

图像插值技术综述

钟宝江 陆志芳 季家欢

(苏州大学计算机科学与技术学院, 苏州, 215006)

摘要: 图像插值利用图像已知采样点的灰度值估计未知采样点的灰度值, 是图像数据的一种生成过程。图像插值的目的在于通过升采样的方式提高图像的分辨率。本文分析了图像插值与图像超分辨率重建的区别; 综述了目前常用的图像插值算法及其优缺点; 对基于边缘的插值算法中涉及到的边缘作出了自己的理解与阐述; 同时, 从主观和客观两方面介绍了当前图像插值质量的评估标准, 并用实验结果说明不同降采样方式对图像插值结果的影响; 最后给出了未来图像插值的发展形势及前景。

关键词: 图像插值; 超分辨率重建; 图像边缘; 质量评估; 图像降采样

中图分类号: TN911.73 **文献标志码:** A

Review on Image Interpolation Techniques

Zhong Baojiang, Lu Zhifang, Ji Jiahuan

(School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou, 215006, China)

Abstract: Image interpolation estimates the gray values of unknown pixels based on known ones. It is a process of data generation. The objective is to increase the resolution of an image through upsampling. Firstly, the difference between image interpolation and image super-resolution reconstruction is analyzed. Then, the developments of various algorithms on image interpolation are reviewed and their features are analyzed. In particular, 'what is an edge' is explained for edge-guided interpolation techniques. Furthermore, some subjective and objective image quality assessments are introduced. Meanwhile, the effects of image interpolation with different downsampling methods are illustrated experimentally. Finally, the future research direction in the field is given.

Key words: image interpolation; super-resolution reconstruction; image edge; quality evaluation; image downsampling

引 言

图像插值是图像处理领域比较热门的话题, 其目的在于利用已知邻近像素点的灰度值预估未知像素点的灰度值, 从而将一幅低分辨率(Low resolution, LR)的图像变成相应的高分辨率(High resolution, HR)版本以改善图像的视觉效果。图像插值广泛应用于图像处理的各个领域, 如人脸检测、军事雷达图像处理、医学图像分析以及超高清电视应用^[1-2]等。当前, 超高清电视应用主要是指4K单位电视

的普及。由于与其匹配的 4K 节目源大量缺乏,现如今大量的电视节目还是标清或者是高清信号,用户通过 4K 电视观看节目达不到好的效果,将低分辨率图像信号转为高分辨率图像信号成为 4K 电视生产企业正在采取的手段。这就是图像插值研究工作者需要解决的问题。

图像分辨率提高的方式有两种,(1)对图像采集设备升级,(2)利用软件的方式提高已采集到的数字图像的分辨率。虽然,过去的几十年中,随着数码摄像机传感设备的发展,便携式摄像机或者是扫描器都已经取得了较大的进步。但是,由于图像采集设备的升级需要付出较昂贵的代价,另一方面不同的图像采集设备的兼容性有待加强,通过硬件方式提高图像的分辨率目前还不现实,因此,现有的提高图像分辨率的方法大多通过软件算法的形式实现。本文提到的图像插值技术就是这样一种用来提高图像分辨率的软件形式。目前较流行的图像插值方法主要分为线性图像插值和非线性图像插值两类,主要根据在图像插值过程中是否采用同一种插值内核处理图像而不考虑图像上不同部分的结构信息来判断某一图像插值算法属于线性图像插值法还是非线性图像插值法。图像插值问题的解决涉及到图像处理、计算机视觉和优化理论等领域中的许多基本问题^[3],例如图像质量评价、图像特征提取和最优化算法等,图像插值是这些问题的一个具体应用领域。同时,图像插值技术的进步也推动了上述领域的发展,所以,无论从图像插值技术的本身出发还是从其对图像处理其他领域的影响出发,研究图像插值技术都是一项极其重要且有意义的工作。在 20 个世纪 60~70 年代,就有人开始研究图像插值的方法,有关图像插值问题的研究成果,在图像处理与信号处理领域的顶级会议和期刊上已经有了大量收录。可以看到,图像插值技术的研究已经有较长一段时间的历史,也已经有了一定的研究成果。然而,图像插值技术的研究并不是一件容易的事情,其中仍然存在大量的问题,这些问题阻碍了图像插值技术的进一步发展。本文就其中的一些问题提出自己的看法与理解,希望能为以后发展图像插值技术提供一个新的思路。本文讨论的问题主要包括(1)目前较流行的超分辨率图像重建与图像插值是否是同一个概念,若不是,两者之间有什么关系,如何区分某一算法是图像插值算法还是超分辨率图像重建算法。(2)目前提出的图像插值算法如何分类,各自的特点是什么,如何改进已有的图像插值算法。(3)对一幅图片进行插值后如何评价插值图像质量的优劣,主观评价如何进行,客观评价又有哪些常用的评价指标。(4)图像插值的过程是否存在一些预处理步骤会影响最终的插值结果,若存在,各图像插值算法在比较最终的插值结果时应如何统一。因此,本文主要分析了图像插值领域的研究意义以及一些关键的科学问题。

1 图像插值和图像超分辨率重建比较

由于图像插值与超分辨率图像重建的目的都是让图像的分辨率提高,因此两者经常容易被混淆,但其实图像插值和图像超分辨率重建是两个不同的概念。Siu 和 Hung^[4]从处理结果的角度出发,认为两者的区别在于图像插值仅仅是将图像放大,但是对放大过程中产生的噪声、人工伪迹等无能为力,而图像超分辨率重建包括 3 部分:图像放大、图像去模糊以及图像去噪,也就是说,图像插值仅仅是图像超分辨率重建的一部分。从处理过程及思想出发,认为两者的区别主要有如下 3 点:

(1)两者的输入信息不同。图像插值是基于了一幅图像上已知像素的灰度信息来估计未知像素的灰度信息,而超分辨率图像重建则是根据多幅相关图像的灰度信息去估计一幅图像的未知信息。两者基于的已知信息数量不同。

(2)两者的计算复杂度不同。图像插值采用的算法一般都具有较低的复杂度,因此算法运行时间较短,速度较快;超分辨率图像重建的方法需要大量的信息作为参考,运行一次往往需要大量的时间,速度较慢。

(3)两者的插值思想不同。经过图像插值处理得到的高分辨率图像保留了原低分辨率图像的信息,而超分辨率图像重建则不同。图 1 给出了图像插值和图像重建在像素处理上的区别。黑色圆点表示原低分辨率图像的像素,白色圆点表示插值得到的像素,黑色圆点表示重建得到的像素。对于一幅低分辨

率图像 LR 进行 2 倍插值后,得到高分辨率图像 HR 上有 1/4 的像素信息是直接从 LR 上复制过来的(如图 1(b) 中黑色圆点所示),剩下的 3/4 需要根据已有的信息去估算(如图 1(b) 中白色圆点所示)。但是从图 1(c) 中可以看到,超分辨率图像重建不会复制原有的像素信息,它所得到的像素值都是根据计算得到。

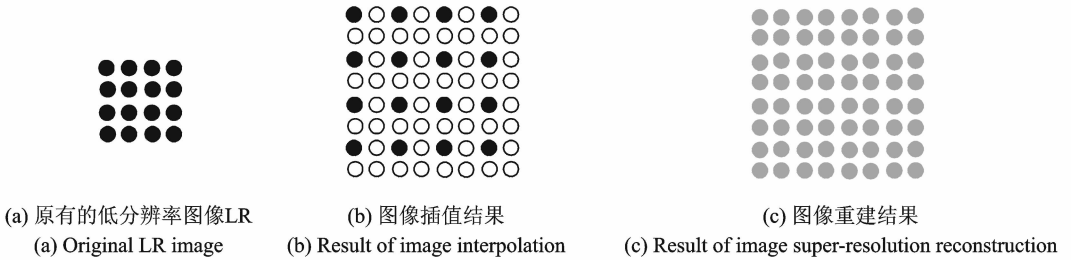


图 1 图像插值与重建示意图

Fig. 1 Image interpolation and image super-resolution reconstruction

2 图像插值分类

目前,人们已经提出了很多图像插值算法,主要可以分为两类,一类是线性图像插值方法,另一类是非线性图像插值方法,如图 2 所示。传统的插值方法如最近邻插值,双线性插值以及双三次插值^[5-12] 等都属于线性插值方法。这类插值方法在图像插值过程中采用同一种插值内核,不用考虑待插像素点所处的位置,这种做法会使图像中的边缘变得模糊不清,达不到高清图像的视觉效果。对于现在比较流行的基于字典学习的图像插值方法^[13-14],基于深度学习的图像插值方法^[15]以及基于决策树的图像插值方法^[16-17]等,由于它们都需要预先利用大量的图像做训练,然后才对图像进行插值,因此,将这些算法归类为图像超分辨率重建算法,文中不作介绍。非线性插值方法主要包括:基于小波系数的方法^[18-24]、基于边缘信息的方法^[25-44]。其中,基于边缘信息的方法又可分为隐式方法^[25-26]和显式方法^[27-44]两种。目前提出的基于边缘信息的方法,如 2001 年 Li 和 Orchard^[28]提出的边缘导向插值(New edge-directed interpolation, NEDI)算法;2006 年 Zhang 和 Wu 提出的线性最小均方误差估计插值(Linear minimum mean square-error estimation, LMMSE)算法^[29];2008 年 Zhang 和 Wu 提出的软判决自适应插值(Soft-decision adaptive interpolation, SAI)算法^[31]以及 2013 年 Wei 和 Ma 提出的边缘对比度引导的图像插值(Contrast-guided image interpolation, CGI)算法^[37]等都是隐式的基于图像边缘的插值方法。

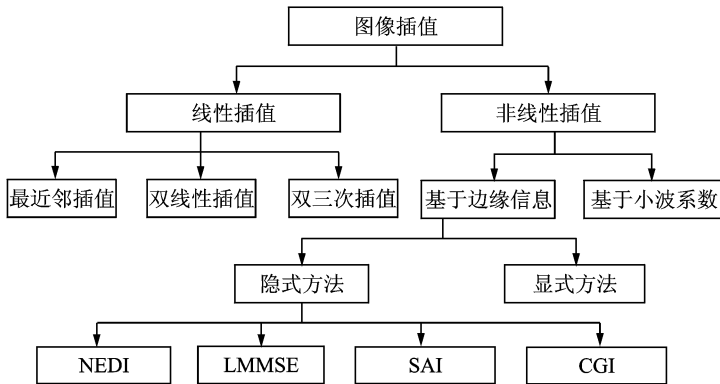


图 2 图像插值算法分类

Fig. 2 Classifications of image interpolation algorithms

2.1 线性插值方法

(1) 最近邻插值法

最近邻插值算法又称零阶插值,它是一种比较容易实现且算法复杂度较低的插值算法,其原理是取待插值点周围 4 个相邻像素点中欧式距离最短的一个邻点的灰度值作为该点的灰度值。此算法由于仅用对该插值点影响最大的(即最近的)像素的灰度值作为该点的值,没有考虑其他相邻像素的影响,因此插值后得到的图像容易产生块效应,造成图像模糊,放大效果一般不够理想。

(2) 双线性插值法

为了改善最近邻插值算法的不足,提出了一种新的插值算法即双线性插值算法^[5-7]。双线性插值又称一阶插值,其插值原理是待插点像素值取原图像中与其相邻的 4 个点像素值的水平、垂直两个方向上的线性内插,即根据待采样点与周围 4 个邻点的距离确定相应的权重,从而计算出待采样点的像素值。经过此算法处理后的图像,会产生许多新的像素值,它们主要由插值点周围像素的灰度值通过插值运算获得。由于此算法没有考虑相邻点间灰度值变化率的影响,因此具有低通滤波器的性质,会使放大后图像的重要细节受到损失,图像变得模糊不清。

(3) 双三次插值

双三次插值^[8-12]又称立方卷积插值,它是一种比较复杂的插值方法,其原理是利用以采样点为中心的 4×4 邻域内的 16 个已知像素点的灰度值来估计采样点的灰度值。双三次插值法不仅考虑到 4 个直接相邻点的灰度影响,而且考虑到各邻点间灰度值变化率的影响。因此,可以得到更接近高分辨率图像的放大效果,但同时也导致了运算量的急剧增加。

2.2 非线性插值方法

(1) 基于小波系数的插值

由于小波具有多分辨率分析功能和逐渐局部细化等性质,基于小波的插值方法^[18-24]也相继被提出。小波变换(Discrete wavelet transform, DWT)的基本思想就是将信号分解到不同的尺度或者分辨率层上,这样可以在不同的尺度上独立的对信号进行研究和分析。正交小波分解不仅可将图像的高低频信息很好地分离,而且分解后各层子带之间具有相似性。分解后的低频信息中包含了图像的绝大部分能量;高频信息则对应图像的边缘信息。图 3 给出了基于小波系数的图像插值对应的思想示意图。

如图 3 所示,通过小波变换,将图像的高低频信息分离后,可以单独对高频信息进行处理。若能准确地得到图像的高频细节,利用重构理论,将得到的高频与原有的低频相叠加,再通过离散小波逆变换(Inverse discrete wavelet transform, IDWT)就可以得到分辨率高一倍的图像。

(2) 基于边缘信息的插值

由于边缘对人眼知觉系统的视觉重要性,研究者提出了边缘引导的图像插值方法^[25-44]来对图像边缘进行放大。基于边缘信息的图像插值方法的核心思想是对非边缘像素点采用无方向的传统插值方法进行插值,而对于边缘像素点则采用有方向的插值方法。边缘像素及其方向判断的精准度对最后的图像插值结果有着决定性的影响。其中,基于边缘的图像插值方法可分为隐式边缘插值和显式边缘插值两种。显式边缘图像插值需要首先用某种边缘检测算法检测出待插值的 LR 图像的边缘,然后沿着边缘对图像进行插值。图 4 给出的是显式边缘插值算法的示意图,其中黑色虚线是图像的真实边缘,灰色实线是边缘检测算法检测出的边缘。对于图 4 中的灰色像素点的插值,需要确定其在边缘的哪一侧,然后利用该侧的已知像素点对其进行估算。由于图像边缘的连续性与数字图像离散性的冲突,将连续的

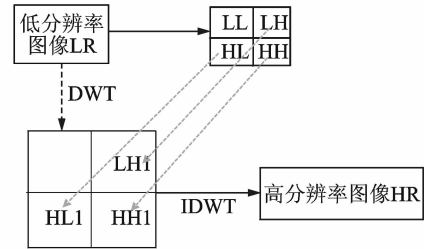


图 3 小波插值示意图

Fig. 3 Demonstration of image interpolation with wavelets

边缘映射到离散的像素点上会产生较大的误差,而且沿着图像边缘插值不易实现,所以此类方法发展较慢。鉴于显式边缘插值方法的上述缺点,后来大多数基于边缘的图像插值方法都属于隐式图像边缘插值方法。该类方法不用明确计算图像边缘线的具体位置,只需要确定某一待处理像素是否是边缘像素,若是边缘像素,其所在的边缘方向即可。但是对于边缘像素考虑方式的不同,最后插值得到的结果会不一样。

3 边缘像素处理

在通常的非线性图像插值方法中,对“边缘”的理解和认识与现有的边缘检测方法(如 Canny 算法)一致,即将梯度超过给定阈值且通过非极大值抑制的像素点连接而成的线条称为边缘,其宽度一般只有 1~2 个像素。在插值过程中,这类边缘像素将得到“保护”,如采用与边缘方向一致的一维方向插值;而对于非边缘像素,一般会采用与线性插值法相同的策略(如双三次插值)处理。此时,对于边缘附近的非边缘像素,其插值所涉及到的支持领域将跨越边缘,导致插值得到的图像边缘仍然存在一定程度的模糊化。对此,2013 年 Wei 和 Ma 在其研究工作^[37]中给出了对图像边缘一种新的理解与阐述:在非线性插值方法中,仅对传统意义上 1~2 个像素宽的边缘进行“保护”不够,为了保证插值效果,需要同时考虑距离边缘一定范围内的非边缘像素并对它们进行类似的保护(如采用边缘导向的一维方向插值,而不是采用无方向的二维插值),这一做法可称为“边缘扩散”或“边缘带状化”。特别地,边缘扩散的程度与边缘对比度(即边缘两侧像素的灰度值差异)成正比,即边缘对比度越大,扩散后的带状化边缘越宽。基于以上考虑,Wei 和 Ma 提出了一种边缘对比度引导的图像插值(Contrast-guided image interpolation, CGI)算法^[37]。

图 5 给出了以上两种不同图像边缘阐述方法的差异。图 5(a) 给出了一幅结构比较简单的图像,图 5(b) 呈现了通常的非线性图像插值方法所考虑的边缘,这类方法能够保证边缘上的像素(如点 A)清晰地出现在 HR 图像中。对于点 B 和点 C,则会被当作非边缘像素进行二维无方向插值。此时,对于点 B,由于无方向插值涉及的支持领域完全位于边缘的同一边(像素差异值较小),插值效果能够得到保证。而对于点 C,由于插值的支持领域跨越边缘,便有可能产生严重的误差。图 5(c) 显示了 CGI 算法所考虑的边缘,根据其边缘扩散原则,对于图 5(a) 的图像,黑色与白色的对比度明显大于灰色与白色的对比度,因而扩散后的带状化边缘宽度也不一样。在图 5(c) 中,由于点 C 被扩散后的边缘涵盖,因此在插值过程中将得到保护,进而产生与通常的非线性插值方法不同的插值效果。但是,在计算出实际的边缘像素(如图 5(b) 中的点 A)后,将其周边的像素归为边缘像素还是非边缘像素?虽然,Wei 和 Ma^[37]给出了一种热扩散技术来解决上述问题,但是实验结果表明,这种方法在精度上仍有一定的欠缺,因此,边缘像素邻近的非边缘像素如何处理,如何划分亟需研究。

4 插值评价

图像质量评价的主体是人,因此人眼视觉特性(Human visual system, HVS),如多通道结构、掩盖效应、对比度敏感度和视觉非线性定律等)对评价算法的研究具有重要意义。但是,对人眼视觉特性的研究涉及很多方面,如心理、生理等,而且目前为止对其仍没有充分理解,特别是对视觉的心理特性还难以找出定量的描述方法,所以现在还缺乏一套全面的、统一的图像质量评价体系。目前,评价图像插值

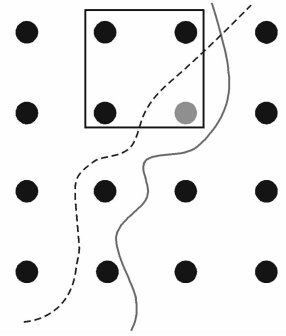


图 4 显式边缘插值示意图
Fig. 4 Demonstration of explicit edge-guided interpolation technique

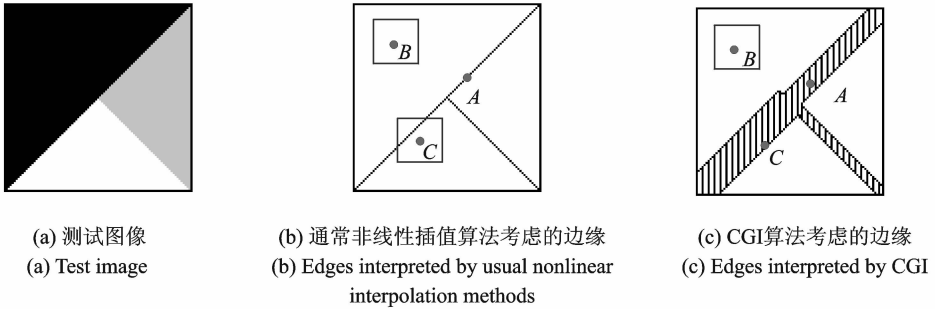


图5 对图像边缘的两种不同阐述方式

Fig. 5 Two types of interpretations of image edge

质量优劣的方式主要有两种标准,一种是主观评价^[45-46],即设计实验,由观测者对图像质量进行评价;另一种是客观评价^[47-51],采用算法对图像质量进行评价。

4.1 主观评价

主观评价^[45-46]指通过人眼对于图像的观察,对得到的高分辨率图像的视觉效果作出评价。根据生物学对人类视觉系统的研究,得到了以下的观点:人类视觉系统由一个个视觉神经元组成,这些神经元单独去识别细小的特征,之后视觉系统会将这些特征逐渐组合,得到整个图像。这与调查结果相吻合,即大部分参与主观评价的评价者,在观察图像的时候,往往会优先注意到图像的细节部分,如边缘是否完整、是否存在不合理的锯齿和局部是否存在不规则形变或重影等。因此,对于图像的主观评价,将重点放置于图像的细节部分,并且同时关注这些细节对于整体的影响,从而得到一个用于全面描述图像质量的评价结果。主观评价可分为绝对主观评价和相对主观评价。绝对主观评价指隐藏原始图像信息,只给出不同方法得到的高分辨率的图像,由观察者判断得到的图像质量优劣,从而对所使用的插值算法进行打分。而相对主观评价指在绝对主观评价的基础上给出原始信息,评价者参照原图得到打分结果。无论是绝对主观评价还是相对主观评价,不同的观察者对同一幅图像进行评测时可能会给出不同的评价结果。而且主观评价方法会受到观测者专业背景、心理和动机等主观因素的影响,可信度难以保证,出于上述考虑,研究者们提出客观评价方法,即用数值大小明确表示图像的插值质量,这里列出几种常用的客观评价方法。

4.2 客观评价

客观评价^[47-51]指通过对得到的高分辨率图像与原始图像的像素按某一规则计算得到的指标值的大小来衡量图像质量的好坏。由于不同算法得到的指标值往往不同,并且以指标值的形式来呈现图像质量的好坏比主观的评价更具有可比性,因此客观的评价方法逐渐成为了该领域评价插值算法优劣的主流。但是,单一的规则往往存在一定的缺陷,不能全面地概括图像的好坏。为了解决这个问题,学者们提出了多种不同的计算规则,从不同的角度去探讨图像质量的评价标准。目前较为流行的评价标准主要有均方误差法^[47]、峰值信噪比法^[48]、结构相似度法^[50]以及信息保真度法^[51]。

(1)均方误差(Mean square error, MSE)是指原图像和插值图像各像素点灰度值差异的平均数。MSE的计算公式为

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [R(m,n) - I(m,n)]^2}{M \times N} \quad (1)$$

式中: R 和 I 分别为插值图像和原图像, m 和 n 为图像的大小。MSE的值越小,则表明 R 和 I 的差异越小,即插值算法越好;反之数值越高则表明两图像的差异越大,插值算法越差。

(2)峰值信噪比(Peak signal to noise ratio, PSNR)是一种比较常用的图像评价指标,计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \log_{10} (L^2 / \text{MSE}) \quad (2)$$

式中: $L = (2^n - 1)^2$;MSE为图像之间的均方误差; n 为每像素的比特数,一般取8,即像素的灰阶数为256,PSNR的单位为dB,数值越大表示失真越小,也就是插值结果越好。实验结果显示,PSNR值并不能总与人眼看到的视觉品质一致,这是因为人眼的视觉对于误差的敏感程度并不是绝对的。

(3)结构相似度(Structural similarity index, SSIM)分别从亮度、对比度和结构3方面度量图像相似性。与峰值信噪比相同,结构相似度考虑了人眼的视觉特征,即人类视觉对亮度对比度较敏感的特点。结构相似度的计算公式为

$$\text{SSIM}(x, y) = [l(x, y)]^a \cdot [c(x, y)]^\beta \cdot [s(x, y)]^\gamma \quad (3)$$

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (4)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \quad (5)$$

$$s(x, y) = \frac{\sigma_{x,y} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (6)$$

式中: l, c, s 分别为亮度、对比度和结构相似度,将这三者用一定的系数结合起来,能够很好地克服单一特征片面扩大或弱化差异的问题。其中 μ_x 和 μ_y 分别为图像 X 和 Y 的均值。 σ_x 和 σ_y 分别为图像 X 和 Y 的标准差, $\sigma_{x,y}$ 为 X 和 Y 的协方差。

(4)信息保真度(Information fidelity criterion, IFC)通过计算原始图像和插值图像之间的互信息,从而度量图像的插值质量。该方法从信息论的角度出发,与信息传递相同,图像信号在传递过程中总是会出现或多或少的信息缺失,也就是所谓的退化。退化模型为

$$D = gC + V = \{g_i C_i + V_i; i \in I\} \quad (7)$$

式中: C 为原始的信号, g 为退化过程, V 为一定量的噪声, D 为得到的信号。原始图像通过一定的退化通道得到处理后的图像。所以,当这个退化通道是插值算法时,原始图像信息和处理后的图像信息之间的互信息越高,就证明插值中所丢失的信息越少,并以此来衡量插值算法的好坏。IFC的具体计算方式为

$$\text{IFC} = \sum_{k \in \text{subbands}} I(C^{N_i, k}; D^{N_i, k} | S^{N_i, k}) \quad (8)$$

式中: I 为互信息, C 和 D 分别为在给定 S 的情况下的原始信号和处理后的信号。将所有的互信息累加,便得到了整体的信息保真度。可以看到,无论是哪种客观评价方法,在计算具体的数值指标前都需要对应的参考图像作为标准,这在实验室里进行算法研究时很容易实现,但是绝大多数情况下,原有的高分辨率图像未知。因此,实际生活中,通常需要将客观评价方法和主观评价方法相结合才可以得到比较公正的评价结果。利用上述提到的标准,如PSNR对目前几种流行的插值算法进行测评,实验测试图如图6所示。参与评测的算法分别为:双三次插值(Bicubic)^[10]法、NEDI^[28]法、LMMSE^[29]法、SAI^[31]法以及CGI^[37]法这5种算法。实验环境如下:程序编写所基于的平台是MATLAB,版本是2014,CPU是3.10 GHz的Inter Core,内存为4 GB,各算法的参数配置均是算法提出者所推荐的默认参数。图7~10给出了上述5种算法对测试图像“Wheel”“House”“Lena”以及“Cameraman”进行插值的主观效果比较。表1为以上5种不同插值算法所获得插值图像与参考图像的峰值信噪比,为便于比较,表格中的最后一行的平均值为各算法相对于双三次插值算法所提高的结果。从图7可以看出,SAI算法在图像“Wheel”

边缘处的处理结果明显优于其他 4 种算法,但是表 1 中的数据显示的却是 CGI 算法对于图像“Wheel”的处理效果更好。因此,在进行插值算法评测时,不能只用一种评测标准,应该主观评测和客观评测相结合,这样才能得出比较公正的结论。表 2 为各算法处理 8 幅灰度图像的 CPU 时间比较,因为 Bicubic 算法是一种不需要考虑图像结构的线性插值算法,所以在速度上最快。



图 6 实验中的 8 幅测试图像

Fig. 6 Eight test images used for simulation experiments

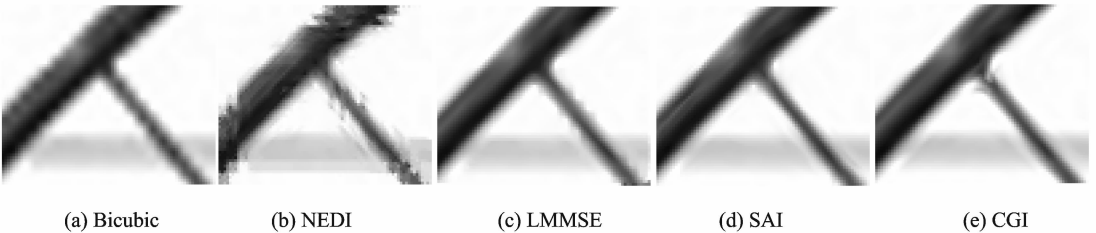


图 7 各算法对“Wheel”图像的插值结果比较

Fig. 7 Comparison of interpolation results on 'Wheel' with different methods

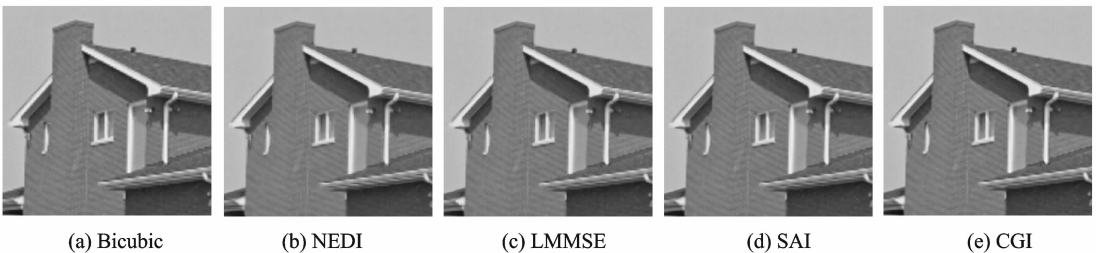


图 8 各算法对“House”图像的插值结果比较

Fig. 8 Comparison of interpolation results on 'House' with different methods



图 9 各算法对“Lena”图像的插值结果比较

Fig. 9 Comparison of interpolation results on 'Lena' with different methods

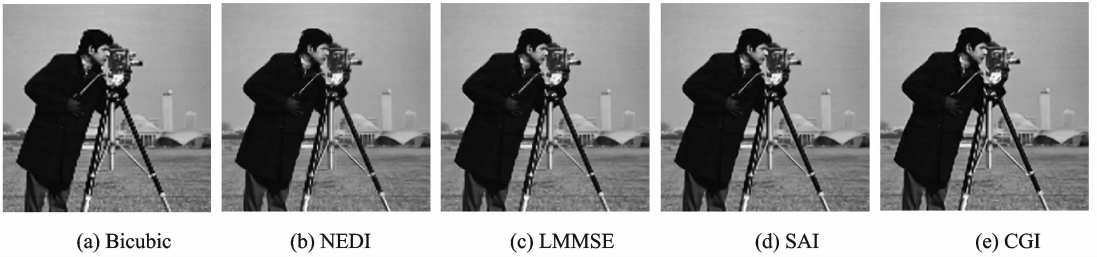


图 10 各算法对“Cameraman”图像的插值结果比较

Fig. 10 Comparison of interpolation results on 'Cameraman' with different methods

5 不同降采样方式

为了客观评价图像插值质量的好坏,需要先对原图进行降采样,然后再对降采样后的图像进行插值,最后将插值得到的图像与原图像进行对比,这样就可以评测插值算法的优劣。可见,图像降采样是图像插值的首要步骤或者是预处理步骤。但是现在绝大多数插值算法在算法比较环节,只考虑最终的插值结果,却很少讨论或明确指出算法所用的降采样方法。但是本文实验结果表明,不同的降采样方式会对图像的插值结果产生不同的影响。目前常用的降采样方式主要有手动降采样和函数调用降采样两类。

其中手动降采样方式中比较有代表性的就是隔行隔列降采样。图 11 是隔行隔列降采样的示意图,图 11(a) 是原始的高分辨率图像,将其奇数行和奇数列的像素值保留,其余像素删除,就可以获得如图 11(b) 所示的低分辨率图像 LR。函数调用降采样主要利用 MATLAB 中自带的“Imresize”函数进行图像降采样,主要有 3 种调用方法的选择,分别是“Nearest”“Linear”以及“Cubic”。图 12 给出了用上述 4 种降采样方法对同一幅测试图像“Lena”进行处理的结果。黑色线框中的数据是图像帽檐部分具体的像素灰度值。可以看到,隔行隔列降采样和最近邻降采样获得的灰度值是原图像的一部分,因此最后的降采样结果会出现明显的锯齿状,但是图像的

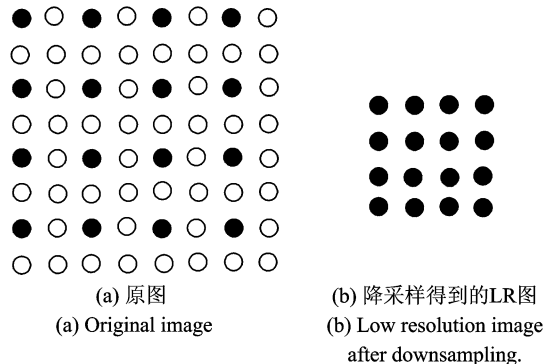


图 11 隔行隔列降采样示意图

Fig. 11 Demonstration of downsampling via interleaved mode

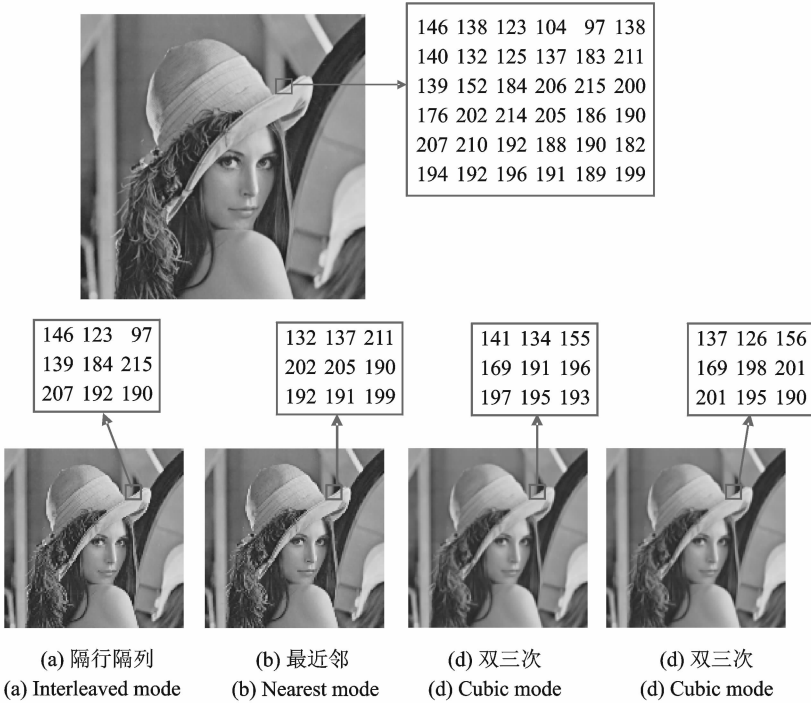


图 12 不同的降采样方式得到的 LR 图

Fig. 12 LR images with different downsampling ways

亮度信息保存得比较完整。双线性降采样和双三次降采样得到的数据都由原有图像的灰度值计算，不是简单的复制与保留，因此最后得到的低分辨率图像的边缘比较平滑，但是亮度信息损失严重。对不同降采样方式得到的低分辨率图 LR，采用同一种插值方法，如双三次“Cubic”法进行插值，得到的结果如图 13 所示。表 3 显示了客观插值评测方法中 PNSR 指标对插值图像的评测结果。从表 3 了可以看出，同一种插值方法，不同的降采样方式，得到的结果会有很大不同。因此，在比较不同插值方法的插值效果时，需要注意降采样方式上的不同，否则无法从数值结果上直接进行比较。

表 1 各算法在对 LR 进行 2×2 插值得到的图像与原图像的 PSNR 比较

Tab. 1 Comparison of different interpolation methods with respect of PSNR

dB

测试图像	Bicubic	NEDI	LMMSE	SAI	CGI
Lena	30.19	30.57	30.50	31.34	31.05
Station	24.65	25.04	25.06	25.94	26.28
Cameraman	25.26	25.38	25.55	25.77	25.75
House	32.06	31.84	32.47	32.73	32.69
Wheel	19.59	21.06	19.64	21.53	22.39
Parrot	34.77	34.99	34.60	35.90	35.61
Butterfly	26.17	26.88	26.43	27.40	27.66
Bike	25.96	25.99	26.06	26.99	26.71
平均值	0	0.39	0.21	1.12	1.19

表 2 不同算法的插值时间比较

Tab. 2 Comparison of different interpolation methods with respect of CPU time

测试图像	Bicubic	NEDI	LMMSE	SAI	CGI
Lena	0.008	4.518	3.441	0.700	0.284
Station	0.009	4.463	3.450	0.845	0.288
Cameraman	0.019	4.221	3.453	0.700	0.267
House	0.015	4.267	3.441	0.688	0.273
Wheel	0.005	2.965	2.352	0.509	0.203
Parrot	0.060	27.618	21.047	3.972	1.532
Butterfly	0.046	7.998	6.898	1.119	0.516
Bike	0.077	30.222	21.721	3.849	1.605
平均值	0.031	10.784	8.225	1.548	0.621

表 3 双三次插值法对不同降采样方式得到的 LR 图像插值结果的 PSNR 比较

Tab. 3 Comparison of Bicubic interpolation in different downsampling methods with respect of PSNR

隔行隔列	Nearest	Linear	Cubic
30.57	23.45	27.48	27.79



图 13 双三次插值法对不同降采样方式得到的 LR 图像的插值结果示意图

Fig. 13 Demonstration of interpolation results via cubic interpolation on different LR images with different downsampling modes

6 结 论

本文分析了图像插值和图像超分辨率重建的异同点,全面地介绍了各类图像插值算法,详细阐述了对于基于边缘的图像插值算法的理解,用实验结果说明了不同图像降采样方式对图像插值结果的影响,并从客观和主观两方面介绍如何评价插值图像的质量。作为一个具有很强实用价值的研究领域,图像插值具有光明的发展前景,目前插值算法的效果也有很大的提升空间。因为提出一个通用且高效的图像插值算法比较困难,图像采集设备硬件的发展会影响到这类通用算法的应用范围。因此,为了能够获得更高质量的插值图像,满足各种实际应用的需求,预计该技术的发展将从以下几个方面展开:

(1)提升算法的速率以满足各类实时性需求。目前已有的图像插值算法速度不够快,若处理单幅图片,这样的速度或许会满足要求,但若将插值算法应用到视频领域,则对算法复杂度要求较高。

(2)针对不同应用需求提出具有针对性的插值算法,提升算法的精确度。在一些专用场合,比如车牌识别、人脸检测等,由于其拥有较多的先验知识,将这些先验知识和图像插值算法紧密结合起来,可能会提高得到的插值图像的质量。

(3)任意倍数的插值。当前的插值算法大多数是 2^n 倍插值,如何将插值算法扩充到任意倍数,包括小数倍数,将成为下一步的研究重点。

同时,图像插值理论的研究涉及到很多与数字图像相关的本质问题,这也会是未来的一个研究热点。图像插值的理论研究目前较少,例如图像插值的理论极限、高低分辨率图像之间的关系等仍是开放的课题,等待研究者的进一步探索。总之,在很长的一段时间内,图像插值问题都将是计算机视觉与图像处理领域的研究热点。更高效插值算法的提出及图像插值相关问题的理论突破,都会对这一领域的发展起到重要的推动作用。

参考文献:

- [1] El-Khamy S E, Hadhoud M M, Dessouky M I, et al. Efficient implementation of image interpolation as an inverse problem [J]. *Digital Signal Processing*, 2005,15(2):137-152.
- [2] Thévenaz P, Blu T, Unser M. Interpolation revisited[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2000,19(7):739-758.
- [3] Capel D, Zisserman A. Computer vision applied to super resolution[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2003,20(3): 75-86.
- [4] Siu W C, Hung K W. Review of image interpolation and super-resolution[C]// *Signal & Information Processing Association Summit and Conference. Asia-Pacific:IEEE*, 2012:1-10.
- [5] Blu T, Thevenaz P, Unser M. Linear interpolation revitalized[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004,13(5): 710-719.
- [6] Lehmann T M, Gönner C, Spitzer K. Addendum: B-spline interpolation in medical image processing[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2001,20(7):660-665.
- [7] Nayak R, Patra D. Image interpolation using adaptive P-spline[C]// *Annual IEEE India Conference (INDICON)*. [S. l.]: IEEE, 2015:1-6.
- [8] Zhou D, Shen X, Dong W. Image zooming using directional cubic convolution interpolation[J]. *IET Image Processing*, 2012,6(6):627-634.
- [9] Hou H S, Andrews H. Cubic splines for image interpolation and digital filtering[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1979,26(6):508-517.
- [10] Keys R. Cubic convolution interpolation for digital image processing[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing*, 1981,29(6):1153-1160.
- [11] Shi J, Reichenbach S E. Image interpolation by two-dimensional parametric cubic convolution[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006,15(7):1857-1870.
- [12] 庞志勇, 谭洪舟, 陈弟虎. 一种改进的低成本自适应双三次插值算法及 VLSI 实现[J]. *自动化学报*, 2013,39(4):407-417. Pang Zhiyong, Tan Hongzhou, Chen Dihu. An improved low cost adaptive bicubic interpolation algorithm and the implemen-

tation of VLSI[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013,39(4):407-417.

- [13] Dong W S, Zhang L, Lukac R, et al. Sparse representation based image interpolation with nonlocal autoregressive modeling [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013,22(4):1382-1394.
- [14] Romano Y, Protter M, Elad M. Single image interpolation via adaptive nonlocal sparsity-based modeling[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014,23(7):3085-3098.
- [15] Dong C, Loy C C, He K, et al. Image super-resolution using deep convolutional networks[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016,38(2):295-307.
- [16] Cha Y, Kim S. Fast image interpolation via random forests[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015,24(10):3232-3245.
- [17] Huang J J, Siu W C. Fast image interpolation with decision tree[C]// *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*. [S. l.]:IEEE, 2015:1221-1225.
- [18] Chang S G, Cvetkovic Z, Vetterli M. Locally adaptive wavelet-based image interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(6):1471-1485.
- [19] 黄海赞, 戚飞虎, 陈剑, 等. 基于小波的医学图像插值[J]. *自动化学报*, 2002,28(5):722-728.
Huang Haiyun, Qi Feihu, Chen Jian, et al. Medical image interpolation based on wavelet[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002,28(5):722-728.
- [20] Lama R K, Shin S, Kang M, et al. Interpolation using wavelet transform and discrete cosine transform for high resolution display[C]// *IEEE International Conference on Consumer Electronics*. [S. l.]:IEEE, 2016:184-186.
- [21] Velisavljevic V. Image interpolation using oriented wavelet transforms[C]//*IEEE International Conference on Signal Processing*. [S. l.]:IEEE, 2008:1-5.
- [22] Rasti P, Lüsü I, Demirel H, et al. Wavelet transform based new interpolation technique for satellite image resolution enhancement[C]// *IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES)*. [S. l.]:IEEE, 2014:185-188.
- [23] Soltan E A, El-Rabaie S, El-Fishawy N, et al. Wavelet-based image interpolation with a least squares algorithm[C]// *IEEE International Conference on Computer Engineering (ICENCO)*. [S. l.]:IEEE, 2010:103-106.
- [24] Shi J, Shan Z, Weng C, et al. Image interpolation using a Bayesian approach in wavelet domain[C]// *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*. [S. l.]:IEEE, 2012:830-833.
- [25] Jensen K, Anastassiou D. Subpixel edge localization and the interpolation of still images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1995,4(3):285-295.
- [26] Wang Q, Ward R K. A new orientation-adaptive interpolation method[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(4):889-900.
- [27] 杨云峰, 苏志勋, 胡金燕. 一种保持边缘特征的图像插值方法[J]. *中国图象图形学报*, 2005,10(10):1248-1251.
Yang Yunfeng, Su Zhixun, Hu Jinyan. An image interpolation method for preserving edge feature[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005,10(10):1248-1251.
- [28] Li X, Orchard M T. New edge-directed interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001,10(10):1521-1527.
- [29] Zhang L, Wu X. An edge-guided image interpolation algorithm via directional filtering and data fusion[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(15):2226-2238.
- [30] Sun H, Zhang F, Zheng N. An edge-based adaptive image interpolation and its VLSI architecture[C]// *Signal & Information Processing Association Summit and Conference. Asia-Pacific;IEEE*, 2012:1-896.
- [31] Zhang X, Wu X. Image interpolation by adaptive 2-D autoregressive modeling and soft-decision estimation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17(6):887-896.
- [32] Ye W, Ma K-K. Convolutional edge diffusion for fast contrast-guided image interpolation[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2016, 23(9):1260-1264.
- [33] Lee S J, Kang M C, Uhm K H, et al. An edge-guided image interpolation method using Taylor series approximation[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2016, 62(2):159-165.
- [34] Zhong G, Yu L, Zhou P. Edge-preserving single depth image interpolation[C]// *Visual Communications and Image Processing (VCIP)*. [S. l.]:IEEE, 2013:1-6.
- [35] Mai Z, Rajan J, Verhoye M, et al. Robust edge-directed interpolation of magnetic resonance images[C]//*International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI)*. [S. l.]:IEEE, 2011:472-476.
- [36] Jha A K, Kumar A, Schaefer G, et al. An adaptive distance-based edge preserving interpolation algorithm for natural images [C]//*IEEE International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV)*. [S. l.]:IEEE, 2015:1-5.

- [37] Wei Z, Ma K-K. Contrast-guided image interpolation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(11):4271-4285.
- [38] Xiao C, He Y, Yu J. A high-efficiency edge-preserving Bayesian method for image interpolation[C]// *International Conference on Signal Processing*. [S. l.]:IEEE, 2008:1042-1046.
- [39] Zhang X, Wu X. Edge-guided perceptual image coding via adaptive interpolation[C]// *International Conference on Multimedia and Expo*. [S. l.]:IEEE, 2007:1459-1462.
- [40] Liu S F, Shen S H. An adaptive image interpolation method focusing on edge information[C]// *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Design (ISCID)*. [S. l.]:IEEE, 2014:421-424.
- [41] Yang S, Kim Y, Jeong J. Fine edge-preserving technique for display devices[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2008, 54(4):1761-1769.
- [42] Hong K P, Paik J K, Kim H J, et al. An edge-preserving image interpolation system for a digital camcorder[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 1996, 42(3):279-284.
- [43] Chen M J, Huang C H, Lee W L. A fast edge-oriented algorithm for image interpolation[J]. *Image & Vision Computing*, 2005, 23(9):791-798.
- [44] Chang J, Yoo D S, Park J H, et al. Edge directional interpolation for image upscaling with temporarily interpolated pixels [J]. *Electronics letters*, 2011, 47(21):1176-1178.
- [45] Sheikh H R, Bovik A C. Image information and visual quality[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(2):430-444.
- [46] Liu S, Wu L, Gong Y, et al. Overview of image quality assessment[J]. *Science Paper Online*, 2011, 6(7):501-506.
- [47] Sakowicz B, Kaminski M, Ritter R, et al. Methods of 3D images quality assessment[C]// *IEEE International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits & Systems*. [S. l.]:IEEE, 2015:123-128.
- [48] Sheikh H R, Sabir M F, Bovik A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(11):3440-3451.
- [49] Wang Z, Li Q. Information content weighting for perceptual image quality assessment[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5):1185-1198.
- [50] Wang Z, Gong Y, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4):600-612.
- [51] Schulter S, Leistner C, Bischof H. Fast and accurate image upscaling with super-resolution forests[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. [S. l.]:IEEE, 2015:3791-3799.

作者简介:



钟宝江 (1972-), 男, 教授, 研究方向: 计算机视觉、图像分析与理解, E-mail: bjzhong@suda.edu.cn.



陆志芳 (1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 图像插值。



季家欢 (1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 图像编码。

