基于机器视觉的高精度顶桥施工位姿测量系统

李 超 李运华

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院，北京 100083)

摘 要：分析了现有的顶桥施工中位姿测量系统的特点，指出其目前存在的主要问题.针对这些问题和现场需求，基于计算机视觉反馈理论，设计了一种由 CCD 传感器、激光准直仪和倾角传感器组成的新型高精度光电测量系统.在建立了相关数学模型的基础上，搭建了硬件系统，给出了视频采集、图像处理和多串口通信等关键技术的具体实现方法，完成了各功能模块的软件开发.该测量系统具有精度高、实时性好、操作简单、维护方便和成本低廉的优点，能够替代以往效率低下的人工测量方式，而且其实现方法为其他大型施工测量系统的设计提供了新技术.

关 键 词：位置测量；计算机视觉；图像处理

中图分类号：TP 23

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2007)03-0322-05

High-accuracy measuring system for position and attitude in pushing-bridge construction based on machine vision

Li Chao Li Yunhua

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The feature of the present measuring system for position and attitude in pushing-bridge construction was analyzed and the system's primary problems were specified. Directed by all the problems and on-site requirements, a kind of photoelectric measuring system composed of CCD sensors, laser collimator and inclinometer was developed based on computer visual feedback. After the system's mathematical model has been built, the hardware work station was finished. In the process of software functional modules' development, such key technologies as video acquisition, image processing and the implementation of multiple serial ports' communication were introduced in detail. Characterized by high accuracy, real-time, simple operation, convenient maintenance and low cost, the measuring system can substitute for the past manual measuring operation. Furthermore, the system's implementation also provides new technology for the design of other large-scale construction's measuring systems.

Key words: position measurement; computer vision; image processing

在城市、城际交通的快速发展过程中需要建设大量的铁跨公路立交桥.由于断路施工所带来的经济损失以及对社会流动秩序的破坏代价太大，一般选择顶推法施工.但施工中使用的测量系统存在很多亟待解决和提高的难题.现有的测量方法一般是采用水准仪与经纬仪人工测量桥箱的位姿，而人工测量和判断不是实时的，需要操作人员读取、记录数据，并由这些数据判断桥箱的位姿，测量结果与操作人员的经验关系极大，容易造成施工质量的不稳定.再者，现有的激光全站仪等国外同类产品价格昂贵，使用时需要多台设备组成测量系统，而且该类产品功能针对性不强.所以

收稿日期：2006-03-13

基金项目：北京市自然科学基金资助项目(3052011)

作者简介：李 超(1979—)，男，山东邹城人，博士生，lichao@asee.buaa.edu.cn.

研制一种适合现有施工特点、成本低廉的测量系统是十分必要的.针对顶桥施工及其位姿测量的要求和特点,提出了一种新的光电检测方案,即两点激光发射器和接收器配合工作,同时用高精度的倾角传感器获取滚动角和俯仰角的数值,实现实时判读桥箱位置姿态,并将位姿数据传送给控制系统,作为纠偏操作的依据.

1　系统结构及工作原理

计算机视觉反馈技术已经在工业自动化领域中得到广泛应用[1-3],其中应用广泛的 CCD 传感器具备灵敏度高、光谱响应宽、动态范围大、实时性好等特点,成为许多工业现场进行非接触式测量的关键部件.在这类测量系统中,测量范围往往与测量精度和实时性相矛盾.特别是在顶桥施工现场,顶进距离往往在 100 m 以上.如何解决上述矛盾,成为设计该测量系统的重点.

如图 1 所示,整个测姿系统由 2 台激光准直发射器,一台重力摆和 2 个 CCD 靶组成.

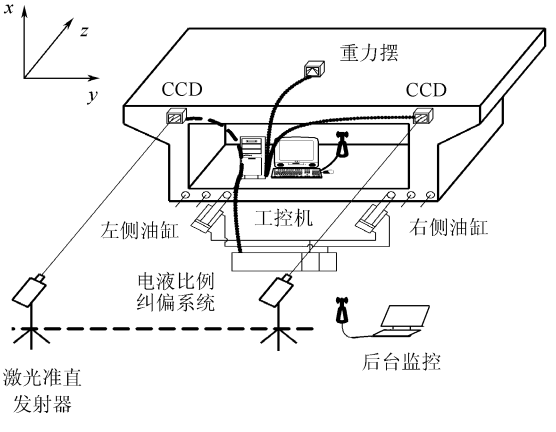

图 1　顶桥施工位姿测量系统

激光准直发射器产生测量光斑的激光束,光斑直径为 5 mm/100 m.重力摆用于测量滚动角和俯仰角,可以达到 30 s 的测角精度.CCD 接收靶由含有广角镜头的 CCD、毛玻璃、视频及电源插头和固定机壳等组成,通过图像采集卡采集图像经处理计算后得到光斑的中心坐标,结合数学模型便可解算出桥箱的位姿.两束激光一直射在各自的 CCD 靶上,光斑的初始位置与各自接收靶的中心位置重合,靶中心随桥箱位姿变化.

2　测量系统数学模型

如图 2 所示,连体坐标系 $O_C x_C y_C z_C$ 固连在桥箱梁的形心处,两个摄像机坐标系 $O_{C1}u_{C1}v_{C1}w_{C1}$,$O_{C2}u_{C2}v_{C2}w_{C2}$ 固连在桥箱的 O_{C1} 和 O_{C2} 处,世界坐标系 $O_W x_W y_W z_W$ 未在图中绘出.连体坐标系和摄像机坐标系随着桥箱位置和姿态的变化而不断变化.

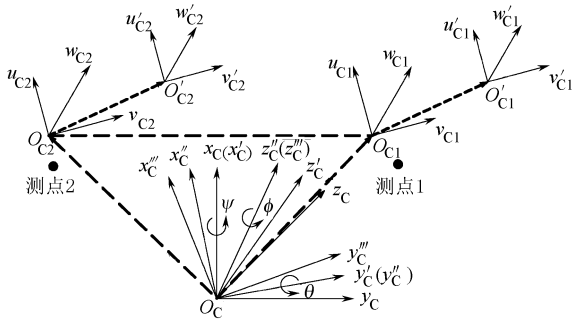

图 2　坐标变换数学模型

现采用齐次坐标形式的位姿变换矩阵 $\boldsymbol{T}$ 表述桥箱体的位姿,

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3} & \boldsymbol{P}_{3\times1}\\ 0 & 1\end{bmatrix}$$

其中 $\boldsymbol{R}_{3\times3}$ 为姿态旋转变换矩阵,$\boldsymbol{P}_{3\times1}$ 为位置平移变换矩阵.由于姿态旋转变换矩阵是含有 9 个元素的方向余旋矩阵,其中只有 3 个独立参数,因此可以选取绕 3 个轴的旋转角作为这 3 个独立参数来描述该矩阵.$\boldsymbol{R}_{3\times3}$ 可由侧倾角 ϕ、俯仰角 θ、方位角 ψ 表述,它的转动次序为:先绕 x_C 轴旋转 ψ,得到坐标系 $O_C x_C' y_C' z_C'$,再绕 y_C' 轴旋转 θ,得到坐标系 $O_C x_C'' y_C'' z_C''$,然后绕 z_C'' 轴旋转 ϕ,得到坐标系 $O_C x_C''' y_C''' z_C'''$,则

$$\boldsymbol{R}(\psi,\theta,\phi)=\boldsymbol{R}(y_C,\psi)\boldsymbol{R}(y_C',\theta)\boldsymbol{R}(z_C'',\phi)=$$

$$\begin{bmatrix}\cos\theta\cos\phi & -\cos\theta\sin\phi & \sin\theta\\ \sin\psi\sin\theta\cos\phi+\cos\psi\sin\phi & -\sin\psi\sin\theta\sin\phi+\cos\psi\cos\phi & -\sin\psi\cos\theta\\ -\cos\psi\sin\theta\cos\phi+\sin\psi\sin\phi & \cos\psi\sin\theta\sin\phi+\sin\psi\cos\phi & \cos\psi\cos\theta\end{bmatrix}\tag{1}$$

设摄像机坐标系原点 O_{C1}、O_{C2} 在连体坐标系中的坐标分别为 $(x_{OC1},y_{OC1},z_{OC1},1)^T$ 和 $(x_{OC2},y_{OC2},z_{OC2},1)^T$;设测点 1 处激光光斑中心在摄像机坐标系中的坐标为 $(u_{C1},v_{C1},w_{C1},1)^T$,其在世界坐标系中的坐标为 $(x_{W1},y_{W1},z_{W1},1)^T$,同理,设测点 2 处激光光斑中心在 2 种坐标系下的坐标为 $(u_{C2},v_{C2},w_{C2},1)^T$ 和 $(x_{W2},y_{W2},z_{W2},1)^T$,设桥箱在 x_W,y_W,z_W 3 个方向上的平移量为 d_x,d_y,d_z.

O_C 在世界坐标系的初值为$(x_{WC0},y_{WC0},z_{WC0})$.

下述计算过程导出了摄像机坐标系与世界坐标系之间的位姿变换矩阵,具体过程如图2所示.

令摄像机坐标系 O_{C1} u_{C1} v_{C1} w_{C1} 和 $O_{C2}u_{C2}v_{C2}w_{C2}$ 与连体坐标系 $O_Cx_Cy_Cz_C$ 重合,依次旋转 ψ,θ,ϕ 角,然后各自沿着旋转后其自身的坐标轴分别平移到 O_{C1} 和 O_{C2} 点. 最后,两摄像机坐标系沿着 x_W 轴、y_W 轴、z_W 轴平移 d_x+x_{WC0},d_y+y_{WC0} 和 d_z+z_{WC0} 距离. 这样就得到了以位姿变换矩阵 $\boldsymbol{T}_1$,$\boldsymbol{T}_2$ 表示的摄像机坐标系的坐标与世界坐标系下的坐标之间的映射关系,即

$$\boldsymbol{T}_1=\begin{bmatrix}1&0&0&d_x+x_{WC0}\\0&1&0&d_y+y_{WC0}\\0&0&1&d_z+z_{WC0}\\0&0&0&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&0\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&x_{OC1}\\0&1&0&y_{OC1}\\0&0&1&z_{OC1}\\0&0&0&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&\boldsymbol{R}_{3\times3}(x_{OC1},y_{OC1},z_{OC1})^{\mathrm{T}}+\\&(d_x+x_{WC0},d_y+y_{WC0},d_z+z_{WC0})^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&1\end{bmatrix}\tag{2}$$

$$\boldsymbol{T}_2=\begin{bmatrix}1&0&0&d_x+x_{WC0}\\0&1&0&d_y+y_{WC0}\\0&0&1&d_z+z_{WC0}\\0&0&0&1\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&0\\0&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1&0&0&x_{OC2}\\0&1&0&y_{OC2}\\0&0&1&z_{OC2}\\0&0&0&1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{R}_{3\times3}&\boldsymbol{R}_{3\times3}(x_{OC2},y_{OC2},z_{OC2})^{\mathrm{T}}+\\&(d_x+x_{WC0},d_y+y_{WC0},d_z+z_{WC0})^{\mathrm{T}}\\\boldsymbol{0}_{1\times3}&1\end{bmatrix}\tag{3}$$

两个光斑中心在世界坐标系下的坐标为

$$(x_{W1},y_{W1},z_{W1},1)^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{T}_1(u_{C1},v_{C1},w_{C1},1)^{\mathrm{T}}\tag{4}$$

$$(x_{W2},y_{W2},z_{W2},1)^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{T}_2(u_{C2},v_{C2},w_{C2},1)^{\mathrm{T}}\tag{5}$$

式中,$w_{C1}=w_{C2}=0$.

将 $\boldsymbol{T}_1$,$\boldsymbol{T}_2$ 代入式(4)和式(5)联立组成方程组式(6),并根据$(x_{WC0},y_{WC0},z_{WC0})$,$(u_{C1},v_{C1},w_{C1})$,$(x_{OC1},y_{OC1},z_{OC1})$,$(u_{C2},v_{C2},w_{C2})$,$(x_{OC2},y_{OC2},z_{OC2})$,$\phi$ 和 θ 及(x_{W1},y_{W1})和(x_{W2},y_{W2})这些已知条件,就可以解出 ψ.

$$\left.\begin{aligned}x_{W1}-x_{W2}=&\cos\theta\cos\phi(u_{C1}-u_{C2})-\\&\cos\theta\sin\phi(v_{C1}-v_{C2})+\\&\cos\theta\cos\phi(x_{OC1}-x_{OC2})-\\&\cos\theta\sin\phi(y_{OC1}-y_{OC2})+\\&\sin\theta(z_{OC1}-z_{OC2})\\y_{W1}-y_{W2}=&(\sin\psi\sin\theta\cos\phi+\cos\psi\sin\phi)\cdot\\&(u_{C1}-u_{C2})+(\cos\psi\cos\phi-\\&\sin\psi\sin\theta\sin\phi)(v_{C1}-v_{C2})+\\&(\sin\psi\sin\theta\cos\phi+\cos\psi\sin\phi)\cdot\\&(x_{OC1}-x_{OC2})+(\cos\psi\cos\phi-\\&\sin\psi\sin\theta\sin\phi)(y_{OC1}-y_{OC2})-\\&\sin\psi\cos\theta(z_{OC1}-z_{OC2})\\z_{W1}-z_{W2}=&(\sin\psi\sin\phi-\cos\psi\sin\theta\cos\phi)\cdot\\&(u_{C1}-u_{C2})+(\cos\psi\sin\theta\sin\phi+\\&\sin\psi\cos\phi)(v_{C1}-v_{C2})+\\&(\sin\psi\sin\phi-\cos\psi\sin\theta\cos\phi)\cdot\\&(x_{OC1}-x_{OC2})+(\cos\psi\sin\theta\sin\phi+\\&\sin\psi\cos\phi)(y_{OC1}-y_{OC2})+\\&\cos\psi\cos\theta(z_{OC1}-z_{OC2})\end{aligned}\right\}\tag{6}$$

在实际测量中 $\cos\psi\approx1$,同时注意到有 $z_{W1}-z_{W2}=(y_{W1}-y_{W2})\tan\psi$,则式(6)的后两式其实是含有一个未知数 $\tan\psi$ 的矛盾方程组,将这2个方程整理成 $a_i\tan\psi=b_i+\varepsilon_i$,$i=1,2$ 的形式,根据矩阵的 Moore-Penrose 广义逆求出其最小二乘解为

$$\tan\psi=(a_1b_1+a_2b_2)/(a_1^2+a_2^2)\tag{7}$$

3 硬件系统构成及软件设计

3.1 硬件系统构成

测量系统采用了研华工业级工作站 AWS-8248TP-T 作为主控单元,CPU 为 Pentium IV 2.0G,操作系统为 Windows 2000. CCD 摄像头采用了 POLIC 的 PL-9838 型,解析度 480 线,最低照度 1.0Lux,信噪比较高. 图像采集卡采用北京嘉恒中自图像技术有限公司的 OK-MC10A 型采集卡. 同时,使用 PCL-812PG 多功能数据采集卡采集油压并向控制器变送控制信号,多串口卡型号为 MOXA 的 CP-104UL V2 型.

3.2 软件设计

软件的设计是实现整套测量系统良好运行的关键环节,其各功能模块如图3所示.

软件工作的具体流程是:根据计算机采集到的图像、距离、角度等数据计算出桥箱的位姿,并经过分析判断后,输出控制信号进行纠偏. 同时,通过对数据库的操作自动记录纠偏过程中的参

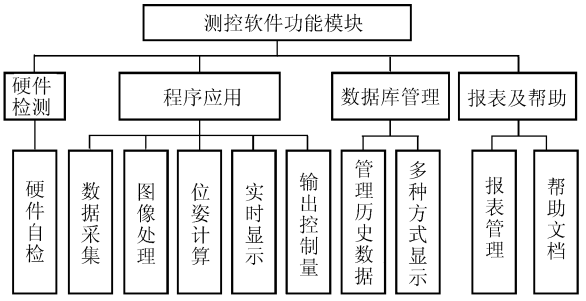

图 3　软件功能模块

数,整理后得到有用信息可供后续施工参考.

3.2.1　视频采集

在视觉伺服系统中,图像的输入由 CCD 和视频采集卡完成,利用 Video for Windows(VFW)函数库中的 API 函数,能够灵活地实现从模拟视频源采集数字视频信号,并可以直接对视频缓存进行处理.目前的视频采集卡几乎都支持 VFW 标准,所以用 VFW 开发的视频采集程序与具体设备无关,保证了该模块的可重构性.考虑到有的图像采集卡会压缩采集到的原始数据,这将影响后续的图像处理.为此在程序中的回调函数内,先将采集的数据放入剪贴板,获得原始数据的内存地址后,保存该地址,并通过该地址进行后续的图像处理.

3.2.2　图像处理

1) 图像预处理.中值滤波是一种非线性的信号处理方法,既能取得较好的滤波效果,同时又能较好地保持图像的边缘部分,因此本文选用中值滤波来对图像进行预处理.

2) 分割图像.该系统采集到的图像相对简单,仅有激光光斑和较均匀的背景,采用最佳阈值的算法[4]对图像进行分割,具体算法如下:

① 计算出图像中最小和最大灰度值 $Z_{\min}$ 和 $Z_{\max}$,令阈值初值 $T^0=(Z_{\min}+Z_{\max})/2$;

② 根据阈值 T^k 将图像分割成目标图像和背景 2 部分,求出 2 部分的平均灰度值 Z_O 和 Z_B:

$$\left.\begin{aligned} Z_O &= \frac{\sum\limits_{Z(i,j)<T^k} Z(i,j)N(i,j)}{\sum\limits_{Z(i,j)<T^k} N(i,j)} \\ Z_B &= \frac{\sum\limits_{Z(i,j)>T^k} Z(i,j)N(i,j)}{\sum\limits_{Z(i,j)>T^k} N(i,j)} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

式中,$Z(i,j)$为图像中点(i,j)的灰度值;$N(i,j)$为点(i,j)的权重系数,一般 $N(i,j)=1.0$;

③ 求出新的阈值 $T^{k+1}=(Z_O+Z_B)/2$;

④ 如果 $T^k=T^{k-1}$,则结束,否则 $k=k+1$,转至步骤②继续迭代.

3) 后续处理

① 通过腐蚀、膨胀操作进一步去除干扰;

② 求取图像中光斑中心的坐标,算法如下.

假定图像中某点(x,y)的灰度 $f(x,y)$是在点(x,y)的"质量",对于一个已经离散化为$(M\times N)$的图像而言,其形心$(\bar{x},\bar{y})$可以定义如下:

$$\left.\begin{aligned} \bar{x} &= \frac{\sum\limits_{i=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{N} if(i,j)}{\sum\limits_{i=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{N} f(i,j)} \\ \bar{y} &= \frac{\sum\limits_{i=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{N} jf(i,j)}{\sum\limits_{i=1}^{M}\sum\limits_{j=1}^{N} f(i,j)} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

中值滤波在整个图像处理过程中耗时较多,影响到了系统的实时性,在编程时选用了能够优化图像处理速度的函数库 IPL(Intel Image Processing Library)[5].尤其是当选用 PENTIUM 系列的 CPU 时,使用 IPL 函数处理图像的速度将呈几倍增长.

3.2.3　多串口通信的实现

工控机的串口资源十分有限,而本系统中包含多个串口设备,需要加入一块多串口卡来联接不同串口设备.由于开发环境是 Windows 2000 操作系统,而在 WIN32 环境下,串口的读写操作是在后台以阻塞方式进行的.因此在编程时需要采用重叠 I/O 机制控制串口,防止主程序阻塞,这种方式使得代码的编写和控制较为复杂,工作流程如图 4 所示.系统运行时,分别为每一个串口设备创建一个串口监视线程,各个子线程之间通

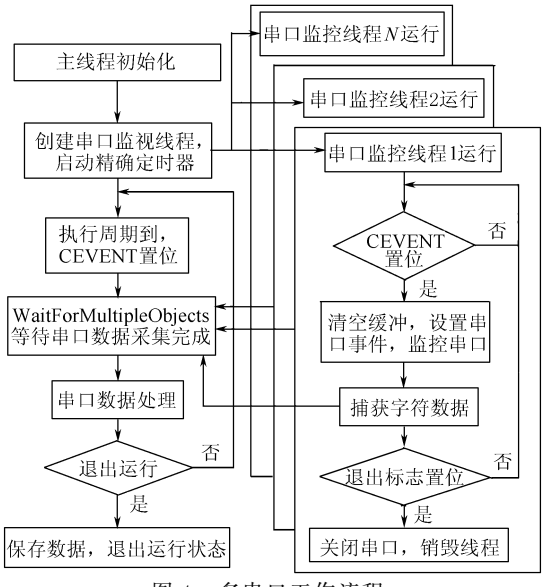

图 4　多串口工作流程

过CEvent对象来实现同步,以保证数据采集的一致性,而主线程通过WaitForMultipleObjects函数来获悉各监控线程采集完毕,进行数据处理.为保证代码的通用性,全部采用API函数编写.软件采用VC++语言编写,具有友好的图像用户界面,方便与现场工作人员交互.在软件开发工作中,采用了模块化和多线程技术,可以根据现场实际情况和现场工作人员的要求方便、及时地改进软件设计.

4 结束语

针对顶桥施工位姿检测的要求设计和实现的新型光电位姿测量系统不仅完全能够满足现场测量需要,而且具有精度高、实时性好、成本低等优点,可以替代原有的人工测量方式,实现测量、施工的自动化,为国产大型工程施工位姿测量系统的研发提供了新技术.

参考文献(References)

[1] Andrea U, Paolo D G. A multirate digital controller for nonholonomic mobile robot pose regulation via visual feedback[J]. WSEAS Transactions on Systems, 2006, 5(5):1129-1136

[2] 陈海初,李满天,张蕊华,等.基于视觉反馈的全自动微小型轮式机器人[J].哈尔滨工业大学学报,2006,38(3):348-349,483
Chen Haichu, Li Mantian, Zhang Ruihua, et al. Autonomous miniature wheeled robot based on visual feedback[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(3):348-349,483(in Chinese)

[3] 凌云,王一鸣,孙明,等.基于机器视觉的大米外观品质检测装置[J].农业机械学报,2005,36(9):89-92
Ling Yun, Wang Yiming, Sun Ming, et al. A machine vision based instrument for rice appearance quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(9):89-92(in Chinese)

[4] 崔屹.图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社, 2000:42
Cui Yi. Image processing and analysis—method and application of mathematical morphology [M]. Beijing: Science Press, 2000:42(in Chinese)

[5] Intel Corporation. Intel image processing library reference manual[M]. USA: Intel Corporation, 2000:133-134

(责任编辑:张 嵘)

(上接第321页)

参考文献(References)

[1] 张鑫,苏东林,李保全,等. 太阳X-EUV成像望远镜波长选择装置[J].北京航空航天大学学报,2006,32(4):421-425
Zhang Xin, Su Donglin, Li Baoquan, et al. Filter wheel device in solar X-EUV image telescope[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics[J]. 2006, 32(4):421-425(in Chinese)

[2] 李保权,朱光武,王世金,等. 太阳X-EVU成像望远镜[J].地球物理学报,2005,48(2):235-242
Li Baoquan, Zhu Guangwu, Wang Shijin, et al. The solar X-EUV imaging telescope[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005,48(2):235-242(in Chinese)

[3] Baker D N. What is space weather[J]. Adv Space Res, 1998,22(1):7-16

[4] Kathleen Freestone. Telemetry and control for the solar X-ray imager[R]. SXI-013,1997

[5] 徐鹏,黄长宁,王涌天,等.卫星振动对成像质量影响的仿真分析[J].宇航学报,2003,24(3):259-263
Xu Peng, Huang Changning, Wang Yongtian, et al. Modulation transfer function in push-broom camera limits resulting from mechanical vibration[J]. Journal of Astronautic, 2003, 24(3):259-263(in Chinese)

[6] Pendergast Karl J, Schauwecker Chris J. Use of a passive reaction wheel jitter isolation system to meet the advanced X-ray astrophysics facility imaging performance requirements[J]. SPIE, 1998, 3356(2):1078-1094

[7] Lemen J R, Duncan D, Edwards C, et al. Solar X-ray imager for GOES[J]. SPIE, 2003, 5171(1): 65-76

[8] Bornmann P L, Speich D, Hirman J, et al. GOES solar X-ray imager: overview and operational goals[J]. SPIE, 1996, 2812(2): 309-319

[9] Hill S, Pizzo V J. Advanced solar imaging from the GOES-R spacecraft[J]. SPIE, 2003, 4853(2):465-478

[10] Stern R A, Shing L, Catura P, et al. Characterization of the flight CCD dectors for the GOES N and O solar X-ray imagers[J]. SPIE, 2003,5171(1):1-6

[11] Brennan Gantner L, James Lemen R, Christopher Edwards G, et al. A system to reduce jitter for the GOES N/O/P solar X-ray imager[J]. SPIE, 2004, 5171(2):101-110

[12] Catura P R, Gantner B L, Jurcevich B K, et al. X-ray calibration of the GOES-N/O solar X-ray imagers[J]. SPIE, 2003,5171(1):1-10

(责任编辑:娄 嘉)