

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.03.05

基于条纹投影的复杂曲面测量技术

于连栋, 张炜, 罗辉, 李维诗, 赵会宁

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 如何快速、高精度地测量复杂曲面的三维轮廓是目前的一个热点研究方向。与现有的测量方法相比, 条纹投影轮廓测量技术具有非接触测量、测量速度快和重构点云密集等优点, 在逆向工程等领域得到了广泛的应用。本文搭建了基于条纹投影轮廓测量技术的复杂曲面测量装置, 并且对相位误差标定及补偿、投影仪精确标定、高阶系统模型简化以及有效点云快速识别等条纹投影轮廓测量的关键技术进行了深入地研究。最后使用该装置进行了叶片表面轮廓测量实验, 实验结果表明, 本文设计装置的测量偏差最大值不超过 0.05 mm。

关键词: 复杂曲面测量; 条纹投影测量; 相位误差补偿; 投影仪标定; 系统模型简化。

中图分类号: TB9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5795(2018)03-0082-09

Measurement Technique of Complex Curved-profile Based on Fringe Projection Profilometry

YU Liandong, ZHANG Wei, LUO Hui, LI Weishi, ZHAO Huining

(School of Instrument Science and Optoelectronic Engineering, HeFei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: It is a hotspot research direction at present to rapidly and accurately measure the three dimensional (3D) profile of complex curved-surface rapidly and accurately. Compared with the existing measurement methods, the fringe projection profilometry (FPP) has extensive applications for its advantages, such as non-contact measurement, fast speed and dense reconstruction point cloud. It has been widely applied in reverse engineering. In this paper, a FPP system was built for measuring the complex curved-profiles. To improve the measurement accuracy, key technologies of fringe projection contour measurement such as phase error calibration and compensation, precise projector calibration, simplification of high-order calibration mode and quick identification of valid points are thoroughly studied. Finally, the profile of an aero-engine blade is measured using the system. Experimental result shows that the maximum measurement deviation is not greater than 0.05mm.

Key words: complex curved-profile measurement; fringe projection profilometry; phase error compensation; projector calibration; simplification of calibration model

0 引言

随着科学技术和工业生产的发展, 航天、造船、汽车等行业和领域对复杂曲面的快速测量提出迫切的需求。传统的接触式测量方法使用高精度测头按规划路径逐点获取曲面轮廓的三维数据, 测量效率较低, 难以满足现代工业对复杂曲面的检测要求。复杂自由曲面的高效、精准制造和检测已经成为机械工程学科的攻坚项目^[1-5]。

条纹投影轮廓术 (Fringe Projection Profilometry, FPP) 是基于相移技术的一种非接触式光学三维扫描方法, 一次扫描能够重构整个投影面的三维轮廓点云, 具有测量速度快、重构点云密集以及对组成装置要求低等特点, 广泛应用于文物保护、逆向工程、质量控制等领域^[5-10]。将条纹投影测量技术应用于复杂曲面测量领域, 可以有效地提高测量效率, 实现在线测量。

本文以条纹投影测量技术在复杂曲面测量中的应用为目的, 针对该技术中影响测量精度的关键性难题进行研究。主要研究内容包括: ①寻求一种高阶多项式系统模型优化方法, 解决高阶多项式系统模型稳定性差、标定困难等问题; ②为了消除测量装置非线性亮度响应引起的周期相位误差, 研究周期相位误差精确补偿方法; ③针对投影仪标定精度困难、标定精度低等问题, 研究投影仪畸变精确标定方法, 消除由投影仪镜头畸变产生的相位误差; ④为了识别条纹图像中的有效区域像素, 避免阴影区域及背景区域等无效区域点云对叶片测量精度的影响, 寻找一种快速、自适应有效点云识别方法。

1 测量原理与系统模型

1.1 测量原理

条纹投影测量系统主要由投影仪、相机和计算机

组成,如图1(a)所示。其中,计算机产生条纹图案,由投影仪将条纹图案投射到待测物体表面,相机采集被测物表面变形的条纹图案并送到计算机进行处理。计算机根据采集的条纹图案计算被测物体表面的相位值分布,标定后的系统模型将相位值转换为被测物表面轮廓的三维点云。图1(b)所示为条纹投影轮廓测量技术的扫描结果。

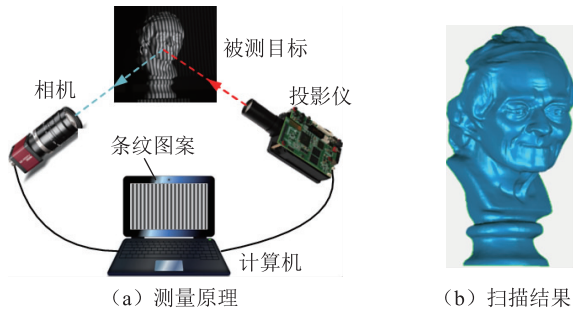


图1 条纹投影测量原理和扫描结果

1.2 测量系统模型

本文采用多项式系统模型建立相位和三维坐标之间

$$\begin{cases} X_w = c_{x1} + c_{x2}u + c_{x3}v + c_{x4}\Phi + c_{x5}uv + c_{x6}u\Phi + c_{x7}v\Phi + c_{x8}u^2 + c_{x9}v^2 + c_{x10}\Phi^2 \\ \quad + c_{x11}u^2v + c_{x12}u^2\Phi + c_{x13}uv^2 + c_{x14}u\Phi^2 + c_{x15}v^2\Phi + c_{x16}v\Phi^2 + c_{x17}u^3 + c_{x18}v^3 + c_{x19}\Phi^3 \\ Y_w = c_{y1} + c_{y2}u + c_{y3}v + c_{y4}\Phi + c_{y5}uv + c_{y6}u\Phi + c_{y7}v\Phi + c_{y8}u^2 + c_{y9}v^2 + c_{y10}\Phi^2 \\ \quad + c_{y11}u^2v + c_{y12}u^2\Phi + c_{y13}uv^2 + c_{y14}u\Phi^2 + c_{y15}v^2\Phi + c_{y16}v\Phi^2 + c_{y17}u^3 + c_{y18}v^3 + c_{y19}\Phi^3 \\ Z_w = c_{z1} + c_{z2}u + c_{z3}v + c_{z4}\Phi + c_{z5}uv + c_{z6}u\Phi + c_{z7}v\Phi + c_{z8}u^2 + c_{z9}v^2 + c_{z10}\Phi^2 \\ \quad + c_{z11}u^2v + c_{z12}u^2\Phi + c_{z13}uv^2 + c_{z14}u\Phi^2 + c_{z15}v^2\Phi + c_{z16}v\Phi^2 + c_{z17}u^3 + c_{z18}v^3 + c_{z19}\Phi^3 \end{cases} \quad (4)$$

2 高阶系统模型简化方法

高阶多项式系统模型能够更好的拟合条纹投影测量系统非线性特性,可以进一步提高条纹投影叶片测量装置的精度。但是高阶多项式系统模型标定困难、模型稳定性差,使得精度较低的三阶多项式系统模型成为常用的条纹投影测量系统模型。为此,本文基于主分量分析(Principal Component Analysis)方法^[14]提出一种高阶多项式系统模型简化方法,该简化方法可以在系统测量精度损失很小的情况下,大大提升高阶多项式系统模型的稳定性。

本文提出的高阶多项式系统模型简化方法可以具体分为5个步骤,即计算模型系数、构建分析数据集、获取主分量、模型组成项重要性分析和模型简化^[15]。

1) 计算模型系数

标定高阶多项式系统模型,得到理想系数矩阵 C^0 。理想系数矩阵 C^0 可以表示为

的转换关系。与传统的几何结构系统模型相比,多项式系统模型对相机和投影仪的安装位置没有限制^[11-13];此外,多项式系统模型可以更加精确地拟合相位与三维坐标之间的转换关系。其一般形式可以表示为

$$W = C \times Q \quad (1)$$

式中: W 为世界坐标系下三维坐标向量(X_w, Y_w, Z_w)^T; C 为多项式系统模型的系数矩阵; Q 为 $m \times 1$ 维向量,由三个变量(u, v, Φ)的 n 阶多项式基组成。

$$C = \begin{bmatrix} c_{x1} & c_{x2} & \cdots & c_{xm} \\ c_{y1} & c_{y2} & \cdots & c_{ym} \\ c_{z1} & c_{z2} & \cdots & c_{zm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为多项式系统模型的系数数量,该数量与模型阶次有关。

$$Q = [1 \quad u \quad v \quad \Phi \quad \cdots \quad u^n \quad v^n \quad \Phi^n]^T \quad (3)$$

式中: n 为多项式系统模型的阶次; (u, v) 为相机图像坐标; Φ 为在图像坐标 (u, v) 处的绝对相位值。

以3阶多项式系统模型为例,系统模型的完整形式可以表示为

$$C^0 = \begin{bmatrix} c_{x1}^0 & c_{x2}^0 & \cdots & c_{xm}^0 \\ c_{y1}^0 & c_{y2}^0 & \cdots & c_{ym}^0 \\ c_{z1}^0 & c_{z2}^0 & \cdots & c_{zm}^0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由此可以得到

$$C^0 Q = \begin{bmatrix} c_{x1}^0 + c_{x2}^0 u_i + c_{x3}^0 v_i + c_{x4}^0 \Phi_i + \cdots + c_{xm}^0 \Phi_i^n \\ c_{y1}^0 + c_{y2}^0 u_i + c_{y3}^0 v_i + c_{y4}^0 \Phi_i + \cdots + c_{ym}^0 \Phi_i^n \\ c_{z1}^0 + c_{z2}^0 u_i + c_{z3}^0 v_i + c_{z4}^0 \Phi_i + \cdots + c_{zm}^0 \Phi_i^n \end{bmatrix} \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, l$

2) 构建分析数据集

使用主分量分析方法是确定多项式系统模型各组成项对重构结果的重要程度,本文使用多项式系统模型各组成项与相应系数的乘积,即式(6)右侧多项式方程的组成项,作为主分量分析方法里的原始变量。按三个坐标方向将 $C^0 \times Q$ 分解,可以得到与三个坐标方向对应的三组变量观测值(G_x, G_y 和 G_z), G_x 如式(7)所示。

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} c_{x1}^0 & c_{x2}^0 u_1 & c_{x3}^0 v_1 & c_{x4}^0 \Phi_1 & \cdots & c_{xm}^0 \Phi_1^n \\ c_{x1}^0 & c_{x2}^0 u_2 & c_{x3}^0 v_2 & c_{x4}^0 \Phi_2 & \cdots & c_{xm}^0 \Phi_2^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{x1}^0 & c_{x2}^0 u_l & c_{x3}^0 v_l & c_{x4}^0 \Phi_l & \cdots & c_{xm}^0 \Phi_l^n \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 获取主分量

分别对变量观测值 \mathbf{G}_x , \mathbf{G}_y 和 \mathbf{G}_z 进行主分量分析, 可以得到载荷矩阵 \mathbf{K}_x , \mathbf{K}_y 和 \mathbf{K}_z , 以及特征值矩阵 $\mathbf{\Lambda}_x$, $\mathbf{\Lambda}_y$ 和 $\mathbf{\Lambda}_z$ 。与较大特征值对应的主分量包含着 \mathbf{G}_x , \mathbf{G}_y 和 \mathbf{G}_z 中的绝大部分信息, 可以使用这些主分量来确定模型组成项的重要性。使用累积贡献率 (ACR) 公式可以计算出这些主分量所包含的信息数量。

4) 模型组成项重要性分析

对于每一个主分量, 各原始变量在线性组合中的系数代表该原始变量对这个主分量重要性的大小。为此, 本文使用载荷矩阵 \mathbf{K}_x , \mathbf{K}_y 和 \mathbf{K}_z 中与主分量对应的系数评定高阶多项式模型组成项对重构结果的重要性大小。以载荷矩阵 \mathbf{K}_x 为例, 从 \mathbf{K}_x 中提取与主分量对应的系数, 提取后的载荷矩阵 \mathbf{K}_{xs} 可以表示为

$$\mathbf{K}_{xs} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ k_{d1} & k_{d2} & \cdots & k_{dm} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: d 为选取的主分量数量。 \mathbf{K}_{ys} , \mathbf{K}_{zs} 分别为提取后的载荷矩阵。

以式(6)中的组成项 $c_{xm}^0 \Phi_i^n$ 为例, 该项的重要性大小可以由载荷矩阵 \mathbf{K}_{xs} 的最后一列系数的数值确定。

5) 多项式模型简化

通过寻找载荷矩阵 \mathbf{K}_{xs} , \mathbf{K}_{ys} 和 \mathbf{K}_{zs} 中的微小系数值, 可以认为与该系数对应的模型组成项是微相关项。在高阶多项式系统模型中去除微相关项, 可以在测量精度

$$\phi^a(x, y) = \arctan \left[\frac{-\sum_{i=1}^N \{a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos [n(\phi(x, y) + \delta_i)]\} \sin(\delta_i)}{\sum_{i=1}^N \{a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos [n(\phi(x, y) + \delta_i)]\} \cos(\delta_i)} \right] \quad (10)$$

由于实际相位值 $\phi^a(x, y)$ 是由理想相位值 $\phi(x, y)$ 和相位误差值 $\Delta\phi(x, y)$ 叠加而成。因此, 由

$$\Delta\phi(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^{\infty} \{(a_{kN+1} - a_{kN-1}) \sin [kN\phi(x, y)]\}}{a_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{(a_{kN+1} + a_{kN-1}) \cos [kN\phi(x, y)]\}} \right] \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 由条纹投影装置非线性亮度响应引起的相位误差是由多个高频相位误差分量合成。对于 N 步相移法, 高频相位误差分量的频率分别是理想相位频率的 kN ($k=1, 2, \dots, \infty$) 倍。图 2(b) 所示为三步相移法相位误差, 可以明显看出 3 倍频分量的

损失很小的情况下实现系统模型简化。

3 周期相位误差补偿技术

为了实现叶片表面轮廓精确测量, 需要对相位误差进行精确标定及补偿。由相机和投影仪非线性亮度响应引起的周期相位误差是相位误差的主要来源, 研究如何消除周期相位误差是条纹投影测量技术领域的研究热点之一。

3.1 周期相位误差分析

由于相机和投影仪具有非线性特性, 使采集的条纹图像具有复杂的频率成分, 即其亮度变化不再是单一频率的正弦波形, 如图 2(a) 所示。

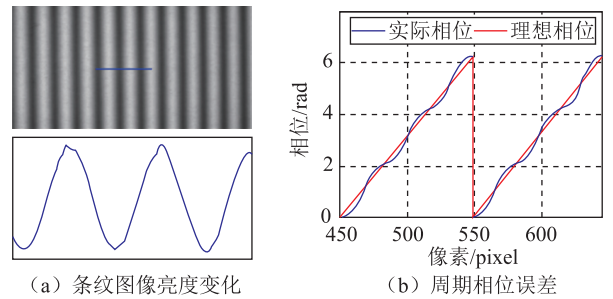


图 2 条纹图像亮度变化与周期相位误差

根据傅里叶级数展开原理^[16], 在条纹图像上非正弦亮度变化曲线可以看做是一个理想的正弦波形和多个高频谐波分量的组合。

$$I_i^e(x, y) = f(I_i(x, y)) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos [n(\phi(x, y) + \delta_i)] \quad (9)$$

式中: $I_i^e(x, y)$ 为条纹图像的亮度; a_0, a_1, \dots, a_n 分别为各分量系数。根据式(9)可以得到实际相位值 $\phi^a(x, y)$ 为

条纹投影装置非线性亮度响应引起的相位误差表达式

3.2 黑箱相位误差补偿方法

为了提高周期相位误差补偿效果, 本文提出一种黑箱相位误差补偿方法^[17]。由式(11)所示的周期相位误差公式可以看出, kN 倍频周期相位误差的幅值等于

条纹图像上 $(kN + 1)$ 倍频谐波和 $(kN - 1)$ 倍频谐波幅值之差。假设条纹图像上 $(kN - 1)$ 倍频谐波的幅值可以

$$\Delta\phi(x, y) \begin{cases} a_{N-1} = a_{N+1} \\ \dots \\ a_{KN-1} = a_{KN+1} \end{cases} = \arctan \left[\frac{0}{a_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ (a_{kN+1} + a_{kN-1}) \cos [kN\phi(x, y)] \}} \right] = 0 \quad (12)$$

由式(12)可以看出, 通过调节采集条纹图像上 $(kN - 1)$ 倍频谐波的幅值, 可以完全消除投影测量装置非线性特性引起的 kN 倍频周期相位误差。根据光波

$$I_i^m(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos [\phi(x, y) + \delta_i] + A_{kN-1} I''(x, y) \cos [(kN - 1)(\phi(x, y) + \delta_i)] \quad (k = 1, \dots, \infty) \quad (13)$$

式中: $I_i^m(x, y)$ 为修改后的条纹图案亮度; A_{kN-1} 为添加相位的幅值。

投射修改后的条纹图案并且采集条纹图像, 在条纹图案中添加的 $(kN - 1)$ 倍频波形会在采集的条纹图

$$I_i^{mc}(x, y) \approx a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos [n(\phi(x, y) + \delta_i)] + \sum_{k=1}^{\infty} C_{kN-1} \cos [(kN - 1)(\phi(x, y) + \delta_i)] + \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} D_{m(kN-1)} \cos [m(kN - 1)(\phi(x, y) + \delta_i)] \quad (14)$$

式中: C_{kN-1} 为额外 $(kN - 1)$ 倍频谐波的幅值; $D_{m(kN-1)}$ ($m \geq 2$) 为 $m(kN - 1)$ 倍频谐波幅值。

调节, 并且使调节之后的幅值与 $(kN + 1)$ 倍频谐波的幅值相等, 这时周期相位误差可以表示为

频率不变性原理, 这里给出了一种谐波幅值主动调节方法, 即在条纹图像上主动加入 $(kN - 1)$ 倍频相位, 修改后的条纹图案亮度可以表示为

像中产生额外的 $(kN - 1)$ 倍频谐波以及相应的 $m(kN - 1)$ 倍频谐波。这时, 采集的条纹图像亮度 $I_i^{mc}(x, y)$ 可以表示为

$$a'_n = \begin{cases} a_n & n \neq m(kN - 1) \\ a_n + D_{m(kN-1)} & n = m(kN - 1) \end{cases} \quad (15)$$

式(14)可以重新表示为

$$I_i^{mc}(x, y) \approx a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a'_n \cos [n(\phi(x, y) + \delta_i)] + \sum_{k=1}^{\infty} C_{kN-1} \cos [(kN - 1)(\phi(x, y) + \delta_i)] \quad (16)$$

由式(16)可以看出, 通过在条纹图案上添加 $(kN - 1)$ 倍频相位, 条纹图像上 $(kN - 1)$ 倍频谐波的幅值

转变为 $(a'_{kN-1} + C_{kN-1})$ 。这时, 修改后条纹图案的相位误差 $\Delta\phi^m(x, y)$ 可以表示为

$$\Delta\phi^m(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^{\infty} \{ [a'_{kN+1} - (a'_{kN-1} + C_{kN-1})] \sin [kN\phi(x, y)] \}}{a_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ [a'_{kN+1} + (a'_{kN-1} + C_{kN-1})] \cos [kN\phi(x, y)] \}} \right] \quad (17)$$

理想情况下, 通过添加相位产生的 $(kN - 1)$ 倍频谐波, 其幅值能够满足 $C_{kN-1}^d = a'_{kN+1} - a'_{kN-1}$ 。这时,

周期相位误差能够被完全补偿。

$$\Delta\phi^m(x, y) = \arctan \left[\frac{\sum_{k=1}^{\infty} \{ (a'_{kN+1} - a'_{kN-1} - C_{kN-1}^d) \sin [kN\phi(x, y)] \}}{a_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ (a'_{kN+1} + a'_{kN-1} + C_{kN-1}^d) \cos [kN\phi(x, y)] \}} \right] = \arctan \left[\frac{0}{a_1 + \sum_{k=1}^{\infty} \{ 2a'_{kN+1} \cos [kN\phi(x, y)] \}} \right] = 0 \quad (18)$$

由此可以看出, 如果能够确定合适的添加相位幅值 A_{kN-1} , 在采集的条纹图像上能够产生具有理想幅值 C_{kN-1}^d 的额外 $(kN - 1)$ 倍频谐波, 最终完全消除 kN 倍频周期相位误差。

在本文提出的相位误差补偿方法中, 没有特别考虑条纹投影叶片测量装置的具体特性, 而是将该装置

的整体特性作为“黑箱”看待。理论上, 这种方法可以完全消除由投影测量系统非线性特性引起的周期相位误差, 补偿效果优于现有的 Gamma 校正方法^[18]。此外, 黑箱补偿法属于主动补偿方法, 该方法不会增加额外的计算时间, 也不会影响装置的测量效率。

在产生的 kN ($k = 1, 2, \dots, \infty$) 倍频周期相位误差

分量中, N 倍频和 $2N$ 倍频相位误差分量是主要部分。因此, 利用本文提出的方法进行相位误差补偿时, 只需要在条纹图案上添加 $(N - 1)$ 倍频相位和 $(2N - 1)$ 倍频相位。由此, 四步相移法时需要在原始条纹图案添加 3 倍频相位和 7 倍频相位。

4 投影仪精确标定方法

因为加工误差和装配误差等原因, 投影仪和相机都存在镜头畸变。投影仪镜头畸变会在投射的条纹图案上产生畸变误差。为了消除投影仪镜头畸变对测量系统精度的影响, 需要精确标定投影仪参数(主要是畸变系数)。由于投影仪不能直接采集图像, 投影仪标定过程更加复杂, 使得投影仪的标定精度远低于相机标定精度^[19-20]。

4.1 现有投影仪标定方法

为了叙述方便, 平面靶标上标志点 P_w 在相机图像平面上的映射点称为 P_c , 在投影仪图像平面上的映射点称为 P_p 。由于投影仪无法直接采集图像, 在投影仪标定过程中需要使用相机采集靶标图像。通过投射横向和纵向两套条纹图案到平面靶标的表面, 获取平面靶标上标志点的投影仪图像坐标。

$$u_p = \frac{\Phi_v}{2\pi} T_v, v_p = \frac{\Phi_h}{2\pi} T_h \quad (19)$$

式中: Φ_v 和 Φ_h 分别为标志点在纵向绝对相位分布和横向绝对相位分布上的相位值; T_v 和 T_h 分别为纵向条纹图案和横向条纹图案上以像素为单位的单个条纹宽度。

在式(19)中, 标志点的投影仪图像坐标是根据完整图像像素对应的绝对相位值计算得到。根据现有的标志点提取算法, 在相机图像上能够得到亚像素精度的标志点相机图像坐标。在利用式(19)计算标志点投影仪图像坐标时, 只能先用圆整算法将亚像素精度的标志点相机图像坐标圆整为像素级精度坐标, 再根据圆整后的整数图像坐标在横向和纵向相位分布上提取绝对相位值。因此, 根据式(19)所示的算法只能得到像素级精度投影仪图像坐标, 影响投影仪的标定精度。

为了能够实现亚像素精度的映射关系, Huang 等人提出了一种基于最小二乘圆拟合的投影仪图像坐标计算方法^[21]。圆形图案的投影存在偏心误差^[22], 标定精度不够理想。Zhang 等人给出了一种依靠相机与投影仪光轴同轴的投影仪标定方法^[20]。但该方法在投影仪标定过程中, 很难保证相机和投影仪的光轴同轴。

4.2 投影仪精确标定方法

如图 3 所示, 如果忽略镜头畸变的影响, 相机图

像平面与投影仪图像平面之间能够构成对同一个平面靶标的射影变换(projective transform)。在射影投影几何中, 四个共线点的交比(cross ratio)是惟一的基本不变量^[23-24]。在图 3 中有三条直线, 每条直线上都有一组四共线点, 分别是 (P_1, P_2, P_3, P_4) , $(P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4})$ 和 $(P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, P_{p4})$ 。其中, $(P_{c1}, P_{c2}, P_{c3}, P_{c4})$ 在相机图像平面, $(P_{p1}, P_{p2}, P_{p3}, P_{p4})$ 在投影仪图像平面, 这两组共线点也是射影变换的关系。因此, $(P_1, P_2; P_3, P_4) = (P_{c1}, P_{c2}; P_{c3}, P_{c4})$, $(P_1, P_2; P_3, P_4) = (P_{p1}, P_{p2}; P_{p3}, P_{p4})$ 以及 $(P_{c1}, P_{c2}; P_{c3}, P_{c4}) = (P_{p1}, P_{p2}; P_{p3}, P_{p4})$ 。

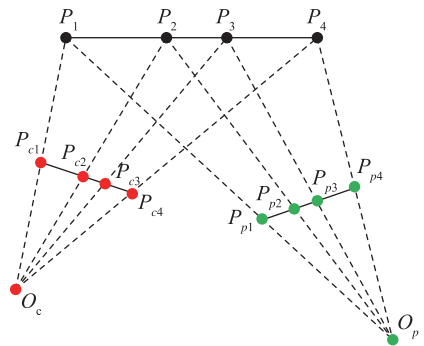


图 3 条纹投影装置中的射影几何关系

为了确定平面靶标上标志点的投影仪图像坐标, 在本文提出的方法中需要使用 7 个辅助点。如图 4(a) 所示的相机图像平面, P_c 是标志点, $A_c \sim G_c$ 是计算过程中需要用到的 7 个辅助点。辅助点 $A_c \sim D_c$ 是包围标志点 P_c 的四个最近整数像素点, E_c 是直线 $A_c C_c$ 和 $B_c D_c$ 的交叉点。直线 $A_c C_c$ 和 $B_c D_c$ 将区域 $A_c B_c C_c D_c$ 划分为四个子区域, 即子区域 I 到子区域 IV。假设标志点 P_c 位于子区域 IV, 或者在直线 $C_c D_c$ 上, 不在直线 $E_c C_c$ 及 $E_c D_c$ 上。这时, F_c 是直线 $A_c C_c$ 和 $B_c P_c$ 的交点, G_c 是直线 $B_c D_c$ 和 $A_c P_c$ 的交点, F_c 和 G_c 的相机图像坐标可以由此确定。

因为点 A_c, B_c, C_c 和 D_c 代表整数像素坐标, 可以根据式(19)计算精确的对应投影仪图像坐标。图 4(b) 所示为 $A_c \sim D_c$ 在投影仪图像上的对应点 $A_p \sim D_p$ 。因为 $A_c \sim D_c$ 代表包围标志点 P_c 的四个最近整数像素坐标, $A_c B_c C_c D_c$ 和 $A_p B_p C_p D_p$ 都是非常小的区域。因此, 区域 $A_p B_p C_p D_p$ 可以视作区域 $A_c B_c C_c D_c$ 的射影变换区域。同时, E_p 在投影仪图像平面上作为直线 $A_p C_p$ 和 $B_p D_p$ 的交点, 也是 E_c 的对应点。 F_p 和 G_p 分别是 F_c 和 G_c 在投影仪图像平面上的对应点, 并且在直线 $A_p C_p$ 和 $B_p D_p$ 上可以得到 $(A_p, E_p; F_p, G_p) = (A_c,$

$E_c; F_c, C_c$) 和 $(B_p, E_p; G_p, D_p) = (B_c, E_c; G_c, D_c)$ 。最后, 直线 $A_p G_p$ 和 $B_p F_p$ 的交点 P_p 可以作为标志点 P_c 在投影仪图像平面上的对应点。

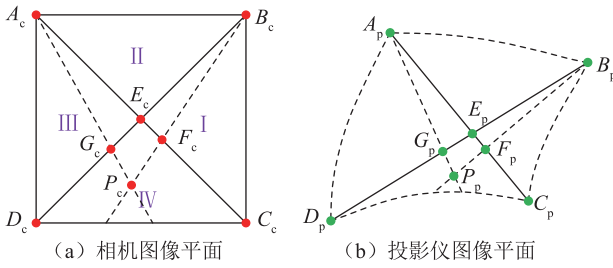


图4 亚像素对应关系示意图

设 $A_p \sim G_p$ 表示点 $A_p \sim G_p$ 的投影仪图像坐标, 且 $a = A_p, b = E_p - A_p, \bar{a} = B_p, \bar{b} = E_p - B_p, A_p \sim G_p$ 可以表示为

$$\begin{cases} A_p = a + \xi_1 \bar{b}, E_p = a + \xi_2 \bar{b}, F_p = a + \xi_3 \bar{b}, C_p = a + \xi_4 \bar{b} \\ B_p = \bar{a} + \tau_1 \bar{b}, E_p = \bar{a} + \tau_2 \bar{b}, G_p = \bar{a} + \tau_3 \bar{b}, D_p = \bar{a} + \tau_4 \bar{b} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $\xi_i (i = 1, \dots, 4)$ 和 $\tau_i (i = 1, \dots, 4)$ 为系数常量, 且 $\xi_1 = 0, \xi_2 = 1, \tau_1 = 0, \tau_2 = 1$ 。

式(20)中, 因为投影仪图像坐标 $A_p \sim E_p$ 是已知量, 由此可以确定系数值 ξ_4 和 τ_4 , 可以得到

$$\begin{aligned} (A_p, E_p; F_p, C_p) &= \frac{(\xi_1 - \xi_3)(\xi_2 - \xi_4)}{(\xi_2 - \xi_3)(\xi_1 - \xi_4)}, \\ (B_p, E_p; G_p, D_p) &= \frac{(\tau_1 - \tau_3)(\tau_2 - \tau_4)}{(\tau_2 - \tau_3)(\tau_1 - \tau_4)} \end{aligned} \quad (21)$$

因为 $(A_p, E_p; F_p, C_p) = (A_c, E_c; F_c, C_c)$ 和 $(B_p, E_p; G_p, D_p) = (B_c, E_c; G_c, D_c)$, 并且 $(A_c, E_c; F_c, C_c)$ 和 $(B_c, E_c; G_c, D_c)$ 已知, 根据式(21)可以直接求出系数值 ξ_3 和 τ_3 。因此, 将系数值 ξ_3 和 τ_3 代入式(20)可以得到 F_p 和 G_p 的投影仪图像坐标 F_p 和 G_p 。最后, 根据获取的投影仪图像坐标 C_p, D_p, F_p 和 G_p 可以确定直线 $C_p G_p$ 和 $D_p F_p$ 的交点坐标 P_p 。

如果标志点 P_c 位于其他子区域(子区域 I 到子区域 III), 可以用类似的方法确定标志点的投影仪图像坐标。在本文提出的方法中, 标志点投影仪图像坐标是根据相机图像上四个整数像素坐标确定, 因此该方法确定的投影仪图像坐标具有亚像素级精度。确定准确的标志点投影仪图像坐标之后, 可以对投影仪进行精确标定。由于整个计算过程与相机标定参数无关, 故本方法的标定精度不受相机标定误差的影响。

5 无效点云快速识别技术

在条纹投影测量装置中, 相机和投影仪的光轴之

间存在一定角度。因此, 采集的条纹图像中经常出现投射光线被遮挡的阴影区域。此外, 被测物体表面通常不能占据整个条纹图像, 除了物体表面以及阴影区域之外的剩余部分称为背景区域。根据背景区域以及阴影区域相位值转换的三维点云是必须要去除的无效点云。

调制度 (Modulation) 可以用来识别背景区域和阴影区域^[25], 调制度的计算公式为

$$M(x, y) = \frac{2}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \sin \frac{2\pi i}{N} \right)^2 + \left(\sum_{i=0}^{N-1} I_i(x, y) \cos \frac{2\pi i}{N} \right)^2} \quad (22)$$

设 t_m 是设定的调制度阈值, 如果像素点 (x, y) 的调制度 $M(x, y)$ 满足 $M(x, y) < t_m$, 则可以确定该点位于背景区域或者阴影区域。理论上, 选择合适的调制度阈值就可以识别出背景区域和阴影区域的无效点云。在实际测量过程中, 不同的测量状况会使调制度变化。

如果设定不合适的调制度阈值, 会使无效点云识别错误。为了得到理想的识别效果, 在实际应用中需要根据测量情况调整区分阈值。到目前为止, 本文没有发现评价调制度阈值是否合适的标准。大多数情况下都是根据经验进行手动设定, 存在效率低下和不够精确等缺点。为此, 本文提出一种基于调制度直方图和改进的 Otsu 方法的自适应阈值确定方法, 可以在不同物体形状、尺寸及背景等条件下自动获取合适的调制度分割阈值。

Otsu 法使用目标和背景之间的最大类间方差作为阈值选取标准, 根据图像的一维灰度直方图进行图像分割, 具有速度快、分割效果好以及适应范围广等优点^[26-28]。但是, 对于非明显双峰直方图分布的图像, 该算法的分割效果不够理想^[29]。本文对原 Otsu 算法的目标函数进行改进, 增加了权重因子。即

$$\xi_m = (p_r / L') \sigma_B^2(t_m) \quad (23)$$

式中: $\sigma_B^2(t_m)$ 为调制度分布的类间方差; (p_r / L') 为新的权重值公式; $[0, L' - 1]$ 为调制度的取值范围。 $p_r = 1/p_{t_m}$ 且 p_{t_m} 代表调制度阈值 t_m 的出现概率。

在式(23)中, 将调制度出现概率的倒数作为新的权重值, 可以在出现概率很小的情况下增强权重值的影响力, 有利于获得靠近谷底位置的调制度作为合适的分割阈值。

6 实验与分析

6.1 测量系统构成

本文设计的条纹投影测量装置如图5所示,主要由图像投影设备、图像采集设备以及同步控制设备组成。选用TI公司生产的三维扫描专用数字投影仪(DLP LightCrafter 4500)作为图像投影设备。图像采集设备则选用了德国AVT公司生产的超小型工业数字相机(Guppy PRO F-125B/C)。CCD相机采集的条纹图像经过1394图像采集卡传送到上位机软件中进行图像处理。

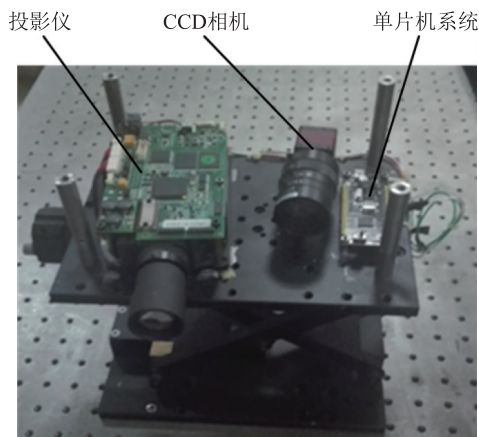


图5 条纹投影测量装置硬件组成

6.2 叶片测量实验

为了验证复杂曲面测量精度,本文使用该装置进行叶片测量实验。叶片测量的具体步骤为:首先获取叶片在单个视角下的局部轮廓点云;将叶片转动一定角度,获取其他视角下的叶片局部轮廓点云;在三维点云处理软件(Geomagic Studio)中,采用手动配准的方法将各叶片局部轮廓点云融合到统一的坐标系下,得到完整的叶片轮廓点云。

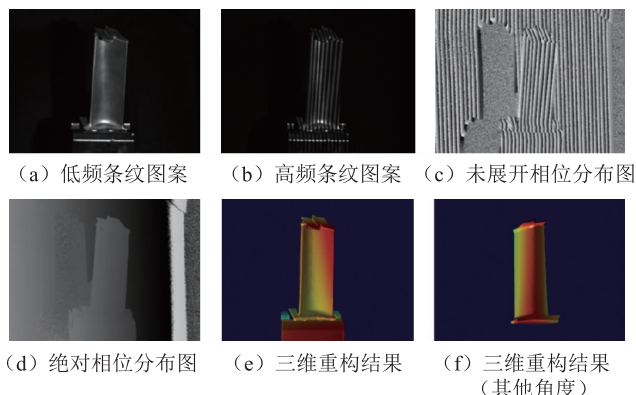


图6 叶片局部扫描结果

图6(a)、图6(b)分别表示向被测叶片投射低频条纹图案和高频条纹图案。根据条纹图像计算出的未展

开相位分布以及展开后的绝对相位分布如图6(c)、图6(d)所示。根据标定后的系统模型计算出叶片局部轮廓的三维坐标,如图6(e)所示。图6(f)为叶片在转动一定角度后得到的三维扫描结果。

本文获得叶片不同部位的局部轮廓点云之后,在三维处理软件中采用手动融合方法将叶片各局部点云拼接成完整的叶片轮廓点云,如图7(a)所示。根据叶片轮廓三维点云生成的叶片轮廓数字模型如图7(b)所示。

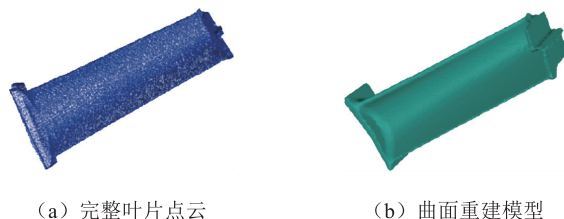


图7 完整叶片点云及曲面重建模型

利用叶片型面特征参数可以判断叶片质量是否合格^[30-32],本文根据获取的叶片模型计算了叶片型面特征参数。与StereoScan neo扫描仪的扫描结果相比,本文设计装置的测量偏差最大值不超过0.05 mm。

7 结论

随着现代工业的发展,对复杂曲面测量的需求大大增加,传统的接触式测量方法很难兼顾精度、效率及成本等因素。为了实现复杂曲面快速、精确测量,本文基于条纹投影轮廓测量技术搭建了新型光学三维测量装置。针对影响装置测量精度的关键问题,本文对相位误差标定及补偿、投影仪精确标定、高阶系统模型简化以及有效点云快速识别等方面问题进行了深入的研究,并且给出了相应的解决办法。最后使用设计的条纹投影测量装置进行了航空发动机叶片表面轮廓测量实验,实验结果验证了装置的测量精度。

除了本文研究的内容外,在应用条纹投影测量技术进行复杂曲面测量时,还需要解决以下问题:

1)高反光表面测量。对具有高反光表面的精密加工工件进行测量是条纹投影测量技术目前的技术难点和研究热点之一,现有的解决办法如喷涂粉末、多曝光法^[34]和偏振光方法^[35]等的测量效果均不够理想。

2)动态测量。为了能够实现高精度、实时测量,需要进一步对测量装置进行改进。技术的关键在于提高条纹图案的投射速度以及条纹图像的采集速度。

3)点云准确拼接。对于体积较大的被测物体,测

量装置每次只能得到局部三维点云, 将不同视角的局部点云进行融合之后, 才能反应被测物体完整的三维信息。点云匹配不准会降低测量系统的精度, 如何实现准确的三维点云数据融合将是后续工作的一个主要研究方向。

参 考 文 献

- [1] 杜颖, 李真, 张国雄. 三维曲面的光学非接触测量技术[J]. 光学精密工程, 1999, 7(3): 1-6.
- [2] Chen F, Brown G M, Song M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10-22.
- [3] 孙宇臣, 葛宝臻, 张以谟. 物体三维信息测量技术综述[J]. 光电子激光, 2004, 15(2): 248-254.
- [4] 李永怀, 冯其波. 光学三维轮廓测量技术进展[J]. 激光与红外, 2005, 35(3): 143-147.
- [5] 吴兆喜, 黄元庆. 基于光学原理的三维形貌测量技术研究[J]. 光学技术, 2006, 32(Z1): 654-658.
- [6] Thakur M, Quan C, Tay C J. Surface profiling using fringe projection technique based on Lau effect[J]. Optics and Laser Technology, 2007, 39(3): 453-459.
- [7] Gorthi S S, Rastogi P. Fringe projection techniques: Whither we are? [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 133-140.
- [8] Zhang S. Recent progresses on real-time 3D shape measurement using digital fringe projection techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 149-158.
- [9] Hieu N, Dung N, Wang Z Y, et al. Real-time, high-accuracy 3D imaging and shape measurement[J]. Applied Optics, 2015, 54(1): 9-17.
- [10] Minh V, Wang Z, Pan B, et al. Hyper-accurate flexible calibration technique for fringe-projection-based three-dimensional imaging [J]. Optics Express, 2012, 20(15): 16926-16941.
- [11] Huang S J, Zhang Z H, Zhao Y, et al. 3D fingerprint imaging system based on full-field fringe projection profilometry [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 123-130.
- [12] Huang J H, Wu Q Y. A new reconstruction method based on fringe projection of three-dimensional measuring system [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2014, 52(1): 115-122.
- [13] Leah M, Wang Y J, Zhang S. Accurate calibration for 3D shape measurement system using a binary defocusing technique[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 514-519.
- [14] Jolliffe I. Principle Component Analysis [M]. Hoboken: Wiley Online Library, 2002.
- [15] Yu L D, Zhang W, Li W S, et al. Simplification of high order polynomial calibration model for fringe projection [J]. Measurement Science & Technology, 2016, 27(10). doi: 10.1088/0957-0233/27/10/105202.
- [16] Pan B, Kemao Q, Huang L, et al. Phase error analysis and compensation for nonsinusoidal waveforms in phase-shifting digital fringe projection profilometry [J]. Optics Letters, 2009, 34(4): 416-418.
- [17] Zhang W, Yu L D, Li W S. Black-Box Phase Error Compensation for Digital Phase-shifting Profilometry[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(10): 2755-2761. doi: 10.1109/TIM.2017.2712862.
- [18] Liu K, Wang Y C, Daniel L L, et al. Gamma model and its analysis for phase measuring profilometry [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision, 2010, 27(3): 553-562.
- [19] Zhan S, Ronald C. Use of LCD panel for calibrating structured-light-based range sensing system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2008, 57(11): 2623-2630.
- [20] Huang S J, Xie L L, Wang Z Y, et al. Accurate projector calibration method by using an optical coaxial camera [J]. Applied Optics, 2015, 54(4): 789-795.
- [21] Huang Z R, Xi J T, Yu Y G, et al. Accurate projector calibration based on a new point-to-point mapping relationship between the camera and projector images [J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 347-356.
- [22] He D, Liu X, Peng X, et al. Eccentricity error identification and compensation for high-accuracy 3D optical measurement [J]. Measurement Science & Technology, 2013, 24(7). doi: 10.1088/0957-0233/24/7/075402
- [23] Xu L, Chen L, Li X, et al. Projective rectification of infrared images from air-cooled condenser temperature measurement by using projection profile features and cross-ratio invariability [J]. Applied Optics, 2014, 53(28): 6482-6493. doi: 10.1364/AO.53.006482.
- [24] Li Dongdong, Wen Gongjian, Hui Bingwei, et al. Cross-ratio invariant based line scan camera geometric calibration with static linear data [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 62(6): 119-125.
- [25] Huang L, Asundi A K. Phase invalidity identification framework with the temporal phase unwrapping method [J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(3). doi: 10.1088/0957-0233/22/3/035304.
- [26] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.

- [27] 何志勇, 孙立宁, 陈立国. Otsu 准则下分割阈值的快速计算[J]. 电子学报, 2013, 41(2): 267-272.
- [28] 袁小翠, 吴禄慎, 陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1772-1781.
- [29] Ng H F. Automatic thresholding for defect detection[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(14): 1644-1649.
- [30] 陈志强, 张定华, 金炎芳, 等. 基于测量数据的叶片截面特征参数提取[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(9): 1972-1975.
- [31] 王玉, 刘涛, 单纯利, 等. 航空发动机叶片评价方法[J]. 计测技术, 2011, 31(6): 33-36.
- [32] 马雯琦. 航空发动机叶片截面特征参数提取技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [33] 蔺小军, 郭研, 吴广, 等. 等高法叶片型面 CMM 测量数据处理算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2442-2450.
- [34] Zhao H, Liang X, Diao X, et al. Rapid in-situ 3D measurement of shiny object based on fast and high dynamic range digital fringe projector [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2014, 54(1): 170-174.
- [35] Salahieh B, Chen Z, Rodriguez J J, et al. Multi-polarization fringe projection imaging for high dynamic range objects [J]. Optics Express, 2014, 22(8): 10064-10071.

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ220893); 111 引智基地项目(B1209)

作者简介



于连栋, 博士, 合肥工业大学仪器科学与工程学院院长、教授, 博士生导师, 国家百千万人才(2017), 有突出贡献中青年专家。现任中国计量学会组织委员、理事, 全国光电标准委员会委员。主持国家重大科学仪器设备开发专项 1 项、“111 学科创新引智基地”计划项目 1 项、国家自然科学基金面上项目 3 项、安徽省科技攻关以及重大项目各 1 项。长期从事微纳操控和 3D 宏观尺度测试技术研究, 在 Opt. Express, Sci. Rep., Meas. Sci. Technol., IEEE Trans. Instrum. Meas., Appl. Phys. Lett., RSC Adv., Opt. Lasers Eng., J. Mech. Robot. 等著名期刊发表 SCI 收录以及中文核心期刊论文共计 60 余篇, 申请国内外发明专利 28 项(其中美国专利 1 项), 授权 19 项, 获省部级科技二等奖 2 项。

1993 年、1999 年、2003 年于合肥工业大学分别获得学士、硕士、博士学位。2001.9-2002.9 在德国联邦物理技术研究院(PTB)做访问学习, 参与德国 SFB622 SPECIAL CMM 项目研究; 2003.9 博士学位毕业后留校任教, 2004 年破格晋升为副教授, 2009 年聘为教授。先后承担了测控技术与仪器本科专业核心课程《误差理论与数据处理》、《检测技术》、《数字信号处理》和双语课程《坐标测量技术》的教学工作, 讲授《纳米技术》研究生课程, 每年指导本科生毕业设计、大学生创新项目与创新大赛等实践环节。先后完成国家级精品课程《误差理论与数据处理》、省级视频公开课《几何与计量》(双语)的建设; 完成“测控技术与仪器”国家级示范专业、安徽省示范实验实训中心的建设工作; 正在承担“测控类专业在线创新实训平台建设研究与实践”和“光电信息科学与工程专业综合试点改革项目”省级质量工程建设项目研究。



张炜, 男, 安徽淮南人, 2013 年于安徽理工大学机械工程学院获硕士学位, 2017 年于合肥工业大学仪器科学与光电工程学院获博士学位。参与国家自然科学基金面上项目“三维阿贝误差补偿技术在关节式坐标测量机中的应用研究”、国家重大科学仪器设备开发专项“便携关节式坐标测量机开发与应用”。

博士期间, 以第一作者发表 SCI 论文 4 篇, 其中一篇论文被 MST 期刊评选为年度亮点论文(highlights of 2016); 根据研究内容申请国家发明专利 4 项; 多次获得学会、国家奖学金奖励; 参加国内外学术交流。博士论文《航空发动机叶片复杂曲面轮廓测量关键技术研究》, 采用条纹投影轮廓测量技术对航空发动机叶片进行测量。