

# 山区高速公路隧道出入口视觉融合技术研究

马庆禄<sup>1,2</sup>, 马恋<sup>1</sup>, 王江华<sup>3</sup>, 孔国英<sup>3</sup>

(1. 重庆交通大学交通运输学院, 重庆 400074; 2. 山区复杂道路环境“人-车-路”协同与安全重庆市重点实验室, 重庆 400074;  
3. 重庆奉建高速公路有限公司, 重庆 401120)

**摘要:**针对红外非可见光与可见光视觉在成像过程中不同的感光特性,面向隧道典型的“黑洞”和“白洞”问题,从自动驾驶车辆视角研究光照环境突变条件下的视觉辨识以及融合感知技术。分别选取低照度车辆进入隧道以及弱光线条件下车辆驶离隧道两种情形,利用局部能量、卷积稀疏表示算法(CSR)对两种图像进行融合实验,结合MI、SF、AG、 $Q^{AB/F}$ 、SSIM、PSNR六种评价指标进行评价。实验结果表明,在隧道入口处图像CSR-E算法对比Curvelet、NSCT、NSCT-T、SR-C&L、SF-Energy-Q五种算法,边缘信息传递因子( $Q^{AB/F}$ )提高了14.14%,隧道出口处图像运行平均时间减少1.17ms,结构相似性(SSIM)提高了3.38%,所提出的红外非可见光与可见光视觉融合成像方法弥补单一传感器针对特定场景表达的不全面,实现对场景全面清晰准确的表达,有效解决了源图像的边缘信息丢失,增强图像的光谱信息。

**关键词:**公路隧道;红外成像;视觉融合;局部能量

中图分类号:TP391.41 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.01.019

## Research on visual fusion technology for entrance and exit of mountain expressway tunnel

MA Qing-lu<sup>1,2</sup>, MA Lian<sup>1</sup>, WANG Jiang-hua<sup>3</sup>, Kong Guo-ying<sup>3</sup>

(1. School of Traffic & Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. Chongqing Key Laboratory of "Human-Vehicle-Road" Cooperation & Safety for Mountain Complex Environment, Chongqing 400074, China; 3. Chongqing Fengjian Expressway Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Aiming at the different photosensitive characteristics of infrared non-visible light and visible light vision in the imaging process, and facing the typical "black hole" and "white hole" problem in tunnels, the visual identification and fusion perception technology under the sudden illumination environment is studied from the perspective of autonomous vehicles. Two scenarios are selected: low illumination vehicles entering the tunnel and vehicles leaving the tunnel under low light conditions. Local energy and convolution sparse representation algorithm (CSR) are used to fuse the two images, and six evaluation indexes including MI, SF, AG,  $Q^{AB/F}$ , SSIM and PSNR are used to evaluate the images. The experimental results show that CSR-E algorithm for images at the tunnel entrance improves the edge information transfer factor ( $Q^{AB/F}$ ) by 14.14%, the average running time of image at the tunnel exit is reduced by 1.17ms and the structural similarity (SSIM) is improved by 3.38% compared with the five algorithms of Curvelet, NSCT,

基金项目:国家重点研发计划项目(No.2018YFB1600200)资助。

作者简介:马庆禄(1980-),博士,教授,研究方向为智能交通系统与安全。E-mail:mql@cqu.edu.cn

通讯作者:马恋,女,硕士,研究方向为智能交通系统与安全。E-mail:ml@mails.cqjtu.edu.cn

收稿日期:2022-01-14;修订日期:2022-02-26

NSCT-T,SR-C&L and SF-Energy-Q. The proposed infrared non-visible and visible vision fusion imaging method made up for the incomplete representation of a specific scene by a single sensor, achieves a comprehensive, clear and accurate representation of the scene, effectively solves the loss of edge information in the source image, and enhances the spectral information of the image.

**Keywords:** highway tunnel; infrared imaging; visual fusion; local energy

## 1 引言

随着山区地形复杂公路的增加,山区桥隧的数量也在增加。2020年年末全国公路隧道21316处,比上一年增加2249处,其中特长隧道1394处,长隧道5541处。隧道口内外光照强度差异大使驾驶员在驶入隧道中由于强弱参照系的反差,往往是发生交通事故的主要原因。针对隧道口区域,单一的传感器在外界复杂道路条件下无法克服空间分辨率的问题,减少驾驶员由于视觉冲击带来的视觉负荷,对入口交通改善措施进行研究是隧道安全工作的重中之重。

目前隧道入口交通安全改善主要集中在改变照明方式,J. L. Xu等<sup>[1]</sup>使用UC-Win/Road仿真软件,建立了12个不同长度的隧道模型,在隧道入口前250 m和出口前50 m,驾驶员的心率(HR)波动显著;在隧道出口,HR受隧道长度的影响较大且变化越大。D. H. Qi等<sup>[2]</sup>为了使道路隧道能源系统更具可持续性和弹性,在隧道的出入口安装半透明光伏(STPV)顶棚。H. Lu等<sup>[3]</sup>为减少隧道出入口段造成的交通事故数量,提出了合理的隧道出入口段限速值,以提高隧道出入口段车辆行驶的安全性。L. Wang等<sup>[4]</sup>介绍了一种以机器视觉为基础的根据夜间行驶车辆的灯光效应生成的报警系统,一旦发现风险,系统会及时发出警告信号。A. Nowosielski等<sup>[5]</sup>用于目标识别的夜视系统使用Ubuntu MATE操作系统下的专有ODROID XU4微型计算机处理热图像,扩展了人类视觉的能力,支持安全出行。U. Lee等<sup>[6]</sup>在不同的天气条件下为自动驾驶汽车配备传感器融合算法,该算法被应用于无人驾驶汽车EureCar(KAIST)。H. Chen<sup>[7]</sup>广泛使用的驾驶录像机(DVRs)作为具有高移动性的分布式传感器进行道路异常的普适感知。Z. F. Zhang等<sup>[8]</sup>介绍了一种用于夜间安全驾驶的带自动控制灯的主动近红外摄像系统。对

捕获的目标红外图像进行图像分割和图像形态学处理,提高了司机的判断准确性。在低光和高动态范围性能条件下,为了解决低照度下的照明条件的挑战,M. Gehrig等<sup>[9]</sup>提出了一个新的数据集(DSEC)。D. Hafner和J. Weickert<sup>[10]</sup>将输出图像定义为输入图像的凸组合,利用局部响应和非线性响应等对比度增强方法,然后进行曝光融合、多光谱成像和脱色实现定制图像融合。周正康<sup>[11]</sup>提出利用隧道传感器指挥调度隧道信号灯,利用数据输入和输出动态控制隧道进出口区域的信息交流,但是隧道全天候照明不免会造成能源浪费;王向等<sup>[12]</sup>在采用减光设施,在隧道入口采取非主动的措施实现强弱参照系合理过渡的视觉体验;梅家林等<sup>[13]</sup>指出提升交通安全水平可通过在隧道入口区域利用平衡空间路权、驾驶员的心理状态和道路行驶要求等策略;黄婷等<sup>[14]</sup>从驾驶员的视认距离出发,对比了环形和矩形标记的特点,提出环形立面比矩形有更高的辨识度,视认距离更有保障;陈柳晓等<sup>[15]</sup>为了保障驾驶员的行车安全,对比分析了3种不同颜色(绿色、黄色、红色)景观设计,实验结论是随着间隔减小,黄色设计减速效果明显;杜志刚等<sup>[16]</sup>为提高驾驶员的曲率感知能力在隧道曲线段设置了多个可见反光环;吴玲等<sup>[17]</sup>将减速标线的形状设计成鱼刺形和树池性减速标线应用于隧道入口段和出口段,并通过设置参数对模型计算。

针对单一传感器图像存在的信息不足,相较于多源传感器获得目标的局限性和差异性,本文提出基于卷积稀疏表示(convolution sparse representation, CSR)和局部能量特征处理的红外与可见光融合研究对隧道出入口视觉信息互补。

## 2 低照度下隧道口分析

### 2.1 隧道出入口特性

山区隧道出入口具有封闭、明暗对比度差,一

旦发生交通事故存在空间狭小,救援困难的缺点。驾驶员根据接收到的信号由各感官的提供,视觉信息占比在70%~80%之间<sup>[18]</sup>。山体隧道在现行隧道在速度行驶、行车安全等方面与普通公路隧道有许多差异,如图(1)所示,光照强度随着季节变化,时间段的区别、环境的变化对驾驶员影响不同。

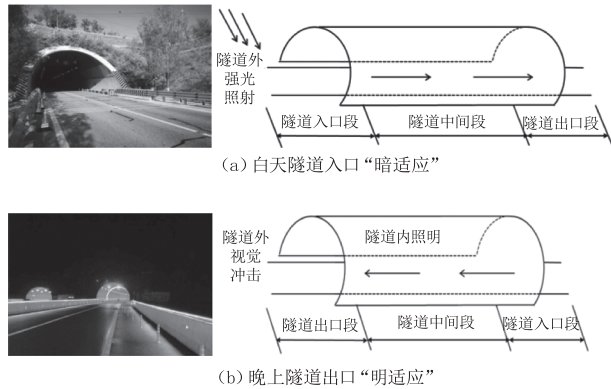


图1 隧道出入口视觉特征

Fig. 1 Visual characteristics of tunnel entrance and exit

在隧道内驾驶员随着自然光照与隧道光源影响,隧道出入口段注视点的位置和次数捕捉信息能力降低,撞击侧墙、追尾成为事故发生的主要原因。对于货运车辆,此阶段货运司机获取交通信息变得更加复杂多变。隧道交通安全设施改善中,也存在现有标志标线、彩色涂装生命周期短,因此本文旨在关注人因(Human factor)以减少人的失误(Human error)为主,驾驶员根据视觉信息有效调控驾驶员在隧道出入口,减少因光线过渡原因诱发,能够有效地完成车辆控制。

## 2.2 非下采样 Contourlet 变换

为提高隧道可见光所呈现的视觉信息和增强红外像素暗处细节,下面通过与原始可见光图像融合进一步提高增强图像中的多传感器信息。Cunha 在 2005 年提出了非下采样 Contourlet 变换(NSCT)具有很好的平移不变性和方向选择性,多分辨率效果明显。相较于 Contourlet 变换已有良好的空域和频域局部特征,NSCT 避免图像退化过程中信息量的丢失。

NSP 的低通分解滤波器  $H_0(z)$  和高通分解滤波器  $H_1(z)$  将图像分为低频子带和高频子带,采用分离的高频子带作为细节层,低频子带通过下一级低

通分解滤波器  $H_0(z^l)$  和高通滤波器  $H_1(z^l)$  分解为低频子带和带通子带,分离出的带频区成为下一个级别的细节层,分离  $m$  级细节层的滤波器称为  $\psi_m(z)$ ,如式(1)所示:

$$\psi_m(z) = \begin{cases} H_1(z); m = 1 \\ \prod_{k=0}^{m-2} H_0(z^{2^k}) H_1(z^{2^{(m-2)l}}); m \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

细节层和低频子带用于分离下一级,若进行  $m$  层分解,分解后的低频子带层记为  $m$ ,其中  $m = 1, 2, \dots, M$ ,当  $m = 1$  和  $m = M$  时,为分辨率最高和最低的层级,分解后的低频子带层为  $G(\cdot)$ ,细节层为  $L(\cdot)$ ,原始图像为  $I_0(\cdot)$ ,在第  $m$  级分解为  $G_m(\cdot)$  和  $L_m(\cdot)$ ,NSP 分解的细节层进行 NSDFB 方向分解,在第  $m$  级分解为  $N_m(\cdot)$ ,其中  $n = 1, 2, \dots, N_m$ ,第  $n$  个方向和第  $m$  个尺度的子带为  $L_{m,n}(\cdot)$ 。

## 2.3 局部能量特征处理

利用加权局部能量和局部能量比将隧道入口的红外与可见光图像的低频子带结构细节信息保存:

$$E(x, y) = \sum_{m=-r}^r \sum_{n=-r}^r W(m+r+1, n+r+1) \times L^2(x+m, y+n) \quad (2)$$

式中,  $E(x, y)$  表示红外图像加权局部能量  $E_i(x, y)$  或可见光图像加权局部能量  $E_v(x, y)$ ,  $L(x, y)$  表示图像位置  $(x, y)$  处的 NSCT 低频系数;  $W(m, n)$  为低频系数的窗口加权系数矩阵,当半径  $r = 1$  时,正

$$\text{则化系数矩阵 } W = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}。 \text{WLE 保存结构}$$

化信息,由于简单加权往往会导致红外目标淡化,为保持融合目标亮度,度量细节提取值采用局部特征能量比:

$$R(x, y) = E_i(x, y) / E_v(x, y) \quad (3)$$

$R(x, y)$  表示红外局部能量与可见光局部能量的占比,  $E_i(x, y)$  相对于  $E_v(x, y)$  越大,其像素越有可能属于目标,但是式(3)  $R(x, y)$  受  $E_i(x, y)$  和  $E_v(x, y)$  共同作用。因此,对于融合图像应尽可能保留红外图像中目标的高亮特征。

$$C_F(x, y) =$$

$$\begin{cases} C_f(x,y), R(x,y) > T_1 \text{ 且 } E_i(x,y) > T_2 \\ u_l C_l(x,y) + u_v C_v(x,y), \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $C_f(x,y)$  为融合图像的低频系数;  $u_l, u_v$  分别为加权系数;  $T_1, T_2$  分别为设定高低阈值由式(5)所示。

$$\begin{cases} T_1 = \text{mean}[R(x,y)] + k_1 \cdot \text{std}[R(x,y)] \\ T_2 = \text{mean}[E_l(x,y)] + k_2 \cdot \text{std}[E_l(x,y)] \\ u_l = E_l(x,y) / [E_l(x,y) + k_3 \cdot E_l(x,y)] \\ u_v = k_3 \cdot E_v(x,y) / [E_v(x,y) + k_3 \cdot E_v(x,y)] \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\text{mean}[\cdot]$  表示均值;  $\text{std}[\cdot]$  表示标准差;  $k_1, k_2$  为经验参数,文中  $k_1 = 0.5, k_2 = 1.5$ 。

### 3 预处理及特征分析

#### 3.1 直方图修正

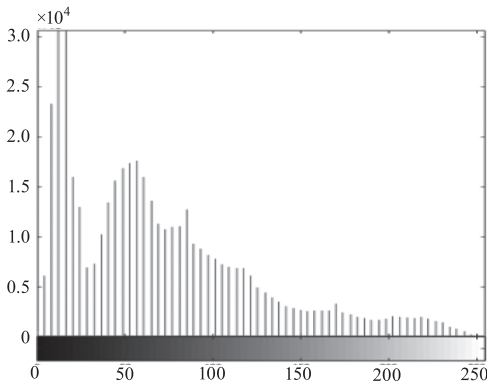
在隧道低照度情况下,视觉信息对比不明显,但是由于灰度值呈现的不均匀现象而集中在某一区间内,视觉特征区别不清晰,对比度不高。直方图均衡化技术可以对隧道出入口视觉信息进行二值化选取阈值,重新均匀各个灰度值,达到增强的效果。

由图2可知经直方图修正后,(b)对(a)来说隧道入口处更加清晰,(d)对(a)灰度值呈现均匀修正。

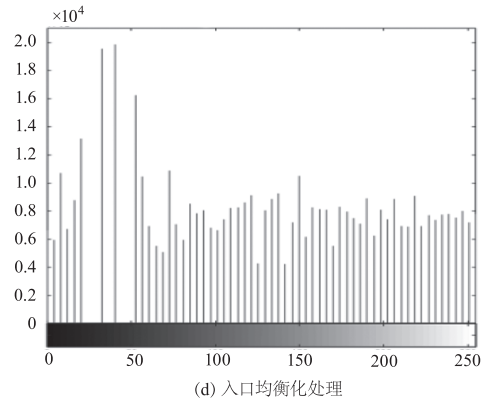


(a) 隧道入口原图

(b) 隧道入口均衡化



(c) 隧道入口直方图



(d) 入口均衡化处理

图2 隧道入口处前后修正对比

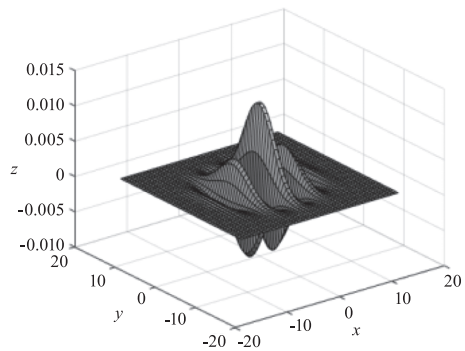
Fig.2 Correction comparison before and after tunnel entrance

#### 3.2 高斯平滑处理及锐化

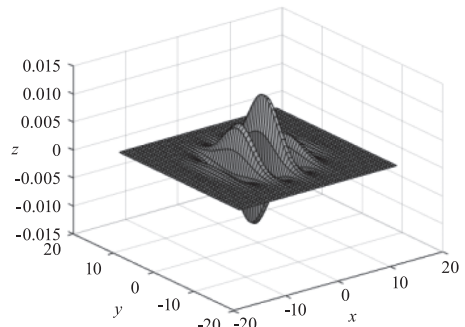
二维 Gabor 滤波器频率和方向十分接近人类视觉系统<sup>[19]</sup>,二维 Gabor 滤波器可表示为式(6):

$$\begin{cases} g(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_u\sigma_v} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right)\right\} \cos(wu) \\ u = x\cos\theta + y\sin\theta \\ v = -x\sin\theta + y\cos\theta \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $\theta$  为 Gabor 滤波器的方向;  $\sigma_u$  和  $\sigma_v$  分别为高斯包络在  $u$  轴和  $v$  轴上的标准差( $u$  轴平行于  $\theta$ ;  $v$  轴垂直于  $\theta$ );  $w$  用于调制频率。



(a) 特征匹配



(b) 真实特征

图3 Gabor 滤波器空域函数

Fig.3 Spatial function of Gabor filter

由图 3 可知 Gabor 滤波器与视觉皮层相比十分接近,残差数值不大。因此,二维 Gabor 滤波器图像增强作用明显。

### 3.3 卷积稀疏表示

传统稀疏表示具有伪吉布斯效应,卷积稀疏表示(Convolutions Sparse Representation, CSR)的原理是将原图像建模为特征响应系数与滤波字典间的一组卷积和,从而取代冗余字典与稀疏系数乘积的表达方式。CSR 模型表示为:

$$\operatorname{argmin}_{\{d_m\}, \{x_m\}} \frac{1}{2} \left\| \sum_{m=1}^M d_m * x_m - s \right\|_2^2 + \lambda \sum_{m=1}^M \|x_m\|_1 \quad (7)$$

$$\text{s. t. } \|d_m\|_2 = 1$$

式(7)交替方向乘子算法(ADMM)中,  $\{d_m\}$  表示  $M$  维卷积字典;  $\{x_m\}$  为特征响应;  $*$  为卷积运算符号;  $s$  表示源图像;  $\lambda > 0$  表示自定义参数。

利用新活性度量方法 NAM 对高频信息进行融合,如式(8)<sup>[20]</sup>所示:

$$\begin{cases} \text{NAM}(x, y) = (PC(x, y))^{\alpha_1} \cdot (LSCM(x, y))^{\beta_1} \cdot \\ (LE(x, y))^{\gamma_1} \\ \text{Lmap}_i(x, y) = \begin{cases} 1, [S_i(x, y)] > \frac{\tilde{M} \times \tilde{N}}{2} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

$\alpha_1, \beta_1$  和  $\gamma_1$  取值为 1、2、2,  $S_i(x, y)$  是  $\tilde{M} \times \tilde{N}$  滑动窗  $(x_0, y_0)$ ,  $K$  为源图像数目,  $\text{NAM}_i(x, y) \geq \max \text{NAM}_i(x, y), i \in (1, K)$ 。采用 NSCT 逆变换重构得到融合图像。

## 4 实验

### 4.1 实验系统

实验系统采用萤石互联网近红外监控摄像头,萤石无线互联网电池摄像机 C3A,如图 6(a),6(b)所示,拥有 7.5 m 红外夜视,防水麦克风和扬声器,最高分辨率 1080 p,IC 红外滤光片可自动切换白天/黑夜模式。电源电压 DC12 V;计算机的 CPU 采用 Intel Core i7-7500U 2.5 GHz,内存为 8 GB, Matlab 2018a 环境。针对低照度下隧道出入口行车会车时实际场景,本文进行了实验室模拟环境下的低照度下会车场景实验,低照度隧道出入口驾驶员行驶的模拟实际路况如图 4(c),4(d)所示,一个发光面为 199 mm × 36 mm 的 LED 条形光源(AFT-

WL21244-22)模拟隧道光照条件,采用沙盘山区隧道模型,光源周围 3 辆汽车模型模拟低照度下隧道出入口行驶车辆。



图 4 模拟低照度隧道入口场景

Fig. 4 Simulates a tunnel entrance scenario with low illumination

实验选用了大小为 1920 × 1080 预配准的 2 组隧道出入口红外与可见光图像进行实验,并挑选了具有对比性的(Curvelet、NSCT、NSCT-T 算法、SR-C&L 算法、SF-Energy-Q)5 组融合算法进行性能比较。对于 NSCT 分解部分,尺度滤波器采用“pyrexc”,方向滤波器采用“vk”,分解级别设为 4,级数为[2,3,3,4]。

### 4.2 隧道入口处融合评价

选用主观视觉与客观指标结合对融合结果进行评价。6 个客观评价指标:互信息量(MI)、空间频率(SF)和平均梯度(AG)、边缘信息传递因子( $Q^{AB/F}$ )、结构相似性(SSIM)和峰值信噪比(PSNR)。其中,指标数值越大,融合效果更好。

主观视觉层面看,图 5 这 6 种融合处理结果均有所体现。但是基于 Curvelet 变换和 NSCT 变换 2 种方法所得的融合图像对比度偏低,背景不突出,整体偏暗;运用 NSCT-T 算法亮度适中,SR-C&L 算法较为阴暗,SF-Energy-Q 算法出现了“块状阴影”三种算法在车辆隧道外车辆颜色有所体现,但局部显示车辆颜色分辨率不高;采用本文所提方法轮廓方面比较清晰,特征显著,总体视觉效果最好,与其余 5 种融合算法相比占据优势。关于低照度隧道入口处融合实验的客观评价指标如表 1 所示。

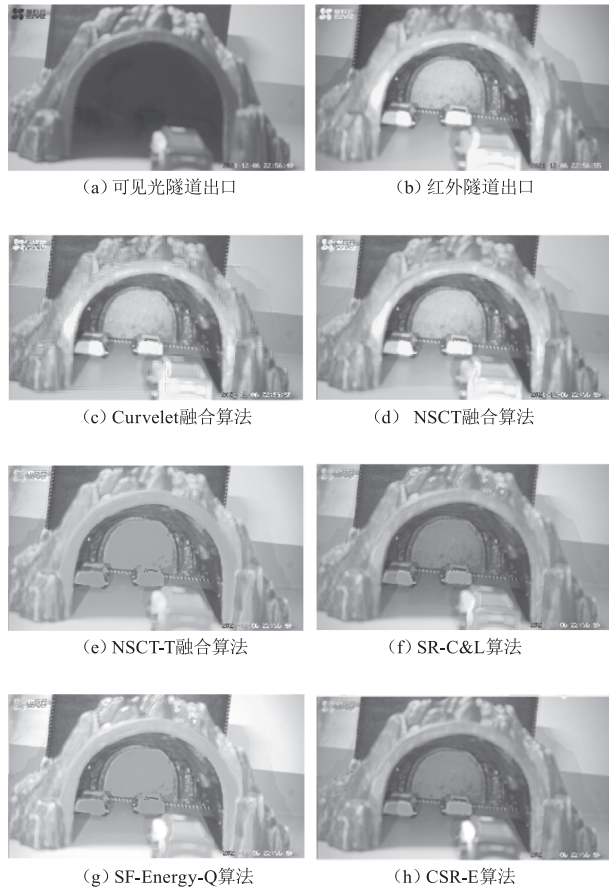


图5 低照度隧道入口处不同算法融合结果  
Fig. 5 Fusion results of different algorithms at low illumination tunnel entrance

对比分析表1可以发现,CSR-E算法MI略低于SR-C&L算法和Curvelet算法,AG略低于NSCT-T算法,其余SF、 $Q^{AB/F}$ 、SSIM、PSNR这4项客观指

表1 隧道入口处性能指标评价

Tab. 1 Performance index evaluation of tunnel entrance

| 实验方法        | MI            | SF             | AG             | $Q^{AB/F}$    | SSIM          | PSNR           |
|-------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Curvelet    | 7.4302        | 25.2998        | 15.0265        | 0.4228        | 0.7404        | 16.2337        |
| NSCT        | 7.1856        | 18.4372        | 11.6510        | 0.4981        | 0.7619        | 16.5615        |
| NSCT-T      | 7.3316        | 25.6958        | <b>15.6966</b> | 0.4868        | 0.7044        | 15.8635        |
| SR-C&L      | <b>7.4468</b> | 24.4950        | 15.2221        | 0.5171        | 0.7283        | 16.3074        |
| SF-Energy-Q | 7.2418        | 23.026         | 14.3491        | 0.4962        | 0.7676        | 16.4695        |
| CSR-E       | 7.4178        | <b>27.4673</b> | 15.4665        | <b>0.5902</b> | <b>0.7755</b> | <b>17.2245</b> |

图6中(a)~(f)表现六种算法指标值及运行的时间,为展示更加清晰直观的实验结果,对应的客观指标及时间展示如图7所示。

由图7可知各指标在时间上算法占比差异,

标占比度较高,主观视觉上融合效果都能很好体现。为了验证算法的实时性加入时间评价,如图6所示。

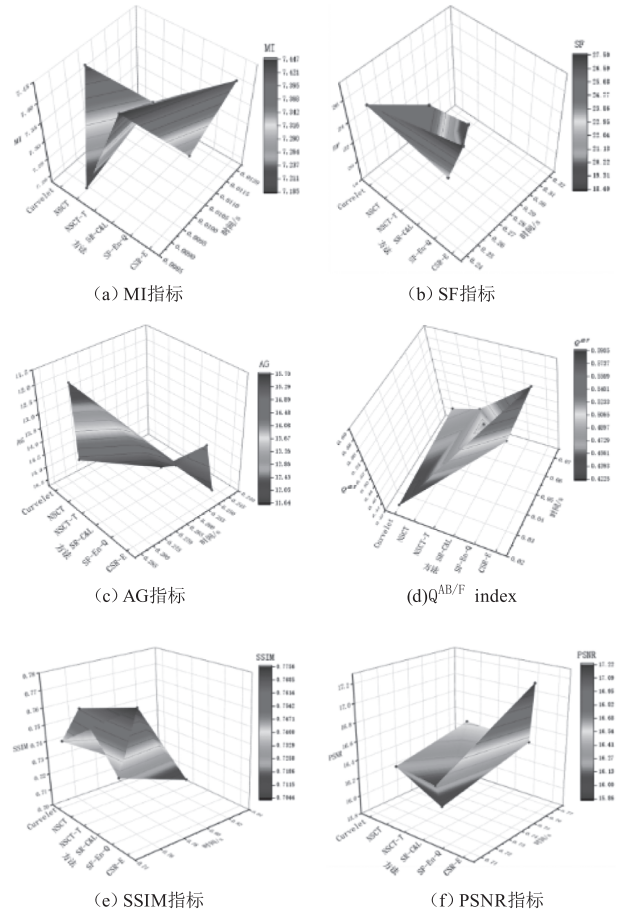


图6 隧道出口处指标三维图

Fig. 6 Three-dimensional diagram of indicators at the tunnel exit

CSR-E算法MI指标运算时间仅需12ms,比较图像融合结果,无论是从视觉效果还是客观指标评价,CSR-E算法占据优势。为确定六种算法在不同指标运行下的平均时间,如表2所示。

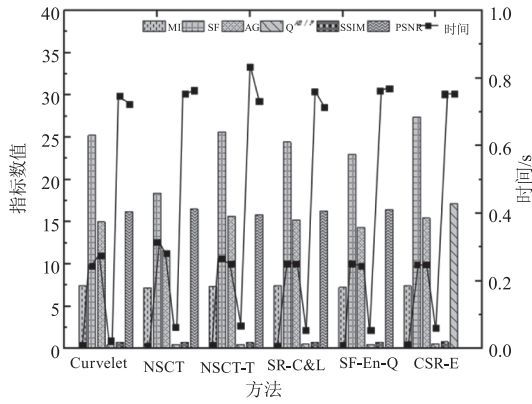


图 7 隧道入口融合评价双 Y 轴柱状-点线图

Fig. 7 Dual-Y-axis histogram of tunnel entrance fusion evaluation

表 2 不同算法在隧道入口处运行的平均时间

Tab. 2 Average running time of different algorithms at the tunnel entrance

| 实验方法     | 时间/ms               | 实验方法        | 时间/ms               |
|----------|---------------------|-------------|---------------------|
| Curvelet | $3.379 \times 10^2$ | SR-C&L      | $3.402 \times 10^2$ |
| NSCT     | $3.645 \times 10^2$ | SF-Energy-Q | $3.487 \times 10^2$ |
| NSCT-T   | $3.603 \times 10^2$ | CSR-E       | $3.465 \times 10^2$ |

由表 2 可知,六种算法所运行的平均时间相差不大,本文 CSR-E 算法运行时间为  $3.465 \times 10^2$  ms 低于 NSCT、NSCT-T 和 SF-Energy-Q 三种算法,虽然高于 Curvelet 和 SR-C&L,但比较图像融合结果,CSR-E 算法均占据优势。

4.3 隧道出口处融合评价

隧道出口处融合结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,基于 Curvelet 变换和 NSCT 变换 2 种方法所得的融合图像对比度偏低,可见光背景下隧道内出口外车辆行驶画面不清晰,隧道中 2 辆车轮廓信息及色彩信息表现不明显,整体不突出、偏暗;运用 NSCT-T

算法亮度适中,SR-C&L 算法较为阴暗,SF-Energy-Q 算法也出现了“块状阴影”,以上算法在车辆隧道外车辆颜色有所体现,但局部显示车辆颜色分辨率不高;采用本文所提方法轮廓方面比较清晰,特征显著,总体视觉效果最好,与其余 5 种融合算法相比占据优势。本文算法融合结果辨识度高,行驶车辆颜色及轮廓信息更加清晰,整体的层次感对比更加强烈,车辆目标清晰,能够有效描述源图像的结构特征。出口处评价指标与隧道入口处一致,互信息量 (MI)、空间频率 (SF) 和平均梯度 (AG)、边缘信息传递因子 ( $Q^{AB/F}$ )、结构相似性 (SSIM) 和峰值信噪比 (PSNR)。

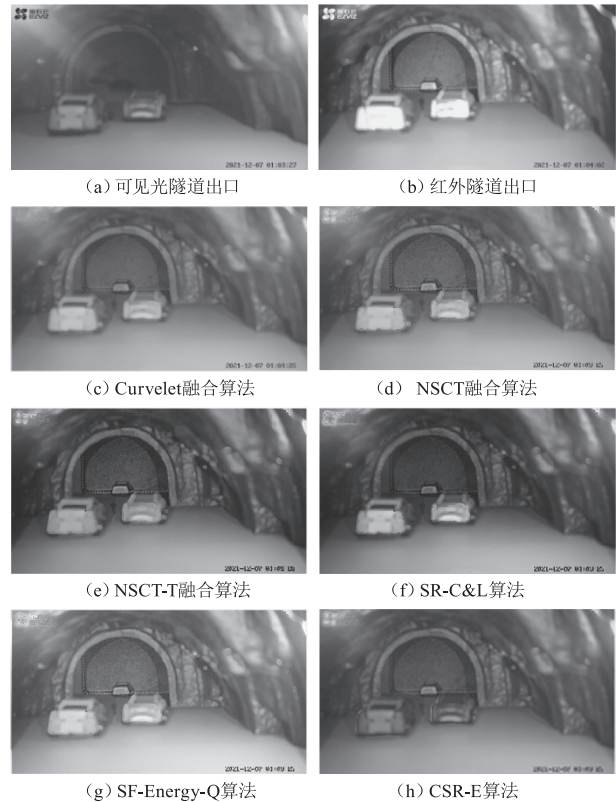


图 8 低照度隧道出口处不同算法融合结果

Fig. 8 Fusion results of different algorithms at low illumination tunnel exit

表 3 隧道出口处性能指标评价

Tab. 3 Performance index evaluation of tunnel exit

| 实验方法        | MI            | SF             | AG             | $Q^{AB/F}$    | SSIM          | PSNR           |
|-------------|---------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| Curvelet    | 7.4735        | 19.8424        | 10.9803        | 0.4937        | 0.8246        | 17.5467        |
| NSCT        | 7.1093        | 15.9407        | 10.7288        | 0.5287        | 0.8589        | 18.8592        |
| NSCT-T      | 7.3810        | 22.5031        | 12.9722        | 0.4995        | 0.8558        | 19.2149        |
| SR-C&L      | 7.3412        | 20.9455        | 13.0304        | 0.5452        | 0.8473        | 18.3498        |
| SF-Energy-Q | 7.1374        | <b>23.4340</b> | <b>15.4361</b> | 0.5509        | 0.8551        | 16.4468        |
| CSR-E       | <b>7.5145</b> | 19.8152        | 15.0233        | <b>0.5598</b> | <b>0.8879</b> | <b>19.2664</b> |

对比分析表 3 可以发现,CSR-E 算法 SF 略低, AG 略低于 SF-Energy-Q,其余 4 项客观指标占比度较高, MI、 $Q^{AB/F}$ 、SSIM 和 PSNR 分别为 7.5145、0.5598、0.8879 和 19.2664。可以看出,本文算法的融合辨识度高,主观视觉层面看,这 6 种融合处理结果均有所体现。图 9 为了验证算法的实时性加入时间评价,除了以上六种指标,验证算法的实时性加入时间评价,如图 9 所示。图 9 中(a)~(f)表现六种算法指标值及运行的时间,为展示更加清晰直观的实验结果,对应的客观指标及时间展示见图 10。图 10 各指标在时间上总体相差不大,总体而言,无论是从视觉效果还是客观指标评价,CSR-E 算法都占据优势。CSR-E 算法 MI 指标运算时间仅仅需要 9.9 ms。为确定六种算法在不同指标运行下的平均时间,如表 4 所示。

由表 4 可知,六种算法所运行的平均时间相差不大,本文 CSR-E 算法运行时间为  $3.4440 \times 10^2$  ms,与其他 5 种算法相比,运行时间最短,减少 1.17ms 同时在视觉效果显著,CSR-E 算法占据优势。

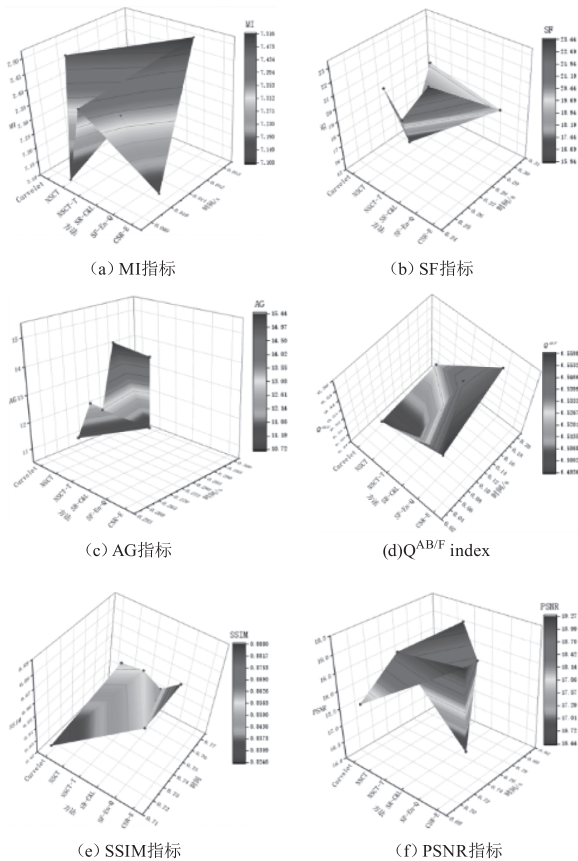


图 9 隧道出口处指标三维图

Fig. 9 Three-dimensional diagram of indicators at the tunnel exit

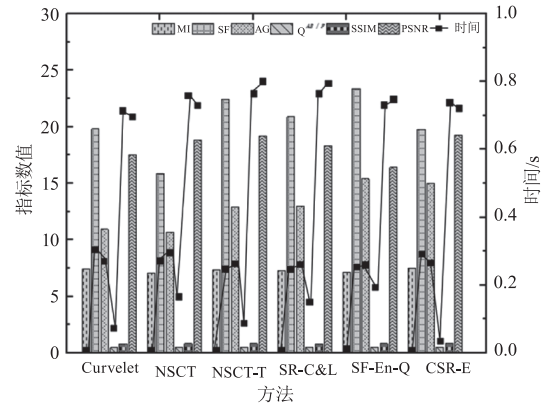


图 10 隧道出口融合评价双 Y 轴柱状-点线图

Fig. 10 Double Y-axis histogram of tunnel exit fusion evaluation

表 4 不同算法在隧道出口处运行的综合时间

Tab. 4 Comprehensive running time of different algorithms at tunnel exit

| 实验方法     | 时间/ms                | 实验方法        | 时间/ms                |
|----------|----------------------|-------------|----------------------|
| Curvelet | $3.4557 \times 10^2$ | SR-C&L      | $3.7202 \times 10^2$ |
| NSCT     | $3.7288 \times 10^2$ | SF-Energy-Q | $3.6725 \times 10^2$ |
| NSCT-T   | $3.6287 \times 10^2$ | CSR-E       | $3.4440 \times 10^2$ |

### 5 结论

(1) 本文结合 CSR 和局部能量特征的特性,提出了一种 CSR-E 红外与可见光图像融合框架。文章首先对红外和可见光源图像进行图像增强及去噪处理,利用 NSCT 将预处理图像分解成一个低频子图 and 多个高频子图,其次,采用卷积稀疏表示与局部能量特征表示方法、活度测量方法进行融合处理,进行重构得到红外与可见光融合图像。实验表明,CSR-E 算法克服了传统的“SR”和“伪 Gibbs”效应,弥补了图像之间关联性差的缺点,保存能量信息与边缘细节信息。

(2) 算法框架上,本文主要将 NSCT 分解所得的低频基础分量利用局部能量特征的方法进行融合,重点体现在红外亮度信息得到保留,使用 CSR 融合低频细节特征分量,并根据活性测度算法提取源图像的特性,对高频部分进行融合。

(3) 本文算法结合了有关 NSCT、CSR 算法的优点,结合局部能量特征的融合规则,最终融合图像对比度高。实验使得最终的融合结果图不仅有着良好的视觉特性,结合 MI、SF、AG、 $Q^{AB/F}$ 、SSIM、PSNR 六种评价指标进行评价。实验结果表明,在隧道入口



处图像 CSR-E 算法对比 Curvelet、NSCT、NSCT-T、SR-C&L、SF-Energy-Q5 种算法,  $Q^{AB/F}$  指标提高了 14.14%, 隧道出口处图像运行平均时间减少 1.17ms, SSIM 提高了 3.38%, 总体运算成本相差不大, 提升图像的鲁棒性和视觉清晰度以及算法运行时间是下一步研究的重点。

#### 参考文献:

- [1] J L Xu, X D Zhang, H Liu, et al. Physiological indices and driving performance of drivers at tunnel entrances and exits: A simulated driving study [J]. *PLoS ONE*, 2020, 15 (12): e0243931.
- [2] D H Qi, S W Yang, C Shu, et al. An exploratory study on road tunnel with semi-transparent photovoltaic canopy—from energy saving and fire safety perspectives [J]. *Building Simulation*, 2022, 15: 537–548.
- [3] H Lu, T Shang, Y Wei, et al. Safety assessment of exit advance guide signs in mountainous highway tunnel based on eye-tracking technology [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 111315–111325.
- [4] L Wang, B K P Horn. Machine vision to alert roadside personnel of night traffic threats [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19 (10): 3245–3254.
- [5] A Nowosielski, K Małeckki, P Forczmański. Embedded night-vision system for pedestrian detection [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20 (16): 9293–9304.
- [6] U Lee, J Jung, S Jung, et al. Development of a self-driving car that can handle the adverse weather [J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2018, 19 (1): 191–197.
- [7] H Chen, C Lai, C Shih. Toward community sensing of road anomalies using monocular vision [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16 (8): 2380–2388.
- [8] Z F Zhang, Y S Zhai, Y L Su, et al. Research on lamp auto-control system based on infrared image processing [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, (3): 1144–1147.
- [9] M Gehrig, W Aarents, D Gehrig, et al. DSEC: a stereo event camera dataset for driving scenarios [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 6 (3): 4947–4954.
- [10] D Hafner, J Weickert. Variational image fusion with optimal local contrast [J]. *Computer Graphics Forum*, 2016, 35 (1): 100–112.
- [11] Zhou Zhengkang. Dynamic control and optimization of the traffic signal lights at urban tunnel entrance [J]. *Modern Urban Research*, 2019 (10): 109–112. (in Chinese)  
周正康. 城市隧道入口交通信号灯的动态控制与优化 [J]. *现代城市研究*, 2019 (10): 109–112.
- [12] Wang Xiang, Li Fengwei, Yang Ke. Study on the design of dimming structure for the road tunnel entrance [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2019, 56 (6): 134–139. (in Chinese)  
王向, 李峰伟, 杨可. 公路隧道入口减光构件设计研究 [J]. *现代隧道技术*, 2019, 56 (6): 134–139.
- [13] Mei Jialin, Tang Zhenong, Du Zhigang, et al. Improvement countermeasures and application of traffic engineering facilities at entrancesection of expressway tunnel [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40 (4): 545–551. (in Chinese and English)  
梅家林, 汤振农, 杜志刚, 等. 高速公路隧道入口区域交通工程设施改善对策与应用 [J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40 (4): 545–551.
- [14] Huang Ting, Zhang Shijuan, Jiang Jingang, et al. Experimental study on visibility of facade marking on entrance portal of highway tunnel [J]. *Highway*, 2019, 64 (12): 204–210. (in Chinese)  
黄婷, 张世娟, 蒋锦港, 等. 公路隧道入口洞门立面标记视认性实验研究 [J]. *公路*, 2019, 64 (12): 204–210.
- [15] Chen Liuxiao, Liu Tangzhi, Duan Mengmeng. Deceleration landscape design of tunnel entrance based on visual illusion [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2018, 192 (1): 99–103. (in Chinese)  
陈柳晓, 刘唐志, 段萌萌. 基于视错觉的隧道入口减速景观设计 [J]. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2018, 192 (1): 99–103.
- [16] Du Zhigang, Ni Yudan, Yang Libo, et al. Effectiveness experiment of sight induction facilities of curve sections in highway tunnel [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20 (1): 215–225. (in Chinese)  
杜志刚, 倪玉丹, 杨理波, 等. 高速公路隧道曲线路段视线诱导设施有效性试验 [J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20 (1): 215–225.
- [17] Wu Ling, Zhang Dongmei, Liu Haoxue, et al. Study on set-

- ting optical illusion deceleration markings in entrance and exit section of freeway medium-long tunnel [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 81 - 86. (in Chinese)
- 吴玲,张冬梅,刘浩学,等. 高速公路中长隧道出入口段视错觉减速标线设置研究[J]. 中国安全科学学报, 2016,26(1):81 - 86.
- [18] Pan Fuquan, Pan Haitao, Wang Zheng, et al. Analysis and modeling of drivers' visual characteristics at entrance and exit of undersea tunnel with coupling of illuminance and longitudinal slope [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 142 - 148. (in Chinese)
- 潘福全,泮海涛,王铮,等. 照度与纵坡耦合作用下海底隧道出入口段驾驶人视觉特征分析与建模[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(1): 142 - 148.
- [19] Chen Wenbing, Mao Junjie, Chen Yunjie, et al. Application of ILBP operator in recognition of fog weather situation map [J]. Computer Engineering, 2019, 500(5): 199 - 204, 209. (in Chinese)
- 陈文兵,毛军杰,陈允杰,等. ILBP 算子在浓雾天气形势图识别中的应用[J]. 计算机工程, 2019, 500(5): 199 - 204, 209.
- [20] Wang Zhao, Du Qingzhi, Long Hua, et al. Infrared and visible image fusion based on CSR and energy features [J]. Laser & Infrared, 2021, 51(8): 1088 - 1096. (in Chinese)
- 王昭,杜庆治,龙华,等. 基于 CSR 和能量特征的红外与可见光图像融合[J]. 激光与红外, 2021, 51(8): 1088 - 1096.