

基于聚焦深度法的刀具几何参数三维测量方法

张沛东, 刘 巍, 王文琪, 司立坤, 张 洋*, 周孟德

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 刀具几何参数的精确测量是评估刀具性能的关键。针对复杂刀具几何参数难以测量的问题, 基于聚焦深度法对其端面几何参数进行三维测量。首先, 提出了一种适用于刀具端面序列图像的改进双阈值 Tenengrad 聚焦评价函数, 通过局部像素分析确定了函数最佳计算窗口大小, 在清晰度比率、陡峭度、清晰变化率、局部波动量评价指标下与常用聚焦函数进行了对比, 验证了所提函数在计算刀具端面序列图像时更具有优势; 其次, 通过自适应 sigmoid 函数的图像增强算法实现了高对比度的刀具端面序列图像的获取, 提升了三维测量效率, 基于 RANSCA 算法对刀具后刀面点云表面进行平面拟合并提出了端面几何参数向量计算方法; 最后, 通过所构建的刀具测量系统对标准量块的阶梯深度进行了测量, 误差为 0.32%, 并实现了刀具后刀面的三维形貌还原, 进一步对主切削刃内、外刃顶角和直径参数进行测量。实验结果表明: 顶角测量误差 $<0.3^\circ$, 直径测量误差 $<3\ \mu\text{m}$, 优于 Tenengrad 函数对应角度 $(<1.9^\circ)$ 及直径 $(<13\ \mu\text{m})$ 测量结果, 满足复杂刀具对角度 $(<0.5^\circ)$ 和直径 $(<10\ \mu\text{m})$ 的测量精度要求。

关键词: 聚焦深度法; 聚焦评价函数; 三维形貌还原; 刀具几何参数测量

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220686

0 引言

在航空航天等工业领域, 复杂刀具在复合材料和金属零构件加工制造过程中有着广泛的应用^[1], 而刀具的使用性能是制约加工精度、质量和效率的关键, 因此需要选择高精度刀具几何参数的测量方法以保证刀具性能。目前, 基于视觉测量原理的刀具参数测量方法由于具有非接触、智能化、高精度等优势^[2], 已经逐步成为刀具参数的主流测量方法。

根据刀具不同几何参数的测量需求, 测量方法主要可以分为二维投影测量方法和三维测量方法。其中, 二维投影测量方法主要通过相机采集单张图像, 针对几何参数特征进行图像处理算法改进以提升测量精度, 但能够测量的参数特征较为简单且具有局限性。为了测量更为复杂的特征参数, 需要使用三维测量方法, 主要可以分为结构光三维还原^[3]、边缘轮廓法^[4]、彩色共聚焦^[5]、低相干光干涉^[6]以及聚焦深度

法^[7]等。其中, Ladislav^[8]等使用三维结构光扫描仪 GOM ATOS II 还原了具有简单形状的刀具表面形貌, 对刀具磨损进行了测量。Zhang^[9]等使用单一相机获取截面上刀具的轮廓, 建立刀具轮廓生成函数, 进一步通过旋转关系确定三维形貌。但对于不规则曲面较多的钻削刀具, 该方法只能获取部分直径尺寸参数, 难以满足测量需求。

在刀具三维测量方法中, 聚焦深度法^[10]测量精度高、速度快且成本低, 其中聚焦评价函数是影响其测量精度的关键。随着聚焦深度法的发展, 常用的聚焦评价函数 SML、Tenengrad、DCT 函数^[11]等难以满足不同的测量需求, 因此专家学者开展了聚焦函数原理上的改进和融合研究。一类改进方式为增加图像高频信息利用率提升函数灵敏度, 张艳超^[12]等使用基于改进的 SUSAN 边缘检测算法的聚焦函数计算灰度梯度信息。刘斌^[13]等在局域方差信息熵的基础上, 提出

收稿日期: 2022-12-10; 修订日期: 2023-01-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0703304); 国家自然科学基金 (92148301, 52125504); 中国博士后基金 (2022M710591, 2021TQ0056)

作者简介: 张沛东, 男, 硕士生, 主要从事视觉测量方面的研究。

导师简介: 刘巍, 男, 教授, 博士, 主要从事多传感器融合和大数据的智能制造、复杂环境下几何量与物理量精密测控等方面的研究。

通讯作者: 张洋, 女, 副教授, 博士, 主要从事复杂工况下大尺寸几何量精密测量等方面的研究。

了一种仅计算高频方差熵的聚焦评价函数,充分利用了图像的高频信息,该类改进方式强化高频信息或提取流程,但需针对不同的图像特征进行原理上的改进。另一类改进方式则为多种常用聚焦函数原理的融合,周丽平^[14]等将提升小波变换频域算子和 Sobel-Tenengrad 时域算子融合,提升了聚焦评价函数的稳定性和准确性。郑馨^[15]等提出一种结合局部像素梯度和全局灰度方差的聚焦函数,对图像整体进行分区,在不同的子图中使用不同的评价原则进行计算,该类改进方式通常需要较大的运算成本,不利于快速实现三维还原。

文中针对现有测量方法无法解决复杂刀具几何参数三维高精度测量的难题,提出基于聚焦深度法的刀具端面几何参数三维测量方法。由于复杂刀具边缘特征突出的同时边缘为不规则形状,以 Tenengrad 函数为基础,强化刀具表面图像边缘特征信息、筛选高频信息、抑制噪点信息,提出了一种顾及刀具边缘特征的改进聚焦评价函数,并与常用聚焦函数进行对比,验证了所提聚焦函数的有效性。接着使用基于自适应 sigmoid 函数的直方图均衡算法得到高对比度刀具表面序列图像,实现了刀具后刀面三维形貌还原。随后使用随机抽样一致性 (RANSAC) 算法进行平面拟合,并提出了基于向量计算的参数测量方法。自主构建了刀具几何参数三维测量的原理样机,通过标准台阶样块验证了系统的精度,进一步地对主切削刃内、外刃顶角及直径等参数进行测量,最后对参数测量的结果进行了验证与评价。

1 基于聚焦深度法的刀具端面几何参数测量方法

文中使用聚焦深度法进行刀具端面几何参数测量,如图 1 所示,刀具放置在相机、镜头及光源组成的成像系统前,即刀具轴线平行于相机轴线,根据聚焦深度法测量原理^[10],由高精度位移平台搭载成像系统利用有限景深和固定步进距离扫描采集刀具端面序列图像,移动的初始和最终位置为不包含聚焦区域的图像位置。采集多张序列图像后通过局部窗口计算每个像素在步进方向上的聚焦评价函数曲线,聚焦评价函数由图像包含特征信息作为评价原则,最终确定

曲线峰值对应图像序列位置以此获取刀具表面图像每一个像素点的深度信息。

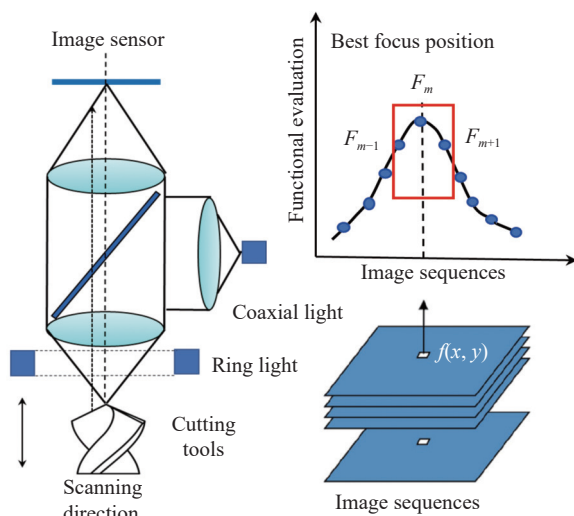


图 1 聚焦深度法测量原理

Fig.1 Measuring principle of depth from focus method

在获取待测刀具端面点云数据后,需要根据测量参数定义对还原的端面或边缘进行拟合,获取平面法向量及直线的方向向量,接着计算测量平面的法向量,最后通过计算得到的端面的法向量以及测量平面法向量计算刀具端面参数中的角度参数,尺寸参数则通过三维点云在测量平面上的投影进行测量。

2 改进的聚焦评价函数

2.1 顾及刀具边缘梯度的聚焦评价函数

根据聚焦深度法测量原理可知聚焦评价函数性能直接决定刀具几何参数的三维测量精度。

Tenengrad 函数是一种基于 Sobel 边缘梯度算子的评价函数,定义为:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$G(x, y) = \sqrt{[G_x(x, y)]^2 + [G_y(x, y)]^2} \tag{2}$$

$$F_{(x,y)} = \sum_{x-\frac{w-1}{2}}^{x+\frac{w-1}{2}} \sum_{y-\frac{w-1}{2}}^{y+\frac{w-1}{2}} [G(x,y) - \bar{G}]^2 \quad (3)$$

式中： $F_{(x,y)}$ 为每个像素点对应的聚焦函数值； G_x 、 G_y 分别为边缘水平和垂直梯度； w 为选取的区域窗口大小； \bar{G} 为该区域内 $G(x,y)$ 的平均值，该函数通过计算图像聚焦区域边缘特征信息对图像序列进行评价。

复杂刀具通常具有多个不规则曲面及平面，刃型复杂，文中测量对象为一种用于航空复材构件钻削的阶梯微齿钻头，其结构较麻花钻更为复杂，如图 2 所示，由多个后刀面、不规则型面、微齿结构以及不连续的主切削刃构成，其表面材料具有高反射率，无明显表面纹理特征，边缘特征突出等特点，直接计算得到的水平垂直梯度信息会导致边缘梯度方向信息的损失。因此基于 Tenengrad 聚焦评价函数进行如下改进，采用新的卷积核计算水平及垂直梯度：

$$G_x = \begin{bmatrix} 2\sqrt{2} & 0 & -2\sqrt{2} \\ 4 & 0 & -4 \\ 2\sqrt{2} & 0 & -2\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} 2\sqrt{2} & 4 & 2\sqrt{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ -2\sqrt{2} & -4 & -2\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

图像边缘梯度方向如图 2 所示，引入边缘梯度方向角 α 进一步计算聚焦函数值：

$$\alpha = \arctan \frac{G_x}{G_y} \quad (5)$$

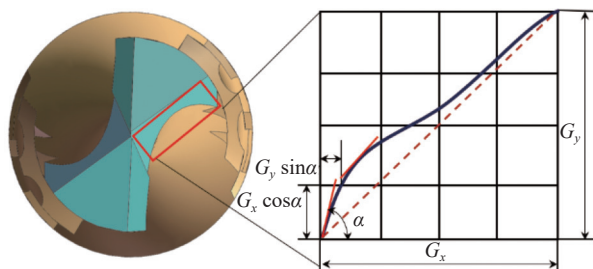


图 2 刀具边缘梯度示意图

Fig.2 Tool edge gradient diagram

根据 Tenengrad 聚焦函数定义^[11]，改进后的聚焦函数定义为：

$$G(x,y) = \sqrt{(G_x \cos \alpha)^2 + (G_y \sin \alpha)^2} \quad (6)$$

$$F_{(x,y)} = \sum_{x-\frac{w-1}{2}}^{x+\frac{w-1}{2}} \sum_{y-\frac{w-1}{2}}^{y+\frac{w-1}{2}} [G(x,y) - \bar{G}]^2 (T_2 < F_{(x,y)} < T_1) \quad (7)$$

为了提升聚焦函数的鲁棒性，计算前先对图像进行高斯滤波以去除噪声，接着通过拉普拉斯滤波增强图像边缘轮廓特征，最后引入双阈值去除噪声值：

$$\begin{cases} T_1 = \bar{T} + K\delta \\ \delta = \left(\frac{\sum_x \sum_y |G(x,y) - \bar{T}|^2}{x \cdot y} \right)^{\frac{1}{2}} \\ T_2 = T_1/2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： \bar{T} 为 $G(x,y)$ 的平均值； K 为定义的比例系数，通过多次实验计算 K 选取为 0.4； \bar{T} 反映了图像中边缘梯度的分布中心位置； δ 反映了分布的离散程度，以此可以筛选出边缘特征以内的有效计算值。改进的 Tenengrad 聚焦评价函数使用 3×3 的计算窗口对每一个像素点进行评价，以便更清晰地分辨和利用刀具表面图像序列中的边缘特征信息，通过给定阈值去除图像中受到干扰产生的噪声信息。

2.2 聚焦评价函数实验对比

为了验证改进聚焦函数的性能，文中开展了对比实验研究。采集了如图 3 所示的刀具表面序列图像，分别选取像素点横刃中点、横刃邻点以及主切削刃一点的像素进行计算分析。文中选取了常用的聚焦评价函数进行对比，分别为：MIS2(Brenner)、MIS3(Image contrast)、DCT1(DCT energy ratio)、GRA1(Gaussian derivative)、STA4(Gray-level local variance)、GRA6 (Tenengrad)^[11]，通过上述方法进行计算，结果进行归

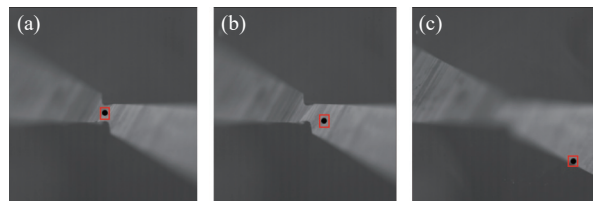


图 3 刀具表面序列图像。(a) 横刃中点；(b) 横刃邻点；(c) 主切削刃一点

Fig.3 Tool surface sequence image. (a) Midpoint of cross blade; (b) Horizontal blade field point; (c) Point of main cutting edge

一化处理。

计算得到的不同像素点对应的聚焦函数曲线如图 4(a)~(c) 所示,改进聚焦评价函数在陡峭度和单峰性上都优于其他函数,且灵敏度较高,在曲线峰值附近的斜率明显大于其他聚焦函数,计算结果变化显著

的同时波动较其他聚焦函数少。

为了更加客观评价改进聚焦评价函数,根据清晰度比率 R 、陡峭度 S 、清晰度变化率 G 、和局部波动量 N ^[15]定义计算结果,其中 R 通过归一化处理前的数据计算^[13,15]。表 1 所示为改进后的聚焦函数清晰度比率

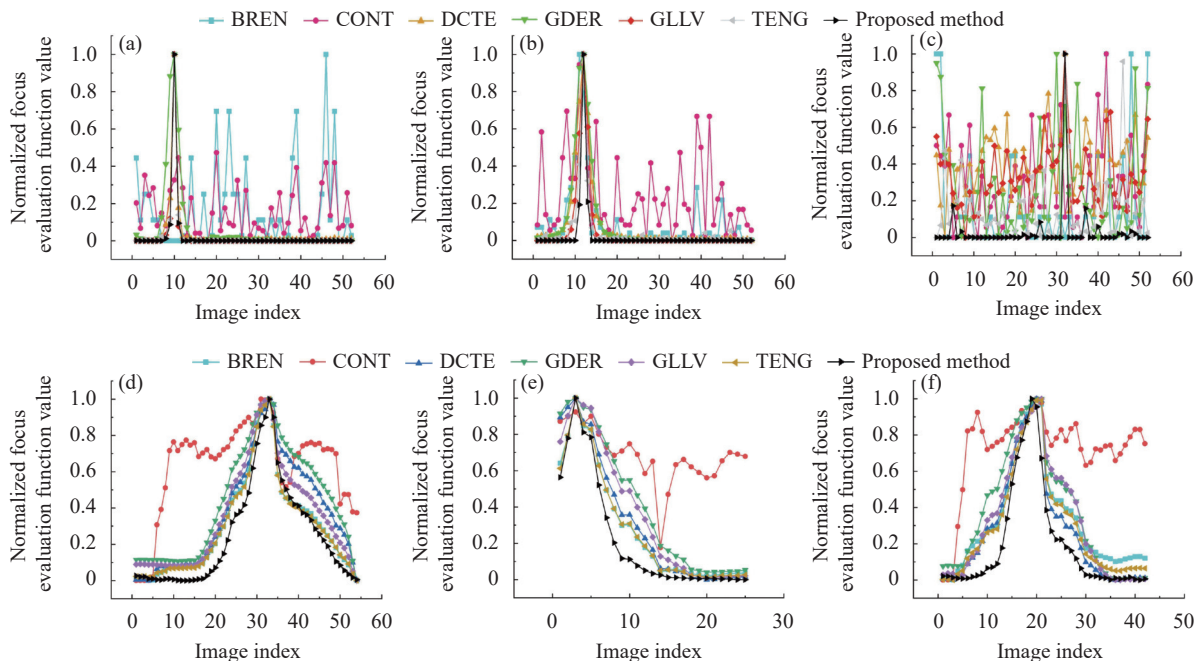


图 4 聚焦评价函数曲线。(a) 横刃中点; (b) 横刃邻点; (c) 主切削刃一点; (d) 第一组侧面序列图像; (e) 第二组侧面序列图像; (f) 第三组侧面序列图像

Fig.4 Focus evaluation function curve. (a) Transverse edge midpoint; (b) Adjacent points of the transverse edge; (c) One point of the main cutting edge; (d) The first set of side sequence images; (e) The second set of side sequence images; (f) The third set of side sequence images

表 1 不同像素点聚焦函数曲线评价指标

Tab.1 Focus function curve evaluation index of different pixel

Image pixel position	Evaluation index	Focusing evaluation function						
		MIS2 ^[11]	MIS3 ^[11]	DCT1 ^[11]	GRA1 ^[11]	STA4 ^[11]	GRA6 ^[11]	Proposed method
Chisel edge point	R	0	3.700	4.365	1.133	8.346	8.679	11.547
	S	-0.005	0.304	0.326	0.300	0.332	0.329	0.333
	G	-0.014	0.817	0.944	0.694	0.981	0.986	0.994
	N	0.820	0.196	0	0	0	0	0
Chisel edge neighboring point	R	0.538	1.059	1.341	1.079	1.737	2.452	5.202
	S	0.105	0.171	0.276	0.257	0.318	0.316	0.333
	G	0.295	0.792	0.607	0.506	0.823	0.913	0.999
	N	0.275	0.402	0	0	0	0	0
Point of cutting edge	R	0	0.154	1.802	2.011	1.979	40.333	2499.611
	S	0	0.009	0.204	0.037	0.235	0.319	0.333
	G	0	0	0.759	0.057	0.694	0.909	0.999
	N	0.778	0.472	0.298	0.714	0.229	0.756	0.172

R 明显高于其余算法、陡峭度 S 与清晰度变化率 G 表现优于其余算法,波动量 N 整体低于其余算法。按照上述指标顺序,改进聚焦函数各指标结果分别高出改进前 Tenengrad 聚焦函数 2082.9%、5.4%、6.7%、25.7%。

进一步从整体图像进行计算,除刀具端面序列图像外,以相同步进距离分别采集刀具轴向不同位置处侧面图像序列,计算的部分位置处聚焦评价函数曲线对比结果如图 4(d)~(f) 所示。改进后的聚焦函数曲线在保证无偏性的情况下陡峭度等指标评价结果仍具有优势。因此,通过以上分析对比,改进的聚焦函数更适用于评价刀具表面序列图像的聚焦性。

3 刀具端面几何参数三维测量方法

3.1 刀具后刀面三维还原方法

文中选取具有代表性的端面几何参数主切削刃内外刃顶角及直径进行测量。使用改进聚焦函数的聚焦深度法测量刀具后刀面。由于刀具几何结构复杂以及表面材质反射率高,使用同轴光照明会导致无法完整提取景深范围内的聚焦区域信息。

利用基于自适应 sigmoid 函数的直方图均衡图像增强算法对初步采集到的刀具后刀面序列图像进行图像增强。sigmoid 函数是一种平滑的单增映射函数,使用 sigmoid 函数代替灰度直方图的累积分布函数可以得到具有高对比度的刀具表面特征序列图像,在显微镜头景深为 $14\ \mu\text{m}$ 的条件下,选取刀具横刃聚焦图像对其进行聚焦区域测量,与增强前的刀具后刀面图像进行对比,增强后的边缘提取结果更为密集,即边缘更易识别,增强前提取的图像聚焦区域最大距离范围为 $9.6\ \mu\text{m}$,增强后最大距离范围为 $26.3\ \mu\text{m}$ 。相同硬件条件下,使用图像增强算法用以提升三维测量效率。

深度计算选用公式:

$$\begin{cases} \bar{d} = d_m + \frac{\log(F_{m-1}) - \log(F_{m+1})}{2\log(F_{m-1}) - 4\log(F_m) + 2\log(F_{m+1})} \\ \text{depth} = \bar{d}\Delta d \end{cases} \quad (9)$$

式中: d_m 为聚焦函数峰值对应的图像序列值; F_{m-1} , F_m , F_{m+1} 分别为 d_{m-1} , d_m , d_{m+1} 对应的聚焦函数值; Δd 为采集图像时相机的步进距离。最终刀具三维还原的流程如图 5 所示。

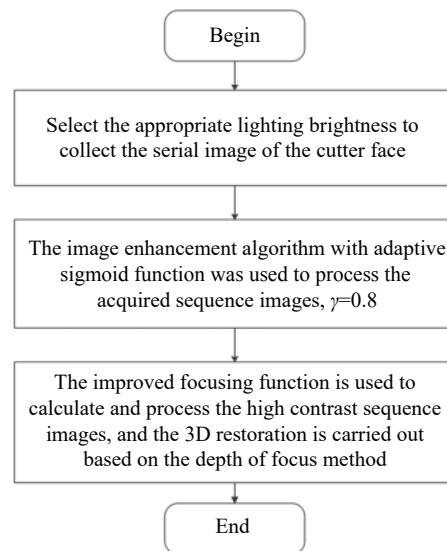


图 5 刀具后刀面三维还原流程图

Fig.5 Flow chart of 3D reduction of tool back surface

3.2 主切削内外刃顶角及直径向量计算方法

计算得到刀具后刀面表面三维点云后,以图像坐标系原点作为三维坐标系原点,图像平面为 xoy 平面,刀具轴线方向为 z 轴方向,基于 RANSAC 算法^[16]分别对主切削内刃所在平面以及外刃所在平面进行拟合,得到其法向量分别为 \vec{n}_1, \vec{n}_2 。根据定义主切削刃顶角为主切削刃投影在中剖面内投影的夹角,而中剖面为过钻头轴线,并与两主切削刃相平行的轴向剖面,因此当轴线向量为 \vec{n}_o 时,内外刃中剖面的法线向量分别为 $\vec{n}_r = \vec{n}_1 \times \vec{n}_o, \vec{n}_w = \vec{n}_2 \times \vec{n}_o$,以计算内刃顶角及直径为例,如图 6 所示。

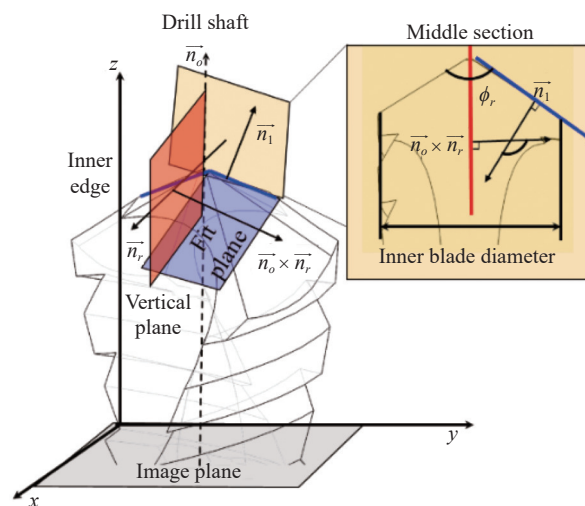


图 6 参数计算向量示意图

Fig.6 Schematic diagram of parameter calculation vector

则顶角 ϕ_r, ϕ_w 计算公式为:

$$\begin{cases} \phi_r = 2 \left(180^\circ - \arccos \frac{(\vec{n}_r \times \vec{n}_o) \cdot \vec{n}_1}{\|\vec{n}_r \times \vec{n}_o\| \cdot \|\vec{n}_1\|} \right) \\ \phi_w = 2 \left(180^\circ - \arccos \frac{(\vec{n}_w \times \vec{n}_o) \cdot \vec{n}_2}{\|\vec{n}_w \times \vec{n}_o\| \cdot \|\vec{n}_2\|} \right) \end{cases} \quad (10)$$

进一步通过后刀面三维点云在中剖面上的投影测量测量内外刃直径 d_r, d_w 。

4 实验验证

如图 7 所示, 搭建刀具几何参数测量实验系统测量刀具主切削刃内、外刃顶角 ϕ_r, ϕ_w 及直径 d_r, d_w 。实验平台主要选用直线电机的位移平台, 其重复定位精度为 $\pm 1 \mu\text{m}$ 、工业相机、显微镜镜头模组和环形光源。实验中所用设备参数如表 2 所示。

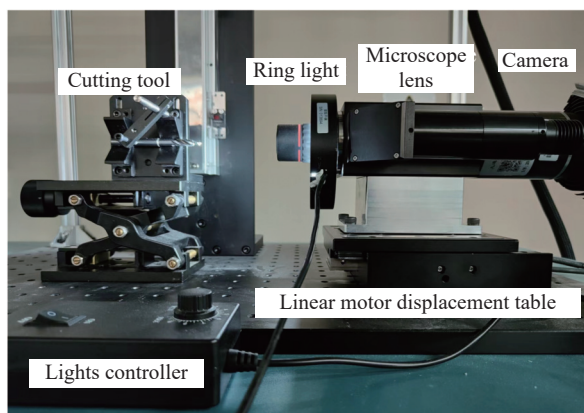


图 7 刀具几何参数测量系统

Fig.7 Tool geometry parameter measurement system

表 2 实验设备参数

Tab.2 Experimental equipment parameter

Equipment	Parameter	Value
Linear motor displacement table	Travel range/mm	60
	Grating resolution/ μm	0.1
CMOS camera	Image size/ μm	4.5×4.5
	Pixel size	5 120×5 120
Microscopic lens	DOF/ μm	14
	Magnification	5
Ring light	Angle/(°)	90

4.1 深度还原精度实验验证

测量参数前首先对深度还原精度进行验证, 由标

准量块搭建阶梯测试件, 阶梯深度为 1.25 mm, 以 $10 \mu\text{m}$ 的步进距离采集序列图像, 见图 8(a), 得到三维点云见图 8(b), 选取直线 1 对应的部分点云深度, 见图 8(c), 计算得到的平均阶梯深度为 1.246 mm, 测量误差为 0.32%。

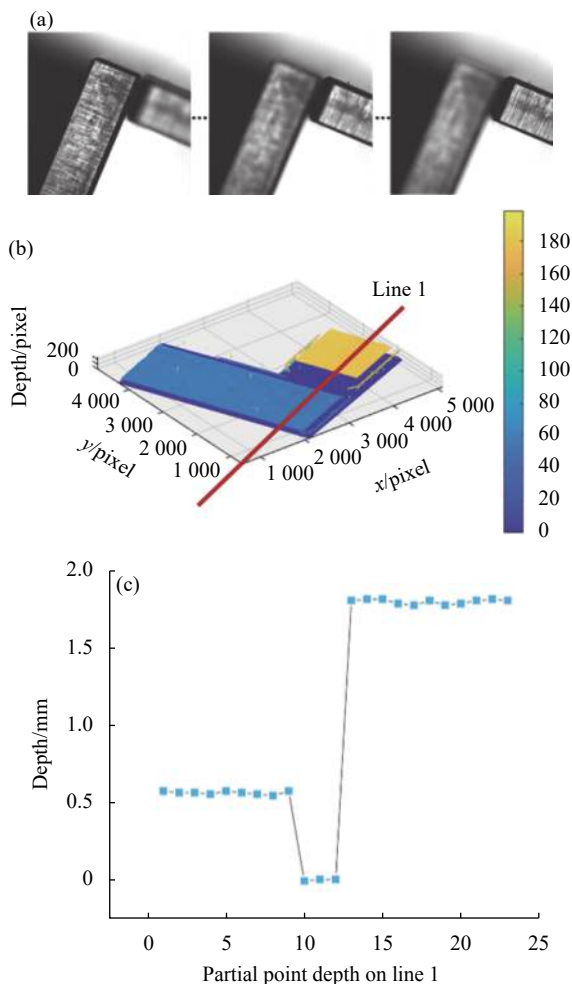


图 8 (a) 阶梯序列图像; (b) 阶梯三维点云图; (c) 直线 1 对应的部分点云深度

Fig.8 (a) Step sequence image; (b) Ladder 3D point cloud; (c) Partial point depth on line 1

4.2 内外刃顶角及直径测量实验验证

按照图 5 流程选取型号为 GBAA-0624-020 的阶梯微齿钻进行测量, 基于上述方法和系统, 分别使用 Tenengrad 聚焦函数与改进后的聚焦函数计算后刀面三维点云。如图 9 所示, 相比改进前的聚焦函数, 使用改进后的聚焦函数得到的三维还原结果点云噪声显著下降。

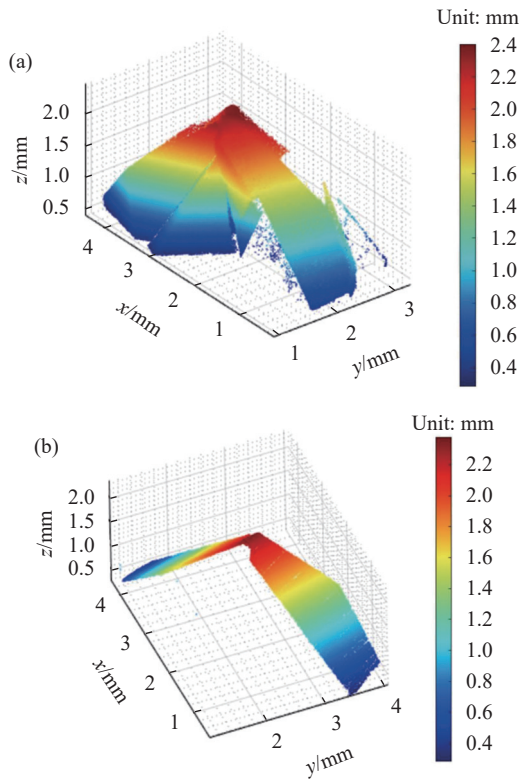


图 9 刀具后刀面三维点云。(a) 基于 Tenengrad 函数计算结果；(b) 改进的双阈值 Tenengrad 函数计算结果

Fig.9 3D point cloud of tool flank. (a) Calculation results based on Tenengrad; (b) Calculation results based on improved double threshold Tenengrad

图 9(a) 基于 Tenengrad 函数计算得到的点云, 由于后刀面三维形貌周围存在大量噪点, 因此需要多次降采样以及滤波处理。而图 9(b) 所示基于改进后的函数计算的三维点云数据仅需一次去噪处理获取待测数据。基于 RANSCA 算法对其进行平面拟合^[16], 其中改进前对应计算得到的内、外刃拟合平面法向量为:

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 &= (0.172, 0.640, 0.979) \\ \vec{n}_2 &= (0.158, 0.754, 0.710) \end{aligned}$$

改进后点云得到的内、外刃拟合平面法向量为:

$$\begin{aligned} \vec{n}_1 &= (0.152, 0.670, 0.979) \\ \vec{n}_2 &= (0.159, 0.777, 0.723) \end{aligned}$$

使用两种聚焦评价函数还原结果求解待测参数后, 进一步使用高精度显微测量仪器 (InfiniteFocus G5, Alicona, 奥地利) 进行验证, 其垂直分辨率为 410 nm, 距离和角度测量精度分别为 1 μm, 0.15°(数据标准参照 ISO 10360-8)。同时与商业化的刀具测量设

备测量结果进行对比。结果如表 3 所示, 与改进前测量结果 (角度误差 < 1.9°, 直径误差 < 13 μm) 相比, 改进后测量结果 (角度测量误差 < 0.3°, 直径测量误差 < 3 μm) 精度分别提升 84.21%、76.92%, 且优于商业化的刀具测量设备测量结果 (角度误差 < 0.5°, 直径误差 < 7 μm)。

表 3 参数测量结果

Tab.3 Measurement results of parameters

Methods	Angle/(°)		Diameter/mm	
	ϕ_r	ϕ_w	d_r	d_w
This paper	111.97	85.33	2.786	6.242
Tenengrad	109.87	84.73	2.774	6.234
Commercial equipment	109.6	84.4	2.78	6.24
Measuring instrument	110.08	84.86	2.772	6.236
Error	T	1.89	0.47	0.012
	O	0.21	0.13	0.002
	C	0.48	0.46	0.006

5 结 论

针对复杂刀具几何参数难以实现高精度测量的难题, 经过研究得出以下结果:

(1) 提出了一种改进的双阈值 Tenengrad 聚焦评价函数, 理论分析和实验结果表明, 更适用于刀具表面序列图像深度计算, 且基于 sigmoid 函数图像增强算法进一步提升了序列图像对比度, 有效提升了聚焦深度计算的效率和准确性。

(2) 构建了刀具几何参数三维测量的原理样机, 并通过标准样块的台阶深度验证了系统的深度方向的测量精度为 0.32%。

(3) 通过上述方法及系统, 实现了刀具表面形貌的高质量还原, 提出了基于向量计算的刀具几何参数测量方法, 实现了刀具主切削刃内外刃顶角及直径的测量, 测量结果表明, 角度参数的测量误差 < 0.3°, 直径参数的测量误差 < 3 μm, 满足复杂刀具几何量的测量精度要求, 有效的保障了刀具的使用性能。

参考文献:

[1] Odedeyi P B, Abou-El-Hossein K. Effect of tool geometry and turning parameters on cutting force during ultra-precision

- diamond machining of rapidly solidified aluminum (RSA) Alloy 6061 [J]. *Materials Science Forum*, 2022, 1059: 21-25.
- [2] Zhou J J, Yu J B. Chisel edge wear measurement of high-speed steel twist drills based on machine vision [J]. *Computers in Industry*, 2021, 128(5-8): 103436.
- [3] Liu Xiaoli, He Dong, Chen Hailong, et al. Techniques of structured light measurement network with 3D sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0303007. (in Chinese)
- [4] Li Zhenyu, Cui Changcai, Huang Hui, et al. Measurement and evaluation of full circumferential three-dimensional surface topography of diamond wire saw based on contour method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 107-115. (in Chinese)
- [5] Zhang Yali, Yu Qing, Cheng Fang, et al. Research on 3D reduction algorithm for parallel chromatic confocal measurement system based on regionprops function [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(1): 45-55. (in Chinese)
- [6] Lu Dongxiao, Fang Wenhui, Li Yuyao, et al. Optical coherence tomography: principles and recent developments [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 919-935. (in Chinese)
- [7] Zuo Chao, Chen Qian. Computational optical imaging: An overview [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(2): 20220110. (in Chinese)
- [8] Morovič L, Vagovský J, Buranský I. Shape investigation of worn cutting inserts with utilization of active triangulation[C]// *Key Engineering Materials*, 2014, 581: 22-25.
- [9] Zhang X, Tsang W M, Mori M, et al. Automatic 3D model reconstruction of cutting tools from a single camera [J]. *Computers in Industry*, 2010, 61(7): 711-726.
- [10] Yuan L, Guo T, Qiu Z, et al. Measurement of geometrical parameters of cutting tool based on focus variation technology [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5): 2383-2391.
- [11] Pertuz S, Puig D, Garcia M A. Analysis of focus measure operators for shape-from-focus [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(5): 1415-1432.
- [12] Zhang Yanchao, Zhao Jian, Han Xizhen, et al. Application of SUSAN definition evaluation function in auto-focusing [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 240-244. (in Chinese)
- [13] Liu Bin, Qiao Qian, Zhao Jing, et al. 3D profile measurement based on depth from focus method using high-frequency component variance weighted entropy image sharpness evaluation function [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200326. (in Chinese)
- [14] Zhou Liping, Sun Zhijun, Zhang Quan. Auto-focusing and control of micro-vision system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(3): 807-812. (in Chinese)
- [15] Zheng Xin, Ai Liefu, Liu Kui, et al. Auto-focusing function for microscopic images based on global and local gray-scale variation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(8): 081801. (in Chinese)
- [16] Zhang Nan, Sun Jianfeng, Jiang Peng, et al. Pose estimation algorithms for lidar scene based on point normal vector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(1): 0105004. (in Chinese)

Three-dimensional measurement of geometrical parameters of cutting tools based on depth from focus method

Zhang Peidong, Liu Wei, Wang Wenqi, Si Likun, Zhang Yang*, Zhou Mengde

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

Abstract:

Objective Cutting occupies a dominant position in mechanical manufacturing, which is the key factor in the development of aerospace, automotive, and electronic industries and other fields. As one of the most important terminals in manufacturing, cutting tool plays an outsized role in removal machining. It is proved that the geometrical parameters have a significant influence on the quality of the workpiece, the efficiency of cutting and the tool life. Given the importance of tool geometry parameters, it is essential to measure these parameters precisely before and during manufacturing. With the increasing requirements of different materials to process, the

structures of the cutting tools used to machine become more complex than traditional cutting tools which brings a challenge for the precision measurement. Compared with the common method based on feature images and structured light sensors, the measurement method based on depth from focus presents the advantages of high precision and plenty of data. Hence, a geometry measurement method of cutting tools based on the depth from focus is proposed and the key technique is discussed.

Methods Firstly, to solve the problem that the existing focusing function is not suitable for the sequence images of the measured cutting tools and improve the accuracy of the 3D reduction, an improved focus evaluation function based on the double-threshold Tenengrad function is proposed. Due to the surface irregularities of complex tools, the cutting edge is interrupted, resulting in sharp and diverse edge properties. In order to boost the gray gradient and calculate the edge information that the original convolution operator ignored, the function is improved by adjusting the convolution operator and expanding the direction angle of the edge gradient. Moreover, noise information is taken down using an image preprocessing algorithm and a double threshold constraint to generate a high-quality 3D point cloud. Specifically, Gaussian filtering and the Laplacian image enhancement algorithm are applied to remove the image's natural noise while maintaining all of the image's feature information. The threshold determined by the average value and dispersion degree of the gray gradient is then used to reduce noise from the 3D point cloud. After determining the improved function, the properties of no obvious texture on the tool surface serve to establish the size of the computation window for the function. Secondly, the 3D reduction method of the tool flank is optimized using the image processing algorithm, and a technique of measuring the geometric parameters of the tool flank based on vector arithmetic is proposed. To obtain high-contrast sequence images of the tool surface appropriate for calculation, an image enhancement algorithm based on the adaptive sigmoid function is used. Next, the processed sequence images of the 3D point cloud of the tool flank are produced by using the improved focusing function. Additionally, the cutting tool end face parameters defined by the space measurement plane are described and calculated using the vector angle formula and geometric relationship. Besides, it is necessary to carry out plane fitting on the 3D point cloud of the flank based on the RANSAC (Random Sample Consensus) algorithm. Finally, premised on the previous measurement method, a 3D measurement system is built. Utilizing a ladder formed from standard gauge blocks, the system's depth reduction accuracy is confirmed. Conjointly, a comparative experiment is conducted to measure the geometric parameters of the complex tool end face using a variety of measuring systems and techniques.

Results and Discussions Throughout every experiment that was done, to test the effectiveness of the improved focus evaluation function, different tool surface sequence images are collected, and focus evaluation function curves related to pixels and the whole image are computed by various focus evaluation functions. The results show that the improved focusing function curve is steeper than other function curves intuitively (Fig.4). The sharpness ratio, steepness, sharpness change rate, and local fluctuation are employed to provide a more objective assessment. It also indicates that other functions pale in comparison to the improved focus evaluation function. The average value is 2.082.9%, 5.4%, 6.7%, and 25.7% better than the Tenengrad function, respectively, according to the index order (Tab.1). Furthermore, it is proved that the depth reduction error of the built system is 0.32% (Fig.8). Eventually, the system and measurement method's data for parameter evaluation reveal that the diameter measurement error is less than 3 μm and the apex angle measurement error is less than 0.3° (Tab.3). It is superior to the Tenengrad function's measurements of the angle (less than 1.9°) and diameter (less than 13 μm). In conclusion, the 3D measurement method based on depth from focus can precisely quantify the geometrical characteristics of cutting tools.

Conclusions In this study, an improved double-threshold Tenengrad focusing evaluation function is proposed, which is more suitable for the depth calculation of tool surface sequence images. And the sigmoid function-based image enhancement algorithm is performed to enhance the contrast of sequence images, effectively improving the efficiency and accuracy of the calculation of depth. Further, a prototype of three-dimensional measurement of tool geometric parameters is constructed, and high-quality 3D morphology reconstruction of the tool surface morphology is obtained. Besides, a method for measuring tool geometric parameters based on vector calculation is proposed, and the apex angle and diameter of the tool's inner and outer edges of the main cutting edge are measured. The measured results are within the tolerances of a length measurement error of no more than 10 μm and an angle measurement error of no more than 0.5° .

Key words: depth from focus method; focus evaluation function; 3D morphology reconstruction; geometrical parameters measurement of cutting tools

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2018YFA0703304); National Natural Science Foundation of China (92148301, 52125504); China Postdoctoral Science Foundation (2022M710591, 2021TQ0056)