

宽带多光谱成像系统 CCD 响应的线性化校正方法

朱时良, 梁金星

(武汉大学 印刷与包装系, 湖北 武汉 430079)

摘 要: 对多光谱成像系统 CCD 响应特性进行了分析, 并提出使用物理阶调模型作为新的线性化校正方法。在分析了数码相机 CCD 响应值的线性化校正原理和方法的基础上, 通过校正精度和光谱重构效果两个方面, 将其与传统的多项式模型和指数模型等方法进行了比较分析。实验结果表明, 经过线性化校正的各通道的线性相关性进一步增强, 其中 GOG 模型各通道的相关系数值均接近 0.996, 具有最好的线性校正效果; 且 GOG 模型校正过的 $RMSE$ 和 ΔE 值分别降低了 37% 和 61%。因此, 采用 GOG 模型, 可以较好地实现 CCD 响应值的线性化校正, 提高多光谱图像获取中光照不均匀性的校正精度和效率。

关键词: 多光谱成像; 线性化校正; CCD 标定

中图分类号: TS801.3; TN215

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2016)01-0068-06

Linear Correction Method of CCD Response for Wide-Band Multi-Spectral Imaging Systems

ZHU Shiliang, LIANG Jinxing

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract : The CCD response characteristic of the multi-spectral imaging system was analyzed, and the physical model was proposed as a new method of linearization. Based on the analysis of the linear correction principle and method of the digital camera CCD response value, it was compared with the traditional model such as polynomial model and the exponential model in two aspects of the correction accuracy and spectral reconstruction effect. Experimental results show that the linear correlation of each channel after linear correction was further enhanced, and in the GOG model the channel correlation coefficient values was close to 0.996 with the optimal linear correction effect; The $RMSE$ and ΔE values which were corrected by the GOG model were reduced by 37% and 61% respectively. Therefore, the GOG model could be used to achieve the linear correction of CCD response value and improve the accuracy and efficiency of illumination nonuniformity correction in the process of multispectral image data acquisition.

Key words: multispectral imaging; linear correction; CCD calibration

0 引言

宽带多光谱图像获取, 是指多光谱图像获取设备在可见光范围内采集拍摄场景的多个通道信息,

进而用相应的光谱重建算法估算其光谱。其不但能准确记录场景的颜色信息, 而且能避免传统成像设备的同色异谱现象^[1]。

收稿日期: 2015-07-20

作者简介: 朱时良 (1990-), 男, 山东滕州人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为多光谱颜色复制,

E-mail: Vector_zhu@126.com

多光谱图像的数据精度,一方面受成像系统设备特性的影响,如相机的光谱响应函数、光电响应特性、噪声等;另一方面,它与图像获取环境密切相关,如光源光谱特性、环境光、原稿表面光照均匀性等。受上述多种因素的综合影响,采用多光谱成像系统获取的物体表面 CCD (charge-coupled device) 数字响应值不能被直接应用于光谱重构,还需要进行 CCD 光电响应值预处理,其中,CCD 响应值线性校正和光照空间均匀性校正是非常重要的步骤^[2-4]。

本研究拟在暗电流噪声校正的前提下,采用物理阶调模型对 CCD 响应特性进行线性化校正,即建立 CCD 光电响应值与接受光辐射能量的函数关系,完成对 CCD 响应特性的线性化校正。在此基础上,通过校正精度和光谱重构效果两个方面,将其与传统方法进行了比较与分析,验证了所提方法的有效性,以期为提高多光谱图像获取中光照不均匀性的校正精度和效率提供一定的理论参考。

1 线性化校正原理和方法

1.1 线性化校正原理

数码相机的光电响应值,是由入射到感光器上的光辐射能量和相机光谱响应函数相互作用后积分得到的。事实上,由 CCD 光电转换后的信号还要经过一系列的传递和压缩,才会输出到显示设备。此时,相机的光电响应值已成为非线性数据,需要对相机的数字信号做线性校正。经过校正后重构的光谱才能与用光谱测量仪器测量的光谱达到较高的一致性,进而获得准确的光谱重构效果^[2,5]。

对于数字图像某颜色通道的任意像素点,线性相机光电信号与入射到 CCD 上的光辐射能量呈线性关系。线性相机光电信号会随着入射光辐射能量的变化而同等变化,同时光电响应值与光电信号呈线性关系。因此,可以通过建立 CCD 所受光辐射能量与相机各通道的光电响应值之间的转换方程,从而实现数据的线性化校正^[2,5]。

$$LinearR = \begin{cases} 0, & \\ \frac{a}{1 + \exp\left(-k\left(\frac{R}{255}\right) - b\right)} - c, & \end{cases}$$

2 线性化校正实验

2.1 实验仪器

本实验选用的仪器主要包括:Scanlite1000 连续

1.2 线性化校正方法

设数码相机拍摄时的光辐射能量为 I , 将其与通过拍摄所获得的相机 RGB 三通道的光电响应值 D 建立线性转换函数^[1,3-6] $f(x)$, 可表示为

$$I = f(x)D. \quad (1)$$

为了寻找最优线性转换方程,分别采用多项式模型、指数模型、S 模型和增益-偏置-伽玛 (Gain-offset-Gamma, GOG) 模型,拟合得各通道响应线性转换函数,进而实现 CCD 光电响应值线性校正。多项式模型和指数模型是数学曲线拟合方法,而 S 模型和 GOG 模型是基于物理意义的阶调特性模型。

多项式模型,是在给定阶次多项式上对数据进行最小二乘法的最优拟合。在函数关系未知的情况下,多项式模型可以根据原始数据找出一个含有 $(k+1)$ 个参数的 k 阶多项式来逼近。

指数模型,是在给定指数形式上对数据进行最小二乘法的最优拟合。在函数关系未知的情况下,指数模型可以根据原始数据找出形如 $a \cdot \exp(b \cdot x)$, $a \cdot \exp(b \cdot x) + c \cdot \exp(d \cdot x)$ 函数来逼近。

GOG 模型,是由 Bems 等人基于 CRT 的理论物理模型分析而提出来的,并被国际照明委员会 (International Commission on illumination, CIE) 推荐为 CRT 的颜色特征化方法^[7]。以 R 通道为例,其表达式可以表示为:

$$LinearR = \left(k_g \left(\frac{R}{255} \right) + k_o \right)^\gamma. \quad (2)$$

式中: R 为通道输入信号,且 $0 \leq R \leq 255$;

$LinearR$ 为 R 对应的线性化值 (归一化光辐射能量),且 $0 \leq LinearR \leq 1$;

k_g, k_o, γ 为模型参数。

S 模型是由王勇等人^[8]提出的适用于 LCD 颜色特征化的新模型,其采用新的函数形式来描述 LCD 的阶调特性。S 模型的函数较为简单,优化计算也较为方便。以 R 通道为例,其表达式见式 (3),其中 a, k, b, c 为模型参数。

$$\frac{a}{1 + \exp\left(-k\left(\frac{R}{255}\right) - b\right)} - c \leq 0; \quad \frac{a}{1 + \exp\left(-k\left(\frac{R}{255}\right) - b\right)} - c > 0. \quad (3)$$

光灯和 Elinchrom 70 cm × 70 cm 柔光箱,均为瑞士 Elinchrom 公司生产;PR705 光谱扫描辐射度计,由美国 PhotoReseach 生产;仙娜 eVolution 75H 多通道图

像采集系统,由瑞士 Sinar 公司生产;Colorchecker 24 色标准色卡 (21.59 cm × 27.94 cm)、标准白板 (14 cm × 12 cm),均由美国爱色丽公司生产。

2.2 实验方案

本研究中,采用 Scanlite 1000 连续光灯,并且配合 70 cm × 70 cm 柔光箱作为照明光源,光在柔光箱内多次内反射与透射,然后输出相对均匀的漫射光,从而能最大限度地保证光均匀地照射到原稿表面。实验采用的数码相机为仙娜 eVolution 75H 数码后背,其采用 DalsaFTF5066C CCD,有效尺寸为 48 mm × 36 mm,像素大小为 6 668 像素 × 4 992 像素,可以获得原始 raw 数据图像,通过配套软件 Captureshop 6.5 进行参数设置,并拍摄图像。

图 1 所示为本研究所采用的仙娜多光谱成像系统 CCD 光电响应值线性校正实验设置图。

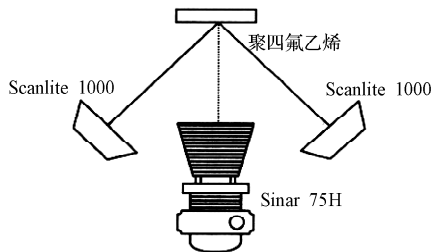


图 1 仙娜相机 CCD 光电响应标定实验设置图

Fig. 1 Calibration experimental setup of CCD response of Sinar camera

本实验将聚四氟乙烯标准白板作为拍摄目标,

仙娜数码后背和拍摄目标间的距离为 2.5 m,连续光灯 Scanlite 1000 和拍摄目标间的距离为 2.9 m,且两光源放置与拍摄目标和仙娜数码相机连线呈 45°,通过改变相机曝光时间来控制 CCD 接收的光辐射能量。光辐射能量是在相同实验条件下,将相机换成 PR705 测量得到的。在实验过程中,需要在每次获取图像后关闭快门拍摄暗电流图像,并将其用于相关图像的校正;另外,为保证图像获取环境的稳定性,排除周围杂散光的影响,需在特定黑暗环境中进行实验,并尽量保持环境温度稳定在 25 ℃,以减小温度变化对 CCD 响应的影响;最后,对光电转换函数进行标定,即建立不同曝光时间下的光辐射能量与 CCD 光电响应值之间的函数关系。

2.3 实验结果与分析

按照上述实验方法,得到该实验条件下不同曝光时间下的光辐射能量和 CCD 光电响应值。实验中使用的数据除了经过暗电流校正,还需进行相应处理。如将 RGB 各通道光电响应值进行归一化处理,获得归一化光电响应值。同时,计算光辐射能量,并且以最大值为参照进行归一化处理,得到归一化后的光辐射能量值。将处理后的数据用于计算通道响应转换方程。通过 Matlab 曲线拟合工具箱得到线性转换方程,以 RGB 三通道为例,分别以归一化 CCD 光电响应值为横坐标,归一化光辐射能量为纵坐标,绘得各通道的线性转换关系曲线,如图 2~5 所示。

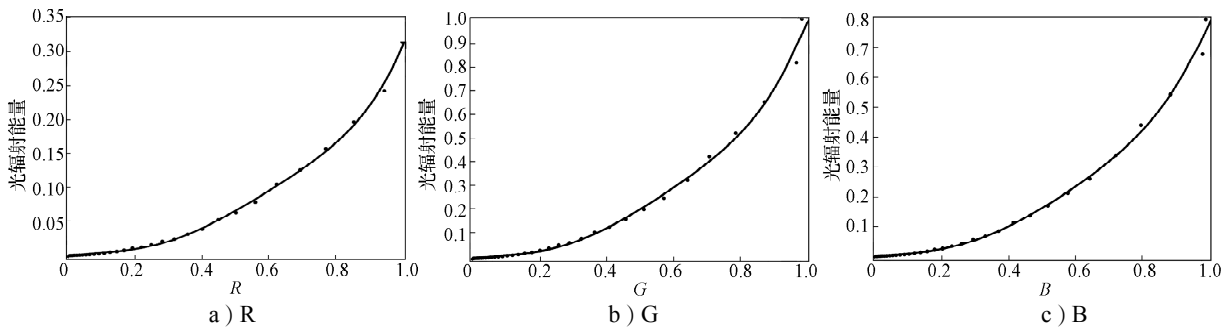


图 2 多项式模型拟合曲线

Fig. 2 Polynomial model fitting curve

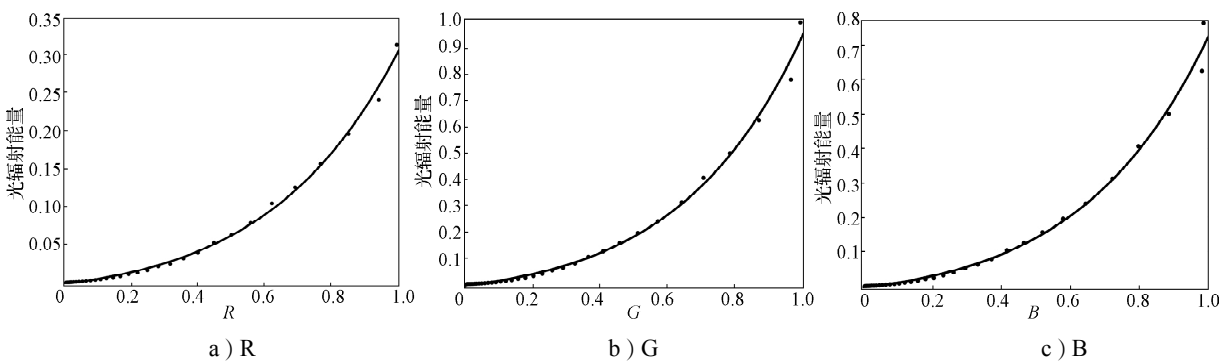


图 3 指数模型拟合曲线

Fig. 3 Exponential model fitting curve

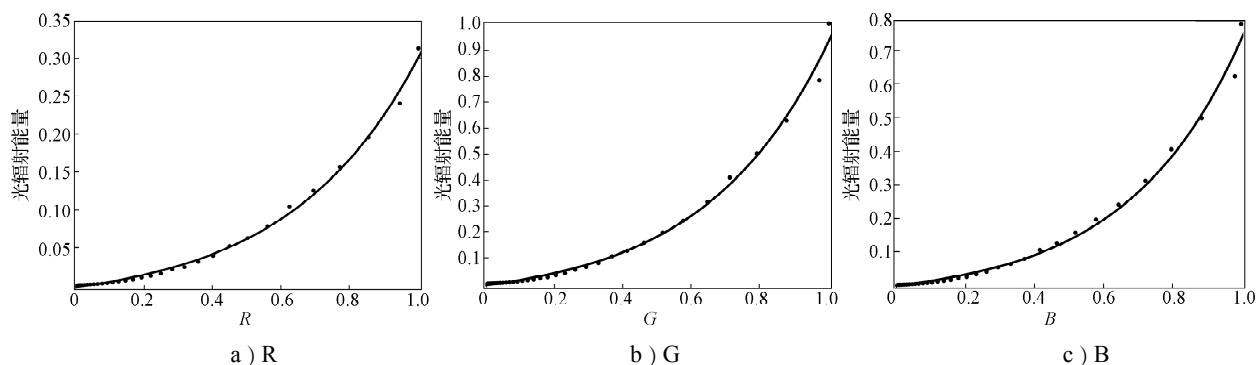


图4 S模型拟合曲线

Fig. 4 S model fitting curve

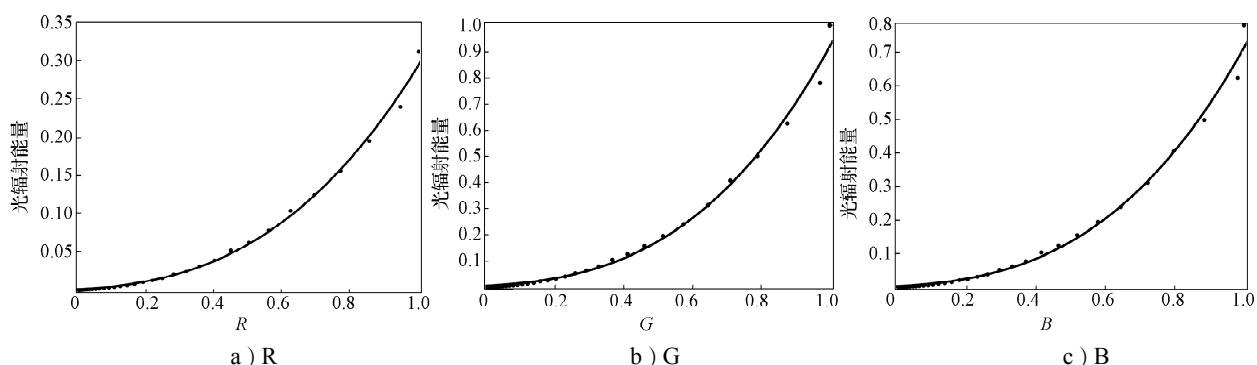


图5 GOG模型拟合曲线

Fig. 5 GOG model fitting curve

由图2~5可看出:数码相机所接受的光辐射能量和各通道的数字响应值呈非线性关系,且R、G、B三通道有着相似的非线性关系。

经过反复实验,最后确定多项式模型选用五次多项式,即

$$f(x)=p_1*x^5+p_2*x^4+p_3*x^3+p_4*x^2+p_5*x+p_6;$$

指数模型选用:

$$f(x)=a*\exp(b*x)+c*\exp(d*x)。$$

GOG模型和S模型的函数关系分别为公式(2)和公式(3)。

为了分析所选不同模型的线性转换精度,选用Colorchecker 24色标准色卡作为拍摄目标,仙娜相机光圈设置为F11,曝光时间为1/13 s,ISO为100,动态曝光1次。其它参数与上述实验设置一致。计算中性灰色块RGB的三通道平均响应值,并计算归一化CCD响应值;然后将其代入线性转换方程,计算校正后的RGB通道响应值;最后,计算不同方法校正的和没有校正的RGB通道响应值,并分析其与已知中性灰色块的明度值^[9]的线性关系。所得具体数据如表1所示。

表1 中性灰色块的明度值和RGB通道响应值

Table 1 Lightness value and RGB channel response value of neutral gray block

色块 编号	明度值	未校正			多项式模型校正			指数模型校正			S模型校正			GOG模型校正		
		R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B	R	G	B
1	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	0.306 3	0.948 7	0.731 6	0.295 5	0.918 8	0.714 5	0.301 6	0.931 0	0.722 5	0.295 6	0.927 0	0.675 0
2	0.656 6	0.811 1	0.814 8	0.809 1	0.169 4	0.516 0	0.398 2	0.178 6	0.547 1	0.418 2	0.175 3	0.533 3	0.408 1	0.167 7	0.527 0	0.339 0
3	0.402 2	0.642 7	0.651 0	0.639 9	0.108 0	0.327 2	0.244 3	0.104 4	0.318 2	0.237 9	0.102 7	0.312 1	0.234 1	0.096 5	0.307 6	0.165 2
4	0.219 6	0.477 8	0.480 2	0.473 6	0.059 5	0.177 4	0.132 7	0.054 8	0.160 3	0.121 3	0.056 5	0.165 7	0.125 6	0.051 5	0.163 4	0.061 6
5	0.100 0	0.338 9	0.344 2	0.344 8	0.027 4	0.084 2	0.066 9	0.027 7	0.0815	0.063 8	0.030 6	0.090 6	0.070 5	0.026 3	0.089 0	0.010 1
6	0.034 8	0.215 0	0.224 4	0.230 2	0.010 8	0.034 0	0.029 0	0.012 7	0.038 6	0.031 5	0.014 8	0.045 3	0.036 4	0.010 4	0.043 3	0

分析表1中的数据可知,未校正的三通道响应值与明度值并不是理想的45°直线关系。G通道校正后的响应值范围为0~0.95,接近未校正响应值的范围。

R通道和B通道校正后的响应值范围比未校正响应值的都小,分别为0~0.31和0~0.73。校正后各通道响应值与明度值的线性关系增强。

相关系数 R^2 是衡量变量间线性相关性的重要指标之一。本研究中选用的不同线性转换方法的精度如表 2 所示。

表 2 不同线性转换方法的精度
Table 2 Accuracy of different linear correction methods

校正方法	相关系数 R^2			/%
	R 通道	G 通道	B 通道	
无	98.273	98.248	98.579	
多项式模型	99.422	99.303	99.233	
指数模型	99.516	99.426	99.273	
S 模型	99.432	99.385	98.914	
GOG 模型	99.751	99.672	99.528	

分析表 2 中的数据可以得知, 虽然未校正的各通道的线性相关性比较强, 但经过线性校正的各通道的线性相关性进一步增强, 其相关系数均在 99% 以上。且数学模型方法 (多项式模型和指数模型) 的线性化效果比基于物理意义的阶调模型 (S 模型和 GOG 模型) 的略差。这是因为: 阶调模型更符合仙娜多光谱相机 CCD 光电转换关系。GOG 模型具有良好的线性校正效果, 各通道的相关系数值均接近 0.996, 有极强的线性相关性, 其线性化效果优于多项式模型、指数模型。GOG 模型不仅线性化精度略优于多项式模型, 而且 GOG 模型比 S 模型的表达式简单, 在运算速度方面更有优势。因此, GOG 模型的线性校正效果在所选模型中最优。

为了比较不同线性校正方法对光谱重构的影响, 利用主成分分析法 (principal components analysis, PCA), 将从实验拍摄 ColorChecker 24 色卡直接读取的相机 RGB 三通道信号和经过不同线性校正方法校正后的 RGB 三通道信号进行光谱重构^[6,10], 并利用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 来评价重构光谱与标准光谱的差别, 同时计算 CIE1976L*a*b* 的色差值 ΔE (D65, 2°), 以评价重构颜色与标准颜色的色差。以此证明线性校正的必要性, 并且得出最优的线性校正方法^[11-13]。所得不同方法的均方根误差和色差值见表 3。

表 3 不同线性校正方法的 RMSE 和 ΔE
Table 3 RMSE and ΔE of different linear correction methods

校正方法	RMSE			ΔE (D65, 2°)		
	min	mean	max	min	mean	max
无	0.021 5	0.096 7	0.343 6	16.75	40.63	72.76
多项式模型	0.004 6	0.061 7	0.122 9	2.79	16.09	45.32
指数模型	0.008 6	0.060 9	0.110 8	14.64	39.67	62.75
S 模型	0.024 6	0.071 7	0.113 2	27.12	39.62	62.50
GOG 模型	0.004 1	0.061 0	0.111 2	4.49	15.89	45.15

分析表 3 中不同线性校正方法的 RMSE 和 ΔE 实验数据可以得知, 将多光谱相机获取的 RGB 信号进行线性化校正, 对光谱重构的光谱精度和色度精度都有了明显提高, 未经过线性化校正重构的光谱与标准光谱的 RMSE 平均值是 0.096 7, 而经过各模型校正后, 其 RMSE 平均值均有了不同程度的降低, 最大的为指数校正, 其 RMSE 为 0.060 9, 约降低了 37%; 与未校正过的颜色与标准颜色的色差平均值相比, 经过各模型线性化校正的颜色与标准颜色的色差平均值也均有不同程度降低, 最大的为 GOG 模型校正方法, 其 ΔE 为 45.15, 约降低了 61%。因为本实验仅使用了 RGB 三通道信息进行光谱重构, 所以整体 CIE1976L*a*b* 色差值偏大。在不同的线性的校正方法中, 综合比较各方法的 RMSE 和 ΔE 值, 可知 GOG 模型方法优于其他 3 种线性校正方法, 在光谱精度和色度精度方面都有一定程度的提高。

3 结论

本研究建立了多光谱图像获取设备 CCD 光电响应值与接收光辐射能量的线性转换方程, 引入了基于物理意义的阶调模型 (S 模型和 GOG 模型), 并传统数学模型方法 (指数模型、多项式模型) 在线性化精度以及对光谱重构的影响两个方面进行比较分析。实验结果表明:

1) 经过线性化校正的各通道的线性相关性进一步增强, 其相关系数均在 99% 以上; 且选用的 4 种模型中, GOG 模型具有最好的线性化校正效果, 其各通道的相关系数值均接近 0.996。

2) 光谱重构后的光谱精度和色度精度都明显提高, 未经过线性校正重构的光谱与标准光谱的 RMSE 平均值是 0.096 7, 而校正过的降低了 25.8%~36.9%, 经过线性校正的颜色与标准颜色的色差平均值比未校正过的最大的约降低了 61%。在不同的线性校正方法中, 综合比较 RMSE 和 ΔE 值, 可知 GOG 模型方法优于其他线性校正方法, 在光谱精度和色度精度方面都有一定程度的提高。

由以上分析结果可以得知, 采用 GOG 模型能够较好地实现光谱图像精度的线性化校正, 在一定程度上减少了 CCD 响应不均匀性对图像信号采集精度的影响, 提高了光谱重构的精度。但是, 本研究所提出的线性化校正方法只是针对本研究中所使用的实验设备和实验条件, 完成了多光谱图像获取中 CCD 光电响应值的线性化校正, 还需对光照空间不均匀性进行校正。

参考文献:

- [1] 刘 振. 多光谱图像获取中光照不均匀性的非线性校正算法[J]. 中国印刷与包装研究, 2013, 5(1): 23-27, 32.
LIU Zhen. Non-Linear Correction Algorithm of Illumination Non-Uniformity for Multi-Spectral Image[J]. China Printing and Packaging Study, 2013, 5(1): 23-27, 32.
- [2] 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. Spectral Reconstruction of Object Surface Color Based on Digital Camera[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [3] 梁金星, 万晓霞, 刘 强. 基于SIFT算法的可见光宽带光谱图像配准方法研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(2): 57-63.
LIANG Jinxing, WAN Xiaoxia, LIU Qiang. Research on Visible Broadband Spectral Image Registration Method Based on SIFT Algorithm[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(2): 57-63.
- [4] 钟 飞, 吴雪茹. 基于线阵CCD的自动纠偏控制系统设计[J]. 包装学报, 2011, 3(2): 14-16.
ZHONG Fei, WU Xueru. Research on Automatic Deviation System Based on Linear CCD[J]. Packaging Journal, 2011, 3(2): 14-16.
- [5] 李 博. 基于三色相机的多光谱图像获取方法研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2012.
LI Bo. Research on the Method of Multispectral Image Acquisition Based on Three Color Camera[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2012.
- [6] 刘 振. 面向复制的多光谱图像获取技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
LIU Zhen. Research on Reproduction-Oriented Multispectral Image Acquisition Technology[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [7] International Commission on Illumination. The Relationship Between Digital and Colorimetric Data for Computer-Controlled CRT Displays[S]. Publication No. 122. Vienna: Commission Internationale de L'Eclairage, 1996: 1-30.
- [8] 王 勇, 徐海松. 基于S模型的液晶显示器颜色特征化[C]//走近CIE 26th 中国照明学会(2005)学术年会论文集. 上海: 中国照明学会, 2005: 349-351.
WANG Yong, XU Haisong. Color Characterization of LCD Based on S Model[C]// Come to the CIE 26th China Illuminating Engineering Society's Academic Essays(2005). Shanghai: China Illuminating Engineering Society, 2005: 349-351.
- [9] MCCAMY C S, MARCUS H, DAVIDSON J G. A Color-Rendition Chart[J]. Journal of Applied Photographic Engineering, 1976, 2(3): 95-99.
- [10] ZHU Y H, LI B. The RGB Digital Camera's Multi-Channel Spectral Reconstruction Based on Basis Function Theory [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 3594-3699.
- [11] HOMANN J P. Digital Color Management: Principles and Strategies for the Standardized Print Production[M]. Germany: Springer, 2009: 1-32.
- [12] MURPHY E R A. Testing Procedure to Characterize Color and Spatial Quality of Digital Cameras Used to Image Cultural Heritage[D]. Rochester: Rochester Institute of Technology, 2005.
- [13] 苏成志, 陈 栋, 曹国华, 等. 减小光强不均对CCD非均匀性校正的影响[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 680-684.
SU Chengzhi, CHEN Dong, CAO Guohua, et al. Reducing the Influence of Non-Uniformity of Luminous Intensity on the Inhomogeneity Correction for CCD[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 680-684.

(责任编辑: 廖友媛)