

共轴光学系统下的红外与可见光图像融合与彩色化

徐萌兮 钱惟贤 顾国华 任建乐 龚振飞

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094)

摘要 提出一种红外图像与可见光的图像融合方法。硬件光学成像系统采用共轴光路,使用拉普拉斯金字塔变换方法对采集到的红外图像与可见光图像进行融合,并使用融合后图像与红外图像相结合在YUV通道中进行信息融合伪彩色化。实验结果表明,所提出的红外图像与可见光图像的融合方法能够显著增强图像信息,突出图像中的特定目标,且对于各种外界环境条件都能得到较好的融合结果。

关键词 图像处理; YUV颜色空间; 图像融合; 光学系统; 红外图像

中图分类号 TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.091004

Image Fusion and Colorization of Infrared and Visible Images Using a Coaxial Optical System

Xu Mengxi Qian Weixian Gu Guohua Ren Jianle Gong Zhenfei

(School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract We propose an image fusion method based on infrared and visible images. The two cameras in the optical imaging system use the same optical axis. Laplacian pyramid transform is used to fuse the infrared and visible images. Then the fused image is combined with the infrared image to obtain the pseudo-color fusion image in YUV space. Experimental results show that the proposed method based on the fusion of infrared and visible images enhances the image information and highlight the specific target in the image significantly, and can get good results at a variety of environment conditions.

Key words image processing; YUV color space; image fusion; optical system; infrared image

OCIS codes 100.2980; 220.4830; 330.1690

1 引言

信息获取技术以及所获得信息的优劣与信息量是信息技术领域的研究热点之一。图像信息由于其直观、内容丰富以及易于获取的特性,在军用和民用领域都具有相当重要的地位。在军事竞争中,侦查与反侦查技术起着重要的作用,为了有效地发挥本方装备的性能并抑制敌方军事力量,需要对来袭目标进行准确识别与定位^[1-2]。基于图像的目标识别与定位技术在军事中发挥着重要的作用,而目标识别与定位的基本前提是目标信息准确突出、易于发现。通常由于环境条件与刻意伪装等因素,单一图像信息源的信息量较小,无法准确判读识别,这时就需要通过多种图像数据源信息进行综合比较分析,充分发挥各种图像信息的互补性。作为非接触式被动探测技术的一种,红外传感器接收传感器成像范围场景内的目标与背景的红外辐射,将无法用肉眼观测到的红外辐射转化为可观测图像。但是红外图像只有目标的大致轮廓,细节信息很少^[3],因此将红外图像与可见光图像进行信息融合成为增加信息量的重要手段。

收稿日期: 2013-04-27; **收到修改稿日期**: 2013-07-03; **网络出版日期**: 2013-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(61271332)

作者简介: 徐萌兮(1986—),女,硕士研究生,主要从事红外图像处理、红外与可见光图像融合方面的研究。

E-mail: xumengxi_amy@126.com

导师简介: 钱惟贤(1980—),男,副研究员,硕士生导师,主要从事目标探测方面的研究。

E-mail: developer_plus@163.com

近年来,图像融合研究发展迅速,融合方法层出不穷,如基于相位信息的图像融合方法^[4-5]、基于金字塔模型的图像融合方法^[6-7]、基于小波及其改进模型的图像融合方法^[8-10],也有针对图像融合方法的评价标准^[11-13]。同时,为了符合人眼的视觉特性,通过融合技术将多源图像彩色化也是图像融合中的一个研究方向^[14]。然而,大多数工作均侧重于某一方面的研究,没有完整地阐述整个软硬件系统。

基于上述情况以及实际应用需求,一种可行的策略是先将可见光图像与红外图像进行图像融合,然后将融合后图像与融合前图像相结合进行伪彩色化,以更加突出目标信息,为后续的目标识别与定位工作做好准备。按照这一思路,本文设计并搭建了用于图像融合的共轴光学成像系统,同时提出了一种基于多分辨率的红外与可见光图像的融合算法。在此基础上,利用融合后的图像与融合前的图像相结合,在 YUV 通道中进行信息融合与伪彩色化,最终获得的彩色融合图像中目标信息丰富明显,易于后续应用。

2 图像融合的光学系统

通常的图像融合系统包括传感器、图像采集、处理和输出部分。本系统可采用热像仪和可见光、热像仪和微光像增强型电荷耦合器件(ICCD)等不同组合搭建,光学结构可以采用平行光路,也可以采用共轴光路(如图1所示)。现今较多的融合系统采用平行光路原理的光学系统搭建,这种结构的系统搭建方便,体积小,光利用率也比较高,观察远距离目标位置会相差很小,但是对于近距离目标的观察会出现图像错位畸形等问题。本文采用共轴光学系统,利用一个镀膜的半透半反镜,将两个波段的光分离,透射 400~750 nm 的可见光,反射 8~12 μm 的红外光,两个相机同高同光轴,入射光与可见光 CCD 平行,与热像仪成 90°角,半透半反镜与入射光的夹角为 45°。上述角度都需要激光器和直角棱镜等光学仪器协助进行标定。虽然半透半反镜会损耗入射光的能量,但是这种系统使两幅图像匹配更为精准,观察远近目标相差相较于平行光路系统会减小很多。光学配准对于图像融合是一项非常重要的工作,共轴光学系统的配准算法比平行光路系统的更简单快速,缩短了计算时间,提高了系统工作的效率。由于本文重点不在介绍配准算法,故不进行进一步的介绍。图2为共轴光路的融合系统装置。

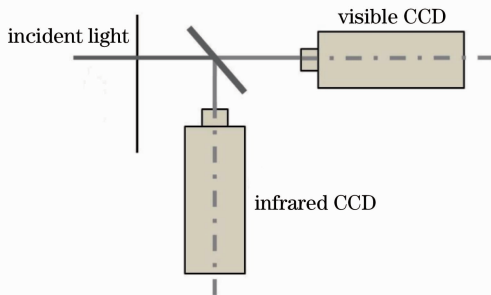


图1 共轴光路系统

Fig. 1 Coaxial optical system



图2 共轴光路的融合系统装置

Fig. 2 Fusion system with coaxial optical configuration

3 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法

图像的多尺度分解是图像处理中的一种重要方法^[15],它能够将原始图像分解为多个尺度,图像的细节信息量随尺度变化而变化,从而能够在多种尺度上对原始图像进行处理、提取特征等操作。

图像的拉普拉斯金字塔的构成是在高斯金字塔的基础上演变而来的。要对图像进行拉普拉斯金字塔分解,首先要对图像进行高斯金字塔分解。设原图像为 G_0 (G_0 为高斯金字塔的底层),对 G_0 进行高斯低通滤波和隔行隔列的下采样,得到高斯金字塔的第一层 G_1 ;再对 G_1 低通滤波和下采样,得到高斯金字塔的第二层 G_2 ;重复以上过程,构成高斯金字塔。高斯金字塔的构建过程为:假设高斯金字塔的第 l 层图像为 G_l :

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{l-1}(2i+m, 2j+n) (1 \leq l \leq N, 0 \leq i < R_l, 0 \leq j < C_l), \quad (1)$$

式中 N 为高斯金字塔顶层的层数; R_l 和 C_l 分别为高斯金字塔第 l 层的行数和列数; $w(m, n)$ 是一个低通滤波器。由 G_0, G_1, \dots, G_N 就构成了高斯金字塔,其中 G_0 为金字塔的底层(与原图像相同), G_N 为金字塔的顶层。

可见高斯金字塔的当前层图像是对其前一层图像先进行高斯低通滤波,然后做隔行和隔列的降 2 采样而生成的。当前层图像的大小依次为前一层图像大小的 1/4。

利用内插方法,将 G_l 图像放大得到 G_l^* ,使 G_l^* 的尺寸与 G_{l-1} 的尺寸相同,表示为

$$G_l^*(i,j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m,n) G_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \quad (0 < l \leq N, 0 \leq i < R_l, 0 \leq j < C_l), \quad (2)$$

式中

$$G_l^*\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) = \begin{cases} G_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right), & \text{when } \frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2} \text{ are integer} \\ 0, & \text{other wise} \end{cases}$$

令

$$\begin{cases} L_l = G_l - G_{l+1}^*, & 0 \leq l < N \\ L_N = G_N, & l = N \end{cases}, \quad (3)$$

式中 N 为拉普拉斯金字塔顶层的层号; L_l 是拉普拉斯金字塔分解的第 l 层图像。由 $L_0, L_1, \dots, L_l, \dots, L_N$ 构成的金字塔即为拉普拉斯金字塔。它的每一层图像是高斯金字塔本层图像与其高一层图像经内插放大后图像的差,此过程相当于带通滤波,因此拉普拉斯金字塔又称为带通金字塔分解。

由(3)式可得

$$G_0 = L_0 + \{L_1 + [L_2 + \dots + (L_N)^*]^*\}^*. \quad (4)$$

(4)式说明,从拉普拉斯金字塔的顶层开始逐层由上至下进行递推,可以恢复其对应的高斯金字塔,并最终可得到原图像 G_0 。

使用拉普拉斯金字塔方式进行图像融合处理,需要生成待融合图像各自的拉普拉斯金字塔。拉普拉斯金字塔的内容代表了每一级图像的边缘细节,因此通过比较两幅图像对应尺度上的拉普拉斯金字塔,就能够将每幅图像中较多的图像细节信息融合到最终的融合图像中,使得融合图像的信息量尽可能丰富,达到图像融合的目的。

拉普拉斯金字塔图像融合方法为对比两幅待融合图像的对应尺度上的拉普拉斯金字塔像素的灰度值,取灰度值大的像素生成融合后的拉普拉斯金字塔。设融合后的第 l 级拉普拉斯金字塔为 L_{IF} ,待融合两幅图像 A,B 的第 l 级拉普拉斯金字塔分别是 L_{IA}, L_{IB} ,则融合规则是

$$L_{IF}(i,j) = \begin{cases} L_{IA}(i,j), & |L_{IA}(i,j) > L_{IB}(i,j)| \\ L_{IB}(i,j), & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (5)$$

4 基于 YUV 空间的色彩传递算法

在图像处理中,颜色的运用主要受两个因素推动:1)颜色是一个强有力的描绘因素,它常常可简化目标物的区分及从场景中抽取目标;2)人眼可以辨别几千种颜色色调和亮度,但相比之下只能辨别几十种灰度层次。因此,根据特定的准则对灰度值赋以彩色的图像处理,即图像的伪彩色化显得尤为重要。

本文使用基于 YUV 空间的色彩传递^[14],YUV 空间的色彩传递避免了在实时处理系统中进行颜色空间的变换,能够得到较理想的传递效果。现有方法通常是基于 YUV 颜色空间直接进行多幅图像的线性融合和色彩传递,这种算法可获得较自然的色彩效果,算法简单、计算量小,可实现实时处理,将亮度与色彩分离,易于实现颜色传输。同时 RGB 与 YUV 空间之间无需其他空间的过渡转换,速度更快。本文提出的彩色融合方法,首先基于拉普拉斯金字塔图像融合方法获得融合图像,之后采用 YUV 空间的线性组合结构,将得到的融合图像与红外图像再次进行线性组合并映射到 YUV 颜色空间,其结构框图如图 3 所示。

采用线性组合法在 YUV 空间将拉普拉斯金字塔变换的融合图像和红外图像融合为彩色图像,作为色彩传递的源图像 Y 为亮度信号, U, V 分别为蓝色和红色色差信号,其中热目标呈红色,冷目标呈蓝色,符合人眼对冷暖色的心理感觉:

$$\begin{cases} Y = G_{IF} \\ U = m_1 G_{IF} - m_2 G_{IR}, \\ V = m_3 G_{IR} - m_4 G_{IF} \end{cases} \quad (6)$$

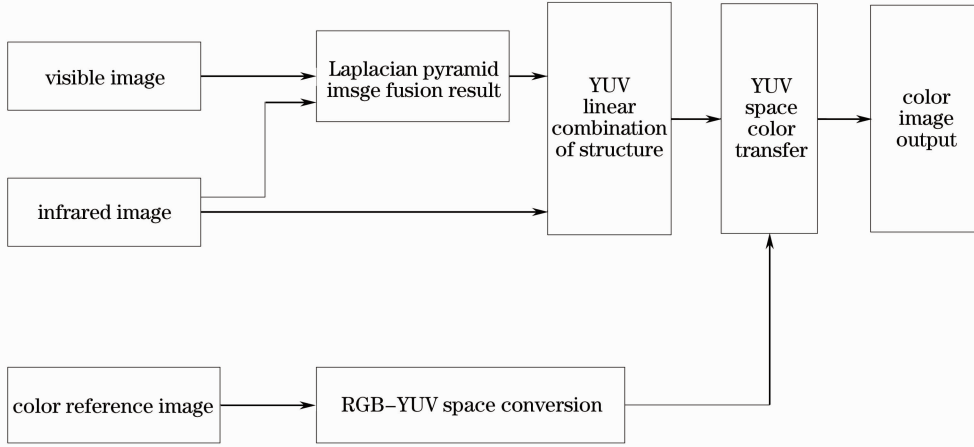


图3 图像融合与彩色化流程图

Fig. 3 Flow diagram of image fusion and colorization

式中 G_{IF} 表示拉普拉斯金字塔变换的融合图像, G_{IR} 表示红外图像, m_1, m_2, m_3 和 m_4 为正有理数。 m_1, m_2, m_3 和 m_4 的大小决定了源图像的均值和方差。源图像 Y, U, V 分量的均值为

$$\begin{cases} \mu_Y = \mu_{IF} \\ \mu_U = m_1 \mu_{IF} - m_2 \mu_{IR} \\ \mu_V = m_3 \mu_{IR} - m_4 \mu_{IF} \end{cases} \quad (7)$$

方差

$$\begin{cases} \sigma_Y = \sigma_{IF} \\ \sigma_U^2 = m_1^2 \sigma_{IF}^2 + m_2^2 \sigma_{IR}^2 - \frac{2m_1 m_2}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ [G_{IF}(i, j) - \mu_{IF}] [G_{IR}(i, j) - \mu_{IR}] \} \\ \sigma_V^2 = m_3^2 \sigma_{IR}^2 + m_4^2 \sigma_{IF}^2 - \frac{2m_3 m_4}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \{ [G_{IF}(i, j) - \mu_{IF}] [G_{IR}(i, j) - \mu_{IR}] \} \end{cases} \quad (8)$$

式中 M 表示图像的宽, N 表示图像的高。

根据其参考图像的标准方差之比进行缩放, 并加上参考图像的均值:

$$\begin{cases} \bar{Y}(i, j) = \frac{\sigma_{R,Y} [G_{IF}(i, j) - \mu_{IF}]}{\sigma_Y} + \mu_{R,Y} \\ \bar{U}(i, j) = \frac{\sigma_{R,U} [G_{IF}(i, j) - \mu_{IF}]}{\sigma_U} + \mu_{R,U} \\ \bar{V}(i, j) = \frac{\sigma_{R,V} [G_{IF}(i, j) - \mu_{IF}]}{\sigma_V} + \mu_{R,V} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $\mu_{R,Y}, \mu_{R,U}, \mu_{R,V}$ 和 $\sigma_{R,Y}, \sigma_{R,U}, \sigma_{R,V}$ 为白天光照下彩色参考图像 Y, U, V 分量的均值和方差。

(9)式即为色彩传递的结果, 变换后的图像在 YUV 颜色空间就拥有了和参考图像一样的均值和方差。最后, 通过逆变换将其转换到 RGB 空间, 就得到了色彩外观上类似参考图像的彩色融合图像。选择适当的彩色参考图像, 就可将彩色夜视图像还原到类似白天的逼真场景。

5 实验结果与分析

本文的所有算法均使用 VC2008 实现。实验结果如图 4~7 所示, 实验环境为夜晚景象。为了证明本文方法的有效性, 在客观评价指标方面, 使用图像熵、平均梯度、空间频率三个评价指标来评价待融合可见光图像、待融合红外图像以及融合后的伪彩色化图像所包含的信息量以及图像质量。

图像熵的定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{k-1} p(i) \lg_2 p(i), \quad (10)$$

式中 $p(i)$ 为灰度值 i 的分布概率, k 为图像灰度级的数量, 对于通常所使用的 8 位图像 $k = 2^8 = 256$ 。图像的熵反映了图像信息量的多少, 图像熵越大, 则图像中所包含的信息量越多。

图像平均梯度的定义为

$$G = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=i}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2}, \quad (11)$$

式中图像 I 的大小为 $M \times N$, ΔI_x 和 ΔI_y 为图像的一阶差分。图像平均梯度反应了图像的质量, 图像平均梯度越大, 则图像质量越高。

图像空间频率的定义为

$$F_s = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N \Delta I_x^2 + \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N \Delta I_y^2}. \quad (12)$$

图像的空间频率反应了图像的活跃程度, 图像的空间频率越大, 图像越清晰。

图 4 为可见光图像, 图 5 为红外图像, 图 6 为红外与可见光图像融合后的灰度融合图像。图 7 为不同参考图像以及使用它们所获得的伪彩色融合图像。表 1 为融合前可见光图像、红外图像与融合后伪彩色图像的客观评价指标结果。



图 4 可见光图像
Fig. 4 Visible image



图 5 红外图像
Fig. 5 Infrared image



图 6 融合图像
Fig. 6 Fusion image

表 1 图像客观评价指标实验结果

Table 1 Image evaluation indices of the experiment results

Image	Entropy	Average gradient	Spatial frequency
Visible image	5.05	6.52	2.98
Infrared image	3.76	3.81	1.77
Ppseudo-color fusion image Fig. 7(d)	5.24	7.28	3.10

实验结果显示, 融合后灰度的图像结合了可见光图像与红外图像中的信息, 能够比较全面地反映场景中的各种内容。同时可以看到, 利用参考图像所获得的伪彩色图像目标偏红色, 背景偏冷色, 符合人眼视觉特性。并且, 伪彩色图像中的细节信息保持良好。从图 7 的三幅参考图像所获得的伪彩色图像也能看到, 图 7 (e)(f) 中背景的树木与目标人物颜色较为接近, 而图 7(d) 中则区分较好。因此在参考图像的选择上, 对比度需要适中, 过高对比度的参考图像会使得所获得的伪彩色图像中的目标不够突出。图像客观评价结果也表

明,相比于融合前图像,融合后的伪彩色图像在图像熵、平均梯度、空间频率上均有所提高,图像的信息量与质量均有提高,对于后续的目标识别环节准确率的提高也有较大帮助。

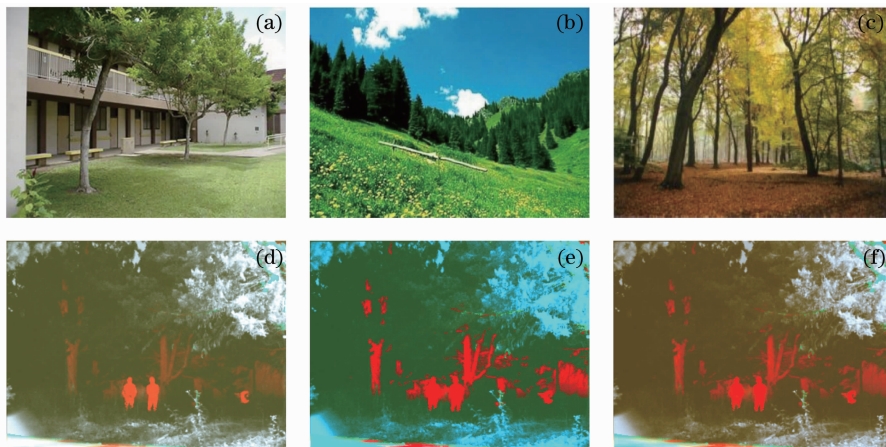


图7 不同参考图像与其对应的伪彩色融合图像。(a) 参考图像 1; (b) 参考图像 2;

(c) 参考图像 3; (d) (a)对应的伪彩色图像; (e) (b)对应的伪彩色图像; (f) (c)对应的伪彩色图像

Fig.7 Different reference image and their color fusion images. (a) Reference image 1; (b) Reference image 2;

(c) Reference image 3; (d) pseudo-color image of (a); (e) pseudo-color image of (b); (f) pseudo-color image of (c)

6 结 论

提出了一套基于红外图像与可见光图像融合的软硬件系统。实验结果表明,所提出的共轴光学系统下的红外与可见光图像融合与彩色化的整套流程切实可行,主观与客观图像评价指标表明,融合后的图像在图像质量与图像信息量上均有所提高,伪彩色化后的融合图像更符合人眼视觉特性,并且图像细节信息保留较好,目标突出。相比于单一源图像,基于红外与可见光图像融合与伪彩色化后的图像具有更广泛的适用性,能够适应各种天气环境情况,在后续目标检测、定位与识别中获得较好结果。

参 考 文 献

- 1 Cheng Gong, Guo Lei, Han Junwei, *et al.*. Infrared dim small target detection based on morphological band-pass filtering and scale space theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1015001.
程 焱, 郭 雷, 韩军伟, 等. 基于形态学带通滤波和尺度空间理论的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1015001.
- 2 Wu Yiquan, Ji Shouxin, Zhan Bichao. Infrared dim target detection based on nonsubsampling contourlet transform and independent component analysis[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0510002.
吴一全, 纪守新, 占必超. 基于无下采样 Contourlet 变换和独立分量分析的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0510002.
- 3 Zhou Yunchuan, He Yongqiang, Li Jitian. Research on dual-band target tracking algorithm based on image fusion[J]. *Laser&Infrared*, 2011, 41(12): 1387-1391.
周云川, 何永强, 李计添. 基于图像融合的双波段目标跟踪算法研究[J]. *激光与红外*, 2011, 41(12): 1387-1391.
- 4 Zhang Lei, Zhang Yu, Wang Xiaoxia. Visible and infrared images fusion algorithm based on phase modulation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(11): 111005.
张 雷, 张 宇, 王肖霞. 基于相位调制的可见光与红外图像融合算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(11): 111005.
- 5 Jing Zhongliang, Xiao Gang, Li Zhenhua. *Image Fusion: Theory and Application*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
敬忠良, 肖 刚, 李振华. *图像融合: 理论与应用*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- 6 Zhu Kang, He Xinguang. Selective remote sensing image fusion method based on the local feature of contourlet coefficients [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 021001.
朱 康, 贺新光. 基于 Contourlet 系数局部特征的选择性遥感图像融合算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(2): 021001.
- 7 Miao Qiguang, Wang Baoshu. Multi-sensor image fusion based on improved Laplacian pyramid transform[J]. *Acta Optica*

- Sinica, 2007, 27(9): 1605–1610.
- 苗启广, 王宝树. 基于改进的拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1605–1610.
- 8 Li Shutao, Yang Bin, Hu Jianwen. Performance comparison of different multi-resolution transforms for image fusion[J]. Information Fusion, 2011, 12(2): 74–84.
- 9 Zhao Peng, Wang Nihong, Pu Zhaobang. Image fusion based on morphological wavelet decomposition pyramid[J]. J Optoelectronics • Laser, 2008, 19(6): 814–817.
- 赵 鹏, 王霓虹, 浦昭邦. 基于形态小波分解金字塔的图像融合[J]. 光电子·激光, 2008, 19(6): 814–817.
- 10 Liu Guixi, Liu Chunhu, Ling Wenjie. A novel algorithm for image fusion based on wavelet multi-resolution decomposition [J]. J Optoelectronics • Laser, 2004, 15(3): 344–347.
- 刘贵喜, 刘纯虎, 凌文杰. 一种基于小波多分辨率分解的图像融合新算法[J]. 光电子·激光, 2004, 15(3): 344–347.
- 11 Li Shanshan, Wang Qi, Feng Xingle. A novel quality metric based on luminance and contrast Model for image fusion[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(6): 061001.
- 李珊珊, 王 琦, 冯兴乐. 基于亮度和对比度模型的图像融合质量评估标准[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(6): 061001.
- 12 Vladimir Petrovc. Subjective tests for image fusion evaluation and objective metric validation[J]. Information Fusion, 2007, 8(2): 208–216.
- 13 Alexander Toet, Eric M Franken. Perceptual evaluation of different image fusion schemes[J]. Displays, 2003, 24(1): 25–37.
- 14 Qian Xiaoyan, Han Lei, Wang Bangfeng. Color fusion method for night vision based on YUV space[J]. J Computer Applications, 2010, 30(2): 3222–3224, 3228.
- 钱小燕, 韩 磊, 王帮峰. 基于 YUV 空间的彩色夜视融合方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 3222–3224, 3228.
- 15 Li Xiaojuan, Zhao Wei. Image fusion algorithm based on multiscale edges[J]. J Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(2): 229–232.
- 李小娟, 赵 巍. 一种基于多尺度边缘的图像融合算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(2): 229–232.