

# 基于 CbCr 查找表的双波段图像彩色融合算法

何炳阳, 张智詮, 李强, 蒋晓瑜

装甲兵工程学院控制工程系, 北京 100072

**摘要** 低照度可见光与红外图像的自然感彩色融合能够显著提高人眼视觉在低照度环境下的情景感知和目标探测能力。基于样本的融合算法是一种快速有效、实时性强的自然感彩色融合算法。针对已有算法在查找表构建和灰度信息利用方面存在的问题, 提出一种基于 CbCr 查找表的双波段图像彩色融合算法。算法采用反向传播神经网络对图像样本的二维亮度向量 $(Y_1, Y_2)$ 和二维色度向量 $(C_b, C_r)$ 进行非线性拟合, 从而获得亮度与色度间的映射关系 $f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$ , 并由此构建 CbCr 查找表。融合时, 由输入的双波段灰度图像的亮度 $Y_1, Y_2$ 和 CbCr 查找表获得彩色融合图像的色度 $C_b, C_r$ ; 由亮度 $Y_1, Y_2$ 经双层拉普拉斯金字塔融合获得彩色融合图像的亮度 $Y_F$ ; 为了减小因环境变化导致的色彩映射偏差, 对亮度 $Y_1, Y_2$ 进行灰度校正。实验结果表明, 本文融合图像具有颜色自然、细节丰富、利于(热)目标检测的特点, 在清晰度、彩色性、映射准确性方面已经达到甚至优于 Toet 算法的图像融合效果。

**关键词** 图像处理; CbCr 查找表; 色彩映射; 反向传播神经网络; 灰度校正

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0133001

## Color Fusion Algorithm of Dual-Band Images Based on CbCr Look-up Table

He Bingyang, Zhang Zhiquan, Li Qiang, Jiang Xiaoyu

Department of Control Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China

**Abstract** Natural color fusion of low-light visible images and infrared images can significantly improve abilities of human vision for situation perceiving and targets detecting in low-light environment. Sample-based color fusion is a fast, effective and real-time natural color fusion algorithm. In view of the problems of existing algorithms in construction of color look-up table and utilization of grayscale information, we propose a new color fusion algorithm of dual-band images based on CbCr look-up table. We obtain the mapping  $f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$  between luminance and chromaticity by using the back propagation neural network to nonlinearly fit the two-dimensional luminance vector  $(Y_1, Y_2)$  and the two-dimensional chromaticity vector  $(C_b, C_r)$  of image samples, and construct the CbCr look-up table based on the mapping. When color fusing, the chromaticity  $C_b, C_r$  of fused image are obtained by the CbCr look-up table and the input luminance  $Y_1, Y_2$  of dual-band grayscale images. The luminance  $Y_F$  of fused image is obtained by the image fusion of luminance  $Y_1, Y_2$  based on two-layer Laplacian pyramid transformation. The luminance  $Y_1, Y_2$  are calibrated to diminish color mapping errors owing to environmental changes. The experimental results show that the fused images based on proposed algorithm have natural color, rich details and are more conducive to (hot) targets detection. The dual-band fusion results obtained by the proposed algorithm are almost as good as or even better than the fusion results by Toet method in definition, colorfulness, and mapping accuracy.

**Key words** image processing; CbCr look-up table; color mapping; back propagation neural network; grayscale calibration

**OCIS codes** 100.2000; 100.4996; 330.1690

## 1 引 言

低照度可见光成像技术可显著增强人眼视觉灵

敏度, 红外成像技术能够有效拓宽人眼视觉光谱范围广泛应用于战场侦查、目标探测、安防监控, 以及辅助驾驶等领域。低照度可见光和红外图像相融

收稿日期: 2017-06-07; 收到修改稿日期: 2017-08-15

作者简介: 何炳阳(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事目标探测与识别方面的研究。E-mail: hebingyangsh@sohu.com

导师简介: 张智詮(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事光电成像与光电检测方面的研究。E-mail: zhangzhq123@sina.com (通信联系人)

合,能够充分利用各波段图像互补信息。相比于灰度图像融合,彩色融合利用人眼视觉对色彩敏感的特点,用色差来增强图像细节,提高融合图像的场景信息表达能力。低照度可见光和红外图像的彩色融合能够提高人眼视觉在低照度环境下对场景的快速理解、感知能力,以及对目标的探测、识别能力<sup>[1]</sup>。

早期的彩色融合算法,如 NRL 法<sup>[2]</sup>、TNO 法<sup>[3]</sup>、MIT 法<sup>[4]</sup>等,得到的伪彩色图像色彩极不自然,观察者在长时间观察中可能会感到视觉疲劳甚至产生错觉<sup>[5]</sup>。对此,Toet<sup>[6]</sup>利用昼间彩色参考图像与伪彩色图像间的全局统计特征(即颜色矩)传递,得到了具有自然感色彩的夜视和红外融合图像;杨少魁等<sup>[7]</sup>则借助累积颜色直方图实现了色彩传递。针对全局色彩传递无法较好实现融合图像序列颜色恒常性的问题,Zheng 等<sup>[8-12]</sup>给出了基于局部统计特征(局域纹理、区域直方图等)的色彩传递方案,但计算成本昂贵,实时性差。为了更好地满足实时融合需求,文献[13-16]提出了基于样本的融合算法(即 Toet 算法),该算法是当前实时融合系统主要采用的彩色融合算法<sup>[17-18]</sup>。

基于样本的彩色融合算法的核心是按照建模颜色与测量颜色之间的平均感知色差最小化原则(即最小化颜色矢量之间的欧氏距离),确定  $n$  维灰度向量  $(g_1, g_2, \dots, g_n)$  与三维彩色向量  $(C_1, C_2, C_3)$  间的最佳映射  $f(g_1, g_2, \dots, g_n) \rightarrow (C_1, C_2, C_3)$ 。该映射反映了不同波段传感器输出场景  $n$  维灰度信息与场景自然感彩色信息间的内在联系,是由传感器的固有特性和场景的环境特点共同确定的,而颜色查找表是映射  $f$  的一种具体实现形式。作为算法的关键步骤,文献[13-15]采用场景中的多组多波段图像样本联合构建完整的颜色查找表,而北京

理工大学的王岭雪等<sup>[19-21]</sup>提出了基于查找表填充的构建方法。总的来说,Toet 算法的基本思想是借助大量数据样本遍历查找表的所有输入和输出值,而北京理工大学的方案是根据已有输出值和填充策略(最小欧氏距离、邻域均值等)对查找表进行修补。这两种方法虽然思路不同,但实质是在无法确定映射  $f(g_1, g_2, \dots, g_n) \rightarrow (C_1, C_2, C_3)$  的情况下提出的查找表补充方案,所得查找表的共性缺点是亮度和色彩过渡不够自然,场景融合效果欠佳。此外,现有的基于样本的彩色融合算法虽然实现了由灰度值索引颜色值,最终获得具有自然感彩色图像的目的,但并未涉及多波段灰度图像的融合,不能满足当前多波段信息融合的需求。针对上述问题,本文提出一种基于样本的低照度可见光和红外图像彩色融合算法,使融合图像兼具自然的色彩、丰富的细节和良好的(热)目标特性。

## 2 算法原理

基于样本的双波段图像彩色融合算法原理如图 1 所示。主要分为色彩映射  $f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$  和灰度融合,并在亮度信息和色彩信息分离的 YCbCr 空间进行融合过程。与 Toet 算法<sup>[13]</sup>的经典三输出方案  $f(g_1, g_2, \dots, g_n) \rightarrow (C_1, C_2, C_3)$  不同,本文采用双输出色彩映射方案,使用双波段灰度图像的亮度  $(Y_1, Y_2)$  和 CbCr 查找表,得到彩色融合图像的色彩信息  $(C_b, C_r)$ ,从而获得自然的颜色外观。对双波段灰度图像进行双层拉普拉斯金字塔融合,得到彩色融合图像的亮度信息  $Y_f$ ,从而获得较好的图像细节和(热)目标特性。由于色彩映射过程仅涉及数据查表操作(灰度校正为可选流程),因此整个彩色融合算法的实时性由灰度融合算法的实时性决定。

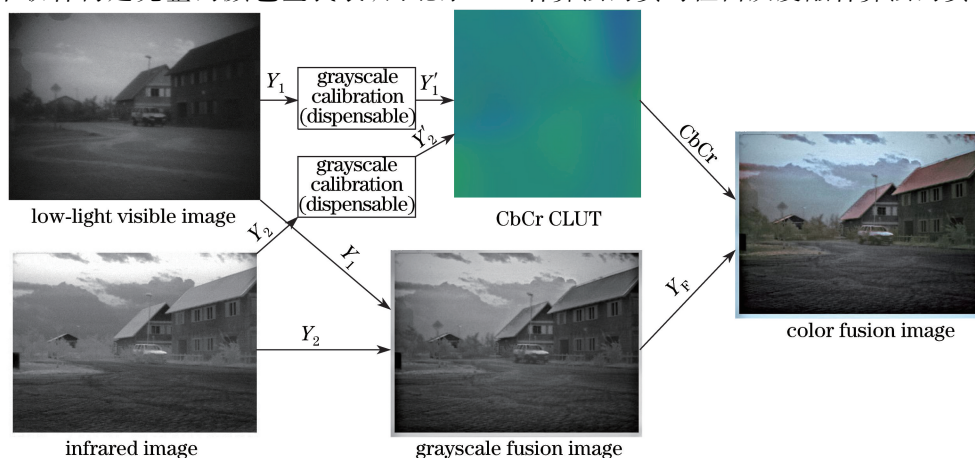


图 1 彩色融合算法原理图

Fig. 1 Schematic of color fusion algorithm

## 2.1 色彩映射

### 2.1.1 基于反向传播神经网络的查找表构建方法

反向传播(BP)神经网络由 McClelland 等<sup>[22]</sup>于 1987 年提出。1989 年, Hecht-Nielsen<sup>[23]</sup>证明其通过样本训练能够逼近任意  $n$  维欧氏空间有界子集  $A$  到  $m$  维欧氏空间有界子集  $f[A]$  的映射或函数  $f: A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ 。从数学本质上看, BP 神经网络是将输入输出问题转换为非线性优化问题, 并具有以下特点: 1)  $n$  维输入空间到  $m$  维输出空间的非线性映射能力; 2) 对训练样本中的大误差或错误数据的容错能力; 3) 对非样本数据的泛化能力。

色彩映射的关键技术是构建 CbCr 查找表。基于 BP 神经网络的特性, 提出一种新的查找表构建方法: 首先采用 BP 神经网络对图像样本进行非线性拟合, 推导出最佳色彩映射  $f$ ; 然后利用映射  $f$  和输入值构建完整的二维颜色查找表  $T_{\text{CLUT}}$ 。具体步骤如下。

1) 选择训练样本。选取所处环境中的一个或几个具有代表性场景的双波段灰度图像(像素大小为  $A \times B$ , 位深为 8 bit)和昼间彩色图像(像素大小为  $A \times B$ , 位深为 8 bit, YCbCr)作为训练样本(每个场景拥有  $A \times B$  组样本数据), 所选场景应包含环境中的典型对象, 并且同一场景的不同波段图像已经过严格配准。

2) 推导最佳色彩映射。按照不同波段图像中像素位置的对应关系, 采用 BP 神经网络对所选训练样本的二维灰度向量  $(Y_1, Y_2)$  和二维色度向量  $(C_b, C_r)$  进行非线性拟合, 确定最佳映射  $f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$ 。借助 MATLAB 提供的神经网络非线性拟合工具箱构建双输入双输出的双层 BP 神经网络(隐层含 10 个神经元), 采用 Levenberg-Marquardt 算法进行训练。其中 70% 的样本用于网络训练, 15% 的样本用于泛化性能优化, 15% 的样本用于网络测试。

3) 构建颜色查找表。以  $Y_1$  和  $Y_2$  作为横、纵坐标, 利用步骤 2) 获得的映射  $f$  和输入值  $(Y_1, Y_2)$  构建完整的二维颜色查找表  $T_{\text{CLUT}}$ ,  $(C_b, C_r) = T_{\text{CLUT}}(Y_1, Y_2) = f(Y_1, Y_2)$ , 其中  $Y_1, Y_2 = 0, 1, \dots, 255$ ,  $(Y_1, Y_2)$  表示位深为 8 bit 灰度图像的所有二维灰度组合, 共计  $256 \times 256$  个  $(C_b, C_r)$  索引值。

### 2.1.2 色彩映射

色彩映射过程如图 2 所示, 对于配准后的待融合双波段灰度图像  $I_{\text{VIS}}$  和  $I_{\text{IR}}$ (像素大小均为  $M \times N$ , 位深均为 8 bit), 根据这两幅图像在同一像素位

置  $(i, j)$  (其中  $i \in [1, M], j \in [1, N]$ ) 处的灰度值组合  $(Y_1, Y_2)$  (其中  $Y_1 = I_{\text{VIS}}(i, j), Y_2 = I_{\text{IR}}(i, j), Y_1, Y_2 \in [0, 255]$ ) 索引 CbCr 查找表  $T_{\text{CLUT}}$ , 索引值  $T_{\text{CLUT}}(Y_1, Y_2)$  即为彩色融合图像  $I_F$  相同像素位置  $(i, j)$  处的  $C_b$  和  $C_r$  色度值  $[C_b(i, j), C_r(i, j)] = I_F(i, j) = T_{\text{CLUT}}(Y_1, Y_2)$ 。对双波段灰度图像所有位置  $(i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N)$  的像素索引后即可得到彩色融合图像的  $C_b$  和  $C_r$  色度通道信息。

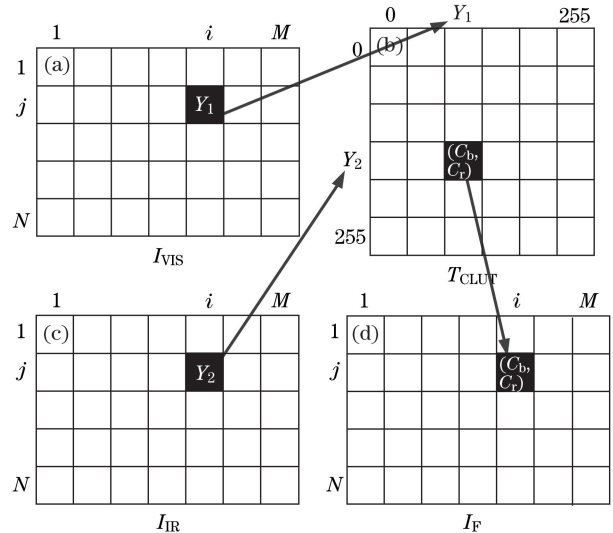


图 2 色彩映射过程。(a)低照度可见光图像; (b)CbCr 查找表; (c)红外图像; (d)彩色融合图像  
Fig. 2 Process of color mapping. (a) Low-light visible image; (b) CbCr look-up table; (c) infrared image; (d) color fusion image

### 2.1.3 灰度校正

由于 CbCr 查找表的色彩是平缓均匀过渡的, 当相似景物在样本图像与待融合图像间的灰度差异较小时, 利用样本训练得到的颜色查找表能够为同一系统采集的相似环境下的待融合图像正确地映射色彩。但是当场景的光照、温度, 以及传感器的信号增益变化较大时, 相似景物在样本图像与待融合图像间的灰度差异较大, 导致色彩映射出现较大偏差。此时, 需要对待融合图像的灰度值进行校正。为此, 采用以参考图像为标准的灰度校正方法, 其灰度传递函数<sup>[24-25]</sup>为

$$g' = \frac{(g - \beta)}{\alpha}, \quad (1)$$

式中  $g$  与  $g'$  为校正前、后的灰度值,  $\beta = \mu_Y - \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{REF}}} \mu_{\text{REF}}$  为平均亮度相对偏移量,  $\alpha = \frac{\sigma_Y}{\sigma_{\text{REF}}}$  为相对增益,  $\mu_Y$  和  $\sigma_Y$  为待校正灰度图像的均值和均方差,  $\mu_{\text{REF}}$  和  $\sigma_{\text{REF}}$  为参考图像的均值和均方差。将各参数代入(1)式,

化简后结果为

$$g' = (g - \mu_Y) \frac{\sigma_{REF}}{\sigma_Y} + \mu_{REF} \quad (2)$$

参考图像应选择与待校正图像具有相同波段、相似场景的样本图像,使得景物在灰度校正后近似达到样本图像中相似景物的灰度水平,从而实现正确的色彩映射。

### 2.2 灰度融合

对于灰度融合算法,目前应用最多的是双(多)波段图像算术(或加权)平均融合。这种算法不仅原理简单,而且实时性极佳,能够提高图像的信噪比。但

平均融合的本质是对图像进行平滑处理,导致融合图像的分辨力下降,清晰度降低,边缘、轮廓变得模糊,使场景中目标的可探测距离显著减小,甚至不如单波段源图像。相比之下,多尺度融合算法符合人眼视觉处理信号的规律,融合效果令人满意,但算法复杂度会随着分解层数的增加而不断增大。考虑到算法的实时性和对图像分辨力的要求,选用具有良好融合效果和较低算法复杂度的双层拉普拉斯金字塔融合作为灰度融合算法<sup>[26]</sup>,算法原理如图3所示,对于拉普拉斯金字塔分解后的顶层(低频)图像采用算术平均融合准则,其余各层(高频)图像采用绝对值最大融合准则。

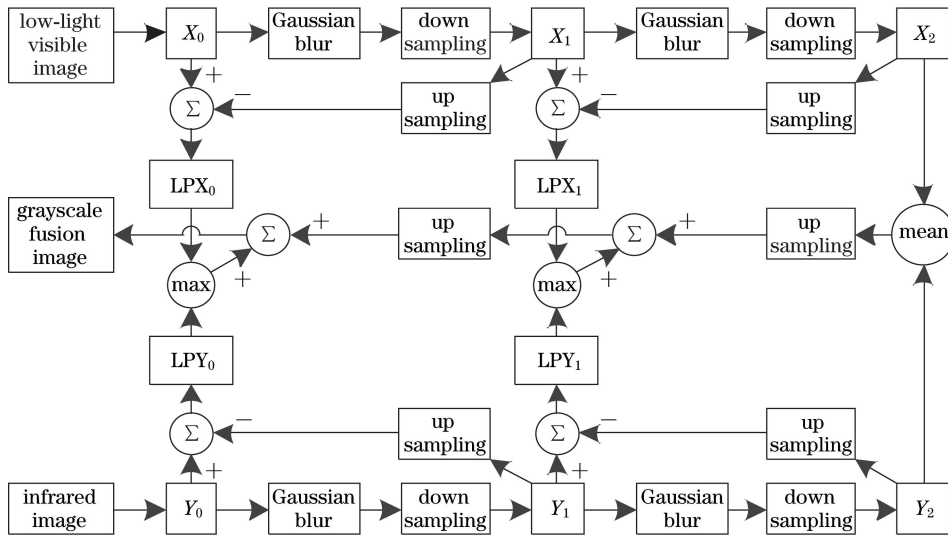


图3 拉普拉斯金字塔融合原理图

Fig. 3 Schematic of image fusion based on Laplacian pyramid transformation

## 3 实验与分析

为了便于比较,本文采用 Toet 提供的 TNO image fusion dataset<sup>[27]</sup> (TNO2014)和 TRICLOBS dynamic multiband image dataset<sup>[28]</sup> (TNO2016)图像融合数据库以及文献[14-15]中配准后的多波段图像作为本文算法实验验证的图像源。实验硬件环境为 Intel T8300 处理器,内存为 3 G,软件环境为 MATLAB R2014a。为了有效对比本文算法和 Toet 彩色图像融合结果,采用以下基于场景理解的客观评价指标:1)清晰度指标 (ISM)<sup>[29]</sup>; 2)色彩的彩色性指标 (CCM)<sup>[29]</sup>; 3)色彩与场景内容的协调性指标  $H_{CS}^{TB}$  和  $H_{CS}^P$  (前者针对城镇建筑场景,后者针对绿色植物场景)<sup>[30]</sup>。

### 3.1 低照度可见光与长波红外图像融合实验

图4所示的村庄环境下5个不同场景的双波段灰度图像(A1~E1:低照度可见光波长为0.4~0.7 μm; A2~E2:长波红外波长为8~14 μm 黑热)和昼间

彩色图像(A3~E3:波长为0.4~0.7 μm RGB)来源于 TNO2014 数据库,将用于样本训练推导最佳映射并构建 CbCr 查找表,所有图像均为 620 pixel × 450 pixel,位深为 8 bit。图5所示的同一环境下更多场景的双波段灰度图像(F1~L1:低照度可见光波长为0.4~0.7 μm; F2~L2:长波红外波长为8~14 μm 黑热)来源于 TNO2016 数据库,将用于算法验证和融合效果对比,所有图像均为 640 pixel × 480 pixel,位深为 8 bit。使用前已将所有场景图像转换至 YCbCr 颜色空间。

#### 3.1.1 样本选择与查找表构建

由于场景 C 和场景 E 基本包含了该环境中的所有对象:房屋、树木、道路、栅栏、汽车、草地、天空等,因此选取场景 C 和场景 E 作为训练样本推导最佳色彩映射,两个场景共计 620 × 450 × 2 = 558000 组样本数据,按照 2.1.1 节所述步骤由 BP 神经网络训练得到的映射  $f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$  构建 CbCr 查找表,如图6所示。



图 4 村庄场景 A~E。(a)低照度可见光;(b)长波红外;(c)昼间彩色

Fig. 4 Scenes A-E of a village. (a) Low-light visible; (b) long-wave infrared; (c) natural color



图 5 村庄场景 F~L。(a)低照度可见光;(b)长波红外

Fig. 5 Scenes F-L of a village. (a) Low-light visible; (b) long-wave infrared



图 6 由场景 C 和 E 构建的 CbCr 查找表

Fig. 6 CbCr look-up table constructed by scenes C and E

### 3.1.2 彩色融合对比

首先采用图 6 的 CbCr 查找表对图 4 的场景进行融合。对 5 个场景的低照度可见光图像(A1~E1)和长波红外图像(A2~E2)进行双层拉普拉斯金字塔融合及彩色融合,分别如图 7(a)、(b)所示。对比彩色融合图像图 7(b)和昼间彩色图像图 4(c)可知,彩色融合图像的整体色彩没有昼间彩色图像丰富,但各场景中不同对象的颜色映射正确,相比于场景的单波段灰度图像[图 4(a)、(b)],彩色融合图像更利于情景感知和目标识别。



图 7 场景 A~E 的融合结果。(a)拉普拉斯金字塔融合;(b)本文算法

Fig. 7 Fusion results of scenes A-E. (a) Fusion based on Laplacian pyramid transformation; (b) proposed algorithm

其次采用图 6 的 CbCr 查找表对图 5 中的场景 F~H 进行融合,并与 Toet 的结果进行对比。场景 F 不含热目标;场景 G 包含 2 个热目标(黑

热),一个人迎面走来,一个人背向跑开;场景 H 包含人和汽车多个热目标。对这 3 个场景的低照度可见光图像(F1~H1)和长波红外图像(F2~H2)

进行双层拉普拉斯金字塔融合及彩色融合,分别如图 8(a)、(b)所示。图 8(c)是 Toet<sup>[16,28]</sup>采用 RGB 空间三维颜色查找表  $f(L_{VIS}, L_{NIR}, L_{LWIR}) \rightarrow (R, G, B)$  得到的三波段(即低照度可见光波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、近红外波长为  $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$  和长波

红外波长为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  白热)彩色融合图像,其中  $L_{VIS}, L_{NIR}, L_{LWIR}$  分别为 RGB 颜色空间中各波段图像的灰度值( $L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$ , 而本文算法灰度值  $Y = 0.275R + 0.564G + 0.098B + 16$ )。



图 8 彩色融合对比。(a)拉普拉斯金字塔融合;(b)本文算法;(c) Toet 算法

Fig. 8 Comparison of color fusion. (a) Fusion based on Laplacian pyramid transformation; (b) proposed algorithm; (c) Toet algorithm

根据场景特点(城镇建筑),选择 ISM、CCM、 $H_{CS}^{TB}$  3 个客观评价指标,本文算法和 Toet 算法的彩色融合结果评价分数如表 1 所示。由客观评价结果可知,本文算法融合图像的清晰度、色彩彩色性更佳,色彩协调性略优。对比图 8(b)、(c)可知,热目标在场景中均能够较好辨识。在色彩丰富度以及映射准确性方面,本文算法双波段融合效果已经达到

甚至优于 Toet 三波段融合效果。在场景 F 和场景 G 中,Toet 融合图像部分树木的颜色出现偏差,而在场景 G 和场景 H 中,本文融合图像部分天空的颜色出现偏差。由于采用了拉普拉斯金字塔融合算法,本文融合图像的细节更佳,景物的边缘轮廓清晰,缺点是对于噪声较大的场景 G,融合算法对噪声的抑制效果较差。相比之下,Toet 算法的融合图像虽然噪声较小,但细节信息有所丢失(如场景 H 中的云朵),景物的边缘轮廓较为模糊。

表 1 不同彩色融合算法的客观评价结果

Table 1 Objective evaluation results of different color fusion algorithms

Algorithm	Scene	ISM	CCM	$H_{CS}^{TB}$
Proposed	F	32.8491	9.9975	1
Toet	F	20.0339	9.3891	1
Proposed	G	57.2448	11.2741	1
Toet	G	40.3954	10.5373	0.9481
Proposed	H	30.2630	9.7667	1
Toet	H	21.5372	9.3901	0.0488

### 3.1.3 灰度校正

采用图 6 的 CbCr 查找表对图 5 中的场景 I~L 进行融合,验证灰度校正的效果,并与 Toet 算法的结果进行对比。场景 I~L 为士兵在烟雾掩护下爬过房屋间空地的场景。对 4 个场景的低照度可见光图像(I1~L1)和长波红外图像(I2~L2)进行双层拉普拉斯金字塔融合及彩色融合,分别如图 9(a)、(b)所示。由于环境条件变化较大,图 9(b)的绿色植物

出现严重偏色。为此,选择图 4 的灰度图像 D1(低照度可见光)、D2(长波红外黑热)对场景 I~L 对应波段的灰度图像进行灰度传递,然后使用灰度校正后的图像和图 6 的 CbCr 查找表得到彩色融合图像,即图 9(c)。由图 9 可知,灰度校正较好地解决

了偏色问题。图 9(d)为 Toet 算法<sup>[16,28]</sup>采用 RGB 空间三维颜色查找表 $f(L_{VIS}, L_{NIR}, L_{LWIR}) \rightarrow (R, G, B)$ 得到的三波段(即低照度可见光波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ 、近红外波长为  $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$  和长波红外波长为  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  白热)彩色融合图像。



图 9 灰度校正及彩色融合对比。(a)拉普拉斯金字塔融合图像;(b)本文算法灰度校正前;(c)本文算法灰度校正后;(d) Toet 算法

Fig. 9 Greyscale calibration and a comparison of color fusion. (a) Fusion based on laplacian pyramid transformation; (b) proposed algorithm before calibration; (c) proposed algorithm after calibration; (d) Toet algorithm

选择 ISM、CCM、 $H_{CS}^{TB}$  3 个客观评价指标,本文算法和 Toet 算法的彩色融合结果评价分数如表 2 所示。结合客观评价结果,对比图 9(c)、(d)可知,本文融合图像较好保留了源图像的细节信息,如场

景 I 中的云朵,但随着烟雾不断增大,本文融合结果的清晰度和色彩彩色性优势逐渐减小,2 种算法的色彩协调性整体相当。

表 2 不同彩色融合算法的客观评价结果

Table 2 Objective evaluation results of different color fusion algorithms

Algorithm	Scene	ISM	CCM	$H_{CS}^{TB}$
Proposed	I	39.9465	10.3456	1
Toet	I	30.1742	9.9103	0.0455
Proposed	J	39.2585	10.3182	1
Toet	J	30.9458	9.9450	1
Proposed	K	40.6167	10.3824	1
Toet	K	36.3672	10.2393	1
Proposed	L	41.1740	10.4245	1
Toet	L	41.4261	10.3875	1

### 3.2 低照度可见光与近红外图像融合实验

图 10 和图 11 所示的住宅环境下 7 个不同场景的双波段灰度图像(M1~S1:低照度可见光波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ;M2~S2:近红外波长为  $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ )和场景 M 的昼间彩色图像(M3 波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$  RGB)来源于 Toet<sup>[14-15]</sup>,场景 M 图像为  $433 \text{ pixel} \times 400 \text{ pixel}$ ,位深为 8 bit,将其作为训练样本推导最佳映射并构建 CbCr 查找表,场景 N~S 图像为  $260 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ ,位深为 8 bit,将用于算法验证和融合效果对比。使用前已将所有场景图像转换至 YCbCr 颜色空间。

以场景 M 作为训练样本推导最佳色彩映射,该场景共计  $433 \times 400 = 173200$  组样本数据,按照 2.1.1 节所述步骤由 BP 神经网络训练得到的映射

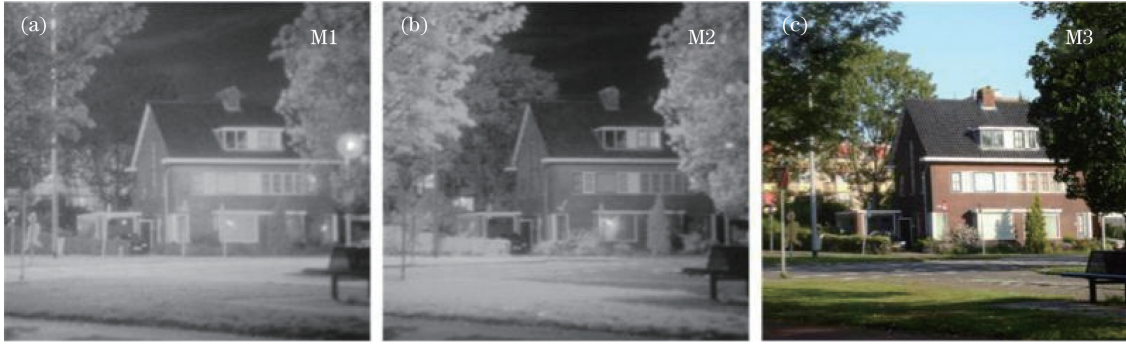


图 10 训练样本。(a)低照度可见光;(b)近红外;(c)昼间彩色

Fig. 10 Training samples. (a) Low-light visible; (b) near infrared; (c) natural color

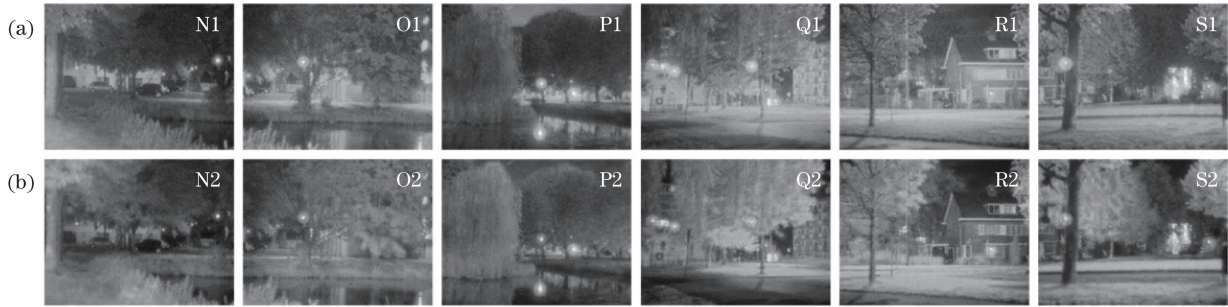


图 11 住宅场景 N~S。(a)低照度可见光;(b)近红外

Fig. 11 Scenes N-S of a residence. (a) Low-light visible; (b) near infrared

$f(Y_1, Y_2) \rightarrow (C_b, C_r)$  构建 CbCr 查找表,如图 12(a)所示。利用该表,对图 11 所示的 6 个场景的低照度可见光图像(N1~S1)和近红外图像(N2~S2)进行双层拉普拉斯金字塔融合及彩色融合,结果分别如图 13(a)、(b)所示。图 12(b)和图 13(c)分别为 Toet 算法<sup>[14-15]</sup>针对场景 M 构建的 RGB 空间二维颜色查找表  $f(L_{\text{VIS}}, L_{\text{NIR}}) \rightarrow (R, G, B)$ , 以及利用该表得到的双波段(即低照度可见光波长为  $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$  和近红外波长为  $0.7 \sim 1.0 \mu\text{m}$ )彩色融合图像。

根据场景特点(绿色植物),选择 ISM、CCM、 $H_{\text{CS}}^p$  3 个客观评价指标,本文算法和 Toet 算法的彩色融合结果评价分数如表 3 所示。结合客观评价结果对比图 13(b)、(c)可知,本文算法融合结果在清晰度、色彩彩色性以及色彩协调性方面均具有优势,图像更加清晰,颜色更加鲜艳自然,因而更利于快速理解情景感知和图像内容。

表 3 不同彩色融合算法的客观评价结果

Table 3 Objective evaluation results of different color fusion algorithms

Algorithm	Scene	ISM	CCM	$H_{\text{CS}}^p$
Proposed	N	39.4359	10.5274	0.0314
Toet	N	29.2130	10.0348	0.0213
Proposed	O	44.4015	10.6658	0.0199
Toet	O	32.9201	10.1551	0.0191
Proposed	P	32.5997	10.2496	0.0212
Toet	P	25.2427	9.7897	0.0194
Proposed	Q	48.7280	10.8443	0.0311
Toet	Q	36.1324	10.3511	0.0149
Proposed	R	58.7839	11.1888	0.0292
Toet	R	42.4467	10.6295	0.0156
Proposed	S	55.0461	11.0511	0.0331
Toet	S	39.8120	10.5225	0.0179

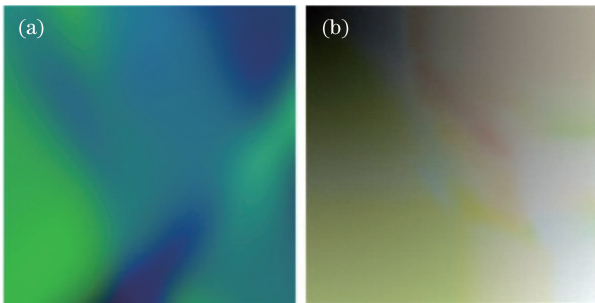


图 12 由场景 M 构建的查找表。(a)本文算法 CbCr 查找表;

(b) Toet 算法 RGB 查找表

Fig. 12 Look-up table constructed by scene M.

(a) CbCr look-up table by proposed algorithm;

(b) RGB look-up table from Toet algorithm



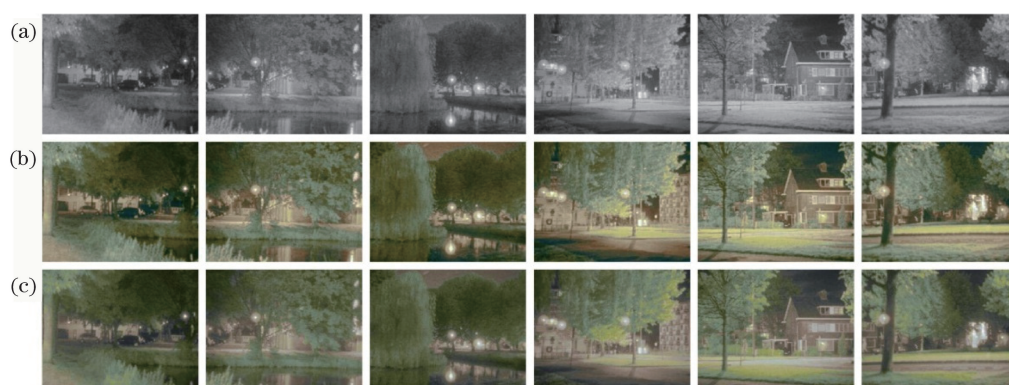


图 13 彩色融合对比。(a)拉普拉斯金字塔融合;(b)本文算法;(c) Toet 算法

Fig. 13 Comparison of color fusion. (a) Fusion based on Laplacian pyramid transformation;  
(b) proposed algorithm; (c) Toet algorithm

## 4 结 论

针对低照度可见光和红外图像的彩色融合需求,提出了一种基于样本的双波段图像彩色融合算法,并在以下方面有所创新:1)新的基于样本的融合算法框架;2)基于 BP 神经网络的查找表构建方法;3)能够有效解决偏色问题的灰度校正方法。由于色彩映射过程仅涉及数据查表操作(消除偏色的灰度校正为可选流程),整个彩色融合算法的实时性由灰度融合算法的实时性决定,因此采用具有较好融合效果和实时性的双层普拉斯金字塔融合算法。利用 Toet 提供的图像源进行融合实验的结果表明,本文算法融合图像具有颜色自然、细节丰富,利于(热)目标检测等特点,在清晰度、彩色性、映射准确性方面已经达到甚至优于 Toet 算法的图像融合效果。下一步研究的重点是神经网络优化以及寻找实时性和融合效果更佳的灰度融合算法。

### 参 考 文 献

- [1] Toet A, Hogervorst M A. Progress in color night vision[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 010901.
- [2] McDaniel R V, Scribner D A, Krebs W K, *et al.* Image fusion for tactical applications[C]. SPIE, 1998, 3436: 685-695.
- [3] Toet A, Walraven J. New false color mapping for image fusion[J]. *Optical Engineering*, 1996, 35(3): 650-658.
- [4] Waxman A M, Gove A N, Fay D A, *et al.* Color night vision: opponent processing in the fusion of visible and IR imagery[J]. *Neural Networks*, 1997, 10(1): 1-6.
- [5] Stuart G W, Hughes P K. Towards understanding the role of colour information in scene perception using night vision device[R]. Australia: Defence Science and Technology Organisation, 2009.
- [6] Toet A. Natural colour mapping for multiband nightvision imagery[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(3): 155-166.
- [7] Yang S K, Liu W. Color fusion method for low-level light and infrared images[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1654-1659.  
杨少魁, 刘文. 一种微光与红外图像彩色融合方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1654-1659.
- [8] Zheng Y F, Essock E A. A local-coloring method for night-vision colorization utilizing image analysis and fusion[J]. *Information Fusion*, 2008, 9(2): 186-199.
- [9] Yang B, Sun F M, Li S T. Region-based color fusion method for visible and IR image sequences[C]// *Proceedings of Chinese Conference on Pattern Recognition*, 2008: 1-6.
- [10] Zhao Y M, Wang L X, Jin W Q, *et al.* A color transfer method for colorization of grayscale image based on region histogram statistics[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(3): 322-326.  
赵源萌, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于区域直方图统计的灰度图像色彩传递方法[J]. *北京理工大学学报*, 2012, 32(3): 322-326.
- [11] Qian X Y, Zhang T C, Wang B F, *et al.* Color night vision algorithm based on local color mapping[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(5): 689-693.  
钱小燕, 张天慈, 王帮峰, 等. 局部颜色映射的彩色夜视算法[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(5): 689-693.
- [12] Xue M G, Zhou P C, Liu C C. A novel local color transfer method for night vision image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 0781.  
薛模根, 周浦城, 刘存超. 夜视图像局部颜色传递算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2): 0781.
- [13] Hogervorst M A, Toet A. Method and system for converting at least one first-spectrum image into a second-spectrum image: US8478028[P]. 2013-07-02.

- [14] Hogervorst M A, Toet A. Method for applying daytime colors to nighttime imagery in realtime[C]. SPIE, 2008, 6974: 697403.
- [15] Hogervorst M A, Toet A. Fast natural color mapping for night-time imagery[J]. Information Fusion, 2010, 11(2): 69-77.
- [16] Hogervorst M A, Toet A. Improved colour matching technique for fused nighttime imagery with daytime colours[C]. SPIE, 2016, 9987: 99870J.
- [17] Luo Y, Jin W Q, Liu X D. Color look-up space based natural color fusion algorithm and DSP real-time implementation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(8): 2241-2246.  
骆媛, 金伟其, 刘效东. 基于颜色查找空间的自然感彩色融合算法及 DSP 实时实现[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2241-2246.
- [18] Pei C, Jiang X Y, Wang J, *et al.* Dual-channel real-time image fusion system with nature color[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(5): 1333-1339.  
裴闯, 蒋晓瑜, 王加, 等. 自然彩色化双通道实时图像融合系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5): 1333-1339.
- [19] 王岭雪, 金伟其, 赵源萌, 等. 基于颜色查找表的双波段视频快速自然感彩色融合方法: 101867685A[P]. 2010-10-20.
- [20] Jin Z. Computational color imaging based on the color look-up table of multidimensional information[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.  
金真. 基于多维信息颜色查找表的计算彩色成像[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [21] Jiang M. Study on double-band color image fusion algorithm based on 2D color look-up table[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.  
姜曼. 基于二维颜色查找表的双波段彩色图像融合算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [22] McClelland J L, Rumelhart D E, PDP Research Group. Parallel distributed processing: psychological and biological models[M]. Cambridge: The MIT Press, 1987.
- [23] Hecht-Nielsen R. Theory of the backpropagation neural network[J]. Neural Networks, 1989, 1(s1): 445-448.
- [24] Li G X, Wang K. Merging infrared and color visible images with an contrast enhanced fusion method[C]. SPIE, 2007, 6571: 657108.
- [25] Wang C Y, Guo Z Z, Wang S T, *et al.* A strip noise removal method of hyperspectral image based on combining bilateral filter with moment matching[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2014, 31(2): 153-156.  
王春阳, 郭增长, 王双亭, 等. 双边滤波与矩匹配融合的高光谱影像条带噪声去除方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014, 31(2): 153-156.
- [26] Wang Y M, Cheng D M, Zhao G B. Image fusion algorithm of infrared and visible images based on target extraction and Laplace transformation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(1): 011002.  
汪玉美, 陈代梅, 赵根保. 基于目标提取与拉普拉斯变换的红外和可见光图像融合算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(1): 011002.
- [27] Toet A. TNO image fusion dataset[DB/L]. [2014-04-26]. <http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.1008029>.
- [28] Toet A, Hogervorst M A, Pinkus A R. The TRICLOBS dynamic multiband image dataset[DB/OL]. [2016-10-08]. [https://figshare.com/articles/The\\_TRICLOBS\\_Dynamic\\_Multiband\\_Image\\_Dataset/3206887](https://figshare.com/articles/The_TRICLOBS_Dynamic_Multiband_Image_Dataset/3206887).
- [29] Yuan Y H, Zhang J J, Chang B K, *et al.* Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image[J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 033202.
- [30] Gao S S, Jin W Q, Wang L X, *et al.* Color-quality assessment for color fusion images of typical scenes based on color harmony[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(10): 1054-1060.  
高绍姝, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于颜色协调性的典型场景彩色融合图像颜色质量评价[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(10): 1054-1060.