

文章编号: 0253-2239(2004)07-978-5

# 基于虚拟圆柱的曲面拼接方法\*

何海涛 郭红卫 于赢洁 陈明仪

(上海大学精密机械工程系, 上海 200072)

**摘要:** 圆柱坐标下的多视角(孔径)扫描拼接方法主要针对类似回转物体面形的拼接测量,用该方法在对非单一回转轴,或者近似回转轴位置远离坐标轴形式的一类物体面形的拼接测量时遇到了困难,把拼接方法推广到基于虚拟圆柱可以解决这一难题。为此提出了基于虚拟圆柱原理的曲面拼接方法,给出了如何估计虚拟圆柱的半径,以及轴心坐标的计算方法,推导了基于虚拟圆柱的坐标转换方程,通过计算机模拟验证了其精确性,并通过实验证明这种方法对解决三维复杂物体表面特别是多视角测量获得面形的拼接测量问题是十分有效的。

**关键词:** 光学测量; 三维测量; 重叠扫描拼接; 平均曲率; 虚拟圆柱

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Novel Connection Method Based on Virtual Cylinder for Three-Dimensional Surface Measurement

He Haitao Guo Hongwei Yu Yingjie Chen Mingyi

(Precision Mechanical Department, Shanghai University, Shanghai 200072)

(Received 7 April 2003; revised 3 September 2003)

**Abstract:** The multi-view (i. e. multi-aperture) overlapping scanning connection technique in cylindrical coordinates is mainly used in connecting measured surface of quasi-rotating objects. It comes into difficulty in surface measurement of object with non-single revolving axis, or whose quasi-revolving axis is comparatively far from the coordinates axis. A novel connection method is presented on the basis of the principle of the virtual cylinders to solve this problem. This extended connection method on the basis of the virtual cylinders for three-dimensional shape measurement is described, the algorithms how to calculate the approximative radius of the virtual cylinders and the coordinates of its revolving axis are given, and the coordinates translation formula is deduced based on the virtual cylinders. The accuracy of this method has been theoretically verified by computer simulation. And the experimental measurement result of an automobile headlamp reflector reassures experimentally that the method is effective and feasible for three-dimensional complex shape connection, especially to obtain the connected surface tested from different views.

**Key words:** optical measurement; three-dimensional shape measurement; multi-view overlapping scanning technique; mean curvature; virtual cylinder

## 1 引 言

基于光栅投射的光学测量方法可精确测量大的、复杂三维物体面形的形状轮廓<sup>[1~3]</sup>,但在实际应

用中存在一些限制,被测物体的轮廓往往不能单次测量完成,需在多个视角下测量,并且拼接合成才能得到所需要的测量数据<sup>[4,5]</sup>。多孔径(视角)重叠扫描拼接技术是解决这些问题一个很有效的方法<sup>[6~10]</sup>,它从不同位置(视角)测量多个小块测量面积(子孔径),并使相邻子孔径部分重叠,利用重叠区域求解相邻两个子孔径的相对位置关系,从而消除多个视角测量时由于被测物体和传感装置相对运动

\* 国家自然科学基金(50205016)、上海市“光科技专项”(011461059)资助课题。

E-mail: hspear@163.net; hspear@tom.com

收稿日期:2003-04-07;收到修改稿日期:2003-09-03

带来的误差影响。

圆柱坐标下多孔径扫描拼接技术(郭法)<sup>[9,10]</sup>主要针对对类似 360°回转物体面形的拼接测量,该算法采纳迭代操作进行误差向量求解,保证了拼接测量的精度。然而,实践证明,郭法主要针对具有单一近似回转特征形式这类物体面形的拼接测量。当被测面形比较复杂,譬如由多片曲面构成;或者其近似回转轴远离相应坐标轴(通常为测量工作转台的旋转轴)时,采用上述拼接方法常导致拼接失败。

本文提出基于虚拟圆柱的拼接方法,将圆柱坐标下多孔径扫描拼接技术的迭代算法推广到不局限于只具有单一回转轴特征表面,有效地扩大了重叠扫描拼接方法的实用范围,并且仍然可以高精度地实现拼接。

## 2 算法模型

### 2.1 虚拟圆柱的建立

从曲面基本理论可以得知,当圆柱面的半径为  $\rho$  时,平均曲率  $H$  为  $-1/2\rho^{[11]}$ ,因此可以针对被测物体面形的几何特征,构造一个近似圆柱,称之为虚拟圆柱,则其半径为

$$\rho = \left| -\frac{1}{2H} \right|, \quad (1)$$

从而可以把被测表面转换到基于该虚拟圆柱来进行有效地拼接。转换的技术关键在于如何确定虚拟圆柱的半径  $\rho$ ,以及轴坐标  $(X_0, Y_0)$ 。

### 2.2 虚拟圆柱半径 $\rho$ 的估计

被测物体表面的局部重叠区域可以用最小二乘多项式来逼近。注意到,采集获得的数字图像的像素点转换到空间三维点坐标为  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ ,  $(i, j)$  为对应像素点。用三维数据点  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$  及其邻域  $M \times N$  个像素通过最小二乘方法拟合该点附近的三维表面,在得到的曲面方程基础上,计算其一阶、二阶微分算子  $f_x, f_y, f_{xx}, f_{xy}, f_{yy}$ ,其局部表面的平均曲率  $H$  为<sup>[12]</sup>:

$$H = \frac{(1+f_x^2)f_{xx} + (1+f_y^2)f_{yy} - 2f_x f_y f_{xy}}{2(f_x^2 + f_y^2 + 1)^{3/2}}, \quad (2)$$

将其结果代入(1)式,可以得到虚拟圆柱的半径  $\rho$ 。

### 2.3 虚拟圆柱轴心坐标的求解

对于被测物体表面的局部区域上的点集  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ ,  $(i, j)$  为对应像素点,可以近似看作是半径为  $\rho$  的虚拟圆柱上的点,即

$$\rho^2 = (X_0 - x_{i,j})^2 + (Y_0 - y_{i,j})^2, \quad (3)$$

将(3)式展开成 1 阶泰勒级数:

$$\begin{aligned} \rho^2 &= \rho_e^2 + 2(X_{0e} - x_{i,j})\delta X + \\ &2(Y_{0e} - y_{i,j})\delta Y + o, \end{aligned} \quad (4)$$

其中下标  $e$  表示有误差的量,  $o$  表示无穷小量,  $\delta X = X_0 - X_{0e}$ ,  $\delta Y = Y_0 - Y_{0e}$ 。

针对每测得的重叠邻域  $M \times N$  个点坐标,可以列出  $M \times N$  个方程构成方程组,轴坐标  $(X_0, Y_0)$  的最小二乘解可以采用迭代法求出。

### 2.4 基于虚拟圆柱的坐标转换方程

圆柱坐标下可用下式表示多孔径扫描拼接技术的原理<sup>[9,10]</sup>:

$$s_0(\rho_{oi}, \theta_{oi}, z_{oi}) = As(\rho_i, \theta_i, z_i), \quad (5)$$

式中  $s_0, s$  是重叠区域,  $(\rho, \theta, z)$  是三维集的圆柱坐标表现形式,  $A$  是压缩映射算子。

参阅文献[9]第(15)式的第一行组成线性方程组,可以求得满足精度要求的误差向量,实现曲面拼接。

本文继承这一思想。设重叠区域的曲面上某点三维点坐标值为  $(x, y, z)$ , 满足方程

$$\rho = \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2}, \quad (6)$$

于是有

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial x} &= \frac{x - X_0}{\rho}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial y} &= \frac{y - Y_0}{\rho}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho}{\partial \alpha} &= -z \frac{y - Y_0}{\rho}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial \beta} &= z \frac{x - X_0}{\rho}, \\ \frac{\partial \rho}{\partial \gamma} &= 0, \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$\alpha, \beta, \gamma$  分别表示绕  $X$  轴,绕  $Y$  轴,绕  $Z$  轴的运动转角值。

这样,从(6)式可求得一阶泰勒展开式为

$$\rho_0 = \rho + [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4] \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \alpha \\ \Delta \beta \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中

$$\left\{ \begin{aligned} \rho_0 &= \sqrt{(x_0 - X_0)^2 + (y_0 - Y_0)^2}, \\ \rho &= \sqrt{(x - X_0)^2 + (y - Y_0)^2}, \\ a_1 &= \frac{x - X_0}{\rho}, \ a_2 = \frac{y - Y_0}{\rho}, \\ a_3 &= -za_2, \ a_4 = za_1, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

$\rho, \rho_0$  表示重叠区域基于虚拟圆柱的半径,对  $\Delta z, \Delta y,$  的变化不敏感。

圆柱坐标下多孔径扫描拼接技术的迭代方法可看作是虚拟圆柱的轴与  $z$  轴( $X_0 = 0, Y_0 = 0$ ) 重合的特例。寻找匹配点的方法同文献[9],在此不赘述。

### 3 计算机模拟

构造如下一复杂面形的待测对象,面形为一近似椭圆柱的一半。其参量方程为

$$\begin{cases} \rho = \frac{18}{1 - e \cos \theta} + 0.1(z - 50) \sin \theta, \\ x = \rho \cos \theta, \quad y = \rho \sin \theta, \end{cases} \quad (10)$$

其中  $z \in [0, 100], \theta \in [0, \pi]$ 。

重叠区域的曲面可用二次曲面方程逼近。

设多视角测量所需的工作转台旋转轴( $z$  轴)与椭圆的左焦点轴重合。如图 1 所示,从 3 个视角方向来测量面形,分别对应 3 个曲面。曲面 1 范围为  $\theta \in [\pi/2, \pi]$ , 曲面 2 范围为  $\theta \in [\pi/6, 2\pi/3]$ , 曲面 3 范围为  $\theta \in [0, \pi/4]$ 。模拟工作转台从曲面 1 的坐标运动到曲面 2 的坐标,有相对运动误差  $[\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha, \Delta \beta]$  为  $[-2.2, -1.6, -0.05, 0.017]$ , 模拟工作转台从曲面 3 的坐标运动到曲面 2 的坐标,有相对运动误差  $[\Delta x, \Delta y, \Delta \alpha, \Delta \beta]$  为  $[1.5, 2.1, 0.017, 0.034]$ 。

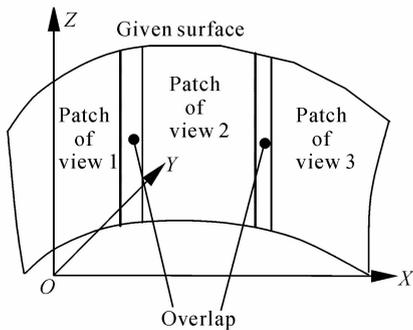


Fig. 1 The principle of multi-view connection

曲面 1 向曲面 2 的拼接过程中,采用基于虚拟圆柱的拼接方法,经过 21 次迭代,误差向量向真值收敛,计算结果为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= -2.199999999953862, \\ \Delta y &= -1.599999999985750, \\ \Delta \alpha &= -0.04999999999207, \\ \Delta \beta &= 0.0169999999989460. \end{aligned}$$

而采用郭法,曲面 1 向曲面 2 拼接过程中,采用同样的重叠区域,迭代第 40 次的误差补偿精度仅为

$10^{-6}$ , 多次迭代表明收敛速度缓慢。

当曲面 3 和曲面 2 拼接时,采用基于虚拟圆柱的拼接方法,经过 15 次迭代,误差向量向真值收敛,计算结果为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= 1.499999999962228, \\ \Delta y &= 2.099999999997091, \\ \Delta \alpha &= 0.016999999999965, \\ \Delta \beta &= 0.034000000000634. \end{aligned}$$

而采用郭法,曲面 3 向曲面 2 拼接过程中,采用同样的重叠区域,多次迭代计算结果呈发散,拼接无法实现。

### 4 实验结果

实验系统如图 2 所示。针对一个复杂面形的轿车车灯反射镜进行测量。从三个视角 ( $0^\circ, 20^\circ, -20^\circ$ ) 获得被测物体的面形。图 3 显示了视角 1 和视角 2 重叠区域的曲面拼接三维图。以视角 1 ( $0^\circ$ ) 为基准,视角 2 ( $20^\circ$ ) 向视角 1 迭代拼解,虚拟圆柱半径为:

$$\rho = 54.48479755366357,$$

虚拟圆柱轴心为:

$$\begin{aligned} X_0 &= 75.09318815954417, \\ Y_0 &= 5.23141422182996. \end{aligned}$$

误差向量计算结果为:

$$\begin{aligned} \Delta x &= -1.06871589345982, \\ \Delta y &= -0.75126624424724, \\ \Delta \alpha &= 0.01030939412536, \\ \Delta \beta &= 0.00823688043460. \end{aligned}$$

视角 3 向视角 1 迭代拼解采用同样的过程,只是构造的虚拟圆柱半径和位置不同。

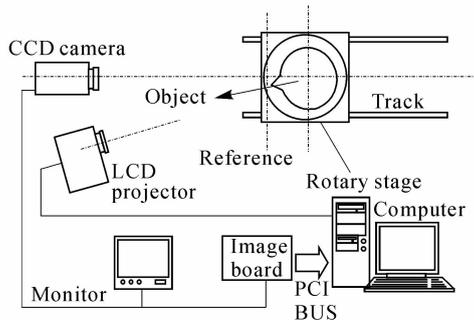


Fig. 2 The scheme of the experimental system

拼接获得的三维图形如图 4 所示。

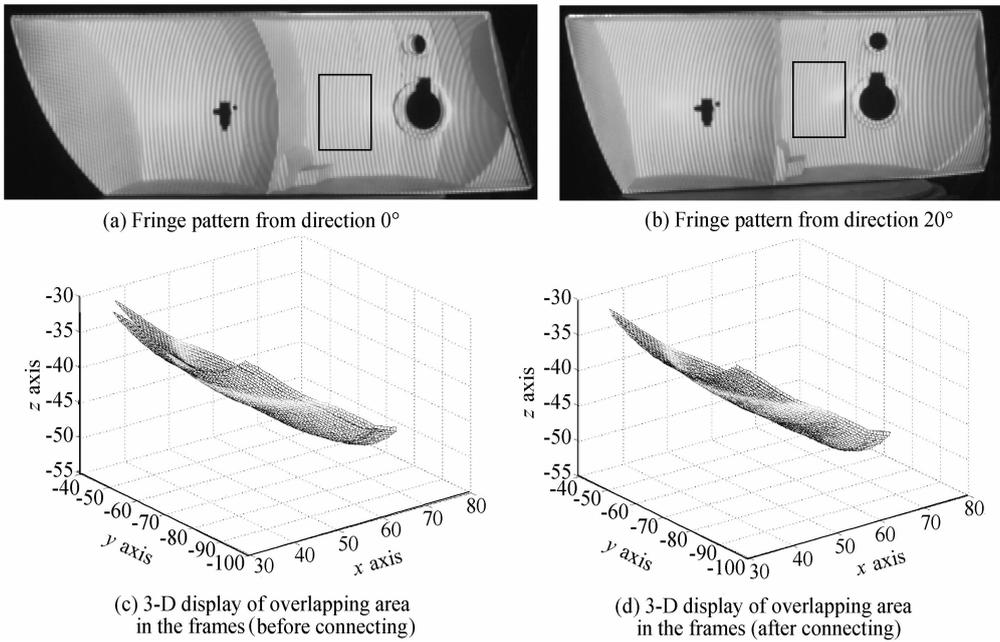


Fig. 3 Diagram of connecting of view 1 and view 2. (a) Fringe pattern from direction  $0^\circ$ , (b) Fringe pattern from direction  $20^\circ$ , (c) 3-D display of overlapping area in the frames (before connecting), (d) 3-D display of overlapping area in the frames (after connecting)

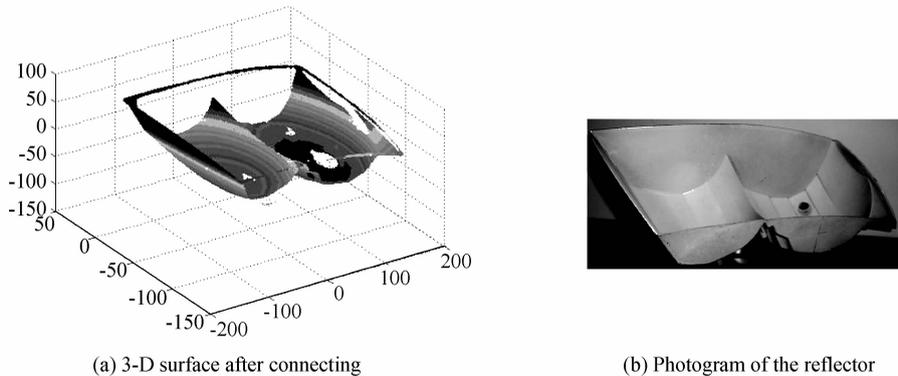


Fig. 4 Measurement results of the automobile headlamp reflector. (a) 3-D surface after connecting, (b) photograph of the reflector

**结论** 当被测面形为非单一回转特征形式时,采用圆柱坐标下多孔径扫描拼接技术难以实现有效拼接。通过计算机模拟和实验表明,利用本文提出的基于虚拟圆柱原理的曲面拼接方法,可以把被拼接的对象推广到不局限于只具有单一回转轴特征表面,解决了三维较复杂物体表面特别是多视角测量获得的面形的拼接测量问题。计算机模拟表明此方法理论拼接误差非常小,精度可达  $10^{-11}$ 。这一方法为以后工程实际应用中,进行多次测量并拼接合成打下了理论基础,有利于解决传统测量中测量范围小和有阴影区域的面形测量问题。在实际应用中,有多少个重叠区域应构造多少个虚拟圆柱进行拼接。

## 参 考 文 献

- 1 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Review of optical profilometry based on pattern projection. *Optical Technology* (光学技术), 1998, **24**(5): 57~60, 64 (in Chinese)
- 2 Nouri T, Federal S. Three-dimensional scanner based on fringe projection. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(7): 1961~1963
- 3 Lehmann M, Jacquot P, Facchini M. Shape measurements on large surfaces by fringe projection. *Experimental Techniques*, 1999, (March/April): 32~35
- 4 Tian Feng, Zhao Hong, Chen Wenyi *et al.*. 3-D measurement system based on the spatial coordinatestranformation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(2): 199~203 (in Chinese)
- 5 Chen Mingyi, Cheng Weiming, Wang Cunwu. Multi-

- aperture overlap-scanning techniques for large aperture test. *Proc. SPIE*, 1991, **1553**: 626~635
- 6 Chen Mingyi, Wu Dezhu, Cheng Weiming. Fring-pattern connection method for shape measurement of 3-D large objects. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(1): 73~79 (in Chinese)
- 7 Cheng Weiming, Chen Mingyi, Ding Zheng. Surface testing for 3-D object using multiaperture connection in cylindrical coordinates. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(6): 811~815 (in Chinese)
- 8 Cheng W M, Chen M Y. Surface measurement of optical cylinder using multiaperture overlap-scanning techniques (MAOST). *Proc. SPIE*, 1996, **2860**: 321~328
- 9 Guo Hongwei, Chen Mingyi. An iterative algorithm of multi-aperture transformation and connection techniques in cylindrical coordinates. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(8): 1047~1052 (in Chinese)
- 10 Guo Hongwei, Chen Mingyi. Multi-view connection technique for 360-deg three-dimensional measurement. *Opt. Engng.*, 2003, **42**(4): 900~905
- 11 Zhu Xinxiong. *Free-From Surface & Curve Modeling Techniques* (自由曲面曲线造型技术). Beijing: Science Press, 2000. 28~31 (in Chinese)
- 12 Li Songtao, Zhang Changshui, Rong Gang *et al.*. 3-D range image surface description via least squares surface fitting. *Acta Automatic Sinica* (自动化学报), 2002, **28**(2): 310~313 (in Chinese)