

文章编号 1004-924X(2010)07-1637-11

颜色传递技术的快速彩色图像融合

李光鑫, 徐抒岩, 赵运隆, 孙天宇

(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:以红外和可见光图像为研究对象,提出了一种基于颜色传递技术的快速彩色图像融合算法。该算法直接用灰度融合图像和源多波段图像的差异信号构成源 $YC_B C_R$ 分量,然后在 $YC_B C_R$ 空间运用统计颜色传递技术形成一幅具有与目标图像相似色彩效果的彩色融合图像。算法中利用像素平均融合法和多分辨率融合法作为灰度融合方法,形成两种不同的融合策略以分别满足高实时性和高融合质量的需求。实验结果表明,提出的彩色图像融合算法能够有效地生成一幅具有自然日光色彩效果的融合图像,算法中即使采用像素平均法进行灰度融合同样可以获得令人满意的融合效果。

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

中图分类号:TP751 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20101807.1637

Fast color image fusion based on color transfer technique

LI Guang-xin, XU Shu-yan, ZHAO Yun-long, SUN Tian-yu

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

Abstract: With the particular research on infrared and visible images, a fast color image fusion algorithm based on color transfer technique is presented. The method directly uses the grayscale fused image and the difference signals of input multiband images to construct the source $YC_B C_R$ components, then uses the statistical color transfer technique in $YC_B C_R$ space to form a color fused image whose color appearance is similar to that of the target image. Two different strategies which employ the pixel averaging fusion scheme and the multiresolution fusion scheme as the grayscale image fusion solution are proposed to fulfill high real-time need and high fusion quality need, respectively. Experimental results show that the proposed color image fusion algorithm can effectively produce a natural appearing daytime-like color fused image, and can also yield a satisfactory result even using the pixel averaging fusion scheme to implement the grayscale fusion.

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

1 引言

红外和可见光图像传感器在军事^[1]、安全监控^[2]等领域的用途广泛,因此欧美等国家将这些领域图像融合技术的开发重点放在了红外和可见光图像上。红外和可见光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。彩色图像融合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^[3-4]。因此,彩色图像融合技术受到了各国学者的广泛关注^[1,5-6]。

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^[4,7-8];荷兰 TNO Human Factors 的 Toet 和 Walraven^[9]提出的 TNO 法;以及 Waxman 等人在美国 Massachusetts 理工学院^[10-12]、Alphatech 公司^[13],和 BAE 公司^[14]陆续开发的 MIT 法。NRL 法和 TNO 法运算速度快,但是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^[15],然而公开的技术细节信息较少。

2001 年,美国 Utah 大学的 Reinhard 等人^[16]结合 $l\alpha\beta$ 变换^[17]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^[18-19]将该方法引入到图像融合中,提出了一种基于 Reinhard 颜色传递技术的彩色图像融合方法,Toet 方法通过合适的目标日光彩色图像调节融合图像的颜色,使得最终的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^[20-24]。Toet 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,Toet 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 $YC_B C_R$ 空间^[25-26]提出了一种基于颜色传递技术的快速彩色图像融合方法。此方法直接用灰度融合图像和源多波段图像的差异信号构筑源 $YC_B C_R$ 分量,然后在 $YC_B C_R$ 空间进行颜色统计量匹配,最后将数据变换到 RGB 空间形成一幅具有与目标图像相似色彩效果的彩色融合图像。方法中所用的 $YC_B C_R$ 逆变换仅需简单的乘加运算,形成源颜色分量的形式直接,因此计算复杂度低。对红外和可见光图像的融合实验表明,提出的彩色图像融合算法能够有效地生成一幅具有自然日光色彩效果的融合图像,算法中即使采用像素平均融合法进行灰度融合同样可以获得令人满意的融合效果。

2 基本融合方法

利用线性的 $YC_B C_R$ 空间,结合 Reinhard 的统计颜色传递策略,可以很容易地发展出彩色图像融合方法。下面提出两个基本的融合算法:标准颜色传递融合方法(Standard Color Transfer Based Fusion Method, StaCT)和对比度增强型颜色传递融合方法(Contrast Enhanced Version of Color Transfer Based Fusion Method, CECT)。这两种基本融合算法需要在融合过程中生成一幅源彩色融合图像,本文借助 NRL 方法^[4,7-8]来合成 StaCT 和 CECT 方法中的源彩色融合图像,该方法简单且快速,利于后续快速融合算法的开发。

2.1 StaCT 方法

StaCT 方法利用颜色传递技术来直接重染色源彩色融合图像,其具体步骤如下:

(1)用 NRL 方法生成源彩色融合图像 $[R_i, G_i, B_i]^T$:

$$\begin{bmatrix} R_i \\ G_i \\ B_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} IR \\ Vis \\ Vis \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中: IR 表示源红外图像, Vis 表示源可见光图像。

(2)将 $[R_i, G_i, B_i]^T$ 由 RGB 空间变换到 $YC_B C_R$ 空间,生成源 $YC_B C_R$ 分量 $[Y_s, C_{B,s}, C_{R,s}]^T$:

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0 & 0.587 & 0 & 0.114 & 0 \\ -0.168 & 7 & -0.331 & 3 & 0.500 & 0 \\ 0.500 & 0 & -0.418 & 7 & -0.081 & 3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_f \\ G_f \\ B_f \end{bmatrix}, \quad (2)$$

(3)在 $YC_B C_R$ 空间进行颜色统计量匹配,从而将目标日光彩色图像的颜色统计量传递给源彩色融合图像,生成最终彩色融合图像的 $YC_B C_R$ 分量 $[Y_c, C_{B,c}, C_{R,c}]^T$:

$$\begin{cases} Y_c = \frac{\sigma_s^Y}{\sigma_s^Y} (Y_s - \mu_s^Y) + \mu_t^Y \\ C_{B,c} = \frac{\sigma_s^{C_B}}{\sigma_s^{C_B}} (C_{B,s} - \mu_s^{C_B}) + \mu_t^{C_B} \\ C_{R,c} = \frac{\sigma_s^{C_R}}{\sigma_s^{C_R}} (C_{R,s} - \mu_s^{C_R}) + \mu_t^{C_R} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: μ_s^θ 和 μ_t^θ ($\theta=Y, C_B, C_R$) 分别为源 θ 分量(源彩色融合图像的 θ 分量)和目标 θ 分量(目标图像的 θ 分量)的均值, σ_s^θ 和 σ_t^θ 分别为源 θ 分量和目标 θ 分量的方差。

(4)将图像数据由 $YC_B C_R$ 空间变换回 RGB 空间,得到最终的彩色融合图像 $[R_c, G_c, B_c]^T$:

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0.000 & 0 & 1.402 & 0 \\ 1.000 & 0 & -0.344 & 1 & -0.714 & 1 \\ 1.000 & 0 & 1.772 & 0 & 0.000 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_c \\ C_{B,c} \\ C_{R,c} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

同线性的 $YC_B C_R$ 变换不同, Toet 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。StaCT 方法和 Toet 方法之间最大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, StaCT 方法的算法复杂度低于 Toet 方法。

2.2 CECT 方法

Toet^[18-19]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 $C_{B,f}, C_{R,f}$ 作为源 $YC_B C_R$ 分量:

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ C_{B,f} \\ C_{R,f} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

基于这种替换增强思想,形成了 CECT 方法。Toet^[18-19]方法利用基于 $l\alpha\beta$ 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 $l\alpha\beta$ 变换相比, $YC_B C_R$ 变换更适于图像融合。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 $YC_B C_R$ 变换进行替换增强式融合的 CECT 方法的计算简单得多,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)。

3 快速融合方法

下面通过优化 CECT 方法的算法结构来得到快速融合方法。将式(1)、(2)代入式(5),可得到:

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -0.168 & 7IR - 0.331 & 3Vis + 0.5Vis \\ 0.5IR - 0.418 & 7Vis - 0.081 & 3Vis \end{bmatrix}, \quad (6)$$

通过整理,可得:

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0.1687(Vis - IR) \\ 0.5(IR - Vis) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

0.1687(Vis - IR)和 0.5(IR - Vis)可以看作是源多波段图像的伸缩差异信号。式(7)表明可以用灰度融合图像和伸缩差异信号来形成 CECT 方法中的源 $YC_B C_R$ 分量。灰度融合图像和伸缩差异信号都是由源多波段图像构成的,这说明可以直接用源多波段图像形成源 $YC_B C_R$ 分量。但式(7)并不是一种最优的构造形式,通过下面的命题,可以进一步地简化源 $YC_B C_R$ 分量的构成方法。

命题 3.1: 设 $[S_1, S_2, S_3]^T$ 和 $[\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3]^T$ 为两组 $YC_B C_R$ 分量,且满足

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_1 \\ \hat{S}_2 \\ \hat{S}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xS_1 + c_1 \\ yS_2 + c_2 \\ zS_3 + c_3 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

其中: x, y, z, c_1, c_2 和 c_3 均为常数,且 x, y, z 均大于 0。设 CECT 方法用 $[\hat{S}_1, \hat{S}_2, \hat{S}_3]^T$ 为源 $YC_B C_R$ 分量所得到的彩色融合图像为 $[\hat{R}_c, \hat{G}_c, \hat{B}_c]^T$, 用 $[S_1, S_2, S_3]^T$ 为源 $YC_B C_R$ 分量所得到的彩色融合图像为 $[R_c, G_c, B_c]^T$ 。若这两种情形均采用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,则有

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_c \\ \hat{G}_c \\ \hat{B}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix}. \quad (9)$$

篇幅限制,证明不表。式(7)中 $F, (Vis - IR)$ 和 $(IR - Vis)$ 对应的系数分别为 1, 0.1687 和 0.5, 这些系数均为正数。这样,依据命题 3.1, 可以直接用 $F, (Vis - IR)$ 和 $(IR - Vis)$ 作为源 $YC_B C_R$ 分量,所得到的融合结果与用式(7)得到的结果相同,也就是与用 CECT 方法得到的融合结果一样。

根据前面的推导,在 CECT 方法的基础上,可以开发出一种快速的彩色图像融合方法,本文称其为结构优化型颜色传递融合方法(Architecture Optimized Version of Color Transfer Based Fusion Method, AOCT),其算法结构图如图 1 所示,相应的算法步骤如下:

(1)用灰度融合图像 F , 源多波段图像的差异

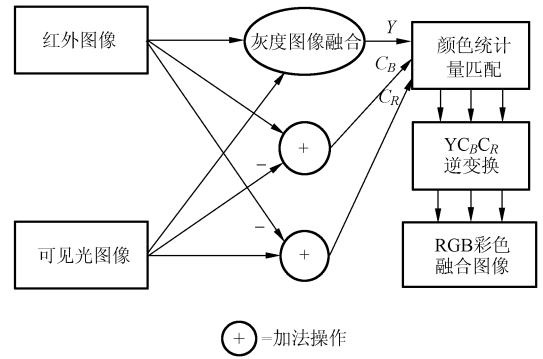


图 1 AOCT 方法的融合结构

Fig. 1 Fusion architecture of the AOCT method

信号 $(Vis - IR)$ 和 $(IR - Vis)$ 构成源 $YC_B C_R$ 分量:

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ Vis - IR \\ IR - Vis \end{bmatrix}. \quad (10)$$

(2)在 $YC_B C_R$ 空间进行颜色统计量匹配,如式(3)所示。

(3)将图像数据变换回 RGB 空间,得到最终的彩色融合图像,如式(4)所示。

本文选用像素平均融合法(Pixel Averaging Fusion Method, PA)和多分辨率融合法(Multi-resolution Fusion Method, MR)来产生 AOCT 方法中的灰度融合图像,称采用 PA 方法进行灰度融合的 AOCT 方法为 P-AOCT,采用 MR 方法进行灰度融合的 AOCT 方法为 M-AOCT。

由前面的推导可知, AOCT 方法和 CECT 方法具有相同的融合性能。但是, AOCT 方法构筑源彩色分量 $(C_{B,s}$ 和 $C_{R,s})$ 的方式更为简单。若输入图像的大小为 $N \times N$, 由式(6)可知, CECT 方法获得源彩色分量需要进行 $4N^2$ 次加法和 $6N^2$ 次乘法; AOCT 方法无需 $YC_B C_R$ 正变换,直接用源多波段图像的差异信号构成源彩色分量,由式(10)可知, AOCT 方法构造源彩色分量仅需进行 $2N^2$ 次加法。因此,同 CECT 方法相比, AOCT 方法具有更低的计算复杂度。

为了便于实时处理,可采取下面的策略对 AOCT 方法进一步优化:

(1)PA 方法生成的灰度融合图像可表示为:

$$F = 0.5IR + 0.5Vis, \quad (11)$$

很明显,权值 0.5 为正数。这样,依据命题

3.1,当采用 P-AOCT 方法进行融合时,可以通过对 IR 和 Vis 直接求和的方式来形成源亮度分量 Y_s :

$$Y_s = IR + Vis. \quad (12)$$

(2)由式(10)可推导出

$$C_{R,s} = -C_{B,s} = -(Vis - IR), \quad (13)$$

这样,根据均值和方差的性质,有

$$\begin{cases} \mu_s^{C_R} = -\mu_s^{C_B} \\ \sigma_s^{C_R} = \sigma_s^{C_B} \end{cases}. \quad (14)$$

式(13)、(14)表明,计算完 $C_{B,s}$, $\mu_s^{C_B}$ 和 $\sigma_s^{C_B}$ 之后,就没有必要再计算 $C_{R,s}$, $\mu_s^{C_R}$ 和 $\sigma_s^{C_R}$,可以通过 $-C_{B,s}$, $-\mu_s^{C_B}$ 和 $\sigma_s^{C_B}$ 直接获得 $C_{R,s}$, $\mu_s^{C_R}$ 和 $\sigma_s^{C_R}$ 。

(3)由式(3)可知,颜色统计量匹配过程中只用到目标颜色统计量: μ_t^Y , $\mu_t^{C_B}$, $\mu_t^{C_R}$, σ_t^Y , $\sigma_t^{C_B}$ 和 $\sigma_t^{C_R}$ 。因此,在实际的融合系统中,没必要存储真正的目标图像,只需存储目标颜色统计量即可完成颜色统计量匹配过程。如果所用的目标图像为一幅合适的日光彩色图像,最终的融合图像就能具有自然的日光色彩效果。

4 实验结果及分析

4.1 各种方法的比较

为了验证 AOCT 方法的有效性,用 NRL 方法、Toet 方法、改进的 Toet 方法、StaCT 方法、P-AOCT 方法和 M-AOCT 方法对 UN Camp 图像进行融合实验。UN Camp 图像如图 2 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 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波红外图像, (b)为相应的 CCD 灰度可见光图像。实验选用图 3 所示的图像作为 Toet 方法、改进的 Toet 方法、StaCT 方法、P-AOCT 方法和 M-AOCT 方法中的目标图像, UN Camp 源多波段图像和目标图像均由 Toet 提供。文中没有用 CECT 方法进行实验,这是由于 CECT 方法与 AOCT 方法具有相同的融合性能(见第 3 节)。

为了降低纹波现象,在 M-AOCT 方法中采用基于相关信号强度比的加权多分辨率图像融合算法^[27-28]形成灰度融合图像,实验中用 Daubechies 的双正交“5-3”小波^[29-30]作为多分辨率分析工具,分解层数为 4, 阈值取 0.75, 掩模取 $\{\{1/16, 1/8, 1/16\}, \{1/8, 1/4, 1/8\}, \{1/16, 1/8, 1/16\}\}$ 。



(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

图 2 UN Camp 图像

Fig. 2 UN Camp images



图 3 UN Camp 图像所用的目标图像

Fig. 3 Target image for UN Camp images

图 4 为各方法对 UN Camp 图像的融合结果。图 4(a)为 NRL 方法的融合结果,该图像的色彩不自然,但是却很好地体现了源多波段图像中的显著细节信息;图 4(b)为 Toet 方法的融合结果,此融合图像的色彩自然性有所改观,但是,图像对比度较差,也没有很好地传承目标图像的颜色特征。可以看到,图像下方的树木呈现出大



(a) NRL 方法的融合结果

(a) Fusion result obtained by NRL method



(e) P-AOCT 方法的融合结果

(e) Fusion result obtained by P-AOCT method



(b) Toet 方法的融合结果

(b) Fusion result obtained by Toet method



(f) M-AOCT 方法的融合结果

(f) Fusion result obtained by M-AOCT method



(c) 改进的 Toet 方法的融合结果

(c) Fusion result obtained by improved Toet method



(d) StaCT 方法的融合结果

(d) Fusion result obtained by StaCT method

图 4 各方法对 UN Camp 图像的融合结果

Fig. 4 Fusion results of UN Camp images by using various methods

片的黄色,而不是目标图像中树木的绿色。此外,在融合图像中出现了过饱和现象,产生了耀眼的白光,这种白光严重地掩盖住了源多波段图像中一些显著的细节信息,比如路面的纹理;图 4(c)为改进的 Toet 方法的融合结果。改进的 Toet 方法同 Toet 方法一样,均借助 $l\alpha\beta$ 变换完成颜色传递过程,不同的是,改进 Toet 的方法中用 NRL 方法生成源彩色融合图像,该融合图像很好地传承了目标图像的自然颜色特征,对比度较好,但是过饱和现象仍没有得到消除,源多波段图像的部分细节信息被白光掩埋。图 4(d)为 StaCT 方法的融合结果,该图像不仅保持了目标图像的自然颜色特征,而且较好地保留了源多波段图像的细节信息,无过饱和现象。图 4(e)为 P-AOCT 方法的融合结果,其融合效果优于 StaCT 方法,图像对比度更高,能够比 StaCT 融合图像更清晰地展现人和栅栏的轮廓信息。图 4(f)为 M-AOCT 方

法的融合结果,可以看到,M-AOCT方法的融合效果最优。

M-AOCT方法中采用MR方法进行灰度融合,Toet方法和改进的Toet方法中采用了 $la\beta$ 变换,所以这3种算法的计算复杂度要高于StaCT和P-AOCT方法。StaCT方法与P-CECT方法(采用PA方法进行灰度融合的CECT方法)具有相同的计算复杂度,由第3节的分析可知,P-AOCT方法的计算量小于P-CECT方法,因此,在5种基于颜色传递的融合方法中(Toet方法、改进Toet方法、StaCT方法、P-AOCT方法和M-AOCT方法),P-AOCT方法的计算复杂度最低。

P-AOCT方法的融合效果虽然没有M-AOCT方法好,但是,P-AOCT方法的融合质量能够令人满意。更重要的是,P-AOCT方法的计算复杂度低,利于实时处理。因此,如果没有特别的需要,在实际中,没有必要采用复杂的M-AOCT方法来融合图像,低计算复杂度的P-AOCT方法能够足以满足大部分情况的需要。

4.2 目标图像的选取

AOCT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,AOCT方法就能够生成一幅具有自然色彩效果的融合图像。为了说明这一点,结合不同的目标图像,以P-AOCT方法为例,分别对Dune图像和Battlefield图像进行融合。Dune图像如图5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)为相应的CCD灰度可见光图像;Battlefield图像如图7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。这两组源多波段图像均由Toet提供。图6和图8分别展示了P-AOCT方法对Dune图像和Battlefield图像的彩色融合结果,图6和图8的左列为实验中所用的目标图像,与这些目标图像相对应的融合结果显示在右列。图6前两行的目标图像来自于Pics4Learning.com网站(www.pics4learning.com),后两行的目标图像来自于BigFoto.com网站(www.bigfoto.com)。图8第一行的目标图像由Toet提供,

第二行的目标图像来自于Van Gogh Gallery网站(www.vangoghgallery.com),第三行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。



(a) Dune 红外图像
(a) Dune infrared image



(b) Dune 可见光图像
(b) Dune visible image

图5 Dune 图像

Fig. 5 Dune images

由图6和图8可以看到,所有的融合图像都很好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AOCT方法得到的融合图像仍然具有良好的自然色彩效果。图6第二行的例子明显地说明了这一点,其目标图像拍摄的是一片草地,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。



图 6 对于 Dune 图像,P-AOCT 方法采用不同目标图像的融合结果。左:4 幅不同的目标图像;右:与各个目标图像相对应的融合结果

Fig. 6 Fusion results of Dune images obtained by the P-AOCT method with different target images. Left: four different target images; Right: Fusion results corresponding to each target image

当目标图像和源多波段图像场景的颜色分布差异较大时,即使目标图像和源多波段图像的场景组成元素相似,利用 AOCT 方法也无法获得



(a) Battlefield 红外图像
(a) Battlefield infrared image



(b) Battlefield 可见光图像
(b) Battlefield visible image

图 7 Battlefield 图像

Fig. 7 Battlefield images

具有自然色彩效果的融合图像。图 6 第四行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,这就导致相应的融合图像中出现了大片的蓝色,与 Dune 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。

AOCT 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 8 第三行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,其相应的融合图像的效果仍旧十分自然。



图 8 对于 Battlefield 图像,P-AOCT 方法采用不同目标图像的融合结果。左:3 幅不同的目标图像;右:与各个目标图像相对应的融合结果

Fig.8 Fusion results of Battlefield images obtained by the P-AOCT method with different target images. Left: three different target images; Right: Fusion results corresponding to each target image

5 结 论

针对红外和可见光图像,本文提出了一种基

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] RILEY T, SMITH M. Image fusion technology for security and surveillance applications [J]. *SPIE*, 2006,6402:640204-1-640204-12.

于颜色传递技术的快速图像融合方法:AOCT。文中用 P-AOCT 和 M-AOCT 两种融合方法来满足不同场合的需求,其中利用像素平均融合技术进行灰度融合的 P-AOCT 方法有利于实时处理;利用多分辨率融合技术进行灰度融合的 M-AOCT 方法能够产生高质量的融合图像。实验结果表明,利用 AOCT 算法可以有效地产生一种具有自然日光色彩效果的融合图像,即使采用简单的 P-AOCT 方法仍能够获得良好的彩色融合效果。

利用 AOCT 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。

- [3] DRIGGERS R G, KRAPELS K A, VOLLMER-HAUSEN R H, *et al.*. Target detection threshold in noisy color imagery [J]. *SPIE*, 2001,4372:162-169.
- [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] 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)
- [6] 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)
- [7] MCDANIEL R V, SCRIBNER D A, KREBS W K, *et al.*. Image fusion for tactical applications [J]. *SPIE*, 1998,3436:685-695.
- [8] 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.
- [9] TOET A, WALRAVEN J. New false color mapping for image fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996,35(3):650-658.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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-TuD3-10.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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 [P]. *United States Patent*: 5555324, 1996.
- [16] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, *et al.*. Color transfer between images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001,21(5):34-41.
- [17] 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.
- [18] TOET A. Paint the night: applying daylight colours to nighttime imagery [R]. *Research Report TM-02-B006, Soesterberg, The Netherlands: TNO Human Factors*, 2002.
- [19] TOET A. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery [J]. *Information Fusion*, 2003,4(3):155-166.
- [20] 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.
- [21] TSAGARIS V, ANASTASSOPOULOS V. Fusion of visible and infrared imagery for night color vision [J]. *Displays*, 2005,26(4-5):191-196.
- [22] 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-1-65671G-8.
- [23] LI G, WANG K. Applying daytime colors to nighttime imagery with an efficient color transfer method [J]. *SPIE*, 2007,6559:65590L-1-65590L-12.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] SKODRAS A, CHRISTOPOULOS C, EBRAHIMI T. The JPEG 2000 still image compression standard [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2001,18(5):36-58.
- [27] LI G, WANG K. Merging infrared and color visible images with a contrast enhanced fusion method [J]. *SPIE*, 2007,6571:657108-1-657108-12.

- [28] 李光鑫,徐抒岩. 适于图像融合的快速颜色传递方法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9): 2301-2310.
LI G X, XU SH Y. Fast color transfer method for image fusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9): 2301-2310. (in Chinese)
- [29] COHEN A, DAUBECHIES I, FEAUVEAU J C. Biorthogonal bases of compactly supported wavelets [J]. *Commun. Pure Appl. Math.*, 1992, 45: 485-560.
- [30] DAUBECHIES I. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.

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年于吉林大学通信工程学院分别获工学硕士、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



赵运隆(1957—),男,吉林长春人,高级实验师,主要从事光电子器件检测、装备及应用技术等方面的研究。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年于中国科学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



孙天宇(1975—),男,吉林长春人,工程师,主要从事空间光学遥感器装备及集成技术等方面的研究。E-mail: guangxin.li@126.com

●下期预告

PC 光学树脂计量圆光栅的制作技术

陈 贇,王力锋,李艳茹

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了解决目前计量圆光栅玻璃基片无法适应振动强度大、冲击力强等恶劣环境的要求,需要采取新型材料替代玻璃作为计量圆光栅制作基片。在分析聚碳酸酯(Polycarbonate,PC)光学树脂透光特性、耐热性和耐化学性等光学特性的基础上,给出清洗PC的具体配方;结合现有光刻复制工艺,研制出先胶后铬新型复制工艺;最后,以PC作为计量圆光栅基片,在蒸镀真空度 1.2×10^{-3} Pa,蒸发距离为150 mm,通过蒸发源质量控制膜厚的镀铬工艺参数下制作出PC光学树脂基片的计量圆光栅。在45倍显微镜下观察,线条陡直,无龟裂,结果表明该新型工艺可行,工艺参数正确,为进一步研制以PC光学树脂计量圆光栅为核心元件的精密测角仪器、光栅计量设备和精确跟踪定位设备等提供了试验基础。