

超分辨率技术的实现——一种改善的小波插值方法

田岩^{1,2)} 田金文²⁾ 柳健^{1,2)} 张继贤³⁾ 林宗坚³⁾

¹⁾(华中科技大学电子与信息工程系, 武汉 430074)

²⁾(图象信息处理与智能控制国家重点实验室, 武汉 430074) ³⁾(中国测绘科学研究院, 北京 100039)

摘要 由于成像系统内部和外部的因素,使得获取的图象产生退化.为提高图象的质量,发展了一种基于小波插值方法的超分辨率技术.在简要分析若干典型插值算法的基础上,考虑到 Bézier 曲面插值方法的精确性和可快速实现性,提出了基于 Bézier 曲面插值的小波变换方法.该方法不仅克服了传统插值方法使图象细节退化的缺点,同时由于 Bézier 曲面插值的快速实现使算法的复杂性得以有效的控制.实验结果表明了采用 Bézier 曲面插值的小波方法对于改善图象分辨率的有效性和可行性.

关键词 计算机图象处理(520·6040) 超分辨率 图象插值 小波变换 Bézier 曲面

中图法分类号: TN911.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)12-1422-05

Implementation for Super Resolution —— An Improved Image Interpolation Based on Wavelet

TIAN Yan^{1,2)}, TIAN Jin-wen²⁾, LIU Jian^{1,2)}, ZHANG Ji-xian³⁾, LIN Zong-jian³⁾

¹⁾(*Electronic and Information Engineering Department, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

²⁾(*Key Laboratory of Education Ministry for Image Processing and Intelligent Control, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074*)

³⁾(*Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100039*)

Abstract Due to some inner and outer reasons of image system, images which obtained by some sensors will be degraded unavoidably. As an effective technique to enhance the resolution and quality of images, Super-resolution technique is becoming a hot topic, which plays an important role in numerous applications of image processing and communication such as HDTV, target recognition, medical image processing and so on. The main purpose of this paper is to present a feasible super resolution to improve the resolution and quality of images. A lot of approaches have been developed including interpolative method, which is a most simple and direct method of super resolution. Some classical interpolative methods will be introduced and analysed briefly in the first part of this paper, and then wavelet transform is shortly described in order to provide the convenience for obtaining a new interpolative scheme. Considering the powerful advantages of Bézier surface method, which is very precision and can be implemented fast, the novel method combined wavelet transform with Bézier surface is described in this paper. This method has two merits at least, first it overcomes the shortcoming of traditional methods which are usually cause the degrading for image details, at the same time, this method is not complex due to the fast implementation of the Bézier surface interpolation. The experimental results show the computational feasibility of this method.

Keywords Computer image processing, Super resolution, Image interpolation, Wavelet transform, Bézier surface

基金项目:高等学校博士点基金项目(20010487030)

收稿日期:2002-01-31; 改回日期:2003-07-17

0 引 言

所谓图象超分辨率技术就是在不改变图象探测系统的前提下,利用已有的低分辨率图象采用某种方法使其获得较高的分辨率的图象观测.由于成像系统内在和外条件的限制,使得获取的影像(航空影像或卫星影像等)常常不能满足实际的需求.从成像系统方面进行改进可能将付出昂贵的代价或者面临很难克服的技术困难,因此从软件方面着手来提高影像分辨率有着极大的现实意义和应用价值.对此问题,人们已从不同的角度发展了许多的方法^[1],但由于每种方法总是在一定的假设下进行的,因此其有效性和普适性大受限制.插值方法较之与其他方法是最为简单的一种,但这种方法的弱点(误差大)与优点(算法简洁)几乎是难分上下,于是如何提高插值的精度成为考虑问题的首选.

目前,经常用到的插值方法包括双线性插值、B 样条插值和 SINC 函数等^[2].双线性插值和 B 样条插值由于只利用了邻近像元的灰度值,因此其最为显著的优点是计算量小,而其不足之处在于这类方法总是假定灰度曲面是连续的(显然这种要求是极不自然的),因此造成插值误差较大,插值后的图象常常会出现方块效应或细节退化等问题;对于空域无限的 SINC 函数却具有计算量大,而截断又会带来不可忽视的误差问题.文献^[3]提出以分形几何为基础的内插方法,其思想是利用图象像素灰度值之间存在的统计自相似性对图象进行插值,其不失为一种较为理想的方法,但这种方法至少有两方面不能令人满意:其一是,利用传统的分形方法精确地求出其自相似变换往往是十分困难的;其二是,与前面的方法相比其计算量较大.基于保证插值结果的精确性和算法简明性的考虑,本文提出了一种 Bézier 曲面插值与小波变换相结合的图象插值方法用于改善图象的分辨率.

小波变换是一种新的可达到时(空)域或频率域局部化的时(空)-频域分析方法,具有多分辨率分析功能和逐步细分等性质,是信号处理的一种强有力的新手段,同时,小波变换的多尺度分解特性更加符合人类的视觉机制.小波的这些优良特性奠定了它在图象信息处理中无可争议的地位.文献^[4]利用小波作为插值基函数给出了在信息融合及累积方面的应用,文献^[5]提出了一种小波分解与分形内插结合

的方法并讨论了在复杂地形数据压缩方面的应用.

1 Bézier 曲面的插值方法

给定空间中的 $(n+1) \times (m+1)$ 个点 $P_{i,j}(i=0, 1, \dots, n; j=0, 1, \dots, m)$, 称下式定义的参数曲面为 $n \times m$ 次的 Bézier 曲面^[6]:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} B_i^n(u) B_j^m(v) \quad (u, v \in [0, 1]) \quad (1)$$

这里 $B_i^n(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i} (i=0, 1, \dots, n)$, $P_{i,j}$ 是 $P(u, v)$ 的控制顶点,记 $\{P_{i,j}\}$ 为由数据点 $P_{i,0}, P_{i,1}, \dots, P_{i,m} (i=0, 1, \dots, n)$ 和 $P_{0,j}, P_{1,j}, \dots, P_{n,j} (j=0, 1, \dots, m)$ 构成的 $P(u, v)$ 的控制网格.由定义可看出,控制网格 $\{P_{i,j}\}$ 是 $P(u, v)$ 的大致轮廓,而 $P(u, v)$ 是对 $\{P_{i,j}\}$ 的逼近.

考虑数字图象的 Bézier 插值曲面的构造.假设 $I(x, y)$ 是一 $m \times n$ 的数字图象, $R_{i,j} (i=1, \dots, m; j=1, \dots, n)$ 是 $I(x, y)$ 中的第 i 行第 j 列像素的灰度值, Bézier 插值曲面 $F(u, v) (0 \leq u \leq m, 0 \leq v \leq n)$ 要求 $F(i, j) = R_{i,j}$, 且点点是 C^1 连续的.采用文献^[7]中的方法,首先将矩阵 $R_1 = \{R_{i,j}; i=1, \dots, m; j=1, \dots, n\}$ 扩充为 $R_2 = \{R_{i,j}; i=1, \dots, m+1; j=1, \dots, n+1\}$, 其插值方法为

$$R_{m+1,j} = 2R_{m,j} - R_{m-1,j} \quad (j=1, \dots, n)$$

$$R_{i,n+1} = 2R_{i,n} - R_{i,n-1} \quad (i=1, \dots, m)$$

$$R_{m+1,n+1} = R_{m+1,n} + R_{m,n+1} - R_{m,n}$$

采用类似的方法将 R_2 扩充为 $R_3 = \{R_{i,j}; i=1, \dots, m+2; j=1, \dots, n+2\}$.在此基础上,构造 $m \times n$ 个 Bézier 曲面如下

$$S_{i,j}(x, y) = \sum_{\alpha=0}^3 \sum_{\beta=0}^3 Q_{\alpha,\beta}^{i,j} B_{\alpha}^3(x) B_{\beta}^3(y) \quad (x, y \in [0, 1]) \quad (2)$$

这里

$$Q_{3\alpha,3\beta}^{i,j} = R_{i+\alpha,j+\beta} (\alpha, \beta = 0, 1) \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (3)$$

$$Q_{1,3\beta}^{i,j} = R_{i,j+\beta} + (R_{i+1,j+\beta} - R_{i-1,j+\beta})/6$$

$$Q_{2,3\beta}^{i,j} = R_{i+1,j+\beta} + (R_{i,j+\beta} - R_{i+2,j+\beta})/6 \quad (4)$$

$$Q_{3\alpha,1}^{i,j} = R_{i+\alpha,j} + (R_{i+\alpha,j+1} - R_{i+\alpha,j-1})/6$$

$$Q_{3\alpha,2}^{i,j} = R_{i+\alpha,j+1} + (R_{i+\alpha,j} - R_{i+\alpha,j+2})/6$$

其中, $(\alpha, \beta = 0, 1)$

$$Q_{1,1\beta}^{i,j} = Q_{0,1\beta}^{i,j} + (Q_{2,1\beta}^{i,j} - Q_{0,1\beta}^{i,j})/6$$

$$Q_{2,1\beta}^{i,j} = Q_{3,1\beta}^{i,j} + (Q_{0,1\beta}^{i,j} - Q_{3,1\beta}^{i,j})/6 \quad (5)$$

其中, $(\beta = 1, 2)$

因此, $Q_{\alpha,\beta}^{i,j}$ 便是 16 个点 $\{R_{i+\alpha,j+\beta}, -1 \leq x, y \leq 2\}$ 的线

性组合. 这样, 一个整体的 Bézier 曲面可表示为

$$F(u, v) = S_{[u][v]}(u - [u], v - [v]) \quad (6)$$

其中, $[u]$ 为取整操作.

为实现上式的快速算法, 将式(2)改写为

$$S_{i,j}(x, y) = A \times B \quad (7)$$

其中, $A = [a_0, a_1, \dots, a_{15}]$; $B = [b_0, b_1, \dots, b_{15}]^T$, $b_k (k=0, 1, \dots, 15)$ 为 Bézier 曲面的控制点. 而 B 中的元素 $b_0 = Q_{0,0}^{i,j}, b_1 = Q_{0,1}^{i,j}, \dots, b_{15} = Q_{3,3}^{i,j}; a_l (l=0, 1, \dots, 15)$ 为控制点的系数.

记 $P = [p_0, p_1, \dots, p_{15}]^T$, 而 p_k 分别为 $p_0 = R_{i-1, j-1}, p_1 = R_{i-1, j}, \dots, p_{15} = R_{i+2, j+2}, C_{l,k}$ 为 b_l 关于 p_k 的系数. 则式(4)~式(6)的矩阵形式为 $B = C \times P$, 这里 $C = \begin{bmatrix} C_{0,0} & \dots & C_{0,15} \\ \dots & \dots & \dots \\ C_{15,0} & \dots & C_{15,15} \end{bmatrix}$, 综上知

$$S_{i,j}(x, y) = A \times B = A \times C \times P = M \times P \quad (8)$$

其中, $M = [m_0, m_1, \dots, m_{15}]$, 此算法中的主要工作集中在系数 $m_i (i=0, \dots, 15)$ 的计算上, 为简化计算, 文献[7]采用像素子分法给出了一种估算方法, 该方法大大提高了计算速度, 同时造成的误差非常小.

2 小波 Bézier 曲面插值方法

2.1 小波变换原理

Mallat 将计算机视觉领域的多尺度分析思想引入到小波分析中, 从多分辨率分析的角度构造了小波分析的框架, 基于此框架提出了 Mallat 多分辨率的金字塔算法. 给定小波函数 $\psi(x)$ 和尺度函数 $\varphi(x)$ 及其相应的小波空间 $\{W_j\}$ 和多尺度分析空间 $\{V_j\}$, 小波函数和尺度函数的伸缩和平移 $\varphi_{j,n}(x) = 2^{-j/2}\varphi(2^{-j}x - n)$ 和 $\psi_{j,n}(x) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}x - n)$ 分别是 V_j 和 W_j 的标准正交基, 二维尺度空间 \tilde{V}_j 定义为 $\tilde{V}_j = V_j \otimes V_j$, 易知

$$\tilde{V}_j = (V_j \otimes V_j) \oplus (W_j \otimes V_j) \oplus (V_j \otimes W_j) \oplus (W_j \otimes W_j)$$

对二维尺度空间 $L^2(\mathbf{R}^2)$ 的函数 $f(x, y) \in \tilde{V}_0$, 它的二维正交小波展开式为

$$f(x, y) = \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{m,n} [\alpha_{m,n}^j \psi_{j,m} \varphi_{j,n}(y) + \beta_{m,n}^j \varphi_{j,m} \psi_{j,n}(x) + \gamma_{m,n}^j \psi_{j,m}(x) \varphi_{j,n}(y)] + \sum_{m,n} s_{m,n}^j \varphi_{j,m}(x) \varphi_{j,n}(y) \quad (9)$$

这里

$$\alpha_{m,n}^j = \iint_{\mathbf{R}^2} f(x, y) \overline{\psi_{j,m}(x) \varphi_{j,n}(y)} dx dy$$

$$\beta_{m,n}^j = \iint_{\mathbf{R}^2} f(x, y) \overline{\varphi_{j,m}(x) \psi_{j,n}(y)} dx dy$$

$$\gamma_{m,n}^j = \iint_{\mathbf{R}^2} f(x, y) \overline{\psi_{j,m}(x) \varphi_{j,n}(y)} dx dy$$

$$s_{m,n}^j = \iint_{\mathbf{R}^2} f(x, y) \overline{\varphi_{j,m}(x) \varphi_{j,n}(y)} dx dy$$

假定 h_0 和 h_1 分别为小波的低通和高通滤波器, $s_{i,l}^0$ 为 0 尺度空间的剩余尺度系数序列, 二维小波的快速分解和重构公式分别表为如下

$$\alpha_{i,l}^j = \sum_{k,m} h_1(k - 2i) h_0(m - 2l) s_{k,m}^{j-1} \quad (10)$$

$$\beta_{i,l}^j = \sum_{k,m} h_0(k - 2i) h_1(m - 2l) s_{k,m}^{j-1} \quad (11)$$

$$\gamma_{i,l}^j = \sum_{k,m} h_1(k - 2i) h_1(m - 2l) s_{k,m}^{j-1} \quad (12)$$

$$s_{i,l}^j = \sum_{k,m} h_0(k - 2i) h_0(m - 2l) s_{k,m}^{j-1} \quad (13)$$

$$s_{k,m}^{j-1} = \sum_{i,l} s_{i,l}^j h_0(k - 2i) h_0(m - 2l) + \sum_{i,l} \alpha_{i,l}^j h_1(k - 2i) h_0(m - 2l) + \sum_{i,l} \beta_{i,l}^j h_0(k - 2i) h_1(m - 2l) + \sum_{i,l} \gamma_{i,l}^j h_1(k - 2i) h_1(m - 2l) \quad (14)$$

2.2 基于 Bézier 曲面插值的小波方法

一幅图象经过一次小波分解后, 被分成了 4 个部分, 如图 1 所示, $MV1$ 为垂直方向上的高频细节, $MD1$ 为对角线方向上的高频细节, $MH1$ 为水平方向上的细节信号, 式(10)~式(12)中的 $\alpha_{i,l}^j, \beta_{i,l}^j, \gamma_{i,l}^j$ 分别为对应于 MV_j, MD_j, MH_j 上的小波展开系数, $s_{i,l}^j$ 为分解后的低频分量 ML_j 的尺度展开系数. 粗略来讲, 小波分解的过程就是将信号不断“剥落”的过程, 随着逼近越来越粗, 丢掉的信息越来越多, 而被抛弃掉的信息可用小波的线性组合来表示. 重建的过程就是将丢掉的细节加起来作为原始信号的近似表示, 只要相同的步骤重复足够多, 这种近似表示就可以达到所需的精确程度.

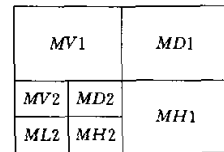


图 1 小波分解示意图

在小波分解的过程中, 不同的分辨率下相同方向上的细节子图具有相似的特性, 在图 1 中, $MD1$ 和 $MD2, MV1$ 和 $MV2, MH1$ 和 $MH2$ 都分别是相

似的.小波插值的思想是:以低分辨率的子图通过某种相似变换近似为高分辨率的子图,然后通过逆变换便可得到较之原图象更高分辨率的图象.

利用 Bézier 曲面插值的小波算法描述如下:

(1) 按式(9)将原图象 $f(x,y)$ 按小波分解为 ML, MV, MD 和 MH 4 个细节子图,形式上记为

$$Tf(x,y) = (ML, MV, MD, MH)$$

(2) 将 MV, MD 和 MH 采用 Bézier 曲面插值算法(记作算子 B)分别进行插值,得到

$$MV' = B(MV), MD' = B(MD), MH' = B(MH)$$

(3) 令原图象为低通部分 $f(x,y) = ML'$;

(4) 对 ML', MV', MD' 和 MH' 4 个子图做小波逆变换,变换后的结果即为最终的插值结果,



图 2 双正交插值



图 3 三次 B 样条插值



图 4 本文方法

除视觉上的差异外,另一个重要的衡量指标是信噪比(SNR),它是一种与人眼视觉比较接近的客观评价.在上述示例中,双线性插值、三次 B-样条插值与本文方法的信噪比分别是:27.27dB、27.503dB、31.691dB.与第 1 种方法相比,本文方法提高了约 4.4dB.

4 结 论

小波分解与 Bézier 曲面插值相结合的图象插值方法较好地保持了图象中丰富的高频成分,插值后的图象主观上具有很好的视觉效果,客观上具有较高的信噪比,并且图象中细节丰富,无明显的畸变,克服了传统的插值方法致使图象高频部分损失、感兴趣的细节被模糊的缺点,改善了图象的分辨率.实验结果表明这是一种行之有效的办法.

参 考 文 献

- 1 Kundur D, Hatzinialtos D. Blind image deconvolution[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1996,13(5):43~64.
- 2 Marks R J. Introduction to shannon sampling and interpolation theory[M]. New York: Springer-Verlag, 1991.
- 3 Yokoya N, Yamamoto, K. Fractal-based analysis and

$$f'(x,y) = T^{-1}(ML', MV', MD', MH')$$

3 实验结果

以 Lena 图象的一部分为例来说明本文中算法的优点.在算法中,选择图象处理中广为使用的 Daubechies 正交 9-7 小波.

观察图 2~图 4 Lena 图象中帽子上的纹理部分,可以看到,基于 Bézier 插值曲面的小波方法与双线性插值及三次 B-样条插值相比,有非常好的视觉效果.将图象放大会更清楚地看到,前两种方法均带有明显的方格效应,而图 4 中的方法较好地保持了图象的边缘细节.

interpolation of 3D natural surface shapes and their application to terrain modeling Computer Vision [J]. Graphics and Image Processing, 1989,46(1):284~302.

- 4 郝鹏威,朱重光.基于小波的图象插值方法[J].遥感学报,1998,2(2):98~102.
- 5 田金文,苏康,柳健等.基于小波分解与分形内插相结合的地形数据压缩方法[J].宇航学报,1998,19(2):1~7.
- 6 唐荣锡,汪嘉业,彭群生.计算机图形学教程[M].北京:科学出版社,1994.
- 7 孙庆杰,张晓鹏,吴恩华.一种基于 Bézier 插值曲面的图象放大方法[J].软件学报,1999,10(2):570~574.



田 岩 1970 年生,博士(后),副教授,中国电子学会会员,2000 年于武汉大学获理学博士学位.主要从事数字图象处理、模式识别、分形及 PDE 理论在图象分析中的应用等领域的研究工作.



田金文 1961 年生,博士,教授,博士生导师,中国电子学会高级会员,1998 年获华中科技大学工学博士学位.主要研究领域包括图象处理、小波理论、图象压缩、计算机视觉等.



柳 健 1939年生,教授,博士生导师,曾在法国高等通信学校(ENST)从事数字图象处理和机器视觉研究,目前主要研究方向是数字图象处理、计算机视觉、遥感图象分析及多媒体信息处理等。

林宗坚 1943年生,博士,教授,博士生导师,中国科学院测绘研究院院长,国家测绘局科技委员会委员,1988年于武汉测绘学院工学获博士学位,主要从事摄影测量与遥感、图形图象学和地理信息系统采集等方面的研究工作。

张继贤 1965年生,博士(后),教授,博士生导师,中国科学院测绘研究院副院长,1994年于武汉测绘科技大学工学获博士学位,研究领域为摄影测量与遥感、模式识别与人工智能及地理信息可视化。

更 正

(一) 2003年第11期第1271页,李书达简介有误,现更正如下:

李书达 1980年生,2002年获天津大学计算机工程学士学位,研究方向为计算机图象处理与识别、人工智能及计算机图形学等。

(二) 2003年特刊中目录及第59页中的作者“崔红涛”更正为“崔江涛”;第260页作者徐臻、第692页作者张晔、第770页作者许端清、第842页作者余轮等人的照片有误,现更正如下:



徐 臻



张 晔



许端清



余 轮