

基于双目视觉极线补偿的圆孔位姿检测方法

陈金友^{1,2}, 关志伟^{1,3*}

¹天津职业技术师范大学汽车与交通学院, 天津 300222;

²湖南财经工业职业技术学院汽车工程系, 湖南 衡阳 421002;

³天津中德应用技术大学汽车与轨道交通学院, 天津 300350

摘要 圆孔是自动化制造装配过程中最重要的特征, 准确估计孔位姿有利于实现高精度工艺。因此, 提出了一种基于双目视觉极线约束的圆孔位姿检测方法。首先, 为了提高轮廓提取的准确性, 提出了一种基于形态学相加的轮廓提纯方法。然后, 基于极线约束对孔的纵坐标进行补偿, 并利用高斯拟合确定最优横坐标, 实现精准匹配。最后, 利用拟合的空间圆确定孔的位姿。实验结果表明, 本方法提取的轮廓接近真实的孔轮廓, 孔位与半径的测量精度为 0.05 mm; 相比没有补偿的情况, 增加补偿后孔径与孔间距的测量精度分别提升了 31.56% 和 34.07%。本方法提供了一种提升孔位姿测量精度的策略, 且满足制造和装配的实际应用需求。

关键词 机器视觉; 双目视觉; 极线约束; 偏差补偿; 形态学

中图分类号 TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2015009

Circular Hole Pose Measurement Method Based on Binocular Vision Epipolar Compensation

Chen Jinyou^{1,2}, Guan Zhiwei^{1,3*}

¹ School of Automobile and Transportation, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

² Department of Automotive Engineering, Hunan Financial & Industrial Vocational-Technical College, Hengyang, Hunan 421002, China;

³ School of Automobile and Rail Transit, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China

Abstract Circular holes are important features in automated manufacturing and assembly, and accurately estimating the pose of a hole can contribute to high-precision processes. Therefore, we propose a method for circular hole pose measurement based on epipolar constraints of binocular vision. First, to improve the accuracy of contour extraction, a contour purification method based on morphological addition is proposed. Then, the ordinate of the hole is compensated according to the epipolar constraint, and the optimal abscissa is determined via Gaussian fitting to achieve precise matching. Finally, the fitted circle in space is used to determine the hole pose. Experimental results show that the contour extracted using the method closely follows the real hole contour, and the measurement accuracy of the hole position and radius is 0.05 mm. Compared with no compensation, the measurement accuracy of the aperture and hole spacing increases by 31.56% and 34.07% after compensation, respectively. The method provides a strategy to improve the accuracy of hole pose measurement, and meets the actual application requirements of manufacturing and assembly.

Key words machine vision; binocular vision; epipolar constraint; offset compensation; morphology

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.1135

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-06; 录用日期: 2020-12-22

基金项目: 天津市人工智能科技重大专项(17ZXRGGX00070)、天津市科技发展战略研究计划重点招标项目(18ZLZDZF00390)

通信作者: *guanzhiw5511@163.com

1 引言

在车辆、机械、航空航天等领域,自动化制造与装配逐渐成为快速大批量生产的主流模式。以工业机器人、数控机床为主的自动化装备在作业过程中,主要依赖零部件表面的连接孔,孔的检测与定位精度会影响自动化连接的质量^[1]。对于整体零件来说,孔质量的主要评估指标是孔位和法向,传统方法通过塞规、止规等标准件进行人工检测,效率低且不能保证精度的一致性。随着机器视觉和光电子测量技术的发展,孔的高精度、自动化与非接触测量检测逐渐成为相关领域研究和应用的热点问题^[2]。

基于视觉与光学的孔参数测量具有操作灵活、成本低、非接触测量等优点。刘新波等^[3-4]利用单束激光实现了孔的直径和轴线直线度的在机测量,推进了光学传感器在制孔检测一体化方面的应用。乔闹生等^[5]基于霍夫圆变换,实现了印刷电路板上同心圆的检测。但空间圆经过相机成像后在图像平面上为椭圆,使霍夫变换失效。庄志炜等^[6]利用二维激光扫描仪获取孔的三维点云,然后利用圆形模板匹配方法识别圆孔并求解法向。但该方法基于三维测量数据,增加了孔识别的复杂度。双目视觉可实现孔位姿的直接测量,其核心技术包括孔轮廓提取和孔三维重建。Liu 等^[7]提出了一种新的圆姿态和半径估计方法,利用与未知半径无关的特殊向量计算圆的法向量,并基于双目视觉重建圆心。但该方法在圆姿态估计中没有考虑极线约束,可能造成立体匹配偏差,影响重建精度。Xia 等^[8]提出了一种基于可信孔边缘提取和空间圆重构的圆孔精确稳健测量方法。Wu 等^[9]用锥退化方法测量孔位姿,并引导机器人的抓取。Jiang 等^[10]提出了一种基于轮廓点三维重建的孔位姿测量方法,并将其用于机器

人轴孔自动化装配过程中。Li 等^[11]研究了单摄像机的孔位姿测量,但该方法在深度方向的测量中不稳定且不准确。Lü 等^[12]提出了一种基于一维单应性的圆姿态测量方法,但这种方法对噪声很敏感,不适用于变化的工业环境。袁培江等^[13]利用双目视觉实现了孔位姿的测量与补偿,提升了自动化制孔的测量精度,但双目视觉中立体匹配的精度会影响三维重建的精度^[14-15]。雷经发等^[16]利用双目视觉实现了弱纹理表面的重建,并利用归一化协方差算法在双目极线约束后进行像素匹配,进一步提高了重建质量。综上所述,基于双目视觉的孔位姿定位与法向检测取得了一定的成果,但在三维孔位姿测量与精度方面仍有待提升。

针对孔位姿和法向的测量问题,本文提出了一种基于双目极线约束的高精度孔位姿检测方法。首先,提取左右图像中孔轮廓的椭圆特征;然后,基于双目极线约束对孔轮廓进行优化;最后,利用三维重建的孔轮廓点计算孔位姿及法向。实验结果表明,该方法可提升基于视觉的孔位姿测量精度,满足自动化制孔与装配的工程应用要求。

2 圆孔位姿检测

2.1 测量系统与原理概述

本系统包括双目测头和计算机,为保证稳定的测量环境,用外加光源进行照明。实验研究对象为平面圆孔,孔位姿的测量过程如图 1 所示。双目相机采集到图像后,先分别对左右图像进行噪声滤除等预处理,然后检测图像中孔的轮廓线,最后对轮廓线进行过滤和提纯,获得真实的圆形轮廓。

本系统基于形态学相加的轮廓滤除算法对目标轮廓进行分割,以获得真实的孔轮廓线。此外,通过

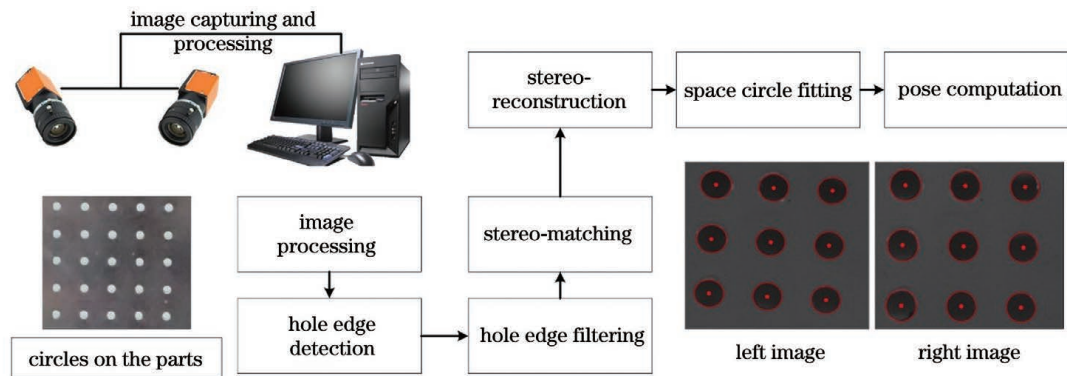


图 1 基于双目视觉的孔位姿测量

Fig. 1 Hole pose measurement based on binocular vision

双目极线约束搜索正确匹配点,并对匹配点进行偏差补偿,然后根据双目原理获得孔的三维轮廓。由于平面圆孔的三维空间特征仍为圆特征,因此,需要对三维轮廓进行空间圆拟合,以获得孔位姿和法向信息。

2.2 基于模板图像的孔轮廓提取

获取左右图像后需要对其进行预处理,由于系统在稳定的光照环境下进行测量,图像只存在少量随机噪声。因此,先采用高斯滤波对图像噪声进行滤除,然后利用 Canny 算子获取图像中的边缘线,最后将连续的边缘线判定为一条轮廓线,从而获得孔轮廓的候选轮廓集合 P_1 ,并用候选轮廓集拟合椭圆。从候选轮廓集中筛选目标轮廓的约束可表示为

$$\begin{cases} H(P_1) > 6 \text{ pixel} \\ \frac{M_x(c_{1i})}{M_n(c_{1i})} < \delta_1 \\ \text{abs} \left[\left\| \frac{L(c_{1i})^2}{4\pi S(c_{1i})} \right\| - 1 \right] < \delta_2 \\ \frac{\|S(c_{1i}) - S(P_1)\|}{S(P_1)} < \delta_3 \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $H()$ 为轮廓的长度,即像素个数, $M_x()$ 、 $M_n()$ 分别为拟合椭圆轮廓的长轴和短轴长度, $L()$ 为拟合椭圆的周长, $S()$ 为轮廓包含的面积, $\text{abs}()$ 为取绝对值函数, i 为轮廓索引, c_{1i} 为初始候选轮廓集中第 i 个拟合的椭圆。通过理论分析和实验环境测试,设定参数 $\delta_1 = 2$, $\delta_2 = 0.2$, $\delta_3 = 0.1$,即拟合椭圆的长短轴比应小于 2,否则椭圆趋向扁平,不符合实际测量情况。其中,圆度值小于 0.2,面积偏差相对值小于 0.1。经过(1)式的筛选后,可得到目标轮廓及对应的椭圆特征。虽然根据目标轮廓能够获得完整的椭圆,但轮廓偏差可能会导致目标轮廓偏离真实孔边缘,因此,必须从图像中进一步对目标轮廓进行分割。本方法基于形态学的模板法对目标轮廓进行分割,具体过程如图 2 所示。将利用拟合椭圆获得的轮廓采样点集记为 P_2 ,经过轮廓检测得到的实际轮廓记为 P_1 。理论上 P_1 与 P_2 应接近或重合,

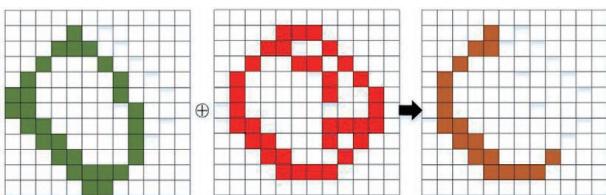


图 2 基于形态学的模板法轮廓提纯

Fig. 2 Template method contour purification based on morphology

但实际轮廓存在偏差导致拟合椭圆并不满足实际情况,从而影响圆心定位。因此,在获取 P_1 、 P_2 后,设置 3×3 的空模板 $I_{3 \times 3}$, $I_{3 \times 3} = X_{\text{all}}(0)$ 表示模板元素全为 0,形态学相加准则可表示为

$$P_{1,i} \oplus P_{2,j} = \{1 \mid P_{1,i} \cap P_{2,j} \neq \emptyset, P_{2,j} \in c_2\}, \quad (2)$$

式中, $P_{1,i}$ 为初始轮廓集中第 i 条轮廓, $P_{2,j}$ 为拟合椭圆轮廓集中第 j 条轮廓, c_2 为拟合轮廓集, \oplus 为形态学加法运算符,具体操作为取交集。(2)式表明,搜索 P_1 、 P_2 的 3×3 邻域,若邻域内有相交的非 0 像素,则设定 $I(m, n) = 1$,其中, m 、 n 为矩阵的行列,可取为 $-1, 0, 1$;否则, $I(m, n) = 0$ 。记录模板中心点在原图像中的位置,并对新图像进行赋值,像素值为轮廓 $P_{1,i}$ 对应的像素值。然后,遍历所有的轮廓点,获得全部满足形态学相交的像素坐标。最后,根据(1)式对过滤的轮廓进行拟合。本方法可适用于初始轮廓与目标轮廓接近的情况,但对于初始轮廓偏差较大的情况,过滤后也不能获得椭圆特征,因此,需要采用“输者全无”的准则进行滤除,即直接舍弃过滤后无法获得椭圆特征的像素。

2.3 基于极线校正的孔轮廓匹配

根据双目视觉的基本原理可知,左右图像坐标系存在固有的变换关系,即基本矩阵。若左右相机的内参矩阵分别为 K_L 和 K_R ,根据相机的成像模型,图像点 M 可以通过空间点投影获得。以左图像点为例,即 $m_L = P_L M = K_L [R_L \mid t_L] M$ 。其中, P_L 为投影矩阵, R_L 、 t_L 分别为左相机的外参旋转矩阵和平移向量,双目极线校正的目标是寻找新的投影矩阵 P_{L_n} 、 P_{R_n} (n 为优化次数),使左右图像平面发生变换,双目坐标系在纵轴方向上保持平齐,即图像坐标点在极线约束情况下的纵坐标相同。将新的投影矩阵定义为 $P_{L_n} = K [R \mid -Ro_L]$, $P_{R_n} = K [R \mid -Ro_R]$ ^[17],其中, R 为左右相机的旋转矩阵, o 为相机的坐标系原点, $K = (K_L + K_R) / 2$ 。若投影矩阵可分解为 Q 和 q 矩阵,则 $P_L = [Q_L \mid q_L]$, $P_{L_n} = [Q_{L_n} \mid q_{L_n}]$,校正后的图像点可表示为 $m_{L_n} = \lambda Q_{L_n} Q_L^{-1} m_L$,其中, λ 为特征向量。

根据处理后的左右图像获得目标椭圆并进行采样,得到的左右图像轮廓点集可表示为 $p_L = \{p_{L1}, \dots, p_{Lk}\}$ 、 $p_R = \{p_{R1}, \dots, p_{Rs}\}$,其中, k 、 s 为左右轮廓点的总数量。对正确匹配点 $p_{Lk}(u_{Lk}, v_{Lk})$ 和 $p_{Rb}(u_{Rb}, v_{Rb})$ 的纵坐标进行修正,可表示为

$$v_{Lk} = v_{Rb} + \epsilon, \quad (3)$$

式中, v_{Lk} 、 v_{Rb} 分别为左右图像点的纵坐标, ϵ 为相

机参数和投影矩阵计算误差导致的图像纵坐标偏差。椭圆在长轴和短轴方向上各有两个极点,由双目视觉的唯一匹配原则可知,纵轴方向上的两个极点必然为正确匹配点。因此,搜索左右椭圆像素点中的两个极点 $e_{L1}(u_{L1}, v_{L1})$ 、 $e_{L2}(u_{L2}, v_{L2})$, 对应的匹配点为 $e_{R1}(u_{R1}, v_{R1})$ 、 $e_{R2}(u_{R2}, v_{R2})$, 得到双目极线校正的补偿值为

$$\varepsilon = \frac{1}{2} [(v_{L1} - v_{R1}) + (v_{L2} - v_{R2})]。 \quad (4)$$

对于椭圆轮廓,一条水平极线与椭圆有多个相交点。因此,本方法利用高斯拟合法确定最优的待匹配点,具体原理如图 3 所示。图 3(a)为孔轮廓的示意图,可以发现,一条极线与椭圆边缘有多个相交点,大致分为左右两个区域(左右区域可利用双目匹

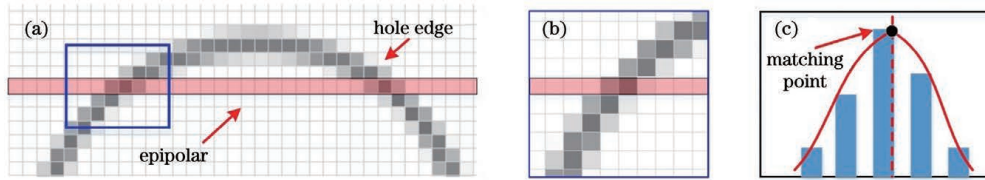


图 3 高斯拟合法确定的待匹配点。(a)圆孔的边缘轮廓;(b)左侧区域的放大部分;(c)最佳匹配点的高斯拟合结果
Fig. 3 Points to be matched determined by Gaussian fitting method. (a) Edge contour of the circular hole; (b) enlarged part of the left area; (c) Gaussian fitting result of the best matching point

2.4 孔轮廓的三维重建与位姿计算

获得正确的匹配点后,对左右图像坐标点进行重新排序和更新,利用双目视觉的视差重建原理重建孔的三维轮廓。获得孔的三维轮廓后需要求解孔的孔心和法向,记孔轮廓的三维点为 $M = \{M_1, \dots, M_N\}$, 质心点的坐标 $C = \sum_{i=1}^N M_i$, 其中, N 为轮廓点的数量, M_i 为第 i 条轮廓。记中心化的三维点 $M_c = [M_1 - C, \dots, M_N - C]^T$, 则孔所在三维平面的法向量可表示为

$$n_M^* = \operatorname{argmin} \|M_c n_M\|^2。 \quad (7)$$

利用奇异值分解得到孔端面法向量的最优解,然后利用罗德里格斯变换将三维点投影到孔端面平面,可表示为

$$M_{pi} = M_i \cos \theta + k \times M_i \sin \theta + k(kM_i)(1 - \cos \theta), \quad (8)$$

式中, $k = n_M^* \times e_3$, $\theta = \arccos \left(\frac{n_M^* e_3}{\|n_M^*\|} \right)$, $e_3 = (0, 0, 1)^T$, $M_{pi} = (x_{pi}, y_{pi})$ 。二维平面上孔的中心通过标准圆拟合确定,可表示为 $(x_c, y_c)^T$, 孔的半径为 r , 则圆方程可表示为

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 = r^2。 \quad (9)$$

的顺序进行区分)。图 3(b)为左边区域的放大示意图,可以发现,一条极线与左边区域相交的像素灰度值先增加后减小,如图 3(c)所示。一维高斯函数可表示为

$$G(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]。 \quad (5)$$

为便于求解高斯函数的均值 μ 和方差 σ , 对(5)式进行对数处理,可表示为

$$\ln [G(x)] = -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} + \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} = a_1 x^2 + a_2 x + a_3。 \quad (6)$$

根据任意一条极线下点的坐标及对应的灰度值,利用最小二乘法得到最佳匹配点的横坐标 $\mu = -a_2/2a_1$, 从而得到更精确的椭圆轮廓匹配点。

$$\text{令 } A = \begin{bmatrix} x_{p1} & y_{p1} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{pN} & y_{pN} & 1 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} x_{p1}^2 + y_{p1}^2 \\ \vdots \\ x_{pN}^2 + y_{pN}^2 \end{bmatrix}, q = (q_0, q_1, q_2)^T, \text{ 建立方程组} \quad (10)$$

利用最小二乘法求解(10)式,得到平面上的圆参数 $x_c = \frac{q_0}{2}, y_c = \frac{c_1}{2}, r = \frac{1}{2} \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + 4q_2}$ 。将平面圆心 $(x_c, y_c, 0)^T$ 反投影到三维空间就能得到孔中心坐标 $(x_c, y_c, z_c)^T$ 。

3 实验结果与分析

为验证本方法的精度和有效性,搭建了双目立体视觉系统,并选取现有的平面标准孔进行测量验证。系统程序平台为 Visual Studio 2015 C++, 算法主要通过第三方开源库实现,如 Boost(C++扩展库)、特征矩阵运算库、OpenCV(计算机视觉库)。系统硬件包括两个像素尺寸为 1280 pixel \times 960 pixel、采样频率为 30 Hz、镜头焦距为 8 mm 的 CCD 相机 (IMAGINGSource), 测试平台为 Windows 10、i7-9750CPU 和 NVIDIA GeForce GTX 1660Ti。双目视觉系统搭建完成后,利用棋盘格进行标定并获得

双目特性参数,其中,重投影误差为 0.179 pixel。

3.1 孔轮廓提取实验

图 4 为本方法的孔轮廓提取过程,为清晰展示孔的局部细节,对一个视图只截取了一个孔进行展示。可以发现,对 Canny 算子提取的边缘进行轮廓

检测获得的初始轮廓比较零散,且目标轮廓存在交叉现象。经过初步椭圆过滤后,拟合的椭圆具有一定的偏斜,且远离了真实孔边缘。用本方法对初始筛选的轮廓进行滤除后,得到的椭圆更接近孔的真实轮廓,验证了本方法的有效性。

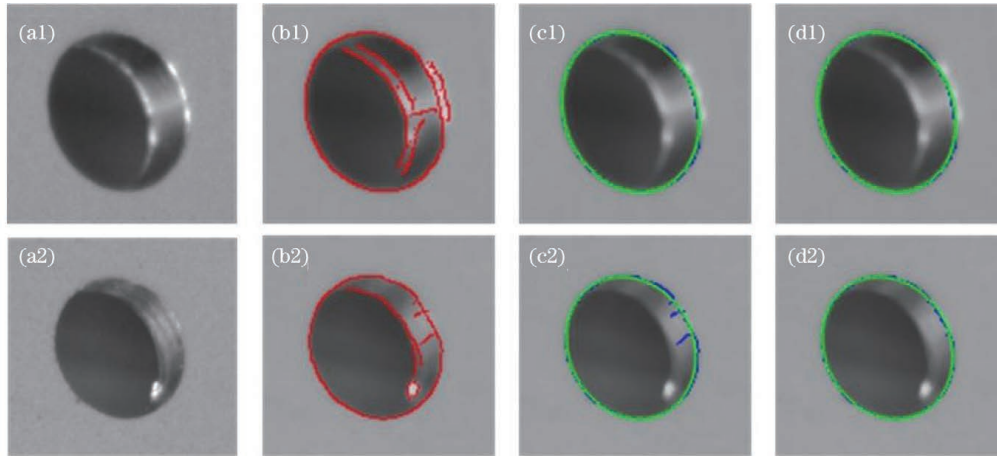


图 4 本方法提取的孔轮廓。(a)原始图像;(b)边缘检测;(c)初始孔边缘拟合的椭圆;(d)优化孔边缘拟合的椭圆

Fig. 4 Hole contour extracted by our method. (a) Original image; (b) edge detection; (c) ellipse fitted to the initial hole edge; (d) ellipse fitted to of the optimized hole edge

3.2 孔位姿计算

用本方法先分别提取左右图像中的孔轮廓,然后利用双目原理进行重建。图 5 为多个孔目标的三维识别及重建结果,图 5(a)和图 5(b)分别为左右图像孔的识别结果。利用极线约束并进行偏差校正后,将获得的匹配点用于三维重建。图 5(c)为三维孔轮廓及其对应的法向量。为量化孔的特征参数,给出了 4 个孔对应的参数,如表 1 所示。可以发现,本方法能有效测量出圆孔的孔位、法向和半径。从孔的半径偏差和孔间距偏差可以发现,孔半径的平均偏差为 0.0563 mm(标准孔半径为 2.5 mm),孔间距(1 号和 2 号,2 号和 3 号,3 号和 4 号孔的孔心距离)的平均偏差为 0.05 mm(标准孔间距为 10 mm),这表明本方法

在孔位姿测量上具有较高的可信度,测量精度可保持在 0.05 mm。

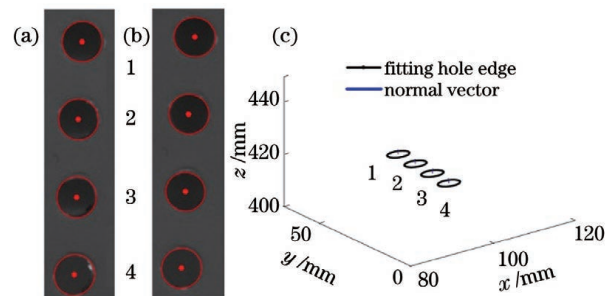


图 5 孔轮廓的三维重建结果。(a)左图像;(b)右图像;(c)重建结果

Fig. 5 Three-dimensional reconstruction result of the hole profile. (a) Left image; (b) right image; (c) reconstruction result

表 1 重建孔的特征参数

Table 1 Characteristic parameters of reconstructed holes

No.	Hole location /mm	Normal vector	Radius /mm	Radius error /mm	Hole spacing /mm	Hole spacing deviation /mm
1	(86.88, 43.70, 424.15)	(0.089, -0.036, 0.997)	2.550	0.050	-	-
2	(86.55, 33.71, 423.83)	(0.089, -0.037, 0.997)	2.557	0.057	10.00	0
3	(86.18, 23.79, 423.40)	(0.087, -0.037, 0.997)	2.556	0.056	9.94	0.04
4	(87.02, 13.87, 423.14)	(0.086, -0.038, 0.997)	2.562	0.062	9.96	0.06

3.3 极线约束偏差补偿的有效性验证

为验证本方法中极线偏差补偿的有效性,分别设定了不进行补偿和进行补偿两组实验。通过对比空间圆半径和孔心距离评价重建的精度。为直观展示两组实验的差异,绘制了不同方法的偏差分布曲线,如图 6 所示。图 6(a)为测量孔的图像,图 6(b)和图 6(c)分别为进行极线偏差补偿和没有补偿情

况下三维孔半径和孔间距的误差分布。可以发现,没有补偿时,孔半径的平均误差为 0.0713 mm,孔间距的平均误差为 0.0637 mm。补偿后孔半径的平均误差为 0.0488 mm,降低了 31.56%,孔间距的平均误差为 0.0420 mm,降低了 34.07%。这验证了本方法对于孔位姿的精确测量效果,且测量结果满足自动化孔测量等应用的需求。

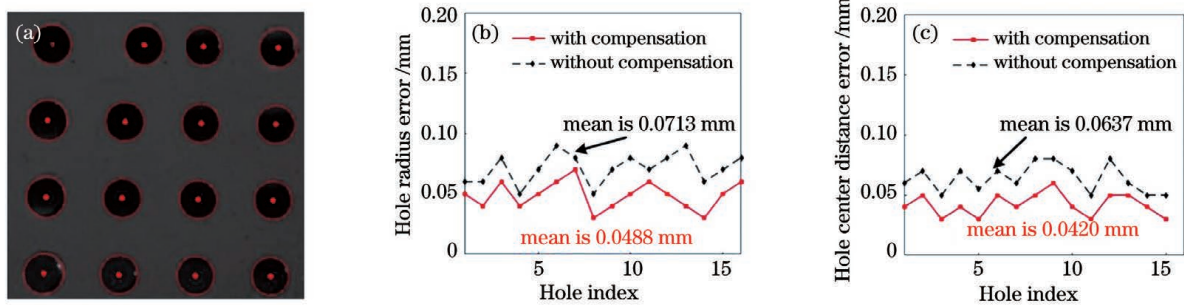


图 6 偏差补偿的实验结果。(a)测量孔的图像;(b)孔半径;(c)孔间距

Fig. 6 Experimental results of deviation compensation. (a) Image of the measurement hole; (b) radius of the hole; (c) distance between the holes

4 结 论

研究了基于双目立体视觉的孔位姿测量方法,实现了孔位姿测量的优化与精度提升。提出了一种基于形态学相加的孔轮廓线优化提纯算法,进一步基于极线约束对孔轮廓线上的匹配点进行偏差补偿,并通过高斯拟合法确定最终的匹配点坐标。通过实验验证了本方法的孔轮廓优化精度及孔位姿测量精度,并利用孔位和孔心距进行了精度评价。实验结果表明,本方法对孔测量的综合效果较优,且能满足目前车辆工程等工业领域中自动制孔与检测对于高效率、自动化、精度一致性等需求。

参 考 文 献

- [1] Qin Y. Research on large aircraft component assembly based on laser ranging technology and machine vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019: 30-50.
秦宇. 基于激光测距和机器视觉的飞机大部件对接技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019: 30-50.
- [2] Zhang H. Research on measurement technology of aircraft docking hole position based on machine vision [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018: 34-55.
张辉. 基于机器视觉的飞机对接孔位测量技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018: 34-55.
- [3] Liu X B, Wang Z, Lin L, et al. Measuring method

for deep hole straightness based on single laser beam rotation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 031203.

刘新波, 王仲, 林立, 等. 基于单激光束旋转的深孔直线度测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 031203.

- [4] Liu X B, Wang Z, Luo Q Y, et al. On-machine measurement of hole diameter based on single laser beam rotation [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041204.

刘新波, 王仲, 罗庆跃, 等. 基于单激光束旋转的圆孔直径在机测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041204.

- [5] Qiao N S, Ye Y T, Mo C H, et al. Method for the detection of concentric circles of photoelectric image of circular hole in printed circuit board [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 75-78.

乔闹生, 叶玉堂, 莫春华, 等. 印刷电路板圆孔光电图像的同圆心检测方法 [J]. 光学学报, 2010, 30(1): 75-78.

- [6] Zhuang Z W, Tian W, Li B, et al. Detection algorithm of hole position and normal based on template matching [J]. Computer integrated manufacturing system: 1-8 [2020-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20200331.1357.012.html>.

庄志伟, 田威, 李波, 等. 基于模板匹配的孔位与法矢检测算法 [J]. 计算机集成制造系统: 1-8 [2020-10-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.tp.20200331.1357.012.html>.

- [7] Liu Z Y, Liu X, Duan G F, et al. Precise pose and radius estimation of circular target based on binocular vision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(2): 025006.
- [8] Xia R B, Su R, Zhao J B, et al. An accurate and robust method for the measurement of circular holes based on binocular vision [J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(2): 025006.
- [9] Wu C R, He Z X, Zhang S Y, et al. A circular feature-based pose measurement method for metal part grasping [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(11): 115009.
- [10] Jiang T, Cui H H, Cheng X S, et al. A measurement method for robot peg-in-hole prealignment based on combined two-level visual sensors [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1-12.
- [11] Li H, Zhang X M, Zeng L, et al. A monocular vision system for online pose measurement of a 3RRR planar parallel manipulator [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2018, 92(1): 3-17.
- [12] Lü Y W, Xu Z C, Liu W, et al. Pose estimation of a single circle based on 1D homography [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11179: 1117943.
- [13] Yuan P J, Chen D D, Wang T M, et al. Research on positional error compensation method based on binocular vision measurement system [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2018, 61(4): 41-46.
- 袁培江, 陈冬冬, 王田苗, 等. 基于双目视觉测量系统的孔位补偿研究 [J]. *航空制造技术*, 2018, 61(4): 41-46.
- [14] Da J, Qu H M, Tao T Y, et al. Real-time three-dimensional measurement composite of epipolar constraint and speckle correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1012003.
- 笄健, 屈惠明, 陶天阳, 等. 结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法 [J]. *光学学报*, 2016, 36(10): 1012003.
- [15] Zhang Q Z, Wang Y. Binocular stereo vision calibration accuracy evaluation using epipolar constraint [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(23): 231504.
- 张青哲, 王勇. 基于对极约束的双目立体视觉标定精度评价方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(23): 231504.
- [16] Lei J F, Wei W, Li Y L, et al. Dimensionality measurement of weak texture hydraulic components based on binocular vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181511.
- 雷经发, 韦旺, 李永玲, 等. 基于双目视觉的弱纹理液压元件尺寸测量 [J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181511.
- [17] Fusiello A, Trucco E, Verri A, et al. A compact algorithm for rectification of stereo pairs [J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16-22.