

增强无人姿态感知的彩色图像融合方法

骆媛^{1,2}, 张科¹, 纪明²

(1. 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 机载传感器侦察及地面数据融合处理是美军军用研究实验室规划的无人姿态感知技术发展的第四等级。独立成分分析(ICA)应用于图像处理是在分析人眼视觉系统特性基础上利用稀疏编码的一种新颖的变换域方法,具有多方向性、特征提取及边缘建模特性。色彩传递是目前融合图像自然感彩色的最佳途径。以增强无人姿态感知为目的,结合两者研究突出波段特征的自然感彩色融合方法。根据场景建立训练图像库并提取独立波段特征信息构建 ICA 域的分析核和综合核,在 ICA 域按照区域能量融合规则生成灰度融合图像,根据视觉任务将源图像线性映射到色彩通道赋予灰度融合图像彩色信息,采用控向金字塔对源彩色融合图像和彩色参考图像的各通道进行多分辨率分解,将各通道的子图像进行均值、方差传递,最终获得类似彩色参考图像色彩的融合图像。人眼感知和客观评价表明:融合图像波段特征突出且增强了细节信息,色彩自然、舒适,进一步改善了机载平台的场景感知。

关键词: 态势感知; 图像处理; 彩色融合

中图分类号: TP391 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.S126002

Color image fusion method for enhancing situation awareness of ICA

Luo Yuan^{1,2}, Zhang Ke¹, Ji Ming²

(1. College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Airborne sensors reconnaissance and ground data fusion processing is the fourth grade of UAV situation awareness that planned by USA Office of the Secretary of Defense. Independent Component Analysis (ICA) that applied to the image processing field is a novel method of transform domain in the analysis of human visual system characteristics based on sparse coding theory, with multiple directions, excellent characteristic extraction and edge modeling feature. Color transfer is the best way to get natural sense color fusion image. The combination of studies highlighted the band characteristics of the natural sense color fusion method so as to enhance UAV situation awareness. Training image database was established according to the scene and the independent band feature information was extracted to construct ICA domain analysis kernel and synthesis kernel. In the ICA domain, the gray fusion image was generated applying area energy fusion rules, the gray fusion image color information was given using source image linear projection to the color channel. The various channels of source color fusion image and color reference image were multi-resolution decomposed using steerable pyramid, each channel transfer mean and variance were independently completed. Finally a similar color fusion image was obtained. Eye perception and objective evaluation show that outstanding band features and natural color enhance detail information to further improve the airborne platforms scene perception.

Key words: situation awareness; image processing; color fusion

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61101191)

作者简介: 骆媛(1985-), 女, 高级工程师, 博士后, 主要从事图像处理及光电系统设计等方面的研究。Email: lilyluoy@163.com

0 引言

未来无人机在军事和民用上都有广泛的应用前景。在军事领域,可采用无人机进行作战和侦察。在民用领域,无人机可以完成资源勘测、环境监测等繁重重复或具有一定危险的任务。无人机自主控制意味着能在线感知态势,并按确定使命、原则在飞行中进行决策并自主执行任务。实现无人机自主控制必须不断发展态势感知技术,通过各种信息获取设备自主地对任务环境进行建模,包括对三维环境特征提取、目标辨识与识别、态势评估等。无人机态势感知技术发展趋势可划分为 8 个级别,能力依次提高^[1]。第一级:飞行(高度、速度)传感器、侦察相机;第二级:装载任务数据,飞行控制和导航传感器;第三级:健康/状态传感器,根据健康、状态、历史等模型评估无人机健康状态;第四级:机上传感器侦察、地面数据融合处理;第五级:机上传感器大范围感知,地面数据补充;第六级:推断友机及目标的行动目的,依靠地面数据进行短距跟踪探测;第七级:在复杂和交互的环境中跟踪目标,确定友机及敌机的行动目的;第八级:识别出战区里所有实体的行动目的。

图像融合将不同图像传感器对同一目标场景的信息合成为一幅图像^[2],可帮助操作人员或者计算机视觉系统更快速有效地对目标场景进行探测、识别和理解。图像融合方法可在空间域和变换域中实现^[3]。变换域方法可以有效区分图像的频率信息,一般采用塔形分解和小波变换^[4]两种方法。独立成分

分析(Independent Component Analysis, ICA)是近年随着盲源分离问题发展起来的一种信号处理技术,着眼于数据间的高阶统计特性和信息熵理论。ICA 方法通过观测数据提取出混合矩阵中隐藏的独立的源信号,广泛应用于视/音频处理、图像处理领域。具有优于金字塔和双树复小波的多尺度、多方向性以及优良的边缘提取性能,有利于增强多传感器特征的表达性能,受到人们的普遍关注^[5]。

由于人眼能分辨的颜色等级是灰度等级的几百倍,彩色融合可使人眼视觉系统更有效感知多个传感器的特征信息。实验分析证明^[6]:与非自然感彩色融合相比,自然感彩色融合能提高方位判断和场景记忆能力,减少操作者的视觉疲劳感、减少判断时间、稳定心理状态,从而提高操作者对于场景态势感知的能力。

文中提出一种增强无人机态势感知的彩色图像融合方法,兼顾自然感彩色与突出源图像波段特征和细节信息:根据 ICA 多尺度、多方向和局域性的特点,将其用于机载传感器可见光和红外图像波段特征的提取;通过多分辨率通道进行色彩传递,即将源图像与参考图像采用控向金字塔进行多分辨率分解后,在各级分辨率层将参考图像三个颜色分量的一阶统计特性传递给源图像。

1 算法架构

针对可见光和红外图像之间的互补信息和共有信息,文中提出的融合架构如图 1 所示,主要由四个

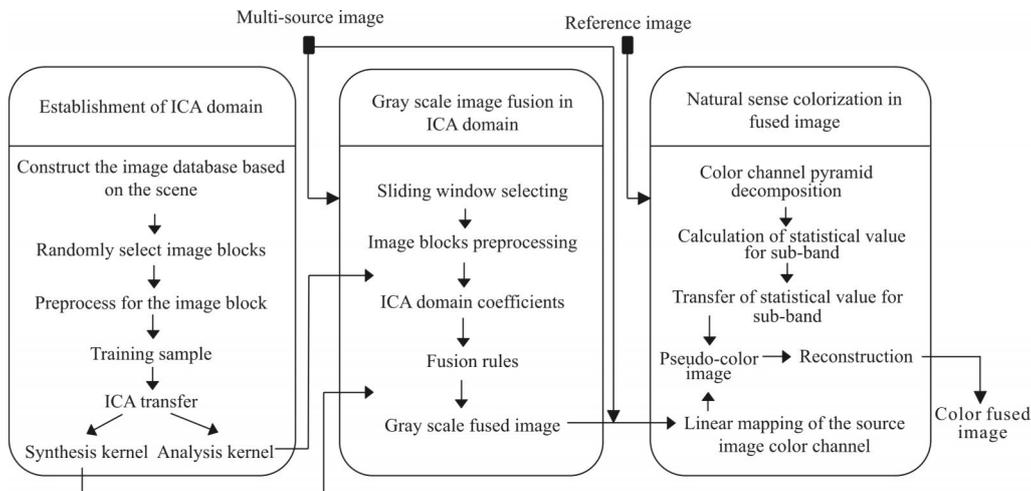


图 1 基于控向金字塔色彩传递及独立成分分析的彩色融合算法架构

Fig.1 Color image fusion using a combinatory steerable pyramid color transfer and ICA method

步骤组成。

第一步,建立训练图像库并提取可见光和红外图像独立的波段特征信息,构建 ICA 域的分析核和综合核;第二步,采用滑动窗口将可见光和红外图像进行分块提取及预处理,在 ICA 域对系数按照融合规则融合为灰度融合图像;第三步,在亮度-色彩分离的颜色空间,如 YUV 空间,将不同融合规则得到的三幅灰度融合图像映射到三个颜色分量,获得伪彩色图像;第四步,利用控向金字塔对彩色参考图像和伪彩色图像的三个颜色分量进行多分辨率分解,在各级分辨率层将参考图像三个颜色分量的均值、方差传递给伪彩色图像并空域重建,最终获得类似彩色参考图像的自然感彩色融合图像。

2 ICA 域的建立

2.1 图像的 ICA 域表达

Vinjie 和 Gallant^[7]通过生理学实验显示,哺乳动物初级注视皮层的神经元在接受自然图像作为输入刺激时,其响应满足稀疏编码,从而证明了自然图像的高阶统计特性服从非高斯分布。根据有效的编码假说,数据变量是由相互独立的一组基向量表示,任何信息是由一小部分的基向量被激活引起的。

图像 $x(i, j)$ 的大小为 $M_1 \times M_2$, 定义图像块 s_w 为像素 (i_0, j_0) 的一个邻域, 大小为 $N_1 \times N_2$ 。从图像 $x(i, j)$ 中随机抽取一定数量的图像块, 每个图像块 $s_w(k, l)$ 排列为向量 $x_w(t)$ 并归一化为零均值。这些向量可以表示为 K 个基向量 b_i 与权重 $u_i(t)$ 的线性组合, $i=1 \dots K$ 。

$$x_w(t) = \sum_{i=1}^K u_i(t) b_i \quad (1)$$

式中: $x(i, j)$ 表示图像 x 以 i 表示离散的纵坐标位置, 以 j 表示离散的横坐标位置, $i=1, \dots, M_2, j=1, \dots, M_1$; $s_w(k, l)$ 表示图像块以 k 为离散的纵坐标位置, 以 l 为离散的横坐标位置, $k=1, \dots, N_2, l=1, \dots, N_1$; t 为从图像中提取的第 t 个图像块的序号; 系数 $u_i(t)$ 为输入图像在基向量的投影。公式(1)也可表示为:

$$x_w(t) = B u(t) \quad (2)$$

$$u(t) = B^{-1} x_w(t) = A x_w(t) \quad (3)$$

式中: $A = B^{-1}$ 代表分析核; B 代表综合核。

文中提取图像块并将图像块排列为向量, 从图像的左上端逐列逐行移动窗口提取图像块。图 2 以

3×3 的矩形窗口提取图像块 s_w 排列为 x_w , 阿拉伯数字代表像素在图像块 s_w 和向量 x_w 的位置。矩形窗口的大小可根据实际图像处理的需要进行选择, 可扩展为 5×5 、 8×8 、 16×16 等。

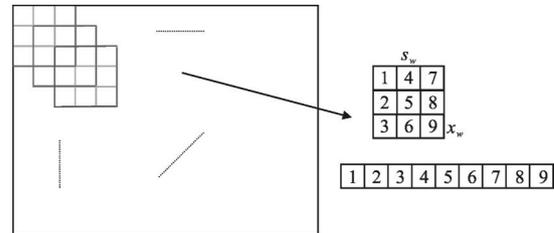


图 2 将 3×3 矩形窗口提取的图像块排列为向量

Fig.2 3×3 rectangular window image block arranged to extract a vector

2.2 训练 ICA 域核函数

选取与融合场景内容相似的图像建立训练图像库。在训练图像库中随机提取 M 个 $N \times N$ 随机图像块 $s_w(k, l)$:

$$s_w(k, l) = a(k, l) \times x(i_0 - N/2 + k, j_0 - N/2 + l), \quad \forall k, l \in [0, N-1] \quad (4)$$

式中: $a(k, l) = 1, \forall k, l \in [0, N-1]$ 。

图像块 s_w 排列为向量 $x_w(t)$ 并组成矩阵 $X, \forall t \in [1, M]$

$$X = [x_w(1) \quad x_w(2) \quad \dots \quad x_w(M)]^T \quad (5)$$

对训练样本矩阵 X 进行 PCA 预处理, 通过提取主成分进行降维并简化后续运算。

$$v(t) = E(x_w(t)) \quad (6)$$

$$m_w(t) = x_w(t) - v(t) \quad (7)$$

$$M = [m_w(1) \quad m_w(2) \quad \dots \quad m_w(M)]^T \quad (8)$$

$$Z = D^{-\frac{1}{2}} P^T M \quad (9)$$

式中: P 和 D 分别是 M 的协方差矩阵 $R_M = E(MM^T)$ 的特征值和特征向量矩阵, 使 $E(ZZ^T) = 1$ 成立。

以 Z 为输入, ICA 变化提取分析核 A 和综合核 B 。ICA 有多种算法模型, 比较常用的有: 最大化非高斯性、最小化互信息、InfoMax 和极大似然估计。ICA 重要的特征就是非高斯性。负熵在一定程度上是非高斯性的最优度量, 选择基于负熵的近似的方法作为 ICA 的目标函数, 采用 FastICA^[8] 作为优化函数。ICA 求解过程为一个最优化的过程: 寻找使负熵最大化的转换矩阵 A , A 即为 ICA 域的分析核。

对于单个独立成分, 目标函数为:

$$w = \arg \{ \max [J_p(y)] \} = \arg \{ \max [J_p(w^T Z)] \} \quad (10)$$

$$J(y) \propto [E\{g(y)\} - E\{g(v)\}]^2 \quad (11)$$

式中： g 为非线性函数， $\arg \max f(x)$ 表示返回 $f(x)$ 最大值时的 x ； v 为标准高斯向量。

采用 FastICA 算法进行分解核 A 的求解，根据公式(3)可算出 ICA 域的综合核 B 。具体流程见表 1。

表 1 分析核 A 的求解流程

Tab.1 Calculation of analysis kernel A

- 1) Z is obtained by centralizing and whitening the data X .
- 2) The number m of independent components to be estimated is selected, and $p \leftarrow 1$ is set.
- 3) The initialization vector w_p with unit norm is randomly selected.
- 4) $w_p \leftarrow E\{Zg(w_p^T Z)\} - E\{g'(w_p^T Z)\}w_p$,
 $g(y) = \tanh(a_1 y)$, $g'(y) = a_1(1 - \tanh^2(a_1 y))$, $a_1 = 0.5$.
- 5) Orthogonalization is performed.
$$w_p \leftarrow w_p - \sum_{j=1}^{p-1} (w_p^T w_j) w_j$$
- 6) Standardization is conducted $w_p, w_p \leftarrow w_p / \|w_p\|$
- 7) If w_p is not converged, the process goes back to step 4.
- 8) $p \leftarrow p + 1$ is set. If $p \leq m$, the process goes back to step 3.

3 ICA 域的灰度图像融合

根据像素区域的大小，融合规则大致分为两类：基于像素选取的融合规则和基于区域选取的融合规则。基于像素选取的融合规则使用最广，但是图像的特征不是单个独立的像素所能表征的，而是一个区域的像素在空间、频率、方向的局部特征，所以采用基于像素选取的融合规则具有局限性。文中采用基于窗口选择的区域能量融合规则。对于两波段源图像：

$$u_{fj} = w_{1j} u_{1j} + w_{2j} u_{2j} \quad (12)$$

$$w_{1j} = \|u_{1j}\|_2 / \sum_{i=1}^2 \|u_{ij}\|_2 \quad (13)$$

$$w_{2j} = \|u_{2j}\|_2 / \sum_{i=1}^2 \|u_{ij}\|_2 \quad (14)$$

式中： u_{fj} 表示融合图像第 j 个子图像的系数； w_{1j} 和 w_{2j} 分别表示两波段源图像第 j 个子图像的系数。

按照源图像分割的顺序，把融合子图像块排列成融合图像。融合图像某一位置的像素采用该位置上所有像素的平均。基于区域能量的融合规则采用了分解系数的最优值，因而更有利于图像清晰度的提高，并且保留更大的信息量。

4 基于控向金字塔多分辨率色彩传递

首先，将 ICA 域灰度融合图像和源图像映射到亮度-色彩分离的彩色空间，获得伪彩色图像，以 YUV 例，彩色具体映射方式为：ICA 域灰度融合图像映射到 Y 空间，可见光映射到 U 空间，红外图像映射到 V 空间。

将伪彩色融合图像与参考图像转换到亮度-色彩分离的颜色空间，通过控向金字塔将各分量的图像分解到相同尺度的子带，将伪彩色融合图像与参考图像对应空间、对应子带进行统计值的传递：

$$\begin{cases} B'_{X,j,k} = \frac{\sigma_{B_{X,r,j,k}}}{\sigma_{B_{X,r,j,k}}} (B_{X,s,j,k} - \bar{B}_{X,s,j,k}) + \bar{B}_{X,r,j,k} \\ L'_{X,j} = \frac{\sigma_{L_{X,r,j}}}{\sigma_{L_{X,s,j}}} (L_{X,s,j} - \bar{L}_{X,s,j}) + \bar{L}_{X,r,j} \\ H'_{X} = \frac{\sigma_{H_{X,r}}}{\sigma_{H_{X,s}}} (H_{X,s} - \bar{H}_{X,s}) + \bar{H}_{X,r} \end{cases} \quad (15)$$

式中： X 表示所选择的颜色空间， $X \subset \{\{l, \alpha, \beta\}, \{Y, U, V\}\}$ ； B 为带通图像； L 为低通图像； H 为高通图像； σ 为子带图像的标准方差； \bar{B} 、 \bar{L} 、 \bar{H} 为子带图像的均值； j 为层数， k 为方向， $k=1$ 时代表水平 (0°) 和垂直 (90°) 两个方向， $k=3$ 时代表 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向； s 为源彩色融合图像； r 为参考图像。

参考图像的一阶、二阶统计量在各子带中传递给了源彩色融合图像，调整彩色融合图像在各尺度和方向下具有和参考图像相同的均值、方差。

5 融合实例及分析

根据与源图像场景内容相似、波段相同的原理，选取 6 幅训练图像，每幅图像随机选取 500 个 8×8 的图像块，对 3000 行、64 列二维数组去均值、白化，提取出 80 个主成分，训练得到 80 个独立基向量，即为 ICA 域分析核。采用二组夜间图像进行融合算法的性能评估。第一组图像由 Applied Multi-Dimensional Fusion 提供^[9]，为航拍的可见光和中波红外图像；第二组图像是项目组采集的微光 ICCD 和中波红外图像，中波红外图像采用了增强处理。在 ICA 域灰度融合阶段，采用 8×8 滑动窗口提取源图像块。在 YUV 颜色空间，人工选取彩色参考图像，对彩色参考图像和伪彩色图像，采用 4 层控向金字塔

分解, $k=3$ 。

(1)实验 1 图 3(a)和图 3(b)的航拍图像中,有建筑物、树木等绿色植被、川流不息的马路、行驶及停放的车辆,场景信息和区域特征较多。图 3(c)体现了图 3(a)的可见光场景细节和边缘信息以及图 3(b)中行驶的车辆和部分热目标。在控向金字塔色彩传递中,选取了图 3(f)和图 3(g)不同的彩色参考图像,由于场景内容类似而颜色统计特征不同,因此,图 3(d)和图 3(e)的场景色彩表达略有不同,但总体上植被为绿色,建筑物为灰色,夜晚灯光区域为冷的荧光色,车辆等轮廓特征固定、明显而无固定的色彩,色彩自然、舒适,适于人眼观察,同时突出了中波红外高热目标,有利于目标的探测和识别,增强了态势感知能力。

(2)实验 2 图 4(a)为夜晚的微光图像,由于灯

光明亮区域亮度过饱和,背景信息表现不足,在暗区域无法分辨建筑物的轮廓等信息;图 4(b)为经过增强处理的中波红外图像,图像反映场景辐射信息,不受光的照度影响,建筑物的轮廓等细节较为明显;图 4(c)为灰度融合图像,在体现红外图像细节的基础上,仍保留了微光图像中的灯光信息,在军用场合下通过灯光有利于分辨目标或场景特征。图 4(d)在图 4(c)突出波段特征及增强细节的基础上,通过自然舒适的色彩提高了方位判断能力、缩短了人眼判断时间并降低了观察者的视觉疲劳,在特定场景和特定任务下显著增强了人眼态势感知能力。图 4(e)为采用传统基于色彩传递的彩色融合方法^[10]得到的彩色图像,色彩观察舒适,但图像细节及边缘等表现较差。图 4(f)将微光图像高亮部分偏蓝色调制,中波红外亮度较高部分偏红色调制,虽



图 3 可见光/中波红外图像的灰度融合与彩色融合图像的比较
Fig.3 Comparison of visible light/MWIR gray fusion image and color fusion image

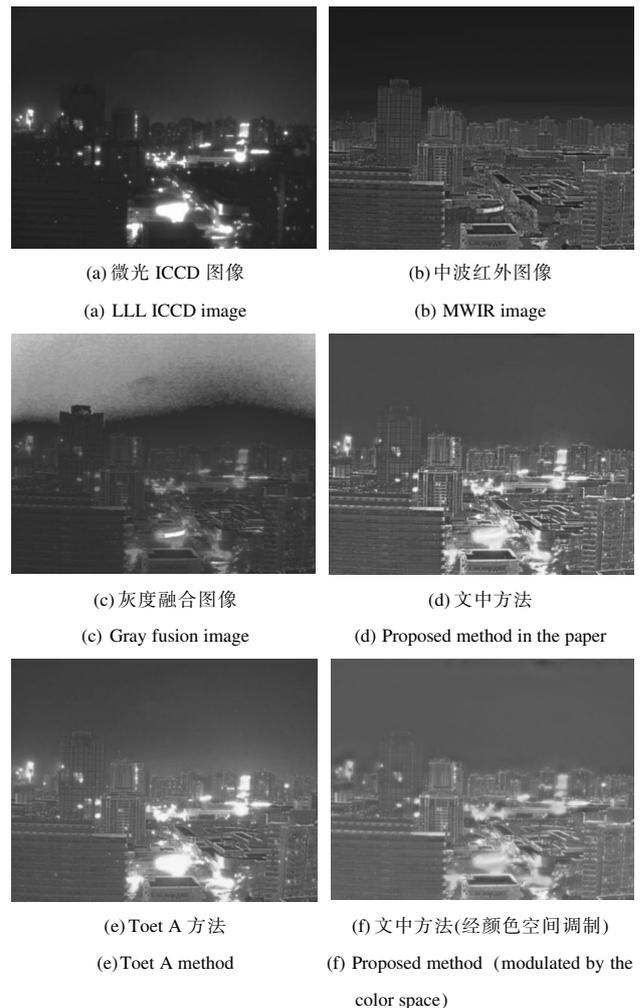


图 4 微光与中波红外图像的灰度融合与彩色融合
Fig.4 LLL/MWIR gray fusion and color fusion

色彩自然感弱于图 4(d),但是对于夜间灯光密集的区域,中外波段特征体现最好。可根据具体场景和任务对色彩进行调制,使之更有利于目标的探测和识别。

在人眼主观感知的基础上,采用客观评价指标进一步对处理效果进行分析。人眼对于彩色图像的感知比灰度图像感知更为复杂,一般认为,观察者因任务需求不同对彩色图像评价的侧重也不同。文中算法着重于增强人眼场景态势感知能力,故而选择两组符合人眼视觉特性的客观指标来实现对于彩色图像锐度(ISM, Image Shapeness Metric)、彩色图像全局对比度(ICM, Image Contrast Metric)、色彩层次生动及丰富度(CCM, Color Colorfulness Metric)^[11]和场景色彩协调性(CH, Color Harmony)^[12]的评价,色彩指标评价在 CIELAB 颜色空间进行。图像锐度(ISM)采用 Soble 算子计算图像灰度平均梯度,ISM 值越大表示锐度表现越好;彩色图像全局对比度(ICM)以灰度和明度(L 值)直方图为基础体现彩色图像的全局对比度性能,ICM 值在[0, 1]区间,0 表示对比度最差,1 表示对比度最好;色彩层次生动及丰富度(CCM)以全局色彩饱和度和色彩变化平均梯度为基础衡量彩色图像的色彩生动、丰富程度,CCM 值越大表示图像具有更好的色彩表现力;场景色彩协调性(CH)以颜色组合协调性为基础,评价人眼观察彩色融合图像的自然、舒适程度,取值越大表示越适于人眼观察。

根据表 2 的客观评价数据,图 3(e)在图像锐度(ISM)方面表现最佳,边缘和细节明晰,图 3(d)表现次之,灰度融合图像 3(c)表现最差;图 3(e)在图像全局对比度(ICM)方面表现最佳,具有宽的灰度动态范围及彩色明度(L 值)动态范围,图 3(d)次之,图 3(c)最差,与人眼观察一致,在灰度融合图像已具有较好的边缘提取和细节增强性能的基础上,色彩传递有效调制灰度通道而增强了彩色融合图像的锐度和全局对比度。图 3(e)在色彩层次生动及丰富度(CCM)方面表现最佳,色彩饱和度高、梯度较大,体现为具有较为鲜艳的蓝色;图 3(d)在场景色彩协调性(CH)方面表现略优于图 3(e),场景色彩更表现符合人眼对于城市场景主观色彩的记忆,人眼观察舒适。

根据表 3 的客观评价数据,图 4(d)在图像锐度(ISM)方面表现最佳,图 4(f)次之,图 4(e)略优于灰度融合图像 4(c);图 4(f)在图像全局对比度(ICM)方

面表现最佳,灰度和彩色明度分布均衡,图 4(d)次之,图 4(e)最差,文中方法在彩色图像锐度和全局对比度的表现上优于文献[9]的传统色彩传递彩色融合方法。图 4(f)在色彩层次生动及丰富度(CCM)方面表现最佳,具有较鲜艳的蓝色和橘红色,颜色梯度变化大,图 4(d)次之,图 4(e)略差于图 4(d);图 4(d)在场景色彩协调性方面(CH)表现最优,图 4(e)次之,图 4(f)最差。融合方法有时在追求最佳人眼观察舒适度和追求最佳融合图像颜色饱和鲜艳、色彩丰富两方面是不可兼得的,可根据具体任务的不同而有所侧重。

表 2 图 3 客观指标计算结果

Tab.2 Calculation result of Fig.3 objective indicator

	Fig.3(d)	Fig.3(e)	Fig.3(c)
ISM	79.769 2	85.348 1	54.665 1
ICM	0.360 9	0.436 2	0.264 4
CCM	7.293 5	8.270 1	
CH	0.712 9	0.701 6	

表 3 图 4 客观评价指标计算结果

Tab.3 Calculation result of Fig.4 objective indicator

	Fig.4(d)	Fig.4(e)	Fig.4(f)	Fig.4(c)
ISM	63.290 0	36.455 6	47.733 3	34.545 0
ICM	0.295 2	0.257 9	0.414 9	0.141 5
CCM	6.661 1	6.597 2	7.667 8	
CH	0.813 8	0.779 2	0.609 2	

综上所述,人眼主观感知和客观评价方法均一致地表明文中方法具有更佳的处理效果,在突出波段特征的基础上,有效增强了图像的细节和边缘,并提升了全局对比度,色彩自然舒适,有利于提高人眼视觉的场景态势感知能力。

6 结 论

文中提出了一种控向金字塔色彩传递与独立成分分析结合的彩色融合方法。独立成分分析通过最优化特征的统计属性从场景图像中学习波段特征,在灰度通道融合中实现了对源图像更有效的细节提取和边缘增强;控向金字塔色彩传递在灰度-色彩分离的颜色空间多分辨率尺度下,根据可视性好的彩色参考图像的一阶及二阶统计量调制伪彩色融合图像灰度和色彩通道,增强了彩色融合图像的锐度和全局对比度,彩色融合图像的色彩自然舒适。

对两组机载传感器的航拍夜间图像进行仿真实验,人眼主观感知和客观指标表明:文中方法突出了源图像波段特征且细节和边缘明晰、色彩自然舒适,适于人眼观察,有利于提高无人机载平台场景感知能力。

参考文献:

- [1] Office of the Secretary of Defense. Unmanned aircraft systems road map 2005–2030 [M]. USA: Office of the Secretary of Defense, 2005: 47–48.
- [2] Goshtasby A A, Nikolov S. image fusion: advances in the state of the art[J]. *Information Fusion*, 2008, 8(2): 114–118.
- [3] Hill P, Canagarajah N, Bull D. Image fusion using complex wavelets[C]//Proceedings of the 13th British Machine Vision Conference, 2002.
- [4] Pajares G, de la Cruz J M. A wavelet-based image fusion tutorial[J]. *Pattern Recognition*, 2004, 37(9): 1855–1872.
- [5] Luo Xiaoyan, Zhang Jun, Dai Qionghai. A regional image fusion based on similarity characteristics[J]. *Signal Processing*, 2012, 92: 1268–1280.
- [6] Toet A, Franken E M. Perceptual evaluation of different image fusion schemes[J]. *Display*, 2003, 24(1): 25–37.
- [7] Vinje W E, Gallant J L. Sparse coding and decorrelation in primary visual cortex during natural vision[J]. *Science*, 2000, 287: 1273–1276.
- [8] Aapo Hyvarinen. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. *IEEE Trans on Neural Networks*. 1999, 10(3): 626–634.
- [9] Mitianoudis N, Stathaki T. Optimal contrast for color image fusion using ICA bases [C]//Proc of the 11th International Conference on Information Fusion, 2008: 4632419.
- [10] Shi Shiming, Wang Lingxue, Jin Weiqi, et al. A dual-band color imaging system for visible and thermal IR image based on transfer in YUV color space [J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(1): 30–35.(in Chinese)
史世明, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于 YUV 空间色彩传递的双通道视频实时融合系统[J]. *兵工学报*, 2009, 30(1): 30–35.
- [11] Yuan Yihui, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Objective quality evaluation of visible and infrared color fusion image [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(3): 033202.
- [12] Gao Shaoshu, Jin Weiqi, Wang Lingxue. Quality assessment for visible and infrared color fusion images of typical scenes [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 081101.