

基于面结构光投影法的刀具几何参数测量研究

刘今越, 刘佳斌, 贾晓辉, 王 宁, 李铁军

(河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

摘 要:先进制造技术中高效切削刀具的几何形状与几何参数是否合理直接影响刀具的使用寿命以及产品的加工质量,针对这个问题,采用面结构光投影法对高效切削刀具的几何参数进行非接触式测量,此方法不仅能够准确重建出用于其几何参数测量的刀具三维模型,还能够直观反映刀具表面有无缺陷。主要对面结构光投影法基本思想、测量系统数学模型和点云旋转拼接进行了研究,并给出了刀具转台坐标系和 CCD 摄像机成像坐标系之间的变换关系,并对直柄麻花钻进行测量实验,实际结果测量结果的比较表明面结构光投影法可有效对刀具进行测量,且测量精度较高。

关键词:面结构光投影法;刀具重建;几何参数测量;点云旋转拼接

中图分类号: TN216 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on tool geometry parameter measurement based on surface structured light projection

Liu Jinyue, Liu Jiabin, Jia Xiaohui, Wang Ning, Li Tiejun

(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: The geometry shape and parameters of high-efficiency cutting tool directly affects the tool's service life and product's quality in advanced manufacturing technology. Thus, a non-contact measurement method based on surface structured light projection is adopted for geometry parameters of high-efficiency cutting tool. This method can not only reconstruct the 3D model of the tool used for measure its geometry parameters, but also can directly detect the defects of the tool surface. This work mainly focuses on the basic ideal of surface structured light projection, mathematical model of measurement system and point cloud rotation registration. The transformation relation between tool turntable coordinate system and CCD camera imaging coordinate system is built. Meanwhile, the measure experiments on was carried out, the experimental results on straight shank twist drill show that the surface structured light projection is effective and precise in the tool measurement.

Keywords: surface structured light projection; tool reconstruction; geometry parameter measurement; point cloud rotation registration

1 引 言

当今社会,制造业得到了迅猛发展,而制造业水平的高低决定着国家综合实力的大小,制造业中最最重要的技术则是先进制造技术,它的出现为制造业的不断发展提供了新的前进动力,而高效切削刀具在先进制造技术中又占有越来越重要的地位,其几何形状与几何参数是否合理是刀具性能好坏的关键因素^[1]。刀具合理的

几何形状与几何参数可大幅度提高刀具的使用寿命,还可加工出同类刀具所不能加工出来的高质量产品,这对刀具的生产者和使用者来说至关重要^[2]。

接触式测量法和非接触式测量法是目前对刀具参数进行测量的两类方法。基于接触式的刀具测量法如游标卡尺、千分尺以及三坐标测量仪等,这些种测量方式操作简单,但其测量效率低、稳定性差,在测量时可能会划伤高精度刀具表面,进而影响刀具的测量精度和它对零件的加工精度^[3];基于非接触式刀具测量法的刀具测量设

备包括工具显微镜、刀具预调测量仪以及投影型光学测量仪^[4-6]等,此测量方法的优势在于对刀具的测量为非接触方式,避免了因接触而划伤高精度刀具表面的可能,但这种测量方式仅能获取刀具边缘的二维投影图像,无法反映刀具表面完整的几何形状和几何参数以及刀具表面有无缺陷,忽略了刀具表面的深度信息,具有一定的局限性^[7-8]。

当前,获取刀具表面几何形状以及深度信息的最有效的方法为结构光主动视觉测量技术,该技术的优势在于其成像系统结构紧凑,测量方式基于非接触测量,同时对深度信息提取较准确^[9]。根据投射光源形式的不同可将结构光分成点、线、面3种不同形式。与点、线这两种形式的结构光相比,面结构光具有测量速度快、精度高的特点^[10],因此本文通过面结构光投影法重建刀具的三维模型,并对其几何参数进行测量。与基于单摄像机二维投影图像的刀具几何参数测量方法相比,这种方法可提取出刀具表面的边缘信息与深度信息^[11],进而得到刀具表面完整的几何形状和几何参数,还可以直观观测刀具表面有无缺陷^[12-13]。

2 面结构光投影法基本思想和测量系统数学模型

2.1 面结构光投影法基本思想

面结构光投影法是基于线激光三角扫描原理发展而来的一种新式测量法^[14],其基本思想为首先利用计算机编制好一系列条纹光栅;然后通过投影仪将条纹光栅投射到被测物体表面(注:由于被测物体存在一定高度,其表面上的条纹光栅发生一定的变形,因此 CCD 摄像机拍摄采集到图像为条纹光栅变形后的图像);最后通过测量系统的几何关系获取被测物体表面的深度信息,并重建出刀具的三维模型。

2.2 测量系统数学模型

图1所示为面结构光投影法测量系统的数学模型示意图, omn 为 CCD 摄像机成像坐标系, $O_r-X_r Y_r Z_r$, $O_c-X_c Y_c Z_c$ 和 $O_p-X_p Y_p Z_p$ 依次为参考坐标系, CCD 摄像机坐标系和投影仪坐标系。点 O_c 和轴 $O_c Z_c$ 分别为 CCD 摄像机镜头光心和光轴,轴 $O_c X_c$ 和轴 $O_c Y_c$ 依次与 CCD 摄像机成像面的轴 om 和轴 on 平行,点 O_p 和轴 $O_p Z_p$ 分别为投影仪镜头光心和光轴,且轴 $O_p Z_p$ 和轴 $O_c Z_c$ 交参考坐标系于点 O_r , CCD 摄像机镜头光心与投影仪镜头光心的连线 $O_c O_p$ 与参考面 $O_r-X_r Y_r$ 平行, O_c 在参考面 $O_r-X_r Y_r$ 的投影为 O'_c , 投影仪投射出的条纹光栅与被测物体表面交于点 Q , 它在参考面上的投影为 Q' , 点 E 和 F 依次为 $O_p Q$ 和 $O_c Q$ 的延长线与参考面的交点, $O_c O_p = d$, $O_r O_p = l$, $QQ' = h$ 。

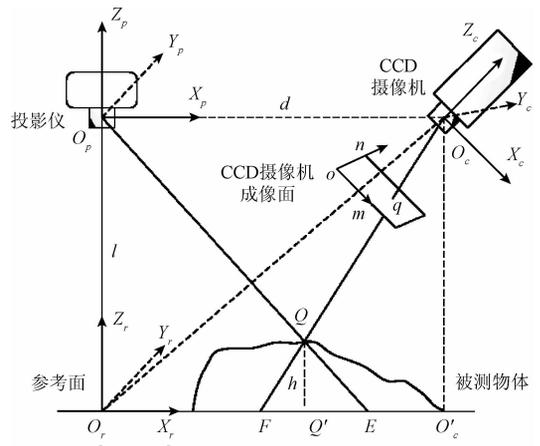


图1 测量系统数学模型示意图

Fig. 1 Mathematical model schematic diagram of measurement system

为得出 Q 点相对于参考面的垂直高度 h , 根据 $\triangle EQQ' \sim \triangle EO_p O_r$ 可知:

$$\frac{EQ'}{EO_r} = \frac{QQ'}{O_r O_p} = \frac{h}{l} \quad (1)$$

根据参考面上的相位沿轴 $O_r X_r$ 方向变化, 可将面 $O_r-X_r Y_r$ 上任一点 (X_r, Y_r) 的相位设为 θ , 有:

$$X_r = \frac{\theta - \theta_0}{2\pi} \lambda_0 \quad (2)$$

式中: θ_0 为原点 O_r 的相位, λ_0 为条纹光栅的节距。

根据 $\triangle FQQ' \sim \triangle FO_c O'_c$ 的可知:

$$\frac{FQ'}{FO'_c} = \frac{QQ'}{O_c O'_c} = \frac{h}{l} \quad (3)$$

根据式(2)可得:

$$EF = O_r E - O_r F = \frac{\lambda_0}{2\pi} (\theta_E - \theta_F) \quad (4)$$

式中: θ_E 和 θ_F 依次表示 E 和 F 点的相位值。

整理式(1)~(4), 有:

$$h = \frac{(\theta_E - \theta_F) l}{(\theta_E - \theta_F) + 2\pi d / \lambda_0} \quad (5)$$

式(5)为相位高度映射式, 由此可得点 Q 相对于参考面 $O_r-X_r Y_r$ 的垂直高度 h 。

3 刀具点云旋转拼接

在单一视角下, CCD 摄像机仅能采集被测刀具单个面的点云数据, 因此, 若要得到被测刀具的完整信息, 则需要 CCD 摄像机采集多个视角下的刀具点云数据, 采集完成后, 将各个视角下的刀具点云数据进行拼接, 并利用完整的刀具点云数据重建出刀具三维模型, 进而求出刀具表面的几何参数。

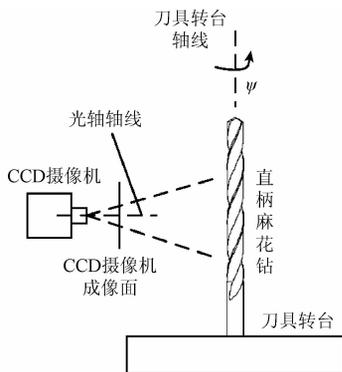
标志点拼接是对点云数据进行拼接的一种有效方法^[15],但该方法往往仅适用于对精度要求较低的大型物体,对表面几何形状复杂,且表面面积和曲率半径较小的小型刀具而言,标志点拼接法拼接精度较低,进而导致刀具的几何参数测量不准确^[16]。

鉴于上述问题,本文利用小型高精度刀具转台旋转一定的角度对刀具点云旋转拼接,这种方法不仅能够实现 CCD 摄像机在同一视角下对刀具多个面点云数据的采集,而且能够实现刀具多个面点云数据的拼接。需要指出的是,为更好地验证该方法对复杂刀具旋转拼接的有效性,因此本文使用的刀具为直柄麻花钻,它的表面较为复杂,且存在螺旋槽,曲率变化较大。

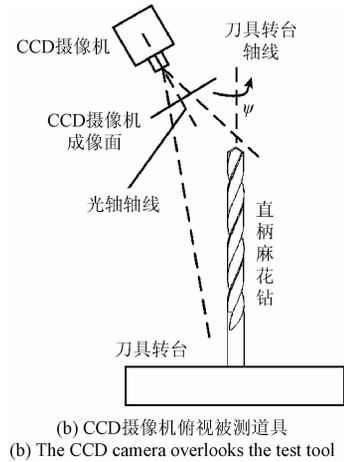
3.1 刀具转台与 CCD 摄像机方位的关系

图2所示为刀具转台与 CCD 摄像机方位的两种设置方式,在图2(a)所示的设置方式中,刀具转台轴线与 CCD 摄像机光轴轴线相互垂直,为保证采集图像的清晰度,CCD 摄像机与被测刀具之间的距离不易过大,但两者之间距离的缩短也势必会造成摄像机视野范围的狭窄,使得 CCD 摄像机仅能采集到被测刀具单个面中间区域的点云数据,未能实现刀具顶部与底部数据的采集,倘若采用图2(a)所示方式对刀具单个表面上所有部分(顶部、中部和底部3个部分)的点云数据进行采集,则需要在采集过程中将 CCD 摄像机进行上下移动,从而实现刀具单个表面所有部分点云数据的采集,该过程较为繁琐,不可避免会出现测量误差,最终影响刀具几何参数的测量精度。

为解决图2(a)中出现的问题,本文采用图2(b)所示刀具转台与 CCD 摄像机方位设置方式进行刀具点云数据的采集,该方式中 CCD 摄像机设置于刀具转台斜上方,CCD 摄像机光轴轴线与刀具转台轴线之间夹角为 30° 锐角,CCD 摄像机俯瞰刀具转台上的被测刀具,此时在 CCD 摄像机视野范围有限的状况下,能够同时采集刀具单个表面所有部分的点云数据,通过旋转刀具转台可采集其他面的点云数据,获取刀具的完整信息,最终实现刀具点云旋转拼接。



(a) CCD 摄像机平视被测道具
(a) The CCD camera looks at the test tool horizontally



(b) CCD 摄像机俯瞰被测道具
(b) The CCD camera overlooks the test tool
图2 刀具转台与 CCD 摄像机方位示意图
Fig.2 Schematic diagram of tool turntable and CCD camera positions

3.2 刀具点云旋转拼接模型的建立

利用小型高精度刀具转台实现刀具点云的旋转拼接的基本思想为:首先,CCD 摄像机采集刀具第1个面的点云数据,然后将刀具转台旋转一定的角度,CCD 摄像机采集刀具第2个面的点云数据,最后将第2个面的点云坐标转换到第1个面所用坐标系下,这样可完成刀具两个面的点云数据拼接,以此类推,采用同样的方法可实现刀具点云在各个面的拼接。在刀具点云拼接时,拼接精度的高低往往取决于刀具转台坐标系与 CCD 摄像机成像坐标系两者之间的空间变换关系的准确程度,接下来本文将对它们的空间变换关系式进行推导。

刀具转台坐标系和 CCD 摄像机成像坐标系位置关系示意图如图3所示, $O_T-X_T Y_T Z_T$ 和 $O-XYZ$ 依次表示为刀具转台坐标系和 CCD 摄像机成像坐标系,面 $O_T-X_T Y_T$ 和 $O-XY$ 依次为刀具转台平面和 CCD 摄像机成像面,轴 $O_T Z_T$ 和 OZ 分别为刀具转台中心轴和 CCD 摄像机镜头光轴。

设 $Q_{r1}(X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1})$ 为刀具转台坐标系下被测刀具表面上任一点,当刀具转台绕轴 $O_T Z_T$ 逆时针旋转 ψ ($\psi > 0$) 角度时,则 $Q'_{r1}(X'_{r1}, Y'_{r1}, Z'_{r1})$ 为点 $Q_{r1}(X_{r1}, Y_{r1}, Z_{r1})$ 旋转后的坐标,可表示为:

$$Q'_{r1} = R Q_{r1} \quad (6)$$

式中: $R = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为旋转矩阵。在刀具

转台坐标系下,式(6)为被测刀具表面上任一点由第1个位置旋转到第2个位置的空间变换关系式。

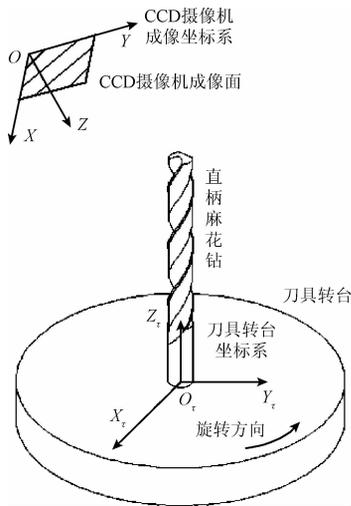


图 3 刀具转台坐标系与 CCD 摄像机成像坐标系位置关系

Fig. 3 Position relations of tool turntable coordinate system and CCD camera imaging coordinate system

设 $O_{XYZ-T}(X_t, Y_t, Z_t)$ 为刀具转台坐标系中的原点 O_t 在 CCD 摄像机成像坐标系下的坐标, 角度 α, β, γ 依次为刀具转台坐标系中的原点 O_t 绕 CCD 摄像机成像坐标系 $O-XYZ$ 中的轴 OX, OY, OZ 旋转得到的角度, 从而利用空间几何知识, 可得出刀具转台坐标系和 CCD 摄像机成像坐标系的变换矩阵 P 为:

$$P = R_x R_y R_z T_1 \quad (7)$$

式中: R_x, R_y, R_z 为旋转矩阵, T_1 为平移矩阵。

设 $Q_{XYZ-T_1}(X_{T_1}, Y_{T_1}, Z_{T_1})$ 为被测刀具表面上任一点 $Q_{T_1}(X_{T_1}, Y_{T_1}, Z_{T_1})$ 在 CCD 摄像机成像坐标系下的坐标, $Q'_{XYZ-T_1}(X'_{T_1}, Y'_{T_1}, Z'_{T_1})$ 为点 $Q'_{T_1}(X'_{T_1}, Y'_{T_1}, Z'_{T_1})$ 在 CCD 摄像机成像坐标系下的坐标, 其中 $Q'_{T_1}(X'_{T_1}, Y'_{T_1}, Z'_{T_1})$ 为点 $Q_{T_1}(X_{T_1}, Y_{T_1}, Z_{T_1})$ 旋转后的坐标, 则有下式关系:

$$Q_{XYZ-T_1} = P Q_{T_1} \quad (8)$$

$$Q'_{XYZ-T_1} = P Q'_{T_1} \quad (9)$$

经旋转拼接后可将式(8)、(9)化为:

$$Q_{T_1} = P^{-1} Q_{XYZ-T_1} \quad (10)$$

$$Q'_{T_1} = P^{-1} Q'_{XYZ-T_1} \quad (11)$$

联立式(6)、(10)、(11)可得出被测刀具表面旋转前的点和旋转后的点在 CCD 摄像机成像坐标下变换关系:

$$Q_{XYZ-T_1} = P R^{-1} P^{-1} Q'_{XYZ-T_1} \quad (12)$$

由式(12)可知, 刀具转台与 CCD 摄像机固定后, 它们的空间位置关系也就确定了, 从而被测刀具在不同视角的坐标变换仅与小型高精度转台旋转角度 ψ 相关, 因此在给定小型高精度转台每次旋转角度后, 被测刀具在不同视角下的坐标变换便很容易确定, 最终完成刀具点云旋转拼接。

4 刀具测量实验及结果分析

刀具测量实验平台, 如图 4 所示, 由 CCD 摄像机、投

影仪、刀具转台和被测刀具组成。其中, CCD 摄像机选用分辨率为 $1\,280 \times 1\,024$ 像素的 IMAGING SOURCE 工业相机, 其镜头焦距为 8 mm 的 COMPUTER 镜头; 投影仪选用分辨率为 $1\,200 \times 800$ 像素的 BENQ 商用投影仪; 刀具转台选用直径为 $\Phi 120\text{ mm}$ 的小型高精度转台, 其分辨率为 $0.0005^\circ = 1.8''$ (20 细分); 被测刀具选用直径为 $\Phi 15\text{ mm}$ 的直柄麻花钻, 如图 5 所示。

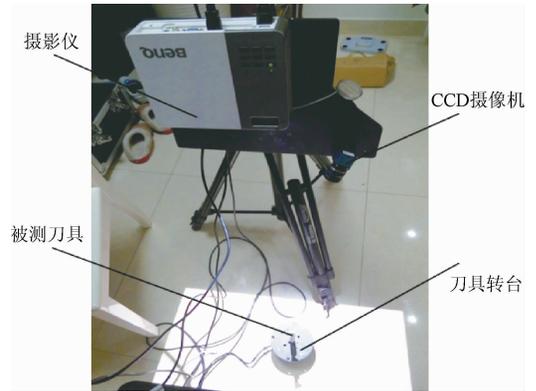


图 4 刀具测量实验平台

Fig. 4 Tool measurement experiment platform



图 5 直柄麻花钻

Fig. 5 Straight shank twist drill

利用 LABVIEW 软件编写测量实验数据, 基于面结构光投影法基本思想以及相关测量技术, 可准确计算出被测刀具表面各点的空间坐标, 其测量过程如下:

- 1) 将 CCD 摄像机、投影仪、刀具转台以及被测刀具摆放在恰当位置;
- 2) 标定 CCD 摄像机、投影仪和刀具转台, 得出测量系统内、外部参数, 并确定刀具转台坐标系和 CCD 摄像机成像坐标系间的转换关系;
- 3) 投影仪投射一系列不同频率条纹光栅到被测刀具表面;
- 4) 通过 CCD 摄像机采集被测刀具表面上变形的条纹光栅;
- 5) 处理采集到的刀具条纹光栅图像, 得到刀具包裹相位图, 并对其解相得到刀具相位展开图;
- 6) 根据式(5)得出刀具表面点云坐标;
- 7) 利用式(12)对刀具点云拼接;
- 8) 利用 Geomagic Studio 软件对刀具点云文件进行封

装处理,并重建刀具三维模型;

9) 测量刀具三维模型几何参数,并对刀具表面存在缺陷的区域进行分析。

上述测量过程中,CCD 摄像机采集到的条纹光栅图像如图 6 所示(相邻两幅图像的频率比值为 3),刀具包裹相位图和刀具相位展开图如图 7 和 8 所示。



(a) 频率为3的条纹光栅图像
(a) Stripe raster image with a frequency of 3



(b) 频率为9的条纹光栅图像
(b) Stripe raster image with a frequency of 9



(c) 频率为27的条纹光栅图像
(c) Stripe raster image with a frequency of 27



(d) 频率为81的条纹光栅图像
(d) Stripe raster image with a frequency of 81

图 6 CCD 摄像机采集到的条纹光栅图像

Fig. 6 Stripe raster image collected by CCD camera



(a) 频率为3的刀具包裹相位图
(a) Tool wrapping phase figure with a frequency of 3



(b) 频率为9的刀具包裹相位图
(b) Tool wrapping phase figure with a frequency of 9



(c) 频率为27的刀具包裹相位图
(c) Tool wrapping phase figure with a frequency of 27



(d) 频率为81的刀具包裹相位图
(d) Tool wrapping phase figure with a frequency of 81

图 7 刀具包裹相位图

Fig. 7 Tool wrapping phase figure



图 8 刀具相位展开图

Fig. 8 Tool phase unwrapping figure

需要指出的是,由于被测刀具选用直柄麻花钻,其表面存在螺旋槽,且单个表面上的点存在遮挡关系,因此 CCD 摄像机在同一视角下无法采集到直柄麻花钻单个表

面被遮挡的点,仅当下一视角下才能采集到上一视角中被遮挡的点。

上述问题通过小型高精度刀具转台的旋转即可解决。因此,为确保 CCD 摄像机能够完整采集到直柄麻花钻表面所有被遮挡的点,同时保证刀具的测量精度与速度,本测量实验每次旋转小型高精度转台 90°,共旋转 3 次,令刀具转台的 4 个位置依次为 0°、90°、180°、270° 位置,实验最终得到的上述 4 个位置刀具点云图如图 9 所示,拼接完成后的刀具点云图如图 10 所示。

刀具点云拼接完成后,将具有准确坐标的点云文件导入 Geomagic Studio 软件中,得到的刀具点云效果图如图 11 所示,其中两个局部位置的放大图如图 12 所示,从图 12 中可清晰看到刀具表面点和点之间的分布十分均匀,整体效果较为理想。

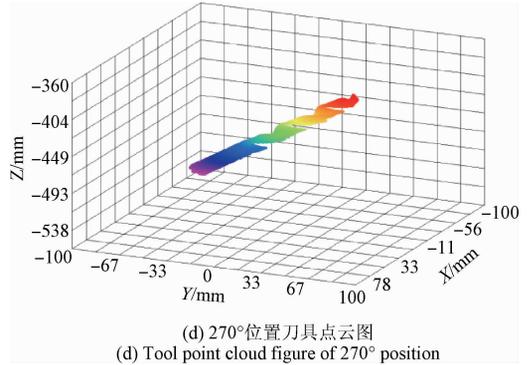
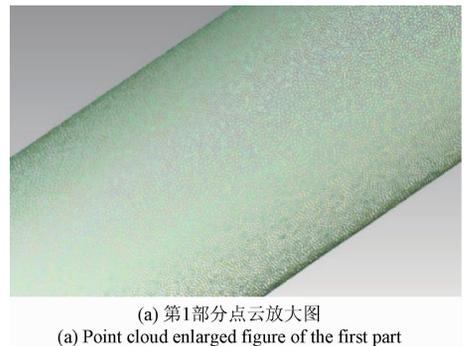
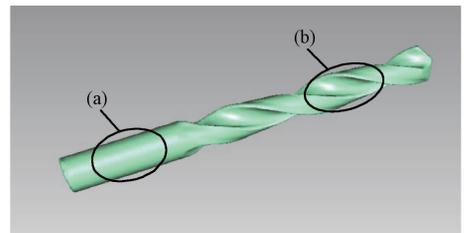
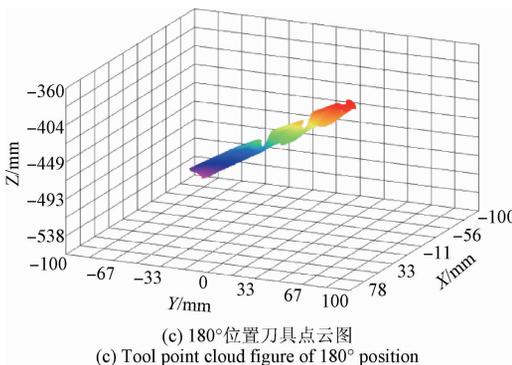
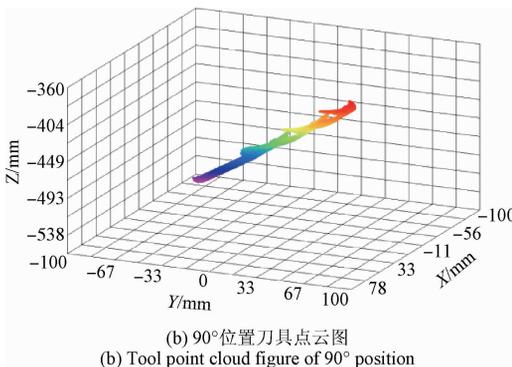
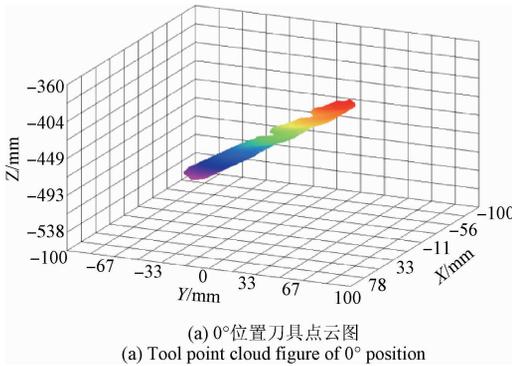
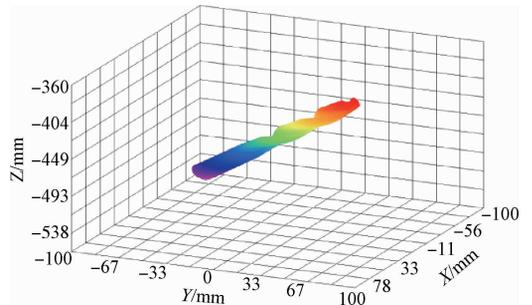
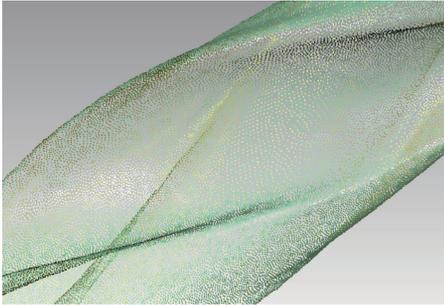


图 9 四个位置刀具点云图

Fig. 9 Tool point cloud figure of four positions





(b) 第2部分点云放大图
(b) Point cloud enlarged figure of the second part

图 12 放大点云图

Fig. 12 Enlarged point cloud figure

为有效分析小型高精度刀具转台对刀具点云的拼接精度的影响,本文取刀具顶部位置上的4个特征点1、2、3、4间的两两间距来对实际数据与测量数据进行比较,如图13所示。

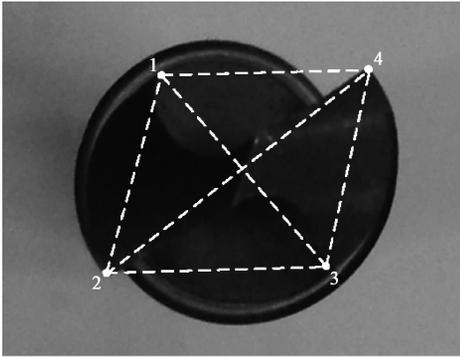


图 13 刀具顶部位置上4个特征点两两间连线

Fig. 13 Two connection lines among four characteristic points of tool top position

首先利用三坐标测量机对上述4个特征点的实际数据进行采集测量,以得到每个点的实际坐标值;然后对由小型高精度转台拼接得来的刀具点云上的4个相同特征点进行采集测量,以得到每个点的测量坐标值;最后将实际值和测量值进行对比分析。表1所示为4个特征点1、2、3、4两两间连线的实际值与测量值之间的对比。

由表1可知,测量值与实际值的平均误差为0.090 2 mm,标准偏差为0.003 4,对通过小型高精度刀具转台实现刀具点云旋转拼接而言,满足点云拼接精度要求^[17]。

表 1 实际值与测量值的对比

Table 1 Comparison between actual value and measured value (mm)

对比	实际值	测量值	误差
12 线	10.083	10.175	0.092
13 线	11.637	11.550	0.087
14 线	10.475	10.569	0.094
23 线	10.511	10.426	0.085
24 线	14.946	15.038	0.092
34 线	10.054	10.145	0.091
平均误差		0.090 2	
标准偏差		0.003 4	

为了准确测得直柄麻花钻的几何参数,利用 Geomagic Studio 软件对点云数据进行封装处理后重建的刀具三维模型如图14所示;结合 Geomagic Qualify 模块测量直柄麻花钻顶部至尾部5个位置的直径值,并与对应位置的实际直径值进行比较,如表2所示。

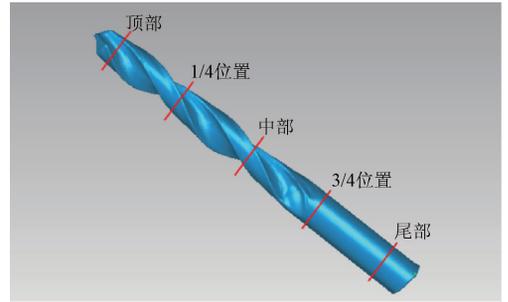


图 14 重建出来的刀具三维模型

Fig. 14 Reconstructed 3D tool model

表 2 刀具直径测量数据

Table 2 Tool diameter measurement data (mm)

测量位置	测量直径	实际直径	误差
中部	15.059	15	0.059
顶部	15.078	15	0.078
尾部	15.087	15	0.087
1/4 位置	15.056	15	0.056
3/4 位置	15.083	15	0.083
平均误差		0.072 6	
标准偏差		0.014 2	

由图14及表2可知,通过面结构光投影法不仅能够重建刀具三维模型,而且能够对刀具直径进行测量,其平均误差仅为0.0726 mm,标准偏差仅为0.0142,与其他研究面结构光的学者^[18-19]所得测量结果相比,本文所用方法的测量精度更高。

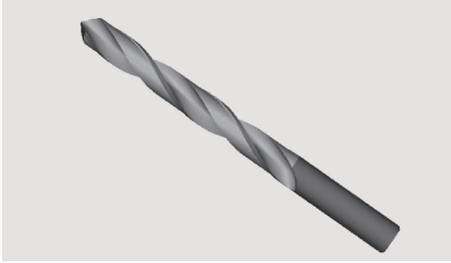


图15 标准刀具模型
Fig.15 Standard tool model

在重建出来的刀具三维模型满足重建精度的情况下,本文将该刀具三维模型(见图14)与标准刀具模型(见图15)进行对比分析,以确定刀具表面存在缺陷的区域,从而预判刀具对零件的加工质量,经对比分析,重建出来的直柄麻花钻表面存在缺陷的区域及原因主要体现在如下两个部分。

1)重建的刀具模型的两个切削刃并不绝对对称,其产生的原因主要是因为实验中使用的被测直柄麻花钻(见图5)已经使用过多次,两侧切削刃均存在一定程度的磨损,这将影响孔径的加工精度。

2)重建的刀具模型的顶部位置出现细微的崩口,其产生的原因主要是被测直柄麻花钻(见图5)加工硬度较高的物体所致。

5 结 论

本文采用面结构光投影法对刀具进行扫描测量,建立了测量系统数学模型和刀具点云旋转拼接模型,得出了相位高度映射关系式、刀具转台坐标系与CCD摄像机成像坐标系间的坐标变换关系式。利用小型高精度刀具转台对被测刀具点云进行旋转拼接,结合实验验证点云拼接精度的可靠性,对比重建的刀具模型几何参数测量数据表明其测量精度较高;另外,对比重建的刀具模型与标准刀具模型,分析确定了刀具表面存在缺陷的区域及其产生的原因。本文首次将面结构光投影法应用于刀具几何参数测量,为其他更复杂刀具的测量分析奠定了基础,为该领域进一步的研究与拓展提供了新的手段。

参考文献

[1] 张森. 刀具几何参数自动测量仪技术研究-图像自动捕捉和自动测量模板设计[D]. 大连:大连工业大学, 2009.
ZHANG M. Research on technology for cutting tool

geometry metrology-Automatic image capturing and measurement model design [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2009.

- [2] 管磊. 刀具几何参数自动测量技术研究-麻花钻后角自动测量[D]. 大连:大连工业大学, 2010.
GUAN L. Relief angle inspection of twist drill by using image-based measurement instrument-relief angle determining for twist drill [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2010.
- [3] 罗胜彬, 宋春华, 韦兴平, 等. 非接触测量技术发展研究综述[J]. 机床与液压, 2013, 41(23):150-153.
LUO SH B, SONG CH H, WEI X P, et al. Review for the development and research of non-contact measurement technology [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(23):150-153.
- [4] 解三霞, 范伟军. 目视万能工具显微镜的影像测量应用研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(9):997-1000.
XIE S X, FAN W J. Research on application of image method detection based on visual universal tool-microscope [J]. Laser & Infrared, 2010, 40(9):997-1000.
- [5] 文莉, 欧阳祥波, 李超林. 电子摄像式刀具预调测量仪的自动聚焦技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2016(5):48-50.
WEN L, OUYANG X B, LI CH L, et al. Auto-focus technology of presetting and measuring machine based on computer vision [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2016(5):48-50.
- [6] 朴成道, 沈文豪, 尹凤哲, 等. 对刀仪在数控车床上的应用[J]. 机床与液压, 2014, 42(8):35-38.
PU CH D, SHEN W H, YIN F ZH, et al. Application of tool presetter in CNC lathe [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2014, 42(8):35-38.
- [7] 刘国华. 基于图像处理的刀具几何参数测量[J]. 黑龙江大学学报, 2015, 6(4):73-77.
LIU G H. Tool geometry parameters measurement based image processing technology [J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2015, 6(4):73-77.
- [8] 王飞, 杜文华, 关波, 等. 基于视觉的刀具参数高精度测量[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(2):524-528.
WANG F, DU W H, GUAN B, et al. High precision measurement of cutting tool parameters based on vision [J]. Computer Engineering and Design, 2015, 36(2):524-528.
- [9] 贾同, 吴成东, 陈东岳, 等. 一种基于全向结构光的深度测量方法[J]. 自动化学报, 2015, 41(9):1553-1562.
JIA T, WU CH D, CHEN D Y, et al. A depth measurement method by omni directional image and structured light [J]. Acta Automatica Sinica, 2015,

- 41(9):1553-1562.
- [10] WEI B, GAO J, LI K, et al. Indoor mobile robot obstacle detection based on linear structured light vision system[C]. IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009:834-839.
- [11] 徐慧, 张金龙, 刘京南, 等. 零件轮廓表面检测与三维重构技术的研究[J]. 南京师范大学学报:工程技术版, 2011, 11(2):26-30.
- XU H, ZHANG J L, LIU J N, et al. Research on the part surface measurement and 3 D reconstruction[J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science Edition, 2011, 11(2):26-30.
- [12] 吴庆华. 基于线结构光扫描的三维表面缺陷在线检测的理论与应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- WU Q H. A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy in Engineering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [13] 刘今越, 刘佳斌, 郭志红, 等. 一种基于面结构光的刀具三维测量系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(12):1884-1891.
- LIU J Y, LIU J B, GUO ZH H, et al. A three-dimensional tool measurement system based on surface structured light[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(12):1884-1891.
- [14] 史红梅, 张继科. 基于激光三角测量原理的轨距检测系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9):1934-1940.
- SHI H M, ZHANG J K. Study on track measurement system based on laser triangulation principle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(9):1934-1940.
- [15] 杨帆, 白宝兴, 张振普, 等. 基于多视点云拼接算法研究[J]. 长春理工大学学报:自然科学版, 2014, 37(3):124-127.
- YANG F, BAI B X, ZHANG ZH P, et al. Research on clouds registration algorithm based on multi-view point[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2014, 37(3):124-127.
- [16] 邓文怡, 梁云波, 吕乃光, 等. 一种基于视觉测量的大型自由曲面拼接方法[J]. 北京信息科技大学学报:自然科学版, 2010, 25(1):6-10.
- DENG W Y, YLIANG Y B, LV N G, et al. Registration method for large free-form profile based on vision measurement[J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2010, 25(1):6-10.
- [17] 林志雄, 乐凯, 胡华亮, 等. 结构光三维测量系统的点云精度分析[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(9):160-164.
- LIN ZH X, LE K, HU H L, et al. Point cloud accuracy analysis of three-dimensional reconstruction system based on structured light[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(9):160-164.
- [18] 耿欣, 曲兴华, 江炜, 等. 大型管道快速测量与建模技术研究及应用[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2):338-343.
- GENG X, QU X H, JIANG W, et al. Rapid measurement and modeling technologies of large pipes and their application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2):338-343.
- [19] 邓珍波, 殷鸣, 向召伟, 等. 基于结构光的叶片自动检测系统研发[J]. 制造业自动化, 2016, 38(1):12-15.
- DENG ZH B, YIN M, XIANG ZH W, et al. research of automatic measurement system aiming at blades based on structured light[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(1):12-15.

作者简介



刘今越, 分别在 2000 年和 2005 年于河北工业大学获得学士学位和硕士学位, 2008 年于天津大学获得博士学位, 现为河北工业大学副教授, 主要研究方向为精密测量与机器视觉。

E-mail: ljy@hebut.edu.cn

Liu Jinyue received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hebei University of Technology in 2000 and 2005, respectively, and received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2008. Currently, he is an associate professor in Hebei University of Technology. His main research interests include precision measurement and machine vision.



刘佳斌, 2014 年于河北工业大学获得学士学位, 现为河北工业大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测量。

E-mail: liu_jiabin1991@163.com

Liu Jiabin received his B. Sc. degree in 2014 from Hebei University of Technology, he is now a master student in Hebei University of Technology. His main research interest is precision measurement.



贾晓辉(通讯作者), 分别在 2000 年和 2003 年于河北工业大学获得学士学位和硕士学位, 2010 年于天津大学获得博士学位, 现为河北工业大学讲师, 主要研究方向为柔性、微纳操作机器人技术。

E-mail: jia_dragon@163.com

Jia Xiaohui (Corresponding author) received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hebei University of Technology in 2000 and 2003, respectively, and received her Ph. D. degree in 2010 from Tianjin University. Currently, she is a lecturer in Hebei University of Technology. Her main research interests include flexible and micro-nano operation robot technology.