

文章编号: 0258-7025(2003)10-0933-05

# 基于 NURBS 曲线插值的激光光刀图像 中心提取方法的研究

隋连升, 李 兵, 蒋庄德

(西安交通大学精密工程研究所, 陕西 西安 710049)

**摘要** 通过介绍激光扫描测量原理,说明准确地从光刀图像中提取光刀中心位置是影响测量精度的关键因素。提出了基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线插值的光刀中心提取方法。通过实验说明该方法重复提取的结果比较稳定,而且将误差控制在 0.1 个像素以下,从而使重复测量的高度误差在 0.02 mm 以下。

**关键词** 图像处理;反求工程;激光扫描系统;非均匀有理 B 样条(NURBS)

**中图分类号** TN 911.73 **文献标识码** A

## Research on Method of Laser-knife Center Position Etracting Based on NURBS Interpolation

SUI Lian-sheng, LI Bing, JIANG Zhuang-de

(Institute of Precision Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** This paper argues that how to compute the center position of the knife in the image obtained by CCD accurately is a key issue by introducing the principle of laser scanning system. In this paper, a new method based on NURBS curve interpolation is designed. The experiments show that the results computed by this method are stable and the errors are controlled below 0.1 pixel. Thus, the errors in the height direction are less than 0.02 mm.

**Key words** image processing; reverse engineering; laser scanning system; NURBS

### 1 引 言

目前,反求工程已广泛地应用于现代先进的制造系统中,如快速成型系统以及基于 Internet 的虚拟网络制造系统等。反求工程不同于传统的产品设计过程,它能够利用现有产品,通过三维轮廓测量技术,得到所需要的计算机辅助设计(CAD)模型。反求工程通过三个步骤实现:1) 产品表面数字化;2) 特征提取;3) 生成产品的 CAD 模型<sup>[1,2]</sup>。产品表面数字化,通过接触式或者非接触式测量得到产品表面的云状数据。特征提取,在云状数据的基础上,识别产品表面的局部特征,减少不必要的数据点。最后,对云状数据进行自由曲线曲面造型,生成 CAD 模型。

非接触式测量有许多优点,如测量速度快、容易

测量表面发生形变的物体,以及能够测量不可接触的物体等。因此,非接触式测量在工业领域得到越来越广泛的应用。图 1 所示是一台高精度三维轮廓测量系统的原型示意图,它是基于非接触式测量的激光线扫描测量系统。从图 1 可以看出,激光发生器产生一线状激光(即激光光刀),并且将它投射到被测物体的表面上。由于物体表面高度的不同,光刀在物体表面上形成一条变形条纹。利用 CCD 摄像机采集变形条纹图像,就得到被测物体的光刀图像,图 2 所示为光刀投射到牙模上形成的光刀图像。

要得到物体的三维轮廓,必须从被测物体的光刀图像中提取光刀位置信息。然后,通过坐标转换,将二维光刀位置信息转换成被测物体的三维空间坐标。实际测量时,沿着  $x$  轴方向,以一定的间距移动

收稿日期:2002-06-17;收到修改稿日期:2002-07-22

基金项目:陕西省自然科学基金(编号:2001c43)资助项目。

作者简介:隋连升(1972—),男,西安交通大学精密工程研究所博士研究生,主要从事反求工程研究。E-mail:slsitrd@163.com

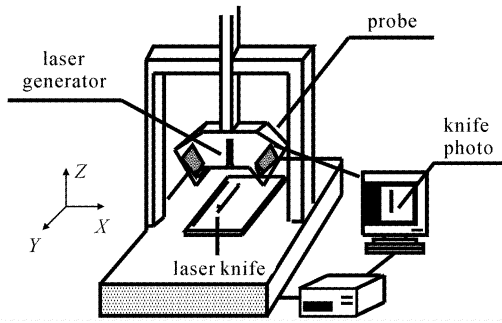


图 1 高精度三维轮廓测量系统原型示意图  
Fig.1 Prototype sketch of high precision 3-D profile measuring system

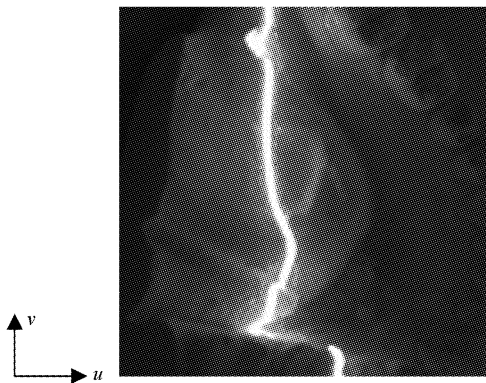


图 2 牙模光刀图像  
Fig.2 Tooth model image

探头,在每个位置上采集一幅光刀图像。对每一幅光刀图像提取光刀位置,并且进行坐标转换。然后集成所有计算出来的三维信息,就得到了被测物体的表面轮廓。

## 2 激光线扫描测量原理

激光线扫描测量,将光刀投射到被测物体表面上,通过物体表面上光刀的成像偏移来计算表面高度。由于高度的计算是由放置物体的基面、像点及像距所组成的三角关系决定的,因此这种测量方式也称为三角测量<sup>[3]</sup>,其原理如图 3 所示。图中,光刀垂直于基面  $M$  投射到物体的表面上,CCD 成像靶面垂直于 CCD 摄像头的成像光轴  $OO'$ ,成像光轴  $OO'$  与入射光的夹角为  $\alpha$ 。根据图 3 所示的三角几何关系以及成像关系,可以得到物体表面上  $A$  点高度计算公式为

$$H = \frac{S}{(S'/L')\sin\alpha + \cos\alpha} \quad (1)$$

其中,光刀照射到基准面上的点  $O$  距摄像机物距为  $S$ ,成像像距为  $S'$ ,物体表面上  $A$  点在 CCD 上成像点

$A'$  偏离  $O'$  点的距离为  $L'$ 。

由公式(1)知,如果光刀,CCD,基准面  $M$  固定,决定  $A$  点高度的主要因素是光刀在 CCD 上的偏移量  $L'$  的精度。而确定  $L'$ ,需要提取光刀的中心位置。由于光刀图像受很多噪声因素的影响,如被测物体表面上的散斑噪声、图像卡的随机噪声、电噪声以及热噪声等,因此很难准确地提取光刀的中心位置。为了提高测量精度,必须采用比较准确的光刀中心位置提取方法。

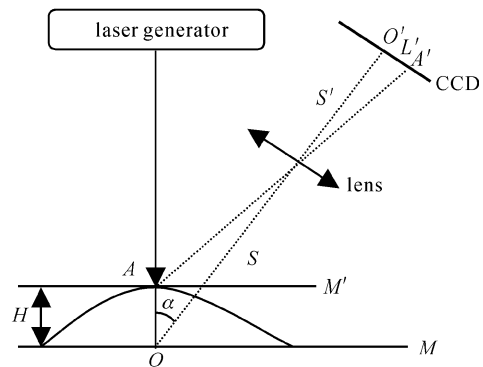


图 3 激光线扫描测量系统原理示意图  
Fig.3 Principle sketch of laser scanning system

## 3 光刀中心位置提取方法

提取光刀中心位置,其方法可以分成两类:1) 提取光刀的几何中心,如中心法;2) 计算光刀的能量重心,将其作为光刀中心,如极值法、重心法、多项式拟合法等。采用中心法,必须要准确地检测光刀的边缘位置。目前,许多方法可以将边缘的检测精度提高到亚像素级,如基于矩保持的亚像素边缘检测法、利用切线信息的亚像素边缘检测法等。但是,由于噪声的存在,检测出来的光刀边缘位置已经是不准确的。为了减少噪声的影响,可以采集多幅图像进行平均。如果使用多幅图像平均,则会大大地降低测量速度。因此,本文采用了计算光刀能量重心的方法。

在激光线扫描系统中,多项式拟合法使用得比较多,它能够比较准确地提取光刀中心位置。但是,它也有着很大的缺点。例如,保证光刀在被测物体表面上的位置不变,采集多幅光刀图像,然后使用多项式拟合法提取光刀中心,结果中心位置变化很大。因此,带来的测量误差比较大。本文提出了基于非均匀有理 B 样条(NURBS)曲线插值的光刀中心提取方法。

### 3.1 多项式拟合法

为了说明问题,在光刀图像上定义了两个方向,

如图 2 所示。光刀在 CCD 靶面上的偏移,即为在  $u$  方向上的偏移。因此,提取光刀的中心位置,需要准确地确定光刀中心在  $u$  方向上的值。应用多项式拟合法,首先,给定一个阈值,对图像进行阈值化处理;其次,沿着  $v$  方向逐行扫描图像,在每行图像上确定属于光刀的像素点,所确定的像素点是连续的;最后,利用这些像素点在  $u$  方向上的坐标值以及灰度值来拟合多项式曲线,求取曲线的重心,得到所要提取的光刀中心。

假设  $v$  值固定,即在一行光刀图像上,确定了  $m$  个属于光刀的像素点,记  $u_i$  表示像素点在  $u$  方向上的坐标, $h_i$  表示相应像素点的灰度值, $i = 1, 2, \dots, m$ ,则拟合的  $k$  次多项式曲线方程为<sup>[4]</sup>

$$H(u) = \sum_{l=0}^k a_l u^l \quad (2)$$

其中, $a_i$  为拟合多项式的系数。为了准确地提取光刀中心,将区间 $[u_1, u_m]$  进行等间距划分。设划分成  $N$  个子区间,则划分的步长  $h$  为

$$h = \frac{u_m - u_1}{N} \quad (3)$$

每个间距点的  $u_j (j = 1, 2, \dots, N)$  坐标值为

$$u_j = u_1 + (j - 1)h \quad (4)$$

每个间距点的灰度值为

$$H_j = H(u_j) = \sum_{l=0}^k a_l u_j^l \quad (5)$$

利用重心法求解公式(5),就可求出光刀的中心坐标  $u_c$

$$u_c = \frac{\sum_{l=1}^N H_l u_l}{\sum_{l=1}^N H_l} \quad (6)$$

### 3.2 NURBS 提取光刀中心位置法

NURBS 曲线<sup>[6]</sup> 为一段段的有理多项式函数,其表达式为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u) W_i V_i}{\sum_{i=0}^n B_{i,k}(u) W_i} \quad (7)$$

式中  $V_i$  为控制点,  $W_i$  为权因子,  $B_{i,k}(u)$  为  $k$  次 B 样条基函数。基函数由下面的递推公式定义

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u), & k \geq 1 \\ \frac{0}{0} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$B_{i,k}(u)$  由节点矢量  $U$  决定

$$U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}] \quad (9)$$

使用 NURBS 曲线提取光刀中心,可以分成以下几个步骤:

1) 将每行光刀像素点  $(u, h_i) (i = 1, 2, \dots, m)$  作为插值点,确定 B 样条插值曲线的节点矢量  $U$ , 计算 B 样条插值曲线的控制顶点。

2) 根据光刀像素点的灰度值分布情况,确定权因子,控制曲线的形状。

3) 等间距划分光刀像素点区间,利用公式(7)计算间距点的灰度值,利用公式(6)计算光刀的中心坐标。

## 4 实验与分析

实验中,将光刀投射于标准的测量平面上,该测量平面高度误差在  $1 \mu\text{m}$  以下,表面上的散斑噪声影响很小。其经过阈值化处理后的图像如图 4 所示,阈值为 20。图像的尺寸为  $768 \times 576$  像素。

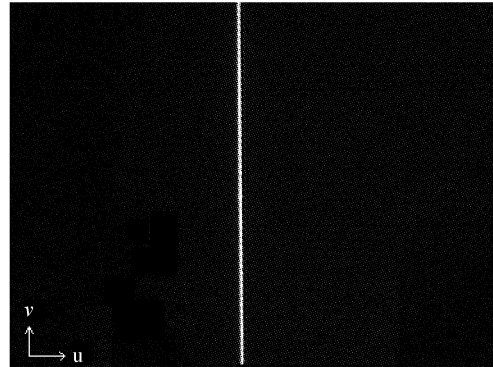


图 4 激光光刀图像

Fig. 4 Laser-knife image

在实验过程中,保证激光探头的位置不变,测量的环境条件(如光源、热源等)也不变,连续采集 20 幅图像,在每幅图像上进行光刀中心提取。本文仅在  $v$  方向上均匀选取 5 个值,如  $v = 90, 190, 290, 390, 490$ 。然后,在每个  $v$  值情况下,确定光刀像素点。然后,分别使用多项式拟合法以及 NURBS 曲线法计算光刀中心。表 1 是使用多项式拟合法计算的光刀中心,拟合多项式的最高次数为 5。表 2 是使用 NURBS 曲线法计算的光刀中心,其次数为 3。

从表 1 中可以看出,使用多项式拟合法得到的光刀中心位置不稳定,平均最大误差在 0.315 个像素左右。图 1 所示的三维轮廓测量仪,其高度测量范围是 100 mm,相应地光刀在光刀图像  $u$  方向上的

偏移量为 500 个像素。因此,光刀中心在  $u$  方向上发生一个像素的偏移,则会在测量高度上引起 0.2 mm 的变化。由此可见,使用多项式拟合法,会带来 0.06 mm 左右的高度误差。

表 1 使用多项式拟合法计算结果(单位:像素)

Table 1 Results computed by the polynomial fitting method (unit: pixel)

$v$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
90	365.407	365.422	365.418	365.460	365.442	365.500	365.437	365.419	365.574	365.400	365.552
190	364.240	364.155	364.141	364.381	364.207	364.221	364.258	364.175	364.630	364.233	364.261
290	363.054	363.158	363.167	363.120	363.225	363.110	363.147	363.161	363.177	363.186	363.152
390	362.079	362.271	362.051	362.243	362.073	362.056	362.166	362.184	362.226	362.059	362.000
490	361.472	361.454	361.465	361.448	361.475	361.474	361.466	361.476	361.422	361.299	361.592
$v$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Avg.	$\epsilon$
90	365.470	365.633	365.506	365.388	365.431	365.458	365.390	365.481	365.488	365.464	0.246
190	364.287	364.348	364.259	364.279	364.120	364.362	364.303	264.315	364.300	364.274	0.510
290	363.095	363.113	363.128	363.233	363.181	363.174	363.097	363.016	363.174	363.144	0.220
390	362.077	362.085	362.038	362.072	362.200	362.039	362.033	362.085	362.193	362.111	0.274
490	361.550	361.571	361.458	361.640	361.555	361.318	361.560	361.499	361.471	361.487	0.325

表 2 使用 NURBS 法计算结果(单位:像素)

Table 2 Results computed by NURBS method (unit: pixel)

$v$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
90	365.443	365.446	365.445	365.472	365.458	365.488	365.460	365.449	365.497	365.441	365.482
190	364.265	364.279	364.253	364.281	364.246	364.255	364.287	364.231	364.307	364.266	364.288
290	363.071	363.136	363.136	363.146	363.156	363.102	363.163	363.134	363.129	363.129	363.115
390	362.130	362.118	362.110	362.179	362.125	362.113	362.143	362.138	362.180	363.118	362.114
490	361.474	361.454	361.465	361.448	361.475	361.473	361.466	361.476	361.422	361.499	361.487
$v$	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Avg.	$\epsilon$
90	365.479	365.502	365.493	365.427	365.468	365.268	365.443	365.474	365.480	365.465	0.075
190	364.280	364.291	364.286	364.302	364.234	364.316	364.280	364.265	364.281	364.275	0.085
290	363.154	363.140	363.151	363.159	363.125	363.132	363.144	363.129	363.126	363.134	0.092
390	362.128	362.133	362.088	362.120	362.141	362.089	362.103	362.135	362.131	362.127	0.091
490	361.489	361.517	361.462	361.504	361.494	361.420	361.505	351.495	361.474	361.475	0.097

表 3 对比实验结果(单位:像素)

Table 3 Results computed by polynomial fitting and NURBS methods (unit: pixel)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Fitting	443.818	443.780	443.825	443.904	443.998	443.722	443.896	443.909	443.660	444.124	443.746
NURBS	443.883	443.852	443.896	443.895	443.891	443.884	443.927	443.904	443.848	443.913	443.903
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Avg.	$\epsilon$
Fitting	443.885	443.728	443.427	443.634	443.698	443.836	443.675	443.832	443.794	443.804	0.696
NURBS	443.896	443.887	443.835	443.882	443.871	443.902	443.870	443.904	443.869	443.886	0.093

从表 2 可以看出,使用 NURBS 法得到的光刀中心位置比较稳定,最大误差在 0.1 个像素以下,测量的高度误差在 0.02 mm 以下。与多项式拟合法相比,精度提高了 0.04 mm 左右。

在实际测量中,由于被测物体表面特性及高度不同,其光刀图像是不对称的、有倾斜的。为了比较

两种方法,进行了上述实验。以图 2 牙模为例,连续采集 20 幅图像,分别采用两种方法提取光刀中心。表 3 是两种方法对比的试验结果,取  $v = 320$ 。从中可见,使用 NURBS 法得到的光刀中心比较稳定,误差比较小。

NURBS 法能够提高计算光刀中心位置的精

度,是因为它有效地减少了噪声对光刀计算的影响。对于每一行光刀图像,光刀像素的灰度值都有一个或几个最大值,这些值决定了光刀中心的大概位置,即可以确定光刀中心位置达到像素级。由于噪声的影响,可能使左右两侧光刀像素的灰度值变化很大。如果要达到亚像素级,就要考虑左右两侧光刀像素的灰度值。使用多项式拟合法计算光刀中心,会出现表 1 所出现的情况:当左侧光刀像素的灰度值变大时,计算出来的光刀中心将偏小;当右侧光刀像素的灰度值变大时,则光刀中心位置将偏大。表 4 所示的是表 1 中采集第 13 幅光刀图像时得到的光刀像素及其灰度值。由于右侧光刀像素的灰度值比较大,使用多项式拟合法计算的光刀中心位置偏大。

表 4 第 13 幅光刀图像的光刀像素位置及灰度值( $v=90$ )

Table 4 Positions and gray values of knife pixels in 13 th image ( $v=90$ )

$u$	361	362	363	364	365	366	367	368	369
$h$	25	48	98	171	227	248	230	154	73

NURBS 曲线具有良好的局部控制性。在给定控制顶点的情况下,改变一个权因子,仅影响两段有理 B 样条曲线。因此,根据光刀像素的灰度值分布情况,改变有关控制顶点的权因子,使受噪声影响比较大的光刀像素对计算光刀中心的影响减少。图 5 所示的 B 样条曲线,是将表 4 的光刀像素及其灰度值作为插值数据点产生的三次 B 样条曲线。圆点为控制顶点,连接圆点的虚线组成控制多边形。

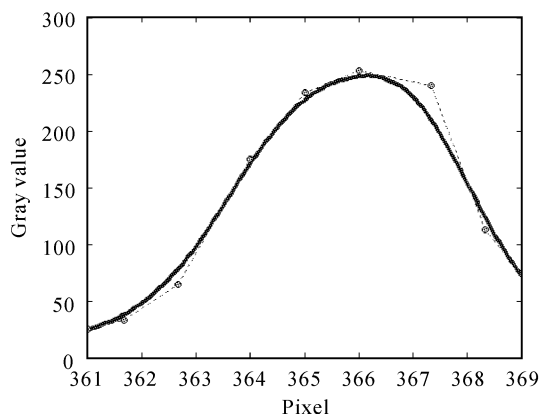


图 5 三次 B 样条曲线及控制顶点

Fig. 5 3-order B-spline curve and control points

通过调整与控制顶点相关的权因子,即可控制曲线的形状。权因子的选取,要根据控制顶点灰度

值在所有光刀像素点的灰度值中的分布情况来确定。简单的方法,可以将控制顶点灰度值与光刀像素点的灰度值总和的比值作为权因子。在本文中,使用 NURBS 法的目的是降低噪声的影响。因此,确定权因子,需要考虑光刀两侧像素点灰度值的影响,可以根据光刀像素点灰度值的统计规律,增加或减少相关控制顶点的权因子,使曲线靠近或远离这些控制顶点,从而减少受噪声影响的光刀像素点的影响。对于表 4,选取如下权因子:

$$\begin{matrix} 0.0146 & 0.0281 & 0.0573 & 0.1000 & 0.1327 \\ 0.1450 & 0.1345 & 0.2247 & 0.1631 & \end{matrix}$$

则计算得到的中心位置明显降低,结果见表 2。

## 5 结 论

由于 NURBS 曲线有很好的局部控制性,所以使用 NURBS 法计算光刀中心位置,能够降低光刀图像噪声的影响。而且,通过上面的实验与分析,说明 NURBS 法重复计算的光刀中心位置比较稳定,并且将误差控制在 0.1 个像素以下。对于本系统,1 个像素点代表 0.2 mm 的高度。因此,NURBS 法能够将重复提取的高度误差控制在 0.02 mm 以下,从而有效地提高了测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 J. P. Kruth, A. Kerstens. Reverse engineering modeling of free-form surfaces from point clouds subject to boundary conditions [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, **76**:120~127
- 2 Abdalla Alrashdan, Saeid Motavalli, Behrooz Fallahi. Automatic segmentation of digitized data for reverse engineering applications [J]. *IIE Transactions*, 2000, **32**:59~69
- 3 Giovanna Sansoni, Matteo Carocci, Roberto Rodella. Calibration and performance evaluation of a 3-D imaging sensor based on the projection of structured light [J]. *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(3):628~636
- 4 Yan Qingjin. Numerical Value Analyse [M]. Beijing: Beijing Aviation and Spaceflight Publishing Company, 1991. 206~215 (in Chinese)
- 5 Yue Kaiduan. Research on theory and applications of high precision three dimension digitalization in reverse engineering [D]. Xi'an Jiaotong University Doctor's Degree Thesis, 1980. 20 (in Chinese)
- 6 Zhu Xinxiong. Free-form Curve and Surface Modeling Technology [M]. Beijing: Science Publishing Company, 2000. 145~167 (in Chinese)