

高动态范围数字相机sRGB 色彩空间颜色管理

郭惠楠,曹剑中,王 华,张 建,杨洪涛

(中国科学院西安光学精密机械研究所,陕西 西安 710119)

摘 要: 数字成像设备在传输、显示图像时需要进行设备的特性化处理,该过程是设备颜色管理中的重要环节。为了保证输出图像的色彩复现能力,高动态范围数字相机需要根据设备自身特性进行特性化。现有特性化过程一般针对 8 位数字相机,并且转换矩阵的标定较为复杂,容易产生系统误差,矩阵精度易受影响。针对上述问题,提出了一种高动态范围彩色数字相机颜色管理方法,利用相机输出图像与被摄目标的色彩属性建立了 RGB 色彩空间到 CIE1931 XYZ 色彩空间的映射关系,并采用最小二乘拟合法对映射矩阵进行标定,最终将相机的 RGB 色彩空间转换至 sRGB 标准色彩空间,解决了高动态相机的特性化问题。实验证明,该方法操作简单,设备通用性较强,拟合均方误差优于 0.08,具有较好的鲁棒性。

关键词: 机器视觉; 高动态范围; 颜色管理; 数字相机

中图分类号: TP391.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)S-0238-05

Color management of sRGB color space for HDR digital camera

Guo Huinan, Cao Jianzhong, Wang Hua, Zhang Jian, Yang Hongtao

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

Abstract: Digital imaging devices require color space characterization while transferring or showing image between various devices which is a crucial part of color management for digital devices. In order to keep the color reproduction ability for output image, a high dynamic range digital (HDR) camera requires characterization based on the device properties. For existing characterization algorithms, which are in most cases for 8-bit-digital cameras, the processes of transformation matrix calibration are involved in some complex approaches, which are easy to cause system errors and influence the precision of color space transformation matrix. Accordingly, a color management approach was proposed for a high dynamic range colorful digital camera that using a color space mapping from camera RGB space to CIE1931 XYZ color space to estimate the function relation between two color spaces and using the least square method to achieve color matrix calibration. Eventually the camera RGB color space was transformed to sRGB standard color space which achieves characterization for HDR camera. Experimental results show that this method is of good robustness and easy to realize as well as the mean square error is less than 0.08.

Key words: machine vision; HDR; color management; digital camera

收稿日期:2014-10-09; 修订日期:2014-11-10

基金项目:国家自然科学基金(61201376)

作者简介:郭惠楠(1985-),男,博士,主要从事航天器机器视觉方面的研究。Email:guohuinan163@163.com

0 引言

可见光数字相机被广泛应用于工业监视、医学诊断、空天侦查、军事预警等诸多方面。由于在某些特殊光照环境下,传统的 8 位数字相机无法满足图像高分辨力的实际需求,因此需要提高 CCD 或 CMOS 的 A/D 采样量化位数来提升相机输出图像的动态范围,例如 12 位数字相机^[1]。无论 8 位或 12 位相机,都需要利用颜色管理技术解决从相机输入到显示输出等一系列过程中颜色一致性问题^[2]。sRGB 色度系统是一种面向显示器、打印机、因特网的标准色度系统,广泛用于 ITU-R BT.709 色彩标准、HDTV 信号传输、标准 CRT 显示器等^[3]。当 8 位相机采集图像并在 8 位 CRT 或 LED 设备显示时,除自带颜色配置表设备外,大多数标准设备已具有 sRGB 色彩空间转换功能,因此无需对设备进行特性化处理。对于 12 位高动态数字相机,相机输出与显示设备间往往不具备标准 sRGB 色彩空间的转换功能,并且相机的光谱响应与 CIE 标准色度观察者配色函数存在不一致性,因此,为了能够在 12 位标准显示设备上复现场景的真实色彩,需要在图像输出显示前将相机的 RGB 色彩空间转换至标准 sRGB 色彩空间。针对上述问题,文中利用 8 位显示设备颜色管理模型,推导出 12 位高动态范围数字相机 RGB 色彩空间与 sRGB 标准色彩空间的转换算法,并提出了一种 sRGB 转换矩阵的标定方法。

1 标准 8 位图像设备的颜色管理

显示设备如 CRT、LED、打印机等在显示输出彩色图像时,图像的颜色复现能力受到了设备色域的限制。设备个体的色彩空间具有明显的硬件依赖性,当颜色信息在不同设备间传递显示时,需要将不同设备的色彩空间转换为一个与设备无关的独立空间,即设备颜色管理的特性化过程^[4-5]。CIE1931-XYZ 色度系统定义了以 X, Y, Z 三刺激值为基色的颜色表述系统,用以定量描述真实世界可见光波段内的所有颜色。为了解决设备间色彩空间不一致所导致的色差问题,惠普与微软提出了一种用于显示器、打印机及因特网的 sRGB 标准色度系统^[3]。该系统描述了一个独立的色彩空间,其色域包含于 CIE1931-

XYZ 所描述的颜色范围,如图 1 所示。

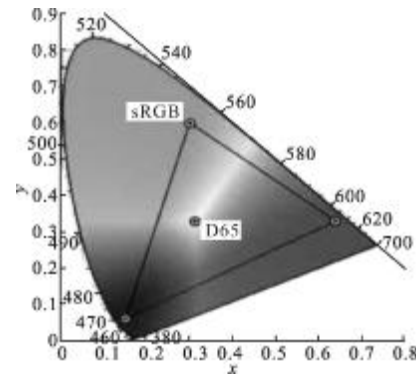


图 1 CIE1931-XYZ 与 sRGB 色域图

Fig.1 CIE1931-XYZ chromaticity diagram and the gamut of the sRGB color space

设待测光三刺激值在 CIE1931-RGB 色度系统中描述为 R, G, B, 则在 XYZ 系统中三刺激值 X, Y, Z 为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{CIE-XYZ}} = M_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{\text{CIE-RGB}} \quad (1)$$

式中: $M_{\text{RGB} \rightarrow \text{XYZ}}$ 为 RGB 空间到 XYZ 空间的转换矩阵。进一步将 XYZ 系统转换至 sRGB 标准色度系统,其线性变换为:

$$\begin{bmatrix} R_{sL} \\ G_{sL} \\ B_{sL} \end{bmatrix}_{\text{sRGB}} = M_{\text{XYZ} \rightarrow \text{sRGB}} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{CIE-XYZ}} \quad (2)$$

式中: $M_{\text{XYZ} \rightarrow \text{sRGB}}$ 为 XYZ 空间到 sRGB 空间的转换矩阵。

由于 sRGB 标准色度系统反映了标准 CRT 显示器 ($\gamma=2.2$) 的真实显示效果,因此需要将上述线性变换进行分段非线性化处理。设 C_{sL} 为线性 sRGB 空间内三分量值 ($C_{sL} \in R_{sL} \cup G_{sL} \cup B_{sL}$), C_{sRGB} 表示经分段非线性变换后的 sRGB 分量输出值 ($C_{sRGB} \in R_{sRGB} \cup G_{sRGB} \cup B_{sRGB}$), 则:

$$C_{sRGB} = \begin{cases} k \cdot C_{sL} & C_{sL} \leq 0.00313 \\ (1 + \alpha) C_{sL}^{1/\gamma} - \alpha & C_{sL} > 0.00313 \end{cases} \quad (3)$$

$k=12.92; \alpha=0.055; \gamma=2.4$

经过公式(1)-(3)的转换^[6-8],设备完成了由 CIE1931-RGB 色彩空间到 sRGB 标准色度空间的转换过程。对于常规 8 位 CRT、LCD、LED 显示器、8 位打印机而言,该过程通常由设备内部的补偿电路或标准转换模块完成。因此对于大多数设备而言,无需再附加辅助转换操作,其色域均由 sRGB 色度系统

确定。对于高动态范围数字相机-如 12 位彩色相机而言,作为前端采集、输入设备,相机的色彩响应直接影响了后端设备的显示效果;同时,12 位数字相机已远远超出了通用 8 位设备的响应动态范围,因此有必要对 12 位数字相机进行 sRGB 色彩空间的辅助转换,从而在不同设备间保证图像色彩的复现效果。

2 高动态 12 位数字相机特性化

类比 8 位图像显示设备的 sRGB 色彩空间转换过程,对 12 位彩色数字相机进行特性化处理,即确定相机 RGB 色彩空间到 sRGB 标准色彩空间的转换算法。CIE1931-XYZ 色度系统是独立于硬件设备的色彩空间,可以利用该色度系统作为桥梁,建立相机 RGB 与标准 sRGB 间的函数关系。

设相机对某目标拍摄,到达传感器表面色光的光谱功率分布为 $E(\lambda)$,在 CIE1931-RGB 色彩空间下三刺激值为:

$$\begin{cases} R_{in} = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G_{in} = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B_{in} = \int_{\lambda} E(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (4)$$

式中: \bar{r} 、 \bar{g} 、 \bar{b} 为三基色光谱三刺激值,该值只取决于人眼的视觉特性; λ 为可见光积分区间内的色光波长。

CIE1931-XYZ 色度系统定义了 CIE1931- RGB 色度系统的映射矩阵,其三刺激值为:

$$\begin{bmatrix} X_{in} \\ Y_{in} \\ Z_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.768892 & 1.751748 & 1.130160 \\ 1.000000 & 4.590700 & 0.060100 \\ 0.000000 & 0.056508 & 5.594292 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: X_{in}, Y_{in}, Z_{in} 为 XYZ 空间下的三刺激值^[7-8]。

考虑到 sRGB 标准色彩空间反映了显示设备实际非线性效果,须在完成 XYZ 到 sRGB 线性映射后,对其进行非线性化处理。CIE1931-XYZ 转换至 sRGB 标准色度系统的线性映射为:

$$\begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{in} \\ Y_{in} \\ Z_{in} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 7.4366 & -1.4085 & 0.7811 \\ -0.8076 & 6.9167 & -0.7499 \\ -0.0500 & -0.7794 & 5.9637 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: R_L, G_L, B_L 为线性映射后的三分量值。由 sRGB 色度系统分段非线性函数得到三刺激值 $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB}$:

$$C_{sRGB} = \begin{cases} 12.92C_L & C_L \leq 0.00313 \\ 1.055C_L^{1/2.4} - 0.055 & C_L > 0.00313 \end{cases} \quad (7)$$

式中: C 代表 R, G, B 。由于在上述变换中对输入、输出量都进行归一化处理(该过程不再累述),对于 12 位高动态相机,其各像素分量灰度变化区间为 $[0, 2^{12}-1]$,最终红、绿、蓝三分量的灰度值为:

$$\begin{cases} R_{out} = 4095 \cdot R_{sRGB} \\ G_{out} = 4095 \cdot G_{sRGB} \\ B_{out} = 4095 \cdot B_{sRGB} \end{cases} \quad (8)$$

$$[R_{out}, G_{out}, B_{out}] = f_{sRGB} [T_{XYZ}(R_{in}, G_{in}, B_{in})] \quad (9)$$

如公式(9)所示,相机 RGB 色彩空间经线性 XYZ 空间映射,最终转换为 sRGB 标准色彩空间。

3 sRGB 转换矩阵标定实验

在实际工程中(如图 2 所示),利用相机图像传感器实际采集到的像素 R, G, B 分量值作为输入来进行色彩空间转换,而非直接利用传感器所接收色光的

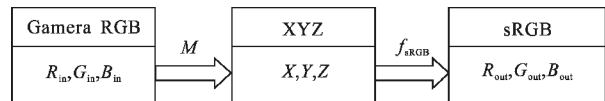


图 2 相机 sRGB 色彩空间转换流程
Fig.2 Flow chart of sRGB color space transform for digital camera

R, G, B 光谱信息进行计算。上述 CIE1931-RGB 空间是 RGB 类色彩空间之一,其表征了入射光的光谱特性;并且在与 XYZ 空间转换时,有着稳定的线性映射矩阵(如 Eq.(1)所示)。图像的 RGB 色彩空间是 RGB 类空间中的另一种形式,是一种以像素三彩色分量为基础的表色形式。由于输出设备的显示制式或硬件环境存在差异,因此该空间与 XYZ 色彩空间转换时,其映射矩阵会随着设备的不同而存在显著差异。参考文献[9-10]中提到了利用多项式回归法、BP 神经网络法等解决 RGB 到 XYZ 色彩空间转换问题,从而实现对个体设备映射矩阵的标定过程。此类方法计算量较大,需要大量的采样点来减小误差,并且

有时存在收敛问题。因此,文中设计了一种利用色度计辅助测量基于最小二乘拟合的映射矩阵标定方法。

首先,如图 3 所示,采用可调光源积分球与 12 位彩色数字相机等设备获取图像 RGB 信息。在某一固定光源环境下(例如 D65 标准光源),利用高动态 12 位相机进行拍摄,得到一幅 12 位可见光图像 I。设图像尺寸为 M×N,三个彩色分量可表述为:

$$I := \{R_{M \times N}^I, G_{M \times N}^I, B_{M \times N}^I\} \quad (10)$$

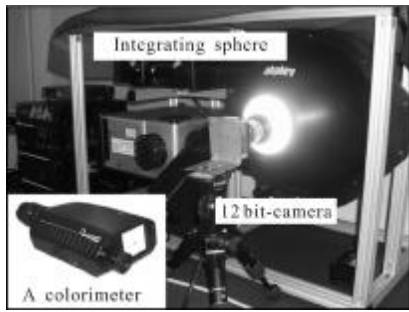


图 3 标定实验装置图

Fig.3 Instruments for experimental calibration

入射光通过镜头光学系统到达图像传感器靶面时,会产生光学系统非均匀性效应,表现为靶面中心区域能量较强,且能量逐渐向外侧递减^[11]。为了减小镜头非均匀性所引起的测量误差,选取图像中心小区域 τ 作为计算窗口,

$$\tau := \left\{ (x, y) \mid \begin{cases} \lfloor \frac{N}{2} - \varepsilon_x \rfloor \leq x \leq \lfloor \frac{N}{2} + \varepsilon_x \rfloor \\ \lfloor \frac{M}{2} - \varepsilon_y \rfloor \leq y \leq \lfloor \frac{M}{2} + \varepsilon_y \rfloor \end{cases} \right\} \quad (11)$$

式中: x, y 为小区域内像素点坐标; $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 分别为沿横、纵坐标方向小区域界值。该界值随图像尺寸大小变化,一般选取中心区域 10% 左右像素。

计算小区域 τ 内所有像素点的 R、G、B 三分量值,并以三分量各自的样本均值作为图像传感器实际接收到的分量值:

$$\begin{cases} R_{in} = \bar{R}_\tau = \frac{1}{N_\tau} \sum_{xy \in \tau} R_{xy} \\ G_{in} = \bar{G}_\tau = \frac{1}{N_\tau} \sum_{xy \in \tau} G_{xy} \\ B_{in} = \bar{B}_\tau = \frac{1}{N_\tau} \sum_{xy \in \tau} B_{xy} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\bar{C}_\tau (C=R, G, B)$ 为分量样本均值; N_τ 为小区域 τ 内像素点总数; $C_{in} (C=R, G, B)$ 为待转换的图像

RGB 分量值。

其次,在与上述测试系统、光照条件完全相同的环境下,利用色度计测定积分球光源在 CIE1931-XYZ 色度系统下的三刺激值。为了减小色度计本身存在的测量误差,实验采用多次测量求均值的方法,以其均值作为三刺激值的测量结果,即

$$\Psi = \frac{1}{N_\Psi} \sum_{i=1}^{N_\Psi} \Psi_i \quad (13)$$

式中: $\Psi\{X, Y, Z\}$; N_Ψ 表示测量次数。由于色度计精度为 0.001,且经 3~10 次测量,其标准差小于 0.005,故实验中通常取 $N_\Psi=5$ 。

通过相机与色度计的两次测定,待测光源的图像 RGB 空间与其 CIE1931-XYZ 空间的映射关系可表述为:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in} \\ G_{in} \\ B_{in} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: M 为图像 RGB 色彩空间到 CIE XYZ 色彩空间的线性映射矩阵。可以看出,矩阵 M 中有 9 个未知参数 $a_1 \sim a_9$,故可进行 9 次实验,通过测定在不同光源环境下的图像 RGB 与 XYZ 值,解算出 9 个未知参数。同时,为了提高计算精度,实际实验中对不同光源环境进行 $N(N>9)$ 次测定,并采用最小二乘拟合法求出最优解。

设 N 次实验中的图像 RGB 与 XYZ 映射关系为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} X^{(1)} \\ Y^{(1)} \\ Z^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{(1)} & a_2^{(1)} & a_3^{(1)} \\ a_4^{(1)} & a_5^{(1)} & a_6^{(1)} \\ a_7^{(1)} & a_8^{(1)} & a_9^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in}^{(1)} \\ G_{in}^{(1)} \\ B_{in}^{(1)} \end{bmatrix} \\ \dots & \dots & \dots \\ \begin{bmatrix} X^{(N)} \\ Y^{(N)} \\ Z^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1^{(N)} & a_2^{(N)} & a_3^{(N)} \\ a_4^{(N)} & a_5^{(N)} & a_6^{(N)} \\ a_7^{(N)} & a_8^{(N)} & a_9^{(N)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{in}^{(N)} \\ G_{in}^{(N)} \\ B_{in}^{(N)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (15)$$

其最小二乘拟合函数 F 为:

$$F = \alpha \cdot R + \beta \cdot G + \gamma \cdot B \quad (16)$$

其中, $F \in (X, Y, Z)$ 。设权重为 ε , F^* 表示 F 的计算值,则均方误差 $\|\delta\|_2$ 为:

$$\|\delta\|_2(F) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \varepsilon \cdot [F - F^*]^2} \quad (17)$$

$$\|\delta\|_2 = \sqrt{\|\delta\|_2^2(X) + \|\delta\|_2^2(Y) + \|\delta\|_2^2(Z)} \quad (18)$$

解算出拟合参数 $a_1 \sim a_9$,并得到映射矩阵后,结合

Eq.(6)~Eq.(9)完成相机 RGB 色彩空间到 sRGB 标准色彩空间的转换标定。

表 1 是某 12 位高动态彩色数字相机与色度计的实际测量值。在测量 RGB 数据时,采用多次测量求平均的方法得到每种颜色的测量均值,归一化后数据如表 1 所示;同理,XYZ 数据也进行了平均、归一化处理。图 4 给出了分别当 $N=9, N=18, N=27$ 时,将图像 RGB 色彩空间映射至 XYZ 色彩空间后的最小二乘拟合误差分析。从误差曲线可以看出,随着定标实验中 RGB 与 XYZ 输入值的增加,所拟合的转换矩阵的均方误差逐渐减小;同时,经过多组实验可以看出($L_1 \sim L_3$),文中所提出的特性化标定方法具有良好的误差鲁棒性。然而,由于最小二乘法在拟合的过程中,随着待拟合值的增多可能出现病态问题,因此对于不同的设备而言,可以根据预先设定的拟合精度阈值,确定拟合实验次数 N 。

表 1 某相机 RGB 与 XYZ 实测数据

Tab.1 RGB and XYZ datasheet of a camera

No.	RGB	XYZ
1	(0.899 3,1.000 0,0.988 1)	(0.492 9,0.517 5,0.462 5)
2	(1.000 0,1.000 0,0.996 1)	(0.734 7,0.770 2,0.640 6)
3	(0.234 2,0.338 1,0.703 0)	(0.097 1,0.148 6,0.281 8)
4	(0.431 9,0.716 6,0.373 5)	(0.271 1,0.162 5,0.218 0)
5	(0.726 0,0.301 9,0.342 9)	(0.530 3,0.549 9,0.038 5)
6	(1.000 0,1.000 0,0.293 0)	(0.166 7,0.084 8,0.011 9)
7	(0.796 0,0.447 1,0.790 9)	(0.100 2,0.177 2,0.043 1)
8	(0.301 0,0.612 4,0.838 9)	(0.041 8,0.031 2,0.182 1)
9	(0.998 3,0.797 7,0.254 0)	(0.407 3,0.366 4,0.021 5)
...
27	(0.599 8,0.999 9,0.921 9)	(0.245 8,0.354 9,0.314 9)

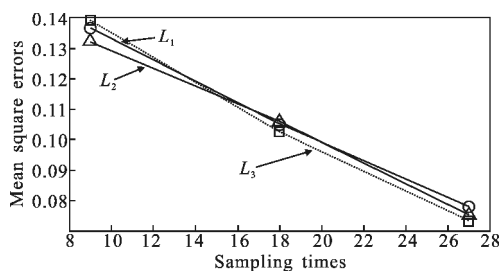


图 4 不同采样次数的均方误差

Fig.4 Distribution of mean square errors for different sampling times

4 结论

高动态范围彩色数字相机在拍摄并输出图像时,为了保证图像在显示设备中具有较高的颜色一致性以及色彩复现能力,需要对相机进行特性化处理。文中提

出了一种针对高动态相机的颜色管理方法,利用最小二乘拟合法建立相机输出图像的 RGB 色彩空间与被摄目标 XYZ 色度系统的函数关系,从而标定出相机特性化过程中的色彩空间转换矩阵。该方法无需测定拍摄目标的光谱功率分布与相机响应函数,简化了转换矩阵的标定过程,且计算量较小、标定精度较高,对于高动态相机的颜色管理具有良好的适用性。

参考文献:

- [1] Lee Dohyoung, Plataniotis, Konstantinos N. Lossless compression of HDR color filter array image for the digital camera pipeline[J]. Signal Processing: Image Communication, 2012, 27(6): 637-649.
- [2] Guthier, Benjamin, Kopf, et al. Algorithms for a real-time HDR video system [J]. Pattern Recognition Letters, 2013, 34(1): 25-33.
- [3] Xu Yanfang, Li Yinan, Wang Zhen. sRGB color space and display's color show [J]. Information Recording Materials, 2011, 12(4): 9-13. (in Chinese)
- [4] Deng Yicheng. Key technology research of color reproduction for color display [D]. Chang Chun: ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2013: 27-48. (in Chinese)
- [5] Hu Weijie, Tang Shunqing, Zhu Zhengfang. Modern Color Science and Application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 237-254. (in Chinese)
- [6] Andreas Koschan, Mongi Abidi. Digital Color Image Processing [M]. Zhang Yujin Transl. Beijing: Tsinghua University Press, 2010: 41-75. (in Chinese)
- [7] Guo Huinan, Cao Jianzhong, Zhou Zuofeng, et al. Objective evaluation approach of color balance for colorful digital image [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(S1): 214-218. (in Chinese)
- [8] Son Do Ky, Cho Eun Byeol, Moon Inkyu, et al. Development of an illumination measurement device for color distribution based on a CIE 1931 XYZ sensor [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2011, 15(1): 44-51.
- [9] Li Ruijuan. Study on color space conversion model from RGB to CIEXYZ [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(3): 79-91. (in Chinese)
- [10] Wu Jing, Yang Weiping, Ou Jiaming, et al. Characterization of still camera BP neural networks-based [J]. Optical Technique, 2004, 30(5): 577-579. (in Chinese)
- [11] Liu Zexun, Quan Xianrong, Ren Jianwei, et al. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)