

doi: 10.3788/gzxb20184704.0410002

# 低照度夜视成像的自然感彩色化及增强方法

朱进<sup>1</sup>, 李力<sup>1</sup>, 金伟其<sup>1, 2</sup>, 李硕<sup>1</sup>, 王霞<sup>1</sup>, 拜晓峰<sup>2</sup>

(1 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

(2 微光夜视技术重点实验室, 西安 710059)

**摘 要:**低照度成像系统输出一般都是黑白视频,为了获得更好的夜视实际应用效果,提出了一种基于 YUV 空间色彩传递的低照度视频图像彩色化及增强的亮度拉伸色彩传递方法.该方法借鉴了双波段色彩传递自然感彩色融合方法,由灰度图像及其负片图像构成初始彩色图像,并对亮度通道进行自适应亮度拉伸,在 UV 通道进行参考图像的色彩传递,实现灰度图像的自然感彩色化和增强.通过与其他基于色彩传递的彩色化方法比较,亮度拉伸色彩传递方法对参考图像和源图像的相似程度要求较低;选取几幅适当的典型场景彩色参考图像,可对绝大多数场景取得较好的彩色化效果,具有很好的场景环境普适性.同时可以看出,该方法高效,对比度高,颜色协调性好,色彩自然,更有利于人眼的观察感知,对于低照度夜视成像效果提升效果明显.该方法已在硬件平台上实时应用,可在无需增加硬件资源的基础上,有效地应用于低照度夜视成像.

**关键词:**低照度;彩色夜视;色彩传递;图像增强;实时成像

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)04-0410002-10

## Natural-appearance Colorization and Enhancement for the Low-light-level Night Vision Imaging

ZHU Jin<sup>1</sup>, LI Li<sup>1</sup>, JIN Wei-qi<sup>1, 2</sup>, LI Shuo<sup>1</sup>, WANG Xia<sup>1</sup>, BAI Xiao-feng<sup>2</sup>

(1 MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Science and Technology on Low-Light-Level Night Vision Laboratory, Xi'an 710059, China)

**Abstract:** The output video of the low-light-level solid-state imaging devices are always gray. For better low-light-level imaging applications, a natural-appearance colorization and enhancement method named Luminance Stretching Color Transfer (LSCT) for grayscale video images using color transfer is proposed. A two-channel natural-appearance color fusion method is referred to in the LSCT method. In order to achieve the natural-appearance colorization and enhancement, firstly, the pre-colored image is obtained by combining the grayscale image with its negative image. Following this, an adaptive luminance stretching is performed and color of the reference image is transferred in the YUV color space. As compared with other methods based on color transfer, the LSCT method is less affected by the degree of similarity between the reference image and the original grayscale image. It means that relatively good results may be achieved for most scenes with an appropriate reference image. Thus, the LSCT method has better environmental adaptability. The comparisons reveal that the LSCT method is high efficient and its colorized results appear more natural in respect to human perception with better contrast and color harmony. Moreover, the LSCT method has been implemented in real time on hardware platforms.

**基金项目:**国家自然科学基金(No.61405013),陆装十三五基金(No. 6140414050327)和微光夜视技术重点实验室基金(No. BJ2017001)资助

**第一作者:**朱进(1989-),男,博士研究生,主要研究方向为微光与红外夜视成像技术. Email: zhujin6319@126.com

**导 师:**金伟其(1961-),男,教授,博士,主要研究方向为夜视与红外技术、光电检测及图像处理. Email: jinwq@bit.edu.cn

**通讯作者:**李力(1982-),男,讲师,博士,主要研究方向为夜视与红外技术. Email: lili@bit.edu.cn

**收稿日期:**2017-10-11; **录用日期:**2018-01-02

<http://www.photon.ac.cn>

Therefore, it can effectively improve the effect of human observation to apply our method in the low-light-level imaging without increasing any hardware costs.

**Key words:** Low-light-level; Color night vision; Color transfer; Image enhancement; Real-time imaging

**OCIS Codes:** 100.2980; 040.3780; 330.1720

## 0 引言

近年来,随着固体成像技术的不断发展,低照度(Low-Light-Level, LLL)CMOS、EMCCD等高灵敏度固体成像器件逐渐深入到夜视领域,但目前低照度夜间成像仍主要采用单色模式,这是因为夜间近红外波段的辐射强于可见光波段,近红外信息响应对拓展低信噪比的夜视成像具有重要作用,但真彩色滤光膜对近红外波段截止,使得彩色成像难以满足必需的信噪比.虽然近年来随着探测器灵敏度的提升与包含近红外信息的彩色滤光片及其重构方法的发展,使得真彩色低照度成像模式得以拓展,但更低照度条件下依然需要切换到单色模式.例如,法国 PHOTONIS 公司生产的低照度 CMOS 成像器件 LYNX CMOS 器件是一款可在  $4 \times 10^{-3}$  lx 以上照度工作的黑白高灵敏度探测器,其量子效率可达 80%,但增加彩色滤光片后的 KAMELEON CMOS 器件的量子效率降到约 60%,只能在  $2 \times 10^{-1}$  lx 以上保持真彩色成像模式,在更低照度下需切换到黑白模式<sup>[1]</sup>.两种模式的最低工作照度相差接近 2 个数量级,表明彩色滤光片对低照度夜视成像的影响是不可忽视的.因此,在尽可能不降低探测器探测能力的前提下,实现低照度灰度视频图像的彩色化成为夜视技术研究的重要方向之一.

目前,基于机器学习和复杂最优化的方法对昼间黑白图像的彩色化已获得很好的效果<sup>[2-4]</sup>,但由于缺少夜视图像数据库且运算量过大,尚难以满足实时夜视视频图像彩色化的要求.同时,基于色彩传递的彩色化方法已然兴起.2001 年 REINHARD 等<sup>[5]</sup>首次提出了在  $\alpha\beta$  空间<sup>[6]</sup>的色彩传递方法,实现了不同彩色图像之间的色彩传递.2002 年 WELSH 等<sup>[7]</sup>提出了一种基于亮度和纹理信息匹配的灰度图像彩色化方法(Welsh 方法).2004 年 TOET 借鉴 REINHARD 的方法,首次将色彩传递技术引入了夜视领域(Toet 方法)<sup>[8]</sup>,通过改进 Welsh 方法获得了较好的效果.2007 年王岭雪等<sup>[9]</sup>采用色彩传递技术在 YUV 颜色空间实现了基于微光和热成像的自然感彩色融合夜视成像.2012 年 LIU 等<sup>[10]</sup>提出了一种基于直方图回归的自动图像彩色化方法(Liu 方法).此外,还有一些全局方法<sup>[11-13]</sup>和局域方法<sup>[14-16]</sup>也是基于彩色参考图像和源灰度图像之间的相似性来进行色彩传递.然而,这些方法都需要参考图像和源灰度图像之间具有很高的相似性,参考图像与源灰度图像相似度越高,基于色彩传递的彩色化方法获得的彩色化效果越佳.

然而,低照度灰度图像获得对应的真实彩色图像存在一些困难:1) 彩色滤光片会降低探测器探测效率,且随机噪声的影响会更明显,故在低照度时很难正常使用彩色成像模式;2) 景物图像的颜色决定于其反射特性及照明条件,低照度条件下的图像重构与照明条件明确相关,同样的场景在不同时段和天气时场景颜色分布也会存在差异,换言之,重构的真彩色不存在唯一性;3) 低照度成像的灰度信息往往包含有近红外信息,故仅具有可见光波段的彩色图像不能很好地与其对应.彩色夜视技术更多的是追求自然感彩色,自然感彩色是指颜色与人对场景的主观印象接近,即结果色彩与记忆中的色彩接近.此外,实时彩色化处理是自然感彩色夜视成像的另一个难点,微光夜视的诸多应用均需要低延时的成像,这也限制了一些彩色化效果好,但处理量较大的算法实用化.

为了获得低照度固体成像器件的自然感彩色夜视成像,本文提出一种基于色彩传递技术的低照度夜视成像彩色化及增强方法,以获得更好的人眼感知效果.

## 1 低照度灰度图像的彩色化及增强处理方法

### 1.1 颜色空间

最佳的基于色彩传递的灰度图像彩色化处理需要在亮度和色度分离的颜色空间进行.目前常用的颜色空间有: $\alpha\beta$  颜色空间<sup>[6]</sup>、YUV(YCbCr)颜色空间<sup>[17]</sup>和 LUV 颜色空间<sup>[11]</sup>.虽然  $\alpha\beta$  颜色空间亮度和色度分离相对最佳,但由于其中的对数和指数操作引入了较大的运算量,难以实现实时处理;LUV 颜色空间的亮度与色彩也是大致分离的,且颜色转换矩阵参数为整数,处理较为简单,但由于其属于非标准颜色空间,难以与硬件处理标准和器件有效兼容,不宜作为硬件处理的选择.YUV 通常与 YCbCr 混用,在计算机应用中更多地

用 YUV 来描述图像<sup>[17]</sup>,虽然其较  $l\alpha\beta$  颜色空间的色度分离性差,但与 RGB 空间的转换更简单,且编码时考虑了人眼的视觉感知,可减小色度分量的带宽,有效降低传输错误和压缩伪像.此外,YUV 空间与硬件标准视频制式(例如 PAL 制)及相关器件兼容性好,且对全局色彩传递具有更好的效果<sup>[18]</sup>,是最有利于硬件实时视频处理的颜色空间.因此,本文的色彩传递选择在 YUV 颜色空间进行.

YUV 颜色空间与 RGB 颜色空间直接的转换关系为

$$\begin{pmatrix} Y \\ U \\ V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.257 & 0.504 & 0.098 \\ -0.148 & -0.291 & 0.439 \\ 0.439 & -0.368 & -0.071 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其逆变换关系式为

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.164 & 0 & 1.596 \\ 1.164 & -0.391 & -0.813 \\ 1.164 & 2.018 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y-16 \\ U-128 \\ V-128 \end{pmatrix} \quad (2)$$

由式(1)可以看出,对于 YUV 颜色空间的 8 位图像而言,Y 通道的取值范围为 16~235,U 和 V 通道的取值范围为 16~240.

## 1.2 低照度灰度成像的彩色化及增强处理方法

可见光/红外双通道自然感彩色融合方法已经成功实现了基于 YUV 颜色空间的色彩传递<sup>[9]</sup>,而对于单通道低照度视频图像的彩色化,主要从 3 个方面进行了针对性的研究:1)由于单通道视频图像相比于双通道视频图像少一个视频通道,因此初始彩色化部分需进行改进;2)使用传统的色彩传递方法可能导致的传递后彩色图像发生细节丢失等问题;3)针对低照度图像的处理的亮度增强.

### 1.2.1 灰度图像的彩色化处理

在基于色彩传递的多源图像彩色融合方法中初始彩色图像构造以及颜色空间的色彩传递是关键的两个环节.

获得一幅彩色融合图像通常至少需要两幅不同特性的灰度图像.对于灰度图像彩色化,由于只有一幅灰度图像  $g(i, j)$ ,难以直接构成初始彩色图像.因此,需要采用图像变换的方式获得另一幅相关的变换图像  $g'(i, j)$ ,即

$$g'(i, j) = \varphi[g(i, j)] \quad (3)$$

式中, $\varphi[\ ]$ 为变换函数.

由于人眼视觉的限制,灰度图像的正片和负片分别能够突出展现场景图像中的不同信息.因此,本文将灰度图像  $g(i, j)$ 与其负片图像  $g'(i, j)$ 作为构造初始彩色图像的源图像,在 YUV 颜色空间对  $g(i, j)$ 和  $g'(i, j)$ 采用双通道彩色融合<sup>[9]</sup>的线性组合结构构造初始彩色化图像.对于 8 位的灰度图像,其负片图像可表示为

$$g(i, j) = (2^8 - 1) - g(i, j) = 255 - g(i, j) \quad (4)$$

将彩色参考图像按式(1)从 RGB 空间转换到 YUV 空间,然后按照 Reinhard 传统色彩传递方法对初始彩色化图像进行全通道色彩传递,得到灰度图像的彩色化处理过程为

$$\begin{aligned} Y_{ACCT} &= (g - \mu_g)\sigma_{R,Y}/\sigma_g + \mu_{R,Y} \\ U_{ACCT} &= (g - \mu_g)\sigma_{R,U}/\sigma_g + \mu_{R,U} \\ V_{ACCT} &= (\mu_g - g)\sigma_{R,V}/\sigma_g + \mu_{R,V} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\mu_g$ 和  $\sigma_g$ 分别为灰度图像  $g(i, j)$ 的均值和标准差; $\sigma_{R,Y}$ ,  $\sigma_{R,U}$ ,  $\sigma_{R,V}$ 和  $\mu_{R,Y}$ ,  $\mu_{R,U}$ ,  $\mu_{R,V}$ 分别为参考图像 YUV 各通道的标准差和均值.

该方法的处理过程比传统双波段色彩传递算法更加简单,且色彩传递结果与初始彩色化的系数无关,有利于硬件实时彩色化处理.式(5)对 YUV 空间各通道均进行了传递,称为全通道色彩传递(All Channels Color Transfer, ACCT)方法.

### 1.2.2 亮度增强

夜间生活照明等光源的场景亮度动态范围往往超出探测器响应的动态范围,目前常规的自动增益控制(AGC)算法容易造成光源区域成像的饱和,但其周边曝光不足,造成所谓“灯下黑”现象,而“黑”场景正是夜

视成像更为关注的区域.由于色彩传递的彩色参考图像属于正常曝光图像,其Y通道传递难以减缓“灯下黑”现象,因此,需要研究解决“灯下黑”的微光夜视增强方法.

提出一种针对Y通道的自适应分段线性拉伸算法,其按照参考图像的Y通道均值进行自适应分段拉伸,整个拉伸是单调递增的,可在最大程度保证原图像信息真实性的同时,有效增强图像,改善“灯下黑”现象.这种U和V通道色彩传递及Y通道分段线性拉伸的方法称为亮度拉伸色彩传递(Luminance Stretching Color Transfer, LSCT)方法.LSCT方法的彩色化图像为

$$\begin{cases} Y_{LSCT} = \begin{cases} \frac{(\mu_{R,Y} - 16)}{(\mu_g - g_{min})} (g - g_{min}) + 16, & \text{if } g < \mu_g \\ \frac{(235 - \mu_{R,Y})}{(g_{max} - \mu_g)} (g - \mu_g) + \mu_{R,Y}, & \text{if } g \geq \mu_g \end{cases} \\ U_{LSCT} = (g - \mu_g)\sigma_{R,U}/\sigma_g + \mu_{R,U} \\ V_{LSCT} = (\mu_g - g)\sigma_{R,V}/\sigma_g + \mu_{R,V} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $g_{max}$  和  $g_{min}$  分别为原始灰度图像灰度的最大值和最小值.

针对Y通道三种不同变换的对比示意图如图1,分别为  $Y_o = g$ ,  $Y_o = Y_{ACCT}$  和  $Y_o = Y_{LSCT}$ . 1) 对于  $Y_o = g$ , 亮度Y通道不进行任何增强,但由于Y通道的取值为16~235,因此,对于小于16或大于235的灰度值都会发生丢失. 2) 对于  $Y_o = Y_{ACCT}$ ,  $\alpha = \sigma_{R,Y}/\sigma_g$ , 由于白天参考图像的亮度分布会比夜间低照度图像的更分散,故  $\mu_{R,Y} > \mu_g$ . 虽然低亮度部分会得到明显改善,但较高亮度部分极有可能发生明显的溢出饱和,从而导致信息丢失. 3) 对于  $Y_o = Y_{LSCT}$ ,  $(\mu_g, \mu_{R,Y})$  是拉伸变换的一个分界点,由于参考图像的均值  $\mu_{R,Y}$  一般都会远大于夜间低照度图像的均值  $\mu_g$ . 因此,在图像低亮度区域被显著提升的同时,较高亮度区域会被尽可能地进行保留,从而保证不会造成细节丢失或亮度溢出饱和. 因此,LSCT的处理方法式(6)与初始彩色化无关,算法流程如图2.

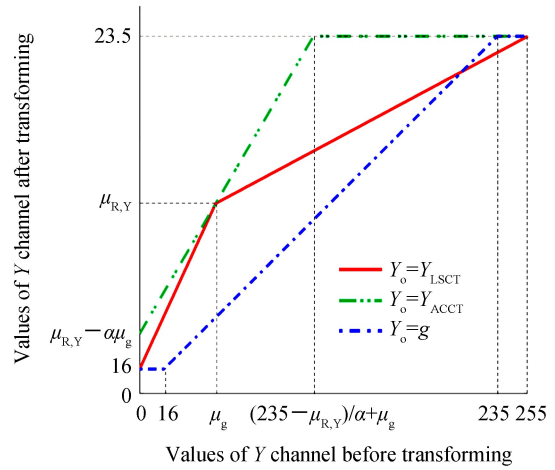


图1 亮度Y通道不同的变换对比  
Fig.1 Comparison of different transformation functions for the luminance Y channel

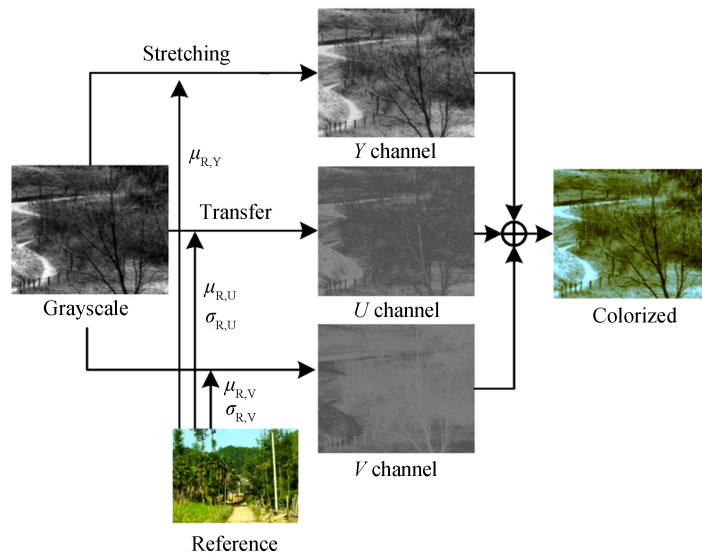


图2 LSCT方法的处理流程  
Fig.2 Diagram of the LSCT method



## 2 实验对比及效果评价

灰度图像彩色化的实验需要同时考察夜间低照度和昼间正常照度条件下的彩色化效果.为了验证 LSCT 方法的有效性,分别选用了亮度全部映射到 RGB 空间的绿色通道(G Channel)方法、Welsh 方法<sup>[7]</sup>、Toet 方法<sup>[8]</sup>、Liu 方法<sup>[10]</sup>和 ACCT 方法进行实验对比.

### 2.1 低照度灰度成像在夜间的彩色化实验

夜间低照度视频图像实验采用了中国昆山锐芯微电子有限公司(BRIGATES Inc.)的高灵敏度 CMOS 探测器组件 CIS0431,在城市夜间存在灯光环境下采集了一系列场景图像(752 × 576).

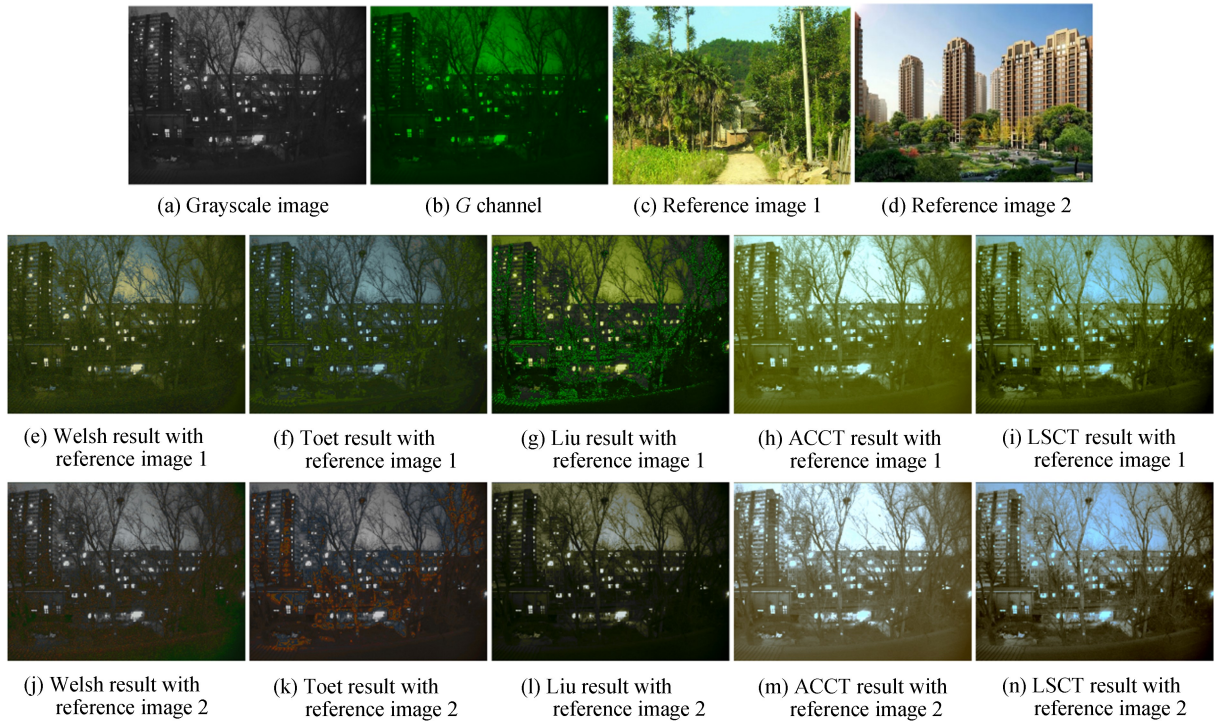
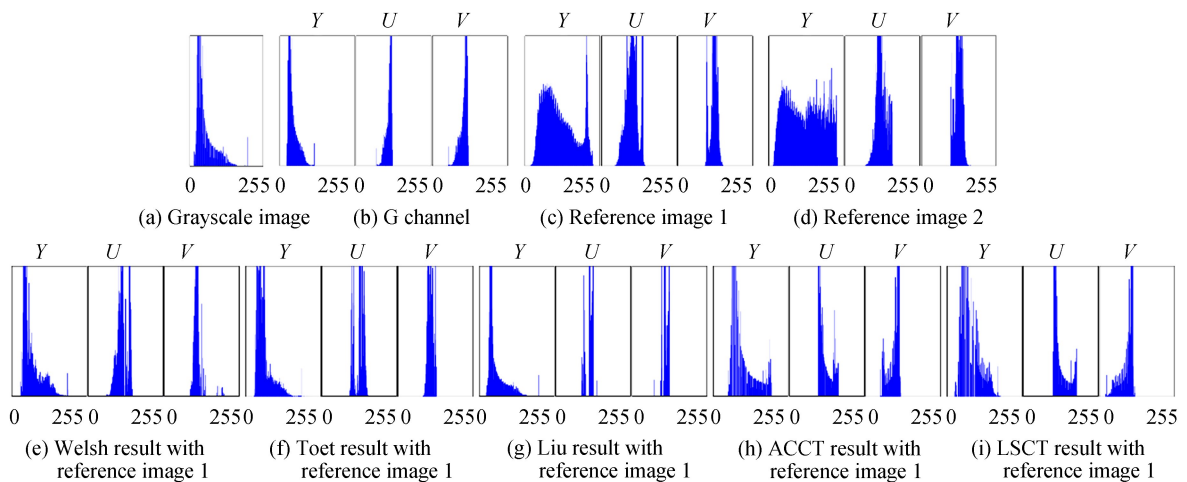


图 3 低照度灰度视频图像夜间彩色化效果对比  
Fig.3 Colorization comparison for LLL grayscale videoimages at night



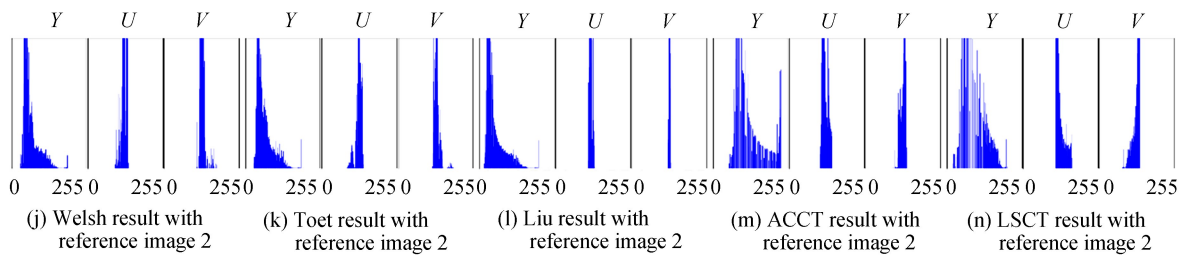


图4 对应于图3的直方图  
Fig.4 Histograms of the corresponding images in Fig. 3

图3给出一个低照度场景的灰度图像及其不同彩色化方法的图像,其中图3(a)为原始灰度图像;图3(b)是G Channel方法(模拟微光像增强器)图像;图3(c)和(d)分别为选取的两幅彩色参考图像;图3(e)~(i)和图3(j)~(n)分别是对应参考图像图3(c)和3(d)的不同彩色化图像,彩色化分别采用Welsh、Toet、Liu、ACCT和LSCT方法,可以看出,LSCT方法彩色化图像具有更好的人眼视觉感知效果,图4为对应于图3的直方图统计图.更多的低照度场景视频图像彩色化如图5.



图5 更多针对夜间低照度视频图像的LSCT方法处理结果  
Fig.5 More LSCT results for LLL grayscale video images at night

## 2.2 白天正常照度的灰度图像彩色化实验

白天正常照度灰度视频图像选取如图6(a) (1024×768)和如图7(a) (752×576)所示的两种测试图像.其中,图6(a)由彩色图像直接灰度化得到,仅包含有可见光波段的信息;图6(b)~(d)分别为G通道彩色化和2幅参考图像,且图6(d)为对应的原始彩色图像.图7(a)由低照度CMOS相机实际采得,同时包含了可见光和近红外信息;图7(c)和(d)为与原图像场景较为相似的彩色参考图像.采用了与图3相同的几种对比方法.本文主要关注包含可见光和近红外信息的低照度图像彩色化问题,图6的灰度图像彩色化实验只为说明LSCT方法的有效性.



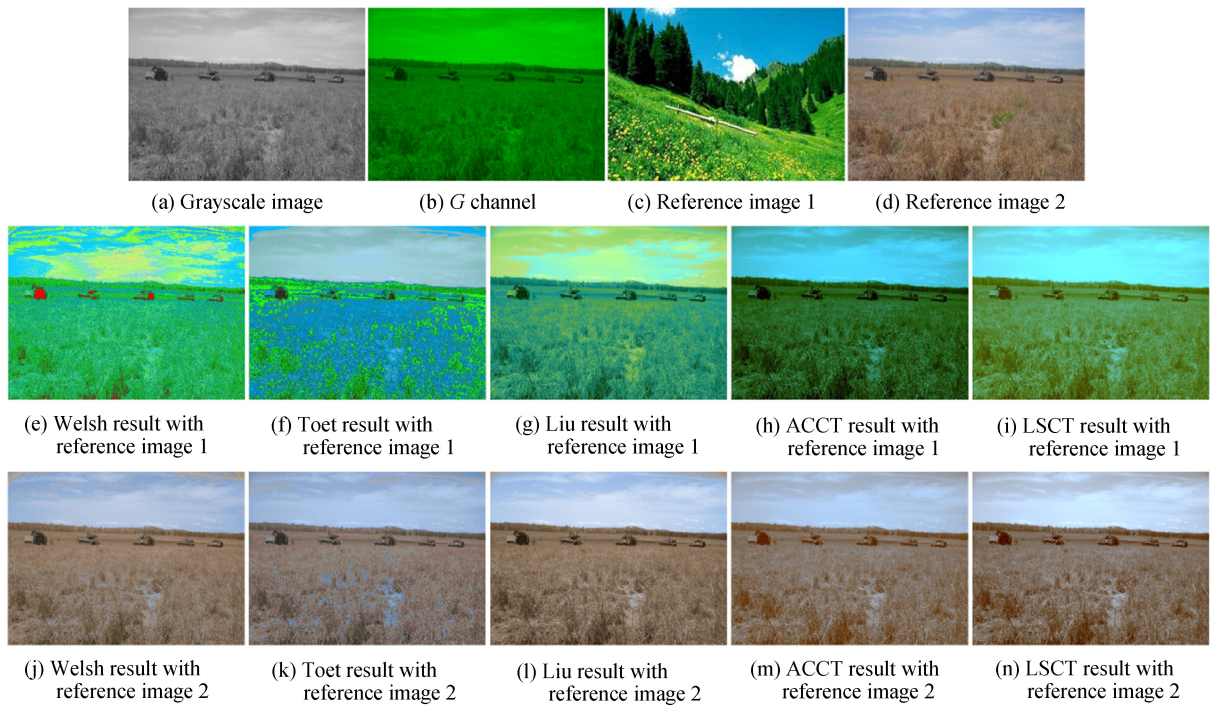


图 6 仅包含可见光信息的灰度视频图像彩色化效果对比  
Fig.6 Colorization comparison for grayscale images only containing visible information

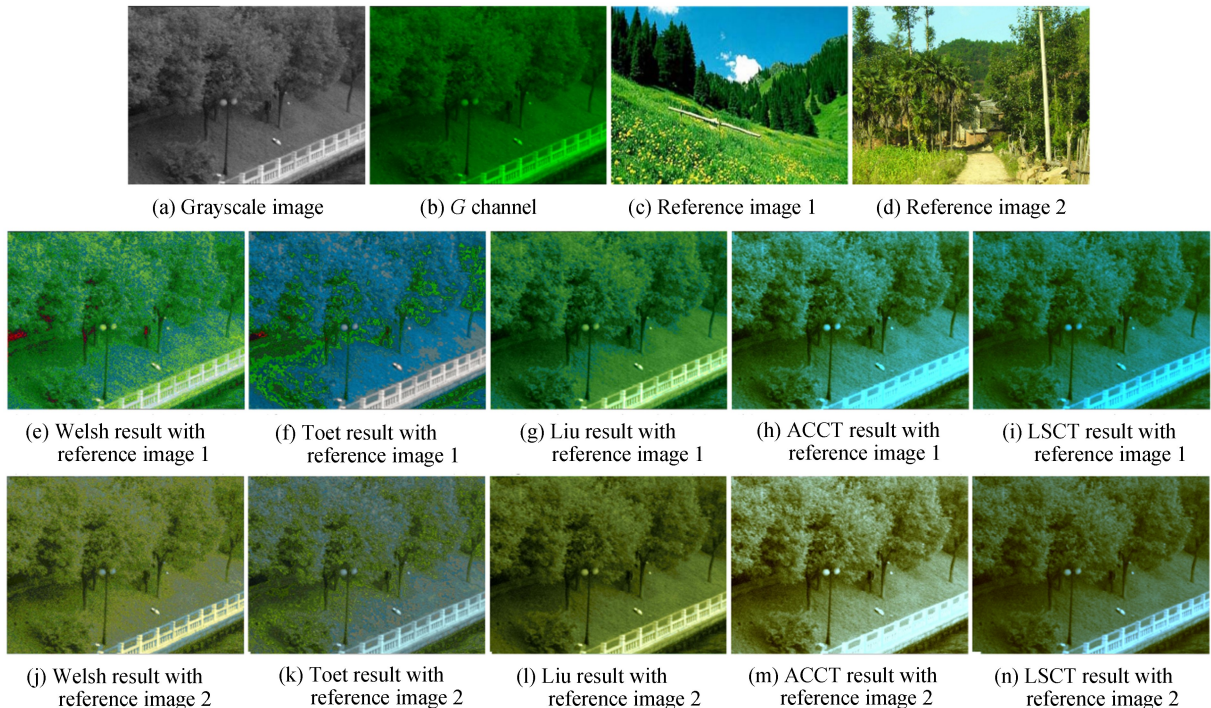


图 7 低照度的灰度视频图像的白天彩色化效果对比  
Fig.7 Colorization comparison for LLL grayscale images at daytime

结构相似性 (Structural Similarity, SSIM) 是一种图像质量评价指标<sup>[19]</sup>, 表 1 给出了图 6 几种彩色化方法的平均 SSIM(MSSIM) 值, 计算 SSIM 的参考图像选择原始彩色图像. 由图 6 和表 1 可以看出, LSCT 方法获得最佳的评价参数, 彩色化图像与原始彩色图像最为接近.

表 1 图 6 中不同方法的 MSSIM 指标比较  
Table 1 MSSIM comparison of methods in Fig.6

Welsh's	Toet's	Liu's	ACCT	LSCT
Fig.6(e), 0.401 1	Fig.6(f), 0.763 1	Fig.6(g), 0.901 8	Fig.6(h), 0.922 0	Fig.6(i), 0.932 7
Fig.6(j), 0.942 6	Fig.6(k), 0.991 8	Fig.6(l), 0.992 0	Fig.6(m), 0.997 1	Fig.6(n), 0.999 0

图 7 中彩色参考图像与原图像场景较为相似,由于没有对应的原始彩色图像,故 SSIM 判断指标并不适合低照度彩色化的评价,只能通过主观视觉评价.为了验证 LSCT 方法的环境适应性,进行了更多的白天正常照度视频图像彩色化实验,表明 LSCT 方法均具有较好的彩色化效果,由于篇幅有限,没有在此列出.

### 2.3 不同彩色化方法的效率及颜色协调性对比

本文灰度和彩色图像分别为 8 位和 24 位数据图像.表 2 给出了图 3、6 和 7 中不同彩色化方法的处理时间比较(CPU 为 Intel 双核酷睿 i5 处理器,主频 2.5 GHz,4 G RAM,MATLAB 软件平台).可以看出:ACCT 与 LSCT 方法比 Welsh、Toet 和 Liu 方法具有更短的处理时间,LSCT 方法是在 ACCT 方法基础上增加了亮度增强处理时间,但增加的处理时间很少.

表 2 不同方法的运行时间比较  
Table 2 Speed comparison of different methods

Methods	Elapsed executiontime/s					
Welsh's	3(e), 137.2	3(j), 142.4	6(e), 240.1	6(j), 249.3	7(e), 141.1	7(j), 148.1
Toet's	3(f), 68.76	3(k), 69.81	6(f), 119.1	6(k), 122.8	7(f), 69.66	7(k), 72.08
Liu's	3(g), 8.460	3(l), 8.606	6(g), 16.48	6(l), 15.40	7(g), 7.030	7(l), 7.475
ACCT	3(h), 0.451 9	3(m), 0.465 3	6(h), 0.744 2	6(m), 0.772 1	7(h), 0.452 6	7(m), 0.454 6
LSCT	3(i), 0.493 2	3(n), 0.523 5	6(i), 0.928 6	6(n), 0.934 7	7(i), 0.537 5	7(n), 0.541 3

为了评价彩色图像的自然感,引入了针对不同典型场景的颜色协调性指标(Color Harmony,CH)<sup>[20]</sup>,其中舍去了原指标评价模型有关红外目标的部分.表 3 为各测试图像的颜色协调性值,其中,粗体代表该组的最佳值.图 3“城镇建筑”场景使用 CH<sub>ITB</sub>表示,图 6 和图 7“绿色植物”场景用 CH<sub>IP</sub>表示.可以看出,LSCT 法也具有较佳的色彩协调性评价参数.

表 3 不同方法的颜色协调性比较  
Table 3 Color harmony comparison of different methods

Color	Methods				
	Welsh's	Toet's	Liu's	ACCT	LSCT
Harmony					
Fig. 3	3(e), 0.592	3(f), 0.599	3(g), 0.504	3(h), 0.575	3(i), 0.601
CH <sub>ITB</sub>	3(j), 0.646	3(k), 0.759	3(l), 0.731	3(m), 0.723	3(n), 0.761
Fig. 6	6(e), 0.415	6(f), 0.338	6(g), 0.554	6(h), 0.537	6(i), 0.540
CH <sub>IP</sub>	6(j), 0.502	6(k), 0.485	6(l), 0.509	6(m), 0.512	6(n), 0.514
Fig. 7	7(e), 0.549	7(f), 0.383	7(g), 0.707	7(h), 0.617	7(i), 0.637
CH <sub>IP</sub>	7(j), 0.541	7(k), 0.501	7(l), 0.572	7(m), 0.526	7(n), 0.622

### 2.4 相关讨论

综合实验图 3~7 和表 1~3 的对比分析,可以得出:

1)将灰度图像直接映射到 RGB 空间的绿色(G)通道的方法非常简单,图像效果与夜视像增强器成像相近,但实际仍为单色图像,图像质量没有改善,也不能加深人眼对夜视场景图像的理解.

2)Welsh 方法和 Toet 方法利用原始彩色图像作为参考图像时,可取得较好的彩色化效果,但当参考图像与原始灰度图像的纹理信息不相似时,即使二者具有相似的场景,其彩色化效果可能非常差,如图 6(e)、图 6(f)及表 1.不存在对应原始彩色图像的低照度灰度视频图像,如图 3 和 7,其不仅彩色化效果普遍较差,且表 3 中颜色协调性也较差.即这两种方法对参考图像和灰度图像纹理相似性要求非常高,且庞大的运算量使其难以用于实时处理.

3)Liu 方法的参考图像对应原始彩色图像时也可获得好的彩色化效果,如图 6(l),但图 6(g)的天空和云朵色彩明显不自然,这是因为参考图像与原始灰度图像之间仅具有相似场景,而直方图分布并不相似.对于包含近红外信息的低照度灰度视频图像,其彩色化效果也较差,如图 3(g)和(l).尽管 Liu 方法在图 6(g)和图 7(g)中获得了最佳的颜色协调性(见表 3),但在图 6(g)的天空部分彩色化仍然相对不自然.即 Liu 方法要求



参考图像和源灰度图像具有高相似的直方图分布.另外,虽然 Liu 方法比 Welsh 和 Toet 方法要快(见表 2),但相比于 ACCT 和 LSCT 方法较慢.

4) ACCT 方法使得彩色化图像与参考图像具有相同的均值和方差,彩色化效果相对较好(见表 3),且处理速度最快.然而,ACCT 方法在低照度成像时可能会导致图像细节信息丢失,如图 4(h)和(m),Y 通道最大值部分发生了溢出饱和,Y 通道最小值部分也可能发生丢失,丢失信息决定于参考图像和原图像之间的亮度相似性.

5) LSCT 方法在自适应分段拉伸变换中,亮度信息将参照彩色参考图像的亮度均值,同时最大程度地保留原有图像信息(如图 7(i)和(n)较 ACCT 方法的图 7(h)和(m)可清晰看到石栏细节纹理).自适应分段拉伸对低照度图像进行了有效的增强,对“灯下黑”现象有明显改善;由表 3 可看出,LSCT 方法具有较好的颜色协调性,尤其对于夜间低照度成像的彩色化,与人们的记忆非常接近,有利于人眼观察感知.LSCT 方法高效,适宜实时处理,是一种有效的低照度灰度视频图像彩色化及增强方法.

6) 由于实际应用中低照度灰度视频图像很难实时获得相应的原始彩色图像,要使实际应用中的参考图像和灰度视频图像具有高相似度是不现实的.实际上,相比于 Welsh、Toet 和 Liu 方法对这种相似程度的苛刻要求,LSCT 方法的要求较为宽松.在诸多实验和应用中,多次选取了 3 幅典型彩色图像作为参考图像,得到的图像色彩自然感都比较好,适合人眼的观察感知.因此,只要选取一幅典型的参考图像作为特定场景的默认参考图像,LSCT 方法对于大多数相近场景都可取得相对较好的彩色化结果,具有较高的普适性.当有明显差别的特殊场景需求时,再选择一幅更适合的典型参考图像.此外,由于 LSCT 方法只需要参考图像的 5 个参数,占用存储空间小,故可采用一系列典型参考图像的自适应方法.即 LSCT 方法对于低照度成像应用具有明显的优势.

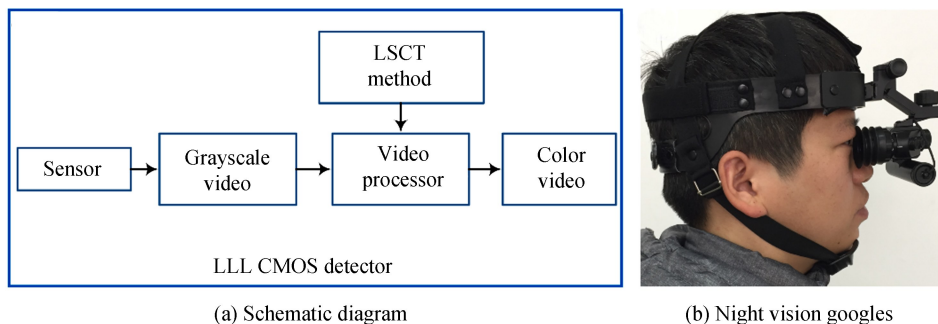


图 8 低照度灰度视频图像 LSCT 彩色化方法应用  
Fig.8 Application of the LSCT method

在前期的研究<sup>[9,21]</sup>中已成功研制了双波段彩色图像融合 DSP 处理平台,实现了 YUV 空间的可见光/红外视频图像的彩色融合处理.LSCT 方法在该图像处理平台上实现了灰度视频的彩色化处理,输出标准 PAL 制式彩色视频,处理延时小于 40 ms.如图 8,LSCT 方法已成功集成到一款低照度黑白 CMOS 探测器自身的视频处理器中,开发了一款自然感彩色夜视眼镜,取得了较好的夜视增强效果.

### 3 结论

本文研究了一种基于色彩传递的低照度灰度视频图像自然感彩色化及增强 LSCT 方法,实验结果表明,LSCT 方法高效,彩色化图像相对目前的几种色彩传递方法具有更好的色彩自然感,符合人眼观察习惯.此外,LSCT 方法受参考图像和原始灰度图像之间的相似程度影响较小,对于不同场景具有更好的普适性.对于低照度夜视成像,LSCT 方法不仅可获得自然感彩色图像,而且可明显提高图像的对比度,提升人眼的观察效果.

LSCT 方法已在硬件处理平台上成功实现了视频图像的实时处理,获得了较好的实际应用结果,可在不明显增加硬件的条件下实现低照度灰度图像的彩色化及增强.因此,LSCT 方法在军用夜视、公共安全监视等领域具有广泛的应用前景.

## 参考文献

- [1] PHOTONIS. Low light level imaging sensors[EB/OL]. (2014-06-02) [2017-09-10] <https://www.photonis.com/en/low-light-level-imaging-sensors>.
- [2] CHARPIAT G, HOFMANN M, SCHOLKOPF B. Automatic image colorization via multimodal predictions[J]. *Computer Vision-ECCV 2008*, 2008:126-139.
- [3] CHIA Y S, ZHUO S, GUPTA R K, *et al.* Semantic colorization with internet images[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6):1-8.
- [4] BUGEAU A, TA V T, PAPADAKIS N. Variational exemplar-based image colorization[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(1): 298-307.
- [5] REINHARD E, ASHIKHMIN M, GOOCH B, *et al.* Color transfer between images[J]. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 2001, 21(5):34-41.
- [6] CHIAO C C, RUDERMAN D L, CRONIN T W. Statistics of cone responses to natural images: implications for visual coding[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1998, 15(15):2036-2045.
- [7] WELSH T, ASHIKHMIN M, MUELLER K. Transferring color to greyscale images[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2002, 21(3):277-280.
- [8] TOET A. Colorizing single band intensified nightvision images[J]. *Displays*, 2005, 26(1):15-21.
- [9] WANG Ling-xue, SHI Shi-ming, JIN Wei-qi, *et al.* Color transfer and its real-time system based on a YUV space for dual-channel video images[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2007, 27(3): 189-191.  
王岭雪, 史世明, 金伟其, 等. 基于 YUV 空间的双通道视频图像色彩传递及实时系统[J]. *北京理工大学学报*, 2007, 27(3):189-191.
- [10] LIU S, ZHANG X. Automatic grayscale image colorization using histogram regression[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2012, 33(13):1673-1681.
- [11] KEKRE H B, THEPADE S D. Color traits transfer to grayscale images[C]. First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. IEEE Computer Society, 2008:82-85.
- [12] CHUNG C H, CHEN W Y. Transferring color to grayscale images using vector quantization of luminance mapping techniques[J]. *Optical Engineering*, 2009, 48(2):55-56.
- [13] ZHAO Yuan-meng, WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, *et al.* Single-band infrared image colorization algorithm based on color transfer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 654-658.  
赵源萌, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于色彩传递的单波段热图像彩色化处理算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(3):654-658.
- [14] XIANG Y, ZOU B, LI H. Selective color transfer with multi-source images[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(7):682-689.
- [15] XUE Mo-gen, ZHOU Pu-cheng, LIU Cun-chao. A novel local color transfer method for night vision image[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 781-785.  
薛模根, 周浦城, 刘存超. 夜视图像局部颜色传递算法[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(2):781-785.
- [16] YANG Y, ZHAO H, YOU L, *et al.* Semantic portrait color transfer with internet images[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2017, 76(1): 523-541.
- [17] WIKIPEDIA. YUV[EB/OL]. (2017-09-14) [2017-10-05] <http://en.wikipedia.org/wiki/YUV>.
- [18] FU R, SUN B, LV J, *et al.* Comparison of two types of color transfer algorithms in YUV and Lab color spaces[C]. *Optical Sensing and Imaging Technology and Applications*. 2017:144.
- [19] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4):600-612.
- [20] GAO S, JIN W, WANG L. Objective color harmony assessment for visible and infrared color fusion images of typical scenes[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(11):1371-1379.
- [21] SHI Shi-ming, WANG Ling-xue, JIN Wei-qi, *et al.* Color night vision research based on multi-resolution color transfer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(3): 553-558.  
史世明, 王岭雪, 金伟其, 等. 基于多分辨率色彩传递的彩色夜视方法研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(3): 553-558.