

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.10.017

色彩传递算法在不同色彩空间中的成像效果研究^{*}

孙 斌¹ 陈小惠¹ 王贵圆² 富容国² 常本康²

(1. 南京邮电大学自动化学院 南京 210023; 2. 南京理工大学电子工程与光电技术学院 南京 210094)

摘 要:为了在红外与可见光图像融合系统中,评价不同色彩传递算法在不同色彩空间中的成像效果,分别在 $YCbCr$ 色彩空间和 $l\alpha\beta$ 色彩空间中,采用全局色彩传递算法和点对点色彩传递算法分别对一组图像进行效果对比研究,并使用客观评价方法对处理结果进行计算分析,所得到的评价结果与主观评价结果基本一致。经过实验对比,客观评价方法的结果与主观评价方法的结果一致,色彩空间的选择对色彩传递算法的最终效果有显著的影响,在 $YCbCr$ 空间中,全局色彩传递效果好于点对点色彩传递效果;在 $l\alpha\beta$ 空间中,点对点色彩传递效果好于全局色彩传递效果。

关键词: 色彩空间;彩色融合;融合评价;红外图像;可见光图像

中图分类号: TN22 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on the effect of color transfer algorithm in different color space

Sun Bin¹ Chen Xiaohui¹ Wang Guiyuan² Fu Rongguo² Chang Benkang²

(1. School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. School of Electronic Engineering and Optic-electronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract:In order to evaluate the effect of different color transfer algorithms in different color space in the infrared and visible image fusion system, in $YCbCr$ color space and $l\alpha\beta$ color space, using objective evaluation method and subjective evaluation method, the global color transfer algorithm and point-to-point color transfer algorithm are used to compare the effect of a set of images. Through the experimental comparison, the result of the objective evaluation method is consistent with the subjective evaluation method. It is concluded that, in the $YCbCr$ space, the global color transfer effect is better than the point-to-point color transfer effect, while in the $l\alpha\beta$ space, the point-to-point color transfer effect is better than the global color transfer effect.

Keywords: color space; color fusion; fusion evaluation; infrared image; visible image

0 引 言

图像间的色彩传递是目前计算机图像图形学的研究热点之一,其主要目的在于实现黑白图像的彩色化,从而增强人眼的可视度。色彩传递技术也被广泛运用在红外与微光夜视领域,将常见场景的颜色赋予黑白的红外图像与微光图像,使得观察者能从颜色的区别上更容易地判断目标特征,快速理解场景^[1-5]。常见的色彩传递算法

可以分为两大类:全局色彩传递和点对点色彩传递。2003年,荷兰应用科学研究院的Toet等人^[6]提出了一种应用于多波段夜视成像的全局自然彩色化算法。该算法首先将多波段的黑白图像进行初步的置色融合得到一幅伪彩色图像^[7],再利用彩色参考图像对伪彩色图像的色彩分量进行线性变换,使各个色彩分量的均值和方差与彩色参考图像的相同,从将彩色参考图像的整体颜色分布的特性转移到伪彩色图像中。2002年,纽约州立大学的Welsh等人^[8]提出了一种点对点的色彩传递算法,该

收稿日期:2017-04 Received Date: 2017-04
^{*} 基金项目:南京邮电大学人才引进基金(NY215051)、南京邮电大学基金(NY217067)资助项目

算法以区域能量和方差作为判定准则,即将区域能量和方差的加权值作为量化标准,从彩色参考图像中寻找与黑白图像中的目标相匹配的点,并将改点的色彩信息传递给黑白图像中的对应点。该方法最初是用于黑白照片、卫星遥感图像、电子显微图像的着色,后来也被用在夜视成像领域^[3]。基于这两种色彩传递的思路,随后又衍生出各自优化的、综合的、多尺度多分辨分析的色彩传递算法^[9-14]。

考虑到人眼视觉习惯,这些算法主要在两个常用的色彩空间进行,即 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间^[15]。 $YCbCr$ 空间是图像处理中常用的色彩编码方案, Y 是指亮度分量, Cb 指蓝色色度分量和一个参考值的差,而 Cr 指红色色度分量和一个参考值的差。人的肉眼对视频的亮度分量更敏感,因此在通过对色度分量进行子采样来减少色度分量后,肉眼将察觉不到的图像质量的变化。主要的子采样格式有 $YCbCr4:2:0$ 、 $YCbCr4:2:2$ 和 $YCbCr4:4:4$ 。 $l\alpha\beta$ 空间假设人类视觉系统是一种处理自然场景的理想系统,其中 l 通道表示消色差的亮度通道, α 表示黄-蓝色差通道, β 表示红-绿色差通道。与传统的颜色通道相比,此空间各通道相关度最小,具有一定的相互独立性,更符合人类视觉感知系统。 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间这两种色彩空间经常被运用于色彩传递算法中,特别是微光夜视和红外夜视图像融合技术中,以往工作的重点只在色彩传递算法的设计上,却没有研究色彩空间对算法本身的影响。显然,色彩空间内在结构的差异,必然会对不同的色彩传递算法有着不同的适应性。本文以全局色彩传递和点对点色彩传递的最典型的两个算法为例,分别在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中进行色彩传递,比较这两类色彩传递算法在不用色彩空间中的差异。

1 色彩空间变换

在彩色图像融合中,图像可以在不同的色彩空间中进行变换,从而得到最佳的融合效果。 RGB 空间通过3种基本颜色的不同程度的迭加来产生各种各样的不同颜色,它能够涵盖人类视力所能感知的所有颜色。然而, RGB 空间的每个分量既包含色度信息,又包含亮度信息,这对于彩色图像的处理是不利的。因此,在彩色图像融合系统和计算机视觉中常用在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中对图像进行处理。对于一个 RGB 空间的图像,通过式(1)将入射到人眼的所有波长的光谱编码成3种信号 L 、 M 、 S 。

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.3783 & 0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ G_B \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: L 、 M 、 S 分别是人眼不同锥细胞的光谱响应。之

后采用采用式(2)将 L 、 M 、 S 转换至 $l\alpha\beta$ 空间。

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

式中: l 表示消色差值, α 表示黄色值减蓝色值, β 表示红色值减绿色值,将式(1)、(2)联立就可以得到 RGB 空间到 $l\alpha\beta$ 空间的转换公式。 $YCbCr$ 空间是另一种常用的图像编码方案,常用于视频信号处理传输,变换关系为:

$$\begin{cases} Y = 0.257R + 0.564G + 0.098B + 16 \\ Cb = -0.148R - 0.291G + 0.439B + 128 \\ Cr = 0.439 - 0.368G - 0.071B + 12 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Y 表示图像亮度信号, Cb 表示蓝色色度分量差值信号, Cr 表示红色色度分量差值信号, R 、 G 、 B 分别表示 RGB 空间对应像素的值。

2 色彩传递算法

2.1 Toet 全局色彩传递

Toet 全局色彩传递算法分为两个过程。第1个过程是将多传感器图像直接映射到 RGB 颜色分量中,以红外图像 F_{IR} 和微光图像 F_{LL} 为例,

$$\begin{cases} F_R = F_{IR} - F_{\text{comm}} \times 0.5 \\ F_G = F_{LL} - F_{\text{comm}} \times 0.5 \\ F_B = F_{\text{comm}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: F_R 、 F_G 、 F_B 分别表示伪彩色图像 F_1 的 R 、 G 、 B 3个色彩分量, F_{comm} 是红外图像 F_{IR} 和微光图像 F_{LL} 的共有部分:

$$F_{\text{comm}} = \min\{F_{IR}, F_{LL}\} \quad (5)$$

第2个过程是将彩色参考图像 T 的色彩传递给伪彩色图像 F_1 。先将彩色参考图像 T 和伪彩色图像 F_1 转换到 $YCbCr$ 空间(或 $l\alpha\beta$ 空间,这里以 $YCbCr$ 空间为例),再分别计算它们各自的3个分量的均值 μ 和方差 σ ,进行如下计算:

$$\begin{cases} F_Y = \mu_Y^T + \frac{\sigma_Y^T}{\sigma_{F_1}^{F_1}} (F_1 - \mu_{F_1}^{F_1}) \\ F_{Cb} = \mu_{Cb}^T + \frac{\sigma_{Cb}^T}{\sigma_{F_1}^{F_1}} (F_1 - \mu_{Cb}^{F_1}) \\ F_{Cr} = \mu_{Cr}^T + \frac{\sigma_{Cr}^T}{\sigma_{F_1}^{F_1}} (F_1 - \mu_{Cr}^{F_1}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: μ_Y^T 、 μ_{Cb}^T 、 μ_{Cr}^T 与 σ_Y^T 、 σ_{Cb}^T 、 σ_{Cr}^T 分别为参考图像 T 各分量的均值和方差, $\mu_{F_1}^{F_1}$ 、 $\mu_{Cb}^{F_1}$ 、 $\mu_{Cr}^{F_1}$ 与 $\sigma_{F_1}^{F_1}$ 、 $\sigma_{Cb}^{F_1}$ 、 $\sigma_{Cr}^{F_1}$ 分别为伪彩色图像 F_1 各分量的均值和方差, F_Y 、 F_{Cb} 、 F_{Cr} 分别为彩色

化图像 F 的 Y 、 Cb 、 Cr 分量。经过式(6)的运算,初步融合的伪彩色图像的各个分量的均值和方差被调整至与参考图像的对应分量一致,因而最终的彩色化图像呈现出参考图像的色彩特征。此类算法利用统计信息进行颜色校正,使两幅图像各通道的统计值具有相同的分布,从而达到视觉上的相似。但是因为这种算法中结果图像的色彩信息不是直接取自源图像,而是通过对目标图中彩色信息进行偏移和缩放得到的,因此得到的结果往往不够自然,得到的图像由于颜色的线性调整有时候会出现不可预测的颜色。

2.2 Welsh 点对点色彩传递

Welsh 等人提出的色彩传递算法是典型的基于像素点匹配的点对点色彩传递算法,适用于将彩色源图像的色彩传递给一个灰度的目标图,即给灰度图像彩色化。此类算法是以 $l\alpha\beta$ 颜色空间为基础,提出了基于亮度和亮度的均方差权值的线性组合作为权值,然后在彩色样本点和目标灰度图像像素之间进行匹配。点对点色彩传递算法的步骤如下:首先采用一种灰度融合算法将红外图像 F_{IR} 和微光图像 F_{LL} 融合为一幅图像 F_2 ,这里采用的是 Laplace-pyramid 算法。然后,将灰度融合图像 F_2 的亮度进行线性转换,使之与彩色参考图像的亮度的均值与方差一致。

$$F_2' = \mu_Y^T + \frac{\sigma_Y^T}{\sigma_{F_2}}(F_1 - \mu_Y^{F_2}) \quad (7)$$

式中: $\mu_Y^{F_2}$ 与 $\sigma_Y^{F_2}$ 分别为灰度融合图像 F_2 的均值和方差, F_2' 为调整后的灰度融合图像。从参考图像中随机选取一批样点,权值 w 计算如下:

$$w = 0.5 \times \text{mean} + 0.5 \times \text{std} \quad (8)$$

式中: mean 和 std 分别为样点周围邻域内的平均能量和方差,这个邻域一般为 5×5 。紧接着,对 F_2' 中的每一个点用式(8)计算权值 w ,并在样本中找到与之最接近的点,将样本点的 α 和 β 分量值赋与对 F_2' 中的点,完成色彩传递。最后,将 $l\alpha\beta$ 空间中的 F_2' 转换到 RGB 空间。此类算法利用一定的准则进行图像间的目标匹配并着色,能够保证色彩的真实性和自然性。然而匹配准则的选取至关重要,匹配的准确性直接决定了色彩传递的效果。另外,点对点色彩传递算法运算量较大,需合理控制样本数量。

3 实验与分析

为了比较这两类算法在不同色彩空间中的色彩传递效果,选用 MIT 提供的一组经典的红外与微光图像,如图 1(a)、(b)所示,用第 2 节的算法进行彩色化处理。首先是全局色彩传递算法,Toet 等人^[6]将微光、中波红外、长波红外 3 个波段的图像分别置于伪彩色图像的 R 、 G 、 B 3 个通道。这里只有微光和红外图像,因而采用文献^[7]

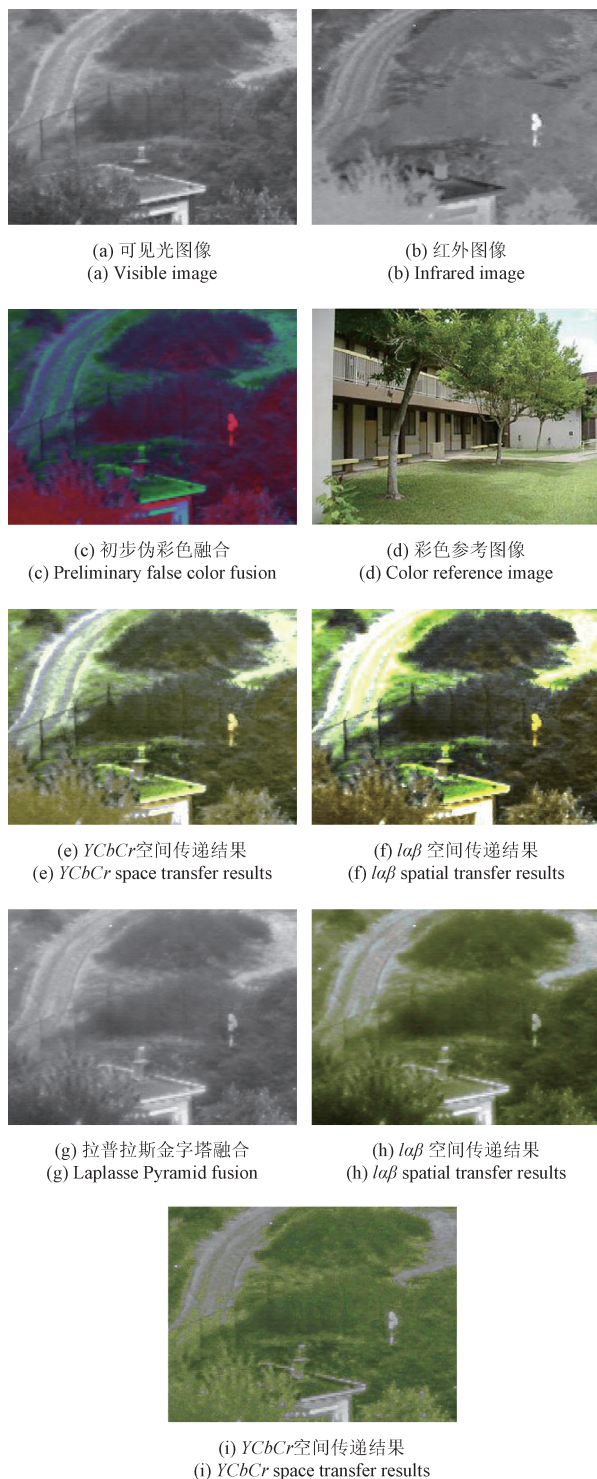


图 1 不同色彩空间的彩色图像融合结果

Fig. 1 Color image fusion results in different color spaces

中提出的方法进行初步的伪彩色化处理,结果如图 1(c)所示。采用主观评价方法,用人眼对不同色彩空间中不同算法的处理结果进行观察,进行融合图像效果评价。显然,图 1(c)并不是一幅呈现自然色彩的图像。利用全局色彩传递算法将一幅在白天拍摄的全彩色照片的色彩

特性赋与初步的伪彩色图像,如图 1(d)所示。这个过程分别在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间进行,得到的结果如图 1(e)、(f)所示,都表现出自然彩色的特性。其中, $YCbCr$ 空间中得到的结果色彩相对自然,道路、草丛、房屋都基本呈现应有的颜色。但是 $l\alpha\beta$ 空间中传递后的色彩明显过于饱和,画面整体上显得很突兀。

进行点对点色彩传递之前,需要将红外与可见光图像融合成一幅图像,本文采用的是 Laplace-pyramid 融合算法,融合图像如图 1(g)所示。利用 welsh 算法,将彩色参考图像(图 1(d))的色彩传递给图 1(g),在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中得到的结果分别如图 1(h)和(i)所示。点对点色彩传递的结果明显不同于全局色彩传递,图像中的色彩均来自彩色参考图像,显得更加真实。然而对比 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中得到的结果,图 1(h)的细节纹理保留的较好,相对更有层次感,而图 1(i)则显得模糊。

为了有效且全面地评价彩色融合图像的质量,采用客观评价的方法,对不同彩色空间的图像处理结果进行评价。从图像整体信息量、图像整体图像梯度、图像灰度与彩色直方图特性、图像色彩饱和度与色彩多样性几方面分别对实验图像进行客观评价,对应评价指标分别是信息熵指标 (information entropy, IE)、图像清晰度指标 (image sharpness metric, ISM)、图像全局对比度指标 (image contrast metric, ICM)、色彩彩色性指标 (color colorfulness metric, CCM)^[16-19]。

图像的信息熵反映了图像所含信息量的多少,一般来说,融合图像的信息熵越大,所含信息越丰富,融合效果越好,公式如下:

$$IE = - \sum_{i=1}^{L-1} P_i \log_2 P_i$$

(9)

式中: L 为图像的灰度级总数, P_i 为灰度值为 i 的像素所占比例。

图像的清晰度与图像细节及边缘有关,图像清晰度指标是根据的梯度信息计算出的,公式如下:

$$ISM = \frac{1}{|W|} \sum \nabla I(x,y|w)$$

(10)

式中:窗口 w 为 3×3 大小的 Sobel 算子, $|W|$ 为所有 Sobel 算子窗口的个数。ISM 的值越大,说明该彩色融合图像的清晰度越好,也就是说,该图像中的细节丰富且清晰。

在彩色图像中,对比度是由灰度对比度和彩色对比度共同决定的,图像全局对比度指标在灰度对比度和彩色对比度的基础上构建,公式如下:

$$ICM = (\omega_1 \times C_g^2 + \omega_2 \times C_c^2)^{\frac{1}{2}}$$

(11)

式中: C_g 为灰度对比度指标, C_c 为彩色对比度指标, ω_1 和 ω_2 分别是 C_g 和 C_c 对 ICM 贡献的权重。在这里,取 ω_1

和 ω_2 为相等的值 0.5。ICM 的取值范围为 0 ~ 1(0 为最差的对比度表现,为最好的对比度表现)。

色彩彩色性描述的是彩色图像中色彩的生动程度,基于色彩饱和度和色彩种类特性的评价指标来评价色彩的彩色性,公式如下:

$$CCM = 0.5 \times CCM_1 + 0.5 \times CCM_2$$

(12)

式中: CCM_1 为色彩色度指标, CCM_2 为色彩多样性指标。

评价结果如表 1 所示。从表 1 中的数据可以看出,采用全局色彩传递算法时, $YCbCr$ 空间中的融合图像评价指标大部分好于 $l\alpha\beta$ 空间中的图像,而采用点对点色彩传递融合算法时, $l\alpha\beta$ 空间中的融合图像效果好于 $YCbCr$ 空间中的图像,与主观评价得到的结果完全一致。

表 1 彩色图像融合客观评价结果

Table 1 Results of objective evaluation of color image fusion

	全局色彩传递		点对点色彩传递	
	$YCbCr$	$l\alpha\beta$	$YCbCr$	$l\alpha\beta$
IE	7.354 3	7.399 4	6.421 1	7.185 5
ISM	49.447 6	42.392 8	26.969 1	30.598 0
ICM	0.401 8	0.283 1	0.323 4	0.341 1
CCM	16.341 3	15.468 2	14.241 8	14.467 8

4 结 论

为了评价图像融合系统中不同融合算法在不同的色彩空间中的成像效果,本文采用全局色彩传递算法和点对点色彩传递算法,分别在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中进行图像融合,之后采用主观评价和客观评价的方法对融合图像结果进行对比分析。通过实验可以得出以下结论:全局色彩传递和点对点色彩传递在 $YCbCr$ 空间和 $l\alpha\beta$ 空间中具有不同的表现,在 $YCbCr$ 空间中,全局色彩传递效果更好,而在 $l\alpha\beta$ 空间中,点对点色彩传递效果更好。在设计图像融合系统时,可以根据系统结构和实际需要合理选择合适的色彩传递空间和彩色图像融合算法,使红外与可见光图像融合系统可以具备最佳的探测性能。

参考文献

[1] 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.

PEI CH, 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.

- [2] 陈学军,杨永明. 一种基于双波段红外视频火灾探测器的研制[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(3): 473-479.
CHEN X J, YANG Y M. Realization of a dual-band fire detector based on infrared video [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(3): 473-479.
- [3] ZHENG Y, ESSOCK E A. A local-coloring method for night-vision colorization utilizing image analysis and fusion[J]. Information Fusion, 2008(9): 186-199.
- [4] 张俊举,常本康,张宝辉,等. 远距离红外与微光/可见光融合成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 20-24.
ZHANG J J, CHANG B K, ZHANG B H, et al. Long-distance image fusion system for infrared and LLL/visible bands [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 20-24.
- [5] 闫光豹,李开宇,杨盛亚. 基于FPGA的红外和CCD图像融合研究及实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(6): 43-47.
YAN G B, LI K Y, YANG SH Y. Infrared and CCD image fusion research and implementation based on GPGA[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(6): 43-47.
- [6] TOET A, WALRAVEN J. New false color mapping for image fusion[J]. Optical Engineering, 1996, 35(3): 650-658
- [7] TOET A. Natural color mapping for multiband nightvision imagery[J]. Information Fusion, 2003, 4(1): 155-166.
- [8] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images [C]. Acm Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 277-280.
- [9] XIANG Y, ZOU B, LI H. Selective color transfer with multi-source images [J]. Pattern Recognition Letters, 2009, 30(7): 682-689.
- [10] 刘勇,邵常勇. 对Welsh灰度图像色彩化算法的改进[J]. 现代电子技术, 2009, 32(24): 141-143.
LIU Y, SHAO CH Y. Improvement of Welsh's grey image colorization arithmetics [J]. Modern Electronic Technology, 2009, 32(24): 141-143.
- [11] YIN S, CAO L, LING Y, et al. One color contrast enhanced infrared and visible image fusion method[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 53(2): 146-150.
- [12] YU X, REN J, CHEN Q, et al. A false color image fusion method based on multi-resolution color transfer in normalization YCbCr space [J]. Optik, 2014, 125(20): 6010-6016.
- [13] 譙涵丹,富容国,王贵圆. 红外与微光融合图像的多尺度色彩传递算法 [J]. 红外技术, 2016, 38(2): 157-162.
- [14] QIAO H, FU R, WANG G. Multi-resolution color transfer algorithm for fusion image of infrared and low-level light[J]. Infrared Technology, 2016, 38(2): 157-162.
- [15] 许辉,袁轶慧,常本康. 可见光与红外融合图像反射与辐射光谱分析. 红外技术, 2011, 33(7): 420-423.
XU H, YUAN Y H, CHANG B K. A study of reflection and Radiation Spectrum of CCD and infrared fusion image[J]. Infrared Technology, 2011, 33(7): 420-423.
- [16] 刘琼,史诺. 基于Lab和YUV颜色空间的农田图像分割方法[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(4): 39-59.
LIU Q, SHI N. Farmland image segmentation based on lab and YUV color spaces [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 34(4): 39-59.
- [17] 李俊峰,方建良,戴文战. 基于色彩感知的无参考图像质量评价[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 339-350.
LI J F, FANG J L, DAI W ZH. No-reference image quality assessment based on color perception [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 339-350.
- [18] YUAN Y H, ZHANG J, CHANG B K, et. al. Objective evaluation of target detectability in night color fusion image [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(1): 011101-1 ~ 011101-4.
- [19] YUAN Y H, ZHANG J, CHANG B K, et al. Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image[J]. Optical Engineering, 2011, 50(3): 033202-1-033202-11.

作者简介



孙斌, 2008年于江苏科技大学获得学士学位, 2015年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京邮电大学讲师, 主要研究方向为信息处理与图像融合。

E-mail: ffgz366@163.com

Sun Bin received B. Sc. from Jiangsu University of Science and Technology in 2008 and Ph. D. from Nanjing University of Science and Technology in 2015, respectively. Now he is lecturer in Nanjing University of Posts and Telecommunications. His main research interests include information processing and image fusion.