

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.04

基于曲率自适应的航空零件法矢量测量研究

叶帆¹, 张洋¹, 兰志广¹, 李汝鹏², 刘巍¹, 邢宏文², 葛恩德², 王福吉¹

(1. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国家商用飞机制造工程研究中心, 上海 200127)

摘 要: 现有的法矢量测量技术无法满足测量准确度和实时性的双重要求, 法矢量计算方法不能适用于不同曲率的曲面。利用双目立体视觉, 本文提出了一种基于曲率自适应的法矢量测量方法。首先, 在双目立体视觉的基础上, 基于变曲率曲面特征建立制孔区域曲面模型, 提出投影点的布局方法; 然后, 基于三维重建的投影点数据, 提出了基于曲面曲率自适应识别的法矢量计算方法; 最后, 针对小曲率曲面样件的测量结果, 与三坐标测量仪测得的法矢量进行对比, 用以验证本双目视觉测量方法的精度。实验结果表明: 该方法测量法矢量误差为 1.6° 。该方法可有效提高法矢量测量的准确度, 满足大型航空零件现场测量的工程要求。

关键词: 双目立体视觉; 特征光源布局; 曲率自适应; 法矢量求解

中图分类号: TB89

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0013-07

Research on Normal Vector Measurement of Aero-parts Based on Adaptive Curvature

YE Fan¹, ZHANG Yang¹, LAN Zhiguang¹, LI Rupeng², LIU Wei¹,
XING Hongwen², GE Ende², WANG Fuji¹

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology., Dalian 116024, China;

2. Commercial Aircraft Corporation of China Ltd, Shanghai 200127, China)

Abstract: The existing technology of the measurement of normal vector cannot meet the requirements of accuracy and timeliness. The methods of calculating normal vector cannot be applied to surfaces with different curvatures. In this paper, a method of normal vector measurement based on adaptive curvature is proposed by using binocular stereo vision. Firstly, based on the binocular stereo vision, the surface model of the hole point is established in accordance with the features of the variable curvature surface, and the layout method of the projected point is proposed. Then, according to the 3D coordinates of the projected points, the method of calculating normal vector based on the adaptive recognition of curvature is proposed. Finally, the measurement results of the small curvature surface part are compared with the normal vectors measured by CMM, to verify the accuracy of the method in this paper. The experimental results show that the error of the method is 1.6° . The method can effectively improve the measurement accuracy of normal vector and satisfy the requirements of the in-site measurement of large aerial parts.

Key words: binocular vision; layout of lighting; curvature adaptation; vector calculation

0 引言

大型航空零件具有类型多、数量多、尺寸跨度大、变曲率等特征, 因此飞机的制造和装配是一项技术难度高、过程复杂的系统任务。在飞机装配过程中的自

动钻铆工序, 为了确保铆接及螺栓连接孔的法向准确度, 需要实时测量零件曲面上制孔点处的法矢量, 其中法矢量的测量准确度决定了制孔准确度和装配质量。而针对大型变曲率的工件, 快速高准确度地测量制孔点法矢量, 可以有效提高自动钻铆工艺的效率和质量, 因而基于曲率自适应的航空零件法矢量测量方法研究至关重要。

目前, 法矢量测量方法可以分为接触法和非接触法。其中接触法主要使用三坐标测量仪测量待测表面的大量测点, 最后利用点云拟合求解。近年来非接触法测法矢量有了很多的发展。如西北工业大学的秦现生等人以五坐标自动钻铆机床为研究对象, 利用电涡流传感器测量制孔点周围的三个点的空间坐标, 三点

收稿日期: 2017-04-01; 修回日期: 2017-05-05

基金项目: 国家重点研究发展计划(973计划)(2014CB046504); 优秀青年科学基金(51622501); 中国商飞创新基金专项(WBS.F-SFKT-0507); 国家自然科学基金(51227004, 51375075); the Liaoning Provincial Natural Science Foundation of China (2014028010)

作者简介: 叶帆(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大视场测量技术、图像处理阈值分割技术。

构成平面的法矢量作为求解结果^[5]。西北工业大学的应高明等人采用激光测距传感器测量曲面上制孔点及其周围的四个点的空间坐标,并由五个点拟合二次曲面,进而求解法矢量^[6]。西北工业大学的谢友金等人则用球面拟合制孔点周围的局部曲面,由计算获得球面球心与制孔点的三维坐标求解法矢量^[4]。哈尔滨工业大学的段曙凯采用单目视觉测量法矢量,他把十字型激光投射在待测曲面上,制孔点为十字中心,并利用视觉方法求解十字激光在制孔点处的两条切矢,通过切矢的叉乘计算制孔点的法矢量^[10]。

目前,曲面法矢量测量的研究具有三个难点:无法对不同曲率零件进行自适应的测量调整;难以同时保障测量准确度和实时性;测点的位置分布以及高可靠性的法矢量求解算法。而双目立体视觉方法具有测量准确度高、实时性好、非接触、可靠性高等优点,用于法矢量测量存在潜在优势。

本文在分析目前自动制孔领域法矢量测量方面采用的各种方法的基础上,提出了一种基于双目立体视觉的法矢量测量方法;并研究布置激光点的图案,提出曲率自适应的法矢量求解算法;最后,针对小曲率曲面样件的测量结果,与三坐标测量仪测得的法矢量进行对比,用以验证本双目视觉测量方法的准确度。

本文基于双目立体视觉,提出一种曲率自适应的快速高精度法矢量测量方法。本文首先介绍了的测量原理;然后,提出了提取算法;最后,对所提出的进行了验证实验。

1 法矢量测量的总体方案

本课题解决的实际工程问题是航空结构件表面制孔点法矢量的实时测量,目的是在自动钻孔过程中对机床主轴进行方向校正,提高加工孔的法向准确度。研究重点是法矢量测量准确度和实时性两大要求。本课题的总体方案示意图如图 1 所示。

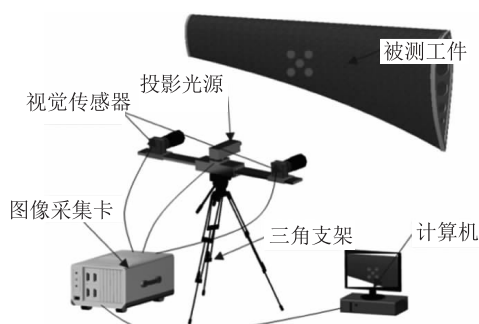


图 1 硬件组合示意图

本研究采用的法矢量测量的基本方法是双目立体视觉法,通过投影点组的方式可以快速获取待测工件表面指定点的三维坐标。在此方法的基础上,本研究设计了一套测量和求解的方案。其中,测量方案包括辅助投影光源在待测点区域投影的布局,以及双目视觉测量坐标系到最终用户坐标系的转换方案。求解方案是利用视觉方法测量的各投影点的空间坐标,计算得到指定点的法矢量信息,并反馈最终结果。本课题流程图如图 2 所示。

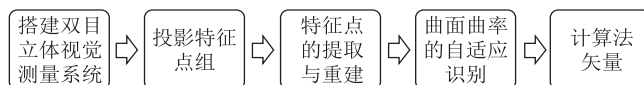


图 2 基于双目立体视觉的法矢量测量系统流程图

本文的研究重点包括辅助投影光源的布局、基于曲率自适应的法矢量求解算法以及准确度评估。

2 特征投影点的布局与提取

2.1 制孔区域曲面模型及投影点的布局

为了测量曲面制孔点处的法矢量,需要对测量区域进行分析。首先,选定连续表面上制孔点的周围区域(为了避免复杂曲面的干扰,选取的制孔点区域是单一凸曲面,即制孔点区域内不存在上凸曲面和下凸曲面同时存在的情形);然后,对制孔点区域进行划分(以制孔点为中心,按照法矢量在表面方向变化率的大小,可以将制孔区域分为如图 3 所示的三个部分)。

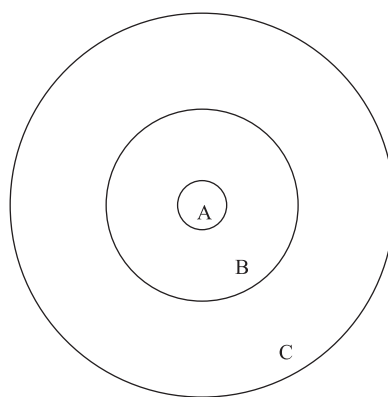
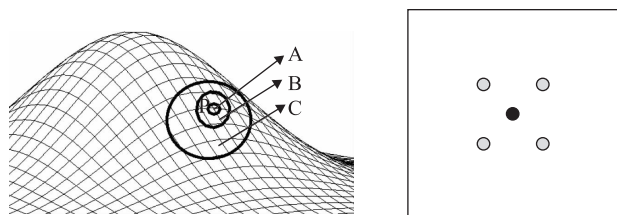


图 3 制孔区域曲面模型示意图

图 3 中, A 区域的形状为平面,区域内各点的法矢量相同,即 A 范围内任意位置矢量 $\vec{r}$, 满足 $d\vec{n}/d\vec{r} = 0 \pm 0.5\varepsilon$, 其中, ε 为测量方法的误差; B 区域的形状近似球面的一部分,区域内各点的曲率为恒定值 ρ , 法矢

量在各方向均匀变化, 即 B 范围内任意位置矢量 $\vec{r}$, 满足 $d\vec{n}/d\vec{r} = \rho \pm 0.5\varepsilon$; C 区域各点的法矢量变化不规则, 可能呈现多种曲面形态, 即 $d\vec{n}/d\vec{r} < (\rho - 0.5\varepsilon)$ 或 $d\vec{n}/d\vec{r} > (\rho + 0.5\varepsilon)$, 又或者 $d^2\vec{n}/d\vec{r}^2 \neq 0$ 。

对于实际制孔点表面, 测点选在 A 和 B 区域内, 可以准确预测曲面的信息, 从而将最终求解的法矢量误差降至最低。然而因为实际表面情形复杂, 如图 4(a) 所示, 对于曲面上任意一个制孔点区域, A 和 B 区域的面积可能很小, 而且两个区域的实际位置很难准确判断, 因此在测量误差允许范围内应该尽量减小测点与制孔点的距离。考虑测量方法和算法的效率问题, 应该减少测点数量。结合 A 和 B 区域连续性的特征, 尤其是针对 B 区域, 将测点环绕制孔点均匀分布, 可以更准确地反映制孔区域的曲面特征。综上所述, 本文采用如图 4(b) 所示的投影点分布方法, 中间黑点为投影中心点, 用于校准制孔点位置和辅助计算测点; 周围均匀分布灰点为环绕特征点组。



(a) 对于任意曲面制孔点的区域划分

(b) 投影特征点的分布

图 4 制孔区域曲面模型及投影点的布局

实际投影特征点组时, 多特征点环绕投影中心点均匀分布, 而投影中心点与实际制孔点不可能完全重合, 从而造成误差。假设制孔点区域的曲率均为 ρ , 中心投影点的直径为 d , 投影中心点法矢量与制孔点法矢量的夹角为 $\theta = \arcsin(0.5\rho d)$, 即为投影中心点与制孔点不重合造成的误差。对于曲率越小的曲面, 此误差越小。

2.2 特征点的提取与重建

采用双目摄像机拍摄投影在制孔点区域的所有测点 $A_i \begin{smallmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{smallmatrix} = 0, 1, \dots, 4$, 投影中心点为 A_0 。记左摄像机拍摄的图像中的各投影点为 A_{li} , 右摄像机拍摄的图像中的各投影点为 A_{ri} 。

对图像进行处理, 采用 *canny* 算子检测边缘, 检索投影点轮廓包含的单连通区域, 并使用灰度重心法提取每个投影点的中心图像坐标。记左摄像机拍摄图像中提取得到的投影点中心坐标为 $A_{li} \begin{smallmatrix} x_{li} \\ y_{li} \end{smallmatrix}$, 右摄像机拍摄图像中提取得到的投影点中心坐标

$A_{ri} \begin{smallmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{smallmatrix}$ 。

根据左右对应投影点的中心坐标 $A_{li} \begin{smallmatrix} x_{li} \\ y_{li} \end{smallmatrix}$ 和 $A_{ri} \begin{smallmatrix} x_{ri} \\ y_{ri} \end{smallmatrix}$ 进行三维重建。第 i 个投影点的三维坐标 $A_i \begin{smallmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{smallmatrix}$ 求解公式见式(1)。

$$\begin{aligned} X_i &= \frac{Zx_{li}}{f_l} \\ Y_i &= \frac{Zy_{li}}{f_l} \end{aligned} \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{f_l(f_r t_x - x_{ri} t_z)}{x_{ri}(f_7 x_{li} + r_8 y_{li} + f_l r_9) - f_r(r_1 x_{li} + r_2 y_{li} + f_l r_3)}$$

式中: f_l 和 f_r 分别为左右摄像机的焦距; $R = \begin{smallmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{smallmatrix}$ 为左摄像机坐标系到右摄像机坐标系的旋转矩阵; $T = \begin{smallmatrix} t_x & t_y & t_z \end{smallmatrix}$ 为左摄像机坐标系到右摄像机坐标系的平移矩阵。这里的各参量可以通过双目立体视觉系统的标定获得。

3 基于曲率自适应的法矢量计算方法

3.1 曲面曲率的自适应识别

传统的法矢量都是在反映曲面特征的基础上进行计算的。平面拟合方法认为制孔区域是一个平面, 而测点分布在图 3 的 A 区域内则能得到精确的结果; 球面拟合方法认为制孔区域是一个球面, 而测点应该分布在 B 区域内; 二次曲面拟合方法认为制孔区域型面是一个二次的曲面, 而测点应该分布在 B 和 C 区域内。本文认为, 针对不同的曲面特征, 应该采用不同的算法计算法矢量。首先, 应该建立曲率判定准则衡量曲面的弯曲程度。

根据前面得到的各投影点三维坐标 $A_i \begin{smallmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{smallmatrix}$, 取 A_0, A_1, A_2 三个不共线的点构成基准平面 S , 该平面的法向量为

$$\vec{N}_s = \begin{smallmatrix} x_{A_0} \\ y_{A_0} \\ z_{A_0} \end{smallmatrix} - A_1 \begin{smallmatrix} x \\ y \\ z \end{smallmatrix} \times \begin{smallmatrix} x_{A_0} \\ y_{A_0} \\ z_{A_0} \end{smallmatrix} - A_2 \begin{smallmatrix} x \\ y \\ z \end{smallmatrix} \quad (2)$$

定义某一点 $A_i \begin{smallmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{smallmatrix} \neq 0, 1, 2$ 到 A_0 的矢量与 $\vec{N}_s$ 夹角的余角, 作为该点偏离基准平面 S 的偏差角 δ_i , 计算见式(3)。

$$\delta_i = \frac{\pi}{2} - \arccos \frac{\begin{smallmatrix} x_{A_0} \\ y_{A_0} \\ z_{A_0} \end{smallmatrix} - A_i \begin{smallmatrix} x \\ y \\ z \end{smallmatrix} \cdot \vec{N}_s}{|A_0 - A_i| |\vec{N}_s|} \quad (3)$$

根据 2.1 节, 本文使用五个测点, 可以得到两个投影点的偏差角 δ_3 和 δ_4 。设定曲率大小判定阈值 θ_0 , 通过实验并基于实际准确度需求确定此值。当 $|\delta_3| + |\delta_4| \leq \theta_0$ 时, 制孔区域呈现平面或小曲率曲面特征; $|\delta_3| + |\delta_4| > \theta_0$ 时, 制孔区域呈现中大曲率的曲面特征。对于连续无缺陷、中大曲率的曲面, 如果 $\delta_3 \delta_4 \geq 0$,

说明两个点在基准平面 S 的一侧, 曲面呈现如柱面、球面、抛物面、锥面等形状; 如果 $\delta_3\delta_4 < 0$, 说明两个点在基准平面 S 的两侧, 曲面呈现如马鞍面、单叶双曲面等复杂形状。由于在局部区域多种二次曲面可以互相替代, 并且为了简化运算过程, 提高算法鲁棒性, 这里舍去三元二次且各元最高次项都是二次的曲面方程, 即不考虑球面、锥面和双曲面等情况。

下面将根据前面得到的各坐标点计算法矢量, 并重点研究针对不同制孔区域型面信息采用的自适应法矢量求解算法。

3.2 平面零件的法矢量求取

根据 3.1 节的阐述, 当 $|\delta_3| + |\delta_4| \leq \theta_0$ 时, 制孔区域呈现平面或小曲率曲面特征, 此时应该将制孔区域当作平面处理。综合考虑算法效率, 这里采用平面主元分析法。根据前面得到的各投影点三维坐标 $A_i \rightarrow X_i, Y_i, Z_i$, 通过对这些坐标进行线性组合, 可以求解得到这组数据中的主元信息。如果线性组合中每个点坐标的权值都相同, 求解的主元可以理解为这组点关于某个平面的核, 每个测点到主元的矢量都在该平面内, 该平面对应的法矢量即为制孔点的法矢量。平面主元分析法的优点在于简单快捷, 能很好地满足本课题实时性的要求, 能用于小曲率曲面或平面上制孔点的法矢量测量。但是当曲面的曲率较大时, 本方法无法正确反映待测点法矢量, 计算准确度较差。

所有投影点构成的扩展矩阵记为

$$P = \begin{bmatrix} A_0^T & A_1^T & A_2^T & A_3^T & A_4^T \end{bmatrix} \quad (4)$$

由公式(4)计算五个投影点的主元 $\bar{Q}$ 。

$$\begin{aligned} \bar{X} &= \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 X_i \\ \bar{Y} &= \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 Y_i \\ \bar{Z} &= \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 Z_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\bar{Q} = \begin{bmatrix} \bar{X} & \bar{Y} & \bar{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T$$

计算 $\begin{bmatrix} P \\ \bar{Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ \bar{Q} \end{bmatrix}^T$ 最小特征值对应的特征向量, 即为五个投影点的法矢量 $\bar{N}$ 。

3.3 曲面零件的法矢量求取

对于大曲率的曲面, $|\delta_3| + |\delta_4| > \theta_0$ 时, 平面主元分析无法精确反映制孔点区域特征。如果把制孔点区域看作二次曲面, 对测点进行拟合, 可以得到更为精确的求解结果。

本方法采用非线性拟合的方法拟合简化二次曲面,

拟合的基本原理是最小二乘法。排除具有平面特征的曲面方程, 结合 3.1 节的分析, 采用的目标函数为

$$Z = AX^2 + BXY + CY^2 + D \quad (6)$$

求解方程组(6)。

$$G = \begin{bmatrix} X_0^2 & X_0Y_0 & Y_0^2 & 1 \\ X_1^2 & X_1Y_1 & Y_1^2 & 1 \\ X_2^2 & X_2Y_2 & Y_2^2 & 1 \\ X_3^2 & X_3Y_3 & Y_3^2 & 1 \\ X_4^2 & X_4Y_4 & Y_4^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \begin{bmatrix} A & B & C & D \end{bmatrix}^T \\ P &= \begin{bmatrix} Z_0 & Z_1 & Z_2 & Z_3 & Z_4 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$G^T G \bar{x} = G^T P$$

得到各参数 A, B, C, D 的值。

确定法矢量的方向。通过上述二次曲面拟合方法, 获得高精度的制孔点邻域型面方程 $S = AX^2 + BXY + CY^2 + D - Z = 0$, 其曲面上某一点 $O \rightarrow X_0, Y_0, Z_0$ 的法矢量通过公式(8)获得。

$$\begin{aligned} \left. \frac{\partial S}{\partial X} \right|_{\rightarrow X_0, Y_0, Z_0} &= 0 \\ \left. \frac{\partial S}{\partial Y} \right|_{\rightarrow X_0, Y_0, Z_0} &= 0 \\ \left. \frac{\partial S}{\partial Z} \right|_{\rightarrow X_0, Y_0, Z_0} &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

得到中心投影点 $A_0 \rightarrow X_0, Y_0, Z_0$ 的法矢量 $\bar{N}$ 作为制孔点法矢量, 即为式(9)。

$$\bar{N} = \begin{bmatrix} 2AX_0 + BY_0 & BX_0 + 2CY_0 & -1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

4 实验与分析

4.1 实验系统及准确度验证方法

基于以上测量方案和基本原理, 搭建了基于双目立体视觉的法矢量测量的硬件系统, 如图 5 所示。双目视觉测量系统主要由计算机、图像采集控制箱、视觉传感器和辅助投影光源组成。其中, 视觉传感器即为两台具有公共视场的 CMOS 摄像机, 用于实时拍摄待测物体; 图像采集控制箱用于直接控制两个摄像机并实时处理摄像机拍摄的文件并输入计算机; 计算机用于标定参数计算、后续图像处理、特征点提取重建以及法矢量求解等运算; 辅助投影光源的功能为将稳定、形状较优的投影点打在待测面上, 便于拍摄和提取特征点。

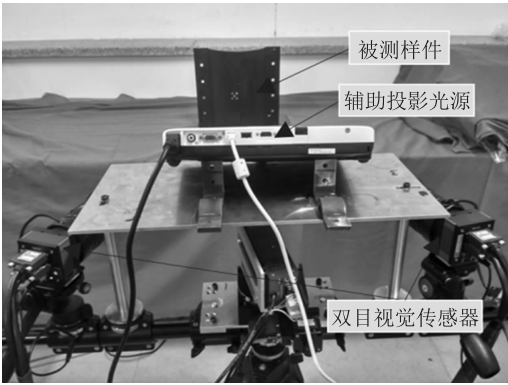


图5 法矢量测量的硬件系统

为了检验法矢量的测量准确度，需要知道视觉坐标系和三坐标测量仪坐标系的转换关系。本节采用三个标准靶球，靶球布置如图6所示，分别粘于待测件边界的三个角附近。在三坐标测量仪中，可以通过接触测量各球外轮廓获得球心的坐标，并以这三个点建立坐标系作为三坐标测量仪坐标系，由此可以转换视觉测量坐标系和三坐标测量坐标系。通过视觉系统可以测得 A, B, C 的三维坐标，由公式(10)可以求解得到视觉坐标系和三坐标测量仪坐标系的转换关系见公式6。

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \frac{\vec{AB}}{\|\vec{AB}\|} \\ \vec{k} &= \frac{\vec{AB} \times \vec{AC}}{\|\vec{AB} \times \vec{AC}\|}\end{aligned}\tag{10}$$

$$\begin{aligned}\vec{j} &= \vec{k} \times \vec{i} \\ R &= \frac{I}{*\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}*} \\ \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix} &= R \begin{matrix} X \\ Y \\ Z \end{matrix} - \begin{matrix} x_B \\ y_B \\ z_B \end{matrix}\end{aligned}\tag{11}$$

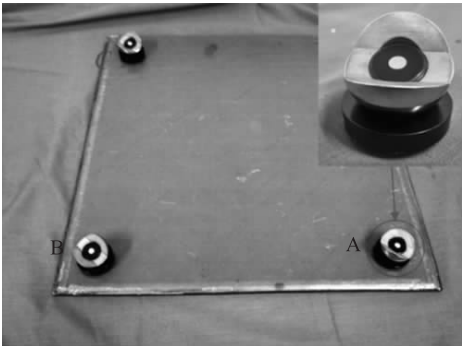
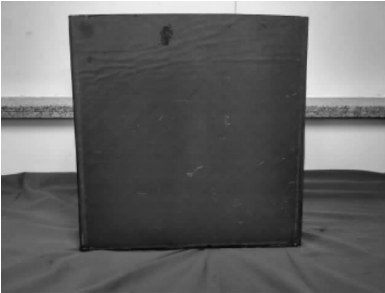


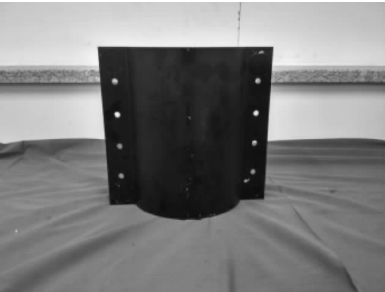
图6 标准靶球及工件上的局部坐标系

4.2 法矢量测量实验

为了验证系统准确度，采用标准平面样件代替小曲率曲面件进行实验。在标准平面样件图7(a)和大曲率壁板缩比曲面样件图7(b)投影图4(b)所示的特征点。以图8所示的分布规律向样件依次投9组共45个投影点，按从左向右、从上向下的顺序标记该9个位置，每次只投一组共5个点，拍摄并存储。将提取到的图像坐标进行三维重建，并将每组数据求解法矢量，处理数据并分析。



(a) 标准平面样件



(b) 壁板缩比曲面样件

图7 两种被测样件

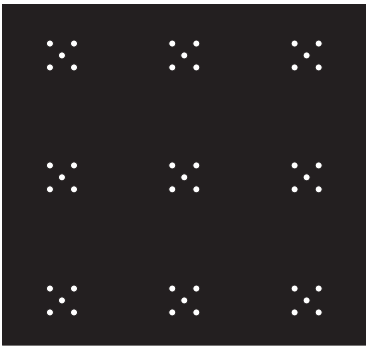


图8 投影点布局示意图

4.2.1 曲率的判断

将第一个零件(标准平面样件)上各组测点数据进行三维重建，然后将坐标系转换到以三个靶球建立的局部坐标系中。表1列出了三组测点的数据。

表 1 第一个零件斜向三组测点的坐标数据 mm

位置	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
	-287.793	-299.543	-276.313	-276.662	-299.991
位置 3	43.772	55.506	55.334	31.062	31.227
	25.558	25.084	25.476	25.786	25.751
	-169.399	-181.428	-157.612	-157.857	-181.676
位置 5	166.531	178.133	178.466	153.972	153.781
	25.402	25.372	25.431	25.382	25.463
	-48.641	-61.047	-36.575	-36.848	-61.299
位置 7	292.022	303.461	304.155	279.550	279.016
	25.346	25.476	25.474	25.488	25.341

根据公式(4)和(5)，计算平面偏差角及总偏差，三组测点的数据见表 2。定义阈值 $\theta_0=2^\circ$ ，第一个零件九个位置 $|\delta_3|+|\delta_4|\leq\theta_0$ ，所以判断第一个零件各测点计算法矢量主要采用平面主元分析方法。

表 2 第一个零件斜向三组测点的平面偏差角 (°)

位置	δ_3	δ_4	$ \delta_3 + \delta_4 $
位置 3	-0.875	0.326	1.201
位置 5	-0.165	0.298	0.462
位置 7	0.947	0.419	1.366

将第二个零件(大曲率壁板缩比曲面样件)上各组测点数据进行三维重建，然后将坐标系转换到以三个靶球建立的局部坐标系中，三组测点的数据见表 3。

表 3 第二个零件斜向三组测点的坐标数据 mm

位置	A_0	A_1	A_2	A_3	A_4
	-210.510	-202.690	-218.259	-218.583	-203.077
位置 3	121.975	114.554	113.853	130.276	130.903
	-38.225	-38.639	-37.658	-38.121	-38.504
	-124.628	-116.948	-131.898	-131.850	-116.920
位置 5	195.220	188.919	188.562	201.892	202.166
	-28.373	-32.030	-32.179	-23.418	-23.380
	-37.396	-30.237	-45.568	-45.564	-30.236
位置 7	77.211	71.157	70.632	84.381	85.160
	-32.399	-28.528	-28.471	-35.673	-34.575

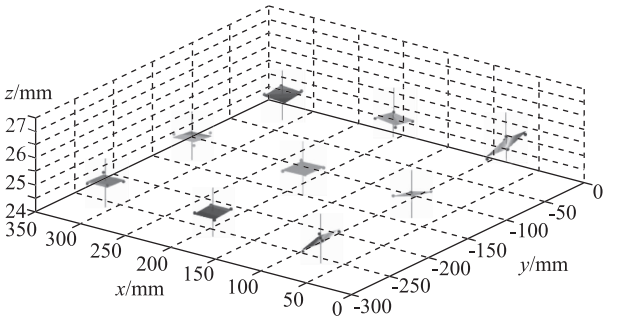
然后计算各组测点平面偏差角及总偏差，三组测点的计算数据见表 4。第二个零件九个位置 $|\delta_3|+|\delta_4|>\theta_0$ ，所以判断第二个零件各测点计算法矢量主要采用二次曲面拟合方法。

表 4 第二个零件斜向三组测点的平面偏差角 (°)

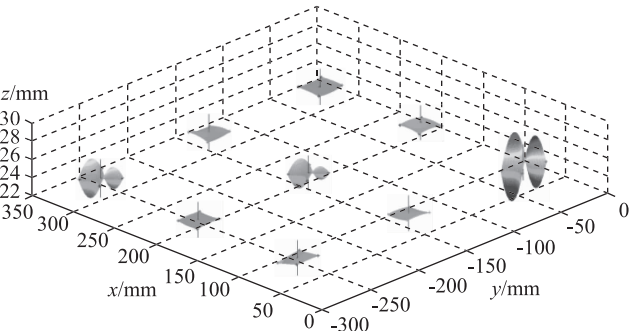
位置	δ_3	δ_4	$ \delta_3 + \delta_4 $
位置 3	-1.563	1.365	2.927
位置 5	3.103	2.666	5.769
位置 7	4.905	4.412	9.318

4.2.2 标准平面样件数据分析

为了评估两种算法的准确度，对于标准平面样件上的九组测点，分别使用平面主元分析法和二次曲面拟合法计算法矢量，结果绘制在图 9 中。其中，为了显示法矢量与各离散数据的关系，图 9(a)中的平面是由五个测点拟合得到的。



(a) 平面主元分析法计算结果



(b) 二次曲面拟合法计算结果

图 9 标准平面样件及两种算法的计算结果

4.2.3 标准平面样件精度验证

图 10 显示了测量标准平面样件时在三坐标测量仪中各测量点坐标的位置关系。

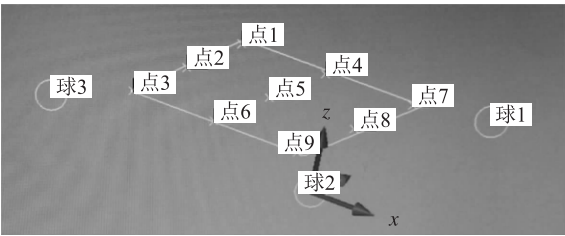


图 10 三坐标测量仪中标准平面样件各测量点

现将前面视觉方法求得的法矢量与三坐标测量仪获得的法矢量求夹角，绘制成折线图如图 11 所示。

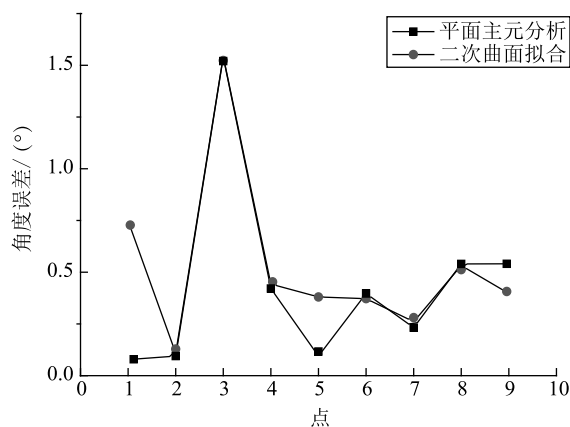


图 11 标准平面样件各方法与三坐标测量仪测法矢量的夹角

平面主元分析法求得法矢量与三坐标测量仪求得法矢量夹角最大值为 1.540° ，平均值为 0.437° 。二次曲面拟合法求得法矢量与三坐标测量仪求得法矢量夹角最大值为 1.543° ，平均值为 0.532° 。可见，两种方法在计算小曲率曲面法矢量时的准确度相近，平面主元分析方法的准确度和空间复杂度较优，作为求解平面或小曲率曲面法矢量的优先方法。

4.2.4 壁板缩比曲面样件数据分析

对于壁板缩比曲面样件上的九组测点，使用二次曲面拟合法计算法矢量，绘制在图 12 中。

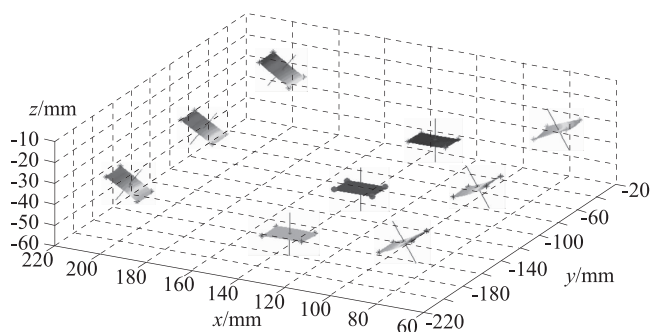


图 12 壁板缩比曲面样件测点二次曲面拟合方法的求解结果

由于在视觉系统中壁板缩比曲面样件上的测点中心，在三坐标测量仪中无法精确定位，所以在此不做验证。

5 结论

本文主要研究航空零件的自动钻铆工艺中的曲面法矢量检测问题，现有的各种测量方法在准确度方面和实时性方面，以及针对曲面曲率差异较大的情况，

都存在诸多的难题和不足。针对上述存在的问题，本文提出了一种基于曲率自适应的航空零件法矢量测量方法，并在投影点布局、法矢量求解算法和准确度验证方法等方面进行了研究。本文研究结论可概括如下：

1) 提出了一种制孔区域曲面模型，并利用此模型来限定投影点的位置和间距。采用四点均匀环绕中心点的图案，并利用中心投影点精确定位实际制孔点。

2) 提出了基于曲率自适应的法矢量计算方法。平面或小曲率曲面的法矢量测量采用平面主元分析法，中大曲率曲面的法矢量测量采用二次曲面拟合法。

3) 小曲率曲面样件法矢量测量方法的准确度评估及大曲率壁板缩比曲面样件实验。本文利用三个标准金属靶球转换双目视觉和三坐标测量仪的坐标系，然后用两种算法测量待测点法矢量并对比对应点处测量法矢量的夹角，以进行准确度验证；以三坐标测量仪的测量结果为参考值，本文法矢量测量最大误差角为 1.6° ；最后，采用本文搭建的系统测量了大曲率壁板缩比曲面样件，得到指定测点的法矢量结果。

参 考 文 献

- [1] 高宏伟. 计算机双目立体视觉[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [2] 张广军. 视觉测量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [3] 神会存, 李建华, 周末水. 三角网格模型顶点法矢与离散曲率计算[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(26): 12-15.
- [4] 谢友金, 王仲齐, 康永刚, 等. 球面逼近求解变形曲面法向量算法研究[J]. 制造技术, 2010(7): 51-108.
- [5] 秦现生, 汪文旦, 楼阿莉, 等. 大型壁板数控钻铆的三点快速调平算法[J]. 航空学报, 2007, 28(6): 1455-1460.
- [6] 应高明, 王仲奇, 康永刚, 等. 飞机壁板自动钻铆法向量测量方法研究[J]. 机床与液压, 2010, 38(23): 1-4.
- [7] 易传云, 王涛. 数字化曲面的法矢求解[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(8): 49-51.
- [8] 肖志涛, 张文寅, 耿磊, 等. 双目视觉系统测量精度分析[J]. 光电工程, 2014, 41(2): 6-11.
- [9] 顾金伟. 飞机壁板机器人自动化制孔控制系统开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [10] 段曙凯. 飞机蒙皮法矢的视觉检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] Wang Z, Fan F, Liu S. Measurement Method for Complex Shape of Hydraulic Turbine Blade Using Binocular Vision [C]// International Conference on Computer Science and Mechanical Automation, 2015: 344-348.
- [12] Gao Y, Wu D, Nan C, et al. Normal direction measurement in robotic drilling and precision calculation [C]// The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. London: Springer-Verlag, 2015, 76(5): 1311-1318.