

RGBC-IR：一种用于红外辅助彩色成像的颜色滤波阵列（CFA）

Tripurari Singh, Image Algorithmics, Bethesda, MD 20816, USA

Mritunjay Singh, Image Algorithmics, Irvine, CA 92620, USA

摘要

现代 RGB-IR (Red, Green, Blue-Infrared) 成像器可通过单传感器捕获准确的色彩与红外 (Infrared, IR) 信息。虽然这类成像器可利用 RGB (Red, Green, Blue) 图像对红外图像进行有效去噪操作,但由于红外像素数量显著不足,其无法实现反向操作,即无法通过红外图像对 RGB 图像进行去噪处理。

利用红外照明器提升低光环境下的 RGB 成像质量,这是未来汽车应用场景中的关键功能——夜间驾驶舱需维持黑暗环境以免干扰驾驶员注意力。针对这一技术挑战,当前主要存在两种解决方案,其一为移除红外截止滤光片并单独获取 RGB 图像与红外图像,但该方案会导致色彩质量显著下降;其二为采用配备独立 RGB 与红外传感器的分束器架构,然而该架构存在体积笨重的固有缺陷。

本文提出一种搭载新型 RGBC-IR (Red-Green-Blue-Clear-Infrared) 颜色滤波阵列 (Color Filter Array, CFA) 的成像器方案。该成像器包含对可见光和红外光均敏感的透明像素,其 RGB 像素覆有红外衰减涂层,而红外像素则采用有效阻挡可见光的黑色滤光片。

通过多光谱去马赛克技术,该成像器可重建 RGB 图像和红外图像,并生成融合透明像素、RGB 像素与红外像素信号的高信噪比亮度图像。利用针对 RGBC (Red-Green-Blue-Clear) 图像传感器和分束器 RGB-IR 成像器开发的融合技术,基于上述亮度图像实现对 RGB 图像和红外图像的协同去噪处理。

引言

RGB-IR 成像器可同时捕获高精度彩色图像与红外图像，实现多光谱数据的同步采集。该成像器在驾驶员与乘客监控系统、视频会议等领域有广泛应用。一些早期设计采用了分束器结构，分束器将光线分别传输至独立的红外传感器和彩色传感器。在红外照明辅助的低光彩色成像应用中，这种设计需通过后续融合步骤，利用红外图像对 RGB 图像进行去噪[1, 2, 3, 4]。另一种用于低光红外辅助彩色成像的早期设计则摒弃了红外截止滤光片，采用单传感器与红外照明器同步进行多次曝光的方案[5]。该设计一方面存在运动伪影问题，另一方面若可见光光源中包含红外成分，会导致色彩还原质量较差。

基于单传感器的 RGB-IR 成像器的最新设计已取得显著进展[6, 7]，可满足大多数场景的图像质量需求，但在低光成像性能方面仍存在不足。典型的 RGB-IR 图像传感器通常采用双带通红外滤光片，该滤光片除允许可见光谱通过外，还可透过 940nm 附近的窄带红外光，而红外像素则覆盖有专门阻挡可见光的黑色滤光片。由于有机染料和颜料具有特定的光学透射特性，黑色、红色、绿色和蓝色滤光片对红外光均呈现透明状态，这一特性直接导致 R(Red)、G(Green)、B(Blue) 三通道信号受到红外光污染，此类污染信号需在去马赛克处理后的色彩校正环节通过减法校正算法予以消除。

尽管减法校正算法可修正色彩，但会不可避免地将红外通道的噪声引入 R、G、B 信号中。由于光子散粒噪声强度随入射光强增加而增大，低光场景下的红外照明会给 R、G、B 信号引入过量噪声，使得传统 RGB-IR 成像方案难以满足实际应用需求。虽然学术界已经设计出红外阻挡涂层和干涉滤光片[8]，但这些技术用于 R、G、B 像素时会导致红外光过度衰减，进而导致红外照明器无法为低光图像提供足够的降噪效果。因此，本文设计了一种新型颜色滤波阵列，该阵列需对红外光具有适度透明性以充分发挥红外照明的信噪比提升作用，同时又能通过物理或算法手段有效阻挡 R、G、B 像素的红外光入射以避免信号串扰。

在后续章节中，本文将详细介绍一种单传感器成像器架构，该成像器可同步捕获色彩准确的 RGB 图像和红外图像，即使在可见光与红外光源的强度差异极大的场景下，其仍能保持稳定的成像性能。此外，该成像器能够利用强光源通道的

高信噪比特性，对较弱光源照射下的图像进行去噪处理。

RGBC-IR 颜色滤波阵列

本文设计的颜色滤波阵列包含 5 类像素：

1. **透明像素**：该类像素不覆盖任何色彩滤光片，能透过所有可见光和红外光；

2. **红外像素**：该类像素覆盖黑色滤光片，该滤光片可阻挡可见光，但允许红外光通过[8]；

3. **R、G、B 像素**：这三类像素分别覆盖红色、绿色、蓝色滤光片，且均覆盖有红外阻挡涂层[8]，该涂层可阻挡 95%的红外光入射，剩余 5%的红外光干扰需在后续色彩校正环节通过算法去除。

颜色滤波阵列的图案设计与去马赛克算法的开发需协同进行。本研究采用梅花形布局将半数像素分配至透明通道，旨在利用该通道重建高信噪比的引导图像。对于剩余像素，将红外、R、G、B 通道以均匀子网格形式分布于颜色滤波阵列中，各通道可单独排列或成对组合，以支持像素合并功能。所生成的两种颜色滤波阵列图案如图 1 所示：

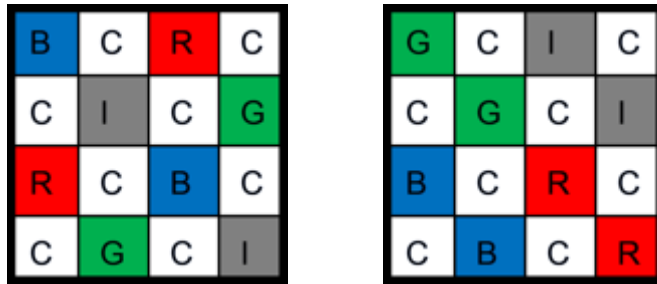


图 1：本文提出的不可合并 RGBC-IR 颜色滤波阵列（左）与 2:1 可合并 RGBC-IR 颜色滤波阵列（右）

RGBC-IR 处理流程

RGBC-IR 处理流程如图 2 所示。

1. 去马赛克处理流程

该流程首先重建透明颜色平面，随后将其用作引导图像来重建 R、G、B 和红外颜色平面。本流程通过应用文献[9]等公开的多光谱去马赛克算法，可实现高信噪比。而采用 RGBC 开发的商用算法[10]，则能够实现良好的视觉质量。

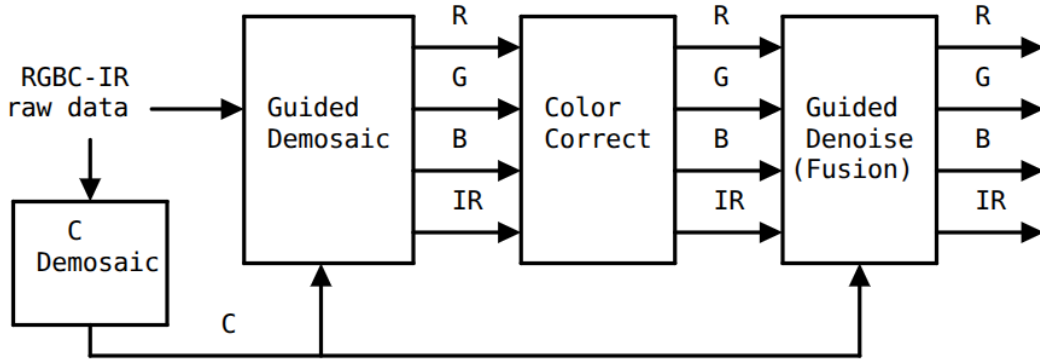


图 2: RGBC-IR 处理流程

2. 色彩校正处理流程

色彩校正步骤首先执行两项操作：去除透过红外阻挡滤光片渗入 RGB 通道的红外光，以及校正 RGB 通道与红外通道之间的串扰。随后，对 RGB 通道进行白平衡处理，并施加标准的 3×3 色彩校正矩阵。在色彩校正过程中，由于 R、G、B、红外通道的信噪比本就低于透明通道，其信噪比会因校正操作而进一步降低。后续通过引导去噪步骤对 R、G、B 和红外颜色平面实施降噪处理。本流程通过适配分束器成像器的公开算法[3]可实现高信噪比，而借助针对 RGBC 开发的商用算法[10]则能实现良好的视觉质量。

仿真实验

本研究针对图 1 所示的不可合并 RGBC-IR 模式开展仿真实验。实验流程从 RGBC 图像传感器采集的原始图像开始，首先对其进行去马赛克处理，将红外通道建模为 R、G、B 色彩平面的非线性函数，随后利用 RGBC-IR 颜色滤波阵列进行重马赛克处理。

实验中向 R、G、B 通道注入 5% 的红外信号，以模拟红外光透过红外阻挡涂

层的泄漏效应，另注入 5% 的红外信号以模拟红外像素与 R、G、B 像素间的串扰。

最后，实验添加了意法半导体（ST Micro）Sibuya RGB-IR 传感器的典型读取噪声与散粒噪声模型。其中，读取噪声模拟为均值 4.9 电子的高斯随机变量，而光子散粒噪声模拟为转换增益 0.16 的泊松过程（在 10 位数值范围内，每电子对应 0.16 个量化步长）。

本研究模拟了两种红外强度场景：场景一采用 LED 照明条件下的典型红外强度；场景二采用增强红外照明条件，该条件下传感器的红外通道响应平均达到其 G 通道响应的 6.6 倍。相关结果如图 3 所示。



图 3：在低 D65 光照下，采用本文提出的 RGBC-IR 图像传感器拍摄的“TE42”测试图局部区域图像。直观对比红外照明开启/关闭时的成像效果差异，左图为红外照明关闭状态，右图为红外照明开启状态。

实验结论

红外照明可使亮度信噪比提升 20dB。从色度质量来看，总体保持稳定，呈现

双向平衡效应：一方面，当从 RGB 通道的滤除红外成分时，会导致色度噪声的本底升高；另一方面，亮度通道信噪比的提升能显著提升图片边缘特征的清晰度，从而优化了色度去噪算法的边界保持能力，有效抑制了跨边缘像素的平滑处理效应。

参考文献

- [1] Bennett, E. P., Mason, J. L., and McMillan, L., “Multispectral bilateral video fusion,” *IEEE Transactions on Image Processing* 16(5), 1185 - 1194 (2007).
- [2] Zhuo, S., Zhang, X., Miao, X., and Sim, T., “Enhancing low light images using near infrared flash images,” in [2010 IEEE International Conference on Image Processing], 2537 - 2540, IEEE (2010).
- [3] Matsui, S., Okabe, T., Shimano, M., and Sato, Y., “Image enhancement of low-light scenes with near-infrared flash images,” *Information and Media Technologies* 6(1), 202 - 210 (2011).
- [4] Takeuchi, K., Tanaka, M., and Okutomi, M., “Low-light scene color imaging based on luminance estimation from near-infrared flash image,” in [Proceedings of IEEE International Workshop on Computational Cameras and Displays (formerly PROCAMS) (CCD/PROCAMS2013)], 1 - 8 (2013).
- [5] Krishnan, D. and Fergus, R., “Dark flash photography,” *ACM Trans. Graph.* 28(3), 96 (2009).
- [6] Monno, Y., Teranaka, H., Yoshizaki, K., Tanaka, M., and Okutomi, M., “Single-sensor rgb-nir imaging: High-quality system design and prototype implementation,” *IEEE Sensors Journal* 19(2), 497 - 507 (2018).
- [7] Hu, X., Heide, F., Dai, Q., and Wetzstein, G., “Convolutional sparse coding for rgb+ nir imaging,” *IEEE Transactions on Image Processing* 27(4), 1611 - 1625 (2017).
- [8] “ Fujifilm Selective IR control for sensing applications, ” <https://www.fujifilm.com/us/en/business/semiconductormaterials/image-sensor-color-mosaic/ir/applications> .
- [9] Monno, Y., Kikuchi, S., Tanaka, M., and Okutomi, M., “A practical one-shot multispectral imaging system using a single image sensor,” *IEEE Transactions on Image Processing* 24(10), 3048 - 3059 (2015).
- [10] “Image Algorithmics RGBW ISP,” <https://imagealgorithmics.com/rgbw-isp/> .

作者简介

Tripurari Singh

Tripurari Singh 于 1993 年在印度理工学院德里分校获得计算机科学学士学位，并于 1999 年在约翰霍普金斯大学获得计算机科学博士学位。在此之后，他曾在运筹学领域从事随机优化算法的开发工作，随后他转向图像处理领域。他的研究工作主要集中在颜色滤波阵列设计，以及在存在白色/透明像素、红外像素、色差、多轮像素合并和高色度分辨率条件下的原始传感器数据处理等领域。

Mritunjay Singh

Mritunjay Singh 拥有印度理工学院孟买分校和加州理工学院的物理学教育背景。此后，他曾在运筹学领域从事随机优化算法的开发工作，随后他转向图像处理领域。他的研究工作主要集中在颜色滤波阵列设计，以及在存在白色/透明像素、红外像素、色差、多轮像素合并和高色度分辨率条件下的原始传感器数据处理等领域。