

一种基于线结构光传感器的圆位姿测量方法

李志宇, 林嘉睿**, 孙岩标***, 郑继贵*

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 对零件上圆形特征的测量是工业制造中质量控制和自动化加工的重要方面。针对基于计算机视觉原理测量空间圆位姿适应性弱、鲁棒性不强的问题, 研究了一种基于线结构光传感器的测量方法。根据图像上椭圆以及空间圆对应的两个二次曲面方程之间的转换关系, 求得圆孔法向矢量, 该过程需要借助一个虚拟锥面构建中间曲面转换矩阵; 进而结合法向矢量和激光线与圆周两个交点的三维坐标数据构建圆孔平面, 利用共线方程即可得到圆孔的孔心坐标和半径。对该测量方法进行实验验证, 结果表明: 在线结构光传感器与空间圆的各种姿态下, 圆孔半径在 2~4 mm 范围内, 法向矢量平均误差为 0.3°, 半径平均误差为 0.02 mm, 孔心坐标平均误差为 0.02 mm。在对比实验中, 该方法对于半径为 3.054 mm 的圆孔, 半径最大误差为 0.04 mm, 旧方法误差极值为 0.23 mm。从而验证了该方法在各种场景下测量结果均能达到较高的精度, 工作环境适应广, 鲁棒性较强。

关键词 测量; 视觉测量; 线结构光传感器; 圆位姿; 鲁棒性; 误差分析

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1512004

A Method for Measuring Circular Pose Based on Line Structured Light Sensor

Li Zhiyu, Lin Jiarui**, Sun Yanbiao***, Zhu Jigui*

State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China

Abstract The measurement of circular feature on the components is an important aspect of quality control and automation in industrial manufacturing. Aiming at the problem of weak adaptability and weak robustness of measuring spatial circular pose based on computer vision principle, a measurement method based on linear structured light sensor is studied. According to the transformation relation between the ellipse on the image and the two quadric surface equations corresponding to the spatial circle, the normal vector of the circular hole is obtained. Then the circular hole plane is constructed by combining the vector and the three-dimensional coordinate data of the two intersection points of the laser line and the circumference. Experimental verification of the measurement method shows that, when the radius of the circular hole is within the range of 2–4 mm, the average error of the normal vector is 0.3°, the average error of the radius is 0.02 mm, and the average error of the coordinates of the center of the hole is 0.02 mm under the various attitudes of the line structured light sensor and the space circle. In the comparison experiment, the maximum radius error of this method is 0.04 mm for the circular hole whose radius of 3.054 mm, and the maximum error value of the old method is 0.23 mm. It is proved that the method can achieve high precision, wide adaptability and strong robustness in various situations.

Key words measurement; visual measurement; line structured light sensor; circular pose; robust; error analysis

OCIS codes 120.4640; 150.1135; 150.6910; 100.2960

1 引 言

视觉测量技术是一项以计算机视觉为基础的精密测量技术, 具有非接触、实时性高、信息量丰富等

突出优点^[1], 广泛应用于汽车工业、航空航天、铁路建设等领域。在 20 世纪 80 年代美国国家标准局就预计, 工业领域超过 80% 的检测任务将由视觉测量系统来完成^[2], 可以预见视觉测量在现代工业生产

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-24; 录用日期: 2020-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51721003, 41701522)、天津市自然科学基金(17JCQNJC07500)、教育部高等学校仪器类专业新工科建设项目(2018C105)

* E-mail: jiguizhu@tju.edu.cn; ** E-mail: linjr@tju.edu.cn; *** E-mail: yanbiao.sun@tju.edu.cn

和国民生活中所占的比重将越来越大。

在工业制造中,常将测量圆孔半径和孔心坐标用于质量检测,比如对汽车制造行业中的螺纹孔、插销孔、定位孔的测量,以及航空制造中对飞机机身连接孔的检测,均是保证制造质量的重要方面。另一方面,圆孔的法向矢量常用于引导加工,比如在工业装配中拧紧螺栓、钻铆钉孔、打自攻丝螺钉,都需要保证加工工具方向和孔一致。传统的人工测量不仅精度差,而且效率低,工业测量常用的三坐标机(CMM)精度高,但效率同样很低,无法应用在现代快速的工业生产线上。

针对上述问题,同时看到视觉检测的巨大潜力,国内外学者开展了一系列研究。美国爱荷华州立大学 Zhang^[3]提出的条纹投影结构光双目系统可以用来恢复物体三维形貌,Gom 公司基于类似原理开发的 ATOS Core 测量系统可以用来获得平面圆孔位置和姿态。该系统测量精度高,但设备结构复杂、体型较大、工作环境要求高,通常用于离线测量。北京航空航天大学周富强等^[4]提出基于极线约束的立体视觉测量圆孔几何参数,该方法无需投影仪投射结构光,但仅依靠极线约束对同名点匹配,容易出现误匹配的问题,对测算精度造成影响。基于单个摄像机的线结构光视觉传感器,相对于双目结构光传感器具有轻便灵活、造价低、体积小、重量轻等特点,并在工业测量中得到广泛应用^[5-6]。天津大学薛婷等^[7-8]提出线结构光传感器测量圆孔的方法,在相机成像平面与圆孔平面平行时,对圆孔孔心坐标和半径的测量能达到较为理想的精度。但是,在实际的生产中由于夹具变形、机器人定位误差等因素,均会造成相机成像平面与待测圆孔平面不平行,并且在某些情形下由于作业空间限制无法使相机平面与圆孔平面平行,该方法的适用性受到一定的限制,并且该方法无法获取空间圆孔法向矢量。

综上所述,虽然已经有国内外学者对空间圆的视觉检测进行了相关研究,但是依然存在条纹投影传感器外形庞大、使用环境要求高,线结构光现有算法不能应用在传感器与待测圆孔角度偏大的场景的问题。针对这些问题,本文研究了一种基于线结构光传感器结合二次曲面和共线方程的测量场景适应性广、鲁棒性强的测量方法,克服了传感器与圆平面相对姿态的限制,同时不需要移动传感器对圆孔在不同站位下进行测量,避免了三维点转站拼接,在相机平面与圆孔平面倾斜角

度较大的情况下,测量结果仍能达到高精度的工业要求。

2 测量空间圆孔位姿的几何模型

2.1 线结构光传感器测量模型

线结构光传感器的测量模型如图 1 所示,主要由相机和光源组成^[9]。平面 π_s 是光源投射出的激光平面,光条 l 是激光平面投射到物体表面经过调制后的交线, P_h 是光条 l 上任意一点; $O_c X_c Y_c Z_c$ 是相机坐标系,也就是传感器坐标系, O_c 是相机光心, $O_c Z_c$ 是相机光轴方向;平面 Γ_s 是归一化图像平面, $O_n X_n Y_n$ 是归一化图像坐标系, O_n 是光轴与图像平面的交点, P_n 是点 P_h 在归一化图像平面的成像点。

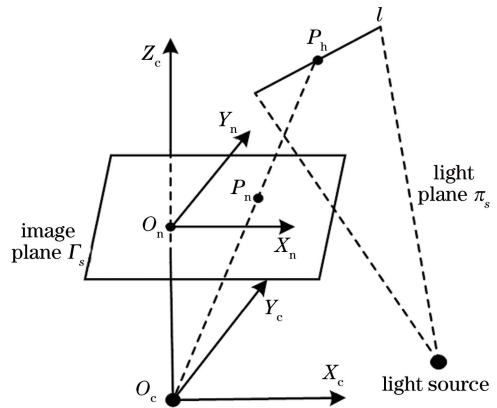


图 1 线结构光目传感器测量模型

Fig. 1 Line structured light sensor measurement model

线结构光传感器利用三角测距原理获取光条 l 上的点的三维坐标信息^[10-11]。光平面 π_s 在相机坐标系下的方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0. \quad (1)$$

激光线 l 上一点 $P_h(x, y, z)^T$, 在归一化图像坐标系上的坐标为 $P_n(x_n, y_n, 1)^T$, 根据相机透射成像模型, 光心 O_c 、 P_n 、 P_h 共线, 则有

$$\frac{x}{x_n} = \frac{y}{y_n} = \frac{z}{1}. \quad (2)$$

联立(1)、(2)式, 可以求解激光线上任一点的三维坐标。

通常相机直接获取的是图像点的像素坐标 $P_{im}(u, v, 1)^T$, 对应的归一化坐标 $P_n(x_n, y_n, 1)^T$ 可以根据相机成像模型得到

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中： \mathbf{K} 表示相机内参矩阵； f_x, f_y 表示相机的等效焦距参数； u_0, v_0 表示图像主点坐标。

相机内参标定、光平面标定后的线结构光传感器，只需获得激光平面上点的在相机平面上的像素坐标，就能得到该点的三维坐标。

2.2 基于二次曲面计算圆孔法向矢量

根据相机成像模型，在一般视角下，空间中平面圆在相机平面投影为椭圆^[12-13]，只有完全对准圆孔的情况下才能形成圆形。建立如图 2 所示的圆孔法向矢量测量模型，为方便描述做以下约定和说明：

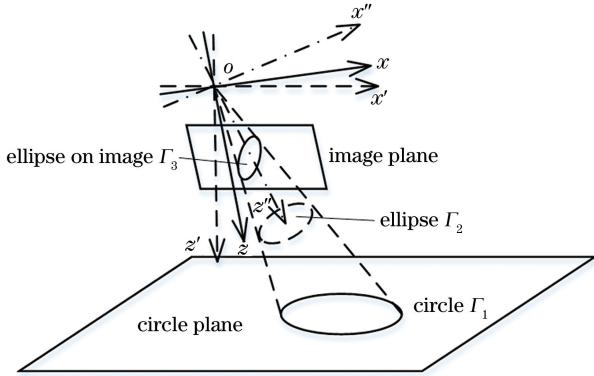


图 2 圆孔成像坐标系变换

Fig. 2 Circular hole imaging coordinate system transformation

1) 图中坐标系的 y 轴均未画出，其中坐标系 $o-xyz$ 为相机坐标系， z 轴与光轴平行，空间平面圆在相机平面上投影为椭圆 Γ_3 。坐标系 $o-x'y'z'$ 为世界坐标系， z' 轴垂直于圆 Γ_1 所在平面。 $o-x''y''z''$ 为辅助坐标系， z'' 轴位于成像光束的中心，通过虚线椭圆 Γ_2 的中心，并垂直于该椭圆平面。

2) 根据三个坐标系，定义三个锥面，锥面的顶点均位于原点，准线所在平面分别与 z 轴、 z' 轴、 z'' 轴垂直，根据坐标系的定义和基本解析几何知识不难看出，坐标系 $o-xyz$ 下的锥面 S_1 对应的准线是圆 Γ_1 ，坐标系 $x''o''y''$ 下的锥面 S_2 对应的准线是椭圆 Γ_2 ，坐标系 $o-x'y'z'$ 下的锥面 S_3 对应的准线是椭圆 Γ_3 ，从图中可以看出，三个锥面的区别在于准线形状的不同。

圆周平面的归一化法向矢量在世界坐标系 $o-x'y'z'$ 坐标系下即为 z' 轴，令相机坐标系 $o-xyz$ 到 $o-x'y'z'$ 的旋转矩阵为 $\mathbf{R} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3)$ ，根据旋转矩阵的几何意义， \mathbf{r}_3 为圆孔平面的归一化法向矢量在相机坐标系 $o-xyz$ 下的表达形式，也就是平面圆的法向矢量。为求得旋转矩阵 \mathbf{R} ，构建一个辅助坐标系 $o-x''y''z''$ 。已经标定完内参 \mathbf{K} 的相机通过椭圆

拟合得到椭圆 Γ_3 的系数矩阵 \mathbf{Q}_e (3×3 实对称矩阵)，那么锥面 S_3 的方程为 $\mathbf{X}_c^T \mathbf{Q}_e \mathbf{X}_c = 0$ ，对矩阵 \mathbf{Q}_e 进行特征值分解即

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^{-1} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad (4)$$

式中： $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 为特征值矩阵，并且 $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ ； $\mathbf{V} = (\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \mathbf{v}_3)$ 为特征向量矩阵。对锥面 S_3 上的点 \mathbf{X}_c 按照矩阵 \mathbf{V} 做旋转变换，也就是 $\mathbf{X}'' = \mathbf{V}^T \mathbf{X}_c$ ， $\mathbf{X}_c^T \mathbf{Q}_e \mathbf{X}_c = (\mathbf{V} \mathbf{X}'')^T \mathbf{Q}_e (\mathbf{V} \mathbf{X}'') = (\mathbf{X}'')^T \mathbf{\Lambda} (\mathbf{X}'')$ ，该表达式表示一个顶点位于原点，准线是椭圆并且旋转轴为 z 轴的锥面，对应于将坐标系 $o-xyz$ 按照矩阵 \mathbf{V} 变换到坐标系 $o-x''y''z''$ 后锥面 S_2 方程

$$\frac{x''^2}{a^2} + \frac{y''^2}{b^2} = z''^2, \quad (5)$$

式中： $a = \sqrt{\frac{-\lambda_3}{\lambda_1}}$ ； $b = \sqrt{\frac{-\lambda_3}{\lambda_2}}$ ；该锥面的系数矩阵 $\mathbf{Q}_1 = \text{diag}\left(\frac{1}{a^2}, \frac{1}{b^2}, -1\right) = \text{diag}\left(\frac{-\lambda_1}{\lambda_3}, \frac{-\lambda_2}{\lambda_3}, -1\right)$ 。设定坐标系 $o-x''y''z''$ 到坐标系 $o-xyz$ 的变换矩阵为 $\mathbf{U} = (u_1, u_2, u_3)$ ，锥面 S_1 的底线是圆，其系数矩阵为

$$\mathbf{Q}_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & D \\ 0 & 1 & E \\ D & E & F \end{bmatrix}, \quad (6)$$

则有

$$\mathbf{U}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{U} = k \mathbf{Q}_c, \quad (7)$$

式中： k 为比例系数。根据(6)式和(7)式可以得到

$$\begin{cases} \frac{a^2 + 1}{a^2} (u_{1x}^2 - u_{2x}^2) + \frac{b^2 + 1}{b^2} (u_{1y}^2 - u_{2y}^2) = 0 \\ \frac{a^2 + 1}{a^2} u_{1x} u_{2x} + \frac{b^2 + 1}{b^2} u_{1y} u_{2y} = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

式中： $\mathbf{u}_i = (u_{ix}, u_{iy}, u_{iz})^T$ 。 \mathbf{U} 为正交矩阵，即

$$\mathbf{U}^T \mathbf{U} = \mathbf{E}, \quad (9)$$

式中： \mathbf{E} 为单位矩阵。联立(8)、(9)式可以求解得到

$$\begin{cases} \mathbf{u}_1 = \begin{bmatrix} \eta \cos \alpha \\ \sin \alpha \\ (-1)^{l-m} \sqrt{1 - \eta^2} \cos \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{u}_2 = \begin{bmatrix} (-1)^m \eta \sin \alpha \\ (-1)^{m+1} \cos \alpha \\ (-1)^l \sqrt{1 - \eta^2} \sin \alpha \end{bmatrix} \\ \mathbf{u}_3 = \begin{bmatrix} (-1)^l \sqrt{1 - \eta^2} \\ 0 \\ (-1)^{m+1} \eta \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (10)$$

式中： $\eta = \sqrt{\frac{1+1/b^2}{1+1/a^2}}$ ； α 是一个自由参数； l, m 是任意的整数。 l, m 取值不同，会得到 4 个不同的 \mathbf{u}_3 ，互为相反数的一对可以视作同一个向量，这样就有两组不同的向量，圆孔平面归一化法向矢量在相机坐标系下

$$\mathbf{n} = \mathbf{V}\mathbf{u}_3, \quad (11)$$

式中： \mathbf{V} 为(4)式求得的特征矩阵，根据其他先验条件约束，比如该向量应垂直于圆孔任意两点的连线，可以得到唯一的法向矢量 \mathbf{n} 。

2.3 圆孔半径及孔心坐标计算模型

基于圆孔平面法向矢量的计算圆孔半径和孔心坐标的模型如图 3 所示，圆孔平面与相机成像平面不需要保持平行。为方便描述做如下说明和约定：

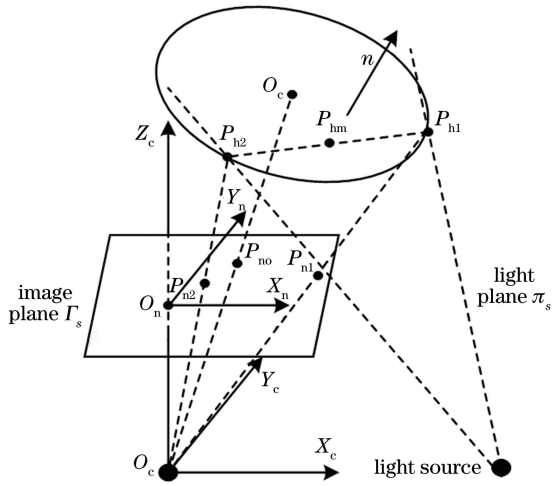


图 3 线结构光传感器测量圆孔

Fig. 3 Line structured light sensor measures round hole

1) 平面 π_s 是光源投射出的激光平面， $P_{h1}P_{h2}$ 是激光平面与圆孔边缘的交线，点 P_{hm} 是弦 $P_{h1}P_{h2}$ 的中点。

2) $O_cX_cY_cZ_c$ 是相机坐标系，也就是传感器坐标系， O_c 是相机光心， O_cZ_c 与相机光轴方向重合，向量 \mathbf{n} 是圆孔平面的法向矢量。

3) 平面 Γ_s 是归一化图像平面， $O_nX_nY_n$ 是归一化图像坐标系， O_n 是光轴与图像平面的交点，线段 $P_{n1}P_{n2}$ 是光线 $P_{h1}P_{h2}$ 在归一化图像平面的成像，圆孔孔心 O_h 在对应图像平面上的点 P_{no} 。

4) 沿着坐标轴的负方向望去，逆时针旋转为正方向。

利用光条提取方法^[14-15]，获取激光条与圆孔边缘交点的像素坐标，根据 2.1 节介绍的线结构光计算三维坐标的模型，可以得到 P_{h1}, P_{h2} 的三维坐标

$(x_{h1}, y_{h1}, z_{h1})^T, (x_{h2}, y_{h2}, z_{h2})^T, P_{h1}, P_{h2}$ 的中点 $P_{hm}(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{hm} = (x_{h1} + x_{h2})/2 \\ y_{hm} = (y_{h1} + y_{h2})/2 \\ z_{hm} = (z_{h1} + z_{h2})/2 \end{cases} \quad (12)$$

根据 2.2 节求得平面圆的法向矢量 \mathbf{n} 。结合圆孔平面的法向矢量 \mathbf{n} 和圆孔平面上一点 P_{h1}, P_{h2}, P_{hm} ，即可确定圆孔平面的平面方程。选择弦的中点 P_{hm} 和法向矢量 \mathbf{n} 确定圆孔平面方程，令 $\mathbf{n} = (x_n, y_n, z_n)^T$ ，则圆孔平面的点法式方程为

$$\mathbf{n}^T(x - x_{hm}, y - y_{hm}, z - z_{hm})^T = 0, \quad (13)$$

式中： \mathbf{n}^T 是圆孔平面法向矢量的转置； $(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T$ 是弦 $P_{n1}P_{n2}$ 的中点 P_{hm} 的坐标。

根据相机透射成像模型可知， O_h, P_{no}, O_c 共线，则有：

$$\frac{x_h}{x_{no}} = \frac{y_h}{y_{no}} = \frac{z_h}{1}, \quad (14)$$

式中： x_h, y_h, z_h 为点 O_h 的三个轴的坐标分量； x_{no}, y_{no} 为 P_{no} 的归一化图像坐标分量。由于圆孔孔心坐标在(13)式描述的平面内，所以结合(13)式和(14)式，就可以获得在相机坐标系下的圆孔孔心坐标：

$$\begin{cases} x_h = x_{no}z_h \\ y_h = y_{no}z_h \\ z_h = \frac{x_n x_{hm} + y_n y_{hm} + z_n z_{hm}}{x_n x_{no} + y_n y_{hm} + z_n} \end{cases} \quad (15)$$

空间圆孔的半径 r 可以由孔心坐标 $(x_h, y_h, z_h)^T$ 和空间孔圆周上的两个点 $(x_{h1}, y_{h1}, z_{h1})^T$ 和 $(x_{h2}, y_{h2}, z_{h2})^T$ 坐标计算：

$$\begin{cases} r_1 = \sqrt{(x_{h1} - x_h)^2 + (y_{h1} - y_h)^2 + (z_{h1} - z_h)^2} \\ r_2 = \sqrt{(x_{h2} - x_h)^2 + (y_{h2} - y_h)^2 + (z_{h2} - z_h)^2} \end{cases} \quad (16)$$

则半径 $r = (r_1 + r_2)/2$ 。

3 孔心坐标误差分析

根据圆孔法向矢量的求解过程可以看出，法向矢量的求取依赖相机内参标定精度以及椭圆轮廓提取精度，使用高精度靶标精确标定相机参数能够提高求解结果精度。另一方面，若图像噪声较大、提取的圆周轮廓不完善，会对结果造成影响，剔除噪声、提高轮廓提取精度可以显著改善法向矢量结果。

同时，从上述方法中可以看到，影响圆孔孔心坐标精度主要有两个方面，一是求取的圆孔平面法向矢量与真实值之间的偏差，二是线结构光测量圆孔边缘

三维点坐标的误差。半径的精度依赖孔心坐标的计算精度,所以在此只进行孔心计算结果的误差分析。

3.1 圆孔平面法向矢量对孔心坐标的精度影响

圆孔平面法向矢量对孔心坐标的误差模型如图4所示,图4与图3有相同的符号和约定,这里不再赘述,同时补充以下说明:

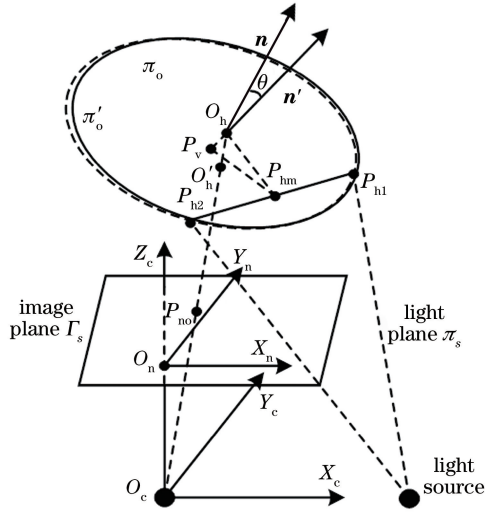


图4 法向矢量影响孔心坐标的误差模型

Fig. 4 Error model of normal vector affecting hole center coordinates

- 1) 圆孔平面 π_o 是由真实法向矢量 \mathbf{n} 和点 P_{hm} 确定。
- 2) 含有误差的法向矢量 \mathbf{n}' 与真实法向矢量 \mathbf{n} 的夹角为 θ , 圆孔平面 π'_o 是由法向矢量 \mathbf{n}' 和点 P_{hm} 确定。
- 3) O_h 是直线 $O_c P_{no}$ 与平面 π_o 的交点, 即真实圆孔孔心, O'_h 是直线 $O_c P_{no}$ 与平面 π'_o 的交点, 即测量得到的含有误差的圆孔孔心。

设定法向矢量真实值 $\mathbf{n} = (x_n, y_n, z_n)^T$, 含有误

差的法向矢量 $\mathbf{n}' = (x'_n, y'_n, z'_n)^T$, 则向量 \mathbf{n} 到向量 \mathbf{n}' 对应的旋转轴 $\mathbf{k} = \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{n}'}{\|\mathbf{n} \times \mathbf{n}'\|}$, 旋转角 $\theta = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}')$, 则向量 \mathbf{n} 到向量 \mathbf{n}' 可以由公式 $\mathbf{n}' = \mathbf{R}\mathbf{n}$, 其中 \mathbf{R} 表示向量 \mathbf{n} 到向量 \mathbf{n}' 的旋转矩阵, 由罗德里戈旋转公式得到

$$\mathbf{R} = \mathbf{k}\mathbf{k}^T + (\mathbf{I} - \mathbf{k}\mathbf{k}^T)\cos\theta + \mathbf{I}_k\sin\theta, \quad (17)$$

式中: \mathbf{k} 为旋转轴单位向量; \mathbf{k}^T 为 \mathbf{k} 的转置向量; \mathbf{I} 为 3×3 单位矩阵; 由向量 \mathbf{k} 确定的反对称矩阵

$$\mathbf{I}_k = \begin{bmatrix} 0 & -y_k & z_k \\ y_k & 0 & -x_k \\ -z_k & x_k & 0 \end{bmatrix}.$$

设定圆孔孔心 $O_h = (x_h, y_h, z_h)^T$, 弦中点 $P_{hm} = (x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T$, 因为 O'_h 与 O_c, O_h 共线, 并且位于由法向矢量 \mathbf{n}' 和点 P_{hm} 确定的圆孔平面 π'_o 上, 所以 O'_h 满足以下约束:

$$\begin{cases} \mathbf{n}'^T(x'_h, y'_h, z'_h)^T = \mathbf{n}'^T(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T \\ x'_h = \frac{x_h}{z_h}z'_h \\ y'_h = \frac{y_h}{z_h}z'_h \end{cases}. \quad (18)$$

求解上述三元一次方程组, 得到:

$$\begin{cases} x'_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}x_h \\ y'_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}y_h \\ z'_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}z_h \end{cases}. \quad (19)$$

在 x, y, z 方向上的误差可由下式计算

$$\begin{cases} \Delta x = x'_h - x_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm} - x_h, y_{hm} - y_h, z_{hm} - z_h)^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}x_h \\ \Delta y = y'_h - y_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm} - x_h, y_{hm} - y_h, z_{hm} - z_h)^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}y_h \\ \Delta z = z'_h - z_h = \frac{\mathbf{n}'^T(x_{hm} - x_h, y_{hm} - y_h, z_{hm} - z_h)^T}{\mathbf{n}'^T(x_h, y_h, z_h)^T}z_h \end{cases}. \quad (20)$$

令向量 $\mathbf{d} = P_{hm}O_h = (x_{hm} - x_h, y_{hm} - y_h, z_{hm} - z_h)^T$, $\mathbf{h} = O_cO_h$, 再令 $d = \|\mathbf{d}\|$, $h = \|\mathbf{h}\|$, 则(17)式可以转化为

$$\begin{cases} \Delta x = x'_h - x_h = \frac{d \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{d} \rangle}{h \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle}x_h \\ \Delta y = y'_h - y_h = \frac{d \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{d} \rangle}{h \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle}y_h \\ \Delta z = z'_h - z_h = \frac{d \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{d} \rangle}{h \cos\langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle}z_h \end{cases}, \quad (21)$$

式中： $\langle \mathbf{n}', \mathbf{d} \rangle$ 、 $\langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle$ 分别对应向量之间的夹角。根据(21)式计算 O_h 与 O'_h 之间的距离，

$$\Delta l = d \left| \frac{\cos \langle \mathbf{n}', \mathbf{d} \rangle}{\cos \langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle} \right|, \quad (22)$$

式中：向量 \mathbf{n}' 由向量 \mathbf{n} 绕轴 \mathbf{k} 旋转得到，当旋转轴 \mathbf{k} 与 \mathbf{d} 平行时， \mathbf{n}' 与 \mathbf{d} 保持垂直的关系不变，也就是 $\Delta l = 0$ ；当旋转轴 \mathbf{k} 与 $\mathbf{n} \times \mathbf{d}$ 平行时，并且旋转 θ ，则 $\Delta l = d \left| \frac{\sin \theta}{\cos \langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle} \right|$ 。向量 \mathbf{n}' 由向量 \mathbf{n} 绕轴 \mathbf{k} 旋转

θ 得到，可以将 θ 分解为绕 \mathbf{d} 轴旋转角 θ_{\parallel} 和绕 $\mathbf{n} \times \mathbf{d}$ 轴旋转角 θ_{\perp} ， θ_{\parallel} 不会影响精度，并且令 $\gamma = \langle \mathbf{n}', \mathbf{h} \rangle$ ，则 $\Delta l = d \left| \frac{\sin \theta_{\perp}}{\cos \gamma} \right|$ ，设定 θ_{\perp} 为 $-3^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ， γ 为 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，设定 d 为 1, 2, 3, 4 mm， Δl 的误差如图 5 所示。

根据误差公式和误差分布图可知，当 θ_{\perp} 和 γ 一定时， d 越小则误差越小，即激光条中心距离圆孔中

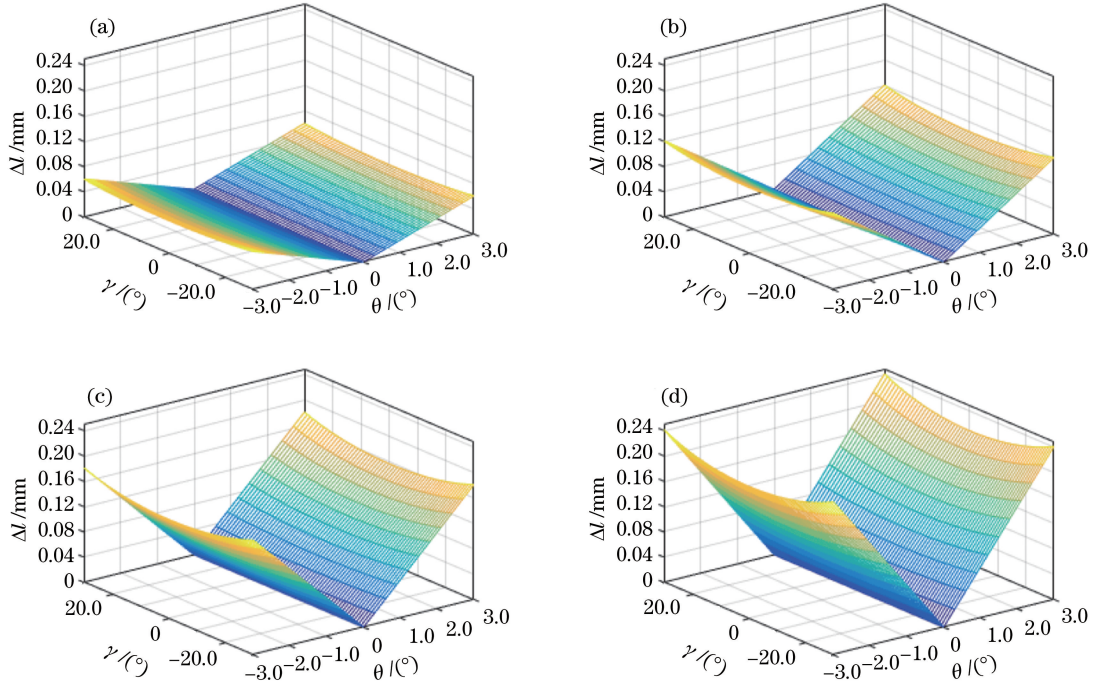


图 5 法向矢量对孔心坐标造成的距离误差。(a) $d=1$ mm; (b) $d=2$ mm; (c) $d=3$ mm; (d) $d=4$ mm
Fig. 5 Distance error caused by the normal vector to hole center coordinates. (a) $d=1$ mm; (b) $d=2$ mm; (c) $d=3$ mm; (d) $d=4$ mm

心越小则误差越小；当 d 一定时， θ_{\perp} 和 γ 绝对值越小，则误差越小；仿真极限误差优于 0.24 mm，实际测量中极限误差极少出现。

3.2 圆周点对孔心坐标的精度影响

在图 4 中，线结构光测量圆孔边缘点 P_{h1} 和 P_{h2} ，与真实值存在一定的偏差，二者的中点 P_{hm} 同样产生偏差，设测得中点为 $P'_{hm} = (x'_{hm}, y'_{hm}, z'_{hm})^T$ ，设定圆孔孔心 $O_h = (x_h, y_h, z_h)^T$ ，因为 O'_h 与 O_c 、 O_h 共线，并且位于由法向矢量 \mathbf{n} 和点 P'_{hm} 确定的圆孔平面 π' 上，所以 O'_h 满足以下约

$$\begin{cases} \mathbf{n}^T (x'_h, y'_h, z'_h)^T = \mathbf{n}^T (x'_{hm}, y'_{hm}, z'_{hm})^T \\ x'_h = \frac{x_h}{z_h} z'_h \\ y'_h = \frac{y_h}{z_h} z'_h \end{cases} \quad (23)$$

令 $(x'_{hm}, y'_{hm}, z'_{hm})^T = (x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T + (\Delta x_{hm}, \Delta y_{hm}, \Delta z_{hm})^T$ ，向量 $\mathbf{h} = (x_{hm}, y_{hm}, z_{hm})^T$ ， $\mathbf{v}' = (\Delta x_{hm}, \Delta y_{hm}, \Delta z_{hm})^T$ ， $\mathbf{h}' = (x'_{hm}, y'_{hm}, z'_{hm})^T$ ，可以获得以下误差公式

$$\begin{cases} \Delta x = x'_h - x_h = \frac{v \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{v}' \rangle}{h \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{h} \rangle} x_h \\ \Delta y = y'_h - y_h = \frac{v \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{v}' \rangle}{h \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{h} \rangle} y_h \\ \Delta z = z'_h - z_h = \frac{v \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{v}' \rangle}{h \cos \langle \mathbf{n}, \mathbf{h} \rangle} z_h \end{cases} \quad (24)$$

式中： v 和 h 分别表示向量 \mathbf{v}' 和 \mathbf{h} 的模长。令 $\beta = \langle \mathbf{n}, \mathbf{v}' \rangle$ ， $\alpha = \langle \mathbf{n}, \mathbf{h} \rangle$ ，则测量孔心坐标与真实值之间的距离误差为 $\Delta l = v \left| \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right|$ ，设定 α 为 $-30^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ， β 为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ， v 设定 4 个值分别为 0.01、

0.04、0.07、0.10 mm, 误差分布如图 6 所示。

根据误差公式和误差分布图可知, 当 α 和 β 一定时, v 越小则误差越小; 当 v 一定时, α 绝对值越

小, β 绝对值越大, 则测量误差越小; 仿真误差精度优于 0.12 mm。

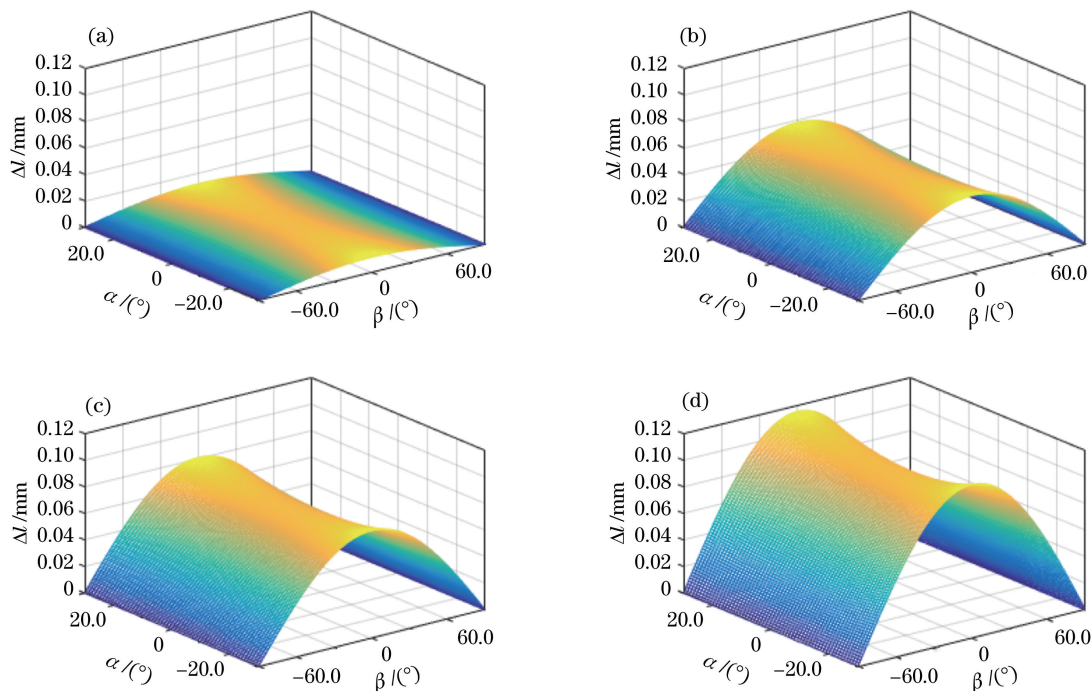


图 6 单点精度对孔心坐标造成的距离误差。(a) $v=0.01$ mm; (b) $v=0.04$ mm; (c) $v=0.07$ mm; (d) $v=0.10$ mm

Fig. 6 Distance error caused by single point accuracy on hole center coordinate. (a) $v=0.01$ mm; (b) $v=0.04$ mm; (c) $v=0.07$ mm; (d) $v=0.10$ mm

4 实验验证与分析

采用搭建完成的线结构光传感器(工作距离为 150 mm, 相机分辨率为 1280×1024)作为实验传感器。待测量的是定制的圆孔标准件, 该标准件上有多个圆孔, 并且圆孔的直径和圆心坐标等均通过影像仪(精度 μm 级别)精确标定, 可以作为精度溯源器件。实验时选取标定块上两个位于同一平面上的圆孔进行测量, 同时采用微型六轴(角度精度为 0.1°)转台作为载体, 用来调整标准件相对传感器的姿态。对传感器进行标定^[16-17], 并搭建如图 7 所示的实验平台, 对标准块元器件上选定的圆孔 1 和圆孔 2 进行测量。旋转六轴转台垂直于地面的轴 5° 、 10° 、 15° 、 20° , 同时调整转台的平移轴保持待测量的圆孔 1 和圆孔 2 同时被激光线穿过, 计算两个圆孔的法向矢量、孔心的距离, 以及孔的半径, 并将结果与影像仪标定的数据作比较, 评价不同方法的精度。

在亮图上进行模板匹配, 边缘提取、椭圆拟合等处理, 结合相机内部参数, 能够获得圆孔平面的法向矢量, 并且将相邻的两个位置的孔的法向矢量的夹

角与设定的值作比较, 如图 8 所示。实验时, 六轴微型转台每次转过 5.0° , 孔 1 的误差极值为 0.6° , 平均误差为 0.3° ; 孔 2 的误差极值为 0.7° , 平均误差为 0.3° 。

在每个位置下计算两个圆孔的孔心距离, 结果如图 9 所示。将两个圆孔孔心距离的测量结果与影像仪标定的结果 15.992 mm 比较, 当误差极值为 0.03 mm、平均误差为 0.02 mm 时, 测量精度较高。

两个圆孔半径计算结果如图 10 所示, 将圆孔半径测量结果与影像仪测量的结果进行比较, 圆孔 1 的半径用影像仪标定的结果为 3.054 mm, 本实验测量的误差极值为 0.03 mm, 平均误差为 0.02 mm; 圆孔 2 的半径用影像仪标定的结果为 2.020 mm, 本实验测量的误差极值为 -0.03 mm, 误差平均误差为 0.02 mm。

将所提算法与现有方法对比, 选择标准块中半径最大的圆孔(影像仪标定半径为 3.054 mm)进行对比实验, 实验时将传感器的光条尽量远离圆心, 保持传感器平面与相机平面成 $20^\circ \sim 35^\circ$, 测试三组不同测量角度的数据, 结果如图 11 所示。

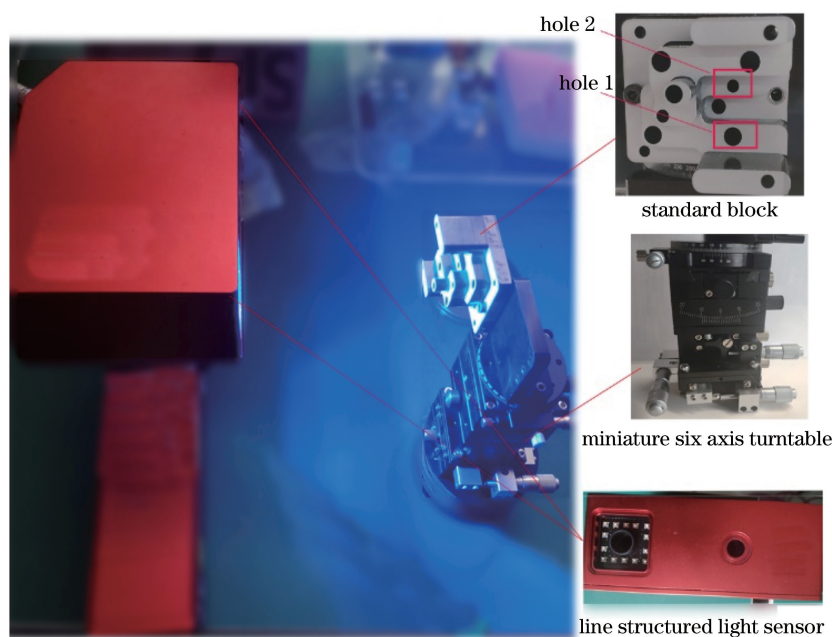


图 7 实验平台

Fig. 7 Experiment platform

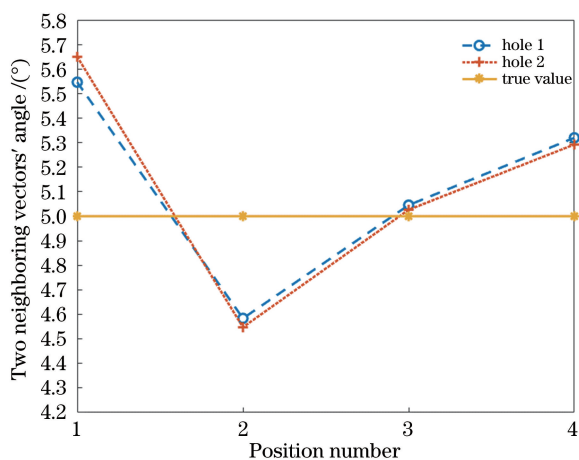


图 8 相邻两个位置圆孔法向矢量夹角

Fig. 8 Angle between the normal vector of two adjacent circular holes

从图中可以看出,当光条远离待测圆心时,随着传感器与待测圆孔角度的增大,使用传统“两步法”(即文献[8]、[9]提出的方法)测量结果误差越来越大,最大误差已经达到 -0.23 mm ,而本文方法只在小范围误差内波动,最大误差为 0.04 mm 。从而验证了所提算法在大角度测量时,比现有算法具有更高的测量精度。

5 结 论

本文研究了一种基于线结构光传感器测量圆位姿的方法,该方法首先根据圆的轮廓和相机内参计

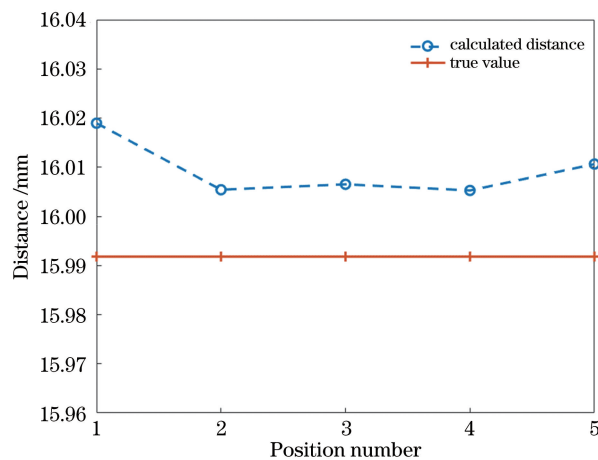


图 9 孔心距离结果

Fig. 9 Distance results of hole center

算空间圆的法向矢量,再联立圆周的两个点坐标,依据空间几何基本定理,确定圆平面方程,最后结合共线方程求解空间圆心坐标,可以同时得到圆的半径尺寸。该方法对相机平面和空间平面圆的位置关系没有严格要求,不需要变换传感器与待测物体的位置,没有大量的同名点匹配,因此方法的鲁棒性强,测量精度高。对本文方法进行实验验证,采集了两个圆孔在五组不同位置下的图片,空间平面圆法向平均误差为 0.3° ,两个孔心距离平均误差为 0.02 mm ,两个圆孔半径的平均误差分别为 0.02 mm 和 0.02 mm ,验证了该方法能够获取高精度的空间圆孔的几何参数,同时进行了对比实验,验

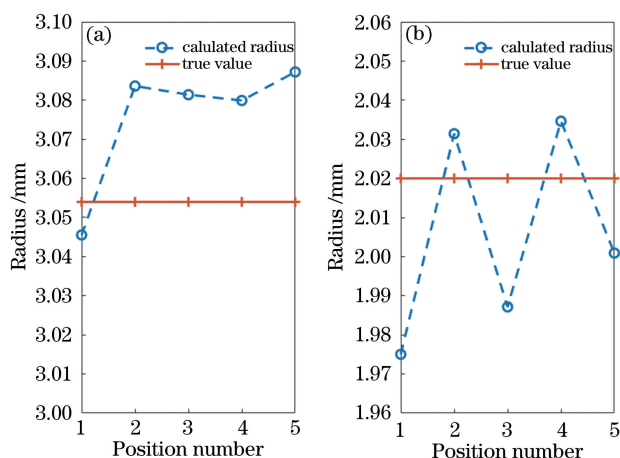


图 10 圆孔半径计算结果。(a)圆孔 1;(b)圆孔 2
Fig. 10 Calculation results of radius of round hole.

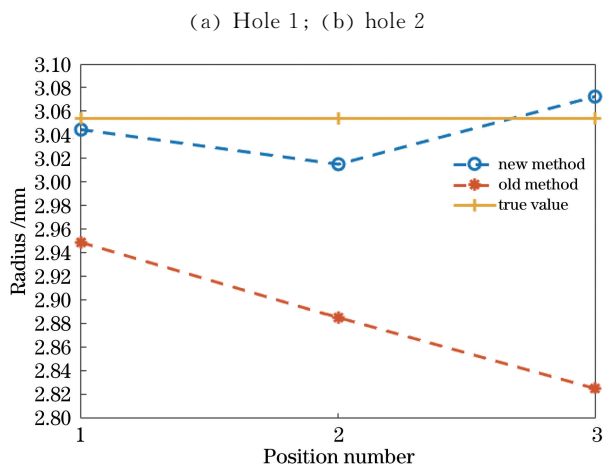


图 11 两种方法测量半径的结果

Fig. 11 Result of measuring radius using two methods

证该算法相对于传统方法,在大角度情形下仍具有较高的精度。该方法扩展了线结构传感器测量圆孔位姿的适应性,对工业测量具有指导意义。

参 考 文 献

[1] Zhu J G, Yu Z J. Principle of vision metrology[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
郝继贵, 于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

[2] Yin S B, Ren Y J, Liu T, et al. Review on application of machine vision in modern automobile manufacturing[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815001.
尹仕斌, 任永杰, 刘涛, 等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815001.

[3] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering,

2010, 48(2): 149-158.

[4] 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.
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.

[5] Koninckx T P, Van Gool L. Real-time range acquisition by adaptive structured light [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006, 28(3): 432-445.

[6] Wu Y C. Research on key technologies of three-dimensional measurement based on line structure light[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019: 1-8.
吴燕城. 基于线结构光三维测量关键技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019: 1-8.

[7] Xue T, Sun M, Zhang T, et al. Two-step method for measuring center coordinates of spatial hole based on the structured light stripe vision sensor [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(10): 206-209.
薛婷, 孙梅, 张涛, 等. 线结构光视觉传感器测圆(类圆)孔中心两步法[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 206-209.

[8] Xue T, Wu B, Zhang T, et al. Analysis on round-hole orientation error based on structured light stripe vision sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(4): 624-629.
薛婷, 吴斌, 张涛, 等. 基于线结构光视觉传感器的圆孔定位误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 624-629.

[9] Yu H T, Huang Y, Zheng D L, et al. Three-dimensional shape measurement technique for large-scale objects based on line structured light combined with industrial robot[J]. Optik, 2020, 202: 163656.

[10] Wei Z Z, Xie M, Zhang G J. Calibration method for line structured light vision sensor based on vanish points and lines [C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition. 23-26 Aug. 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 794-797.

[11] Chen Z, Hu Y X, Hao H. Line structured light measurement algorithm based on 3D vision [J]. Modern Information Technology, 2019(22): 33-35.
陈状, 胡永祥, 郝晗. 基于3D视觉的线结构光测量算法[J]. 现代信息科技, 2019(22): 33-35.

[12] Safae-Rad R, Smith K C, Benhabib B, et al. An analytical method for the 3D-location estimation of circular features for an active-vision system [C]//

- 1990 IEEE International Conference on Systems. 4-7 Nov. 1990, Los Angeles, CA, USA. New York: IEEE Press, 1990: 215-220.
- [13] Wu H Y, Chen Q, Wada T. Homography from conic intersection: camera calibration based on arbitrary circular patterns[J]. IPSJ Transactions on Computer Vision and Image Media, 2003, 139(2): 9-16.
- [14] Li Y H, Liu P, Zhou J B, et al. Center extraction of structured light stripe based on back propagation neural network [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (12): 1212005.
李玥华, 刘朋, 周京博, 等. 基于 BP 神经网络的结构光光条中心提取 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1212005.
- [15] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20 (2): 113-125.
- [16] Zhou J B, Li Y H, Qin Z Y, et al. Calibration of line structured light sensor based on reference target[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(4): 0412005.
周京博, 李玥华, 秦志英, 等. 基于参考靶标的线结构光传感器标定 [J]. 光学学报, 2019, 39(4): 0412005.
- [17] Chen T F, Zhao J B, Wu X. New calibration method for line structured light sensor based on planar target [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112004.
陈天飞, 赵吉宾, 吴翔. 基于共面靶标的线结构光传感器标定新方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112004.