

DOI: 10.3901/JME.2008.10.206

# 线结构光视觉传感器测圆(类圆)孔中心两步法\*

薛婷<sup>1</sup> 孙梅<sup>2</sup> 张涛<sup>1</sup> 吴斌<sup>3</sup> 叶声华<sup>3</sup>

(1. 天津大学电气与自动化工程学院 天津 300072;

2. 天津大学内燃机研究所 天津 300072;

3. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津 300072)

**摘要:** 针对基于工业机器人平台柔性三维视觉检测系统, 提出线结构光视觉传感器测量空间圆(类圆)孔中心两步法。根据线结构光视觉传感器测量模型, 确定被测圆心近似 $z$ 向坐标。根据圆心相对摄像机光心的方位, 确定被测圆心的 $x$ 、 $y$ 向坐标。该方法突破了传统空间圆(类圆)孔中心测量仅能采用双目视觉传感器的方式。研究表明, 该方法切实可行, 可以满足实际测量需求, 能够极大地扩展线结构光视觉传感器的应用范围。

**关键词:** 三维视觉检测 线结构光传感器 圆(类圆)心空间坐标 两步法

**中图分类号:** TN247 TP242

## Two-step Method for Measuring Center Coordinates of Spatial Hole Based on the Structured Light Stripe Vision Sensor

XUE Ting<sup>1</sup> SUN Mei<sup>2</sup> ZHANG Tao<sup>1</sup> WU Bin<sup>3</sup> YE Shenghua<sup>3</sup>

(1. College of Electrical and Automation Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Engine Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072;

3. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology &amp; Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072)

**Abstract:** Creation of the two-step method for inspecting the spatial hole center coordinates with structured light stripe vision sensor is proposed for three-dimensional visual inspection system based on the industrial robot. According to the mathematical model of structured light stripe vision sensor, coordinate  $z$  of hole center is solved. Coordinates  $x$ ,  $y$  are acquired by the hole center orientation relative to the camera optic center. The new approach is different from the traditional spatial hole inspection method with stereovision sensor. The research result shows that the two-step method is feasible and greatly expands the application range of the structured light stripe visual inspection system.

**Key words:** Three-dimensional visual inspection Structured light stripe vision sensor Center coordinates of spatial hole  
Two-step method

## 0 前言

基于单摄像机的线结构光视觉传感器由于其非接触、成本低、体积小、质量轻和方便灵活等特点, 在三维视觉检测中获得了广泛应用<sup>[1-2]</sup>, 尤其适合于工业机器人导引的柔性三维视觉检测系统<sup>[3-4]</sup>。

圆是被测物体的基本几何形状, 如工件、零部

件上的定位孔等, 其空间位置精度要求往往比较高。针对空间圆(类圆)孔几何量测量, 传统的测量方式采用双目视觉传感器, 基于圆孔立体像对来实现圆孔空间位置的测量<sup>[5]</sup>, 若已知圆心在左右摄像机中的归一化图像坐标以及传感器位姿参数(旋转矩阵 $R$ 和平移矢量 $T$ ), 即可以方便获得被测圆孔中心的三维空间坐标。然而双目视觉传感器成本较高, 体积较大, 也比较重, 在工业现场应用中有很多局限性, 如安装调整空间限制等, 尤其对于近年来发展迅速的基于工业机器人平台的柔性视觉检测应用系统, 由于机器人手臂抓取负荷及运动灵活性等的限

\* 国家自然科学基金(50705065)和天津市自然科学基金(08JCYBJC10000)资助项目。20071212收到初稿, 20080628收到修改稿

制,更凸显出其不足。

线结构光视觉传感器可以方便地检测出位于激光平面上被物体形面所调制的特征点空间位置信息,如被测棱线特征点等,但是由于被测空间圆(类圆)孔中心很难精确地位于结构光平面上,因此线结构光视觉传感器对于空间圆孔的检测则相对复杂很多。如何采用线结构光视觉传感器精确测量圆心,成为相关视觉检测系统,尤其柔性三维视觉检测系统应用的瓶颈和亟待解决的关键问题之一。

本文提出一种线结构光视觉传感器空间圆(类圆)孔中心检测两步法,突破了传统圆(类圆)孔中心测量采用双目视觉传感器的方式,通过试验验证,该方法切实有效,可以实现圆(类圆)心空间坐标较高精度的测量,满足实际测量需求,极大地扩展了线结构光视觉传感器的实际应用。

## 1 线结构光视觉传感器数学模型

图 1 所示为线结构光视觉传感器的数学模型。

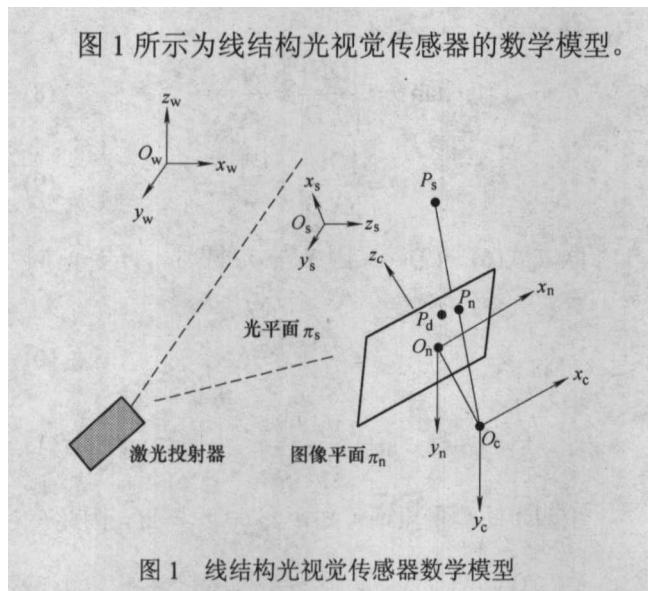


图 1 线结构光视觉传感器数学模型

如图 1 中所示,假设三维世界坐标系为  $O_w x_w y_w z_w$ , 摄像机坐标系为  $O_c x_c y_c z_c$ , 图像平面  $\pi_n$  坐标系为  $O_n x_n y_n$ 。将摄像机坐标系作为传感器测量坐标系,则线结构光视觉传感器的数学模型可以用摄像机坐标系下光平面的方程来表示。设光平面上任意一点  $P_s$  在摄像机坐标系  $O_c x_c y_c z_c$  下的齐次坐标为  $\bar{P}_c = (x_c \ y_c \ z_c \ 1)^T$ , 则在摄像机坐标系下光平面  $\pi_s$  的方程可以表示为

$$ax_c + by_c + cz_c + d = 0 \quad (1)$$

若已知光平面上任意一理想投影点的归一化图像坐标  $\bar{P}_n = (x_n \ y_n \ 1)^T$ , 则过摄像机光心和此像点的直线方程可以表示为

$$\frac{x_c}{x_n - x_n} = \frac{y_c}{y_n - y_n} = \frac{z_c}{z_n - 1} \quad (2)$$

联立式(1)、(2),若已知光平面方程和光平面上任意一点的归一化图像坐标,则可以求出光平面上任意一点在摄像机坐标系下的三维空间坐标。

## 2 两步法测量原理

图 2 所示为线结构光视觉传感器测量空间圆(类圆)孔中心位置的原理示意图。图 2 中摄像机采用正直摆放姿态,激光投射器斜向摆放。

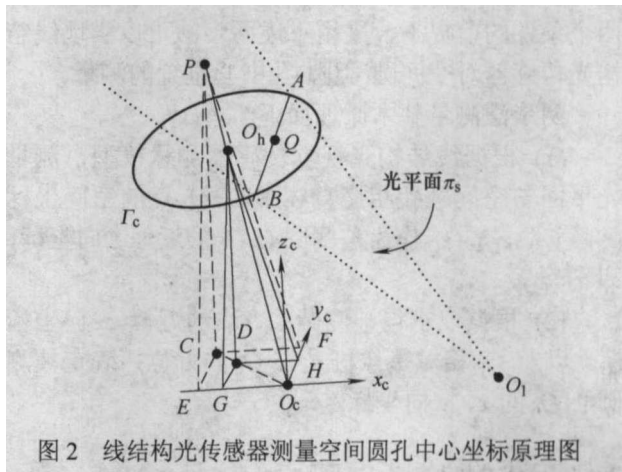


图 2 线结构光传感器测量空间圆孔中心坐标原理图

测量分析过程采用如下约定。

(1) 摄像机光心由符号  $O_c$  表示,结构光光源中心由符号  $O_l$  表示,线结构光视觉传感器测量坐标系定义为与摄像机坐标系  $O_c x_c y_c z_c$  重合。

(2) 被测空间圆(类圆)孔中心由符号  $O_h$  表示,  $O_h$  在  $O_c x_c y_c z_c$  坐标系中空间坐标定义为  $(x, y, z)$ , 延长直线  $O_h O_c$  与光平面  $\pi_s$  交于一点,由符号  $P$  表示,  $P$  在  $O_c x_c y_c z_c$  坐标系中空间坐标定义为  $(x_p, y_p, z_p)$ 。

(3) 光平面  $\pi_s$  与空间圆(类圆)相交于弦  $AB$ , 弦  $AB$  中心由符号  $Q$  表示,  $Q$  在  $O_c x_c y_c z_c$  坐标系中空间坐标定义为  $(x_q, y_q, z_q)$ 。

(4) 为简化分析,假定激光平面与摄像机坐标系  $y_c$  轴平行。

(5) 旋转角度逆时针为正,顺时针为负。

(6)  $O_h$  点  $x$  向、 $y$  向及  $z$  向测量坐标分别由符号  $x_m$ 、 $y_m$  及  $z_m$  表示。

在满足线结构光视觉传感器工作距离及测量景深的前提下,线结构光传感器与被测空间圆(类圆)孔之间的理想测量位姿关系应满足以下条件。

(1) 摄像机像面与空间圆(类圆)孔圆面平行。

(2) 光平面与空间圆(类圆)孔相交(是否过其中心均可)。

根据空间椭圆透视投影变换模型<sup>[6]</sup>,当空间圆(类圆)平面与摄像机像面平行时,由像面上椭圆拟合求得的中心等同于空间圆(类圆)中心的实际投

影,而当摄像机像面与空间圆(类圆)所在的平面不平行时,必然存在透视投影畸变,两个平面所成角度越大,畸变误差越大。因此条件1的近似满足不仅可以保证被测圆(类圆)孔的图像为理想图像,减小由于透视投影畸变引起的圆(类圆)中心坐标测量误差,同时也可以最大限度消除圆(类圆)中心 $z$ 向坐标的实际测量误差。条件1在实际测量中不可能精确满足,但应尽可能满足。条件2是采用线结构光视觉传感器实现空间圆(类圆)孔中心位置测量的必要条件,在实际测量中也容易实现。在满足上述两个条件的前提下,采用下述两步法可以实现线结构光传感器对空间圆(类圆)孔中心位置的测量。

两步法测量基本原理如下。

(1) 根据线结构光视觉传感器测量模型,测量光平面与空间圆孔相交直线中心 $Q$ 点的空间坐标 $(x_Q, y_Q, z_Q)$ ,  $z_Q$ 作为被测圆心 $O_h$ 的近似 $z$ 向坐标,即 $z \approx z_Q$ 。

(2) 根据已求得被测圆心 $O_h$ 的近似 $z$ 向坐标 $z_Q$ ,以及 $O_h$ 相对摄像机光心 $O_c$ 的方位,确定被测圆心 $O_h$ 的 $x$ 、 $y$ 向坐标。

### 3 两步法测量步骤

#### 3.1 $z$ 向坐标求取

设被测圆孔在图像平面上椭圆方程为

$$\frac{(x-x_n)^2}{a^2} + \frac{(y-y_n)^2}{b^2} = 1 \quad (3)$$

式中 $(x_n, y_n)$ 为椭圆中心, $a$ 、 $b$ 为椭圆两半主轴。

光条直线方程为

$$y = kx + l \quad (4)$$

式中 $k$ 为直线斜率, $l$ 为 $y$ 轴截距。

根据图像特征定位算法求得上述方程,联立式(3)、(4)可以解算得到光平面 $\pi_s$ 与空间圆相交两点 $A$ 、 $B$ 的图像坐标。

根据线结构光视觉传感器测量数学模型,分别计算求得 $A$ 、 $B$ 两点在摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 下的空间坐标 $(x_A, y_A, z_A)$ 和 $(x_B, y_B, z_B)$ ,由于 $Q$ 点为弦 $AB$ 的中点,有

$$\begin{cases} x_Q = \frac{x_A + x_B}{2} \\ y_Q = \frac{y_A + y_B}{2} \\ z_Q = \frac{z_A + z_B}{2} \end{cases} \quad (5)$$

则 $z_Q$ 为被测圆心 $O_h$ 的近似 $z$ 向坐标, $z_m = z_Q$ 。

#### 3.2 $x$ 、 $y$ 向坐标求取

由图像处理得到被测圆孔中心 $O_h$ 的图像坐标,根据线结构光视觉传感器数学模型,已知光平面在

摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 下的标定系数,则可以唯一确定光平面上 $P$ 点在测量坐标系下的坐标 $(x_P, y_P, z_P)$ 。

如图2所示,过 $P$ 点作 $O_c x_c y_c$ 平面垂线,垂足记为 $C$ ,在 $O_c x_c y_c$ 平面内,过 $C$ 点分别作 $x_c$ 轴与 $y_c$ 轴的垂线,垂足记为 $E$ 和 $F$ ,令 $\angle FPC = \theta$ ,  $\angle EPC = \varphi$ ,则 $P$ 点相对摄像机光心 $O_c$ 的方位可由 $\theta$ 和 $\varphi$ 表示( $\theta$ 和 $\varphi$ 为锐角)。由前述约定及图2中几何关系,有

$$\tan \theta = \frac{|CF|}{|PC|} = \frac{|x_P|}{z_P} \quad (6)$$

$$\tan \varphi = \frac{|CE|}{|PC|} = \frac{|y_P|}{z_P} \quad (7)$$

同理,过圆孔中心 $O_h$ 作 $O_c x_c y_c$ 平面垂线,垂足记为 $D$ ,在 $O_c x_c y_c$ 平面内,过 $D$ 点分别作 $x_c$ 轴与 $y_c$ 轴的垂线,垂足记为 $G$ 和 $H$ 。由图2可以看出, $\angle HO_h D = \angle FPC = \theta$ ,  $\angle GO_h D = \angle EPC = \varphi$ ,因此 $O_h$ 相对摄像机光心 $O_c$ 的方位也可由 $\theta$ 和 $\varphi$ 表示,有

$$\tan \theta = \frac{|DH|}{|O_h D|} = \frac{|x|}{z} \quad (8)$$

$$\tan \varphi = \frac{|DG|}{|O_h D|} = \frac{|y|}{z} \quad (9)$$

联立式(6)~(9),又因 $x$ 与 $x_P$ 同号, $y$ 与 $y_P$ 同号,有

$$x = \frac{x_P}{z_P} z \quad (10)$$

$$y = \frac{y_P}{z_P} z \quad (11)$$

由两步法测量原理可知, $z_m = z_Q \approx z$ ,因此有

$$x_m = \frac{x_P}{z_P} z_Q \quad (12)$$

$$y_m = \frac{y_P}{z_P} z_Q \quad (13)$$

#### 3.3 半径的求取

上述空间坐标求取方法同样适用于椭圆中心或不完整圆面等类圆孔中心的求取。若被测物为圆孔,还可以求取其半径,已知光平面与圆孔相交 $A$ 、 $B$ 两点在摄像机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ 下的空间坐标分别为 $(x_A, y_A, z_A)$ 和 $(x_B, y_B, z_B)$ ,由上述两步求得圆孔中心 $O_h$ 在 $O_c x_c y_c z_c$ 坐标系中空间坐标定义为 $(x_m, y_m, z_m)$ ,则有

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_m - x_A)^2 + (y_m - y_A)^2 + (z_m - z_A)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x_m - x_B)^2 + (y_m - y_B)^2 + (z_m - z_B)^2} \end{cases} \quad (14)$$

记圆孔半径为  $r$ , 取

$$r = (r_1 + r_2) / 2 \quad (15)$$

当  $O_h Q$  平行于  $O_o x_o y_o$  平面, 即摄像机像平面与空间圆平面理想平行时, 可以得到被测圆心  $O_h$  的无理论误差坐标值  $(x, y, z)$ , 实际测量中往往不能精确满足上述条件, 因此得到被测圆心  $O_h$  的近似空间坐标。由于篇幅有限, 对于空间坐标误差的详细讨论和分析见文献[7]。

#### 4 线结构光视觉传感器测圆试验

采用已标定的线结构光视觉传感器(由一个 WATEC 902H 摄像机、25 mm AVANIA 镜头以及一个激光投射器组成)测量被测工件圆孔。使被测工件表面与传感器端面大致平行, 左右、上下移动九个位置, 允许有小角度偏移。图 3 所示为 9 个位置中的 1 个位置图像, 图 3a 所示为圆孔图像, 图 3b 为圆孔与光平面相交图像。

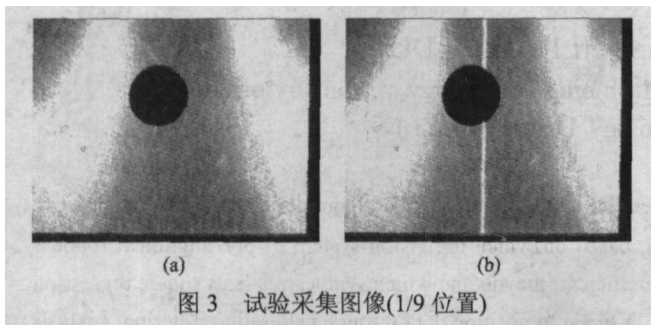


图 3 试验采集图像(1/9 位置)

采用上述结构光测圆两步法及 FARO 多关节测量臂分别计算空间圆孔中心在传感器坐标系及关节臂坐标系下的三维坐标值及半径。取测量臂九次测量圆孔半径的平均值  $r = 5.0191$  mm 作为真值, 记  $\Delta r = r_i - r$ , 半径测量误差曲线如图 4 所示。图 4 中横坐标表示被测工件的移动位置号。

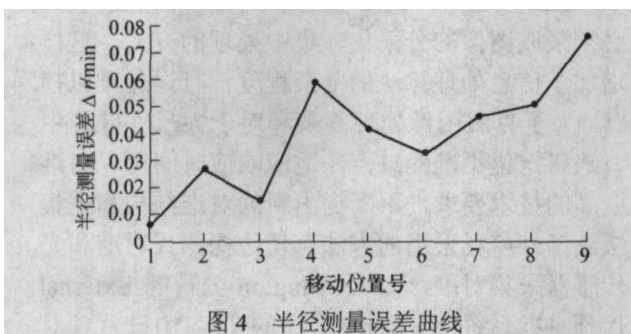


图 4 半径测量误差曲线

由误差曲线图 4 可以看出, 传感器测量空间圆孔半径绝对精度优于 0.08 mm, 相对精度优于 1.6%。

#### 5 结论

(1) 提出了线结构光传感器测量空间圆(类圆)孔中心两步法, 并推导了相应的数学模型。

(2) 试验证明该方法切实有效, 传感器测量空间圆孔半径绝对精度优于 0.08 mm, 相对精度优于 1.6%, 可以满足实际测量需求。

(3) 该方法突破了传统圆(类圆)孔检测采用双目视觉传感器实现的局限, 极大地扩展了线结构光视觉传感器的实际应用。

#### 参 考 文 献

- [1] ZENG L J, HAO Q, KAWACHI K. A scanning projected line method for measuring a beating bumblebee wing[J]. Optics Communications, 2000, 183(1): 37-43.
- [2] THOMAS P K, LUC V G. Real-time range acquisition by adaptive structured light[J]. IEEE Trans. PAMI, 2006, 28(3): 432-445.
- [3] LE MOIGNE J J, WAXMAN A M. Structured light patterns for robot mobility[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(5): 541-548.
- [4] ZHANG Y M, KOVACEVIC R. Real-time sensing of sag geometry during GTA welding[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(2): 151-160.
- [5] 周富强, 张广军, 江洁. 空间圆几何参数的非接触高精度测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(5): 604-607. ZHOU Fuqiang, ZHANG Guangjun, JIANG Jie. High accurate non-contact method for measuring geometric parameters of spatial circle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(5): 604-607.
- [6] JANNE H, OLLI S. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]// Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Jun 17-19, 1997, San Juan, PR, USA. Los Alamitos: IEEE, 1997: 1 106-1 112.
- [7] 薛婷. 三维视觉检测仪器化关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. XUE Ting. Study on the key technologies of instrumentation of visual inspection[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.

作者简介: 薛婷, 女, 1977 年出生, 博士, 讲师。主要从事视觉检测、自动控制及在线测量等方面的研究。

E-mail: xueting@tju.edu.cn