

文章编号: 1000-6893(2006)05-0913-04

# 一种快速的星敏感器星跟踪方法研究

江 洁, 张广军, 李 霄, 魏新国

(北京航空航天大学 仪器与光电工程学院, 北京 100083)

## A Fast Star Tracking Algorithm for Star Sensor

JIANG Jie, ZHANG Guang-jun, LI Xiao, WEI Xin-guo

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of  
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:** 阐述了星敏感器中星跟踪方法的重要性,指出了目前国内外星跟踪方法的不足。针对这些不足,提出了一种全新的、快速的星跟踪方法。新的跟踪方法采用现场可编程门阵列(FPGA)实现了实时的星点定位;正是由于这种技术的采用,加快了星点位置信息的获取,摒弃了跟踪窗的跟踪方法,采用简单的匹配识别的跟踪方法;对于新星的识别,由于有初始姿态而采用匹配组的识别方法。最后给出了星跟踪过程的实验结果。

**关键词:** 星敏感器; 星跟踪; 实时星点定位; 匹配识别

**中图分类号:** V447 **文献标识码:** A

**Abstract:** The importance of star tracking for star sensor and the deficiency of existing star tracking algorithm are presented. To resolve these problems, a novel and fast star tracking algorithm is put forward. Real-time star position locating is implemented with Field Programmable Gate Array (FPGA) in the star tracking algorithm. Because of the technology, the star position is obtained quickly, the simple match identification for tracking is adopted and the tracking window method is abandoned. For new star identification, match group method is used. Finally the experiment results are presented.

**Key words:** star sensor; star tracking; real-time star position locating; match identification

星敏感器是天文导航系统的主要设备<sup>[1]</sup>,它是集光学、机械、电子、实时图像处理技术于一体的仪器。它通过 CCD 或 CMOS 图像传感器获取星体的图像信息,然后对图像信息进行实时处理(包括星体中心精确定位、星图识别、快速跟踪和精确姿态求解),输出姿态信息控制飞行器的姿态。

星敏感器有两种工作模式<sup>[2,3]</sup>:初始姿态捕获和跟踪模式。初始姿态捕获模式与跟踪模式是两种即相对独立又相关的工作模式。初始姿态捕获模式,由于没有初始姿态,以整个天球为不确定天区,进行星图的匹配和识别,所以搜索和匹配花的时间比较多,一般识别过程需要秒级的时间,这对于实时姿态的输出是不利的。而跟踪模式不需要进行全天搜索和识别,所以跟踪模式处理时间短。初始姿态捕获只有在起始或跟踪丢失时才进行,如果跟踪模式非常稳定,则经过初始姿态捕

获,星敏感器就一直处于实时跟踪的状态,因此实时跟踪是星敏感器的主要工作模式。

## 1 星跟踪算法

目前从国内外文献查到的星跟踪模式其跟踪过程是:经过初始姿态捕获,得到需要跟踪的星体和精确的初始姿态信息,由初始姿态信息估计跟踪星体的下一个准确位置,以估计的位置信息为中心和一定的窗口形式去捕获跟踪的星体,读取窗口内星体的灰度信息,精确计算星体中心位置,计算当前精确的姿态。这种星跟踪方法有以下一些不足:

(1) 需要将子窗口内的图像数据输入信号处理单元进行星点位置的提取。受到图像传感器和信号处理单元之间接口速度的限制,这种方法不能传输太多的星体数据,造成了图像数据获取的瓶颈。

(2) 实现过程需要实时地将子窗口中心位置信息反馈给传感器驱动逻辑,增加了图像传感器驱动逻辑的复杂性。

收稿日期:2005-05-01; 修订日期:2006-04-03

基金项目:航空科学基金(03151004)、航天创新基金、民用航天预研

(3) 为了估计精确的位置信息,有些跟踪方法用其他惯性器件提供粗略的姿态信息,并采用卡尔曼算法等进行滤波,计算比较复杂,不利于快速跟踪的实现。另外由于跟踪的窗口比较小,姿态的扰动,估计的错误会引起跟踪丢失或错误的星体目标的获取。

针对这些不足,提出了一种全新的、快速的跟踪方法,其过程如下:

#### (1) 初始姿态捕获

经过初始姿态捕获,得到需要跟踪的星体(包括星体所有的信息如星号、星等、赤经和赤纬等)和精确的初始姿态信息。

#### (2) 快速星体目标和星点位置的获取

**快速星体目标的获取** 这一过程是在图像数据输出的同时进行星体目标的获取,分为两个阶段:将星体目标和背景分离开,将单个星体目标与其他星体目标分离开。

第一阶段,可以采用全局阈值或者局部阈值的方法进行阈值分割。考虑到星图的特点和算法的复杂程度,一般用一个固定的全局背景阈值即可将星体目标和背景分离开。

第二阶段,借鉴二值图像处理的方法,用连通域算法来实现星体目标的聚类分离<sup>[4]</sup>。连通域方法是扫描整个图像窗口将其中相连通的像素用相同的记号进行标记,不同的连通部分采用不同的标记。

星体目标的标记是从1开始的连续的整数,各个星体目标在星图中表现为相邻的具有相同标记的像素点的集合。经过连通域得到的星体目标分割的结果如图1所示。

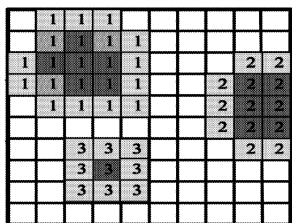


图1 4连通域分割算法

Fig. 1 Segmentation with 4-connection

**星体中心精确的定位** 对在 中得到的星体目标,采用带阈值的质心法计算中心位置,这种内插细分算法可以使被观测星的位置达到高于1/20像素级的精度,其计算过程如下:

设包含目标的图像表示为  $f(x, y)$ , 其中  $x = 1, \dots, m; y = 1, \dots, n$ 。阈值化过程为

$$F(x, y) = \begin{cases} f(x, y) & (f(x, y) \geq T) \\ 0 & (f(x, y) < T) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $T$  为背景阈值。

带阈值的质心法就是将原图像与二值化阈值相减,然后对相减后的图像求质心。

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x, y) - T]x}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x, y) - T]} \\ y_0 &= \frac{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x, y) - T]y}{\sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n [F(x, y) - T]} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

采用现场可编程门阵列 FPGA 对图像传感器进行整帧驱动,并实时并行实现了4连通域分割和质心定位算法。在输出图像数据的同时得到视场上所有星体精确的位置信息,并传输到信号处理单元。因此往信号处理单元传输的是星点的位置数据,而不是整个星体的图像数据。正是由于4连通域和质心定位算法的FPGA实现,加快了星点位置信息的获取,使本文摒弃了跟踪窗的跟踪方法,采用简单的匹配识别的跟踪方法,解决了数据传输的瓶颈问题,大大加快了星跟踪算法的速度。

#### (3) 星跟踪匹配识别

星跟踪匹配是基于星体中心坐标位置的匹配,如图2所示。

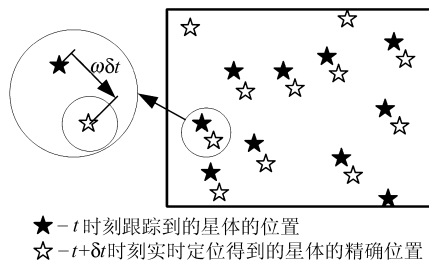


图2 匹配识别

Fig. 2 Identification with matching

当前时刻的星体根据其位置信息,寻找与其在位置上匹配的前一时刻已经跟踪到的星体,如果找到一颗,而且只有一颗星体与其匹配,则匹配识别成功,当前星体的信息(包括赤经、赤纬、星等和星号)由匹配到的前一时刻的星体获取。为了提高跟踪的速度,只选择最靠近视场中央的10颗星体进行跟踪。

#### (4) 新进入视场的星体的识别

对于新星的识别并不总是要进行的,只有当跟踪的星体出了视场的范围只剩5颗后才进行。

对新星的识别可以采用初始姿态捕获模式下的全天识别方法,跟踪过程中新星的识别是有初始姿态的识别,算法可得到简化,计算速度加快,能实现快速的识别。采用匹配组算法<sup>[5]</sup>,这种方法是取视场中没被跟踪的星体  $i$  作为主星,选 4 个被跟踪的星体  $i$  作为伴星,计算这 4 个伴星与这个主星的角距值。同时计算星库星体  $i$  与这 4 个跟踪星体的角距值,比较视场中的 4 个角距值与星库中的 4 个角距值,如果 4 个角距值都一致,那么新星就识别为星体  $i$ ,同时将该颗星体列入跟踪星体中,用 4 个角距匹配是为了减少匹配的冗余。过程如图 3 所示。

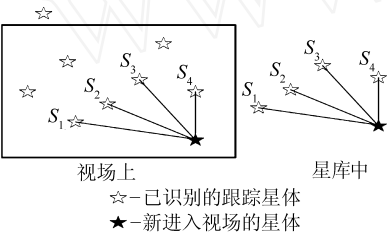


图 3 新星的识别

Fig 3 Identification of new star

(5) 计算并输出精确的姿态,再转入步骤(2),进行反复的跟踪过程。其流程图如图 4 所示。

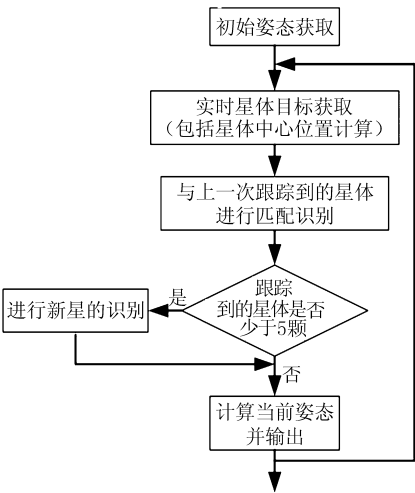


图 4 星跟踪方法流程图

Fig. 4 Flow chart of star tracking

2 实验结果

在仿真阶段,仿真一个实际的准确的姿态,通过跟踪计算得到一个计算姿态,根据这两个姿态的比较来评价跟踪的正确性。图 5 是仿真过程的流程图。

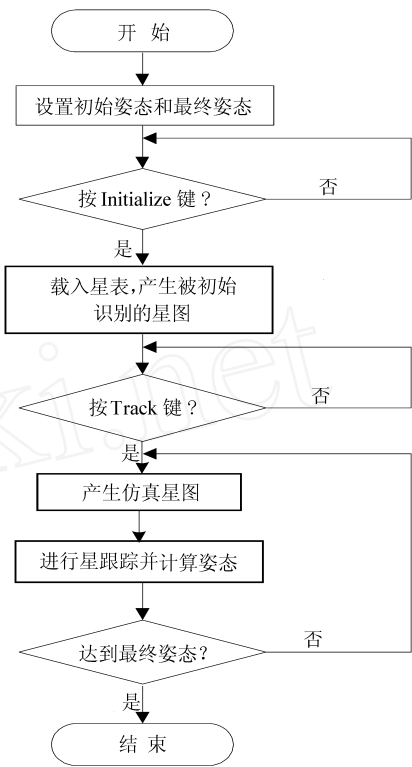


图 5 仿真流程图

Fig 5 Flow chart of simulation

由于跟踪是一个动态的过程,这里随机截取跟踪过程从姿态角(俯仰 40°,偏航 50°,滚转 40°)变化到(45°,55°,45°)的一段。表 1 是从跟踪中随机截取的一些数据,也可以用于评价跟踪的过程。从表中可以看出,在加了噪声后,计算的姿态角精度比没有加噪声的低。图 6 是在没有加噪声情况下以俯仰角为例比较跟踪过程的正确性,图 7 是在加了 2 个像素的位置噪声情况下以滚转角为例比较跟踪过程的正确性。从图 6 可以看出,在没有加噪声情况下跟踪过程是正确的,而从图 7 可以看出,加噪声后跟踪过程受到影响,但整个跟踪的趋势是对的。在整个跟踪过程中新星的识别是

表 1 跟踪过程数据的比较

Table 1 Camparation of data in tracking			
实际的俯仰角	计算的俯仰角	实际的滚转角	计算的滚转角 (加位置噪声)
40. 233	40. 234	43. 605	43. 456
40. 349	40. 347	43. 721	43. 771
40. 465	40. 465	43. 837	43. 941
40. 581	40. 581	43. 953	43. 880
40. 698	40. 697	44. 070	44. 119
40. 814	40. 813	44. 186	44. 217
40. 930	40. 929	44. 302	44. 325
41. 047	41. 046	44. 419	44. 402
41. 163	41. 161	44. 535	44. 451
41. 279	41. 278	44. 651	44. 687

比较耗时的,在奔腾 1.4 G 的机器上仿真这一识别过程,平均耗时仅为 0.45 ms,因此整个跟踪过程的速度是比较快的。

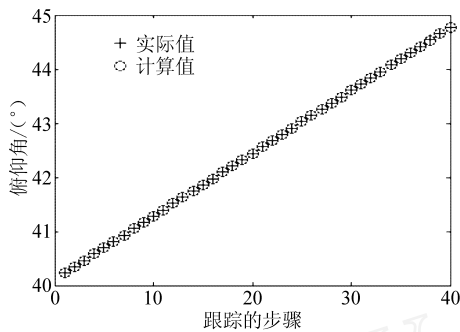


图 6 没有加噪声情况下俯仰角的跟踪过程

Fig. 6 Pitch tracking without noise

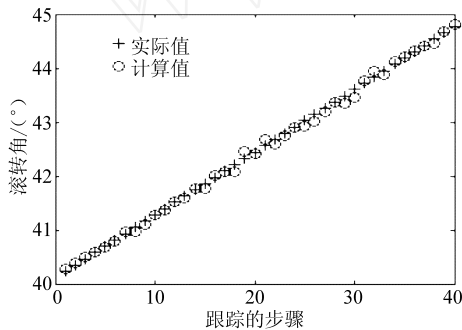


图 7 在加噪声情况下滚转角的跟踪过程

Fig. 7 Roll tracking with noise

### 3 结 论

星跟踪模式是星敏感器的主要工作模式,因此实现一个实时、快速的星跟踪方法是星敏感器的很重要的工作。本文在研究了目前星跟踪方法的不足的基础上,提出了一种全新的星跟踪方法。这种方法由于采用 FPGA 实现了星图的预处理,实时得到星点的位置信息,解决了数据传输的瓶颈问题,大大加快了星跟踪算法的速度。由于摈

弃了跟踪窗的方法而采用匹配识别的方法,使得图像传感器的驱动控制逻辑简化,也大大提高了跟踪的速度。对于新星的识别,由于有初始姿态而采用匹配组的星识别方法,识别速度也提高了。给出的实验结果也说明整个跟踪过程是正确的,而且是快速的。

### 参 考 文 献

- [1] 王珉. 航空航天技术[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1993.  
Wang M. Technology of aeronautics and astronautics[M]. Nanjin: Jiangsu Science Publisher, 1993. (in Chinese)
- [2] Liebe C C. Accuracy performance of star trackers—a tutorial[J]. IEEE Trans on AES, 2002, 38(2): 587-599.
- [3] Liebe C C, Alkalai L, Domingo G, et al. Micro APS based star tracker[C]// Aerospace Conference Proceeding. IEEE, 2001: 2285-2299.
- [4] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2002.  
Jia Y D. Machine vision[M]. Beijing: Science Publisher, 2002. (in Chinese)
- [5] Bezooijen V. Automated star pattern recognition[D]. California: Stanford University, 1989.

#### 作者简介:

江 洁(1973 - ) 女,福建人,博士,副教授,主要从事光电信息处理和光电导航的研究。E-mail:jiangjie@buaa.edu.cn

张广军(1965 - ) 男,天津人,博士,教授,北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院院长,主要从事机器视觉和光电精密测量技术的研究。

李 霄(1980 - ) 男,河北人,硕士,主要从事光电信息处理和光电导航的研究。

魏新国(1977 - ) 男,湖北人,博士后,主要从事机器视觉和模式识别的研究。

(责任编辑:鲍亚平)