

文章编号 1004-924X(2009)09-2301-10

# 适于图像融合的快速颜色传递方法

李光鑫, 徐抒岩

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为获得具有自然日光色彩效果的融合图像, 利用线性  $YC_B C_R$  空间和 Reinhard 统计颜色传递策略, 提出了一种适于图像融合的颜色传递方法:  $YC_B C_R$  颜色传递方法。此方法不仅计算复杂度低, 而且非常适合彩色图像融合, 使得利用高对比度灰度融合图像替换彩色融合图像亮度分量, 从而使增强彩色融合图像亮度对比度的操作变得简单易行。本文从数学上证明了 YUV 等符合通用  $YC_B C_R$  空间模型的颜色空间用于颜色传递所产生的重染色结果与用  $YC_B C_R$  空间得到的结果相同。实验结果表明,  $YC_B C_R$  颜色传递方法可以赋予彩色融合图像一种自然的日光色彩效果, 其重染色彩色融合图像的能力好于 Reinhard 方法。

**关键词:** 颜色传递; 彩色图像融合;  $YC_B C_R$  变换; 红外图像; 可见光图像

**中图分类号:** TP751 **文献标识码:** A

## Fast color transfer method for image fusion

LI Guang-xin, XU Shu-yan

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** With linear  $YC_B C_R$  space and Reinhard's statistical color transfer strategy, a color transfer method for image fusion, named  $YC_B C_R$  color transfer method, is proposed to produce a fused image with a natural daytime color appearance. This approach has low computational complexity, and is very suitable for color image fusion. Furthermore, it facilitates enhancing the luminance contrast of the color fused image by replacing the luminance component of the color fused image with the high-contrast grayscale fused image. This paper mathematically proves that color spaces conforming to the general  $YC_B C_R$  space framework, such as YUV space, can be used as an alternative to  $YC_B C_R$  space in color transfer. Experimental results demonstrate that the  $YC_B C_R$  color transfer method is able to give color fused image a natural daytime color appearance, and has better capability of recoloring color fused image than the Reinhard's approach.

**Key words:** color transfer; color image fusion;  $YC_B C_R$  transform; infrared image; visible image

## 1 引言

图像融合按输出结果的色彩可分为灰度图像融合和彩色图像融合。彩色图像可以为人们提供更多的信息,将源多波段图像合成一幅彩色融合图像可以扩大多传感器系统表达信息的动态范围,从而更有利于场景的理解,因此,彩色图像融合技术受到了各国学者的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。输出图像颜色的自然性是目前彩色图像融合领域中的热点议题,人们力图使融合图像在各种情况下都具有日光彩色图像(Daylight Color Image)的自然色彩效果,从而能够更准确、快捷地进行场景理解和目标判别,减轻观察者的疲劳感。

国际上较为著名的彩色图像融合方法有:美国 Naval Research Lab 提出的 NRL 法<sup>[4-6]</sup>;荷兰 TNO Human Factors 的 Toet 和 Walraven<sup>[7]</sup>提出的 TNO 法;以及美国 Waxman 等人在 Massachusetts Institute of Technology<sup>[8-10]</sup>、Alphatech 公司<sup>[11]</sup>和 BAE 公司<sup>[12]</sup>陆续开发的 MIT 法。NRL 法和 TNO 法运算速度快,然而它们融合图像的色彩不自然,不符合人的视觉感受。MIT 法比前两者复杂,但其融合图像具有适合人眼观察的自然色彩,MIT 法的相关技术获得了美国专利<sup>[13]</sup>,然而公开的技术细节信息较少。2001 年,美国 University of Utah 的 Reinhard 等人<sup>[14]</sup>结合  $l\alpha\beta$  变换<sup>[15]</sup>提出了一种在两幅彩色图像之间进行颜色传递(Color Transfer)的方法。随后,Toet<sup>[16-17]</sup>将该方法引入到图像融合中,用以调整融合图像的色彩。如果以日光彩色图像作为目标图像,Reinhard 颜色传递方法能够使融合图像具有一种自然的日光色彩效果(Natural Daytime Color Appearance),符合人的视觉感知,因此很快得到了图像融合领域众多学者的重视<sup>[18-22]</sup>。

Reinhard 方法给出了调整融合图像色彩的有效途径,但是该方法存在明显的不足:一方面,方法中所用的  $l\alpha\beta$  变换是一个非线性的对数变换,不利于计算,变换过程中除了需要大量的乘加运算以外,还需进行对数和指数操作;另一方面, $l\alpha\beta$  空间的无色分量  $l$  的动态范围与灰度图像的动态范围不同,这不方便使用传统的方法来增强最终彩色融合图像的亮度对比度,即不能用高对比度的灰度融合图像直接替换  $l$  分量来形成高质量

的彩色融合图像。为了解决上述问题,本文结合线性的  $Y C_B C_R$  空间<sup>[23-24]</sup>,提出了一种适于图像融合的  $Y C_B C_R$  颜色传递方法。此方法不仅计算复杂度低,而且非常适合彩色图像融合,可以使利用替换方法来增强彩色融合图像亮度对比度的操作变得简单易行。文中利用  $Y C_B C_R$  颜色传递方法对红外和可见光图像的彩色融合结果进行了重染色,实验结果表明,该方法可以赋予彩色融合图像一种自然的日光色彩效果,其重染色彩色融合图像的能力好于 Reinhard 方法。

## 2 $Y C_B C_R$ 颜色传递方法

利用  $Y C_B C_R$  空间,结合 Reinhard 的统计颜色传递策略,本文提出了  $Y C_B C_R$  颜色传递方法,其具体的算法步骤如下:

(1)将源图像和目标图像由 RGB 空间变换到  $Y C_B C_R$  空间,并且分别计算它们各个颜色分量( $Y$ 、 $C_B$  和  $C_R$ )的均值和方差, $Y C_B C_R$  正变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0 & 0.587 & 0 & 0.114 & 0 \\ -0.168 & 7 & -0.331 & 3 & 0.500 & 0 \\ 0.500 & 0 & -0.418 & 7 & -0.081 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

(2)在  $Y C_B C_R$  空间进行颜色统计量匹配,将目标图像的颜色统计量传递给源图像:

$$\begin{aligned} Y_s^* &= \frac{\sigma_t^Y}{\sigma_s^Y} (Y_s - \mu_s^Y) + \mu_t^Y \\ C_{B,s}^* &= \frac{\sigma_t^{C_B}}{\sigma_s^{C_B}} (C_{B,s} - \mu_s^{C_B}) + \mu_t^{C_B}, \\ C_{R,s}^* &= \frac{\sigma_t^{C_R}}{\sigma_s^{C_R}} (C_{R,s} - \mu_s^{C_R}) + \mu_t^{C_R} \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $s$  和  $t$  分别表示源图像和目标图像, $\mu_s^\theta$  和  $\mu_t^\theta$  ( $\theta=Y, C_B, C_R$ ) 分别为源  $\theta$  分量(源图像的  $\theta$  分量)和目标  $\theta$  分量(目标图像的  $\theta$  分量)的均值, $\sigma_s^\theta$  和  $\sigma_t^\theta$  分别为源  $\theta$  分量和目标  $\theta$  分量的方差。

(3)将调整后的源图像数据由  $Y C_B C_R$  空间变换回 RGB 空间,得到最终的重染色源图像, $Y C_B C_R$  逆变换公式如下:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.402 & 0 \\ 1.000 & 0 & -0.344 & 1 & -0.714 & 1 \\ 1.000 & 0 & 1.772 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ C_B \\ C_R \end{bmatrix}. \quad (3)$$

同线性的  $YC_B C_R$  变换不同,Reinhard 方法中所用的  $l_{\alpha\beta}$  变换是非线性的。若一幅 RGB 彩色图像的大小为  $N \times N$ ,完成整个  $l_{\alpha\beta}$  变换(包括正变换和逆变换)总共需要  $22N^2$  次加法、 $34N^2$  次乘法、 $3N^2$  次对数运算和  $3N^2$  次指数运算;相比之下, $YC_B C_R$  变换中省去了对数和指数运算,整个变换过程仅需要  $10N^2$  次加法和  $13N^2$  次乘

法。 $YC_B C_R$  颜色传递方法和 Reinhard 方法之间的区别就是它们所采用的颜色空间不同,从上面的分析可以明显地看出, $YC_B C_R$  变换的计算复杂度远低于  $l_{\alpha\beta}$  变换,因此, $YC_B C_R$  颜色传递方法的算法复杂度低于 Reinhard 方法。

命题 2.1:定义  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  为通用  $YC_B C_R$  空间,它和 RGB 空间的变换关系如下:

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{C}_B \\ \tilde{C}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0x & 0.587 & 0x & 0.114 & 0x \\ -0.168 & 7y & -0.331 & 3y & 0.500 & 0y \\ 0.500 & 0z & -0.418 & 7z & -0.081 & 3z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0x^{-1} & 0.000 & 0 & 1.402 & 0z^{-1} \\ 1.000 & 0x^{-1} & -0.344 & 1y^{-1} & -0.714 & 1z^{-1} \\ 1.000 & 0x^{-1} & 1.772 & 0y^{-1} & 0.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{C}_B \\ \tilde{C}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中, $x,y,z,c_1,c_2$  和  $c_3$  均为常数,且  $x,y$  和  $z$  不等于零。设基于  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间和基于  $YC_B C_R$  空间的颜色传递方法所得到的重染色源图像分别为  $[\tilde{R}_s^*, \tilde{G}_s^*, \tilde{B}_s^*]^T$  和  $[R_s^*, G_s^*, B_s^*]^T$ 。若这两种方法均采用同样的目标图像和同样的源图像,则有

$$\begin{bmatrix} \tilde{R}_s^* \\ \tilde{G}_s^* \\ \tilde{B}_s^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^* \\ G_s^* \\ B_s^* \end{bmatrix}. \quad (6)$$

命题 2.1 表明(篇幅限制,证明不表),同等条件下,在颜色传递中采用任何一种形式的  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间所得到重染色源图像,与用  $YC_B C_R$  空间得到的结果相同。显而易见, $YC_B C_R$  空间符合  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间模型。在图像处理中常用的 YUV 空间<sup>[25]</sup>也符合  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间模型,对于 YUV 空间, $x=1,y=0.872,z=1.23,c_1=c_2=c_3=0$ 。这表明,也可以采用 YUV 空间进行颜色传递,利用  $YC_B C_R$  和 YUV 空间所得到的颜色传递结果相同。

### 3 $YC_B C_R$ 颜色传递方法在图像融合中的应用

$YC_B C_R$  颜色传递方法可以很容易地应用到图像融合领域。一种最简单的思路就是用直接映射融合法生成一幅源彩色融合图像,利用一幅日光彩色图像作为目标图像,然后使用  $YC_B C_R$  颜色传递方法将目标图像的颜色分布传递到源彩色融合图像中,从而生成一幅重染色融合图像。

Toet<sup>[16-17]</sup>提到,有些条件下一些图像细节在源多波段图像中会呈现出相反的对比度,将源多波段图像直接映射成一幅彩色融合图像也许会严重地降低图像细节的亮度对比度,使得在单波段图像中显著的图像细节在融合图像中反而会变得不清晰。优秀的灰度图像融合方法可以很好地保留源多波段图像中的细节信息,利用一幅高对比度的灰度融合图像替换彩色融合图像的亮度分量,可以有效地提高最终彩色融合图像的亮度对比度,突出源多波段图像中的细节信息。

由于  $YC_B C_R$  空间亮度分量  $Y$  的动态范围与灰度图像的动态范围相同,因此可用灰度融合图像  $F$  直接替换源彩色融合图像  $f$  的亮度分量  $Y_f$ 。替换后,直接用  $F$  和源彩色融合图像的两个彩色分量  $C_{B,f}, C_{R,f}$  作为颜色统计量匹配中的源  $YC_B C_R$  分量:

$$\begin{aligned} Y_c &= \frac{\sigma_Y^Y}{\sigma_F^Y} (F - \mu_F^Y) + \mu_t^Y \\ C_{B,c} &= \frac{\sigma_{C_B}^{C_B}}{\sigma_{C_B,f}^{C_B}} (C_{B,f} - \mu_{C_B,f}^{C_B}) + \mu_t^{C_B}, \quad (7) \\ C_{R,c} &= \frac{\sigma_{C_R}^{C_R}}{\sigma_{C_R,f}^{C_R}} (C_{R,f} - \mu_{C_R,f}^{C_R}) + \mu_t^{C_R} \end{aligned}$$

其中, $c$  表示最终的对比度增强型重染色融合图像。

Toet<sup>[16-17]</sup>利用基于  $l_{\alpha\beta}$  变换的 Reinhard 颜色传递技术来对源彩色融合图像进行重染色,同 Reinhard 方法相比, $YC_B C_R$  颜色传递方法更适于图像融合。一方面,如前面所述,线性的  $YC_B C_R$

变换的运算要比非线性的  $l\alpha\beta$  变换简单快速得多;另一方面,  $l\alpha\beta$  空间的无色分量  $l$  的动态范围与灰度图像的动态范围不同,因此不能用灰度融合图像直接替换  $l$  分量。Toet 借助 HSV 空间来解决这一问题,他首先将已经重染色了的彩色融合图像变换到 HSV 空间,然后用灰度融合图像替换亮度分量  $V$ ,最后将得到的结果变换回 RGB 空间生成最终的彩色融合图像。可以看出,这种办法总共需要 3 个颜色空间(RGB、 $l\alpha\beta$  和 HSV)和 4 次空间变换(RGB 到  $l\alpha\beta$ ,  $l\alpha\beta$  到 RGB, RGB 到 HSV, HSV 到 RGB)。相比之下,用  $YC_B C_R$  颜色传递方法生成对比度增强型重染色融合图像的计算简单得多,整个过程仅需要两个颜色空间(RGB 和  $YC_B C_R$ )和两次空间变换(RGB 到  $YC_B C_R$ ,  $YC_B C_R$  到 RGB)。

命题 3.1: 设基于  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间和基于  $YC_B C_R$  空间的颜色传递方法所得到的对比度增强型重染色融合图像分别为  $[\tilde{R}_c, \tilde{G}_c, \tilde{B}_c]^T$  和  $[R_c, G_c, B_c]^T$ 。若这两种方法均采用同样的直接映射融合方法,同样的灰度融合方法,同样的目标图像和同样的源多波段图像,且  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  变换中的常数  $x$  为正数,则有

$$\begin{bmatrix} \tilde{R}_c \\ \tilde{G}_c \\ \tilde{B}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

命题 3.1 表明(篇幅限制,证明不表),在同等条件下,只要能保证  $x > 0$ ,那么利用符合  $\tilde{Y}\tilde{C}_B\tilde{C}_R$  空间模型的颜色空间所生成的对比度增强型重染色融合图像,就与用  $YC_B C_R$  空间得到的结果相同。这说明,利用  $YC_B C_R$  和 YUV 空间能够产生相同的对比度增强型重染色融合图像。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 彩色融合图像重染色结果的比较

为了验证  $YC_B C_R$  颜色传递方法的有效性,本节将其用于图像融合,并与 Reinhard 方法进行比较。实验中采用 UN Camp 图像来生成源彩色融合图像,UN Camp 图像如图 1 所示,这是一组在日出前拍摄的联合国营地监控图像,其中(a)为 3~5  $\mu\text{m}$  的中波红外图像,(b)为相应的 CCD 灰度可见光图像。由于没有相应场景的日光彩色图像,因此选用图 1(c)所示的彩色图像作为目标图

像(图 1 展示的所有图像均由荷兰 TNO Human Factors 的 Toet 博士提供)。



(a) UN Camp 红外图像  
(a) UN Camp infrared image



(b) UN Camp 可见光图像  
(b) UN Camp visible image



(c) UN Camp 图像所用的目标图像  
(c) Target image for UN Camp images

图 1 实验图像

Fig. 1 Experimental images

实验在两种情况下进行,这两种情形生成源彩色融合图像所用的直接映射融合方法不同。第一种情形采用 Toet 方法<sup>[16-17]</sup>作为直接映射融合方法,该方法将 R 通道置零,将红外图像送入 G 通道,可见光图像送入 B 通道;第二种情形采用 NRL 方法<sup>[4-6]</sup>作为直接映射融合方法,该方法将红外图像送入 R 通道,可见光图像分别送入 G 和

B 通道。

实验还用  $Y C_B C_R$  颜色传递方法生成了对比度增强型重染色融合图像,为了降低纹波现象,采用基于相关信号强度比的加权多分辨率图像融合算法<sup>[26]</sup>形成灰度融合图像,该算法利用小波变换<sup>[27]</sup>对图像进行多尺度分解,通过像素平均法对近似分量进行融合,通过加权融合规则对细节分量进行融合,其融合规则如下:

$$d_{j,F}^\epsilon(m,n) = \begin{cases} d_{j,A}^\epsilon(m,n) & , R_{j,AB}^\epsilon(m,n) \geq \frac{1}{T} \\ d_{j,B}^\epsilon(m,n) & , R_{j,AB}^\epsilon(m,n) < T \\ \frac{[d_{j,A}^\epsilon(m,n) + d_{j,B}^\epsilon(m,n)]}{2} & , \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $d_j^\epsilon$  表示在  $2^j$  分辨率、 $\epsilon$  方向上的细节分量,  $m, n$  是像素坐标,  $A, B$  表示输入的源图像,  $F$  表示融合图像,  $T$  为阈值,取值范围为  $[0, 1]$ ,  $R$  为相关信号强度比<sup>[26, 28-29]</sup>:

$$R_{j,AB}^\epsilon(m,n) = \frac{\sum_{m' \in L, n' \in K} P(m', n') |d_{j,A}^\epsilon(m+m', n+n')|}{\sum_{m' \in L, n' \in K} P(m', n') |d_{j,B}^\epsilon(m+m', n+n')|} \quad (10)$$

其中,  $P$  为窗口区域的掩模,用于对  $|d_{j,A}^\epsilon|$  和  $|d_{j,B}^\epsilon|$  进行线性滤波,  $L$  和  $K$  定义了掩模窗口区域的大小,  $m', n'$  的变化范围在  $L, K$  内。本文在实验中用 Daubechies 的双正交“5-3”小波<sup>[30-31]</sup>作为多分辨率分析工具,分解层数为 4, 阈值取 0.75, 掩模取  $\{\{1/16, 1/8, 1/16\}, \{1/8, 1/4, 1/8\}, \{1/16, 1/8, 1/16\}\}$ 。

图 2 和图 3 分别展示了两种情形的重染色结果,由实验结果可以得出下述结论:

(1)  $Y C_B C_R$  颜色传递方法重染色彩色融合图像的能力好于 Reinhard 方法,它可以很容易地使



(a) Toet 方法的彩色融合结果

(a) Color fused result obtained by Toet's method



(b) 以图 1(c) 为目标图像的 Reinhard 方法对图 2(a) 的重染色结果

(b) Recolored result of Fig. 2(a) obtained by Reinhard's method with Fig. 1(c) as target image



(c) 以图 1(c) 为目标图像的  $Y C_B C_R$  颜色传递方法对图 2(a) 的重染色结果

(c) Recolored result of Fig. 2(a) obtained by  $Y C_B C_R$  color transfer method with Fig. 1(c) as target image



(d)  $Y C_B C_R$  颜色传递方法的对比度增强型重染色融合图像

(d) Contrast-enhanced recolored fused image by using  $Y C_B C_R$  color transfer method

图 2 用 Toet 方法生成源彩色融合图像的情形  
Fig. 2 Examples of using Toet's method to produce source color fused image

融合图像具有一种自然的日光色彩效果。由图 2 和图 3 可以看出,  $Y C_B C_R$  颜色传递方法能够稳定地将目标图像的颜色特征传递到源彩色融合图像中, Reinhard 方法则会出现颜色传递效果不稳定的情况, 比如, 图 2(b) 中下方的树木出现了大片的黄色, 没有很好地传承目标图像中树木的绿色。此外, Reinhard 方法还会在重染色融合图像中引起过饱和现象, 产生耀眼的白光, 图 2(b) 和图 3(b) 中均出现了这种现象, 耀眼白光严重地掩盖住了源多波段图像中的一些显著细节信息, 比如路面的纹理。

(2) 相对于 Toet 方法, 利用 NRL 方法产生源彩色融合图像更有利于形成高质量的重染色融合图像。虽然图 2 和图 3 的形成过程中采用了相同的目标图像, 但是由于生成源彩色融合图像的方式不同, 因此所形成的重染色融合图像的效果大相径庭。图 2(b)、(c) 有一种卡通的效果, 相比之下, 图 3(b)、(c) 看起来更加生动自然。此外, NRL 法对应的重染色融合图像能够更好地保留源多波段图像中的显著细节信息, 可以看到, 图 3(b)、(c) 的细节信息分别比图 2(b)、(c) 的细节信息更为丰富。

(3) 利用高对比度的灰度融合图像替换源彩色融合图像亮度分量的操作, 可以显著地改善最终彩色融合图像的对比度。通过图 2 和图 3 可以明显地看到, 相对于同组的其他图像, 图 2(d)、图 3(d) 突出和表现图像细节的能力更强, 能够更清楚、准确地表达源多波段图像中的细节信息。但是, 这种优势是以牺牲计算复杂度为代价的, 复杂的灰度图像融合过程增加了算法的计算量。



(a) NRL 方法的彩色融合结果

(a) Color fused result obtained by NRL method



(b) 以图 1(c) 为目标图像的 Reinhard 方法对图 3(a) 的重染色结果

(b) Recolored result of Fig. 3(a) obtained by Reinhard's method with Fig. 1(c) as target image



(c) 以图 1(c) 为目标图像的  $Y C_B C_R$  颜色传递方法对图 3(a) 的重染色结果

(c) Recolored result of Fig. 3(a) obtained by  $Y C_B C_R$  color transfer method with Fig. 1(c) as target image



(d)  $Y C_B C_R$  颜色传递方法的对比度增强型重染色融合图像

(d) Contrast-enhanced recolored fused image by using  $Y C_B C_R$  color transfer method

图 3 用 NRL 方法生成源彩色融合图像的情形  
Fig. 3 Examples of using NRL method to produce source color fused image

## 4.2 目标图像的选择

$Y C_B C_R$  颜色传递方法对目标图像的要求并

不苛刻,只要目标图像和源多波段图像场景的颜色分布相似, $Y C_B C_R$ 颜色传递方法就能生成一幅具有自然色彩效果的重染色融合图像。为了说明这一点,结合不同的目标图像,本节用 $Y C_B C_R$ 颜色传递方法分别对Dune图像和Battlefield图像的NRL彩色融合结果进行重染色。Dune图像如图4所示,这是一组日出前拍摄的沙丘地监控图像,其中(a)为 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的中波红外图像,(b)



(a)Dune 红外图像

(a) Dune infrared image



(b)Dune 可见光图像

(b) Dune visible image



(c)NRL 方法的彩色融合结果

(c) Color fused result obtained by NRL method

图4 NRL方法对Dune图像的融合

Fig. 4 Fusion of Dune images by using NRL method

为相应的CCD灰度可见光图像,(c)为NRL方法对Dune图像的彩色融合结果;Battlefield图像如图6所示,这是一组白天拍摄的战场监控图像,其中(a)为 $8\sim 12\mu\text{m}$ 的长波红外图像,(b)为相应的CCD灰度可见光图像,(c)为NRL方法对Battlefield图像的彩色融合结果。Dune和Battlefield源多波段图像均由Toet博士提供。

图5和图7分别展示了 $Y C_B C_R$ 颜色传递方法对图4(c)和图6(c)的重染色结果,图5和图7的上行为实验中所用的目标图像,与这些目标图像相对应的重染色融合结果显示在下行。图5左两列的目标图像来自于Pics4Learning.com网站<sup>[32]</sup>,右两列的目标图像来自于BigFoto.com网站<sup>[33]</sup>。图7左列的目标图像由Toet博士提供,中列的目标图像来自于Van Gogh Gallery网站<sup>[34]</sup>,右列的目标图像是作者用Sony Cybershot DSC-F717数码相机在日照充足的情况下拍摄的彩色图像,拍摄地点为美国Florida州Orlando市Orlando World Center Marriott Resort and Convention Center的高尔夫球场,拍摄时间为2007年4月。



图5 对于图4(c), $Y C_B C_R$ 颜色传递方法采用不同目标图像的重染色结果。上行为4幅不同的目标图像;下行为与各个目标图像相对应的重染色结果

Fig. 5 Recolored results of Fig. 4(c) obtained by  $Y C_B C_R$  color transfer method with different target images. Top: four different target images; Bottom: recolored results corresponding to each target image

由图5和图7可以看到,所有的重染色融合图像都很好地传承了目标图像的颜色特征,只要目标图像和源多波段图像场景的颜色分布相似,即使目标图像和源多波段图像的场景内容不同,通过 $Y C_B C_R$ 颜色传递方法所得到的重染色融合图像仍然具有良好的自然色彩效果。图5左二列的例子明显地说明了这一点,其目标图像拍摄的



(a) Battlefield 红外图像

(a) Battlefield infrared image



(b) Battlefield 可见光图像

(b) Battlefield visible image



(c) NRL 方法的彩色融合结果

(c) Color fused result obtained by the NRL method

图 6 NRL 方法对 Battlefield 图像的融合

Fig. 6 Fusion of Battlefield images by using NRL method

是一片草地,场景中有一只麋鹿,Dune 源多波段图像反映的是一片沙丘,很明显,目标图像和源多波段图像的场景内容极为不同。但是,目标图像整体呈现棕黄色,这与 Dune 图像场景的自然颜色特征相似,可以看到,相应的重染色融合图像的颜色看起来十分生动自然,符合人的视觉感受和场景的需求。

当目标图像和源多波段图像场景的颜色分布



图 7 对于图 6(c), $Y_{C_B}C_{C_R}$  颜色传递方法采用不同目标图像的重染色结果。上行为 3 幅不同的目标图像;下行为与各个目标图像相对应的重染色结果

Fig. 7 Recolored results of Fig. 6(c) obtained by  $Y_{C_B}C_{C_R}$  color transfer method with different target images. Top: three different target images; Bottom: recolored results corresponding to each target image

差异较大时,即使目标图像和源多波段图像的场景组成元素相似,利用  $Y_{C_B}C_{C_R}$  颜色传递方法也无法获得具有自然色彩效果的重染色融合图像。图 5 最右列例子中的目标图像和 Dune 源多波段图像的场景内容相似,都存在沙地,但是,目标图像中还有大片的蓝天,这就导致相应的重染色融合图像中出现了大片的蓝色,与 Dune 源多波段图像场景的实际情况不符,严重地影响了观察者对场景的理解和判断。

$Y_{C_B}C_{C_R}$  颜色传递方法对目标图像的要求并不严格,各种类型的图像都可以作为目标图像。图 7 右列例子中的目标图像为凡高(Vincent Van Gogh)在 1889 年于法国 Saint-Rémy 创作的油画“Green Wheat Field with Cypress”。虽然目标图像为一幅人工的油画,但是由于目标图像和 Battlefield 源多波段图像场景的颜色分布相似,因此可以看到,其相应的重染色融合图像的效果仍旧十分自然。

## 5 结 论

本文提出了一种适于图像融合的颜色传递算法: $Y_{C_B}C_{C_R}$  颜色传递方法。相对于 Reinhard 颜色传递方法, $Y_{C_B}C_{C_R}$  颜色传递方法具有更低的计算复杂度,而且非常适合图像融合,使得利用替换方法来增强彩色融合图像亮度对比度的操作变

得简单易行。实验结果表明,  $Y_C B_C R_C$  颜色传递方法可以成功地赋予彩色融合图像一种自然的日光色彩效果,其重染彩色融合图像的能力好于 Reinhard 方法。

$Y_C B_C R_C$  颜色传递方法仅用到了目标颜色统计量,即目标图像  $Y_C$ 、 $B_C$ 、 $R_C$  三分量的均值和方差,因此,在实际的融合系统中,没必要存储真正的目标图像,只要存储目标颜色统计量即可完成颜色传递过程。

利用  $Y_C B_C R_C$  颜色传递方法可以接近彩色图像融合技术的理想发展目标,也就是,使融合图像在各种情况下都能够具有相应场景在日光下的真

实色彩。可以通过两种途径来接近这一目标:(1)选取一幅具有代表性的日光彩色图像,将其颜色统计量设置为目标颜色统计量,从而满足大部分典型场景的需求;(2)从各种典型场景的日光彩色图像中取样,建立一个目标颜色统计量索引表,根据实际情况来调节目标颜色统计量,从而使生成的彩色融合图像具有与实际场景最近似的色彩效果。

致谢:荷兰 TNO Human Factors 的 Toet 博士、Pics4Learning.com 网站、BigFoto.com 网站、Van Gogh Gallery 网站提供了本文的实验源图像,特此声明并表示感谢。

## 参考文献:

- [1] SMITH M I, HEATHER J P. Review of image fusion technology in 2005 [J]. *SPIE*, 2005, 5782: 29-45.
- [2] 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.  
NI G Q, XIAO M J, QIN Q W, *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. (in Chinese)
- [3] 金伟其,王岭雪,赵源萌,等. 彩色夜视成像处理算法的新进展 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(1): 147-150.  
JIN W Q, WANG L X, ZHAO Y M, *et al.*. Developments of image processing algorithms for color night vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 147-150. (in Chinese)
- [4] SCRIBNER D A, SCHULER J M, WARREN P R, *et al.*. Infrared color vision; separating objects from backgrounds [J]. *SPIE*, 1998, 3379: 2-13.
- [5] MCDANIEL R V, SCRIBNER D A, KREBS W K, *et al.*. Image fusion for tactical applications [J]. *SPIE*, 1998, 3436: 685-695.
- [6] MCCARLEY J S, KREBS W K. Visibility of road hazards in thermal, visible, and sensor-fused nighttime imagery [J]. *Applied Ergonomics*, 2000, 31(5): 523-530.
- [7] TOET A, WALRAVEN J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(3): 650-658.
- [8] WAXMAN A M, AGUILAR M, FAY D A, *et al.*. Solid-state color night vision: fusion of low-light visible and thermal IR imagery [J]. *Lincoln Lab. J.*, 1998, 11(1): 41-60.
- [9] AGUILAR M, FAY D A, ROSS W D, *et al.*. Real-time fusion of low-light CCD and uncooled IR imagery for color night vision [J]. *SPIE*, 1998, 3364: 124-135.
- [10] FAY D A, WAXMAN A M, AGUILD M, *et al.*. Fusion of multi-sensor imagery for night vision: color visualization, target learning and search [C]. *The 3rd International Conference on Information Fusion*, 2000, 1: TuD3-3-10.
- [11] FAY D A, WAXMAN A M, IVEY R, *et al.*. Multisensor image fusion & mining: learning targets across extended operating conditions [J]. *SPIE*, 2004, 5424: 148-162.
- [12] FAY D, ILARDI P, SHELDON N, *et al.*. Real-time image fusion and target learning & detection on a laptop attached processor [J]. *SPIE*, 2005, 5802: 154-165.
- [13] WAXMAN A M, FAY D A, GOVE A N, *et al.*. Method and apparatus for generating a synthetic image by the fusion of signals representative of different views of the same scene; United States, 5555324[P]. 1996.
- [14] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, *et al.*. Color transfer between images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21(5): 34-41.
- [15] RUDERMAN D L, CRONIN T W, CHIAO C C. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding [J]. *J. Optical Soc. of America*, 1998, 15(8): 2036-2045.

- [16] TOET A. Paint the night: applying daylight colours to nighttime imagery [R]. *Research Report TM-02-B006, Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors*, 2002.
- [17] TOET A. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery [J]. *Information Fusion*, 2003,4(3):155-166.
- [18] LI Z, JING Z, YANG X, *et al.*. Color transfer based remote sensing image fusion using non-separable wavelet frame transform [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2005,26(13):2006-2014.
- [19] TSAGARIS V, ANASTASSOPOULOS V. Fusion of visible and infrared imagery for night color vision [J]. *Displays*, 2005,26(4-5):191-196.
- [20] WANG L, ZHAO Y, JIN W, *et al.*. Real-time color transfer system for low-light level visible and infrared images in YUV color space [J]. *SPIE*, 2007,6567:65671G-1-8.
- [21] LI G, WANG K. Applying daytime colors to nighttime imagery with an efficient color transfer method [J]. *SPIE*, 2007,6559:1-65590L-12.
- [22] ZHENG Y, ESSOCK E A. A local-coloring method for night-vision colorization utilizing image analysis and fusion [J]. *Information Fusion*, 2008,9(2):186-199.
- [23] NEELAMANI R, QUEIROZ R DE, FAN Z, *et al.*. JPEG compression history estimation for color images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006,15(6):1365-1378.
- [24] SKODRAS A, CHRISTOPOULOS C, EBRAHIMI T. The JPEG 2000 still image compression standard [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001,18(5):36-58.
- [25] PRATT W K. *Digital Image Processing* [M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2001.
- [26] LI G, WANG K. Merging infrared and color visible images with a contrast enhanced fusion method [J]. *SPIE*, 2007,6571:657108-1-12.
- [27] MALLAT S G. *A Wavelet Tour of Signal Processing* [M]. 2nd ed. New York: Academic, 1998.
- [28] 李光鑫, 王珂, 张立保. 加权多分辨率图像融合的快速算法 [J]. *中国图象图形学报*, 2005,10(12):1529-1536.
- LI G X, WANG K, ZHANG L B. Computationally efficient algorithm of multiresolution image fusion with weighted average fusion rule [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005,10(12):1529-1536. (in Chinese)
- [29] 李光鑫, 王珂. 基于 Contourlet 变换的彩色图像融合算法 [J]. *电子学报*, 2007,35(1):112-117.
- LI G X, WANG K. Color image fusion algorithm using the contourlet transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007,35(1):112-117. (in Chinese)
- [30] COHEN A, DAUBECHIES I, FEAUVEAU J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. *Commun. Pure Appl. Math.*, 1992,45:485-560.
- [31] DAUBECHIES I. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.
- [32] <http://www.pics4learning.com/> [OL].
- [33] <http://www.bigfoto.com/> [OL].
- [34] <http://www.vangoghgallery.com/> [OL].

#### 作者简介:



李光鑫(1978—),男,吉林长春人,助理研究员,2001年于北京理工大学自动控制系获工学学士学位,2005年、2008年分别于吉林大学通信工程学院获工学硕士、工学博士学位,主要研究方向为图像融合、图像处理等。E-mail: guangxin.li@126.com



徐抒岩(1963—),男,辽宁人,研究员,博士生导师,1985年于天津大学获学士学位,1989年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要研究方向为空间光学遥感器计算机控制、图像处理等。E-mail: xusy@ciomp.ac.cn