

星敏感器星点聚类提取方法

王龙^{①*}, 杨孟飞^②, 钟红军^①, 卢欣^①, 杨君^①, 李晓^①, 余成武^①, 刘婧^①, 梁士通^①

① 北京控制工程研究所, 北京 100190;

② 中国空间技术研究院, 北京 100094

* E-mail: lucev@qq.com

收稿日期: 2015-01-05; 接受日期: 2015-01-23

国家中长期科技发展规划重大专项资助项目

摘要 星敏感器现有的星点提取方法运算时间长、存储需求大, 从而限制星敏感器姿态初始捕获时间、轻小化等性能指标的提高. 针对以上问题, 提出了一种星敏感器星点聚类提取方法. 首先, 介绍和分析了星点聚类提取方法中的预处理滤波算法和聚类算法; 然后, 给出了该方法在北京控制工程研究所新研小型星敏感器中的实现方式和实现效果, 该星敏感器在探月三期月地高速再入返回飞行器中成功实现了首次在轨飞行实验; 最后, 通过星敏感器观星实验对星点传统提取方法和星点聚类提取方法进行了比对验证, 并通过小型星敏感器在轨飞行实验对星点聚类提取方法进行了在轨验证. 实验显示, 该方法提取星点所需时间最大约为传统方法的 16%, 星图存储需求不到传统方法的 1%, 且星点提取正确, 在轨表现良好. 结果表明, 星敏感器星点聚类提取方法能有效减小星点提取所需时间, 不需大容量星图存储器件, 且逻辑简单、移植性好, 适用于各类光学成像敏感器.

关键词

星敏感器
星点提取
像元滤波
聚类

1 引言

近年来, 宇航技术飞速发展, 航天任务呈现多样化、交叉化和精准化的发展趋势, 这对参与组成各种航天器的通用关键部件提出了更高的性能要求. 星敏感器是一种广泛用于航天器的重要姿态测量部件^[1~4], 典型的星敏感器一般由光学系统、成像敏感芯片(CCD 或 APS)、处理单元和电源等部分组成^[5~8]. 在其工作时, 光学系统将视场内的恒星成像于 CCD 或 APS 芯片的敏感表面, 经过光电转换得到星图数据输入到处理单元, 后者经过星点提取、导航星匹配识别和姿态解算验证, 最终得到星敏感器本体在惯性坐标系下的三轴姿态数据. 安装有星敏感器的航

天器就是根据星敏感器输出的姿态数据及安装标定矩阵, 得到航天器的精确惯性姿态信息. 因为星敏感器测量姿态时基于对全天球近似均布的恒星成像, 所以与太阳敏感器、地球敏感器、惯性陀螺等其他姿态测量部件相比, 具有测量精度高(角秒级, 亚角秒级)、任务适应性强(地球轨道任务, 行星际、恒星际等深空任务)和高稳定性(无漂移)等特点^[9]. 星敏感器具备自主定姿能力, 其在轨的初始姿态捕获是基于对所拍摄的整幅星图进行星点提取和识别解算实现的. 由于整幅星图数据量大, 达到兆像素级, 对其进行星点提取时通常需要将所有像素数据进行缓存并一一进行读取判断, 所以星敏感器不但普遍配置大容量的数据存储器件, 而且姿态捕获时星点提取环节

引用格式: 王龙, 杨孟飞, 钟红军, 等. 星敏感器星点聚类提取方法. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 257–262

Wang L, Yang M F, Zhong H J, et al. Star extraction based on clustering within a star tracker (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 257–262, doi: 10.1360/N092014-00480

耗时巨大, 导致星敏感器硬件电路复杂、姿态捕获时间这一重要指标很难提高. 因此, 研究用于星敏感器姿态捕获的存储需求小、执行速度快的星点提取方法对星敏感器优化硬件电路设计、提高姿态捕获时间指标具有重要意义.

目前在轨应用较为广泛的北京控制工程研究所研制的分体式 APS 星敏感器^[10]基于像素数为 1024×1024 的 APS 敏感芯片, 在姿态捕获模式提取星点时, 先通过抽样灰度直方图算法分区确定整幅星图背景阈值, 再采用遍历方法搜索和组合灰度高于背景的可疑像素, 最后用能量质心法计算出星点坐标. 虽然星点提取功能满足使用要求, 但需配备总容量达 4 MB 的乒乓星图存储器, 姿态捕获时间为 5 s 左右. 北京航空航天大学的魏新国等人^[11]采用固定阈值分割和连通域分割并行进行星点提取, 可以在一定程度上减少算法计算量, 但星点提取精度受阈值影响, 且星图存储需求未改善. 本文提出了一种星点聚类提取方法, 首先通过可编程逻辑器件在从敏感芯片读出星图数据的同时对数据进行自适应滤波, 仅存储灰度高于图像背景的有效像元, 然后根据星点的连通域特征对有效像元进行聚类, 并采用质心法计算星点坐标. 由于星点提取过程的存储和聚类均针对有效像元而非整幅星图, 数据存储空间和星点提取时间显著减少, 达到星敏感器优化电路、快速姿态捕获的目的.

2 基于自适应滤波的有效像元提取

为了节约星图存储空间和处理时间, 需在星图读取的同时对星图上高于背景的有效像元进行提取, 关键在于星图背景的确定. 比较常用的方式是固定背景阈值或分区灰度直方图算法^[12~14]. 固定背景阈值方法简单, 但由于有外界杂光、成像敏感芯片低频噪声和暗电流等影响, 实际星图的背景存在不一致性(图 1), 若固定背景阈值的话会带来误提取或无提取等诸多问题; 分区灰度直方图算法可解决上述问题, 但这种算法需要在全图进行抽样计算, 无法在读取星图的同时确定背景阈值, 事后处理的方法不能实现星图背景的实时确定. 这里介绍两种能够实时确定星图背景的算法: IIR 滤波^[15]和加权平均滤波^[16].

2.1 IIR 滤波

IIR 滤波是对星图某一像元附近的像元进行 IIR 滤波运算, 得到该像元位置的背景阈值, 计算公式如下:

$$\text{THR}_{r,c} = p \sum_{n=0}^L (1-p)^n G_{r,c-n}, \quad (1)$$

其中 $\text{THR}_{r,c}$ 为星图中第 r 行、第 c 列处背景值; p 为 IIR 滤波因子; L 为窗口长度; $G_{r,c}$ 为星图中第 r 行、第 c 列处像元原始灰度值.

采用该方法, 对图 1 中的第 124 行数据进行处理, 得到的背景值如图 2 所示. 其中 IIR 滤波因子 p 取 0.25, 窗口长度 L 取 19. 可以看出, IIR 滤波在像元灰度缓慢变化时可很好地估算当前背景, 但在敏感恒星像点位置(像元灰度突变)估算出来的背景值有很大变化. 若采用该背景进行有效像元提取和星点位置解算, 会带来灵敏度降低、单星精度下降等问题.

2.2 加权平均滤波

加权平均滤波与 IIR 滤波在计算时类似, 也是对

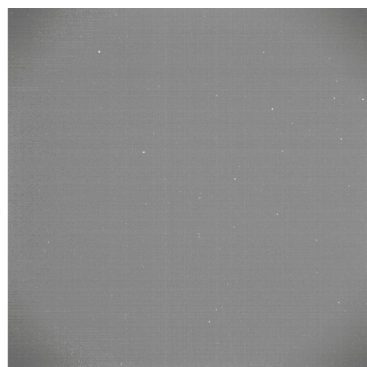


图 1 实际观星星图

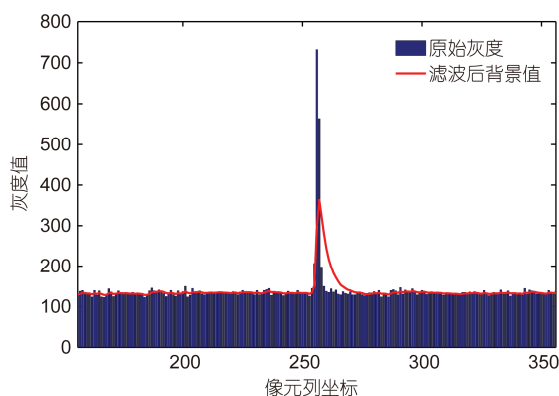


图 2 IIR 滤波结果

星图某一像元附近的像元进行滤波运算, 得到该像元位置的背景阈值. 不同之处在于, 进行滤波运算时, 该算法为每个像元分配不同的权值, 计算公式如下:

$$\text{THR}_{r,c} = \frac{\sum a_n G_n}{\sum a_n}, \tag{2}$$

其中 $\text{THR}_{r,c}$ 为星图中第 r 行、第 c 列处背景值; G_n 为星图中第 r 行、第 c 列附近像元原始灰度值; a_n 为像元灰度权值. 采用该方法, 对图 1 中的第 124 行数据进行处理, 得到的背景值如图 3 所示.

可以看出, 加权平均滤波在像元灰度缓慢变化和敏感恒星像点位置(像元灰度突变)都能很好地估算当前背景值, 优于 IIR 滤波, 故选用加权平均滤波进行有效像元提取过程中的星图背景实时确定.

星图数据通常按行从敏感芯片读出, 且预处理逻辑按行提取有效像元以压缩星图存储空间, 有效像元按提取的先后顺序存储, 存储位置并不直接包含有效像元位置信息. 在存储有效像元时, 除需保存像元灰度信息外, 还需保存像元位置信息, 一种典型的有效像元存储格式如表 1 所示(设每个地址 32 位指针保存 16 位有效信息).

3 星点聚类提取

由于经过预处理逻辑提取的有效像元信息在存储空间中并无二维像面位置对应性, 故无法直接用

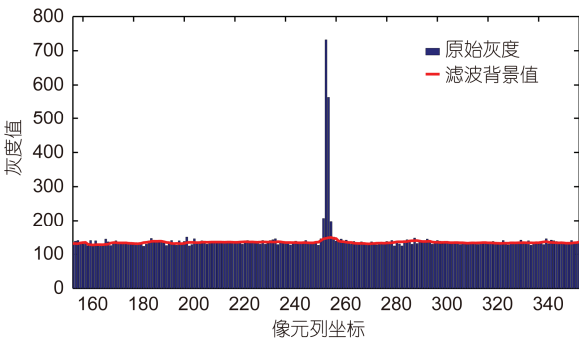


图 3 加权平均滤波结果

连通域算法进行像元按所属星点不同的划分. 本文提出一种有效像元聚类划分算法, 在星点提取时, 依次读取有效像元信息, 依据像元行列信息、四个聚类判据和行坐标单调递增的特征, 判断像元与星点的归属关系, 将像元按所属星点不同分组存放, 再经过星点质心位置计算等, 输出视场内恒星对应的星点信息队列供星图匹配、姿态解算等模块使用, 具体的聚类判据如下:

- 1) 像元 p 与星点 s 的像元队列中最后一个像元行地址相同, 列地址相邻, 则像元 p 属于星点 s . 如果像元 p 同时不属于之前遍历过的任何星点, 则将像元 p 置于星点 s 像元队列末尾, 如图 4(a);
- 2) 像元 p 与星点 s 的像元队列中最后一个像元行地址相同或相邻, 星点 s 的像元队列中存在与像元 p 行地址相邻, 列地址相同的像元, 则像元 p 属于星点 s . 如果像元 p 同时不属于之前遍历过的任何星点, 则将像元 p 置于星点 s 像元队列末尾, 如图 4(b);
- 3) 若像元 p 经判断属于星点 s_2 , 但其之前经判断属于 s_1 并已置于星点 s_1 像元队列末尾, 则将星点 s_1 像元队列拼接于星点 s_2 的队列末尾, 并清空 s_1 像

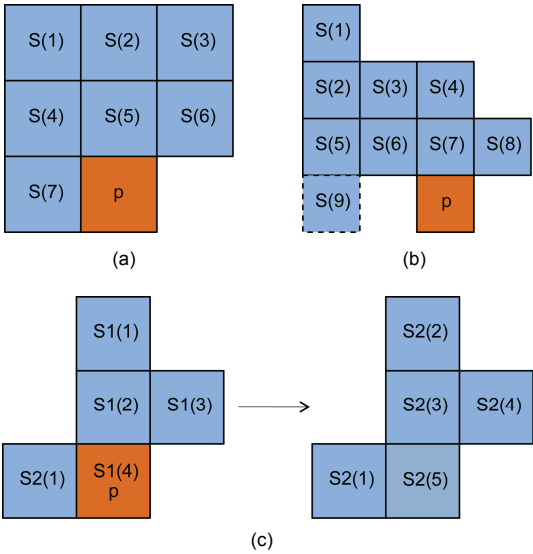


图 4 聚类判据 1(a), 2(b), 3(c)

表 1 有效像元存储格式

	地址	内容	地址	内容	地址	内容	地址	内容
信息行	0000h	像元数	0004h	像元数	0008h	0000	000Ch	0000
像元 1	0010h	行坐标	0014h	列坐标	0018h	灰度值	001Ch	背景值
像元 2	0020h	行坐标	0024h	列坐标	0028h	灰度值	002Ch	背景值
...	...	...	...	...	...	...	...	...

元队列。如图 4(c);

4) 像元 p 经判断不属于任何已创建的星点, 则创建新的星点, 像元 p 作为该星点第一个像元加入星点像元队列。

4 星点聚类提取方法的实现

北京控制工程研究所新研小型星敏感器在姿态捕获时采用本文提出的星点聚类提取方法进行星点提取。该星敏感器同样基于像素数为 1024×1024 的 APS 敏感芯片, 但未配置大容量星图存储器, 且姿态捕获时间优于 1 s 。

星点聚类提取方法分两部分实现。在星敏感器的处理软件中, 实现基于有效像元聚类划分的星点提取和质心计算, 其处理流程如图 5 所示。

在星敏感器的预处理器中, 实现基于加权平均滤波的有效像元实时提取并存储, 即在敏感芯片完成一帧星图曝光后、依次读取星图数据时, 通过“缓冲-滤波计算-比较”逻辑实现灰度高于图像背景的有效像元的在线筛选和存储, 其流水线逻辑工作方式如图 6 所示^[17]。

5 实验验证与结果分析

对传统星点提取方法(分区灰度直方图、连通域全图遍历搜索)和本文提出的星点聚类提取方法通过观星实验进行对比验证。实验环境如表 2 所示。

实验时, 将星敏感器安装在三轴转台上, 转台滚转轴锁死, 偏航和俯仰轴步进调整, 使保持在姿态捕获模式的星敏感器指向不同天区, 下传星敏感器星点信息和星点提取时间。实验结果如表 3 所示。

北京控制工程研究所新研小型星敏感器在探月三期月地高速再入返回飞行器 GNC 试验子系统中成

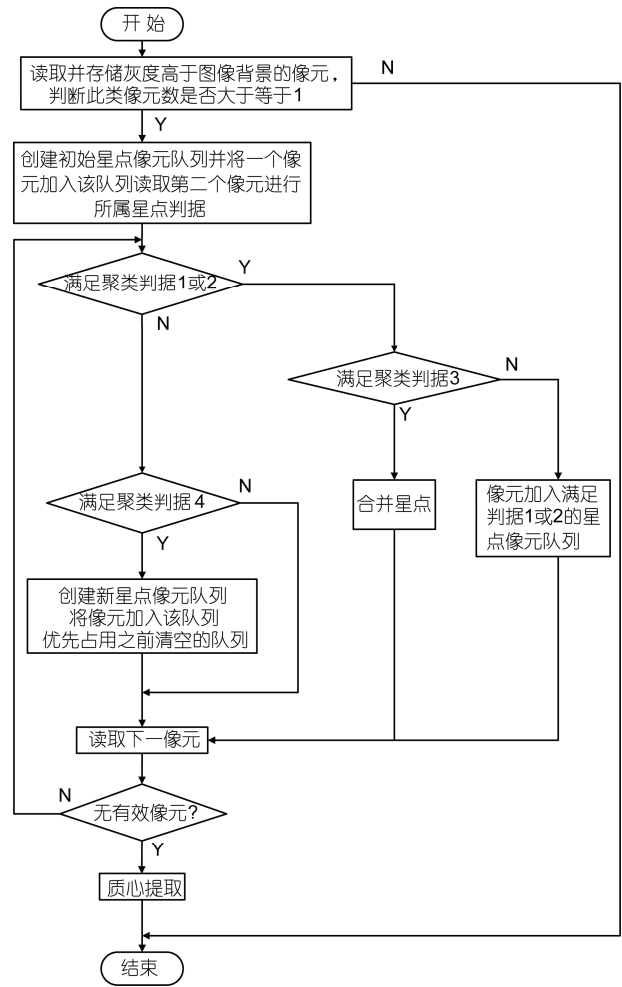


图 5 星点聚类提取方法软件流程图

功实现了首次在轨飞行实验。由于采用了本文提出的星敏感器星点聚类提取方法, 小型星敏感器未配置大容量的星图存储器, 且在轨姿态捕获时间均小于 1 s 。

由上述实验结果可得, 本文提出的星敏感器星点聚类提取方法像元存储所需空间小于传统方法的



图 6 预处理流水线逻辑

表 2 观星实验环境

序号	项目	描述
1	测试设备	星敏感器信息采集系统 三轴转台 隔离地基等
2	实验载体	北京控制工程研究所新研小型星敏感器 灵敏度: 优于 7 等 分辨率: 1024×1024 视场: $\Phi 20^\circ$
3	实验地点	国家天文台兴隆观测基地

表 3 实验结果

方法	指向 1	指向 2	指向 3	指向 4
传统方法	存储象元数: 1048576 提取星数: 15 提取时间(s): ~3	存储象元数: 1048576 提取星数: 18 提取时间: ~4	存储象元数: 1048576 提取星数: 21 提取时间: ~7	存储象元数: 1048576 提取星数: 16 提取时间: ~3
聚类星点提取	存储象元数: 783 提取星数: 15 提取时间(ms): ~46	存储象元数: 915 提取星数: 18 提取时间: ~54	存储象元数: 3661 提取星数: 21 提取时间: ~723	存储象元数: 2369 提取星数: 16 提取时间: ~468

1%, 星点提取所需时间最大约为传统方法的 16%, 大大减小了星敏感器星图存储空间和姿态捕获模式星点提取时间。

6 总结

为了优化星敏感器电路、减小星敏感器姿态捕获

时间, 本文设计了一种星点聚类提取方法. 该方法通过预处理逻辑提取有效像元, 减少待软件处理的像元数, 并且采用四个聚类判据将有效像元按星点不同划分, 在完成星敏感器姿态捕获模式下星点提取的同时, 减小了星图存储空间和星点提取时间, 达到了星敏感器优化目标. 该方法已成功实现在轨验证, 可普遍用于各类成像式敏感器的目标提取模块。

参考文献

1 叶培建, 饶伟. 光电技术在中国深空探测中的应用. 航天返回与遥感, 2011, 32: 1-11

2 蔡晓东, 叶培建. 卫星遥感图像信息作为姿态敏感器的应用研究. 中国空间科学技术, 2005, 25: 8-13

3 Cameron R A, Aldcroft T L, Podgorski W A, et al. Initial performance of the attitude control and aspect determination subsystems on the Chandra Observatory. Proceedings of SPIE, 2000, 4012: 658-668

4 Glen J K. Attitude control for the Pluto Fast Flyby spacecraft. Proceedings of SPIE, 1993, 1949: 177-187

5 屠善澄. 卫星姿态动力学与控制. 第三版. 北京: 宇航出版社, 2003

6 Lithin, M G, Kashyap G K, Sudha, B, et al. Design of very low noise amplifier for high accuracy star tracker in GEO missions. In: 2013 International Conference on Advanced Electronic Systems. Pilani, ICAES 2013. 83-87

7 Dzamba T, Enright J. Optical trades for evolving a small arcsecond star tracker. IEEEAC Paper, 2013, 2445: 1-9

8 钟红军, 杨孟飞, 卢欣. APS 图像传感器及其在星敏感器中的应用. 光学技术, 2009, 35: 204-208

9 Salomon P M, Crawford W E. A high-accuracy digital star tracker for advanced planetary missions. Opt Eng, 1979, 11: 119-126

10 钟红军, 卢欣, 李春江, 等. 新型分体式星敏感器设计及其应用. 红外与激光工程, 2014, 43: 1278-1283

11 魏新国, 张广军, 江洁. 星敏感器中星图图像的星体细分定位方法研究. 北京航空航天大学学报, 2003, 29: 812-815

12 Roelof W H, Van B. SIRTf autonomous star tracker. Proceedings of SPIE, 2003, 4850: 108-121

13 Liebe C C. Accuracy performance of star tracker – a tutorial. IEEE T Aero Elec Sys, 2002, 38: 587-599

14 钟红军, 杨孟飞, 卢欣. APS 图像传感器噪声分析. 光学技术, 2009, 35: 131-137

15 Schmidt U, Wunder D. Hard-wired digital data preprocessing: Applied within a modular star and target tracker. Proceedings of SPIE, 1997, 3163: 214-223

- 16 Ran X, Farvardin N. A perceptually motivated three-component image model-part I: Description of the model. *IEEE T Image Process*, 1995, 4: 401–415
- 17 钟红军, 杨孟飞, 卢欣. 流水线并行处理提高星敏感器数据更新率. *光学精密工程*, 2009, 17: 2230–2235

Star extraction based on clustering within a star tracker

WANG Long¹, YANG MengFei², ZHONG HongJun¹, LU Xin¹, YANG Jun¹, LI Xiao¹, YU ChengWu¹,
LIU Jing¹ & LIANG ShiTong¹

¹ *Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China;*

² *China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China*

The traditional star extraction methods of star tracker need much processing time and large image memory, resulting in slow attitude acquisition and complex electronic circuits. A new star extraction method, star extraction based on clustering, was developed. The analysis of on-line background estimation algorithm and clustering algorithm in the new method was introduced. The method was realized in one of the novel star trackers developed by Beijing Institute of Control Engineering (BICE), on-board circumlunar return and reentry spacecraft of 3rd phase of China lunar exploration program. According to the house-keeping data packages recorded during on-ground real sky test and the flight mission, the processing time of star extraction was reduced by 84% at least and the image memory was reduced by 99% at least, compared with traditional methods. The results indicated that the star extraction based on clustering had advantages in processing time, memory and migration, which made it possible to realize the method in almost all kinds of optical sensors.

star tracker, star extraction, pixel filter, clustering

doi: 10.1360/N092014-00480