

文章编号:1002-2082(2016)04-0567-06

地震振动台实验三维全场位移测量的研究

王晓光^{1,2}, 梁 晋^{1,2}, 尤 威^{1,2}, 梁 瑜^{1,2}, 刘烈金^{1,2}

(1. 西安交通大学 机械工程学院, 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 广东顺德西安交通大学研究院, 广东 佛山 528300)

摘 要:提出一种基于高速相机双目立体视觉技术的大视场全场三维位移测量方法,用来测量地震振动台实验过程中的位移变化。给出了一种鲁棒的标志点匹配算法,基于 VS2010 开发环境,研发了用于振动台实验三维全场位移测量系统,设计了精度评估实验方案,验证该方法在大幅面位移测量中的精度,并利用该实验系统对高边坡模型振动台实验进行测量。结果表明:在 3 m×1.5 m 视场范围,静态位移测量误差优于 0.4 mm,动态位移测量误差优于 0.5 mm,可以满足振动台实验的要求;该方法可以方便、直观地测量地震振动台实验中高边坡模型的位移场,并且测量得到 X、Y、Z 3 个方向位移曲线以及总位移曲线过渡自然、数据合理,是测量振动台实验全场位移变化的一种有效方法。

关键词:双目立体视觉;三维位移测量;立体匹配;振动台实验

中图分类号:TN206;TH762.2

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0403002

3D full field displacement measurement of seismic shaking table experiment

Wang Xiaoguang^{1,2}, Liang Jin^{1,2}, You Wei^{1,2}, Liang Yu^{1,2}, Liu Liejin^{1,2}

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Guangdong Xi'an Jiaotong University Academy, Foshan 528300, China)

Abstract: A large field 3D displacement measurement method based on binocular stereo vision technology was proposed to measure the displacement of the seismic shaking table experiment. First of all, a robust marking point stereo matching algorithm was proposed. Besides, based on the VS2010 development environment, the three-dimensional full field displacement measurement system was developed for seismic shaking table experiment. Finally, in order to verify the method's accuracy in the experiment of large view, the accuracy evaluation experiment was designed. And the shaking table experiment of high slope model was measured by the developed experimental system. Experimental results show that the static displacement measurement error is less than 0.4 mm, the dynamic displacement measurement error is less than 0.5 mm, which can meet the requirements of shaking table experiment in the field of 3 m×1.5 m. Moreover the method proposed can be convenient and intuitive to measure the displacement field of the high slope model in earthquake shaking table experiment. And the X, Y, Z three direction displacement curves and the total displacement curve are reasonable. It is an ef-

收稿日期:2016-04-11; **修回日期:**2016-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51421004,5275378,51275389);中央高校基本科研业务费专项资金资助;广东省公益研究与能力建设专项资金资助(2014A010104003)

作者简介:王晓光(1990—),男,河北张家口人,硕士研究生,主要从事逆向工程与三维光学摄影测量方面的研究。

E-mail: wangxgjtu@163.com

fective method to measure the full field displacement of the seismic shaking table experiment.

Key words: binocular stereo vision; 3D displacement measurement; stereo matching; shaking table experiment

引言

中国大陆地震灾害严重,不仅分布范围广,而且发生频率高、强度大,给我国经济发展以及人民的人身安全造成了极大的威胁。因此,对地震模拟试验测量方法研究具有重大的意义。与拟静力、拟动力试验相比,地震振动台试验主要从宏观角度研究地震破坏模式、地震破坏机理以及结构薄弱部位,同时,对于评价结构抗震能力,衡量减震、隔震效果具有重要的研究价值。

目前,基于地震振动台的实验中数据的获取主要是基于位移传感器、加速度传感器、应变片以及光纤光栅传感器等方法。由于土木工程中振动台实验具有幅面大、变形大、测点多等特点,而基于单只传感器的测量方法只能测量单方向的变形,往往需要布置几十只甚至上百只传感器,因此引线较多,使用繁琐并且成本较高。郑东建^[1]建立了边坡模型,多因素回归时变预测模型用以研究边坡变形;宋丽红^[2]将直线式位移传感器应用于地震振动台在实验中,并讨论了测量结果的可靠性;汪云龙^[3]将光纤光栅传感器应用于振动台实验中测量;薛彪^[4]论证了单目近景测量技术在振动台实验中的可行性。

本文针对振动台实验位移动态测量的需求,提出并实现了一种基于双目立体视觉^[5-7]实时测量方法,并在某地震振动台实验中成功测量了振动过程中三维位移场。实验过程中通过识别模型上的人工标志点^[8-9],计算标志点在振动过程中位移变化,从而得到模型三维全场变形。该实验方法不仅解决了土木工程中大幅面全场三维测量的难题,也为人类抗震、减震工作提供了有效的数据支持。

1 匹配算法

双目三维动态高速测量中的关键技术包括:双相机的标定、标志点的识别、同名点追踪与匹配、三维重建等关键技术。将双相机识别的标志点如何有效地匹配在整个技术流程中起到了至关重要的作用。本文针对同名点追踪这一难题,提

出了一种基于最近距离判定的层状剥离法。

对于参考状态和当前状态下的2个点集合,同名点追踪应遵循两种判定准则。如图1所示,左图为单一最近点判定示意图,右图为互为最近点判定示意图。

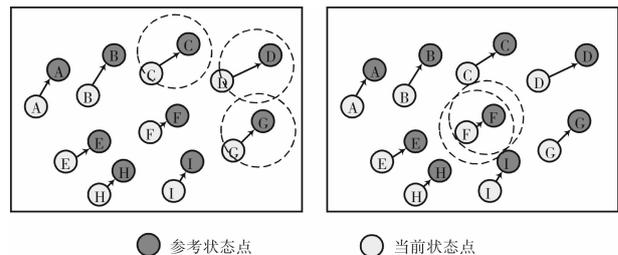


图1 基于最近距离判定的层状剥离法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of layered stripping method based on nearest distance determination

单一最近点判定准则。在当前状态下,单个物体点在其搜索范围内,在参考状态下有且只能找到一个对应点,这时可以确定为同名点关系,追踪完成,在图1左图中,点C、D、G符合该准则。

互为最近点判定准则。在当前状态下,单个物体点在其搜索范围内能在参考状态下找到一个最近点,并且此最近点在其搜索范围内找到的当前状态下的最近点为其本身,即两点各自搜索范围内互为最近点。如图1右图所示,点F满足该准则。

单一最近点判定准则为充要判定,互为最近点判定准则为必要判定。因此,单一最近点判定准则具有更高的优先级。在上述两种判定准则中,都可以使用层状剥离法进行匹配,即第一轮匹配成功后的点,在第二轮进行匹配时,可以排除第一次成功匹配的点,以此来消除干扰。具体过程如图1左图所示,在第一轮判定中,C、D、G被准确匹配排除后,在第二轮搜索中,B、F、I点可被成功匹配。依次匹配剥离,即可实现大部分点成功匹配。

具体计算流程如图2所示。匹配流程为一个不断循环的过程,每次循环均用单一最近点判定准则和互为最近点判定准则进行判定,直至没有新的匹配点出现为止,即同名点匹配追踪结束。

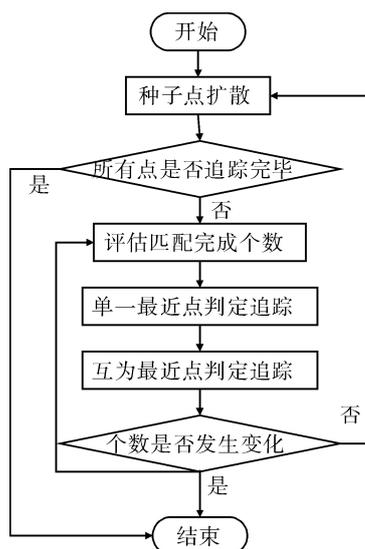


图2 基于最近距离判定的层状剥离法流程图

Fig. 2 Flow chart of layered stripping method based on nearest distance determination

2 实验装置及过程

本文的实验系统硬件主要由高性能电脑、测头、强光源、三脚架、1.5 m×1.5 m 标定十字架组成。测头(如图3)由 Basler 工业相机、焦距为 35 mm 的施耐德镜头以及横梁组成。相机芯片像素分辨率为 2 048 pixel×1 088 pixel,模型具体尺寸 3 000 mm×1 500 mm×1 300 mm,实验现场如图4所示。

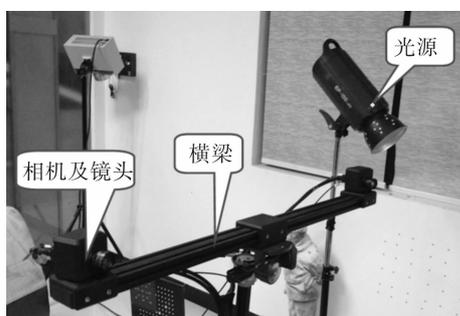


图3 测头

Fig. 3 Measurement device

实验开始之前,首先将实验模型固定在地震振动台上特定的位置,然后在模型上根据实验需求在关键位置布置标志点,以此作为实验系统追踪的对象,系统通过识别标志点,计算得到实时的位移信息。由于实验观察对象主要为模型上层的结构面,故在上层标志点布置密集,下边岩石层布置稀疏,如图5所示。



图4 实验现场

Fig. 4 Experiment site



图5 点 3015 位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of point 3015

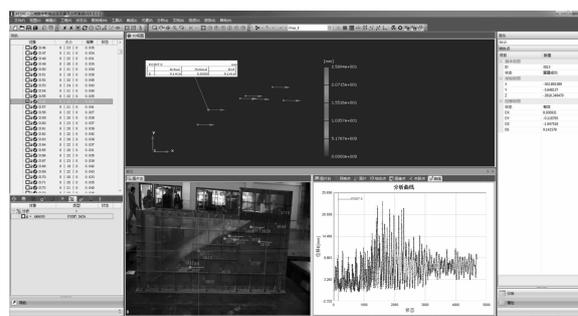


图6 实验软件界面

Fig. 6 Experimental software interface

调节横梁长度为 1m,两相机夹角约为 30°,公共视场为 3 m×1.5 m。实验时,将相机的采集频率设置为 240 frame/s,共采集 4 100 个状态。另外,在数据采集之前需要对相机进行标定,为了提高标定精度,综合考虑相机的畸变参数以及标定板的制造误差,本实验系统采用了一种基于光束平差的系统自标定方法^[10],具体标定过程采用八步标定法^[11]。

本文根据双目立体视觉相关理论和数字图像相关法,基于 VS2010 的开发环境,研发了一套大视场高速测量系统,用于解决地震振动台实验中全场位移测量这一难题,系统界面如图6所示。将实验采集的图像导入到本实验软件进行计算,即可得到有效标志点的位移数据。

3 实验分析

3.1 精度评估

因瓦合金由于其线膨胀系数极低,只有 $1.8 \mu\text{m}/^\circ\text{C}$,因此能在很宽的温度范围内保持固定长度,在摄影测量领域经常被用作标尺。本文选用因瓦合金标尺作为标准,分别测量因瓦合金标尺在静止和运动过程中的多个状态,将软件测量结果和因瓦合金标尺实际长度进行比较,用来确定本实验系统静态和动态精度。本实验使用因瓦标尺在温度为 20° 的条件下的真实长度为 600.057 mm ,实验时通过温度计测量现场温度,对标尺进行温度补偿。

在静态精度评估实验中,为了得到准确的精度评估结果,本文分别将标尺静止在 VDI/VDE-2634 标准推荐的 7 个测量位置,分别在每个位置采集 1 个状态,将采集到的数据和标尺真实长度对比,将测量误差绘制在笛卡尔坐标系中,如图 7 所示。

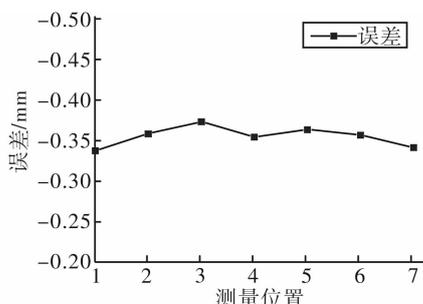


图 7 静态精度评估实验

Fig. 7 Static accuracy evaluation experiment

在动态精度评估实验中,沿着 VDI/VDE-2634 标准推荐的 7 个测量位置移动,在移动过程中每个位置至少出现一次。每隔 5 s 采集一次数据,共采集 10 个状态,测量误差结果如图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出,在测量视场为 $3 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 的情况下,本实验系统静态测量精度优于 0.4 mm ,动态测量精度优于 0.5 mm ,可以满足试验要求,并且随着视场的减小可以获得更高的测量精度。误差来源:1)测量幅面的影响,幅面越大,误差相应增大;2)系统本身精度的限制。

3.2 振动台实验分析

利用开发的测量系统以及计算软件,对基于地震振动台的高边坡模型实验进行了测量。本文加载波形为汶川地震记录波,具体的加载工况如表 1 所示。

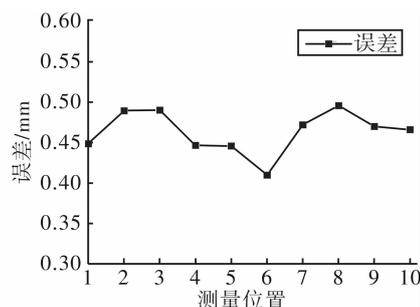


图 8 动态精度评估实验

Fig. 8 Dynamic accuracy evaluation experiment

表 1 加载工况

Table 1 Loading conditions

工程号	加载波形	激振方向	烈度	加速度(gal)
1	汶川地震波	水平(X)	8度	336
2	汶川地震波	水平(X)	9度	504

选取两组工程模型上编号为 3 015 的点进行分析,位置如图 5 所示。图 5 中带有编号的点为有效标志点,分别绘制其 X、Y、Z 3 个方向位移曲线以及总位移曲线,如图 9 所示。从图 9(a)中可以看出,工程 2 中 X 方向的位移在 $-25 \text{ mm} \sim 20 \text{ mm}$ 之间振动,振动波形在工程结束时稳定在 -10 mm 。分析可知,该点处的沙土沿 X 轴负方向移动了 10 mm ,工程 1 中 X 方向的位移在 $-10 \text{ mm} \sim 10 \text{ mm}$ 之间振动,稳定时位移量略有偏移,偏移量为 1 mm 。从图 9(b)中可以看出,工程 2 的位移在 $-1 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$ 之间振动,稳定时沿 Y 轴负方向偏移了 0.25 mm ,而工程 1 的位移在采集到第 1 400 个状态时,位移数据沿 Y 方向发生偏移,在第 2 400 个状态以后数据在 -2.8 mm 左右跳动,由此分析得到,该点处由于振动的作用该点处的沙土沿 Y 轴负方向偏移了 2.8 mm 。分析图 9(c)可知,工程 1 和工程 2 的数据在 $-5 \text{ mm} \sim 5 \text{ mm}$ 之间波动,工程 2 中该点处沿 Z 方向偏移了 1.5 mm 。由于工程 2 的地震烈度和加速度都比工程 1 大,从图 9(d)可以清晰地看到工程 2 的位移变化量以及跳动幅度都比工程 1 大。

此外,本实验系统可以根据计算得到的数据绘制成矢量图,更加直观显示在各个状态下标志点的位移方向。图 10 为第 150 个状态时,各个有效标志点的方向。实验表明,本文测量方法能够准确、直观、方便地测量基于地震振动台实验的位移场,为研究地震对建筑物、边坡等的影响提供了一种可靠且有效的实验手段。同时,随着相机、镜

头制造水平的提高,以及实验环境的改善,本文实

验系统可以获得更高的位移测量精度。

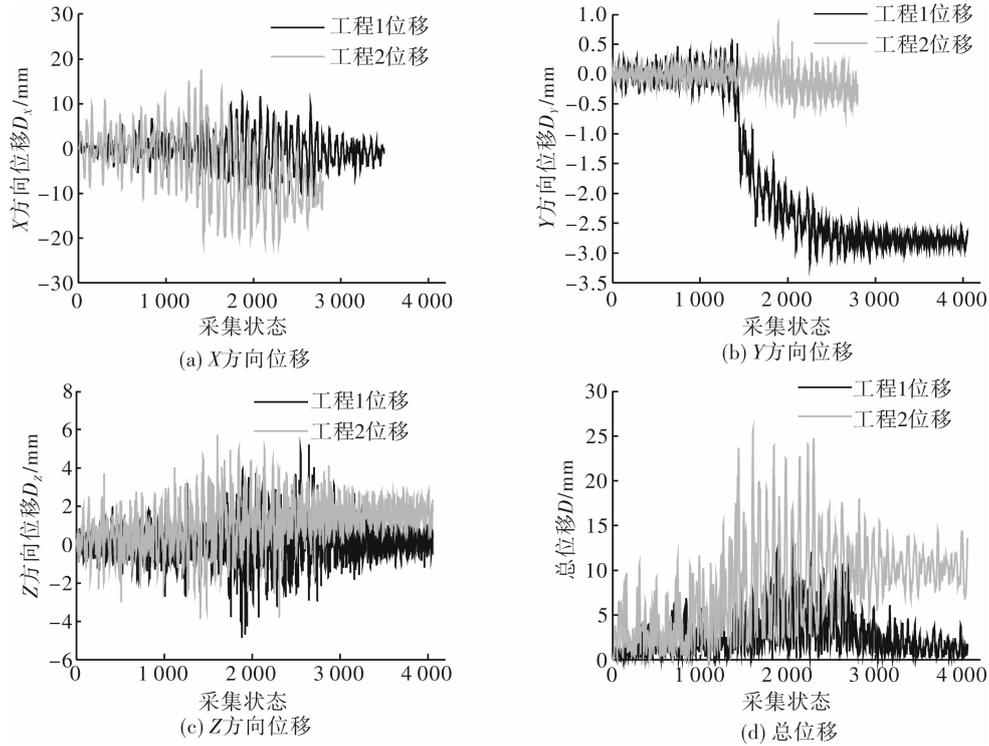


图 9 点 3015 X,Y,Z 3 个方向位移和总位移

Fig. 9 Point 3015 displacements of X,Y,Z direction and total displacement

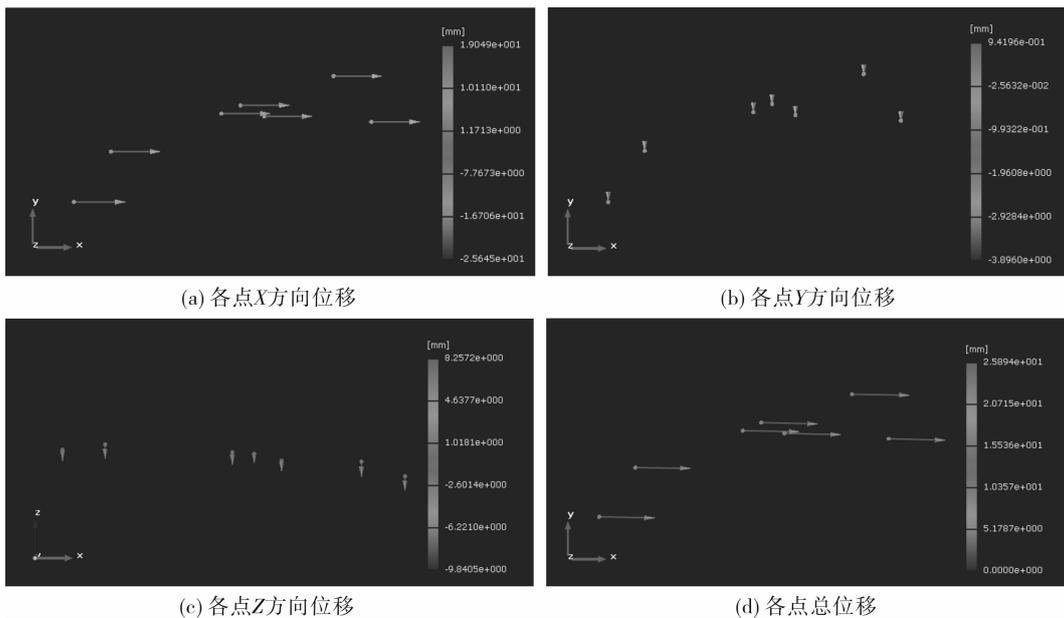


图 10 第 150 个状态的各点位移

Fig. 10 Displacement of the 150th state

4 结论

本文针对土木工程中对大幅面位移测量的要求,首先研究了立体测量中同名标志点的匹配问题,并提出了一种鲁棒的标志点立体匹配算法,有

效地解决了双目立体视觉中标志点准确匹配的问题;其次研制了一种基于高速相机的双目立体视觉技术大视场全场三维位移测量系统,并设计了精度验证实验。实验结果表明,在测量视场为 3 m

×1.5 m 的情况下,本实验系统静态测量精度优于 0.4 mm,动态测量精度优于 0.5 mm,可以满足振动台实验精度要求。利用本实验系统进行位移测量,不仅可以准确、方便地得到实验数据,绘制出准确的波动曲线,而且可以从软件界面上显示出各个测量点位移的方向。与此同时,该方法是一种非接触式的测量方法,避免了传感器在实验使用过程中费时费力,使用不方便等缺点,为土木工程振动台实验中 大视场位移测量这一难题提供了一种准确、方便、直观的测量手段。

参考文献:

- [1] Zheng Dongjian, Gu Chongshi, Wu Zhongru. Time series evolution forecasting model of slope deformation based on multiple factors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (17): 3180-3184.
郑东建,顾冲时,吴中如. 边坡变形的多因素时变预测模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (17): 3180-3184.
- [2] Song Lihong, Huang Haohua. Application of linear displacement sensor in earthquake simulation shaking table experiment[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(11):115-116.
宋丽红,黄浩华. 直线式位移传感器在地震模拟振动台试验中的应用[J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (11):115-116.
- [3] Wang Yunlong, Yuan Xiaoming, Yin Jianhua. A measurement method for 1-D distribution of lateral deformation of soils in shaking table tests using FBG technique[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(10):1908-1913.
汪云龙,袁晓铭,殷建华. 基于光纤光栅传感技术的测量模型土体侧向变形一维分布的方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(10):1908-1913.
- [4] Xue Biao, Zhang Songfei, Zhao Li. Application of close-range photogrammetry based on monocular vision in shaking table test[J]. Industrial instrumentation & Automation, 2008, 27(11):115-116.
薛彪,张松飞,赵莉. 基于单目视觉的近景摄影测量在振动台试验中的应用[J]. 工业仪表与自动化装置, 2015(3):44-47.
- [5] Chen Nian, Li Jin, Wang Haihui. Research and implementation of binocular stereo vision measurement system[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2011. 33(5):101-104.
陈念,李进,王海晖. 双目立体视觉测量系统的研究与实现[J]. 武汉工程大学学报, 2011, 33 (5): 101-104.
- [6] Tong Shuai, Xu Xiaogang, Yi Chengtao, et al. Overview on vision-based 3D reconstruction[J]. Application Research of Computers, 2011, 28 (7): 2411-2417.
佟帅,徐晓刚,易成涛,等. 基于视觉的三维重建技术综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(7): 2411-2417.
- [7] Zhang Dehai, Li Yanqin, Xie Guizhong et al. Reverse engineering application of 3D optical scanning technology[J]. Journal of Applied Optics, 2015, 36(4): 519-525.
张德海,李艳芹,谢贵重,等. 三维光学扫描技术逆向工程应用研究[J]. 应用光学, 2015, 36 (4): 519-525.
- [8] Zhang Dehai, Liang Jin, Guo Cheng. 3D optical technique for springback measurement in sheet forming [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43 (7): 51-55.
张德海,梁晋,郭成. 板料成形回弹三维光学测量技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(7): 51-55.
- [9] Liu Jianwei, Jiang Zhiqiang, Liu Yuanpeng, et al. Measurement of structural deformation of load-bearing power transmission tower based on 3D optical method[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5):942-948.
刘建伟,蒋志强,刘元朋,等. 输电塔架承载变形的三维光学测量[J]. 光学精密工程, 2012, 20 (5): 942-948.
- [10] Fraser C S. Digital camera self-calibration [J]. Photogrammetry & Remote Sensing, 1997, 52 (4): 149-159.
- [11] Tang Zhengzong, Liang Jin, Xiao Zhenzhong, et al. Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 10(18): 2244-2253.
唐正宗,梁晋,肖振中,等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 10 (18): 2244-2253.