

## 任意分辨率小波光顺的光顺精度分析

纪小刚<sup>1,2\*</sup>, 杨艳<sup>1</sup>, 薛杰<sup>1</sup>

(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(\* 通信作者电子邮箱 bhearts@126.com)

**摘要:**在多分辨光顺算法研究及软件编制的基础上,针对多分辨光顺的精度控制问题,分析研究了光顺尺度对光顺精度的具体影响。该方法以半圆曲线作为标定对象,揭示了光顺尺度的选择与光顺精度之间的内在联系。实验结果表明,光顺尺度越小,光顺误差越大;多分辨光顺能够以较少的点表示原始曲线,有较强的数据压缩能力;曲线曲率较大的地方,更容易产生光顺误差。

**关键词:**逆向工程;多分辨率分析;光顺;小波;计算机图形学

**中图分类号:** TP391.72 **文献标志码:** A

### Precision analysis of arbitrary resolution wavelet fairing

Ji Xiaogang<sup>1,2\*</sup>, YANG Yan<sup>1</sup>, XUE Jie<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** For precision control problem of multi-resolution fairing, specific impact of fairing precision caused by fairing scale was studied on the basis of the researches of multi-resolution fairing algorithm and software. Taking semicircular curve as a calibration object, this method revealed the internal relations between selection of fairing scale and fairing precision. The experimental results show that the smaller the fairing scale is, the larger the fairing error is. Secondly, multi-resolution fairing can reflect original curves with less control vertexes and own a strong ability of data compression. Finally, fairing error would be larger at the place of curves with larger curvature.

**Key words:** reverse engineering; Multi-Resolution Analysis (MRA); fairing; wavelet; computer graphics

## 0 引言

由于实物原型的制造误差以及测量技术的限制,在原型的数字化过程中将不可避免地带入各种误差和噪声,从而影响重构曲线曲面的光顺性。曲线曲面的光顺操作是改善其重构质量的直接、有效的方法。光顺操作一直是逆向工程中的关键部分,特别是对于像压缩机转子、增压器叶轮、发动机叶片等这类必须满足空气动力学性能要求的功能表面以及像汽车、家用电器外型等包含有艺术特色的观赏表面尤为如此。多分辨光顺技术为这一问题的解决提出了全新的思路。

多分辨分析(Multi-Resolution Analysis, MRA)是一种能够刻画数据内部相关性结构的新的时频分析数学方法,同时具有时域和频域的局部性。随着该技术的日渐成熟,多分辨分析开始被应用于计算机图形学。1994年,Quak等<sup>[1]</sup>开创性地针对具有 $2^j+3$ ( $j$ 为二进尺度)个控制顶点的特定曲线,首次提出了闭区间上B样条小波的分解与重构算法。针对多分辨光顺这一新领域,国内外许多学者对此展开了研究。Ceruti等<sup>[2]</sup>基于二进小波光顺算法,构造了快速的多细节层次(Levels of Detail, LOD)滤波器组,实现了A级曲线的小波光顺。潘洋宇<sup>[3]</sup>在研究经典小波变换的基础之上,提出了基于提升格式的第二代小波光顺技术,该方法通过分割、预测、

更新三个步骤组成了一个提升步,并以常用的三次准均匀B样条曲线为例,推导了准均匀B样条曲线的二代小波表示方法。Abdul-Rahman等<sup>[4]</sup>基于提升小波框架,将其推广到自由曲面的表示,并实现了不规则复杂自由曲面的过滤与光顺。

上述研究虽然实现了曲线曲面的小波光顺,但由于小波构造过程中所使用的尺度函数为B样条基函数,且其伸缩平移系是二进的,即不同尺度函数之间以二倍进行缩放,这虽然可以保证曲线曲面能够在不同尺度下进行连续的小波分解,但是却也存在一个致命的缺陷,那就是对控制顶点的个数有严格的要求,即必须保证曲线曲面的控制顶点数量为 $2^j+(r-1)$ ( $r$ 为阶数),但实际上曲线曲面的控制顶点数一般是任意的,针对这种一般情况,上述的一整套算法将不再适用,这在很大程度上制约了小波技术在该领域的应用和推广。这一问题是与生俱来的,二进小波构造在降低数学推导难度的同时,也对所处理的控制顶点数量提出了限制。一般把这种光顺算法称为二进小波光顺。

为了实现对具有任意个控制顶点数的曲线曲面的小波光顺,潘洋宇等<sup>[5]</sup>通过插入节点从而增加控制点个数的方法,运用第二代小波变换,研究了任意控制点B样条曲线小波光顺技术。Wang等<sup>[6]</sup>根据给定的权重公式,通过对节点矢量的去除,重构了正交非均匀样条小波,从而实现了一般非均匀

收稿日期:2013-11-13;修回日期:2013-12-10。 基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51105175);国家自然科学基金资助项目(51275210);教育部中央高校基本科研业务费专项(JUSRP21006)。

作者简介:纪小刚(1977-),男,江苏常州人,副教授,博士,主要研究方向:逆向工程、快速原型、先进制造; 杨艳(1988-),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要研究方向:逆向工程; 薛杰(1991-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:逆向工程。

有理 B 样条 (Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS) 曲线曲面的小波光滑与精简。Pan 等<sup>[7]</sup>、Sadeghi 等<sup>[8]</sup>通过给定的节点矢量,基于离散范数,运用最小二乘拟合算法,构造了双正交非均匀 B 样条小波,实现了任意自由曲线的多分辨光滑。该算法由于避免了内积运算,计算效率得到了很大的提高。但是上述算法都存在近似计算,无法对曲线曲面进行精确重构。一般把这种对控制顶点数量没有特殊要求的光顺算法称为任意分辨率小波光滑。

针对上述问题,在文献[9-12]中,作者已经从小波的定义出发,通过直接的数学推导,实现了对具有任意控制顶点数的曲线曲面的小波光滑。但是对于小波的光顺结果,特别是对光滑精度的影响,仍然有必要作进一步的讨论。

## 1 多分辨光滑基础

### 1.1 多分辨光滑原理

本文以准均匀三次 B 样条曲线为例进行研究,此时  $r = 4$ ,采用 Cox-de Boor 递推公式,B 样条可表示为  $\varphi(t) = N_4(t)$ 。对于尺度  $m$ ,对应的节点矢量可表示为  $[0, 0, 0, 0, 1/m, 2/m, \dots, 1 - 1/m, 1, 1, 1, 1]$ ,节点矢量对应的一组 B 样条基函数可由其伸缩平移系表示,即  $\varphi(mt - k) = N_4(mt - k)$ ,其中  $k$  为平移量。记  $\varphi_k^m = \varphi(mt - k)$ ,则由  $\Phi_m = (\varphi_0^m, \varphi_1^m, \dots, \varphi_{m+2}^m)$  可张成一个线性空间  $V_m$ ,即  $V_m = \text{span}\{\varphi_k^m\}$ 。研究发现,  $V_m$  中共有  $m+3$  条 B 样条,因此可用  $m+3$  个控制顶点  $C_m = (c_0^m, c_1^m, \dots, c_{m+2}^m)^T$  来唯一确定一条曲线。

同理,对于光滑后的尺度  $n$ ,此时  $n < m$ ,同样存在一组 B 样条基函数  $\varphi_l^n = \varphi(nt - l)$ ,  $l$  为平移量,并可由  $\Phi_n = (\varphi_0^n, \varphi_1^n, \dots, \varphi_{n+2}^n)$  也张成一个线性空间  $V_n$ ,表示为  $V_n = \text{span}\{\varphi_l^n\}$ 。研究发现,  $V_n$  中共有  $n+3$  条 B 样条,因此也可用  $n+3$  个控制顶点  $C_n = (c_0^n, c_1^n, \dots, c_{n+2}^n)^T$  来唯一确定一条曲线。

设  $f_m$  为基于  $V_m$  的一条曲线,  $f_n$  为基于  $V_n$  的一条曲线。小波分析作为低通滤波器组的构造工具,其对曲线光滑的实质,就是要通过所构造的滤波器组,过滤掉  $f_m$  中的细节  $g_n$ ,从而获得更为光滑的曲线  $f_n$ ,其表达式为:

$$f_m = f_n + g_n \quad (1)$$

其塔式结构如图 1 所示。

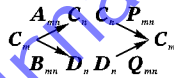


图 1 多分辨小波光滑塔式结构

细节曲线  $g_n$  可由  $m-n$  个细节顶点  $D_n = (d_0^n, d_1^n, \dots, d_{m-n-1}^n)^T$  确定,与之相对应的基函数,即为本文要构造的小波,可表示为  $\Psi_n = (\psi_0^n, \psi_1^n, \dots, \psi_{m-n-1}^n)$ ,其同样可以张成一个线性空间  $W_n$ ,一般称  $W_n$  为  $V_m$  关于  $V_n$  的小波子空间。为了使小波能够尽快衰减为零,在进行小波构造时,要求  $V_n \perp W_n$ ,从而有公式:

$$V_m = V_n \oplus W_n \quad (2)$$

式(2)中,  $\oplus$  表示直和。由于 B 样条基函数本身不具有平移正交性,因此,在小波构造时,只能确保在相同尺度  $n$  下  $\Phi_n$ 、 $\Psi_n$  之间的正交性,即:

$$\langle \varphi_i^n, \psi_j^n \rangle = 0; \quad i \in [0, n+2], j \in [0, m-n-1] \quad (3)$$

### 1.2 多分辨光滑算法

根据式(2)及 1.1 节描述,B 样条曲线的多分辨光滑过程

可表示为:

$$\sum_{k=0}^{m+2} c_k^m \varphi_k^m = \sum_{i=0}^{n+2} c_i^n \varphi_i^n + \sum_{l=0}^{m-n-1} d_l^n \psi_l^n \quad (4)$$

根据文献[9],对式(4)两边分别用  $\varphi_i^n (i \in [0, n+2])$  做内积,则:

$$C_n = [\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]^{-1} [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] C_m \quad (5)$$

取:

$$A_{mn} = [\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]^{-1} [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] \quad (6)$$

则有曲线分解公式:

$$C_n = A_{mn} C_m \quad (7)$$

$A_{mn}$  为低频分解矩阵,它是  $(n+3) \times (m+3)$  阶的。其中  $[\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle]$  表示内积  $\langle \varphi_k^n, \varphi_l^m \rangle$  构成的矩阵,它是  $(n+3) \times (m+3)$  阶的;  $[\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]$  表示内积  $\langle \varphi_i^n, \varphi_j^n \rangle$  构成的矩阵,它是  $(n+3) \times (n+3)$  阶的。

同样,对式(4)两边分别用  $\psi_j^n (j \in [0, m-n-1])$  做内积,则:

$$D_n = [\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]^{-1} [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] C_m = B_{mn} C_m \quad (8)$$

取:

$$B_{mn} = [\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]^{-1} [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] \quad (9)$$

则有细节分解公式:

$$D_n = B_{mn} C_m \quad (10)$$

$B_{mn}$  为细节分解矩阵,它是  $(m-n) \times (m+3)$  阶的。其中  $[\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]$  表示内积  $\langle \psi_i^n, \psi_j^n \rangle$  构成的矩阵,它是  $(m-n) \times (m-n)$  阶的;  $[\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle]$  表示内积  $\langle \psi_i^n, \varphi_l^m \rangle$  构成的矩阵,它是  $(m-n) \times (m+3)$  阶的。

将式(4)左右对调并分别用  $\varphi_i^n (i \in [0, n+2])$  和  $\psi_j^n (j \in [0, m-n-1])$  进行内积计算,得:

$$[\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle] C_n = [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] C_m \quad (11)$$

$$[\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle] D_n = [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] C_m \quad (12)$$

将两部分合并成一个  $(m+3) \times (m+3)$  的方形矩阵,

$$\begin{bmatrix} [\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]^{-1} [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] \\ [\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]^{-1} [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] \end{bmatrix} C_m = \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix}, \text{ 所以 } C_m = \begin{bmatrix} [\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]^{-1} [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] \\ [\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]^{-1} [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} \text{ 取:}$$

$$[P_{mn} | Q_{mn}] = \begin{bmatrix} [\langle \Phi_n | \Phi_n \rangle]^{-1} [\langle \Phi_n | \Phi_m \rangle] \\ [\langle \Psi_n | \Psi_n \rangle]^{-1} [\langle \Psi_n | \Phi_m \rangle] \end{bmatrix}^{-1} \quad (13)$$

则:

$$C_m = [P_{mn} | Q_{mn}] \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

式(14)即为多分辨光滑的重构方程。其中,  $[P_{mn} | Q_{mn}]$  为重构矩阵,且  $P_{mn}$  为  $(m+3) \times (n+3)$  阶矩阵,  $Q_{mn}$  为  $(m+3) \times (m-n)$  阶矩阵。

## 2 基于简单曲线的光顺精度分析

在上述算法研究的基础上,编制了相应的多分辨光滑软件,实现了具有任意控制顶点曲线曲面的多分辨光滑。

为了实现对多分辨光滑精度的控制,本文首先对多分辨光滑的光顺精度展开详细研究。

为了说明问题,本文首先选定一条简单的半圆曲线,并对其多次光滑,以分析和标定光滑过程对曲线精度的具体影响。原始半圆曲线半径为  $R = 25 \text{ mm}$ ,由 100 个型值点确定,因此对应的控制顶点数为 102。应用第 1 章的算法,将曲线分解成由 82 个控制顶点确定的曲线,对应的型值点数为 80。分别绘制相应的曲线,并将两条曲线精度对比,结果

如图2所示。



图2 从100个型值点向80个型值点光顺的精度分析

分析图2可以发现,虽然控制顶点数减少了20%,但是两条曲线之间的最大误差非常小,为0.0004 mm,接近于0 mm,光顺过程对曲线精度几乎没有影响。

同理,用光顺软件将原始曲线从102个控制顶点光顺到62个控制顶点,则光顺曲线有60个型值点,分别绘制曲线并进行精度对比,结果如图3所示。



图3 从100个型值点向60个型值点光顺的精度分析

分析发现,虽然控制顶点数减少了40%,但是两条曲线之间的最大误差也仅为0.001 mm,这表明,光顺后,光顺曲线与原始曲线之间的误差也几乎为0 mm,光顺结果能够满足实际工程要求。

图4为原始曲线向42个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有40个型值点。精度分析表明,虽然控制顶点数减少了60%,但是此时的最大误差也仅为0.0013 mm,光顺结果能够满足实际工程要求。

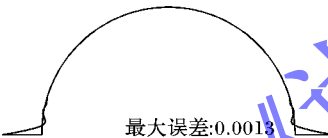


图4 从100个型值点向40个型值点光顺的精度分析

图5为原始曲线向22个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有20个型值点。精度分析表明,虽然控制顶点数的减少已经达到了80%,但是最大误差仍然仅有0.009 mm,光顺结果能够满足实际工程要求。



图5 从100个型值点向20个型值点光顺的精度分析

图6为原始曲线向12个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有10个型值点。精度分析表明,虽然控制顶点数的减少已经达到了90%,但是最大误差仍然仅有0.0033 mm,光顺结果能够满足实际工程要求。

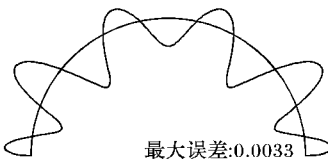


图6 从100个型值点向10个型值点光顺的精度分析

图7为原始曲线向10个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有8个型值点。精度分析表明,随着过滤掉的细节越来越多,控制顶点数越来越少,最大误差有所增加,达到了

0.0101 mm。

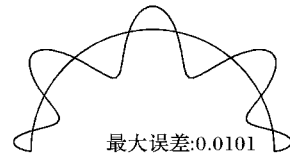


图7 从100个型值点向8个型值点光顺的精度分析

图8为原始曲线向8个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有6个型值点。精度分析表明,随着光顺程度的增加,最大误差也进一步变大,达到了0.0548 mm。

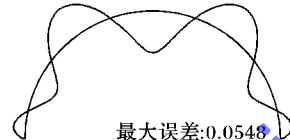


图8 从100个型值点向6个型值点光顺的精度分析

图9为原始曲线向7个控制顶点进行光顺的结果,此时曲线有5个型值点。精度分析表明,在控制顶点数减少了95%的情况下,最大误差已经增加到了0.0565 mm。

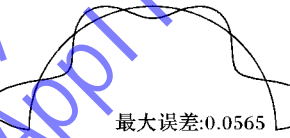


图9 从100个型值点向5个型值点光顺的精度分析

分析图2~9,还可以得出如下结论:

1) 随着尺度的变化,光顺后的控制顶点数越来越少,但是光顺精度越来越低,如图10所示。

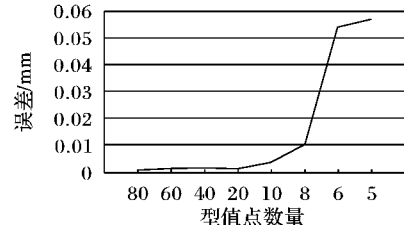


图10 不同型值点数量对多分辨光顺精度的影响

2) 从图2~7,虽然已经从102个控制顶点光顺到了10个控制顶点,但是光顺精度仍然控制在0.001 mm内,这说明,由于多分辨光顺通过滤波器组过滤掉不必要的细节后,最大限度地提取了曲线的本质特性,在控制顶点极少的情况下,仍然能够反映曲线的本质。这是能量法等传统光顺算法无法比拟的。

3) 从图2~7,虽然控制顶点数从102个减少到了10个,达到了90.2%,但是仍然能够较好地表达原始曲线,从另一个角度来看,多分辨光顺算法还具有较好的数据压缩能力,这对于通过激光扫描仪等设备获取的海量点云数据,有更强的现实意义。

### 3 多分辨光顺曲线精度分析实例

现在以螺杆压缩机阴转子型线为例,分析多分辨光顺对其光顺精度的影响。

螺杆压缩机阴转子中单个拟合齿的型线如图11所示。



图11 螺杆压缩机阴转子型线

原始曲线为由107个控制顶点确定的曲线,对应的型值



点数为105。原始曲线沿曲线方向的曲率变化如图12中实线所示,最大曲率为 $0.5251\text{ mm}^{-1}$ 。

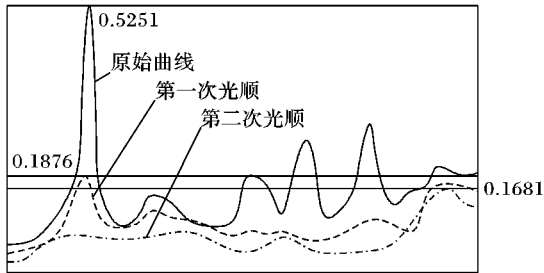


图12 三条曲线对应的曲率分析

光顺后,曲线具有72个控制顶点,有70个型值点,所确定曲线沿曲线方向的曲率分布如图12中虚线所示,最大曲率为 $0.1876\text{ mm}^{-1}$ 。将光顺曲线与原始曲线进行精度对比,分析结果如图13所示,分析发现,光顺产生的最大误差为 $0.02\text{ mm}$ ,这种精度已经能够满足工程的实际使用要求。进一步分析图12,在从原始曲线向具有70个型值点的曲线光顺的过程中,由于过滤掉了大量的细节部分(如图14所示),即噪声,曲线变得更为平滑,最大曲率从 $0.5251\text{ mm}^{-1}$ 降低到 $0.1876\text{ mm}^{-1}$ ,曲线取得了良好的光顺效果。进一步对比图12和图13可以发现,原始曲线的曲率变化与图13中精度的变化是一一对应的,曲率较大的地方,产生的光顺误差较大。

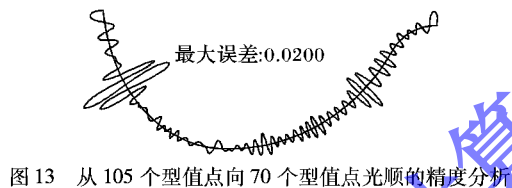


图13 从105个型值点向70个型值点光顺的精度分析

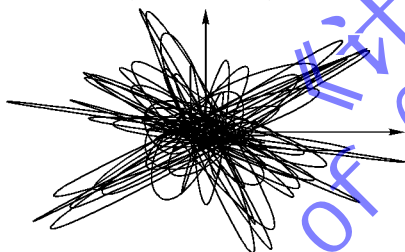


图14 从105个型值点向70个型值点光顺时过滤掉的细节

再次将原始曲线光顺为由42个控制顶点确定的曲线,对应的型值点个数为40,所确定曲线沿曲线方向的曲率分布如图12中双点划线所示。将光顺曲线与原始曲线进行精度对比,结果如图15所示。分析发现,通过过滤掉更多的细节(如图16所示),控制顶点数进一步减少,曲线变得更为平滑,此时最大曲率减少到了 $0.1681\text{ mm}^{-1}$ ,但是误差却有所增加,最大误差从 $0.02\text{ mm}$ 增加到了 $0.0321\text{ mm}$ 。进一步对比图12和图15,同样可以看出,在曲率变化较大的地方,光顺误差较大,反之亦然。

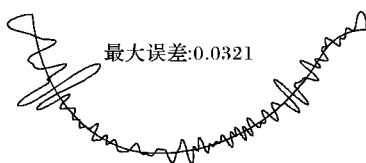


图15 从105个型值点向40个型值点光顺的精度分析

本实例表明,在采用多分辨分析技术所构造的滤波器组过滤掉不必要的噪声后,曲线曲率变小,曲线更为光顺,并能够根据给定的尺度 $n$ 获得要求的光顺精度。需要进一步说明

的是,假设给定了光顺的允差 $\varepsilon = 0.02\text{ mm}$ ,则第一次光顺能够满足精度要求,而第二次光顺无法满足精度要求。因此,在实际应用中,对曲线光顺精度的控制就显得尤为重要。作者将在后续的研究中对其展开研究。

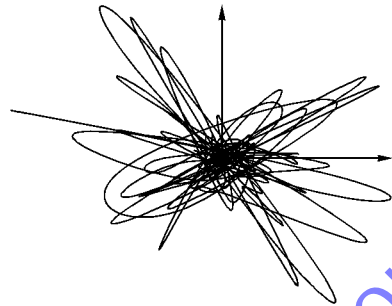


图16 从105个型值点向40个型值点光顺时过滤掉的细节

## 4 结语

本文结合作者的前期研究成果,在实现具体算法和软件编制的基础上,对多分辨光顺的光顺精度进行了详细的分析,从中可以得出如下结论:

- 1) 多分辨光顺算法应用于曲线曲面光顺时,其作为一种高效的低通滤波器组,在过滤掉不必要的噪声后,能够最大限度地提取曲线的本质特性,光顺后能够以较高的精度还原原始曲线。
- 2) 多分辨光顺算法能够以较少的点表示原始曲线,具有较好的数据压缩能力。
- 3) 曲率波动较大的地方,对多分辨光顺精度的影响较大。
- 4) 随着光顺过程的进行,被过滤掉的细节越来越多,曲线越来越平滑,对应的曲率分布也越来越平滑。
- 5) 随着光顺过程的进行,被过滤掉的细节越来越多,曲线的精度损失越来越大,因此,对于曲线光顺精度的控制就显得尤为重要,将对其展开后续研究。

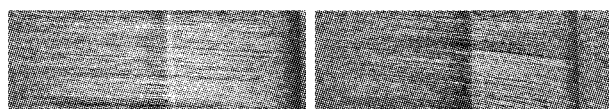
## 参考文献:

- [1] QUAK E, WEYRICH N. Decomposition and reconstruction algorithms for spline wavelets on a bounded interval [J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1994, 1(3): 217-231.
- [2] CERUTI A, LIVERANI A, CALIGIANA G. Fairing with neighbourhood LOD filtering to upgrade interactively B-spline into class-A curve [J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing, 2012(11): 1-9.
- [3] PAN Y. Research on the method of B-spline curves fairness based on lifting scheme [J]. Machinery, 2010, 37(5): 6-8. (潘洋宇. 基于提升格式的B样条曲线光顺技术研究[J]. 机械, 2010, 37(5): 6-8.)
- [4] ABDUL-RAHMAN H S, JIANG X J, SCOTT P J. Freeform surface filtering using the lifting wavelet transform [J]. Precision Engineering, 2013, 37(1): 187-202.
- [5] PAN Y, JIANG F. Research on wavelet fairing method of arbitrary control point curve [J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(11): 12-13. (潘洋宇, 姜福祥. 任意控制点曲线小波光顺方法研究[J]. 机械设计, 2009, 26(11): 12-13.)
- [6] WANG W, ZHANG Y. Wavelets-based NURBS simplification and fairing [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2010, 199(5/6/7/8): 290-300.
- [7] PAN R, YAO Z. Biorthogonal nonuniform B-spline wavelets based on a discrete norm [J]. Computer Aided Geometric Design, 2009, 26(4): 480-492.

(下转第1452页)

配点对为 ORSA 算法剔除错误匹配后的匹配点集利用以单应矩阵为几何线性约束模型的 RANSAC 算法进一步剔除的错误匹配。由于篇幅限制,本文只列出利用改进 ASIFT 算法的 Wall 组图像第 1 幅分别与第 2 幅、第 5 幅的匹配结果。

采用 ASIFT 算法和改进 ASIFT 算法匹配比较结果如表 3 示。由此可知,相比 ASIFT 算法,改进 ASIFT 算法在高度相似重复纹理特征图像匹配中,匹配精度、适应能力和鲁棒性等方面性能更好。



(a) Wall1-2图像  
改进ASIFT算法匹配结果  
(b) Wall1-5图像  
改进ASIFT算法匹配结果  
图6 Wall 图像匹配结果

表3 Wall 图像序列匹配结果数据比较

实验影像	ASIFT 算法		改进 ASIFT 算法	
	剔除错配后的 剩余匹配点数	配准 精度/Pixel	剔除错配后的 剩余匹配点数	配准 精度/Pixel
Wall1-2	1 044	2.42	950	1.23
Wall1-3	556	1.60	338	0.38
Wall1-4	249	1.73	136	0.72
Wall1-5	328	1.92	118	0.68
Wall1-6	53	3.50	15	1.89

### 3 结语

本文对 ASIFT 匹配框架进行了改进,使得 ASIFT 算法的计算量随影像间视点变换大小而不同,计算复杂度也随影像变形的大小而变化;利用 ORSA 迭代算法结合以单应矩阵为几何线性约束模型的 RANSAC 算法来剔除错误匹配点。实验结果分析表明,改进后 ASIFT 算法减少了计算量、计算时间,提高了匹配精度,且更适用于大尺度、高度相似重复纹理特征的图像配准。

#### 参考文献:

- [1] ZITOVÁ B, FLUSSER J. Image registration methods: a survey [J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.
- [2] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [3] MOREL J M, YU G. ASIFT: a new framework for fully affine invariant image comparison [J]. *SIAM Journal on Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 438-469.
- [4] KE Y, SUKTHANKAR R. PCA-SIFT: a more distinctive representation for local image descriptors [C]// *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004, 2: 506-513.
- [5] MA L, HAN X. Application of PCA method in SIFT matching algorithms [J]. *Video Engineering*, 2012, 36(1): 129-132. (马莉, 韩燮. 主成分分析法(PCA)在 SIFT 匹配算法中的应用[J]. *电视技术*, 2012, 36(1): 129-132.)
- [6] MIKOLAJCZYK K, SCHMID C. Scale & affine invariant interest point detectors [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(1): 63-86.
- [7] ZHANG Y, YU J, SUN J, *et al.* Research on corner matching method based on Harris [J]. *Computer and Modernization*, 2011(11): 78-81. (张勇, 余建平, 孙军伟, 等. 基于 Harris 的角点匹配算法研究[J]. *计算机与现代化*, 2011(11): 78-81.)
- [8] ZHANG B, WANG T, LI K, *et al.* Improved algorithm of Harris feature point matching [J]. *Computer Systems and Applications*, 2013, 22(7): 100-103. (张波, 王天召, 李科, 等. 一种改进的 Harris 特征点匹配算法[J]. *计算机系统应用*, 2013, 22(7): 100-103.)
- [9] MATAS J, CHUM O, URBAN M, *et al.* Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(10): 761-767.
- [10] MO H, WANG Z. A feature detection method combined MSER and SIFT [J]. *Journal of Donghua University: Natural Science Edition*, 2011, 37(5): 624-628. (莫会宇, 王祝萍. 一种结合 MSER 和 SIFT 算子的特征检测方法[J]. *东华大学学报: 自然科学版*, 2011, 37(5): 624-628.)
- [11] MOISAN L, STIVAL B. A probabilistic criterion to detect rigid point matches between two images and estimate the fundamental matrix [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 57(3): 201-218.
- [12] ZHANG Y, WENG L, ZHANG J, *et al.* Homography of UAV downward-looking ground images [J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(2): 749-752. (张宇, 翁璐斌, 张吉祥, 等. 无人机下视地面图像的单应约束[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 749-752.)
- [8] SADEGHI L, SAMAVATI F F. Smooth reverse Loop and Catmull-Clark subdivision [J]. *Graphical Models*, 2011, 73(5): 202-217.
- [9] JI X, GONG G. Semi-orthogonal B-spline wavelets and its application to curve and surface fairing [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(9): 54-59. (纪小刚, 龚光容. 半正交 B 样条小波及其在曲线曲面光顺中的应用[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(9): 54-59.)
- [10] JI X, GONG G. Curve fairing with arbitrary number of control vertices by semi-orthogonal B-spline wavelets [J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2006, 27(2): 90-95. (纪小刚, 龚光容. 基于半正交 B 样条小波的任意控制顶点曲线光顺研究[J]. *工程图*
- [11] JI X, GONG G. Arbitrary resolution fairing of quasi-uniform cubic B-spline curve [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, 28(11): 1477-1481. (纪小刚, 龚光容. 准均匀三次 B 样条曲线的任意分辨率光顺[J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(11): 1477-1481.)
- [12] JI X, GONG G. A simple algorithm for B-spline wavelets decomposition and reconstruction based on geometrical meanings [J]. *Journal of Machine Design*, 2009, 26(2): 16-19. (纪小刚, 龚光容. 一种基于几何含义的 B 样条小波分解重构简易算法[J]. *机械*

(上接第 1426 页)