

采用复合式靶标的近景大视场相机标定方法

刘巍, 李肖, 马鑫, 贾振元, 陈玲, 刘惟肖

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要: 针对风洞内视觉测量视场较大, 测量物体较近以及图像畸变过大等导致的标定精度低, 标定物成本高等问题, 提出了一种基于复合式靶标分区域分约束近景大视场相机标定方法。该方法利用一维标定架与二维标定平面构造的复合式靶标充满测量视场将测量视场划分区域, 针对不同参照物信息采用分约束的方式完成整个视场的分区域准确标定, 重建时针对感兴趣特征所处图像不同区域选取不同像机内外参数与畸变系数进行 3D 重建, 完成基于复合式靶标的三维信息求取。最后, 针对所提出的标定方法进行了标定精度对比以及验证实验。实验结果表明: 内区域标定均方根误差为 0.165, 外区域标定均方根误差为 0.276, 标定精度高, 满足了测量精度要求。

关键词: 相机标定; 复合式靶标; 成像畸变; 近景测量; 大视场

中图分类号: TB853.1; TB811+.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0717005

Camera calibration method for close range large field of view camera based on compound target

Liu Wei, Li Xiao, Ma Xin, Jia Zhenyuan, Chen Ling, Liu Weixiao

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A compound target for camera calibration in wind tunnels is developed, solving problems of low precision and high costs caused by a large field of view, small object distance and severe distortions of optical images. Moreover, a camera calibration method for close range photogrammetry system based on different constraints in different regions was presented in this paper. The 1-D calibration frame and 2-D planar in the compound target were utilized to divide the field-of-view into two regions. Based on distinguished constraints offered by the two calibration references, camera intrinsic, extrinsic and distortion parameters for the two regions were calculated respectively. Then the 3-D coordinates of targets can be reestablished with high precision according to the image region where interesting features lie in. In the end, accuracy contrast test and verification test with respect to the proposed calibration method had been conducted. The results show that the root mean square calibration error of inner region is 0.165 and the root mean square calibration error of exterior region is 0.276, verifying that this method is simple, effective and of high accuracy, meeting the precision requirements.

Key words: camera calibration; compound target; imaging distortion; close range photogrammetry; large field of view

收稿日期: 2015-11-24; 修订日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(51375075, 5122704); 973 计划项目(2014CB46504); 创新研究群体科学基金(51321004)

作者简介: 刘巍(1979-), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事视觉测量、光学精密测量、精密控制、微执行器、微机器人等方面的研究。Email: lw2007@dlut.edu.cn

0 引言

近年来,随着航天航空科技不断发展,国防工业对航空航天设备提出了越来越高的精度指标与技术要求。风洞试验作为研究解决飞行器空气动力学问题不可缺少的实验手段,为飞行器设计提供重要的数据支撑^[1]。近年来视觉检测以其快速、非接触、高精度、实时性强等优点被广泛应用于风洞环境复杂工况各类几何量与物理量的测量中^[2-3]。然而某些风洞实验技术中的被测目标运动范围大,导致视觉标定成本高。并且在同一风洞进行不同尺寸模型测量时,视觉标定对标定参照物规格需求多,标定不具有柔性。此外风洞模拟实验大多属于近场测量,这就不可避免的使用广角镜头或鱼镜头,使得成像存在较大畸变,限制了视觉测量精度。因此研究风洞环境下相机高精度标定尤为重要。

目前像机标定方法大致可分为三类:一、基于场景信息的自标定方法、基于像机已知运动的主动视觉标定方法以及基于标定参照物的传统标定方法。二、其中传统标定方法按使用标定物维数不同分为一维靶标、二维靶标和三维靶标。三、基于高精度标定物的相机标定方法以其较高的精度和稳定性被广泛应用于风洞相机标定中。国内外学者对风洞相机标定进行了有益的探索,美国宇航局 NASA Thomas W. Jones 等人提出了基于双目视觉的模型位姿(俯仰、偏航、滚转)测量方法^[4]。采用安装于风洞内部模型支杆的三维台阶标定块充满整个测量视场标定相机。德国圣路易斯研究所利用单目视觉测量激波风洞中抛射弹自由飞运动轨迹^[5],标定时采用魔方式三维标定卡片作为参照物,采用 DLT 估计像机内外参数初值,利用 LM 算法对像机参数迭代求精。使用三维标定块标定考虑到了景深方面的畸变,但当风洞空间狭小时,三维标定块安装困难,当测量物体较大,为获取高精度测量结果需较大尺寸标定块充满整个视场,然而大尺寸标定块制造难度大、制造成本高。

针对于二维标定参照物,法国宇航局提出了双目视觉结合反光标志点的空客模型 F1 风洞机翼动态变形测量方法^[6]。采用 1 m×1 m 上面制有 124 个圆形标志点的铝制平面标定板在模型周围摆放多个姿态,利用 Tsai 方法完成两相机标定。美国宇航局艾姆

斯研究中心在 40 ft×80 ft 的全尺寸空气动力学风洞中利用四对相机测量旋翼在不同实验条件下的振动量^[7]。标定时,将 84 个 6 in 直径的自发光标志点安装于风洞顶壁上,并用 VSTARS 系统测定标定点的坐标,结合最小二乘法和 LM 算法进行摄像机的标定。使用平面标定板在加工时会产生与标定块同样的问题。

NASA 兰利研究中心提出了基于立体摄影原理的高超音速减速器全尺寸低速风洞变形测量方法^[8]。采用 20 个带有编码点的胶合板与单杆组成的交叉标尺标定四对像机,利用小型高精度摄像机系统校准编码点位置信息。标定时靶标位置固定,像机转动。荷兰代尔夫特大学采用双目视觉结合标志点测量风力涡轮机叶片的振动量^[9],标定采用 1.5 m×1.5 m 的十字型靶标进行像机的标定。韩国延世大学提出了多目视觉配合红外光源的风洞环境结构位移量测量^[10]。标定过程分为静态标定和动态标定,静态标定时通过将标准的 T 型靶标在摄像机前方摆放多了姿态标定摄像机的外参数和畸变参数,动态标定用于整个摄像机矩阵的标定,最后从中分离出内参数。国内中国科学院长春光学精密机械与物理研究所王子辰^[11]、苏州大学牛海涛^[12]在相机标定方面做了广泛研究并且取得了很好的结果。在风洞相机标定方面西安交通大学梁晋等提出了基于十字架一维靶标的风洞模型动态视频测量相机标定方法^[13]。在引入径向畸变、切向畸变、薄棱镜畸变的基础上,利用光速平差法进行摄像机矩阵和空间坐标的优化,该方法的标定精度可以达 0.5 个像素。虽然一维靶标方便、便携,但标定精度低。并且采用的标定算法标定出视场内的畸变与二维标定板一样不能反映镜头在整个幅面内的畸变。

大量学者针对风洞相机标定做出了卓越的贡献,但是针对导致的风洞近景测量视场与畸变较大以致标定精度低等问题没有较好解决。文中提出一种基于复合式靶标的风洞相机大视场标定方法。首先介绍虑及相机畸变矫正模型的非线性成像模型,然后合理设计基于多维的复合式靶标。标定时将靶标覆盖整个测量视场并将其划分不同区域,然后根据不同区域提供的不同约束条件进行分区域分约束标定以达到分区域内高相机标定精度。在空间信息

求解时根据感兴趣特征所处图像不同分区选取不同摄像机标定参数进行 3D 重建。最后在实验室条件下进行标定精度对比与验证实验。

1 非线性相机成像模型

摄像机成像模型表达了三维空间到二维像面的映射关系,常用的投影模型为中心透视投影模型,针孔模型示意图见图 1。

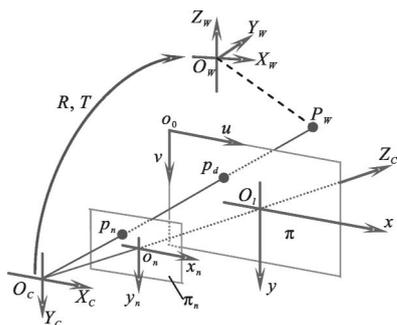


图 1 针孔摄像机模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pinhole camera model

$$Z_c \begin{bmatrix} u+\delta_x \\ v+\delta_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_x & 0 & u_0 \\ 0 & C_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = MP \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_0, v_0 为图像的主点坐标; C_x, C_y 为横纵方向的等效焦距; R, T 分别为摄像机坐标系相对于世界坐标系的旋转和平移矩阵; X_w, Y_w, Z_w 为控制点在世界坐标系下的坐标; M 为相机内参数矩阵; P 为相机外参数矩阵; u, v 为控制点在摄像机平面上的像素坐标, δ_x, δ_y 为畸变。

近景大视场使用广角镜头测量时, 由于光学系统以及组合透镜的设计、制造以及安装误差, 物点成像存在畸变, 如图 2 所示。使得像点、物点和主点不再同一条直线上, 从而使理论成像点偏离实际成像点。畸变可表达为:

$$\begin{cases} x-\delta_x=\bar{x} \\ y-\delta_y=\bar{y} \end{cases} \quad (2)$$

式中: x, y 为实际成像点; \bar{x}, \bar{y} 为理论成像点; δ_x, δ_y 为畸变量。

畸变主要分为径向畸变、切向畸变和薄棱镜畸变, 通常以径向畸变为主, 考虑到广角镜头畸变大的

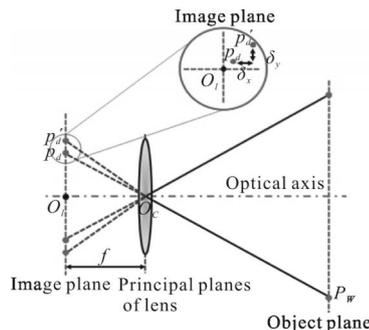


图 2 像机畸变原理图

Fig.2 Schematic diagram of the camera distortion

特点, 将径向畸变和切向畸变引入畸变模型:

$$\begin{cases} \delta_x=u[k_1(u^2+v^2)+k_2(u^2+v^2)^2]+ \\ [p_1(3u^2+v^2)+2p_2uv] \\ \delta_y=v[k_1(u^2+v^2)+k_2(u^2+v^2)^2]+ \\ [p_2(3u^2+v^2)+2p_1uv] \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_1, k_2 中分别为第一阶与第二阶径向畸变系数; p_1, p_2 为第一阶和第二阶切向畸变参数; 在考虑畸变的基础上 $C_x, C_y, u_0, v_0, k_1, k_2, p_1, p_2$ 构成成像模型 9 个内参数; R, T 构成 6 个独立的外参数。

2 风洞大视场分区域标定方法

文中针对风洞复杂环境近景大幅面测量图像畸变较大等问题, 设计一种复合式靶标, 并针对此靶标提出一种分区域分约束相机标定方法。

2.1 复合式靶标设计

风洞环境视觉大幅面测量相机标定存在以下测量问题: (1) 标定板未充满整个测量视场时, 标定精度低。 (2) 为提高标定精度, 当采用三维标定块和二维标定板覆盖相机视场时, 因标定参照物加工精度难保证, 制造价格昂贵, 且后续维护困难, 很难应用于实际风洞相机标定; 当采用一维靶标标定, 相机校准精度低。 (3) 当标定参照物覆盖整个视场时, 常规标定算法求解的畸变量不能准确反映整幅图像畸变情况。考虑到标定物设计制造低成本、分区内高标定精度以及标定简单便携等因素, 文中设计了一种基于不同参照物维度的复合式靶标。

如图 3 所示, 靶标分为内区域和外区域, 内区域由黑白相间网格拼接成的平面标定板组成, 其角点距离精确已知; 外侧为两自由相交的一维十字架, 其上分布多个距离已知的编码标记点和非编码点。为

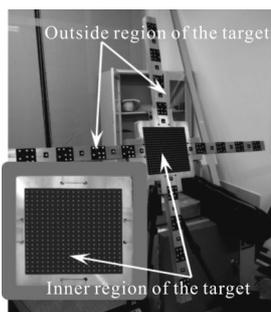


图 3 复合式靶标

Fig.3 Compound target

满足不同测量视场大小与精度要求, 选择合理尺寸的标定物以内外组合方式充满整个测量视场, 针对不同区域内标定物提供的不同约束信息进行摄像机内外以及畸变参数的分区域分约束求解。

2.2 相机标定

摄像机标定是图像测量关键一步, 标定精度直接影响后续测量精度。根据靶标中不同标定参照物提供的不同约束信息, 文中提出了分区域分约束像机标定方法, 针对图像不同区域建立不同相机成像模型, 使分区域内相机标定精度达到高。

2.2.1 相机内区域标定算法

考虑到大幅面测量使用广角镜头畸变严重, 文中采用非线性成像模型结合优化算法求解摄像机参数。为获得良好的标定参数初值使像机参数达到全局收敛, 文中依据镜头成像时图像中心像差较小, 图像边缘像差较大的物理机制, 选取图像中心小区域控制点进行内区域标定初始参数估计。基于张氏标定算法^[14]标定靶标内区域。在靶标平面上建立坐标系, 此时 $Z=0$ 在不考虑畸变的情况下摄像机投影模型公式(1)可改写为:

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $H=[h_1 \ h_2 \ h_3]$ 为单应性矩阵; r_1, r_2 分别为旋转矩阵的前两列; t 为平移矩阵组成的列向量; 因旋转矩阵的单位正交性得到旋转矩阵列向量之间的关系如下: $r_1 r_2^T = 0$ 和 $\|r_1\| = \|r_2\| = 1$ 。

则针对相机拍摄单张图像有如下两个约束:

$$\begin{cases} h_1^T M_1^{-T} M_1^{-1} h_2 = 0 \\ h_1^T M_1^{-T} M_1^{-1} h_1 = h_2^T M_1^{-T} M_1^{-1} h_2 \end{cases} \quad (5)$$

摄像机有 5 个内部参数, 每张图像可提供一张单应性矩阵, 通过摄像机在不同位置获取至少靶标三张图片就可以解算出 $M_1^{-T} M_1^{-1}$; 随后将 $M_1^{-T} M_1^{-1}$ 进行 Cholesky 分解得到内参数矩阵 M_1 ; 随后由内部参数和单应性矩阵可分离出外参数 R, T 初值; 将像差 (δ_x, δ_y) 引入到成像模型中求解畸变初值。考虑整个内区域, 利用 LM 算法最小化重投影误差目标函数得到内区域标定参数的最优值。

2.2.2 像机外区域标定算法

依据十字架标志点提供的距离约束信息标定相机靶标图像外区域, 记十字架标志点分别为 x_i^{A+1} 和 x_i^A , 两非编码标志点之间距离为 L , 有如下方程:

$$\begin{cases} |x_i^{A+1} - x_i^A| = L \\ F = K_1 R [\mu] \times K_2 \\ t = \left(\frac{1}{2d} \sum_i |x_i^{A+1} - x_i^A| \right) (\mu t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: K_1, K_2 分别为第一个与第二个相机的内参数矩阵; R, t 为两相机之间的旋转与平移矩阵; i 为距离为 L 的点对; μ 为比例系数。

标定外区域相机参数时选用与内区域相同的内参数初值, 利用 RANSAC 算法根据多相机拍摄控制点之间的对应关系估计两摄像机间基本矩阵 F , 根据多对编码标志点间的距离和相机的内参数初值先验知识对 F 矩阵进行 SVD 分解求解外参数初值。随后引入畸变到摄像机模型中求解畸变系数初值, 最后利用 LM 算法最小化重投影误差函数得到内外参数的最优值。

3 实验

采用图 4 所示搭建的双目视觉测量系统。实验设备采用德国 SVS 公司生产的两黑白工业相机 SVS11002, 4 008×2 607 像素, 方形 CCD 像元, 尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$, 12 Bit。光学镜头采用 Nikon 公司的 17/35 mm 广角镜头。风洞内目标运动范围为 $1\ 200 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$ 。根据测量视场要求设计复合式靶标总体尺寸为 $1\ 200 \text{ mm} \times 1\ 200 \text{ mm}$, 内区域尺寸为 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ 编码点点阵图案, 圆形标志点阵列为 18×18 。外区域由四条单杆连接而成, 每个单杆上布置编码点和非编码点各 4 个, 相邻编码标志点和非编码标志点之间的距离为 30 mm, 标志点半径为 10 mm。

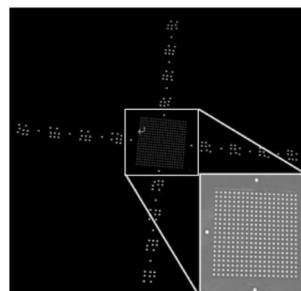


图 4 相机标定设备

Fig.4 Apparatus for camera calibration

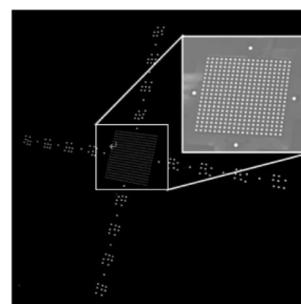
针对文中提出的复合式靶标和分区域分约束像机标定方法,文中在实验室环境下进行了实际标定实验。标定时将复合式靶标摆放 12 个位置,使其在每个位置下都能充满整个测量视场。使用上述双目视觉系统采集靶标图像,经图像处理采用文中提出的分区域分约束标定算法标定双目立体相机。图 5 为左右工业相机采集的靶标成像。表 1 为标定的图像不同区域的相机内外参数以及畸变参数。

针对文中提出的标定方法进行靶标内外区域标定精度对比实验。实验分两组,第一组采用与复合式靶标内区域尺寸相当的平面标定板标定双目视觉系统,标定视场为 1 200 mm×1 200 mm,标定板的尺寸大小为 300 mm×400 mm,图案阵列为 9×9。标定时将平面标定板在两相机的公共视场内摆放 14 个位置,并使平面标定板摆放位置布满整个测量视场,采用 Zhang^[14]方法标定相机。第二组实验中将复合式靶标



(a) 左相机拍摄靶标图像

(a) Target image captured by the left camera



(b) 右相机拍摄靶标图像

(b) Target image captured by the right camera

图 5 靶标采集图像

Fig.5 Target images captured by the stereo cameras

与一维靶标在相机公共视场内摆放多个位置并充满整个测量视场,分别采用 Zhang^[15]与 Kalpoe D^[9]方法标定相机。比较两种不同标定参照物下文中提出的标定方法与其他标定方法之间的 RMS 大小,两组实验的比较结果见表 2。

表 1 不同区域相机参数标定结果

Tab.1 Camera calibration results for different regions

Region of the target	Intrinsic matrix	Pose matrix between two cameras	Distortion coefficient	RMS/mm	
Inner region	Left camera	$R = \begin{bmatrix} -0.0071 & 0.9985 & -0.0550 \\ 0.9998 & 0.0080 & 0.0173 \\ 0.0177 & -0.0549 & -0.9983 \end{bmatrix}$	$k_1 = -0.0835, k_2 = 0.0536$ $p_1 = 0.0005, p_2 = -0.0004$	0.165	
	Inner region				$\begin{bmatrix} 858.0137 & 0 & 520.3792 \\ 0 & 858.1906 & 504.5432 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Right camera				$T = \begin{bmatrix} -69.9362 \\ -135.2279 \\ 813.2551 \end{bmatrix}$
	Right camera	$\begin{bmatrix} 873.0285 & 0 & 521.3530 \\ 0 & 873.3631 & 503.4587 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$			
Outside region	Left camera	$R = \begin{bmatrix} -0.0043 & 0.8592 & -0.1321 \\ 0.8562 & 0.0127 & 0.3562 \\ 0.0328 & -0.1597 & -0.6349 \end{bmatrix}$	$k_1 = -0.0624, k_2 = 0.0687$ $p_1 = 0.0007, p_2 = -0.0006$	0.276	
	Outside region				$\begin{bmatrix} 851.0324 & 0 & 521.6273 \\ 0 & 851.4231 & 503.4334 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
	Right camera				$T = \begin{bmatrix} -19.6326 \\ -19.6159 \\ 921.3422 \end{bmatrix}$
	Right camera	$\begin{bmatrix} 840.0124 & 0 & 517.3246 \\ 0 & 840.1725 & 508.3241 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$			

表 2 不同标定参照物下重投影误差结果

Tab.2 Re-projection error results based on different calibration references

Calibration target/method	Inner region RMS/mm	Outside region RMS/mm
Compound target	0.165	0.276
Planer target(Zhang's method ^[14])	0.259	—
One-dimensional object (Zhang's method ^[15])	—	0.421
One-dimensional object (Kalpoe D's method ^[9])	—	0.342

由表 2 知, 复合式靶标中心区域标定精度高于 Zhang^[14]基于二维标定板的标定精度, 复合式靶标外区域标定精度高于 Zhang^[15]与 Kalpoe D^[9]基于一维靶标的相机标定精度。实验结果表明文中提出的采用复合式靶标的相机标定方法可使相机在不同视场分区内达到较高标定精度。

为了验证该标定方法的有效性与高精度, 采用不同尺寸殷钢标准尺进行验证。将长度分别为 1 050.017 2 mm 和 175.015 4 mm 的标尺在测量视场中心摆放多个位置, 根据标尺所在不同区域采用不同的摄像机模型进行标准尺长度重建, 将实际测量值与理论值进行比较验证该标定方法的测量精度。不同尺寸的标尺见图 6, 两种尺寸下标尺的测量结果见表 3。



(a) 1 050.017 2 mm 殷钢标准尺

(a) Invar gauge with length of 1 050.017 2 mm



(b) 175.015 4 mm 殷钢标准尺

(b) Invar gauge with length of 175.015 4 mm

图 6 不同尺寸的殷钢标准尺

Fig.6 Invar gauges with different length dimensions

表 3 标尺长度测量误差

Tab.3 Length measurement error of the two invar gauges

Length of the invar gauges/mm	Positon of the invar gauges	Measurement results/mm	Measurement errors/mm	Standard deviation
175.015 4	1	175.231 4	0.216	0.172
	2	175.122 4	0.107	
	3	175.266 4	0.251	
	4	175.211 4	0.196	
	5	174.903 4	-0.112	
	6	174.814 4	-0.201	
1 050.017 2	1	1 050.242 2	0.225	0.258
	2	1 050.251 2	0.234	
	3	1 049.680 2	-0.337	
	4	1 049.712 2	-0.305	
	5	1 050.193 2	0.176	
	6	1 050.278 2	0.261	

4 结 论

文中针对近景测量广角镜头畸变大, 标定精度低等问题, 根据实际成像系统非线性畸变以及风洞环境特点, 设计了适用于近景大视场测量的复合式靶标, 并提出基于复合式靶标的分区域分约束相机标定方法。通过理论分析和实验验证, 得出如下结论:

(1)设计了一种新型复合式靶标, 采用平面靶标与十字靶标相结合的方式, 在视觉系统标定时, 使得靶标尽量充满视场, 不仅提高了标定精度, 而且降低标定成本;

(2)提出了一种分区域分约束的标定方法, 将广角镜头外部畸变较大区域与内部畸变较小区域分别标定, 提高了双目相机标定精度;

(3)通过实验对比与验证证明该标定方法简单有效, 并且提高了整个视场的标定精度, 满足近景大视场实验测量系统的标定要求。

参 考 文 献:

[1] Graves S S, Burner A W. Development of an intelligent videogrammetric wind tunnel measurement system [C]//Proc SPIE, 2001, 4448: 120-131.

[2] Jia Zhenyuan, Ma Xin, Liu Wei, et al. Pose measurement method and experiments for high-speed rolling targets in a wind tunnel[J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 23933-23953.

- [3] Liu Wei, Shang Zhiliang, Ma Xin, et al. Position and attitude measuring method of auxiliary tank based on color-coding method in wind tunnel environment [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 36(5): 1156–1563. (in Chinese)
刘巍, 尚志亮, 马鑫, 等. 基于彩色编码的副油箱风洞模型位姿测量方法[J]. 航空学报, 2014, 36(5):1156–1563.
- [4] Thomas W J, Charles B L. A photogrammetric system for model attitude measurement in hypersonic wind tunnels[C]// AIAA, 2007, 1164: 1–10.
- [5] Charles V S, Jennifer H, Thomas G I, et al. Assessing videogrammetry for static aeroelastic testing of a wind-tunnel model[C]//AIAA, 2004, 1677: 1–10.
- [6] Martinezl B, Bastide M, Wey P. Free flight measurement technique in shock tunnel[C]// AIAA, 2014, 2523: 1–12.
- [7] Sant Y L, Mignosi A, Deléglise B. Model deformation measurement(MDM) at Onera[C]//AIAA, 2007, 3817: 1–11.
- [8] Kushner L K, Littelly J, Cassellz A. Photogrammetry of a hypersonic inflatable aerodynamic decelerator [C]//AIAA, 2013, 1284: 1–15.
- [9] Kalpoe D, Khoshelham K, Gorte B. Vibration measurement of a model wind turbine using high speed photogrammetry [C]//Proc SPIE, 2011, 8085: 80850J1–80850J11.
- [10] Park H S, Kim J Y, Kim J G, et al. A new position measurement system using a motion-capture camera for wind tunnel tests[J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 12329–12344.
- [11] Wang Zichen, Dai Ming, Li Gang, et al. Calibration and analysis of line-scan camera based on virtual stereo pattern [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (3): 903–907. (in Chinese)
王子辰, 戴明, 李刚, 等. 基于虚拟立体靶标的线阵相机标定与分析[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3): 903–907.
- [12] Niu Haitao, Zhao Xunjie. New method of camera calibration based on checkerboard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 133–137. (in Chinese)
牛海涛, 赵勋杰. 采用棋盘格模板的摄像机标定新方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 133–137.
- [13] Hu Hao, Liang Jin, Tang Zhengzong, et al. Global calibraton for muti-camera videogrammetric system with lager field of view[J]. *Opt Precision Eng*, 2012, 20(2): 369–378. (in Chinese)
胡浩, 梁晋, 唐正宗, 等. 大视场多像机视频测量系统的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 369–378.
- [14] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330–1334.
- [15] Zhang Zhengyou. Camera calibration with one-dimensional objects [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(7): 892–899.