

文章编号:1001-2486(2004)03-0052-05

固定天区小视场星跟踪器两颗星识别方法*

朱长征,沈振康,李 飏

(国防科技大学 ATR 国家实验室,湖南长沙 410073)

摘要:研究了在观测天区固定的前提下,小视场星跟踪器视场内只有两颗观测星时的星图模式识别算法。首先简述了研究的必要性;接着简要介绍了实时星图的预处理;随后详细论述了所提出算法的具体步骤;然后说明了导航星表的制定过程。仿真结果表明了算法是有效的,并对仿真试验结果进行了分析;最后给出了结论。

关键词:视场;星跟踪器;模式识别;两颗星

中图分类号:V448.21;TP273 **文献标识码:**A

Two-star Pattern Recognition Method in Small Field of View in the Fixed Sky-area

ZHU Chang-zheng, SHEN Zhen-kang, LI Biao

(National Lab of ATR, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The two-star pattern recognition method is researched on the small field of view provided that the sky-area to be observed is fixed. Firstly, the need is stated briefly. Then the pretreatment of the real-time star pattern is presented in short. Subsequently the pattern recognition algorithm used in the article is discussed in detail. And then the process to build the reference star catalog is explained. The simulation shows the algorithm is effective. The result is analyzed. Finally the conclusion is presented.

Key words: field of view; star tracker; pattern recognition; two-star

CCD 面阵星跟踪器(本文简称星跟踪器)是目前常用的空间飞行器姿态敏感器,第二代自主式星跟踪器作为飞行器姿态测量仪器,相对于其它三轴稳定姿态敏感器,如太阳敏感器、红外地球敏感器、射频敏感器、惯性敏感器等^[1],因为其指向精度高、无姿态累积误差、快速的故障恢复能力和智能化(星光入、姿态出)而受到人们的关注。对于承担军事任务的空间飞行器,其姿态控制精度要求很高。例如,在8000km 高度瞄准地面目标时的姿态误差将引起1600m 的落点误差。目前军用空间飞行器几乎都选用星跟踪器作为姿态敏感器。它的工作原理是以恒星为参照物,利用 CCD 照相机实拍到的星图,经过恒星质心提取、星图识别和姿态估算等一系列计算,确定出星跟踪器视轴在惯性参考天体空间的瞬时指向,从而确定飞行器的姿态。图1给出了基于自主式星跟踪器的飞行器姿态控制系统的结构框图,可以看出对星跟踪器拍摄到的星图进行识别是很重要的一个环节。

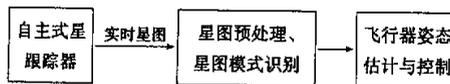


图1 基于自主式星跟踪器的飞行器姿态控制系统框图

Fig.1 Spacecraft attitude control systems based autonomous star tracker

对于视场中出现不少于三颗观测星的星跟踪器,已经提出了几种进行星图识别的算法,如三角形算法^[2,3]、栅格算法^[2,4]、匹配组算法^[2,5]、基于遗传算法的识别方法^[6]和随机识别算法^[7]等。对于视场中仅仅出现一颗或者两颗观测星的情况,目前还没有提出相应的算法,本文就是针对小视场中仅仅检测到两

* 收稿日期:2003-12-17

基金项目:国家863基金资助项目

作者简介:朱长征(1977—),男,博士生。

颗观测星的情况进行研究的。

对于较大视场($\geq 6^\circ$)的星跟踪器,由于在构造导航星数据库时考虑了在特定星跟踪器的探测灵敏度(即该星跟踪器的 CCD 相机在一定条件下可以检测到的视星等范围)条件下数据库的完备性,视场中出现一颗或者两颗观测星的概率非常小;同时由于星跟踪器的数据处理频率是一定的,导致星跟踪器的光轴指向不连续,这一点也使得视场中出现一颗或者两颗观测星的概率进一步变小。对于小视场($< 6^\circ$)星跟踪器,由于导航星数据库在数据处理周期的限制下不能非常大,另外恒星在天球上的分布不均匀,单位角面积上天赤道附近恒星密度大,而两个天极附近的恒星密度相对较小,导致小视场星跟踪器的 CCD 照相机拍摄到的天空部分出现一颗或者两颗观测星的概率变大,当然不会很大。总之,虽然星跟踪器的视场中出现一颗或者两颗观测星的概率非常小,并不意味着不会出现这种情况,为了保持姿态估计的连续性,有必要研究相应的识别算法。

尽量降低重量是空间飞行器设计的基本要求之一,因为重量与发射成本紧密相关。由于飞行器不能从地面获取用来进行姿态控制的能源,因此低功耗设计也十分重要。这两条使得小视场星跟踪器(质量较小、功耗较低)相对于较大视场星跟踪器具有竞争优势。根据双矢量定姿原理,单探头的 CCD 摄像机视场中只要正确识别两颗星就能确定飞行器的姿态,因此使得采用小视场星跟踪器进行飞行器姿态确定成为一种发展趋势。研究小视场星跟踪器视场中仅仅检测到两颗观测星的情况下进行星图识别的算法就成为解决问题的关键,这也是研究小视场星跟踪器视场中仅仅检测到两颗观测星的情况下星图识别算法的原因之一。

对于一些作为太空武器的军用飞行器,一般采用小视场星跟踪器,其观测天区是预先就确定了的(即 CCD 照相机的视轴指向变化范围很小);在确定的观测天区内,能够确保使用的 CCD 照相机“永远”观测到不少于两颗的观测星(即系统要有高可靠性),选择其中最亮的两颗观测星作为待识别的星,与导航星库中的导航星进行匹配(在这种情况下,导航星库的制定过程见第 4 节);匹配的过程就是星图模式识别的过程,也就是观测星识别算法实现的过程。因此需要研究的只有两颗观测星的星图模式识别算法。这是该算法研究的应用背景。

1 星图的预处理

在此仅扼要介绍一下星图的预处理过程。在 CCD 照相机获得实时星图以后,预处理过程主要包括:抑制噪声以增加信噪比、提取观测星质心和确定观测星。对于视场中检测到的观测星数目多于 2 时,要利用质心位置的强度信息(对应于星等信息),选择最亮的两颗星作为待识别的观测星。需特别指出的是,对于本文而言,由于假定观测天区事先已知,即使某一个视轴方向对应的观测视场内有 $n(n \geq 3)$ 颗观测星,按照亮度的强弱排序,存在从第二颗观测星起随后有至少一颗观测星的星等与第二颗观测星的星等非常接近的现象,无论是否考虑系统各种噪声的影响,都不会引起确定的观测星与导航星不存在对应关系的问题。如果在某一视轴方向对应的视场中,所有观测星都非常模糊,或者如果由于系统各种噪声的影响,在没有观测星的位置却得到了一颗观测星,这样肯定导致错误识别,这也是为什么需要对实时星图进行抑制噪声的预处理。

2 具体识别算法

对于小视场(本文考虑的是 $3^\circ \times 3^\circ$ 方形视场)星跟踪器,如果在视场范围内检测到两颗观测星,要对其进行识别,可以利用的信息有两颗星的视星等、两颗星之间的角距信息和两颗星的光谱特性。但是从目前的技术水平来看,CCD 照相机还不能利用恒星光谱,因为目前的 CCD 相机只能接收有限波段的可见光,因此这个重要信息目前还不可利用。由于不能利用恒星的光谱信息,可以利用的就只有星等(即视星等)信息和角距信息,即可用信息的特征维数为 3,是很低的。但是,由于观测天区预先已知,这样就可以大大降低由于识别信息特征维数低而导致的歧义匹配率^[8]。

本文提出的识别算法具体过程如下:

第一步:在视场中确定了两颗观测星质心后,首先利用星等信息,从导航星数据库 A 中找出满足星

等误差容限的所有星对组成新的任务子星表, 设为 B :

$$B = \{(s_i, s_j) \mid |s_i - m_1| < \epsilon, |s_j - m_2| < \epsilon, (s_i, s_j) \in A\} \cup \{(s_i, s_j) \mid |s_i - m_2| < \epsilon, |s_j - m_1| < \epsilon, (s_i, s_j) \in A\}$$

其中, m_1, m_2 表示两颗观测星, (s_i, s_j) 表示导航星数据库 A 中的一对导航星; 在这里为什么要进行集合的并运算见第 4 节。

第二步: 在星跟踪器坐标系中计算两颗观测星之间的角距 α_{12} , 利用两颗观测星之间的角距信息 α_{12} , 从任务子星表 B 中查找满足角距误差范围的所有星对记为 C :

$$C = \{(s_i, s_j) \mid |\alpha_{12} - \alpha_q| < \delta, (s_i, s_j) \in B\}$$

第三步: 如果 C 中仅有唯一的导航星对, 则认为进行了一次正确的识别; 如果 C 中没有导航星对或导航星对多于一对, 则认为进行了一次错误的识别。

3 导航星库的制定

在制定导航星库时, 要考虑的主要问题是导航星库的完备性, 即导航星库能够包括全部可能的视轴方向对应的星图模式。由于不能获得连续的视轴方向, 对于全天空而言很难保证导航星库具有 100% 的完备性^[9]。但是对于本文的假设——观测天区预先已知的情况下, 完全可以做到导航星库的完备性, 而且不需要利用蒙特卡罗方法, 具体制定过程如下:

第一步: 根据本文假设, 星跟踪器的观测天区一定。比如说以赤经 8h0m0s、赤纬 45°0'0" 为中心, 9 度 × 12.6 度视场范围内为观测天区(为了保证完备性, 实际观测天区可以选取得比理论上要求的稍大), 在该范围内, 一定星等范围内的恒星数目是确定的, 设为 N 。图 2 显示了以赤经 8h0m0s、赤纬 + 45°0'0" (注: 正号表示北半天球) 为中心, 在 2003 年 7 月 10 日 0 时 9 度 × 12.6 度视场范围内视星等 0~7 之间的所有恒星的分布, 其中包括双星和变星。

第二步: 根据排列组合原理, 星对的个数有 $C_N^2 = N(N-1)/2$, 但是还要剔除角距大于 3 度的所有星对, 剩余的构成导航星库。这样制定的导航星库可以确保完备性, 但是可能存在冗余。如在图 2 的右上角 3 度 × 3 度视场对应的视轴方向就有 9 颗恒星, 按照第 3 节给出的算法仅仅需要两颗最亮的恒星来构成对应视轴方向的导航星对, 其余的星对组合就导致了导航星库的冗余。

第三步: 在存储导航星对的时候, 按照(星对编号, 星等, 星等, 星对角距)进行存储。其中, 对于两颗观测星的星等大小关系不进行严格限定, 这样增加了识别算法的可靠性, 但是增加了识别算法第一步的运算量; 星对角距在存储时要按照大小进行排序, 依照单调增加或单调降低的顺序进行存储, 这样在识别过程需要进行查找时可以提高查找速度。

在实际应用中, 制定导航星库还要考虑许多现象, 如恒星自行、岁差、章动等, 具体讨论见文献[10]。

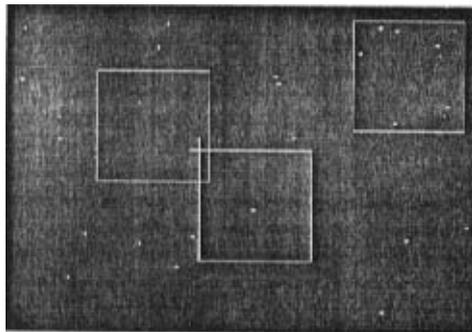


图 2 某一天区范围内视星等 0~7 之间的所有恒星
Fig. 2 All stars whose magnitudes are between zero and seven in the sky-area

4 仿真结果和结果分析

由文献[11]知道,对于视场为3度×3度、星等探测门限为7的星跟踪器视场内出现至少两颗星的理论天空覆盖率接近100%,也就是说极小部分视场中只出现一颗星。如在图2中,位于中间的两个正方形天区对应的视轴方向的视场内就只出现了一颗星。为了确保在上述条件下星跟踪器视场内出现至少两颗星的天空覆盖率达到100%,特意选择以赤经7h36m44s、赤纬-24°6'52"(负号表示南半天球)为中心,6度×8.4度视场范围为观测天区,图3显示了该天区2003年7月10日0时1~7等范围内的恒星星图(包括双星和变星)。图中共有56颗星,所有星的第谷星表编号(Tycho catalog number, TYC)以及星等可以根据条件查相应星表,在此从略。

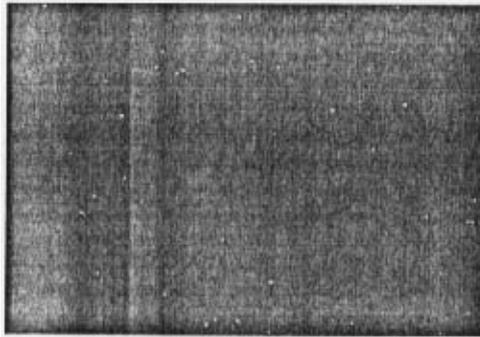


图3 某天区2003年7月10日0时的星图
Fig.3 All stars in the sky-area at zero clock on July 10 in 2003

利用蒙特卡罗方法产生多个视轴方向,用文献[12]的方法产生待识别的星图,条件是视场角为3度×3度、面阵大小为512×512、像素大小为10 μ m×10 μ m,并且引入位置噪声和星等噪声,假设都是高斯白噪声,均值为零,方差分别为(0.07像素)²[11]和(0.25视星等)²[13]。根据文献[11],CCD星跟踪器所成星图中的恒星质心定位精度在采样定理的限制下为0.38个像素;但是典型的CCD星跟踪器的星图都存在稍微散焦的现象,这正是为了克服采样定理的限制而采取的有效措施;在采取上述措施后,恒星质心定位精度小于0.18像素。在仿真计算中向每一个恒星质心坐标的X坐标和Y坐标引入均值为0、标准差 σ 为0.07像素的高斯噪声,这样使得添加的噪声幅度99%以上位于区间[-0.21像素,0.21像素]之内,能够达到精度极限。根据文献[13],CT-633星传感器探测视星等误差的标准差为0.25视星等。从随机产生的视轴方向对应的星图中选出8幅,如图4所示,图中圆斑的大小表示星亮度的强弱,圆斑越小表示该星的星等越大,即星看起来越暗。显然8幅星图都包含多个星,但是这只是说明我们选取的星跟踪器探测到的星等门限太低。

识别结果如表1所示,其中角距的识别门限为10.0角秒,视星等的识别门限为0.50,识别成功率为100%。

表1 星图识别结果
Tab.1 The recognized results of star maps

星图	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
识别结果	正确							

从识别结果来看,在所选择的天区内本文提出的算法是有效的。对于其它天区是否有效,需要进一步的研究。另外,本文没有考虑背景噪声,只是在中间的计算结果引入了噪声,这一点不符合实际情况,这可能也是算法能够达到100%的正确识别率的原因。

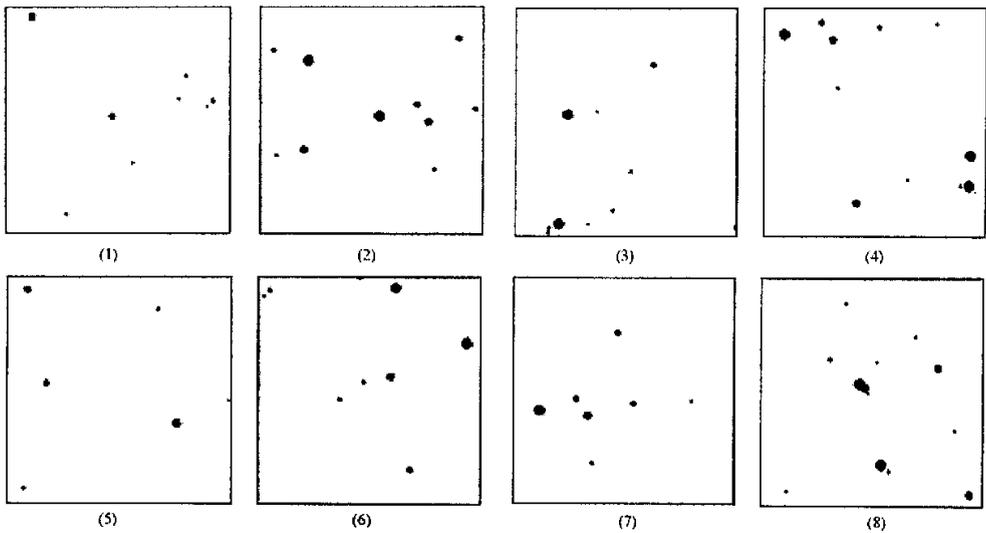


图4 8幅待识别的星图

Fig.4 Eight star maps to be recognised

5 结论

文章在假设观测天区一定的前提下,针对小视场星跟踪器视场内仅仅有两颗观测星的情况提出了相应的星图模式识别算法。虽然结果具有一定的局限性,但是仿真结果证实算法是有效的。

另外,本文中的识别算法还可以作为其它全天星图识别算法的补充。例如对于三角形识别算法,对于特定的 CCD 星跟踪器,虽然在所有的视轴方向对应的视场内至少出现三颗观测星的比例接近 100%,只要不是确实达到 100%,就不可避免会在某一视轴方向对应的视场中仅仅出现一颗或者两颗观测星。只要确认仅仅有两颗观测星,就可以利用本文提出的算法进行星图模式识别。只是在制定导航星库的时候,要把一些视轴对应的视场中只有两颗观测星的情况考虑进去。

参考文献:

- [1] 杨大明.空间飞行器姿态控制系统[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2000.
- [2] Padgett C, et al. Evaluation of Star Identification Techniques[J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 1997,20(2):259-267.
- [3] 李立宏,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):372-373.
- [4] 李立宏,等.一种改进的全天自主栅格星图识别算法[J].光学技术,2000,26(3):204-206.
- [5] Kasic J. Star Pattern Identification Aboard an Inertially Stabilized Spacecraft[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1991,14(1):230-235.
- [6] 李立宏,等.一种基于遗传算法的全天自主星图识别算法[J].光电工程,2000,27(5):15-18.
- [7] Udonkesmalee S, et al. Stochastic Star Identification[J]. Journal of Guidance Control Dynamics, 1994,17(6):1283-1286.
- [8] 阎道宏,等.星敏感器用导航星表的建立[J].宇航学报,1992,13(4):43-49.
- [9] Juang Jer-Nan, Kim H Y, Junkins J L. An Efficient and Robust Singular Value Method for Star Pattern Recognition and Attitude Determination[R]. NASA Langley Research Center, January 2003:NASA/TM-2003-212142.
- [10] 陈元枝,等.适用于星敏感器的导航星库制定[J].光学精密工程,2000(4):331-334.
- [11] Liebe C C. Accuracy Performance of Star Trackers - A Tutorial[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002,38(2):587-599.
- [12] 张钧萍,等.一种模拟 CCD 星图的方法[J].中国空间科学技术,1999(3):46-50.
- [13] CT-633 Stellar Attitude Sensor[R]. Ball Aerospace & Technologies Corp., <http://www.ball.com/aerospace/pdf/ct633.pdf>, 阅读时间:2003-12-06.

