



基于三维扫描技术的结冰风洞冰形非接触测量研究

郭龙^{1,2}, 马军², 李明^{1,2}, 倪章松²

(1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 飞行器结冰与防除冰重点实验室, 四川 绵阳 621000)

摘要: 在结冰风洞中进行冰形测量, 传统的接触方法测量精度低、对冰形有损坏, 且只能获得二维的冰形迹线。采用双目视觉测量与结构光方法相结合的三维扫描技术, 利用两个 CCD 相机和一个光栅投射器, 辅助旋转平台和计算机, 构成一个三维非接触扫描系统。通过解决冰的透光性以及结冰风洞低温高湿的环境影响, 设计加热保温装置, 并探索多种显影剂及播撒方法, 实现对透明光冰的非接触测量。实验结果表明: 采用三维扫描系统测量冰形的精度可达到 0.1 mm, 可以满足小尺度模型结冰外形的三维非接触测量, 可在实验研究或工程实践中使用。

关键词: 双目测量; 结构光; 结冰风洞; 结冰外形; 显影剂

中图分类号: V211.74

文献标志码: A

文章编号: 1674-5124(2018)09-0018-05

Non-contact measurement of ice shape in icing wind tunnel based on 3D scanning technology

GUO Long^{1,2}, MA Jun², LI Ming^{1,2}, NI Zhangsong²

(1. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China; 2. Key Laboratory of Icing and Anti/De-icing of Aircraft, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: Because of the shortcoming of the traditional contact measurement of ice shape in icing wind tunnel, such as low accuracy, damage to the ice shape and only obtaining 2D ice shape trajectory. A 3D scanning technology was developed by combining binocular vision measurement and structured light method, which includes two CCD cameras, a grating projector, an auxiliary rotating platform and a computer, forming a 3D non-contact scanning system. Ice transparency and environment influence of icing wind tunnel with low temperature and high humidity were considered, and an attemperator was designed and many types of developers and seeding methods were researched to achieve non-contact measurement for light ice with transparent characteristics. The test results indicate that ice shape measuring precision based on 3D scanning system was 0.1mm, which meets 3D non-contact measurement demands for small-size model icing shape and it can be used during experimental study or engineering practice.

Keywords: binocular measurement; structured light; icing wind tunnel; ice shape; developer

收稿日期: 2018-01-09; 收到修改稿日期: 2018-02-05

基金项目: 国家 973 计划项目(2015CB755800)

作者简介: 郭龙(1980-), 男, 陕西淳化县人, 高级工程师, 研究方向为飞行器结冰试验技术。

0 引言

结冰风洞试验是开展飞机结冰及其防护研究最基本的手段,如何准确获取真实冰形信息,是结冰试验领域的研究者长期以来研究和关注的焦点。获取冰形的传统方法是利用卡板及“热刀”装置,手工测量冰形的二维轨迹线^[1],通过数据拟合的方式获取冰形的三维信息。该方法的显著优点是操作简便,容易实现,但操作过程中对冰形信息有所破坏,影响了测量的准确度,同时所得结果为有限的二维冰形,不能完全反映冰形的真实三维外形。为此,如能将非接触测量技术引入冰形测量,就可避免切削方法对冰形信息的影响,大大提高测量的准确度和真实性。

光栅式三维扫描技术是一项高效、实用的非接触测量技术,它结合结构光技术、相位测量技术和计算机视觉技术于一体,可快速、有效获取物体三维信息,具有扫描精度高、速度快、扫描范围大等显著优势,已广泛应用于文物保护、土木工程、工业检测等领域^[2-6]。近年来,NASA的研究者使用“立体照相法”(三维扫描技术)在结冰风洞中开展了冰形测量研究^[7],取得了一定的成果,但在测量精度和速度方面尚存在一些问题。国内由于结冰风洞较少,对冰形的非接触测量方面研究甚少。

本文利用双目视觉与结构光相结合的方法,研制了一套基于光栅扫描技术的冰形非接触测量系统,并在0.3 m×0.2 m结冰风洞中进行了实验验证。

1 测量原理

光栅式三维扫描技术,又称“拍照式扫描技术”,是一种基于双目测量原理的非接触测量技术。该技术利用两台摄像机模仿人眼的功能,利用空间点在两摄像机上的像点坐标来确定空间点的三位坐标,测量原理如图1^[8-9]所示。

1.1 坐标系定义

世界坐标系 $O_W-X_W Y_W Z_W$:空间目标点 P_W 所在坐标系,用于描述摄像机与目标物体的位置关系。

图像坐标系:左、右摄像机图像坐标系分别为 $O_L-X_L Y_L$ 和 $O_R-X_R Y_R$, O_L 和 O_R 分别为左右摄像机光轴与图像平面中心的交点。

摄像机坐标系: o_L 和 o_R 分别为左右摄像机光心,分别以其为原点,以光轴为 z_L 和 z_R 为纵轴,建立左右摄像机的坐标系。光轴与图像平面垂直, x_L 、 y_L 分别

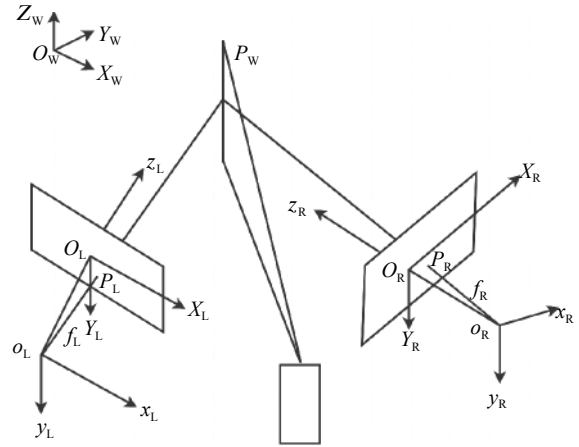


图1 三维扫描技术原理图

与图像坐标系的 X_L 、 Y_L 平行, x_R 、 y_R 分别与图像坐标系的 X_R 、 Y_R 平行。

1.2 空间点三维重建模型

双目测量原理通过视差原理来确定目标位置。空间目标 $P_W(x_w, y_w, z_w)$ 在左右摄像机下的图像坐标分别为 $P_L(X_L, Y_L)$ 和 $P_R(X_R, Y_R)$,左右摄像机焦距分别为 f_L 、 f_R ,右摄像机坐标系相对于左摄像机坐标系间的转换关系为

$$\begin{bmatrix} x_R \\ y_R \\ z_R \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} x_L \\ y_L \\ z_L \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

其中, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 为左右摄像机间的旋转和平移矩阵,可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

通常为了方便计算,将世界坐标系与其中一个摄像机坐标系重合。当世界坐标系与左摄像机坐标系重合时,根据透视投影变换及坐标系转换可得目标点 $P_W(x_w, y_w, z_w)$ 为

$$\begin{cases} x_w = x_L = z_L X_L / f_L \\ y_w = y_L = z_L Y_L / f_L \\ z_w = z_L \frac{f_L (f_R t_x - X_R t_z)}{X_R (r_{31} X_L + r_{32} Y_L + r_{33} f_L) - f_R (r_{11} X_L + r_{12} Y_L + r_{13} f_L)} \end{cases} \quad (3)$$

测试前,通常要对相机进行标定,获得焦距 f_L 、 f_R 、旋转矩阵 \mathbf{R} 、平移矢量 \mathbf{T} 等系统结构参数,之后可根据空间一点在两图像坐标下的坐标点位置即可以求得空间点坐标,即可以根据左右图像中的匹配像点重建出对应的空间点三维坐标。

2 系统设计

系统的总体设计框图如图2所示。主要包括2台光学相机、结构光光源、工作台、计算机等。

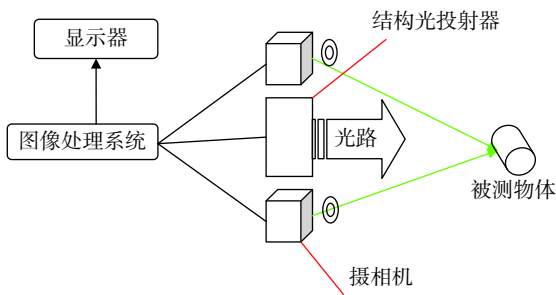


图2 系统总体设计框图

2.1 硬件配置

系统的硬件配置主要包括光栅投射器、相机、散热系统、可移动测量架、旋转平台、标定板、计算机等,结构安装情况如图3所示。其中投射器采用日本三菱GW365,出射亮度2 600 lm,分辨率1 280×1 024。相机采用德国BasleracA1300-14 gm工业相机,分辨率1 296×966,帧率30,像元尺寸3.75 μm×3.75 μm,镜头焦距12 mm。旋转平台重复定位精度0.005°,台面直径300 mm,中心负载大于20 kg。

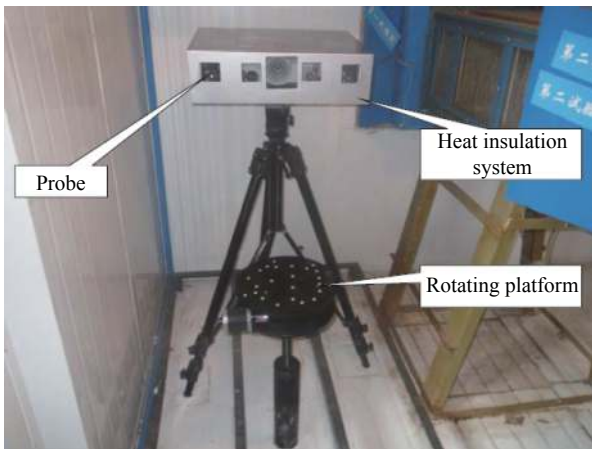


图3 系统硬件安装

2.2 软件配置

系统的软件配置主要是三维光学扫描系统、旋转平台控制软件和数据处理系统3大部分,均安装于测量计算机上。三维光学扫描系统通过相关通信策略控制测量计算机直接与测量头、旋转平台等硬件配置联系。扫描时,三维光学扫描系统通过控制测量头内相机拍照,先完成系统标定^[10-11],之后控制测量头内投影仪投射编码光栅,同时控制相机采集相关光栅图像,完成三维点云坐标的计算。单幅扫描之后,通过旋转平台控制器控制旋转平台完成预设角度的旋转,开始下次测量,完成360°全局扫描

后即可获取所需冰形表面三维数据,之后通过数据处理系统完成冰形表面三维数据的处理及分析。

细分后的软件模块主要包括:数据管理、系统标定、三维重构、三维操作与显示以及数据处理等模块,各模块结构示意图如图4所示。数据处理模块是整个后处理的核心,主要包括点云采样、点云去噪、点云光顺以及点云三角化等功能,通过自行研发方式完成。具体有:

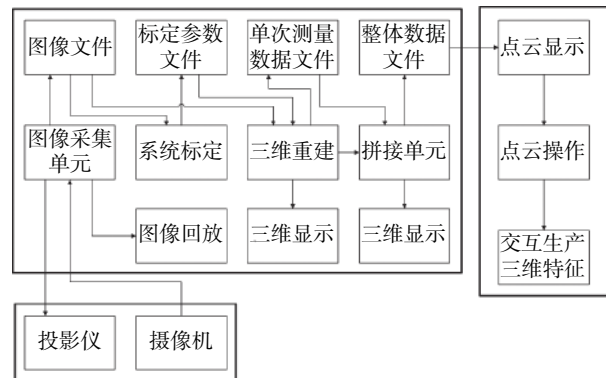


图4 系统软件模块结构示意图

1)点云采样功能可用于对获取到的点云数据进行精简。通过点云采样,减少点云结果的整体数量,在确保物体表面特征的情况下,保证后期三角化、截面分析等操作能快捷、可靠的运行。

2)点云去噪功能用于删除不必要的杂散噪点。扫描过程中受外界多方面因素影响,可通过点云去噪功能对这些离散噪点进行去除,保证后期的截面分析等处理结果的可靠。

3)点云光顺功能用于平滑扫描结果中因指纹、灰尘等影响导致的表面细小突起或噪点,使整个扫描结果的外观更光滑。

4)点云三角化功能用于将离散的三维点云结果整合成三角面片结构,以保证后期截面分析等其他处理能顺利进行。

2.3 技术难点与解决措施

2.3.1 冰的透光性

基于数码相机采集被测物体表面反射光图像的测量原理,需要被测物体表面具有良好的反光特性,而实际上大多冰形(特别是光冰)表面具有很强的透光特性,无法直接测量。本文分别探索了在冰形表面喷涂液体显影剂、干粉显影剂等方案。液体显影剂的优点是喷涂均匀且颗粒较小,但其对冰的

溶解和腐蚀的作用也很明显。干粉显影剂可很好地粘附于冰表面,不会融化冰,经反复研究,排除了溶液型喷壶、电动喷枪、磁粉喷壶等方案,制作了干粉喷瓶和分离网,解决了喷涂不均匀的问题。经冷库实验和风洞实验验证,干粉显影剂及喷涂方法能很好解决冰的透光性问题,如图5和图6所示,为结冰外形的光学测量提供了保障。

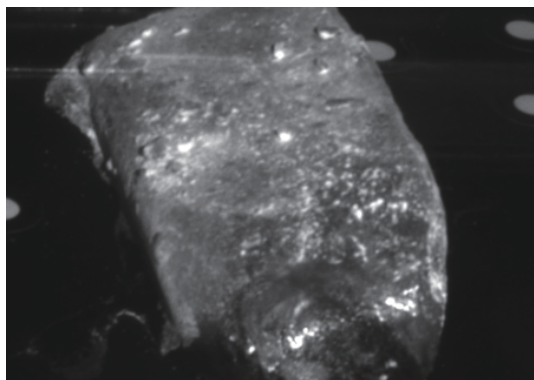


图5 未喷涂显影剂的冰形表面



图6 喷涂显影剂的冰形表面

2.3.2 低温高湿环境

冰形测量中,一方面,为了确保冰不融化,测量系统的硬件均需处于低温环境下;另一方面,测量结束后回到常温环境,硬件设备表面会凝水,因此,需充分考虑设备的耐低温能力和防水特性。为了保证设备能在潮湿环境(相对湿度100%)和低温条件($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下正常工作,对线缆、旋转台、测量头采取了以下措施:

1)在设备选型时,所有线缆和接头都采用了IP66以上防水等级和耐低温的产品,旋转平台选用低温电机。

2)将线缆集中放于线缆盒中,数据线穿过盒

子,使用密封橡胶圈将数据线与线缆盒隔开。与计算机系统连接的线缆则采用专用保温材料进行处理,确保线缆的工作温度在零度以上。

3)将测头、投射器封装在外壳中,设计了专用的加热保温系统,采用电加热的形式,实现了硬件设备的加热、除湿和保温功能。

3 测量实验与结果分析

3.1 精度实验

实验在冷库中进行。实验前准备了一个方形冰块作为被测物,非接触测量前用游标卡尺测量其尺寸参数,之后喷涂干粉显影剂,使用非接触测量系统完成冰形表面三维数据的获取。对获取的三维数据处理后以冰块某一侧面作为基准拟合平面,以另一侧点到基准平面的距离作为测量数据,同游标卡尺测量所得数据进行对比,验证系统精度。

表1给出了冰块的测量结果。可以看出非接触测量系统与游标卡尺对同一测点的测量值相差 0.1 mm 之内,3次测量的精度相差 0.1 mm 之内;而一般使用卡板划线法测量冰形的误差往往大于 0.5 mm 。就此而言,非接触测量系统的测量精准度比传统方法要高的多。

表1 非接触测量值与游标卡尺测量值对比

测量点	非接触测量值/mm	卡尺测量值/mm	偏差/mm	
N1	47.14	47.10	0.04	
1#	N2	47.19	47.12	0.07
	N3	47.15	47.09	0.06
	N4	46.57	46.50	0.07
2#	N5	46.48	46.50	-0.02
	N6	46.49	46.51	-0.02

3.2 风洞测量实验

测试实验在中国空气动力研究与发展中心 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 结冰风洞内完成。该风洞是一座闭口回流式低速风洞,主试验段截面为 $0.3\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 的矩形,空风洞最高风速 65 m/s ,试验段气流最低温度可达 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该风洞试验段外配套有驻室,驻室的最低温度可达 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实验模型为直径 20 mm 、长 200 mm 铝质实心圆柱。实验条件为:风速 30 m/s 、温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、平均水滴直径 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、液态水含量 0.9 g/m^3 、喷雾时间 15 min 。驻室温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

实验中先对系统进行标定,对未结冰的圆柱模型进行三维扫描,获取圆柱的三维信息。喷雾结束后,将圆柱模型同其上冰一起放置于驻室内的旋转平台上,使用非接触测量系统测量圆柱及冰形的三维信息。其后利用杰魔软件,对测量结果进行三维处理,获取冰形(不含圆柱本体)的三维结果,并进行分析研究。

图7和图8给出了圆柱模型上冰的实际照片和三维扫描结果。图9是某典型截面的二维冰形轨迹线。从结果看,非接触测量系统能够有效的获取模型结冰后的三维信息结果,并可以截取任意截面的二维信息,为结冰试验的冰形测量提供了一种快速高效的方法和途径。



图7 实际冰形照片

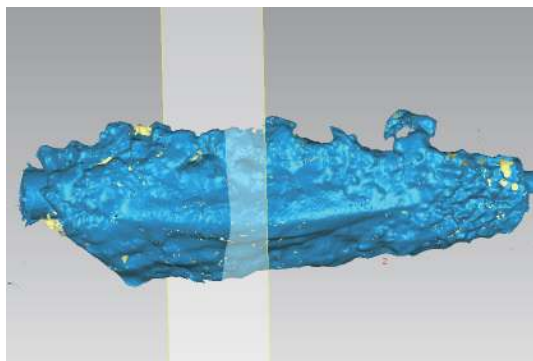


图8 冰形三维扫描结果

4 结束语

在结冰风洞中,利用三维扫描技术进行冰形非接触测量的方法较为少见。本文采用双目测量的原理,使用结构光投射结合双相机照相的方式,实现了对被测冰形的360°全视角扫描。该方法不同于传统的热刀方法,具有数据信息全面、对冰形破坏小、测量精度高的显著优点。

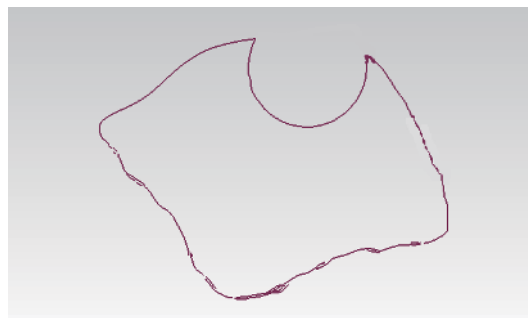


图9 某典型截面的二维冰形轨迹线

本方法实现了对小尺度冰形三维信息的快速测量,进一步扩展视场和精度后,可实现对更大范围结冰风洞试验模型上所结冰形的非接触测量,可为大尺寸模型结冰试验提供更有效的测量方案,因此具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] REEHORST A, CHUNG J, POTAPCZUK M Y. An experimental and numerical study of icing effects on the performance and controllability of a twin engine aircraft[Z]. AIAA-99-0374.
- [2] ALAN C L, SHOU-YEE L. Automated sequence arrangement of 3D Point data for surface fitting in reverse engineering[J]. *Computers in Industry*, 1998, 35(2): 149-173.
- [3] XU H, GOSSETT N, CHEN B. Knowledge and heuristic based modeling of laser-scanned trees[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(4): 303-308.
- [4] ZHANG S, YAU S T. Generic non-sinusoidal phase error correction for three-dimensional shape measurement using a digital video projector[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(1): 36-43.
- [5] WANG J W, DU C M. Three-dimensional laser scanning image processing algorithms to mend[J]. *Computer Engineering and Design*, 2010, 31(17): 3929-3931.
- [6] EDWARD T S, LAURA K K, JAMES T H. Measurements of tip vortices from a full-scale UH-60A rotor by retro-reflective background oriented schlieren and stereo photogrammetry[J]. ARC-E-DAA-TN8772, 2013.
- [7] 孙新磊, 吉国华. 三维激光扫描技术在传统街区保护中的应用[J]. *华中建筑*, 2009(7): 44-47.
- [8] 张刘, 支帅. 双目测量系统目标相对位置误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(S): 116-122.
- [9] 杨景号, 刘巍, 刘阳, 等. 双目立体视觉测量系统的标定[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(2): 300-308.
- [10] 袁建英, 郭进, 王伟, 等. 一种结构光三维扫描系统新标定方法[J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(3): 151-153.
- [11] 田里, 刁常宇. 一种结构光三维扫描仪系统自动标定法[J]. *计算机应用与软件*, 2011, 28(4): 98-100.

(编辑:徐柳)