

基于色彩传递的单波段热图像彩色化处理算法

赵源萌 王岭雪 金伟其 史世明 王霞

(北京理工大学信息科学技术学院光电工程系, 北京 100081)

摘要 研究基于色彩传递的单波段热成像自然感彩色化处理算法, 提出一种应用伪彩色编码突出显示热目标的方法。方法首先选定适当的参考图像并对亮度通道做线性变换, 然后基于通道间相关性很小的 $l\alpha\beta$ 颜色空间, 利用图像像素邻域亮度通道的均值和标准差进行像素间的相互匹配, 将参考图像的色彩传递给单波段红外图像, 最后寻找色彩传递结果图像中亮度接近最大值的像素, 将它们的颜色映射到彩虹编码的高温端, 以红色调突出显示。算法用于几种场景类型的单波段红外图像, 得到了色彩自然感较好的彩色化热图像, 能够避免长时间观察热图像造成视觉疲劳的问题; 突出场景热目标, 在保留背景深度感的基础上, 可有效提升观察者的目标识别能力。

关键词 图像处理; 单波段热图像彩色化; 色彩传递; 伪彩色编码

中图分类号 TP751.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0654

Single-Band Infrared Image Colorization Algorithm Based on Color Transfer

Zhao Yuanmeng Wang Lingxue Jin Weiqi Shi Shiming Wang Xia

(Department of Optical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract Single-band infrared image colorization based on color transfer is studied, and a method of popping-out hot targets by applying pseudo-color coding is put forward. An appropriate reference image is selected, and its luminance channel is linearly transformed. Color of the image is transferred to single-band infrared image based on decorrelated $l\alpha\beta$ color space, through matching pixels between images using the mean and standard deviation in luminance channel over specified neighbor of pixels. The brightest parts of the resulted image are highlighted using the red hue of rainbow color coding, which usually associates with high temperature. By doing those to kinds of single-band infrared images, images with natural color appearance are obtained, which can avoid visual fatigue after long-time observation. And as the hot targets in the scene are made more noticeable, the target identification ability can be efficiently increased while the scene depth perception is remained.

Key words image processing; single-band infrared image colorization; color transfer; pseudo-color coding

1 引 言

目前, 大多数热成像系统的图像仍主要以黑白模式显示, 由以往针对颜色视觉的研究和实验^[1,2]可知, 人眼能分辨的彩色等级远多于灰度等级, 因此热成像的彩色化处理算法一直是人们研究的主要课题。常见的灰度伪彩色编码方法虽可直观地显示场景的温差, 但过于突兀鲜艳的颜色与实际场景不仅

实际色彩相差甚远, 而且容易造成观察者视觉疲劳, 主要用于工业测温以及医学辅助诊断等领域。因此, 自然感彩色化技术成为彩色夜视和红外成像技术的重要方向^[3~6]。

基于色彩传递的图像彩色化处理算法正逐渐成为图像处理领域的一个研究热点。2002年 Welsh等^[7]利用像素邻域亮度均值和标准差来匹配灰度图

收稿日期: 2008-04-22; 收到修改稿日期: 2008-09-16

基金项目: 总装重点预研项目(40405050103)、教育部高校博士点基金新教师项目(20070007022)和北京理工大学基础研究基金(20070142007)资助课题

作者简介: 赵源萌(1981—), 男, 博士生, 主要从事数字图像处理方面的研究。E-mail: zhaoym@bit.edu.cn

导师简介: 金伟其(1961—), 男, 教授, 博士, 主要从事夜视与红外技术、图像工程与视频处理技术、光电检测技术、电子光学等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

像和参考图像的像素,初步实现了对可见光灰度图像的自然感色彩传递。赵国英等^[8]通过调整图像的高阶统计量获得了更好的色彩传递结果。胡国飞等^[9]采用了局部和整体相结合的自适应采样分析方法,实现颜色图像到形状图像的色彩传递过程。钱小燕等^[10]等通过模糊颜色聚类技术获得了平滑和自然的灰度图像彩色化效果。

近年来,我们研究提出了基于人眼视觉特性的可见光(微光)/热成像自然感彩色夜视图像处理算法^[4]以及基于色彩传递的双波段夜视图像自然感彩色化方法^[11],获得了较好的自然感彩色夜视成像,但算法主要针对多波段图像的自然感彩色化。鉴于目前普遍使用单传感器的热成像系统,本文将尝试将色彩传递技术用于单波段热图像的彩色化处理。

2 彩色图像由 RGB 颜色空间到 $l\alpha\beta$ 对立色空间的转换

2.1 $l\alpha\beta$ 颜色空间

Ruderman 等在研究视网膜对自然图像的响应时,发现在锥细胞反应空间 LMS 三个特定方向上响应数据不相关,由此推导出三个通道之间的相关性很小的对立色 $l\alpha\beta$ 颜色空间^[12]。对 LMS 进行对数变换,改善坐标轴的对称性

$$\begin{aligned} L^* &= \lg L - \langle \lg L \rangle, \\ M^* &= \lg M - \langle \lg M \rangle, \\ S^* &= \lg S - \langle \lg S \rangle, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $\langle \lg L \rangle$ 是 $\lg L$ 在图像中的平均值。然后通过主分量分析,引入表示对数锥细胞响应空间中 L^* 、 M^* 、 S^* 方向上的单位向量 \mathbf{L} 、 \mathbf{M} 、 \mathbf{S} :

$$\begin{aligned} \mathbf{l} &= (\mathbf{L} + \mathbf{M} + \mathbf{S}) / \sqrt{3}, \\ \boldsymbol{\alpha} &= (\mathbf{L} + \mathbf{M} - 2\mathbf{S}) / \sqrt{6}, \\ \boldsymbol{\beta} &= (\mathbf{L} - \mathbf{M}) / \sqrt{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

得到的主坐标轴和标准差比值对图像的尺度变化不敏感。在 $l\alpha\beta$ 颜色空间中, \mathbf{l} 方向方差最大,表征自然图像的灰度起伏; $\boldsymbol{\alpha}$ 方向方差较大,用 \mathbf{L} 和 \mathbf{M} 信号的平均值对抗 \mathbf{S} ,符合生物物理学中的黄-蓝对抗机制; $\boldsymbol{\beta}$ 方向扮演红-绿通道,简单地对抗 \mathbf{L} 和 \mathbf{M} 。在这三个通道中,不能由任何通道预测另外两个通道,即其间无相关性。

2.2 彩色空间转换

色彩传递需要将图像的亮度与颜色分开处理, RGB 颜色空间三通道之间的相关性会给处理带来不便,而数字图像多以 RGB 颜色空间保存、处理和

显示,因此,在传递之前需将图像从 RGB 空间转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间。转换过程分以下几步:首先将图像由 RGB 空间转换到 XYZ 空间,因为色彩传递后还需逆变换回 RGB 空间,因此采用与设备无关的转换,然后再由 XYZ 空间得到人眼锥细胞反应空间 LMS 的三通道值:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0.5141 & 0.3239 & 0.1604 \\ 0.2651 & 0.6702 & 0.0641 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (3)$$

LMS 三通道值取对数可改善数据相对于坐标轴的对称性,鉴于由 $l\alpha\beta$ 空间到 RGB 空间逆变换时的运算考虑,与(1)式相比此处没有减去 $\lg L$ 、 $\lg M$ 、 $\lg S$ 的均值,而是在(9)式中减去通道均值,因为旋转坐标轴和减去数据均值这两个运算的先后次序并不会影响结果。最后图像由锥细胞反应空间转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间:

$$L' = \lg L, \quad M' = \lg M, \quad S' = \lg S \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix}. \quad (5)$$

在 $l\alpha\beta$ 空间完成色彩传递后,须将结果图像逆变换回 RGB 空间:

$$\begin{bmatrix} L' \\ M' \\ S' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1/\sqrt{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{6} & 0 \\ 0 & 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$L = 10^{L'}, \quad M = 10^{M'}, \quad S = 10^{S'}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.4679 & -3.5873 & 0.1193 \\ -1.2186 & 2.3809 & -0.1624 \\ 0.0497 & -0.2439 & 1.2045 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix}. \quad (8)$$

3 彩色可见光图像到单波段红外图像的色彩传递

单波段红外图像(简称源图像 S)只反映辐射强度的二维图像数据,以一幅与其场景相似的可见光彩色图像作参考(简称参考图像 R),将参考图像 R 的自然感色彩传递给源图像 S ,使成为具有自然感的彩色热图像。本文算法的整体流程图如图 1。

3.1 参考图像的选取

根据源图像 S 的内容选择参考图像 R ,虽然 R 图像内容不必与 S 图像完全相同,但原则上两者应在一定程度上类似(例如,源图像场景中有树木、草坪和建筑物,则可选取一幅场景中有树木、草坪和建筑物的彩色可见光图像作参考图像)。如果多幅源图像的场景内容相近,可选取同一幅可见光彩色图像作参考图像。图 2 给出三幅不同场景热图像在同一参考图像下的传递结果。可以看出:由于源图像的场景中都有大面积的草地和树木,用同一幅具有草地的参考图像进行传递,能够得到色彩风格基本一致的自然感彩色图像。这表明在成像系统的实际

应用时,有可能选择对场景具有一定普适性的参考图像进行传递。

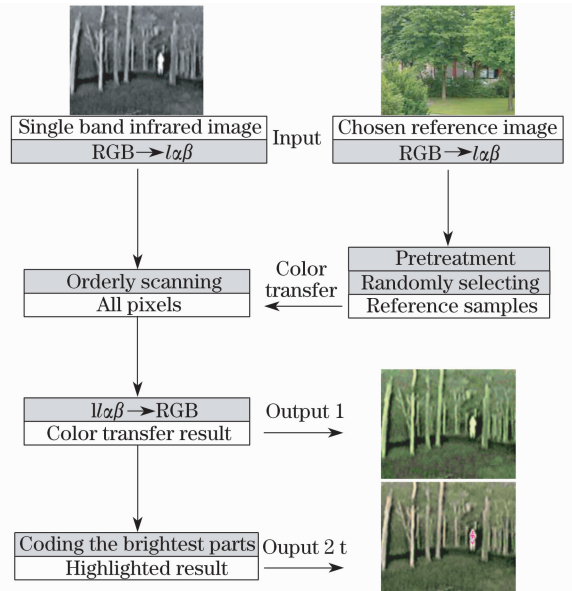


图 1 基于色彩传递的单波段红外图像彩色化算法处理流程图

Fig. 1 Flow chart of single band infrared image colorization based on color transfer

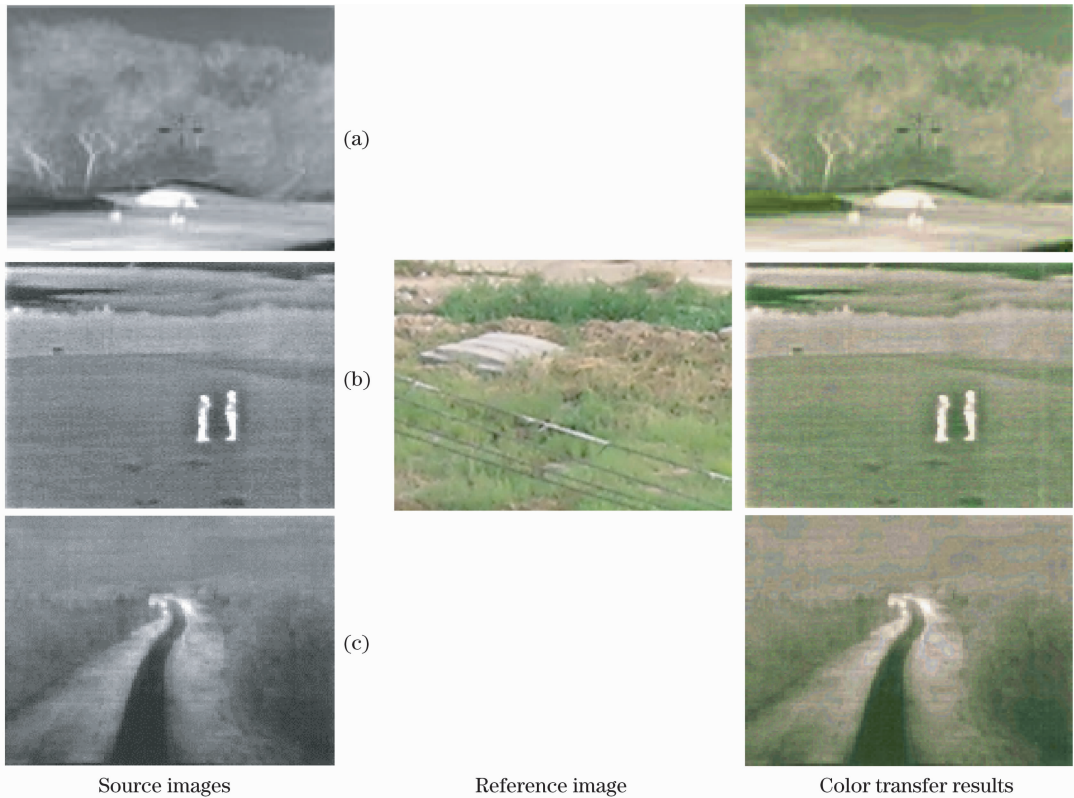


图 2 基于同一参考图像的多场景源图像色彩传递结果
Fig. 2 Results of color transfer from one reference image to multi-scene source images

同时,同一幅源图像在不同色彩风格的参考图像下可传递得到不同色彩风格的传递图像。图 3 给

出了图 2 (b) 热图像在其它 2 种参考图像下的传递结果,可以看出传递结果带有较明显的参考图像色彩风格。这一方面为算法应用带来了很大灵活性,观察者可根据需要,指定特定风格的参考图像。另一方面对于实际常规使用,选择提供具有一定普适性的参考图像组成为新的研究课题。

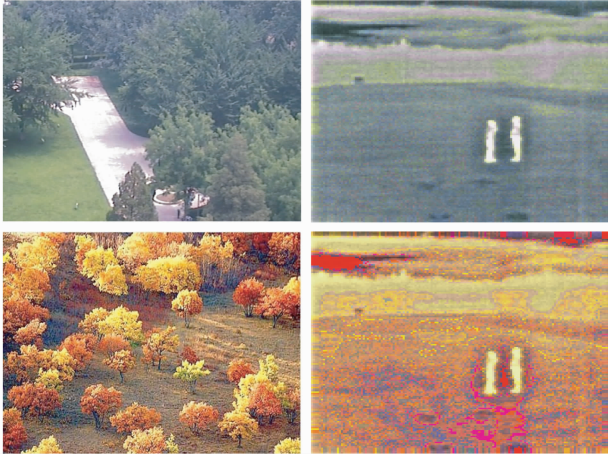


图 3 不同参考图像对图 2(b) 热图像的色彩传递

Fig. 3 Color transfer from different reference images to Fig. 2(b)

3.2 彩色空间转换及参考图像亮度通道的线性变换

选定参考图像后,将参考图像由 RGB 颜色空间转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间,为了使源图像和参考图像的相应像素能够更好地匹配,对参考图像亮度通道进行线性变换

$$l'_R = (l_R - \mu_R)\sigma_S/\sigma_R + \mu_S, \quad (9)$$

其中 μ_R 和 σ_R 是参考图像亮度通道 l 的均值和标准差, μ_S 和 σ_S 是源图像的亮度均值和标准差, l_R 、 l'_R 是参考图像变换前后对应像素的亮度值。线性变换不改变源图像亮度,但使参考图像亮度分布接近源图像。

3.3 像素匹配及颜色值传递

基于色彩传递的单波段红外图像彩色化算法核心是参考图像与源图像的像素匹配和颜色赋值。源图像和参考图像转换到 $l\alpha\beta$ 颜色空间后图像数据都以三通道形式存储,像素匹配时仅需要图像的亮度通道 l ,源图像的 α 、 β 通道数据在像素匹配后将被覆盖。

3.3.1 参考采样点的选取和像素邻域的设置

根据像素邻域的亮度通道统计量进行图像间像素匹配。为限制程序运行时间,先从参考图像中随机选取若干像素作为采样点,这些采样点应该尽量均匀地分布在参考图像的全部区域中,这样可保证较少遗漏参考图像的场景颜色信息。本文选取 300 个参考图像采样点,该数量可照顾到大多数参考图像场景细节的颜色信息,且处理时间不多。然后,为

源图像像素和参考图像采样点选取适当的邻域,考虑到红外图像分辨力较低,采用 9×9 的正方形邻域,可在较短时间内有效地完成像素匹配。在实际热成像系统的实时色彩传递中,参考图像的参考采样点及其统计值可事先计算保存,传递处理时调出即可。

3.3.2 像素匹配

计算源图像每个像素以及参考图像采样点的正方形邻域内亮度通道均值和标准差,然后根据统计量差值,为源图像的每个像素选择一个统计量最接近的参考采样点。这里,邻域亮度通道统计量差值定义为

$$D = k | 1 - | \mu'_S / \mu'_R | | + | 1 - (\sigma'_S / \sigma'_R) |, \quad (10)$$

其中 μ'_S 、 σ'_S 是 S 图像像素 9×9 邻域的亮度通道均值和标准差;参量 k 是权值,取 $k=1$ 。增大 k 值可提高 S 图像像素与 R 图像采样点邻域亮度匹配的权重,如果两幅图像的相应颜色区域亮度相近而纹理差别大,应适当增大 k 值,相反则应减小 k 值。通道统计量差值可更全面地考虑均值和标准差,使它们在像素匹配中能够起到均衡的作用。匹配像素的 D 越小两个像素越接近,源图像像素的最佳匹配参考采样点是所有采样点中使 D 最小的点。

3.3.3 传递颜色值

为源图像像素找到最匹配采样点后,在保留源图像亮度通道的条件下,将最匹配采样点 α 、 β 通道值赋给源图像像素。传递颜色值之后,将源图像处理结果转换回 RGB 颜色空间,即得到经过色彩传递且具有参考图像色彩风格的彩色化热图像。

4 突出色彩传递结果图像的热目标

在热成像系统的许多应用中,目标大多是场景中的热目标,由于一般的色彩传递处理形成的色彩反差有时不及单色图像中相应的亮度差异明显,由亮度差异表征的热对比度在进行色彩传递中有可能被弱化。如前所述,在色彩传递时保留了源图像的 l 通道,色彩传递后得到彩色图像的亮度信息仍可用于突出源图像场景热目标。因此,白热模式下对色彩传递图像中亮度最高的部分像素赋予一些鲜明色调(如红色),则在图像其余部分保留自然感传递结果条件下,可以进一步突出传递图像中的热目标。

首先根据 CIE 1931 标准色度系统的亮度方程^[13]计算色彩传递图像(记为 G)每个像素的亮度

$$l_p = R_p + 4.5907G_p + 0.0601B_p, \quad P \in G \quad (11)$$

遍历整幅图像找出亮度值位于 $[l_T, l_{\max}]$ 的所有像素,其中

$$l_{\max} = \max_P l_P, \quad P \in G \quad (12)$$

式中 l_T 是阈值,用来控制进行伪彩色编码的像素范围,实验中

$$l_T = l_{\max} - 0.1(l_{\max} - l_{\min}) = 0.9l_{\max} + 0.1l_{\min}. \quad (13)$$

选用伪彩色编码中常用的彩虹编码。位于编码区间内的像素根据亮度值与彩虹编码表中的RGB颜色值相对应,规则是亮度集合 $\{l_{\max}, l_{\max} - 1, l_{\max} - 2, \dots, l_T + 2, l_T + 1, l_T\}$ 依次由彩虹编码高温端向低温端映射,用彩虹编码表中的相应RGB颜色值代替色彩传递结果图像像素的颜色值。图4给出图2(a)热图像在突出色彩传递下的彩色化热图像,图中色彩传递图像中的树木色彩自然,热目标飞机被较鲜艳的红色突出显示。经过这样处理的彩色化热图像中热目标得到更直观的显现,便于观察和目标识别。



图4 图2(a)的突出色彩传递结果

Fig. 4 Highlighted color transfer result of Fig. 2(a)

5 结 论

本文提出了一种基于色彩传递的单波段红外图像彩色化算法,并用伪彩色编码的方法突出显示场景的热目标。实验表明:与单色红外图像相比,经色彩传递的图像不仅保持了原有的目标细节和特征,而且具有较好色彩自然感的彩色图像,增强了场景的深度感。由于色彩传递图像色调接近人眼视觉,因此,本文方法比以往的伪彩色编码彩色化方法更适合长时间观察。突出热目标色彩传递可提示观察者对重要目标的注意,弥补彩色化图像会弱化热对比度的不足。实验发现某一幅或几幅参考图像对场景相近的源图像具有一定的普适性,通过选择不同色彩风格的参考图像可得到多种风格的传递结果,参考图像的优选是算法的重要步骤,如何组成适用于典型场景的参考图像集合,以及如何自动分析和选取最优参考图像有待进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 Wang Zhehong, Xu Haisong. Lightness threshold evaluation in visual color matching[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1274~1278
汪哲弘, 徐海松. 颜色视觉匹配中明度阈值的评价[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1274~1278
- 2 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on color discrimination threshold using CRT display part I: analysis of experimental data and human color vision characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1139~1144
汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 3 A. M. Waxman, D. A. Fay, A. N. Gove *et al.*. Color night vision: fusion of intensified visible and thermal IR imagery[C]. *SPIE*, 1995, **2463**: 58~68
- 4 Wang Lingxue, Jin Weiqi, Shi Junsheng *et al.*. Research on fusion schemes of multi-band color night vision images based on opponent vision property [J]. *J. Infrared and Millimeter Waves*, 2006, **25**(6): 455~459
王岭雪, 金伟其, 石俊生等. 基于拮抗视觉特性的多波段彩色夜视融合方法研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, **25**(6): 455~459
- 5 A. Toet. Natural color mapping for multiband nightvision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(3): 155~166
- 6 Ni Guoqiang, Xiao Manjun, Qin Qingwang *et al.*. Development of near natural color image fusion algorithms and real-time image fusion system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2101~2109
倪国强, 肖蔓君, 秦庆旺等. 近自然彩色图像融合算法及其实时处理系统的发展[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2101~2109
- 7 T. Welsh, M. Ashikhmin, K. Mueller. Transferring color to grayscale images[J]. *Proc. ACM TOG*, 2002, **20**(3): 277~280
- 8 Zhao Guoying, Xiang Shiming, Li Hua. Application of higher moments in color transfer between images [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2004, **16**(1): 62~66
赵国英, 向世明, 李 华. 高阶矩在颜色传输中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2004, **16**(1): 62~66
- 9 Hu Guofei, Fu Jian, Peng Qunsheng. Adaptive color transfer [J]. *Chin. J. Computers*, 2004, **27**(9): 1245~1249
胡国飞, 傅 健, 彭群生. 自适应颜色迁移[J]. *计算机学报*, 2004, **27**(9): 1245~1249
- 10 Qian Xiaoyan, Xiao Liang, Wu Huizhong. Application of fuzzy color cluster in color transfer between images[J]. *J. Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2006, **18**(9): 1332~1336
钱小燕, 肖 亮, 吴慧中. 模糊颜色聚类在颜色传输中的应用[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2006, **18**(9): 1332~1336
- 11 Wang Lingxue, Shi Shiming, Jin Weiqi *et al.*. Hot targets enhancement for color fusion of visible and infrared images[J]. *Trans. of Beijing Institute of Technology*, 2008, **28**(1): 1~4
王岭雪, 史世明, 金伟其等. 可见光与红外图像彩色融合中的热目标增强方法[J]. *北京理工大学学报*, 2008, **28**(1): 1~4
- 12 D. L. Ruderman, T. W. Cronin, C. C. Chiao. Statistics of Cone Responses to Natural Images: Implications for Visual Coding[J]. *J. Opt. Soc. Ame.*, 1998, **15**(8): 2036~2045
- 13 Jin Weiqi, Hu Weijie. *Radiometry, Photometry, Colorimetry and Test Methods*[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006. 117~123
金伟其, 胡威捷. 辐射度、光度与色度及其测量[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006. 117~123