

基于像素位移的多图像超分辨率重建

吴强, 夏豪杰

(合肥工业大学仪器科学与光电工程学院 合肥 230009)

Email: 2021030003@mail.hfut.edu.cn

摘要: 在一些应用中, 提高空间分辨率至关重要。为实现这一目标, 可选用高分辨率图像传感器或利用图像超分辨率技术。目前, 图像超分辨率算法主要用于处理单一低分辨率图像或多个低分辨率图像序列。本文提出了一种多图像超分辨率 (MISR) 方法, 将图像间的亚像素位移信息作为先验信息, 并结合深度学习的构架将序列图像重建成一张高质量图像。这一方法充分利用了图像之间的亚像素细节和共现先验信息, 以生成高放大系数的 SR 图像。我们的实验结果表明, 相较于当前的超分辨率方法, 该方法在图像的 PSNR 和 SSIM 评估指标上表现更出色, 验证了其在精密工业检测中的有效性。未来, 我们计划进一步整合时间信息并优化模型的计算效率, 以更好地满足工业应用的需求。

关键词: 图像序列, 超分辨率, 像素位移信息, 先验信息

Abstract: Abstract: In certain applications, enhancing spatial resolution is of paramount importance. To achieve this objective, one can opt for high-resolution image sensors or utilize image super-resolution techniques. Currently, image super-resolution algorithms mainly process either a single low-resolution image or sequences of multiple low-resolution images. This paper introduces a multi-image super-resolution (MISR) method that uses sub-pixel shift information between images as prior knowledge and leverages deep learning architectures to reconstruct the sequence images into a high-quality image. This method fully exploits the sub-pixel details and co-occurrence priors among images to produce super-resolution (SR) images with high magnification factors. Our experimental results indicate that this method surpasses existing super-resolution techniques in terms of PSNR and SSIM evaluation metrics, confirming its efficacy in precision industrial inspection. Moving forward, we plan to further integrate temporal information and optimize the model's computational efficiency to better fulfill the demands of industrial applications.

Keywords: image sequence, super resolution, sub-pixel shift information, prior knowledge

1、研究背景

超分辨率重建技术 (Super-Resolution, SR) 是一种先进的图像处理方法, 它旨在通过应用复杂的数字图像处理算法, 从低分辨率 (LR) 图像中提取和重建高质量、高分辨率 (HR) 图像。这一技术的核心目的是显著提升图像的空间分辨率, 从而在受限的硬件成像条件下生成细节更丰

富的图像。在 FPD 检测、文档与胶片扫描、以及硬件木马检测等应用场景中，当需要高分辨率图像以提供更精准的视觉信息时，超分辨率重建提供了一种行之有效的解决策略。

超分辨率技术主要分为单图像超分辨率 (Single-Image Super-Resolution, SISR) 和多图像超分辨率 (Multi-Image Super-Resolution, MISR) 两种主要方法。SISR 聚焦在仅从一个低分辨率图像中重建高分辨率图像的问题，而 MISR 则利用多个低分辨率图像之间的互补信息来提升最终图像的质量。SISR 的挑战在于，单一的低分辨率输入限制了可用信息的量，这对精确复原图像中的细节构成了挑战。为应对这一问题，基于示例的方法成为主流，其中通过学习低分辨率与高分辨率图像间的对应关系来推断高分辨率输出。

近年来，深度学习的广泛应用极大推动了超分辨率技术的发展。从早期的卷积神经网络 (CNN) 模型，如 SRCNN，到现在的更复杂网络架构，包括剩余注意机制、双向回归抑制、生成对抗网络 (GAN) 和 Transformer 框架，深度学习方法已经显著提升了 SISR 的效果和效率。此外，深度学习也为 MISR 技术提供了坚实的研究基础，并促进了基于深度卷积网络的 MISR 模型的开发，这些模型利用深度学习的潜力，显著提升了多图像超分辨率的性能。

在 MISR 的实际应用中，我们采用一种“硬件先行，后续软件处理”的策略，即通过成像系统在固定场景下采集多帧具有已知亚像素位移的低分辨率图像，然后应用软件算法进行高分辨率图像的重建。这种方法不仅充分利用了多帧图像之间的信息，还能有效提高重建图像的质量和准确性。总体而言，超分辨率技术通过其强大的图像重建能力，在多个领域中展示了巨大的应用潜力和实际价值。

因此，本文提出了一种基于亚像素位移的多图像超分辨率重建方法，旨在克服传统硬件成像限制以及单张图像超分辨率处理技术所面临的挑战。通过这种方法，我们能够重建出具有更高质量和精度的图像。

2、研究内容

在获取序列图像的过程中，图像处理器的空间位置持续变化，引发了图像的平移、旋转和缩放等畸变。这些动态变化通过运动变化矩阵 \bar{W} 表征，以捕捉场景 HR 的动态特性。同时，图像处理器受光学孔径限制和控制精度的制约，导致输出图像出现模糊，此现象由模糊因子矩阵 \bar{B} 描述。此外，在图像处理器的感光区域，生成像素值的过程涉及到下采样，这一过程通过下采样算子矩阵 \bar{D} 表示，并因此进一步降低了输出图像的分辨率。最后，探测器输出的图像在通过读出电路转换后附加了噪声，这一影响由噪声混叠矩阵 \bar{n} 描述。这些因素共同作用，影响了成像系统的性能和图像质量。因此，第 j 帧图像传感器输出的图像 LR 可通过以下表达式描述：

$$\text{LR}_j = \bar{D}\bar{B}\bar{W}_j\text{HR} + \bar{n} \quad j=2,3,4,\dots, \quad (1)$$

为了从若干张低分辨率的序列图像中恢复重建为高分辨率图像，需要逆向推导上述方程。这实际上是解算一个病态方程的过程。由于真实场景退化到低分辨率图像的过程不是唯一的，采用单一算法可能导致求解得到的高分辨率图像不唯一或求解过程不稳定。因此，本研究的关键在于引入亚像素信息的先验知识，使得方程的逆向解析过程变得更为稳定和可行。

我们提出了一种基于亚像素采样的新图像采样方法，灵感来源于相机的成像机制，该方法能够最大化地利用图像间的互补信息。此外，通过结合高效的亚像素卷积神经网络，我们采用了亚像素卷积作为上采样手段，同时使用其反卷积作为下采样手段，从而构建了一种轻量级的超分辨率网络。该网络的主要优势包括：在进行尺度变换时，不需要增加额外的参数，确保图像信息不会丢失，有望减少网络的复杂性。与 U-net 网络结构相结合，进一步减少了网络的参数数量，提高了运行效率。

如图 1 所示，我们采用了四层 Unet++ 作为核心的网络结构。在这个基于亚像素采样的轻量超分辨率网络中，首先将硬件捕获到的亚像素位移图像序列在通道上进行堆叠。在网络的主体部分，利用多图像之间的互补信息进行亚像素采样，并配合空间注意力机制对特征进行提取。接着，通过多尺度特征融合与通道注意力机制，进一步整合了图像信息。最终，利用亚像素上采样技术输出高分辨率图像。在这个过程中，多个同一位置的低分辨率 (LR) 图像通过亚像素上采样和下采样整合，生成了包含相邻像素信息的高分辨率 (HR) 图像。这确保了充分利用了每张 LR 图像间的互补信息。

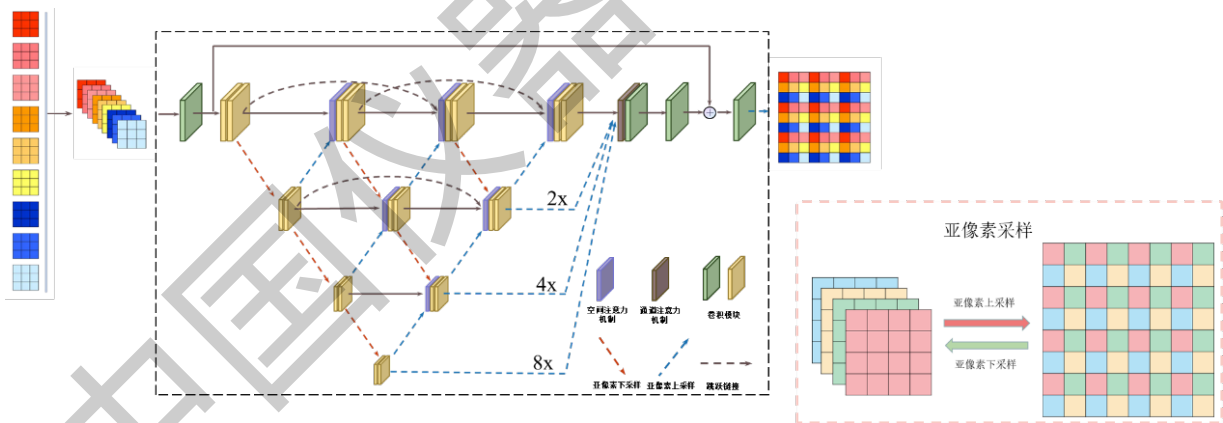


图 1 超分辨率重建网络示意图

3、结论

在本研究中，我们提出并验证了一种基于亚像素位移的多图像超分辨率重建方法，该方法有效克服了由于硬件成像限制和单张图像超分辨率处理技术的局限性而导致的图像质量退化问题。通过引入先进的亚像素采样技术和结合使用亚像素卷积神经网络，本研究不仅成功实现了从低分辨率序列图像到高分辨率图像的精确重建，还提高了图像处理的稳定性和效率。

参考文献

- [1] Wu Q, Zeng H, Zhang J, Xia H. Multi-image hybrid super-resolution reconstruction via interpolation and multi-scale residual networks[J]. Measurement Science and Technology, 2023, 34(7): 075403.
- [2] 夏豪杰, 吴强, 曾鸿飞, 杨紫怡, 许非凡, 余鑫, 一种基于亚像素位移的序列图像超分辨率重建系统, 中国发明专利, ZL202410100291.5, 2024.05.14.

中国仪器仪表表学