

# 结构优化型颜色传递融合方法

李光鑫,徐抒岩,董吉洪

(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:** 提出一种红外和可见光图像的快速彩色图像融合算法:结构优化型颜色传递融合方法.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  $Y_{C_B}C_R$  分量,然后在  $Y_{C_B}C_R$  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.文中从数学上证明了 YUV 等符合通用  $Y_{C_B}C_R$  空间模型的颜色空间也可用于本文算法,所产生的融合结果与用  $Y_{C_B}C_R$  空间得到的结果相同.算法不仅限于融合红外和可见光图像,还可以用于融合其他波段的双波段图像.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;  $Y_{C_B}C_R$  变换; 红外图像; 可见光图像

**中图分类号:** TP751      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 01-0213-06

## Architecture Optimized Version Color Transfer Based Fusion Method

LI Guang-xin, XU Shu-yan, DONG Ji-hong

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

**Abstract:** A fast color image fusion algorithm for merging infrared and visible images is presented, which is named Architecture Optimized Version Color Transfer Based Fusion Method. The method directly uses the grayscale fused image and the difference signals of the input multiband images to construct the source  $Y_{C_B}C_R$  components, then uses statistical color transfer technique in  $Y_{C_B}C_R$  space to form a color fused image with similar color appearance as the target image. The paper mathematically proves that color spaces conforming to the general  $Y_{C_B}C_R$  space framework, such as YUV space, can be used as an alternative to  $Y_{C_B}C_R$  space in the proposed method. The approach is not only limited to fuse infrared and visible images, but also suitable for merging other dual-band image types. Experimental results show that the proposed color image fusion algorithm can effectively produce a natural appearing daytime-like color fused image, and even using the pixel averaging fusion scheme to implement the grayscale fusion can also provide a satisfactory result.

**Key words:** color image fusion; color transfer;  $Y_{C_B}C_R$  transformation; infrared image; visible image

## 1 引言

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>.

国际上较为著名的彩色图像融合方法有:美国海军研究室提出的 NRL 法<sup>[4]</sup>,荷兰 TNO 人性因素研究所 Toet 和 Walraven<sup>[5]</sup>提出的 TNO 法,以及美国麻省理工学院 Waxman 等人<sup>[6]</sup>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,其融合图像具有适合

人眼观察的自然色彩,然而公开的技术细节信息较少.

2001年,美国犹他州大学 Reinhard 等人<sup>[7]</sup>结合  $\alpha\beta$  变换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>[8]</sup>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,因此很快得到了众多学者的重视.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  $\alpha\beta$  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, $\alpha\beta$  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  $Y_C B_C R_C$  空间<sup>[9]</sup>,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信号构筑源  $Y_C B_C R_C$  分量,然后在  $Y_C B_C R_C$  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  $Y_C B_C R_C$  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 CECT 方法

利用线性的  $Y_C B_C R_C$  空间,结合 Reinhard 的统计颜色传递策略,本节给出一种基本的融合算法:对比度增强型颜色传递融合方法 (CECT, Contrast Enhanced Version Color Transfer Based Fusion Method). 该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<sup>[4]</sup>来合成 CECT 方法中的源彩色融合图像, NRL 方法简单且快速,利于后续快速融合算法的开发. CECT 方法具体步骤如下:

(1) 用 NRL 方法生成源彩色融合图像  $[R_f, G_f, B_f]^T$ :

$$[R_f, G_f, B_f]^T = [IR, Vis, Vis]^T \quad (1)$$

其中,  $IR$  表示源红外图像,  $Vis$  表示源可见光图像.

(2) 将  $[R_f, G_f, B_f]^T$  由 RGB 空间变换到  $Y_C B_C R_C$  空间,生成源  $Y_C B_C R_C$  分量  $[Y_s, C_{B,s}, C_{R,s}]^T$ :

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_f \\ C_{B,f} \\ C_{R,f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_f \\ G_f \\ B_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3) 对红外图像  $IR$  和可见光图像  $Vis$  进行灰度融合,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,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  $Y_C B_C R_C$  分量:

$$[Y_s, C_{B,s}, C_{R,s}]^T = [F, C_{B,f}, C_{R,f}]^T \quad (3)$$

(4) 在  $Y_C B_C R_C$  空间进行颜色统计量匹配,用目标日光彩色图像的颜色统计量调整源  $Y_C B_C R_C$  分量,生成最终彩色融合图像的  $Y_C B_C R_C$  分量  $[Y_c, C_{B,c}, C_{R,c}]^T$ :

$$\begin{aligned} Y_c &= \frac{\sigma_t^Y}{\sigma_s^Y} (Y_s - \mu_s^Y) + \mu_t^Y \\ C_{B,c} &= \frac{\sigma_t^{C_B}}{\sigma_s^{C_B}} (C_{B,s} - \mu_s^{C_B}) + \mu_t^{C_B} \\ C_{R,c} &= \frac{\sigma_t^{C_R}}{\sigma_s^{C_R}} (C_{R,s} - \mu_s^{C_R}) + \mu_t^{C_R} \end{aligned} \quad (4)$$

其中,  $\mu_s^\theta$  和  $\mu_t^\theta$  ( $\theta = Y, C_B, C_R$ ) 分别为源  $\theta$  分量(源彩色融合图像的  $\theta$  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.

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

$$\begin{bmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.0000 & 1.4020 \\ 1.0000 & -0.3441 & -0.7141 \\ 1.0000 & 1.7720 & 0.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_c \\ C_{B,c} \\ C_{R,c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Toet 方法<sup>[8]</sup>利用基于  $l\alpha\beta$  变换的 Reinhard 颜色传递技术完成彩色图像融合,同  $l\alpha\beta$  变换相比,  $Y_C B_C R_C$  变换更适于图像融合,能使融合过程变得更加快速简单:

一方面,线性的  $Y_C B_C R_C$  变换的运算要比非线性的  $l\alpha\beta$  变换简单快速得多.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,  $Y_C B_C R_C$  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.可以明显地看出,  $Y_C B_C R_C$  变换的计算复杂度远低于  $l\alpha\beta$  变换.

另一方面,由于  $l\alpha\beta$  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 利用 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.这种办法总共需要三个颜色空间 (RGB,  $l\alpha\beta$  和 HSV) 和四次空间变换 (RGB 到  $l\alpha\beta$ ,  $l\alpha\beta$  到 RGB, RGB 到 HSV, HSV 到 RGB). 相比之下,用  $Y_C B_C R_C$  变换进行替换增强式融合的计算简单得多,整个过程仅需要两个颜色空间 (RGB 和  $Y_C B_C R_C$ ) 和两次空间变换 (RGB 到  $Y_C B_C R_C$ ,  $Y_C B_C R_C$  到 RGB).

## 3 AOCT 方法

本节通过优化 CECT 方法的算法结构来得到快速融合方法.将式(1)、(2)代入式(3),可以得到

$$\begin{bmatrix} Y_s \\ C_{B,s} \\ C_{R,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ -0.1687 IR - 0.3313 Vis + 0.5 Vis \\ 0.5 IR - 0.4187 Vis - 0.0813 Vis \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过整理,可得

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

0.1687( $V_{is} - IR$ )和0.5( $IR - V_{is}$ )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.实际上,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,这就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 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  $x, y, z$  均大于零.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

$$[\hat{R}_c, \hat{G}_c, \hat{B}_c]^T = [R_c, G_c, B_c]^T \quad (9)$$

由于篇幅限制,证明不表.式(9)中  $F, (V_{is} - IR)$  和  $(IR - V_{is})$  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 1,就可以直接用  $F, (V_{is} - IR)$  和  $(IR - V_{is})$  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.

根据上述推导,在 CECT 方法的基础上,可以发展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(AOCT, Architecture Optimized Version Color Transfer Based Fusion Method),其算法结构图如图 1 所示,相应的算法步骤如下:

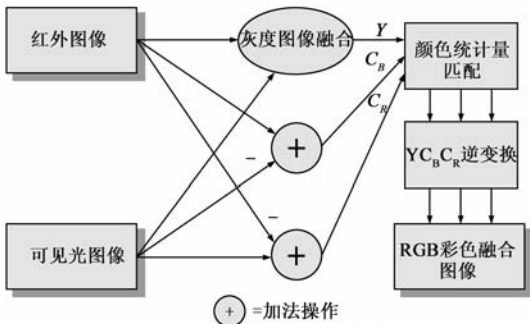


图 1 AOCT 方法的算法结构

(1)对红外图像  $IR$  和可见光图像  $V_{is}$  进行灰度融合,用灰度融合图像  $F$ 、源多波段图像的差异信号( $V_{is} - IR$ )和( $IR - V_{is}$ )构成源  $YC_B C_R$  分量:

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

(2)在  $YC_B C_R$  空间进行颜色统计量匹配,见式(4).

(3)将图像数据变换回 RGB 空间,得到最终的彩色融合图像,见式(5).

本文选用像素平均融合法(PA, Pixel Averaging Fusion Method)和多分辨率融合法(MR, Multiresolution Fusion Method)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,称采用 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 方法在构造源彩色分量的整个过程中仅需进行  $2N^2$  次加法.因此,同 CECT 方法相比, AOCT 方法具有更低的计算复杂度.

## 4 AOCT 方法的优化及扩展

为了便于实时处理,可采取下面的措施对 AOCT 方法进行优化:

(1)PA 方法生成的灰度融合图像可表示为:

$$F = 0.5 IR + 0.5 V_{is} \quad (11)$$

很明显,权值 0.5 为正数.这样,依据命题 1,当采用 P-AOCT 方法时,就可以通过对  $IR$  和  $V_{is}$  直接求和的方式来形成源亮度分量  $Y_s$ :

$$Y_s = IR + V_{is} \quad (12)$$

(2)由式(10)可推导出

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

这样,根据均值和方差的性质,有

$$\mu_s^{C_R} = -\mu_s^{C_B}, \quad \sigma_s^{C_R} = \sigma_s^{C_B} \quad (14)$$

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(4)可知,颜色统计量匹配过程中只用到目标颜色统计量:  $\mu_i^Y, \mu_i^{C_B}, \mu_i^{C_R}, \sigma_i^Y, \sigma_i^{C_B}$  和  $\sigma_i^{C_R}$ .因此,在实际的融合系统中,没必要存储真正的目标图像,只要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,就能使

最终的融合图像具有自然的日光色彩效果.

此外,可以通过下面的策略对 AOCT 方法进行扩展:

(1) AOCT 方法不仅限于融合红外和可见光图像,还可以用于融合其他波段的双波段图像,比如长波红外和中波红外图像.用 AOCT 方法融合双波段图像时,需将长波段与短波段图像的灰度融合结果送入  $Y$  通道,将长波段与短波段图像的差送入  $C_B$  通道,将短波段与长波段图像的差送入  $C_R$  通道,具体的算法结构如图 2 所示.

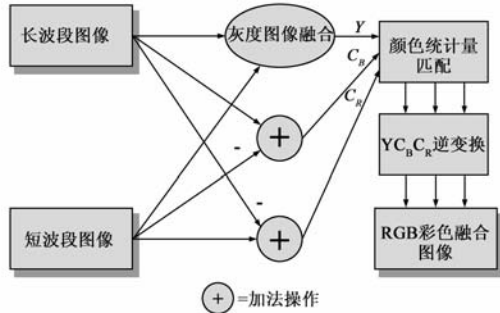


图2 融合双波段图像的AOCT方法的算法结构

(2) AOCT 方法中可以采用其他符合通用  $YC_B C_R$  空间模型(见式(15)和(16))的颜色空间来完成图像融合,所得到融合结果与用  $YC_B C_R$  空间得到结果相同.

**命题 2** 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:

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{C}_B \\ \tilde{C}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2990x & 0.5870x & 0.1140x \\ -0.1687y & -0.3313y & 0.5000y \\ 0.5000z & -0.4187z & -0.0813z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000x^{-1} & 0.0000 & 1.4020z^{-1} \\ 1.0000x^{-1} & -0.3441y^{-1} & -0.7141z^{-1} \\ 1.0000x^{-1} & 1.7720y^{-1} & 0.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{C}_B \\ \tilde{C}_R \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

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 AOCT 方法所得到的融合图像分别为  $[\tilde{R}_c, \tilde{G}_c, \tilde{B}_c]^T$  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  $x, y, z$  为正数,则有

$$[\tilde{R}_c, \tilde{G}_c, \tilde{B}_c]^T = [R_c, G_c, B_c]^T \quad (17)$$

由于篇幅限制,证明不表.图像处理中常用的 YUV 空间<sup>[10]</sup>也符合通用  $YC_B C_R$  空间模型,对于 YUV 空间,  $x = 1, y = 0.872, z = 1.23, c_1 = c_2 = c_3 = 0$ .根据命题 2, AOCT 方法中也可以采用 YUV 空间进行图像融合(算法结构图如图 3 所示),利用  $YC_B C_R$  和 YUV 空间所得到的融合结果相同.

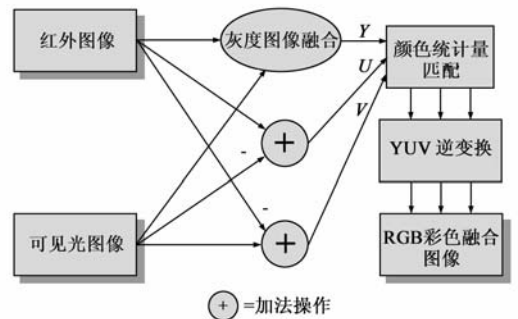


图3 基于YUV空间的AOCT方法的算法结构

## 5 实验结果及分析

### 5.1 各种融合方法的比较

为了验证 AOCT 方法的有效性,用 NRL 方法、Toet 方法、改进的 Toet 方法、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 4 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.UN Camp 源多波段图像由 Toet 提供.本文没有用 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<sup>[11]</sup>的加权多分辨率图像融合算法<sup>[12]</sup>形成灰度融合图像,实验中用 Daubechies 的双正交“5-3”小波<sup>[13]</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 5 为各方法对 UN Camp 图像的融合结果.图 5(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 5(b)为 Toet 方法、改进 Toet 方法、P-AOCT 方法和 M-AOCT 方法所用的目标图像,该目标图像由 Toet 提供.图 5(c)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 5(d)为改进 Toet 方法的融合结果,该方法用简化的 NRL 方法生成源彩色

融合图像,仍借助  $l\alpha\beta$  变换完成颜色传递过程.其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 5(e)为 P-AOCT 方法的融合结果,该融合图像具备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 5(f)为 M-AOCT 方法的融合结果,其融合效果优于 P-AOCT 方法,图像对比度更高,能够比 P-AOCT 融合图像更清晰地展现人和栅栏的轮廓信息.比较五种融合方法,M-AOCT 方法的融合效果最优.

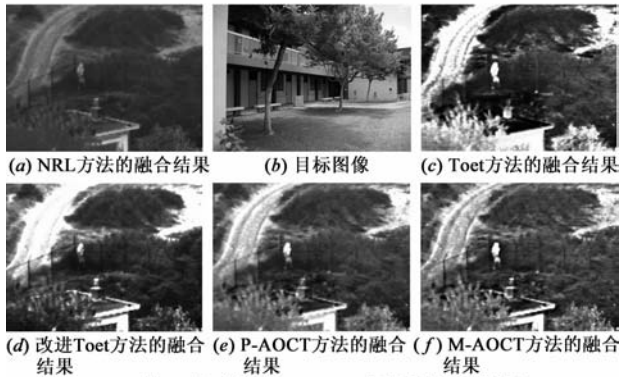


图 5 各方法对 UN Camp 图像的融合结果

M-AOCT 方法中采用 MR 方法进行灰度融合,Toet 方法和改进 Toet 方法中采用了  $l\alpha\beta$  变换,所以,这三种算法的计算复杂度要高于 P-AOCT 方法.在四种基于颜色传递的融合方法中(Toet 方法、改进 Toet 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 方法的融合质量也能够令人满意.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.

作者通过大量实验发现,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.

## 5.2 颜色通道相关性比较

颜色传递技术是 AOCT 方法的关键,颜色传递通过分别改变图像各颜色通道的统计分布来实现图像色彩的调整,颜色通道之间的相关性直接影响颜色传递的效果,当改变一个颜色通道时,其他通道变化的越小越利于颜色传递.下面对 RGB,  $l\alpha\beta$ ,  $Y_C_B C_R$  三个空间的颜色通道相关性进行比较.

通过对图 5(b) 随机采样 1000 个像素点,得到 RGB,  $l\alpha\beta$ ,  $Y_C_B C_R$  三个空间的颜色通道关系图,如图 6 所示.图 6(a)为 RGB 空间的各颜色通道关系图,R、G、B 三颜色通道之间存在很大的相关性,随机采样数据沿 45°斜线分布,一个通道的灰度值增大,其他通道灰度值也随之增大.这样如果改变一个通道的颜色分布,其他通道的颜色分布也会受到较大的影响,很难对各通道实现单独控制,所以 RGB 空间不利于颜色传递,Reinhard 等人<sup>[7]</sup>的实验也表明利用 RGB 空间难以得到理想的颜色传递效果.图 6(b)为  $l\alpha\beta$  空间的各颜色通道关系图, $l$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$  三颜色通道近似正交,一个通道的灰度值增大,其他通道灰度值随之变化较小,这样利于对各个通道进行独立调整,便于完成颜色传递.图 6(c)为  $Y_C_B C_R$  空间的各颜色通道关系图,可以看到,与  $l\alpha\beta$  空间类似, $Y$ 、 $C_B$ 、 $C_R$  三颜色通道的相关性也很小,利于实现各通道的单独控制,因此  $Y_C_B C_R$  空间适于颜色传递. $Y_C_B C_R$  空间不仅具有与  $l\alpha\beta$  空间相似的颜色通道独立性,而且计算更加简单,更适于图像融合(如第 2 节所述).

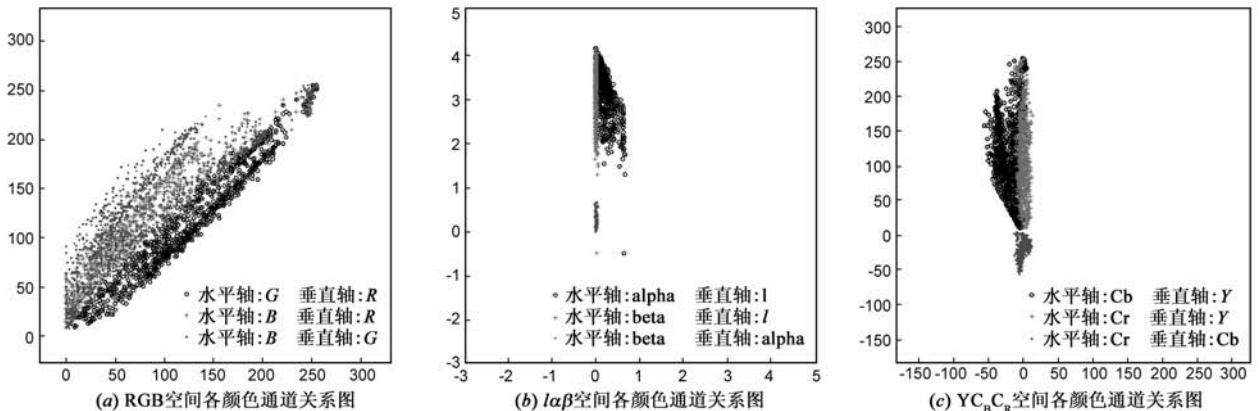


图 6 对图 5(b) 随机采样 1000 个像素点,形成的 RGB,  $l\alpha\beta$ ,  $Y_C_B C_R$  三个空间的颜色通道关系图

## 6 结论

针对红外和可见光图像,本文提出了一种基于颜色传递技术的快速图像融合方法:AOCT.文中给出了 P-AOCT 和 M-AOCT 两种融合方法来满足不同场合的需求:利用像素平均融合技术进行灰度融合的 P-AOCT 方法利于实时处理;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 方法也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.

AOCT 方法可应用于军事、安全监控等领域,有助于观察者理解场景和辨别目标,提高态势感知能力,其融合思路对遥感、医学图像融合也有较大的借鉴意义,方法中所衍生出的  $Y_{CB}C_R$  颜色传递技术也可用于其他类型彩色图像的重染色.

致谢 荷兰 TNO Human Factors 的 Toet 博士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]. Proc. SPIE, 2005, 5782: 29 - 45.
- [2] 倪国强,肖蔓君,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 Guo-qiang, Xiao Man-jun, 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,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 Wei-qi, Wang Ling-xue, et al. Developments of image processing algorithms for color night vision[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(1): 147 - 150. (in Chinese)
- [4] McDaniel R V, Scribner D A, et al. Image fusion for tactical applications[J]. Proc. SPIE, 1998, 3436: 685 - 695.
- [5] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion

[J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 650 - 658.

- [6] Fay D A, Waxman A M, et al. Fusion of multi-sensor imagery for night vision: Color visualization, target learning and search [A]. The 3rd International Conference on Information Fusion [C]. Paris: IEEE Press, 2000. TuD3-3-TuD3-10.
- [7] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, Shirley P. Color transfer between images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34 - 41.
- [8] Toet A. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery[J]. Information Fusion, 2003, 4(3): 155 - 166.
- [9] Neelamani R, Queiroz R de, et al. JPEG compression history estimation for color images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(6): 1365 - 1378.
- [10] Pratt W K. Digital Image Processing[M]. 3rd ed. New York: Wiley, 2001.
- [11] 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 Guang-xin, Wang Ke. Color image fusion algorithm using the contourlet transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(1): 112 - 117. (in Chinese)
- [12] 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 Guang-xin, Xu Shu-yan. Fast color transfer method for image fusion[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(9): 2301 - 2310. (in Chinese)
- [13] Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets[M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1992.

### 作者简介:



李光鑫 男,1978 年生,吉林长春人,副研究员,2001 年于北京理工大学自动控制系获工学学士学位,分别于 2005 年、2008 年在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 男,1963 年生,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

董吉洪 男,吉林长春人,研究员,1995 年于中国科学技术大学获学士学位,主要研究方向为空间光学遥感技术、光学精密机械等.  
E-mail: dongjihong2002@sohu.com