

基于单传感器的低照度彩色图像增强系统

金石开^{1,2}, 徐江涛^{1,2*}, 聂凯明^{1,2}

¹天津大学微电子学院, 天津 300072;

²天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072

摘要 针对低照度下传统彩色图像传感器成像质量差的问题, 提出一种基于单传感器的低照度彩色图像增强系统。系统同时采集可见光(VIS)和近红外(NIR), 用 NIR 对 VIS 图像进行增强。系统中, 为处理混合光图像提出了一系列图像处理方法; 针对 NIR 对 VIS 颜色干扰的问题, 提出一种颜色差值与降噪处理相结合的 VIS 分离方法; 针对 VIS 与 NIR 融合问题, 提出一种色彩空间转换与标准化处理相结合的融合方法; 针对颜色区分度与信噪比相矛盾的问题, 提出一种比值图像与阈值设定相结合的像素替换方法。通过对低照度含 NIR 图像的处理表明, 本文系统可以比较明显地提升传统彩色图像传感器在低照度下的成像亮度、信息量和信噪比, 并且效果优于所对比文献。

关键词 图像处理; 低照度; 彩色图像增强; 近红外

中图分类号 TP751

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1410001

Low-Illumination Color Image Enhancement System Based on Single Sensor

Jin Shikai^{1,2}, Xu Jiangtao^{1,2*}, Nie Kaiming^{1,2}

¹School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronics Technology, Tianjin 300072, China

Abstract To alleviate the problem of the poor imaging quality of conventional color image sensors under low illumination, a low-illumination color image enhancement system based on a single sensor was proposed. The system simultaneously collects visible (VIS) and near infrared (NIR) images and enhances the VIS image using the NIR image. In the system, a series of image processing methods were proposed to handle the mixed light images. These methods involved a VIS separation method combining color subtraction and noise reduction to eliminate the influence of NIR on VIS color, a fusion method combining color space conversion and standardization processing to fuse VIS and NIR images, and a pixel replacement method to solve the contradiction between color discrimination and signal-to-noise ratio. Through the image processing of low illumination using NIR, the system can significantly improve the brightness, information, and signal-to-noise ratio of conventional color image sensors under low illumination.

Key words image processing; low illumination; color image enhancement; near infrared

OCIS codes 100.2980; 100.1160; 100.3008

1 引言

低照度下, 传统彩色图像传感器采集的可见光

(VIS)图像会出现亮度偏低、细节丢失和信噪比偏低等问题^[1]。对于这类问题, 可以直接对原图像进行增强处理^[2-5], 也可以在增加进光量的基础上进行

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-11-06; 录用日期: 2020-11-14

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB2204202)

通信作者: * xujiangtao@tju.edu.cn

增强处理^[6-10], 比如增加近红外(NIR)的进光量。第二种方式为增加图像的信息量, 这种方式更利于图像的显示和处理。在同样环境下, 图像传感器采集的 NIR 图像具有更高的信噪比和更丰富的信息。但由于 NIR 会干扰 VIS 颜色, 通常可使用热镜将其过滤掉^[6]。如果能消除 NIR 对 VIS 颜色的干扰, 利用其较高质量的亮度信息, 则可以有效提升彩色图像传感器在低照度下的亮度、信噪比和信息量。

对于 NIR 增强彩色 VIS 图像问题, 业界最早主要采用基于多传感器的图像融合方案^[7-10], 但像素匹配、功耗和成本等问题一直制约着该方案的发展。为了解决上述问题, 业界进行了基于单传感器技术方案的研究^[11-14], 但该方案也面临一个问题: 如何将 VIS 与 NIR 分离。目前, 研究最多的是采用红绿蓝(RGB)+NIR 型颜色滤波阵列(CFA)进行 VIS 与 NIR 的采集与分离。Yamashita 等^[11]采用 RGB+NIR 型 CFA 传感器, 首先利用 VIS 和 NIR 混合光图像作为指导图, 然后通过联合插值和降噪等方式对低照度彩色图像进行处理, 生成高质量的彩色图像。Nonaka 等^[14]同样采用 RGB+NIR 型 CFA 传感器, 通过插值、颜色校正和色彩空间转换等处理, 将 NIR 的细节信息融合到 VIS 图像中, 从而提高了低照度彩色图像的信息量。采用 RGB+NIR 型

CFA 的 VIS 分离方法可以简单、有效地分离 RGB 和 NIR 图像, 但是该方法存在颜色通道采样率低和光线利用率低等问题。

针对 RGB+NIR 型 CFA 存在的问题, 提出一种新的分离方法: 利用青(Cyan, C)、品红(Magenta, M)、黄(Yellow, Y)和白(White, W)即 CMYW 型 CFA 采集图像, 再利用颜色差值与降噪相结合的方式分离 VIS。在此基础上, 设计了一套低照度彩色图像增强系统, 系统中又提出了图像融合和像素替换等方法。实验表明, 该系统能消除 NIR 对 VIS 颜色的干扰, 有效提升低照度彩色图像的亮度、信噪比和信息量, 并且优于所对比的文献。

2 基本原理

2.1 CMYW 型 CFA

CMYK 色彩模型主要用于打印机染料技术^[15]。光线照射到 CMY 和 K 染料表面时, 染料会吸收掉对应颜色的光线, 而将剩余光线反射到人眼, 即形成人眼所见到的 RGB 图像。这种反射信息是白光 W 与 C、M、Y 的差值信息。受该色彩模型的启发, 本研究采用 CMYW 型的 CFA 进行 VIS 与 NIR 的采集与分离。图 1 为本文所测量的 RGB+NIR 型 CFA 和 CMYW 型 CFA 的传感器光谱敏感度(SS)。

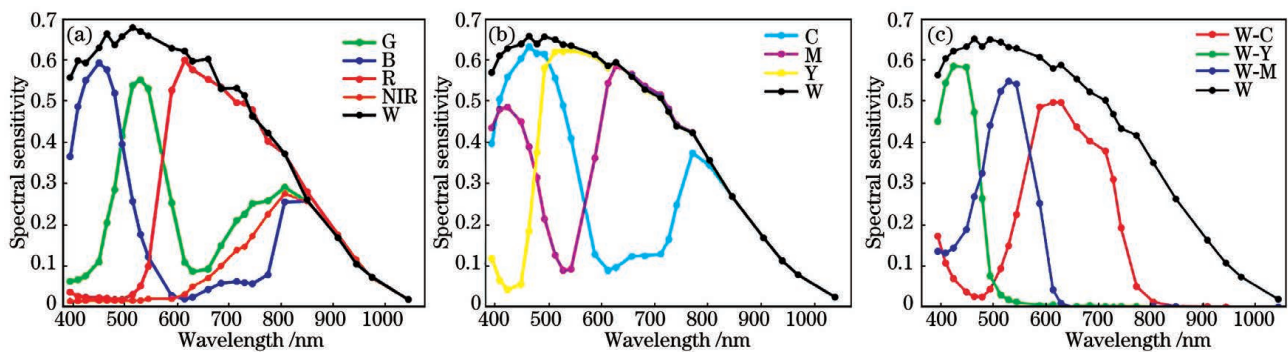


图 1 传感器光谱敏感度。(a) RGB+NIR 型 CFA 的 SS; (b) CMYW 型 CFA 的 SS; (c) CMYW 差值后的 SS

Fig. 1 Sensor spectral sensitivity. (a) SS of RGB+NIR CFA; (b) SS of CMYW CFA; (c) SS of CMYW subtraction

图 1(a)和图 1(b)分别为 RGB+NIR、CMYW 型 CFA 的 SS, 图 1(c)为图 1(b)颜色通道差值后的 SS。可以看出, 图 1(c)的 SS 接近于图 1(a)的 SS, 并且在 700 nm 以上的 NIR 波段的进光量接近于零。这说明这种颜色信息通道差值的方式在理论上可以达到消除混合光中 NIR 的效果, 而且 CMYW 型的 CFA 比 RGB+NIR 型的 CFA 在颜色通道采样率和进光量方面有明显优势。

2.2 空间域降噪算法

本节主要介绍空间域降噪算法中的中值滤波算

法^[16]和非局部均值(NLM)滤波算法^[17]。

中值滤波的主要思想是将待降噪点和周围点按从小到大(或从大到小)的顺序排列, 选中间点作为输出, 这样过亮或过暗的点会被排在序列两端, 从而被消除。中值滤波属于轻度的图像降噪算法, 对脉冲噪声有良好的滤除作用, 并且不损失图像细节。

NLM 算法则认为噪声图像中每个像素点与周围点存在相似性, 每个像素点可由其他像素点间的相似性进行表示。具体计算方法为构造加权系数, 并对图像进行加权平均处理, 具体表达式为

$$v_{NL}(i) = \sum_{j \in I} w(i, j) v(j), \quad (1)$$

式中, $v_{NL}(i)$ 为邻域搜索区域中心像素灰度估计值, I 为邻域搜索区域, $v(j)$ 为邻域搜索区域内第 j 个像素值, 权值 $w(i, j)$ 表征中心像素 i 和 j 的相似度。像素 i 所在的邻域块为 N_i , 像素 j 所在邻域块为 N_j , $w(i, j)$ 可以通过计算 N_i 与 N_j 的相似性得到, 且满足 $0 \leq w(i, j) \leq 1$ 和 $\sum_{j \in I} w(i, j) = 1$, 即

$$w(i, j) = \frac{1}{z(i)} \exp \left[\frac{-d(i, j)}{h^2} \right], \quad (2)$$

式中, $d(i, j)$ 为两个像素的高斯距离, $z(i)$ 为归一化参数, h 为控制权值衰减的超参数。 $d(i, j)$ 和

$z(i)$ 的具体表达式为

$$d(i, j) = \|v(N_i) - v(N_j)\|_{2, \alpha}^2, \quad (3)$$

$$z(i) = \sum_{j \in I} \exp \left[\frac{-d(i, j)}{h^2} \right], \quad (4)$$

式中: $\alpha (\alpha > 0)$ 为标准差。

3 图像增强系统设计

3.1 图像增强系统整体设计

基于单传感器的 NIR 增强 VIS 的图像技术是一个 VIS 与 NIR 分离、处理和融合的过程, 本研究基于 CMYW 型 CFA 实现这一过程, 提出的图像增强系统的整体架构如图 2 所示, 处理过程如下。

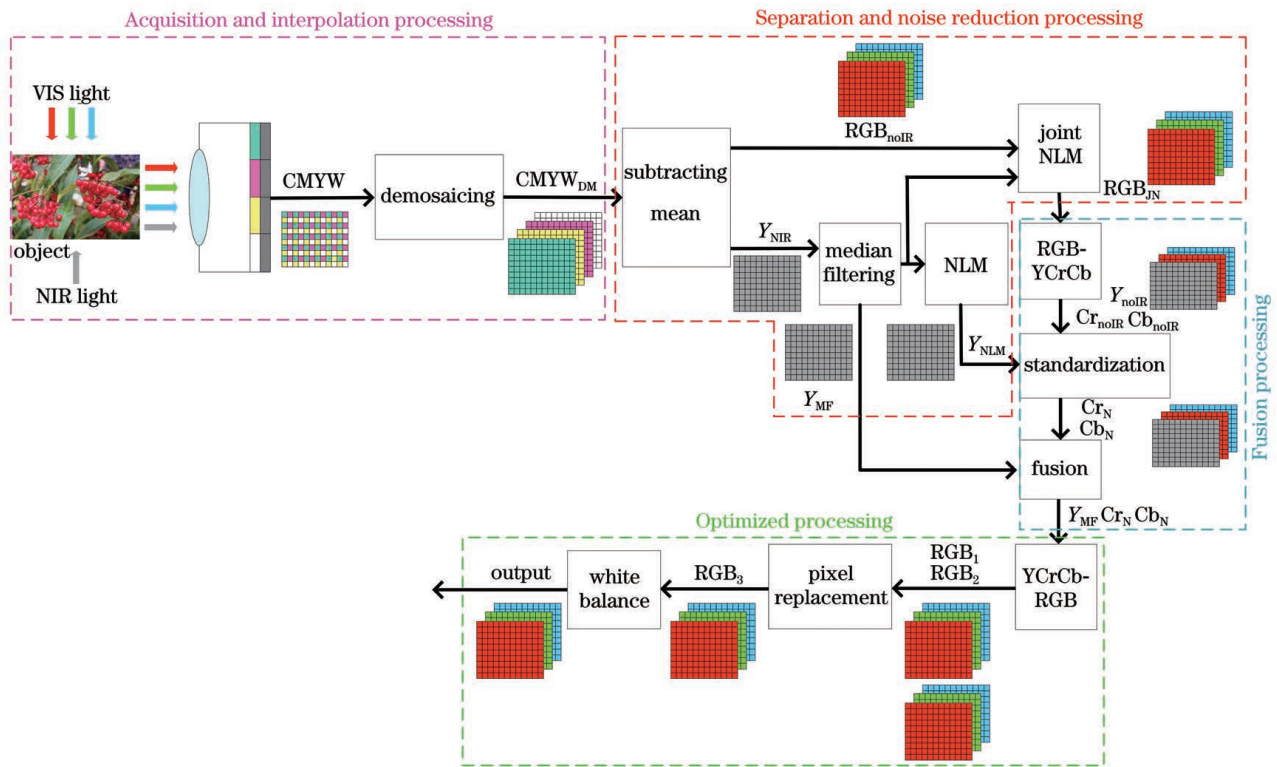


图 2 图像增强系统的整体架构

Fig. 2 Image enhancement system architecture

首先, 入射光线经过 CMYW 型 CFA 后进入图像传感器产生 C、M、Y 和 W 4 种颜色通道的图像信息即 CMYW。其次, 对图像进行颜色插值处理^[18], 使每个像素点的通道产生四种颜色信息得到 CMYW_DM。再次, 从含 NIR 的混合光信息中分别进行 VIS 与混合光亮度的分离与降噪处理得到 RGB_JN 和 $f_{Y_{MF}}$ 。然后, 将 RGB_JN 与 $f_{Y_{MF}}$ 进行融合处理得到 $Y_{MF} Cr_N Cb_N$ 。最后, 进行优化处理得到输出图像。

3.2 分离与降噪处理

本研究借鉴文献^[14]的方法提取亮度信息: 取

临近含 NIR 的 4 个颜色通道的均值, 即

$$f_{Y_{NIR}} = \frac{1}{4} (f_{C_{IR}} + f_{M_{IR}} + f_{Y_{IR}} + f_{W_{IR}}), \quad (5)$$

式中, $f_{C_{IR}}$ 、 $f_{M_{IR}}$ 、 $f_{Y_{IR}}$ 和 $f_{W_{IR}}$ 分别为青、品红、黄和白通道的混合光信息, $f_{Y_{NIR}}$ 为混合光亮度。

从 2.1 可知, W 分别与 C、M 和 Y 差值后的 SS 在理论上接近于消除 NIR 的 RGB, 即

$$\begin{aligned} f_{W_{IR}} - f_{C_{IR}} &= f_{R_{noIR}}, f_{W_{IR}} - f_{Y_{IR}} = f_{G_{noIR}}, \\ f_{W_{IR}} - f_{M_{IR}} &= f_{B_{noIR}}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $f_{R_{noIR}}$ 、 $f_{G_{noIR}}$ 和 $f_{B_{noIR}}$ 分别为消除 NIR 的红、绿和蓝信息, 即 RGB_noIR。

接着,对 $f_{Y_{\text{NIR}}}$ 进行中值滤波处理以消除椒盐噪声得到 $f_{Y_{\text{MF}}}$, RGB_{noIR} 中含有大量噪声,需要进行强力降噪处理。

受联合双边滤波算法^[19]的启发,本研究采用联合降噪思想对 NLM 算法进行改进,提出 Joint NLM 算法,以对 RGB_{noIR} 进行降噪处理。Joint NLM 算法以信噪比更高的 $f_{Y_{\text{MF}}}$ 图像为参照图像,用该图的 NLM 权重替代待降噪图的权重,从而达到对待降噪图强力降噪的效果,即

$$\begin{cases} f_{Y_{\text{noIR}}} = 0.299 \times f_{R_{\text{JN}}} + 0.587 \times f_{G_{\text{JN}}} + 0.114 \times f_{B_{\text{JN}}} \\ f_{Cr_{\text{noIR}}} = 0.615 \times f_{R_{\text{JN}}} - 0.515 \times f_{G_{\text{JN}}} - 0.100 \times f_{B_{\text{JN}}} \\ f_{Cb_{\text{noIR}}} = -0.147 \times f_{R_{\text{JN}}} - 0.298 \times f_{G_{\text{JN}}} + 0.436 \times f_{B_{\text{JN}}} \end{cases}, \quad (8)$$

然后,基于(8)式分别提取亮度和色度信息。同时,将中值滤波处理后的含 NIR 的亮度信息 $f_{Y_{\text{MF}}}$ 进行 NLM 降噪得到 $f_{Y_{\text{NLM}}}$,接着将 $f_{Y_{\text{NLM}}}$ 图像与 $f_{Y_{\text{noIR}}}$ 图像相除形成比值图像 S_{cale} ,即

$$S_{\text{cale}} = \frac{f_{Y_{\text{MF}}}}{f_{Y_{\text{noIR}}}}. \quad (9)$$

然后,将 $f_{Cr_{\text{noIR}}}$ 、 $f_{Cb_{\text{noIR}}}$ 进行标准化处理,即分别与比值图像 S_{cale} 相乘得到放大后的色度 f_{Cr_N} 和 f_{Cb_N} ,可表示为

$$f_{Cr_N} = f_{Cr_{\text{noIR}}} \times S_{\text{cale}}, f_{Cb_N} = f_{Cb_{\text{noIR}}} \times S_{\text{cale}}. \quad (10)$$

将 f_{Cr_N} 、 f_{Cb_N} 和 $f_{Y_{\text{MF}}}$ 通过公式转换为 RGB 图像以便于屏幕显示,表达式为

$$\begin{cases} R = f_{Y_{\text{MF}}} + 1.14f_{Cr_N} \\ G = f_{Y_{\text{MF}}} - 0.58f_{Cr_N} - 0.39f_{Cb_N} \\ B = f_{Y_{\text{MF}}} + 2.03f_{Cb_N} \end{cases}. \quad (11)$$

最后,将图像使用灰度世界法^[20]进行白平衡校正,得到校正后的图像,计算过程如下。取 R 、 G 和 B 的均值 \bar{R} 、 \bar{G} 和 \bar{B} 和总均值 M_{RGB} ,计算 R 、 G 和 B 的增益 k_R 、 k_G 和 k_B ,表达式为

$$k_R = \frac{M_{\text{RGB}}}{\bar{R}}, k_G = \frac{M_{\text{RGB}}}{\bar{G}}, k_B = \frac{M_{\text{RGB}}}{\bar{B}}, \quad (12)$$

再用增益去校正原图像,校正后的 RGB 图像信息可表示为

$$R' = R \times k_R, G' = G \times k_G, B' = B \times k_B. \quad (13)$$

3.4 优化处理

在对图像的 RGB 信息进行 Joint NLM 降噪处理的过程中发现,当邻域窗口固定时,搜索范围大小与图像颜色区分度呈负相关、与降噪效果呈正相关,即搜索范围越大,图像区分度越低,图像的信噪比越

$$v'_{\text{JN}}(i) = \sum_{j_{\text{IR}} \in J_{\text{IR}}} \omega_{\text{IR}}(i_{\text{IR}}, j_{\text{IR}}) v'(j), \quad (7)$$

式中, $v'_{\text{JN}}(i)$ 为 Joint NLM 算法处理后的像素, ω_{IR} 为 $f_{Y_{\text{MF}}}$ 的 NLM 权重, $v'(j)$ 为待降噪图像中心像素的周围像素,对 RGB_{noIR} 处理后得到 RGB_{JN} 。

3.3 融合处理

首先,将 RGB_{JN} 通过公式转换为 YCrCb 信息即 $f_{Y_{\text{noIR}}}$ 、 $f_{Cr_{\text{noIR}}}$ 和 $f_{Cb_{\text{noIR}}}$,表达式为

高,反之亦然。在颜色区分度和信噪比折中的最佳图像中,亮度较低的区域仍有明显的噪声,如果将亮度较低区域的像素换成搜索范围更大(即过度平滑)图像的像素就可以有效提升图像的信噪比。该区域的特点是颜色分量较少,即比值图像的值较低,因此可以将比值小于一定阈值的数据替换掉,其中可以将最佳折中图像的比值图像作为替换依据,具体方法如下。

首先,计算最佳折中图像对应比值图像的均值 \bar{S}_{cale} ,将 \bar{S}_{cale} 乘以系数 K_s 构造阈值 T_h ,即

$$T_h = \bar{S}_{\text{cale}} \times K_s. \quad (14)$$

通过调整 K_s 来调整 T_h ,调整原则是:最佳折中图像的信噪比较高时, T_h 取值较大,即保留更多的最佳图像部分,反之亦然。

然后,用比值图像上的每个像素的灰度值与 T_h 作比较,小于 T_h 的像素时说明处于合理的放大比例,取最佳折中图像对应的像素值;大于 T_h 的像素时说明处于不合理的放大比例,取过度平滑图像对应的像素值;从而得到兼具二者优点的合成图像。

最后,对图像进行白平衡校正得到最终的输出图像。

4 实验结果与分析

为了验证本文图像增强系统的性能,在处理器为 Intel Core i5-7300HQ CPU @ 2.5 GHz,内存为 8.00 GB,操作系统为 Windows 10 的计算机上使用 MATLAB 2019 软件进行实验。对本文所提出的系统与文献[11]和文献[14]提出的系统进行主观和客观评价。其中,主观评价是根据人眼的感受来评价

图像处理效果, 客观评价是主要通过亮度均值 (Mean Value, MV)、结构相似性 (Structural Similarity, SSIM) 和峰值信噪比 (Peak Signal to Noise Ratio, PSNR) 等指标来对图像的处理效果进行定量分析。

4.1 实验环境

图 3 是图像采集的暗室环境, 为了防止其他光源

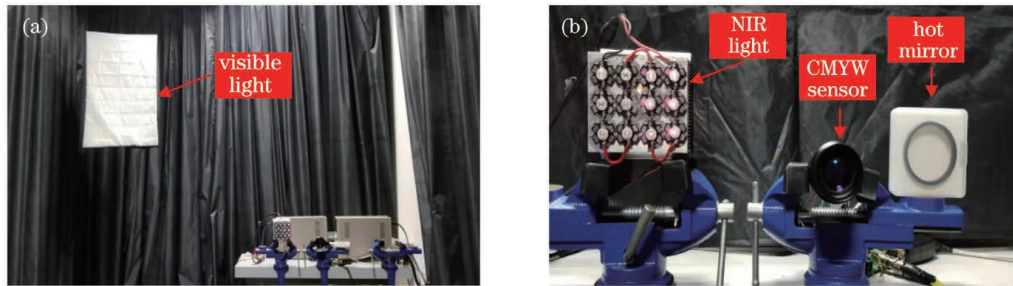


图 3 实验环境。(a)图像采集的暗室环境;(b)部分细节放大图

Fig. 3 Experimental environment. (a) Darkroom environment for image acquisition; (b) enlargement of some details

4.2 降噪算法对比

在图 4 中, 图 4(a)是差值后的 R、G 和 B 的灰度图像; 图 4(b)是采用双边滤波 (BF)^[21] 降噪后的 R、G 和 B 灰度图像; 图 4(c)是采用联合双边滤波

影响成像效果, 暗室采用遮光布进行全封闭, 人在暗室外通过计算机屏幕采集图像。图 3(a)和图 3(b)中的实验环境由 VIS 光源、NIR 光源、CMYW 型传感器和热镜组成, 具体见图中标识。分别调整 VIS 和 NIR 光源的强度来模拟自然光。在光源和景物不变的情况下, 通过在传感器上添加和去掉热镜来获得低照度下不含 NIR 的彩色图像和含 NIR 的彩色图像。

(JBF)^[22] 降噪后的 R、G 和 B 灰度图像; 图 4(d)是采用 NLM 降噪后的 R、G 和 B 灰度图像; 图 4(e)是采用 INLM 降噪后的 R、G 和 B 灰度图像^[23]; 图 4(f)是采用 Joint NLM 降噪后的 R、G 和 B 灰度图像。

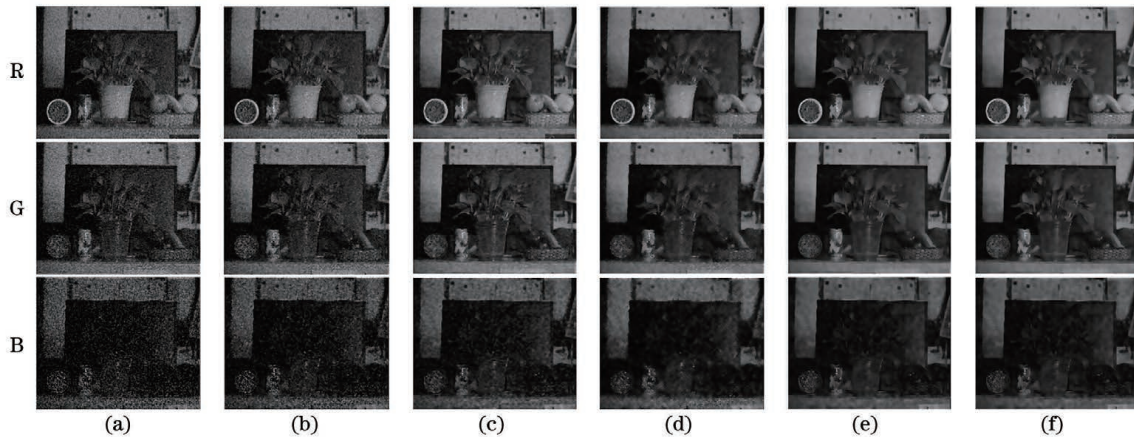


图 4 不同算法的降噪效果对比。(a)差值;(b)BF;(c)JBF;(d)NLM;(e)INLM;(f)Joint NLM

Fig. 4 Comparison of noise reduction effects for different algorithms. (a) Difference; (b) BF; (c) JBF; (d) NLM; (e) INLM; (f) Joint NLM

直观上看, 由于考虑到像素间的相似性, NLM 降噪优于双边滤波降噪; 引入双边滤波核、将欧氏距离改成马氏距离的 INLM 的降噪效果要优于 NLM 算法; 采用参照图的 JBF 和 Joint NLM 的降噪效果要明显优于不采用参照图的其他降噪算法, 而 Joint NLM 算法处理后的图像降噪效果最明显, 区分度最高。

本文采用峰值信噪比 (PSNR) 作为客观定量评价指标。PSNR 衡量的是处理图像与真实图像的失真程度, 取值范围是 0~1。PSNR 越大, 失真越小, 即降噪效果越好。但由于无法得到真实图像, 本文

将根据亮度均值等比例缩小的混合光亮度图像近似为真实图像, 因此得到的 PSNR 会小于真实值, 该值可以用于不同算法的横向比较。表 1 是差值图像和采用上述降噪算法降噪后的 R、G 和 B 灰度图像的 PSNR。

从表 1 可以看出, 采用联合降噪思想的 JBF 算法和 Joint NLM 算法的 PSNR 最高, 这是因为将更高质量的参照图作为降噪权重, 能使权重值更加接近真实情况, 因此 PSNR 指标要明显高于其他算法。而与 JBF 算法相比, Joint NLM 算法由于考虑

表 1 不同降噪算法处理后图像的 PSNR 对比
Table 1 PSNR comparison of images processed by different noise reduction algorithms unit: dB

Algorithm	R	G	B
Original image	18.161	18.125	16.580
Ref. [17]	18.530	18.475	16.657
Ref. [21]	19.171	19.131	17.157
Ref. [22]	19.102	19.064	17.061
Ref. [23]	19.131	19.113	17.126
Ours	19.339	19.284	17.857

了像素间的相似性,更具鲁棒性,因此 PSNR 的指标更高。

4.3 整体效果对比实验

图 5~7 是 3 组相同景物在不同光照条件下的实验对照组,图像分辨率均为 800 pixel×600 pixel。其中:图(a)是正常照度下过滤 NIR 的 CMYW 传感器成像,作为标准参考图像;图(b)是低照度下过滤 NIR 的 CMYW 传感器成像;图(c)是低照度下引入 NIR 的 CMYW 传感器成像;图(d)是采用 RGB+NIR 传感器的文献[11]系统处理后的低照度图像;

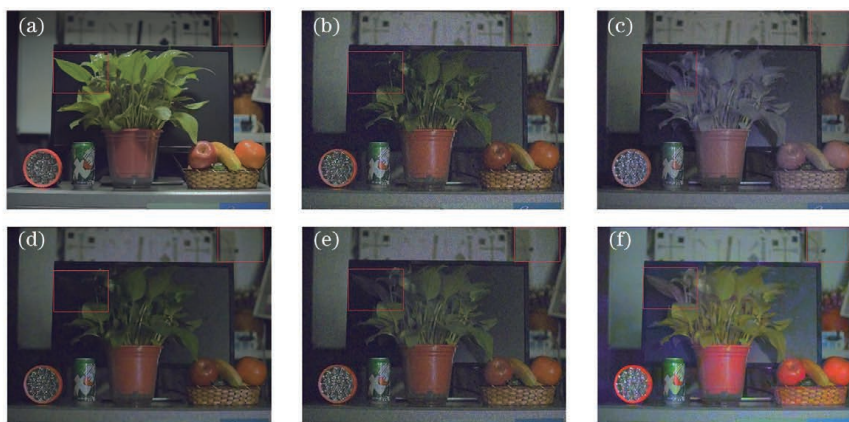


图 5 第一组不同环境下的图像与不同算法处理后的图像。(a)正常照度下不含 NIR 的图像;(b)低照度下不含 NIR 的图像;(c)低照度下含有 NIR 的图像;(d)文献[11]系统处理后的低照度图像;(e)文献[14]系统处理后的低照度图像;(f)本文系统处理后的低照度图像

Fig. 5 First group of images in different environments and images processed by different algorithms. (a) Image without NIR under normal illumination; (b) image without NIR under low illumination; (c) image with NIR under low illumination; (d) low illumination image processed by system in Ref. [11]; (e) low illumination image processed by system in Ref. [14]; (f) low illumination image processed by proposed system

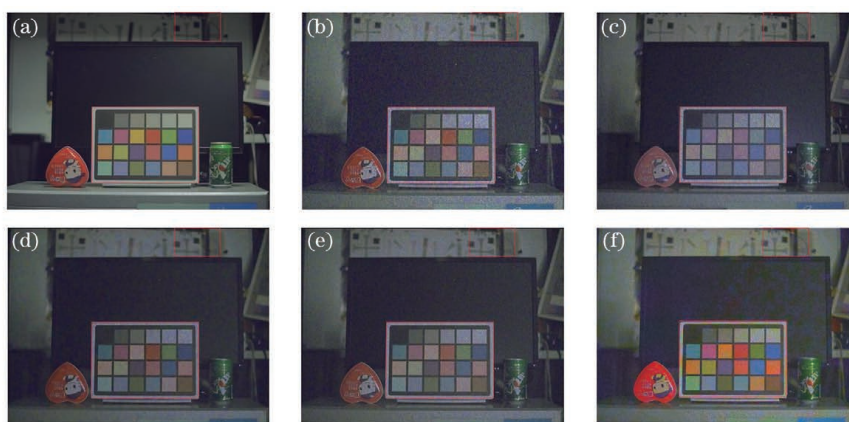


图 6 第二组不同环境下的图像与不同算法处理后的图像。(a)正常照度下不含 NIR 的图像;(b)低照度下不含 NIR 的图像;(c)低照度下含有 NIR 的图像;(d)文献[11]系统处理后的低照度图像;(e)文献[14]系统处理后的低照度图像;(f)本文系统处理后的低照度图像

Fig. 6 Second group of images in different environments and images processed by different algorithms. (a) Image without NIR under normal illumination; (b) image without NIR under low illumination; (c) image with NIR under low illumination; (d) low illumination image processed by system in Ref. [11]; (e) low illumination image processed by system in Ref. [14]; (f) low illumination image processed by proposed system

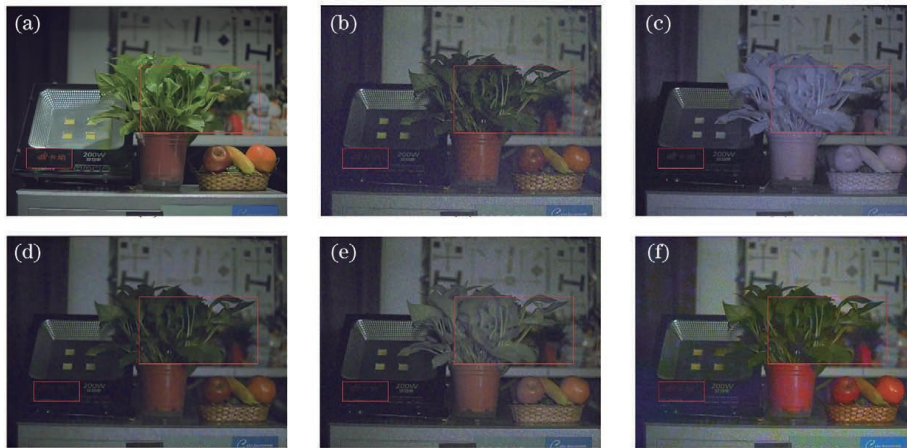


图 7 第三组不同环境下的图像与不同算法处理后的图像。(a)正常照度下不含 NIR 的图像;(b)低照度下不含 NIR 的图像;(c)低照度下含有 NIR 的图像;(d)文献[11]系统处理后的低照度图像;(e)文献[14]系统处理后的低照度图像;(f)本文系统处理后的低照度图像

Fig. 7 Third group of images in different environments and images processed by different algorithms. (a) Image without NIR under normal illumination; (b) image without NIR under low illumination; (c) image with NIR under low illumination; (d) low illumination image processed by system in Ref. [11]; (e) low illumination image processed by system in Ref. [14]; (f) low illumination image processed by proposed system

图(e)是采用 RGB+NIR 传感器的文献[14]系统处理后的低照度图像;图(f)是图(c)经过本文系统处理后的低照度图像。

对比图 5~7 中的 3 组图像,差异明显处已用方框标出。对比图(f)和图(b),图(f)的亮度明显更高,图中噪声更少,颜色更饱满,图像的信息更丰富,其中图 5(b)左上方方框里的叶子几乎分辨不出来,右上方方框里的纹理模糊不清,而图 5(f)均清晰可见。对比图(f)和图(c),图(f)的颜色自然,而图(c)整体偏白紫,图像(f)噪声偏少,其中图 6(f)中间方框的颜色卡可以有效消除 NIR 对图 5(c)颜色的干扰。对比图(f)和图(d),图(f)的亮度明显更高,信息更丰富,其中图5(d)左上方方框里叶子的纹理模

糊不清,而图 5(f)却清晰可见。对比图(e)和图(f),图(f)的亮度明显更高、信噪比更高,对于没有颜色信息区域的处理也更好,其中图 7(e)中间的方框处,偏白色部分是由于该区域 VIS 信息远少于 NIR 信息所致,本文通过 Joint NLM 算法的平滑特性,对该区域进行了颜色增强,使颜色复原效果较好。

采用 MV、PSNR 和 SSIM 作为客观评价指标。MV 是图像亮度均值,反映的是图像整体的亮度, MV 越大,图像亮度和动态范围越大,人眼感受越好,取值为 0~1023。SSIM 从亮度、对比度和结构三个维度对图像进行评价,取值范围是 0~1,值越大表明越接近真实图像。图 5~7 的评价指标如表 2、3 和 4 所示。

表 2 三组图像的亮度均值对比

Table 2 Brightness mean values comparison of three groups of images

Image	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Fig. 5	251.814	267.478	237.167	245.263	267.583
Fig. 6	250.962	266.593	236.281	244.384	266.675
Fig. 7	246.589	264.837	233.893	241.765	264.951

表 3 三组图像的结构相似性对比

Table 3 Structural similarity comparison of three groups of images

Image	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Fig. 5	0.701	0.748	0.689	0.732	0.749
Fig. 6	0.702	0.746	0.692	0.731	0.747
Fig. 7	0.698	0.745	0.688	0.730	0.746

表 4 三组图像的峰值信噪比对比

Table 4 Comparison of PSNR of three groups of images

unit: dB

Image	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Fig. 5	19.780	20.280	19.964	19.256	20.501
Fig. 6	19.653	20.267	19.848	19.249	20.384
Fig. 7	19.421	20.178	19.665	19.158	20.296

通过对比 3 组图像的 MV、SSIM 和 PSNR 指标可以发现,本文提出系统的指标均为最高,说明本文系统不仅可以有效提升低照度彩色图像的亮度、信息量和信噪比,而且效果优于对比文献。

5 结 论

针对低照度下彩色图像传感器成像质量差的问题,提出一种基于 CMYW 型 CFA 的彩色图像增强系统。介绍了图像增强系统的整体设计架构,从整体上介绍了图像数据的处理流程。然后,具体介绍了针对本系统提出的主要方法:采用颜色差值与降噪相结合的 VIS 分离方法,采用色彩空间转换与色度标准化处理的图像融合方法,以及通过比值图像和实验阈值确定替换关系的像素替换方法等。最后,通过主观和客观评价证明本系统可以有效提升传统图像传感器低照度成像的亮度、信噪比和信息量,而且增强效果优于所对比文献。但本算法也存在有待改进之处,比如:对于 VIS 分离方法,可以进一步研究噪声产生的原因,以进行更有针对性地降噪;图像颜色出现一定程度的过度饱和现象,可以进一步研究色度的处理方法。本文后续将继续研究这些问题,以进一步提高图像处理质量。

参 考 文 献

- [1] Chen C C. Low illumination color image enhancement algorithm research based on Retinex theory [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2018. 陈灿灿. 基于 Retinex 理论的低照度彩色图像增强算法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2018.
- [2] Ma H Q, Ma S P, Xu Y L, et al. Low-light image enhancement based on deep convolutional neural network[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0210004. 马红强, 马时平, 许悦雷, 等. 基于深度卷积神经网络的低照度图像增强[J]. 光学学报, 2019, 39(2): 0210004.
- [3] Chen Q J, Qu M. Low-light image enhancement based on cascaded residual generative adversarial

network [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141024.

陈清江, 屈梅. 基于级联残差生成对抗网络的低照度图像增强[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141024.

- [4] Wu R Y, Wang D X, Yuan H C, et al. Low-light image enhancement based on multi-branch all convolutional neural network[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(14): 141021. 吴若有, 王德兴, 袁红春, 等. 基于多分支全卷积神经网络的低照度图像增强[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(14): 141021.
- [5] Huang H X, Chen F H. Low-illumination image enhancement method based on attention mechanism and Retinex[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(20): 201004. 黄辉先, 陈凡浩. 基于注意力机制和 Retinex 的低照度图像增强方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(20): 201004.
- [6] Lu Y M, Fredembach C, Vetterli M, et al. Designing color filter arrays for the joint capture of visible and near-infrared images[C]//2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), November 7-10, 2009, Cairo, Egypt. New York: IEEE Press, 2009: 3797-3800.
- [7] Guidi A, Achanta R, Fredembach C, et al. GUI-aided NIR and color image blending [C]//Melecon 2010—2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, April 26-28, 2010, Valletta, Malta. New York: IEEE Press, 2010: 1111-1116.
- [8] Schaul L, Fredembach C, Süssstrunk S. Color image dehazing using the near-infrared[C]//2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), November 7-10, 2009, Cairo, Egypt. New York: IEEE Press, 2009: 1629-1632.
- [9] Bennett E P, Mason J L, McMillan L. Multispectral bilateral video fusion [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(5): 1185-1194.
- [10] Sugimura D, Mikami T, Yamashita H, et al. Enhancing color images of extremely low light scenes based on RGB/NIR images acquisition with different exposure times [J]. IEEE Transactions on Image

- Processing, 2015, 24(11): 3586-3597.
- [11] Yamashita H, Sugimura D, Hamamoto T. Enhancing low-light color images using an RGB-NIR single sensor[C]//2015 Visual Communications and Image Processing (VCIP), December 13-16, 2015, Singapore. New York: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [12] Honda T, Hamamoto T, Sugimura D. Low-light color image super-resolution using RGB/NIR sensor [C] // 2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), October 7-10, 2018, Athens, Greece. New York: IEEE Press, 2018: 56-60.
- [13] Honda T, Sugimura D, Hamamoto T. Multi-frame RGB/NIR imaging for low-light color image super-resolution[J]. IEEE Transactions on Computational Imaging, 2020, 6: 248-262.
- [14] Nonaka Y, Yoshida D, Kitamura S, et al. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments[C]//2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), January 12-14, 2018, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE Press, 2018: 1-5.
- [15] Gonzalez R C, Woods R E. Digital image processing [M]. Ruan Q Q, Ruan Y Z, Transl. 2nd ed. Beijing: Electronic Industry Press, 2007: 232-233. 拉斐尔 C 冈萨雷斯, 理查德·E 伍兹. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 232-233.
- [16] Fu Y Q. Research and hardware design of image processing algorithm based on FPGA[D]. Nanchang: Nanchang University, 2006: 15-19. 付昱强. 基于 FPGA 的图像处理算法的研究与硬件设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2006: 15-19.
- [17] Buades A, Coll B, Morel J M. A non-local algorithm for image denoising [C] // 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), June 20-25, 2005, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2005: 60-65.
- [18] Li P M, Mei S Q, Ma Q P. An improved bilinear interpolation travel-time ray-tracing method[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48 (4): 553-558, 676, 501. 李培明, 梅胜全, 马青坡. 一种改进的双线性插值射线追踪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2013, 48(4): 553-558, 676, 501.
- [19] Petschnigg G, Szeliski R, Agrawala M, et al. Digital photography with flash and no-flash image pairs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 664-672.
- [20] Xu X Z, Cai Y H, Liu X M, et al. Improved grey world color correction algorithms[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(3): 559-564. 徐晓昭, 蔡轶珩, 刘晓民, 等. 改进灰度世界颜色校正算法[J]. 光子学报, 2010, 39(3): 559-564.
- [21] Zhang Z Q, Wang W Y. A modified bilateral filtering algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(3): 443-447. 张志强, 王万玉. 一种改进的双边滤波算法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(3): 443-447.
- [22] Petschnigg G, Szeliski R, Agrawala M, et al. Digital photography with flash and no-flash image pairs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 664-672.
- [23] Li M L, Xu Y. Improved non-local means algorithm for image denoising[C]//2019 IEEE 11th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN), June 12-15, 2019, Chongqing, China. New York: IEEE Press, 2019: 358-361.