

引用格式: WANG Tao, LI Zhan, QIAO Wei-lin, *et al.* Adaptive Positioning for Blade Repair of Complex Curved Surface Based on Speckle Measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1212001

王涛, 李战, 乔伟林, 等. 采用散斑测量的复杂曲面叶片修复自适应定位[J]. *光子学报*, 2019, **48**(12): 1212001

采用散斑测量的复杂曲面叶片修复自适应定位

王涛, 李战, 乔伟林, 王盛, 吴军

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘 要: 针对于航空发动机叶片修复过程中传统夹具定位无法满足复杂曲面叶片损坏形式多样的要求, 提出了采用散斑测量的复杂曲面叶片修复自适应定位方法. 首先, 构建视觉测量系统, 通过对叶片表面散斑点的匹配与空间解算得到叶片立体点云数据和参考测量点空间坐标, 完成叶片三维构型. 然后, 建立自适应定位模型, 通过对各定位坐标系进行位姿矩阵解算, 实现欠定位装夹下曲面叶片在机床坐标系下的自适应定位. 最后, 基于德玛吉五轴数控加工中心进行自适应定位实验, 验证了定位方法的有效性与实用性. 实验结果表明, 定位各方向平移向量偏差小于 0.25 mm, 旋转矩阵欧拉角偏差小于 0.2° , 且通过一次装夹固定及视觉测量提取叶片形貌与位置信息, 减少了定位工序, 可为后续对损坏复杂曲面叶片加工复形的自适应定位修复提供实验依据.

关键词: 散斑测量; 发动机叶片; 修复; 自适应定位; 位姿解算

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1212001

Adaptive Positioning for Blade Repair of Complex Curved Surface Based on Speckle Measurement

WANG Tao, LI Zhan, QIAO Wei-lin, WANG Sheng, WU Jun

(Aeronautical Engineering Institute, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the fact that the traditional fixture positioning can not meet requirements of complex curved blade damage in the process of aero-engine blade repair, an adaptive positioning method for blade repair on complex curved surface based on speckle measurement was proposed. Firstly, a visual measurement system was constructed. The three-dimensional configuration of the blade was achieved by matching the speckles on the blade surface and calculating the spatial coordinates of the reference measuring points and the data of the blade solid point cloud. Then, an adaptive positioning model was established, and the pose matrix of each positioning coordinate system was calculated to realize the adaptive positioning of curved surface blades under under-positioning clamping in machine tool coordinate system. Finally, an adaptive positioning experiment based on damage five-axis NC machining center was carried out to verify the effectiveness and practicability of the positioning method. The experimental results show that the deviation of translation vectors is less than 0.25 mm and the deviation of Euler angle of rotation matrix is less than 0.2° . The shape and position information of blades are extracted by one-time clamping and fixing using visual measurement to reduce the locating process, which can provide an

基金项目: 国家自然科学基金民航联合研究基金(Nos.U1633104, U1533111), 国家自然科学基金(No.51705518), 数字制造装备与技术国家重点实验室开放课题(No.DMETKF2017018), 中央高校基本科研业务费(No.3122019088), 精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(No. pilab1707), 天津市教委科研项目(No.2018KJ242)

第一作者: 王涛(1979—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为航空部件数字化制造与修复, 激光修复. Email: wangtaotdme@163.com

通讯作者: 吴军(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为航空发动机故障的检测与维修技术、激光检测技术、视觉测量、超声检测. Email: j-wu@cauc.edu.cn

收稿日期: 2019-06-19; **录用日期:** 2019-09-24

<http://www.photon.ac.cn>

experimental basis for the subsequent adaptive positioning and repair of complex surface blades.

Key words: Speckle measurement; Engine blade; Repair; Adaptive localization; Pose calculation

OCIS Codes: 120.6150; 120.4610; 150.0150; 330.1400

0 引言

叶片是涡轮航空发动机的核心部件之一,由于工作环境恶劣,极易出现损坏,从而失去其良好的气动性能,影响飞行安全^[1].复杂的制备工艺和特殊难加工的材料导致叶片成本较高,修复受损叶片是近年来较为经济的做法^[2].常规发动机叶片的修复过程,一般先将损坏的部分去除,然后采用激光熔覆技术对叶片进行熔覆或堆焊处理,最后对修复叶片进行减材复形加工以满足气动性能要求^[3-5].由于曲面叶片形状复杂、损坏形式多样,传统夹具定位无法满足其减材复形的定位要求.近年来,随着测量技术和数控技术的发展,叶片的自适应定位修复受到关注,其关键问题是实现欠定位装夹(非专有夹具定位)下的复杂曲面叶片在加工中心的精确定位.

对于叶片等几何曲面工件的定位问题,国内外学者进行了相应的研究工作.VERGEEST J S M等^[6]研究了无特征点的自由曲面加工定位方法,通过实时3D扫描点与CAD模型的匹配实现自由曲面定位,然后采用六自由度机器人实现自由曲面的加工.SHEN B等^[7]提出了对于大型曲面最优定位算法,通过对自由曲面旋转和平移运算,对工件进行预定位、调整、空间姿态解算控制,实现了加工曲面工件的定位.WU B H等^[8]研究了一种用于模型重构和数控加工的修复叶片自适应定位方法.通过建立一个数学模型来描述约束条件下的定位,基于所提出的数学模型和变形过程的连续性实现用于数控加工的修复叶片的定位方法.YAN S J等^[9]采用了类似的两级优化方法,通过匹配高斯曲率和平均曲率的差异实现粗定位,在此基础上实现复杂曲面精确定位.WU Jia-feng^[10]通过建立并求解自适应定位数学模型,给出了一种超大构件分区形式下的自由曲面自适应定位加工方法.以上都是对一些曲面工件定位进行的研究,而对于航空发动机复杂曲面叶片定位及修复,仍存在两个问题,一是叶片的原始模型难以获取,且使用后叶片会发生蠕变,难以适用于待修复叶片;二是叶片曲面几何形状复杂、损坏形式多样,难以在数控机床上精确定位以完成叶片修复.

本文提出了一种采用散斑测量的叶片自适应定位方法,构建视觉测量系统,通过对叶片表面散斑点的匹配与空间解算得到立体点云数据和参考测量点空间坐标,完成叶片三维构型;建立了自适应定位模型,通过对各定位坐标系进行姿态矩阵解算,实现欠定位装夹下叶片在机床坐标系下的自适应定位.对于传统航空发动机叶片修复中需要专有夹具定位、较难确定定位基准、基准与各修复加工部分尺寸计算复杂等问题,通过一次装夹固定及视觉测量即可实现损坏叶片修复的自适应定位,减少了定位工序.

1 叶片自适应定位流程

国内航空发动机维修企业一般缺少叶片原始模型数据,且叶片在长期使用过程中易发生蠕变,同时叶片本身叶型复杂且发生损伤的位置具有随机性,因此利用数控系统对复杂曲面叶片进行减材复形修复,必须对其进行自适应定位,即满足任意形状任意损伤下先固定后定位的修复方式,通常按图1所示流程实现.首先通过视觉测量实现叶片及定位点的测量;其次完成待定位叶片模型重建以及通过自适应模型解算;最后通过数据交汇实现叶片的自适应定位.

2 叶片点云散斑测量方法

获得真实叶片表面是所提方法的第一步.实验过程中首先需要在叶片表面喷制哑光漆散斑处理,散斑点利用脱漆剂易于清洗且并不影响叶片的二次

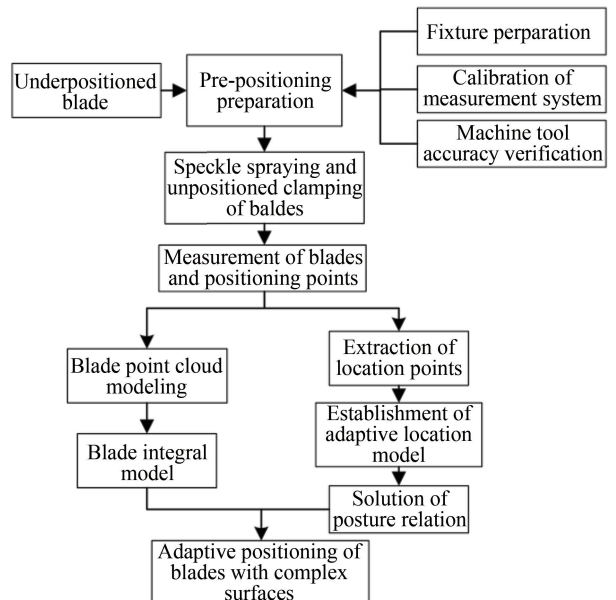


图1 叶片自适应定位流程

Fig.1 Flow chart of blade adaptive positioning

使用.散斑视觉测量即在待测叶片表面喷制散斑点以获取叶片点云的近景测量方法,同时喷制散斑点具有随机性强、数量适中、跟随性强等优点,降低了接触式测量测得点云的数据量,简化了传统视觉测量在叶片表面投射特征光条、粘贴标志点的繁琐步骤,同时解决了投射特征光条无法跟随工件实现精准测量与定位的问题.为了测量获取叶片表面精确构型,搭建了一套视觉测量系统,图 2(a)是视觉测量系统示意图.左相机 C_l 、右相机 C_r 光轴夹角呈 $25^\circ \sim 40^\circ$ 放置,被测叶片表面的散斑点由高反射率的哑光漆喷制而成,散斑点经照明装置照明后由两台测量相机分别对其成像,形成一定的立体视差,利用叶片表面散斑在左右像面的成像点坐标解算叶片曲面散斑点的空间三维坐标,实现双目立体视觉测量^[11-13].

传统匹配方法需提取散斑点的特征描述符,然后采用距离准则进行匹配,但耗时较大,不适用于曲面叶片表面散斑测量.因此,采用基于光流法的目标追踪算法(Kanade-Lucas-Tomasi, KLT)算法^[14]来实现散斑点的初始匹配,为了提高匹配精度,在初始匹配基础上,通过外极线约束剔除初始匹配中的误匹配点,在此基础上进行空间坐标解算.

由于相机内参数、散斑点图像坐标以及两相机的相对方位均存在一定误差,因此通过三角交汇原理对应的散斑匹配点投影线则不能精确相交,即存在交汇误差,左右相机交汇线不能准确交于 P 点,如图 2(b).因此,空间点的坐标求解问题转化为距离最优化问题.

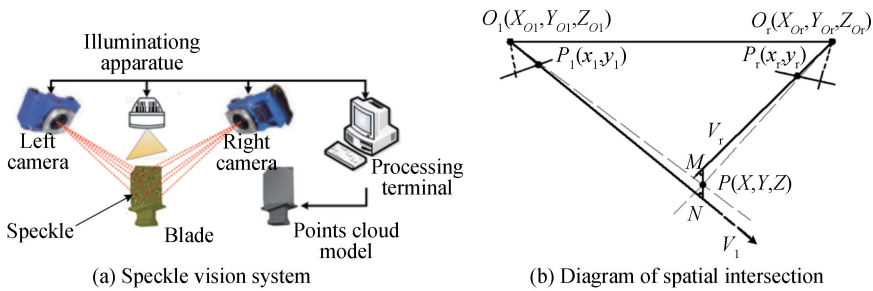


图 2 视觉测量系统空间及交汇示意图

Fig.2 Visual measurement system space and intersection schematic

采用点到其投影线距离平方和最小化作为优化目标,其中 $P(X, Y, Z)$ 为任一空间点, $O_l(X_{O_l}, Y_{O_l}, Z_{O_l})$, $O_r(X_{O_r}, Y_{O_r}, Z_{O_r})$ 为左右相机主光点, $P_l(x_1, y_1)$, $P_r(x_r, y_r)$ 为左右相机的图像点, $\mathbf{V}_l = \alpha_1 \mathbf{x} + \beta_1 \mathbf{y} + \gamma_1 \mathbf{z}$ (\mathbf{x} , \mathbf{y} , \mathbf{z} 为各方向的单位向量, α_1 , β_1 和 γ_1 为 \mathbf{V}_l 在 x, y, z 方向分向量的模) 为经过 O_l 和 P_l 的归一化矢量,它的值由相应的匹配点的坐标及测量相机的标定结果决定,同理有 $\mathbf{V}_r = \alpha_r \mathbf{x} + \beta_r \mathbf{y} + \gamma_r \mathbf{z}$ (α_r, β_r 和 γ_r 为 \mathbf{V}_r 在 x, y, z 方向分向量的模). 设空间点到两条射线的总距离 H 为

$$H = \| \overline{PM} \|^2 + \| \overline{PN} \|^2 \quad (1)$$

采用非线性优化方法,设其优化函数为

$$\min H = \min \{ (X - X_{O_l})^2 + (Y - Y_{O_l})^2 + (Z - Z_{O_l})^2 - [\alpha_1(X - X_{O_l}) + \beta_1(Y - Y_{O_l}) + \gamma_1(Z - Z_{O_l})]^2 + (X - X_{O_r})^2 + (Y - Y_{O_r})^2 + (Z - Z_{O_r})^2 - [\alpha_r(X - X_{O_r}) + \beta_r(Y - Y_{O_r}) + \gamma_r(Z - Z_{O_r})]^2 \} \quad (2)$$

为求解空间点坐标 $P(X, Y, Z)$,对 H 进行求导并整理,可得

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (3)$$

式中, \mathbf{x} 为满足到投影线距离平方和最小的空间三维特征点,

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} (1 - \alpha_l^2) + (1 - \alpha_r^2) & -\alpha_l \alpha_r - \alpha_r \alpha_l & -\alpha_l \gamma_l - \alpha_r \gamma_r \\ -\alpha_l \beta_l - \alpha_r \beta_r & (1 - \beta_l^2) + (1 - \beta_r^2) & -\beta_l \gamma_l - \beta_r \gamma_r \\ -\alpha_l \gamma_l - \alpha_r \gamma_r & -\beta_l \gamma_l - \beta_r \gamma_r & (1 - \gamma_l^2) + (1 - \gamma_r^2) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} [(1 - \alpha_l^2)X_{O_l} + (1 - \alpha_r^2)X_{O_r}] - [\alpha_l \beta_l Y_{O_l} + \alpha_r \beta_r Y_{O_r}] - [\alpha_l \gamma_l Z_{O_l} + \alpha_r \gamma_r Z_{O_r}] \\ -[\alpha_l \beta_l X_{O_l} + \alpha_r \beta_r X_{O_r}] + [(1 - \beta_l^2)Y_{O_l} + (1 - \beta_r^2)Y_{O_r}] - [\beta_l \gamma_l Z_{O_l} + \beta_r \gamma_r Z_{O_r}] \\ -[\alpha_l \beta_l X_{O_l} + \alpha_r \beta_r X_{O_r}] - [\alpha_l \beta_l Y_{O_l} + \alpha_r \beta_r Y_{O_r}] + [(1 - \gamma_l^2)Z_{O_l} + (1 - \gamma_r^2)Z_{O_r}] \end{pmatrix}$$

经过式(1)~(3)空间坐标求解运算,可得叶片的点云数据.

在参考标志点空间坐标获取方法上,首先对于左右图像中标志点特征提取与匹配,对拍摄不同位置叶片图像标志点图像进行灰度化、高斯平滑、阈值化处理、Canny 边缘提取和椭圆质心提取等图像处理过程,其次

对两幅图像中对应的标志点进行匹配,同样按照上述获取叶片点云的方法进行标志点空间坐标的求取。

由于被测叶片表面形貌的复杂性以及相机单次测量视野限制,无法一次性提取待测叶片整体三维点云坐标数据,因此进行多角度测量提取,然后通过基于标志点点云拼接,将所有测量数据统一到同一坐标系下,实现全视觉的三维拼接获取叶片点云数据^[15-16]。在获取叶片全部点云基础上,根据三次B样条理论对所得到的叶片点云数据进行曲线曲面拟合,完成叶片模型重构。

3 视觉测量自适应定位方法

通过对叶片点云进行曲线曲面拟合数字化建模完成了对叶片的构型,由于叶片曲面几何形状复杂,损坏形式多样,难以实现其在五轴加工中心的精确定位,因此,构建了采用散斑测量的叶片自适应定位方法。图3为自适应定位系统的原理示意图,叶片欠定位装夹于五轴加工中心平台上,视觉测量系统放置在加工中心前方以测量提取叶片的形貌和位置信息,测量数据信息经计算机处理解算得到自适应定位数据信息实现叶片欠定位装夹下的自适应定位。

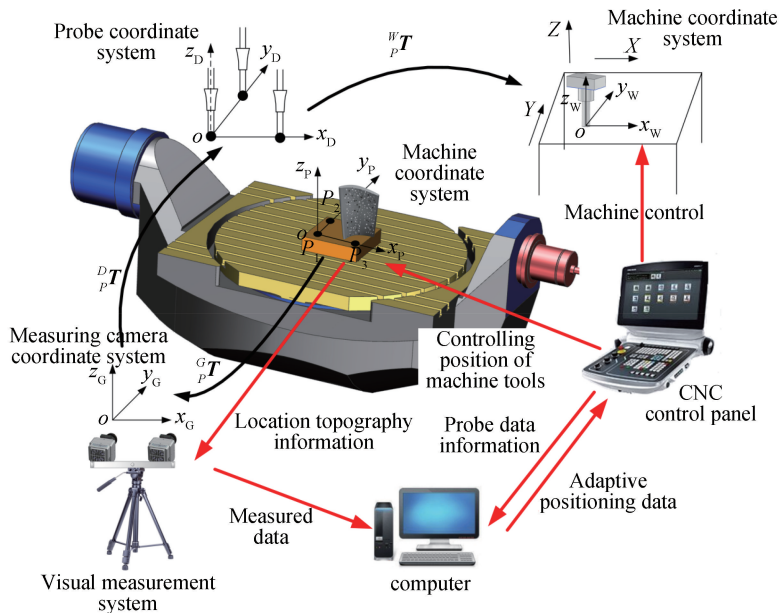


图3 自适应定位系统原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of adaptive positioning system

3.1 自适应定位数学模型

基于视觉测量的叶片自适应定位简化几何模型如图3,设 $P-x_P y_P z_P$ 为标志点坐标系 P , $G-x_G y_G z_G$ 为测量相机坐标系 G , $D-x_D y_D z_D$ 为机床测头坐标系 D , $W-x_W y_W z_W$ 为机床坐标系 W ,自适应定位的实质就是求出叶片点云在机床坐标系下的位置坐标。

标志点坐标系下叶片表面某点坐标 x_P 与机床坐标系下同一点坐标 x_W 的关系为

$$x_W = {}^W T_D \cdot {}^D T_P \cdot {}^G T_P \cdot x_P \quad (4)$$

式中, ${}^G T_P$ 为标志点坐标系在测量相机坐标系下的位姿矩阵; ${}^D T_P$ 为测量相机坐标系在机床测头坐标系下的位姿矩阵; ${}^W T_D$ 为机床测头坐标系在机床坐标系下的位姿矩阵。其中的每个位姿矩阵均可以由坐标系间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} 来构成,因此式(4)写为

$$\begin{bmatrix} x_W \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_D & \mathbf{T}_D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_G & \mathbf{T}_G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R}_P & \mathbf{T}_P \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_P \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

通过上述坐标运算,将标志点坐标系下叶片每一点的坐标信息转换到了机床坐标系下,由此实现复杂曲面叶片的自适应定位^[17]。

3.2 自适应定位模型位姿解算方法

要求解自适应定位模型,首先应建立各个位姿坐标系,通过上述视觉测量的方式测量各空间参考测量点

位置信息,然后进行自适应定位模型求解.

3.2.1 标志点坐标系在测量相机坐标系下位姿求解

标志点坐标系通过三点法建立,建立方法如下:在机床夹具上布置标志点板,选取其中的3个参考点标志点 P_1 、 P_2 、 P_3 ,距离假定已知并且 P_1P_2 、 P_1P_3 相互垂直,其中 P_1 、 P_2 、 P_3 为通过视觉测量方法测量得到的测量点,即为测量相机坐标系下的坐标值.现补充虚拟标志点坐标 P_4 ,其坐标通过 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 、 $\overrightarrow{P_1P_3}$ 的叉积后单位化得到,并通过正交向量 $\overrightarrow{P_1P_2}$ 、 $\overrightarrow{P_1P_3}$ 、 $\overrightarrow{P_1P_4}$ 建立坐标系 $P-x_Py_Pz_P$,其中 x 、 y 、 z 轴的单位矢量分别为

$$\mathbf{n}_x = \frac{\overrightarrow{P_1P_3}}{\|\overrightarrow{P_1P_3}\|} \quad (6)$$

$$\mathbf{n}_y = \frac{\overrightarrow{P_1P_2}}{\|\overrightarrow{P_1P_2}\|} \quad (7)$$

$$\mathbf{n}_z = \frac{\overrightarrow{P_1P_3} \times \overrightarrow{P_1P_2}}{\|\overrightarrow{P_1P_3} \times \overrightarrow{P_1P_2}\|} \quad (8)$$

假定测量相机坐标系的建系方式与此相似,均为右手坐标系,与 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 相对应的点分别为 P_{G1} 、 P_{G2} 、 P_{G3} 、 P_{G4} ,因此标志点坐标系 $P-x_Py_Pz_P$ 与测量相机坐标系 $G-x_Gy_Gz_G$ 之间的转换关系由一个旋转矩阵 \mathbf{R}_P 和一个平移向量 \mathbf{T}_P 实现,如式(9)、(10)所示.

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \mathbf{R}_P \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} + \mathbf{T}_P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_P \\ y_P \\ z_P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \mathbf{R}_P P_{P1} + \mathbf{T}_P = P_{G1} \\ \mathbf{R}_P P_{P2} + \mathbf{T}_P = P_{G2} \\ \mathbf{R}_P P_{P3} + \mathbf{T}_P = P_{G3} \\ \mathbf{R}_P P_{P4} + \mathbf{T}_P = P_{G4} \end{cases} \quad (10)$$

即可求出变换矩阵 \mathbf{R}_P 和 \mathbf{T}_P ,进而得出 ${}^G\mathbf{T}$.

3.2.2 测量相机坐标系在测头坐标系下位姿求解

对于测量相机坐标系在测头坐标系下位姿矩阵 ${}^D\mathbf{T}$ 求解,方法与3.2.1中的位姿关系求解方法相似.

首先建立机床测头坐标系,所不同的是通过利用五轴机床测头结合视觉测量的方法得到机床测头在三个参考位置时的测量坐标.具体操作方法是先通过机床控制测头位于距离叶片相对合适的位置,拍下图像数据后提取此位置时的测头位置信息,然后控制机床测头沿 y 方向平移一定距离到距离叶片相对合适的位置,同样提取此位置时的测头位置信息,按照此方法依次提取三个特定位置下的机床测头中心点 P_1 、 P_2 、 P_3 的位置信息,假定距离已知并且 P_1P_2 、 P_1P_3 相互垂直,依据三点法建立机床测头坐标系 $D-x_Dy_Dz_D$.在利用视觉测量的方法拍摄机床测头图像数据的同时,利用机床的测头数据显示功能记录三个测头参考点位置时的机床坐标系下的坐标数据.

在机床测头坐标系与测量相机坐标系中对应的参考点分别为 P_{G1} 、 P_{G2} 、 P_{G3} 、 P_{G4} ,机床测头坐标系 $D-x_Dy_Dz_D$ 与测量相机坐标系 $G-x_Gy_Gz_G$ 之间的转换关系同样由一个旋转矩阵 \mathbf{R}'_G 和一个平移向量 \mathbf{T}'_G 实现,得出旋转平移矩阵后即可通过式(11)得出 ${}^D\mathbf{T}$.

$${}^D\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}'_G{}^{-1} & -\mathbf{R}'_G{}^{-1} \cdot \mathbf{T}'_G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_G & \mathbf{T}_G \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2.3 机床测头坐标系在机床坐标系下位姿求解

为了求解机床测头坐标系在机床坐标系下的位姿矩阵,应先对五轴加工中心机床坐标系位姿进行描述.依据五轴加工中心机床坐标系内部建系原则建立机床坐标系,调整机床控制面板显示主轴为机床坐标系下的位置坐标,控制主轴回到坐标原点,并以此点为坐标原点,再分别以机床的 x 轴正方向和 y 轴正方向为建立右手坐标系.

基于3.2.2中三个特定测头参考位置建立机床测头坐标系,并且这三个测头参考点的在机床坐标系下

的坐标通过五轴加工中心探测功能获取,依据公式(6)~(8)建立坐标系。

根据坐标系空间旋转平移变换与对应变换矩阵之间关系求解机床测头坐标系与机床坐标系的位姿矩阵。对于存在任意旋转变换关系的两个坐标系 $D-x_Dy_Dz_D$ 和 $W-x_Wy_Wz_W$,能够通过依次绕三个坐标轴旋转一定的角度实现两个坐标系的坐标轴的重合。假设坐标系 $D-x_Dy_Dz_D$ 依次绕自身 x, y, z 轴分别逆时针旋转 α, β, γ 后,再沿着某一方向平移一定距离可以与坐标系 $W-x_Wy_Wz_W$ 重合,则空间中机床测头坐标系和机床坐标系的位姿转换矩阵由式(12)得到。

$$\mathbf{R}_D = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \cos \gamma \sin \beta \sin \alpha - \sin \gamma \cos \alpha & \cos \gamma \sin \beta \cos \alpha + \sin \gamma \sin \alpha \\ \sin \gamma \cos \beta & \sin \gamma \sin \beta \sin \alpha + \cos \gamma \cos \alpha & \sin \gamma \sin \beta \cos \alpha - \cos \gamma \sin \alpha \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (12)$$

平移矩阵 \mathbf{T}_G 可以通过机床测头坐标系与机床坐标系原点位置阵表示,如式(13),其中 $\mathbf{P}_{D2}, \mathbf{P}_{W2}$ 分别为测头坐标系和机床坐标系的位置矩阵。

$$\mathbf{T}_D = \mathbf{P}_{D2} - \mathbf{P}_{W2} \quad (13)$$

${}^W_D\mathbf{T}$ 由上述求解得出旋转平移矩阵后通过式(14)得出。

$${}^W_D\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_D & \mathbf{T}_D \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

至此,完成自适应定位模型中的各个定位坐标系之间的位姿解算。通过式(5),将标志点坐标系下的叶片的点云信息通过坐标运算转换到五轴加工中心机床坐标系下,实现了叶片中的任何一点位置信息在机床坐标系下的唯一确定,即通过视觉测量的方法实现了叶片的自适应定位。

4 测量实验与结果

4.1 实验平台

图4为进行自适应定位的实验平台,包括DMG MORI数控加工中心、计算机、控制面板、叶片、标志点板和视觉测量系统,其中视觉测量系统包括迈迪微视公司生产GE500M-T千兆网CMOS工业双目相机(像素5.0 Megapixels,分辨率 2592×1944 ,光圈比值1:2.0,焦距 f 为16 mm)、支架、三脚架。

数控加工中心测头使用前经过校验,测量系统内参采用张正友平面棋盘格标定法进行标定,标定结果左右相机内参标定的平均残差为0.06 pixels,可满足本次实验要求。外部参量通过匹配结果求解,得到系统外部参量(旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T})的标定结果分别为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9838 & 0.0030 & -0.1793 \\ -0.0026 & 1.0000 & 0.0024 \\ 0.1793 & -0.0019 & 0.9838 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = [-115.3299 \text{ mm} \quad -0.7812 \text{ mm} \quad 11.8784 \text{ mm}]^T$$

4.2 叶片点云及参考标志点数据的获取

在标定的基础上,对相机采集图像进行校准(去除镜头畸变影响),同时采用KLT算法进行散斑点初始匹配,同时采用外极线约束剔除误匹配,在保证观察的前提下,选取部分代表匹配点,所得到的匹配图如图5,可以看出采用KLT算法结合外线约束实现了较好的匹配,叶片其余部分匹配过程与此类似。

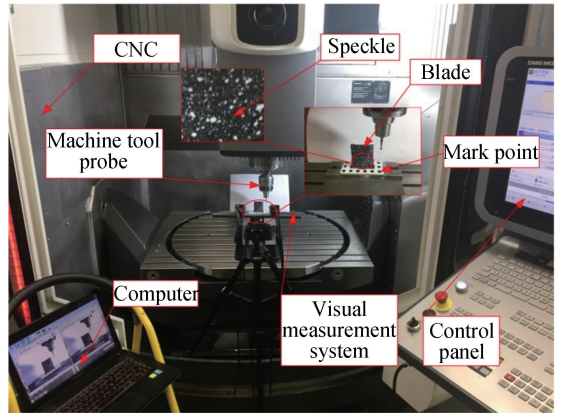


图4 自适应定位实验平台

Fig.4 Adaptive positioning experimental platform

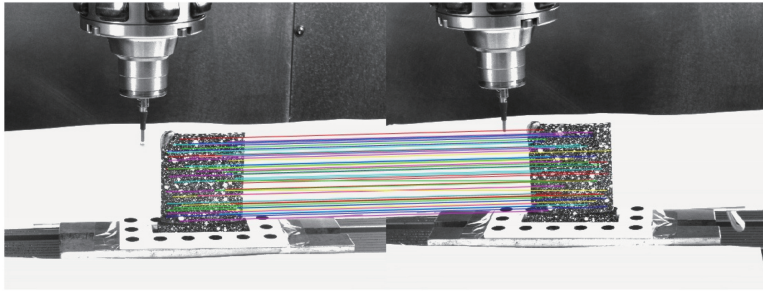


图5 散斑点的立体匹配
Fig.5 Stereo matching of the speckles

图 6(a)为在对应散斑匹配点的基础上,采用最小距离目标函数的方法得到去除榫头的前叶片点云数据可视化后的结果,图 6(b)为后叶片点云数据可视化的结果,同时将其依据 B 样条曲线理论拟合拼接点云数据,完成叶片的三维构型,如图 6(c).

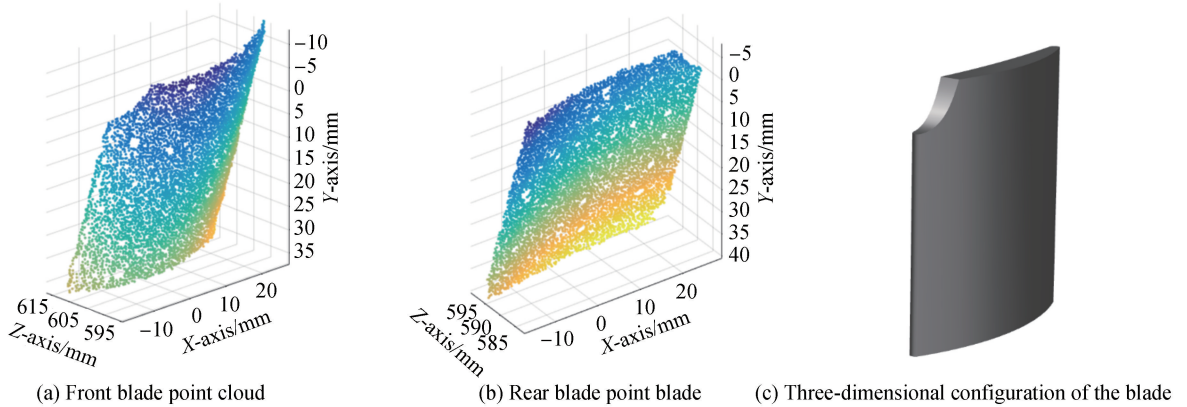


图6 叶片点云可视化显示及构型图
Fig.6 Visual display and configuration chart of blade point cloud

对于参考标志点及测头空间点的获取,则通过图像处理的方法建立匹配关系后进而进行空间坐标的三维解算.

4.3 自适应定位位姿解算

为了验证本文中的自适应定位精度,对欠定位装夹在五轴加工中心上的叶片进行自适应定位解算,同时通过视觉测量系统测量得到的参考标志点和测头中心点坐标,建立各定位坐标系,进行四个定位坐标系之间的空间位姿解算,求解得到标志点坐标系之于机床坐标系的位姿矩阵为

$${}^w_P \mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.999\ 8 & 0.007\ 0 & 0.002\ 2 & 470.769\ 0 \\ 0.000\ 7 & 1.016\ 0 & 0.001\ 7 & -434.893\ 0 \\ -0.002\ 2 & -0.001\ 7 & 1.000\ 0 & -479.647\ 4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将标志点坐标系之于机床坐标系的位姿矩阵代入式(5),即可解算出叶片在五轴加工中心机床坐标系下的位置信息,即实现了视觉测量辅助下的航空发动机叶片的自适应定位.

4.4 结果与分析

由于叶片本身为复杂曲面零件,构型复杂且叶片上每一点定位信息较难,为了验证方法更为方便直观,采用同样方法与步骤,对标准矩形量块进行实验测试,矩形标准量块的尺寸参数约为 35 mm×36 mm×70 mm,图 7 采用自适应定位方法对矩形量块进行位姿解算后在机床坐标系下的可视化显示图,进而即可采用同样的方式对矩形量块进行拟合构型.

为了检验本文方法有效性及稳定性,依次进行 10 次重复自适应定位测量实验.首先应保证测量数据及构型的可靠性,测量矩形量块工件的几何参数,测量指标主要为矩形量块的长度、宽度、以及测量的实际高

度,测量几何参数的实际值由机床测头的三坐标功能测得(测量精度为 0.001 mm),将测量值与实际值对比,比较结果如图 8.

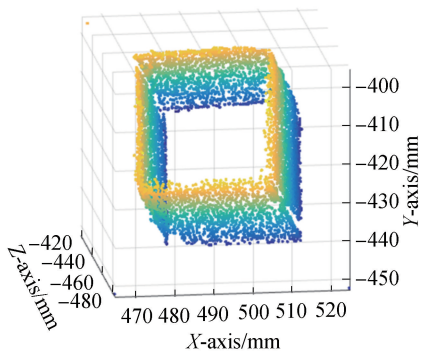


图 7 机床坐标系下矩形块自适应显示图

Fig.7 Rectangular block adaptive display in machine tool coordinate system

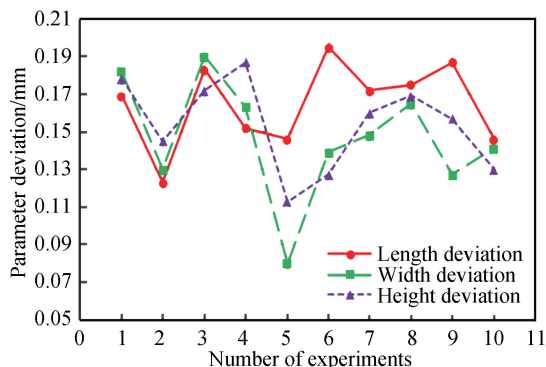


图 8 几何参数误差

Fig.8 Geometric parameter error

可以看出,采用散斑测量方法得到的矩形量块几何参误差控制在 0.2 mm 内,长、宽、高三个参数的均值误差分别为 0.165 mm, 0.147 mm, 0.154 mm, 标准差控制在 0.05 内,分别为 0.022 mm, 0.032 mm, 0.024 mm,保证了视觉测量方法构型的精确性与可靠性^[18].

同时由于提取定位标志点及机床测头中心点坐标存在偏差,导致求解自适应定位模型各定位坐标系位姿矩阵存在偏差,即通过自适应定位方法测得的矩形量块的测量位置存在定位偏差,如图 9.

利用机床测头的三坐标测量功能,接触式测量矩形量块的上表面的四个顶点坐标,即自适应定位的真值,将解算出的欠定位装夹下的位置信息与接触式测量得到的矩形块的真值对比.依据矩形量块工件上满足不共线的至少三个点可以确定其位置和姿态,通常由平移向量 $T_0 = (t_x, t_y, t_z)^T$ 和旋转位姿矩阵 R_0 表示,它与机床坐标系相联系.为了更直观地比较,两种测量方法测得矩形量块的位姿矩阵 R_0 . 通常由三个欧拉旋转角表示,分别是俯仰角 ω 、偏航角 φ 和偏滚角 κ .用上述对于矩形量块工件位置信息的描述方法,检验采用散斑测量的自适应定位方法下的位置偏差和姿态偏差,结果如图 10.

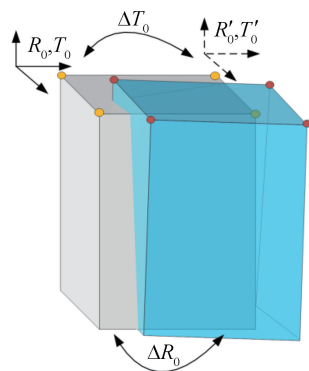
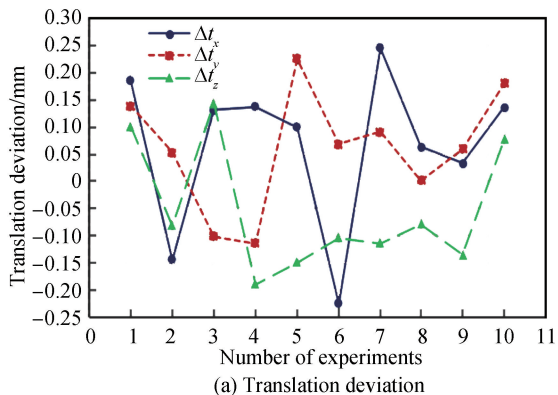
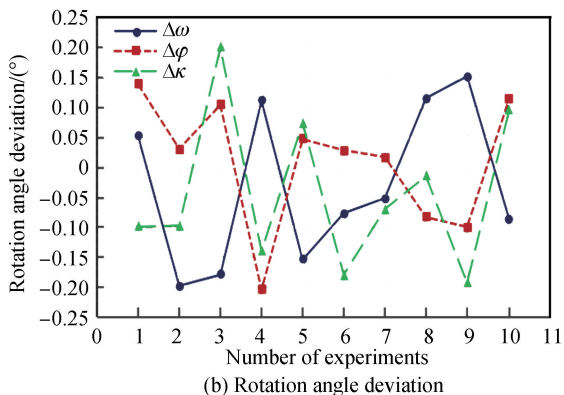


图 9 矩形量块位姿偏差示意图

Fig.9 The sketch of rectangular measurement block pose deviation



(a) Translation deviation



(b) Rotation angle deviation

图 10 自适应定位测量误差

Fig.10 Measurement error of adaptive positioning

为了减小随机误差波动对实验结果的影响,采用10次重复定位实验取均值以减小随机误差的影响。由图10(a)可以看出矩形量块在沿 x, y, z 三个方向的最大平移偏差在0.25 mm以内,每个方向平移偏差均值分别为0.139 mm, 0.104 mm, 0.117 mm。同时由图10(b)看出绕三个轴的最大欧拉旋转角偏差在 0.2° 以内,每个方向旋转角偏差均值分别为 $0.117^\circ, 0.086^\circ, 0.116^\circ$ 。对测量矩形量块工件进行视觉测量模型重构后进行自适应定位姿态求解,实验结果表明,对于欠定位装夹下的复杂矩形量块工件自适应定位具有较高的精度。

5 结论

提出了一种采用散斑测量的复杂曲面叶片修复的自适应定位方法,通过对欠定位装夹标准矩形量块进行视觉测量以及自适应定位模型中各定位坐标系的位姿解算,实现了矩形量块工件在五轴加工中心的自适应定位,避免了传统人工专有夹具定位过程中多次装夹校准的复杂操作。对于缺少原始叶片模型且发生蠕变后的复杂曲面叶片,通过一次装夹固定及视觉测量获取叶片形貌及位置信息实现DMG加工中心自适应定位,在一定程度上减少定位工序,提高发动机叶片减材复形加工的修复效率。实验结果表明,测量矩形块的几何参数均值误差在0.2 mm以内,标准差小于0.05 mm,同时自适应定位测量误差各方向平移向量偏差小于0.25 mm,旋转矩阵欧拉角偏差小于 0.2° ,在现有实验设备条件下具有较好的精度,可为后续对损坏复杂曲面叶片加工复形的自适应定位修复提供实验依据。

参考文献

- [1] DING Hua-peng. Research on model reconstruction of aero-engine damaged blades and laser cladding[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016.
丁华鹏. 航空发动机受损叶片逆向重构与激光熔覆技术研究[D]. 天津:中国民航大学,2016.
- [2] BI QZ, HUANG N D, ZHANG S K, *et al.* Adaptive machining for curved contour on deformed large skin based on on-machine measurement and isometric mapping[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2019, **136**: 34-44.
- [3] HOU F R, WAN N, CHANG Z Y, *et al.* An adaptive repair surface modeling approach for worn blades[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, **94**(1-4): 523-532.
- [4] YU Z J, MA K, WANG Z J, *et al.* Surface modeling method for aircraft engine blades by using speckle patterns based on the virtual stereo vision system[J]. *Optics Communications*, 2018, **411**: 33-39.
- [5] HUANG Ting, XU Hui, FANG Cheng, *et al.* Robots grinding progress planning for complex blade surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, **26**(1): 132-141.
黄婷,许辉,樊成,等. 叶片复杂曲面的机器人抛磨工艺规划[J]. 光学精密工程,2018,**26**(1):132-141.
- [6] VERGEEST J S M, SONG Y, HARTGE D. Freeform object positioning by 3D shape matching without artificial feature points[C]. WSCG, 2004: 483-490.
- [7] SHEN B, HUANG G Q, MAK K L, *et al.* A best-fitting algorithm for optimal location of large-scale blanks with free-form surfaces[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **139**(1-3): 310-314.
- [8] WU B H, WANG J, ZHANG Y, *et al.* Adaptive location of repaired blade for multi-axis milling[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2015, **2**(4): 261-267.
- [9] YAN S J, ZHOU Y F, PENG F Y, *et al.* Research on the localization of the workpieces with large sculptured surfaces in NC machining[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, **23**(5-6): 429-435.
- [10] WU Jia-feng. Research on subdivision and adaptive localization machining technology of super-large components with a developed movable machine tool[D]. Harbin: Harbin institute of technology, 2010.
武加锋. 超大构件分区自适应定位加工及其可移动机床的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [11] LI Peng, ZHANG Yang-yang. Stereo vision localization for mobile robot based on auxiliary target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(S1): 0117006.
李鹏,张洋洋. 采用辅助靶标的移动机器人立体视觉定位[J]. 红外与激光工程,2019,**48**(S1):0117006.
- [12] LIU Wei, GAO Peng, ZHANG Yang, *et al.* High-precision measurement method for 3D shape of large-scale parts[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(3): 0317003.
刘巍,高鹏,张洋,等. 面向大型零部件的三维形面高精度测量方法[J]. 红外与激光工程,2017,**46**(3): 0317003.
- [13] CHEN Yi-chao, LIU Bing-qi, HUANG Fu-yu. Ultra-wide field infrared binocular vision epipolar constraint and spatial positioning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(2): 0211003
陈一超,刘秉琦,黄富瑜. 超大视场红外双目视觉极线约束与空间定位[J]. 光子学报,2019,**48**(2):0211003
- [14] MA Guo-qing, LIU Li, YU Zheng-lin, *et al.* Application and development of three-dimensional profile measurement for large and complex surface[J]. *Chinese Optics*, 2018: 214-228
马国庆,刘丽,于正林,等. 大型复杂曲面三维形貌测量及应用研究进展[J]. 中国光学,2018:214-228.

- [15] WU Wen-shuang, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *et al.* Optical image mosaic methods based on MEMS gyroscope[J]. *Chinese Optics*, 2018, **47**(3): 0310001.
伍文双,冯华君,徐之海,等. 基于 MEMS 陀螺仪的光学图像拼接[J]. *光子学报*, 2018, **47**(3):0310001.
- [16] CHEN Yue, ZHAO Yan, WANG Shi-gang. Fast image stitching method based on SIFT with adaptive local image feature[J]. *Chinese Optics*, 2016, **9**(4): 416-421.
陈月,赵岩,王世刚. 图像局部特征自适应的快速 SIFT 图像拼接方法[J]. *中国光学*, 2016, **9**(4):416-421.
- [17] YANG Shou-ruì, YIN Shi-bin, REN Yong-jie, *et al.* Improvement of calibration method for robotic flexible visual measurement systems[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(12): 3239-3246.
杨守瑞,尹仕斌,任永杰,等. 机器人柔性视觉测量系统标定方法的改进[J]. *光学 精密工程*, 2014, **22**(12):3239-3246.
- [18] YILMAZ O, GINDY N, GAO J. A repair and overhaul methodology for aeroengine components[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2010, **26**(2): 190-201.

Foundation item: The National Natural Science Foundation of China Civil Aviation Joint Research Fund (Nos.U1633104,U1533111), the National Natural Science Foundation of China (No.51705518), the Opening of National Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology (No.DMETKF2017018), the Fundamental Research Business Expenses of Central Universities (No.3122019088), the Open Fund of State Key Laboratory of Precision Testing and Instruments(No. pilab1707), the Scientific Research Project of Tianjin Education Commission(No.2018KJ242)