。针对拜尔彩色相机中颜色串扰效应的产生因素,分别进行了两种相机的光谱响应成像模拟,以及拜尔彩色相机的色彩还原插值模拟。结果表明,相机的光谱响应特性是造成颜色串扰效应的主要因素,而色彩插值过程对通道间颜色串扰影响较小。对于图像通道分离的应用,推荐使用 3CCD/COMS 彩色相机,并结合带通滤波技术的应用等,最大限度减少相机的光谱重叠度,从而降低或消去通道污染,提升测量精度。

参考文献:

- [1] 侯雨石,陈永飞,何玉青,等. 数码相机原理与系统设计研究[J]. 光学技术, 2002(5):452—458 (HOU Yushi, CHEN Yongfei, HE Yuqing, et al. Study of digital still camera's elements and system[J]. Optical Technique, 2002(5):452—458 (in Chinese))
- [2] 张晓华,张认成,龚雪,等. CCD 的应用现状及其发展前景[J]. 仪器仪表用户, 2005, 12(5):718—720 (ZHANG Xiaohua, ZHANG Rencheng, GONG Xue, et al. Application status and development prospect of CCD [J]. Instrumentation Customer, 2005, 12(5):718—720 (in Chinese))
- [3] 孙辉,柏旭光,孙丽娜,等. Bayer 图像色彩还原线性插值方法[J]. 液晶与显示, 2013, 28(3):417—423 (SUN Hui, BAI Xuguang, SUN Lina, et al. Linear interpolation of demosaicing for Bayer pattern[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2013, 28(3):417—423 (in Chinese))
- [4] Koh C, Mukherjee J, Mitra S K. New efficient methods of image compression in digital cameras with color filter array[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2003, 49(4):1448—1456.
- [5] Ding Y, Xi J T, Yu Y G, et al. Recovering the absolute phase maps of three selected spatial-frequency fringes with multi-color channels[J]. Neurocomputing, 2017, 252(8):17—23.
- [6] Gao Y, Cheng T, Su Y, et al. High-efficiency and high-accuracy digital image correlation for three-dimensional measurement[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65(1):73—80.
- [7] 黄湛,张森,程攀,等. 基于光流算法的粒子图像测速技术研究和验证[J]. 实验力学, 2016, 31(5):673—682 (HUANG Zhan, ZHANG Miao, CHENG Pan, et al. On the PIV technology and validation based on optical flow algorithm[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(5):673—682 (in Chinese))
- [8] Yang L X, Xie X, Zhu L Q, et al. Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(1):1—13.
- [9] Genovese K, Casaletto L, Rayas J A, et al. Stereo-Digital Image Correlation (DIC) measurements with a single camera using a biprism[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(3):278—285.
- [10] Huang Y, Yan Y, Riley G. Vision-based measurement of temperature distribution in a 500kW model furnace using the two-colour method[J]. Measurement, 2000, 28(3):175—183.
- [11] Wu D F, Lin L J, Ren H Y, et al. High-temperature deformation measurement of the heated front surface of hypersonic aircraft component at 1200℃ using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122(11):184—194.
- [12] Yue M K, Wang J Y, Zhang J S, et al. Color crosstalk correction for synchronous measurement of full-field temperature and deformation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 150(3):106878.
- [13] 李晓东,叶益民,黄诚,等. 电子散斑干涉三维变形测量技术研究[J]. 实验力学, 2020, 35(3):397—406 (LI Xiaodong, YE Yimin, HUANG Cheng, et al. Research on simultaneous 3D displacement measurement using electronic speckle pattern interferometry[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(3):397—406 (in Chinese))
- [14] Yu L, Pan B. Color stereo-digital image correlation method using a single 3CCD color camera[J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(4):1—9.

- [15] 李奇, 徐之海, 冯华君. 面向数字相机的 CCD 像素颜色插值新算法研究[J]. 光电工程, 2002, 29(3):4—8 (LI Qi, XU Zhihai, FENG Huajun. Study on new interpolation algorithm for pixel color of CCD in digital camera[J]. Opto-Electronic Engineering, 2002, 29(3):4—8 (in Chinese))
- [16] 陈均溢, 商思航, 苗丹, 等. 光电成像系统的绝对光谱响应效率测量及分析[J]. 激光技术, 2021, 45(1):121—125 (CHEN Junyi, SHANG Sihang, MIAO Dan, et al. Measurement and analysis of absolute spectral response efficiency of photoelectric imaging system[J]. Laser Technology, 2021, 45(1):121—125 (in Chinese))
- [17] 徐良波. TFT-LCD 滤色器用三色感光剂研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008 (XU Liangbo. The research on tricolor photoresist for color filters of TFT-LCD[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008 (in Chinese))
- [18] 王景义. 滤色器的制造技术[J]. 微细加工技术, 1994(1):14—20 (WANG Jingyi. Color filter manufacturing technology[J]. Micro Machining Technology, 1994(1):14—20 (in Chinese))
- [19] 徐奕艺. 基于数码相机的物体表面色光谱重构[D]. 杭州: 浙江大学, 2008. (XU Yiyi. Study of spectral reconstruction based on digital camera [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese))
- [20] 徐海松. 颜色信息工程[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2005 (XU Haisong. Color information engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005 (in Chinese))
- [21] 张卉. RGB 与光波长关系的研究[J]. 安徽工业大学学报, 2011, 28(3):295—230 (ZHANG Hui. Study on relationship between RGB and optical wavelength[J]. Journal of Anhui University of Technology, 2011, 28(3): 295—230 (in Chinese))
- [22] Mcphail M J, Fontaine A A, Krane M H, et al. Correcting for color crosstalk and chromatic aberration in multicolor particle shadow velocimetry[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(2):025302.

Research on color crosstalk effect in CCD/CMOS color digital camera

SHANGGUAN Zhihao, ZHOU Shichao, MA Shaopeng

(School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The color channel separation principle of color digital cameras has important applications in the field of experimental mechanics, such as single-camera 3D deformation measurement, temperature and deformation synchronous measurement, etc. In the separation of R, G, and B channels, the color crosstalk effect can significantly affect the accuracy of measurement. A comparison experiment based on the filtered photograph was carried out between 3CCD/CMOS color camera and Bayer color camera. It was verified that the Bayer color camera had a more serious color crosstalk effect, while the 3CCD/CMOS color camera basically had no such effect. Based on the imaging principles and characteristics of the color digital cameras, the imaging simulations and color reproduction interpolation simulations were conducted in conjunction with their spectral response characteristics. The research results showed that the spectral response of the camera was the key factor for the color crosstalk effect, while the post-processing color interpolation process was less influential. This study can provide improvement directions and suggestions for the development of high-precision measurement equipment based on color channel separation.

Keywords: 3CCD/CMOS color camera; bayer color camera; color crosstalk; spectral response; color interpolation