

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311835

基于双拟合优化的聚焦深度三维形貌测量方法*

王文琪, 刘巍, 刘洋, 程习康, 张洋
(大连理工大学机械工程学院 大连 116000)

摘要: 聚焦深度法广泛地应用于小尺寸零构件的三维形貌测量。针对聚焦评价曲线多存在噪声导致三维形貌测量的精度下降, 且效率受图像序列数目和聚焦评价算法限制的难题, 通过结合双拟合优化理论与聚焦单峰性评价指标提出了一种基于自适应权重的聚焦极值搜寻方法, 并进一步基于三次多项式二次插值算法和多级中值混合滤波优化深度信息。实验结果表明, 方法对仿真图像数据的均方根误差 (RMSE) 较高斯拟合和多项式拟合分别降低了 19.08%、17.32%, 对球栅阵列封装 (BGA) 图像中受噪声干扰较大的区域仍具三维分辨能力, 同时对钻削刀具进行了测量, 提出的方法在 50% 的图像序列数目和图像分辨下 RMSE 仍降低了 77.8%、62.6%, 有效减少了聚焦曲线噪声对测量结果影响的同时提升了三维测量的效率。

关键词: 聚焦深度法; 三维形貌测量; 宽场显微成像; 三维点云优化; 聚焦极值搜寻算法

中图分类号: TH76 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Shape from focus 3D topography measurement method based on dual-fitting optimization

Wang Wenqi, Liu Wei, Liu Yang, Cheng Xikang, Zhang Yang

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Shape from focus is a commonly-used method for measuring the three-dimensional topography of components with small size. However, the measurement accuracy is often affected by noise in the focus evaluation curve. Additionally, the efficiency is limited by both the number of image sequences and the focus evaluation algorithm. In this paper, an adaptive weighted focus extreme search method combining the theory of dual-fitting optimization and a focus unimodality evaluation index is proposed. Furthermore, a cubic polynomial quadratic interpolation algorithm is used for interpolation, and the depth information is optimized by a multi-level median blend filtering algorithm. Experimental results show that the proposed method reduces the RMSE of simulated image data by 19.08% and 17.32% compared to Gaussian fitting and polynomial fitting, and maintains three-dimensional resolution in regions with significant noise interference. At the same time, we also measured the drill bits. Results show that the proposed method reduces the RMSE by 77.8% and 62.6% even when the number of image sequences and image resolution are reduced by 50%, which effectively reduces the influence of measurement curve noise on measurement results and improves measurement efficiency.

Keywords: shape from focus; three-dimensional (3D) topography measurement; wide-field microscopy imaging; 3D point cloud optimization; search algorithm of focus curve

0 引言

随着工业智能制造的快速发展, 航空航天^[1]、精密制造^[2]、集成电路与半导体^[3]等领域对复杂零构件的精准尺寸和形貌的测量需求与日俱增。同时, 为了

实现更优的产品性能, 此类零构件逐渐呈尺寸更微小、结构更复杂的发展趋势^[4], 传统的接触式测量和基于视觉的二维图像的测量方法已无法满足测量维度和效率的需求, 因此, 亟需发展高精、高效、非接触式的三维形貌测量方法, 以推动工业生产和智能制造技术的发展。

收稿日期: 2023-08-25 Received Date: 2023-08-25

* 基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0703304)、国家杰出青年科学基金 (52125504)、国家自然科学基金集成项目 (92148031) 资助

目前,双目立体视觉^[5]、激光三角法^[6]、条纹投影轮廓术^[7-8]、光度立体视觉^[9]、宽场显微轴向扫描^[10]等基于视觉测量原理的三维形貌测量方法广泛应用于工业生产场景。其中,聚焦深度法(shape from focus, SFF)是一种被动照明的三维成像方法,通过成像系统有限景深获取同一场景下轴向位置的序列图像,计算聚焦信息并检索还原图像中每个像素点的深度。相比于主动式三维成像方法其受环境光干扰较小,同时也避免了立体视觉中遮挡和匹配歧义等问题,具有精度高、结构简单等优点,适用于小尺寸的复杂工业零构件的三维测量,近年来受到了工业界的广泛关注。Ding 等^[11]将聚焦深度法用于齿轮磨损体积的测量,有效地评估了齿轮磨损和寿命,测量精度可达 97.23%。2020 年, Santoso 等^[12-13]提出了一种安装于混合超精密机床上用于在机表面形貌测量的聚焦深度测量系统,并讨论了在机测量的影响因素对测量结果的影响。此外,奥地利 Alicona 公司基于聚焦深度原理研发了系列三维尺寸、表面粗糙度测量的商业化仪器,在工业测量中得到了广泛的认可^[14]。

然而,针对表面复杂的样品,其测量过程中受采样抖动、图像噪声等问题的影响,三维还原的精度和点云完整度大大下降。针对上述问题,近年来专家学者们进行了深入的研究。Qu 等^[15]通过驱动液体透镜实现了轴向扫描测量,使物体相对于光学系统的位置恒定,减少了机械位移的同时也减少了光照变化对测量结果的影响。然而由于系统放大倍率的变化和横轴的偏移,需要液体透镜的轴向焦移标定。此外,聚焦评价函数的精确度与稳定性直接决定了测量的精度,传统的聚焦评价函数在处理表面差异化明显的待测物时,计算的鲁棒性、准确性和速度等方面表现各异,缺乏抗干扰性和泛用性,需结合实际的被测物进行改进以准确评估聚焦特性^[16]。为了实现复杂刀具的三维参数测量,本课题组^[17]前期结合刀具边缘特征提出了一种改进的 Tenengrad 聚焦评价函数,提升了点云的质量和三维测量的精度。尽管聚焦函数的改进使得测量精度得到了明显提升,但复杂的聚焦函数往往导致图像处理时间的增加,致使测量效率降低。另一方面序列图像的数量和图像的分辨率也是限制基于聚焦深度法进行三维形貌测量效率的重要因素,通常难以直接满足工业零件的三维测量需求。需要通过拟合等后处理方法进行形貌恢复结果的进行进一步优化。首先,准确的拟合曲线不仅能够减少图像序列的数目提升测量效率,也减少了聚焦评价误差从而实现更高精度的测量。然而,传统的高斯拟合、多项式拟合等方法易受环境噪声的干扰导致测量精度下降。2018 年,张明等^[18]提出了一种基于贝塞尔曲线插值的聚焦深度法,有效地抑制了噪声。2019 年, Jang 等^[19]提出了基于局部回归的聚焦曲线拟和方法,相较传统的三点法等拟和方法在精度和效率

上得到了较大的提升。近期, Fu 等^[20]通过自适应导数步长计算聚焦曲线梯度,利用梯度曲线零点寻找最佳聚焦位置,减少了低信噪比区域的影响。然而此类算法通常较为复杂,拟合结果易受成像过程的复杂性和噪声的影响,且上述方法所应用的测量对象较为简单,形貌特征单一,拟合方法的泛用性也有待于进一步提高。因此,针对聚焦深度法在复杂工业零件三维形貌测量中易受环境噪声影响、测量效率低等问题,本文首先基于公开的序列图像数据集,通过不同的聚焦评价函数对测点进行聚焦评价,并分析了现有拟合方法对测量结果的误差。在此基础上,提出了一种基于双拟合的聚焦深度还原方法,首先在仿真图像和球栅阵列封装(ball grid array, BGA)数据集图像上验证了方法的有效性,并以麻花钻头为实验对象,在所搭建的测量系统中获取了被测物的特征序列图像,对麻花钻进行了三维重建,实验对比了不同序列数量、图像分辨率等因素对测量结果的影响,并对所提方法的精度和效率与高斯拟合和多项式拟合进行了对比验证。

1 双拟合优化聚焦三维形貌测量方法

1.1 聚焦深度三维形貌测量基本原理

理想的成像系统物距 s 、像距 v 、焦距 f 满足高斯成像公式,系统处于聚焦状态时,物面上的点和对对应像面上的点共轭。当系统处于离焦状态时,该像点变为弥散圆斑,可以看作为点扩散函数和聚焦平面图像的卷积,即:

$$\begin{cases} I_d(x, y) = h(x, y) * I_f(x, y) \\ h(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_h^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_h^2}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_d 为离焦时的图像; $h(x, y)$ 为点扩散函数通常近似为二维高斯函数; σ_h 为高斯函数相关参数; I_f 为聚焦图像。因此聚焦深度法是通过获取不同聚焦程度的序列图像并分析图像中每个像素点的聚焦情况从而估算获取深度的被动测量方法,其测量原理的示意图如图 1 所示。首先通过高精度的运动平台负载有限景深的成像系统以等间隔的距离 Δd 进行轴向扫描获取 N 张被测物的序列图像,由于垂直扫描,样品的不同区域在不同图像上聚焦;其次,采用聚焦评价函数对图像序列中每一张图像上选定的像素点邻域进行清晰度评价的计算,获取聚焦矩阵,生成每个采样点的图像序列数 n 与聚焦测度值 F_m 的信息;最后,进一步对测度数据进行拟合、插值、滤波等后处理方法实现测量对象的三维点云获取,并通过截面和向量计算等方法完成几何三维参数的测量。

1.2 图像聚焦评价函数

通过对测量方法的分析,基于聚焦深度法获取被测物初始深度信息的关键在于图像的聚焦评价函数对聚焦

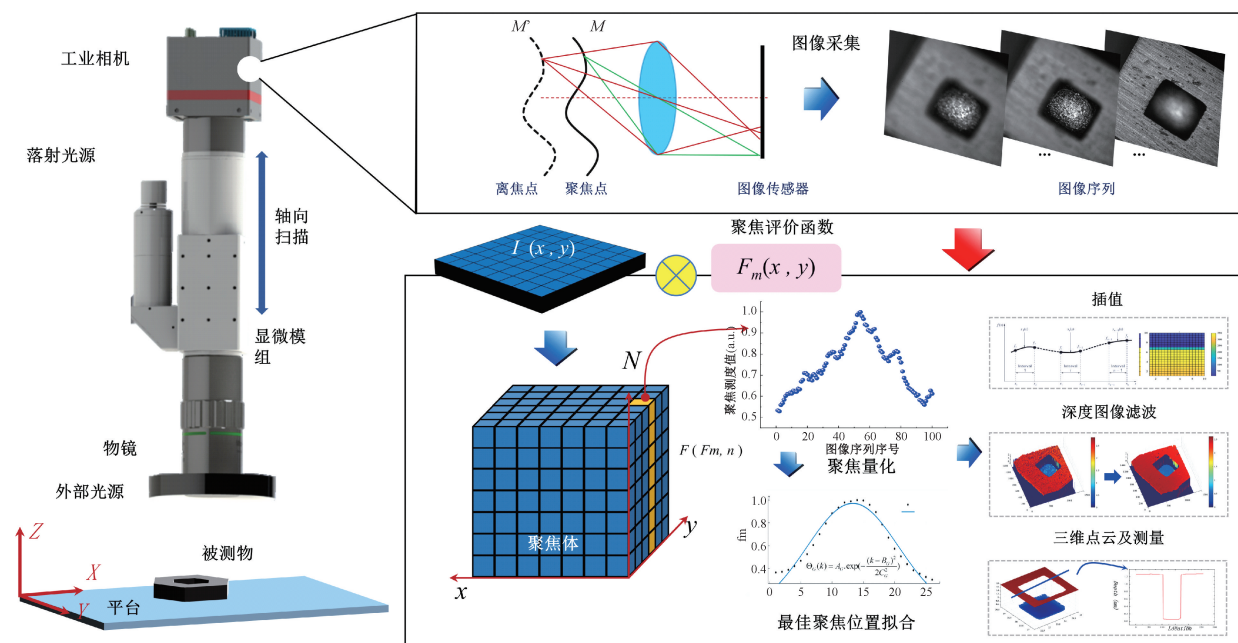


图1 基于聚焦深度法的三维形貌测量方法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of 3D topography measurement method based on shape from focus

测度的计算是否准确、稳定。聚焦评价函数对每个像素点聚焦度评价的本质是高通滤波器,通过函数与序列图像进行卷积计算,将聚焦评价量化:

$$F_m(x, y) = \sum_{x=\frac{w-1}{2}}^{x+\frac{w-1}{2}} \sum_{y=\frac{w-1}{2}}^{y+\frac{w-1}{2}} f[I(x, y)] \quad (2)$$

式中: w 为窗口大小,为了减少噪声的干扰; f 为聚焦评价函数; $I(x, y)$ 为像素点灰度值。理想情况下,聚焦测度曲线具有优异的单峰性、无偏性和低噪声等特点。本文对公开的 BGA 焊球的显微序列图像的数据集进行了常用聚焦评价函数对聚焦测度值计算与评价。选取了 BREN、CURV、TENG、TENV、GDER 和 WAVS 6 种常用的聚焦评价函数,分别对序列图像的全局和 4 个不同的测试点(点①~④)的聚焦情况进行了分析评价,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出,评价函数对聚焦测度的计算会受到图像噪声的影响,从而影响对峰值位置的估计,如图 2(c)、(h) 的点②、③和④由于受图像噪声干扰较大,在峰值附近聚焦值的分布存在误差跳动和偏移,不利于后续准确的深度拟合。此外,针对不同的样本,不同聚焦函数表现能力各异,且复杂的聚焦评价函数计算耗时难以满足快速测量需求,因此仅依靠聚焦评价函数的改进与提升难以解决实际的测量问题,需要对拟合等后处理过程进行进一步地优化改进以提高还原方法的适用范围,减少系统对聚焦评价函数的依赖。

1.3 基于双拟合的聚焦极值搜寻方法

通过上述分析,理想情况下聚焦评价曲线应符合高斯分布,而受实际环境等因素的干扰,聚焦测度值的误差和跳动导致无论是直接将极值进行定位还是传统的高斯拟合都难以准确地评价实际的聚焦情况,使得后续的三维重建失真、失准。以 WAVS 评价函数在测点②的聚焦测度值进行单一的高斯拟合,结果如图 3 所示,表明对于数据的跳动,高斯拟合无法对聚焦极值点准确地进行表征。

理论上,高斯拟合与曲率拟合极值对应的横轴位置具有重合性。高斯曲线函数表达为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

其中, σ 为标准差, μ 为均值向量,其对应的曲率函数表达式为:

$$k(x) = \frac{|f''(x)|}{(1 + f'(x))^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

$k'(x) = 0$ 时, $x = \mu$ 。如图 4 所示,高斯函数和其曲率函数极值点对应的横坐标重合。因此,本文通过基于高斯拟合和曲率拟合的双拟合逼近聚焦测度的极值点,减少极值点附近数据的跳动带来的拟合误差:

$$x_f = \omega_g \mu_g + \omega_c x_c \quad (5)$$

式中: x_f 为最终拟合极值点; μ_g 与 x_c 分别为高斯拟合和曲率拟合对应极值点; ω_g 与 ω_c 分别为高斯拟合和曲率拟合的权重值。虑及高斯拟合标准差对拟合精度的影响,

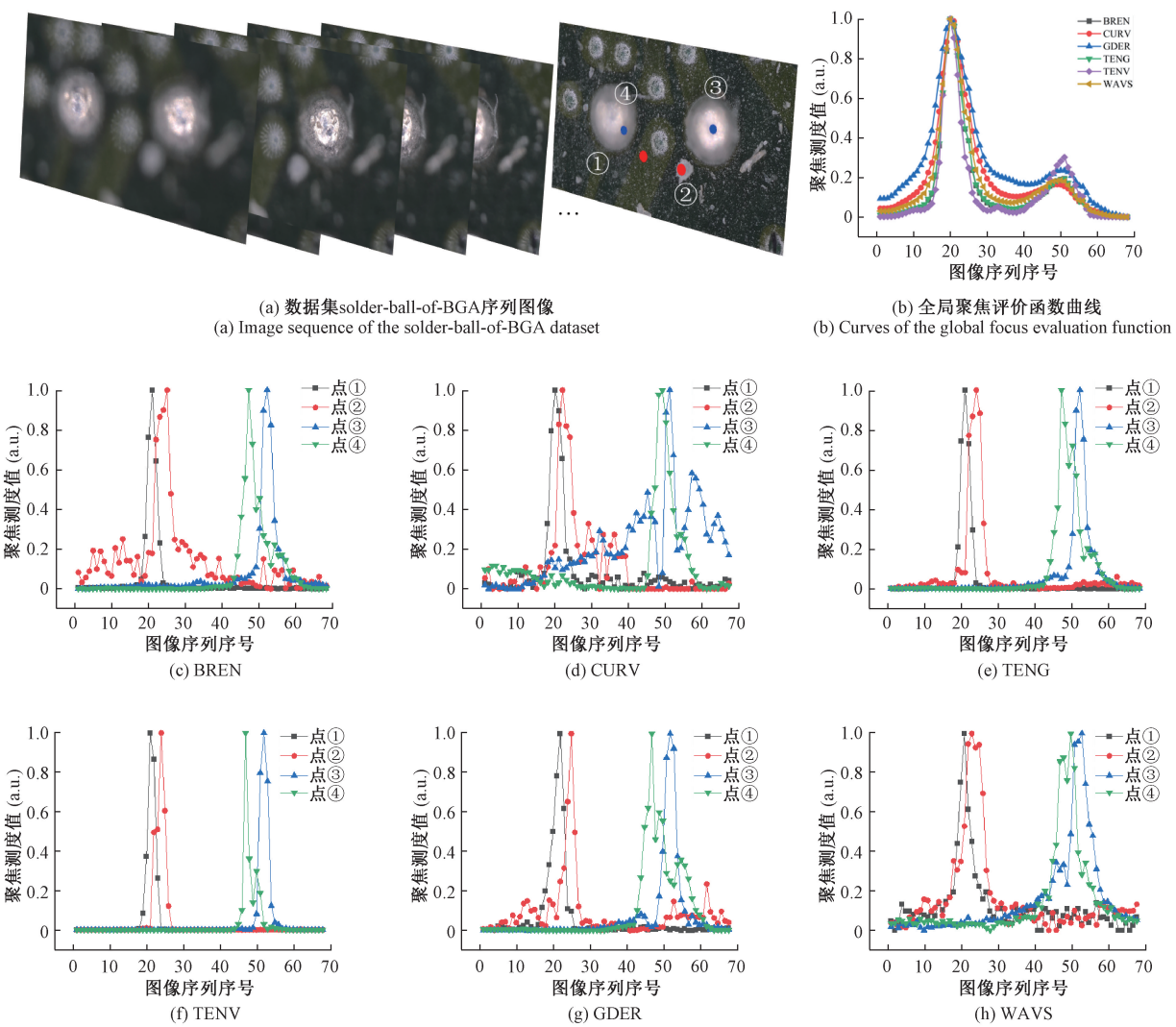


图 2 solder-ball-of-BGA 数据集聚焦评价曲线分析

Fig. 2 Focus curve analysis of the solder-ball-of-BGA dataset

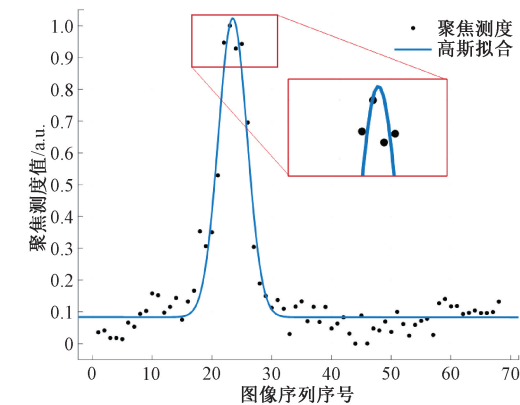


图 3 测点 ② WAVS 聚焦测度评价的高斯拟合

Fig. 3 Gaussian fitting of measuring point ② WAVS focusing measure evaluation

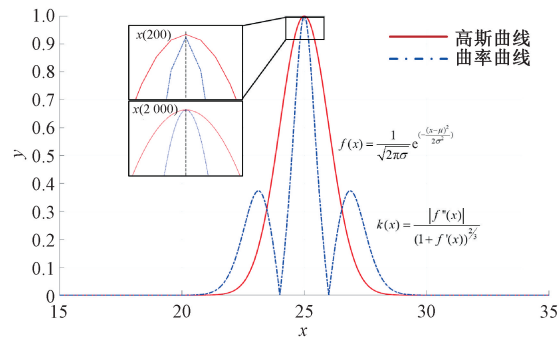


图 4 理想情况下高斯函数与曲率函数极值点对应横坐标重合性

Fig. 4 Theoretical coincidence of extreme point between Gaussian function and curvature function

σ 与拟合结果的单峰性直接相关,因此,权重根据高斯拟合的标准差 σ 进一步自适应确定。

根据上述分析,如图 5 所示,本文提出了一种基于双拟合优化的极值搜寻算法,步骤如下:

- 1) 搜寻聚焦测度值 $F_m > T$ 的点, T 为阈值(本文中测度之进行了归一化处理, $T=0.5$);
 - 2) 对搜寻的点进行高斯拟合,根据最小二乘法计算高斯拟合标准差 σ ,拟合曲线的峰值点 μ_g ;
 - 3) 根据三点法对测度值进行曲率计算,并根据最大值确定 x_c ;
 - 4) 根据 σ 计算权重值,最终确定拟合点 x_f 。
- 具体算法如算法 1 所示。

算法 1: 双拟合优化极值搜寻算法

- 1) 判定 σ 是否小于拟合误差 λ ;
 - 2) 若是,认为高斯拟合结果受影响程度小: 令 $\omega_g = \lambda / \sigma + \lambda$;
 $\omega_c = 1 - \omega_g$;
 - 3) 若否,认为聚焦测度值受到较大程度干扰,需要通过曲率拟合进行进一步修正:
- 计算:
- $$\text{diff}(i) = f(x_{i+1}) - f(x_i), \text{sign}(i) = \text{diff}(x_{i+1}) \cdot \text{diff}(x_i);$$
- 寻找:
- $$\text{sign}(i) < 0, \text{提取曲率 } K_i, K_{i+1};$$
- $$\text{令 } \omega_g = \frac{\min\{K_i, K_{i+1}\}}{\max\{K_i, K_{i+1}\} + \min\{K_i, K_{i+1}\}}, \omega_c = 1 - \omega_g。$$

其中,离散点 (N_i, F_i) 曲率为:

$$K_i = \frac{\arctan\left(\frac{F_{i+2} - F_{i+1}}{N_{i+2} - N_{i+1}}\right) - \arctan\left(\frac{F_{i+1} - F_i}{N_{i+1} - N_i}\right)}{\sqrt{(N_{i+1} - N_i)^2 + (F_{i+1} - F_i)^2}} \quad (6)$$

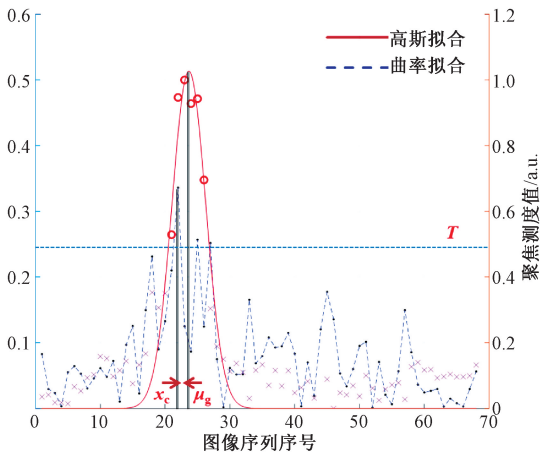


图 5 基于双拟合的聚焦极值搜寻方法

Fig. 5 Focusing extremum searching method based on dual-fitting

1.4 虑及深度信息连续性的深度优化处理方法

通过上述步骤,可以有效地获得初始深度信息。然而,对于表面形貌复杂的样品,初始序列图像存在的由高光引起的信息缺失和随机的噪声难以抑制,仍需要进一步地对深度信息进行优化。针对采集的序列图像受局部的高光的影响,初始的点云信息存在空洞等问题,首先基于横向信息深度的连续性,通过三次多项式对初始深度图进行二次插值:

$$s(d) = \begin{cases} (a+2)|d|^3 - (a+3)|d|^2 + 1, & |d| \leq 1 \\ a|d|^3 - 5a|d|^2 + 8a|d| - 4a, & 1 < |d| < 2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: d 为像素点到附近点的距离; a 为多项式系数。进一步地,通过邻域 4×4 个点进行加权求和对像素点 (x, y) 的深度进行计算:

$$d(x, y) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 d(x_i, y_j) s(x - x_i) s(y - y_j) \quad (8)$$

这种方法计算准确,且填充效果平滑。此外,为了减少噪声和离群点对深度图像的质量和准确性的影响,需要进一步地通过点云滤波算法对点云的噪声进行去除。为了在平滑的基础上同时保留更多的边缘和细节信息,本文采用多级中值混合滤波器,结合了多级中值滤波、混合操作和深度连续性优化,通过逐层进行滤波和混合,以提高深度图像的平滑性和连续性。具体算法如算法 2 所示。

算法 2: 深度信息优化算法

- 1) 输入: 深度图像 img ; 滤波层数 $nLevels$; 滤波器初始窗口大小 $inSize$; 混合权重 α_r
- 2) 初始化滤波器参数,并对原始滤波图像进行中值滤波:
 $d_f(x, y) = \text{medfilt}(d(x, y), winSize)$
- 3) 混合图像:
 $d_m(x, y) = \alpha_r \times d(x, y) + (1 - \alpha_r) \times d_f(x, y)$
- 4) 输入混合图像,进入迭代,增加窗口大小,进一步进行滤波
 $winSize = winSize + 2$
- 5) 达到滤波层数 $nLevels$, 输出最终结果

2 实验与讨论

为了验证本文所提出方法的有效性,本文分别对聚焦仿真图像序列、真实数据集、以及构建的三维视觉测量系统采集的图像序列进行了三维形貌的还原和测量的分析与评价。

2.1 仿真样本三维形貌测量实验

本文通过聚焦仿真生成了 60 张在不同位置聚焦的仿真图像序列,如图 6(a) 所示,其理论三维形貌如

图 6(b) 所示。为了验证抗噪性, 在生成的图像中添加了高斯和椒盐噪声。选取了 TENV 聚焦评价函数, 分别基于高斯拟合、多项式拟合和本文方法对图像序列进行三维还原, 结果如图 6(c)、(d) 所示, 与理论值进行对比, 本文方法生成的点云的平均 RMSE 相较高斯拟合和多项式拟合分别降低了 19.08%、17.32%。

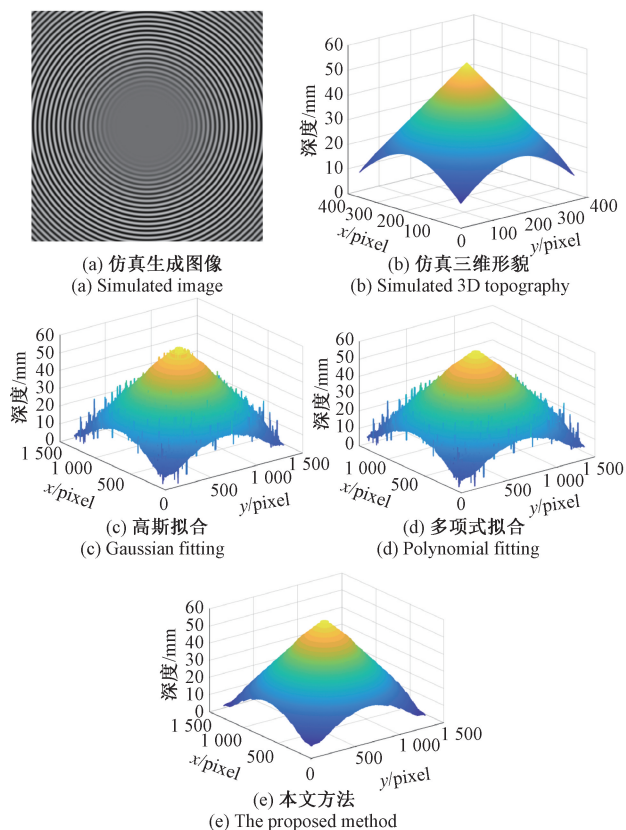


图 6 基于仿真样本的三维形貌还原

Fig. 6 3D morphology reduction results of the simulated objects

2.2 BGA 三维形貌还原

基于 TENV 聚焦评价函数对 solder-ball-of-BGA 数据集进行了三维形貌的还原。该数据集采集了 68 张 BGA 焊球不同聚焦情况下的序列图像, 通过本文算法进行还原得到结果如图 7 所示。图 7(a) 为全聚焦图像, 图 7(b)~(d) 分别为通过高斯拟合、多项式拟合和本文所提出的双拟合方法进行三维还原的结果, 对比可以看出, 本文所提出的方法能够清晰地还原出受噪声干扰较大的小焊球的形貌且噪声少、完整度高, 结果优于两种对比方法。

2.3 麻花钻三维形貌测量与评价

为了进一步验证本文所述方法的有效性, 本文构建了基于聚焦深度法的测量系统如图 8 所示, 并对麻花钻进行了三维形貌的测量。测量系统主要由工业相机 (CMOS, 5 120×5 120, 像元尺寸 4.5 μm), 显微模组 (放

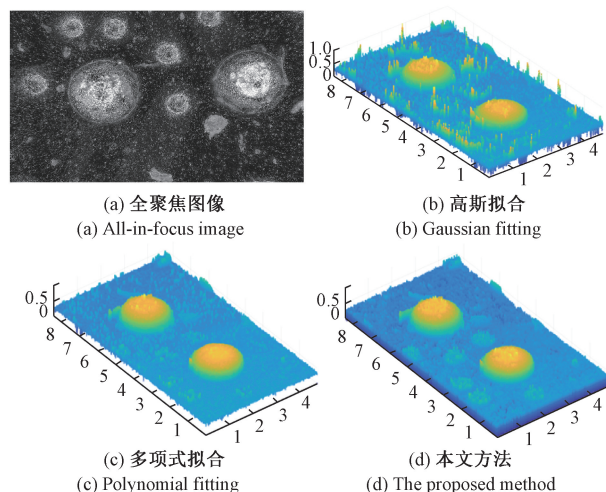


图 7 球栅阵列封装三维形貌还原结果

Fig. 7 3D morphology reconstruction results of solder ball of BGA

大倍率 5 $\times$, 景深 14 μm), 直线电机运动平台 (重复定位精度 < 0.1 μm), 穹顶光源、图形工作站及自主研发的测量软件构成。首先, 验证了系统的测量精度, 对标准金属深槽量块 (槽深 1.22 mm) 进行了深度的测量, 测量精度 < 1 μm 。

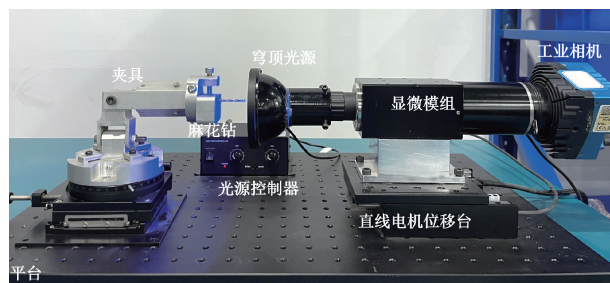
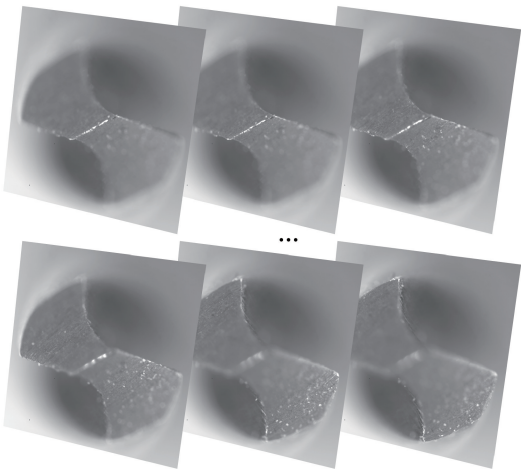


图 8 基于聚焦深度法的三维测量实验平台

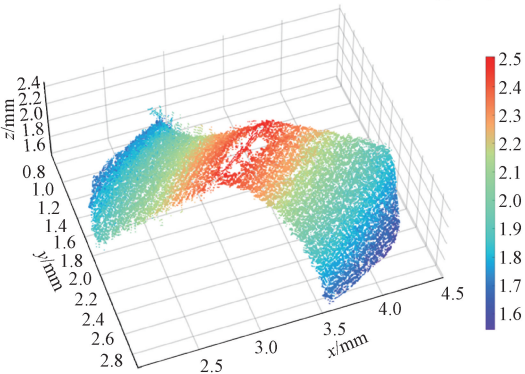
Fig. 8 Experimental platform for 3D measurement based on shape from focus

通过上述系统以步进距离 10 μm 采集了 207 张麻花钻钻头的序列图像, 基于 TENV 聚焦评价函数分别采用高斯拟合、多项式拟合、和本文方法对采集的图像进行了麻花钻的三维形貌的还原, 结果如图 9 所示。同时为了验证结果的准确性, 本文采用了高精度的商用共焦显微仪器 (InfiniteFocusG5, Alicona, 奥地利, 垂直分辨率为 410 nm, 长度和角度测量精度分别为 1 μm , 0.15°, 数据标准参照 ISO 10360-8) 在 10 $\times$ 放大倍率下对同一麻花钻进行了测量, 所获得的三维点云数据作为参考以评估本文方法的测量误差。

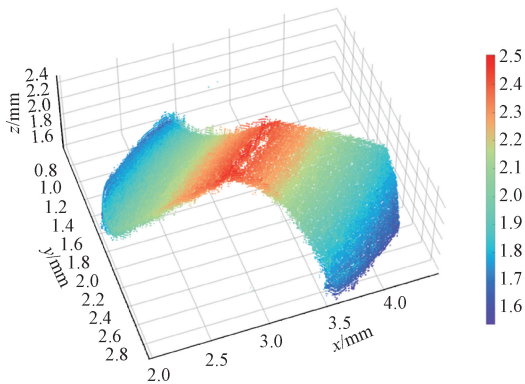
图 9(a) 为麻花钻端面的序列图像, 可以看出, 由于表面形貌坡度变化大, 即使是在穹顶光源均匀照明的



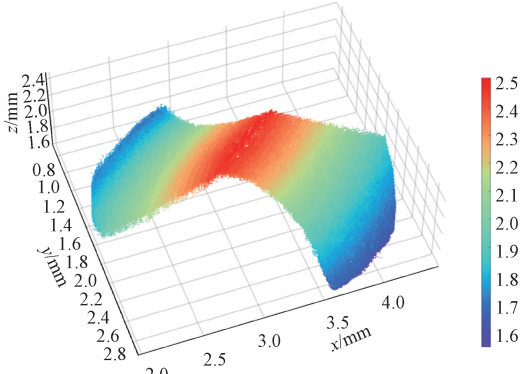
(a) 麻花钻头端面序列图像
(a) Image sequence of the drill bits



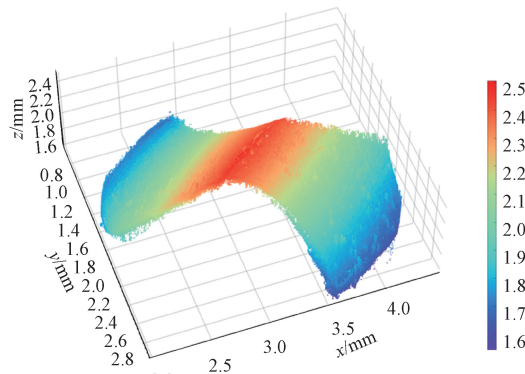
(b) 全分辨率、采样下高斯拟合
(b) Gaussian fitting with full resolution and sampling numbers



(c) 全分辨率、采样下多项式拟合
(c) Polynomial fitting with full resolution and sampling numbers



(d) 全分辨率、采样下本文方法
(d) Proposed method with full resolution and sampling numbers



(e) 50%横向分辨、采样下本文方法
(e) Proposed method with 50 % resolution and sampling numbers

图9 麻花钻三维形貌测量

Fig. 9 Three-dimensional morphology measurement results of the drill bits

情况下,刀刃处仍存在着局部过曝,造成聚焦难以准确的评价,传统的拟合和后处理方法导致了还原的三维云点在刀刃处存在漏洞和较大的噪声。图9(b)、(c)分别为全分辨率和采样下基于高斯拟合和多项式拟合的三维还原结果,图9(d)为本文所提出的方法的三维还原结果,对比可以看出,基于双拟合方法获得的三维形貌更为完

整,且由于图像局部高光导致的三维点云信息的缺失得到了完整的还原。基于本文方法,以50%的图像横向分辨率和采样的数目进行三维形貌还原得到如图9(e)所示结果,尽管分辨率和采样数目减少,所获取的三维点云质量仍能满足测量需求。本文以点云密度和均方根误差(root mean squared error, RMSE)的评价指标对测量结果

进行量化,如表 1 所示。结果表明,本文提出的方法在图像序列数目和图像分辨率降低 50% 的情况下, RMSE 相较于高斯拟合和多项式拟合仍有效降低了 77.8%、62.6%。

表 1 麻花钻三维形貌测量结果对比

Table 1 Comparison of three-dimensional shape measurement results of twist drill

评价指标	点云密度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	RMSE/ μm
高斯拟合	3 092	5.683
多项式拟合	14 198	3.371
双拟合	57 167	1.078
50% 横向分辨、采样下本文方法	55 083	1.261

3 结 论

针对被测物表面形貌复杂、采样抖动等对基于聚焦深度法三维形貌测量失真、失准的难题,本文提出了一种基于双拟合后处理方法的聚焦深度三维形貌测量方法,进一步虑及横向深度连续性,对初始点云信息进行三次多项式二次插值自适应中值滤波去噪以获得高质量点云。首先对仿真生成的图像序列进行三维还原,结果表明,本文方法能够有效的抑制图像噪声,三维还原的 RMSE 指标较高斯拟合、多项式拟合分别降低了 19.08%、17.32%,其次对 BGA 焊球数据集进行三维还原实验,结果表明所述方法在图像噪声干扰较大的区域仍具分辨能力。最后,构建了测量系统对麻花钻进行三维测量,测量结果表明本文方法在图像序列数目和图像分辨率降低 50% 的情况下, RMSE 相较于高斯拟合和多项式拟合分别降低了 77.8%、62.6%,充分说明了该方法兼具测量效率与精度,适用范围更广,在工业三维形貌测量领域极具应用潜力。

参考文献

[1] HOU L, ZOU J H, ZHANG W, et al. An improved shape from focus method for measurement of three-dimensional features of fuel nozzles[J]. Sensors, 2023, 23(1): 265.

[2] TANG J J, QIU Z J, LI T Y. A novel measurement method and application for grinding wheel surface topography based on shape from focus[J]. Measurement, 2019, 133: 495-507.

[3] XIE Q, LONG K, LU D N, et al. Integrated circuit gold wire bonding measurement via 3-D point cloud deep learning[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11807-11815.

[4] 王玥颖, 刘旭, 郝翔. 三维表面形貌测量中的共聚焦显微成像技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(8): 137-148.

WANG Y Y, LIU X, HAO X. Advances of confocal microscopy in three-dimensional surface topography measurement[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(8): 137-148.

[5] SUN J H, ZHANG Y, CHENG X Q. A high precision 3D reconstruction method for bend tube axis based on binocular stereo vision [J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2292-2304.

[6] SCHLARP J, CSENCICS E, SCHITTER G. Optical scanning of a laser triangulation sensor for 3-D imaging[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3606-3613.

[7] 刘今越, 刘佳斌, 贾晓辉, 等. 基于面结构光投影法的刀具几何参数测量研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1276-1284.

LIU J Y, LIU J B, JIA X H, et al. Research on tool geometry parameter measurement based on surface structured light projection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1276-1284.

[8] 郑小钰, 董祉序, 杨赫然, 等. 基于结构光测量技术的 DMD 自适应掩膜生成[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 148-155.

ZHENG X Y, DONG ZH X, YANG H R, et al. DMD adaptive mask generation based on structured light measurement technology [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (7): 148-155.

[9] JU Y K, PENG Y X, JIAN M W, et al. Learning conditional photometric stereo with high-resolution features[J]. Computational Visual Media, 2022, 8(1): 105-118.

[10] 任婧荣, 傅相达, 王孟瑞, 等. 快速宽场三维显微技术研究进展[J]. 中国激光, 2023, 50(3): 55-70.

REN J R, FU X D, WANG M R, et al. Advances in rapid three-dimensional wide field microscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(3): 55-70.

[11] DING H, LIU Y C, LIU J C. Volumetric tooth wear measurement of scraper conveyor sprocket using shape from focus-based method[J]. Applied Sciences, 2019, 9(6): 1084.

[12] SANTOSO T, SYAM W P, DARUKUMALLI S, et al.

On-machine focus variation measurement for micro-scale hybrid surface texture machining [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109(9-12): 2353-2364.

- [13] SANTOSO T, SYAM W P, DARUKUMALLI S, et al. Development of a compact focus variation microscopy sensor for on-machine surface topography measurement[J]. Measurement, 2022, 187: 110311.
- [14] YE R F, JIANG X Q, BLUNT L, et al. The application of 3D-motif analysis to characterize diamond grinding wheel topography[J]. Measurement, 2016, 77: 73-79.
- [15] QU Y, HU Y, ZHANG P. Nonmechanical and multiview 3D measurement microscope for workpiece with large slope and complex geometry[J]. Journal of Microscopy, 2018, 272(2): 123-135.
- [16] 袁涛, 易定容, 蒋威, 等. 基于双模糊的显微图像聚焦评价方法[J]. 光学学报, 2023, 43(10): 63-72.
YUAN T, YI D R, JIANG W, et al. Double blur micro-images focusing evaluation method [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(10): 63-72.
- [17] 张沛东, 刘巍, 王文琪, 等. 基于聚焦深度法的刀具几何参数三维测量方法[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 252-261.
ZHANG P D, LIU W, WANG W Q, et al. Three-dimensional measurement of geometrical parameters of cutting tools based on depth from focus method [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(4): 252-261.
- [18] 张明, 丁华, 刘建成. 贝塞尔曲线插值下的聚焦形貌恢复[J]. 机械设计与制造, 2018(9): 175-177, 181.
ZHANG M, DING H, LIU J CH. Shapes from focus based on Bezier curve interpolation [J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(9): 175-177, 181.
- [19] JANG H S, MUHAMMAD M S, CHOI T S. Optimizing image focus for shape from focus through locally weighted non-parametric regression[J]. IEEE Access, 2019(7): 74393-74400.
- [20] FU B Y, HE R Z, YUAN Y L, et al. Shape from focus using gradient of focus measure curve[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 160: 107320.

作者简介



王文琪, 分别于 2016 年和 2019 年于华侨大学获得学士学位和硕士学位, 现为大连理工大学博士研究生, 主要研究方向为复杂工业场景下的三维视觉成像与复杂形貌工件几何参数精密测量。

E-mail: wqwang19@mail.dlut.edu.cn

Wang Wenqi received her B.Sc. degree and M.Sc. degree both from Huaqiao University in 2016 and 2019, respectively. Now she is a Ph.D. candidate at Dalian University of Technology. Her main research interests include 3D machine vision for industrial environment and precision measurement of geometrical parameters of workpieces with complex structures.



刘巍, 2007 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为复杂环境下几何量与物理量的精密测控技术, 主要聚焦于复杂环境下几何量视觉测量、多维时变力载荷测量、精密加工过程中测试与数据处理等方面的工作。

E-mail: lw2007@dlut.edu.cn

Liu Wei received his Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 2007. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Dalian University of Technology. His main research interests include precise measurement control technology of geometric and physical quantities in complex environment, mainly focusing on visual measurement of geometric quantities in complex environments, measurement of multi-dimensional time-varying force loads, and testing and data processing in precision machining processes.



张洋 (通信作者), 2018 年于大连理工大学获得博士学位, 现为大连理工大学副教授, 博士生导师, 主要研究方向为研究方向为大尺寸几何量精密测量、智能检测与智能制造、多传感器融合测量。

E-mail: zy2018@dlut.edu.cn

Zhang Yang (Corresponding author) received her Ph.D. degree from Dalian University of Technology in 2018. Now she is an associate professor and a Ph.D. advisor at Dalian University of Technology. Her main research interests include precision measurement of large size geometric quantities, intelligent inspection and intelligent manufacturing, multi-sensor fusion measurement.