

文章编号 1004-924X(2011) 07-1605-07

智能双模式太阳跟踪器

王红睿, 王玉鹏, 方伟*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 构造了可自动切换工作模式的智能太阳跟踪器以提高其在多种气象条件下的工作性能和运行可靠性。研究了太阳跟踪器的工作模式选择问题, 提出了基于图像信息的工作模式切换方法。提出的太阳跟踪器具有开环和闭环两种工作模式, 由成像单元、转台、步进电机、单片机、上位机等模块构成; 其闭环工作模式采用了视觉伺服控制方法, 开环工作模式则采用了天文跟踪方法; 由天文历法来计算太阳在天空中的位置。系统由成像单元抓取天空图像, 利用图像处理的方法来分析当前的天气条件或外界环境, 最后系统选择并且进入合适的工作模式。太阳跟踪实验中, 系统俯仰角和方位角的太阳平均指向偏差分别为 0.186° 和 0.167° 。太阳跟踪实验表明, 该跟踪器运行稳定可靠, 能在较复杂的气象条件下工作。

关键词: 太阳跟踪; 图像处理; 视觉伺服控制; 闭环控制

中图分类号: TK519; TP273 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20111907.1605

Intelligent solar tracker with double modes

WANG Hong-rui, WANG Yu-peng, FANG Wei*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

Abstract: A solar tracker with intelligent switching ability of working modes is constructed to improve its performance and reliability under several weather conditions. How to choose a proper work mode of the solar tracker is investigated, and the switching method of working mode for the solar tracker is also proposed. The solar tracker has two working modes, open loop mode and closed loop one, and it consists of an imaging unit, a turntable, steppers, the subsystem of micro control unit, a computer and so on. A visual servo scheme is employed for the closed loop mode, while astronomy theory is used for the open loop mode. Moreover, the sun position in the sky is obtained by astronomic algorithms in the case of open loop. The system captures the sky image through an imaging unit, and analyzes weather conditions and external environments through image processing. In experiments, the average tracking error is 0.186° for the zenith angle and 0.167° for the azimuth angle. The solar tracking experiments indicate that the solar tracker operates reliably, and is able to work under complex weather conditions.

Key words: solar tracking; image processing; visual servo control; closed loop control

收稿日期: 2010-09-13; 修订日期: 2011-01-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61077080)

1 引 言

太阳跟踪器广泛用于太阳能发电、太阳辐射监测等领域^[1-5],可携带太阳能电池板、辐射计等负载自动对准太阳,使太阳能发电系统具有太阳指向能力,提高光伏电池或集热器的能量密集度,进而提高太阳能发电系统效率^[1]。太阳跟踪器亦常用于测量太阳辐射的气象台站网络中^[2]。根据运行系统原理的差异,太阳跟踪器可大体分为三类^[1-9]。第一类为闭环方式,或称为光电控制方式^[1-2,7]。采用这种方式的太阳跟踪器通过反馈信号来消除太阳指向偏差,用于反馈的传感器有多种,例如光电池^[7]、图像传感器^[9]等。为了高精度跟踪太阳,文献[9]以面阵 CCD 获取天空图像,经过二值化,用质心法计算太阳像点中心。采用闭环方式,可以获得较高的太阳跟踪灵敏度和太阳跟踪精度,但太阳跟踪器的运行受天气条件的制约。对于采用图像反馈的闭环方式^[9],如果要求太阳跟踪器在变化的天气条件下长时间运行,必须满足如下几个条件:(1)太阳出现在成像系统的视场内;(2)太阳最好不被云层或其他物体遮住,始终在成像系统内成像;(3)成像系统接收到的太阳光必须足够强,捕获到的图像满足后续处理要求;(4)系统由捕获到的图像正确提取了太阳像点中心,误差足够小。如果太阳跟踪器只有闭环工作模式,一旦天气由晴朗变阴暗,例如太阳光被流动的云层挡住,系统将失去图像等反馈信号,导致太阳跟踪器无法自动跟踪太阳。因此,仅依靠闭环控制,难以完成时晴朗时阴暗等复杂天气条件下的长时间太阳跟踪任务,无法满足太阳能发电、太阳辐射测量设备一天内长时间连续自动跟踪太阳的需求。

第二类为开环方式,或称为程序跟踪方式、微处理器方式^[1,3]。系统需根据天文历法先计算太阳的高度角和方位角,再驱动转动机构到期望的角度。开环方式的优点是不受天气条件的限制,缺点是机械加工及安装必须满足一系列的严格要求。系统的南北线应和安装地点的地理南北线重合,底座要与地面严格水平。若不引入编码器等角度反馈元件,系统将存在累积误差。

第三类为闭环和开环方式相结合的混合方式^[2,7]。文献[2]在太阳辐射较强时,利用光电传

感器反馈进行闭环跟踪;其余情况选用开环运行方式。文献[7]采用光电二极管检测太阳光强弱,当光电二极管导通时,说明天气晴朗,采用闭环方式;当光电二极管截止时,表明天气阴暗,选用开环方式。上述方法利用外界信息的范围是较为有限的,分析方法及天气状况判读过程较为简单,依赖于单一的人工设定阈值。在某些条件下,应用这些方法得到的天气晴好结果可能不是很准确。对于混合方式而言,选择开环还是闭环的太阳跟踪器的模式切换问题需进一步研究。

为了提高太阳跟踪器在多种天气条件下的工作性能和运行可靠性,笔者构造了具有开环和闭环双模式的太阳跟踪器,研究了太阳跟踪器在多种天气条件下的模式切换问题,提出了太阳跟踪器在多种天气条件下的工作模式选择方法。开环模式采用了天文跟踪方法,闭环模式采用了视觉伺服的控制方法。通过图像分析的方法,由成像单元抓取到的天空图像来判断当前的天气状况或外界环境,提出了基于图像信息的工作模式切换方法。

2 系统原理

太阳跟踪器由成像单元、转台、单片机、上位机等模块构成。成像单元包括光孔、滤光片、CCD 成像器件^[10-13]、图像采集单元等组件,用来捕获天空图像。转台包括传动机构、转动部件、俯仰步进电机、方位步进电机等。单片机模块主要负责生成步进电机的细分驱动信号,其中央处理器芯片为 C8051F020。

上位机完成图像处理、工作模式选择、步进电机控制等工作。系统未安装编码器等角度反馈元件。太阳光通过光孔经滤光片衰减后在成像器件的光敏面上成像。由上位机读取成像器件采集到的图像,再进行图像预处理、图像分割、图像分析等操作。如果太阳光在成像单元的视场内,且经过图像处理准确定位了太阳像点,那么太阳跟踪器进入闭环跟踪方式;否则,说明成像单元没有捕获到太阳图像或无法定位太阳像点,表明当前的天气阴暗或太阳在成像单元的视场外,系统转入天文跟踪模式。最后,上位机将计算得到的脉冲数通过 RS232 串口发送到单片机,由单片机生成驱动信号控制步进电机转动。系统每次采样循环

的工作流程见图 1。

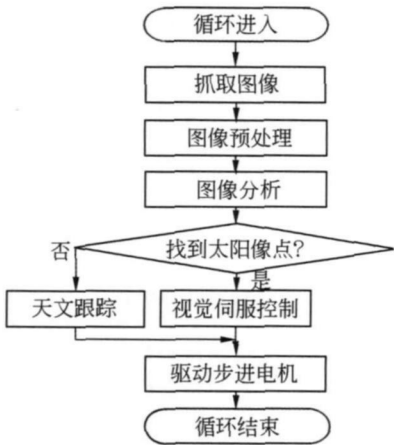


图 1 太阳跟踪器采样循环的工作流程
Fig. 1 Flowchart of sample process for solar tracker

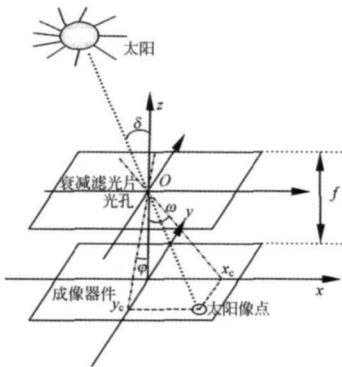


图 2 成像单元的结构示意图
Fig. 2 Illustration for imaging unit

成像单元采用小孔成像的原理, 未引入透镜等光学部件, 整体的光学结构简单、紧凑。图 2 是成像单元的结构示意图。成像单元内部表面经过了涂黑处理。为衰减入射的太阳光, 在成像单元中加入了衰减滤光片。光孔的直径为 d , 光孔到成像器件光敏面的距离为 f ; 面阵 CCD 的像元尺寸为 n_x (x 方向像素个数) $\times$ n_y (y 方向像素个数)、光敏面的物理尺寸为 d_x (宽度) $\times$ d_y (高度)。

3 智能模式切换

最初使用的模式切换方法是在二值化后的天空图像中寻找圆形的目标区域。如果找到了圆形的目标区域, 则认为捕获到了太阳像点, 系统进入闭环模式; 否则, 系统进入开环模式。但是, 若太阳光以一定的倾角照射到成像器件上, 则太阳像

点区域可能是不规则的, 见图 4(a)、(f)。这种非圆形的像点多见于太阳光逐渐进入成像单元视场的情况。为解决上述的问题, 本文放弃了寻找圆形区域的思路, 引入了基于连通区域标记的智能模式切换方法。

成像单元抓取到天空图像后, 传送给上位机。经过图像预处理^[14]后, 以 Otsu 方法设置灰度阈值, 分割目标和背景^[14-15], 然后标记连通区域^[14], 寻找可能存在的太阳像点。最后, 根据上述的结果选择太阳跟踪器的工作模式。

假设抓取图像不存在噪声, 且太阳仅在成像单元中成像, 那么在这种理想的情况下, 对于二值化后的图像, 应该存在且只存在一个太阳像点区域。其中, 太阳像点区域的进入闭环模式灰度值为 1, 背景区域的像素灰度值为 0。但是在实验中发现除太阳之外, 天空中其他的物体(例如云朵等)、成像单元内表面反射的杂光也可能会成像。同时, 由于各类噪声的影响, 二值化后的图像可能存在多个连续灰度值为 1 的像点区域, 影响太阳像点的定位精度。为此, 这里引入连通域标记的方法, 模式选择方法如下:

- (1) 按从左到右、从上到下的顺序扫描二值化后的图像。
 - a. 若当前像素灰度值为 0, 转到下一像素。
 - b. 若当前像素灰度值为 1, 检查这个像素的四连通区域连通性。
 - 1) 若 4 个相邻像素的灰度值均为 0, 给当前像素一个新的标号值。
 - 2) 若 4 个相邻像素中仅一个像素的灰度值为 1, 把这个像素的标号值赋给当前像素。
 - 3) 若 4 个相邻像素中有 n ($1 < n \leq 4$) 个像素的灰度值为 1, 则按左、左上、右、右上的顺序, 确定当前像素的标号值。若这些相邻像素的标号各异, 则将之视为等价标号保存。
- (2) 进行第二次图像扫描。根据标号等价关系整理所有的标号。第二次图像遍历后所有灰度值为 1 的目标区域都有了各异的标号。
- (3) 排序。按从大到小的顺序, 对各连通域的像素数排序, 并获取对应的连通域标号列表。
- (4) 选择太阳像点区域。将像素数目最多的连通域视为太阳像点区域, 计算太阳像点区域的像素个数 n_s 。
- (5) 如果 $n_{g_2} \leq n_s \leq n_{g_1}$, 则说明太阳像点区域

中的像素个数是合适的, 成像单元已经捕捉到了清晰的太阳像点, 可以认为当前天气晴朗, 太阳处于成像单元的视场之内, 转到(6); 否则, 转到(7)。其中, n_{g_1} 为太阳像点区域最大像素个数, n_{g_2} 为太阳像点区域最小像素个数。

(6) 去除噪声。将除太阳像点区域之外的所有连通区域的像素灰度值设置为 0, 将这些像素视为背景区域, 系统进入闭环控制阶段。

(7) 太阳像点区域的像素个数不在合理范围内, $n_s \leq n_{g_2}$ 或 $n_s \geq n_{g_1}$ 。抓取到的图像中没有太阳像点, 说明太阳光在成像单元的视场外或此时的天气阴暗, 系统进入天文跟踪模式。

4 闭环控制

系统进入闭环运行状态后, 采用视觉伺服控制的方法。此时, 成像系统捕获到了清晰并且面积合适的太阳像点, 太阳已经全部或者部分进入成像系统的视场, 太阳跟踪器进入视觉伺服控制模式。首先计算太阳像点的中心, 再计算太阳光和成像器件的角度偏差, 最后决定控制量。

以重心法计算太阳像点区域的中心。对于经过标记连通域后的图像, 太阳像点区域的中心为

$$x_c = \frac{\sum_{j=1}^K x_j A_j}{\sum_{j=1}^K A_j}, \tag{3}$$

$$y_c = \frac{\sum_{j=1}^K y_j A_j}{\sum_{j=1}^K A_j}, \tag{4}$$

其中 A_j 为像素的灰度值, x_j 为像素的行标号, y_j 为像素的列标号。

太阳光和成像器件平面俯仰角的角度偏差 e_h 为

$$e_h = \arctan \left[\frac{(\frac{n_y}{2} - y_c) \frac{d_y}{n_y}}{f} \right]. \tag{5}$$

太阳光和成像器件平面方位角的角度偏差 e_a 为

$$e_a = \arctan \left[\frac{(\frac{n_x}{2} - x_c) \frac{d_x}{n_x}}{f} \right]. \tag{6}$$

采用比例控制的方法, 驱动俯仰方向步进电

机和方位方向步进电机的脉冲数 n_h 和 n_a 分别为

$$n_h = k_h e_h, \tag{7}$$

$$n_a = k_a e_a. \tag{8}$$

其中 k_h 和 k_a 分别为俯仰方向控制器和方位方向控制器的比例增益。

5 天文跟踪

系统先由经纬度和时间等信息计算当前的太阳高度角增量和方位角增量, 再驱动步进电机动作, 调整转台转动到期望的位置。

在时刻 t , 太阳的高度角 h 和太阳的方位角 α 分别为

$$h(t) = \arcsin(\sin \delta(t) \cdot \sin \phi(t) + \cos \delta(t) \cdot \cos \phi(t) \cdot \cos \omega(t)), \tag{9}$$

其中 ϕ 为观测点的地理纬度, δ 为太阳的赤纬角

$$\alpha(t) = \arccos \left[\frac{\sin \delta(t) \cdot \cos \phi(t)}{\cos h(t)} - \frac{\cos \delta(t) \cdot \cos \omega(t) \cdot \sin \phi(t)}{\cos h(t)} \right], \tag{10}$$

其中 ω 为太阳时角。太阳赤纬角和太阳时角的计算见文献[3]。

6 实 验

光孔到成像器件的焦距 $f = 80 \text{ mm}$; 面阵 CCD 光敏面的物理尺寸为 $d_x = 30 \text{ mm}$, $d_y = 25 \text{ mm}$, 像元尺寸为 $n_x = 640$, $n_y = 480$ 。控制器的比例增益分别为 $k_h = 50$ 和 $k_a = 60$ 。转台及成像单元的图片见图 3。在系统开机前, 需手动将成像单元对准太阳。

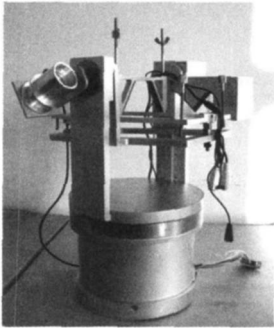


图 3 转台及成像单元
Fig. 3 Turntable and imaging unit

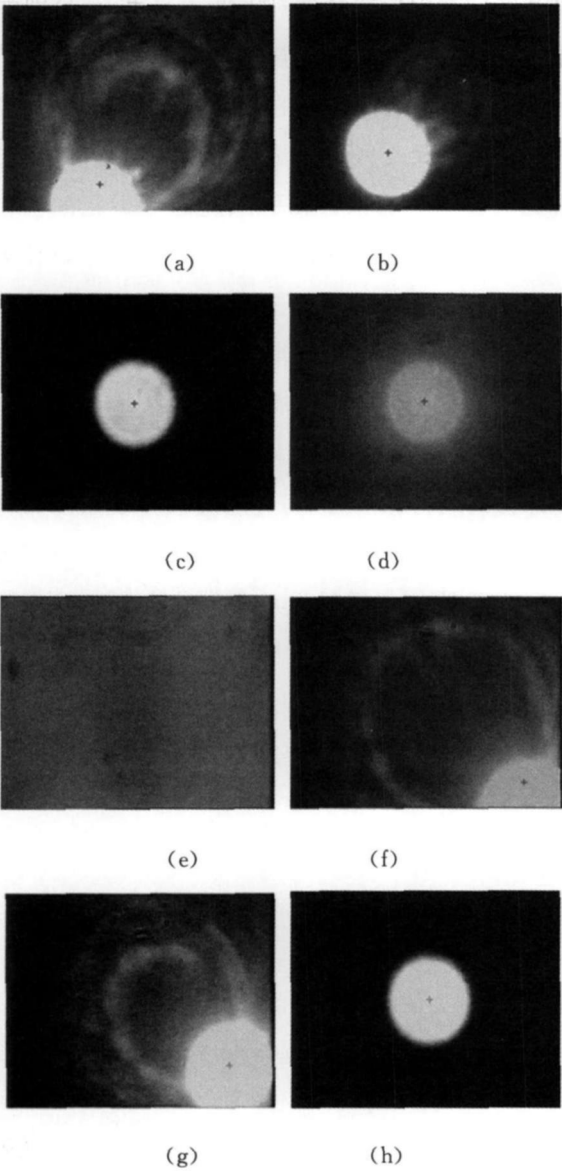


图 4 不同时刻捕获的天空图像
Fig. 4 Grabbing images of sky

表 1 图 3 中各图像的捕获时间

Tab. 1 Grabbing time for images in Fig. 3

标号	抓取时间	系统状态
(a)	15: 06: 49	闭环
(b)	15: 06: 59	闭环
(c)	15: 08: 19	闭环
(d)	15: 13: 50	闭环
(e)	15: 27: 13	天文跟踪
(f)	15: 27: 14	闭环
(g)	15: 29: 24	闭环
(h)	15: 30: 21	闭环

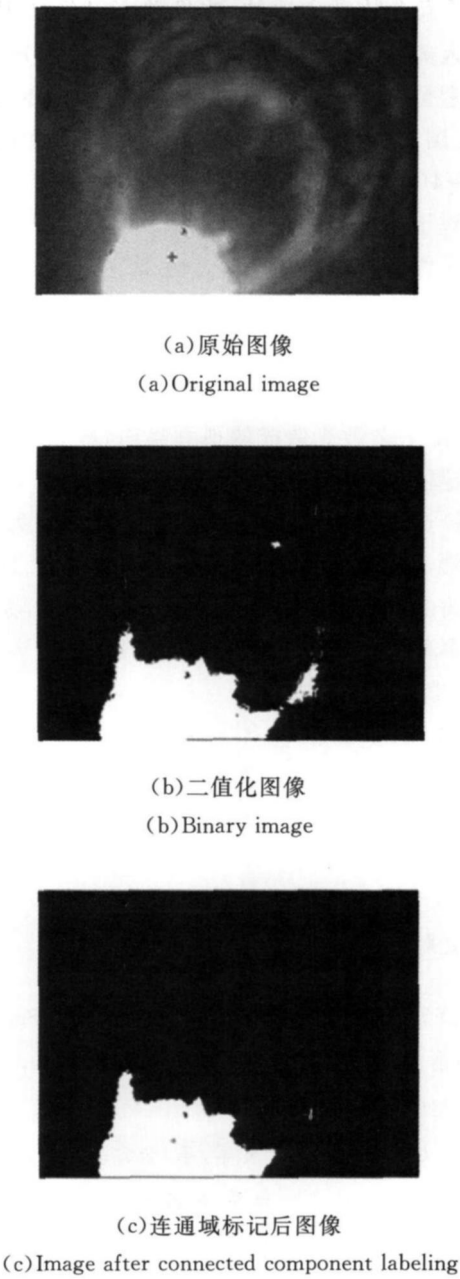


图 5 图像的处理结果
Fig. 5 Results after image processing

一次太阳跟踪实验中系统捕获的若干图像见图 4, 捕获时间见表 1, 图中的“+”表示太阳像点区域的中心。实验时间为 2010 年 1 月 20 日, 地点为中科院长春光机所, 经纬度为 N23° 45′ 44″, E125° 35′。

太阳进入成像单元视场后(见图 4(a)), 太阳跟踪器进入闭环工作模式, 并逐渐消除了系统的太阳指向偏差(见图 4(b)、(c))。一段时间后, 天气从晴朗转为暗淡(见图 4(d)), 直到由抓取图像

无法定位太阳像点区域后(见图 4(e)),太阳跟踪器进入天文跟踪模式。此后,天气从暗转晴,系统重新定位了太阳像点区域,重新进入闭环工作模式(见图 4(f)),逐渐消除了系统的太阳指向偏差(见图 4(g)、(h))。

对于成像单元捕获的图 4(a),经过连通域标记等操作后的图像见图 5。由图 5(b)可知,二值化的图像存在噪声,其中的几块孤立噪声可能是成像单元内部表面发射的杂光造成的。由图 5(c)可知,引入连通域标记等太阳像点定位操作后,去除了杂散光造成的孤立噪声,提高了太阳像点的定位精度。

经过时间跨度为 3 个月,累计时间约为 150 h 的实验,俯仰角的太阳平均指向偏差为 0.186° ,方位角的太阳平均指向偏差为 0.167° ,系统实现了多种天气条件下的自动太阳跟踪。

7 结 论

为了提高太阳跟踪器在多种天气条件下长时

间运行的太阳指向精度和运行可靠性,研究了太阳跟踪器的工作模式切换问题,构造了可在开环和闭环模式间智能切换的太阳跟踪器。开环工作模式采用了天文跟踪方法,闭环工作模式采用了视觉伺服控制方法。在引入连通域标记的基础上,提出了基于图像信息的智能切换方法以便太阳跟踪器选择合适的工作模式。这种基于图像信息的方法可获取较为丰富的外界环境信息,提高了系统感知外界环境的能力,降低了太阳跟踪器选择错误模式的概率。太阳跟踪实验表明,太阳跟踪器的运行稳定可靠,可适应较为复杂的天气条件。采用所提出的方法可在一定条件下,实现太阳跟踪器的全天候自动跟踪。太阳跟踪实验中,俯仰角的太阳平均指向偏差为 0.186° ,方位角的太阳平均指向偏差为 0.167° 。文中介绍的系统用于算法验证,一体化的嵌入式太阳跟踪系统正在研制中。

参考文献:

[1] LEE C, CHOU P, CHIANG C, *et al.*. Sun tracking systems: a review[J]. *Sensors*, 2009, 9: 3875-3890.

[2] 吕文华,贺晓雷,于贺军,等.全自动太阳跟踪器的研制和应用[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(12): 2544-2550.

LU W H, HE X L, YU H J, *et al.*. Development of full-automatic solar tracker and its applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2544-2550. (in Chinese)

[3] GRENA R. An algorithm for the computation of the solar position[J]. *Sol. Energy*, 2008, 82: 462-470.

[4] CHONG K K, WONG C W. General formula for one-axis sun tracking system and its application in improving tracking accuracy of solar collector[J]. *Sol. Energy*, 2009, 83: 298-305.

[5] KRIBUS A, VISHNEVETSKY I, YOGEV A, *et*

al.. Closed loop control of heliostats[J]. *Energy*, 2009, 29(5-6): 905-913.

[6] ABDALLAH S, NIJMEH S. Two axes sun tracking system with PLC control[J]. *Energ. Convers. Manage*, 2004, 45: 1931-1939.

[7] 张兴磊,杨丽丽,张东风.一种太阳自动跟踪系统的设计[J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(4): 315-318.

ZHANG X L, YANG L L, ZHANG D F. Design of one kind of automatic tracking system of sun[J]. *Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science)*, 2008, 26(4): 315-318. (in Chinese)

[8] ROTH P, GEORGIEV A, BOUDINOV H. Design and construction of a system for sun-tracking[J]. *Renewab. Energy*, 2004, 29(3): 393-402.

[9] 肖江,胡柯良,林佳本,等.用大面阵 CCD 实现全日面像自动导行[J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(9): 1589-1594.

XIAO J, HU K L, LIN J B, *et al.*. Tracking and guiding for full solar disk image using CCD-array

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(9): 1589-1594. (in Chinese)
- [10] 冉峰, 杨辉, 黄舒平. 面阵 CCD 彩色视频图像实时采集系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 273-280.
- RAN F, YANG H, HUANG SH P. Design of real-time color video capture system for area array CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 273-280. (in Chinese)
- [11] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 电子倍增 CCD 星相机的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6): 1396-1403.
- HE J W, HE X, WEI Z H, *et al.*. Design of real-time color video capture system for area array CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1396-1403. (in Chinese)
- [12] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 1420-1428.
- WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 1420-1428. (in Chinese)
- [13] 章明朝, 周跃, 闫丰, 等. “日盲”紫外增强型 CCD 的自动增益调节[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2): 496-502.
- ZHANG M CH, ZHOU Y, YAN F, *et al.*. Automatic gain control of SBUV-ICCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 496-502. (in Chinese)
- [14] RAFAEL G, RICHARD W. *Digital Image Processing*[M]. New York: Prentice-Hall, 2002.
- [15] 何瑾, 刘铁根, 张昊, 等. 应用形态学 top-hat 变换的支票方形印鉴自适应分割[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10): 2576-2585.
- HE J, LIU T G, ZHANG H, *et al.*. Adaptive algorithm based on morphological top-hat transformation to segment Chinese square seals in bank check[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2576-2585. (in Chinese)

作者简介:



王红睿(1980-), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 2006 年、2009 年于吉林大学分别获得硕士、博士学位, 主要从事非线性控制、太阳辐射测量的研究。E-mail: wang_hongrui@yahoo.com.cn



王玉鹏(1972-), 男, 山东沂水人, 博士, 副研究员, 主要从事空间遥感技术、精密太阳跟踪、太阳光谱及总辐射测量等方面的研究。E-mail: wangyu_peng@sina.com



方伟(1965-), 女, 辽宁朝阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 1987 年于山东大学获得学士学位, 1997 年、2005 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位, 主要从事辐射计量及空间光学遥感仪器的研究。E-mail: fangw@ciomp.ac.cn