

低照度下六基色微光融合的彩色成像方法研究

焦祉衡¹, 李野^{1*}, 陶冶¹, 焦岗成²

¹长春理工大学, 理学院, 吉林 长春

²微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安

Email: 382718316@qq.com, *382718316@qq.com

收稿日期: 2021年3月7日; 录用日期: 2021年3月30日; 发布日期: 2021年4月6日

摘要

为突破低照度条件下传统三基色成像器件光谱利用率低的限制, 本文提出了一种低照度下六基色微光融合的彩色成像方法, 借鉴虾蛄复眼结构的十二原色光谱感光模型, 优化并确定适用于彩色微光成像的六基色虾蛄眼仿生色谱体系; 完成六基色滤光片参数设计, 且加入可见光波段全透滤光片以提高成像灵敏度; 建立色彩传递模型, 实现由六基色色域向RGB颜色空间的色谱映射; 在微光实验室中完成多波段微光图像的采集, 设计相应算法并实现, 完成多波段微光图像融合与图像质量及色彩还原度评价。评价结果表明, 本文提出的低照度下六基色微光融合的彩色成像方法能够提高可见光光谱利用率, 进而得到清晰、高信噪比、颜色信息准确且丰富的真彩色夜视图像。

关键词

真彩色夜视, 多波段, 图像融合, 高信噪比, 图像质量评价

Research on Color Imaging Method of Six Primary Color Low Light Level Fusion under Low Illumination

Zhiheng Jiao¹, Ye Li^{1*}, Ye Tao¹, Gangcheng Jiao²

¹College of Science, Changchun University of Technology, Changchun Jilin

²Low Light Level Key Laboratory, Xi'an Shaanxi

Email: 382718316@qq.com, *382718316@qq.com

Received: Mar. 7th, 2021; accepted: Mar. 30th, 2021; published: Apr. 6th, 2021

*通讯作者。

Abstract

In order to break through the limitation of low spectral efficiency of traditional trichromatic imaging devices under low illumination conditions, in this paper, a color imaging method of six primary colors low light level fusion under low illumination is proposed. Referring to the twelve primary color chromatographic sensitivity model of Squilla compound eye structure, the six primary colors Squilla eye bionic chromatographic system suitable for color low light level imaging is optimized and determined; the parameters of six primary colors filter are designed, and the visible light band full transparent filter is added to improve the imaging sensitivity; the color transfer mode is established. In the low light level laboratory, the acquisition of multi band low light level image is completed, the corresponding algorithm is designed and implemented, and the multi band low light level image fusion, image quality and color restoration degree evaluation are completed. The evaluation results show that the proposed six primary color low light level fusion color imaging method under low illumination can improve the utilization of visible light spectrum, and then get clear, high signal-to-noise ratio, accurate and rich color information of true color night vision image.

Keywords

True Color Night Vision, Multi Band, Image Fusion, High SNR, Image Quality Evaluation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

以往的夜视图像都是单色图像,如微光图像[1]与红外图像[2],存在着信噪比低、图像缺乏深度感等问题,不利于对目标的长时间观察。为充分利用人眼彩色视觉的高分辨率和高灵敏度的特性[3],从上个世纪七十年代起,国内外就已开展彩色夜视技术的研究,尤其是近些年美国已取得多项彩色夜视方面的成果[4][5][6][7],且已有部分部队装备了彩色夜视仪,因此我国发展彩色夜视技术便显得尤为重要。

彩色夜视技术按色彩还原可分为假彩色夜视技术与真彩色夜视技术[8]。通过假彩色夜视技术得到的图像确实能够对目标与背景有良好的色彩区分,但假彩色图像与人眼视觉观察习惯不相符,长时间观察同样会使观察者产生视觉疲劳与身体不适。而真彩色夜视技术是利用场景中的真实颜色信息进行彩色成像,所成图像符合人眼视觉观察习惯。但目前真彩色成像技术基于 RGB 三基色成像器件,受色彩还原度的限制,且 RGB 三基色成像器件的光谱利用率低,限制了器件探测灵敏度的提高,进而限制了其在微光夜视领域的应用。

为突破传统三基色成像器件光谱利用率低的限制,本文提出了低照度下六基色微光融合的彩色成像方法,该方法借鉴了虾蛄复眼结构的十二原色色谱感光模型,查阅相关文献可知虾蛄眼对光谱的吸收能力极强,在可见光波段存在七个波长的吸收峰,感光能力至少是 RGB 采集方式的一倍以上,光谱利用率能够达到 92%。对基于人眼观察的微光系统而言,本课题以虾蛄眼可见光范围内六个吸收峰为基础进行优化并确定适用于本课题的六基色虾蛄眼仿生色谱体系,利用虾蛄眼仿生色谱采集模式来展宽光谱并提高光子收集能力。可见光波段全透滤光片的引入能够充分利用每一个光子,大幅度提升成像器件的探测灵敏度。因现有的显示系统均为 RGB 色系,需建立六基色虾蛄眼仿生色谱——RGB 颜色空间的色彩传

递模型, 实现六基色图像至 RGB 图像的转换, 进而引入全光谱图像, 最终实现高信噪比真彩色微光图像的重现。

2. 六基色及全透滤光片设计

传统三基色器件皆利用红、绿、蓝三色滤光片, 每种滤光片的光谱透过曲线存在大范围的交叠。因日间照度足够高, 各波段的光子数量丰富, 可以还原出色彩准确的图像, 但在夜间即低照度条件下, 各波段光子数量匮乏, 大面积的交叠会对色彩还原产生极大影响, 导致色彩还原不准确且色彩饱和度很低。而本课题中滤光片则消除了交叠的影响, 具体设计如下。

低照度下六基色微光融合的彩色成像方法的第一步是获取六基色与全光谱图像, 需设计合适的六基色滤光片与全透滤光片。已知可见光波长范围在 380~760 nm, 可分为红 760~622 nm、橙 622~597 nm、黄 597~577 nm、绿 577~492 nm、青 490~480 nm、蓝 480~455 nm、紫 455~380 nm 七个波段。目前已确定六基色波段中心波长分别为 455 nm、510 nm、564 nm、618 nm、672 nm、726 nm, 用 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_6 表示。

最终确定六基色滤光片参数如表 1 所示, 均采用带通曲线, 准高斯线型。全透滤光片可用透明窗口来等效替代。

Table 1. Six-primary color filter parameters

表 1. 六基色滤光片参数

基色	中心波长(nm)	带宽(nm)	光谱范围(nm)	透过率 T (%)
C_1	455	60	425~485	$T \geq 80$
C_2	510	60	480~540	$T \geq 80$
C_3	564	60	534~594	$T \geq 80$
C_4	618	60	588~648	$T \geq 80$
C_5	672	60	642~702	$T \geq 80$
C_6	726	60	696~756	$T \geq 80$
W			380~1100	$T \geq 80$

对于夜视系统而言, 六基色滤光片的引入并没有产生新的噪声, 只是某些光谱进行了反射, 改变的是入射到 CCD 上的光子数量, 进而导致 CCD 及夜视系统输出真彩图像的信噪比降低[9]。

3. 多光谱图像融合方法

3.1. 六基色虾蛄眼仿生色谱颜色空间向标准 RGB 颜色空间的映射

主流的显示设备都多为基于 CIE1931 或 CIE1976 标准的 RGB 三基色显示设备, 无法实现六基色虾蛄眼仿生色域的标准输出。要获取每个像素显示用的 RGB 颜色通道值, 需构建从六基色虾蛄眼仿生色谱颜色空间向标准 RGB 颜色空间映射的色度转换模型。

3.1.1. 六基色色度坐标建立

根据 RGB 三基色模型[10], 任意彩色光 C 都可以由 R、G、B 三基色合成。

$$C = rR + gG + bB \quad (1)$$

r 、 g 、 b 分别为 R、G、B 色光的加权系数, 任意的 $[r, g, b]$ 组合会得到不同颜色的光, 且彩色光 C 的明度等于原始色光的明度和, 因此 RGB 三基色混色也叫做加法混色。

现在其 RGB 三基色探测波段盲区内插入三个新的探测波段，获取六基色的另外三个基色，即有：

$$[C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4 \ C_5 \ C_6] = [B \ f_2(R,G,B) \ G \ f_4(R,G,B) \ f_5(R,G,B) \ R] \quad (2)$$

其中：

$$\begin{aligned} C_2 &= f_2(R,G,B) = r_2R + g_2G + b_2B \\ C_4 &= f_4(R,G,B) = r_4R + g_4G + b_4B \\ C_5 &= f_5(R,G,B) = r_5R + g_5G + b_5B \end{aligned} \quad (3)$$

f_2 、 f_4 、 f_5 表示插入的另外三个基色对应的插值函数。图 1 给出了六基色在标准色度图中的色度坐标示意图。

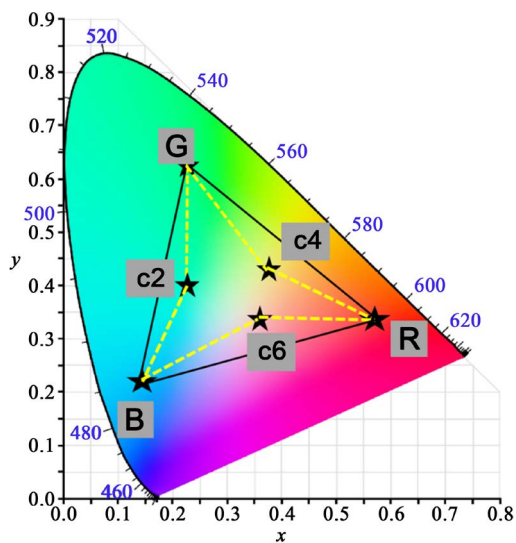


Figure 1. Schematic diagram of six primary colors chromaticity coordinates
图 1. 六基色色度坐标示意图

3.1.2. 色度转换模型的构建

由典型的色度转换模型可知，转换矩阵可以描述从一个颜色空间到另一个颜色空间的变换：

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = T \times \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_k \end{bmatrix} \quad (4)$$

在该式中 $[F_1, F_2, \dots, F_k]$ 表示各彩色滤色元对应的像素响应，本文中为基于实验采集到的六基色数据 $[C_1, C_2, \dots, C_6]$ ； T 为需要求解的一个 $3 \times k$ 维度的转换矩阵，在本文中即为 3×6 维度的转换矩阵，如式(5)所示。

$$T = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵 T 的特点是每行元素值相加为 1，且可根据滤光片光谱透过率曲线与横轴波长围成的面积占该波段总面积的比例来大致确定 T 内的元素值，即：

$$a_{ij} = k \cdot \frac{\int_{\lambda_{j1}}^{\lambda_{j2}} C_j d\lambda}{\lambda_{j2} - \lambda_{j1}} \quad (6)$$

式中 k 为比例常数。 $i = 1, 2, 3$, $i = 1$ 时, 分母及分子中积分上下限为蓝光波长范围; $i = 2$ 时, 为绿光波长范围; $i = 3$ 时, 为红光波长范围。 $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ 。经计算可得:

$$T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.159 & 0.421 & 0.42 \\ 0 & 0.521 & 0.479 & 0 & 0 & 0 \\ 0.981 & 0.019 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

当转换矩阵 T 确定后, 式(4)中等式左侧的 $[R, G, B]$ 可计算出来, 得到 $[R, G, B]$ 三幅单色图像, 完成六基色虾蛄眼仿生色谱颜色空间向 RGB 颜色空间的映射。

3.2. $[R, G, B]$ 与全光谱图像融合方法

在本文中, 设计了一种 $[R, G, B]$ 图像与全光谱图像融合方法, 如图 2 所示。

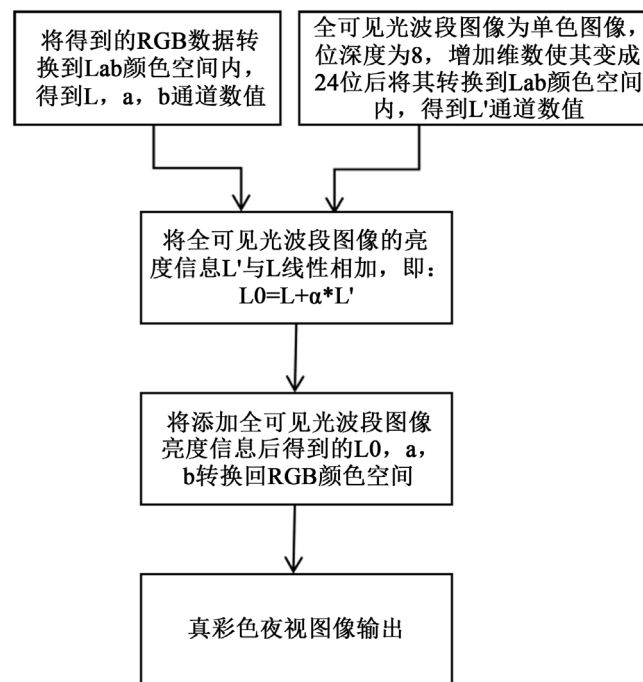


Figure 2. Flow chart of the fusion method of full spectrum image and $[R, G, B]$
图 2. 全光谱图像与 $[R, G, B]$ 融合方法流程图

为提高系统探测灵敏度, 使用全透滤光片获取全光谱响应数据, 这些数据中包含着图像的大量亮度及空间信息, 可以用来丰富六基色彩色图像的对比度、清晰度及锐化程度。

为将全光谱信息添加到 $[R, G, B]$ 图像信息中, 同时保持色彩还原效果, 本文选取 Lab 颜色空间中 L 通道作为全光谱数据的添加通道, 因为亮度信息与表示颜色信息的 a 和 b 是独立的。同时, Lab 颜色空间对色彩的编码方式非常适用于保存不同亮度信息下物体表面外观的颜色信息[11]。

首先, 将六基色转换得到的 $[R, G, B]$ 数据转换到 Lab 颜色空间, 得到对应的 L、a、b 三通道数据。由于全光谱图像为单色图像, 位深度 8 位, 无法直接转换到 Lab 颜色空间中, 需增加维数使其变成 24 位图像后才可将其转换到 Lab 颜色空间内, 得到亮度通道 L' 。将全可见光波段图像的亮度信息 L' 与 L 相加, 得到:

$$L_0 = L + \alpha \cdot L' \quad (8)$$

其中, α 表示光亮度加权系数, 可根据添加全光谱数据后的图像质量进行修正。再将添加全光谱信息后的 L_0 与 a, b 从 Lab 颜色空间转换到 RGB 颜色空间, 实现最终的真彩色夜视图像输出。

4. 真彩色成像实验

基于多波段图像融合的真彩色微光夜视方法研究的工作流程如下: 在标准光源 D65 下, 目标及背景反射光经六基色与全透滤光片过滤后得到六基色光线与可见光全波段光线; 经滤光片过滤后的光线打到 CCD 图像传感器上, 获取对应的探测器输出响应值, 得到需要的多光谱图像; 图像经计算机处理及存储; 完成多光谱图像采集后, 设计六基色+全光谱图像融合算法输出彩色图像。示意图如图 3 所示。

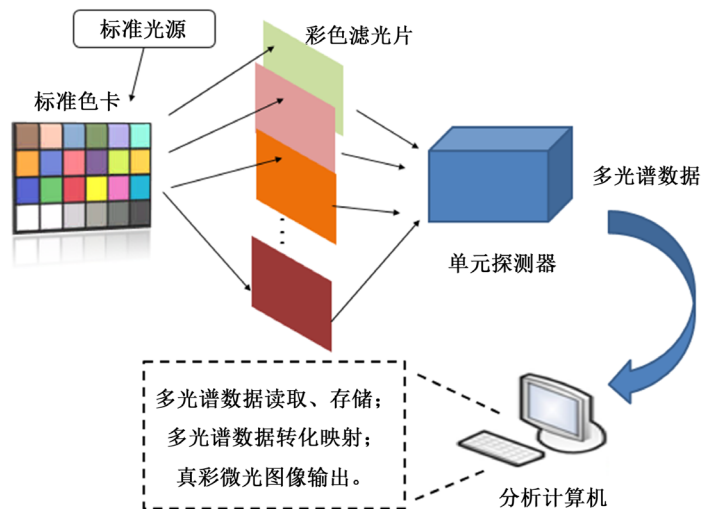


Figure 3. Work flow of research on true color low light level night vision method based on multi-band image fusion
图 3. 基于多波段图像融合的真彩色微光夜视方法研究工作流程

实验参数:

- 1) 实验在微光实验室中进行, 成像目标为 24 色标准色卡, 图 4 为标准色卡实物图, 也是本文中进进行图像质量评价时的标准图样;
- 2) 六基色滤光片通过镜头支架固定在相机镜头前, 镜头支架由 3D 打印得到;



Figure 4. 24-color standard color card
图 4. 24 色标准色卡

- 3) 控制 CCD 的曝光时间使每幅图像的积分时间为 40 ms;
- 4) 实验时光照度分别为 0.5 lx、2.5 lx 及 5 lx。
- 5) 获取的六基色、三基色与全光谱图像及融合后的彩色图像如图 5~7 所示, 其中六基色图像的命名为对应的中心波长, E 为图像灰度均值; 三基色图像通过中心波长为 455 nm、564 nm、672 nm、高斯线性且带宽为 110 nm、光谱透过率大于 80% 的滤光片获取。



Figure 5. Multi-band image collected by 0.5 lx and color image after fusion
图 5. 0.5 lx 采集的多波段图像及融合后彩色图像

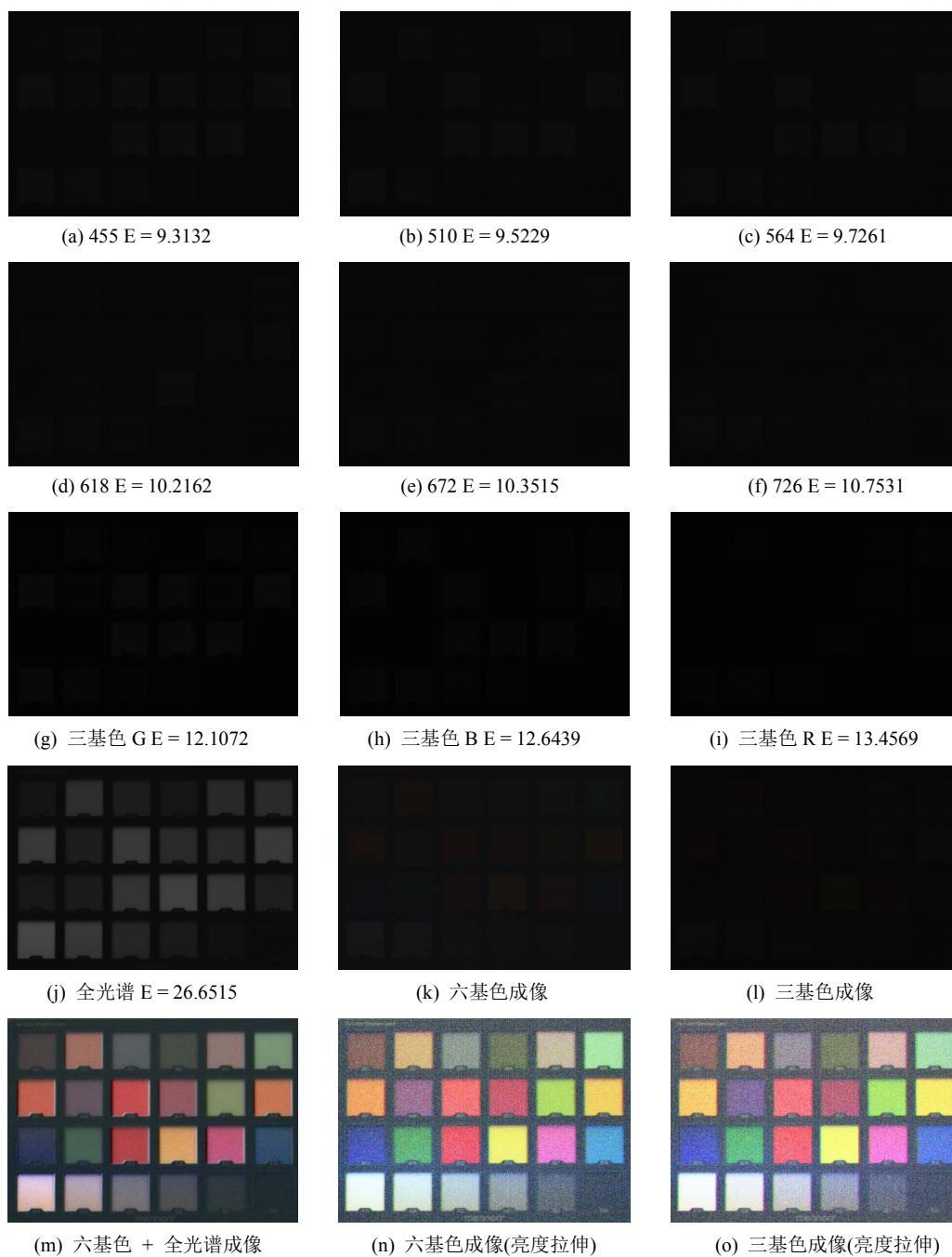
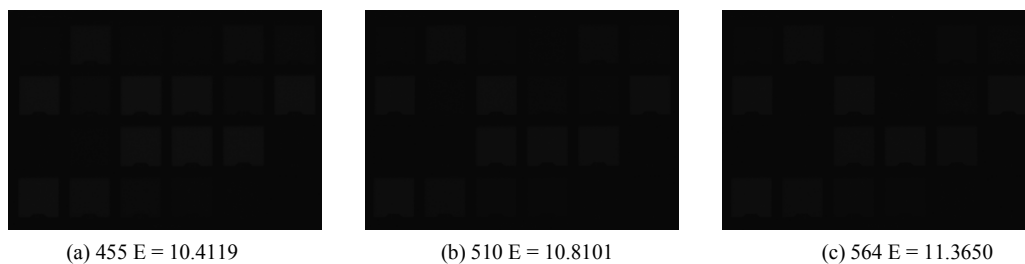


Figure 6. Multi-band image collected by 2.5 lx and color image after fusion
图 6. 2.5 lx 采集的多波段图像及融合后彩色图像



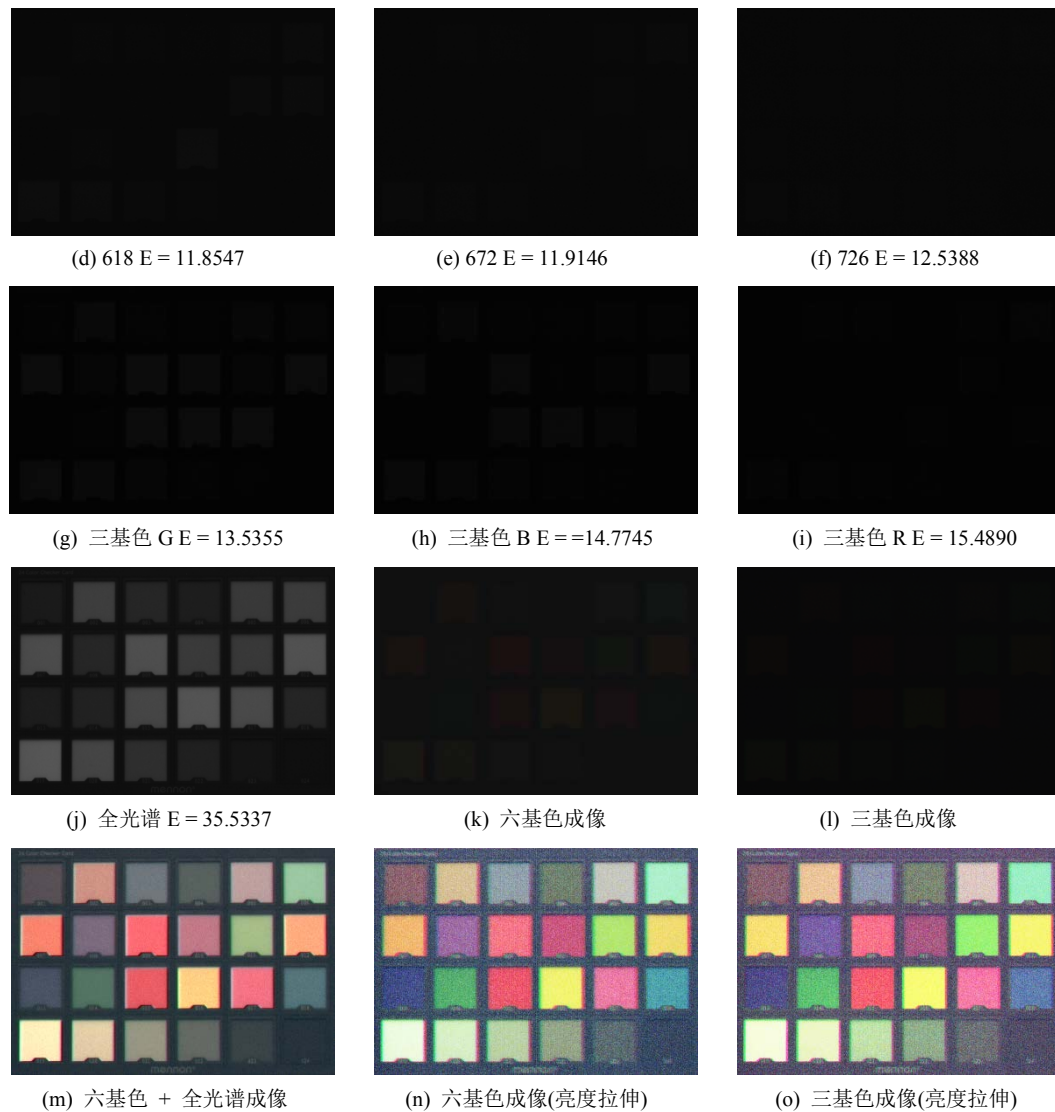


Figure 7. Multi-band image collected by 5 lx and color image after fusion
图 7. 5 lx 采集的多波段图像及融合后彩色图像

5. 实验结果及分析评价

在 0.5 lx、2.5 lx 及 5 lx 照度条件下，人眼直接观察到三基色图像和六基色图像直接融合得到的彩色图像(图 5~7 中的 k、l 图像)几近全黑，无法分辨各色块之间的差异。为了便于读者观看，对其灰度值进行拉伸，提升图像的动态范围及对比度，得到 n、o 两幅图像。可看出由拉伸后得到的 n、o 图像只是亮度得到提升，仅便于人眼观察，但图像噪声很大，信噪比低。而由六基色与全光谱图像融合后得到的彩色图像(图 5~7 中的 m 图像)目视效果良好，噪声小，无需进行灰度拉伸即可直接观察，颜色分辨性较好，不同颜色之间的色块分界明显，利于人眼长时间观察。

对图像仅进行人眼主观评价是不充分的，需对图像质量进行客观评价，选用的评价指标有：信息熵 [12]，熵反映了图像的信息量，熵越大图像代表的信息量越大；灰度均值 [13]，图像的灰度均值反映了图像的平均亮度，如果平均值适中，则目视效果良好；灰度方差 [14]，方差反映了图像的对比度和清晰度，方差越大则对比度越高，清晰度越高 [15]；峰值信噪比 PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)，PSNR 的值越

大,表明待评图像与参考图像之间的失真越小,待评图像质量越好[16]。对图像色彩还原评价指标选取的色差,计算色差的公式为最新的 CIEDE 2000 色差公式[17],其是将融合得到的彩色图像与标准图样进行比较,其值越小,表示图像的色彩还原度越好。

表 2~6 给出了三种照度下六基色、全光谱灰度图像与融合后彩色图像在信息熵、灰度均值、灰度方差、峰值信噪比及色差的评价结果。

Table 2. Image information entropy after fusion under three illuminances

表 2. 三种照度下融合后图像信息熵

图像	0.5 lx	2.5 lx	5 lx
三基色直接融合	1.7217	2.1427	2.2155
六基色直接融合	2.4291	2.8534	3.0401
六基色全光谱融合	6.6143	7.2143	7.4028

Table 3. The average gray values of multi-band images and fused images under three illuminances

表 3. 三种照度下多波段图像与融合后图像灰度均值

图像	0.5 lx	2.5 lx	5 lx
三基色直接融合	10.9110	12.8420	14.8034
六基色直接融合	15.5218	16.3167	17.1710
六基色全光谱融合	60.4159	76.7885	99.4828

Table 4. The gray-scale variance of the multi-band image and the fused image under three illuminances

表 4. 三种照度下多波段图像与融合后图像灰度方差

图像	0.5 lx	2.5 lx	5 lx
三基色直接融合	0.5827	1.1765	1.6729
六基色直接融合	1.5179	3.3846	4.7446
六基色全光谱融合	609.5440	1746.0	3063.9

Table 5. The peak signal-to-noise ratio (PSNR) of the multi-band image and the fused image under three illuminances

表 5. 三种照度下多波段图像与融合后图像峰值信噪比 PSNR

图像	0.5 lx	2.5 lx	5 lx
三基色直接融合	9.3221	9.3733	9.4223
六基色直接融合	9.5441	9.9444	10.0240
六基色全光谱融合	15.4117	17.5586	20.6568

Table 6. Image chromatic aberration after fusion under three illuminances

表 6. 三种照度下融合后图像色差

图像	0.5 lx	2.5 lx	5 lx
三基色直接融合	26.0143	25.9381	25.8783
六基色直接融合	24.7872	24.5978	24.3801
三基色融合后拉伸	19.7713	20.8489	19.9353
六基色融合后拉伸	17.0420	16.6176	16.5010
六基色全光谱融合	11.4707	7.6202	5.1781

由表 2~6 可得以下结论:

1) 在环境照度相同情况下, 六基色融合得到的彩色图像的信息熵、灰度均值、灰度方差及 PSNR 均要大于三基色融合得到的彩色图像, 说明六基色融合较传统三基色融合能够提升光谱利用率, 输出的彩色图像质量确实要好于传统三基色成像。

2) 在环境照度相同情况下, 六基色与全光谱融合得到的彩色图像的各个评价指标皆为最优, 信息熵最优说明图像信息最多, 灰度均值最优说明图像平均亮度高, 目视效果很好, 灰度方差最优说明图像对比度最高, 最清晰度, 而 PSNR 最高说明图像失真程度最小, 图像质量最好。说明全光谱图像的引入提升了优于三基色融合图像的六基色融合图像的质量。

3) 各彩色图像的色差随环境照度的提升而减小, 说明环境照度直接影响色彩还原质量。而在环境照度相同情况下, 各图片色差大小有如下关系: 三基色融合 > 六基色融合 > 三基色融合后灰度拉伸 > 六基色融合后灰度拉伸 > 六基色与全光谱融合, 大小关系能够看出六基色融合后图像的色差要小于三基色融合后图像, 灰度拉伸后也是如此, 说明六基色融合后图像的色彩还原度要好于三基色融合后的图像。而六基色与全光谱融合后的彩色图像的色差最小, 色彩还原度最高。

6. 结论

本文针对低照度条件下传统三基色成像器件光谱利用率低、色彩还原不准确等问题, 提出了一种基于多波段图像融合的真彩色微光夜视方法研究。从虾蛄眼色域响应曲线出发, 利用六基色成像实现了成像波段 80% 以上的光谱覆盖, 提高光谱利用率、得到纯色光子, 引入全光谱图像进一步提高成像灵敏度。完成真彩色成像实验, 并对输出彩色图像进行质量与色彩还原度评价。评价结果表明, 六基色融合图像在全部指标上均好于三基色成像, 且六基色+全光谱融合图像在全部指标上均好于其他图像, 说明本课题提出的方法能够有效提高真彩色微光图像的质量与色彩还原度, 进而得到高信噪比的真彩色微光图像。

参考文献

- [1] Paicopolis, P.S., Hixson, J.G. and Noseck, V.A. (2007) Human Visual Performance of a Dual Band I²/IR Sniper Scope. *SPIE*, **6737**, 1-12. <https://doi.org/10.1117/12.738108>
- [2] Hertel, D., Marechal, H., Tefera, D.A., Fan, W. and Hicks, R. (2009) A Low-Cost VIS-NIR True Color Night Vision Video System Based on a Wide Dynamic Range CMOS Imager. 2009 *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, Xi'an, 3-5 June 2009, 273-278. <https://doi.org/10.1109/IVS.2009.5164290>
- [3] 金伟其, 王岭雪, 王生祥, 高稚允, 刘广荣. 夜视图像的彩色融合技术及其进展[J]. *红外技术*, 2003, 25(1): 6-12.
- [4] Keesling, M., Ferren, B., Kaehler, A., *et al.* (2015) Color Night Vision Cameras, Systems, and Methods There of: US, US20150350629.
- [5] Ottney, J.C. (2011) Fusion Night Vision System with Parallax Correction: US, US8072469.
- [6] Shamir, H., Yaeli, Y. and Efrat, I. (2012) Synthetic Colour Night Vision System: US, US82122876.
- [7] Van, D. and Brink, A. (2016) Filtering Device for a Night Vision System: US, EP2966500.
- [8] 蒋云峰, 武东生, 黄富瑜. 彩色夜视技术方法综述[J]. *激光技术*, 2020, 44(1): 108-112.
- [9] 吴海兵, 陶声祥, 顾国华, 王书宇. 基于四波段图像融合的彩色夜视方法研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(5): 0510002.
- [10] 韩磊, 曲中水. 一种 RGB 模型彩色图像增强方法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2014, 16(6): 59-63.
- [11] 古晶. RGB 到 Lab 颜色空间转换[J]. *广东印刷*, 2009(5): 11-14.
- [12] 许廷发, 李俊涛, 张一舟, 等. 真彩色传递双波段图像融合[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 403-410.
- [13] 张勇, 金伟其. 夜视融合图像质量主观评价方法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1360-1365.
- [14] 陈一超, 胡文刚, 武东生, 等. 三波段彩色夜视分谱优化研究[J]. *光学仪器*, 2016, 38(4): 313-319.
- [15] Deshmukh, M. and Bhosale, U. (2010) Image Fusion and Image Quality Assessment of Fused Images. *International*

Journal of Image Processing, **4**, 484-508.

- [16] 王晓岩, 李野, 岳丹. 一种低光照度下的彩色数码设备色彩还原能力评价方法[J]. 液晶与显示, 2020, 35(5): 477-485.
- [17] 王欢, 陈向宁, 姜明勇. 偏色图像的色彩还原算法实现[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(3): 109-111.