

一种改进的基于场景识别的夜视图像彩色融合质量评价方法

赵俊豪¹, 肖刚¹, Durga Prasad Bavirisetti², 刘刚³, 李振华⁴

1)上海交通大学, 上海 200240; 2)上海交通大学, 上海 200240 印度;

3)上海电力学院, 上海 200082; 4)山东大学, 济南 250061

摘要: 基于场景识别的夜视图像彩色融合方法, 会通过场景识别和彩色融合, 最终获得接近自然的, 符合人眼视觉的彩色融合图像。由于在 $l\alpha\beta$ 和 YUV 颜色空间得到的结果不同, 还需主观评价择其优者, 因此对此做出了重要改进, 即场景识别后, 在 $l\alpha\beta$ 和 YUV 颜色空间同时进行彩色融合并用提出的图像评价指标对结果进行评价。综合结构相似度, 饱和度和亮度, 对不同空间得到的图像在无参考图像的条件下进行定量评价, 将最终评价认为融合质量好的图像作为最终输出图像。实验证明该评价方法得到的结果比传统的均方误差和熵更符合人眼主观, 是一种有效的图像融合质量评价方法。

关键词: 场景识别; 微光; 红外; 彩色融合; 质量评价

中图分类号: TP391.41

An Improved Color Fusion Evaluation Method for Night Vision Images Based on Scene Recognition

Junhao Zhao¹, Gang Xiao¹, Durga Prasad Bavirisetti², Gang Liu³, Zhenhua Li⁴

1) Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2) Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240 India;

3) Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082;

4) Shandong University, Jinan, 250061

Abstract: Using the color fusion method for night vision image based on scene recognition will get the colorful fused image, which is close to nature and human's vision, through scene recognition and color fusion. Because the results from $l\alpha\beta$ and YUV color space are different and we have to make subjective evaluation to choose the superior one, we make an important improvement that make color fusion in $l\alpha\beta$ and YUV simultaneously after scene recognition and use new evaluation index to evaluate these results. Considering structure similarity, saturation and luminance, the images obtained in different spaces are evaluated quantitatively without reference images and we choose the image with better index as the output image. The experimental results show that the proposed method is more aligned with human visual system than the traditional method: mean square error and entropy and it is an effective method for image fusion quality evaluation.

keywords: scene recognition; low light level image; infrared image; color fusion; quality assessment

引言¹

典型的夜视图像传感器有微光夜视仪和红外热像仪。微光图像分辨率高, 场景细节丰富, 但容易受

到天气影响; 红外热像仪能够在白天和黑夜连续工作, 几乎不受照明和天气的影响, 作用距离远, 其图像有着较好的热对比度^[1-2]。通过将配准好的微光夜视仪和红外热像仪拍摄的图像进行融合, 能够很好

收稿日期: 2017-5-31

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 973 计划 (2014CB744903)、国家自然科学基金 (61673270)、上海浦江人才计划 (16PJD028)、中国航天科技创新基金 (HTKJCX2015CAAA09)、上海市科委科技攻关项目 (13231201300)

作者简介: 赵俊豪 (1993-), 男 (汉族), 浙江宁波, 硕士研究生, 研究方向为图像融合, zhaojunhao0821@163.com

通讯作者: 肖刚 (1974-), 男 (汉族), 研究员, xiaogang@sjtu.edu.cn

地结合微光场景细节丰富和红外不受天气影响等优点，使观察者能够在漆黑的环境当中识别目标和背景，从而有利于计算机后续处理。

在该领域的早期研究中，学者们提出了许多不同的灰度融合算法，所得到的黑白图像并不能有效地支持目标探测和场景识别的能力^[3]。由于人眼只能分辨出大约 100 个灰度级，却能分辨几千种颜色，微光与红外融合后的黑白图像中分辨不出的信息，有些能够在彩色化后的图像中得到正确分辨，于是灰度图像彩色化已经成为了研究热点之一。美国麻省理工学院 Lincoln Laboratory^[4]提出了基于生物视觉特性的 MIT 多波段彩色融合方法，获得了具有一定自然感的融合图像，但缺点是运算复杂，导致不能进行实时处理。Li Wei^[5]在 YUV 的颜色空间中，提出了基于 YUV 空间的彩色夜景可视化方法，有效提升了彩色化的速度，缺点是该非线性融合方法有时会带来模糊效果。TNO Human Factors 的 Toet^[1]等人在 2012 年，提出了针对红外与可见光图像的伪彩色融合算法，该算法能够保留不同传感器各自的信息，并且增强了图像的细节信息。

为了在无先验条件下，获得更好彩色融合效果的图像，瞿哲^[6]提出的基于场景识别的夜视图像彩色融合方法，能够对输入的微光、红外图像进行分类，根据获得的标签（如“街道”、“乡村”和“森林”等）在图像库中找到相应的场景，从中匹配最佳的参考图像，将参考图像的颜色传递给微光和红外的伪彩色融合图像，实验证明能够得到很好的彩色融合图像。但在该方法中，如果在不同的颜色空间进行的参考图像筛选会得到不同的融合效果。本文提出一种改进的基于场景识别的夜视图像彩色融合方法，将输入图像在 $la\beta$ 和 YUV 同时进行场景识别和彩色融合，并用本文所提出的评价指标对得出的两个结果进行评价，该指标可以在无参考图像的条件下有效评价，最终将评价效果好的图像作为最终输出图像。

1 基于场景识别的夜视图像彩色融合方法理论基础

1.1 颜色空间

$la\beta$ 颜色空间分开保存图像的色彩信息和亮度信息^[7]。其中 l 代表亮度； α 正负分别代表红色和绿色； β 正负分别代表黄色和蓝色。该空间弥补了 RGB 色彩模型的分布不均问题。其变换公式如下：

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3811 & 0.5783 & -0.0402 \\ 0.1967 & 0.7244 & 0.0782 \\ 0.0241 & 0.1288 & 0.8444 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \log L \\ \log M \\ \log S \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

可见从 RGB 空间变换到 $la\beta$ 颜色空间需要用到对数运算，因此是非线性的。

YUV 颜色空间常用于现代彩色电视系统中，用亮度和色度来表示颜色信息。其中 Y、U 和 V 分别是亮度、蓝色和红色色差信号。该空间比 RGB 空间更能适应光照强度变化，其变换公式如下：

$$\begin{bmatrix} Y \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ -0.147 & -0.289 & 0.436 \\ 0.615 & -0.515 & -0.100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (4)$$

可见从 RGB 空间转换到 YUV 颜色空间是线性的，计算简单，不存在溢出导致图像信息丢失的问题。

这两种颜色空间都很常用，并具有各自的优势。

1.2 基于彩色传递的融合方法

Toet^[8]最先提出将彩色传递应用到微光与红外的图像融合当中。他所使用的颜色空间为 $la\beta$ 颜色空间，具体步骤是：

a) 将红外与微光图像灰度值分别作为 RGB 空间中的 R、G 通道值，B 通道值设为 0，由此获得伪彩色融合图像

b) 使用式 (1)、(2) 和 (3) 将伪彩色图像从 RGB 空间转换到 $la\beta$ 空间，并作为输入图像

c) 计算输入图像和参考图像各通道的均值和方差，利用式 (5) 修正输入图像的统计量使得输入图像具有和参考图像相似的色彩感

$$\begin{cases} l'_s = \frac{\sigma_l}{\sigma_s} (l_s - \mu_s^l) + \mu_t^l \\ \alpha'_s = \frac{\sigma_\alpha}{\sigma_s} (\alpha_s - \mu_s^\alpha) + \mu_t^\alpha \\ \beta'_s = \frac{\sigma_\beta}{\sigma_s} (\beta_s - \mu_s^\beta) + \mu_t^\beta \end{cases} \quad (5)$$

d) 将上一步结果转换到 RGB 颜色空间。

在 YUV 颜色空间进行的彩色传递方法，与 toet 在 $l\alpha\beta$ 颜色空间进行的方法相仿，只是在式(5)中三个变量 l 、 α 、 β 分别改为 Y、U、V。

1.3 选择参考图像使用的彩色融合图像评价方法

对于进行彩色传递后的融合图像评价的方法，是基于 Anwaar-ul-Haq^[9] 提出的 CFOI 模型。该评价指标由三个因素组成：色彩度、梯度相似性和互信息。

色彩度由颜色矩阵评估^[10]，使用式(6)计算，其中 μ 和 σ 分别表示颜色成分空间 $rg=R-B$ 和 $yb=0.5(R+G)-B$ 的均值和方差。最后用式(7)计算归一化的融合图像和参考图像之间颜色相似度。

$$C = \sqrt{\sigma_{rg}^2 + \sigma_{yb}^2} + 0.3\sqrt{\mu_{rg}^2 + \mu_{yb}^2} \quad (6)$$

$$C(F,T) = \frac{C_F}{0.5(C_T + 1)} \quad (7)$$

梯度相似度由亮度 l 、对比度 cg 以及结构对比度 sg 组成，使用式(8)计算，其中 l 、 cg 、 sg 分别由式(9)至式(11)计算得出。 μ 和 σ 为两幅输入图像的梯度向量的均值和方差。

$$GSM(a,b) = [l(a,b)] \cdot [cg(a,b)] \cdot [sg(a,b)] \quad (8)$$

$$l(a,b) = \frac{2\mu_a\mu_b}{\mu_a^2 + \mu_b^2} \quad (9)$$

$$cg(a,b) = \frac{2\sigma_a\sigma_b}{\sigma_a^2 + \sigma_b^2} \quad (10)$$

$$sg(a,b) = \frac{\sigma_{ab}}{\sigma_a\sigma_b} \quad (11)$$

互信息质量评价使用式(12)计算， λ 是空间频率系数， $M(A,F)$ 为微光图像 A 与彩色融合图像 F 的互信息，使用式(13)计算。

$$Q(A,B,F) = \lambda M(A,F) + (1-\lambda)M(B,F) \quad (12)$$

$$M(F,A) = \sum_{i_1=1}^L \sum_{i_2=1}^L h_{F,A}(i_1,i_2) \log_2 \frac{h_{F,A}(i_1,i_2)}{h_F(i_1)h_A(i_2)} \quad (13)$$

在式(13)中， L 是灰度级数， $h_{F,A}$ 为 F 和 A 的归一化联合灰度直方图， h_F 和 h_A 为归一化的边缘梯度直方图。

在瞿哲的方法中^[6]，考虑到参考图像 T 与最终融合图像 F 之间的互信息，将 Q 修改为：

$$Q(A,B,T,F) = \frac{\lambda M(A,F) + (1-\lambda)M(B,F) + 2M(T,F)}{4} \quad (14)$$

将梯度相似性修改为：

$$GSM(a,b) = [l(a,b)] \cdot [cg(a,b)] \quad (15)$$

提升颜色相似性 C 的比重后，最终评价指标 QCG 为

$$QCG = \frac{Q + 2C + G}{4} \quad (16)$$

1.4 场景分类方法

场景图像的分类过程^[11]如图 1 所示，提取输入图像的古IST 特征，然后利用 SVM 分类器来进行场景分类，获得场景标签。由于输入图像都为灰度图像，因此在特征提取的过程中给予方向和强度更多的权重。

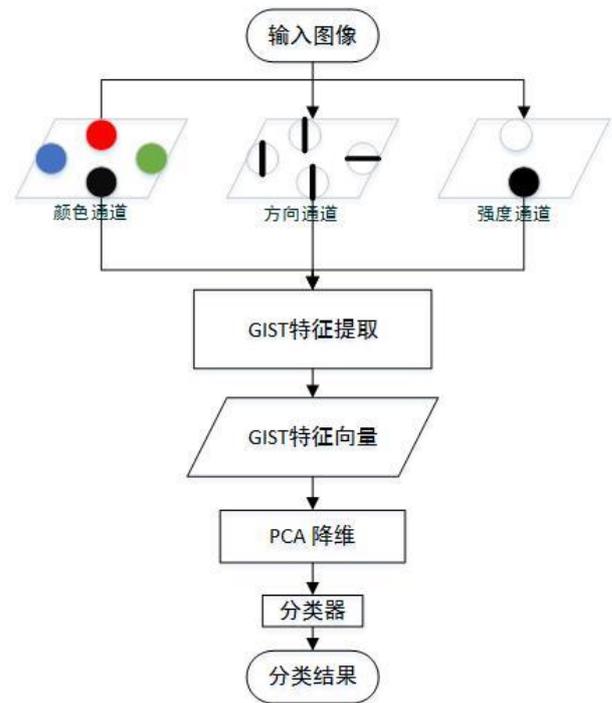


图 1 场景图像分类方法

在 Oliva and Torralba 场景图像库^[11]：街道（292 张），城市（260 张），森林（328 张），海岸（360 张），山区（374 张），建筑（356 张），高速公路（260 张），乡村（410 张）中提取 GIST 特征后的图像数据结构如表 1 所示：

表 1 提取 GIST 特征后图像的数据结构

数据结构	描述
自然性 s	全局能量谱与自然性积分得到的自然性
特征向量 g	由视觉特征图提取的 gist 向量降维得到
图像类别标签 L	1 到 8 分别表示 8 类不同场景
预测图像类别标签 LP	SVM 根据训练模型得到的预测标签，1 到 8 表示 8 类场景

该图像库中，用一半图像作为训练集，剩余一半

作为测试集，测试结果如表 2 所示：

表 2 基于 GIST 模型的识别正确率

场景		正确率
自然场景	海岸	87.22%
	森林	95.12%
	山区	89.84%
	乡村	84.63%
人工场景	高速公路	83.46%
	城市	88.63%
	街道	95.55%
	建筑	95.50%

2 一种改进的基于场景识别的夜视图图像彩色融合方法

2.1 HSI 颜色空间

HSI 模型是美国色彩学家 H.A.Munseu^[12]提出的，它反映了人的视觉系统感知彩色的方式。组成 HSI 颜色模型的三个分量分别是色调 H(Hue)，饱和度 S(Saturation)和亮度 I(Intensity)，通常用圆锥空间模型来描述。如图 2 的圆锥空间所示，色调的角度范围是 $[0^\circ, 360^\circ]$ ，其中 0° 代表红色， 120° 代表绿色， 240° 代表蓝色， 0° 至 360° 的颜色均匀过渡。饱和度的范围是 $[0, 1]$ ，半径越大，颜色饱和度越大，反之，半径越小，越接近灰度。亮度的范围也是 $[0, 1]$ ，高度越高，数值越大，越接近白色，反之越接近黑色。

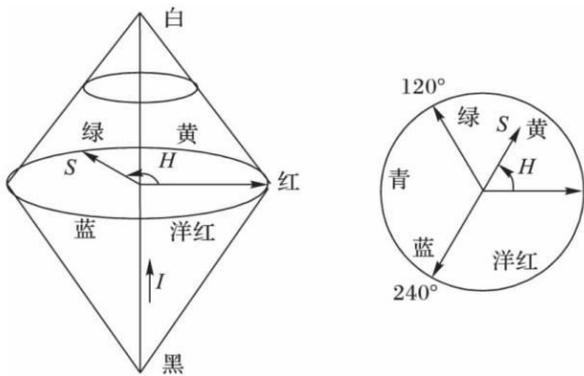


图 2 HSI 空间模型

HSI 模型的特点是：1.亮度分量与彩色信息无关，可以单独调节图像亮度而不改变色彩分布；2.更符合人类视觉系统，有利于图像处理。

使用式(17)，可以将 RGB 空间转换到 HSI 空间：

$$\begin{cases} H = \begin{cases} \theta, & G \geq B \\ 2\pi - \theta, & G < B \end{cases} \\ S = 1 - \frac{3 \min(R, G, B)}{R + G + B} \\ I = (R + G + B) / 3 \end{cases} \quad (17)$$

其中：

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{(R - G) + (R - B)}{2 \left[(R - G)^2 + (R - B)(G - B) \right]^{1/2}} \right\}$$

当 $R=G=B=0$ 时， $H=0, S=1, I=0$ ；当 $R=G=B \neq 0$ 时， $H=0, S=0, I=R$ 。

2.2 新的彩色融合图像评价方法

为了将 lab 和 YUV 空间中得到的结果进行对比，从而选出更符合人眼视觉的彩色融合图像，因此要使用新的评价方法。因为 CFOI 模型考虑了参考图像，而比较的两幅图像是在不同彩色空间，选择不同参考图像进行融合的，所以在这里，我们定义新的评价指标为 Q_N ， Q_N 的计算并不涉及到参考图像。使用式(18)计算该值，其中 a, b 为输入图像即微光和红外图像， f 为输出的彩色融合图像， f_g 为 f 的灰度图像。 Q_N 值越大，彩色融合效果就越好。

$$Q_N = Q_E(a, b, f_g) \cdot \bar{I}(f) \cdot \bar{S}(f) \quad (18)$$

该指标包含了三个因素，反映结构相似度的 Q_E ，反映平均亮度的 \bar{I} 和反映平均饱和度的 \bar{S} 。 Q_E 是由 Gemma Piella^[13]提出的，他考虑到人眼对图像的边缘信息十分敏感，而边缘信息能反映图像的主要结构，所以在很大程度上，用边缘相似度来评价融合图像的好坏。由于他的方法是用来评价灰度图像的，所以我们要把彩色图像 f 转为灰度图像 f_g 。 Q_E 的计算公式如式(19)，式(20)和式(21)所示，

$$Q_0(a, f_g) = \frac{\sigma_{af_g}}{\sigma_a \sigma_{f_g}} \cdot \frac{2a\bar{f}_g}{(a)^2 + (f_g)^2} \cdot \frac{2\sigma_a \sigma_{f_g}}{\sigma_a^2 + \sigma_{f_g}^2} \quad (19)$$

$$Q(a, b, f_g) = \lambda Q_0(a, f_g) + (1 - \lambda) Q_0(b, f_g) \quad (20)$$

$$Q_E(a, b, f_g) = Q(a, b, f_g) \cdot Q(a', b', f'_g)^\alpha \quad (21)$$

在式(19)中， \bar{a}, \bar{f}_g 为两幅图像的均值； σ_a, σ_{f_g} 为两幅图像的方差； σ_{af_g} 为两幅图像的协方差。在式(20)中， λ 为权重系数，这里我们取为 0.5。在式(21)中， a', b', f'_g 为使用 sobel 算子，对输入图像 a, b, f 进行滤波后的边缘图像； α 为权重系数，这里我们取为 1。

第二个因素为反映彩色融合图像平均亮度的 \bar{l} 。首先将 f 从RGB空间转换到HSI空间,可以得到H、S和I的三个分量图像,三个分量图像都是灰度图像。然后可以用式(22)计算亮度分量图像的平均值,即彩色融合图像的亮度 \bar{l} :

$$\bar{l} = \sum_{k=0}^{L-1} z_{1k} p(z_{1k}) \quad (22)$$

其中, z_{1k} 是 I 分量图像中所有可能的灰度值, $p(z_{1k})$ 为灰度级 z_{1k} 出现的概率。

第三个因素为反映图像平均饱和度的 \bar{S} 。 \bar{S} 由 f 的HSI空间中S分量图像得到,利用式(23)计算得到:

$$\bar{S} = \sum_{k=0}^{L-1} z_{2k} p(z_{2k}) \quad (23)$$

其中, z_{2k} 是 S 分量图像中所有可能的灰度值, $p(z_{2k})$ 为灰度级 z_{2k} 出现的概率。

2.3 本文改进的方法

本文方法如图3所示,是将微光与红外图像输入,进行场景识别以获得场景标签。分别在 lab 和YUV颜色空间中,将相应标签的场景库中的每一幅图像用1.2节方法进行彩色融合,然后用1.3节的QCG进行评价,QCG值最高认为是最佳彩色融合图像,相应的参考图像为最佳参考图像。下一步把来自不同空间的最佳彩色融合图像用本文提到的评价指标 Q_N 来进行评价,取 Q_N 大值者为我们最终的输出图像。

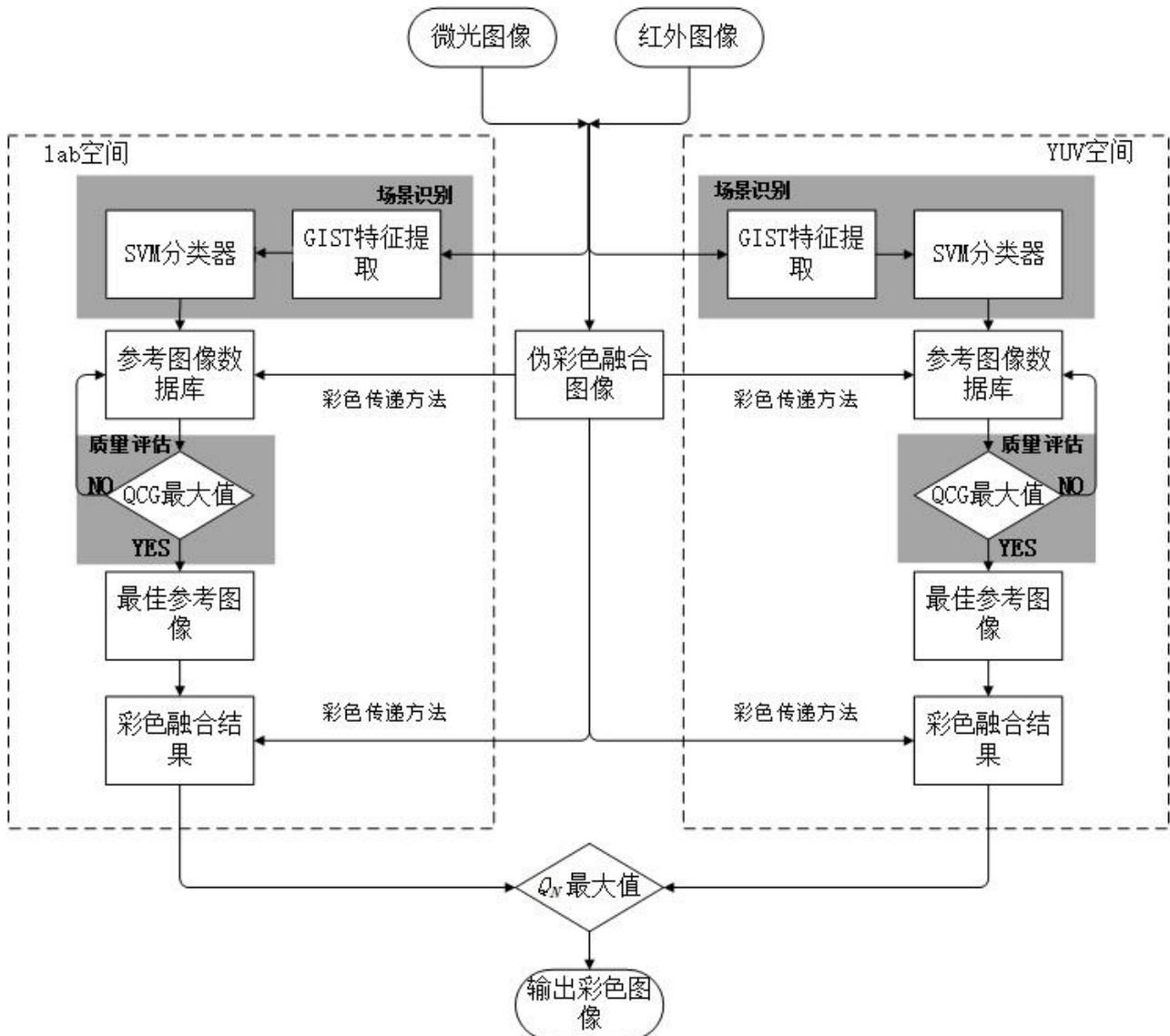


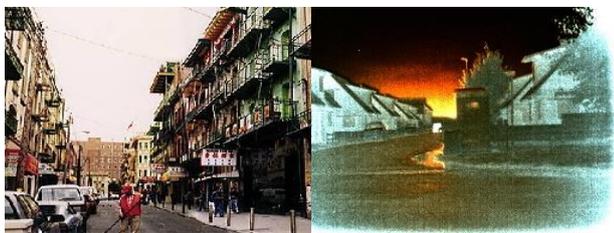
图3 本文算法流程图

3 实验结果与分析

本文使用 Toet 的红外与微光图像库进行实验^[1],并在图像库中,任意选取了十组微光、红外图像。用本文的评价指标和传统评价图像的均方误差 MSE 和熵 Entropy 进行对比,将其中的两组图像列于图 4 与图 5,十组实验结果列于表 5。



(a)微光图像 (b)红外图像



(c) $la\beta$ 空间匹配的参考图像 (d) $la\beta$ 空间的彩色融合结果



(e)YUV 空间匹配的参考图像 (f)YUV 空间的彩色融合结果

图 4 实验 1 的彩色融合结果

第一组实验图像如图 4 所示,场景识别的标签为“街道”,所以以“街道”场景库中的图像作为参考图像,得到了两幅在各自颜色空间的, QCG 值最大的彩色融合图像。从图像上看,图 4 (d) 较有“彩色感”,天空中出现了类似“夕阳”的景象,比较贴近自然,而图 4 (f) 的“彩色感”却没有前者强,因此从视觉上可以认为在 $la\beta$ 空间融合的图像效果好于在 YUV 空间融合的图像。

用新评价指标 Q_N 来评价两幅图像的结果,如表 3 所示:

表 3 实验 1 的各项评价指标数值

空间	Q_E	\bar{i}	\bar{S}	Q_N
$la\beta$	0.1141	112.8546	0.5082	6.5434
YUV	0.1411	82.5247	0.1602	1.8648

从表中可以看出,两幅图的结构相似度相差不

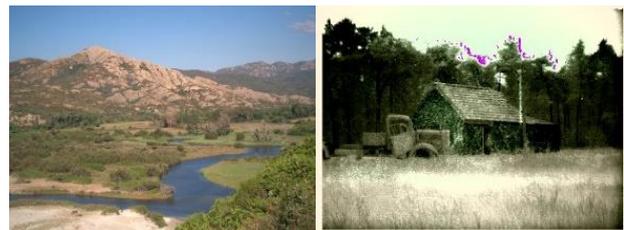
大,而图 4 (d) 的亮度和色彩饱和度均远大于图 4 (f),从而导致图 4 (d) 的 Q_N 大,说明图 4 (d) 的彩色融合效果更好,这完全符合人眼主观视觉。



(a)微光图像 (b)红外图像



(c) $la\beta$ 空间匹配的参考图像 (d) $la\beta$ 空间的彩色融合结果



(e)YUV 空间匹配的参考图像 (f)YUV 空间的彩色融合结果

图 5 实验 2 的彩色融合结果

第二组实验图像如图 5 所示,场景识别的标签为“乡村”,所以以“乡村”场景库中的图像作为参考图像,得到了两幅在各自颜色空间的, QCG 值最大的彩色融合图像。从图像上看,两者的“彩色感”相差不多,但图 5 (f) 显得更亮,更能够反映房屋和房屋前物体的结构,因此从视觉上可以认为在 YUV 空间融合的图像效果好于在 $la\beta$ 空间融合的图像。

用新评价指标 Q_N 来评价两幅图像的结果,如表 4 所示:

表 4 实验 2 的各项评价指标数值

空间	Q_E	\bar{i}	\bar{S}	Q_N
$la\beta$	0.2112	84.8193	0.7266	13.0162
YUV	0.5274	96.5199	0.4398	22.3878

从表中可以看出,图 5 (f) 仅有饱和度低于图 5 (d),而其结构相似度和亮度都远远大于图 5 (d),导致图 5 (f) 的 Q_N 大,说明图 5 (f) 的彩色融合效果更好,这完全符合人眼主观视觉。

将十组实验对比数据列于表 5:

表 5 十组实验客观评价指标对比

	实验一		实验二		实验三		实验四		实验五	
	$l\alpha\beta$	YUV								
主观评价	✓			✓		✓	✓		✓	
MSE	107.3618	72.1457	36.9927	117.1837	80.911	75.2298	185.1666	182.523	111.104	179.9616
Entropy	7.273	7.1905	5.8783	7.1362	6.5689	7.3165	7.163	7.3036	7.209	7.7161
Q_N	6.5434	1.8648	13.0162	22.3878	9.4998	6.187	25.2584	3.5795	10.7228	2.8564
	实验六		实验七		实验八		实验九		实验十	
	$l\alpha\beta$	YUV								
主观评价	✓		✓		✓		✓			✓
MSE	154.2376	120.378	138.241	151.859	108.7646	102.915	95.667	115.7819	106.2962	81.7691
Entropy	7.3004	7.3449	7.6411	7.7518	6.8303	7.7619	7.63	7.7533	7.3154	7.5296
Q_N	42.5033	5.003	21.8435	4.4851	15.8845	4.9027	22.2726	5.7404	7.6228	10.8614

均方误差 MSE 用来表示彩色融合图像对于彩色原始图像失真程度,数值越小,表明融合效果越好。熵 Entropy 表示图像的平均信息量,该值越大,说明图像中包含的信息越多,融合效果越好。表中加粗的数值表示所在空间融合的图像效果好,而黑色表示符合主观评价,红色表示不符合主观评价。经过统计,用 MSE 评价最终的输出彩色图像的正确率为 50%,用 Entropy 评价的正确率为 40%,而用本文指标评价的正确率为 90%,证明了本文评价指标的效果好于常用融合图像评价指标。

4 结论

本文对基于场景识别的夜视图像彩色融合方法进行改进。输入的微光和红外图像在场景分类后,同时在 $l\alpha\beta$ 和 YUV 空间进行彩色融合,为在不同空间得到的结果中,选择最终输出图像,本文提出了评价彩色融合图像的指标 Q_N 。该指标 Q_N 综合了结构相似度、饱和度和亮度。实验证明, Q_N 较传统客观评价指标 MSE 和 Entropy,能够以较高的准确率有效地定量评价图像,与人眼主观评价结果一致,从而选择的图像有利于目标识别与检测和计算机进一步处理等。

参考文献:

[1]Alexander Toet, Maarten A Hoger vorst. Progress in color night vision[J].Optical Engineering, 2012, 51 (1): 010901-010901.
 [2]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]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,(05):1654-1659.
 [4]Zhaobin Wang, Yide Ma, Jason Gu, Multi-focus image fusion

using PCNN[J], Pattern Recognition,2010, 43 (6): 2003-2016.
 [5]LI Wei, ZHU Xue-feng. A New Image Fusion Algorithm based on Wavelet Packet Analysis and PCNN[C]. Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2005, 5297-5301.
 [6]瞿哲,肖刚,徐宁文,刁卓然. 基于场景识别的夜视图像彩色融合方法[J]. 计算机应用研究,2018,(02):1-2.
 [7]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,(04):39-41+57.
 [8]Alexander Toet. Color the night: applying daytime colors to nighttime imagery[C]. Proc of SPIE. 2003, 5081: 484800-1-11.
 [9]Gondal I, Murshed M. A novel color image fusion QoS measure for multi-sensor night vision applications[C]. Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on. IEEE, 2010: 399-404.
 [10]Panetta K, Bao L, Agaian S. A human visual "no-reference" image quality measure[J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2016, 19(3):34-38.
 [11]Oliva A, Torralba A. Modeling the shape of the scene: A holistic representation of the spatial envelope[J]. International journal of computer vision, 2001, 42(3): 145-175.
 [12]王建新,张有会,王志巍,张静,李娟.基于 HSI 颜色空间的单幅图像去雾算法[J].计算机应用,2014,(10):2990-2995.
 [13]Piella G, Heijmans H. A new quality metric for image fusion[C]. Image Processing, 2003. ICIP 2003. Proceedings. 2003 International Conference on. IEEE, 2003, 3: III-173.