

一种基于小波的轮廓特征提取算法

张慧^{1),2)} 刘伟军²⁾

¹⁾(中国科学院研究生院,北京 100039) ²⁾(中国科学院沈阳自动化研究所,沈阳 110016)

摘要 从大量含有噪声的3维点云数据中提取实物的边界特征,在以计算机视觉为基础的数字化曲面重建过程中有非常重要的意义。为提高重建精度,需要首先对大量原始散乱数据进行除噪及精简处理,但常规的数据处理方法由于没有区分噪声和特征点,因而使重建精度大大降低。为了准确的进行轮廓特征提取,提出了一种基于小波变换的激光测量扫描表面轮廓特征提取算法,并通过严格的理论推导,构造了一种类似 mexh 小波的小波基用来对两种边界特征点进行检测。多次实验结果显示,该算法不仅有效地避免了噪声和冗余数据的干扰,较精确地定位到了边界特征点,而且通过重建原始数据,较准确地提取了3维实体的外形轮廓,同时也为实现冗余数据的精简提供了一种新思想。

关键词 mexh 小波 点云 边界特征点

中图分类号: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)07-0828-06

Wavelet Based Profile Feature Extraction Method

ZHANG Hui^{1),2)}, LIU Wei-jun²⁾

¹⁾(Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

²⁾(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

Abstract It is meaningful to abstract edge feature point from a large amount of 3D point cloud in the reconstruction of curved surface. The 3D data we get must be processed firstly in order to avoid the distortion and deviation during the course of reconstruction. But the common methods for this problem are of little use because noise points and the feature edge have not been analyzed and distinguished. According to this, a new approach based on wavelet edge detection is presented. We select a kind of wavelet similar to mexh as a tool exclusively to detect these two kinds of edge feature points, The following experiments show that: the edge feature points are located accurately by ignoring the disturbance of noise and redundancy. Comparing with former data proceeding methods, this method is more accurate and overcomes the influence of noise simultaneously.

Keywords mexh wavelet, 3D point cloud, edge feature point

1 引言

当前,采用计算机视觉技术进行自由曲面的数字化得到越来越广泛的应用,其中激光测量扫描就是非常实用的一种。采用此种方法获取被测实物的外形数据不仅速度快,而且所需设备价格便宜,但是也存在以下一些缺陷^[1,2]:一是会产生大量无用的冗余数

据;二是测量得到数据中存在噪声。大家知道,边界特征点(以下简称界点)是反映实体外形轮廓特征点,从散乱数据中直接提取界点,既可以从最原始的大规模测量数据中获得反映实体外形轮廓的特征信息,以便从整体上观测被测物的整体构架,又可据此判定被测物的复杂程度,以便依据此边界特征进行分片之后的进一步数据处理,但是,由于噪声和冗余数据的影响,使得特征点提取变得异常困难。

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划基金资助项目(2001AA421160)

收稿日期: 2004-07-05; **改回日期**: 2004-12-17

第一作者简介: 张慧(1981~),女。2002年毕业于河南师范大学计算机科学技术系,现为中国科学院沈阳自动化研究所模式识别与智能系统专业在读硕士。研究方向为小波变换、模式识别。E-mail: zhanghui@sia.cn

当前,对于此种问题的解决方案均是在提取边界特征点之前,首先经过除噪、光顺、精简等一系列复杂的数据预处理工作,如在除噪方法上,经常使用的是中值滤波、标准高斯滤波(Gaussian)、平均滤波(averaging),以及更为高效的卡尔曼滤波(Kalman)^[3,4];在处理数据冗余问题上,有等距采样、根据方向转角设定阈值采样、弦高差采样等;在提取边界特征点方面,常用基于差分的逐点计算方位角方法、根据空间点的法矢量来判定边界特征点、基于最小二乘的左右邻域曲线拟合等方法来识别等等^[5]。且不说这些方法自身存在的一些不可避免的缺陷,单是这种毫无协调关系的数据处理流程本身就存在着以下问题:(1)噪声和原始的边界特征点反映在数字化的曲面上都是尖锐的突变点,但由于对界点的提取和对数据的平滑除噪是采用不同的方法分开进行的,因此,如果先对数据进行消噪处理,则将不可避免地破坏特征点数据的“尖锐性”,即对数据的平滑将使特征点失去精确表征实物外形的特性,但如果在除噪前先提取特征点,又容易将噪声当作特征点提取出来,这样,不但会剔除有用的特征数据,还会造成得到的界点数据发生畸变和偏移;(2)数据量在一定程度上刻画了数字曲面表征实物的精确程度,即布点越密集,描述外形越精确,反之越粗糙,但为了方便存储及处理必须将所认为的冗余数据除去,而将特征的信息保留。这就意味着,数据的除噪、精简和界点的提取等各项工作既相互制约又密不可分,忽视它们之间的联系只对每一种算法的修修补补将不能从根本上解决问题。基于以上情况的考虑,本文针对激光测量扫描线的特点,提出了一种基于小波变换的扫描线数据处理方法,即通过对原始数据进行多分辨率下的分解来在除噪声的基础上提取界点,以便在随后的重建过程中实现数据的精简。

2 轮廓边界点的小波变换特性

2.1 扫描线体现的边界特性

对形状复杂的物体表面,体现它特征的边缘部分可以抽象成如图 1 所示的两种情况。

如果将由于两平面相交而产生的交点处一阶导数不存在的现象称为脉冲式间断(如图 1(a)所示),定义 F_1 和 F_2 在垂直 AB 的截面上—阶切矢间断处为脉冲式界点,而将两平面平行交错的不连续现象叫做阶跃式间断(如图 1(b)所示),并定义阶

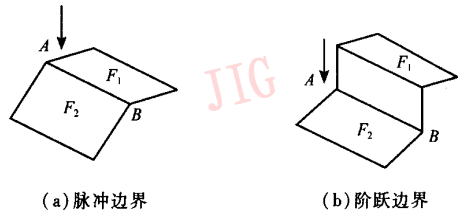


图 1 脉冲边界和阶跃边界

Fig. 1 Pulse edge and step edge

跃式界点为曲面 F_1 和 F_2 在垂直 AB 的截面线上呈现出阶跃跳变的边界点,那么激光扫描到两类边界特征点处,其得到的扫描线数据将呈现出如图 2 所示的特征。

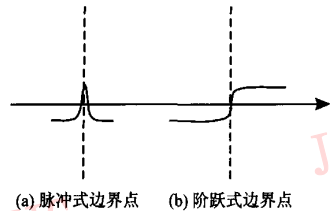


图 2 脉冲式边界点和阶跃式边界点

Fig. 2 Pulse edge point and step edge point

2.2 小波选取依据及小波函数的推导

小波变换在应用领域的—个突出的优点是它能在局部时间和频域范围内描述被测物的细节信息,并将它们分离出来。对于噪声和边界特征点而言,它们的特性在变换到小波域上时都能得到体现,但由于在不同的尺度空间下呈现出的是不同的变化规律,因此借助它来分离噪声和边界特征点能够达到满意的效果。

—般情况下,往往某个小波函数对于特定问题的分析具有最佳的效果。例如为检测图 2 的界点,需要如下性质的小波^[6,7]:

性质:设 $f(x)$ 是原始输入数据序列, $\theta(x)$ 是某—低通平滑函数, $y(x)$ 是原始数据序列 $f(x)$ 被 $\theta(x)$ 平滑后的输出结果,取 $\psi^{(2)}(x)$ 为 $\theta(x)$ 的二阶导数,如果用 $\psi^{(2)}(x)$ 对原始离散数据序列 $f(x)$ 做小波变换,则小波变换 $W_a^{(2)}f(x)$ 的零点应对应 $y(x)$ 的拐点($\frac{d^2y}{dx^2} = 0$),其在极限情况下就对应阶跃式界点处;

小波变换 $W_a^{(2)}f(x)$ 的极值点应对应 $\frac{dy}{dx} = 0$ 的点,也就是 $y(x)$ 的极值点,其在极限情况下就对应脉冲式点处。

据此,即可构造如下符合要求的小波:取 $\theta(x)$ 为高斯函数,即

$$\theta(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

设 $\psi^{(2)}(x)$ 为 $\theta(x)$ 的二阶导数,即

$$\psi^{(2)}(x) = \frac{d^2\theta(x)}{dx^2} \quad (2)$$

$$\psi^{(2)}(x) = \frac{1}{\sigma^2\sqrt{2\pi\sigma}} \left(\frac{x^2}{\sigma^2} - 1 \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

对 $\psi^{(2)}(x)$ 进行标准归一化,即

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}\sigma} \pi^{-1/4} \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

它的频域表示如下:

$$\Psi(\omega) = -\sqrt{\frac{8}{3}} \sigma^{5/2} \pi^{1/4} \omega^2 e^{-\frac{\sigma^2\omega^2}{2}} \quad (5)$$

其中, ω 为角速度。

可以证明: $\psi(x)$ 满足弱容许条件。若给定高斯函数 $\theta(x)$ 中的标准方差 $\sigma = 1$, 则最终构造出的小波函数为

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (6)$$

其频域表示为

$$\Psi(\omega) = \sqrt{2\pi}\omega^2 e^{-\frac{\omega^2}{2}} \quad (7)$$

图 3 为构造的小波在时域和频域的波形图,从图 3(a) 中可以看到,它类似 mexh 小波,其没有相位偏移,是一种实小波。

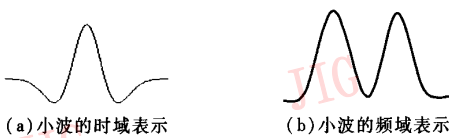


图 3 小波的时域表示和小波的频域表示

Fig. 3 Wavelet time domain and wavelet frequency domain

从整个构造过程可以看到:(1) 函数 $\Psi(\omega)$ 在 $\omega = 0$ 处有二阶零点;(2) 在时域和频域都具有很好的局部化特性;(3) 恰好具备所需要的定位边界特征点的性质^[8,9]。

图 4 为理论上采用此种小波(如图 4(c)所示)对脉冲式界点(如图 4(a)所示)和阶跃式界点(如图 4(b)所示)进行变换后的特征结果。

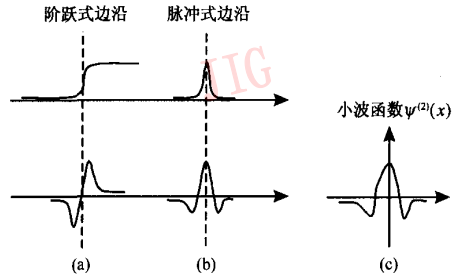


图 4 $\psi^{(2)}(x)$ 对阶跃点及脉冲点的小波变换结果

Fig. 4 The result of the wavelet transform for step edge and pulse edge

具有不同的表现形式,边界特征点提取算法流程如下:

(1) 以一条扫描线为一个结点,对所有扫描线建立链表数据结构;

(2) 从该链表读入一条扫描线 $\{v_i = (x_i, y_i, z_i) \mid i = 0, 1, \dots, n\}$, 它是一组 3 维数据序列;然后将其投影到其对应的光刀平面 S 上,并以初始点作为坐标原点来完成点云数据 3 维到 2 维的转化 $\{q_i = (x_i, y_i) \mid i = 0, 1, \dots, n\}$;最后沿横坐标方向进行均匀插值,即可转化成 1 维的离散数据 $\{p_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$;

(3) 使用上一节构造的小波函数来对离散数据进行多层分解;

(4) 采用非线性小波变换阈值法,滤去噪声后,再搜取每层处理过的小波系数模极大值,当得到一条在多尺度下的较小范围内收敛于 p_0 的极大值线时,则保存 p_0 点,并将 p_0 处标志为突变式界点 flag1;

(5) 对保存的点 p_0 ,再查看其左右邻域,如果在它的 δ 邻域内,同时有与之符号相反,且幅值相同的极值点 p_1 出现(即出现反对称现象)时,则修改 p_0 、 p_1 处的界点属性,并将离散数据序列 $\{p_i \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 的 $\frac{p_0 + p_1}{2}$ 点处标记为边沿式界点 flag2;

(6) 用分解的小波系数和概貌系数重构扫描线数据序列,修正步骤(4)和步骤(5)定位的界点处数据为原始数据;

(7) 对每一条扫描线数据序列重复步骤(2)至步骤(6),直至链表结点为空。

4 实验

本实验待处理数据(见图 5)是由中国科学院沈阳自动化研究所 RP 实验室用自制的非接触式激光测量扫描设备对一娃娃外形轮廓进行扫描得到的扫

3 边界特征点提取算法

基于以上不同性质的两类界点在所构造的小波下

描线数据,它是利用计算机视觉技术和图像处理的方法,通过双 CCD 摄像机结合狭缝式结构光(如图 6 所示)得到的曲面物体的空间 3 维坐标点,由于这样得到的点云数据的特点是一条扫描线上的点在一个激光平面内,因此可将每条扫描线上的点转化到它对应的激光平面所在的 2 维欧氏空间进行处理。



图 5 娃娃数据 3 维显示

Fig. 5 A toy's 3D display

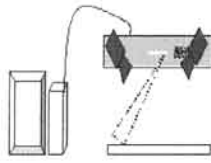


图 6 激光成像原理

Fig. 6 Laser scan principle

为验证本文提出算法的可行性与有效性,本文选取图 5 娃娃耳朵附近的一条扫描线数据运用本文算法进行处理,该扫描线上的离散数据个数为 421,空间的形状特征如图 7 所示。

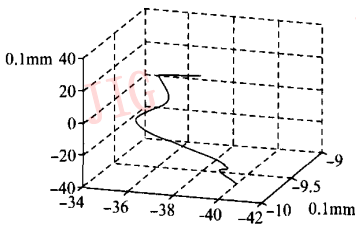


图 7 一条扫描线数据

Fig. 7 A line data from lase

处理实验步骤如下:

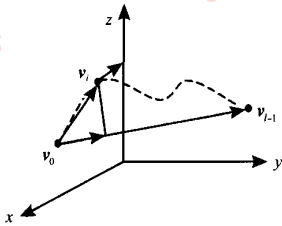


图 8 3 维扫描线数据的空间几何关系

Fig. 8 The representation of the 3D laser line in space

(1) 对该扫描线进行降维及匀化处理,如图 8 所示,扫描线数据在 3 维欧氏空间 R^3 上的坐标 $v_i = (x_i, y_i, z_i), i = 0, 1, 2, \dots, l - 1$ 的空间几何关系为以始点 v_0 为坐标原点,以 $\overrightarrow{v_0 v_{l-1}}$ 为横坐标正向,建立的激光平面内的直角坐标系,设 $\hat{q} = (\hat{x}_i, \hat{y}_i)$ 为扫

描线上的任一点 v_i 在以 v_0 为坐标原点的激光平面内的新坐标,可以证明

$$\hat{x}_i = \frac{\overrightarrow{v_0 v_{l-1}} \cdot \overrightarrow{v_0 v_i}}{|\overrightarrow{v_0 v_{l-1}}|}, \hat{y}_i = \frac{\overrightarrow{v_0 v_{l-1}} \cdot \overrightarrow{v_0 v_i}}{|\overrightarrow{v_0 v_{l-1}}|}$$

图 9 为匀化处理后的 2 维激光平面上的 1 维扫描线数据显示,由图 9 可以看到,原始的数据曲线没有发生变形,仍然保持了原来的形状特征。

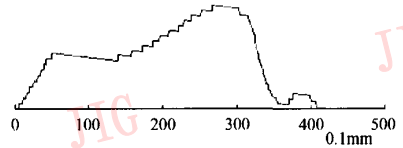


图 9 匀化处理后的 1 维扫描线数据

Fig. 9 Averaging interval processing of 1D data

(2) 将上步得到的扫描线数据看作 1 维信号来进行处理,在对数据进行小波分解之前,一个必需的步骤是延拓数据长度使之成为 2 的整数幂,为此可选用平滑扩展法来处理边界,以避免在小波分解的过程中两端部分因出现“翘曲”而提取到伪界点。图 10 为将原始数据序列的 421 个点扩展到 512 个点(虚线外为扩展的数据)的示意图。

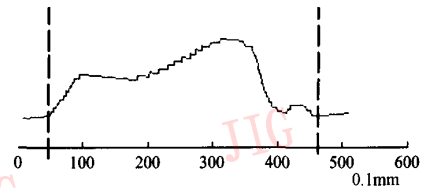


图 10 长度扩展后的扫描线数据

Fig. 10 The representation of data length extension

(3) 小波分解层数也是需要考虑的问题。实际处理中,由于分解步骤是有限的,因此分解层数要合适。分解层数过多,则小波变换不再反映边界点的局部特性,如果分解层数过少,则易受高频噪声干扰,又会使提取的界点不准确。经过多次验证,发现当分解到 7 层的时候,小波系数还能反映边界的信息。

(4) 对信号进行 7 层小波分解,并从最高层 ($j=7$) 开始,按分辨率由高到底的顺序逐层搜寻局部极大值点。由于已知边界特征点在小波变换的多个尺度下,均表现为明显的峰值;而噪声将随着尺度的加大而迅速减小,因此按照这个性质,在定位界点时,噪声会自然被滤去。各层分解的小波系数曲线如图 11 所示,最下边的曲线是第 1 层的小波分解系数,最上边的是第 7 层小波分解系数,图中标出的黑

点是搜索到的模极大值点,同时可以看到它们最终形成了 4 条极大值线。实验证明,根据本文提出的算法,可以很容易地由多层小波模极大值点定位到两类界点。

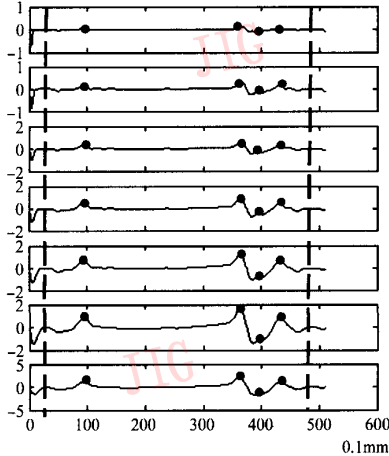


图 11 扫描线数据序列在 mexh 小波下的 7 层分解

Fig. 11 7 lays line data decomposition using WT

(5) 考虑到噪声和界点在小波域上出现的混叠现象,本文选择采用非线性小波变换阈值法来对各层小波系数进行处理,这里使用的是软阈值方法,设定的阈值分别为 $t_1 = 0.2$, $t_2 = 0.25$, $t_3 = 0.242$, $t_4 = 0.199$, $t_5 = 0.06$, $t_6 = 0.06$, $t_7 = 0.06$ 。小波系数经过这种调整之后,就可对信号进行重建,这种重建后的信号不仅在一定程度上滤去了噪声,取得了平滑的效果,而且提取到了特征点(见图 12)。

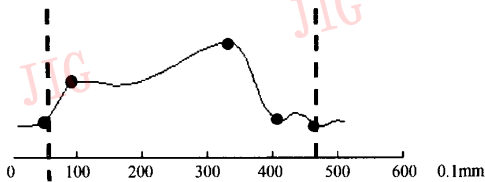


图 12 重建后的扫描线数据

Fig. 12 The reconstructed line data

(6) 对组成娃娃的每一条扫描线数据都进行上述的处理,最终提取出的特征点如图 13 所示。

由此可以看到,使用此方法提取到的边界特征点既克服了噪声的干扰,又基本反映了娃娃的外形轮廓特征信息。当对提取的小波模极大值线设置不同的阈值时,可在不同的程度上消除点云数据的冗余,同时为数据的精简提供了一种新的思路。



图 13 娃娃的 3 维轮廓特征数据显示

Fig. 13 The toy's surface feature representation

5 结 论

本文算法的优点体现在以下几个方面:

- (1) 将 3 维空间的数据点转化为 1 维的数据序列进行分析,可避免空间点之间复杂的拓扑关系;
- (2) 构造具有特殊性质的小波,在对扫描线数据序列进行多层分解后可定位界点,并可利用局部模极大值提取界点;
- (3) 对分解的多层小波系数采用非线性阈值化处理,可使噪声得到很好的抑制。

同时该算法也存在以下缺点:

- (1) 各种参数,如 σ (标准差)、 j (分解层数) 和 t (非线性阈值) 的设定只能通过先验知识和多次实验确定,例如对分解层数 j ,如果分解层数太少,则健壮性不强,其将使极值点定位不准确,如果分解层数增多,则计算量太大,又使效率降低;
- (2) 实验中两类界点分类不明显,从而导致界点重复计算的次数比较多。

以上缺点都需要在算法的优化方面进行改进。

参考文献 (References)

- 1 Tai Ching-Chih, Huang Ming-Chih. The processing of data points basing on design intent in reverse engineering [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, 2000, 40 (13): 1913 ~ 1927.
- 2 Abdalla Alrashdan, Saeid Motavalli, Behrooz Falahi. Automatic segmentation of digitized data for reverse engineering applications [J]. IJME Transactions on Design and Manufacturing, 2000, 30 (4): 59 ~ 69.
- 3 HU Jian-Ming, Yan Hong. Polygonal approximation of digital curves based on the principles of conceptual organization [J]. Pattern Recognition, 1997, 30 (5): 314 ~ 319.
- 4 Wang Xin, et al. The filter of the discrete signals [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. [王欣等. 离散信号的滤波 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.]

- 5 Sun Yu-wen. Study on key techniques of reverse engineering oriented to rapid prototyping manufacturing. Ph. D Dissertation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2000;13 ~ 35. [孙玉文. 面向快速原形制造的反求工程关键技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2000, :13 ~ 35.]
- 6 Mallat S, Hwang W L. Singularity detection and processing with wavelets[J]. IEEE Transactions on Information Technique, 1992, 38(2):617 ~ 643.
- 7 Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Mathine Intelligence, 1992,14(7):710 ~ 732.
- 8 Yang Fu-sheng. The Engineering analysis and application of wavelet transformation[M]. Beijing:The Press of Science, 1999;145 ~ 155. [杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京. 科学出版社, 1999;145 ~ 155.]
- 9 Mallat S. A wavelet tour of signal processing(Second Edition)[M]. New York:Academic Press, 1999.