

投影测量技术在翼型表面摩擦力测量中的应用

易荣刚 李鹏 蒋晖

(南京航空航天大学 南京 210000)

摘要: 为了克服风洞荧光油膜法测量翼型表面摩擦力实验中获取待测翼型表面油膜演化图像时存在的不利因素: 待测机翼表面曲率、机翼表面振动和扭曲、成像设备相对位置以及光线折射率变化等, 引入了适用于曲面的投影测量技术。针对风洞中拍摄图像亮度不高, 标记点不易提取的问题, 本文从相机针孔模型的成像原理切入, 建立成像平面中的像素点与其对应的空间位置的映射模型, 并运用冗余信息融合的方法来降低标记点提取的误差。曲面投影测量技术在风洞荧光油膜法测量翼型表面摩擦力实验中得到了验证, 将拍摄到的二维油膜演化图像投影还原成对应的三维空间图。

关键词: 曲面投影测量; 标记点提取; 冗余信息融合; 三维重建

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Application of projection measurement technique in the measurement of airfoil surface friction

Yi Ronggang Li Peng Jiang Hui

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China)

Abstract: In the wind tunnel experiments, there are some unfavorable factors when acquire oil film evolution image on surface of the wing to be measured. These unfavorable factors include surface curvature of the wing, surface vibration, the relative position of imaging equipment, changes in the refractive index of light and so on. In order to overcome these unfavorable factors, projection measurement technique for curved surfaces is introduced. According to the imaging principle of pinhole camera model, we establish the mapping model of the pixels in the imaging plane and its corresponding spatial position in this paper because of filming figure brightness is not high, marked points is not easy to extract. Redundancy information fusion methods are used to reduce the mark point extraction error. In the experiment of measuring the wing surface friction using fluorescent oil film method in wind tunnel, surface projection measurement technique has been verified, and the 2D oil film evolution image is projected into the corresponding three-dimensional space.

Keywords: surface projection measurement; mark points extraction; redundant information fusion; 3D reconstruction

1 引言

表面摩擦应力与飞行器运动过程中所受到的阻力及其产生的气动热存在密切关系, 通过对它的测量可以帮助工程人员优化飞行器的设计、提高性能, 因此可以说对表面摩擦应力的测量是一个十分重要的工程应用问题^[1]。风洞实验中, 荧光油膜法^[2]测量机翼表面摩擦应力, 是基于拍摄荧光油膜演化图像亮度的变化解算表面擦力。为了克服风洞实验中获取待测机翼表面油膜演化图像时存在的不利因素, 必须将测量图像的像素点重新投影到对应的空间点上, 这就需要引入投影测量技术。然而如今应用于荧光油膜的

投影测量技术都是基于平面开发的传统的棋盘格方法^[3-5], 当翼型表面曲率与扭曲不可忽略时, 该方法就不适用了, 本文对此引入了适用于曲面的投影测量技术。

实验地点为航天空气动力技术研究院第二研究部七室风洞。实验机翼模型为 NLF415, 如图 1 所示, 实验风速为亚音速 0.8 马赫。实验中采用的成像设备是 YTW501HB 千兆网工业相机, 其分辨率为 $2\ 592 \times 1\ 944$ (可调), 最大采样帧率为 50 fps。

为了不影响流场, 实验中采用的事先打印好荧光标记线的贴合翼型表面的薄膜, 代替传统的棋盘格。在翼型表面画横向标记线 9 条间隔 10 mm, 竖向标记线 16 条间隔

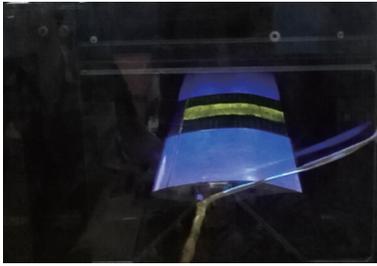


图 1 NLF415 翼型模型

20 mm。图 2 为油膜与标记线在紫外荧光灯下拍摄图，中间为油膜区域，两边为标记线区域。

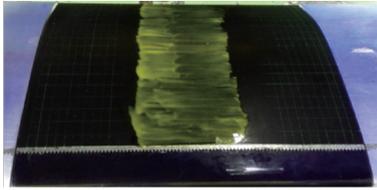


图 2 标记线与油膜在紫外荧光灯下拍摄图

曲面投影测量技术分为图像中标记点坐标提取、标记点空间坐标求取、相机内外参数解算、投影变换-三维重建^[6]，具体实现流程如图 3 所示。

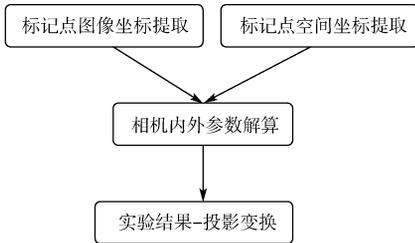


图 3 曲面投影测量技术流程

2 标记点图像坐标提取

标记线上荧光物质受紫外灯激励而发光，由于实验中紫外灯功率较低，再加上为了消除紫外灯的反射光而加的低通滤波片，使得拍摄图像的标记点区域亮度较低，现有的角点提取方法^[7]不能适用，从而提出适用于本实验图像的角点提取方法。实验中拍摄图像标记线区域如图 4 所示。

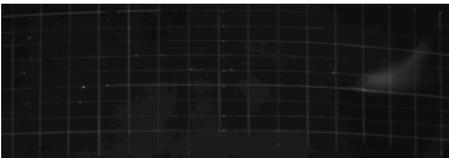


图 4 实验中标记线区域的拍摄图像

由图 4 可以看出横向线不太连贯，而纵向线连贯性比较好，因此将横向线与纵向线分别提取。为了更容易检测

出 9 条横向标记线与 16 条纵向标记线，可以根据相机成像的原理公式推导出线与线的相互关系，从而可以将提取出的标记线运用冗余信息融合方法减小误差。相机拍摄的基本模型为小孔成像的模型^[8-10]。

2.1 相机针孔模型的成像原理

首先，建立 3 个坐标系，如图 5 所示分别为世界坐标系 (X_w, Y_w, Z_w) ，摄像机坐标系 (X_c, Y_c, Z_c) 图像坐标系 (x, y) 。

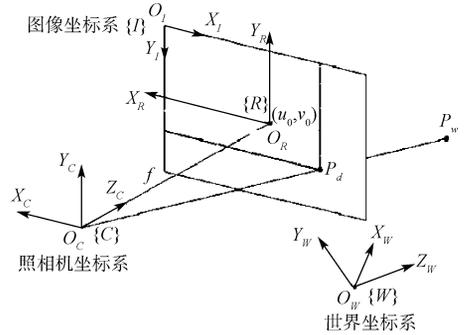


图 5 3 个坐标系的关系

1) 刚体变换(世界坐标系到摄像机坐标系)

刚体变换的过程就是世界坐标系中的一点到摄像机坐标系中的点，可以由一个旋转矩阵 M 和一个平移矩阵 t 来描述，则存在如下刚体变换公式：

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

M 矩阵为 3×3 的矩阵，它的各元素由欧拉角 $(\omega, \varphi, \kappa)$ 确定：

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\phi \cos\kappa \\ m_{12} &= \sin\omega \sin\phi \cos\kappa + \cos\omega \sin\kappa \\ m_{13} &= -\cos\omega \sin\phi \cos\kappa + \sin\omega \sin\kappa \\ m_{21} &= -\cos\phi \sin\kappa \\ m_{22} &= -\sin\omega \sin\phi \sin\kappa + \cos\omega \cos\kappa \\ m_{23} &= \cos\omega \sin\phi \sin\kappa + \sin\omega \cos\kappa \\ m_{31} &= \sin\phi, m_{32} = -\sin\omega \cos\phi \\ m_{33} &= \cos\omega \cos\phi \end{aligned} \quad (2)$$

2) 透视投影(摄像机坐标系到图像物理坐标系)

根据相机成像焦距 f ，物距 u 以及相距 v 直接的关系，与图 6 可得：

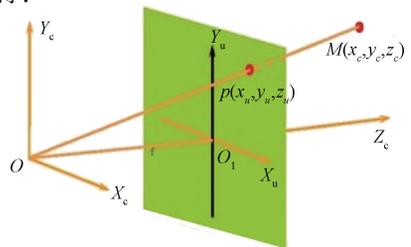


图 6 透视投影

$$\begin{cases} x_u = f \frac{X_c}{Z_c} \\ y_u = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (3)$$

3) 数字化图像(图像物理坐标系到图像坐标系)

图像物理坐标系原点在图像坐标系中的坐标为 (x_p, y_p) ,像面上每一个像素点在 x 轴、 y 轴方向上的物理尺寸为 S_h, S_v ,则图像中任意一个像素在两个坐标系中满足以下关系:

$$\begin{cases} x_n = \frac{x_u}{S_h} + x_p \\ y_n = \frac{y_u}{S_v} + y_p \end{cases} \quad (4)$$

成像设备与翼型的相对位置可以人为设置,本实验中平移矩阵 t 中 t_3 近似为700 mm,欧拉角 (ω, ϕ, κ) 近似为 $(0^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$,误差不超过 5° ,代入式(2),旋转矩阵 M 就近

$$\text{似为} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2 拍摄图像中标记线的相互关系证明

标记线是事先打印好,故标记线的空间方程式已知的。翼型 NLF415 数据已知,翼型上任一点的坐标都满足 $Z=F(Y)$ (Y 坐标与 Z 坐标直接的关系 F 已知)。

纵向线的空间方程为:

$$\begin{cases} Y = 80 + 20 \times (n - 1) \\ Z = F(Y) \end{cases} \quad (5)$$

$1 \leq n \leq 16$ 的整数,从左到右第 n 条纵向线。

横向线的空间方程为:

$$\begin{cases} Z = F(Y) \\ X = 20 + 10 \times (n - 1) \end{cases} \quad (6)$$

$1 \leq n \leq 9$ 的整数,从上到下第 n 条横向线。

2.2.1 纵向线之间的相互关系证明

由纵向线空间式(5)可知,在世界坐标系中任一条纵向直线 L 都是垂直于 Y 轴的直线,故可以将 L 上点 Y_w 与 Z_w 视为定值,设 L 上任一点为 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ ($X_w \in R$),旋转矩阵 M 已知,将点 P 代入式(1)与(3),并整理可得:

$$\begin{cases} x_u = f \frac{Y_w + t_1}{Z_w + t_3} \\ y_u = f \frac{-X_w + t_2}{Z_w + t_3} \end{cases} \quad (7)$$

式中:焦距 f 、平移矩阵 t 、 Y_w 与 Z_w 均为定值,且 $X_w \in R$,从式(7)中易看出 x_u 为定值, $y_u \in R$ 。由于 x_p, y_p, S_h, S_v 均为常数,当 x_u 为常数, $y_u \in R$ 时,从式(4)中易看出, x_n 为常数, $y_n \in R$,可以得出结论:世界坐标系中任一条纵向直线 L 在图像坐标系中为垂直于 x 轴的直线。

2.2.2 横向线之间的相互关系证明

由横向线的空间方程式(6)可知,任一条横向线 L_1 上任一点设为 $P_1(X_w, Y_w, Z_w)$,另一条横向线 L_2 相对应的点

可以表示为 $P_2(X_w + \nabla x, Y_w, Z_w)$ (∇x 为一定值)。将两点分别代入式(1)与式(3),并整理可得:

$$\begin{cases} x_u = f \frac{Y_w + t_1}{Z_w + t_3} \\ y_u = f \frac{-X_w + t_2}{Z_w + t_3} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x'_u = f \frac{Y_w + t_1}{Z_w + t_3} \\ y'_u = f \frac{-X_w - \nabla + t_2}{Z_w + t_3} \end{cases} \quad (9)$$

将式(8)、(9)与(4)联立,整理可得:

$$\begin{cases} x'_n = x_n \\ y'_n = y_n - \frac{f}{S_v} \cdot \frac{\nabla}{Z_w + t_3} \end{cases} \quad (10)$$

世界坐标系中,机翼模型上最高点,即 $Z_{w \max} = 34.5 \text{ mm}$, $t_3 = 700 \text{ mm}$,可知 $t_3 \gg Z_w$, f, S_v 为定值,令 $\nabla = (f \cdot \nabla x) / (S_h \cdot t_3)$,显而易见 ∇ 为一定值。式(10)可以写为:

$$\begin{cases} x'_n = x_n \\ y'_n = y_n - \nabla \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可以看出,在世界坐标系中两条横向间隔定值 ∇x 的曲线,在图像坐标系中,该2条曲线间隔定值 ∇ 。

2.3 竖向线提取

如图4所示,实验拍摄图像较暗,标记线不易直接提取,所以首先使用移动平均图像阈值处理将标记线与背景分离出来,从而更容易被检测。然后再运用Canny边缘检测与霍夫变换进行线检测^[11],将检测出垂直于 x 轴的线即 $\theta = 0^\circ$ 提取出来,即为纵向线,结果如图7所示。

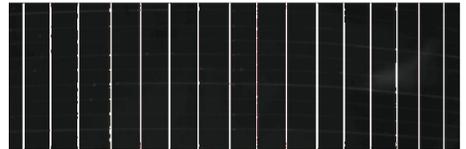


图7 霍夫变换提取竖向线图

2.4 横向线提取

由图4可以看出,横向线有些地方亮度较低,与背景不易区分。横向线之间的关系之前已经证明出来,是相互间隔 ∇ (∇ 根据已有的参数算出近似为60像素)的曲线,从而某一条横向线不明显的地方可以用其他线对应的这部分来弥补,从而将横向线上能提取出的点提取出来,之后再行冗余信息融合方法^[12]就可以近似还原出横向曲线。

提取横向线上点方法的思想。

1)从左到右每一个纵列的亮度如图8所示,每条横向曲线对应一个亮度峰值,找到这些亮度峰值,也就找到了横向曲线上点的坐标。

2)将该纵列上任一点的亮度 g_1 与之前间隔 dy 的亮度 g_2 之差再比上 g_2 得到系数 R ,当 R 大于 K (K 为一经验常数),就认为该点就是亮度峰值,即为横向曲线上点。

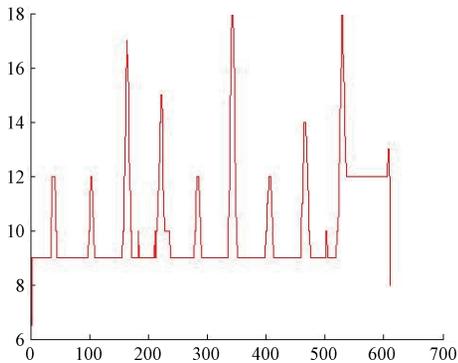


图 8 纵向某列亮度图

3) 纵向线所在的纵列附近容易产生误差, 故将其避开在外。

4) 根据坐标可以很简单的将提取到的点分别归类到 9 条横向曲线中。

5) 曲线直接的间隔 ∇ 为 60 像素, 将其他 8 条曲线上的点均投影到第一条曲线上。再将这些点用冗余信息融合方法解算曲线方程, 再反算出其他 8 条曲线方程。结果如图 9 所示。

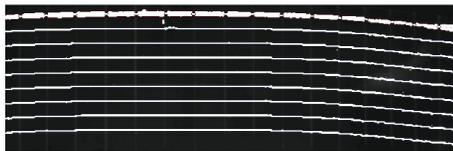


图 9 投影到第一条曲线上点与提取出的 9 条曲线

2.5 标记点提取(横向与纵向标记线交点)

根据前面提取出的 16 条纵向直线与 9 条横向曲线方程, 求出 144 个交点, 即为所要求出的角点。结果如图 10 所示。图 10 可见, 提取出标记点的精度是可以接受的。

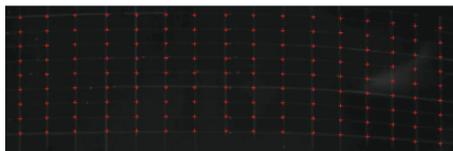


图 10 提取出的标记点

3 标记点空间坐标求取

实验用的翼型为 NLF415, 该翼型的数据是已知的, 先将该翼型的散点图拟合成曲线, 得到曲线方程 $F(y)$ 。翼型上标志点打上去的位置也是已知的, 标志点到 x 轴的弧长也就是确定的, 对 y 积分求弧长得到方程式:

$$s = \int_0^y \sqrt{1 + F'(y)^2} dy \quad (12)$$

s 为弧长, $F(y)$ 为曲线方程, 两者均已知。运用积分知识很容易就可以解出。图 11 为 YZ 方向的翼型上打的角点的位置。

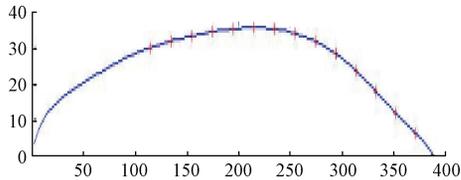


图 11 翼型标志点空间坐标

4 相机内外参数解算

在小孔成像模型中将成像设备中的透镜认为是理想的, 然而实际上由于制造工艺偏差, 透镜都是不理想的, 从而导致实际的光学系统中存在着非线性的几何失真, 使得目标像点与理论像点之间存在着径向畸变^[13]和切向畸变。

根据相关研究图像中点 (x_n, y_n) 处的畸变修正量表示为:

$$\begin{cases} dx = dx_r + dx_t \\ dy = dy_r + dy_t \\ dx_r = (x_n - x_p)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ dy_r = (y_n - y_p)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ dx_t = p_1 [r^2 + 2(x_n - x_p)^2] + 2p_2 (x_n - x_p)(y_n - y_p) \\ dy_t = p_1 [r^2 + 2(y_n - y_p)^2] + 2p_2 (x_n - x_p)(y_n - y_p) \end{cases} \quad (13)$$

式中: (dx, dy) 表示总畸变修正值, (dx_r, dy_r) 表示径向畸变修正值, (dx_t, dy_t) 表示切向畸变修正值 $r = \sqrt{(x_n - x_p)^2 + (y_n - y_p)^2}$, (k_1, k_2, k_3) 为径向畸变相关的系数, (p_1, p_2) 为切向畸变相关的系数。对于加工工艺较高, 质量较好的镜头可以忽略 k_2, k_3, p_1 以及 p_2 , 由于本文中采用的成像设备品质较好, 因此具体计算时忽略了以上 4 个参数, 仅保留了 k_1 。

从式(1)到式(4)与式(13)可以看出, 要从模型中确定出图像坐标点到空间坐标中的映射关系需要获得测量系统的内外参数, 即 (x_p, y_p, f) 、 $(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$ 和 (X_c, Y_c, Z_c) 、 (ω, ϕ, κ) , 因此需要在测量前确定出以上参数。在投影测量中, 将这个过程称为相机的内外参数解算。

针对相机的内外参数解算, 很多研究者提出了相应的解算方法。本文将直接线性变换(DLT)^[14]方法计算初值, 在此基础上运用单纯形搜索法^[15]优化内参数, 运用泰勒级数、最小二乘法与 Newton-Raphson 迭代法优化外参数。根据上述方法编写程序的图如图 12 所示。

将前面求得的标记点坐标与其对应的空间坐标代入成像内外参数解算程序, 即可获得程序设备当前工作状态的内外参数。

成像设备内外参数的解算结果为如下。

外参数中, 两个坐标系之间的欧拉角分别为 5.87° 、 6.75° 、 89.41° , 投影中心坐标 (X_c, Y_c, Z_c) 为 $(8.85 \text{ mm}, 7.78 \text{ mm}, 29.02 \text{ mm})$; 内参数中, 焦距 f 为 9.82 mm , $S_h /$

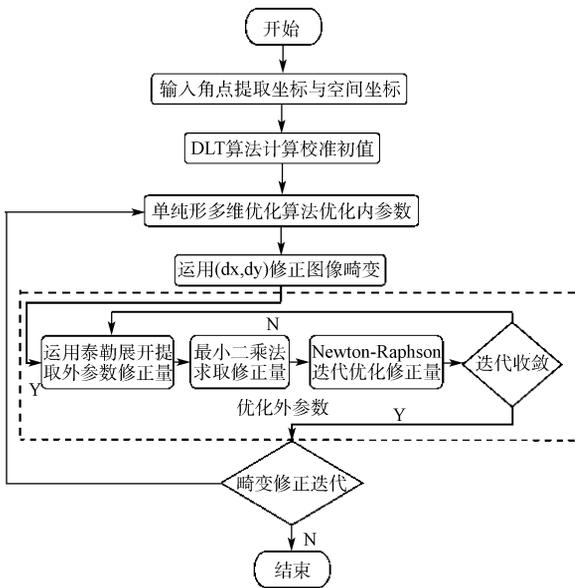


图12 成像内外参数优化算法实现流程

$S_v = 1.012$, 5个畸变系数(k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)为($5.92 \times 10^{-5}, 0, 0, 0$)。图13中给出了角点的精确值与运用程序解算处的测量值对比,由图13可知,该校准程序的精度还是可以接受的。

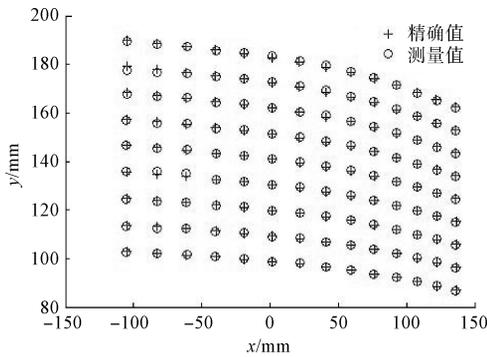


图13 标记点的精确值与测量值

5 实验结果——投影变换

图14为模型 1° 攻角拍摄的标志点区域图,图15为图14投影到三维空间图。



图14 标记点区域投影前

图16为模型 1° 攻角拍摄的油膜区域图,图17为图16投影到三维空间图。

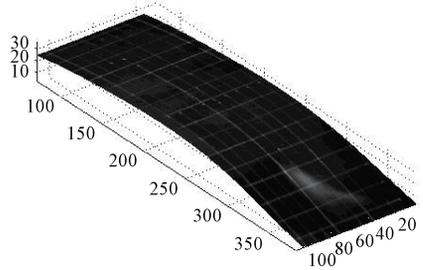


图15 标记点区域投影后

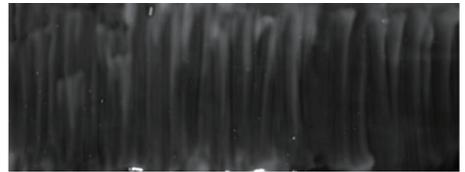


图16 油膜区域投影前

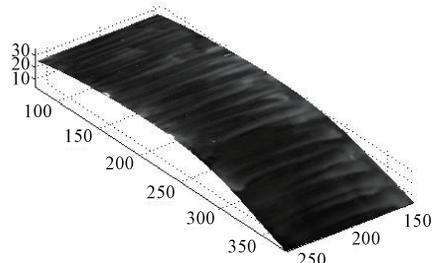


图17 油膜区域投影后

图18为模型 1° 攻角拍摄的完整图像(标记点区域+油膜区域),图19为图18投影后到三维空间图。

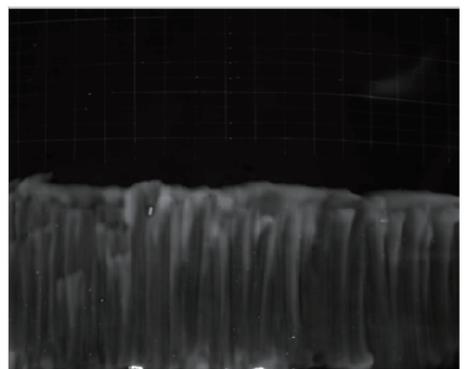


图18 完整图像投影前

6 结论

针对风洞实验中荧光油膜表面摩擦力测量过程中待测机翼表面油膜演化图像获取时存在的:待测机翼表面曲率、表面振动、成像设备相对位置以及光线折射率变化等不利因素引入适用于曲面的投影测量技术。深入研究了相机针

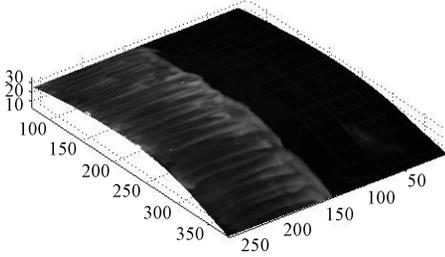


图 19 完整图像投影后

孔模型的成像原理,建立成像平面中的像素点与其对应的空间位置的映射模型,推导出翼型上互相平行等间距的横向标记线之间的相互关系,互相平行等间距的纵向标记线之间的相互关系。运用冗余信息融合技术,降低标记点提取的误差。最后,通过风洞翼型荧光油膜表面摩擦力测量实验中验证了本文给出的投影测量技术。

参考文献

- [1] 丁超. 油膜干涉法测量表面摩擦应力的实验研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [2] 李鹏, 明晓. 风力机叶片的全局表面摩擦力测量的荧光油膜法[J]. 南京航空航天大学学报, 2011, 43(5): 581-585.
- [3] PLACHT S, FÜRSATTE P, MENGUE E A, et al. ROCHADE: robust checkerboard advanced detection for camera calibration[C]. Computer Vision-ECCV, 2014:766-779.
- [4] 赖文敬, 周延周, 朱文卓, 等. 一种基于棋盘格模板单目摄像机高精度标定方法[J]. 广东工业大学学报, 2015, 32(3): 79-84.

- [5] 沈彤, 刘文波, 王京. 基于双目立体视觉的目标测距系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(4): 52-54.
- [6] 王俊, 朱利. 基于图像匹配-点云融合的建筑物立面三维重建[J]. 计算机学报, 2012, 35(10): 2072-2079.
- [7] 许佳佳, 张叶, 张赫. 基于改进 Harris-SIFT 算子的快速图像配准算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(1): 48-54.
- [8] 冯焕飞. 三维重建中的相机标定方法研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2013.
- [9] 贺科学, 李树涛. 基于两垂直相交线段的摄像机快速标定算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1696-1702.
- [10] 路红亮. 机器视觉中相机标定方法的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
- [11] 周涛, 郭庆, 徐翠锋. 基于图像处理的麻花钻角度测量[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6): 37-40.
- [12] 李雪莲, 孙尧, 莫宏伟. 基于最小二乘法的冗余信息数据融合算法实现[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(15): 34-38.
- [13] 涂波, 刘璐, 刘一会, 等. 一种扩展小孔成像模型的鱼眼相机矫正与标定方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(4): 653-659.
- [14] 刘亚文. 利用数码相机进行房产测量与建筑物的精细三维重建[D]. 武汉:武汉大学, 2004.
- [15] 谈樾, 杨旭波. 投影相机建模系统的自标定方法[J]. 科技通报, 2012, 28(7): 130-134.

作者简介

易荣刚, 1990 年出生, 南京航空航天大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理和空气动力学。