· 开发研究与工程应用 ·　　文章编号: 1000-3428(2017)11-0281-05　　文献标志码: A　　中图分类号: TP391

三目视觉测量系统在风洞试验中的应用研究

付增良,梁　彬,赵俊波,杨　辉

(中国航天空气动力技术研究院,北京 100074)

摘　要: 针对立体视觉测量技术在风洞试验中的应用特征,设计基于线阵 CCD 的三目视觉立体测量系统。利用基于双高斯物镜的组合透镜,在降低光学畸变的前提下实现点光源到线光源的变换。组合镜头可对 CCD 进行三自由度微调,保证测量目标成像于焦平面附近。在系统标定过程中利用三坐标测量机构建虚拟阵列靶,以最大限度地提高标定靶精度。实例应用结果表明,该系统能够实现三自由度虚拟飞行系统模型运动轨迹的追踪及自由振动系统机械阻尼的测量。

关键词: 风洞试验;姿态测量;三目视觉;线阵 CCD;虚拟阵列靶

中文引用格式:付增良,梁　彬,赵俊波,等. 三目视觉测量系统在风洞试验中的应用研究[J]. 计算机工程,2017,43(11):281-285,291.

英文引用格式:FU Zengliang,LIANG Bin,ZHAO Junbo,et al. Application Research of Trinocular Vision Measurement System in Wind Tunnel Test[J]. Computer Engineering,2017,43(11):281-285,291.

Application Research of Trinocular Vision Measurement System in Wind Tunnel Test

FU Zengliang,LIANG Bin,ZHAO Junbo,YANG Hui

(China Academy of Aerospace Aerodynamics,Beijing 100074,China)

【**Abstract**】 Aiming at the application feature of the stereovision measurement in wind tunnel test, a trinocular stereovision measurement system based on linear CCD is designed. The cylindrical lens system based on biotar lens is fixed on the focal plane of CCD,which is used to convert the point light to linear light,and to reduce the lens distortion simultaneously. Adjusted by three-DOF mechanism to CCD,measurement target can form image nearby the focal plane. The virtual calibration target, constructed with coordinate measuring machines, is used to compute the transformation parameter accurately. Example application results show that the system can track the trajectory of the three-degree-of-freedom virtual flight system,and measures the mechanical dump of free-oscillation system accurately.

【**Key words**】 wind tunnel test; attitude measurement; trinocular vision; linear CCD; virtual array target

DOI:10.3969/j.issn.1000-3428.2017.11.045

0　概述

近二十年来,立体视觉技术在风洞试验领域的重要性愈发突出,作为一种新的测量手段和途径,可有效辅助和弥补现有基于应变天平、传感器、微机械陀螺(MEMS)等传统测量技术的不足,以测量精度高、实时性好、处理灵活方便等优点,在模型姿态测量、机翼变形测量、动态试验模型运动轨迹追踪等风洞试验中得到越来越广泛的应用[1-2]。

国外关于立体视觉技术在风洞中的应用研究始于 20 世纪 90 年代初,波音公司资助开发的 OPTOTRAK 系统在风洞中模型姿态角的测量精度达 0.01°,NASA 的 Ames 研究中心和 Langley 研究中心也分别开发了视觉测量系统,并在风洞中投入使用[3-5]。国内诸多科研机构也对该技术及其在风洞中的应用进行大量研究,见于报道的文献主要以双目视觉系统为主[6-9]。较之于面阵 CCD 技术,线阵 CCD 具有处理数据量小、分辨率高的特点,易于实现测量点坐标的精确和高速重建,在现代风洞试验中具有更加广泛的应用前景。国内的清华大学、哈尔滨工业大学和长春光机所等也对线阵 CCD 立体定位技术进行研究[10-13],并在临床医学、天文学和航空航天领域进行初步应用。目前,这些研究仍处于实验室测试阶段,测量精度和稳定性等仍有待提

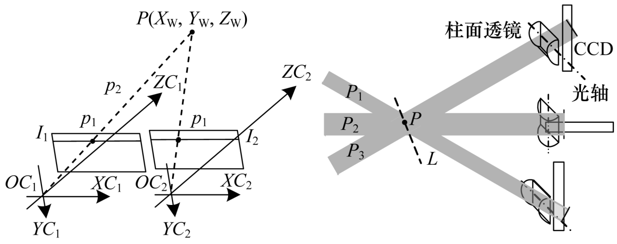
基金项目:国家自然科学基金(11302214)。
作者简介:付增良(1981—),男,高级工程师、博士,主研方向为立体视觉技术;梁　彬,工程师、博士;赵俊波、杨　辉,高级工程师、博士。
收稿日期:2016-09-26　　**修回日期**:2016-11-12　　**E-mail**:fuzengliang435@163.com

高,距普遍推广尚有很大差距。基于线阵 CCD 的立体定位技术在国外已相当成熟,并推出许多商业化产品,如加拿大 NDI 公司的 OptotrakTM 立体测量系统。但这类产品价格普遍比较昂贵,维护成本高,重新标定需要返回国外厂家。而且单纯采用国外的产品和技术而不进行自主研发,难以从根本上推进我国相关技术的发展,不利于我国风洞试验基础研究领域的长期、良性发展。

本文研究针对立体视觉测量技术在风洞试验中的应用特征展开,设计一套基于线阵 CCD 的三目视觉测量系统,并在风洞自由振动试验机械阻尼测量和虚拟飞行试验中模型姿态追踪等方面进行应用。相机镜头由柱面透镜与双高斯物镜组合而成,柱面透镜实现点光源到线光源的转换,双高斯物镜可有效消除畸变和像差,满足系统大视场、高精度的要求。在测量过程中,发光 LED 在线阵 CCD 上所成线状像与柱面透镜光轴构成平面,3 个不共面光平面的交点即为 LED 的空间位置。

1 三目视觉立体测量系统

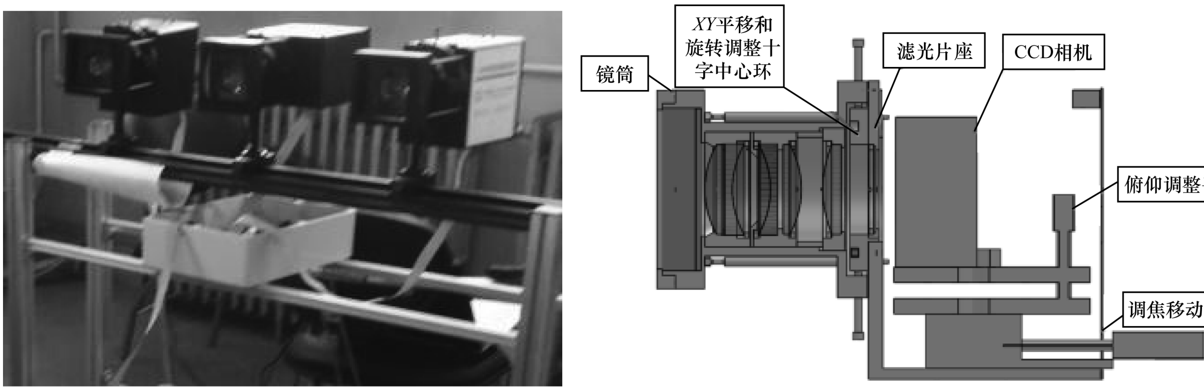
线阵 CCD 原理如图 1 所示。



(a)双目面阵CCD测量原理 (b)三目线阵CCD测量原理

图 1 立体测量原理

立体测量系统及镜头装配图如图 2 所示。三目视觉测量系统如图 2(a)所示,中间相机的柱面透镜水平放置,两侧柱面透镜与之相垂直。基于双高斯物镜的组合透镜的全视场全波段系统如图 3 所示,焦距为 91.158 mm,工作波段为 490 nm ~ 650 nm。



(a)立体测量系统 (b)镜头装配图及三自由度微调结构

图 2 立体测量系统及镜头装配图

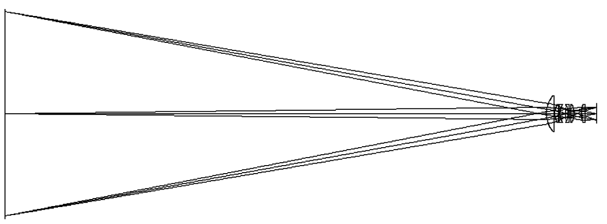
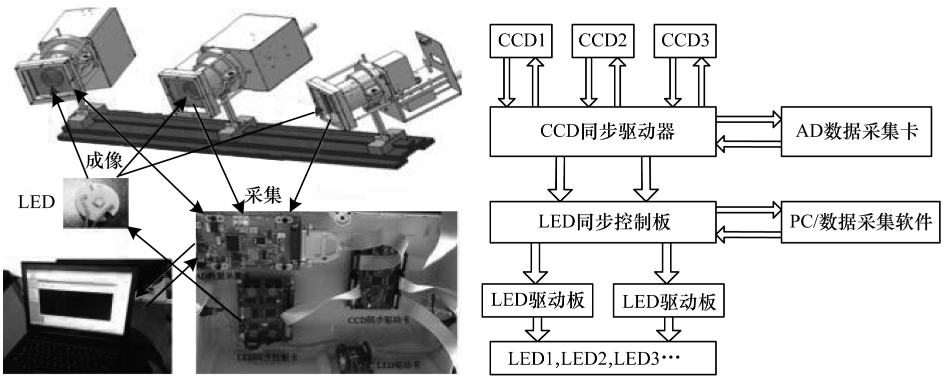


图 3 光学镜头全视场全波段系统

由于加工和安装误差的存在,线阵 CCD 安装后需要在位置和姿态方面进行微调,以保证 CCD 相机垂直安装于柱面组合透镜的焦平面处。设计如图 2(b)所示相机组合安装平台,实现组合镜头在水平和垂直方向的两维平移及一定范围的转动。同时,CCD 安装于一维俯仰和一维平移台上,实现俯仰角度和焦点位置的微调。一维平移台实现 CCD 相机相对镜筒前后移动;一维俯仰台实现上下角度的调整。同时,可针对不同的光源波段更换对应滤光片,有效地降低系统成像噪声。

立体测量系统主要包括镜头、CCD 单元、高速数据采集卡、线阵 CCD 同步驱动模块、LED 同步控制、驱动模块、计算机及数据处理软件模块等。系统工作流程如图 4 所示,上电后,单片机系统初始化,读取 CCD 驱动板和 LED 同步板的设定参数,在系统时钟驱动下,逻辑模块生成三路同步 CCD 驱动逻辑,驱动三路线阵 CCD 芯片开始同步工作。同时,根据 AD 板的同步逻辑和设置信息,驱动当前 LED 同步进行闪烁。CCD 感应到的光电信号经 AD 转换后通过 USB 接口传输至上位机,利用数据处理软件对数据进行解析,重新拟合为三路 CCD 数据,经过标识点提取、系统校准、坐标解算,最终达到实时测量标识点三维空间位置的目的。



(a)立体测量系统　　　(b)系统工作流程

图 4　立体测量系统工作流程

2　三目视觉立体测量系统标定

系统标定是对三维空间坐标已知的一系列标识点分别成像,将标识点在各个 CCD 上的一维图像坐标和对应的三维世界坐标带入系统成像模型,解算出成像模型中未知参数的过程[14-15]。单个组合透镜与 CCD 单元成像关系如图 5 所示。

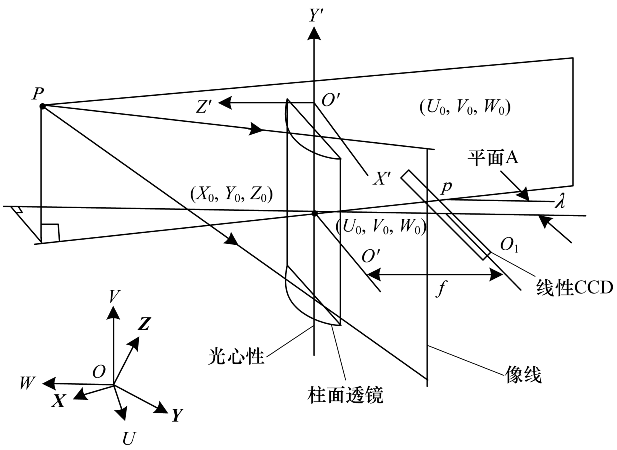


图 5　组合透镜与 CCD 单元成像关系

根据小孔成像原理有:

$$\lambda - \lambda_0 = -f\frac{r_{11}\boldsymbol{X} + r_{12}\boldsymbol{Y} + r_{13}\boldsymbol{Z} + U_0}{r_{31}\boldsymbol{X} + r_{32}\boldsymbol{Y} + r_{33}\boldsymbol{Z} + W_0} \tag{1}$$

取 $L_1 = \dfrac{\lambda_0 r_{31} - fr_{11}}{W_0}, L_2 = \dfrac{\lambda_0 r_{32} - fr_{12}}{W_0}, L_3 = \dfrac{\lambda_0 r_{33} - fr_{13}}{W_0}$,

$L_4 = \lambda_0 - f\dfrac{U_0}{W_0}, L_5 = \dfrac{r_{31}}{W_0}, L_6 = \dfrac{r_{32}}{W_0}, L_7 = \dfrac{r_{33}}{W_0}$,则式(1)可简化为:

$$\lambda = \frac{L_1\boldsymbol{X} + L_2\boldsymbol{Y} + L_3\boldsymbol{Z} + L_4}{L_5\boldsymbol{X} + L_6\boldsymbol{Y} + L_7\boldsymbol{Z} + 1} \tag{2}$$

进一步整理可得:

$$L_1\boldsymbol{X} + L_2\boldsymbol{Y} + L_3\boldsymbol{Z} + L_4 - \lambda(L_5\boldsymbol{X} + L_6\boldsymbol{Y} + L_7\boldsymbol{Z}) = \lambda \tag{3}$$

写成矩阵方程的形式:

$$\boldsymbol{NX} = \boldsymbol{C} \tag{4}$$

其中:

$$\boldsymbol{N} = \begin{bmatrix} \lambda^{(1)}L_5^{(1)} - L_1^{(1)} & \lambda^{(1)}L_6^{(1)} - L_2^{(1)} & \lambda^{(1)}L_7^{(1)} - L_3^{(1)} \\ \lambda^{(2)}L_5^{(2)} - L_1^{(2)} & \lambda^{(2)}L_6^{(2)} - L_2^{(2)} & \lambda^{(2)}L_7^{(2)} - L_3^{(2)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \lambda^{(n)}L_6^{(n)} - L_1^{(n)} & \lambda^{(n)}L_6^{(n)} - L_1^{(n)} & \lambda^{(n)}L_7^{(n)} - L_3^{(n)} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{X} \\ \boldsymbol{Y} \\ \boldsymbol{Z} \end{bmatrix}, \boldsymbol{Z} = \begin{bmatrix} L_4^{(1)} - \lambda^{(1)} \\ L_4^{(2)} - \lambda^{(2)} \\ \vdots \\ L_4^{(n)} - \lambda^{(n)} \end{bmatrix}$$

只要已知 7 个已知空间点坐标和其对应的一维图像坐标,即可求解式(4)中的未知系数,完成立体测量系统的标定。通常情况下,标识点个数远大于 7,利用最小二乘法得到方程的最优解。

在线性标定过程中,认为 λ 为理论成像坐标值,忽略了镜头畸变导致的误差。而圆透镜实际成像时包含径向和切向 2 种畸变,由于圆透镜的对称性,切向畸变非常小,可以忽略。径向畸变的表达式为:

$$\begin{aligned} X_u &= X_d + X_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) \\ Y_u &= Y_d + Y_d(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) \\ r &= \sqrt{{X_d}^2 + {Y_d}^2} \end{aligned} \tag{5}$$

其中,X_d 和 Y_d 是实际测量的图像坐标,X_u 和 Y_u 是理想情况下的像坐标;k 是镜头畸变系数。

由于本文系统中柱面透镜沿一维方向成像,因此只需考虑一个方向的畸变,即:

$$\lambda_u = \lambda_d + k_1\lambda_d^3 + k_2\lambda_d^4 + \cdots \tag{6}$$

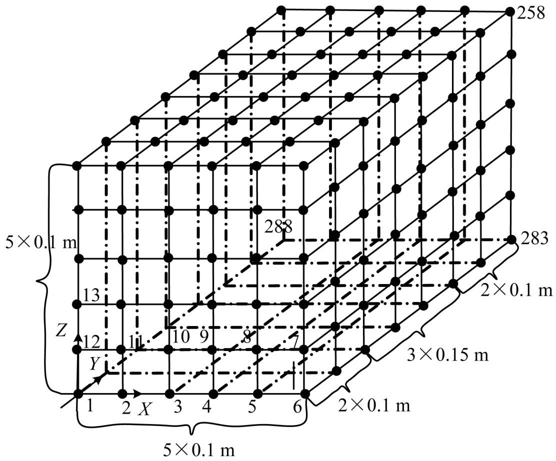
设计中采用组合透镜的方式解决柱面透镜的畸变问题,将双高斯物镜最前镜面替换为柱面透镜,由双高斯物镜的对称性自动校正慧差和畸变,最小限度降低镜头畸变的影响。

在传统的标定方法中,通常利用相对空间坐标已知的非共面标识点作为标定靶进行系统标定。由于标定靶的精度直接决定系统的标定精度,标定靶

通常需要恒温恒湿环境保存,制造与维护成本高,尤其是阶梯标定靶尺寸超过 1 m 后,其制造与维护费用剧增至十几万元到几十万元[16]。

为保证标定靶定位精度,降低系统成本,利用 Global Classic SR 三坐标测量仪构建如图 6 所示的虚拟标定靶。LED 固定于三坐标测量测头,依次将测头移动至虚拟阵列靶点位置,记录当前 LED 的三维世界坐标和一维图像坐标。

(a)虚拟阵示意图



(b)三坐标虚拟标定靶

图 6　虚拟阵列靶法标定系统

由于 LED 刚性连接于测头,三坐标测量仪的定位精度即为虚拟标定靶的精度。三坐标测量仪性能参数见表 1,完全满足立体测量系统的标定精度要求。

表 1　Global Classic SR-09.15.8 型三坐标测量仪性能参数

精度指标/μm		行程范围/mm		
MPEe	MPEp	*X* 方向	*Y* 方向	*Z* 方向
3.2+3.3/1 000	3.2	900	1 500	800

系统标识点选用美国科瑞公司的 LED,功率为 3 W~5 W,波长为 554 nm~557 nm。通过选择合适的滤光片,LED 在 CCD 上所成线状像如图 7 所示,目标区域边界清晰,峰值突出,利用加权质心法即可精确地得到 LED 的质心位置。

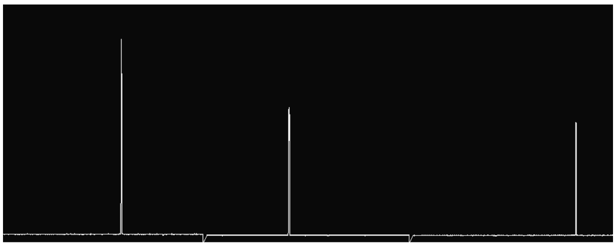


图 7　LED 在线阵 CCD 上成像波形图

由于双高斯透镜可以有效地消除透镜畸变与像差,因此本文研究中利用了上文所述的直接线性变换(DLT)方法进行系统成像模型的标定。在 500 mm×500 mm×(1 800 mm~2 200 mm)成像范围内,如表 2 所示,在测量误差比较大的深度方向仍可获得小于 2 mm 的测量误差。

表 2　三维解算结果与三坐标测量机运动位置差值 mm

序号	*X* 方向	*Y* 方向	*Z* 方向
1	-0.250 900	-0.668 450	-0.086 650
2	0.000 610	0.147 264	-0.246 760
3	-0.139 290	0.360 144	-0.229 760
4	0.104 722	-0.588 290	-0.156 510
5	0.044 976	-1.328 980	-0.369 790
6	0.455 392	-0.065 950	-0.349 630
7	-0.533 740	0.442 918	-0.447 560
8	0.216 034	-1.497 160	-0.069 460
9	0.093 954	-0.792 390	-0.122 570
10	-0.065 780	-1.923 460	-0.102 690
11	0.096 952	0.623 556	-0.124 080
12	-0.129 520	0.768 148	-0.026 870
13	-0.050 710	-1.863 510	0.081 990
14	-0.351 260	-1.104 270	0.017 544
15	0.048 898	-1.872 209	0.015 524
16	-0.443 000	0.155 740	0.583 658
17	0.005 392	-1.234 060	0.141 236
18	-0.586 490	-1.582 710	0.226 720
19	0.233 318	-1.447 570	0.419 308
20	-0.050 820	0.000 830	-0.023 980

3　应用实例

为了更好地对飞行器的飞行性能和飞行品质进行预示和评估,直观地反映飞行器的稳定性和可控性,研究团队设计了三自由度(3-Degree-Of-

Freedom)虚拟飞行风洞试验系统,利用 MEMS 测量模型的运动状态变量,研究其中相应的气动响应特性和姿态控制规律。由于 MEMS 普遍存在测量精度低、零点漂移随时间线性增加的问题,将视频测量系统用于虚拟飞行试验中模型姿态的实时测量,如图 8 所示。

图 8　三自由度虚拟飞行系统地面测试

标识点安装在模型表面,其相对于模型运动中心(三自由度机构转心)坐标已知。图 9 所示为在模型俯仰运动过程中,MEMS 与视频测量系统的测量结果。2 种曲线形状一致性较好,但随着时间的增加,MEMS 测量曲线明显偏离平衡位置,25 s 时零漂已达 0.3°。

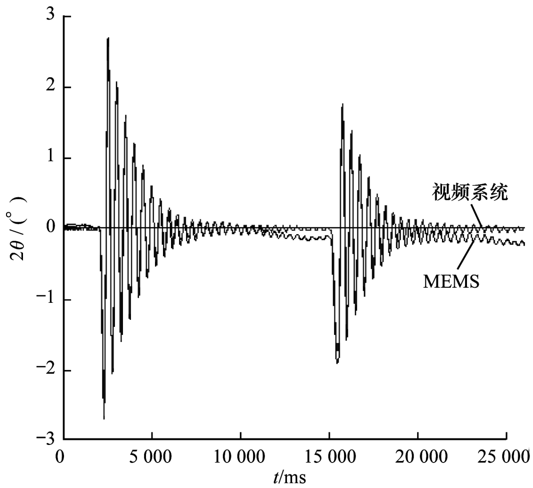


图 9　MEMS 与视频测量系统测量结果对比

如图 10 所示,视频测量系统用于风洞自由振动试验系统机械阻尼的测量。LED 固定于模型表面,视频测量系统通过追踪 LED 的运动过程获取模型振动的衰减过程。传统方法则主要利于动态天平上应变片测量模型自由振动轨迹[17-18],2 种方法的测量结果如图 11 所示。虽然视频系统由于采样率不高出现曲线光滑度较低的问题,但 2 种方法获得的机械阻尼几乎一致。因此,视频测量系统不仅可以进行自由振动风洞试验系统机械阻尼的前期测量,且可在系列应变天平加工后即进行系统振动频率的测量,避免所有天平均进行精细、耗时的贴片工作,加快风洞试验周期。

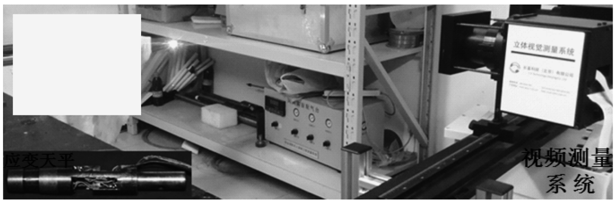


图 10　某弹机械阻尼测量试验

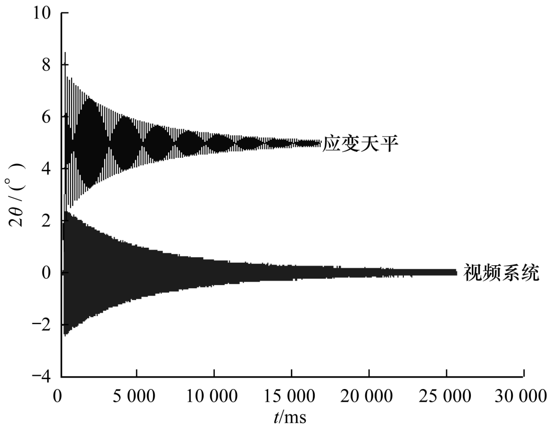


图 11　应变天平与视频测量系统测量结果对比

4　结束语

本文给出一种基于线阵 CCD 的三目视觉定位系统,利用三坐标测量仪构建虚拟阵列标定靶进行系统标定。结合双高斯组合透镜畸变小的特点,运用直接线性成像模型进行系统标定,在给定的测量视场范围内系统可取得较高的测量精度。本文系统成功应用于风洞自由振动试验机械阻尼测量和虚拟飞行试验中模型姿态追踪。直接线性标定模型在指定的小视场测量范围,测量精度可以满足试验的要求。但由于组合镜头中圆透镜被柱面镜替换,整个结构不再完全对称,畸变并未完全消失,当标识点在偏离主光轴较大的角度成像时,镜头的几何畸变不可忽略。下一步将继续研究系统的成像模型,采用镜头畸变的成像模型或 BP 神经网络模型进行系统标定,进一步扩大系统的测量视场。

参考文献

[1]　周述光,温渝昌,金启刚. 风洞模型位移光学测量技术应用综述[J]. 实验流体力学,2009,23(2):94-99.

[2]　张征宇,黄叙辉,尹　疆,等. 高速风洞试验中视频测量技术现状与应用综述[J]. 空气动力学学报,2016,34(1):70-79.

[3]　WATZLAVICK R L,CROWDER J P,et al. Comparison of Model Attitude Systems: Active Tager Photogrammetry, Precision Accelerometer, and Laser Interferometer [C]//Proceedings of the 19th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference. New Orleans, USA: AIAA Press, 1996: 158-169.

(下转第 291 页)

通过该界面可以查看每个路灯的实时运行状况,方便路灯检修;同时,也可以查看对应路灯区域的实时环境状况,通过对环境的数据分析可以预警污染源的地点与扩散方向以及扩散速度。

4　结束语

本文设计并实现了一种基于 6LoWPAN 无线传感网络技术的智慧城市数据采集系统。针对数据采集系统的功能需求。为实现底层采集网络与互联网的融合,利用 6to4 隧道技术设计并实现嵌入式网关,提高了网关的适应性,在高密度数据转发情况下具有很小的丢包率,具备较好的性能。将设计开发的基于 6LoWPAN 无线传感网络技术的智慧城市数据采集子系统应用于市政路灯监测与大气环境数据采集。实际应用结果表明,该系统方案可行性高、组网方便、易于维护和系统升级。同时,通过大规模应用该系统,可以为环境管理与预警、环境科学研究、城市规划、资源调配优化、商业规划等方面提供数据资源支持。后续研究工作将从底层网络安全、数据采集器能耗优化以及数据存储优化 3 个方面进行。

参考文献

[1] 安宇宏. 智慧城市[J]. 宏观经济管理,2013(9):78.

[2] 赵生辉,朱学芳. "城市记忆工程 2.0"理论与实践初探[J]. 图书情报知识,2014(5):30-38.

[3] 王静远,李　超,熊　璋,等. 以数据为中心的智慧城市研究综述[J]. 计算机研究与发展,2014,51(2):239-259.

[4] 黎山峰,杨　雷,孙建军. 面向智慧社区的环境监测系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制,2015,23(5):1785-1788.

[5] 冯　扬. 智能小区无线网络系统安全研究[J]. 电子测量技术,2014,37(2):132-136.

[6] 赵敏华,李　莉,呼　娜. 基于无线传感网络的水监测系统设计[J]. 计算机工程,2014,40(2):92-96.

[7] 张大伟,陈佳品,冯　洁,等. 面向准危重病人的区域化无线监护系统研制[J]. 仪器仪表学报,2014,35(1):74-81.

[8] 侯　琛,赵千川,冯浩然,等. 一种物联网智能数据采集系统的研究与实现[J]. 电子测量技术,2014,37(5):96-102.

[9] 段　宇,宋海声,闫佳星. 基于 6LoWPAN 技术的气体环境监控系统[J]. 计算机测量与控制,2015,23(7):2357-2358.

[10] ALBARAKAI A J,QAYYUM J,FAKEEH K A. A Survey on 6LowPAN & Its Future Research Challenges[J]. International Journal of Computer Science and Mobile Computing,2014,3(10):558-570.

[11] HUANG Zucheng, YUAN Feng. Implementation of 6LoWPAN and Its Application in Smart Lighting[J]. Journal of Computer and Communications,2015(3):80-85.

[12] MAHMOODA A,JAVAIDA N,RAZZAQB S. A Review of Wireless Communications for Smart Grid[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,41:248-260.

[13] 彭　宇,庞景月,刘大同,等. 大数据:内涵、技术体系与展望[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(4):469-482.

[14] 苟冬荣,张道萍,柴小丽,等. SCA 型高速通用数字信号处理模块设计[J]. 计算机工程,2013,39(6):66-71.

[15] GRZIANI R. IPv6 技术精要[M]. 夏俊杰,译. 北京:人民邮电出版社,2013.

[16] EZUST A,EZUST P. C++ Qt 设计模式[M]. 闫锋欣,张学敏,张君施,等,译. 北京:电子工业出版社,2012.

编辑　顾逸斐

(上接第 285 页)

[4] DANNY A B. Videogrammetric Model Deformation Measurement Technique for Wind Tunnel Application[C]//Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit. Carson City,USA:AIAA Press,2007:148-154.

[5] SCHAIRER E T,KUSHNER L K,GARBEFF T J,et al. Model Deformation Measurements of Sonic Boom Models in the NASA Ames9-by7-ft Supersonic Wind Tunnel[C]//Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. [S. l.]:AIAA Press,2015.

[6] 张孝棣,蒋甲利,贾元胜,等. 视频测量方法在风洞模型姿态角测量中的应用[J]. 实验流体力学,2005,19(3):21-25.

[7] ZHANG Zhenyu, WANG S L. Video Grammetric Measurement for Model Displacement in Wind Tunnel Test[J]. Applied Mechanics and Materials,2012(134):103-107.

[8] LIU Wei,MA Xin,LI Xiao,et al. High-precision Pose Measurement for Model Displacement in Wind Tunnel Test[J]. Applied Mechanics and Materials,2011(130):113-117.

[9] 范路桥,蒋梁中,汪　伟,等. 排爆机器人双目立体视觉系统的研究和开发[J]. 计算机工程,2007,33(7):207-209.

[10] 刘金国,李　杰,郝志航. 三线阵 CCD 相机亚像元精度几何标定方法研究[J]. 光电工程,2004,31(1):36-39.

[11] 梁　磊,段丕轩,刘丽萍,等. 线阵 CCD 在风洞轨迹测量实验技术中的应用研究[J]. 实验流体力学,2012,26(5):93-97.

[12] 吴　剑. 三维高精度光学定位技术及其临床应用[D]. 北京:清华大学,2004.

[13] 艾莉莉. 基于线阵 CCD 的空间目标外姿态测量关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.

[14] MOUMEN A,ALY F. Nonmetric Calibration of Camera Lens Distortion: Differential Methods and Robust Estimation[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2005,14(8):1215-1230.

[15] 王　涛,李恒宇,谢少荣. 一种双目视觉传感器的快速自标定方法[J]. 计算机工程,2012,38(12):291-293.

[16] 张征宇,黄叙辉,尹　疆,等. 高速风洞试验中视频测量技术进展[J]. 实验流体力学,2015,29(2):1-7.

[17] 李周复. 风洞试验手册[M]. 北京:航空工业出版社,2015.

[18] 鲍国华. 风洞特种试验[M]. 西安:西北工业大学出版社,1990.

编辑　索书志