

基于双光路系统的精密偶件装配对齐方法

顾书豪¹, 曹润赟¹, 张国锐², 刘畅², 任同群^{1,3}

(1. 大连理工大学 微纳米技术及系统辽宁省重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;

3. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 双光路系统是精密偶件装配对齐任务中一种常用的检测装置; 其中, 分光棱镜的安装误差会导致待装配偶件成像点发生偏移, 不同零件表面加工质量以及双侧零件成像光路的差异, 也会导致零件的拍摄图像质量不一致, 影响特征提取精度; 针对这一问题, 采用一种基于单应矩阵的标定方式, 消除棱镜安装误差带来的影响; 基于灰度方差和信息熵的自动对焦与光强自适应调节方式, 保证了图像质量的一致性; 基于改进的反正切法并结合自适应边缘梯度阈值, 进行亚像素边缘提取; 上述方法同时考虑并克服了图像采集与处理过程中的干扰因素, 在避免棱镜姿态调节的情况下直接获取对齐控制量, 提高算法的鲁棒性; 经实验测试, 该方法在不同工况下的图像特征提取精度能够达到 0.25 像素, 回转体偶件装配同轴度为 $\phi 6.3 \mu\text{m}$ 。

关键词: 精密偶件; 双光路系统; 光强调节; 装配对齐; 亚像素边缘提取

Precision Mate Part Assembly Alignment Method Based on Dual Optical Path System

GU Shuhao¹, CAO Runguo¹, ZHANG Guorui², LIU Chang², REN Tongqun^{1,3}

(1. Key Laboratory for Micro/Nano Technology and System of Liaoning Province,

Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;

3. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Dual-optical path system is a commonly-used detection device in precision mate part assembly alignment tasks. Among them, the installation error of the beam splitting prism can cause the imaging point of the assembled part to shift. Moreover, the differences in the surface processing quality of different mate parts and the imaging optical path of double-sided parts can also lead to inconsistent image quality of the parts, which affects the accuracy of feature extraction. To address this issue, a calibration method based on homography matrix is adopted to eliminate the installation errors of prisms. An automatic focus and light intensity adaptive adjustment method based on gray variance and information entropy is adopted to ensure consistency in image quality. Based on improved arctangent method and adaptive edge gradient threshold, the subpixel edge is extracted. The above method simultaneously considers and overcomes interference factors in image acquisition and processing, directly obtains alignment control variables while avoids posture adjustment of prisms, and improves the robustness of the algorithm. Through experimental testing, the image feature extraction accuracy of this method can reach 0.25 pixels under different working conditions, and the assembly coaxiality of the rotary mate parts is $\phi 6.3 \mu\text{m}$.

Keywords: precision coupler; dual optical path system; light intensity adjustment; assembly alignment; subpixel edge extraction

收稿日期:2024-05-23; 修回日期:2024-06-05。

基金项目:国防基础科研计划资助(JCKY2022203B006)。

作者简介:顾书豪(1999-),男,硕士研究生。

通讯作者:任同群(1980-),男,博士,副教授。

引用格式:顾书豪,曹润赟,张国锐,等. 基于双光路系统的精密偶件装配对齐方法[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(7): 180

- 187.

0 引言

精密偶件装配在机械制造领域是一类常见任务,特别是在高科技产品如航空发动机、精密仪器和光学系统中尤为普遍。精密偶件装配通常要达到较高的配合精度,以保证产品的整体性能^[1-5],因而需要可靠的对齐检测手段,保证装配精度。

在精密偶件装配的过程中,双光路系统是一种比较常用的装对齐检测装置。考虑到棱镜位姿偏差对成像的影响,使用前除了需要对相机进行标定,还应该对棱镜的位姿进行标定。经典的相机标定方法包括 DLT 变换法^[6]、Tsai 两步法^[7]和张正友标定法^[8]等。针对棱镜位姿的标定方式,文献[9]采用逆装配法对棱镜位姿进行标定,先行在显微成像系统下对准分别代表基体件与待装配件的标定板,再将标定板撤回至对位检测位置中再次进行对准。该方法要求实际零件装配前的位置要与标定位置一致,对系统的定位机构要求较高。文献[10]通过测量棱镜3个方向的位姿偏差,采用进行多次调整的方式,直至各方向角度误差降到 0.001° 以下,但是这样的操作过程较为繁琐。

对于不同零件来说,表面加工质量存在差异,可能会影响相机对焦^[11]。此外,由于上下零件成像光路存在差异,也会使图像的明暗程度发生变化,从而影响拍摄图像质量^[12]。常见的自动调焦方法有测距法、焦点检测法和数字图像对焦法^[13]。测距法是一种通过测量相机镜头与被摄物体之间的距离来实现自动对焦的方法,但该方法系统复杂度高,易受外界环境干扰;与测距法相比,焦点检测法无需额外的对焦辅助装置,精度高,但对焦速度较慢;相较于前两种对焦方法,数字图像对焦法具有更高的精度,但是对图像信息处理器的性能依赖程度高。文献[14]提出改进 Sobel 算子图像清晰度评价函数与粗细调焦结合的变步长两段式快速搜索自动调焦的方法,调焦准确性较高,但未讨论该方法在不同环境条件下的通用性和适应性。文献[15]提出一种基于多尺度窗口的分段式自动调焦算法,使自动调焦的实时性得到了提升。但是,文中并未提供关于算法对于表面质量不同的零件的测试效果。

针对光强调节,文献[16]提出一种人脸光照自适应调节算法,解决铁路闸机人脸识别时的光照和模糊问题,人脸识别准确率达到了97.21%。但是,对于各种不同的非理想或极端的光照条件,如逆光或昏暗的光线条件下,这种算法的调节效果可能会受影响。文献[17]基于灰度方差设计了一套自适应光强调节系统,可以适应不同的环境光变化,提高掌纹图像的识别准确率。文献[18]分析光照对印刷电路板线宽

测量造成的影响,提出基于信息熵的最佳光照强度调节方法,有效地保证了线宽的测量精度。分析了同轴光源光照对印制电路板线宽的精密测量的影响。后两种方法并未在多种不同的环境光照条件下进行测试,其适应性有待验证。

针对边缘精确提取,文献[19]提出了一种改进的 FT 显著性检测方法,用于对零件图像进行孔区域分割。采用了形态学边缘检测算法和轮廓细化算法来提取孔区域的轮廓,即使在噪声密度高达30%的情况下,仍能成功完成孔的检测。但这些算法中涉及多个参数,这些参数的选择可能需要根据具体的应用场景进行调整,增加了算法应用的复杂性。文献[20]提出了一个基于图像的微小零件边缘检测算法,该算法通过提取不同加工方法的边缘过渡区并建立多项式模型,利用求导确定边缘点的准确位置,精度达到 $0.395\text{ }\mu\text{m}$ 。文献[21]提出了几何特征约束的 SIFT 特征匹配改进算法,有效解决了灰度变化较平滑的图像易产生误匹配点的问题。上述方法主要针对特定图像,对图像质量不同时算法的适应性少有讨论。

综上所述,搭建了一套用于精密偶件对齐的双光路系统,采用基于单应矩阵的标定方法,直接计算得到对齐控制量,避免了棱镜位姿的调整,并分别通过调控图像采集质量和特征提取的自适应性提高图像处理的鲁棒性。

1 双光路系统设计

1.1 双光路系统成像原理

如图1所示,目标(上)零件发出的光线进入棱镜后,通过半反半透膜的反射,光线水平射向全反射膜,然后又反射至半反半透膜,透过半反半透膜在 CMOS 相机中成像。半反半透膜的作用是将一部分光线反射,而允许另一部分光线穿过去。由于受到半反半透膜的两次影响,光的能量变为原来的 $1/4$ 。基体(下)零件发出的光线进入棱镜后,经过半反半透膜的反射在 CMOS 相机中成像,光线的能量变为原来的 $1/2$,这会导致采用相同照明光强时上下零件图像的明暗程度出现差异,影响图像质量的一致性。

1.2 双光路系统结构设计

双光路系统整体结构如图2所示,其中上偶件由三爪卡盘固定,以确保其在检测过程中的稳定性。三爪卡盘安装在 Z 轴滑台上,上偶件可沿 Z 方向移动,适应不同高度的检测需求;下偶件放置在 XYZ 微动平台上,可以对其进行 XYZ 三个方向的小范围位移调节,从而实现精确的对准和定位;分光棱镜安装在 XY 俯仰偏转台上,可以进行绕 X 轴和 Y 轴的小范围角度微调具体

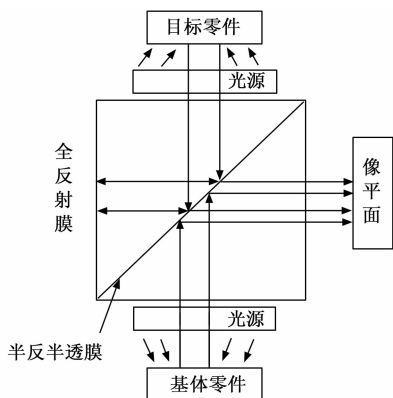
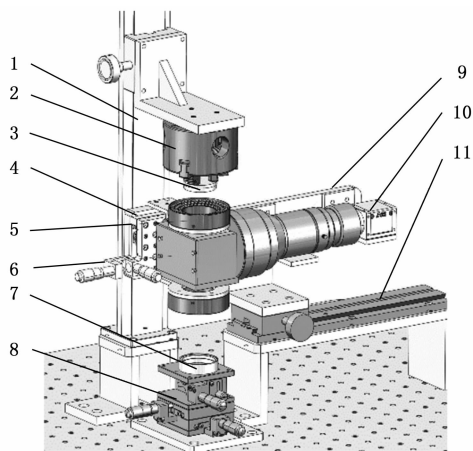


图 1 双光路系统成像原理

范围为 $X: \pm 5^\circ$, $Y: \pm 2^\circ$ 。相机、镜头、环形光源及 XY 俯仰偏转台安装在背板上，背板及其上的光学组件安装在 X 轴滑台上，以便于调整检测位置。



1. Z 轴滑台; 2. 三爪卡盘; 3. 上偶件; 4. XY 俯仰偏转台;
5. 环形光源; 6. 分光棱镜; 7. 下偶件; 8. XYZ 微动平台;
9. 镜头; 10. 相机; 11. X 轴滑台

图 2 双光路系统结构设计

所使用的相机型号为水星二代 PRO 系列 USB3.0 相机，型号为 ME2P-2621-15U3M/C，分辨率为 5120×5120 ，采用 USB3.0 接口，可以减少高分辨率图像传输过程中的时间延迟。实验中需要镜头的工作距离较长，因此选用镜头的型号为 Myutron MGTL-V 系列 1200 万像素 1.1 英寸远心镜头，工作距离为 150.5 mm。

2 图像处理

2.1 自动对焦及光强自适应调节

2.1.1 基于图像灰度方差的自动对焦

图像的灰度方差是衡量图像灰度分布均匀性的一个统计参数，它反映了图像中灰度值的分散程度。具体来说，图像灰度方差表示了图像中各个像素点灰度值与整个图像灰度平均值的偏离程度。图像的灰度方

差也可以反映图像的清晰度。较高的灰度方差通常意味着图像中存在较大的灰度变化，这可以表明图像具有较好的对比度和细节，看起来更清晰；如果图像的灰度方差较低，这可能意味着图像的灰度分布比较均匀，图像可能看起来比较平坦，缺乏细节，因此可能被认为不够清晰。

此外，图像的局部区域可能具有不同的灰度方差。因此，评估图像清晰度时需要优先考虑图像中感兴趣区域的灰度方差，尤其是对于具有不同纹理和特征的复杂图像。

灰度方差的计算公式如下：

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_i - \mu)^2 \quad (1)$$

其中： σ^2 表示灰度方差； N 是图像中的像素总数； I_i 是图像中第 i 个像素的灰度值； μ 是图像中所有像素灰度值的平均值，其计算公式如下：

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i \quad (2)$$

采用图像灰度方差计算方法的步骤如下：首先，将原始图像分割成若干 $N \times N$ 大小的图像块，之后分别计算每小块图像的平均灰度 μ 及灰度方差 σ^2 ，该值衡量了某一图像块内像素灰度值的分布离散程度；为了判断图像块的质量，还需要设定一个灰度方差的阈值，这个阈值是基于经验或特定应用场景的需求来确定的。若某图像块的灰度方差大于方差阈值，则认为是好的图像块，设置分割小图像块的尺寸为 $40 \text{ px} \times 40 \text{ px}$ ，设定灰度方差的阈值为 400。最后，统计好的图像块数目在总图像块数目中的占比 r ，它可以作为衡量整个图像灰度方差特征的一个指标，后续实验中用 r 表示图像的灰度方差。

2.1.2 基于图像信息熵的光强自适应调节

图像的信息熵通常表示为图像灰度级集合的比特平均数，单位是比特/像素。它描述了图像信源的平均信息量，与图像的灰度分布聚集特征有关。信息熵值越大，表明图像包含的信息越多，它的灰度分布就会越均匀，图像中的像素灰度越丰富；相反，信息熵值越小，图像包含的信息越少，它的灰度分布就会越集中。

图像信息熵可以作为图像光照强度的评价函数，这是因为如果图像的某些区域由于过曝光导致灰度分布变得非常集中，那么这些区域的图像信息熵可能会降低，信息熵本身并不提供光强的具体数值，但它可以评估图像的整体灰度分布特性，从而反映图像的光强。

图像信息熵的计算公式基于香农熵 (Shannon entropy) 的定义，对于离散图像，其计算公式通常表示为：

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

其中： E 是图像的信息熵； L 是图像可能的像素值的数量（例如，对于灰度图像， $L=256$ ，因为一个 8 位像素可以有 256 个不同的灰度值）。 p_i 是图像中第 i 个像素值出现的相对频率，即该像素值在图像中出现的次数与总像素数的比值。

2.2 零件边缘提取

基于 Canny 算法的单像素边缘提取是零件特征提取的常用方法，具体步骤包括高斯滤波、梯度计算、非极大值抑制、滞后阈值及边缘跟踪。其中滞后阈值是 Canny 算法中的关键步骤，它涉及到高阈值和低阈值的设置。其中，高阈值用于确认边缘的存在，它决定了某一边缘像素点是否为强边缘，若边缘像素点梯度值大于高阈值，则被认为是强边缘点。此外，高阈值有助于连接低阈值下识别的边缘候选像素，形成连续的边缘。检查强边缘候选像素周围的像素，如果它们的梯度幅度高于低阈值，并且至少有一个邻近像素的梯度幅度高于高阈值，那么这些邻近像素也会被标记为边缘的一部分。因此，高阈值的选取是关键。低阈值用于识别边缘的强候选像素。如果某一像素的梯度幅度高于低阈值，表明它可能是边缘的一部分。相对于高阈值，低阈值的选取影响较小，故针对高阈值进行自适应选取，以圆形零件为例，设计了考虑自适应 Canny 高阈值的特征提取算法。

平均灰度越大的图像，其边缘处的灰度梯度越大。此时，若想要获得较好的单像素边缘，Canny 高阈值就应该选取得更大。经多次实验发现，Canny 高阈值的选取与图像的平均灰度呈二次函数关系，因此可基于实验数据拟合出图像平均灰度与算法参数的关系曲线，实现自适应算法参数选取，如图 3 所示。

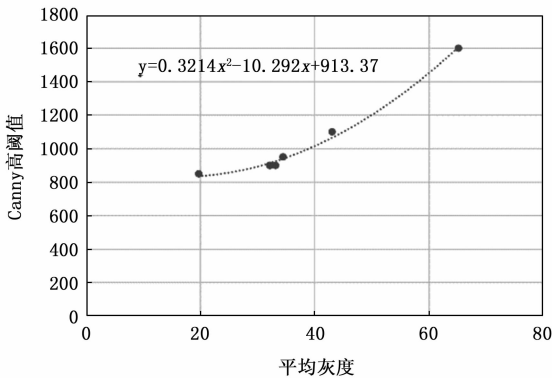


图 3 灰度与算法参数的关系曲线

单像素边缘检测方法通常能够提供像素级的边缘位置。然而，这对于需要更高分辨率的应用场景来说是不够的。因此，还需要进行亚像素级边缘提取，进一步提高精度。在实际零件拍摄过程中，由于光学系统的反

射、散射或其他环境因素，有时会存在一些鬼影，如图 4 所示。这类图像具有更为复杂的特征信息，若直接对原始图像进行亚像素边缘提取，会提取到较多的干扰边缘。因此，对于这类零件图像，首先要进行预处理，先通过特征区域识别等方式，对提取区域进行初步限制，再使用 Canny 算法在提取区域内进行单像素边缘提取，大致确定其边缘位置。之后，以单像素边缘为基础，进行亚像素边缘提取。采用基于改进反正切法的亚像素边缘位置计算，属于拟合法的一种。计算方法是

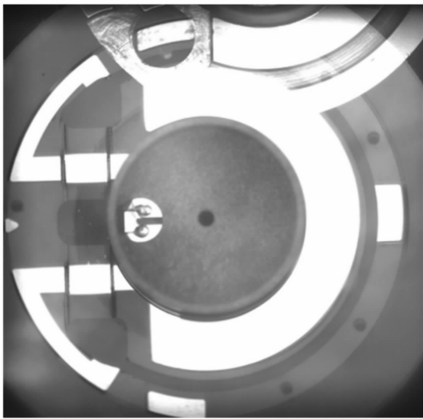


图 4 有鬼影时的零件图片

常规反正切法使用二阶导数计算斜率最大点，但是这样做计算量大，拟合迭代次数多，处理大尺寸的零件图像时，需要的计算时间较长。基于这一点，采用文献 [22] 中的改进反正切法对图像进行亚像素提取，缩短计算时间。计算原理如下：

基于反正切拟合的亚像素算法，通过拟合边缘附近的灰度分布，可以找到灰度变化率最大的点，即理论亚像素边缘点，这个点代表了图像中亮度变化最剧烈的位置。如图 5 所示，横虚线表示拟合反正切函数的值域上限及下限，竖虚线表示理论亚像素边缘点所在位置，在反正切函数模型中，理论亚像素边缘点两侧的灰度变化率是关于理论边缘点中心对称的。因此，在边缘点两侧由拟合反正切函数值域上限和下限围成的面积 S_1 和 S_2 理论上是相等的。反之，由于边缘法向灰度分布符合反正切函数模型，可以推导出满足 $S_1 = S_2$ 的分割点，即为理论亚像素边缘点。因此，通过找到使得 $S_1 = S_2$ 的点，可以确定边缘点的亚像素位置。

基于上述理论，为了在反正切曲线上搜索满足 $S_1 = S_2$ 相等的点，需要对反正切函数进行积分。在存在

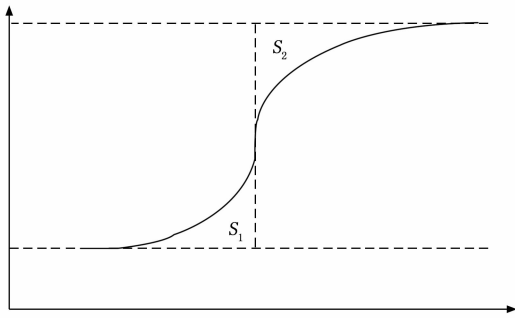


图 5 改进反正切法计算示意图

噪声或光照不均的情况下，实际拍摄出的图像的边缘的灰度变化将变得非常复杂。此种情况下，若直接求解反正切曲线下的积分，计算量极大。为简化计算，这里采用了一种近似方法^[22]，通过计算一系列过渡点的灰度值来近似表示反正切曲线，将这些过渡点的灰度值与理论边缘法线上的最大和最小灰度值所围成的梯形面积之和 S'_1 和 S'_2 近似表示 S_1 和 S_2 。如图 6 所示，用公式表示为：

$$S'_1 = S_{12} + S_{23} + \cdots + S_{kk+1} \quad (4)$$

$$S'_2 = S_{k+1k+2} + \cdots + S_{n-1n} \quad (5)$$

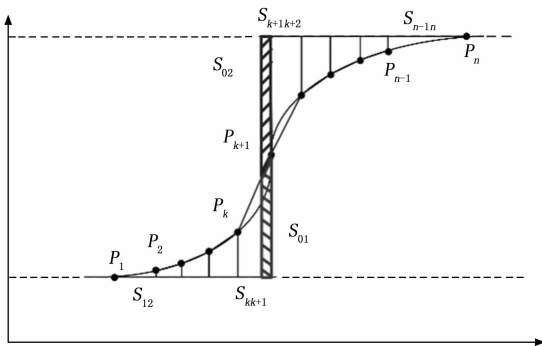


图 6 反正切函数的近似计算

3 实验及结果分析

3.1 双光路系统标定

由双光路系统成像原理可知，在理想状态（棱镜无安装姿态误差）下，偶件对齐点在图像中是重合的。但是，因为棱镜的实际安装姿态存在偏差，成像光路发生变化，成像点不再重合。

单应矩阵 H ，也叫投影变换，是一个 3×3 的非奇异矩阵，表示两个投影平面 p_1 和 p_2 之间的可逆映射，用公式可以表示为 $p_1 = H p_2$ 。基于单应矩阵对双光路系统进行标定。如图 7 所示，假定两规格相同且严格对齐的标定板，经偶件装配系统的操作分离至合适的成像位置，形成两个空间标定平面，同时假定在实际装配的过程中，上下偶件的对齐特征处于相同的标定平面内（这一点可由系统的 Z 向运动重复性保证）。 u_0 和 b_0 分别为

上下标定平面内任意一组对齐点， u_1 和 b_1 分别为待装配偶件的实际对齐点， i_{u0} 、 i_{b0} 、 i_{u1} 和 i_{b1} 分别为 u_0 、 b_0 、 u_1 和 b_1 在像平面上的像点。假设上下标定平面与像平面之间的单应矩阵分别为 H_1 和 H_2 ，则有：

$$u_i = H_1 i_{ui} \quad (6)$$

$$b_i = H_2 i_{bi} \quad (7)$$

其中： H_1 和 H_2 可通过上下标定平面与像平面之间的任意四组以上非共线的对应点求出，每组对应点可以提供两个独立的方程，即一个点对应可以生成两个方程，由于单应矩阵的自由度为 8，因此最少需要 4 组对应点来构成一个线性方程组，通过直接线性变换法即可求出对应的单应矩阵。

假设控制上零件寻找并对齐下零件，则 u_1 为待求点。 b_1 在标定板坐标系中的坐标是未知的，可通过其理论成像点 i_{b1} 由式 (7) 求得。由于标定面是装配系统平动获得，可认为上零件和下零件所在的坐标系是平行的，因此有 $b_1 - b_0 = u_1 - u_0$ 的关系，进而可以求得 u_1 。再通过式 (6) 逆向解算，获得 u_1 在像平面上的理论成像点 i_{u1} ，则只需控制上零件运动，当其像点与 i_{u1} 重合时，可以认为上零件和下零件已经达到了对齐位置。

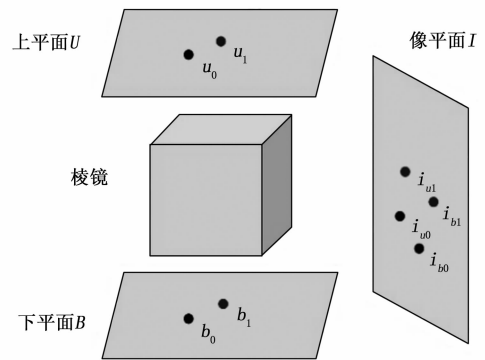


图 7 双光路系统标定示意图

以上述方法进行系统标定，进行四次对齐实验，在每次实验中，上零件的位置保持固定，计算将下零件调节到对齐位置时在图像坐标系所需偏移量 Δx 及 Δy ，并实测调整完成后上下零件的同轴度，计算结果如表 1 所示。实验数据表明，该方法可以实现精确的对齐控制，同轴度的测量值均在可接受的精度范围内。

表 1 偏移量测量及同轴度实测结果

序号	初始位置/px	Δx /px	Δy /px	同轴度 $\varphi/\mu m$
1	(9.36, 7.12)	-3.92	-1.15	4.3
2	(5.76, 8.35)	0.32	-2.38	3.4
3	(3.67, 4.23)	1.77	1.74	5.7
4	(6.22, 9.37)	0.78	-3.40	6.3

注：实验设备镜头倍率为 $0.3 \times$ ， $1 \text{ px} \approx 8.3 \mu m$ 。

3.2 自动对焦及光强自适应调节

选取爬山式变步长搜索法作为调焦搜索算法，以图像的灰度方差作为清晰度评价值，具体搜索的逻辑如下：首先，设定初始调节方向为远离镜头方向。若首次调节后的图像的灰度方差值变小，则认为初始搜索方向有误，转而沿另一方向重新搜索；反之则认为当前搜索方向正确，继续沿当前方向搜索。之后，每次出现图像评价值变小的情况，则认为此时已越过评价函数的峰值点，转而沿另一方向继续搜索，且每次反向时将搜索步长缩短一半。当搜索步长低于初始搜索步长的 1/4 时，认为此时已在评价函数图像峰值点附近，调节完成。

任意设置离焦位置，进行自动聚焦实验，清晰度评价函数曲线如图 8 所示。可以看到，最佳对焦位置在标尺距离 329 mm 附近，考虑到所用相机的实际景深范围，标尺距离在 327~331 mm 之间都可认为是对焦状态较好的位置。调焦完成后，再将图像信息熵作为图像光强评价值，进行光强调节实验，光强评价函数曲线如图 9 所示。实验中的光照强度调节范围是 0~255，其中 255 代表光源的最大亮度。可以看到，最佳光强对应的曲线峰值点大约在光强值为 41 的位置，光强在 39~43 的图像的质量仍然保持在较理想的水平。因此，在这个区间内，所得到的图片都可以认为是光强适宜的。

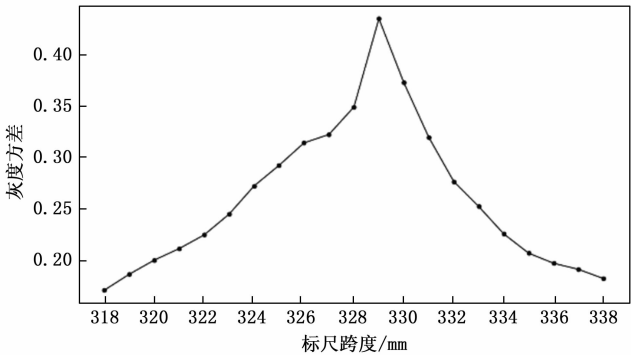


图 8 调焦评价函数曲线

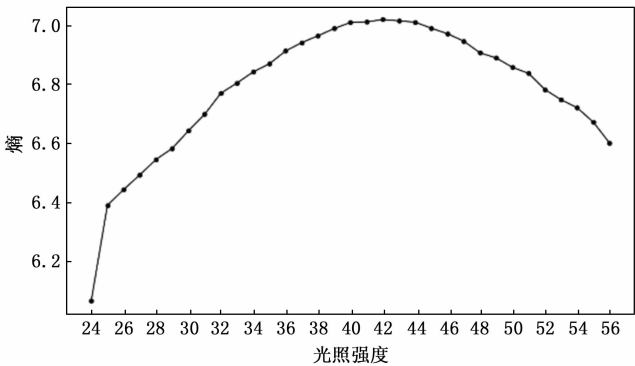


图 9 光强评价函数曲线

根据初始位置和初始光照强度不同的情况，进行四

组实验，调节前后效果对比如图 10 ~ 13 所示，具体数值结果如表 2 所示。

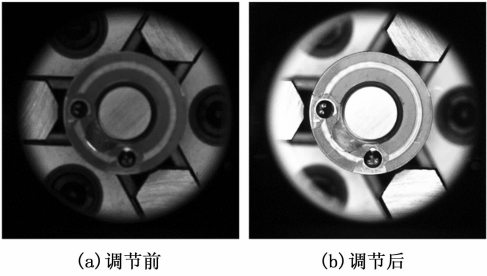


图 10 第一组调节前后对比图

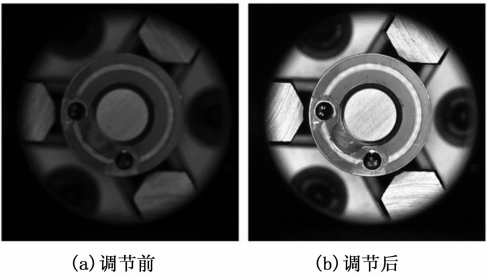


图 11 第二组调节前后对比图

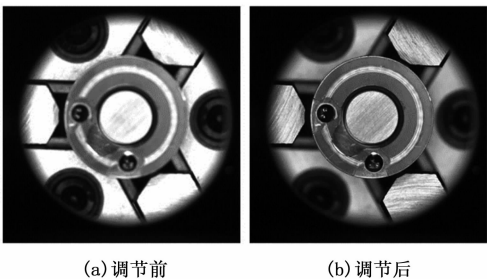


图 12 第三组调节前后对比图

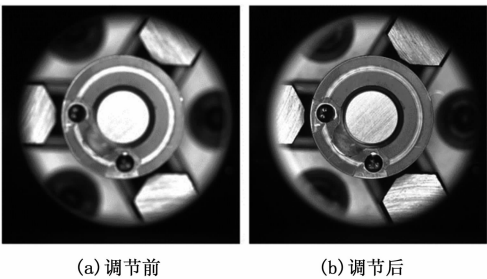


图 13 第四组调节前后对比图

表 2 对焦及光强调节结果

组别	调节前状态		调节完成状态	
	光强	标尺距离/mm	光强	标尺距离/mm
第一组	20	318	42	330
第二组	20	340	42	328
第三组	52	318	43	329
第四组	52	340	40	329

从实验结果来看,对比初始状态,调节完成后的光强和标尺距离都在适宜范围之内,表现出较好的适应性。

3.3 边缘提取

为验证算法的鲁棒性,选用带有鬼影的零件图片进行边缘提取及圆心拟合,并对提取结果进行精度验证。实验过程如图 14 (a) ~ 图 14 (f) 所示,具体步骤如下。

1) 预处理:将零件图片导入算法,首先对图像进行降噪以及二值化处理,保留图像的细节特征并简化图像。再通过分析图像特征,自动选取图像中的最优定位点,根据这些点来初步限制提取区域。针对鬼影对单像素提取的影响,为了提高定位的准确性,优先选择最接近图像边缘的环带作为提取区域。以图 14 (b) 中的黑色未污染特征进行环带定位。

在初步确定了边缘后,需要评估其与理想边缘位置的偏差。如果实际获得的边缘与理论上的边缘位置相差过大,这通常意味着该位置受到了鬼影的影响。在这种情况下,应该将这部分受影响的区域从提取过程中去除,以保证提取结果的准确性。鬼影通常在图像的边缘区域更为明显,通过减少环带的宽度,可以减少鬼影边缘的数量。这样,即使在提取过程中不可避免地包含了

一些鬼影,它们也更容易在后续的残差处理阶段被识别和过滤掉。

2) 提取出的环带如图 14 (c) 所示,在此范围内进行 Canny 算子单像素边缘提取;

3) 以单像素边缘为基础,使用反正切法进行亚像素边缘位置计算;

4) 根据亚像素级边缘点拟合几何中心。

另取一组图片进行测试,提取结果如图 15 所示。在当前位置完成圆心拟合后,控制微动平台移动一段距离,再次进行圆心拟合,并通过电感测微仪测出其实际位移,计算两次拟合圆心像素坐标之差,验证提取精度,结果如表 3 所示,X 方向提取精度为 0.25 像素,Y 方向提取精度为 0.21 像素。

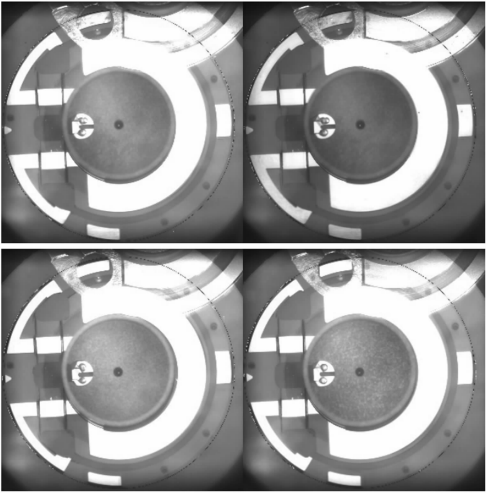


图 15 边缘提取及圆心拟合结果

表 3 提取精度验证(X 方向)

序号	圆心 X 坐标变化量/px	理论位移/ μm	微动平台实际位移/ μm
1	0.79	6.58	8.67
2	1.72	14.32	14.55
3	0.33	2.74	4.05
4	0.64	5.33	4.58
5	0.73	6.08	6.45

表 4 提取精度验证(Y 方向)

序号	圆心 Y 坐标变化量/px	理论位移/ μm	微动平台实际位移/ μm
1	0.65	5.33	6.35
2	0.47	3.89	4.37
3	1.05	8.82	8.63
4	0.78	6.49	5.84
5	2.52	22.15	20.41

注:实验设备镜头倍率为 $0.3\times$, $1\text{ px}\approx 8.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

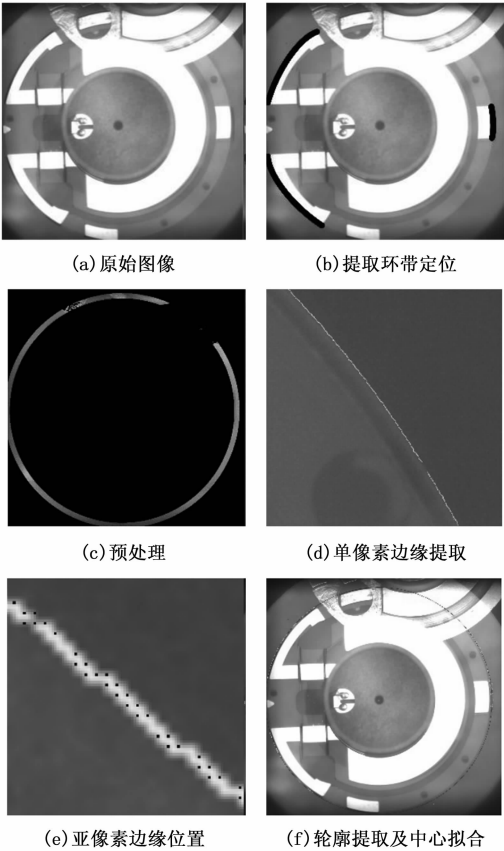


图 14 亚像素级边缘提取过程



图16 提取精度验证

4 结束语

针对精密偶件装配过程中的对齐问题,设计搭建了利用“CMOS工业相机+立方体分光棱镜”的双光路系统,并基于单应矩阵完成标定。针对不同零件加工质量和成像光路差异的问题,采用基于灰度方差和信息熵的自动对焦与光强自适应调节方式,保证图像质量的一致性。最后,在图像特征提取的过程中,针对单像素精度不足的问题,采用基于改进反正切法的亚像素边缘提取方法,并结合自适应边缘梯度阈值提高算法的鲁棒性。实验证明,采用该方法图像提取精度可达0.25像素。

参考文献:

- [1] 程俊森,吴文荣,杨毅,等.智能微装配技术研究综述[J].现代制造工程,2022,(6):142-152.
- [2] 黄心汉.微装配机器人:关键技术、发展与应用[J].智能系统学报,2020,15(3):413-424.
- [3] SHEN Y, JIA Q, WANG R, et al. Learning-Based visual servoing for High-Precision Peg-in-Hole assembly [J]. Actuators, 2023, 12 (4): 144.
- [4] 赵晨阳,向捷,卞凯,等.基于光学显微视觉精密定位测量综述[J/OL].激光与光电子学进展,2024:1-41. [2024-05-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20231108.0957.050.html>.
- [5] CHEN M, HAN S, LI C. Efficient Micro-LED defect detection based on microscopic vision and deep learning [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 177: 108-116.
- [6] ABDEL-AZIZ Y, KARARA H. Direct linear transformation into object space coordinates in close-range photogrammetry, in proc. symp. close-range photogrammetry [J]. Urbana-Champaign, 1971: 1-18.
- [7] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off the-

shelf cameras and lens [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1987, 3 (4): 323-344.

- [8] ZHANG Z Y. A flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations [C] // Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 666-673.
- [9] 高翔宇.微装配系统快速对位检测技术研究[D].北京:北京理工大学,2017.
- [10] 李燕.高精度微装配对位检测系统与关键技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
- [11] GAO P P, LIU F, SUN X Z, et al. Rapid non-contact visual measurement method for key dimensions of revolving workpieces [J]. International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2021, 12: 10.
- [12] DO P N B, NGUYEN Q C. A review of stereo-photogrammetry method for 3-D reconstruction in computer vision [C] // 2019 19th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), IEEE, 2019: 138-143.
- [13] 尤玉虎,刘通,刘佳文.基于图像处理的自动对焦技术综述[J].激光与红外,2013,43(2):132-136.
- [14] 潘宏亮,孙金霞,韩希珍.图像清晰度评价与变步长融合调焦方法[J].红外与激光工程,2023,52(1):248-253.
- [15] 张驰,韩冬艳,冉迪,等.基于多尺度窗口的自动调焦算法[J].弹箭与制导学报,2021,41(1):135-138.
- [16] 景辉,戴琳琳,候亚伟,等.基于光照自适应调节和模糊分类的人脸图像质量提升算法研究[J].铁路计算机应用,2023,32(2):1-6.
- [17] 解冰.掌纹识别系统中的光源强度自动调节技术及其应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.
- [18] 洪润莉,何佳乐,古庆宏,等.基于图像处理技术的印制电路板宽精密测量与光源光强调节方法研究[J].电脑与电信,2021,(12):42-46.
- [19] 田佳淳,王亮,梅标,等.集成视觉显著性和群决策的航空零件孔特征检测[J].光学精密工程,2024,32(1):125-136.
- [20] 张之敬,杜芳,金鑫,等.微小尺寸零件复杂边缘识别算法[J].光学精密工程,2009,17(2):356-361.
- [21] 张喜民,詹海生,余奇颖.几何特征约束的SIFT特征匹配改进算法[J].计量学报,2023,44(8):1182-1187.
- [22] 刘凌霄.基于改进亚像素法的光强自适应弹簧轮廓检测方法研究[D].北京:机械科学研究总院,2022.