

文章编号 1004-924X(2008)04-0624-06

基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析

薛 婷¹, 吴 斌², 张 涛¹, 叶声华²

(1. 天津大学 电气与自动化工程学院, 天津 300072;

2. 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: 针对空间圆(类圆)孔的几何量测量, 传统视觉测量方法一般采用双目立体模型, 基于立体像对来实现对圆孔空间位置的测量。受传感器成本、体积、重量的限制, 该测量方法在特殊视觉系统, 尤其在发展迅速的基于工业机器人平台的柔性视觉检测系统中均显不足。本文基于单摄像机架构的线结构光视觉传感器, 提出了圆(类圆)孔定位两步法, 讨论和分析了被测圆心 x, y, z 向坐标测量误差。通过对被测圆心定位误差的分析计算, 在实际测量应用中, z 向测量精度可以优于 $\pm 0.25\text{ mm}$, x, y 向测量精度优于 $\pm 0.006\text{ mm}$ 。研究结果表明, 该方法切实可行, 可以满足实际测量需求, 扩展了线结构光视觉传感器的应用范围。

关键词: 线结构光视觉传感器; 圆(类圆)孔; 定位; 误差分析

中图分类号: TP212.14; TP242 文献标识码: A

Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision sensor

XUE Ting¹, WU Bin², ZHANG Tao¹, YE Sheng-hua²

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

2. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instrument,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: A binocular stereo vision measurement model was used to inspect the space position of round hole or similar round hole based on the stereo image-pair, for the stereo vision sensor does not meet the requirement for some particular visual inspecting system, especially for the flexible visual inspecting system based on the industrial robot platform. In this paper, a two-step method to inspect the hole center coordinates was presented, and the x, y, z coordinate orientation errors were analyzed in detail based on the structured light stripe vision sensor composed of one camera. According to the error analysis, the z coordinate measurement precision is higher than $\pm 0.25\text{ mm}$, x and y coordinate measurement precisions higher than $\pm 0.006\text{ mm}$, respectively. The measured results show that the method is valid by experiment and it greatly expands the actual appliance of the structured light stripe visual inspection system.

Key words: structured light stripe vision sensor; round hole or similar round hole; orientation; error analysis

收稿日期: 2007-08-30; 修订日期: 2007-11-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50705065); 天津市自然科学基金重点资助项目(No. 08JCYBJC10000)

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

1 引 言

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。这些圆孔几何中心的三维空间位置以及圆半径的精度对于物体的整体定位和自动检测具有重要意义^[1]。

针对空间圆(类圆)(本文中所有的‘圆(类圆)’用‘圆’表示)孔的几何量测量, 已有的视觉测量方法一般采用双目立体模型, 基于圆孔立体像对来实现圆孔空间位置的测量, 许多学者对此进行了研究^[2-3]。由于双目视觉传感器成本较高, 体积较大, 也比较重, 在工业现场应用中很受限制, 如安装调整空间的限制等。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以及运动灵活性等限制, 更凸显出其不足。

基于单摄像机的线结构光视觉传感器由于其成本低、体积小、质量轻、方便灵活, 在三维视觉检测中获得了广泛应用^[4-5], 尤其适用于工业机器人导引的柔性三维视觉检测系统^[6]。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。而由于被测空间圆孔中心很难精确地位于结构光平面上, 因此, 采用线结构光视觉传感器对空间圆孔进行定位比较复杂, 该技术也成为相关视觉检测系统应用的瓶颈和亟待解决的关键问题之一。

本文基于线结构光视觉传感器, 提出了空间圆孔定位两步法, 并详细讨论和分析了被测圆心 x, y, z 向坐标的测量误差。测量误差分析及实验验证表明, 该方法切实可行, 能满足实际测量需求, 极大地扩展了线结构光视觉传感器的应用范围。

2 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位两步法

基于线结构光视觉传感器测量空间圆孔中心位置原理如图 1 所示。图中摄像机采用正直摆放姿态, 激光投射器斜向摆放。

图中采用如下约定:

- (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, 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 $\overline{o_h o_c}$ 与光平面 π_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 π_s 与空间圆相交于弦 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。

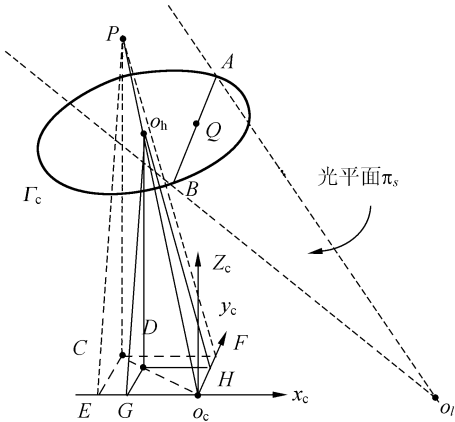


图 1 线结构光传感器测量空间圆孔中心坐标原理图
Fig. 1 Measurement of spatial circle hole center coordinates based on structured light stripe vision sensor

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孔之间的理想测量位姿关系应满足:

- (1) 摄像机像面与空间圆孔圆面平行;
- (2) 光平面与空间圆孔相交(是否过其中心均可)。

条件(1)在实际测量中不可能精确满足, 但应尽量满足。根据空间椭圆透视投影变换模型^[7], 条件(1)的近似满足可以保证被测圆孔的图像为理想图像, 同时根据后续分析, 也可以最大限度消除圆心 z 向坐标的实际测量误差。条件(2)是

基于线结构光视觉传感器空间圆孔定位的必要条件,在实际测量中也容易实现。

在满足上述两个条件前提下,采用两步法实现对空间圆孔中心位置的测量。以圆孔为例,首先,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) ,将 z_Q 作为被测圆心 o_h 的近似 z 向坐标,然后,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。详细测量步骤可参阅文献 [8],根据约定,有:

$$\begin{cases} x_m = \frac{XP}{ZP} \cdot z_m \\ y_m = \frac{YP}{ZP} \cdot z_m \\ z_m = \frac{Z_A + Z_B}{2} \end{cases} \quad (1)$$

3 线结构光视觉传感器圆定位误差分析

当摄像机像平面与空间圆平面平行时,可以得到被测圆心 o_h 的无理论误差坐标值 (x, y, z) ,但实际测量中往往不能完全满足上述条件,下面对实际测量中被测圆心 x, y, z 坐标测量误差进行详细分析。约定如下:

- (1) 摄像机光轴与光平面 π_s 的交点定义为传感器理想工作点,由符号 o_P 表示, $|o_P o_c|$ 定义为传感器理想工作点距离,由符号 L 表示,摄像机光轴与光平面 π_s 夹角由符号 α 表示;
- (2) 被测圆中心 x 向偏移用 x_d 表示,以光心为原点,与 x_c 轴同向为正,与 x_c 轴反向为负;
- (3) 被测圆中心 y 向偏移用 y_d 表示,以光心为原点,与 y_c 轴同向为正,与 y_c 轴反向为负;
- (4) 被测圆中心 z 向偏移用 z_d 表示,以理想工作点为原点,与 z_c 轴同向为正,与 z_c 轴反向为负;

(5) o_h 点 x 向实际坐标由符号 x 表示, $x = x_d$,则 x 向测量误差由符号 Δx 表示,且 $\Delta x = x_m - x = x_m - x_d$;

(6) o_h 点 y 向实际坐标由符号 y 表示, $y = y_d$,则 y 向测量误差由符号 Δy 表示,且 $\Delta y = y_m - y_d$;

$-y = y_m - y_d$;

(7) o_h 点 z 向实际坐标由符号 z 表示, $z = L + z_d$,则 z 向测量误差由符号 Δz 表示,且 $\Delta z = z_m - z = z_m - L - z_d$ 。

3.1 z 向坐标测量误差分析

将图 1 在 $x_c o_c z_c$ 平面上投影,如图 2 所示,纸面定义为 $x_c o_c z_c$ 平面,遵循笛卡儿坐标系右手法则,则 y_c 轴方向垂直纸面向里, $\overline{o_P o_l}$ 为光平面 π_s 在 $x_c o_c z_c$ 平面上的投影。

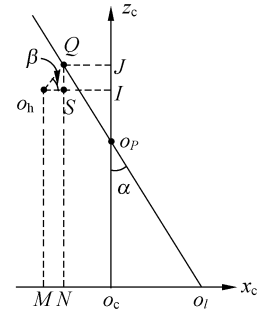


图 2 圆孔中心 z 向坐标测量误差分析示意图

Fig. 2 Analysis on z coordinate orientation errors

当摄像机像平面与被测圆面不平行,即 $o_h \overline{Q}$ 与 $x_c o_c y_c$ 平面有一投影夹角 β 时,由被测圆心 o_h 点和 Q 点分别向 x_c 轴做垂线,垂足记为 M 和 N ,由 o_h 点和 Q 点分别向 z_c 轴做垂线,垂足记为 I 和 J ,且 \overline{ON} 与 $o_h \overline{I}$ 相交点记为 S 。根据约定和图中的几何关系,有 $x_d = -|M o_c|$, $z_d = |o_P I|$, $\angle o_l o_P o_c = \alpha$ 。

α 角可以通过结构光传感器数学模型及标定参数,由摄像机光轴直线方程与激光平面方程的夹角计算获得,实验用线结构光视觉传感器传感器 α 角经计算为 20.771° 。

根据两步法测量原理及图中几何关系,有:

$$\Delta z = z_m - z = -\frac{x_d + z_d \cdot \tan \alpha}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta} \cdot \tan \beta \quad (2)$$

由式(2)可以看出:

(1) 当 $\beta = 0^\circ$ 时,即 $\overline{o_h Q}$ 与 $x_c o_c y_c$ 平面平行时, $\Delta z = 0$;

(2) 当 $x_d + z_d \cdot \tan \alpha = 0$ 时,即光平面 π_s 过被测空间圆孔中心 o_h 时, $\Delta z = 0$ 。此时, x_d 、 z_d 应满足图 3 所示曲线关系。

实际测量时,由于生产线上夹具和定位措施

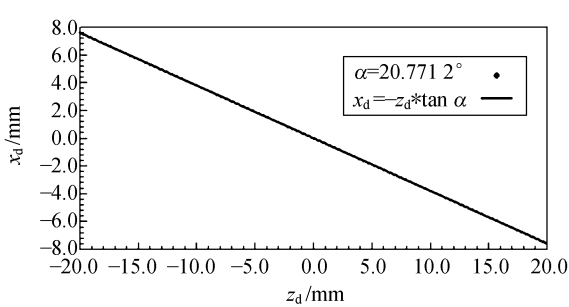


图 3 x_d 与 z_d 应满足的理想关系曲线

Fig. 3 Idea graph between x_d and z_d

的保证, 被测工件间的相对位置和姿态一般在一定的小范围内变化, 在此基础上, 可通过预调整环节来尽量减小 β 角和偏移量 x_d, y_d, z_d 的大小。根据实际情况, 若 β, x_d, z_d 的变化范围为 $-2^\circ \leq \beta \leq 2^\circ, -5 \text{ mm} \leq x_d \leq 5 \text{ mm}, -5 \text{ mm} \leq z_d \leq 5 \text{ mm}$ 。令 $\text{Tmpl} = x_d + z_d \cdot \tan \alpha$, 式(2)变换为:

$$\Delta z = -\frac{\text{Tmpl}}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta} \cdot \tan \beta, \quad (3)$$

根据式(3)及 Tmpl 的取值范围, z 向测量误差 Δz 如图 4 所示。由图中可以看出, 测量精度优于 $\pm 0.25 \text{ mm}$ 。

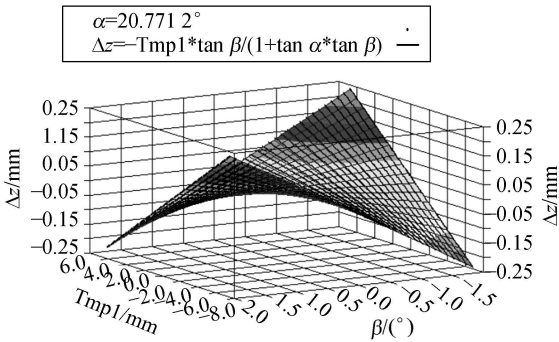


图 4 实际测量应用中 Δz 变化曲线

Fig. 4 Δz curve in actual measurement system

3.2 X 向坐标测量误差分析

将图 1 简化为图 5, 如图所示纸面定义为 $x_c o_c z_c$ 平面, 坐标系遵循右手法则, 则 y_c 轴方向垂直纸面向里, $o_P o_I$ 为光平面 π_s 在 $x_c o_c z_c$ 平面上的投影。

o_h 为被测圆孔中心实际位置, 由被测圆心 o_h 和 P 点分别向 x_c 轴做垂线, 垂足记为 M 和 N , 由 o_h 点和 P 点分别向 z_c 轴做垂线, 垂足记为 I 和 J 。根据约定和图中的几何关系, 有

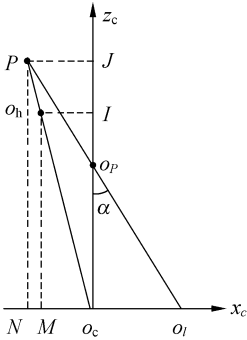


图 5 圆孔中心 x 向坐标测量误差分析示意图

Fig. 5 Analysis on x coordinate orientation errors

$x_d = -|Mo_c|, z_d = |o_P I|, |o_P o_c| = L, \angle o_I o_P o_c = \alpha$, 由图中几何关系及约定, 有:

$$\Delta x = -\frac{x_d \cdot (x_d + z_d \cdot \tan \alpha)}{(L + z_d) \cdot (1 + \tan \alpha \cdot \tan \beta)} \cdot \tan \beta, \quad (4)$$

由式(3)可以看出:

- (1) 当 $\beta = 0^\circ$ 时, 即 $o_h Q$ 与 $x_c o_c y_c$ 平面平行时, $\Delta x = 0$;
- (2) 当满足 $x_d = 0$, 即被测圆孔中心成像在图像坐标系 Y 轴上时, $\Delta x = 0$;
- (3) 当 $x_d + z_d \cdot \tan \alpha = 0$ 时, 即光平面 π_s 过被测空间圆孔中心 o_h 时, $\Delta x = 0$, 此时, x_d, z_d 应满足图 3 所示曲线关系。

根据结构光传感器数学模型及标定参数, 传感器理想工作点距离 L 可以通过计算摄像机光轴直线方程与激光平面方程的交点的 z 向坐标精确获得, 实验用线结构光视觉传感器理想工作点距离 L 经计算为 253.0417 mm 。

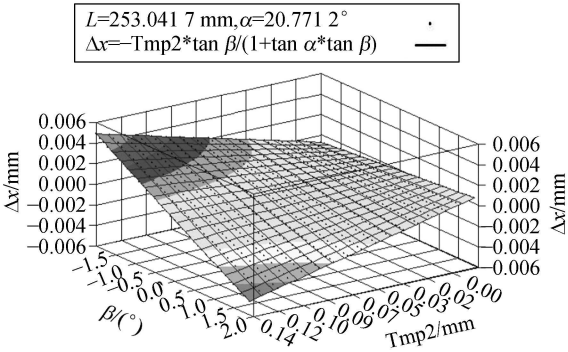


图 6 实际测量应用中 Δx 的变化曲线

Fig. 6 Δx curve in actual measurement system

按实际应用分别取 $-2^\circ \leq \beta \leq 2^\circ, -5 \text{ mm} \leq x_d \leq 5 \text{ mm}, -5 \text{ mm} \leq z_d \leq 5 \text{ mm}$ 。令 $\text{Tmp2} = x_d$

° $(x_d+z_d \cdot \tan \alpha)/(L+z_d)$, 式(4)变换为:

$$\Delta x=-\frac{T_{mp2}}{1+\tan \alpha \cdot \tan \beta} \cdot \tan \beta, \quad (5)$$

根据式(5)及 T_{mp2} 的取值范围, 可以得到如图 6 所示的 x 向测量误差 Δx 的关系曲线。

由图 6 可以看出, 实际测量应用中, x 向测量误差 Δx 可保证在 $\pm 0.006 \text{ mm}$ 以内。

3.3 y 向坐标测量误差分析

将图 1 在 $y_cO_cz_c$ 平面上投影, 简化为图 7, 如图所示纸面定义为 $y_cO_cz_c$ 平面, 坐标系遵循右手法则, 则 x_c 轴方向垂直纸面向外。

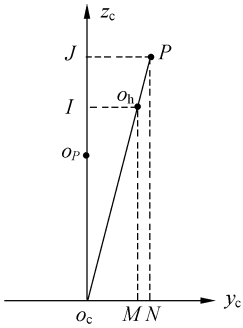


图 7 圆孔中心 y 向坐标测量误差分析示意图
Fig. 7 Analysis on y coordinates orientation error

O_h 为被测圆孔中心实际位置, 由被测圆心 O_h 点和 P 点分别向 y_c 轴做垂线, 垂足记为 M 和 N , 由 O_h 点和 P 点分别向 z_c 轴做垂线, 垂足记为 I 和 J 。根据约定和图中的几何关系, 有 $y_d = |MO_c|$, $z_d = |O_P I|$, $|O_P O_c| = L$ 。

由图中几何关系及约定, 有:

$$\Delta y=-\frac{y_d \cdot\left(x_d+z_d \cdot \tan \alpha\right)}{\left(L+z_d\right) \cdot\left(1+\tan \alpha \cdot \tan \beta\right)} \cdot \tan \beta, \quad (6)$$

由式(6)可以看出:

- (1) 当 $\beta=0^\circ$ 时, 即 $O_h Q$ 与 $x_c O_c y_c$ 平面平行时, $\Delta y=0$;
- (2) 当满足 $y_d=0$, 即被测圆孔中心成像在图像坐标系的 x 轴上时, $\Delta y=0$;
- (3) 当 $x_d+z_d \cdot \tan \alpha=0$ 时, 即光平面 π_s 过被测空间圆孔中心 O_h 时, $\Delta y=0$, 此时, x_d, z_d 应满足图 3 所示曲线关系。

按实际应用分别取 $-2^\circ \leq \beta \leq 2^\circ$ 、 $-5 \text{ mm} \leq x_d \leq 5 \text{ mm}$ 、 $-5 \text{ mm} \leq y_d \leq 5 \text{ mm}$ 、 $-5 \text{ mm} \leq z_d \leq 5 \text{ mm}$, 令 $T_{mp}=\left(x_d+z_d \cdot \tan \alpha\right) /\left(L+z_d\right)$, $T_{mp3}=y_d \cdot T_{mp}$, 式(6)变换为:

$$\Delta y=-\frac{T_{mp3}}{\left(1+\tan \alpha \cdot \tan \beta\right)} \cdot \tan \beta . \quad (7)$$

根据式(7)及 T_{mp3} 的取值范围, 可以得到如图 8 所示的 y 向测量误差 Δy 的关系曲线。

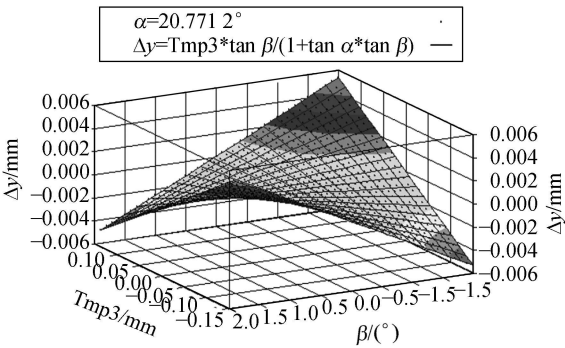


图 8 实际测量应用中 Δy 的变化曲线
Fig. 8 Δy curve in actual measurement system

由图 8 可以看出, 实际测量应用中, y 向测量误差 Δy 可保证在 $\pm 0.006 \text{ mm}$ 以内。

4 线结构光视觉传感器测圆实验

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 A VANIA 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 9 个位置, 允许有小角度偏移。图 9 所示为 9 组图像中的一组, 图中(a)所示为圆孔图像, (b)为圆孔与光平面相交图像。

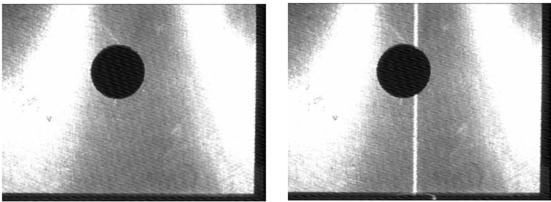


图 9 实验采集图像(1/9 组)
Fig. 9 Images acquired by experiment(1/9 groups)

采用上述结构光测圆两步法及 FA RO 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 9 次测量圆孔半径的平均值 $r=5.0191 \text{ mm}$ 作为真值, 记 $\Delta r=r_i-r$, 半径测量误差曲线如图 10 所示。

由误差曲线图可以看出, 传感器测量空间圆

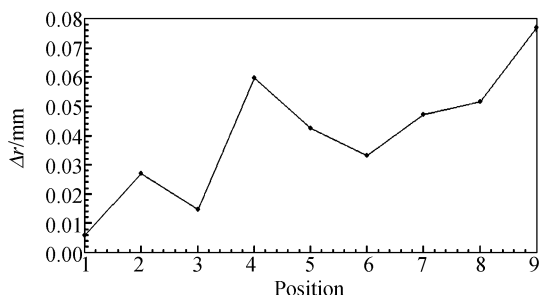


图 10 半径测量误差曲线

Fig. 10 Graph of measured circle hole radius error

孔半径绝对精度优于 0.08 mm, 相对精度优于 1.6 %。

参考文献:

- [1] PERKINS W A. Inspector: a computer vision system which learns to inspect parts [J]. *IEEE*, 1986, 5: 584-592.
- [2] NAKAGAKI H, KITAGI K, OGASAWARA T, *et al.*. Study of insertion task of a flexible wire into a hole by using visual tracking observed by stereo vision [C]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1996, 4: 3209-3214.
- [3] 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 F Q, ZHANG G J, JIANG J. High accurate non-contact method for measuring geometric parameters of spatial circle[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(5): 604-607. (in Chinese)
- [4] THOMAS P K, LUC V G. Real-time range acquisition by adaptive structured light [J]. *IEEE*, 2006, 28(3): 432-445.
- [5] 贺忠海, 王宝光. 线结构光传感器的模型及成像公式[J]. *光学 精密工程*, 2001, 9(3): 269-272.
HE ZH H, WANG B G. Model and imaging formula of the line structured light sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3): 269-272. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] HEIKKILA J, SILVEN O. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction [C]. *International Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1997: 1106-1112.
- [8] 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 T. *Study on the Key Technologies of Instrumentation of 3D Visual Inspection* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)

作者简介: 薛 婷(1977—), 女, 讲师, 博士, 主要从事激光及光电测试、自动控制及在线测量等方面的研究。E-mail: xueting@tju.edu.cn

(本栏目编辑 严寒)