

## 夜视抗晕光融合图像自适应分区质量评价

郭全民\* 柴改霞 李翰山

(西安工业大学电子信息工程学院 西安 710021)

**摘要:** 针对夜视晕光场景中, 高亮度晕光信息导致现有红外与可见光融合图像评价方法失效的问题, 该文提出一种自适应分区的融合图像质量评价方法。该方法根据可见光图像的晕光程度自动确定自适应系数, 并通过迭代计算可见光灰度图像的晕光临界灰度值, 将融合图像自动分为多个晕光区和非晕光区; 在晕光区由设计的晕光消除度指标评价融合图像的晕光消除效果; 在非晕光区从融合图像自身特性、对原始图像信息保留程度以及人眼视觉效果3方面评价融合图像纹理色彩等细节信息的增强效果; 通过对4种不同抗晕光算法的融合图像进行评价分析, 甄选出9种客观评价指标构成夜视抗晕光融合图像质量评价体系。不同夜视晕光场景下的实验结果表明, 所提方法能够全面、合理地评价红外与可见光融合的抗晕光图像质量, 解决了融合图像晕光消除越彻底客观评价结果反而越差的问题, 也适于评判不同抗晕光融合算法的优劣。

**关键词:** 融合图像; 图像质量评价; 夜视抗晕光; 自适应分区

**中图分类号:** TN911.73; TP391.41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2020)07-1750-08

**DOI:** [10.11999/JEIT190453](https://doi.org/10.11999/JEIT190453)

## Quality Evaluation of Night Vision Anti-halation Fusion Image Based on Adaptive Partition

GUO Quanmin CHAI Gaixia LI Hanshan

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** To solve the failure of existing evaluation methods of infrared and visible fusion image caused by high brightness halation information in night vision halation scene, a novel fusion image quality evaluation method based on adaptive partition is proposed. In this method, the adaptive coefficient is automatically determined according to the halation degree of visible image, and then, the fusion image is divided into halo regions and non-halo region by iterative calculation of the critical halation gray value. In the halo region, the effectiveness of halation elimination is evaluated by halation elimination index designed, while in the non-halo region, the enhancement effect of detailed information such as texture and color is evaluated from three aspects including: characteristics of fusion image itself, retention degree of original image information and human visual effect. Based on evaluation and analysis of fusion images obtained by 4 different anti-halation algorithms, nine objective indexes are selected to construct a quality evaluation system of night vision anti-halation fused image. Experimental results in different night vision halation scenes show that the proposed method could evaluate anti-halation image quality of infrared and visible fusion comprehensively and reasonably, and could solve the problem that the more thorough halation elimination of fusion image, the worse objective evaluation results. This method could also be suitable for evaluating merits and demerits of different anti-halation fusion algorithms.

**Key words:** Fusion image; Image quality evaluation; Night vision anti-halation; Adaptive partition

收稿日期: 2019-06-20; 改回日期: 2019-09-25; 网络出版: 2020-01-21

\*通信作者: 郭全民 guoqm@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61773305), 陕西省重点研发计划项目(2019GY-094)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61773305), The Shaanxi Provincial Key Research and Development Program (2019GY-094)

## 1 引言

夜间会车滥用远光灯导致的晕光现象，是引起夜间道路交通事故发生的重要原因之一，因此研究夜视抗晕光技术提高夜间驾驶安全性，受到了国内外专家学者的持续关注。相对于在前挡风玻璃增加偏振膜<sup>[1,2]</sup>、夜视红外成像<sup>[3-5]</sup>、像素点积分时长独立可控的面阵CCD图像传感器<sup>[6]</sup>、两路光积分时间不同的可见光图像融合<sup>[7]</sup>等方法，红外与可见光图像融合的夜视抗晕光方法<sup>[8-10]</sup>，晕光消除更彻底、图像视觉效果更优，但由于特殊的夜视晕光场景，融合图像消除晕光后，在晕光区域与原始图像明显不同，且晕光消除越彻底两者的差异越大，相似度越低，这与通常的红外与可见光融合方法<sup>[11,12]</sup>聚焦于获取更多原始图像的纹理色彩信息，提高细节清晰度明显不同，因而导致现有融合图像质量评价方法不适于评价消除晕光后的融合图像。

典型的无参考图像评价方法<sup>[13]</sup>通过客观指标评价融合图像自身质量。消除晕光后的融合图像，由于晕光区域高亮度信息被剔除，使反映图像亮度的均值降低，且晕光消除越彻底，晕光边界越不明显，对比度也越低，导致标准差、平均梯度和边缘强度等指标降低；但非晕光区域的暗处信息得到增强后，图像亮度、轮廓纹理、色彩细节又明显改善，使均值、标准差、平均梯度和边缘强度等指标提高。

常用的全参考图像评价方法<sup>[14]</sup>通过对原始图像的信息保留程度来评价融合图像质量。融合图像晕光消除越彻底，晕光信息保留越少，晕光区域与原始图像相似程度越低，使交叉熵等指标降低。

基于视觉系统的评价方法<sup>[15]</sup>从人眼视觉效果方面评价融合图像的质量。融合图像晕光消除越彻底，晕光区域中光晕的边缘、轮廓等信息保留越少，使结构相似度、边缘保持度等指标降低，但在非晕光区域却能保留更多的原始图像边缘、轮廓信息。

由上述可知，晕光区域高亮度信息的存在，导致现有评价方法无法在融合图像晕光区域作出正确、准确的评价，但对于非晕光区域依然有较好的评价效果。因此，本文在对夜视抗晕光融合图像特征分析的基础上，提出一种自适应分区图像质量评价方法，以准确评价晕光消除、细节信息增强的效果，达到全面、合理地评价融合图像质量。

## 2 夜视抗晕光融合图像特征及评价原理

夜视抗晕光图像融合的目的，与通常的红外与可见光图像融合不同，首要是消除高亮的晕光，再次是增强暗处纹理、色彩等细节信息。图1为市郊

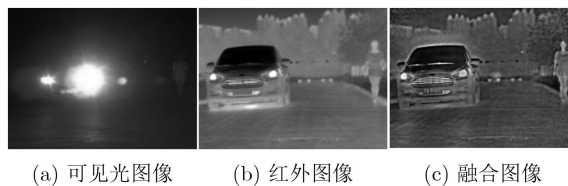


图1 原始图像及融合图像

道路对向来车开启远光灯相距约10 m处的原始图像及融合图像。

由图1可看到，夜视抗晕光融合图像与通常的红外与可见光融合图像相比，具有以下显著特征：(1)消除晕光后的融合图像与原始可见光图像差异显著，且晕光消除越彻底差异越大；(2)原始可见光图像的光晕梯度及明暗边界十分明显，融合图像在原晕光区域的梯度、边界不明显，且晕光消除越彻底越不明显；(3)原始可见光图像晕光部位的高亮度造成其它暗处部位更暗，细节信息更不易观察，但同时也使晕光部位周边区域的色彩纹理细节信息得到增强，有利于提高融合图像质量。

现有方法评价夜视抗晕光融合图像失效的根本原因是晕光区高亮度信息导致评价指标不能真实反映融合图像的质量。因此，综合考虑高亮度晕光造成晕光部位有效信息丢失的影响，以及晕光部位周边区域细节色彩信息得到增强的有利因素，提出对夜视抗晕光融合图像进行分区评价。在晕光区主要评价融合图像的晕光消除效果，融合图像与红外图像越相似，所含晕光信息越少，晕光消除越彻底；与可见光图像越相似，所含晕光信息越多，晕光消除越不彻底。在非晕光区，借鉴现有方法甄选合适的客观指标评价融合图像的细节、色彩的增强效果，实现对抗晕光融合图像质量的全面、客观评价。

## 3 自适应分区融合图像质量评价方法

基于上述分区评价原理，本文提出自适应分区的夜视抗晕光融合图像质量评价方法。

### 3.1 夜视抗晕光融合图像自适应分区

#### 3.1.1 自适应系数的确定与优化

晕光区域的高亮度信息量直接影响整幅图像的灰度值，而晕光信息量与晕光区面积正相关，则晕光区域面积间接影响整幅图像的灰度值。以会车时的晕光图像为研究对象，采集夜间不同类型道路车辆从远及近，晕光面积从小到大再变小的大量晕光图像，通过研究发现，自适应系数 $m$ 、晕光区与非晕光区的面积比 $s$ 之间负相关，由自适应系数 $m$ 与面积比 $s$ 构成点集 $(s_i, m_i)$ 知，二者接近式(1)的递减函数

$$m = a \times s^b + c \quad (1)$$

式中,  $a, b, c$ 为待辨识的常参数。采用非线性最小二乘法对3个参数进行估计, 误差平方和 $Q$ 为

$$Q = \sum_{i=1}^N [m_i - f(s_i, \theta)]^2 \quad (2)$$

式中,  $f$ 是参数 $\theta$ 的非线性模型。 $Q$ 达到极小值时参数 $a, b, c$ 的估计值分别为:  $-0.6701, 0.0741, 1.1750$ , 获得的拟合曲线称为基线

$$m = -0.6701s^{0.0741} + 1.1750 \quad (3)$$

点集 $(s_i, m_i)$ 的采样量越多, 拟合曲线越精确。选择位于基线外侧的大量图像向外扩张, 增加采样量直到晕光区分割效果满足人眼观察的临界点, 将分布在基线上、下外侧的边界点分别再次利用式(2)拟合得到基线上界和下界曲线, 基线上下界曲线内的分割效果均满足人眼视觉效果。为了获得最优分割效果, 将基线上下界内的点对应取均值得到点集 $(\bar{s}, \bar{m})$ , 拟合得最优曲线

$$m = -1.7336s^{0.0253} + 2.2243 \quad (4)$$

各拟合曲线如图2所示。

为了评判各曲线拟合优度<sup>[16]</sup>, 采用误差平方和SSE、均方根误差RMSE、拟合度 $R^2$ 指标评判曲线拟合效果。表1为基线、上下界曲线和最优曲线的拟合优度结果。

由表1可知, 最优曲线的SSE比另3条曲线降低了近乎1个数量级, 表明曲线拟合更好; RMSE减小了近乎50%, 表明拟合误差更小;  $R^2$ 也从0.95左右提高到了0.99近于1, 表明回归直线的拟合程度更好。综上, 最优曲线的分割效果最好。

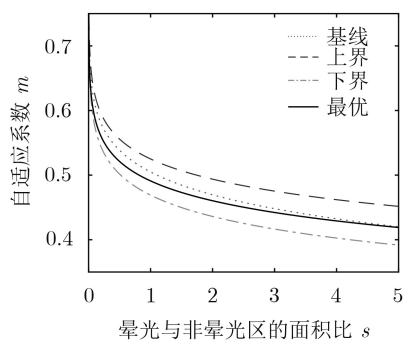


图2 自适应系数 $m$ 的拟合曲线

表1 曲线拟合优度

曲线	SSE	RMSE	$R^2$
基线	0.0481	0.0310	0.9487
上界	0.0293	0.0318	0.9566
下界	0.0304	0.0313	0.9559
最优	0.0042	0.0174	0.9910

### 3.1.2 晕光临界灰度值的确定及自动分区

晕光区的灰度值明显高于非晕光区, 因此需确定晕光与非晕光区交接处的晕光临界灰度值 $G_c$ 进行区域划分。通过设计的自适应迭代阈值法确定 $G_c$ 。

计算阈值 $T_{i+1}$

$$\left. \begin{aligned} T_{i+1} &= m(\mu_1 + \mu_2) \\ \mu_1 &= \frac{1}{L_1} \sum_{j=0}^{L_1-1} \ln(j) \\ \mu_2 &= \frac{1}{L_2} \sum_{j=L_1}^{L-1} \ln(j) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中,  $m$ 为自适应系数, 随晕光程度自动调节;  $\mu_1$ 和 $\mu_2$ 分别为经阈值 $T_i$ 将图像分割为区域 $R_1$ 和 $R_2$ 的灰度均值;  $\ln(j)$ 是第 $j$ 个像素的灰度值,  $L$ 为总像素数,  $L_1$ 和 $L_2$ 分别为区域 $R_1$ 和 $R_2$ 的像素数,  $L=L_1+L_2$ 。

通过式(5)进行迭代计算, 直到阈值不再变化时结束, 最新的阈值即为晕光临界灰度值 $G_c$ 。其中, 初始阈值 $T_0$

$$T_0 = 0.5(\ln_{\max} + \ln_{\min}) \quad (6)$$

式中,  $\ln_{\max}$ 和 $\ln_{\min}$ 分别为像素中最大和最小灰度值。

根据 $G_c$ 将图像自动分为多个晕光区 $\mathbf{A}_{Hn}$ 和非晕光区 $\mathbf{A}_{\bar{H}}$ 。 $\mathbf{A}_{Hn}$ 互不连通, 大小各异, 形状由晕光光束边界而定。因此, 利用像素间的连通性, 通过连通域标记法<sup>[17]</sup>可确定晕光区个数 $n$ 。标记后的图像中, 连通域按由上到下、由左至右出现的顺序被标以连续的自然数 $1, 2, \dots, n$ , 即晕光区数。多晕光区分割公式为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_H &= \{\mathbf{Y}(i, j) | \mathbf{Y}(i, j) \geq G_c\} \\ \mathbf{A}_{\bar{H}} &= \{\mathbf{Y}(i, j) | \mathbf{Y}(i, j) < G_c\} \\ \mathbf{A}_{Hn} &= \{\mathbf{Y}_{\text{label}}(i, j) | \mathbf{Y}_{\text{label}}(i, j) = n\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中,  $\mathbf{Y}(i, j)$ 为图像第 $i$ 行、第 $j$ 列的像素灰度值,  $\mathbf{Y}_{\text{label}}(i, j)$ 为图像连通域标记矩阵,  $\mathbf{A}_H$ 表示灰度值大于 $G_c$ 的所有像素点构成的区域,  $\mathbf{A}_{Hn}$ 表示第 $n$ 个晕光区,  $\mathbf{A}_{Hn} \in \mathbf{A}_H, n=1, 2, \dots$ 。

最后将二值图和原图进行“与”操作, 得到原图的多晕光区和非晕光区。对图1的原始图像及融合图像进行自适应分区, 结果如图3所示, 分割后的图像中共有3个晕光区, 剩余部分为非晕光区。

### 3.2 晕光消除度

为评价融合图像的晕光消除效果, 以融合图像的晕光区与红外、可见光图像的相似程度构造晕光消除度指标。从亮度、对比度、结构3方面表征融合图像与原图的相似度<sup>[18]</sup> $\text{SIM}_{R-FU}$ :

$$\text{SIM}_{R-FU} = \frac{(2\mu_R\mu_{FU} + C_1)(2\text{cov}_{R-FU} + C_2)}{(\mu_R^2 + \mu_{FU}^2 + C_1)(\sigma_R^2 + \sigma_{FU}^2 + C_2)} \quad (8)$$

式中,  $R$ 和 $FU$ 分别为参考图像和融合图像,  $R \in \{VI,$

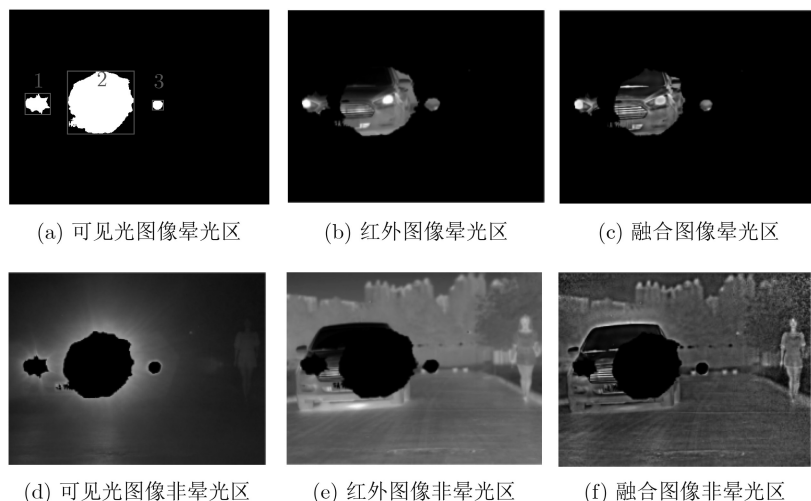


图3 分区图像

IR}, VI和IR分别为可见光和红外图像,  $\mu, \sigma$ 和  $cov$ 分别为均值、标准差和协方差,  $C_1$ 和 $C_2$ 为常数, 用来克服不稳定性问题。

融合图像在晕光区越接近红外图像, 晕光消除效果越好, 越接近可见光图像效果越差, 则晕光消除度  $D_{HE}$ 与 $SIM_{IR-FU}$ 正相关、与 $SIM_{VI-FU}$ 负相关。因 $SIM_{IR-FU}$ 和 $SIM_{VI-FU}$ 的取值范围均为 $[0, 1]$ , 则  $D_{HE}$ 与 $(1-SIM_{VI-FU})$ 正相关, 取 $SIM_{IR-FU}$ 与 $(1-SIM_{VI-FU})$ 的均值构造晕光消除度 $D_{HE}$ 为

$$D_{HE} = \frac{SIM_{IR-FU} + (1 - SIM_{VI-FU})}{2} \quad (9)$$

将式(8)代入式(9), 则晕光消除度 $D_{HE}$ 为

$$D_{HE} = \left[ \frac{(2\mu_{IR}\mu_{FU} + C_1)(2cov_{IR-FU} + C_2)}{2(\mu_{IR}^2 + \mu_{FU}^2 + C_1)(\sigma_{IR}^2 + \sigma_{FU}^2 + C_2)} - \frac{(2\mu_{VI}\mu_{FU} + C_1)(2cov_{VI-FU} + C_2)}{2(\mu_{VI}^2 + \mu_{FU}^2 + C_1)(\sigma_{VI}^2 + \sigma_{FU}^2 + C_2)} \right] + \frac{1}{2} \quad (10)$$

$D_{HE}$ 的取值范围为 $[0, 1]$ , 越接近1, 晕光消除越彻底; 越接近0, 晕光消除效果越差。

### 3.3 非晕光区评价指标

非晕光区没有高亮度晕光信息的干扰, 借鉴现有评价方法从不同角度评价融合图像, 并通过试验对比与分析, 甄选出合适的评价指标, 准确、合理地评判夜视抗晕光融合图像质量。

(1) 从融合图像自身特性评价融合图像的质量, 计算均值 $\mu$ 、标准差 $\sigma$ 、信息熵 $E$ 、平均梯度AG、边缘强度EI、空间频率SF等指标。

(2) 从融合图像对原始图像信息的保留程度评价融合图像的质量, 计算峰值信噪比PSNR、交叉熵CE、互信息MI、均方根误差RMSE等指标。

(3) 从人眼视觉效果评价融合图像的质量, 计算结构相似度SSIM和边缘保持度 $Q^{AB/F}$ 等指标。

## 4 评价结果及分析

为验证提出的自适应分区融合图像质量评价方法的有效性, 使用可见光相机Basler acA1280-60gc、远红外相机Gobi-640-GigE同时采集同一场景的可见光图像和红外图像, 通过千兆网口将图像数据传至图像处理平台, 处理器采用Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU@2.80GHz, 显卡采用NVIDIA GeForce GTX1050, 使用Windows8 64位操作系统, 在MATLAB2018中通过不同抗晕光融合算法进行处理, 从晕光区的晕光消除效果、非晕光区色彩细节增强效果两方面综合评价融合图像。图4为采用IHS、曲波、改进前后IHS-曲波变换<sup>[19]</sup>等4种抗晕光算法对图1原始红外、可见光图像的融合结果。

### 4.1 晕光区域评价结果及分析

4种融合图像的晕光消除度 $D_{HE}$ 如表2所示。

由表2可知, IHS变换的晕光消除效果最差, 因IHS变换光谱分辨率较低, 光谱扭曲性导致融合图像与原图的亮度、对比度、结构差异较大; 曲波变换的 $D_{HE}$ 较IHS提高了14.4%, 因曲波变换具有

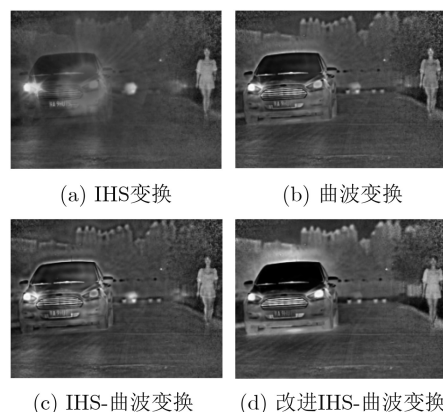


图4 融合结果

表2 晕光消除度

算法	$D_{HE}$
IHS	0.7431
曲波	0.8500
IHS-曲波	0.8978
改进IHS-曲波	0.9277

各向异性的支撑区间,能更好地保留图像的边缘、轮廓和纹理信息,与原图结构差异较小。

IHS-曲波变换的 $D_{HE}$ 较IHS提高了20.8%,因IHS-曲波变换将IHS空间下的亮度和色彩分量分开处理,仅将可见光图像的亮度分量与红外图像进行单通道融合,有效避免了光谱扭曲,提高了消晕效果;较曲波的 $D_{HE}$ 提高了5.6%,因IHS变换能丰富融合图像的色彩信息,故在曲波变换中融入IHS变换能改善晕光消除效果。综上,IHS-曲波变换的消晕效果比两种单一变换的好。

改进IHS-曲波变换的 $D_{HE}$ 较改进前提高了3.3%,因改进后的低频系数值自动调节融合策略<sup>[20]</sup>,相较于改进前的低频系数加权平均融合策略,能够将高亮度的晕光信息剔除,避免其参与融合过程,晕光消除较为彻底。

#### 4.2 非晕光区域评价结果及分析

对4种融合图像的非晕光区从3方面进行评价:

(1)从融合图像自身特性评价融合图像的质量。为了验证分区评价方法的有效性,与未分区的融合图像进行对比。表3为无参考图像评价指标的结果。

由表3可知,对每一种抗晕光融合算法,未分区融合图像的各项指标均比非晕光区的大,这是因为高亮度晕光信息,使未分区融合图像的均值变大,明暗对比度变大,导致标准差更大,熵更大,

一圈圈的光晕使反映纹理细节的平均梯度变大,晕光处明显的边界使边缘强度更大,导致空间域的活跃程度增大,使空间频率更大。综上,未分区融合图像因包含无用的高亮度晕光信息,导致客观评价结果失真,不能正确反映融合图像质量。

由表3还可知,对同一评价指标,随着抗晕光算法的改进,未分区融合图像的评价结果反而越差;分区后,非晕光区评价结果与理论分析相符合,能正确评价融合图像质量。因此,以融合图像非晕光区客观评价指标为研究对象,通过评价不同抗晕光算法的图像质量,筛选区分度大的客观指标构成评价体系。

表3中 $\sigma$ 和 $E$ 分布集中,整体变化趋势小,对融合图像质量的区分度较小,EI对改进前后的IHS-曲波变换不敏感,不适合作为评判指标; $\mu$ ,AG,SF数值分布合理,能有效区分各融合图像质量,适合作为评判指标。

(2)从融合图像对原始图像的信息保留程度评价融合图像质量。表4为全参考图像评价指标结果。

表4中曲波、IHS-曲波变换的 $RMSE_{FU-VI}$ 相近;IHS和曲波变换、改进前后的IHS-曲波变换的 $RMSE_{FU-IR}$ 分别相近;曲波、改进前后的IHS-曲波变换的 $PSNR_{FU-VI}$ 和 $PSNR_{FU-IR}$ 区分度小,且这4种指标分布集中,变化范围较小,不适合作为评判指标。而 $CE_{FU-VI}$ , $MI_{FU-VI}$ , $CE_{FU-IR}$ 和 $MI_{FU-IR}$ 的数值相对分散,变化范围较大,适合作为融合图像对原始图像保留程度的评判指标。

(3)从人眼视觉效果评价融合图像的质量。表5为基于视觉系统的融合图像评价指标结果。

表5中,曲波、改进前后的IHS-曲波变换的 $SSIM_{FU-VI}$ , $SSIM_{FU-IR}$ 分别依次提高了1.51%,

表3 无参考图像客观评价指标

算法	非晕光区融合图像						未分区融合图像					
	$\mu$	$\sigma$	$E$	AG	EI	SF	$\mu$	$\sigma$	$E$	AG	EI	SF
IHS	55.5114	23.7201	4.7715	1.6149	1.3009	9.1389	102.1417	25.9308	5.7862	3.9899	14.0576	10.1062
曲波	66.4604	28.0101	4.7845	3.5071	4.1962	14.5914	105.3180	38.7324	6.8762	6.8807	18.7757	21.1077
IHS-曲波	72.6815	30.0118	5.4760	3.7987	7.3702	17.1324	106.8972	39.4403	7.0812	7.7245	20.8070	22.9812
改进IHS-曲波	94.8522	30.7021	6.0882	4.3367	7.3808	19.3482	104.9308	38.4334	6.6463	6.3063	15.0324	19.3287

表4 全参考图像客观评价指标

算法	$CE_{FU-VI}$	$MI_{FU-VI}$	$RMSE_{FU-VI}$	$PSNR_{FU-VI}$	$CE_{FU-IR}$	$MI_{FU-IR}$	$RMSE_{FU-IR}$	$PSNR_{FU-IR}$
IHS	0.9961	1.1810	30.9468	58.7218	0.9831	1.0933	30.8392	60.3349
曲波	0.4655	1.9853	27.7219	63.7648	0.6850	1.6314	29.7961	65.5507
IHS-曲波	0.3018	2.5135	26.8683	64.9261	0.5247	3.1821	25.9617	67.8470
改进 IHS-曲波	0.2051	3.0012	23.7003	65.9410	0.3289	4.8819	24.9118	68.2431

表 5 视觉系统的客观评价指标

算法	SSIM <sub>FU-VI</sub>	SSIM <sub>FU-IR</sub>	$Q^{AB/F}$
IHS	0.5792	0.6004	0.3361
曲波	0.6632	0.7443	0.4048
IHS-曲波	0.6732	0.7516	0.4539
改进IHS-曲波	0.6761	0.7611	0.5740

0.98%, 0.43%, 1.26%, 指标数值变化小、区分度不大, 不适合作为评判指标; 4种算法的 $Q^{AB/F}$ 分别依次提高了20.44%, 12.13%, 26.46%, 表明该指标区分度大, 适合作为评判指标。

由上述融合图像晕光区和非晕光区客观评价指标的对比与分析可知, 晕光消除度 $D_{HE}$ 用于评价融合图像晕光消除效果; 均值 $\mu$ 、平均梯度AG、空间频率SF、交叉熵 $CE_{FU-VI}$ 和 $CE_{FU-IR}$ 、互信息 $MI_{FU-VI}$ 和 $MI_{FU-IR}$ 、边缘保持度 $Q^{AB/F}$ 等8种指标适合评价融合图像色彩、细节信息的增强效果; 两类共9种指标共同构成夜视抗晕光融合图像质量评价体系。9种指标均表明曲波变换优于IHS变换; IHS-曲波变换的视觉效果进一步改善; 改进IHS-曲波变换最优。

### 4.3 不同夜视晕光场景的评价结果

为验证本文所甄选的抗晕光融合图像质量评价体系具有普适性, 在两类不同的实际夜视晕光场景<sup>[21]</sup>进行试验。

第1类为市郊道路开启远光灯相距约5 m, 15 m

处2组试验, 与图1场景相同, 但距远光灯的远近不同。在同一场景下, 前方车辆越近, 晕光现象也越严重; 但距离太近, 留给驾驶员的预判和采取适当措施的时间又太短, 故考虑实际应用, 选取距离约为5 m晕光非常严重的图像及约15 m处晕光明显的图像来进行分析对比, 融合结果分别如图5、图6所示。

第2类为市内主干道多目标、多晕光的复杂场景试验, 随机选取了1组相距远光灯约20 m处的晕光图像进行验证, 融合结果图7所示。

图5—图7中图(a), 图(b)分别为原始可见光和红外图像, 图(c)—图(f)分别为IHS、曲波、改进前后IHS-曲波变换的融合结果。从图5—图7的图(c)—图(f)可以看出, 从左到右, 融合图像的晕光消除效果越好, 车辆、背景和道路边缘轮廓越清晰, 即IHS、曲波、IHS-曲波及改进IHS-曲波变换的融合结果依次变优。

在市郊、市内两类不同复杂场景下, 利用评价体系的9种指标进行评价, 因CE和PSNR数值越小性能越好, 且CE数值偏小, RMSE数值偏大, 采用 $CE^{-1}$ 和-RMSE表示更利于数据分析。图8(a)—图8(c)分别为市郊道路约5 m, 15 m处及市内主干道融合图像评价指标的雷达图。

从图8中可以看出, 随算法改进, 雷达图包围面积也越来越大, 9种指标能从不同角度反映抗晕光融合图像质量的好坏及不同算法的优劣, 验证了

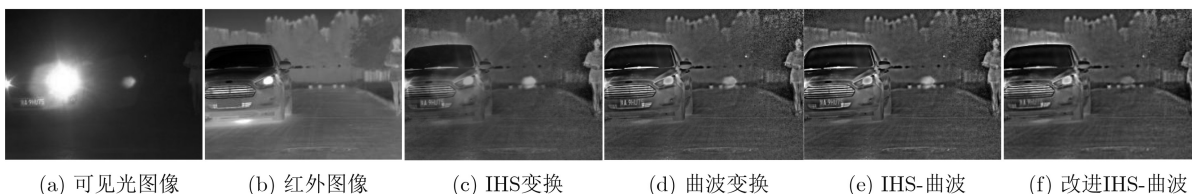


图 5 市郊道路相距约5 m处的融合图像

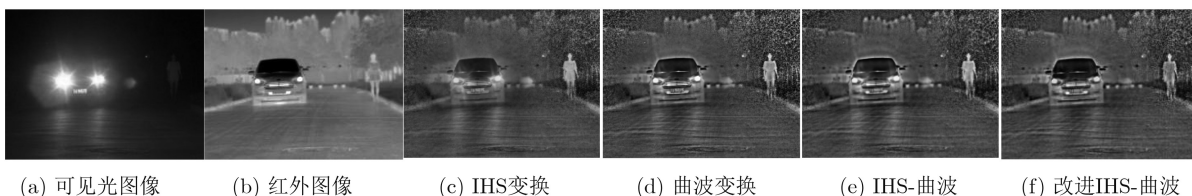


图 6 市郊道路相距约15 m处的融合图像

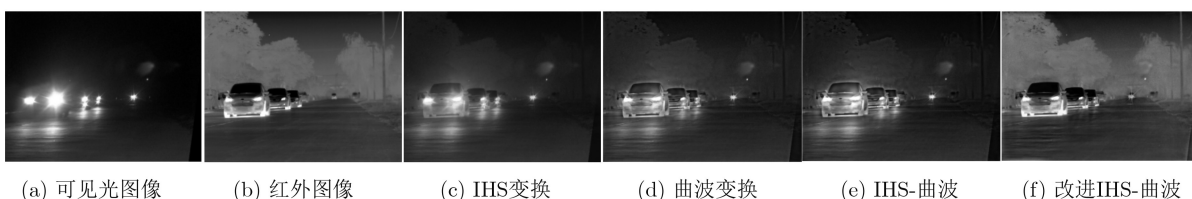


图 7 市内主干道相距约20 m处的的融合图像

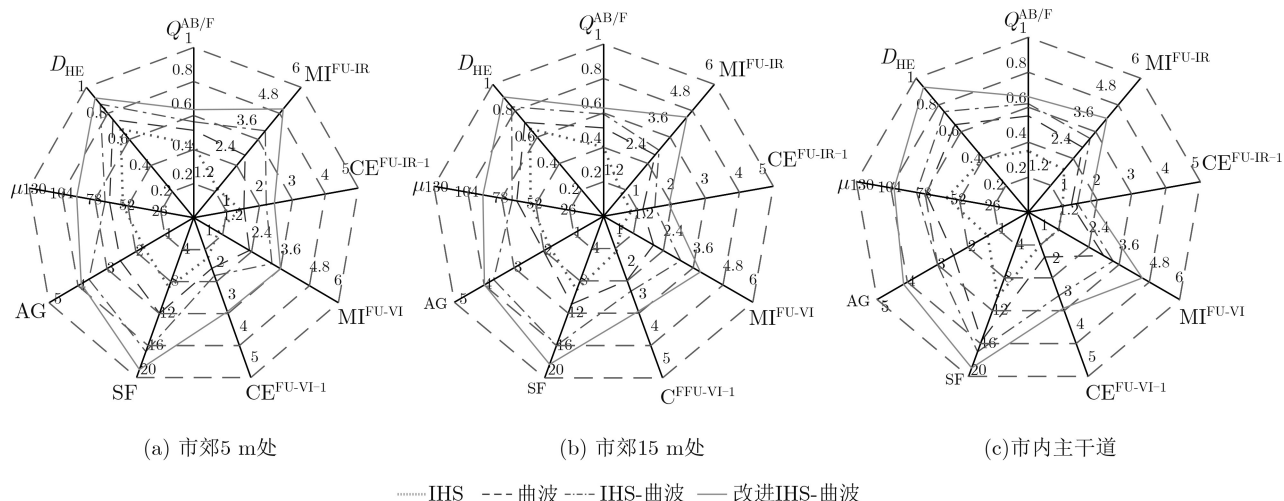


图8 不同晕光场景下的评价体系雷达图

提出的抗晕光图像质量评价体系针对不同夜视晕光场景具有一定的普适性。

## 5 结论

(1) 本文提出了一种自适应分区的夜视抗晕光融合图像质量评价方法。该方法将晕光区与非晕光区分开评价,解决了现有方法评价夜视抗晕光融合图像时,融合图像晕光消除越彻底评价结果反而越差的问题,也适用于评判不同红外与可见光融合的夜视抗晕光算法的优劣。

(2) 本文设计的自适应迭代阈值法能够根据可见光图像的晕光程度自动确定自适应系数,并通过迭代计算确定可见光灰度图像的晕光临界灰度值,将融合图像自动分为多个晕光区和非晕光区;在晕光区设计晕光消除度指标,用来评价融合图像晕光消除的效果;在非晕光区从多角度评价融合图像色彩、细节信息的增强效果。

(3) 采用本文方法对4种不同抗晕光算法得到的融合图像进行评价分析,甄选出9种评价指标构成完整的融合图像质量评价体系。实验结果表明,在多个不同真实晕光场景中,该评价体系均能正确地评价不同融合图像的质量、评判不同算法的优劣,验证了本文方法能全面、合理地评价红外与可见光融合的夜视抗晕光融合图像,具有一定的普适性。

## 参考文献

- [1] MÅRSELL E, BOSTRÖM E, HARTH A, *et al.* Spatial control of multiphoton electron excitations in InAs nanowires by varying crystal phase and light polarization[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(2): 907–915. doi: [10.1021/acs.nanolett.7b04267](https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b04267).
- [2] 朱美萍, 孙建, 张伟丽, 等. 高性能偏振膜的研制[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(12): 2908–2915. doi: [10.3788/OPE.2016](https://doi.org/10.3788/OPE.2016).
- [3] CHRZANOWSKI K. Review of night vision technology[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(2): 153–181. doi: [10.2478/s11772-013-0089-3](https://doi.org/10.2478/s11772-013-0089-3).
- [4] KWAK J Y, KO B C, and NAM J Y. Pedestrian tracking using online boosted random ferns learning in far -infrared imagery for safe driving at night[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation System*, 2017, 18(1): 69–81. doi: [10.1109/TITS.2016.2569159](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2569159).
- [5] JEONG M R, KWAK J Y, SON J E, *et al.* Fast pedestrian detection using a night vision system for safety driving[C]. The 11th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, Singapore, 2014: 69–72. doi: [10.1109/CGiV.2014.25](https://doi.org/10.1109/CGiV.2014.25).
- [6] BOSIERS J T, KLEIMANN A C, VAN KUIJK H C, *et al.* Frame transfer CCDs for digital still cameras: Concept, design, and evaluation[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2002, 49(3): 377–386. doi: [10.1109/16.987106](https://doi.org/10.1109/16.987106).
- [7] 王健, 高勇, 雷志勇, 等. 基于双CCD图像传感器的汽车抗晕光方法研究[J]. *传感技术学报*, 2007, 20(5): 1053–1056. doi: [10.3969/j.issn.1004-1699.2007.05.023](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-1699.2007.05.023).
- [8] GUO Quanmin and LI Xiaoling. Car anti-blooming method based on visible and infrared image fusion[J]. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2015(4): 115–121.
- [9] HU Haimiao, WU Jiawei, LI Bo, *et al.* An adaptive fusion

2412.2908.

ZHU Meiping, SUN Jian, ZHANG Weili, *et al.* Development of high performance polarizer coatings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2908–2915. doi: [10.3788/OPE.20162412.2908](https://doi.org/10.3788/OPE.20162412.2908).

- algorithm for visible and infrared videos based on entropy and the cumulative distribution of gray levels[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(12): 2706–2719. doi: [10.1109/TMM.2017.2711422](https://doi.org/10.1109/TMM.2017.2711422).
- [10] QIAO Tiezhu, CHEN Lulu, PANG Yusong, *et al.* Integrative multi-spectral sensor device for far-infrared and visible light fusion[J]. *Photonic Sensors*, 2018, 8(2): 134–145. doi: [10.1007/s13320-018-0401-4](https://doi.org/10.1007/s13320-018-0401-4).
- [11] 陈清江, 张彦博, 柴昱洲, 等. 有限离散剪切波域的红外可见光图像融合[J]. *中国光学*, 2016, 9(5): 523–531. doi: [10.3788/CO.20160905.0523](https://doi.org/10.3788/CO.20160905.0523).  
CHEN Qingjiang, ZHANG Yanbo, CHAI Yuzhou, *et al.* Fusion of infrared and visible images based on finite discrete shearlet domain[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(5): 523–531. doi: [10.3788/CO.20160905.0523](https://doi.org/10.3788/CO.20160905.0523).
- [12] 江泽涛, 吴辉, 周晓玲. 基于改进引导滤波和双通道脉冲发放皮层模型的红外与可见光图像融合算法[J]. *光学学报*, 2018, 38(2): 0210002. doi: [10.3788/AOS201838.0210002](https://doi.org/10.3788/AOS201838.0210002).  
JIANG Zetao, WU Hui, and ZHOU Xiaoling. Infrared and visible image fusion algorithm based on improved guided filtering and dual-channel spiking cortical model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 0210002. doi: [10.3788/AOS201838.0210002](https://doi.org/10.3788/AOS201838.0210002).
- [13] LI Leida, XIA Wenhan, LIN Weisi, *et al.* No-reference and robust image sharpness evaluation based on multiscale spatial and spectral features[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2017, 19(5): 1030–1040. doi: [10.1109/TMM.2016.2640762](https://doi.org/10.1109/TMM.2016.2640762).
- [14] JAIN A and BHATEJA V. A full-reference image quality metric for objective evaluation in spatial domain[C]. 2011 International Conference on Communication and Industrial Application, Kolkata, India, 2011. doi: [10.1109/ICCIndA.2011.6146668](https://doi.org/10.1109/ICCIndA.2011.6146668).
- [15] CHEN Guo, LI Li, JIN Weiqi, *et al.* Image contrast enhancement method based on display and human visual system characteristics[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(7): 1813–1823. doi: [10.1364/AO.58.001813](https://doi.org/10.1364/AO.58.001813).
- [16] XU Hailong, CHEN Yong, GU Dexian, *et al.* Evaluating goodness-of-fit in comparison of different expressions for length-weight relationship in fishery resources[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 651-653: 337–343. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.337](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.651-653.337).
- [17] 徐正光, 鲍东来, 张利欣. 基于递归的二值图像连通域像素标记算法[J]. *计算机工程*, 2006, 32(24): 186–188, 225. doi: [10.3969/j.issn.1000-3428.2006.24.067](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2006.24.067).  
XU Zhengguang, BAO Donglai, and ZHANG Lixin. Pixel labeled algorithm based on recursive method of connecting area in binary images[J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(24): 186–188, 225. doi: [10.3969/j.issn.1000-3428.2006.24.067](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-3428.2006.24.067).
- [18] 叶盛楠, 苏开娜, 肖创柏, 等. 基于结构信息提取的图像质量评价[J]. *电子学报*, 2008, 36(5): 856–861. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.05.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.05.005).  
YE Shengnan, SU Kaina, XIAO Chuangbai, *et al.* Image quality assessment based on structural information extraction[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2008, 36(5): 856–861. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.2008.05.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.2008.05.005).
- [19] 郭全民, 王言, 李翰山. 改进IHS-Curvelet变换融合可见光与红外图像抗晕光方法[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1126002. doi: [10.3788/IRLA201847.1126002](https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1126002).  
GUO Quanmin, WANG Yan, and LI Hanshan. Anti-halation method of visible and infrared image fusion based on improved IHS-Curvelet transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1126002. doi: [10.3788/IRLA201847.1126002](https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1126002).
- [20] 郭全民, 董亮, 李代娣. 红外与可见光图像融合的汽车抗晕光系统[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(8): 0818005. doi: [10.3788/IRLA201746.0818005](https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0818005).  
GUO Quanmin, DONG Liang, and LI Daidi. Vehicles anti-halation system based on infrared and visible images fusion[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0818005. doi: [10.3788/IRLA201746.0818005](https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0818005).
- [21] YU Tianshu and WANG Ruisheng. Scene parsing using graph matching on street-view data[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2016, 145: 70–80. doi: [10.1016/j.cviu.2016.01.004](https://doi.org/10.1016/j.cviu.2016.01.004).
- 郭全民: 男, 1974年生, 博士, 教授, 研究方向为智能感知与信息融合、图像处理及机器视觉。  
柴改霞: 女, 1993年生, 硕士, 研究方向为图像处理及机器视觉。  
李翰山: 男, 1986年生, 博士, 教授, 研究方向为智能传感与信息处理、图像处理及机器视觉。

责任编辑: 陈 倩