

doi: 10.7690/bgzd.2026.01.015

基于 HDR 融合和 SR 融合相结合的图像增强方法

徐雪峰¹, 黄 余²

(1. 江苏电子信息职业学院, 江苏 淮安 223003; 2. 圣路易斯大学, 菲律宾 碧瑶 2600)

摘要: 针对图像增强问题, 提出一种将高动态范围融合与超分辨率融合相结合的系统方法。对摄像机进行校准, 以模拟摄影机的光度特性, 获得估计摄影机的响应曲线; 执行自动图像采集过程, 在不同的视角和不同的摄影机参数(如不同的曝光时间)下拍摄, 作为捕捉具有适当图像融合所需变化的多个输入图像; 对于色调映射, 采用梯度域融合方法进行, 将亮度图压缩到强度域, 在最终图像中尽可能多地保持细节, 同时仍然保持逼真的外观; 对于图像融合步骤, 进行光度和几何配准, 建立输入图像中像素之间的对应关系。以提高分辨率和最大化动态范围为目标进行图像融合, 从而获得最终增强的图像。采用不同类型摄像机拍摄的图像实例, 结果表明该系统方法具有可行性。

关键词: 图像增强技术; 高动态范围; 超分辨率; 摄像机响应曲线; 图像融合; 辐照度; 成本函数

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Image Enhancement Method Based on HDR Fusion and SR Fusion

Xu Xuefeng¹, Huang Yu²

(1. Jiangsu Vocational College of Electronics and Information, Huai'an 223003, China;

2. Saint Louis University, Baguio 2600, Philippines)

Abstract: Aiming at the problem of image enhancement, a systematic method combining high dynamic range fusion and super-resolution fusion is proposed. Calibrating the camera to simulate the photometric characteristics of the camera to obtain an estimated response curve for the camera; performing an automated image acquisition process to capture multiple input images at different viewing angles and different camera parameters (e.g., different exposure times) as a function of the variations required for proper image fusion; For tone mapping, a gradient-domain fusion method is used to compress the luminance map into the intensity domain, preserving as much detail as possible in the final image while still maintaining a realistic appearance; for the image fusion step, photometric and geometric registration are performed to establish the correspondence between pixels in the input image. The final enhanced image is obtained by image fusion with the goal of improving resolution and maximizing dynamic range. The results of images taken by different types of cameras show that the system and method are feasible.

Keywords: image enhancement technique; high dynamic range; super-resolution; camera response curve; image fusion; irradiance; cost function

0 引言

近年来, 传感器具有更多的像素数量、更大的动态范围和更低的成本^[1-2]。在一些应用中, 基于硬件的图像增强是不现实的, 如机场和火车站的大型监控系统通常需要安装数以千计的摄像头(成像传感器)。基于硬件层的图像增强由于成本高和安装不便等因素, 一般认为是长期不可替代的, 而基于软件层的图像增强, 由于其便利性和易升级等特性才是最佳和可接受的解决方案; 在数字摄影、文本识别和人脸识别等领域, 基于图像融合方法的图像增强技术也得到了广泛的应用^[3-6]。如超分辨率(super-resolution, SR)提供了一种将多个输入图像中包含的像素组合成单个增强图像的方法^[7], 使高

分辨率图像的重建成为可能; 高动态范围(high-dynamic-range, HDR)融合将以不同曝光设置捕捉的多个输入图像合并, 以生成比任何输入图像本身具有更大动态范围的图像^[8]; 文献[9]对具有较大光度变化的输入图像的超分辨率问题进行了研究, 但没有明确解决高动态范围的融合问题; 文献[10]采用最大后验(maximum a posteriori, MAP)方法, 从具有较大光度变化的输入图像估计超分辨率图像。上述方法都是在亮度域中进行 SR 融合, 依赖于每个输入图像来捕捉光度和几何变化; 文献[11-13]对高动态范围成像进行了研究。这些方法没有考虑利用最少数量的输入图像更实际情形。文献[14]提出了一种对视频数据进行 HDR 融合的方法; 文献[15]提

收稿日期: 2024-11-11; 修回日期: 2024-12-07

基金项目: 国家社科基金(18BJY157); 江苏省科技厅产学研项目(BY20231018); 江苏省重点技术创新项目([2021]112-1657)

第一作者: 徐雪峰(1975—), 女, 江苏人, 硕士。

出了一种结合最优单应性矩阵选择和切缝处理的鲁棒容差图像拼接方法。上述方法都没有考虑超分辨率来进一步增强图像。

尽管上述方法解决图像增强问题,但很少关注高动态范围融合和超分辨率融合相结合的图像增强方法;对此,笔者提出一种系统方法,将高动态范围融合和超分辨率融合相结合,以生成增强的图像。这种系统方法特别适合于像监控摄像头这样的实际应用。笔者提出的方法可以将 HDR 融合步骤需要的图像最小化,达到只有 2 个输入图像。这 2 个图像已经可以捕捉场景的大部分动态范围,即使是对极端情形。

1 系统方法原理

笔者提出的系统方法包括测光相机标定(校准)、受控图像采集、图像融合和色调映射,系统方法的原理如图 1 所示。

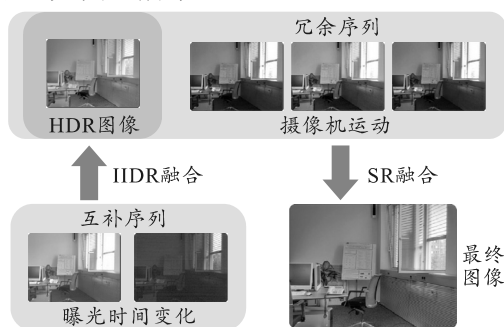


图 1 本文中提出的系统方法的原理

1.1 测光相机标定

对于高动态范围图像融合来说,对每个相机都需要估计响应曲线。笔者利用互易性的物理特性^[11],从一组不同曝光的图像中估计相机响应曲线,将捕捉的强度值 $\vec{l}$ 与真实辐照度 $\vec{e}$ 和曝光时间 t 联系起来:

$$\vec{l} = f(\vec{e} \cdot t)。 \quad (1)$$

式中 f 为相机响应函数,可以认为是光度扭曲函数。其逆的对数 $g(\bullet) = \ln f^{-1}(\bullet)$ 是一个从强度域到亮度域的离散映射,并实现为一个查找表。为了采用 K 个输入图像从位置 i 的 N 个像素对应中估计 g ,需要最小化以下基于重建项和平滑正则化器的成本函数:

$$O = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^K \left[w(\vec{l}_{ij}) \cdot (g(\vec{l}_{ij}) - \ln \vec{e}_i - \ln t_j) \right]^2 + \lambda \sum_{v=L_{\min}}^{L_{\max}} \left(w(v) \cdot \frac{\partial^2 g}{\partial v^2}(v) \right)^2。 \quad (2)$$

求解这个最小二乘问题,就是同时估计对应于相机响应函数 f 的逆对数查找表 g 和对应位置的辐照度 $\vec{e}$;因此,应用一个加权函数 $w(\bullet)$ 来给那些关键区域的强度值赋一个较小的权重。为了实现对噪声测量的鲁棒性,加入一个正则化项,有利于在考虑的强度范围 $v \in [L_{\min}, L_{\max}]$ 内较低二阶偏导数 $(\partial^2 g / \partial v^2)$ 的平滑解。

1.2 受控图像采集

对于本文中的融合方法,2 个输入序列是连续获取的。对于超分辨率输入,要记录多张具有自动曝光设置的图像,这些图像必须从稍微不同的视角拍摄,以捕捉到足够的场景统计数据。

1.3 图像融合

在图像融合之前,需要对输入图像进行几何对齐以补偿摄像机的运动。假设镜头运动的场景可以用 8-景深(depth of field, DoF)单应性来描述。笔者应用基于双逆成分强度的算法^[16]且该算法同时估计光度(仿射)和几何(透视)配准参数。超分辨率融合只增强 SR 输入图像中包含有意义像素的那些区域(如非饱和区域)。对于饱和部分, HDR 图像已经包含了来自不同曝光输入的最佳信息,因此让它保持不变。

1.4 色调映射

笔者提出一种梯度域融合方法进行色调映射。梯度域融合方法的关键思想是生成一个衰减矩阵,衰减矩阵表示高动态范围图像中的每个梯度像素是应当放大还是应当抑制。然后根据该衰减矩阵对高动态范围图像的梯度进行修正。通过求下列解泊松方程,从修正后的梯度场中恢复最终图像:

$$\nabla^2 I = \text{div} G。 \quad (3)$$

式中: ∇^2 为待恢复图像 I 的拉普拉斯算子; $\text{div} G$ 为修正后梯度场的散度。对于 2 维图像来说:

$$G = \frac{\partial G_x}{\partial x} + \frac{\partial G_y}{\partial y}; \quad \nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}; \quad (4)$$

式中:

$$G(x, y) = \nabla H(x, y) \Phi(x, y)。 \quad (5)$$

式中: $H(x, y)$ 为 2 维 HDR 函数; $\Phi(x, y)$ 为空间变化衰减映射函数。

2 基于 HDR 和 SR 融合的图像增强

2.1 HDR 融合

笔者采用将 2 幅输入图像重新组装成最终图像

的方法。一种简单的方法是根据 2 个输入强度值中哪一个饱和度较低来按像素生成标签。但如果光度配准不是很准确的话,会产生非常不一致的掩膜,从而导致可见的接缝。为了避免这个问题,在标记过程中的成本函数采用摄像机响应函数。为解决二值标注问题,将成本函数构建为:

$$F = \sum_{i,j} V(\vec{b}_i, \vec{b}_j) + \sum_i D(\vec{b}_i). \quad (6)$$

式中: $\vec{b}$ 为二值标签掩膜; $V(\bullet)$ 为接缝成本函数; $D(\bullet)$ 为数据成本函数,表示当前标签在像素位置 i 上与图像数据的匹配程度。数据成本计算为:

$$D(\vec{b}_i) = \frac{\partial g}{\partial l}(\vec{l}_i^{\vec{b}_i}). \quad (7)$$

式中: $\partial g / \partial l$ 为摄像机响应函数的逆的对数 g 的偏导数; $\vec{l}_i^{\vec{b}_i}$ 为在像素位置 i 处标签为 $\vec{b}_i$ 的图像的强度值; 此外,成本函数应当允许相邻的像素位置(例如 i 和 j)只有在对应的强度值不引入接缝时才被分配不同的标签。接缝成本函数如下:

$$V(\vec{b}_i, \vec{b}_j) = \left| \vec{e}_i^{\vec{b}_i} - \vec{e}_i^{\vec{b}_j} \right| + \left| \vec{e}_j^{\vec{b}_i} - \vec{e}_j^{\vec{b}_j} \right|. \quad (8)$$

式中 $\vec{e}_i^{\vec{b}_i}$ 为标签为 $\vec{b}_i$ 的图像在位置 i 的亮度。如果 2 个相邻标签 $\vec{b}_i$ 和 $\vec{b}_j$ 相等,则这个成本为 0。如果相邻标签不同,则可以将成本视为接缝度量。笔者采用标准图切割方法^[17]来解决具有成本函数 F 的这个二值标签的离散优化问题,得到的标签掩膜决定最终图像中每个像素的源图像,如图 2 所示。

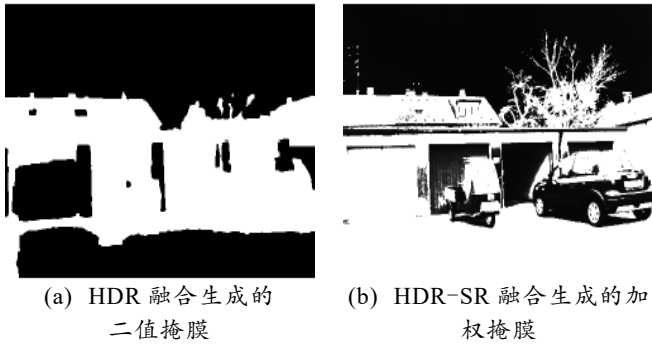


图 2 对应的样本掩膜

图 2(a)中在黑色区域,像素从曝光时间较短的图像中转移,而在白色区域,则采用曝光时间较长的图像来代替。图 2(b)中在白色区域执行超分辨率;为了生成最终的 HDR 图像,将输入图像的辐照度值转换到最终的图像合成中。输入图像在每个定义的亮度域中进行光度对齐,几乎看不到任何接缝。

2.2 SR 融合

笔者采用将迭代反投影(iterative back-projection, IBP)算法^[18]进行扩展,采用高质量、预先计算的低分辨率高动态范围图像作为初始超分辨率估计,并运行扩展 IBP 算法对非饱和区域的辐照度值执行超分辨率估计。

给定多个低分辨率图像 $\vec{l}$, 图像行可以串接成向量并相互堆叠,以形成一个输入图像矩阵 L 。此外,假设给定了将所有输入图像映射到一个参考图像的配准参数,以及摄像机系统的模糊和所需的放大系数。利用这些参数,构造一个系统矩阵 M ,将一个超分辨率图像 $\vec{h}$ 映射到低分辨率图像:

$$M \cdot \vec{h} = L. \quad (9)$$

如果采用真实的 $\vec{h}_{\text{true}}$, 则观察到的低分辨率图像 L 和生成的低分辨率图像 $M \cdot \vec{h}_{\text{true}}$ 应该相等。求解这个方程组的一种方法是采用迭代反投影法。估计图像 $\vec{h}_n$ 采用以下迭代方案进行改进:

$$\vec{h}_{n+1} = \vec{h}_n + k B^T (L - M \cdot \vec{h}_n). \quad (10)$$

式中 B 为反投影矩阵。通过将低动态范围超分辨率估计 $\vec{h}_n$ 替换为高动态范围超分辨率估计 $\vec{q}_n$, 采用式(1)低动态范围和高动态范围图像之间的关系,就可以重新构建这个迭代更新:

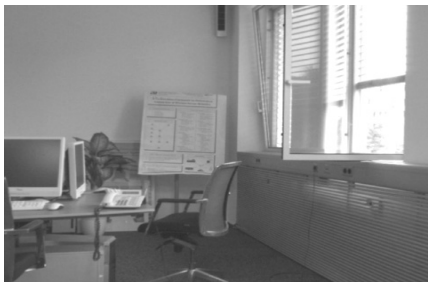
$$\vec{q}_{n+1} = \vec{q}_n + k B^T \cdot W \cdot (\exp(g(L) - \ln t) - M \cdot \vec{q}_n). \quad (11)$$

式中: g 为对应于摄像机响应曲线的查找表; t 为低分辨率、低动态范围输入图像的曝光时间。为了确保只对初始 HDR 图像的非饱和区域执行超分辨率,在更新期间应用加权矩阵 W 。

总之,笔者提出的混合方法结合了通过 HDR 融合算法获得的高动态范围信息和通过超分辨率融合算法获得的高分辨率信息。超分辨率融合仅增强 HDR 图像中低分辨率、低动态范围输入图像提供额外信息的区域(非饱和区域),HDR 图像中对应于 SR 输入中饱和区域的部分保持不变。

3 实验结果

采用不同类型摄像机捕捉图像来验证笔者提出系统方法的性能。这些图像采用 AVT Dolphin F-145C(专业摄像机)、佳能 Ixus 40(消费级数码相机)和 Axis 233D(专业监控摄像机)拍摄。图 3 为动态范围超过传感器限制的办公场景,这些图像用 AVT 摄像机拍摄。



(a) 低分辨率双三次插值图像



(b) 本文中提出的方法获得的图像

图 3 采用自动曝光设置捕捉的低分辨率双三次插值图像

图 3(a)为采用自动曝光设置的低分辨率双三次插值视图(标准视图),图 3(b)为经过本文中所提方法处理后的结果。在标准视图中饱和的部分(例如窗户)无法通过超分辨率增强,如图 4 所示。



(a) 左侧部分(低分辨率双三次插值)与右侧部分
(提出的增强方法)

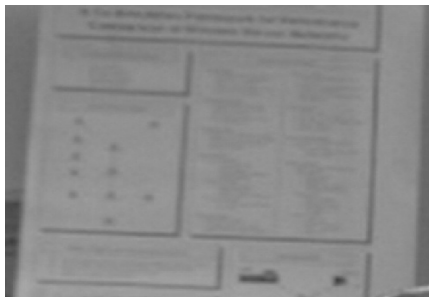


(b) 左侧部分(提出的增强方法)与右侧部分
(低分辨率双三次插值)

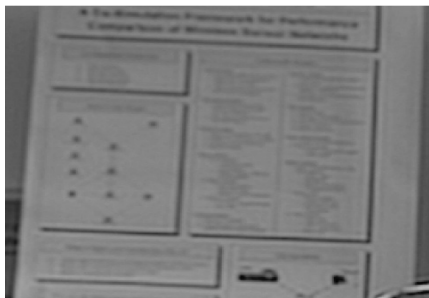
图 4 采用自动曝光设置下捕捉的低分辨率双三次插值图像与提出的增强方法的比较

图 4(b)的右侧,几乎看不到任何结构这些像素是由 HDR 图像填充的。在采用自动曝光设置捕捉的区域,图像的分辨率明显得到增强,对于超分辨

率来说,用 10 幅输入图像将分辨率提高 2 倍。图 5 为对双三次 HDR 图像的超分辨率增强。图 6 为用佳能相机拍摄的室外场景。



(a) 低分辨率双三次插值 HDR 图像



(b) 提出的增强方法获得的图像

图 5 低分辨率双三次插值 HDR 图像与提出的增强方法获得的图像的比较



(a) 低分辨率双三次插值图像



(b) 提出的增强算法获得的图像

图 6 采用自动曝光设置捕捉的低分辨率双三次插值图像与本文中的增强方法获得的图像的比较

场景包含非常明亮的区域(例如天空)和非常暗的区域(如打开的车库),不能被单个图像捕捉。采用图 2(a)的掩膜合并 2 张不同曝光的图像,由此生成的 HDR 图像提供了具有极端照明区域(例如天空

和打开的车库)的像素。超分辨率导致了所有其他部分的改进,例如可以在图 7 中的车牌上看到这一点。



(a) 低分辨率双三次插值图像



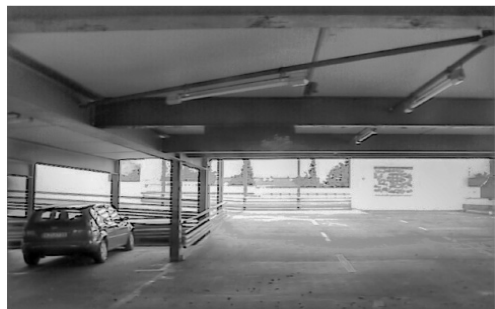
(b) 提出的增强方法获得的图像

图 7 低分辨率双三次插值 HDR 图像与本文中提出的增强方法获得的图像的比较

加权掩膜表示 HDR 图像中需要通过超分辨率增强的区域,如图 2(b)所示。图 8 为用 Axis 相机拍摄的图像示例。



(a) 低分辨率双三次插值图



(b) 提出的增强方法获得的图像

图 8 采用自动曝光设置捕捉的低分辨率双三次插值图像与提出的增强方法获得的图像的比较

这类相机的整体质量通常较差,会产生色彩伪

影和锯齿状边缘。尽管如此, HDR 图像仍然可以计算出比标准视图(图 8(a))包含更少饱和区域的图像,如图 8(b)。由于输入图像的质量较低,只能获得最小的分辨率增强。

4 结论

笔者提出一种将 HDR 融合与 SR 融合相结合的系统方法用于图像增强。提出的方法建立在受控采集过程的基础上,将输入信息分离为互补部分和冗余部分。方案确保了其中任何一个部分所包含的最合适的信息被合成到最终增强的图像中;通过采用不同类型摄像机的各种实例验证了所提出方案的可行性;在未来的工作中,希望该系统能够应用于视频处理,可能包括更鲁棒的配准和强制帧间掩膜的显式一致性。

参考文献:

- [1] 毛杜立, 比尔, 潘, 马渊圭司, 等. 具有低色串扰的高动态范围分割像素 CMOS 图像传感器 [P]. CN202110528424. 5. 2021-11-23.
- [2] 李杰, 李玮. 一种图像传感器获取单帧高动态范围图像的方法和一种图像传感器 [P]. CN202011298924. 6. 2022-05-20.
- [3] 朱炼, 孙枫, 夏芳莉, 等. 图像融合研究综述 [J]. 传感器与微系统, 2014, 33(2): 14-18.
- [4] 张聪. 数字成像设备性能改善的数字摄影图像融合研究 [J]. 数码设计, 2022(8): 56-59.
- [5] 陈大龙, 舒成成, 陆慧雯, 等. 一种基于图像处理与深度学习相结合的文本识别方法 [P]. CN202210600210. 9. 2022-07-01.
- [6] 朱韦丹. 基于多模态图像融合的人脸识别算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [7] 山显响, 刘云清. 基于超分辨率重建的车牌图像增强算法 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 106-110.
- [8] 白本督, 李俊鹏, 孙爱晶. 基于注意力机制的高动态范围多曝光图像融合模型及方法 [J]. 光子学报, 2022, 51(4): 336-347.
- [9] HAEFNER B, PENG S Y, VERMA A, et al. Photometric Depth Super-Resolution [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(10): 2453-2464.
- [10] SHARIF S M A, NAQVI R A, BISWAS M, et al. A Two-stage Deep Network for High Dynamic Range Image Reconstruction [C]//2021 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW). Nashville, TN, USA, 2021: 550-559.