

基于散斑视觉测量的叶片模型重构

王涛, 李战, 王盛, 乔伟林, 吴军*

中国民航大学航空工程学院, 天津 300300

摘要 叶片是航空发动机的重要部件, 由于工作环境恶劣, 容易出现损坏。对损坏的叶片进行修复是比较经济的做法, 模型重构是航空发动机叶片修复的关键技术之一。为此提出了一种基于散斑视觉测量的叶片模型重构方法。采用散斑视觉系统采集叶片曲面散斑点; 通过散斑点立体匹配得到局部点云数据; 通过点云拼接得出叶片整体点云; 根据叶片点云曲率提取边界点, 通过三次 B 样条曲线对叶片点云边界点进行拟合, 得出叶片包络曲线; 利用包络曲线和点云重建叶片模型; 进行了实验验证, 证明了方法的可行性。

关键词 机器视觉; 模型重构; 立体匹配; 散斑; 点云拼接; 三次 B 样条

中图分类号 TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.011501

Blades Model Reconstruction Based on Speckle Vision Measurement

Wang Tao, Li Zhan, Wang Sheng, Qiao Weilin, Wu Jun*

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

Abstract The blade is an important part of aero engine. It is easy to be damaged due to the bad working environment. It is economical to repair the damaged blade, and the model reconstruction is one of the key technologies of aero-engine blade repair. A blade model reconstruction method based on speckle vision measurement is proposed. The speckle vision system is used to collect the speckle on blade surface, and the local point cloud data are obtained by speckle stereo matching. Then, the entire point cloud of the blade is obtained through the point cloud splicing, at the same time, the boundary points are extracted according to the curvature of the blade point cloud, and the boundary points of the blade point cloud are fitted by the cubic B-spline curve to obtain the envelope curve of the blade. The envelope curve and point cloud are used to reconstruct the blade model. Finally, the experimental verification of the method is given, and the feasibility of the method is proved.

Key words machine vision; model reconstruction; stereo matching; speckle; point cloud registration; three B-spline curve

OCIS codes 150.0155; 030.6140; 100.3010

1 引言

航空发动机叶片为发动机动力能源装置关键部件之一, 其曲面构型直接影响飞行安全^[1]。由于工作环境复杂、恶劣, 发动机叶片极易发生损坏。此外, 工作过程中吸入的外来物的撞击也极易导致叶片的缺损和形变。如直接更换新叶片, 价格昂贵、成本高, 而比较经济的做法是对受损叶片进行修复。因此精确地重建叶片模型用于后续的叶片再制造是

航空发动机维修的关键技术之一^[2]。

近年来, 激光测量法和视觉扫描测量法是叶片测量比较常用的方法。激光测量法利用激光束对叶片做高速扫描进而得到点云数据, 优点是测量速度快、采样频率高, 缺点是点云数据过多且易存在噪声点, 需要精简以完成后续重构, 工作量较大。视觉扫描测量法首先利用一束结构光以一定角度扫描被测叶片表面, 反射的结构光成像在面阵上, 然后通过计算机进行信息提取和处理, 得到叶片曲面信息。

收稿日期: 2018-06-07; 修回日期: 2018-07-04; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1633104, U1533111)、数字制造装备与技术国家重点实验室开放课题(DMETKF2017018)、天津市自然科学基金科技特派员项目(17JCTPJC51800)、中央高校基本科研业务费(3122017017, 3122017033)、精密测试及仪器国家重点实验室开放基金(pilab1707)、国家自然科学基金青年基金项目(51705518)

* E-mail: j_wu@cauc.edu.cn

这种方法测量速度和效率都较高,但测量精度较低^[3-4]。相对于上述点云获取方式,散斑视觉测量具有成本低、结构灵活、校准方便、同步测量、测得点云数量适中、处理算法简便等优点,简化了非接触测量需要在叶片表面粘贴标志点、投射特征光条的繁琐步骤。

在叶片模型重构方法上,国内外研究人员进行了大量研究工作。Bremer等^[5]提出了三维(3D)光学测量法获得发动机叶片截面从而实现模型重构。Piya等^[6]提出通过获取叶片各部分若干个特征截面重建三维造型,在选取截面时通过手动随机选取方法。李启东等^[7]提出曲面特征自适应保持的精简算法用以处理模型重构前的点云处理工作。Zheng等^[8]提出了一种叶片破损边界点自动识别方法,从几何学角度进行修补重构。Gao等^[9]利用Polyworks软件进行叶片建模,提出基于3D非接触测量的叶片修复系统对重建后叶片模型修复。赵娜等^[10]提出基于非均匀有理B样条(NURBS)理论的叶片点云处理和曲面重构的方法,得到三维叶片模

型。然而,在叶片模型重构上还存在难点与问题:1)获取点云数据点数量较大且须进行繁琐的前期数据处理;2)在点云边界点提取和重构模型曲线光滑顺性以及重构模型精度上还需进一步改进与提高。

针对上述叶片曲面点云获取方法中存在点云数据及噪声点过多、测量精度低、测量效率低和模型重构上难以为叶片修复提供准确模型等问题,本文提出了一种基于散斑视觉测量的叶片模型重构方法,基于标志点的点云拼接获得了更加全面的三维数据点。在此基础上,根据获得叶片点云曲率的不同,对叶片点云进行边界点提取;依据三次B样条曲线对叶片点云边界点进行拟合,得出叶片包络曲线;最终用包络曲线和点云建立叶片表面三维模型。

2 叶片点云及标志点的获取

2.1 散斑视觉系统原理

为了得到叶片表面精确完整构型,叶片点云的精确可靠至关重要。搭建了一个散斑视觉系统,图1是散斑视觉系统模型及其二维原理图。

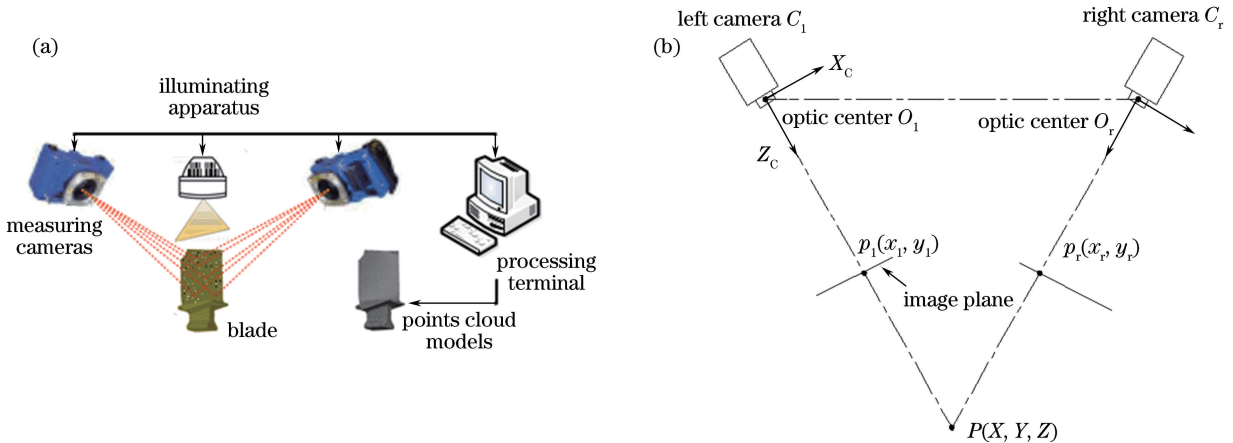


图1 (a)散斑视觉系统及(b)其二维原理图

Fig. 1 (a) Speckle vision system and (b) its two-dimensional schematic diagram

左相机 C_1 、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 $P(X, Y, Z)$ 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,利用散斑点在左右像面的成像点坐标 $p_1(x_1, y_1)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ 解算叶片曲面散斑点的三维空间坐标,实现双目立体视觉测量^[11-12]。

2.2 叶片表面散斑点的立体匹配

传统匹配方法需要取散斑点的特征描述符,然后采用距离准则进行匹配。但是,传统方法耗时较长,不便于叶片表面重构的曲面散斑测量中。

因此,采用KLT(Kanade-Lucas-Tomasi)算法^[13-15]来实现散斑点的初始匹配。其匹配过程如下:

散斑成像系统中,像面左、右部分对应散斑点的仿射变换表达式为

$$\mathbf{x}' = (\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{x} + \mathbf{d}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{xx} & d_{xy} \\ d_{yx} & d_{yy} \end{bmatrix}$ 为变形矩阵, \mathbf{E} 为单位矩阵, \mathbf{d} 是特征窗口中心的平移矩阵, \mathbf{x}' 、 \mathbf{x} 为二维向量。定义 \mathbf{x} 为左像面散斑点非齐次坐标, \mathbf{x}' 为 \mathbf{x} 在右像面对应匹配点的非齐次坐标。给定图像 I 和 J , KLT 算法能找到评价函数(用 ϵ 表示)在最小化时

的变形矩阵 \mathbf{D} 和特征窗口中心的平移矩阵 \mathbf{d} , 得到

$$\varepsilon = \iint_w \{J[(\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{x} + \mathbf{d}] - I(x)\}^2 \omega(x) \mathbf{d}(x), \quad (2)$$

式中: $\omega(x)$ 为加权函数, 可采用高斯分布函数来突出窗口中心区域的作用; $J(\cdot)$ 为图像 J 的灰度分布; $I(\cdot)$ 为图像 I 的灰度分布。由(2)式对 \mathbf{d} 进行求导, 可得

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{D}} = \iint_w \{J[(\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{x} + \mathbf{d}] - I(x)\} \cdot \\ \quad \mathbf{g}\mathbf{x}^T \omega(x) \mathbf{d}(x) = 0 \\ \frac{1}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \mathbf{d}} = \iint_w \{J[(\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{x} + \mathbf{d}] - I(x)\} \cdot \\ \quad \mathbf{g}\mathbf{x}^T \omega(x) \mathbf{d}(x) = 0 \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $\mathbf{g} = (\partial J / \partial x, \partial J / \partial y)^T$, 其中 $\partial J / \partial x$ 和 $\partial J / \partial y$ 为图像 x 、 y 方向上的梯度模值。一般, \mathbf{d} 和 \mathbf{x} 相比是可以忽略的小量, 因此可以将 $J[(\mathbf{E} + \mathbf{D})\mathbf{x} + \mathbf{d}]$ 进行泰勒级数展开, 并只截取线性项, 整理得到

$$\begin{cases} \iint_w \mathbf{g}\mathbf{x}^T (\mathbf{g}^T \mathbf{x}) \omega(x) \mathbf{d}(x) = \\ \quad \iint_w [I(x) - J(x)] \mathbf{g}\mathbf{x}^T \omega(x) \mathbf{d}(x) \\ \iint_w \mathbf{g} (\mathbf{g}^T \mathbf{u}) \omega(x) \mathbf{d}(x) = \\ \quad \iint_w [I(x) - J(x)] \mathbf{g}\omega(x) \mathbf{d}(x) \end{cases}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{u} = \mathbf{D}\mathbf{x} + \mathbf{d}$ 。对于左右像面的散斑点图像, 迭代求解可得到变形矩阵 \mathbf{D} 和特征窗口中心的平移矩阵 \mathbf{d} 。代入(1)式, 即求得左像面 \mathbf{x} 在右像面中的匹配点 \mathbf{x}' , 完成散斑点的初始匹配。在初始匹配的基础上, 为进一步提高匹配精度, 采用外极线约束剔除匹配过程中的误匹配的散斑, 完成左右像面的散斑的最终匹配^[16]。

2.3 三维重建叶片点云及标志点空间坐标

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的误差, 因此通过三角交汇原理对应的散斑匹配点的投影线不能精确相交, 存在交汇误差, 即左右相机交汇线不能准确交于 P 点, 如图 2 所示。因此, 空间点的坐标求解问题转化为距离最优化问题。

本文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, $p_l(x_l, y_l)$ 、 $p_r(x_r, y_r)$ 为左右相机的图像点, \mathbf{V}_l 为

经过 O_l 和 p_l 的标准化向量。设空间点到两条射线的总距离为

$$\mathbf{H} = \|\overline{PM}\|^2 + \|\overline{PN}\|^2, \quad (5)$$

采用非线性优化的方法对 \mathbf{H} 求导, 求得空间点 P 的坐标, 即距离最优化的空间三维特征点。对以上左右匹配的散斑点进行空间坐标求解, 即可得到叶片表面点云数据。

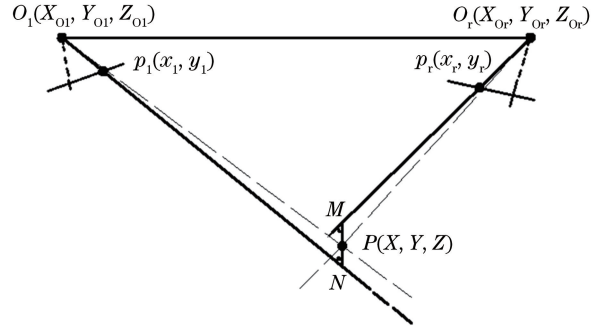


图 2 空间交汇示意图

Fig. 2 Diagram of spatial intersection

对于标志点的空间坐标获取, 方法大体与叶片表面点云的求取方法相同。所不同的是对于左右图像中标志点特征提取与匹配, 采用图像处理的方法, 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处理, 然后对两幅图中对应的三对标志点进行匹配, 同样通过上述三维重建叶片点云的方法进行三维重建标志点空间坐标。

3 基于标志点的叶片点云拼接

3.1 点云拼接原理

由于测量相机单次测量范围有限以及被测叶片表面形貌的复杂性, 无法一次性提取出叶片的整体三维点云坐标, 因此进行分块多次拍摄测量, 再将所有测量数据统一到同一坐标系中, 实现全视觉的三维拼接形成叶片全部点云^[17-18]。本文将叶片固定于旋转平台保证叶片与平台相对位置不变, 中间放置圆形标志点基板并使基板与叶片固连, 实现叶片点云的拼接。

拼接过程中, 叶片可由旋转平台驱动旋转, 使测量相机可以拍摄到叶片的不同部位, 并且需要保证不同的拍摄部位有相互重叠的三个标志点, 以此重叠区域的三个标志点坐标求取各部位相机坐标系与标志点坐标系的位置转换矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} , 进而实现各部位点云的归一化, 即将三维坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 与坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 中测量点云坐标均归一化到同一

坐标系 $Oxyz$ 中,完成点云数据的拼接,原理示意图如图 3 所示。

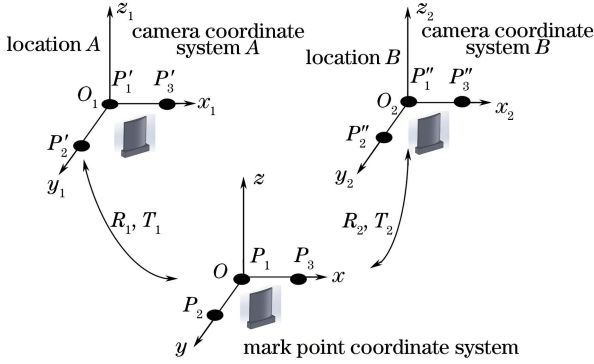


图 3 拼接原理示意图

Fig. 3 Schematic of splicing principle

3.2 点云拼接原理解算

如图 3,位置 A、B 为叶片测量过程中的两个位置, P_1, P_2, P_3 为选定的三个标志点,距离假定已知并且 P_1P_2, P_1P_3 相互垂直,其中 $P_1(0, 0, 0), P_2(0, n, 0), P_3(n, 0, 0)$,补充虚拟标志点 $P_4(0, 0, n)$,并通过正交向量 $\overrightarrow{P_1P_2}, \overrightarrow{P_1P_3}, \overrightarrow{P_1P_4}$ 建立坐标系 $Oxyz$ 。同时 P'_1, P'_2, P'_3 为测量标志点坐标,通过空间点坐标求取原理得出,再由正交向量 $\overrightarrow{P'_1P'_2}, \overrightarrow{P'_1P'_3}, \overrightarrow{P'_1P'_4}$ 建立坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 。其中 P'_4 坐标通过 $\overrightarrow{P'_1P'_2}, \overrightarrow{P'_1P'_3}$ 的叉积后单位化得到,公式为

$$\overrightarrow{P'_1P'_3} \times \overrightarrow{P'_1P'_2} = \mathbf{V}, \quad (6)$$

$$\overrightarrow{P'_1P'_4} = \mathbf{V}/n, \quad (7)$$

式中 $P'_1(x_{11}, y_{11}, z_{11}), P'_2(x_{12}, y_{12}, z_{12}), P'_3(x_{13}, y_{13}, z_{13})$,由(6)和(7)式可得出 P'_4 坐标。

假定位置 A、B 处相机坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 和 $O_2x_2y_2z_2$ 由初始位置与标志点坐标系 $Oxyz$ 重合的坐标系位置转换得到,因此 $O_1x_1y_1z_1$ 与 $Oxyz$ 之间的转换关系由一个旋转矩阵 \mathbf{R} 和一个平移矩阵 \mathbf{T} 实现,公式为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_1 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

分别将 P'_1, P'_2, P'_3, P'_4 和 P_1, P_2, P_3, P_4 坐标点代入下式:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_1 P_1 + \mathbf{T}_1 = P'_1 \\ \mathbf{R}_1 P_2 + \mathbf{T}_1 = P'_2 \\ \mathbf{R}_1 P_3 + \mathbf{T}_1 = P'_3 \\ \mathbf{R}_1 P_4 + \mathbf{T}_1 = P'_4 \end{cases} \quad (9)$$

最终经过求解得出变换矩阵 \mathbf{R}_1 和 \mathbf{T}_1 ,用相同的方法即可求得位置 B 处坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 与坐标系 $Oxyz$ 的变换矩阵 \mathbf{R}_2 和 \mathbf{T}_2 。

由(8)和(9)式推得

$$P = \mathbf{R}^{-1}(P' - \mathbf{T}), \quad (10)$$

分别将各位置叶片点云坐标代入(10)式进行坐标转换,得出归一化的拼接点云坐标。

4 叶片模型重构

由于航空发动机叶片根部的榫头部分作为叶片的安装部分,对叶片表面的构型并无影响,在此,本文将对散斑视觉测量系统测量得到的榫头以上部分拼接点云进行表面模型重构。

4.1 点云数据的边界提取

采用局部邻域二次曲面的方法对叶片点云进行曲率分析,得到所获得点云的曲率变化规律,为下一步依曲率变步长提取边界点提供依据。基于所获得点云的曲率,通过曲率的不同选取不同的步长进行边界点的提取。具体来说,在曲率大的地方采用小的步长,在曲率小的地方采用较大的步长。为了说明这种方法,将叶片的前部点云作为示例进行说明,其他叶片区域具有相似的提取过程。叶片边界点提取的流程如图 4 所示。

首先将叶片的点云投影到 X-Y 平面上,根据点云的 Y 轴坐标比顶部的最低边缘区域大,选择候选点云边界点。其次根据每一步预估出的点云稀疏,选择合适的步长 L ,并计算出相应的曲率差值 δ 。最后,步长 L 的改变取决于曲率差值的不同。具体解释为,当差值 $\delta = c_{i+1} - c_i$ 在最小值 δ_{\min} 和最大值 δ_{\max} 之间时,步长 L 不变;当差值比 δ_{\min} 小时,增加步长 L 的长度;当差值比 δ_{\max} 大时,减少步长 L 的长度。 δ_{\min} 和 δ_{\max} 由点云曲率和稀疏程度决定,表达式为

$$\delta_{\max} = (c_{\max} - c_{\min}) \times \frac{L\lambda}{p}, \quad (11)$$

$$\delta_{\min} = (0.2 \sim 0.4)\delta_{\max}, \quad (12)$$

式中 c_{\max} 和 c_{\min} 代表曲率最大值和最小值, L 为步长, λ 为点云稀疏系数, p 为顶部边缘点云的数量。

4.2 叶片表面数字化模型的构建

得到边界点后,依据三次 B 样条曲线理论对叶片的包络线进行拟合。B 样条曲线具有强大的局部控制能力,可以改进更漂亮的样条曲线。B 样条曲线中,给定 $n+1$ 控制点 $p(i) (i=0, 1, 2, 3, \dots, n)$,也称多边形的顶点,则 k 次 B 样条表达式为

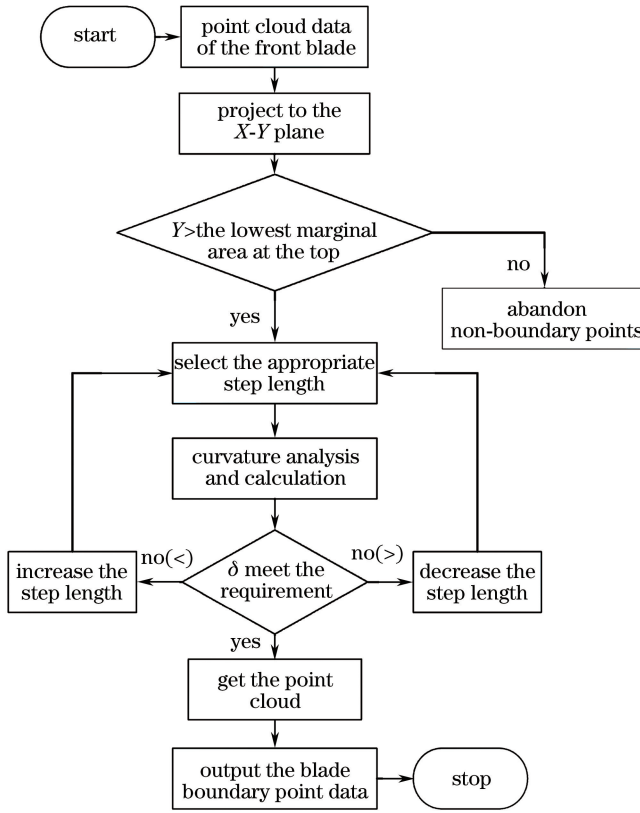


图 4 边界点提取流程图

Fig. 4 Flow chart of boundary point extraction

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u), 1 \leq k \leq n, \quad (13)$$

式中 $N_{i,k}(u)$ 为调和函数, 也为基函数。采用 DeBoorCox 递推公式得到

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k} - u}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u), t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad (14)$$

它是一个节点值作为非负序列。第 k 次 B 样条曲线的节点矢量由 $\mathbf{T} = [t_0, t_1, \dots, t_{n+k+1}]$ 构成。每个基函数都由对应的 $k+2$ 个节点决定。因此, 当 $k=3, i=0, 1, 2, 3$ 时, 基函数为

$$\begin{cases} N_{0,3}(u) = \frac{1}{3!} (1-u)^3 \\ N_{1,3}(u) = \frac{1}{3!} (4-6u^2+3u^2) \\ N_{2,3}(u) = \frac{1}{3!} (1+3u+3u^2-3u^3) \\ N_{3,3}(u) = \frac{1}{3!} u^3 \end{cases}, \quad (15)$$

所以, 三次 B 样条方程为

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 P_i N_{i,3}(u), 0 \leq u \leq 1. \quad (16)$$

根据三次 B 样条曲线理论, 得到前叶片边界点的拟合线, 同理也可得到后叶片点云边界点的拟合线。对于两条拼接曲线的小圆角过渡部分, 采用基准圆搜索算法^[19] 建立基准圆, 并进行拟合线的拼接, 由此得到整个发动机叶片的包络曲线。

将所得到的叶片包络曲线与散斑系统得到的点云相结合, 得到叶片边点混合模型。叶片内部采用最小二乘拟合法, 得到发动机叶片各部分的表面模型。再将拟合曲面连接处光滑拟合处理, 最终得到发动机叶片的整体表面构型。

5 实验验证

5.1 实验平台搭建

为了验证本文提出构型方法的有效性, 进行了实验测试。图 5(a) 为实际搭建的双目视觉测量平台, 包括叶片、光学平台、双目工业 COMS 相机 (像素 5.0×10^6 pixel, 分辨率为 $2590 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$, 光学尺寸为 $1/2.5$, 焦距 $f=16 \text{ mm}$)、旋转平台、标志点板、三脚架和计算机。测量系统内参采用张正友平面棋盘格标定法进行标定, 靶标如图 5(b) 所示。图 6 为双目相机标定内参残差分布图, 从图 6 可以看出, 内参标定的平均残差小于

0.24 pixel,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 R 和平

移矩阵 T)的标定结果如表 1 所示。

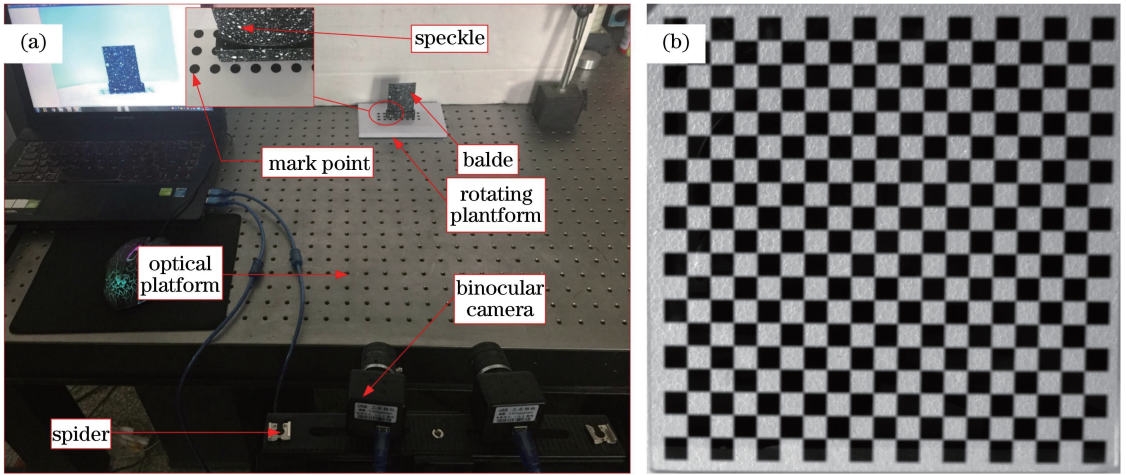


图 5 (a)实际测量平台及(b)标定靶标

Fig. 5 (a) Actual measuring platform and (b) calibration target

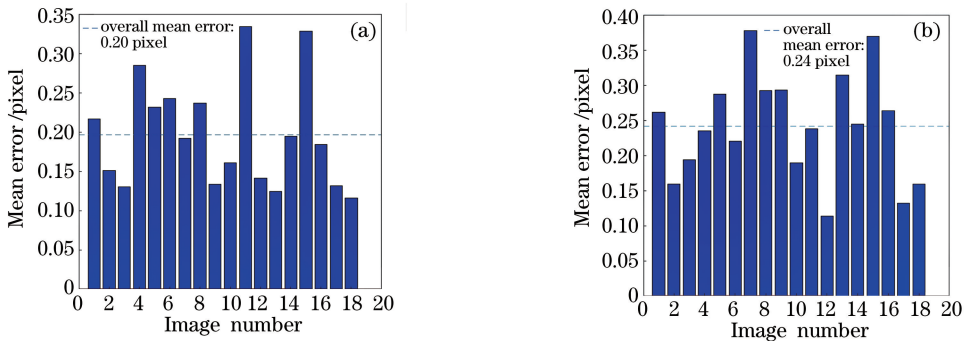


图 6 双目相机内参标定残差图。(a)左相机;(b)右相机

Fig. 6 Binocular camera internal parameter calibration residuals. (a) Left camera; (b) right camera

表 1 测量系统外参标定结果

Table 1 Calibration results of measuring system external parameters

External parameter	Matrix representation
R	$\begin{bmatrix} 0.9840 & 0.0160 & -0.1775 \\ -0.0181 & 0.9998 & -0.0106 \\ 0.1773 & 0.0137 & 0.9841 \end{bmatrix}$
T / mm	$[-108.5240 \quad -3.4861 \quad 1.9005]^T$

5.2 叶片点云及标志点的获取

在标定基础上,对相机采集图像进行校准(去除

镜头畸变影响),校准图像如图 7(a)所示。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,以前叶片为例,初始匹配共得到 5175 对匹配点,剔除误匹配得到 4780 对匹配点,匹配准确率为 92.37%。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 7(b)所示,可以看出,采用 KLT 算法结合外线约束可以实现较好的匹配结果,叶片其余部分匹配过程与此类似。

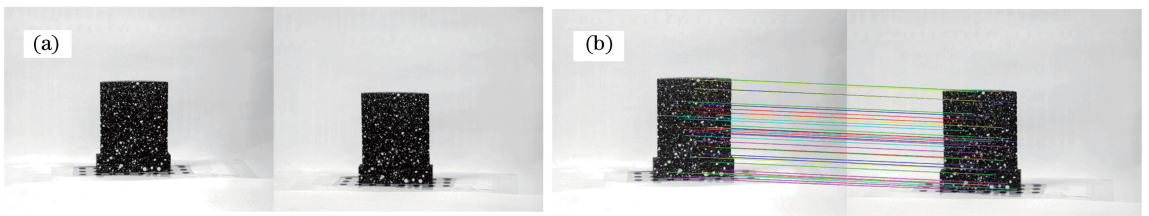


图 7 散斑点的立体匹配。(a)待匹配图像;(b)匹配图像

Fig. 7 Stereo matching of speckles. (a) Images to be matched; (b) matching images

图 8 为在对应匹配点的基础上,采用最小距离目标函数的方法得出点云数据可视化后的结果。其中前叶片共得到 4780 个点云坐标,后叶片共得到 4984 个点云坐标,相较于三维扫描仪测得的数十万个数据点,数量较为适中^[20]。从图 8(a)、(b)可以看

出,重建的散斑点云分布具有随机性,点云数量适中,能较好地反映叶片曲面构型的特点。

图 9 为对部分标志点的特征提取流程图,通过对标志点的匹配与空间解算得出其空间坐标,进而实现点云拼接。

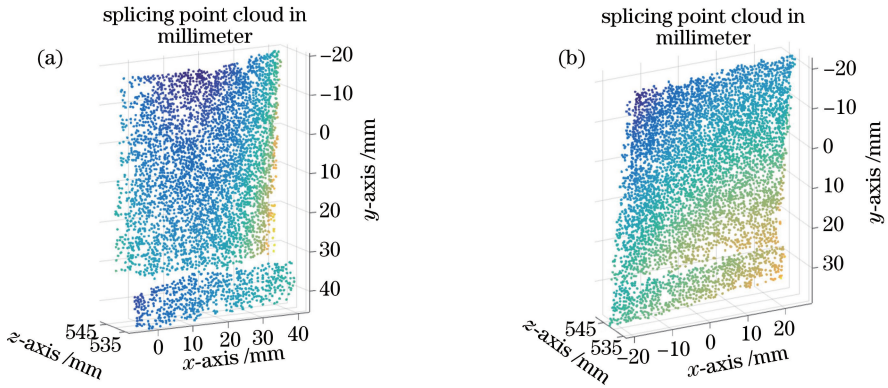


图 8 叶片点云重建图。(a)前叶片点云;(b)后叶片点云

Fig. 8 Blade point cloud reconstruction. (a) Front blade point cloud; (b) rear blade point cloud

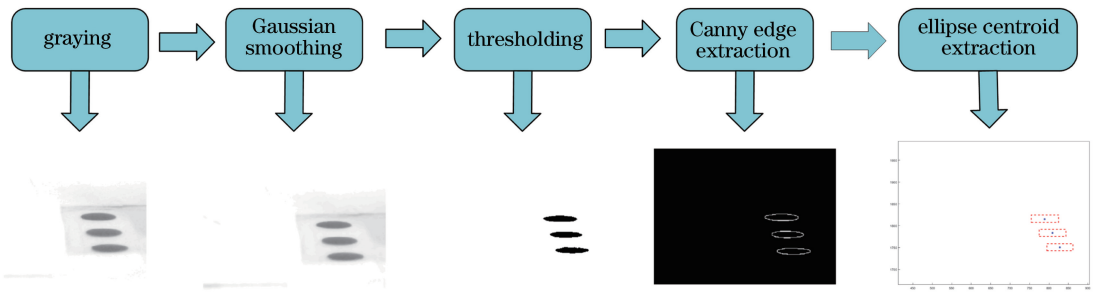


图 9 部分标志点的图像处理

Fig. 9 Image processing of some markers

5.3 基于标志点的点云拼接

依据点云拼接原理,对各部分点云数据进行坐标运算,得到拼接点云数据,并将其可视化,如图 10 所示。

叶片为例,不难发现依据三次 B 样条曲线理论可以有效地近似发动机前叶片的包络曲线,并且依速率变步长方法提高了拟合包络线的光顺性,如图 11(b)所示。

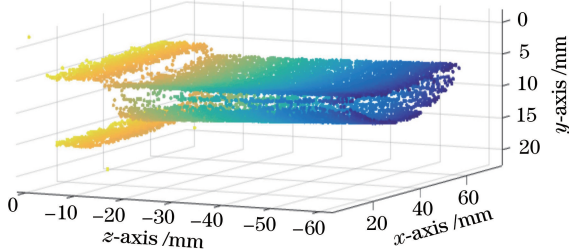


图 10 可视化拼接叶片表面点云

Fig. 10 Visual splicing of blade surface point cloud

5.4 叶片表面模型重构

图 11(a)为依据边界点提取算法获得前叶片的边界点,同理可得出叶片其他部位的边界点。以前

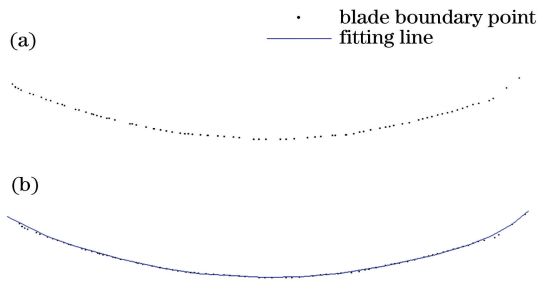


图 11 (a)前叶片边界点;(b)配合三次 B 样条的拟合线

Fig. 11 (a) Boundary points of front blade; (b) fitting curve with the cubic B-spline method

叶片点云的各部分边界点的拟合曲线的拼接过程如图 12 所示,由此得到发动机叶片的整个包络曲线。图 13(a)为发动机前叶片点云拟合曲面,图 13

(b)为发动机后叶片点云拟合曲面,图 13(c)为发动机叶片整体表面构型。叶片的表面构型方法具有

光滑边界和精度曲率变化的优点,并能反映叶片的几何特性。

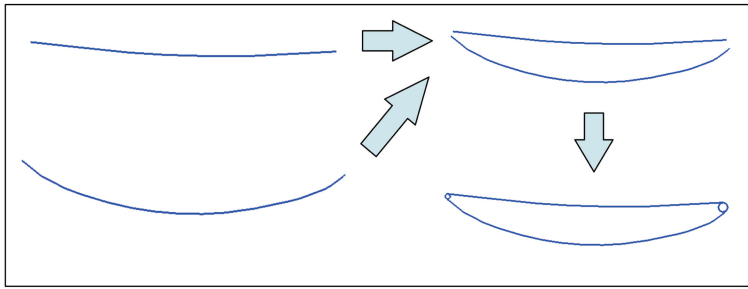


图 12 叶片点云拟合线的拼接

Fig. 12 Splicing of blade point cloud fitting

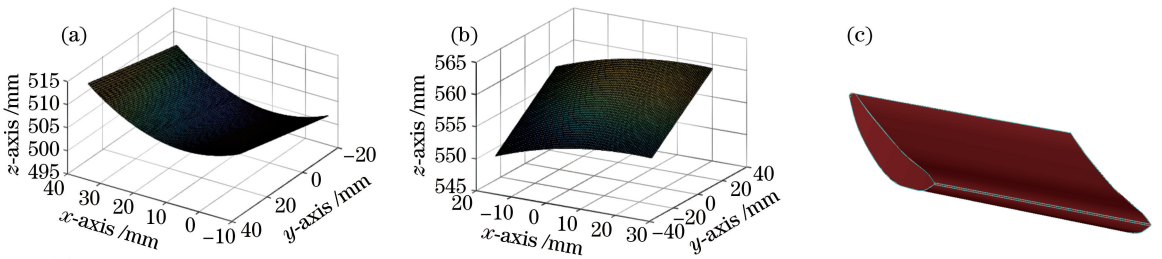


图 13 (a)前叶片点云拟合曲面;(b)后叶片点云拟合曲面;(c)叶片整体表面构型

Fig. 13 (a) Fitting surface of front blade point cloud; (b) fitting surface of rear blade point cloud; (c) overall surface configuration of the blade

5.5 结果与分析

为了验证测量系统测量点云数据的精确性及曲面构型方法的可靠性,重复测量实验 5 次,每次实验叶片随机转动微小角度,对每次获取的点云数据拟合拼接后进行模型重构。然后对点云数据拟合出的叶片曲面进行拟合优度分析,分析指标为误差平方和(SSE)、拟合相关系数(R-square)、均方根误差(RMSE),拟合优度如表 2 所示。

表 2 点云拟合优度分析

Table 2 Point cloud fitting analysis

Test number	SSE	R-square	RMSE
Test 1	45.62	0.9958	0.2895
Test 2	40.19	0.9969	0.2703
Test 3	37.48	0.9967	0.2740
Test 4	43.59	0.9945	0.2832
Test 5	42.51	0.9964	0.2810

表 3 叶片曲面几何参数误差

Table 3 Geometrical parameter errors of blade surface

Parameter	Test 1	Test 2	Test 3	Test 4	Test 5	Measured value /mm	Actual value /mm	Error value /mm
Chord length	46.142	46.126	46.207	46.143	46.131	46.150	46.294	0.144
Height	50.238	50.207	50.186	50.263	50.133	50.205	50.374	0.169
Max thickness	7.665	7.713	7.687	7.702	7.678	7.689	7.836	0.147
Arc length	48.941	48.937	49.049	48.977	49.056	48.992	49.145	0.153

从表 2 可以看出,由点云数据拟合拼接出的点云曲面,R-square 大于 0.99, RMSE 小于 0.3,表明拟合效果较好,验证了测量点云数据的精确性较高。

同时,对叶片曲面的几何参数进行测量,叶片曲面几何参数的实际值由 Global 桥式三坐标测量机(测量精度为 0.001 mm)测得,测量值为 5 次实验的平均值。测量指标主要为弦长、高度、最大厚度以及弧线长,测量结果如表 3 所示。

从表 3 可以看出,测得叶片曲面模型的各项几何参数中,弦长、高度、最大厚度和弧线长的均值误差小于 0.2 mm,可知拟合曲面与实际曲面比较接近。对点云数据进行拟合线拼接、曲面重构,最终测量实验结果表明,所得结果符合工业误差要求,进一步验证了测量方法及构型方法的精确性与可靠性。

6 结 论

航空发动机叶片表面构型对叶片修复及再加工具有重要意义,鉴于此,提出了一种采用散斑视觉测量的叶片模型重构方法。散斑视觉测量所获得点云具有随机性分布、点云数量适中且噪声点较少、处理较为方便等优点,在此基础上,对叶片点云进行模型重构得到叶片表面模型。该构型方法的优点是具有光滑的边界、精确的曲率变化,能精确地反映出实际叶片的几何特征。通过实验验证可知, R -square 大于 0.99, RMSE 小于 0.3,同时叶片曲面几个重要参数误差均小于 0.2 mm,反映了测量数据的准确性和构型方法的有效性,能为受损叶片的修复和再加工提供依据。

参 考 文 献

- [1] Ding H P. Research on model reconstruction of aero-engine damaged blades and laser cladding [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016: 1-6.
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: 1-6.
- [2] Yu Z J, Song S T, Wang T, *et al.* Digital modeling of aircraft engine blade based on reverse engineering [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(17): 122-125.
于之靖, 宋四同, 王涛, 等. 基于逆向工程的航空发动机叶片数字化建模[J]. 机床与液压, 2011, 39(17): 122-125.
- [3] Escamilla G A P, Kobayashi F, Otani Y. Three-dimensional surface measurement based on the projected defocused pattern technique using imaging fiber optics[J]. Optics Communications, 2017, 390: 57-60.
- [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] Bremer C. Adaptive Strategies for manufacturing and repair of blades and blisks[C]// ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, & Air. 2000.
- [6] Piya C, Wilson J M, Murugappan S, *et al.* Virtual repair: geometric reconstruction for remanufacturing gas turbine blades[C]// ASME International Design Engineering Technical Conferences & Computers & Information in Engineering Conference, 2011: 895-904.
- [7] Li Q D, Li W L, Zhou L P. A surface feature-preserving point cloud simplification method for aviation blades [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(16): 2204-2212.
李启东, 李文龙, 周莉萍. 一种曲面特征保持的航空叶片点云精简方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(16): 2204-2212.
- [8] Zheng J M, Li Z G, Chen X. Worn area modeling for automating the repair of turbine blades [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 29(9/10): 1062-1067.
- [9] Gao J, Chen X, Yilmaz O, *et al.* An integrated adaptive repair solution for complex aerospace components through geometry reconstruction [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 36(11/12): 1170-1179.
- [10] Zhao N, Li L Y, Liu J, *et al.* A three-dimensional reconstruction methodology for aeroengine blade welding repair[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(6): 73-76, 117.
赵娜, 李亮玉, 刘杰, 等. 飞机叶片焊接修复中的三维测量重构技术[J]. 焊接学报, 2014, 35(6): 73-76, 117.
- [11] Wang S, Xu X. 3D reconstruction based on horopter [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(5): 0515004.
王珊, 徐晓. 基于双目单视面的三维重建[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 0515004.
- [12] Cheng M J, Shen X J, Xiao J J, *et al.* Three-dimensional calibration of fisheye camera based on laser scanner[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0315001.
程梦娇, 申夏晶, 肖江剑, 等. 基于激光扫描的鱼眼相机三维标定方法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0315001.
- [13] Zhang H Y, Yu Z J. Initial displacement estimation method for speckle image based on marker matching [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0303001.
张红颖, 于之靖. 基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0303001.
- [14] Cai J, Huang P F. Research of a real-time feature point tracking method based on the combination of improved SURF and P-KLT algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(5): 1204-1214.
蔡佳, 黄攀峰. 基于改进 SURF 和 P-KLT 算法的特征点实时跟踪方法研究[J]. 航空学报, 2013, 34(5): 1204-1214.
- [15] Yu Z J, Ma K, Wang Z J, *et al.* Marker matching

- method with improved KLT algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020301.
- 于之靖, 马凯, 王志军, 等. 采用改进 KLT 算法的标志点匹配方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020301.
- [16] Chen B, Sun T Q, Liu A X. Influence of speckle noise on image registration based on feature point matching [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 121103.
- 陈波, 孙天齐, 刘爱新. 散斑噪声对基于特征点匹配的图像配准的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 121103.
- [17] Wang C B. Multi-view 3D reconstruction based on binocular stereo vision [D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2013: 40-51.
- 王长波. 基于双目视觉的多角度三维重建[D]. 泉州: 华侨大学, 2013: 40-51.
- [18] Wu Q Y, Zeng Z, Zhang B C, *et al.* A 360° three-dimensional measurement system and its calibration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0404002.
- 吴庆阳, 曾增, 张佰春, 等. 一种新的 360° 三维测量系统及标定技术[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0404002.
- [19] Wang H, Wang L W, Wang T, *et al.* Method and implementation of remanufacture and repair of aircraft engine damaged blades[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(3): 1036-1048.
- 王浩, 王立文, 王涛, 等. 航空发动机损伤叶片再制造修复方法与实现[J]. *航空学报*, 2016, 37(3): 1036-1048.
- [20] Huo H X. Large complex malleable cast a 3D-scanning point cloud data denoising and smoothing method research [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2017: 29-30.
- 霍洪旭. 大型复杂铸锻件三维扫描测量与数据处理方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017: 29-30.