星敏感器中快速星跟踪技术

江 洁 李 霄 张广军 魏新国

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 跟踪模式是星敏感器的主要工作模式之一,跟踪过程的快速性直接影响星敏感器的整体性能. 提出了一种快速星跟踪算法. 在跟踪算法的 3 个耗时环节,分别采用了分区星表、阈值映射、先排序后匹配识别这 3 种方法,以提高跟踪过程的快速性. 其中分区星表法将整个天区分成了若干个子天区,使得在星体映射时,只是搜索星敏感器视轴指向附近的部分子天区,而不是搜索整个天区,减少了搜索星体的数量;阈值映射法,在满足精确度的情况下,设置被跟踪星体的数量阈值,只有被跟踪的星体数目少于此阈值时,才进行星体映射,减少了映射次数;先排序后匹配识别法,先根据星体在星图中的坐标值进行排序,然后再进行匹配识别,减少了那些距离较大的无谓的星体间的匹配识别. 仿真测试结果表明,这 3 种方法的采用,提高了跟踪算法的快速性,提高了星敏感器的整体效能.

关 键 词: 星图; 星敏感器; 跟踪算法; 匹配识别

中图分类号: V 448.22

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)08-0877-04

Fast star tracking technology in star sensor

Jiang Jie Li Xiao Zhang Guangjun Wei Xinguo

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

Abstract: Tracking model is one of main models, when star sensor works. Speediness of tracking process affects star sensor's performance. A fast star tracking algorithm was proposed. Three methods, such as star catalog partition, threshold mapping, sorting and matching, were designed for three time-consuming elements in tracking algorithm, in order to raise the tracking speed. Star catalog partition method divided the celestial sphere into some partitions. It made star mapping search in the partitions near the direction of star sensor's visual axis not in the whole celestial sphere and reduced the total number of stars searched. Threshold mapping method in required accuracy condition, set a threshold of stars tracked. When the number of stars tracked was less than the threshold, star mapping was performed. It reduced mapping times. Sorting and matching method made sorting based on star's coordinates in star image, and then matched. It avoided matching between stars which had a long distance. Simulation showed that application of these methods made this tracking algorithm faster, and improved the efficiency of star sensor.

Key words: star image; star sensor; tracking algorithms; matching identification

星敏感器技术的出现为空间飞行器的姿态测量开辟了一个新的途径. 它可以达到很高的姿态测量精度. 随着航天技术的发展,对航天飞行器的自主导航能力提出了越来越高的要求,不仅要求准确的姿态信息,还要有很好的快速性[1].

星敏感器有初始姿态捕获和跟踪模式 2 种工作模式. 初始姿态捕获就是在全天球范围内对 CCD(Charge Coupled Device)或 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor Transistor)成像器件所得到的观测星图进行匹配、识别,计算初始的精确姿态[2];跟踪模式就是由初始姿态信息估计期望位置,并跟踪上一次已识别到的几个星体,

收稿日期: 2005-09-23

基金项目: 航空科技基金资助项目(03I51004); 航天创新科技基金资助项目; 民用航天预研资助项目

作者简介: 江 洁(1973-),女,福建古田人,副教授, jiangjie@buaa.edu.cn.

从而输出当前精确的姿态[3].

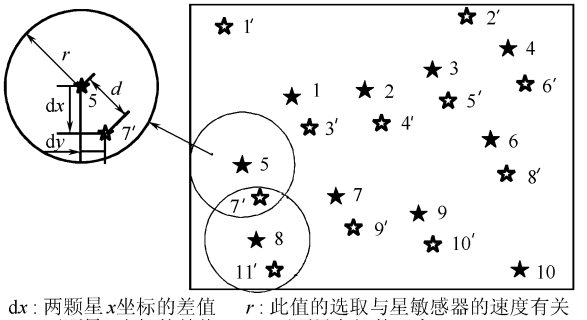
星敏感器工作时,经过全天星图识别[4]获得初始姿态后,就进入了跟踪模式. 星敏感器的大部分工作时间处于跟踪模式,跟踪过程速度的提高,对星敏感器整体性能的影响将非常明显. 目前,国内外对于星跟踪算法的研究还不多. 因此研究此跟踪算法是非常有意义的.

提出一种快速星跟踪算法,在此算法中的3个耗时环节,分别采用了阈值映射,分区星表,先排序后匹配识别这3种方法,很好地提高了星跟踪的快速性.

1 快速跟踪算法

1.1 星跟踪原理

为了方便说明该快速星跟踪方法,在后面的论述中,不妨假设跟踪过程中的第 k 帧及其以前帧星图的识别结果均已知,对当前第(k+1)帧的观测星图(星敏感器采集到的星图)进行跟踪识别,如图1所示.



dx:两颗星x坐标的差值 r:此值的选取与星敏感器的速度有关
dy:两颗星y坐标的差值 d:两颗星之间的距离
★:第(k+1)帧参考星图中的星体
☆:第(k+1)帧观测星图中的星体

图1 两幅星图

由第 k 帧观测星图的识别结果,可以计算出星敏感器当前的视轴指向,并得到在此视轴指向下某一定天区范围的星体信息,星体的信息是从星表(将星空中的恒星的数据,按不同要求编制而成的表册)中得到的. 在星表中保存有星体天球坐标系下的坐标(赤经、赤纬)、亮度(星等)、星号等信息[5]. 然后经过星体映射,即将此范围内星体的坐标从天球坐标系向图像坐标系的变换(将星表中星体的赤经、赤纬信息转化为图像传感器感光面上的位置坐标信息)[6],可以得到第(k+1)帧参考星图,此参考星图中所有的星体信息均已知.

对于第(k+1)帧参考星图中的任意一颗星,在第(k+1)帧观测星图中寻找是否有星体位于其邻域 r 范围内,如果有且只有一颗星位于该邻域,则观测星图中的这颗星被成功匹配识别. 若参考星图中没有星体位于该邻域或者存在一颗以上的星体位于该邻域(如图1中黑色8号星的邻域内,存在白色7′号星和11′号星两颗星),那么就不能在观测星图找到与之正确匹配的星体. 其中,邻域半径 r 的取值与星敏感器运动的角速度有关. 同样,可以利用第(k+1)帧观测星图的识别结果产生第(k+2)帧参考星图,用以实现对第(k+2)帧观测星图的识别. 如此循环,可以实现星体的跟踪.

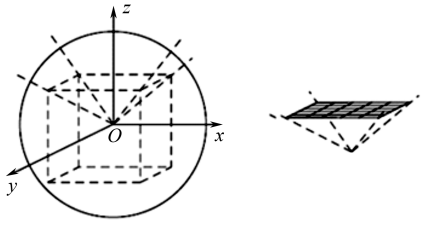
1.2 分区星表

在跟踪过程中,经过星体映射产生参考星图的计算过程是很耗时的,时间主要消耗在从星表中搜索能够映射到视场中的星体的过程.

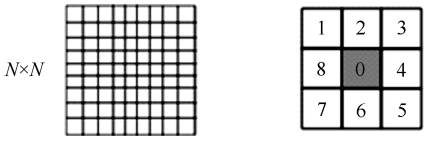
本文采用了分区星表的方法[7]. 用天球的内接正方体将天球球面均匀地分成6个区域,天球中心和正方体每一侧面4个顶点的连线构成一个锥体,锥体和球面相交并将其分成6块(S1 ~ S6),然后对于每一个区域,将其划分成 $N\times N$ 个子块(如图2所示). 分区后每个子块对应的中轴线矢量和边界点的方向矢量是由S1 ~ S6的方向矢量得到的. 通常星敏感器采用的视场为12°×12°,所采用的分区星表中的任一子块及其相邻子块(见图2d)构成的子天区应大于该视场. 仿真程序中采用的分区星表是取 $N=9$,将天区分成了486块的分区星表,每个子块为10°×10°,这样保证任一子块及其相邻子块构成的子天区大于12°×12°视场. 划分好的子块保存在分区星表中(保存了邻近子块的数目,邻近子块的序号,星体数目,星体索引号等内容).

采用分区星表后的具体搜索方法如下:①由上次的跟踪识别结果,求出星敏感器视轴的方向矢量. ②在分区星表中找出中轴线矢量与该视轴方向矢量最接近的子块. ③将该子块及其相邻的子块(如图2d所示)构成的子天区中的星体索引号存储下来. ④根据存储的星体索引号,在星表中找到相应的星体,获得星体的信息,然后通过计算比较此子天区范围内的星体信息,可以得到映射到视场中的星体,完成一次搜索. ⑤在下次搜索中轴线矢量与星敏感器视轴的方向矢量最接近的子块时,由于星体在视场中每次移动的距离不大,所以只需要在上次用到的9个子块中搜索即可.

采用了分区星表之后,不用搜索整个天区,只搜索9个子块中的星体,缩小了搜索范围(整个天区的$\frac{9}{6\times N\times N}$),从而加快了搜索速度,提高了跟踪的快速性.



a　内接正方体　　b　锥体



c　$N\times N$ 个子块　　d　子天区

图 2　分区星表

1.3　阈值映射

跟踪算法中,最耗时的是星体映射部分. 跟踪的目的是通过跟踪星体,经过计算得到星敏感器的姿态. 只要成功跟踪 10 颗星,根据其计算出的星敏感器姿态就非常精确. 为了减少星体映射的次数,本文采用了阈值映射的方法.

阈值映射就是设置一个星体数目阈值 δ,如果观测星图中被成功跟踪的星体数目大于这个阈值 δ,则不进行星体映射,反之,则进行星体映射.

具体方法如下:①首先设置一个阈值 δ,在仿真实验中根据多次实验经验,为了使跟踪算法有较好的稳定性,并且有较高的姿态精度,可以将阈值 δ 设置为稍大于 10 的值,本文取 δ 为 13. ②在第 k 帧观测星图和其参考星图匹配识别到的星体不少于 δ 颗时,不进行星体映射,而是将观测星图中的星体的信息(赤经、赤纬、星等、星号等信息)设置为与其匹配的参考星图中的星体信息,然后将此经过匹配识别的观测星图作为第(k+1)帧参考星图(只保留被成功匹配识别的星体). ③如果第 k 帧观测星图中匹配识别到的星体少于 δ 颗时,则进行星体映射,并得到第(k+1)帧参考星图. ④用同样方法,第(k+1)帧参考星图和其观测星图进行匹配识别. 如此循环,完成跟踪.

1.4　先排序后匹配识别

跟踪算法中,在参考星图和观测星图进行匹配时,那些距离较远的星体是没有必要进行比较的,本文采用了先排序后匹配识别的方法,就是在匹配识别前,先将两幅星图中的星体按照 x 坐标由小到大排序(如图 3 所示的是图 1 中两幅星图的排序),然后再进行匹配识别.

为了方便说明,将排序后的第(k+1)帧参考星图和其观测星图分别简记为 A 序列和 B 序列.

图 1 的 2 幅星图的匹配识别过程,可看成两序列匹配过程,以 A 序列的 2 号星和 B 序列星体



a　第(k+1)帧参考星图排序

b　第(k+1)帧观测星图排序

图 3　两幅星图的排序

的匹配为例(见图 4),具体匹配识别的方法如下:

1) 为了减少计算量,提高计算速度,不是比较 2 颗星的距离 d,而是比较坐标差值 dx(x 坐标差值),dy(y 坐标差值). 如式(1)所示:

$$\left.\begin{aligned} \mathrm{d}x &= |\ x - x'\ | \\ \mathrm{d}y &= |\ y - y'\ | \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

2) A 序列的 2 号星和 B 序列星体的比较是从 3′号星开始的,3′号星是在 A 序列 7 号星和 B 序列星体比较时,首先使 dx 小于 r 的 B 序列的星体. 也就是说,7 号星和 3′号星前面的 7′,11′号星的 dx 值大于 r. 由于是增序比较,那么 7 号星后面的 2,7′和 11′号星的 dx 值必然也大于 r,因此 2 号星没有必要再和它们比较了.

3) 在比较时,如果 2 号星和 B 序列星体的 dx 值小于 r,则继续和 B 序列的下颗星比较. 本例中 2 号星将依次和 3′,9′,4′,10′号星进行比较.

4) 在 2 号星和 10′号星比较时,发现两星的 dx 值大于 r,则停止 2 号星和 B 序列星体的比较,因为是增序比较,2 号星和 10′号星后面的 5′,2′,8′,6′号星的 dx 值必大于 r,没必要再进行比较.

5) 在 2 号星和 B 序列星体比较过程中,只有和 4′号星的 dx,dy 值同时小于 r,即在 2 号星的邻域内只有唯一一颗星存在,那么此 4′星就被匹配识别了. 其星体信息可从 2 号星的星体信息获得.

6) 按照同样的方法,A 序列的 9,3,6,4,10 号星继续和 B 序列进行比较,完成此帧观测星图的匹配识别.

这种先排序后匹配方法,有效地减少了那些无谓的星体间的比较(如图 4 所示第(k+1)帧参考星图的 2 号星,只需和观测星图的 3′,9′,4′,10′号星比较),只是比较坐标值相近的星,减少了匹配识别时的比较次数,提高了匹配识别的速度.

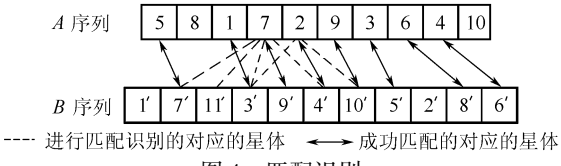


图 4　匹配识别

2 仿真测试

在赛扬900(m)的计算机上进行仿真测试. 测试的具体方法如下:①仿真程序中采用的分区星表是将天区分成了486($N=9$)块的分区星表,每个子块为10°×10°. 为了使跟踪程序能够有较高的精度和稳定性,将映射的阈值δ设为13. ②设置星敏感器的初始姿态(俯仰角α为70°,偏航角β为20°,滚转角γ为0°)和最终姿态(α为80°,β为30°,γ为0°). 在模拟星敏感器从初始姿态运动到最终状态的跟踪过程中,共分了139步来跟踪. 每一步都会根据每步的姿态产生一幅星图模拟星敏感器采集到的观测星图,然后利用其参考星图对此观测星图进行跟踪识别,求出此时的星敏感器姿态(与这一步的姿态对比可以验证跟踪的正确性). ③比较采用此3种方法和没有采用时的效果,测试结果如表1~表4所示. 表中,t_1是跟踪算法没有用相应方法时的耗时;t_2是用此相应方法后的耗时.

表1 采用分区星表方法的映射时间对比

参数	步骤			
	第1步	第33步	第65步	第120步
α/(°)	70.071	72.333	74.596	78.485
β/(°)	20.071	22.333	24.596	28.485
γ/(°)	0	0	0	0
t_1/ms	6.202	6.397	6.378	6.154
t_2/ms	0.445	0.445	0.430	0.414

表2 采用阈值映射方法的跟踪时间对比

参数	步骤			
	第1步	第33步	第65步	第120步
α/(°)	70.071	72.333	74.596	78.485
β/(°)	20.071	22.333	24.596	28.485
γ/(°)	0	0	0	0
t_1/ms	11.592	9.575	9.703	9.165
t_2/ms	5.842	3.219	3.479	4.384

表3 采用先排序后匹配识别方法的匹配识别时间对比

参数	步骤			
	第1步	第33步	第65步	第120步
α/(°)	70.071	72.333	74.596	78.485
β/(°)	20.071	22.333	24.596	28.485
γ/(°)	0	0	0	0
t_1/ms	2.100	0.661	0.282	0.879
t_2/ms	0.176	0.067	0.041	0.058

表4 总体仿真效果对比(跟踪时间)

参数	步骤			
	第1步	第33步	第65步	第120步
α/(°)	70.071	72.333	74.596	78.485
β/(°)	20.071	22.333	24.596	28.485
γ/(°)	0	0	0	0
t_1/ms	11.592	9.575	9.703	9.165
t_2/ms	3.859	3.234	3.100	3.080

3 结束语

本文提出的这种快速跟踪算法,在跟踪算法的3个环节,分别采用了分区星表、阈值映射、先排序后匹配识别这3种方法. 从仿真效果看出,分区星表法使得搜索天区缩小为1/54(设$N=9$),使映射时间约为原来的6%;阈值映射法,根据跟踪上的星体的数目和设置的阈值,来决定是否进行映射,减少了映射次数,采用此方法使跟踪时间减少了约一半;先排序后匹配识别,通过排序,排除了那些坐标差值较大的星体间的比较,此方法使得匹配识别的时间大约降低为原来的10%,进一步提高了算法的计算速度. 仿真测试结果表明,这3种方法的采用使得跟踪时间缩短了约60%. 由于星敏感器工作时主要处在跟踪模式,跟踪过程快速性的提高,对星敏感器整体效能的提高也是非常明显的.

参考文献(References)

[1] 郑万波, 夏亮, 郝志航. 基于星敏感器的卫星瞬时姿态计算方法[J]. 吉林大学学报, 2003,21(3):28-30
Zheng Wanbo, Xia Liang, Hao Zhihang. Method calculating of satellitic instantaneous attitude based on star tracker[J]. Journal of Jilin University, 2003, 21(3): 28-30(in Chinese)

[2] 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[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812-815
Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9):812-815 (in Chinese)

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

[4] Liebe C C. Star tracker for attitude determination [J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 1995, 10(6):10-16

[5] 陈元枝, 郝志航, 王国辉. 适用于星敏感器的导航星星库制定[J]. 光学精密工程, 2002, 27(5):5-10
Chen Yuanzhi, Hao Zhihang, Wang Guohui. Constitution of guide star catalog for star sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 27(5):5-10(in Chinese)

[6] 许世文, 龙夫年, 付苓, 等. 实时星场模拟器中的坐标变换[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(5): 118-120
Xu Shiwen, Long Funian, Fu Ling, et al. Coordinate transformation in real-time star field simulator[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(5):118-120(in Chinese)

[7] 魏新国. 星敏感器中的星图识别方法及相关技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 2004
Wei Xinguo. Star identification method for star sensor and related techniques[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)