

# 零件轮廓表面检测与三维重构技术的研究

徐 慧<sup>1</sup> 张金龙<sup>1</sup> 刘京南<sup>2</sup> 内田敬久<sup>3</sup>

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院 江苏 南京 210042;

2. 东南大学 自动化学院 江苏 南京 210096;

3. 日本爱知工业大学 智能机械工学科, 丰田市 470-0392)

**[摘要]** 基于零件实物样件的几何模型反求技术已成为 CAD/CAM 领域的研究热点之一, 现提出一种基于面结构光投影法的复杂零件轮廓表面检测与三维重构技术. 此技术通过向被测物体表面投射条纹光栅, 得到包含物体表面形状的畸变条纹, 畸变条纹图像由 CCD 拍摄并传送至计算机, 通过对畸变条纹图像的分析处理, 得到被测物体表面的三维外形数据信息. 根据检测得到的三维点云数据的特点, 用基于曲率抽样的拓扑矩形阵列进行了 NURBS 曲面拟合. 实验结果表明基于面结构光投影法的重构系统具有检测准确、快捷、非接触等特点, 且能对复杂零件外形进行有效检测与三维重构.

**[关键词]** 逆向工程, 结构光, 形状检测, 三维重构

**[中图分类号]** TH165 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2011)02-0026-05

## Research on the Part Surface Measurement and 3 D Reconstruction

Xu Hui<sup>1</sup> Zhang Jinlong<sup>1</sup> Liu Jingnan<sup>2</sup> UCHIDA Yoshihisa<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. Automatization College, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. Department of Intelligent Machinery Engineering, Aichi Institute of Technology, Toyoda 470-0392, Japan)

**Abstract:** The reverse engineering of geometric model based on part exemplar has become one of the research focuses in CAD/CAM field. This paper presents the methods of 3D shape measurement and reconstruction based on surface. The measurement principle is deduced and the mathematics model is established. The deformed grating pattern appears when the standard grating pattern is projected onto the specimen. The deformed grating pattern image contains information about the surface topography of 3D object. The deformed grating pattern is input into a computer by CCD camera and processed by a series of procedures to obtain the digital point clouds of geometrical surfaces of the measured object. According to 3D shape measured data, non-uniform rational b-spline (NURBS) surface fitting based on an extracted topology array is made. Experimental result shows that the system can realize 3D shape measurement and reconstruction of complex surface.

**Key words:** reverse engineering, structured light, shape measurement, 3D reconstruction

逆向工程,是指从实物上采集大量的三维坐标点,并由此建立该物体的几何模型,进而开发出同类产品的先进技术.复杂曲面的逆向工程是逆向工程的难点之一,它是根据曲面的测量规划,对曲面进行数字化扫描检测,再将数字点云进行曲面重构生成 CAD 模型,它在农业机械的犁体曲面、旋耕刀曲面、叶片曲面等设计和制造业中有着广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>.如何高效率、高精度地将零件进行数字化,如何有效地依据零件表面的数字化结果实现曲面重构是其关键问题.零件表面检测技术的发展经历了从人力检测、人工检测、电检测到计算机辅助检测的阶段.长期以来,因为制造水平的限制和工艺的不发达,通用量具和专用检验用具存在诸多弊端,不能精确检验被测零件的某些关键部位.本文提出了一种通过采用结构光投影方式实现对物体形状三维检测和物象重建的方法,该方法通过运用结构光投影和计算机图像技术,从被物体

收稿日期: 2010-11-21.

基金项目: 国家“863”计划项目(2005AA303610)、江苏省自然科学基金项目(BK2009406).

通讯联系人: 张金龙, 博士, 副教授, 研究方向: 超精密定位技术. E-mail: ZJL0310@163.com

表面形状所调制的畸变条纹模式中,提取物体形状的三维信息,快捷有效地实现三维物体的形状检测和物像重建,具有检测过程完全非接触、准确、快捷、数据空间分辨率高等特点,是一种具有较高应用价值和发展前景的技术。

1 基本原理

1.1 基本原理

三维物体形状检测基于面结构光投影的三角测量法,如图 1 所示。被测物体、投影点和观测点在空间上形成三角关系。当用基准光栅条纹投影到被测物体上时,由于物体表面形状凹凸不平,光栅条纹发生了畸变,这是由于向物体投射的光栅条纹信号受被测物体表面形状调制所致。因此,从观察点处所获得的畸变光栅条纹图像包含了物体表面形状的三维信息。

三维形状检测中,由摄像头获取被物体表面形状调制后的光栅条纹信号,再通过图像采集卡将其以数字化的形式送入计算机中,经过剪切、平滑、锐化、二值化、细线化等图像处理环节,可以提取出图像中有用的位置信息。根据观测面(摄像头成像面)与被测物体间的三维空间关系,可以进一步得到物体表面形状相应点的三维坐标,从而推断出被测物体的表面形状。

1.2 数学模型

基于面结构光投影的三维检测系统几何原理如图 2 所示。图中,三维空间坐标系代表整个系统所处的空间位置,二维观测坐标系则代表 CCD 摄像头的成像平面。假设被测目标物体置于以空间坐标系原点  $O(0\ 0\ 0)$  为中心处; CCD 摄像机头的光轴与空间三维坐标系的  $Z$  轴重合,摄像头的光心位于空间三维坐标系的  $B$  点  $(0\ 0\ l)$  处,成像平面和摄像头的光轴垂直,与摄像头光心的距离为  $v$ ,且摄像头成像平面的  $x$ 、 $y$  轴分别与空间三维坐标系的  $X$ 、 $Y$  轴平行, $O$  点  $(0\ 0\ l+v)$  为成像中心点,也是二维观测坐标系  $(x\ y)$  的原点;投影仪的投影光轴在空间三维坐标系的  $Y-Z$  平面内,且通过空间三维坐标系的原点,与  $Z$  轴成  $\alpha$  角,投影仪的光心到  $Z$  轴的距离为  $d$ ,到  $Y$  轴的距离为  $l$ 。

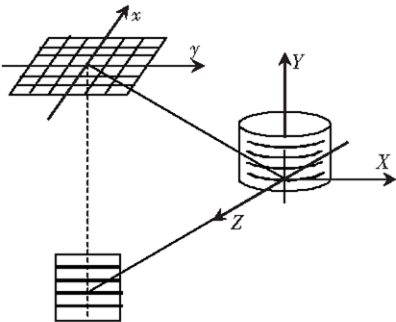


图 1 结构光投影测量原理

Fig.1 Measurement principle of surface structured light projection

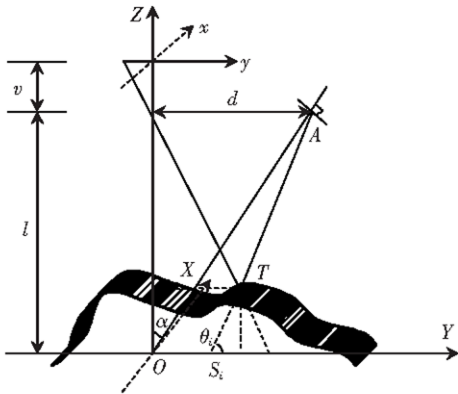


图 2 测量几何原理图

Fig.2 Geometry sketch of measurement

从摄像头透镜成像原理和系统空间位置关系,可以建立三维空间坐标系和二维观测坐标系(摄像头成像面上约定的坐标系)之间的联系,从而建立系统的数学模型。设第  $i$  次投影光栅条纹光平面与参考平面所成夹角为  $\theta_i$ ,且在  $Y$  轴上截距为  $S_i$ 。空间物体表面上一点在空间坐标系中表示为  $T(X_T\ Y_T\ Z_T)$ ,在成像平面上对应观测坐标系的点  $t(x_i\ y_i)$ ,则点  $T$  与  $l, d, v, \theta_i, S_i, x_i, y_i$  必然存在某种函数关系,即:

$$\begin{cases} X_T = f(x_i, y_i, l, d, v, \theta_i, S_i), \\ Y_T = g(x_i, y_i, l, d, v, \theta_i, S_i), \\ Z_T = h(x_i, y_i, l, d, v, \theta_i, S_i), \end{cases} \quad (1)$$

其中参数  $l, d$  可以由直接测量获得,  $v, \theta_i, S_i$  可以经间接测量或根据已知数据计算出来,所以只要找出函数关系  $f, g, h$ ,就可以由已知参数求得被测曲面的三维坐标。

依据图 2 中各参数的几何关系,可得被测曲面上任意一点  $T(X_T\ Y_T\ Z_T)$  与其在观测坐标系中对应点

$t(x_i, y_i)$  之间的对应函数关系为:

$$\begin{cases} X_T = W \cdot x_i, \\ Y_T = W \cdot y_i, \\ Z_T = W \cdot v + l, \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $W = k/(H_i + y_i l)$   $k = l \cdot d$   $H_i = ivh - vd$ . 由式(2)可见, 通过测量或计算已知变量  $l, d, h, v, x_i$  和  $y_i$  等, 就可以求得被测物体表面的三维参数.

## 2 数据采集和处理

### 2.1 数据采集

系统构成如图 3 所示, 数据采集时, 通过投影仪向被测物体投射基准结构光栅条纹, 位于投影仪下方的 CCD 摄像头将拍摄到的畸变光栅条纹图像经过图像采集卡 A/D 转换、灰度化、比例压缩等处理后, 传送到计算机, 计算机接收到图像数据后, 对图像进行预处理、阈值分割、形态处理与三维坐标转换等, 从图像中提取出有用的参数信息, 最后根据数学模型, 计算出被测物体表面的外形数据.

### 2.2 图像预处理

图像预处理的目的在于提高原始图像的分辨能力, 消除各种干扰噪声, 增强识别信号, 为后面的图像处理工作做好准备. 图像预处理主要包括图像剪切与图像滤波两部分. 图像剪切是对原始图像进行剪切, 将不必要的背景、边缘裁剪掉, 这样可以减少干扰, 提高图像处理的效果以及节省处理时间. 此外, 图像在形成、传输、接收和处理的过程中, 不可避免地存在着外部干扰和内部干扰, 如光电转换过程中敏感元件灵敏度的不均匀性、数字化过程的量化噪声、传输过程中的误差等, 通过滤波可以改善图像.

图像滤波分为线性滤波和非线性滤波. 线性滤波包括低通滤波、高通滤波、带通滤波和带阻滤波. 非线性滤波包括中值滤波、最大值滤波、最小值滤波等. 滤波的目的是为了消除噪声, 增强图像特征. 滤波器的选择应根据图像的特点和噪声的类型来确定. 例如, 对于椒盐噪声, 中值滤波效果较好; 对于高斯噪声, 低通滤波效果较好.

### 2.3 阈值分割

畸变条纹图像经过剪切、滤波后, 在分析条纹图像时仅对条纹感兴趣, 而对条纹内部以及明暗条纹之间的过渡区域不感兴趣. 因此, 需要运用阈值分割的方法将灰度图像转化为二值图像. 图像阈值分割是各项图像处理中的重要环节, 它的精确度直接影响到其后的细化处理与三维重构的效果. 近年来, 一些学者提出利用图像的二维灰度直方图(像素的灰度值分布及其邻域的平均灰度值分布所构成的直方图)的方法来进行阈值选取和图像分割. 由于这些方法利用了图像的灰度值信息和邻域的空间相关信息, 能够有效地抑制噪声, 得到较高精度的分割图像, 但运算速度慢、复杂性高, 如果没有快速算法很难应用于实时处理. 本课题采用二维最大熵阈值分割快速递推算法, 其图像阈值分割时间快, 具有良好的图像分割效果, 并且能够有效地抑制噪声, 便于实时处理, 是一种有效的阈值分割算法.

### 2.4 细化

经过阈值分割后, 畸变光栅条纹虽然被提取出来, 但是由于条纹较粗, 并且边缘扩散, 如果不进行细化处理就无法精确地算出条纹的坐标. 所以, 条纹图像细化也是图像处理的关键环节.

细化就是不断去除曲线上不影响连通性的轮廓像素, 从而获得单位宽度的中心骨架的过程. 本文采用了 Hilditch 细化算法<sup>[5]</sup>. Hilditch 细化算法是一种有效的二值图像细化算法, 其主导思想是每次扫描删除图像上的目标轮廓像素(这些像素必须满足一定的条件), 直到图像上不存在可删除的轮廓像素为止. 其特点是能较好地提取出封闭区域的轮廓骨架, 细线条纹清晰, 且运算速度很快.

### 2.5 三维坐标转换

通过条纹细化, 可以对图像上的每个像素点精确定位, 从而计算出其在二维观测坐标系中的坐标. 首先, 在图像中以  $(x_0, y_0)$  为中心, 沿垂直方向扫描各细线条纹, 然后对于其中的目标像素点, 根据下式:

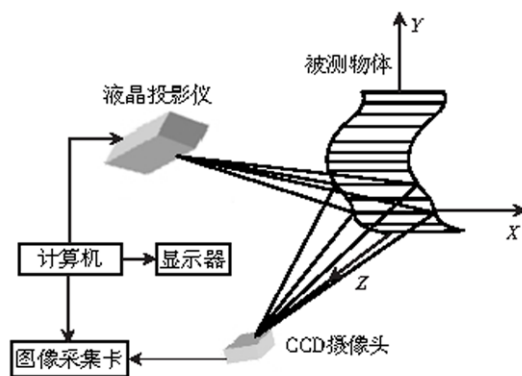


图 3 三维物体形状检测和重构系统

Fig.3 3D Shape measurement and reconstruction system

$$\begin{cases} x = (x - x_0) \times 6.66 \mu\text{m}, \\ y = (y_0 - y) \times 6.66 \mu\text{m}, \end{cases} \quad (3)$$

精确地计算出其在二维观测坐标系中的坐标  $(x_i, y_i)$ 。

最后, 将测量或计算得到变量  $l, d, h, v, x_i$  和  $y_i$  代入式 (2), 就可以求得物体上的点  $T$  在空间坐标系中的坐标  $(X_T, Y_T, Z_T)$ , 这样就获得了被测物体表面上的三维坐标信息。

### 3 三维曲面重构

检测到的畸变条纹图像经过滤波、阈值分割、细线化、设定参数等处理后, 得到大量的被测物体表面上的离散点数据 (即点云数据)。检测到的点云数据在计算机屏幕上三维显示出来, 再经过重新采样和分组排序等重构预处理, 最终采用 NURBS 法实现三维曲面重构。

#### 3.1 重构预处理

##### 3.1.1 重新采样

一般情况下, 采样后获得的点云数据量是十分庞大的, 在保持原始数据基本特征的基础上, 对冗长的数据进行重新采样<sup>[6]</sup>, 这样后续处理可以减少运算量、缩短处理时间。

##### 3.1.2 分组排序

根据点云数据的特点, 首先选择点云条纹数  $n$  作为关键词, 将所有关键词相同的点云分组; 其次, 在每一组里, 再选择点云的横轴方向坐标  $x$  为关键词进行排序。这样就可以将原来杂乱无章的点云转换成有序的点云, 更加有利于后续处理。

#### 3.2 曲面重构

对于自由曲面的描述, 目前国际上多采用 NURBS 法为统一数学描述方法, NURBS 曲面定义为:<sup>[7]</sup>

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{ij} P_{ij}}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{ij}}, \quad (4)$$

式中  $P_{ij}$  为矩形域上特征网格控制点列;  $\omega_{ij}$  为相应控制点的权因子;  $N_{i,p}(u)$  为  $u$  向的  $p$  次 B 样条基函数;  $N_{j,q}(v)$  为  $v$  向的  $q$  次 B 样条基函数;  $u$  向和  $v$  向的节点矢量分别为:

$$U = [0 = u_0 = u_1 \cdots = u_p, u_{p+1}, \cdots, u_{r-p-1}, u_{r-p}, u_{r-p+1} = \cdots u_r = 1],$$

$$V = [0 = v_0 = v_1 \cdots = v_q, v_{q+1}, \cdots, v_{s-q-1}, v_{s-q}, v_{s-q+1} = \cdots v_s = 1],$$

其中, 沿  $u$  向和  $v$  向的节点矢量的节点数分别为  $r+1$  和  $s+1$ , 其中  $r = m+p+1$ ,  $s = n+q+1$ 。

用 NURBS 方法对散乱点进行曲面重构一般需要采用数据抽样方法产生矩形拓扑网格, 然后再构造 NURBS 曲面模型<sup>[8]</sup>。本文采用改进的 shepard 局部插值函数<sup>[9,10]</sup>, 为曲面初始模型, 由基于曲率的自由曲面抽样规划方法确定基于曲率信息的抽样拓扑矩形阵列。在测量数据集合中抽取距抽样拓扑矩形阵列中每个节点最近的数据点, 产生实际的拓扑矩形阵列。对该拓扑矩形阵列进行 NURBS 拟合, 得到最终重建曲面。

### 4 实验研究

面结构光投影实验设备为 Epson EMP500 (SVGA 2000 ANSILumen), 图像由 CE-7861C CCD Camera (PAL-D) 采集, 系统以 C++ Builder 6.0 作为平台, 利用 OpenGL 编程, 对轮廓表面的检测与重构, 如图 4 所示, 其中图 4a 为零件曲面检测点云数据, 图 4b 为曲面的重构图, 结果表明, 重建的曲面模型整体性能好, 且重构难度和花费时间较低。

### 5 结论

基于面结构光投影法的复杂零件轮廓表面检测与三维重构系统, 通过向被测物体表面投射条纹光栅, 可得到包含物体表面形状的畸变条纹。畸变条纹图像由 CCD 拍摄并传送至计算机, 对这些图像进行预处理、阈值分割、条纹细化等一系列处理, 并根据相应的数学模型和图像处理算法对畸变条纹进行分析, 可得

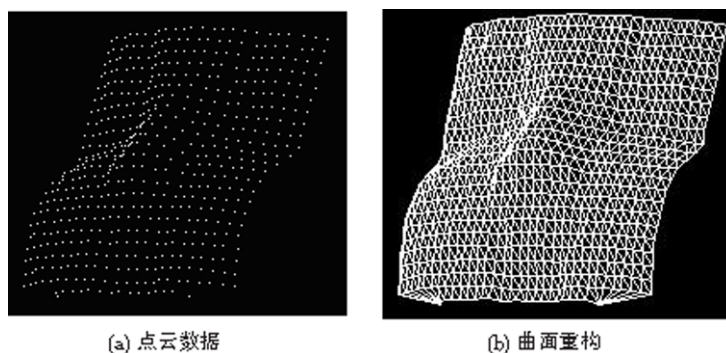


图 4 曲面三维检测与重构

Fig.4 3D shape measurement and reconstruction of the surface

到被测物体表面的三维外形数据信息. 根据检测得到的三维点云数据的特点, 用基于曲率抽样的拓扑矩形阵列进行了 NURBS 曲面拟合. 实验结果表明基于面结构光投影法的重构系统具有检测准确、快捷、非接触等特点, 且能对复杂零件外形进行有效的检测与三维重构.

## [参考文献](References)

- [1] 王亮德. 逆向工程技术在复杂曲面零件设计与制造中的应用与展望[J]. 制造技术与机床, 2009(11): 21-26.  
Wang Liangde. Application and prospect of reverse engineering in designing and manufacturing complex surface parts [J]. Manufacturing Technology and Machine Tool, 2009(11): 21-26. (in Chinese)
- [2] Dhond U, Aggarwal J. Structure from stereo—a review [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(6): 1489-1510.
- [3] Battle J, Mouaddib E, Salvi J. Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: A survey [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(7): 963-982.
- [4] Woodham R. Photometric method for determining surface orientation from multiple images [J]. Optical Engineering, 1980, 19(1): 139-144.
- [5] 夏良正. 数字图像处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001.  
Xia Liangzheng. The Processing of Digital Image [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2001. (in Chinese)
- [6] 洪军, 丁玉成, 曹亮, 等. 逆向工程中的测量数据精简技术研究[J]. 西安交通大学学报: 自然科学版, 2004, 38(7): 661-664.  
Hong Jun, Ding Yucheng, Cao Liang, et al. Data cloud direct reduction in reverse engineering [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University: Natural Science Edition, 2004, 38(7): 661-664. (in Chinese)
- [7] 严庆光, 李明哲, 付文智. 基于数字化技术的多点成形与逆向工程的集成[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5): 128-132.  
Yan Qingguang, Li Mingzhe, Fu Wenzhi. Integration of multi-point forming and reverse engineering based on digitalized techniques [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5): 128-132. (in Chinese)
- [8] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
Zhu Xinxiong. Freedom Technology of the Shape Curve [M]. Beijing: Scientific Press, 2000. (in Chinese)
- [9] BradeLy C, Vickers G W. Free-form surface reconstruction for machine vision rapid prototyping [J]. Optical Engineering, 1993, 32(9): 2191-2199.
- [10] Paul J Besl, Neil D McKay. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.

[责任编辑: 刘 健]