

文章编号 1004-924X(2008)09-1589-06

用大面阵 CCD 实现全日面像自动导行

肖江, 胡柯良, 林佳本, 申基, 邓元勇
(中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要:介绍了基于质心算法并用大面阵 CCD 实现的全日面磁场望远镜的自动跟踪与导行技术。该方法利用具有高实时处理能力的嵌入式终端设备计算和处理太阳质心数据, 构成高精度的位置环导行系统; 同时对 CCD 图像采用“二值化”处理, 提高了导行精度和对不良天气的抗干扰能力。利用该方法可大大降低原有导行技术的成本和复杂度, 适用于空间太阳望远镜的导行。实测分析表明, 在连续工作 1 h 的情况下, 该系统导行精度优于 1", 达到系统设计需求。

关键词:太阳望远镜; 自动跟踪; CCD 导行

中图分类号: P111.41; TN386.5 **文献标识码:** A

Tracking and guiding for full solar disk image using large CCD-array

XIAO Jiang, HU Ke-liang, LIN Jia-ben, SHEN Ji, DENG Yuan-yong

(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: An auto-tracking and guiding system for full solar disk image was introduced based on mass-center algorithm and large CCD-array. An embedded system with high speed processing ability was used to compute and process mass-center data and all CCD images were dealt with binarization process. Compared with the traditional system, the new system can greatly reduce the cost and complexity and can enhance the accuracy of the tracking system and reduce the dependency of weather condition. A high-precision closed-loop tracking apparatus was designed also in this system. According to the analysis of the experimental data, the new auto-tracking and guiding system achieves the precision of 1" during one hour observation, which satisfies the requirements of the system.

Key words: solar telescope; auto-tracking; CCD guiding

1 引言

怀柔太阳观测基地(Huairou Solar Observing Station, HSOS)是中国科学院国家天文台(National Astronomical Observatories, Chinese

Academy of Sciences, NAOC CAS)的重要观测基地之一, 拥有世界一流的太阳磁场望远镜。该仪器可对太阳光球和色球的磁场和速度场进行观测, 观测资料处于世界领先水平。太阳磁场望远镜^[1]和太阳多通道望远镜^[2]的研制成功是我国实测太阳物理进入世界先进行列的标志。

收稿日期: 2008-01-25; 修订日期: 2008-02-27.

基金项目: 国家 973 工程资助项目(No. 2006CB806301); 中国科学院方向性项目(No. KJXC2-YW-T04); 国家自然科学基金资助项目(No. 10473016, No. 10673016)

高时间分辨率和高空间分辨率观测是天文学家永远追求的目标,正因为如此,导行系统成为太阳望远镜广泛使用且不可缺少的附属设备,太阳望远镜的导行模式经历了一个点—线—面的辩证发展过程。

第一代太阳导行系统采用了太阳边缘对称的 4 个点作为导行跟踪的目标,即所谓的四象限法。这种方法的特点是结构简单,数据量小,但是导行精度差,且极易受天气状况的影响,在实施技术改造以前,怀柔多通道望远镜就是采用这种模式。

第二代太阳导行系统采用线阵探测器,通过抽取线阵探测器上的几个点、几条线作为导行依据,这种导行技术目前应用在西班牙卡那利岛上的德国 GCT^[3]、日本的 YOHKOH 卫星以及我国曾经研制的球载望远镜上。

目前在 HSOS 新建成的全日面太阳光学和磁场望远镜利用在赤经赤纬轴中安装的光栅钢带码盘作为望远镜位置检测元件,通过计算跟踪期内望远镜实际转过的角度与太阳理论位移的偏差,实时发出速度微调指令,形成位置闭环跟踪;再通过增加的胡氏光路,利用小面阵视频 CCD 实现二次自动导行^[4]。该导行系统虽采用了视频的面阵 CCD,但是其靶面小,从太阳上抽取的点数少,且需要附加导行光路,所以系统较复杂,成本高,不适合用在空间类望远镜的导行观测以及对现有望远镜系统的更新改造上。

为了对怀柔太阳基地的望远镜进行更新改造,也为了对空间太阳望远镜的导行系统研制做准备,多年来本课题组对导行系统进行了认真的研究。文献[3]中对基于质心算法的导行方案进行了验证,从理论上证明了在探测器面阵的 AD 量化位数为 8,填充因子为 1 的情况下,该方法的定位精度可以达到 1/70 像元分辨率。根据这一理论结果,进行了工程应用方面的设计,在导行系统使用了以下新方法:(1)用大面阵 CCD 采集全日面图像,利用工作站服务器对图像进行“二值化”处理,用质心算法实时计算图像位置;(2)用嵌入式终端设备处理校正数据,实时控制电机驱动设备。这种方法简化了光路,提高了导行系统的精度,降低了薄云、雾等对跟踪精度的影响。

2 导行系统的基本原理

导行系统采用面阵 CCD 导行,根据每幅图

像的质心判断太阳的实际位置。求质心的算法有多种,但差别不大,本文采用的是加权平均的质心作为太阳像中心的方案。

定义太阳像的质心的为:

$$X = \sum xf(x, y) / \sum f(x, y);$$

$$Y = \sum yf(x, y) / \sum f(x, y).$$

式中, $f(x, y)$ 表示 (x, y) 点的像素值, X 、 Y 分别表示计算后的质心位置。

假设第一幅图像的中心为 X_0 、 Y_0 , 则偏差计算如下:

$$X_{\text{offset}} = X - X_0;$$

$$Y_{\text{offset}} = Y - Y_0.$$

因为 X_{offset} 、 Y_{offset} 表示当前太阳位置与开始跟踪时太阳位置在赤经和赤纬方向上的偏差,设计的望远镜轴系控制系统每经 $2 \times 10\ 000 \times 10\ 000$ 个脉冲,望远镜在赤经或者赤纬方向上转动一圈,由此可以计算:每校正一个角秒发送的脉冲个数 $= (2 \times 10\ 000 \times 10\ 000) / (360 \times 60 \times 60) \approx 154.32$,整个太阳像视场为 $32' \times 32'$ ($1\ 920'' \times 1\ 920''$),由于相机面阵为 $2\ 029(\text{H}) \times 2\ 044(\text{V})$ pixel,1 pixel 约等于 $1.06''$,1 pixel 发送 145.58 个脉冲。

由于该望远镜系统设计建造于上世纪 70、80 年代及 90 年代初,光学设备和电子设备都采用当时先进的器件,但随着时间的推移,部分设备已经老化,光路出现了杂散光。为此,导致 CCD 所采集的像噪声较大,另外每一帧图像的曝光时间短,图像的位置和形状容易受大气抖动的影响,解决的办法是采用“二值化”的思想,取太阳像中心 ($2\ 000\ \text{pixel} \times 2\ 000\ \text{pixel}$) 面积区域,计算其像素点的期望值 p_0 ,定义太阳像中某一点像素值为 p :

如 $p > p_0$ 则 $p = p_0$; 如 $p < p_0$ 则 $p = 0$ 。

由图像知识可知,采用“二值化”后,图像除过滤掉了太阳表面一些大反差结构(如:黑子,耀斑等),还过滤掉了杂散光等干扰信号,得到稳定清晰的图像,它的中心精确地反映了真实太阳像的中心。

3 导行系统结构设计

3.1 闭环控制系统结构

导行系统的闭环控制结构是实时反馈系统,

其主要思想是:采用大面阵 CCD 探测器首先采集第一幅图像,实时计算太阳像的质心,存储作为起始值;然后对实时采集的每幅图像计算太阳像的质心,并与起始值比较,得出偏差值,根据偏

差值向终端设备实时发出速度微调指令,从而实现闭环跟踪控制。

闭环控制系统框图如图 1 所示:

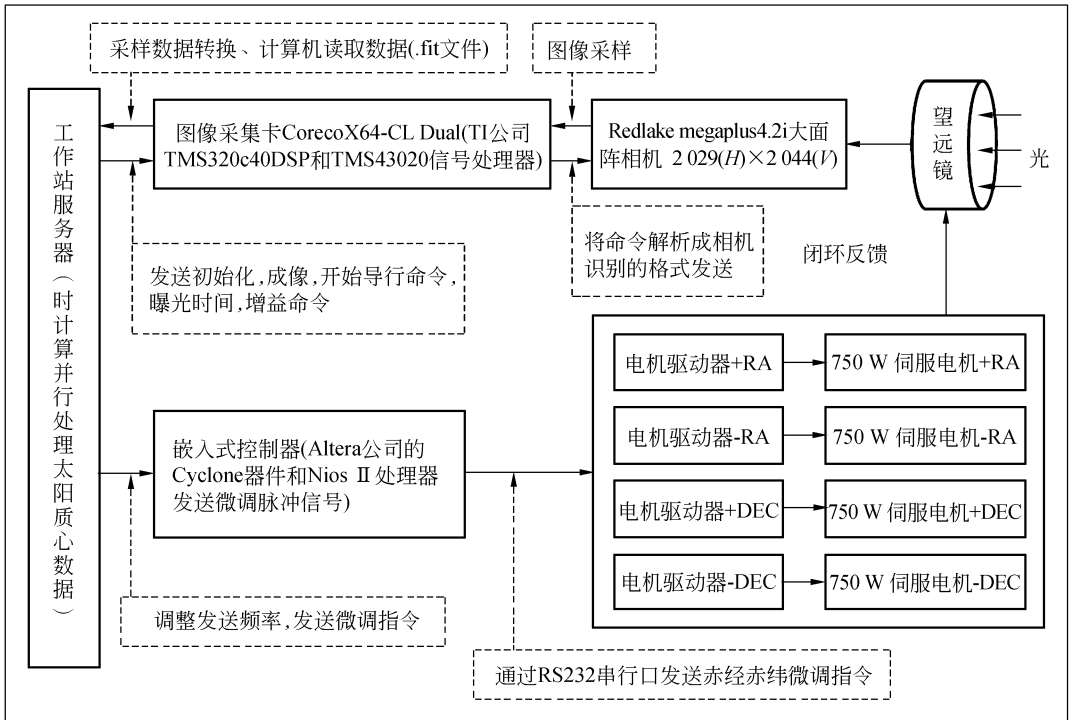


图 1 闭环控制系统流程图(RA:赤经,DEC:赤纬)

Fig. 1 Scheme of closed-loop control system (RA: Right Ascension, DEC: Declination)

3.2 图像的采集

在该系统中采用的 CCD 相机是 RedLake 公司的 MegaPlus 4. 2i,这是一款高性能的 8 位数字输出相机,时钟频率为 10 MHz,可以根据曝光时间调整采样速率,面阵大小为 2 029(H) pixel × 2 044(V) pixel,有 400 多万万个像元, CCD 芯片可

以对整个太阳成像。根据该相机的特点,本文编写了成像程序,并将导行控制程序也嵌入到成像程序中,成像情况如图 2 所示。

3.3 电机的控制系统

为满足大面阵导行所带来的大数据量要求,本文选择了 Altera 公司的 Cyclone 器件 (1PEC100 芯片)和 Nios II 处理器的硬、软件组合方案。硬件配置和软件设计使用 Quartus II, SOPC Builder 和 Nios II IDE 完成。(关于器件特点、软件使用方法这里就不作详细介绍,可以参看 Altera 公司提供的手册),采用 SOPC 技术来实现整个方案,系统设计的复杂程度大大降低,设计时间大大缩短。基于从速度调节和系统升级等方面的考虑,选择了伺服电机作为驱动设备。这里选用的电机驱动器是松下公司 MINAS/MS-MA 的伺服电机,输出功率为 750 W。

图 3 是所设计的电机控制电路:

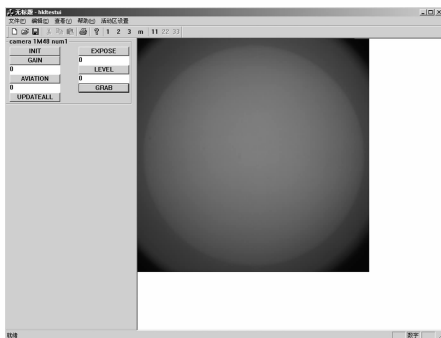
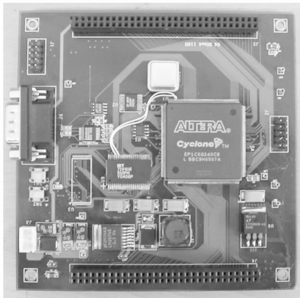


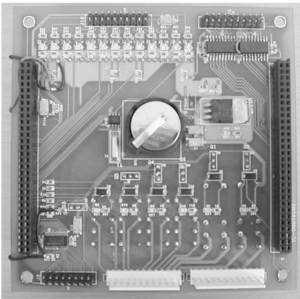
图 2 导行系统工作界面

Fig. 2 Computer interface of auto-tracking and guiding system



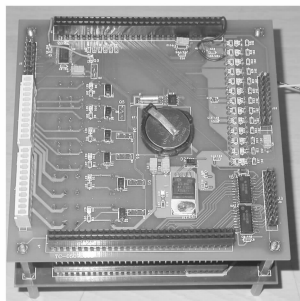
(a) 主控电路板

(a) Main control circuit board



(b) 辅助接口电路板

(b) Accessorial interface circuit board



(c) 系统组合状态

(c) Combination of (a) and (b)

图 3 电机控制系统

Fig. 3 Control system of electric machinery

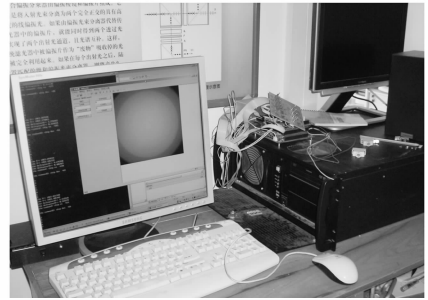


图 4 工作站计算机系统

Fig. 4 System of computer server

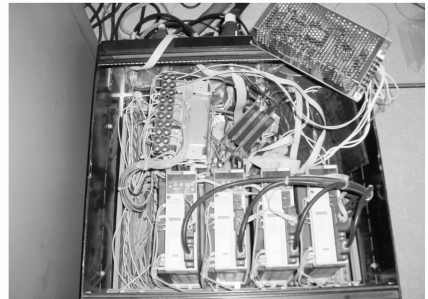


图 5 伺服电机驱动系统

Fig. 5 Driver system of servo electric machinery

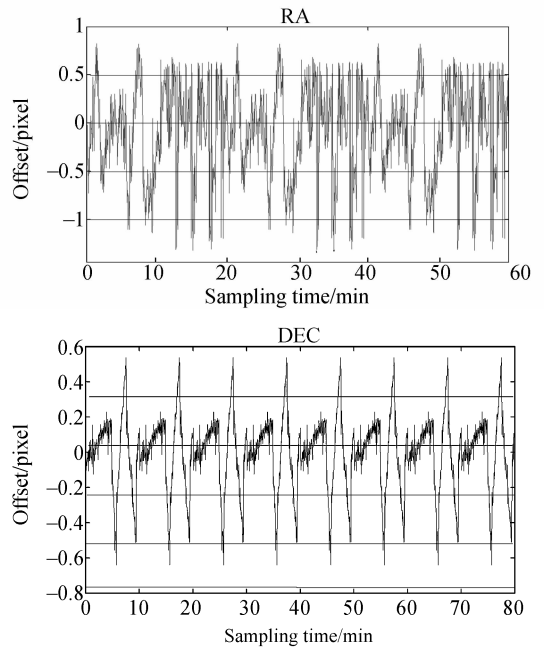


图 6 导行 1 h 测试结果(RA: 赤经方向,DEC: 赤纬方向),纵坐标表示太阳像偏离初始位置

Fig. 6 Result of guiding in 1 h (RA: Right Ascension, DEC: Declination), the ordinates show offset values of current position and original position of solar image

4 测试结果

导行系统的工作站和伺服电机控制系统分别如图 4、图 5。

该导行系统设计之初要求望远镜导行精度能达到 $1''/30 \text{ min}$ (标准偏差),系统安装调试完毕后,2007 年 11 月 27 日进行了跟踪导行测试,如图 6 所示(纵坐标表示太阳像偏离初始位置的像

素值,横坐标表示测试时间),在曝光时间为 40 ms,每 6 幅图校正一次的情况下,测试跟踪 1 h 结果为:DEC 方向标准偏差为 $0.2134''$,RA 方向标准偏差为 $0.9395''$,高于预期目标。另外对长周期(即采样时间为 4 h)和恶劣天气(有薄云,微风)也进行了导行测试,测试结果表明,RA 方向跟踪精度为 $1.1384''$,DEC 方向跟踪精度为 $0.2516''$,这说明该导行方法非常有效。

5 结 论

在多通道太阳望远镜中,全日面太阳望远镜的导行控制系统是一个很重要的方面,望远镜长时间的高精度跟踪导行是获得高质量科学数据的重要保证。本文利用质心算法计算大面阵 CCD 上太阳像的中心坐标,并用二值化方法减少了计

算误差,大大提高了导行的稳定性。经过一段时间的调试,系统稳定可靠,结果表明,本文提出的方法有效,具有广阔的应用前景。

在前期的模拟仿真中,本文测试的结果要比现在实际的精度高(理论分析的精度为 $1/70$ pixel),图 6 所示表明该导行系统中赤纬方向的标准偏差为 $0.2''$ 左右,偏差值呈周期性变化且精度优于赤经。在调试中发现,由于该项技术目前应用于多通道太阳望远镜系统,而该系统使用时间较长,设备老化导致整体机械、光学精度下降,因此在使用大面阵 CCD 导行过程中受到一些影响。在赤经方向上恒动速度不准确,导致赤经的跟踪精度低于赤纬,此外由于电机驱动系统的脉冲偏差为周期性变化,由此导致了导行的偏差值在赤经赤纬方向呈周期性变化。

参考文献:

- [1] AI G, HU Y. Multichannel birefringent filter. I. principle and video spectrograph [J]. *Scien. Sinica A*, 1987, 30: 868-876.
- [2] DENG Y Y, AI G X, WANG J S, *et al.*. Reports on the test observation of multi-channel solar telescope [J]. *Solar Physics*, 1997, 173: 207-221.
- [3] 胡柯良. 面阵 CCD 导行和嵌入式系统在高时空分辨率太阳磁场观测中的应用研究[D]. 北京:中国科学院, 2004: 10-13.
HU K L. *Research on the application of guide system with area CCD camera and embedded system in high temporal and spatial resolution observation of solar magnetic field* [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2004: 10-13.
- [4] 吴春晖,朱庆生,周小军. 全日面太阳光学和磁场望远镜的自动跟踪与导行方法[J]. *天文研究与技术*, 2007, 6(2): 146-152.
WU CH H, ZHU Q SH, ZHOU X J. The tracking and guiding method for full solar disk vector magnetograph telescope [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2007, 6(2): 146-152. (in Chinese)
- [5] KLVANA M, BUMBA V, SOBOTKA M. A CCD-based guiding and control system for solar telescope [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2003, 324(4): 305-307.
- [6] SANWAL B B. CCD imageing camera and CCD based guiding system at the 1 meter UPSO telescope [R]. *Astronomical Society of India, Bulletin (ISSN 0304-9523)*, 1993, 21(3/4): 353-357.
- [7] BRUNER M E, TARBELL T D. TRACE DESIGN NOTE 21-Guide Telescope Held of View [R]. *Palo Alto, California: Stanford-Lockheed Institute for Asuophysical and Space Research*, 1994.
- [8] 薛旭成,李云飞,郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1191-1195.
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1191-1195. (in Chinese)
- [9] 宋亚军,许廷发,倪国强,等. 基于 Virtex-4 FPGA 的低功耗图像融合系统[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(6): 935-940.
SONG Y J, XU T F, NI G Q, *et al.*. Low power image fusion system based on Virtex-4 FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 935-940. (in Chinese)

- [10] 林元章. 太阳物理导论[M]. 北京:科学出版社, 2000:31-32.
LING Y ZH. *Introduction of Solar Physics*[M]. Beijing:Science Press,2000:31-32.
- [11] 赵贵军,陈长征,万志,等. 扫推型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学精密工程,2006,14(2):291-296.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):291-296. (in Chinese)
- [12] PROSISE J. MFC Windows 程序设计[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2007.
PROSISE J. *Programming Windows with MFC*[M]. 2nd ed. Beijing:Tsinghua University Press,2007. (in Chinese)
- [13] WILLIAM J. PALM III. MATLAB 7 基础教程-面向工程应用[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
WILLIAM J. PALM III. *Introduction to MATLAB 7 for Engineers* [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)
- [14] WAYNE W. 基于 FPGA 的嵌入式系统设计[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
WAYNE W. *Embedded System Design Based on FPGA*[M]. Xi'an:Xi'an University Press,2005. (in Chinese)

作者简介:肖江(1982—),男,四川自贡人,博士,主要从事图像处理、自动控制、过程监控、嵌入式装备控制等方面的研究。E-mail: xj@bao. ac. cn

导师简介:邓元勇(1965—),男,四川资阳人,总工程师,研究员,博士生导师,主要从事太阳物理观测和天文望远镜仪器研制等方面的研究。E-mail: dyy@bao. ac. cn

● 下期预告

激光为光源的液晶自适应眼底成像系统

姜宝光^{1,2},程少园^{1,2},李鹏飞^{1,2},李抄^{1,2},夏明亮^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

建立了一套基于液晶波前校正器的模拟人眼眼底自适应成像系统。该系统采用 Shark-Hartman 波前探测器进行波面探测,将探测所得波前畸变经过计算处理转化为灰度图通过电脑施加到 LCOS 上进行波面校正,通过校正人眼像差的方式来提高系统成像质量。经过校正后系统波前误差从 $1.92\ \mu\text{m}$ 降低到 $0.048\ \mu\text{m}$ 系统分辨率接近 $70\ \text{lp/mm}$,已经达到该光学系统衍射极限分辨。研究表明,该系统可以满足低阶大像差情况下的模拟人眼视网膜成像要求。