

## 基于同心圆分割的大视场星图识别算法

刘恒<sup>1,2</sup>, 郑炅<sup>1,2\*</sup>, 秦龙<sup>1,2</sup>, 赵天昊<sup>1,2</sup>, 王嵩<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学技术大学 信息科学技术学院, 合肥 230027; 2. 网络传播系统与控制安徽省重点实验室(中国科学技术大学), 合肥 230027)

(\*通信作者电子邮箱 qzheng@ustc.edu.cn)

**摘要:**针对星敏系统常见的三角形识别算法数据冗余量大、识别速度特别是初始识别速度低的问题,提出一种基于同心圆分割的大视场(FOV)星图识别算法。在分析星图信息以获得其主星的基础上,围绕主星以一定的半径画8个同心圆,再根据各星的坐标统计每个圆环内的星数量,从而得出主星的伴星分布向量。以同样方法基于基本星表构建相对应的导航星特征库,然后利用伴星分布向量与特征库进行模式匹配,从而得出星图识别结果。对特征库中的数据,根据各向量的第一维元素大小进行排序,以加快算法的识别过程。仿真实验结果表明,该算法所需的导航星特征库存储空间小,具有良好的实时性、抗噪性与较高的识别率,能够以95.3 μs的识别时间达到88.9%以上的正确率,可与其他识别算法相结合,执行于不同的阶段,实现更高效、准确的天文导航。

**关键词:**同心圆;大视场;星图识别;伴星分布向量;导航星特征库

**中图分类号:**TP391.413 **文献标志码:**A

### Star pattern recognition algorithm of large field of view based on concentric circles segmentation

LIU Heng<sup>1,2</sup>, ZHENG Quan<sup>1,2\*</sup>, QIN Long<sup>1,2</sup>, ZHAO Tianhao<sup>1,2</sup>, WANG Song<sup>1,2</sup>

(1. School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China;

2. Key Laboratory of Network Communication System and Control of Anhui (University of Science and Technology of China), Hefei Anhui 230027, China)

**Abstract:** Since the triangle identification algorithm commonly utilized in star sensitive system is of high data redundancy and low recognition speed, especially initial recognition speed, a concentric circles-based star pattern recognition algorithm of large Field Of View (FOV) was proposed. After analyzing the information of star map to acquire its main star, draw eight concentric circles around the main star at some certain radiuses, then figure out the number of stars in each annulus based on the coordinates to obtain the distributional vector of companion stars. Construct the navigation star feature database from the base database with the utilization of the same method, so as to process the pattern matching with the distributional vector to acquire star pattern recognition result. The vectors in the database will be sorted by the first dimensional element in order to accelerate the process of recognition. The simulation results show that this algorithm needs much less storage space of navigation star feature database, and possesses good real-time and noise resistance, and high recognition rate. It takes 95.3 μs recognition time to achieve more than 88.9% accuracy, and it also can be integrated with other recognition algorithms and performance in different stages to realize more efficient and accurate celestial navigation.

**Key words:** concentric circle; large Field Of View (FOV); star pattern recognition; distributional vector of companion stars; navigation star feature database

## 0 引言

尽管现代定位导航方式越来越丰富,越来越准确——比如全球定位系统(Global Positioning System, GPS),但基于天文方式的定位导航技术由于其自主性依然有其无可比拟的优越性<sup>[1]</sup>。建立在恒星参考系上的天文导航定位不依赖于任何其他外部系统,这在军用系统中显得尤为重要。这类系统可以不与外界交换信息,不受其他系统干扰,自主工作,高精度,无误差积累,因而得到广泛应用及大力研究<sup>[2]</sup>。

天文导航系统的研究内容主要分为4个方面(如图1):

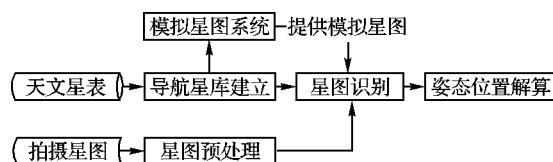


图1 天文导航系统主要研究内容

- 1) 获取原始恒星星图,可直接拍摄或模拟星图;
- 2) 对原始星图的低层特征处理与提取,包括图像修复、去噪、质心定位和星等估计等;
- 3) 利用各恒星数据信息进行星图识别;
- 4) 根据识别出的恒星数据进行相应的姿态及位置解算。

收稿日期:2013-01-31;修回日期:2013-03-11。

基金项目:超精密控制与系统联合实验室科研项目;国家发改委 CNGI 课题(CNGI-09-03-14)。

**作者简介:**刘恒(1986-),男,广西玉林人,硕士研究生,主要研究方向:网络多媒体、模式识别; 郑炅(1970-),男,安徽合肥人,副教授,博士,主要研究方向:网络多媒体、模式识别、视频语义检索、媒体内容分发; 秦龙(1988-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要研究方向:网络多媒体; 赵天昊(1987-),男,黑龙江齐齐哈尔人,硕士研究生,主要研究方向:网络多媒体; 王嵩(1975-),男,安徽六安人,讲师,博士,主要研究向:计算机网络、媒体内容分发。

星图识别就是将星敏传感器视场(Field Of View, FOV)中观测星组成的星图和星表中导航星组成的星图,根据几何特征等信息进行匹配以确定观测星与导航星的对应关系,是星图导航中极为关键的一个步骤<sup>[3]</sup>,它指出了星敏传感器拍摄到的实时星图的空间位置信息,为导航中的姿态和位置解算提供了基础,其效率和准确度对整个星图导航系统有着极为重要的意义。

全天星图识别算法主要分为两大类<sup>[4-6]</sup>。第一类方法将星图识别作为子图的匹配问题,主要是从当前拍摄星图中构建一个子图和子结构,再到整体的导航星库中去匹配查找,其典型算法有以三角形算法<sup>[7]</sup>及相关改进算法<sup>[8]74-76</sup>为代表的多边形算法(Polygon Algorithm, PA)<sup>[9]</sup>,以匹配组算法(Match Group Algorithm, MGA)<sup>[10]</sup>为代表的主星算法。第二类方法则将星图识别作为一个模式识别问题,主要通过星及其周边环境定义某种特定的模型来进行匹配识别,其典型算法有网格算法(Grid Algorithm, GA),神经网络算法(Neural Network Algorithm, NNA)<sup>[11-12]</sup>以及遗传算法(Genetic Algorithm, GA)<sup>[13]</sup>等。

三角形算法特征维度低,冗余匹配多,对噪声敏感<sup>[14]</sup>。网格算法需要较多的亮星信息。神经网络算法则需要大量的测试样本训练,要求设备具有较强计算能力。

为了有效解决上述问题,本文针对大视场环境,提出一种基于同心圆<sup>[15]</sup>分割的全天自主星识别算法,该方法先确定星图中的主星,再构建其邻域的伴星分布向量,并建立相应的导航星特征库。利用伴星分布向量与导航星特征库进行模式匹配,从而得出识别结果。

## 1 识别算法设计

本文仿照基于内容的图像检索(Content Based Image Retrieval, CBIR)中颜色分布直方图的基本思想设计同心圆主星识别算法。首先按坐标与亮度选取主星,围绕主星以一定的半径画个同心圆,如图2所示。

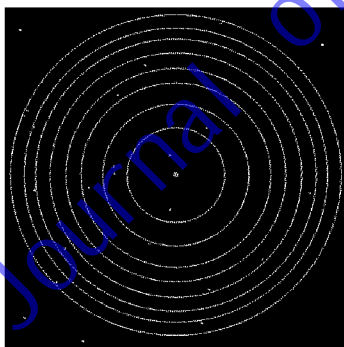


图2 同心圆分割示意

接下来统计每个圆环内的星数量,从而得到各星的伴星分布向量,以同样方法构建相对应的导航星特征库,利用伴星分布向量与特征库进行模式匹配,从而得出星图识别结果。对特征库中的数据,将根据各向量的第一维元素大小进行排序,以加快算法的识别过程。这样既可以解决三角形算法特征维度低的问题,也有效地减少了数据冗余度,同时算法具有旋转不变性。

### 1.1 主星选取

主星的选取准则为:1) 保证主星的选择范围足够大;

2) 能够成功构建主星的伴星分布向量,也即要求能够满足最大同心圆的半径。则主星应落在星图中央的1/3区域。

相应地,取伴星分布向量的最大同心圆半径为星图视场大小的1/3。

按上述准则,在 $20^\circ \times 20^\circ$ 的星图大视场情况下,取最大半径为星对焦距,这样可以保证向量匹配过程能够正确进行。此时主星的横坐标 $x$ 和纵坐标 $y$ 应满足式(1):

$$\begin{cases} (20/3)^\circ \leq x \leq (40/3)^\circ \\ (20/3)^\circ \leq y \leq (40/3)^\circ \end{cases} \quad (1)$$

如图3所示,c、d两个星点有可能成为备选主星,而a、b、e则由于落在中心区域之外,不会被选中。

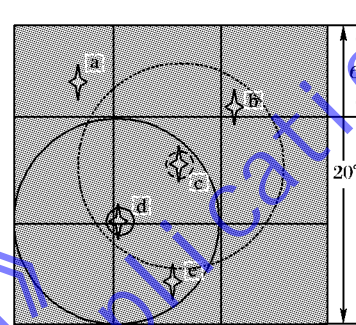


图3 主星选取准则

### 1.2 同心圆及伴星分布向量构建

鉴于星图分布是全天随机的,为了使同心圆环各部分引入伪星以及误判噪声为星的概率近似相等,应保证各圆环面积均与中国小圆面积 $S_1$ 近似相等。其中 $S_1, S_i$ 计算方法如(2)所示:

$$\begin{cases} S_1 = \pi r_1^2 \\ S_i = 0\pi r_i^2 - \pi r_{i-1}^2; i = 2, 3, 4, \dots \end{cases} \quad (2)$$

其中 $r_i$ 表示第 $i$ 个圆的半径。

经过实验发现,当同心圆数目 $n=8$ 时,星图识别效果令人满意。同心圆数目过少容易导致匹配失败或误匹配;过多则特征向量维度增多而识别效果改进不明显。

此时,根据式(2)计算结果,取各同心圆的半径分别为: $r_1 = 2.35^\circ, r_2 = 3.33^\circ, r_3 = 4.07^\circ, r_4 = 4.71^\circ, r_5 = 5.27^\circ, r_6 = 5.77^\circ, r_7 = 6.23^\circ, r_8 = 6.66^\circ$ 。

根据各星的坐标,统计各个同心圆环中的星数目,从而得到相应的伴星分布向量。图2的样例星图所对应的伴星分布向量为 $[2, 3, 2, 1, 3, 3, 2, 5]$ 。

## 2 导航星数据库设计

导航星数据库包括原始的天文恒星数据,以及根据算法需要设计的导航星特征库。

### 2.1 导航星库原始数据

导航星库的原始数据来自J2000.0纪元定义下的史密松天体物理台星表(Smithsonian Astrophysical Observatory star catalog, SAO),其中包含的星记录条数为258997条,星等下限为10等。本文基于该星表制作特定星等下限的导航特征库,其中6星等以下的记录为5104条,6.5星等以下为9041条。

### 2.2 导航星特征库设计

同心圆主星算法导航星库中的一个元素为一颗星的主要信息以及该星对应的伴星分布向量,其数据结构如下:

```
struct IdentityProperties
```

```

{
    short starNo;                //主星的星编号
    short starsNum[ ARR_DIM];
    //主星的伴星分布向量,其中 ARR_DIM 为常量 8
};

```

按本算法生成的导航星特征库中记录条数与相应星等的星数量相同,分别为 5104 和 9041 条,生成后依据伴星分布向量第一维元素的大小对导航星特征库进行升序排序,以便加快算法的识别过程。其中 6 星等以上的导航星特征库如表 1 所示。

基于本方法生成的 6 星等导航星特征库二进制文件大小为 89.7 KB。与此相对应,三角形算法对应的文件大小为 11 620 KB。

### 3 识别算法流程

同心圆主星识别算法的整体工作流程如图4所示。包含

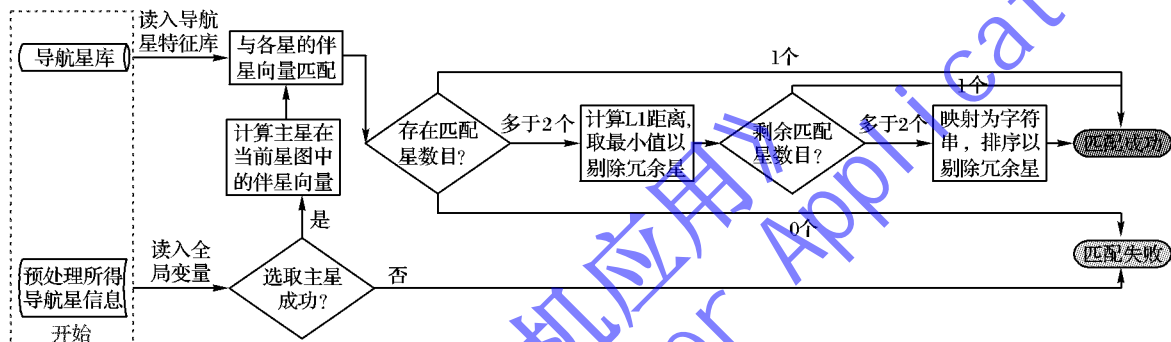


图4 同心圆主星识别算法流程

同心圆主星识别算法的具体步骤可以分为如下几方面。

#### 1) 选取主星并构建其伴星分布向量。

如果星图中央 1/3 区域无星,则本次匹配直接失败,跳出循环,继续等待新的星图信息;否则,选取其中最亮的星为主星,并遍历当前星图中的各星,根据它们与主星的星对角距更新主星的伴星分布向量。

#### 2) 根据伴星分布向量在导航星特征库中进行匹配。

程序调用匹配函数来完成对得到的伴星分布向量与导航星库的匹配,其具体过程如下。

首先对伴星分布向量第一维元素作折半查找确定第一维满足预设误差的导航星库向量的上下限;然后遍历上下限之间的库向量第 2 维到第 8 维,挑选出所有满足误差范围的向量。之后的匹配识别流程如算法 1。

#### 算法 1 同心圆主星识别算法。

```

if ( 匹配星数目 = 0 )
    匹配失败;
else if ( 匹配星数目 = 1 )
    匹配成功;
//选择最优匹配星算法
else{
    计算 L1 距离, 获取距离最小的星;
    if ( L1 距离最小的星数目 = 1 )
        匹配成功;
    else {
        将距离映射为字符串;
        选取最小的串对应的星为最优匹配星;
    }
}

```

其中, L1 距离即为城区距离。

数据读取、主星提取、构建伴星向量、星图匹配等过程。本识别过程将为后续的星图解算模块提供星信息。

表 1 6 星等以上的导航特征库示例

编号	SAO 星号	伴星向量							
2900	4585	2	6	5	5	1	2	7	2
2901	4772	2	6	5	6	4	7	6	5
2902	1810	2	6	6	3	5	2	1	3
2903	362	2	6	6	3	10	2	2	1
2904	4294	2	6	7	1	1	2	5	2

其中数据读取步骤分两个阶段实施。当前阶段为直接读取导航星特征库及预处理星信息。待整个天文导航系统整合之后会作相应调整,读取导航星特征库将在循环识别之前进行并保存到内存中,以节省后续读库时间;读取预处理星信息则将改为直接由星图预处理模块将数据传递过来。

将差异距离映射为字符串方法如下:字符串最左端对应向量第 1 维,1 表示相应维度有差异,0 表示无差异。

选取 L1 距离最小者,其物理意义为:优先选取伴星位置差异和最小的星向量;选取差异字符串最小者,其物理意义为:优先选取出现差异的星离主星距离更远的星向量。

### 4 仿真实验分析

实验平台: Intel Core2 Quad CPU Q8300 2.50 GHz; RAM 4 GB; L2 2 × 2 MB; Windows7 Ultimate SP1 x86; Visual Studio 2010。

#### 4.1 星图模拟仿真系统

本算法所设计的模拟仿真系统如图 5 所示。其中,主窗口上方左半部分为输入或模拟得到的原始星图,右半部分为通过不同处理步骤后的星图;下方左半部分为程序运行过程提示,右半部分为识别结果数据列表。

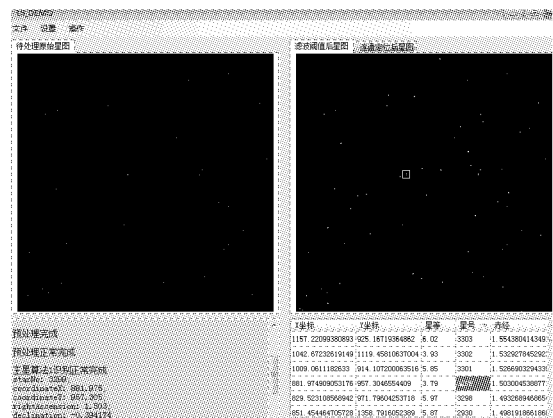


图5 星图识别模拟系统



仿真实验采取的视场大小  $FOV_x \times FOV_y$  为  $20^\circ \times 20^\circ$ , 敏感面阵为  $2048 \times 2048$ 。

由于原始星图的星点细小, 为了便于观察分析, 对其进行亮度增强处理, 见图6。



图6 亮度增强后的星图

#### 4.2 实验分析

在仿真实验中, 通过设定模拟系统的各项参数, 包括视场大小、赤经、赤纬以及是否产生高斯白噪声等, 从而自动获得相应的模拟星图, 并对之预处理, 再进行识别过程。实验中, 模拟系统按照设定随机产生 500 组测试数据, 其中 5 组测试数据的赤经、赤纬数据示例见表2。赤经的单位为时分秒, 可统一换算为度分秒<sup>[16]</sup>; 赤纬的单位为度分秒。

表2 测试数据的赤经、赤纬示例

序号	赤经	赤纬
1	5°50'31.924"	-21°56'0.13"
2	1°50'16"	-30°49'3"
3	20°8'53"	2°9'6"
4	6°7'8"	-89°23'7"
5	23°31'25"	-38°73'18"

实验分别测试了  $20^\circ \times 20^\circ$  模拟视场下不同识别算法的平均识别时间, 见表3所示。作为对比, 可以看到, 本文算法的平均识别时间为  $95.3 \mu\text{s}$ , 仅为三角形识别算法的 9%。

表3 不同识别算法的识别时间比较  $\mu\text{s}$

算法	时间
本文识别算法	95.2852
三角形识别算法	1055.2690

当前星图识别算法的识别时间均为 ms 数量级, 如文献[17]、[8]中的识别时间分别为 1.29 ms、38.41 ms, 而本文算法达到了  $\mu\text{s}$  数量级。

在性能方面, 识别成功率与正确率见表4。其中: 识别成功定义为程序正常运行, 未报出识别异常或程序异常; 识别正确率为在识别成功的前提下, 正确识别的结果所占百分比。对于无噪与加噪的两类模拟星图, 在星图预处理阶段, 都由相应的算法对其进行去噪处理, 再将星点数据传输到识别部分。

表4 无噪及加噪模拟的星图识别成功率与正确率比较 %

算法	无噪模拟星图		加噪模拟星图	
	成功率	正确率	成功率	正确率
本文识别算法	90	88.9	100	90
三角形识别算法	100	100	100	80

可见本文提出的识别算法, 在保证不低于 90% 的成功率

的前提下, 能够达到 88.9% 以上的正确率; 并且在添加了高斯白噪声作为背景噪声之后, 算法的效率基本保持不变。

作为星图识别的直接后续步骤, 星图姿态解算的无噪及加噪时的测试结果如表5~6所示。可以看到, 在偏航角、纵摇角、横滚角三方面, 与三角形算法相比各有优势。

表5 星图姿态解算结果比较(无噪)

算法	偏航角偏差	纵摇角偏差	横滚角偏差
本文算法	0.0072"	27.5038"	2.1163"
三角形算法	0.0069"	53.5043"	0.4835"

表6 星图姿态解算结果比较(加噪)

算法	偏航角偏差	纵摇角偏差	横滚角偏差
本文算法	0.0066"	125.3766"	1.4694"
三角形算法	0.0075"	12.0042"	0.4733"

#### 5 结语

本文针对天文导航大视场环境, 提出一种基于同心圆分割的主星识别算法, 该算法结构简单, 具有旋转不变性; 在导航特征库的存储容量上, 本文提出的同心圆主星识别算法仅为常规三角形算法的 0.77%; 在识别时间上达到  $\mu\text{s}$  数量级, 为传统三角形算法的 9%, 检索速度快; 在识别效果上, 加入高斯噪声之后, 仍能保持 90% 以上的正确率。从而为后续的解算步骤顺利进行提供基础。

本算法的不足之处在于, 对主星的标定依赖于星的亮度, 且需要计算星对角距, 都有可能引入误差。但基于本算法的前述各特性, 在星敏系统中, 可与其他识别算法相互组合, 执行于不同的阶段, 实现更高效、准确的识别与解算, 如可以作为三角形算法初期识别的有力补充, 因而具有很好的工程应用价值。下一步工作, 将致力于本算法的进一步改善和不同算法的实现以及融合。

#### 参考文献:

- [1] 房建成, 宁晓琳. 深空探测器自主天文导航方法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 231-232.
- [2] 房建成, 宁晓琳, 田玉龙. 航天器自主天文导航原理与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 1-5.
- [3] 吴峰. 自主导航星敏传感器关键技术的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [4] PADGETT C, KREUTZ-DELGADO K. A grid algorithm for autonomous star identification [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 202-213.
- [5] SILANI E, LOVERA M. Star identification algorithm: novel approach & comparison study [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(4): 1275-1288.
- [6] NA M, JIA P F. A survey of all-sky autonomous star identification algorithms [C]// Proceedings of the 1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. Piscataway: IEEE Press, 2006: 896-901.
- [7] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellation for spacecraft applications [J]. IEEE Aeronautics and Electronics Systems Magazine, 1992, 7(6): 34-41.

(下转第2021页)

表1 检测成功率与算法耗时统计

缺陷类型	报警成功率/%	提取成功率/%	平均耗时/s
缺口	100	100	24.71
裂口	100	100	24.62
翻边	100	100	24.58
微小创口	50	50	25.78
划痕	100	100	24.56
刻痕	100	100	24.43
无缺陷	100		23.11
平均	91.67	91.67	24.54

图6显示了翻边类裂口和缺口类缺陷电池样品的小波变换处理图样,实验中运用文献[2-3]中所提到的小波分割法对原始图像进行小波变换处理后进行阈值化。可以看出,不论哪一层重构图像,由于受到不均匀光照的影响,光照下的阴影部分会严重混淆缺陷的提取,因此无法通过阈值分割的方法得出缺陷区域,因此文献[2-3]中所述的小波分割法无法在较差的光照条件下有效实现对电池表面缺陷的准确检测。可见本文方法相比小波分割法具有更强的针对性和有效性。

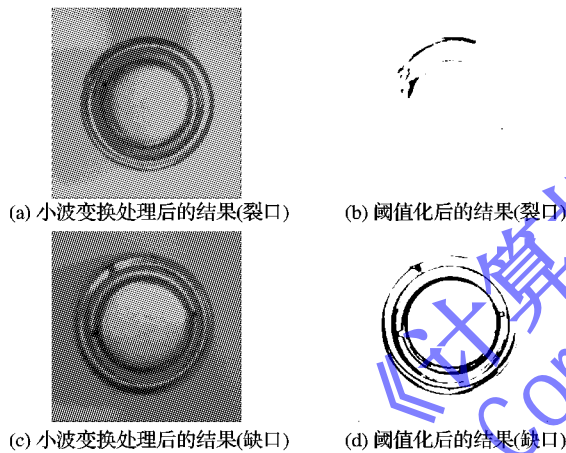


图6 小波分割法检测结果

## 5 结语

本文提出了一种新的电池表面探伤方法。该方法可实现对有缺陷电池报警并提取缺陷区域,实验证明本文方法的检测成功率达到90%以上。相比小波分割法,本文方法能够更有针对性地抵御光照不均的干扰实现成功检测。如果运用编码优化和硬件优化对本文方法加以改进和硬件加载,则可作为电池生产领域中产品质量检测的一种有效参考方法。

## 参考文献:

- [1] CHEN L F, SU C T, CHEN M H. A neural-network approach for defect recognition in TFT-LCD photolithography process [J]. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2009, 32(1): 1-8.
- [2] AJAY K. Computer-vision-based fabric defect detection: a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(1): 348-363.
- [3] YANG X, PANG G, YUNG N. Robust fabric defect detection and classification using multiple adaptive wavelets [J]. IEEE Proceedings on Vision, Image and Signal Processing, 2005, 152(6): 715-723.
- [4] LIU H X, ZHOU W, KUANG Q W, et al. Defect detection of IC wafer based on spectral subtraction [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2010, 23(1): 141-147.
- [5] OLIVEIRA H, CORREIA P L. Automatic road crack detection and characterization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(1): 155-168.
- [6] TSAI D M, WU S C, CHIU W Y. Defect detection in solar modules using ICA basis images [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(1): 122-131.
- [7] 王磊. 基于机器视觉的电池表面缺陷检测技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [8] 张舞杰, 李迪, 叶峰. 硅太阳能电池纹理缺陷检测[J]. 计算机应用, 2010, 30(10): 2702-2704.
- [9] 柳效辉, 徐林, 肖晨江, 等. 基于 Matlab 的图像处理技术识别硅太阳能电池的缺陷[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(7): 926-930.
- [10] 张宏军, 刘堂友. 结合 PCA 和 SVM 的太阳能电池缺陷识别[J]. 电视技术, 2011, 35(21): 66-68.
- [11] JIA J Y. Single image motion deblurring using transparency [C]// CVPR'07: Proceedings of 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2007: 1-8.
- [12] DAI S Y, WU Y. Motion from blur [C]// CVPR 2008: Proceedings of 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [13] TAI Y W, HAO D, BROWN M S, et al. Image/video deblurring using a hybrid camera [EB/OL]. [2012-12-20]. <http://research.microsoft.com/en-us/UM/people/stevelin/papers/cvpr08tai.pdf>.
- [14] LE M H, WOO B S, JO K H. A comparison of SIFT and Harris corner features for correspondence points matching [C]// Proceedings of 2011 17th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-4.

(上接第1987页)

- [8] 文涛, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于星三角形外接圆的星图识别算法[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(2): 74-76.
- [9] 孟靖. 大地天文测量星图定位与识别算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- [10] van BEZOOIJEN R H. True-sky demonstration of an autonomous star tracker [C]// Proceedings of SPIE 2221, Acquisition, Tracking, and Pointing VIII. Bellingham, WA: SPIE, 1994: 156-168.
- [11] LINDSEY C S, LINDBLAD T, EIDE A J. Method for star identification using neural networks [C]// Proceedings of SPIE 3077, Applications and Science of Artificial Neural Networks III. Bellingham, WA: SPIE, 1997: 471-478.
- [12] HONG J, DICKERSON J A. Neural-network-based autonomous

star identification algorithm [J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(4): 728-735.

- [13] 李立宏, 张福恩, 林涛. 一种基于遗传算法的全自主星图识别算法[J]. 光电工程, 2000, 27(5): 15-18.
- [14] 赵臻. 天文导航中星图预处理及匹配识别技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [15] Concentric circles [EB/OL]. [2012-12-28] <http://math-world.wolfram.com/ConcentricCircles.html>.
- [16] Right ascension [EB/OL]. [2013-01-16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Right\\_ascension](http://en.wikipedia.org/wiki/Right_ascension).
- [17] 樊巧云, 陆壮志, 魏新国, 等. 基于惯性比特征的三角形星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(10): 2838-2843.