

用于测量孔轴装配参数的双目视觉方法

刘凌飞, 袁道成*, 张连新

中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川 绵阳 621000

摘要 孔轴装配是工业制造领域的一个重要基础问题, 针对空间狭窄视觉困难、容易碰撞损坏、人工装配效率低等问题, 提出一种基于双目视觉的监测方案, 将图像叠加融合, 扩大监测视野, 并通过轴与孔的截交线来测量装配参数。此外, 根据重投影误差, 对不同位置的双目数据的融合权重进行优化, 使误差降低 10% 左右, 在实现快速检测的同时保证了测量精度。实验结果表明, 所提算法可以对间隙为 0.25 mm 的小直径和小间隙孔轴的装配过程进行实时监测, 平均误差约为 0.015 mm。同时, 所提算法对摄像机的倾斜角度不敏感, 在不同的摄像机安装位置具有良好的鲁棒性。

关键词 机器视觉; 孔轴装配; 双目视觉; 数据融合

中图分类号 TP391

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222509

Binocular Vision Method for Measuring Shaft-in-Hole Assembly Parameters

Liu Lingfei, Yuan Daocheng*, Zhang Lianxin

*Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621000, Sichuan, China*

Abstract Shaft-in-hole assembly is an essential basic problem in the field of industrial manufacturing. Aiming at its issues of narrow space visual challenges, easy collision damage, low manual assembly efficiency, and other problems, this paper suggests a detection scheme based on binocular vision that uses image fusion to expand the monitoring field-of-view and evaluate assembly parameters through the intersection of shaft and hole. Furthermore, the fusion weight of the binocular data at various positions is optimized according to the reprojection error, which reduces the error by about 10% and ensures the measurement accuracy while realizing fast detection. The experimental findings demonstrate that the suggested method is capable of real-time detection during the assembly process of shafts with small clearance holes and small diameters with a gap of 0.25 mm and an average inaccuracy of roughly 0.015 mm. At the same time, the suggested approach has a strong robustness in various camera installation sites and is not sensitive to the camera's tilt angle.

Key words machine vision; shaft-in-hole assembly; binocular vision; data fusion

1 引言

随着现代高精密加工制造技术的发展, 大量精密微小型机电产品^[1-2]应用于航空航天^[3-4]、工业制造^[5]、生物医学^[6]等领域, 这些产品的组装与使用都离不开孔轴装配环节。由于人工装配存在效率低、视野盲区大、目测精度有限、人力成本高等问题, 难以满足生产需求, 因此装配自动化技术^[7]已经成为工业制造领域的重点研究问题之一。

为了能够顺利完成自动化装配任务, 需要对轴插入孔的过程进行实时监测, 获得轴的位置与轴的姿态

两个装配参数。目前常用的柔顺装配技术需要依赖力传感器^[8-9], 通过孔轴接触进行受力感知, 但对于小尺寸的精密元件, 这种接触容易造成磨损与变形, 因此无需接触能进行孔轴监测的视觉技术^[10]逐渐引起了研究人员的注意。解则晓等^[11]使用可以自动调节光源亮度的双目系统对圆孔轮廓进行三维重建, 获得了圆孔的孔径信息, 精度可满足工业现场应用的要求。Li等^[12]使用深度相机对孔轴位姿进行估计, 将 20 mm 左右的孔轴装配误差降低到 0.8 mm, 且置信度达 90%, 但深度相机需要使用特定的激光光源, 存在成本较高、容易受到环境影响等问题。Kim^[13]借助由反射镜与棱锥镜

收稿日期: 2022-09-09; 修回日期: 2022-09-30; 录用日期: 2022-10-19; 网络首发日期: 2022-10-29

通信作者: *yuandaocheng@caep.cn

组成的光学系统扩大摄像机视野,同时对孔的 4 个方位的反射像进行检测,获得了轴的装配参数,但复杂的光路系统不适合工业检测。

为解决上述问题,本文采用双目视觉技术来获得装配参数,双目视觉技术有着成本低、结构简单、受环境影响小等优点。周富强等^[14]对镜像双目视觉的基本结构和发展现状进行了介绍,阐述了镜像双目视觉测量技术的发展现状,主要从测量原理与测量精度等方面阐述了双目视觉精密测量技术的优势。李庆武等^[15]由人眼视觉特性得到启发,提出一种基于双目视觉的显著性目标检测方法,该方法提高了在受到相似背景干扰时对目标的检测准确度与稳定性。徐智涵等^[16]使用双目视觉方法消除监测盲区,并结合单纯形搜索法对装配参数进行迭代优化,得到了较为精确的装配参数,但迭代算法计算量较大,难以满足监视任务的实时性要求。

本文采用一种双目视觉方法来对孔轴装配过程进行实时监测,介绍了系统所涉及的坐标系及其变换关系,给出了装配参数的计算原理并进行了误差分析与参数优化。通过实验验证了所提算法的精度,并调节摄像机角度进行了扩展实验,所提算法满足工业生产中的孔轴自动化装配需求。

2 装配参数测量方法

装配参数包括轴相对于孔的位置与姿态两个。通过轴与孔上表面的截交线来反映装配参数,轴与孔均可视为标准圆柱体,因此截交线为椭圆,中心反映了轴的位置,形状反映了轴的倾斜姿态。但是如图 1(a)所示,截交线并非图像的边缘,无法直接使用边缘处理算法进行提取,故采用双目视觉技术对轴的位置与姿态

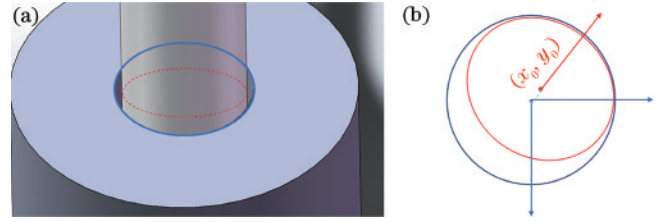


图 1 孔平面与轴的截交线。(a)截交线的实际位置;(b)孔边缘与截交线的关系

Fig.1 Intersection line of hole plane and shaft. (a) Actual location of the intersection line; (b) relationship between the intersection line and the hole edge

进行求解,最终以截交线椭圆进行显示,如图 1(b)所示。

2.1 基本坐标关系

装配系统的整体结构如图 2 所示,在装配过程中,孔工件保持静止,轴由机械臂引导并进行装配,两台固定位置的摄像机在侧上方倾斜拍摄。

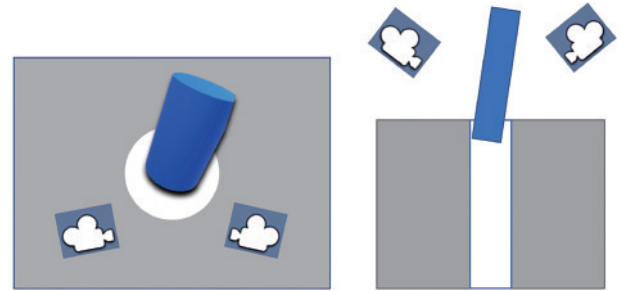


图 2 装配系统整体结构

Fig.2 Overall schematic of the assembly system

图 3 说明了系统的坐标关系,包括孔坐标系、相机坐标系及像素坐标系。理想相机成像模型为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z} \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & \gamma & \mu_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_w^c & \mathbf{T}_w^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_w^c = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \\ \mathbf{T}_w^c = [x_T \quad y_T \quad z_T]^T \end{cases}, \quad (1)$$

式中: \mathbf{R}_w^c 为由孔坐标系转换为相机坐标系的旋转矩阵; ψ, θ, ϕ 分别表示沿 x, y, z 轴的旋转角度; \mathbf{T}_w^c 代表相对位移; f 表示相机焦距,单位为 mm; d_x 和 d_y 表示像素在 x 和 y 方向上的实际距离,单位为 mm; γ 是相机的倾斜系数; (μ_0, v_0) 是图像像素中心的坐标,单位为 pixel。 $[\mathbf{R}_w^c, \mathbf{T}_w^c]$ 只与相机的摆放位置有关,称为相机的外参

数。 $[f, d_x, d_y, \gamma, \mu_0, v_0]$ 只与相机的自身参数有关,称为相机的内参数。内外参数可以通过张正友标定法^[17]进行求解。

由于相机与孔平面有一定的倾斜角度,需要对图像进行重映射,得到等效于相机垂直拍摄的截交线。同一台相机在不同角度拍摄的两幅图像 p 与 p' 间存在一定的映射关系,用单应矩阵 \mathbf{H} 来表示,对于

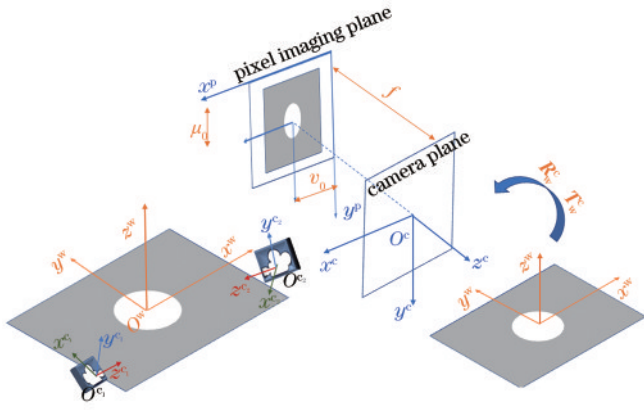


图 3 系统的坐标关系

Fig. 3 Coordinate relationship of the system

同一台相机, H 只与相机的外参数有关。当空间点均在一个平面上时, 式(1)中的 z^w 可以视为 0, 因此可

以得到

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_w^p \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x^{p'} \\ y^{p'} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_w^{p'} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ 1 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} x^{p'} \\ y^{p'} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_w^{p'} \mathbf{M}_w^p{}^{-1} \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

2.2 轴姿态计算

轴件可以视作一个已知半径 r 的标准圆柱体, 成像投影如图 4 所示, 轴最外侧母线在像面上的投影为 l_1^p 和 l_2^p 。图 4(b) 是图 4(a) 的俯视图, 图 4(c) 是图像平面的成像图。

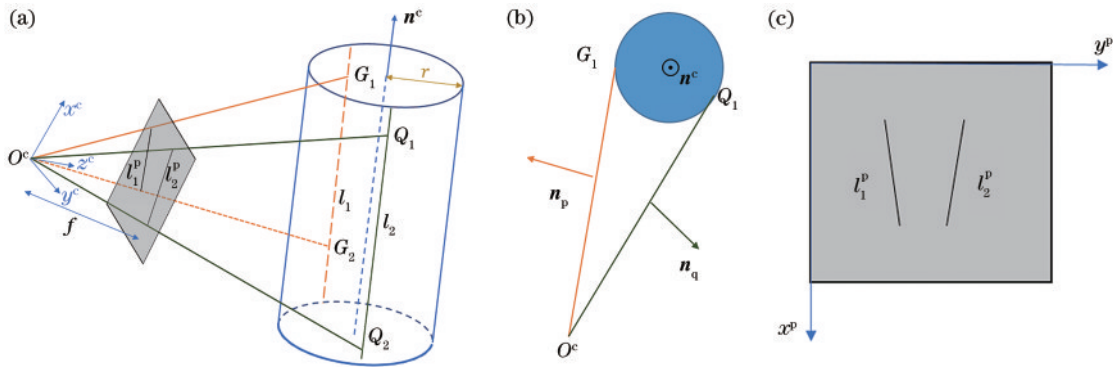


图 4 成像投影。(a)轴最外侧母线的成像投影过程;(b)俯视图;(c)成像图

Fig. 4 Imaging projection. (a) Imaging projection process of the outermost bus of the shaft; (b) top view; (c) imaging map

l_1^p 与 l_2^p 在图像平面上的表达式为

$$\begin{cases} l_1^p: a_1 x_p + b_1 y_p + c_1 = 0 \\ l_2^p: a_2 x_p + b_2 y_p + c_2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

接着, 根据式(1), 可以得到其在相机坐标系下的空间表达式

$$\begin{cases} l_1^c: a_1 x_c + b_1 y_c + c_1 = 0 \\ l_2^c: a_2 x_c + b_2 y_c + c_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由于 l_1^p 在面 G_1OG_2 上, l_2^p 在面 Q_1OQ_2 上, 面 G_1OG_2 、 Q_1OQ_2 过点 $O(0, 0, 0)$, 所以在相机坐标系下的空间方程为

$$\begin{cases} G_1OG_2: a_1 x_c + b_1 y_c + \frac{c_1 z_c}{f} = 0 \\ Q_1OQ_2: a_2 x_c + b_2 y_c + \frac{c_2 z_c}{f} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

由于 n^c 垂直于面 G_1OG_2 的法向量 $n_p^c(a_1, b_1, c_1/f)$ 与面 Q_1OQ_2 的法向量 $n_q^c(a_2, b_2, c_2/f)$, 因此 $n^c = n_p^c \times n_q^c$ 。通过平均两相机各自求得的 n^c 以及坐标变换, 可以得到轴线在世界坐标系下的姿态 n^w , 并进行单位化。同时, 两相机的 n^c 可以使用并行技术分别计算,

能够大幅加快计算速度。

$$\begin{aligned} n^w &= (n^{c_1} + n^{c_2} R_{c_2}^{c_1}) R_{c_1}^w, \\ n^w &\leftarrow \frac{n^w}{\|n^w\|}. \end{aligned} \quad (6)$$

2.3 轴位置计算

轴的位置即截交线的中心位置, 记为 $O(x_0, y_0)$, 圆柱体表面上的点 (x, y, z) 到圆柱体回转轴线的距离是半径 r , 因此可以求得圆柱体表面方程, 同时, 孔平面的方程为 $z = 0$, 因此截交线椭圆的方程可以表示为

$$|(x - x_0, y - y_0, z = 0) \times n_w| / \|n_w\| = r^2. \quad (7)$$

图 5 说明了轴位置计算的流程, 对左右两台相机拍摄的图像进行重映射, 得到等效的垂直拍摄图像。原始图像的母线方程与重投影后的方程的映射关系为

$$l^\perp = H^{-T} l' = (a^\perp, b^\perp, c^\perp)^T, \quad (8)$$

由于透视投影的相切不变性, 重投影后的母线仍与椭圆相切。接着, 对中心位置进行粗略的估计。使用像素平均的方式对左右图像进行叠加融合。图像融合的

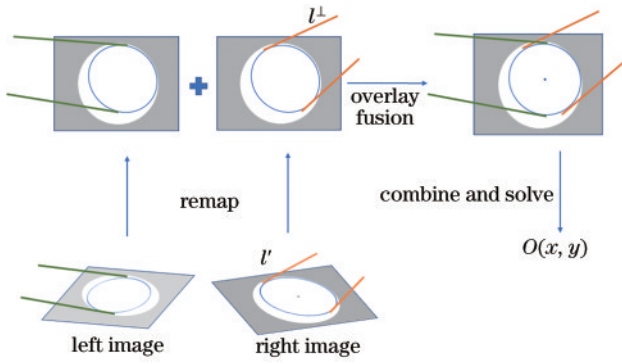


图 5 轴中心位置计算流程

Fig. 5 Calculation process of the center position of the shaft

公式为

$$I(i, j) = 0.5 * [I_l(i, j) + I_r(i, j)], \quad (9)$$

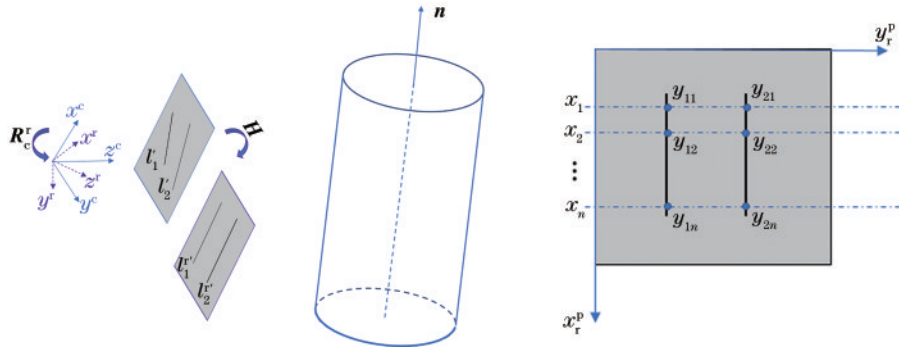


图 6 重投影误差分析

Fig. 6 Reprojection error analysis

记旋转前的轴线为 $n = n^c / \|n^c\|$, 旋转后的轴线为 $n^r = (0, 1, 0)$, 使用 Rodrigues 公式计算两向量之间的旋转矩阵 R_c^r , 同时这也是由坐标系 c 转换到坐标系 r 的旋转矩阵, 其中 $k = n \times n^r = (-n_3, 0, n_1)$ 是旋转轴, θ 表示旋转角度, $\cos \theta = n \cdot n^r$.

$$\begin{cases} R_c^r = I \cos \theta + (1 - \cos \theta) k k^T + \sin \theta \hat{k} \\ \hat{k} = \begin{bmatrix} 0 & -k_3 & k_2 \\ k_3 & 0 & -k_1 \\ -k_2 & k_1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -n_1 & 0 \\ n_1 & 0 & n_3 \\ 0 & -n_3 & 0 \end{bmatrix}, \end{cases} \quad (10)$$

可以求得归一化后的单应矩阵 $H_c^r = K R K^{-1} =$

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{bmatrix}, \text{ 便可以得到像素映射前后的对应}$$

关系:

$$\begin{bmatrix} x_r^p \\ y_r^p \\ 1 \end{bmatrix} = H_c^r \begin{bmatrix} x_c^p \\ y_c^p \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

映射后轴的两条母线理论上平行于图像 x 轴, 以此作为误差评价依据。在映射后的图像上, 沿 x 轴均匀地在两条母线上取 N 对点, 记点的纵坐标为 $(y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1n})$ 和 $(y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2n})$, 用均方差来衡量

式中: $I_l(i, j)$ 和 $I_r(i, j)$ 分别表示左右相机拍摄图像在 (i, j) 点上的灰度; $I(i, j)$ 表示融合后的图像。 $I(i, j)$ 包含两对切线, 由于孔轴间隙较小, 截交线椭圆可以近似看作一个圆, 因此两对切线的角平分线的交点可以看作是椭圆中心的粗略位置 $O(x_0, y_0)$ 。最后, 计算出准确的椭圆中心。将式(8)的 4 条切线方程与式(7)椭圆方程联立, 组成超定方程组进行求解, 得到精确的 (x_0, y_0) , 至此获得式(7)椭圆方程的所有参数, 得到了截交线方程。

2.4 误差分析与重校准

采用单应矩阵进行映射, 利用重投影误差对轴姿态的准确性进行分析, 使重投影后的轴线向量在新坐标 r 的坐标为 $(0, 1, 0)$, 即相机垂直于轴拍摄, 如图 6 所示。

重映射误差 Δ 。

$$\begin{cases} \Delta = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N (y_{ji} - \mu_j)^2 \quad (N > 2) \\ \mu_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{ji} \end{cases} \quad (12)$$

初步地对两相机得到的轴姿态取平均, 但是由于像差的存在, 在不同的区域两相机所占权重应当不同, 因此引入参数 ϵ 来平衡, 表达式为

$$n^w = [\epsilon n^{c_1} + (1 - \epsilon) n^{c_2} R_{c_2}^{c_1}] R_{c_1}^w \quad (0 < \epsilon < 1). \quad (13)$$

ϵ 只与轴所在位置有关, 依据两相机的位置将孔的区域分为 4 个部分, 如图 7 所示, 每部分的 ϵ 取值相同。

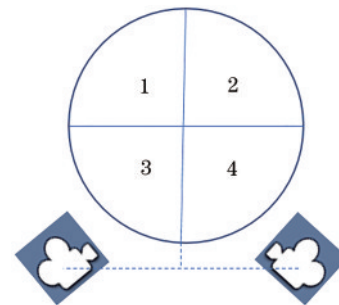


图 7 校准区域划分

Fig. 7 Calibration area division

截交线中心 (x_0, y_0) 所在的区域即认为是轴所在区域。

联立式(10)~(13),得到含有参数 ϵ 的误差方程。使用最小二乘法求解

$$\epsilon = \operatorname{argmin}_{\epsilon} \frac{1}{N} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^N [y_{ji}(\epsilon) - \mu_j(\epsilon)]^2, \quad (14)$$

得到每个区域最优的 ϵ 值。轴中心点 (x_0, y_0) 所在的区域即认为是轴所在区域,为了加快算法速度,可用轴的粗略位置 $\hat{O}(\hat{x}, \hat{y})$ 代替,当落在区域交界处时默认属于序号较小的区域。图 8 是整体的实验流程。

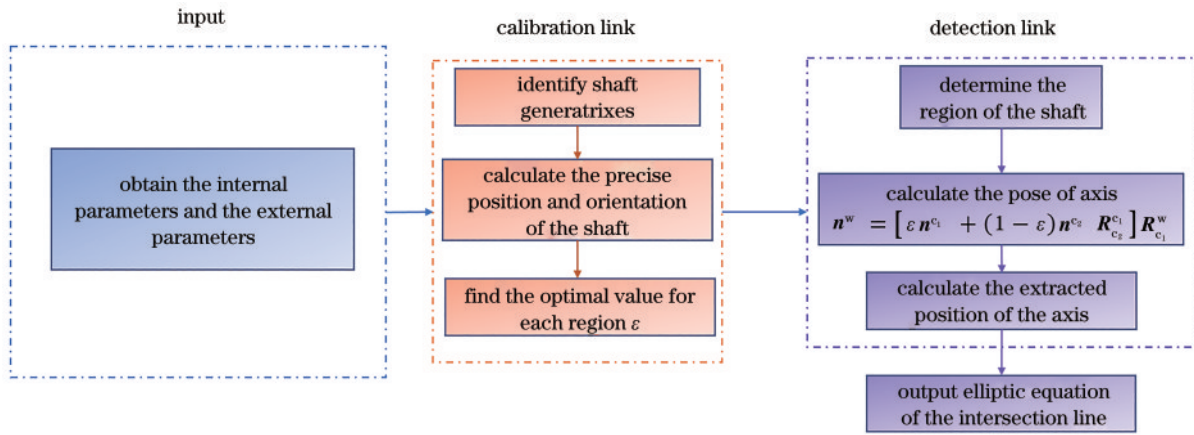


图 8 整体实验流程

Fig. 8 Overall experimental procedure

3 实验与分析

本实验的成像部分由型号为 OV2710 的 CMOS 芯片与微型相机镜头组成,微型相机模组的几何尺寸为 $38 \text{ mm} \times 38 \text{ mm} \times 21 \text{ mm}$,靶面大小为 $1/2.7 \text{ inch}$ ($1 \text{ inch} = 2.54 \text{ cm}$),像元大小为 $3 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$,相机的分辨率为 1920×1080 ,光圈大小为 F2.4,视场角为 50° 。标定得到两相机的内参数为

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1731.90 & -1.12 & 949.79 \\ 0 & 1719.50 & 563.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1322.80 & -0.33 & 987.36 \\ 0 & 1322.50 & 534.98 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

将两相机倾斜放置进行拍摄,与孔平面的角度约为 40° ,两相机间主点距离约为 12 cm ,标定获得两相机的精确外参数为

$$R_r = \begin{bmatrix} 0.995 & 0 & -0.099 & -1.366 \\ 0.068 & 0.722 & 0.687 & -4.955 \\ 0.071 & -0.691 & 0.719 & 59.355 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 和}$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.999 & 0 & -0.029 & -0.568 \\ 0.014 & 0.874 & 0.485 & -7.682 \\ 0.026 & -0.485 & 0.874 & 59.823 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

本实验使用的孔半径 $R = 1.75 \text{ mm}$,孔深度 $h = 60 \text{ mm}$,轴半径 $r = 1.5 \text{ mm}$,轴长度为 100 mm 。实验装置的整体情况如图 9 所示,使轴自然放置在孔中,达到自然贴合的状态,该状态等价于装配过程中孔与轴恰好贴合的极限情况,对该情况进行检测与分析。

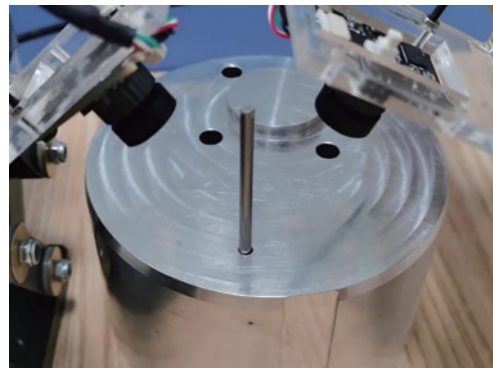


图 9 实验装置

Fig. 9 Experimental setup

3.1 轴位姿计算实验结果

图 10 是两相机拍摄得到的原始图像,其中图 10(a)是装配前的原始图像,图 10(b)是插入轴后的图像。

图 11 是检测结果,采用第 2 节的方式对轴的位置与姿态进行计算,为了便于观察,对左右两相机的图像进行映射与裁剪,并进行叠加融合,结果如图 11(a)所示。由于截交线椭圆中心位于图 11(b)校准图的第 4 区域,将校准系数 $\epsilon_4 = 0.524$ 代入式(13)中,得到校准后的结果,如图 11(c)所示。

3.2 误差分析

由于孔轴间隙太小,几乎没有设备能够准确地直接获得孔轴位置关系,因此以极限情况下(如图 12 所示)的轴孔接触状态来验证所提算法的准确性,使轴在自然状态下放置于孔中。

由几何关系可以求得,轴的极限倾斜角

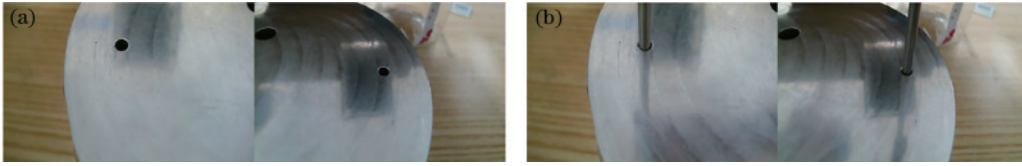


图 10 两台相机拍摄的原始图像。(a)装配前的图像;(b)插入轴后的图像

Fig. 10 Original image captured by the two cameras. (a) Image before assembly; (b) image after shaft placement

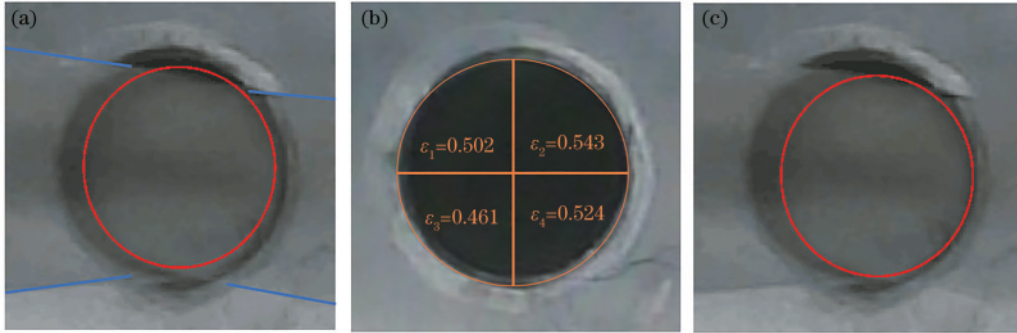


图 11 检测结果。(a)校准前的截交线;(b)校准图;(c)校准后的截交线,也是最终结果

Fig. 11 Recognition result. (a) Intersection line before calibration; (b) calibration diagram; (c) calibrated intersection line, which is also the final result

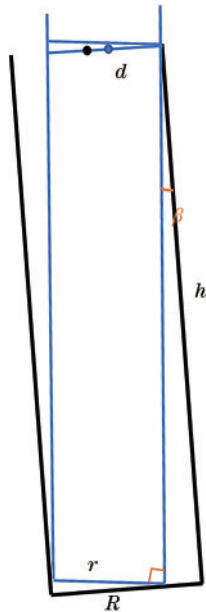


图 12 极限情况下孔轴状态

Fig. 12 Hole and shaft condition under extreme condition

$\beta = 0.478^\circ$, 此时截交线中心与孔中心的距离 $d = R - r / \cos \beta = 0.25 \text{ mm}$, 以中心距 d 为衡量基准。表 1 是使用误差校准算法之前的数据, 表 2 是校准后的数据。

图 13 是误差数据的对比, 可以看出, 区域参数校准方法将数据的平均误差由 16.01% 降至 6.36%, 与采用迭代的单纯形搜索法^[16]的误差(5%)相接近, 但所提方法能够将校准阶段与检测阶段分开, 不需要进行迭代计算, 大幅加快了检测速度。所提方法在满足实时检测需求的同时保证了测量精度, 因此可以很好地从双目融合图像中计算出轴件的位置与姿态, 进而恢

表 1 误差校准前的测量值与相对误差

Table 1 Measurement results and relative error before error calibration

Measurement No.	d / mm	Relative error / %
1	0.3007	20.28
2	0.1949	22.04
3	0.2893	15.72
4	0.2584	3.36
5	0.2034	18.64

表 2 误差校准后的测量值与相对误差

Table 2 Measurement results and relative error after error calibration

Measurement No.	d / mm	Relative error / %
1	0.2678	7.12
2	0.2275	9.00
3	0.2644	5.76
4	0.2573	2.92
5	0.2325	7.00

复出轴与孔平面的截交线, 起到装配过程防碰撞的预警作用。

3.3 扩展实验

考虑到工业生产装配时的情况多样性, 如装配体处于一个狭窄空间内, 或装配机械臂的工作空间与相机摆放位置存在冲突等情形, 探究在不同角度相机安装位置下的算法精度是必要的。对此, 将相机的拍摄角度调节至垂直于孔平面, 以减少相机工作空间。同时, 垂直拍摄时不必进行单应变换将图像映射至孔平面上, 一定程度上提高了算法速度。图 14 是实验装置以及左右相机拍摄的原始图像。

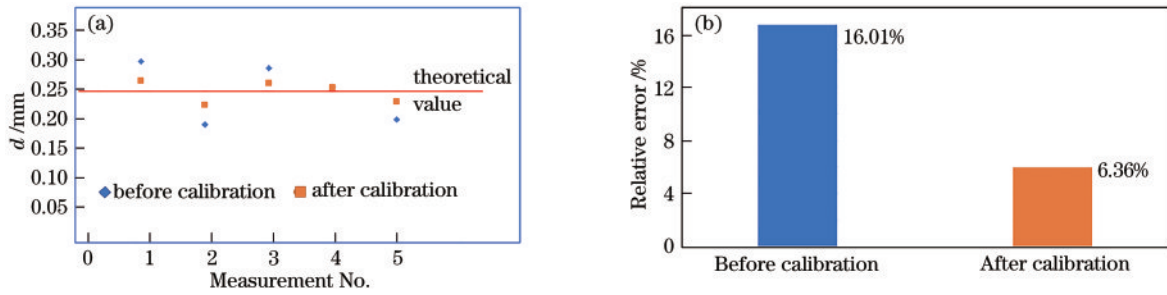


图 13 校准前和校准后的数据比较。(a) 测量值的比较; (b) 平均相对误差的比较

Fig. 13 Comparison of data before and after calibration. (a) Comparison of measured values; (b) comparison of mean relative errors

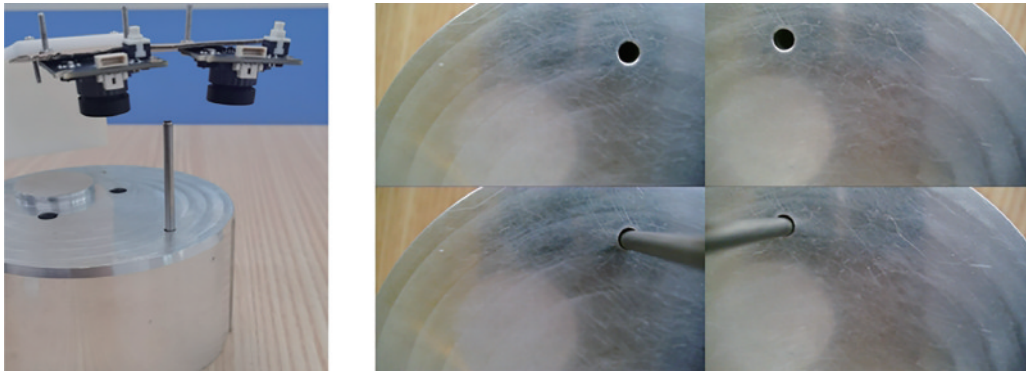


图 14 垂直拍摄实验结构及拍摄图像

Fig. 14 Vertical shot of the experimental equipment and original image

扩展实验的误差如表 3 所示,平均误差为 5.24%,与倾斜拍摄的结果相差不大。可以看出,所提方法在相机垂直拍摄孔平面的情况下也能获得较好的结果。所提方法存在一定的鲁棒性,对相机的拍摄角度要求较低,同时,垂直拍摄对孔的识别清晰,倾斜拍摄对轴母线的识别更加准确,因此可以根据实际情况调节相机安装角度。所提方法有应用于不同工业生产环境的能力。

表 3 扩展实验校准后的测量值与相对误差
Table 3 Measurement results and relative error of extended experiment after calibration

Measurement No.	d / mm	Relative error / %
1	0.2670	6.80
2	0.2632	5.28
3	0.2289	8.44
4	0.2576	3.04
5	0.2434	2.64

所提方法依靠轴的母线来对装配参数进行计算,因此需要保证轴的两条母线能够在相机视野范围内得到清晰成像。对于不同口径的孔轴装配问题,需要将摄像机调整到合适的工作距离,在相机焦距、视场角等参数固定的情况下,工作距离与口径成正相关,考虑到工业相机与机械装置的实际工作空间,所提方法能够对半径在 1 mm 及以上的孔轴的装配过程进行检测。同时,所提方法精度主要受到相机分辨率的影响,分辨

率越高,对轴母线的提取越准确,装配参数的误差越小,但对高分辨率图像的处理速度稍慢,对设备的内存要求更高,可以根据实际的生产需要在分辨率与精度之间进行平衡。

4 结 论

对于轴入孔的装配问题,采用基于双目数据融合的方法,实时获得孔与轴之间的关系,同时避免力传感器和主动视觉技术带来的碰撞破坏和高环境影响的问题。此外,根据重投影误差,对双目摄像头的的数据融合参数进行标定,以提高检测精度。实验结果表明,所提方法能够实时检测半径为 1.75 mm 的孔和半径为 1.5 mm 的轴的装配过程,平均误差约为 0.015 mm,最大误差小于 0.025 mm,说明所提方法稳定准确。同时所提方法对摄像机的安装位置和角度不敏感,可以根据需求适应复杂的工业生产环境。

参 考 文 献

[1] 王亚珍, 朱文坚. 微机电系统(MEMS)技术及发展趋势[J]. 机械设计与研究, 2004, 20(1): 6, 10-12.
Wang Y Z, Zhu W J. MEMS technology and developing trend[J]. Machine Design and Research, 2004, 20(1): 6, 10-12.

[2] Popa D O, Stephanou H E. Micro and mesoscale robotic assembly[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2004, 6(1): 52-71.

[3] 范玉青. 飞机数字化装配技术综述: 飞机制造的一次革

- 命性变革[J]. 航空制造技术, 2006, 49(10): 42-48.
- Fan Y Q. Overview of aircraft digital assembly technology: a revolutionary change in aircraft manufacturing [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2006, 49 (10): 42-48.
- [4] Rembala R, Ower C. Robotic assembly and maintenance of future space stations based on the ISS mission operations experience[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 65(7/8): 912-920.
- [5] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 微装配技术的发展现状及关键技术[J]. *光学精密工程*, 2004, 12(3): 27-30.
- Duan R L, Li Q X, Li Y H. Review of micro-assembly and its key technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(3): 27-30.
- [6] Agarwal G, Robertson M A, Sonar H, et al. Design and computational modeling of a modular, compliant robotic assembly for human lumbar unit and spinal cord assistance [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14391.
- [7] Boothroyd G. Assembly automation and product design, second edition (manufacturing engineering and materials processing)[J]. *Assembly Automation*, 2006, 26(4): 670A.
- [8] 陈立国, 孙立宁, 荣伟彬. 基于显微视觉与微力觉柔顺混合控制的微操作机器人[J]. *高技术通讯*, 2003, 13 (12): 53-56.
- Chen L G, Sun L N, Rong W B. Micromanipulation robot based on hybrid control of micro-vision and micro-force flexible control[J]. *High Technology Letters*, 2003, 13(12): 53-56.
- [9] Reinhart G, Werner J. Flexible automation for the assembly in motion[J]. *CIRP Annals*, 2007, 56(1): 25-28.
- [10] Huang S R, Murakami K, Yamakawa Y, et al. Fast peg-and-hole alignment using visual compliance[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, November 3-7, 2013, Tokyo, Japan. New York: IEEE Press, 2013: 286-292.
- [11] 解则晓, 王晓东, 宫韩磊. 基于双目视觉的薄壁零件圆孔轮廓测量[J]. *中国激光*, 2019, 46(12): 1204004.
- Xie Z X, Wang X D, Gong H L. Round-hole profile measurement of thin-walled parts based on binocular vision[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(12): 1204004.
- [12] Li C, Chen P, Xu X, et al. A coarse-to-fine method for estimating the axis pose based on 3D point clouds in robotic cylindrical shaft-in-hole assembly[J]. *Sensors*, 2021, 21(12): 4064.
- [13] Kim J Y. Vision-based measurement of part deformation and misalignment for deformable cylindrical peg-in-hole tasks[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, 219(6): 589-606.
- [14] 周富强, 王晔昕, 柴兴华, 等. 镜像双目视觉精密测量技术综述[J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0815003.
- Zhou F Q, Wang Y X, Chai X H, et al. Review on precise measurement technology based on mirror binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0815003.
- [15] 李庆武, 周亚琴, 马云鹏, 等. 基于双目视觉的显著性目标检测方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0315002.
- Li Q W, Zhou Y Q, Ma Y P, et al. Salient object detection method based on binocular vision[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0315002.
- [16] 徐智涵, 袁道成, 李璐璐. 基于双目图像融合的孔轴配合间隙监视[J]. *计算机技术与发展*, 2021, 31(8): 169-175.
- Xu Z H, Yuan D C, Li L L. Inspection of hole-shaft assembly clearance based on binocular image fusion[J]. *Computer Technology and Development*, 2021, 31(8): 169-175.
- [17] Zhang Z Y. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece. New York: IEEE Press, 1999: 666-673.