

# 基于线结构光的空间圆高精度测量算法<sup>\*</sup>

张瑞峰 李士亮

(天津大学电子信息工程学院 天津 300072)

**摘 要:** 分析了空间圆透视投影的数学模型,由于透视投影畸变的存在,提出了基于线结构光的空间圆几何参数的非接触测量方法,利用光条中心和圆孔边缘图像,筛选出圆孔的图像坐标,进而获取圆孔上的三维坐标,并采用将三维数据转换成二维数据处理的方法来拟合出圆孔的几何参数。实验结果表明,该方法减小了空间圆透视投影形状畸变引起的测量误差,能快速采集圆孔的大量三维数据点,精确的拟合空间圆的几何参数,具有较高的精度。

**关键词:** 线结构光;最小二乘;平面方程;坐标系转换

**中图分类号:** TP391.4      **文献标识码:** A

## High precision measurement method of parameters of space circle based on line structured light

Zhang Ruifeng Li Shiliang

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 30072)

**Abstract:** Based on analysis of model of perspective projection transformation of space circle, high precision measurement method of parameters of space circle based on line structured light is proposed in this paper, which is considered perspective projection distortion. The image coordinate of hole is selected by edge of the hole and the center of light, and three-dimensional coordinates of the hole is obtained with parameter of line structured light system. The method that Three-dimensional data is transformed two-dimensional data to fit the hole is employed. Experimental results show that the error caused by perspective projection distortion is reduced, as well as lots of three-dimensional data can be obtained in a short time, which are used to fit the circle precisely.

**Keywords:** line structured light; least-squares; plane equation; coordinate system transformation

## 0 引 言

检测技术是现代化工业的基础技术之一,是保证产品质量的关键。随着工业制造技术和加工工艺的提高和改进,对检测手段、检测速度和精度提出了更高的要求,这就要求测量系统和数学模型应该具有更高的科学性和可靠性。

结构光视觉检测系统具有大量程、非接触、速度快、系统柔性好、精度适中等优点,广泛应用于三维模型重建、物体表面轮廓三维信息测量等领域<sup>[1-2]</sup>。在三维测量系统中,线结构光系统<sup>[3-8]</sup>应用于各个方面,其中往往需要获取圆形特征的几何尺寸及空间位置信息。基于视觉的平面圆参数测量方法在测量领域得到了广泛的应用,但在这对摄像机与平面圆的位置关系有严格的要求,因此限制了其应用,且不适用于高精度要求的场合。天津大学精密测试计量技术

及仪器国家重点实验室采用基于椭圆拟合求取圆中心对应点,直接测量圆中心的空间三维坐标,该方法具有较高精度。文献[9-10]提出了1种平面圆几何参数的非接触测量方法,采用立体视觉以及空间圆拟合获取空间圆的几何中心的三维空间坐标和圆半径等几何参数,但是双目立体视觉存在匹配的难点问题<sup>[11]</sup>,影响测量精度。

为测量柴油机缸盖上的多个圆孔的几何参数及位置关系,本文分析了空间圆透视投影的数学模型,考虑到透视投影畸变的存在及位置关系的需求,设计了线结构光扫描系统,利用光条中心和圆孔边缘图像可以同时获取多个圆的三维数据点,并在圆所在的平面内拟合圆,再将圆心坐标转换到三维坐标系(线结构光的测量坐标系)求解圆的相对位置关系,该系统可以非接触测量空间圆的几何参数,同时获取多个空间圆的相对位置关系,且具有较高的测量精度。

本文于2011年8月收到。

<sup>\*</sup> 基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876074)

©1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

## 1 空间圆的数学模型

由于摄像机模型为透视投影,透视投影变换对圆来说,不是保形变换,当摄像机像面与空间圆所在的平面不平行时,必然存在透视投影畸变,圆在图像平面上的投影不是一个标准圆。空间圆的透视投影变换模型如图1所示。设空间圆 $\Gamma_1$ 所在的世界坐标系 $\Omega_1(x_w, y_w, z_w) \in R^3$ 的在摄像机的投影中心 $O$ , $Z_w$ 轴垂直于空间圆 $\Gamma_1$ 所在的平面 $\pi_1$ ,则空间圆 $\Gamma_1$ 实际上是由空间圆锥 $C$ 与平面 $\pi_1$ 的交线。

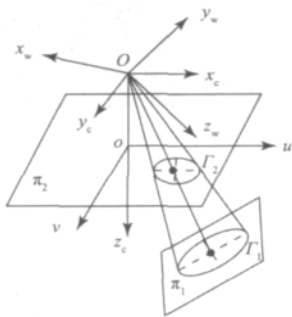


图1 空间圆的透视投影变换模型

设空间圆的圆心三维坐标为 $C(x_c, y_c, z_c)$ ,半径为 $r$ ,圆上任意一点坐标为 $X(x_i, y_i, z_i)$ ,圆所在的平面 $\pi$ 的方程为:

$$N(X - C) = 0 \quad (1)$$

其中: $N$ 为平面 $\pi$ 的单位法向量。若 $U$ 和 $V$ 也为单位向量,且向量 $U, V$ 和 $N$ 构成一个右手正交坐标系,则空间圆的参数方程可以表示为:

$$X = C + r(U\cos\theta + V\sin\theta) = C + rW(\theta) \quad (2)$$

其中: $\theta \in [0, 2\pi]$ ,  $W(\theta) = U\cos\theta + V\sin\theta$ 。由式(2)可知,空间圆上任意一点应该满足: $|X - C| = r$ ,即圆上所有点到圆心的距离都相等,由式(1)可知, $X$ 必然位于同一平面上。

## 2 空间圆几何参数线结构光的测量法

当空间圆所在平面与图像平面间的夹角比较大,由于透视投影畸变的存在,不能简单地以椭圆拟合的中心为空间圆透视投影的图像坐标。为了快速测量空间圆的几何参数,克服平面圆几何参数测量的局限性,且避免立体视觉中的匹配难点,提出了线结构光测量空间圆几何参数的方法。主要步骤为:

1) 建立线结构光测量系统,标定摄像机的内部参数,光平面的参数,导轨方法参数。

2) 圆孔三维数据获取是关键点,在此没有在三维数据里提取特征点,而是在图像坐标系控制圆上的图像坐标,再求取对应的三维坐标。由于圆孔上的二维点既位于光条中心又位于圆的轮廓上,在光条中心提取后,求取同一图片的边缘,具有这种性质的点被筛选出来,由此求出圆上的图像

坐标,由步骤1)中标定好的系统参数进而求出对应的三维数据,光条中心和边缘交集的效果如图2所示。系统获取三维数据的流程图如图3所示。

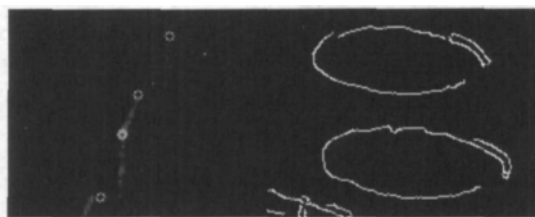


图2 圆孔边缘点的图像坐标

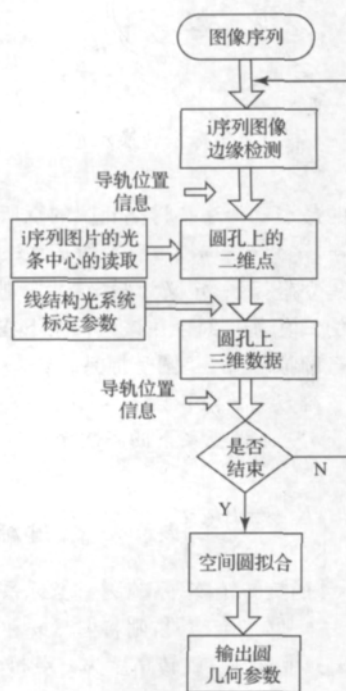


图3 算法流程

3) 由步骤2)中获取的空间圆的三维数据,采用将三维数据转成二维数据再拟合的方法,求解出空间圆的几何中心,半径及平面所在法向量。

## 3 数据处理

### 3.1 平面拟合

通过上述方法获得圆的三维数据后,由于圆上的三维点位于同1个平面上,采用最小二乘的方法对该平面进行拟合<sup>[12-15]</sup>,设在系统的测量坐标系下圆的三维点为所在的平面为:

$$ax_i + by_i + cz_i + d = 0 \quad (3)$$

以圆上的点到该平面的距离平方和为目标建立优化函数,如式(4):

$$f(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n l_i^2 \quad (4)$$

式中:  $l_i = |ax + by + cz + d| / (a^2 + b^2 + c^2)^{1/2}$ , 使  $f(a, b, c, d) = \sum_{i=1}^n l_i^2 \rightarrow 0$ , 求解出  $a, b, c, d$ , 由此得到了圆所在平面的方程。以该平面为  $xoy$  面, 其法向量为  $z$  轴, 建立坐标系, 称为圆坐标系。

### 3.2 坐标系转换

坐标系转换示意图如图4所示。

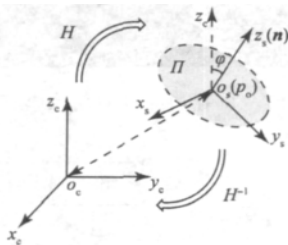


图4 坐标系转换示意

由3.1中的最小二乘法获得空间圆的点所在平面  $\pi$  的单位法向量  $n = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T$ , 以平面  $\pi$  为  $xoy$  面, 单位法向量  $n$  为  $z$  轴建立坐标系, 定义为圆坐标系, 则在该坐标系下圆上所有点的  $z$  值为0, 即可在该坐标系下在  $xoy$  面内用最小二乘法进行圆拟合。  $p_0$  是圆坐标系  $o_s x_s y_s z_s$  的原点(可以以圆上某个三维点为该点), 设  $p = [x \ y \ 0 \ 1]^T$  为圆上的空间点在  $x_c o_c y_c z_c$  坐标系下的齐次坐标, 则:

$$p = H p_c \quad (5)$$

其中,  $H = \begin{bmatrix} R & -R p_0 \\ 0^T & 1 \end{bmatrix}$  表示  $o_s x_s y_s z_s$  坐标系到系统测量坐标系的  $4 \times 4$  的旋转矩阵。系统测量坐标系  $x_c o_c y_c z_c$  的  $z$  轴方向向量为  $z_c = [0 \ 0 \ 1]^T$ , 则将向量  $n$  和  $z_c$  对准的旋转轴为  $\alpha = (n z_c) / \|n z_c\|$ , 旋转角度为  $\varphi = \arccos(n \cdot z_c)$ 。因此  $R$  由式(6)计算:

$$R = \alpha \alpha^T + \cos \varphi (I - \alpha \alpha^T) + \sin \varphi (I \alpha) \quad (6)$$

式中:  $I$  为  $3 \times 3$  的单位正交矩阵,  $I \alpha =$

$$\begin{bmatrix} 0 & -\alpha_3 & \alpha_2 \\ \alpha_3 & 0 & -\alpha_1 \\ -\alpha_2 & \alpha_1 & 0 \end{bmatrix} \text{—— 向量 } \alpha \text{ 定义的反对称矩阵。}$$

由式(5)将空间圆在系统测量坐标系  $x_c o_c y_c z_c$  下的三维坐标转换到圆坐标系下  $o_s x_s y_s z_s$  坐标系下。在圆坐标系下, 空间圆的点  $z$  值为0, 即可在  $xoy$  面内, 采用最小二乘的方法对圆进行拟合, 得到平面圆的圆心后, 由  $H^{-1}$  转换到系统测量坐标系  $x_c o_c y_c z_c$  下。

## 4 实验及分析

为了验证所提出方法的可行性, 本文采用维视 MV-1394 接口高分辨率工业数字摄像机, 焦距为 12 mm 日本 computar 镜头, 北京微纳光科的精密导轨以及陕西华科光电有限公司生产的激光投射器组成线结构光视觉系统, 激

光器和摄像机安装在同一滑动块上(二者相对位置不变)向斜下方俯视投射和拍摄, 由步进电机拖动沿导轨作一维平移扫描, 如图5所示。

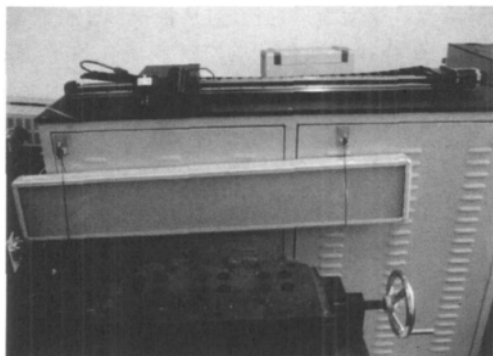
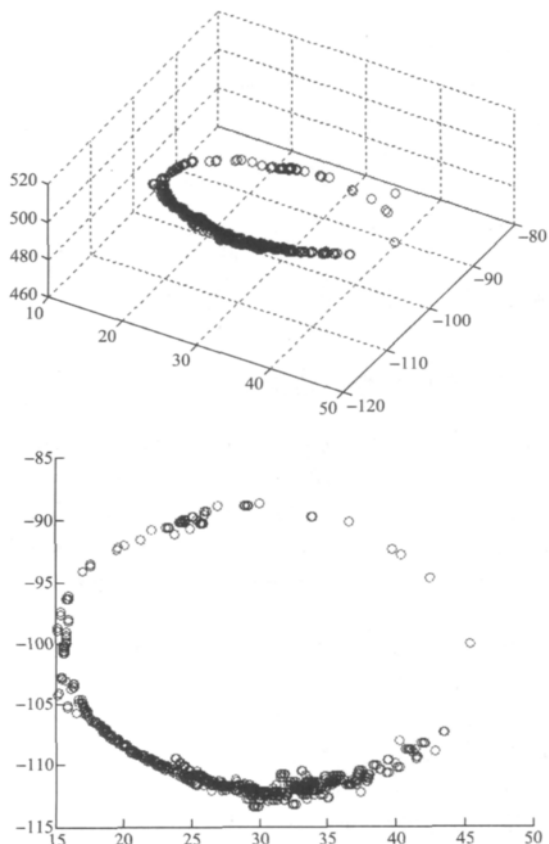


图5 被动式线结构光扫描系统

该系统对1个直径为30 mm的圆孔进行测量, 实验中的圆孔所在平面与摄像机平面大约成  $60^\circ$ 。采用步骤3)中方法获取圆孔的三维数据, 并用3中所述的数据处理方法处理三维数据。其中在系统测量坐标系下圆平面的方程为:

$$-0.021x + 0.662y + 0.749z = 300.115$$

圆孔的圆心坐标为: (163.446, -104.532, 493.231), 半径为 14.916 6。获取的圆孔的三维数据及圆坐标系下的数据图如图6所示。



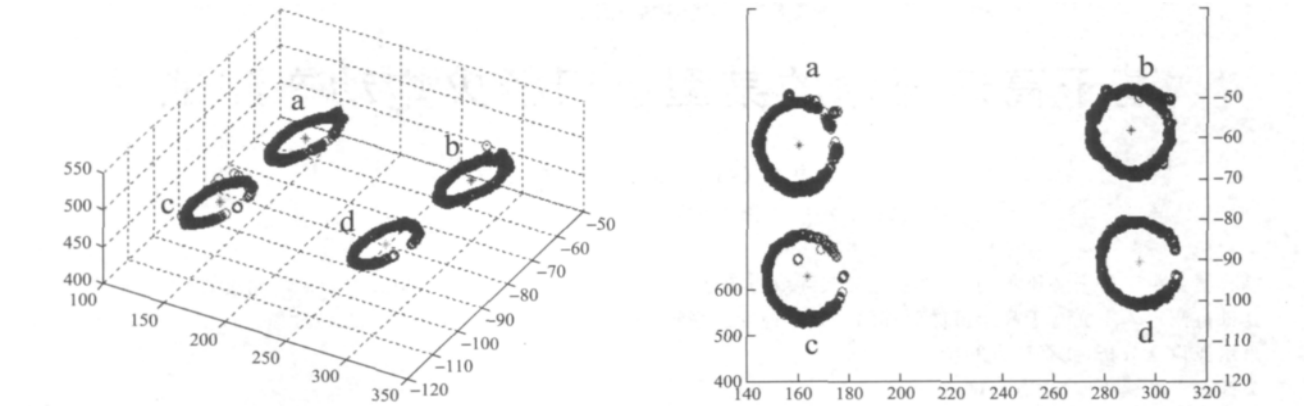


图 6 圆孔的三维数据图及平面圆孔数据

为了验证测量精度,对同 1 个圆孔及不同圆孔进行多次测量,部分测量数据如表 1、表 2 所示。数据拟合的绝对偏差 $<0.326\text{ mm}$ ,平均偏差 $<2.17\%$ 。相对距离的测量绝对误差 $<0.325$ ,平均误差 $<0.25\%$ 。实验表明该方法测

量空间圆几何参数切实可行,具有较高精度。由图 6 可见,获取的三维点有干扰点,在获取图像的二维控制点的环节可以进一步改进,以提高整体的测量精度。

表 1 圆孔的多次测量数据 (单位:mm)

圆孔标号	圆心坐标			测量半径	实际半径	绝对误差	相对误差
a	163.446	-104.532	493.231	14.916	15.000	0.084	0.56%
a	163.421	-105.012	493.203	15.106	15.000	0.106	0.71%
a	162.982	-104.043	493.159	15.230	15.000	0.230	1.53%
a	163.031	-104.215	492.856	14.879	15.000	0.121	0.81%
a	163.452	-104.551	493.251	15.326	15.000	0.326	2.17%
b	160.083	-68.796	461.765	15.249	15.000	0.249	1.66%
c	293.732	101.161	492.796	15.165	15.000	0.165	1.1%
d	290.171	-65.265	461.303	15.216	15.000	0.216	1.44%

表 2 圆孔的相对位置测量数据 (单位:mm)

两点间距	测量值	实际值	绝对误差	相对误差
ac	47.761	48.000	0.239	0.5%
bd	47.885	48.000	0.115	0.24%
ab	130.325	130.000	0.325	0.25%
cd	130.137	130.000	0.137	0.11%

5 结 论

本文提出的线结构光测量空间圆的几何参数的方法,克服了相机平面和圆孔所在平面位置关系的影响,同时还避免双目立体视觉方法中匹配的难点,该线结构光系统同时获多个圆孔的三维数据,采用将三维数据转换成二维数据的方法求解圆的几何参数及相对位置关系,完全能满足实际需求。对于线结构光系统测量系统,圆孔边缘三维数据获取方式,数据拟合方法进行改进,线结构光测量空间圆几何参数方法的精度还可以提高。该方法对视觉方法在空间的圆的测量方面具有借鉴意义。

参 考 文 献

[1] 吕乃光,孙鹏,娄小平,等. 结构光三维视觉测量关键技术的研究[J]. 北京信息科技大学学报,2010,25(1):1-5.

[2] 张万江,许敏. 基于结构光视觉的激光拼焊焊缝背面质量检测方法研究[J]. 仪表技术与传感器,2010(9):84-87.

[3] 张广军,刘震,魏振忠,等. 基于线结构光的四通道舵偏角同步动态测量系统[J]. 仪器仪表学报,2010,31(8):1910-1915.

[4] 边琰,郭彤,张国雄. 基于线结构光的工件台阶特征尺寸测量方法研究[J]. 机床与液压,2009,37(6):129-134.

[5] 田庆国,葛宝臻. 基于激光三维扫描的人体特征尺寸测量[J]. 光学精密工程,2007,15(1):84-88.

[6] 赵庆祥,曾丹,张之江. 编码结构光技术在人脸建模中的应用[J]. 电子测量技术,2010,33(1):114-118.

(下转第 90 页)

## 参 考 文 献

- [1] 杨素英,李琨.基于USB的数据采集系统的设计[J].计算机与现代化,2007(8):56-58.
- [2] 赵鹏,罗文广,王伍成.基于USB2.0的高速数据采集系统设计与实现[J].电子测量技术,2009,32(10):143-146,149.
- [3] 鲁力,张波.嵌入式TCP/IP协议的高速电网数据采集系统[J].仪器仪表学报,2009,30(2):183-187.
- [4] 郭连平,田书林,蒋俊,等.高速数据采集系统中触发点同步技术研究[J].电子测量与仪器学报,2010,24(3):26-31.
- [5] 张世伟,印世平,何运桃.USB2.0接口传输的FPGA控制与实现[J].国外电子测量技术,2009,28(11):74-80.
- [6] 许海清,田书林,戴志坚.基于USB总线的逻辑分析仪设计-仪器仪表学报,2005,26(8):310-311.
- [7] 王宏,鞠正喜,杜国华,等.基于USB2.0接口的高速视频采集系统设计[J].仪器仪表报,2006,27(6):1423-1424.
- [8] 张伟伟,薛模根,袁魏华.基于DSP和USB2.0的高速

偏振图像采集处理系统[J].电子技术应用,2009(8):54-56.

- [9] 熊俊俏,刘峥.基于CY7C68013的高速数据传输系统的设计[J].电子技术应用,2010(7):73-75,80.
- [10] 罗伟林,王立欣,毛远.USB数据采集系统中DMA数据传输的实现[J].电子测量技术,2008,31(6):121-124.
- [11] 惠兰,裴东兴.基于EZ-USBFX2的实时数据传输的实现[J].测控技术与仪器仪表,2010,36(9):112-114.
- [12] 张萌,曹建.基于USB接口的全自动热量计的设计及实现-仪器仪表学报,2008,29(6):1295-1299.
- [13] 杨帆,李国平,赵党军,等.基于虚拟仪器的USB高速数据采集卡设计[J].自动化仪表,2007,28(9):17-20.
- [14] 何苏勤,黄翠翠.基于USB2.0的异步数据传输和控制接口的设计[J].国外电子测量技术,2010,29(3):79-83.

## 作 者 简 介

牛军浩,1981年生,博士研究生,主要研究方向为自动测试系统、智能仪器仪表。

(上接第79页)

- [7] 解则晓,李绪勇,辛少辉,等.水下线结构光自扫描三维测量技术[J].中国激光,2010,37(8):2010-2014.
- [8] 商大伟,解则晓,王浩元,等.一种线结构光自扫描测量系统的研究[J].机电工程,2010,27(10):30-33.
- [9] 徐博,习俊通,陈晓波.基于亚像素的圆孔几何参数立体视觉高精度测量[J].航空计算技术,2008,38(3):94-96.
- [10] 林国余,陈旭,张为公.基于立体视觉的平面圆参数高精测量算法[J].计算机应用研究,2010,27(3):1183-1186.
- [11] 杜玉军,高明,辛维娟,等.基于机器视觉的闭气塞表面缺陷自动检测系统[J].国外电子测量技术,2011,30(4):13-16.
- [12] 潘国荣,谷川,施贵刚.空间圆形物体检测方法 with 数据处理[J].大地测量与地球动力学,2007,27(3):28-30.
- [13] 张明光,李艳.基于最小二乘支持向量机的电力市场

出清电价预测方法[J].电子测量技术,2009,32(1):59-61.

- [14] 邹见效,王厚军,舒军,等.一种基于最小二乘法的FPN与规则权值优化新方法[J].电子测量与仪器学报,2010,24(7):76-81.
- [15] 朱伟,韩晓东.矢量网络分析仪中的电子校准技术[J].国外电子测量技术,2010,29(8):26-28.

## 作 者 简 介

张瑞峰,1974年出生,天津大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为机器视觉和嵌入式测控系统。

李士亮,1985年出生,天津大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉和图像处理。

E-mail:lishiliang@tju.edu.cn