

# 双模式太阳跟踪器太阳质心提取算法

姜春霞<sup>1,2,3</sup> 王灿进<sup>1,3\*</sup> 陈娟<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>长春工业大学电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012

<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在传统太阳跟踪器的基础上结合图像处理技术, 搭建一套双模式太阳跟踪器, 并围绕太阳质心提取算法展开研究。针对太阳跟踪器在太阳被云雾遮挡时无法准确跟踪的问题, 提出了一种基于快速中值滤波的去雾算法, 根据暗通道先验计算出透射率图, 使用快速中值滤波代替软抠图方法对透射率图进行平滑, 还原出无雾图像。为避免人工阈值带来的分割误差, 在去雾增强的图像上使用快速最大稳定极值区域(MSER)特征区域检测方法检测出太阳区域, 并提取出太阳质心。实验证明该算法在雾霾天气下仍然能够还原出清晰的太阳图像, 准确提取出太阳质心, 并且算法复杂度较低, 满足太阳跟踪器实时处理的需求。

**关键词** 图像处理; 太阳跟踪; 去雾; 最大稳定极值区域特征区域; 质心提取

中图分类号 TK519; TP273

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0213002

## Sun Centroid Extraction Algorithm for Solar Tracker with Double Modes

Jiang Chunxia<sup>1,2,3</sup> Wang Canjin<sup>1,3</sup> Chen Juan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science,  
Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>The Institute of Electrical and Electronic Engineering, Changchun University of Technology,  
Changchun, Jilin 130012, China

<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** On the basis of traditional solar tracker, a new solar tracker with double modes is built using image processing technology. The theme is focus on sun centroid extraction algorithm for solar tracker. To handle the problem that the solar tracker cannot track accurately when the sun is obscured by clouds or fogs, an image dehazing method based on rapid median filter is proposed. The transmission map is estimated by dark channel prior, and is smoothed using fast median filtering instead of soft-matting. The dehazed image is estimated using the transmission map. In order to avoid segmentation errors caused by manual threshold, an improved fast manimally stable extremal region (MSER) feature regions extraction method is proposed to extract sun area, and the centroid of the sun is computed. The experimental results indicate that the proposed algorithm can restore images captured in foggy and hazy weather, and accurately extract the centroid of the sun. The proposed method has low computational complexity and it meets the real-time processing acquirement of solar tracker.

**Key words** image processing; solar tracking; haze removal; manimally stable extremal region feature region; centroid extraction

**OCIS codes** 010.7295; 100.2980; 350.6050

收稿日期: 2014-06-10; 收到修改稿日期: 2014-09-23

基金项目: 吉林省科技发展计划(20126015)

作者简介: 姜春霞(1976—), 女, 博士研究生, 主要从事光电跟踪与伺服控制技术等方面的研究。

E-mail: jiang\_chunxia@163.com

导师简介: 陈娟(1961—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电跟踪与伺服控制技术等方面的研究。

E-mail: chenjuan@mail.ccut.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: wcjpsh@126.cm

# 1 引 言

太阳能作为一种清洁环保的可再生能源,具有广阔的应用前景。目前,光伏发电技术是太阳能利用的主要手段<sup>[1-2]</sup>。在对太阳光的接收过程中,太阳的跟踪与非跟踪,能量的接收效率相差很大。因此在光伏发电中,研究精确跟踪太阳指向的太阳能跟踪器对于提高发电效率具有积极意义<sup>[3]</sup>。

目前太阳跟踪器大体分为三类:1)为光电控制方式,通过光电电池、电荷耦合器件(CCD)相机等传感器的反馈信号来消除太阳指向偏差,例如文献[4]使用大面阵 CCD 获取天空图像,通过二值化和质心法计算太阳中心,该方法可获得较高的跟踪精度和灵敏度,但受天气条件影响严重,如果太阳被云层遮挡则无法跟踪,太阳离开视场之后无法自动搜索;2)为开环方式,根据天文历法计算太阳俯仰和方位角,控制伺服电机进行跟踪<sup>[5-6]</sup>。这种方法优点是不受天气条件影响,缺点是对系统的安装条件要求严格:系统的南北线需与安装地的地理南北线重合,底座严格水平。同时该系统存在积累误差,需要人工调整;3)是开环和闭环结合的方式,CCD 相机成像跟踪和天文历法跟踪相互配合使用。如文献[7]在以标记连通区域的方法计算太阳像点区域像素,在 CCD 闭环控制和天文跟踪之间切换;文献[8]在太阳辐射强度较强时采用光电传感器闭环跟踪,在太阳辐射较弱时采用开环跟踪;文献[9]使用光电二极管判断天气好坏,在开环与闭环跟踪方式之间切换。这种智能跟踪是当前太阳跟踪器的发展趋势。这类方法也有一定的缺陷,模式切换问题没有合适的标准,使用 CCD 相机进行太阳区域的选择需要人工设定阈值,受背景干扰严重。

现有有关太阳跟踪器的文献中,多数关注系统的搭建过程,其中使用的图像处理方法较为简单。例如,文献[4]在成像系统所获得的图像中,直接利用二值化进行太阳质心提取,若太阳受到云雾遮挡,或者阈值选取不合理,则很难提取出准确的太阳质心。算法能否准确提取太阳质心,是直接决定跟踪精度的重要因素。

为此,搭建一套太阳跟踪系统,该系统结合 CCD 和高性能的上位机,进行较为复杂的图像处理。在此基础上,提出了一种适用于太阳跟踪器的图像处理算法,用于实时提取太阳质心,编码后向转台发送控制指令。提出的基于快速中值滤波的太阳跟踪器图像去雾算法可以消除雾霾对太阳区域的模糊,而快速最大稳定极值区域(MSER)提取算法则能够避免人工选取阈值,准确提取太阳区域,从而提高太阳跟踪器在雾霾和多云天气条件下的环境适应性和跟踪精度。实验表明,提出的算法不仅能够准确提取出太阳质心,提高太阳跟踪精度和光电转换效率,并且处理时间较短,满足跟踪系统实时性的需求。

## 2 系统原理

### 2.1 太阳跟踪器系统简介

太阳跟踪器由 CCD 相机、图像采集卡、上位机、转台等模块构成。CCD 相机用于采集天空图像,通过 Cameralink 接口与上位机上的图像采集卡相连。转台包括方位和俯仰电机,并内嵌单片机,输出脉冲宽度调

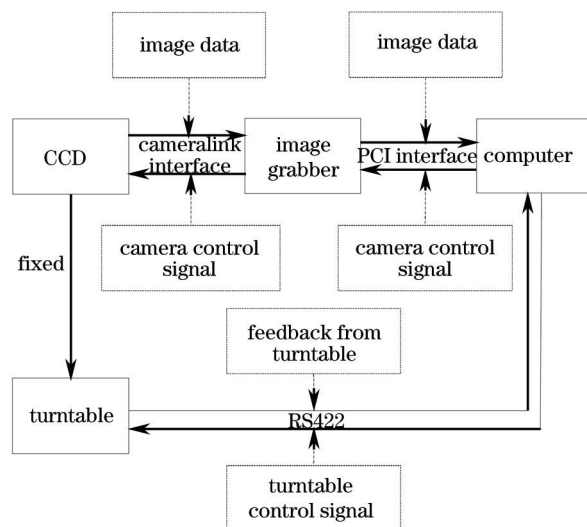


图 1 太阳跟踪器系统构成

Fig.1 System configuration of solar tracker

制(PWM)信号控制电机的转向和转速。上位机通过RS422接口与转台相连,向转台发送控制或查询指令。转台响应指令后,向上位机发送反馈信号。系统结构如图1所示。

程序启动阶段,先设置相机的帧频和曝光时间等参数。接着,系统进入循环工作模式。CCD相机将采集到的天空图像以固定的帧频发送给上位机,上位机对图像经过一系列的处理以提取出太阳中心。如果太阳中心在相机视场内,则采用闭环跟踪方式,程序计算出太阳中心相对于视场中心的脱靶量,编码后通过RS422发送给转台,控制转台转动直至视场中心和太阳中心重合。如果没有提取出太阳中心,说明太阳中心在视场之外,或者虽然太阳中心在视场之内,但是被云雾完全遮挡,算法提取太阳中心失败,转入天文历法跟踪方式,程序使用(1)式和(2)式计算当前时刻太阳的方位和俯仰角,控制转台将视场中心移动到该位置。为保证用户界面显示流畅,采用多线程方式进行该循环操作,程序控制流程如图2所示。

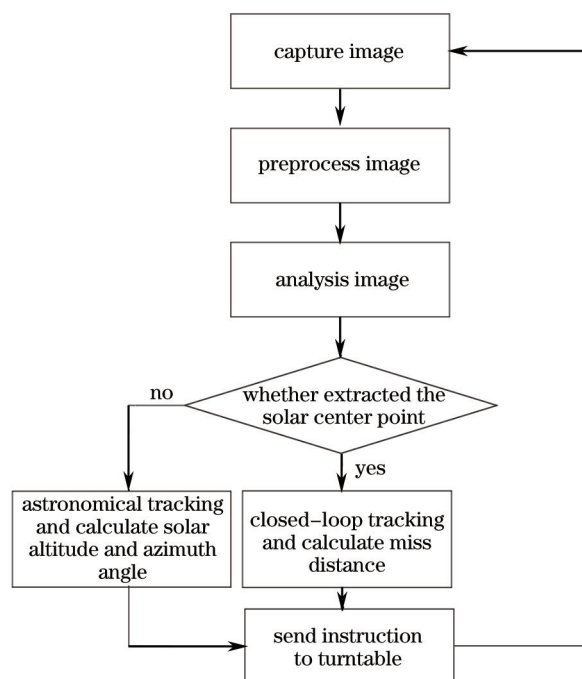


图2 太阳跟踪器程序控制流程  
Fig.2 Program control flowchart of the solar tracker

## 2.2 天文历法跟踪

天文历法跟踪是指由观测地的经纬度、当前时间计算太阳的高度角和方位角,程序控制伺服电机转动到该角度。

在  $t$  时刻,太阳的高度角  $h(t)$  和方位角  $\alpha(t)$  分别为

$$h(t) = \arcsin[\sin \delta(t) \cdot \sin \phi(t) + \cos \delta(t) \cdot \cos \phi(t) \cdot \cos \omega(t)], \quad (1)$$

$$\alpha(t) = \arccos\left[\frac{\sin \delta(t) \cdot \cos \phi(t) - \cos \delta(t) \cdot \cos \omega(t) \cdot \sin \phi(t)}{\cosh(t)}\right], \quad (2)$$

式中  $\phi$  为观测点的地理纬度,  $\delta$  为太阳的赤纬角,  $\omega$  为太阳时角。

## 2.3 闭环跟踪

闭环跟踪是指图像处理算法判断出太阳质心在当前 CCD 相机的视场之内,则以质心脱靶量为反馈量,控制伺服电机转动,进行闭环跟踪。假设提取出的太阳区域为  $S$ ,  $S$  中包含的像素个数为  $N$ ,则计算出的太阳质心为

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^N x_i F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}, \quad (3)$$

$$Y_s = \frac{\sum_{i=1}^N y_i F_i}{\sum_{i=1}^N F_i}, \quad (4)$$

式中  $(X_s, Y_s)$  是太阳质心坐标,  $x_i, y_i$  分别是太阳区域像素的横纵坐标,  $F_i$  是像素的灰度值。

随后,根据 CCD 的尺寸、光学系统的焦距计算脱靶量  $(e_n, e_s)$ , 经过通信协议编码之后, 发送给转台控制系统, 驱动伺服电机运动至该角度。

由以上过程可知, 闭环跟踪的依据就是图像处理算法提取出的太阳区域  $S$ 。该区域提取是否准确, 决定了闭环跟踪的精度。由于太阳跟踪器的成像过程较为复杂, 例如太阳部分进入视场、薄云(雾霾)对光线的削弱、噪声等, 云雾对太阳遮挡较为严重时, 太阳区域  $S$  可能提取不准确, 从而影响跟踪精度。因此太阳跟踪器的图像处理算法中, 引入去雾过程十分重要。同时为了满足实时性, 算法处理时间必须足够短。例如假设图像采集系统的帧频为 20 Hz, 则图像处理算法的单帧运算时间必须小于 50 ms。

### 3 太阳跟踪器的图像去雾算法

单幅图像去雾是一个欠约束病态问题, 近年来许多学者对其进行了研究。Fattal 等<sup>[10]</sup>通过统计颜色信息提出简单的退化模型, 该模型在薄雾情况下效果较好, 而在浓雾情况下去雾性能迅速下降。Tan 等<sup>[11]</sup>提出最大化局部对比度的思想, 该方法可以视作一种通用的图像增强手段, 对于去雾并没有建立合适的模型, 具有较大的局限性。He 等<sup>[12]</sup>提出基于暗通道原理的去雾方法, 该方法基于透射成像理论建立了完善的模型, 是目前效果最好的去雾方法之一。但是该方法处理时间过长。孙伟等<sup>[13]</sup>提出了基于大气散射模型的去雾方法, 通过开运算去除场景中的白色目标以精确估计环境光亮度, 同时使用快速联合双边滤波估计大气透射系数, 较好地还原了场景。该算法有效缩短了计算时间, 对 576 pixel×768 pixel 的图像处理时间为 0.5 s 左右, 但是对于太阳跟踪器图像处理系统中, 处理时间仍嫌过长。为此, 提出了基于快速中值滤波的暗通道去雾方法。

#### 3.1 暗通道去雾

根据文献[12], 图像的雾化过程可以描述为

$$I(x) = J(x)t(x) + A[1 - t(x)], \quad (5)$$

式中  $I$  为成像系统获得的雾化图像,  $J$  是场景在无雾条件下的成像,  $A$  是天空亮度,  $t$  是传输介质透射率图。

暗通道原理的基本思想是: 在自然图像的局部小像素块中, 总是存在一些像素, 至少在  $R, G, B$  的某一个通道上的灰度值趋近于 0。根据暗通道原理恢复出的无雾图像为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t, t_0)} + A, \quad (6)$$

式中常数  $t_0$  是为了防止计算出的透射率过小, 使去雾后的像素值太小而失真。

由于计算时进行了分块, 导致估计出的透射率图出现明显的块效应, 去雾结果产生失真。为此, 文献[12]采用软抠图<sup>[14]</sup>方法来优化透射率图。实验证明, 软抠图确实可以抑制去雾过程中的块效应, 增加去雾对比度, 但是时间开销较大。例如实验中测试一幅 512 pixel×512 pixel 的三通道图像, 软抠图过程需要 4 s 左右, 这对于太阳跟踪器这种实时性要求比较高的场合显然是不适用的。为此, 需要寻找合适的方法代替软抠图进行透射率图的优化。

#### 3.2 快速中值滤波

软抠图可视为一种滤波方法, 对透射率图进行平滑并保留边缘细节部分, 只是计算代价巨大。为此可以选择合适的滤波器代替软抠图。常用的高斯滤波会对透射率图有用的边缘也造成模糊, 而中值滤波可以较好地保护细节信息。

在原始的含雾图像中, 考虑图 3 所示的阶跃边缘  $C$ , 以及边缘附近的两个像素点  $A, B$ , 其像素灰度值分别为  $p(A), p(B)$ , 且  $p(A) < p(B)$ , 设不加滤波, 对应透射率为  $t(A), t(B)$ , 直接去雾之后  $A, B$  的灰度值变为  $p_i(A), p_i(B)$ 。对透射率图进行滤波后, 两边对应的透射率变为  $t'(A), t'(B)$ , 再去雾,  $A, B$  的灰度值变为  $p'_i(A), p'_i(B)$ 。

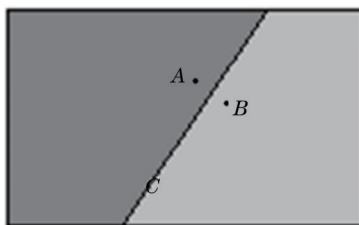


图3 阶跃边缘示意图

Fig.3 Schematic diagram of step edge

根据透射率的计算公式<sup>[12]</sup>可知  $t(A) > t(B)$ 。对透射率图经过滤波之后,  $t(A)$  由于  $t(B)$  的加权而减小,  $t(B)$  由于  $t(A)$  的加权而增加, 即  $t'(A) < t(A)$ ,  $t'(B) > t(B)$ 。再根据(6)式, 可得:  $p'_i(A) < p_i(A)$ ,  $p'_i(B) > p_i(B)$ 。

在对透射率图进行滤波之前, 去雾后阶跃边缘两边的对比度  $\Delta p_i = p_i(B) - p_i(A)$ 。在对透射率图进行滤波之后, 去雾后阶跃边缘两边的对比度  $\Delta p'_i = p'_i(B) - p'_i(A)$ 。由前文分析可知  $\Delta p'_i > \Delta p_i$ , 即对透射率图进行滤波再去雾, 确实可以增加阶跃边缘两边的对比度, 改善去雾质量。

从大气透射率角度, 滤波作用机理可解释如下: 滤波后, 阶跃边缘附近, 暗处的透射率减小, 亮处的透射率增加, 从而暗处透过的信息更少而更暗, 亮处透过的信息更多而更亮, 因此处理后图像的对比度增加。

传统的中值滤波需要对每个像素邻域像素进行排序, 计算量非常大。假设滤波器窗口大小为  $w \times w$ , 图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$ , 使用冒泡排序, 则对整幅图像进行滤波的计算复杂度为  $M \times N \times O(w^4)$ 。为此, 提出一种快速的中值滤波近似算法:

1) 首先定义长度为  $w$  的队列  $Q$ ;

2) 若当前处理的像素是每行需要处理的第一个像素, 记为  $f(i, w)$ ,  $w \leq i \leq M - w$ 。取其  $w \times w$  的邻域矩阵  $D_{i,w}$ , 计算该矩阵每一列的中值  $\{m_1^{i,w}, m_2^{i,w}, \dots, m_w^{i,w}\}$ , 存入队列,  $m_1$  先入而  $m_w$  后入, 最后对队列中的数再次排序得到中值;

3) 对于其余像素  $f(i, j)$ ,  $w < j \leq M - w$ , 其邻域矩阵  $D_{i,j}$  的每一列中值为  $\{m_1^{i,j}, m_2^{i,j}, \dots, m_w^{i,j}\}$ 。因为队列中已经存储了  $f(i, j-1)$  的邻域矩阵  $D_{i,j-1}$  的每一列中值  $\{m_1^{i,j-1}, m_2^{i,j-1}, \dots, m_w^{i,j-1}\}$ , 并且有  $m_1^{i,j} = m_2^{i,j-1}, m_2^{i,j} = m_3^{i,j-1}, \dots, m_{w-1}^{i,j} = m_w^{i,j-1}$ , 因此只需要计算  $D_{i,j}$  最后一列的中值并将其入队列, 并计算队列的中值, 就可以得到  $f(i, j)$  邻域的中值。

使用改进的快速中值算法, 解得的并非邻域的严格中值, 但足以满足滤波的要求。实验中发现改进中值滤波的效果几乎与传统中值滤波效果没有区别。同时, 改进方法大大简化了计算。滤波器窗口大小为  $w \times w$ , 图像大小为  $M \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$  时, 其计算复杂度为  $N \times (w + 1) \times O(w^2) + 2 \times M \times (N - 1) \times O(w^2) \approx 2M \times N \times O(w^2)$ , 大大优于传统中值滤波。

### 3.3 基于快速中值滤波的暗通道去雾

提出了基于快速中值滤波的暗通道去雾方法, 步骤为:

1)  $A = \max[f(i, j)]$ , 选取图像中最亮的像素值作为天空的亮度  $A$ ;

2)  $t(i, j) = 1 - \alpha[f(i, j)]_{w_0} * [f(i, j)/A]$ , 计算透射率图;

3) 使用快速中值滤波器对透射率图进行滤波;

4)  $i \text{ mag eDehazed}(i, j) = [i \text{ mag eSrc}(i, j) - [1 - t(i, j)] * A] / t(i, j)$ , 还原出无雾图像。

在步骤2)计算透射率的公式中, 加入对比度增强因子  $\alpha$ , 可以进一步增强去雾的对比度。 $\alpha$  的取值方法为

$$\alpha = \begin{cases} 0.9, & f(i, j)/A > 0.9 \\ 1.1, & f(i, j)/A < 0.9 \end{cases} \quad (7)$$

去雾之后图像会有一定程度的变暗, 为此可以使用指数变换对图像进行增亮。

## 4 质心提取方法

经过去雾和指数增强之后, 即可以提取太阳区域  $S$ 。文献[7]使用阈值法分割太阳与背景区域, 该算法

的缺陷是阈值选取可能不够准确,对分割结果产生较大影响。为此,引入MSER方法。

取  $T = \{0, 1, \dots, 255\}$ , MSER算法<sup>[15]</sup>的目的是找到这样的连通区域  $R$ , 满足

$$\Delta R = \frac{|R(T + \Delta)| - |R(T - \Delta)|}{|R(T)|} < \varepsilon, \quad (8)$$

式中  $\Delta$  表示阈值变化量,  $\varepsilon$  表示最大误差阈值。根据定义, 提取出的MSER区域具有以下性质: MSER区域为与背景区域像素对比度较大的连通区域; 目标区域较稳定; 无需事先确定分割阈值。天空背景下, 太阳目标区域满足上述条件, 因此MSER算法适用于提取太阳区域。因为太阳为圆形, 故检测出MSER区域后, 将其规整为圆形区域。

MSER算法的时间复杂度为  $O(n \log \log n)$ , 若对每帧图像均单独运算, 耗时过大。考虑到在相邻帧中, 太阳区域位置几乎不发生变化, 因此可以使用以下快速MSER算法:

- 1) 使用MSER算法提取当前帧的太阳区域  $S$ , 求其外接矩形  $Rect$ , 并根据(3)、(4)式计算质心位置  $(X_s, Y_s)$ , 并记录阈值  $T$ ;
- 2) 在下一帧到来时, 在  $Rect$  区域中, 遍历阈值  $[T - 2\Delta, T + 2\Delta]$  提取MSER区域, 提取该帧的太阳区域  $S'$ , 并将其规整为圆形区域。根据(3)、(4)式求出质心位置  $(X'_s, Y'_s)$ , 记录阈值  $T'$ ;
- 3) 若  $|X'_s - X_s| + |Y'_s - Y_s| < \delta$ , 证明成功提取太阳质心, 返回步骤2); 否则, 证明太阳质心提取失败, 返回步骤1)。

## 5 太阳跟踪器太阳质心提取算法流程

提出的太阳跟踪器太阳质心提取算法流程为:

- 1) 对捕获的每帧图像  $I$ , 执行快速暗通道去雾, 得到去雾图像  $I_d$ ;
- 2) 对  $I_d$  进行指数增强, 得到清晰太阳图像  $I_c$ ;
- 3) 对  $I_c$  执行快速MSER算法, 提取出太阳区域  $S$ , 并最终根据(3)、(4)式提取出太阳质心  $(X_s, Y_s)$ 。

## 6 实 验

根据图1所示的系统结构搭建一套太阳跟踪器系统, 成像系统焦距为  $f = 100 \text{ mm}$ , 接收装置采用Basler a1000-120 km 可见光 CCD 相机, 像元尺寸为  $5.5 \mu\text{m}$ , 成像分辨率为  $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$ , 帧频调至  $20 \text{ frame/s}$ , 积分时间调至  $500 \mu\text{s}$  以防止过度曝光, 相机通过cameralink接口向上位机实时传输图像; 转台型号为YS3081, 有方位和俯仰两个自由度, 内部控制芯片为C8051F020单片机, 通过RS422串口与工控机相连接, 接收上位机的查询及控制指令。在系统上电自检之后, 需要手动调节光学系统指向, 使太阳进入视场。

在雾霾天气下, 一天中不同时刻捕获的太阳图像如图4所示。图4(a)、(b)中, 由于雾霾的影响, 太阳的边缘变得模糊, 难以与天空背景准确地区分开。在图4(c)中, 由于云层的遮挡, 导致只能观测到一部分太阳区域。图4(d)表示随着时间的推移, 雾霾越来越严重, 太阳与天空背景的对比度越来越差, 给准确提取太阳质心带来困难。

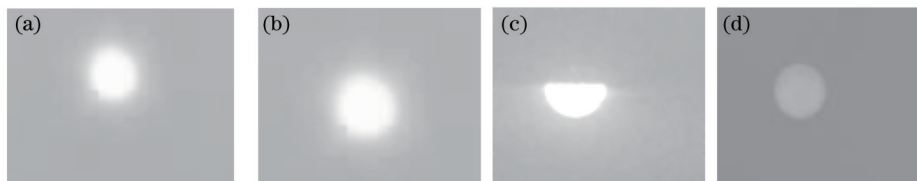


图4 不同时刻获取的太阳图片。(a)上午10时05分;(b)下午12时11分;(c)下午2时09分;(d)下午3时56分

Fig.4 Sun images captured at different time. (a) 10:05 am; (b) 12:11 pm; (c) 2:09 pm; (d) 3:56 pm

图5表示经过去雾和指数增强后的图片, 可以看出, 去雾之后, 太阳边缘变得较为清晰, 太阳与天空的对比度变好。虽然在天空靠近太阳部分会出现不规则的亮斑, 但不影响后续的太阳区域提取。

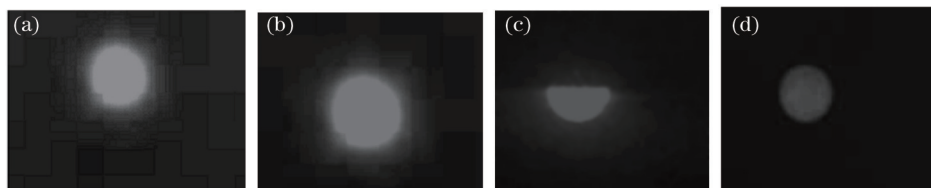


图5 去雾增强之后的太阳图片

Fig.5 Sun images after dehazing and enhancing

图6为太阳质心提取结果,红色实线十字叉表示所提算法求取的太阳质心,蓝色虚线十字叉表示使用文献[7]算法求取的太阳质心。从图6(a)、(b)直观上可以看出,在雾霾较严重时,因为所提算法无需手动确定阈值,而文献[7]阈值可能选取不准确,因此所提算法求取的太阳质心更贴近于真实的太阳质心;从图6(c)可以看出,在太阳被部分遮挡时,所提算法对MSER特征区域进行圆形规整,所求出的太阳质心也贴近于真实的太阳质心;图6(d)因为使用阈值法二值化之后的太阳区域与MSER规整的圆形区域基本一致,因此两种算法求取的太阳质心基本重合,接近真实的太阳质心。

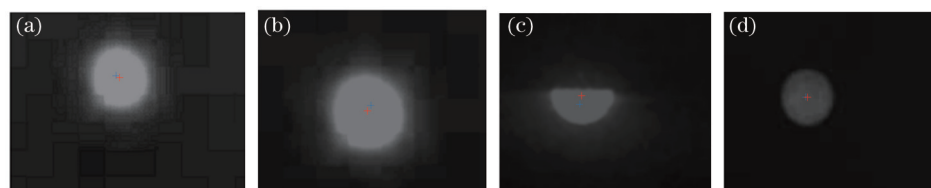


图6 太阳质心提取结果

Fig.6 Sun centroid extraction results

以(1)、(2)式计算得到的太阳天文历法位置为基准,统计一天时间内文献[7]算法和所提算法的平均指向偏差,结果如表1所示。

表1 平均指向偏差统计

Table 1 Statistics of average pointing error

Algorithm	Pitch error	Azimuth error
Algorithm proposed in Ref.[7]	0.2118	0.1976
Proposed algorithm	0.1267	0.1034

从表1可知,相比于文献[7]的算法,使用所提算法的俯仰跟踪精度提高了67.2%,方位跟踪精度提高了47.7%,证明了所提算法能有效提高太阳跟踪器的跟踪精度。

综上所述,所提算法具有更好的适应性,在雾霾较为严重或者太阳被部分遮挡的情况下,能够较为准确地提取太阳质心,保证太阳跟踪器的跟踪精度。

统计算法的单帧运算时间,结果如表2所示。所提算法由于使用快速中值滤波加速了去雾过程,同时使用快速MSER避免了在整幅图像上重复检测太阳区域,因此耗费时间较短。成像系统帧频20 frame/s时,能够实时提取太阳质心。

表2 算法运行时间统计

Table 2 Statistics of algorithm running time

Algorithm	Running time/ms
Algorithm proposed in Ref.[7]	45.45
Proposed algorithm	31.88

## 7 结 论

为保证太阳跟踪器在雾霾天气中的运行精度和可靠性,结合CCD相机和高性能工控机构造太阳跟踪器,介绍了该太阳跟踪器的工作机理,并提出了一种快速的太阳质心提取算法。所提算法利用基于中值滤波的快速暗通道去雾方法去除太阳图像中的雾霾,并进行指数增强,使用快速MSER特征区域提取算法提取

太阳区域,最后计算出太阳质心。实验证明所提算法适用于复杂的天气条件,在雾霾天气下仍然能够较为准确地提取太阳质心,保证了太阳跟踪器的跟踪精度。

## 参 考 文 献

- 1 Fang Zujie, Chen Gaoting, Ye Qing, *et al.*. Progress of photovoltaic electric power generation[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 5-14.  
方祖捷,陈高庭,叶青,等.太阳能发电技术的研究进展[J].中国激光,2009,36(1):5-14.
- 2 Li Guoliang, Li Ming, Wang Liuling, *et al.*. Analysis of output characteristics of super cells serial module with partial shading[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0125001.  
李国良,李明,王六玲,等.阴影遮挡下空间太阳能电池串联组件输出特性分析[J].光学学报,2011,31(1):0125001.
- 3 He Xincheng, Gao Chunfu, Wang Bin, *et al.*. Design and positional posture analysis of parallel sun auto-tracking mechanism[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(5): 1048-1054.  
贺新升,高春甫,王彬,等.太阳自动跟踪机构的设计和位姿分析[J].光学精密工程,2012,20(5):1048-1054.
- 4 Xiao Jiang, Hu Keliang, Lin Jiaben, *et al.*. Tracking and guiding for full solar disk image using large CCD-array[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(9): 1589-1594.  
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.
- 5 C Lee, P Chou, C Chang, *et al.*. Sun tracking systems: A review[J]. Sensors, 2009, 9(5): 3875-3890.
- 6 R Grena. An algorithm for the computation of the solar position[J]. Sol Energy, 2008, 82(5): 462-470.
- 7 Wang Hongrui, Wang yupeng, Fang Wei. Intelligent solar tracker with double modes[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1605-1611.  
王红睿,王玉鹏,方伟.智能双模式太阳跟踪器[J].光学精密工程,2011,19(7):1605-1611.
- 8 Lü Wenhua, He Xiaolei, Yu Hejun, *et al.*. Development of full-automatic solar tracker and its applications[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2544-2550.  
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(2):2544-2550.
- 9 Zhang Xinglei, Yang Lili, Zhang Dongfeng. Design of one kind of automatic tracking system of sun[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2008, 26(4): 315-318.  
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.
- 10 R Fattal. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- 11 R T Tan. Visibility in bad weather from a single image[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. 1-8.
- 12 K M He, J Sun, X O Tang. Single image haze removal using dark channel prior[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. 1956-1963.
- 13 Sun Wei, Li Dajian, Liu Hongjuan, *et al.*. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(4): 1040-1046.  
孙伟,李大健,刘宏娟,等.基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J].光学精密工程,2013,21(4):1040-1046.
- 14 A Levin, D Lischinski, Y Weiss. A closed-form solution to natural image matting[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2008, 30(2): 228-242.
- 15 Chen Bing, Zhao Yigong, Li Xin. A new approach to scene matching during electro-optical imaging terminal guidance[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 163-168.  
陈冰,赵亦工,李欣.一种新的光电成像末制导景象匹配方法[J].光学学报,2010,30(1):163-168.

栏目编辑:张浩佳