

改进 IHS–Curvelet 变换融合可见光与红外图像抗晕光方法

郭全民,王 言,李翰山

(西安工业大学 电子信息工程学院,陕西 西安 710021)

摘要:为了解决夜间会车滥用远光灯造成驾驶员晕光的问题,提出一种在 IHS 色彩空间下改进 Curvelet 变换融合可见光与红外图像的抗晕光方法。该方法通过改进 Curvelet 变换实现图像二维细节信息的有效表达,提高图像清晰度,其中提出的低频系数权值自动调节融合策略能够将晕光信息剔除,避免其参与融合过程;与 IHS 变换相结合能够保留原图中的色彩信息,避免色彩失真。对实验结果的主客观分析表明,该方法消除晕光比较彻底,与 IHS–小波融合相比,融合图像的标准差、平均梯度、边缘强度、信息熵分别提高了 47.15%、53.10%、52.46%、4.45%,对比度和清晰度显著提升,细节信息也更加丰富,人眼视觉效果更好,有利于驾驶员观察前方路况,提前做出预判,消除安全隐患,提高夜间行车的安全性。

关键词: 抗晕光; 图像融合; IHS 色彩空间; Curvelet 变换

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1126002

Anti-halation method of visible and infrared image fusion based on improved IHS–Curvelet transform

Guo Quanmin, Wang Yan, Li Hanshan

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

Abstract: In order to solve the problem of driver halation caused by the abuse of high beam lights at night, the anti-halation method of visible and infrared image fusion was proposed based on improved Curvelet transform in IHS color space. The method could effectively express the two-dimensional detail information of the image by improving the Curvelet transform, and improved the image clarity. The proposed fusion strategy of self-adjusting low-frequency coefficient weights could remove the halation information and avoid its participation in the fusion process. The color information in the original image was preserved by combining with the IHS transform to avoid color distortion. Subjective and objective analysis of the experiment results show that the method can eliminate the halation more completely. Compared with IHS-wavelet fusion, standard deviation, average gradient, edge intensity and entropy of the fusion image increase by 47.15%, 53.10%, 52.46% and 4.45%, respectively, its contrast and clarity are significantly enhanced, the details are also more abundant, and the visual effect of the human eye is better. The method is helpful for the driver to observe the road condition ahead, make judgment in advance, eliminate safe hidden trouble and improve the safety of night driving.

Key words: anti-halation; image fusion; IHS color space; Curvelet transformation

收稿日期:2018-06-10; 修订日期:2018-07-20

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM8326);陕西省教育厅科研计划项目(11JK0989)

作者简介:郭全民(1974-),男,教授,硕士生导师,博士,主要从事智能传感与信息融合、图像处理及机器视觉方面的研究。

Email: guoqm@163.com

0 引言

夜间会车时,远光灯的不合理使用会使对向车辆驾驶员感到非常刺眼,进而不能及时发现并处理前方路况信息。这种滥用远光灯导致的晕光问题,极易引发交通事故,据公安部门统计,国内发生在夜间的交通事故中,与远光灯使用不当有关的达到 30%~40%,且该比例有不断上升的趋势^[1]。因此,消除晕光以提高夜间驾驶安全性是目前亟待解决的问题。

为了消除晕光对夜间行车的影响,在双向车道中间设置植物隔离带或隔光板,可从根本上消除晕光,但受城建规划等因素影响,一般仅应用于城市主干道和高速公路,无法广泛应用。因此,为机动车配置主动消除晕光的装置,成为汽车制造商和研究人员关注的重点。汽车制造商为高档汽车配备了主动/被动红外夜视仪^[2],利用物体反射或自身辐射的红外线成像来解决晕光问题,红外图像具有无晕光的优点,但存在色彩单一、细节信息严重缺失、视觉效果不理想等问题。参考文献[3]在机动车前大灯及前挡风玻璃上加装偏振片能完全消除晕光,但偏振片会削弱光照强度造成暗处重要细节信息观察困难,且要求对方车上同样安装有方向严格一致的偏振装置,难以普及。参考文献[4]利用两路积分时间不同的可见光相机采集同一场景融合成一幅图像,扩大了图像的动态范围,但消除晕光不彻底。结合红外图像无晕光、可见光图像色彩细节信息丰富等优点的多谱段图像融合技术^[5-6],能有效提高夜视场景下目标与背景的信息,有助于增强夜间会车晕光融合图像的细节信息,但无法消除晕光现象。参考文献[7]利用小波彩色图像融合算法增强夜视场景清晰度,提出可将其用于抑制微光图像中的晕光。参考文献[8]采用 IHS 加小波变换融合可见光和红外图像来消除晕光,融合图像在降低晕光的同时,具有丰富的色彩和细节信息。但以上融合方法在低频系数融合时采用的(加权)平均融合策略使晕光信息仍参与了图像融合,导致晕光依然存在,无法彻底消除;采用的小波变换因不具有各向异性特性,不能有效表达二维信息中的边缘、轮廓等细节信息,故融合图像的清晰度仍有待提高。

为了彻底地消除晕光,提出了一种红外低频系

数权值随可见光低频系数自动调节的融合策略。在低频系数融合时,能主动剔除晕光信息,避免其参与融合过程,故能比较彻底地消除晕光。Curvelet 变换^[9]、Contourlet 变换、NSCT 等多尺度几何变换方法均能克服二维小波基不具有各向异性的缺陷,进一步提高融合图像清晰度。但 Contourlet 变换不具有平移不变性,会产生伪吉布斯现象,导致图像失真;NSCT 在频域隔层细分削弱了对图像稀疏表示能力,实现过程相对复杂,运算量大;第二代离散 Curvelet 变换的 Wrap 实现算法,在很大程度上减少了冗余,实现方法更简单、快速。因此,文中提出了一种在 IHS 色彩空间下通过改进 Curvelet 变换来融合可见光与红外图像的抗晕光方法,以获得符合人眼观察效果的清晰图像。

1 可见光与红外图像融合的抗晕光原理

可见光与红外图像各自成像特性具有很强的互补性。可见光图像具有光谱信息丰富、分辨率高、细节纹理清晰的优点,但在低照度下拍摄强光源时存在晕光问题;红外图像穿透性强,不受光照条件影响,夜晚拍摄强光源不会产生晕光,但分辨率低,细节模糊,色彩单一。因此,文中结合可见光与红外图像各自优点,采用图像处理方法得到无晕光、色彩纹理清晰并适合人眼观察的融合图像。

将可见光图像由原始 RGB 色彩模式转换到 IHS 色彩空间,得到其亮度 I、色调 H 和饱和度 S3 个分量,可观察到晕光信息主要包含在亮度分量 I 中,因此文中仅对亮度分量 I 与红外图像进行单通道融合,与 3 个通道同时融合相比能降低算法的运算复杂度,提高系统的处理速度;同时,将包含晕光信息的亮度分量和不包含晕光信息的色彩分量分开处理,能有效避免图像的色彩失真,使融合图像更符合人眼观察。

通过改进 Curvelet 变换来融合可见光亮度分量和红外图像。Curvelet 分解后的低频系数包含着图像轮廓纹理等主要信息,相当于一定尺度下对原始图像的近似,故可认为可见光的晕光信息主要包含在低频系数中,提出的低频系数权值自动调节融合策略,在图像融合时摒弃晕光信息,避免其参与融合过程,能够比较彻底地消除晕光且最大程度地保留

图像的原始信息;而高频系数反映了图像的边缘、轮廓等显著特征^[10],故高频系数采用模值取大的融合策略,能够保留更多更清晰的纹理细节信息。

2 改进 IHS-Curvelet 变换的抗晕光实现

为了减少原始图像自身因素及拍摄过程中环境因素对图像融合的影响,在融合前先对两路图像进行滤波、配准、增强等预处理操作,然后对可见光图像进行 IHS 正变换得到 I、H、S3 个分量,再对 I 分量和红外图像分别进行 Curvelet 分解得到各自的低频与高频系数,并采用权值自动调节策略融合低频系数和模值取大策略融合高频系数,最后对低频、高频融合系数进行 Curvelet 重构得到新的亮度分量 I', 将其与原始的色调 H、饱和度 S 分量进行 IHS 逆变换得到最终的融合图像。整个图像融合过程如图 1 所示。

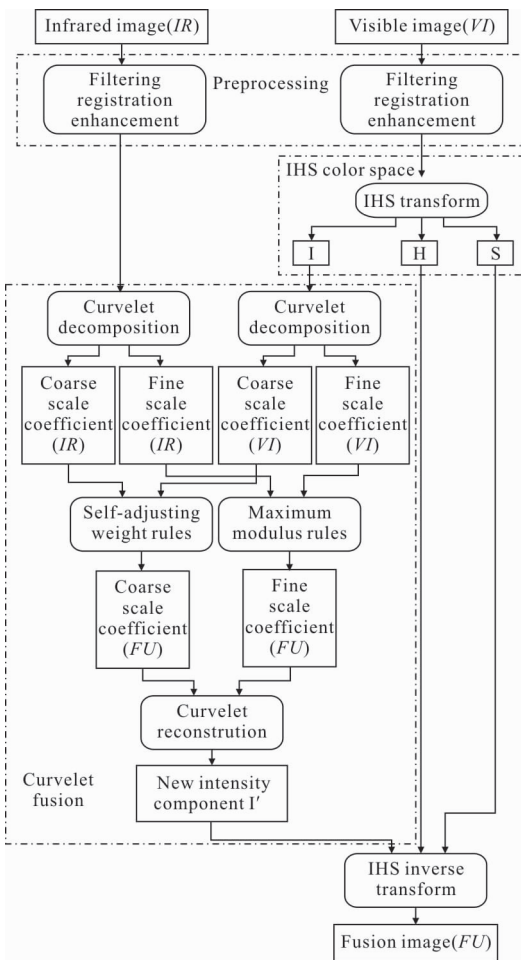


图 1 图像融合过程

Fig.1 Image fusion process

2.1 图像预处理

使用可见光相机和红外相机,同时采集夜间对向来车开启远光灯的同一晕光场景,图 2(a)为原始红外图像,图像没有晕光现象,但细节信息模糊、对比度较差且色彩单一;图 2(b)为原始可见光图像,图像整个背景较暗,晕光以外的其他细节信息很难观察。此外,由于两幅图像来自不同传感器,在空间位置上存在一定差异,因此在融合前要对图像进行滤波、配准、增强等预处理操作。为了消除红外图像中噪声,同时使图像信息损失达到最小,采用 3×3 模板的均值滤波来滤除噪点,如图 2(c)所示;然后以红外图像为参考,采用互相关加仿射变换法^[11]对可见光图像进行配准,如图 2(d)所示;为了增强图像暗处细节信息,对滤波后的红外图像及配准后的可见光图像做 MSRCR 图像增强^[12],如图 2(e)、图 2(f)所示。



(a) 红外图像

(a) Infrared image



(b) 可见光图像

(b) Visible light image



(c) 滤波后的红外图像

(c) Filtered infrared image



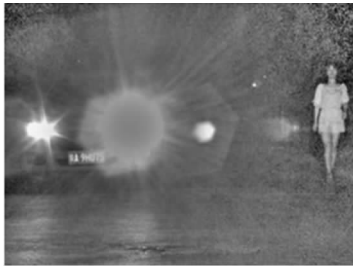
(d) 配准后的可见光图像

(d) Registered visible light image



(e) 增强后的红外图像

(e) Enhanced infrared image



(f) 增强后的可见光图像

(f) Enhanced visible light image

图 2 图像预处理

Fig.2 Image preprocessing

2.2 改进 HIS-Curvelet 变换的图像融合

对预处理后的可见光和红外图像进行 IHS 色彩空间下改进 Curvelet 变换融合,按顺序分为以下 6 步。

(1) 可见光图像转换到 IHS 色彩空间

使用 IHS 正变换公式,将可见光图像由 RGB 转换到 IHS 色彩空间,得到亮度分量 I、色度分量 H 和饱和度分量 S^[13]:

$$\begin{bmatrix} I \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 & -\sqrt{2}/6 \\ 1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$H = \arctan \left(\frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2)$$

$$S = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} \quad (3)$$

式中: v_1, v_2 为中间变量。

(2) 亮度分量 I 及红外图像 Curvelet 分解

由于待处理的可见光亮度分量 I 和红外图像均为数字图像,因此采用 Curvelet 变换的二维离散形式进行分解^[14]:

$$C^D(j, l, k) = \sum_{0 \leq t_1, t_2 < n} f[t_1, t_2] \overline{\varphi_{j, l, k}^D[t_1, t_2]} \quad (4)$$

式中: $f[t_1, t_2]$ 为笛卡尔坐标系下的输入,其中 $0 \leq t_1; t_2 < n$; $\varphi_{j, l, k}^D[t_1, t_2]$ 为 Curvelet 函数,其中 D 表示离散, j 表示 Curvelet 分解的尺度, l 表示方向, k 表示位置。

使用公式(4)对可见光图像亮度分量 I 和红外图像进行 Curvelet 分解,得到各自的低频系数 $C_0^{VI}(k_1, k_2)$ 、 $C_0^{IR}(k_1, k_2)$ 和不同尺度、不同方向下的高频系数 $C_{j,l}^{VI}(k_1, k_2)$ 、 $C_{j,l}^{IR}(k_1, k_2)$, 其中上标 VI 表示可见光, IR 表示红外。

(3) 低频系数融合

可见光的晕光信息主要包含在其低频系数中,故低频系数的融合策略要以消除晕光为目的。文中消除晕光的基本思想是:融合图像在晕光部分主要取红外图像信息,在非晕光部分取两者信息的平均。对可见光图像进行处理时发现,晕光部分的灰度值明显高于未晕光部分,经过 Curvelet 分解后其低频系数矩阵在晕光对应位置的值也明显大于其他地方。因此,文中设计了一种红外低频系数权值随可见光低频系数自动调节的融合策略,构造两者的函数关系如下:

$$\alpha(k_1, k_2) = \frac{1}{2\pi} \arctan(l(C_0^{VI}(k_1, k_2) - m) + n) \quad (5)$$

式中: $\alpha(k_1, k_2)$ 为红外低频系数的权值; $C_0^{VI}(k_1, k_2)$ 为可见光低频系数, $C_0^{VI}(k_1, k_2) \in [0, 6]$; m 为低频系数矩阵中晕光与非晕光交界处的临界值; n 为临界值处的红外低频系数权值; l 为临界变化率,反映了 $\alpha(k_1, k_2)$ 在晕光与非晕光交界处变化的剧烈程度。经多次计算优化对比, m 取 3, n 取 0.75, l 取 2 时,图像融合结果达到最优,其函数关系曲线如图 3 所示。

由函数关系曲线可知,当可见光低频系数 $C_0^{VI}(k_1,$

$k_2) < 2$, 即非晕光处, 红外低频系数权值 $\alpha(k_1, k_2)$ 接近 0.5, 可见光低频系数权值为 $[1 - \alpha(k_1, k_2)]$, 也接近 0.5, 表示融合图像在非晕光处取两者信息的平均, 可最大程度地同时保留两种图像的有用信息; 当 $2 \leq C_0^{VI}(k_1, k_2) < 4$, 即晕光过渡区, 随 $C_0^{VI}(k_1, k_2)$ 的增大, $\alpha(k_1, k_2)$ 由接近 0.5 逐渐增大到接近 1, 表示随着晕光逐渐从无到有, 红外图像所占比重越来越大, 可见光所占比重越来越小, 这样便可有效去除晕光信息, 保留有用信息; 在 $C_0^{VI}(k_1, k_2) \geq 4$, 即严重晕光区, 红外低频系数权值 $\alpha(k_1, k_2)$ 接近 1, 可见光低频系数权值接近 0, 表示融合图像在严重晕光处几乎全部取红外图像信息, 这样就可以阻止几乎全部的晕光信息参与图像融合。

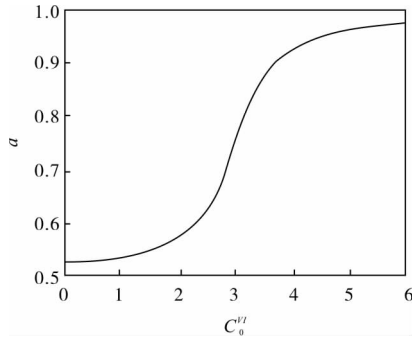


图 3 α 与 C_0^{VI} 的函数关系

Fig.3 Function relationship of α and C_0^{VI}

在可见光低频系数 $C_0^{VI}(k_1, k_2)$ 的整个变化区间, 红外低频系数权值 $\alpha(k_1, k_2)$ 随着可见光低频系数 $C_0^{VI}(k_1, k_2)$ 的增大而增大, 且呈非线性连续变化。使用公式(5)融合可见光和红外低频系数, 可比较彻底地消除晕光, 融合图像的低频系数可表示为:

$$C_0^{FU}(k_1, k_2) = \alpha(k_1, k_2)C_0^{IR}(k_1, k_2) + [1 - \alpha(k_1, k_2)]C_0^{VI}(k_1, k_2) \quad (6)$$

(4) 高频系数融合

高频系数反映了图像的边缘、纹理、轮廓等细节信息。可见光和红外图像的高频部分差异较大, 故高频系数的融合策略要以增强融合图像的细节信息为目的。通常模值较大的高频系数包含了更多更清晰的细节信息, 因此, 采用模值取大的策略来融合可见光和红外高频系数, 融合图像的高频系数可表示为:

$$C_{j,l}^F(k_1, k_2) = \max \left\{ \left| C_{j,l}^{IR}(k_1, k_2) \right|, \left| C_{j,l}^{VI}(k_1, k_2) \right| \right\} \quad (7)$$

(5) Curvelet 重构

频域的离散 Curvelet 变换^[14]为:

$$C^D(j, l, k) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum \hat{f}[\omega_1, \omega_2] \overline{\hat{\varphi}_{j,l,k}^D[\omega_1, \omega_2]} \quad (8)$$

式中: $\hat{f}[\omega_1, \omega_2]$ 为频域的输入; $\hat{\varphi}_{j,l,k}^D[\omega_1, \omega_2]$ 为频域的 Curvelet 函数。

使用公式(8)对融合后的高低频系数进行重构, 得到的融合图像作为可见光图像的新亮度分量 I' 。

(6) IHS 色彩空间转换到 RGB 色彩空间

对可见光图像的新亮度分量 I' 和原始的色调 H、饱和度 S 分量进行 IHS 逆变换, 获得适合显示器显示的 RGB 色彩图像, 即为最终抗晕光融合图像。

IHS 逆变换公式^[15]:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 1 & \sqrt{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I' \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$v_1 = S \cos H \quad (10)$$

$$v_2 = S \sin H \quad (11)$$

3 实验结果及分析

为了验证文中算法的有效性, 选取 IHS 变换、小波变换、IHS-小波变换^[8]、Curvelet 变换、传统的低频系数加权平均 IHS-Curvelet 变换 5 种不同算法与文中算法进行比较, 融合结果如图 4 所示。

从融合结果可以看出, 使用了 IHS 变换的图 4(a)、图 4(d)、图 4(e) 和图 4(f), 融合图像中的人物、车牌等都有清晰的色彩, 而未使用 IHS 变换的图 4(b)、图 4(c) 几乎成为灰度图像, 丢失了大量的色彩信息, 表明可见光与红外图像融合时, 采用 IHS 变换能很好地保留原图中的色彩信息, 避免色彩失真。

对比图 4(a)、图 4(d) 和图 4(f), 可以看出: 3 种算法融合图像的清晰度依次递增, 图 4(a) 中的车辆轮廓、车牌、道路边缘及背景建筑物模糊不清, 图像清晰度低; 图 4(d) 中的清晰度较图 4(a) 有所提升, 边缘轮廓等细节信息较为清楚; 图 4(f) 中图像清晰度又明显优于图 4(d), 车辆轮廓、车牌、道路边缘及背景建筑物清晰可见, 表明在 IHS 变换的基础上, 因小

波变换具有可聚焦到信号任意细节的特点, 融入小波变换能够提高图像的清晰度; Curvelet 变换因具有各向异性的支撑区间, 故能用更少的系数表示曲线, 使其比小波变换能更好地保留图像信息, 融合图像清晰度更高。

对比图4(e)传统低频系数加权平均和图 4(f)采用文中低频系数权值自动调节的两种 IHS-Curvelet



(a) IHS 变换
(a) IHS transform



(b) 小波变换
(b) Wavelet transform



(c) Curvelet 变换
(c) Curvelet transform



(d) IHS-小波变换
(d) IHS-wavelet transform



(e) 传统的 IHS-Curvelet 变换
(e) Traditional IHS-Curvelet transform



(f) 文中算法
(f) Proposed algorithm

图 4 融合结果

Fig.4 Fusion results

变换, 可以看出图 4(e)中仍然存在晕光, 而图 4(f)中的晕光基本完全消除, 这是由于传统的加权平均低频系数融合策略中晕光信息仍参与了图像融合, 造成融合结果不理想, 而文中算法所使用的低频系数权值自动调节融合策略在融合过程中摒弃了晕光信息, 能更为彻底地消除融合图像中的晕光。

为了客观地评价文中算法效果, 采用标准差、平均梯度、边缘强度、信息熵、均值等 5 个通用评价指标^[16]对上述 6 种算法的融合图像进行数据分析, 结果如表 1 所示。

从表 1 中可以看到, 文中算法融合图像的标准差较 IHS 变换、小波变换、IHS-小波变换依次提高了 61.04%、48.75%、47.15%, 标准差的显著提升表明文中算法使用的 Curvelet 变换比 IHS 和小波变换融合图像的灰度范围明显增大, 对比度大幅提高; 较 Curvelet 变换提高了 10.26%, 表明在 Curvelet 变换的基础上结合使用 IHS 变换, 能使融合图像的对比度有明显提高; 较低频系数加权平均的 IHS-Curvelet 变换提高了 6.95%, 表明在进行 IHS-Curvelet 变换时采用文中低频系数权值自动调节的融合策略相比传统的加权平均低频系数融合策略可进一步提高图像对比度。

表 1 融合图像的客观评价

Tab.1 Objective evaluation of fusion images

Evaluation index	IHS	Wavelet	IHS-Wavelet	Curvelet	Traditional IHS-Curvelet	Proposed algorithm
Standard deviation	26.520 2	28.711 5	29.022 7	38.732 0	39.933 7	42.707 6
Average gradient	4.328 3	4.562 4	4.626 9	6.875 3	7.023 0	7.083 6
Edge intensity	45.824 0	48.215 9	48.767 7	67.530 2	73.452 0	74.352 3
Entropy	6.797 2	6.826 4	6.886 3	7.045 1	7.084 3	7.192 7
Mean value	107.162 6	103.933 4	105.395 1	103.385 6	110.430 2	104.706 0

文中算法融合图像的平均梯度、边缘强度较 IHS 变换、小波变换、IHS-小波变换依次分别提高了 63.66%、62.26%、55.26%、54.21%、53.10%、52.46%，这两项指标同样也显著提升，表明使用文中算法的融合图像边缘、轮廓、纹理等细节信息比 IHS 变换和小波变换算法的更加丰富，图像清晰度大幅提升；较 Curvelet 变换分别提高了 3.03%、10.10%，表明在 Curvelet 变换的基础上使用 IHS 变换，能使融合图像的清晰度有一些提高；较低频系数加权平均的 IHS-Curvelet 变换分别提高了 0.86%、1.23%，表明在进行 IHS-Curvelet 变换时，采用文中低频系数权值自动调节融合策略较传统的加权平均低频系数融合策略，图像清晰度又有稍微的提高。

文中算法融合图像的信息熵较 IHS 变换、小波变换、IHS-小波变换依次提高了 5.82%、5.37%、4.45%；较 Curvelet 变换、低频系数加权平均的 IHS-Curvelet 变换依次提高了 2.10%、1.53%，表明使用 Curvelet 变换比 IHS 和小波变换能保留更多的原图信息，减少信息的丢失；而文中算法较以上几种算法保留的原图信息更多。

文中算法融合图像的均值较小波变换、Curvelet 变换分别提高了 0.74%、1.28%，表明文中算法融合图像的平均亮度较小波变换和 Curvelet 变换略有提高，这是因为文中算法使用的 IHS 变换能很好地保留源图像的光谱信息，从而提高图像平均亮度；较 IHS 变换、IHS-小波变换、低频系数加权平均的 IHS-Curvelet 变换分别降低了 2.29%、0.65%、5.18%，表明文中算法融合图像的平均亮度较这 3 种算法都有所下降，这是因为采用文中算法进行图像融合时剔除了高亮度的晕光像素点，导致融合图像

均值有所降低，但是图像的有用信息未减少、质量未下降，实际视觉亮度并未降低。

为了评价文中算法的处理速度，采用上述 6 种算法对不同场景图像进行多次实验，并统计各算法运行时间，如表 2 所示。

表 2 融合算法运行时间

Tab.2 Operation time of fusion algorithm

Fusion algorithm	Operation time/ms
IHS	30-40
Wavelet	80-85
Curvelet	80-90
IHS-Wavelet	40-45
Traditional IHS-Curvelet	40-50
Proposed algorithm	40-50

从表 2 中可以看出，单一的 IHS 变换算法运行时间最短；小波变换和 Curvelet 变换因为要进行三通道融合，运行时间长；文中算法、IHS-小波变换以及传统低频系数加权平均的 IHS-Curvelet 变换仅与 IHS 变换进行单通道融合，因此运行时间较小波变换和 Curvelet 变换大幅减小。

通过对以上客观指标的数据对比与分析，文中提出的抗晕光算法，能使融合图像的对比度和清晰度显著提升，包含的信息量更多，亮度也有改善，运行时间适中，进一步验证了文中抗晕光方法的有效性。

4 结 论

文中针对现有抗晕光算法消除晕光不彻底，融合图像清晰度较低的问题，提出了一种在 IHS 色彩空间下改进 Curvelet 变换融合可见光与红外图像

的抗晕光方法。其中设计的低频系数权值自动调节的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,较为彻底地消除了融合图像中的晕光现象。采用 IHS 色彩空间变换和 Curvelet 变换相结合融合可见光与红外图像,克服了二维小波基不具有各向异性的缺陷,能更好地表达图像的边缘、轮廓、纹理等细节信息,同时保留了色彩信息,避免了色彩失真。通过对实验结果的主客观分析表明,文中方法能较为彻底地消除晕光,保留更多的图像原始信息,获得色彩丰富、细节清楚、清晰度高、适合人眼观察的融合图像,更好地解决夜间会车时的晕光问题。

参考文献:

[1] Chen Lin. The legal issues study on the high beams car meeting at night [J]. *Legal System and Society*, 2014, 9 (23): 71-72. (in Chinese)
陈琳. 夜间行车远光灯会车法律问题研究[J]. 法制与社会, 2014, 9(23): 71-72.

[2] Chen Yichao, Hu Wengang, Wu Dongsheng, et al. Experimental study on single-channel triple-spectrum color night vision system [J]. *Infrared Technology*, 2017, 39(1): 62-66. (in Chinese)
陈一超, 胡文刚, 武东生, 等. 单通道三波段彩色夜视系统设计及实验研究[J]. 红外技术, 2017, 39(1): 62-66.

[3] Zhu Meiping, Sun Jian, Zhang Weili, et al. Development of high performance polarizer coatings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2908-2915. (in Chinese)
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.

[4] Wang Jian, Gao Yong, Lei Zhiyong, et al. Research of auto anti-blooming method based on double CCD image sensor [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007(5): 1053-1056. (in Chinese)
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(5): 1053-1056.

[5] Wu Kewei, Duan Weiwei, Yang Xuezhi. Infra-visible video fusion object tracking under rainy night condition [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37 (5): 1131-1139. (in Chinese)
吴克伟, 段伟伟, 杨学志. 雨夜条件下的红外可见光视频融合目标跟踪[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1131-1139.

[6] Lu Jiaying, Gu Xiaojing, Gu Xingsheng. Scene parsing method toward low-light-level/infrared color night vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (8): 0824002. (in Chinese)
鲁佳颖, 谷小婧, 顾幸生. 面向微光/红外融合彩色夜视的场景解析方法 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46 (8): 0824002.

[7] Lu Dekun, Gong Junbin, Ma Jiayi, et al. System of infrared and low light level image fusion on vehicle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 303-307. (in Chinese)
刘德坤, 龚俊斌, 马佳义, 等. 一种车载的红外与微光图像融合系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39 (S): 303-307.

[8] Guo Quanmin, Li Xiaoling. Vehicles' anti-blooming method based on visible and infrared images fusion[J]. *Infrared Technology*, 2015, 37 (6): 475-478. (in Chinese)
郭全民, 李晓玲. 基于可见光和红外图像融合的汽车抗晕光方法[J]. 红外技术, 2015, 37(6): 475-478.

[9] Emmanuel J C, Donoho D L. Curvelets—a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2000, 283 (3): 1051-1057.

[10] 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. (in Chinese)
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.

[11] Du Siliang, Yang Bo, Wang Mi, et al. Stellar image registration based on mutual information in object area [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24 (2): 406-412. (in Chinese)
杜斯亮, 杨博, 王密, 等. 采用目标区域互信息的星空图像配准[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 406-412.

[12] Wang Hao, Zhang Ye, Shen Honghai, et al. Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 438-448. (in Chinese)
王浩, 张叶, 沈宏海, 等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438-448.

[13] Hong G, Zhang Y, Mercer B. A wavelet and IHS integration method to fuse high resolution SAR with

- moderate resolution multispectral images [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 75(10): 1213–1223.
- [14] Candès E J, Demanet, Donohol D L, et al. Fast discrete curvelet transforms [J]. *Multiscale Modeling and Simulation*, 2006, 5(3): 861–899.
- [15] Maglione P, Parente C, Vallario A. Pan-sharpening WorldView -2: IHS, Brovey and Zhang methods in comparison[J]. *International Journal of Engineering & Technology*, 2016, 8(2): 673–679.
- [16] Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Remote multiband infrared image fusion system and registration method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0526002. (in Chinese)
- 李英杰, 张俊举, 常本康, 等. 远距离多波段红外图像融合系统及配准方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0526002.