

文章编号 1004-924X(2009)01-0191-05

# 适用于星敏感器的预测未知恒星星像质心算法

李葆华,马衍宇,刘睿,王常虹

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种自主预测视场内未知恒星星像质心算法。该算法采用星跟踪算法来提取视场内已知恒星星像坐标。根据已知恒星信息从主星表中搜索视场内所有未知恒星,并采用这些信息预测所有未知恒星的理想像平面中心,从以这些预测的理想坐标为中心的范围内提取相应的实际星像坐标。同时采用已知恒星来验证未知恒星星像坐标。最后,对该算法进行了外场观星测试。实验结果表明:该方法提取未知恒星星像坐标时,扫描星图的像元只有局部提取星像算法的0.12%,所以进一步提高了数据更新率。

**关键词:**星敏感器;星图识别;星跟踪算法;星像质心

**中图分类号:**V448.222;TP391 **文献标识码:**A

## A predictive centroiding algorithm of unmatched stars for star sensor

LI Bao-hua, MA Yan-yu, LIU Rui, WANG Chang-hong

(*Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin  
Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** An autonomous predictive centroiding algorithm of unmatched stars is presented in this paper to obtain the real star centroidings of identified stars with star tracking algorithm. All the unmatched stars within Field of View(FOV) are searched from a guide star catalogue according to identified stars. Then, these ideal centroidings of unmatched stars are calculated through these identified stars. The algorithm can obtain the real centroidings of unmatched stars within some threshold scan windows of star image and can identify the centroidings of unmatched stars through the identified stars within FOV, so that recognition performance is improved. The algorithm is successfully demonstrated by real space experiments, experimental results show that the number of pixels of scanning star image by the proposed algorithm is only 0.12% of that by local obtaining star location algorithm, when unrecognized star locations are captured. The conclusions reported here prove that proposed method can improve the update rate of data.

**Key words:** star sensor; star identification algorithm; star tracking algorithm; star centroiding

**收稿日期:**2008-03-27;**修订日期:**2008-05-08.

**基金项目:**国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2005AA745060);十一五共性技术资助项目(No. 51320050301);哈尔滨工业大学博士后建设资助项目

## 1 引言

星敏感器是一种以恒星作为观测基准的高精度飞行器姿态测量敏感器,能够提供角秒级甚至更高精度的姿态信息,被认为是目前精度最高的姿态敏感器<sup>[1-3]</sup>。无论是地球轨道卫星还是深空探测器,大型空间结构还是小卫星,高精度的姿态确定几乎都采用了星敏感器。与其它姿态敏感器相比,星敏感器还具有自主性强、无姿态积累误差等优点<sup>[4]</sup>。

为了提高星敏感器姿态更新率和提高星图识别算法的可靠性,许多学者提出各种全天星图识别算法<sup>[5-9]</sup>或者改进各种全天星图识别算法<sup>[10-11]</sup>。这些算法虽然从某种程度上完善了这些指标,但是由于全天星图识别前必须从整幅星图中提取星像坐标,而提取星像坐标占用了整个全天星图识别模式的绝大部分时间,而且随着像平面阵的增大,每次提取星像坐标过程的时间也相应地增加。为了改善这种状况,文献<sup>[11]</sup>采用星跟踪方法来提高星敏感器的姿态更新率。然而,随着飞行器的运动,星敏感器视场内已知恒星的数目越来越少,直至已知恒星的数目不足以计算出姿态信息,此时,星敏感器不得不再次进入全天星图识别模式。

为了避免星敏感器由于已知恒星数量不足时再次进入全天星图识别模式。当星敏感器视场内已知恒星较少时,文献<sup>[12]</sup>采用了局部星像提取方法,该方法在星图适当区域内提取未知恒星星像坐标,再根据这些已知恒星信息来识别、验证这些未知恒星。利用该时刻先验信息和识别后未知恒星信息即可再次进入星跟踪模式,避免了由于星敏感器视场内先验信息不足而进入全天星图识别模式。然而,该方法虽然采用了局部星图识别,但是提取未知恒星星像坐标时,必须扫描星图的外侧比较大的一个范围,因此在提取未知恒星星像坐标过程中扫描星图背景花费大量时间。随着像平面的面阵增大,每次提取星像坐标过程的时间也增多。而且提取未知恒星星像坐标时,不扫描已知恒星星像区域内,只扫描该区域外的星图周围连续区域,因此不能提取包含在此已知恒星星像区域内的未知恒星星像。为此,当星敏感器视场内已知恒星较少时,可以利用已知恒星信息,从主

星表中搜索星敏感器视场内除了已知恒星以外的其他所有恒星,并根据这些信息,计算这些未知恒星在像平面的理想星像坐标,从以这些理想坐标为中心的范围提取实际的星像坐标。

## 2 恒星星像质心坐标的预测

恒星星像质心坐标的预测模型就是恒星在星图中质心坐标 $(x, y)$ 和天球坐标 $(\alpha, \delta)$ ,即恒星在天球坐标系中的赤经和赤纬的关系式。

如图 1,  $o_1$  和  $o_2$  代表相机物镜的外主点和内主点,从  $o_2$  作底片的垂线交底片于  $o$  点,这点称为底片的光心。在理想的情况下,  $o$  点应该位于光轴上,并且和底片的几何中心大致重合。

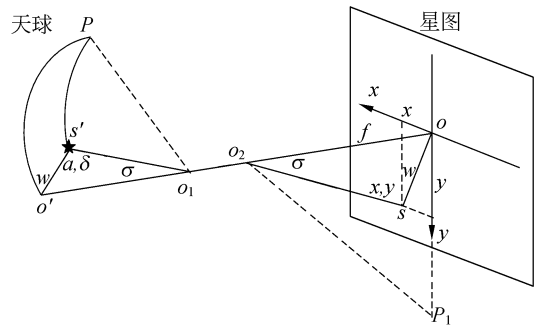


图 1 球面坐标和理想星像坐标的关系

Fig. 1 Coordinate relation between celestial sphere system and ideal image plane system

通过  $o_1$  引  $o_2o$  的平行线交天球于  $o'$ ,  $o$  点就是  $o'$  点在星图上的投影像;天球上某恒星  $s'$  在星图上的投影是通过  $o_2$  平行于  $o_1s'$  的直线和星图的交点  $s$ ;通过  $o'$  点的赤经圈  $o'P$  在星图上的投影是通过  $o$  点的直线  $o'P_1$ 。

在星图上以光心  $o$  为原点建立一个直角坐标系;以  $oP_1$  为纵轴( $y$  轴),取赤纬增加的方向为正;以通过  $o$  点和  $y$  轴垂直的直线作横轴( $x$  轴),取赤经增加的方向为正;这样构成的坐标系为理想星像坐标系。对于一张星图,星像坐标系是唯一的。恒星在此坐标系中的坐标——理想星像质心坐标 $(x, y)$ 和天球坐标 $(\alpha, \delta)$ 是一一对应的。

在图 1 中,由于三角形  $o_2so$  的  $\angle o_2os = 90^\circ$ , 所以:

$$os = oo_2 \tan \angle oo_2s = f \cdot \tan \sigma, \quad (1)$$

其中:  $f$  为焦距,  $\sigma$  为  $o's'$  的角距,  $\sigma = \angle s'o_1o' =$

$\angle oo_2s$ 。s 的理想星像质心坐标  $(x, y)$  为:

$$\begin{cases} x = os \cdot \sin \omega = f \cdot \tan \sigma \cdot \sin \omega \\ y = os \cdot \cos \omega = f \cdot \tan \sigma \cdot \cos \omega \end{cases} \quad (2)$$

令  $f=1$ ,即用弧度表示理想坐标,式(2)可表示为:

$$\begin{cases} x = \tan \sigma \cdot \sin \omega \\ y = \tan \sigma \cdot \cos \omega \end{cases} \quad (3)$$

把式(3)代入球面三角的基本公式和三角形的基本公式<sup>[13]</sup>,并消除中间变量  $\sigma$  和  $\omega$ ,可得从天球坐标系到图像平面坐标系中理想星像质心坐标的公式:

$$\begin{cases} x = \frac{\cos \delta \sin(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \\ y = \frac{\sin \delta \cos D - \cos \delta \sin D \cos(\alpha - A)}{\sin \delta \sin D + \cos \delta \cos D \cos(\alpha - A)} \end{cases}, \quad (4)$$

其中  $(A, D)$  是理想坐标系中心(即光轴指向)在天球坐标系的指向。

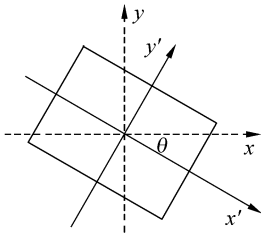


图 2 坐标转换

Fig. 2 Coordinate transform

如果图像平面坐标系与天球坐标系存在  $\theta$  ( $^\circ$ ) 的旋转角,那么从天球坐标系到图像平面坐标系中理想星像质心坐标的公式(如图 2):

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 实验室环境下仿真结果

为了评价本文算法,从 SKY2000 星表中选取了星等在  $0.0 \sim 5.5$  中的 5 062 颗恒星作为导航星,采用 Monte Carlo 方法随机产生星敏感器的光轴指向。本文任意选取了某个视场内的测试结果,如表 1 和图 3。其中星图大小为  $1\,024 \text{ pixel} \times 1\,024 \text{ pixel}$ ,星敏感器的视场为  $20^\circ \times 20^\circ$ ,用 P III 800 MHz 主频的微机,在 Windows2000 环境下,用 VC++6.0 工具进行实验。分别采用本文

方法和文献[12]方法进行了实验验证比较(其中表 1 加粗部分为视场内已知恒星星像坐标,黑斜体部分表示采用文献[12]不能提取的星像坐标)。

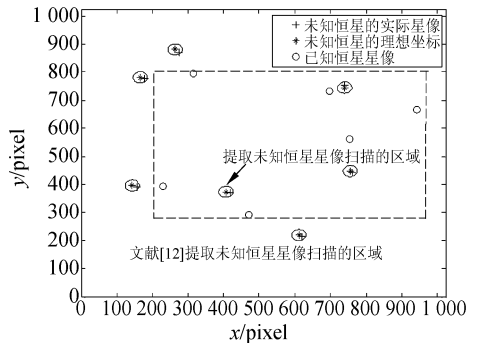


图 3 两种方法测试结果

Fig. 3 Test results with different algorithms

表 1 两种方法测试结果

Tab. 1 Test results with different algorithms

识别方法	提取坐标 $(x, y)$ (pixel)	提取所有星像时 扫描像元数量	参与识 别区域
	<b>(697. 291 67, 733. 105 12)</b>		
	<b>(470. 516 86, 290. 864 46)</b>		
	<b>(754. 010 63, 562. 229 86)</b>		
	<b>(315. 040 35, 794. 083 79)</b>		
文献 [12]	<b>(229. 368 94, 394. 194 60)</b> <b>(942. 911 53, 667. 133 79)</b>	689 608	全地球的 0. 617%
	(156. 656 98, 741. 928 74)		
	(179. 081 39, 447. 814 33)		
	(274. 645 56, 898. 449 21)		
	(619. 809 75, 182. 710 78)		
	<b>(697. 291 67, 733. 105 12)</b>		
	<b>(470. 516 86, 290. 864 46)</b>		
	<b>(754. 010 63, 562. 229 86)</b>		
	<b>(315. 040 35, 794. 083 79)</b>		
	<b>(229. 368 94, 394. 194 60)</b>		
	<b>(942. 911 53, 667. 133 79)</b>		
本文 方法	<b>(759. 830 56, 635. 184 04)</b>	832(扫描区域 半径为 8)	全地球的 0. 617%
	(156. 656 98, 741. 928 74)		
	(179. 081 39, 447. 814 33)		
	(274. 645 56, 898. 449 21)		
	<b>(418. 284 97, 578. 122 81)</b>		
	<b>(740. 474 36, 709. 596 24)</b>		
	(619. 809 75, 182. 710 78)		

### 3.2 外场试验结果

为了进一步验证本文提出的方法,2007 年运用该方法进行了地面观星测试。外场观星测试结果如下:星敏传感器全天空识别成功后即进入星跟踪模式,且长时间工作在星跟踪模式。当星敏传感器视场内已知恒星较少时即进入一次预测星像质心模式,之后又进入长时间的星跟踪模式和一次预测星像质心的工作模式。如图 4 所示,当星敏传感器视场内已知恒星少于 7 颗时即进入预测星像质心模式,图中三轴姿态角的单位为( $^{\circ}$ ),星敏传感器视场内已知恒星 12 颗后又再次进入长时间的星跟踪模式(在工程实现中,只要视场内已知恒星数量达到 12 颗就不再预测未知恒星,因为视场内已知恒星的数目多于 12 颗,计算姿态精度没有明显提高,却明显增加了处理器的计算量。而实际仿真中,本文算法能预测视场内所有未知恒星理想星像)。

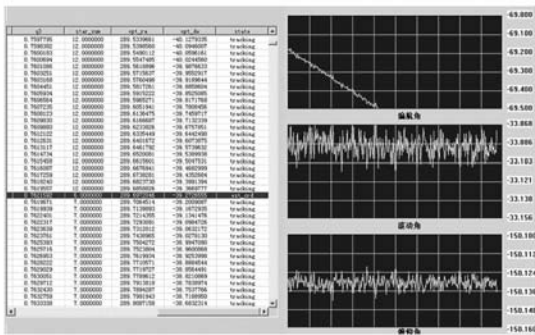


图 4 外场观星测试结果

Fig. 4 Test results of night sky experiment

### 3.3 结果讨论

该方法直接采用星跟踪算法来提取星敏传感器视场内已知恒星的星像坐标。对于视场内未知恒星的星像坐标:首先,计算出其理想的星像质心坐标,然后,在以这些理想的坐标为中心的某星图区域内提取相应的实际星像坐标。如果每个区域的面积增大那么在提取星像坐标过程中增加了扫

描星图的区域,从而增加了提取星像坐标过程的时间。所以,如果星敏传感器工作在预测星像质心模式下,要根据星敏传感器视场内恒星数量、飞行器机动角速度等来适当选取区域的大小。文献[12]采用扫描星图周围连续区域来提取视场内未知恒星星像坐标,因此不能提取已知恒星形成区域内的未知恒星星像(如图 3 和表 1 所示,采用文献[12]方法提取的未知恒星星像坐标才 4 个);由于该方法提取未知星像坐标时要扫描星图中某些连续区域,因此与全天空识别模式的星像提取方法一样,提取星像坐标过程中扫描星图背景花费大量时间,随着像平面的面阵增大,每一次提取星像坐标的时间也增长。而采用本文的方法来提取未知恒星星像坐标,只要选取区域大小不变,提取星像的时间不会随着星敏传感器像平面的面阵增大而增加,只随着视场内恒星的数量增加而略变大,其中扫描星图像元数量大约为  $64n$ ( $n$  为视场内恒星的数量,包括已知恒星和未知恒星的数量)。

## 4 结 论

预测星像质心模式不是扫描星图周围连续区域来提取视场内未知恒星星像坐标,而是利用视场内已知恒星信息来计算未知恒星的理想星像质心坐标,再在以这些理想坐标为中心的范围提取相应实际星像坐标。与文献[12]的方法相比,这样能减少扫描星图像元数量,从而降低提取星像坐标的时间,所以该方法进一步提高了星敏传感器的数据更新率。同时由于预测星像质心模式是采用已知恒星信息来验证未知恒星星像,因此该方法与文献[12]的方法一样,减少了识别过程中误匹配的可能。所以该方法不但继承了文献[12]方法提高星图识别率的优点,而且还克服了其提取星像坐标时扫描星图背景花费大量时间的缺点。最后为了进一步验证本文提出的预测星像方法,2007 年进行了外场观星测试,并将 2009 年应用于某卫星的姿控系统中。

### 参考文献:

[1] LIEBE C C. Accuracy performance of star trackers-a tutorial[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2002, 38(2): 587-599.

[2] LIEBE C C. Star trackers for attitude determination [J]. *IEEE AES Systems Magazine*, 1995, 31(6): 10-16.

[3] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏传感器探测灵敏度研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(8):553-557.

LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection

- sensitivity of APS star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(8):553-557. (in Chinese)
- [4] XIE J F, JIANG W SH. The analysis of the error sources affecting the accuracy of attitude determined by star sensor[J]. *SPIE*, 2007, 6752:675249.
- [5] 刘朝山, 刘光斌. 星光制导中的凸多边形星图识别算法[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(1):88-94.  
LIU ZH SH, LIU G B. A convex polygon star pattern identification algorithm for celestial guidance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1):88-94. (in Chinese)
- [6] MORTARI D. Search-less algorithm for star pattern recognition[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1997, 45(2):179-194.
- [7] SCHOLL M S. Star field identification algorithm-performance verification using simulated star field [J]. *SPIE*, 1993, 2019:275-290.
- [8] 李葆华, 张迎春, 李化义, 等. 用KMP算法进行星敏感器星图识别的方法[J]. *光电工程*, 2004, 31(1):9-11.  
LI B H, ZHANG Y CH, LI H Y, *et al.*. Star map recognition method of star sensor using KMP algorithm[J]. *Opto-electronic Engineering*, 2004, 31(1):9-11. (in Chinese)
- [8] 江洁, 李霄, 张广军, 等. 一种星敏感器中快速星跟踪方法[J]. *宇航学报*, 2006, 27(5):952-955.  
JIANG J, LI X, ZHANG G J, *et al.*. A fast star tracking method in star sensor[J]. *Journal of Aeronautics*, 2006, 27(5):952-955. (in Chinese)
- [9] 李立宏, 林涛, 宁永臣, 等. 一种改进的全天自主三角形星图识别算法[J]. *光学技术*, 2000, 26(4):372-374.  
LI L H, LIN T, NING Y CH, *et al.*. Improved all-sky autonomous triangle star-field identification algorithm[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(4):372-374. (in Chinese)
- [10] LEE H J, OH C S, BANG H CH. Modified grid algorithm for star pattern identification by using star trackers[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2003:385-391.
- [11] LI B H, ZHANG Y CH, LI H Y, *et al.*. A star tracking algorithm suitable for star sensor [C]. *The 6th Asia-Pacific Conference Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics, Harbin, P.R. China: APCOM2006*, 2006.
- [12] 李葆华, 王长虹, 张迎春. 适用于星敏感器的局部星像提取方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(9):1427-1431.  
LI B H, WANG CH H, ZHANG Y CH. Obtaining method for star locations in local region of star image for star sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9):1427-1431. (in Chinese)
- [13] 张永顺. 高等几何[M]. 沈阳:辽宁人民出版社, 1984.  
ZHANG Y SH. *Higher Geometry* [M]. Shenyang: Liaoning People's Press, 1984. (in Chinese)

## 作者简介:



李葆华(1977—),男,博士,讲师,主要研究方向为图像处理、模式识别、嵌入式控制和星模拟技术等。E-mail: li-baohua@hit.edu.cn

刘睿(1978—),男,博士研究生,主要从事地磁导航、组合导航技术的研究。E-mail: liu\_rui\_2002@sohu.com

马衍宇(1984—),男,硕士研究生,主要从事天文导航图像处理技术的研究。E-mail: myy19840716@sina.com

王常虹(1961—),男,辽宁鞍山人,教授,博士生导师,主要从事智能控制、鲁棒控制理论等方面的研究。E-mail: cwang@hit.edu.cn