

基于人工靶标的多光谱遥感图像真彩色合成

黄红莲¹, 易维宁¹, 杜丽丽¹, 崔文煜¹, 曾献芳²

(1. 中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽水利水电职业技术学院, 安徽 合肥 230601)

摘要: 多光谱真彩色合成图像在遥感图像解译判读、目标识别和信息处理等领域具有广阔的应用前景。真彩色合成技术取决于获得准确的 X、Y、Z 三刺激值, 以建立相机 RGB 三基色体系与人眼视觉颜色体系之间的关系。为此, 提出了基于彩色目标光谱信息的多光谱图像真彩色合成方法, 通过在卫星过顶时铺设人工靶标, 利用实测的靶标反射率光谱, 计算相机三基色体系 RGB 与人眼视觉颜色体系 CIE-XYZ 之间的转换矩阵, 构建适用于一定大气条件下的真彩色校正模型。利用高分一号卫星多光谱图像进行真彩色校正实验的结果表明, 该方法对色彩丰富度不同的图像均具有较好的颜色校正效果。

关键词: 真彩色合成; 光谱反射率; 人工靶标; 多光谱图像

中图分类号: TN911 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1126002

Multi-spectral remote sensing image true color synthesis technique based on artificial target

Huang Honglian¹, Yi Weining¹, Du Lili¹, Cui Wenyu¹, Zeng Xianfang²

(1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Anhui Technical College of Water Resources and Hydroelectric Power, Hefei 230601, China)

Abstract: Multi-spectral true color synthesized images have the prospects of broad application in the interpretation of remote sensing image, target recognition and information processing etc. The technique of true color synthesis depends on the accuracy of the obtained tristimulus values CIE-XYZ, which is used to establish the right relationship between the system of camera's RGB and human being's visual color. So, a method of true color image synthesis based on the information of artificial target was proposed by laying the man-made targets when the satellite passes. And, the transformation matrix between camera's RGB trichromatic system and human being's visual color system was estimated from the reflectance spectrum of man-made targets. Eventually, the suitable true color correction model was established in the certain atmospheric conditions. Experiment of true color correction was conducted on the multi-spectral images of GF-1 satellite, and the results show that good color correction effects has been exhibited on even every image with different degrees of color's richness.

Key words: true color synthesis; spectral reflectance; artificial target; multi-spectral image

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-26

基金项目: 中国科学院创新基金(CXJJ-14-Q53)

作者简介: 黄红莲(1980-), 女, 副研究员, 博士, 主要从事定量遥感应用方面的研究。Email: hlhuang@aiofm.ac.cn

0 引言

多光谱遥感图像一般由 R、G、B、NIR 四个通道的灰度图像组成的,而彩色合成图像则是利用多光谱图像中的 R、G、B 波段上的灰度图像组合形成的,可以表现出一定的颜色^[1-2]。图像中的色彩信息虽不能定量地反映光谱信息,但是却能够使人敏感地觉察出可见光波段光谱的细微差异,可以充分利用色彩在遥感图像解译判读和信息提取中的优势。此外,人工判读也是卫星图像应用的最基本和最重要的手段,因此一幅色彩逼真的卫星图像可以有效提升人眼判识地物类别的效率,在遥感影像判读及快视图像生成等方面有广泛的应用^[3-4]。

但是,在使用多光谱卫星影像合成彩色图像的过程中,由于受到多光谱成像探测器光谱响应性能及外界环境等因素的影响,使得合成的真彩色图像色彩失真,不易判别。为解决合成图像的色偏问题,人们发展了多种色彩校正方法与彩色合成方法。归纳起来主要有三类:基于图像统计的颜色校正方法、基于相机模型的颜色校正方法和基于光谱反射率的颜色校正方法。

基于图像统计的颜色校正方法通过统计图像本身的特性来进行真彩色校正,代表性的有白平衡法及其各种改进算法^[5-6]。该方法利用的是图像的统计信息,与图像本身的特性密切相关,但对于多光谱遥感图像而言,它在形成的过程中由于受到来自外界环境等多方面的影响,如果本身已偏色严重,再去对其进行统计分析,不但达不到颜色校正的效果,反而使图像质量更差。

基于相机模型的颜色校正方法通过建立标准图像与非标准图像之间的映射关系,来实现彩色校正。目前比较常用的有矩阵转换法、多项式回归法、查找表法和人工神经网络法^[7-8]。该方法虽然最终处理效果比较好,但是在建模的过程中需要大量的标准图像做参考,这对于用彩色相机获取与多光谱图像拍摄场景一致的彩色遥感图像增加了一定的难度,需要耗费大量的时间、人力、物力和财力,实用性较差。基于光谱反射率的颜色校正通过还原物体表面的光谱反射特性来实现彩色校正^[9]。该方法虽然能定量地表达和描述颜色,但是需要获得多光谱遥感图像

中所有地物的光谱反射率信息,这在实际的过程中不可能通过测量获得特定环境条件下所有地物的光谱反射率,而通过反射率反演获得又会增加颜色校正的误差。

综合上述三类真彩色校正方法各自的优缺点,近年来发展了一种基于物理机理的真彩色合成方法^[10]。它将相机模型的颜色校正方法和基于光谱反射率的颜色校正方法相结合,根据实际遥感图像和地物理论色彩真值之间的转换关系,完成遥感图像的真彩色校正。但是由于在计算转换关系时,需要获得 5 nm 间隔的实际图像的 DN 值,而对多光谱图像不适用。所以,文中针对多光谱图像,使用实测的人工靶标光谱信息,直接获得靶标三刺激值 XYZ 与遥感图像 RGB 之间的转换矩阵。具体方法为:通过在卫星过顶时铺设人工靶标,并测量其高光谱反射率,计算人工靶标的 CIE-XYZ 标准色度系统三刺激值 X、Y、Z;由对应的多光谱遥感图像,获得相机三基色体系与人眼视觉颜色体系之间的转换矩阵;再将转换矩阵应用到整幅图像或大气条件相近的其他图像,实现多光谱图像的真彩色合成。该方法既不需要通过彩色相机获取标准的真彩色图像,也不需要测量图像中所有地物的光谱反射率或者进行反射率反演,只需要获得被摄图像中某几种地物的光谱信息即可,这在实际操作过程中比较容易获取,同时也使校正变得简单可行。

1 真彩色合成算法

基于彩色靶标光谱信息的真彩色合成分三个步骤实现:(1) 根据实测的靶标光谱信息和人眼视觉函数,计算彩色靶标在 CIE-XYZ 标准颜色空间三刺激值 X、Y、Z;(2) 由彩色靶标三刺激值 X、Y、Z 和多光谱遥感图像,解算 CIE-XYZ 标准颜色空间三刺激值 X、Y、Z 与多光谱相机 R、G、B 之间的转换矩阵 A;(3) 将计算得到的转换矩阵作用到多光谱遥感图像,得到 CIE-XYZ 颜色空间的图像,并将其转换到计算机显示器 R'G'B'颜色空间下,以真实的颜色显示,实现多光谱遥感图像的真彩色合成。由于第三步中显示系统的转换关系矩阵是确定的,所以,“真彩色”图像的获得,取决于多光谱图像中靶标区域三刺激值 X、Y、Z 的准确计算,以解算出转换矩阵 A。

1.1 CIE-XYZ 三刺激值计算

CIE-XYZ 是国际照明委员会(CIE)于 1931 年创建的标准颜色空间,它基于人类颜色视觉直接测定,与测量设备无关,用三刺激值 X 、 Y 、 Z 来定量描述颜色,计算公式如下^[10]:

$$\begin{cases} X=k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} S(\lambda)\rho(\lambda)\bar{x}(\lambda) \\ Y=k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} S(\lambda)\rho(\lambda)\bar{y}(\lambda) \\ Z=k \sum_{\lambda=380}^{\lambda=780} S(\lambda)\rho(\lambda)\bar{z}(\lambda) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho(\lambda)$ 为物体光谱反射率; $S(\lambda)$ 为光源光谱; $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 为 1931CIE 标准色度观察者光谱三刺激值; k 为调整因子, $k=100/\int_{\lambda} S(\lambda)\bar{y}(\lambda)$ 。

针对多光谱遥感图像,由于光学载荷一般在自然光下成像,计算三刺激值 X 、 Y 、 Z 时, $S(\lambda)$ 可以使用接近太阳光的标准 D65 光源,近似模拟太阳光的光谱功率分布;标准色度观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 根据人眼的明视觉光谱光视效率函数定义,其值是固定不变的。所以要获得准确的三刺激值,关键是得到卫星高度的目标表现反射率 $\rho(\lambda)$ 。

根据大气辐射传输模型,由地面同步测量的彩色靶标的地面光谱反射率和大气参数,可以计算得到地物在卫星高度的表现反射率,公式如下^[11]:

$$\rho(\lambda)=\rho_s(\lambda)+\frac{\rho_a(\lambda)}{1-\rho_s(\lambda)\cdot S}T_{\lambda}(\theta_s)T_{\lambda}(\theta_r) \quad (2)$$

式中: θ_s 为太阳天顶角; θ_r 为观测天顶角; $\rho(\lambda)$ 为卫星高度的表现反射率; $\rho_s(\lambda)$ 为地物目标地表反射率; $\rho_a(\lambda)$ 为大气分子和气溶胶散射产生的大气内反射率; $T(\theta_s)$ 为入射方向(太阳-目标路径)总的散射透过率; $T(\theta_r)$ 为观测方向(目标-观测点路径)总的散射透过率; S 为大气半球反照率。

1.2 转换矩阵解算

相机属于 R、G、B 三基色体系,对多光谱图像红、绿、蓝三个波段分别求每块靶标区域的灰度均值,得到彩色靶标在相机 RGB 颜色空间的三刺激值 R、G、B。

相机 RGB 颜色空间的三刺激值 R、G、B 与 CIE-XYZ 标准颜色空间三刺激值 X、Y、Z 之间可以通过以下公式实现数据转换^[12]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = A \times \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:[X]、[Y]、[Z]为靶标在 CIE-XYZ 空间的颜色三刺激值,可以通过将公式(2)代入公式(1)计算得到;[R]、[G]、[B]为靶标在相机 RGB 颜色空间的三刺激值 R、G、B,通过对多光谱图像红、绿、蓝三个波段分别求每块靶标区域的灰度均值获得。

理论上由三块以上人工靶标,就可以通过线性拟合得到公式(3)的矩阵系数 A。但是,在实际应用中,使用线性拟合得到的 A 进行真彩色校正效果不理想,故增加了常数项。表示如下:

$$\begin{cases} X=a_{11}R+a_{12}G+a_{13}B+a_{14} \\ Y=a_{21}R+a_{22}G+a_{23}B+a_{24} \\ Z=a_{31}R+a_{32}G+a_{33}B+a_{34} \end{cases} \quad (4)$$

由此,可以得到增加常数项后的转换矩阵 A:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.3 真彩色校正

计算得到转换矩阵 A 之后,将其作用到整幅图像或大气条件相近的其他图像,即可获得彩色图像每个像素的 XYZ 值。

由于 XYZ 颜色空间是设备无关颜色空间,还需要将得到的 XYZ 空间的颜色三刺激值(X, Y, Z)转换到计算机显示器 R'G'B'颜色空间下的颜色值(R', G', B'),用(R', G', B')记录目标的颜色值。取 D65 光源在 XYZ 颜色空间中坐标(0.3127, 0.3290, 0.3583)为标准参考白点,其在 ITU-R BT.709 色度空间中的坐标(R', G', B')转换如下^[12]:

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.24048 & -1.53715 & -0.49854 \\ -0.96926 & 1.87599 & 0.04156 \\ 0.05565 & -0.20404 & 1.05731 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 真彩色合成结果及评价

2.1 实验数据和处理

为检验上述真彩色合成方法的有效性,针对高分一号卫星,于 2014 年 12 月份在云南丽江开展了验证实验。在丽江靶标场,铺设了六种颜色的彩色靶标、三种灰阶靶标,六种彩色靶标长宽都是 48m,三种灰阶靶标长宽都是 60m。

在高分一号卫星过顶时,同步测量了彩色靶标和灰阶靶标的光谱反射率曲线,以及靶标场地周围的大气参数。彩色靶标的光谱反射率曲线如图 1 所示,灰阶靶标的光谱反射率曲线如图 2 所示。

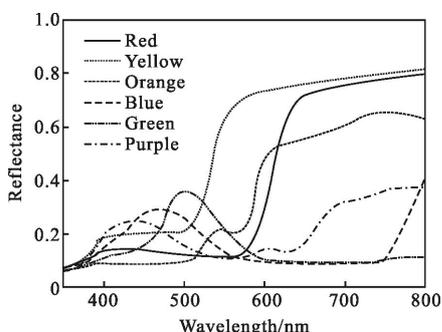


图 1 彩色靶标的光谱反射率

Fig.1 Spectral reflectance of color artificial target

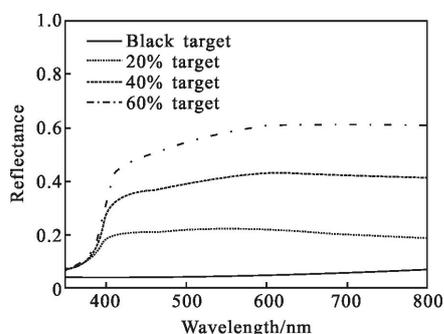


图 2 灰阶靶标的光谱反射率

Fig.2 Spectral reflectance of gray-scale artificial target

由地面同步测量的人工靶标光谱反射率 $\rho_s(\lambda)$ 和地面大气参数 (卫星过顶时气溶胶光学厚度为 0.159),使用大气辐射传输模型 6S,计算出大气内反射率 $\rho_a(\lambda)$,大气半球反照率 S ,大气透过率 $T(\theta_s)$ 、 $T(\theta_v)$ 。再根据公式(2),可以得到不同波长的表观反射率 $\rho(\lambda)$ 。

得到表观反射率 $\rho(\lambda)$ 后, $S(\lambda)$ 选择接近太阳光的标准 D65 光源,根据公式(1),对每一波长的标准色度观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 进行积分,得到每块人工靶标在 CIE-XYZ 空间的色度三刺激值。

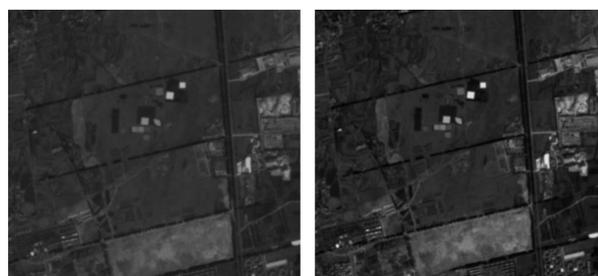
2.2 真彩色合成结果

GF-1 卫星搭载有两台 2 m 分辨率全色/8 m 分辨率多光谱相机,四台 16 m 分辨率多光谱相机。其中 8 m 分辨率多光谱相机包含红(0.63~0.69 μm)、绿(0.52~0.59 μm)、蓝(0.45~0.52 μm)、近红外(0.77~0.89 μm) 四个波段。使用前三个波段进行真彩色合

成算法验证。

人工靶标在相机 RGB 颜色空间的三刺激值 R、G、B 通过对多光谱图像红、绿、蓝三个波段分别求每块靶标区域的灰度均值获得,根据已经得到的标准颜色空间的人工靶标三刺激值 X、Y、Z,由公式(4)可解算出转换矩阵 A,进而得到真彩色合成图像。

图 3 为计算出的转换矩阵直接作用在本幅图像上,得到的丽江靶标场区域真彩色校正效果。图 3(a)为原始图像,图 3(b)为真彩色校正后得到的真彩色合成图像,可以看出,原始图像偏蓝,真彩色校正后图像颜色比较鲜艳、自然,颜色更接近真实的地物彩色。相对与校正前的图像,真彩色校正后图像更接近人眼视觉效果,并且图像的亮度有所增加,地物间对比度更为明显,有利于识别目标。



(a) 真彩色校正前图像 (b) 真彩色校正后图像
(a) Images before true color correction (b) Images after true color correction

图 3 靶标场真彩色校正前后对比图

Fig.3 Images before and after true color correction in target field

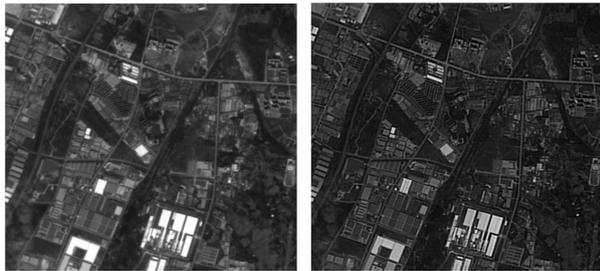
为验证转换矩阵的通用性,将由人工靶标计算得到的转换矩阵,应用到嵩山场、成都、西安、广州等地多光谱图像上。表 1 为转换矩阵应用到其他图像

表 1 通用转换矩阵的大气条件

Tab.1 Atmospheric conditions of general transformation matrix

GF-1 image	Aerosol optical thickness	Sun zenith angle/(°)	Sun azimuth angle / (°)
Lijiang target-field	0.159	51.44	166.73
Songshan target-field	0.512	53.31	164.79
Chengdu	0.610	46.36	167.45
Guangzhou	0.496	42.04	150.98
Xi'an	0.450	58.69	160.62

时的大气条件。图 4 是将计算得到的转换矩阵应用到成都郊区多光谱图像上的真彩色校正结果。从中可以看出,将丽江靶标场计算的转换矩阵应用到成都郊区的多光谱图像上,亦能将偏蓝的原始图像校正到颜色鲜艳、自然,取得较好的校正效果。说明,在太阳天顶角相差 15°,气溶胶光学厚度相差 0.45 以内,转换矩阵都具有通用性。



(a) 真彩色校正前图像 (b) 真彩色校正后图像
(a) Images before true color correction (b) Images after true color correction

图 4 城镇居住区真彩色校正前后对比图

Fig.4 Images before and after true color correction in urban residential area

2.3 真彩色校正效果评价

多光谱遥感图像合成真彩色图像后,其色彩校正效果的评价就是一项必不可少的内容。评价图像色彩校正的效果应充分遵循人眼的视觉特性^[13],但由于受到周围环境、文化背景、人的主观感受等因素的影响,不同的人具有不同的颜色视觉特性。所以,还需要对其进行客观评价,下面采用 CIE LAB 空间色差法进行客观评价。

CIE LAB 空间色差法是为了统一评价颜色差别而提出的一种方法^[14]。该方法首先将 CIE XYZ 彩色空间的三刺激值转换到 CIE LAB 空间,转换公式如下:

$$\begin{cases} L^*=116f(Y/Y_n)-16 \\ a^*=500[f(X/X_n)-f(Y/Y_n)] \\ b^*=200[f(Y/Y_n)-f(Z/Z_n)] \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{式中: } f(g) = \begin{cases} (841/108)(g)+16/116 & g \leq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\ (g)^{1/3} & g > \left(\frac{24}{116}\right)^3 \end{cases}$$

$g=X/X_n, Y/Y_n, Z/Z_n, X, Y, Z$ 为颜色样品在 CIE XYZ 空间的三刺激值, X_n, Y_n, Z_n 为指定的白色刺激的三刺激值,一般情况下是 CIE 标准照明体照射在完全漫

反射体上,再经完全漫反射体反射至观察者眼中的白色刺激的三刺激值, $X_n=95.045, Y_n=100.00, Z_n=108.905$; L^* 为米制明度, a^*, b^* 为米制色度, 如果已知两个以 L^*, a^*, b^* 标定的颜色,那么其总色差可表示如下:

$$\Delta E_{ab}^*(L^*a^*b^*)=[(\Delta L^*)^2+(\Delta a^*)^2+(\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (8)$$

式中: $\begin{cases} \Delta L^*=L_1^*-L_2^* \\ \Delta a^*=a_1^*-a_2^* \\ \Delta b^*=b_1^*-b_2^* \end{cases}$; L_1^*, a_1^*, b_1^* 是第一种颜色在 CIE LAB 空间中的坐标, L_2^*, a_2^*, b_2^* 是第二种颜色在 CIE LAB 空间中的坐标; ΔE_{ab}^* 是两个颜色的色差。

在实际处理过程中,一般采用校正后图像与标准图像的平均色差作为评价指标,公式如下:

$$\Delta E_{ab}^*(L^*a^*b^*) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \times \sqrt{(L_1^*(i,j)-L_2^*(i,j))^2+(a_1^*(i,j)-a_2^*(i,j))^2+(b_1^*(i,j)-b_2^*(i,j))^2} \quad (9)$$

式中: $M \times N$ 为图像总大小。

使用 CIE LAB 空间色差法对文中真彩色校正法和其他颜色校正算法进行客观评价,如表 2 所示。从表中可以看出,与原图像相比,经过彩色校正后的图像 CIE LAB 空间色差 $\Delta E_{ab}^*(L^*a^*b^*)$ 都有所降低,但是使用文中提出的真彩色校正法校正后的图像 $\Delta E_{ab}^*(L^*a^*b^*)$ 最小,校正效果最好。

表 2 CIE LAB 空间色差对比表

Tab.2 Comparison of color difference in CIE LAB color space

GF-1 image	Color difference in CIE LAB color space
Original image	22.67
Reflectance inversion method	2.08
White balance method	3.35
Method in this article	1.17

3 结论

针对相机模型的颜色校正方法和基于光谱反射率的颜色校正方法的不足,文中提出了一种基于人工靶标光谱信息的真彩色合成方法对多光谱遥感图像进行颜色校正。该方法由人工靶标光谱信息获得靶标的三刺激值 CIE-XYZ,再由对应的多光谱遥感

图像, 获得相机三基色体系与人眼视觉颜色体系之间的转换矩阵, 最后使用转换矩阵进行真彩色合成。通过丽江验证实验, 将该方法应用于高分一号多光谱遥感图像, 结果表明该算法不仅适用于色彩丰富度不同的图像, 而且得到的转换矩阵在一定大气条件下对多光谱遥感图像颜色校正具有通用性, 为研究多光谱遥感图像的真彩色合成提供了一种解决思路。

参考文献:

- [1] Cai Tiefeng, Zhu Feng, Hao Yingming, et al. Pseudo-color processing of gray images for human visual detection and recognition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S): 213-219. (in Chinese)
蔡铁峰, 朱枫, 郝颖明, 等. 面向人眼探测识别的灰度图像伪彩色化方法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(S): 213-219.
- [2] Xu Tingfa, Li Juntao, Zhang Yizhou, et al. True color transfer for dual band image fusion [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 402-410. (in Chinese)
许廷发, 李俊涛, 张一舟, 等. 真彩色传递双波段图像融合[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 402-410.
- [3] Xu Xiaozhao, Shen Lansun, Liu Changjiang. Color correction methods and application in image processing [J]. *Application Research of Computers*, 2008, 25(8): 2250-2254. (in Chinese)
徐晓昭, 沈兰荪, 刘长江. 颜色校正方法及其在图像处理中的应用[J]. *计算机应用研究*, 2008, 25(8): 2250-2254.
- [4] Wang Chunjiao, Shan Monan, Hu Zhaoguang. Multi-spectral remote sensing based land surface temperature retrieval and isolated permafrost zone segmentation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1390-1396. (in Chinese)
王春娇, 单墨楠, 胡照广. 多光谱遥感的地温反演及岛状冻土区分割方法研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1390-1396.
- [5] Zhou Rongzheng, He Jie, Hong Zhiliang. Adaptive algorithm of auto white balance for digital camera [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(3): 529-533.
- [6] Xu Minfen, Wang Liqiang, Yuan Bo. Auto white-balance algorithm of high-definition electronic endoscop [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3110-3115. (in Chinese)
- [7] Li Yanni, Li Yating. Research on color characterization of display[J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(17): 95-97.
- [8] Liu Ye, Zhang Yong, Liu Cunhai, et al. A comparative study of the digital cameras colorimetric characterization by means of BP neural networks and polynomial transforms[J]. *Advanced Display*, 2010, 109: 28-31. (in Chinese)
柳叶, 张勇, 刘存海, 等. 数码相机颜色特性化两种方法对比研究-BP神经网络和多项式转换法 [J]. *现代显示*, 2010, 109: 28-31.
- [9] Ren Penyuan, Liao Ningfang, Chai Binghua, et al. Spectral reflectance recovery based on multispectral imaging [J]. *Optical Technique*, 2005, 31(3): 427-433.
- [10] Lv Xiaokai, Li Chuanrong, Ma Lingling, et al. A true color correction model for hyperspectral remote sensing image based on physical mechanism [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(3): 467-473. (in Chinese)
吕晓凯, 李传荣, 马灵玲, 等. 一种基于物理机理的高光谱遥感图像真彩色校正模型[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(3): 467-473.
- [11] Vermote E, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector(6SV)[Z], 2006: 11-14.
- [12] Guo Huinan, Cao Jianzhong, Wang Hua, et al. Color management of sRGB color space for HDR digital camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(S): 238-242. (in Chinese)
郭惠楠, 曹剑中, 王华, 等. 高动态范围数字相机 sRGB 色彩空间颜色管理[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S): 238-242.
- [13] Jin Weiqi, Jia Xiaoting, Gao Shaoshu, et al. Subjective evaluation of quality for color fusion images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(12): 3465-3471. (in Chinese)
金伟其, 贾晓婷, 高绍姝, 等. 彩色融合图像的质量主观评价[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(12): 3465-3471.
- [14] Yu Xun, Tian Bingxin, Jiang Xu, et al. Measurement method of MRED of color imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1633-1637. (in Chinese)
于洵, 田冰心, 姜旭, 等. 彩色成像系统最小可分辨色差测量方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(5): 1633-1637.