

基于双目视觉技术的FAST舱索系统模型振动测量方法

崔希民¹, 王强¹, 李辉², 范生宏³, 郑珂¹, 亓晓彤¹

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083
2. 中国科学院国家天文台, 北京 100012
3. 清华大学土木工程系, 北京 100084

摘要 FAST望远镜舱索系统位置、振动频率的动态检测是实现闭环控制的基础。针对传统测量方法用于FAST望远镜舱索系统缩比模型振动频率检测时操作复杂、干扰性大和不易实现的缺点, 根据被测物体连续振动变化的特点, 提出双目视觉高速动态测频方法。该方法通过计算被测物点位三维坐标, 利用快速傅立叶变换对离散的实时点位信息进行频谱变换, 分析确定被测物的振动频率。实验显示, 双目视觉高速动态测频方法在频率分辨率为0.04 Hz的情况下, 重复测量、分时段测量的误差分别小于0.08 Hz和0.04 Hz, 表明对于舱索系统之类的低频振动物体, 该方法能有效满足振动频率的动态测量要求。

关键词 FAST舱索系统; 振动频率; 双目视觉高速动态测频方法; 快速傅立叶变换

正在建设中的500 m口径球面射电望远镜(FAST)是国际大射电望远镜计划在中国的一项先导工程^[1]。作为其关键技术之一的光机电一体化馈源支撑系统, 在风激、索系驱动载荷作用下会产生很大的振动, 与目标位置产生偏差, 影响馈源舱内接收机定位指向的性能和精度^[2]。测定出馈源舱位置偏差可以计算出6根索系需要调整的变化量; 测定出主频率可以指导相应驱动装置进行一些控制, 从而抵消或减小舱索柔性悬挂系统的振动。主频率是在得到馈源舱在一定时间内相对于其中心位置的位移变化情况的基础上获得的, 而位移变化是由馈源舱的实时三维坐标得到的。因此, 坐标测量、时间测量的精度直接决定了测频的精度。

FAST望远镜利用轻型索拖动机构和并联机器人实现接收机高精度定位是中国的自主创新。测量机器人、GPS动态差分技术、激光与惯性组合测量技术已经在FAST 20 m/50 m缩比模型的馈源舱位置和姿态测量方面得到一定程度的应用^[3-5]。然而, 测量机器人采样率低, 时间滞后; GPS动态差分的精度比较差, 而激光与惯性组合装置实施操作起来复杂度比较高, 同时它们自身对馈源舱的附加重量, 会影响舱索系统的运动; 如果利用一些接触性传感器又会对馈源接收的信号造成干扰^[6]。因此, 这些方法都不利于对振动频率进行测量。双目视觉技术具有非接触性、干扰小、操作简单、拍摄图

像时间短、处理速度快以及测算三维坐标点位精度高等优点, 可应用于对点位和姿态的动态测量^[7]。本文研究基于双目视觉技术的FAST舱索系统模型振动频率高速摄影动态测量方法。

1 双目视觉高速动态测频方法

500 m口径球面射电望远镜(five hundred meters aperture spherical radio telescope, FAST)舱索系统结构如图1所示。FAST舱索系统位置、振动频率的动态检测是实现其闭环控制的基础。

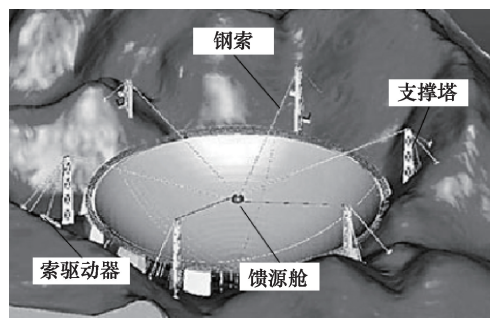


图1 FAST舱索系统结构示意图

Fig. 1 Illustration of FAST cabin-cable system

收稿日期: 2016-01-29; 修回日期: 2016-05-27

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474217)

作者简介: 崔希民, 教授, 研究方向为GPS卫星导航及定位、形变灾害监测与数据处理、三维工业测量、3S集成与应用, 电子信箱: cxm@cumtb.edu.cn; 王强(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为近景摄影测量、精密工程测量及工业测量, 电子信箱: wangqiang_study@163.com

引用格式: 崔希民, 王强, 李辉, 等. 基于双目视觉技术的FAST舱索系统模型振动测量方法[J]. 科技导报, 2016, 34(18): 270-274; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.18.037

双目视觉高速动态测频系统,利用2台高速 CCD 摄像机通过控制系统进行图像的同步获取,精确、实时地测量标志点的三维坐标,并经进一步分析得到位置和振动位移的偏移量;然后利用各个坐标数据获得的时间信息,以一定时间间隔对偏移量进行快速傅立叶变换,得到给定时间段内振动物体的主频率。动态测量与常规的静态测量技术不同,必须保持摄像机不动,且2台摄像机之间的位置关系需预先标定,即系统定向已经完成;同时2个摄像机必须保持相当高的同步拍摄速率。双目视觉高速动态测频方法的流程如图2所示。

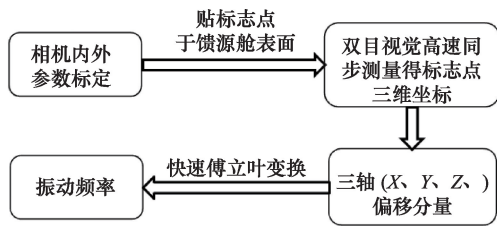


图2 双目视觉高速动态测频流程
Fig. 2 Procedure of using high-speed dynamic frequency measuring

1.1 编码标志布设

编码标志是一种特殊的回光反射材料,在环形光源的低强度曝光下可以产生高亮度值的标志图像。使用这种标志一方面可以明显提高测量精度和可靠性,另一方面可以提高被测物体成像点识别性能和同名点匹配精度,实现自动化测量^[8]。编码标志贴附于被测物体表面,置于双摄像机的公共视场。编码标志如图3所示。

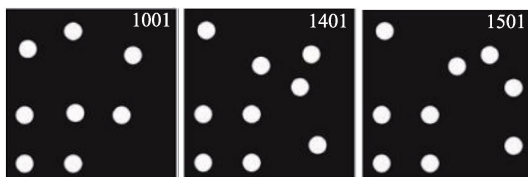


图3 编码标志图像
Fig. 3 Images of code target

1.2 摄像机参数标定

摄像机参数采用基于光束法平差的10参数模型^[9]。利用控制架在上面布设人工标志,进行实验场自标定,以消除因摄像机畸变带来的测量误差。

双摄像机外部参数的标定,实质上是确定2个摄像机的图像在空间坐标系间的转换参数。本文选用基于一维靶标的双摄像机结构参数标定直接解法^[10]。一维靶标如图4所示。

标定得到右摄像机在左摄像机坐标系下的转换参数的3个平移量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 分别为 882.88、-23.73、334.96 mm,3个旋转角 R_x 、 R_y 、 R_z 分别为 0.01168、-0.47039、-0.02685 rad。

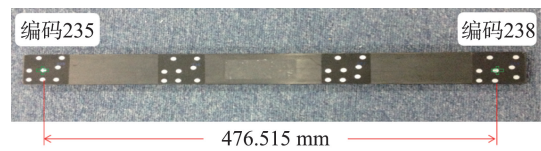


图4 一维靶标

Fig. 4 One-dimensional object

1.3 三维坐标双目同步测量

三维坐标动态测量基于立体像对的同名点匹配,2张图像必须保证是同一时刻拍摄的,一般的软件层面很难达到严格的同步精度。因此,为了保证2张匹配的图像是同一时刻获取的,采用硬件同步外触发机制,使双摄像机的同步采集时滞误差为 5 μ s,远远小于摄像机数据的采样间隔 50 ms (20 Hz),故可视为同步。

如图5所示,空间任意一点 P ,用左右2个摄像机同时观察点 P , P_1 、 P_2 分别为 P 在2个摄像机成像平面的成像像素点。可以看出,直线 O_1P_1 与直线 O_2P_2 相交于 P 点,因此点 P 是唯一的,其三维空间位置是确定的。

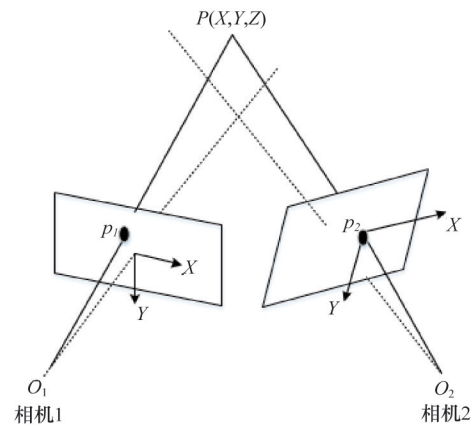


图5 双目视觉动态测频示意

Fig. 5 Binocular measurement chart

假设在世界坐标系下,根据摄像机针孔成像模型,有

$$Z_L \begin{bmatrix} u_L \\ v_L \\ 1 \end{bmatrix} = M_L \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{L11} & m_{L12} & m_{L13} & m_{L14} \\ m_{L21} & m_{L22} & m_{L23} & m_{L24} \\ m_{L31} & m_{L32} & m_{L33} & m_{L34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Z_R \begin{bmatrix} u_R \\ v_R \\ 1 \end{bmatrix} = M_R \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{R11} & m_{R12} & m_{R13} & m_{R14} \\ m_{R21} & m_{R22} & m_{R23} & m_{R24} \\ m_{R31} & m_{R32} & m_{R33} & m_{R34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, M_L 、 M_R 分别为左右2个摄像机的投影矩阵, $Z_L=Z_R=Z$ 。

对式(1)、式(2)分别消去 Z_L 、 Z_R , 得

$$AP = B \quad (3)$$

式中

$$A = \begin{bmatrix} m_{L31}u_L - m_{L11} & m_{L32}u_L - m_{L12} & m_{L33}u_L - m_{L13} \\ m_{L31}v_L - m_{L21} & m_{L32}v_L - m_{L22} & m_{L33}v_L - m_{L23} \\ m_{R31}u_R - m_{R11} & m_{R32}u_R - m_{R12} & m_{R33}u_R - m_{R13} \\ m_{R31}v_R - m_{R21} & m_{R32}v_R - m_{R22} & m_{R33}v_R - m_{R23} \end{bmatrix}$$

$$P = [X \ Y \ Z]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} m_{L14} - m_{L34}u_L \\ m_{L24} - m_{L34}v_L \\ m_{R14} - m_{R34}u_R \\ m_{R24} - m_{R34}v_R \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法,求得空间点P的三维坐标,即

$$P = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (4)$$

在上述原理的基础上,摄像机连续快速拍摄处理,只要在2个摄像机的公共视场内,就可以测得目标的连续变化。双目视觉动态测频系统经过长期实验和测试,在运动物体50 cm/s速度的动态跟踪测量中,坐标测量精度优于1 mm。

1.4 离散坐标频谱分析

对于动态信号,常常在其频率域内而非时间域内进行分析,即要对信号进行时频域的转变,使自变量由时间转变为频率,振动的幅值转变为信号谱的幅值,这种分析方法就是频谱分析法^[11-12]。快速傅里叶变换是计算离散傅里叶变换的一种快速算法^[12],简称FFT。FFT可以将1个时域信号变换到频域,将信号的频谱提取出来^[13]。

假设采样频率为 F_s ,信号频率 F ,采样点数为 N 。那么FFT计算结果是 N 个复数,每个采样点对应着1个频率点^[14]。某点 $n(n=2, 3, \dots, N)$ 所表示的频率为

$$F_n = \frac{(n-1) \times F_s}{N} \quad (5)$$

式中, F_s/N 为采样的频率分辨率。

而每个复数的模值,就代表其相对应的频率值下的幅度特性。假设原始信号的峰值为 A ,那么FFT计算结果的每个点(除了第1个点直流分量之外)的模值是 A 的 $N/2$ 倍。假设FFT计算之后某点 n 用复数 $a+bn$ 表示,那么这个复数的模为

$$A_n = \sqrt{a^2 + b_n^2} \quad (6)$$

任何信号都可以用正弦波来叠加或逼近,幅度最高的正弦波可以认为是原始信号的主频率。

在测量馈源舱振动时,可以通过三维坐标测量计算出每个时刻摄像机坐标系下的物体编码点坐标;编码点的三维点坐标可以看作是均匀采样的离散信号。这里选取馈源在某一时刻的位置作为起始基准,对后面每一时刻点坐标取相对偏移值作为采样数据。为了能方便地做频谱分析,将点坐标偏移量分解为 X 、 Y 、 Z 3个分量,分别进行一维离散信号处理,进行频谱变换。

根据Nyquist理论知道,频谱分析的结果应该是一个关于中心频率对称的曲线,而能准确表示的频谱范围为 $[0, F_s/2]$ 。以 F_n 为横坐标,以原始信号峰值 A 为纵坐标,可以绘制出 N 根频谱线图。

2 实验与结果

实验所采用的工业摄像机为德国Basler系列,摄像机分辨率为 659×494 ,视场角为 $54^\circ \times 48^\circ$,像素尺寸为 $5.6 \mu\text{m}$,帧频为20 fps;测量对象为FAST的实验室3 m缩小模型。

实验室馈源舱模型的直径约30 cm,质量3 kg,模型舱自然状态下悬垂,绳索与水平方向倾角为 60° ,索长度约2 m,振动频率小于5 Hz,在电机控制的多条绳索牵引下悬挂,如图6所示。施加一定的人工激发,使模型舱产生阻尼振动,如图7所示,其横轴为采样点的个数,纵轴为坐标偏移量。

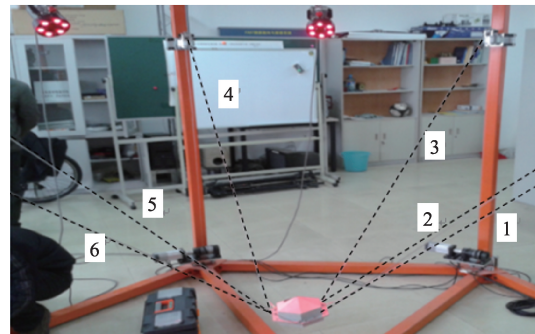


图6 实验室馈源舱模型

Fig. 6 Laboratory model of feed cabin

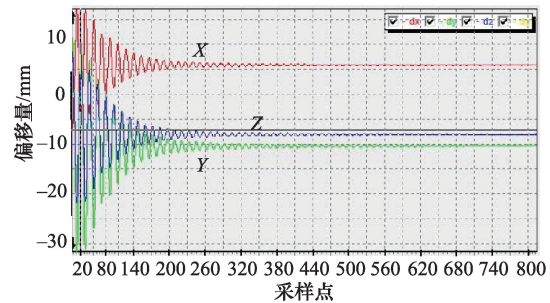


图7 X、Y、Z轴位移偏移量曲线

Fig. 7 Axial displacement offsets of X,Y,Z

系统采样频率 $F_s=20$,采样点个数 $N=512$ 时,采样分辨率为0.04 Hz。

为验证双目视觉高速动态测频方法的精度和正确性,在同样条件下,采用3索系统(索编号1、3、5)和6索系统(索编号1~6)分别进行振动实验分析;每组实验过程中,将时间分4个时段,每采集512个点做一次频谱分析,同时选择64个点作为交叉部分,如图8所示。每组实验进行3次重复性测量。

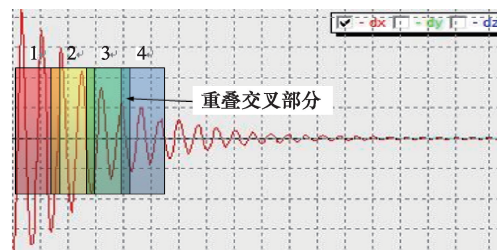


图8 信号分段示意

Fig. 8 Signal segment

图9为6索系统下某一时刻对512个采样数据 X 、 Y 、 Z 轴方向的频谱分析结果。谱线关于中心对称,符合Nyquist准

则^[15]。其横轴表示频率,纵轴表示频率值所对应的幅值大小。可以看出,舱索系统的振动频谱有2个尖峰,分别对应2个主振频率,即1.56 Hz和2.27 Hz,它们分别代表舱索系统的2个振动模式。表1所示为分别采用3索系统(索编号1、3、5)和6索系统(索编号1~6)情况下X轴方向测得的振动频率。

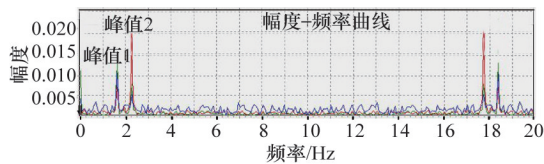


图9 频谱分析结果

Fig 9 Spectrum analysis result

表1 X轴方向振动频率测量结果(单位:Hz)
Table 1 Measure result of vibrational frequency
in X Axis (Unit: Hz)

时间段	3索系统(索编号1、3、5)			6索系统(索编号1~6)		
1	1.56	1.56	1.56	2.27	2.27	2.27
2	1.56	1.56	1.60	2.27	2.31	2.27
3	1.52	1.52	1.56	2.23	2.31	2.27
4	1.56	1.52	1.60	2.27	2.27	2.27

注:每个时段2组数据,每组3个数据从左到右依次为第1次测量值、第2次测量值和第3次测量值。

从表1可以看出,振动主频率的重复测量和分时段测量数值稳定,误差分别不大于0.08 Hz(2个分辨率值)和0.04 Hz(1个分辨率值),证明了双目视觉动态测频方法的正确性和准确性。分时段测量结果表明阻尼运动会使振幅逐渐减小,但是不会导致主频率发生太大的变化;3索系统的阻尼小于6索系统,可以观察到3索系统的振幅衰减较慢^[16]。

3 结论

双目视觉动态测频方法可实现馈源模型的振动频率测量,且测量精度高,不会产生因接触和附加重量而带来的信号干扰,特别适合馈源等低频振动物体的频率测定。在保证采样频率的情况下,提高采样分辨率,可以获得更高的测频精度。

由于本文实验是针对实验室缩比模型,并非实际现场的测量,等FAST馈源建设成功,可能还会有很多实际问题需要解决。然而,相对于GPS差分、测量机器人等模型实验,双目视觉动态测量模型实验的简易性、高效性和可靠性对进一步的工程应用有重要的指导作用。同时,还可以推广运用到其它振动和变形测试领域。

参考文献(References)

- [1] Nan Rendong, Di Li, Cheng Jinjin, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project[C]// Proceedings of the International Topical Meeting on Microwave Photonics. New York: IEEE, 2015: 331-346.
- [2] 孙京海, 朱文白, 南仁东. FAST馈源支撑系统中质量阻尼器的初步设计[J]. 天文研究与技术, 2009, 6(1): 36-42.
Sun Jinghai, Zhu Wenbai, Nan Rendong. Design of the mass damper preliminary in fast feed supporting system[J]. Astronomical research and technology, 2009, 6(1): 36-42.
- [3] 骆亚波. 测量机器人在FAST馈源动态跟踪测量中的应用[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2003.
Luo Yabo. The application of measuring robot in the fast feed dynamic tracking measurement[D]. Zhengzhou: Information and Engineering University of the Chinese PLA, 2003.
- [4] 任红飞. GPS动态测量技术的检测及其在FAST工程中的应用研究[D]. 郑州: 中国人民解放军信息工程大学, 2008.
Ren Hongfei. Detection of GPS dynamic measurement technology and its application in FAST engineering[D]. Zhengzhou: Information Engineering University of the Chinese PLA, 2008.
- [5] 胡金文, 朱丽春. FAST项目中激光惯性融合测量技术的研究[J]. 科学技术与工程, 2009(11): 2884-2889.
Hu Jinwen, Zhu Lichun. Research on measurement technology of laser inertial fusion in the project of FAST[J]. Scientific Technology and Engineering, 2009(11): 2884-2889.
- [6] 张玉贵. 烟机叶片振动的非接触式在线监测关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
Zhang Yugui. Study on key technology of non-contact online monitoring of vibration of flue gas turbine blade[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [7] Waxman A M, Sinha S S. Dynamic stereo: passive ranging to moving objects from relative image flows[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986(4): 406-412.
- [8] 范生宏. 工业数字摄影测量中人工标志的研究与应用[D]. 郑州: 中国解放军信息工程大学, 2006.
Fan shenghong. Research and application of artificial mark in industrial digital photogrammetry[D]. Zhengzhou: Information Engineering University of the Chinese PLA, 2006.
- [9] 黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2005.
Huang Guiping. Research and applications for key techniques of digital close range industrial photogrammetry[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.
- [10] 于英. 双目立体工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 郑州: 中国解放军信息工程大学, 2010.
Yu Ying. Key technology research and application of binocular stereo industrial photogrammetry[D]. Zhengzhou: Information Engineering University of the Chinese PLA, 2010.
- [11] Akay M. Nonlinear biomedical signal processing vol. II: Dynamic analysis and modeling[M]. Wiley: Wiley- IEEE Press, 2000.
- [12] Smith C C, Dahl J F, Thornhill R J. The duality of leakage and aliasing and improved digital spectral analysis techniques[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1996, 118(3): 741-747.
- [13] Antoniou A. Digital signal processing[M]. Toronto, Canada: McGraw-Hill Book Companies, 2006.
- [14] Shannon C E. Communication in the presence of noise, Proc[J]. Institute of Radio Engineers, 1949, 37(1): 10-21.

- [15] Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(2): 280-305.
- [16] 滕军, 幸厚冰. 索参数对斜拉结构固有频率的影响分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(6): 25-30.

Teng Jun, Xing Houbing. The effect analysis on the natural frequency of the suspension structure by cable parameters[J]. Journal of Engineering and Seismic Strengthening, 2010, 32(6): 25-30.

Measuring FAST cabin-cable system model's vibrations using binocular camera's technology

CUI Ximin¹, WANG Qiang¹, LI Hui², FAN Shenghong³, ZHENG Ke¹, QI Xiaotong¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China
2. National Astronomical Observation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
3. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract It is the foundation to realize closed loop control that the FAST telescope feed cabin-cable's location and vibration frequency are dynamically measured. Due to the fact that traditional measurement methods for FAST telescope cabin-cable scaled model's vibration frequency measuring are of complicated operation, large disturbance, and difficult to realize, a high-speed dynamic frequency-measuring method based on binocular camera is put forward to cope with the characteristics of continuous changes in the vibrating object to be measured, It calculates object's three-dimensional coordinates, and uses fast Fourier transform to obtain the spectrum of real-time discrete point locations. Then the vibration frequency is analyzed. Experiments show that in the case of frequency's resolution being 0.04 Hz, the repeated measurement and time-segmented measuring errors of binocular camera high-speed dynamic frequency measuring are not greater than 0.08 Hz and 0.04 Hz, respectively, indicating that for low frequency vibrating objects like the feed cabin cable, this method can effectively satisfy the requirement of dynamic frequency measuring.

Keywords FAST cabin-cable system; vibration frequency; method of binocular camera high-speed dynamic frequency measuring; FFT

(责任编辑 韩星明)