

一种微光与红外图像彩色融合方法

杨少魁^{1,2}, 刘文¹

(1.中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:微光夜视仪和红外热像仪这两种图像传感器互补的成像特性可以使它们在几乎任何条件(昼/夜/烟/雾)下观察场景。针对微光与红外图像,提出了一种彩色融合算法,可以使融合图像有相对自然真实的颜色感觉。首先用中心-环绕拮抗彩色融合算法产生彩色源图像,然后在 YCbCr 颜色空间中让源图像的直方图与参考图像的相匹配。为了增强融合图像的对比度,可以先用灰度融合图像代替亮度分量,然后进行直方图匹配。仿真结果表明文中提出的方法可以使融合图像接近自然真实的颜色感觉,易于分辨识别目标,从而提高观察者或机器视觉系统的工作效率,增强对总体形势的意识能力。

关键词:拮抗彩色融合; 色彩传递; 直方图匹配; 微光; 红外

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)05-1654-06

Color fusion method for low-level light and infrared images

Yang Shaokui^{1,2}, Liu Wen¹

(1.Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The complementary nature of low-level light image intensifiers and thermal infrared cameras makes them possible to observe the scene under almost any conditions (day/night/smoke/fog). A color fusion method of low-level-light and infrared images was introduced to render multiband imagery in comparative realistic color appearance. Firstly, the center-surround opponent-color fusion scheme was used to yield color imagery. Next, the histograms of the image were matched to those of the reference image in YCbCr color space. This transferred the natural color characteristics of daylight imagery into multispectral night vision images. In order to enhance the contrast of the fused imagery, a grayscale fused image was used to replace the luminance component of the multiband imagery and then implement the histogram matching. The experiment results demonstrate the proposed method is effective in displaying the fused imagery in natural colors and popping out targets. This fused data can help observers or machine vision systems to process this type of images efficiently, therefore reducing detection and recognition times and improving situational awareness.

Key words: opponent color fusion; color transfer; histogram matching; low-level light; infrared

收稿日期: 2013-09-11; 修订日期: 2013-10-23

作者简介: 杨少魁(1988-), 男, 硕士生, 主要从事微光与红外图像融合方面的研究。Email: yangshaokui0109@163.com.

导师简介: 刘文(1978-), 男, 研究员, 博士, 主要从事图像处理方面的研究。Email: wliu@opt.ac.cn

0 引言

在夜视领域或其他恶劣条件下的图像采集和处理等应用中,微光像增强型相机和红外相机是重要的信息来源。微光图像的场景细节丰富,但容易受到天气等外界环境的干扰;而红外图像则呈现较好的热对比度,受天气和照明的影响小,具有穿透烟、雾、雨、雪且作用距离远的优势^[1-2]。微光的场景细节正好与红外热目标进行互补,将它们进行融合成为近年来研究热点。这样可以减轻图像使用者的工作负担和疲劳,改善对场景的理解和对目标识别的能力。

在图像融合研究的初期,许多学者提出了不同的灰度融合算法,然而仅灰度信息并不能精确有效地支持场景辨识和目标探测的能力。我们知道,人眼仅能分辨几十个不同的灰度级,但却可以分辨出上千种不同的颜色。基于人眼的这一特性,研究者开始发展彩色融合技术。荷兰人力因素研究所的Toet等人提出了针对红外与可见光图像的伪彩色融合算法^[3],这种算法增强了图像细节的清晰度并且保留了不同传感器的特有信息。另外,此算法只涉及简单的加减运算,可以在简单的硬件中实时完成。麻省理工学院林肯实验室的Waxman等提出了一种基于生物彩色视觉模型的融合方法,这种拮抗彩色融合算法一般有相对符合人眼视觉的色彩感觉。

大多数的伪彩色融合图像的颜色特性在直观性与真实性上与自然景观不太符合,在这种情况下,观察者需要依靠彩色对比来分割图像并发现其中的物体,这样效果可能会比利用单一波段的图像来识别更糟糕。后来学者们研究了几种不同的方法使彩色融合图像具有真实自然的颜色感觉。Toet等人提出了基于色彩传递的融合算法^[4],该算法引用了参考图像的统计特征参数,带来了彩色融合领域革命性的进步。然而色彩传递算法是基于图像全局的统计特征,并不能得到颜色恒常性。为了消除这些缺点,后来他们又提出了基于彩色查找表的着色算法^[5-6]。在这个算法中,最重要的是确定一种颜色映射,将其作为彩色查找表来进行颜色变换。这种颜色传递方法简单快捷,也实现了颜色恒常。

基于前面提到的色彩传递融合算法,文中提出

了在源图像和参考图像之间进行直方图匹配的色彩传递。这可以将白天自然光下彩色图像的色彩特征参数传递于夜视融合图像中。在有些情况下,将不同波段的灰度图像融合为彩色图像时会减小目标物在场景中的对比度,这将对于在需要目标识别的应用中有致命的影响。现在有许多优秀的灰度融合算法可以很好地保持目标在融合图像中的对比度^[7],因此可以将亮度分量用灰度融合图像进行替换,则目标和一些细节会比较清晰而且场景的自然真实感觉不变。

1 中心-环绕拮抗彩色融合

在基于RGB颜色空间通道映射的彩色融合算法中,麻省理工学院林肯实验室提出的中心-环绕拮抗彩色融合算法是比较优秀的一种。它的计算过程是模仿生物彩色视觉模型。在灵长类动物的视觉系统中,经过视网膜锥状细胞相互作用,产生了ON和OFF域,它们合在一起称为感受野(Receptive Fields)。ON中心形感受野增强中心、抑制环绕,OFF中心形则抑制中心、增强环绕。这些神经元使得对于一种模态图像的响应可以增强或抑制对于其他模态图像的响应。这种相互作用就是拮抗处理过程^[8]。文中采用Grossberg的前馈中心-环绕分离网络数学模型,它可以增强每个传感器或某波段图像的空间对比度;通过局部增益控制来自适应的压缩或归一化动态范围;组合单一波段或传感器的图像中产生颜色增强的拮抗图像。在该模型中,中心-环绕感受野基于拮抗分离网络。图像中每个像素的动态值和平衡方程由以下两公式给出:

$$\frac{dE_{ij}}{dt} = -AE_{ij} + (1 - E_{ij})[CI^c]_{ij} - (1 + E_{ij})[G_s * I^s]_{ij} \quad (1)$$

$$E_{ij} = \frac{[CI^c - G_s * I^s]_{ij}}{A + [CI^c + G_s * I^s]_{ij}} \quad (2)$$

式中: E 是经过拮抗处理后的增强图像; I^c 是引起感受野中心兴奋的输入图像; I^s 是抑制感受野高斯环的输入图像。

公式(1)的分离系数确定了增强图像的动态范围,它是有界的, $-1 < E < 1$ 。而不论输入图像的动态范围是多少,当输入中心与环绕的是同一幅图像时,公式(2)的分子就等同于熟悉的差分高斯滤波,可以

增强空间高频信息。公式(2)的分母用来根据局部均值和邻近环绕来自适应地归一化增强图像的对比度,这对于处理有微光 CCD 和红外相机采集到的宽动态范围的图像特别有效。对公式(1)做修改,可以产生中心抑制环绕增强的中心-环绕分离神经网络;它可以产生增强的 OFF 图像(比如说反向增强的红外图像)。让单波段的图像经过公式(2)的增强和归一化,并重复运用这一拮抗处理过程,即将其中一个波段的图像送入中心,另一波段的图像送入环绕。

基于中心-环绕拮抗处理融合微光(可见光)与红外图像的算法结构如图 1 所示。用同心圆表示公式(2)的运算。这个算法过程由增强、融合、彩色映射三个步骤来完成。图像首先送入同心圆得到增强,然后将增强后的图像作为兴奋或抑制图像输入到中心或环绕。然后根据公式(2)将它们组合到一起。依据标记灵长类动物拮抗彩色处理神经细胞的惯例,文中将这些图像标记为 +Vis、+Vis-IR、+Vis+IR。最后将它们分别映射到绿、蓝、红三个颜色通道。这样映射是为了与人眼的色温感觉相一致,即红色为暖色调,蓝色为冷色调。这样就在结果图像中既运用亮度对比体现了可见光波段的信息,又运用色彩对比来体现了温度信息,很好地将两种图像的互补信息融合在一幅图像中。

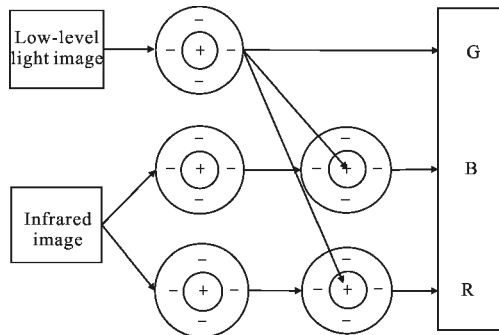


图 1 中心-环绕拮抗彩色融合计算结构

Fig.1 Computational architecture of the center-surround opponent color fusion

2 基于直方图匹配的色彩传递

由中心-环绕拮抗彩色融合得到的图像比其他伪彩色融合方法得到的图像效果较好,但总体感觉

与真实彩色图像仍有差距。2003 年 Toet 提出了一种色彩传递算法,将参考图像的一阶统计矩传递于伪彩色融合图像中,使其感觉与白天自然光图像感觉相似。这种技术最初是由 Reinhard 提出来的^[9],用来增强合成图像的颜色表现。该算法过程如下,首先合成一幅伪彩色融合图像并选取一幅白天自然光下的真实彩色图像,文中分别称它们为源图像和参考图像;然后将二者转换到视觉感知独立的颜色空间中,并使源图像的均值和标准差与参考图像的相同;最后将处理后的图像转换回 RGB 颜色空间中用来显示。在这里对参考图像的要求是其场景内容与源图像内容相似,而不必完全相同。

受到上述算法思想的启发,文中提出了一种基于直方图匹配的色彩传递算法。一幅数字图像,设它的灰度范围是 $[0, L-1]$,那么离散函数就是它的直方图:

$$h(r_k) = n_k, k=0, 1, \dots, L-1 \quad (3)$$

式中: r_k 代表第 k 级灰度; n_k 是灰度为 r_k 的像素个数。有时也将直方图归一化,即将函数值除以图像的像素总数,用 n 来表示。因此归一化的直方图就是 $p(r_k) = n_k/n$, 严格地说, $p(r_k)$ 是像素灰度级为 r_k 出现的概率。归一化直方图所有函数值之和等于 1。

直方图是许多空域处理技术的基础,对其进行操作是处理图像的有效手段。将源图像的直方图修改为与参考图像相同,那么处理后的图像将呈现与参考图像相似的颜色感觉。注意到源图像与参考图像都是在 RGB 颜色空间中表示的,这三个通道不是独立的,因此需要将两幅图像转换到相关性很小的颜色空间中。这里并没有选取 $l\alpha\beta$ 颜色空间,因为由 RGB 到 $l\alpha\beta$ 之间的转换首先需要转换到 LMS 空间,然后做对数,最终变换到 $l\alpha\beta$ 空间,运算非常复杂。文中选取了转换简便的 YCbCr 颜色空间,然后分别在 Y、Cb、Cr 三个通道中对源图像进行直方图的匹配,最后将处理后的图像转换回 RGB 颜色空间中以便显示。对于直方图匹配,可以按以下步骤进行:

(1) 对源图像和参考图像作直方图均衡化,并分别计算它们的累积直方图 p_i, p_j 。

$$p_i = \sum_{k=0}^i p_r(k), i=0, 1, \dots, L-1 \quad (4)$$

$$p_j = \sum_{l=0}^j p_z(l), j=0,1,\dots,L-1 \quad (5)$$

式中: $p_i(k)$ 和 $p_z(l)$ 分别是源图像和参考图像的直方图; i 和 j 分别代表源图像和灰度图像的灰度级, 它们有相同的取值范围。

(2) 依据 p_i 与 p_j 最邻近的原则, 确定灰度 i 到 j 的映射。

(3) 依据(2)中确定的映射将源图像中各灰度级变换为对应的灰度级。

在算法执行的过程中, 仅用到了参考图像的直方图信息, 这意味着在将白天自然光图像的色彩传递到源图像的过程中, 仅需要 YCbCr 颜色空间中的三个直方图分布函数。因此没必要存储整个参考图像的数据, 这一般会占用很大的存储量。这三个直方图可以事先计算出来, 存储于硬件设备当中; 或者将几种典型场景的图像的直方图函数存储于系统当中, 建立一个查找表, 用户可以根据观察场景的内容来决定这一色彩传递的参数。

在有些条件下, 一些目标和细节在不同波段中可能会呈现相反的灰度^[10], 这样在将微光(可见光)和红外图像融合为彩色图像时, 会产生对比度减弱的严重问题。比如说在红外图像中比较清晰的目标可能会在融合图像中不那么明显。为了消除这一缺点, 文中将源图像的亮度分量(Y分量)用灰度融合图像代替。现在有非常多的将可见光与红外图像融合为灰度图像的算法能很好地保持目标和某些细节的对比度, 像主分量分析法、小波融合法、人工神经网络等。文中选取合适的算法来产生灰度融合图像, 将它替换 Y 分量后, 连同 Cb、Cr 分量作直方图匹配, 然后做 YCbCr 到 RGB 颜色空间变换, 得到最终的彩色融合图像。

3 实验结果与讨论

在目前微光与红外图像的彩色融合研究中, 已经使用了相当多的融合方法。用不同的融合算法对输入图像进行处理, 得到不同的结果图像。如何评价融合算法的效果和图像的质量具有重要意义。目前的融合效果和图像质量评价中, 主要有主观评价

法和客观评价法; 而目前经常采用的客观评价方法有计算结果图像的熵、梯度等; 与标准参考图像间的均方根误差; 还有与源图像之间的联合熵、偏差和交互信息量等参数。主观评价法是由人眼直接对图像质量进行评估, 它具有简单直观的优点。

文中研究的是微光与红外图像的彩色融合问题, 比灰度融合图像包含更多的信息, 而且利用了人眼能分辨更多不同彩色的优势。由于所提出算法的不同阶段得到的融合图像差异比较明显, 通过肉眼即可分辨出优劣。另外, 在微光与红外图像彩色融合应用中, 得到的结果图像是给观察者使用的。因此文中采用主观评价法, 可以准确有效、方便快捷地评估出融合算法和图像质量的优劣。

文中选取了两组经过配准的微光与红外图像。这些图片由处于夜视图像融合领域领先地位的荷兰人力因素研究所的 Toet 提供, 其场景内容符合军事战场等应用场合, 相当于夜视图像融合领域的标准测试图像。图 2(a) 是微光图像, 图 2(b) 是红外图像。两者拍摄的都是夜间, 一个人从树中间走过的瞬间。在红外图像中, 只能分辨出一个人, 很难看出像树、地面之类的背景。然而在微光图像中可以看出背景信息, 作为目标物的人却很难分辨出来的。图 2(c) 是采用麻省理工学院林肯实验室(MIT) Waxman 等提出的中心-环绕拮抗彩色融合算法的结果, 作为目标的人很明显, 因为他被映射为红色, 与其他颜色迥异。但背景颜色感觉不自然, 树木被映射为暗红色, 地面呈现青色, 还有不同程度的蓝色分量, 这影响了对场景的认知和理解。图 2(d) 是选取的参考图像, 场景内容是草地和树, 与将要融合的场景相似, 符合色彩传递技术的要求。图 2(e) 是采用荷兰人力因素研究所(TNO Human Factors) Toet 等提出的色彩传递融合算法的结果图像。它的色彩感觉相对自然, 树被映射为绿色, 地面呈现灰绿色, 与参考图像色调感觉一致, 但是人不如红外图像中的明显, 对比度有所下降。图 2(f) 是采用文中提出的方法, 即先将灰度融合图像(用主分量分析法得到)替换 Y 分量, 再进行直方图匹配色彩传递的结果。图像中人远比图 2(e) 中明显, 而且颜色感觉没有变化, 饱和度和分辨率都得到了提高, 更易于识别出目标, 增强了观察

者的工作效率。

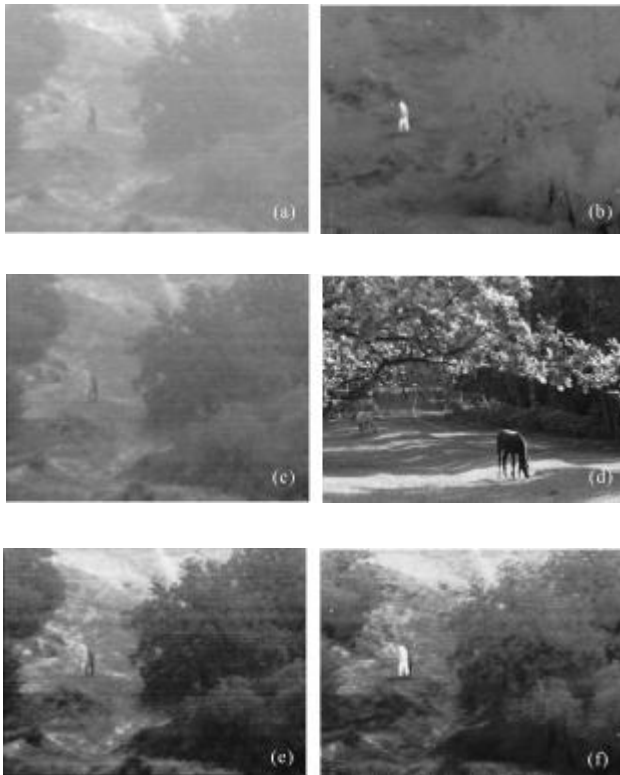


图 2 人从树中间走过的夜晚场景图像

Fig.2 Images of a nighttime scene representing a person crossing the interval between trees

图 3 显示了另外两幅在夜晚拍摄的图像及其融合结果。图(a)是微光图像;图(b)是红外图像。场景中有房屋、道路、植物,还有一个人在围栏旁边行走。红外图像中人非常明显,但其他细节难以辨认。在对应的微光增强图像中,看不出有目标物人的存在,但像房屋、道路、树木等细节比较清楚。图(c)是采用 Waxman 提出的中心-环绕拮抗算法得到的彩色融合图像。场景中细节,包括人都清晰可见,但颜色不符合真实自然感觉,树木为暗红色,屋顶、草地和道路呈现不同程度的蓝色。图(d)是按照算法要求选取的参考图像,其中包含房屋、树木和草地等,与要融合的场景相似。图(e)是采用 Toet 的色彩传递算法的融合结果。它具有参考图像的颜色特征,其颜色感觉比源图像真实自然,树木、草地等为暗绿色,房屋和道路为灰色,使得对场景的理解更加直观。但是出现了过饱和现象,隐藏了输入图像的一些显著的细节信息,例如道路的纹理和围栏的立柱等,而且目标物对比度有所下降。图(f)是采用文中算法,即将 Y

分量用灰度融合图像(由小波融合法得到)代替并进行直方图匹配色彩传递的结果。从融合图像中可以看出房屋、围栏和道路及轮廓的分辨率都有提高。消除了过饱和现象。作为目标物的人也更为醒目突出。这两组仿真结果表明,文中提出的方法克服了 Waxman 的中心-环绕拮抗彩色融合算法的缺陷,可以使融合图像有相对真实自然的颜色,也比 Toet 的色彩传递算法效果更佳,保留了丰富的背景细节,目标物也更易于辨认识别。

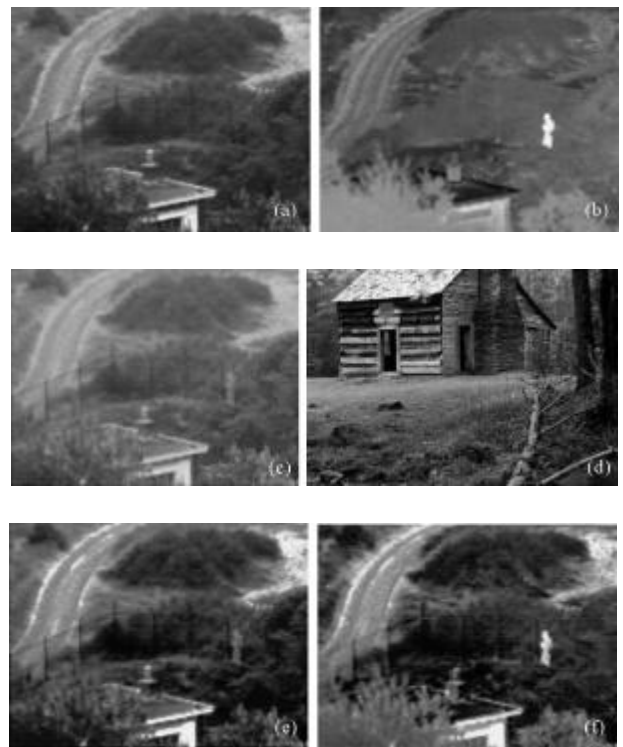


图 3 夜晚场景图像,包含房屋、道路、植物、及在围栏旁边行走的人

Fig.3 Images of a nighttime scene representing a building, a path, heather, and a person walking along the fence

4 结论

文中提出了一种融合微光(可见光)和红外图像的色彩融合算法。首先利用中心-环绕拮抗彩色融合算法得到源图像,这种算法是模拟人眼视网膜的神经计算模型。然后利用直方图匹配的色彩传递算法,使得融合图像呈现相对自然真实的颜色感觉,此过程需要与文中所要融合场景相似的真实彩色图像,或者它在 YCbCr 颜色空间中三个通道的直方图函数。更进一步,将灰度融合图像替换 Y 分量,再进行

色彩传递,可以增强融合图像的对比度。仿真实验表明这种融合算法取得了较为自然真实的彩色效果,提升了图像的深度感知,有利于观察者或机器视觉系统对场景的理解和认识,提取目标等重点信息,从而更好地判断所处的总体形势。

参考文献:

- [1] Alexander Toet, Maarten A Hogervorst. Progress in color night vision[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51 (1): 010901-1-20.
- [2] Jin Weiqi, Wang Lingxue, Zhao Yuanmeng, et al. Developments of image processing algorithms for color night vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37 (1): 147-150. (in Chinese)
金伟其,王岭雪,赵源萌,等.彩色夜视成像处理算法新进展[J].*红外与激光工程*, 2008, 37(1): 147-150.
- [3] Toet A, Walraven J. New false color mapping for imaging fusion [J]. *Optical Engineering*, 1996, 35: 650-658.
- [4] Alexander Toet. Color the night: applying daytime colors to nighttime imagery[C]//*Proc of SPIE*. 2003, 5081: 484800-1-11.
- [5] Luo Yuan, Jin Weiqi, Liu Xiaodong. Color look-up space based natural color fusion algorithm and DSP real-time implementation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (8): 2241-2246. (in Chinese)
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.
- [6] Maarten A Hogervorst, Alexander Toet. Fast natural color mapping for night-time imagery[C]//*Information Fusion*, 2010: 69-77.
- [7] Chen Yong, Pi Defu, Zhou Shiyuan, et al. Study for infrared image fusion based on wavelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30(1): 15-17. (in Chinese)
陈勇,皮德富,周士源,等.基于小波变换的红外图像融合技术研究[J].*红外与激光工程*, 2001, 30(1): 15-17.
- [8] Allen M Waxman, Mario Aguilar, David A Fay, et al. Solid-state color night vision: fusion of low-light visible and thermal infrared imagery [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 1998, 11: 41-60.
- [9] Reinhard E, Ashikhmin M, Gooch B, et al. Color transfer between images [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2001, 21: 34-41.
- [10] Wang Haihui, Peng Jiaxiong, Wu Wei. Performance measure rules of multi-sensor image fusion [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(2): 189-193. (in Chinese)
王海晖,彭嘉雄,吴巍.评价多传感器图像融合效果方法的比较[J].*红外与激光工程*, 2004, 33(2): 189-193.