

基于预测跟踪星表提高星敏感器实时性的方法

陈 聪,王宏力,崔祥祥,陆敬辉,姜 伟

(第二炮兵工程大学,陕西 西安 710025)

摘 要:为提高星敏感器在星跟踪失败时向全天识别模式转换的效率,提出了一种在星跟踪的同时,并行预测跟踪导航子星表的方法,以随时做好工作模式切换的准备,提高星敏感器实时性。设计了“分层存储、逐层索引”结构的导航星表,实现了均匀化筛选导航星、构建导航子星表及对数据快速搜索和处理;由飞行器姿态数据预测下一时刻星敏感器姿态,并通过星敏感器视轴指向与子星表地址之间的索引关系,预测跟踪子星表的地址;星跟踪失败时,全天识别在 4 个冗余子星表中完成,简化识别过程,提高了识别效率。实验结果表明,设计的导航星表较为科学、合理,预测跟踪星表方法具有较强的鲁棒性,在高动态条件下有效提高了星敏感器模式切换的实时性。

关键词:星跟踪; 预测跟踪星表; 子星表; 星图识别; 实时性

中图分类号: V448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)08-2190-07

Method of improving real-time of star sensor based on predicting and tracking star catalog

Chen Cong, Wang Hongli, Cui Xiangxiang, Lu Jinghui, Jiang Wei

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To improve the efficiency of star sensor during the transition from star tracking mode to full-sky star identification mode, a novel method of synchronously predicting and tracking guidance star sub-catalog while in star tracking mode was proposed. The work mode transition was always prepared, therefore the real-time property of star sensor was improved. The overall catalog architecture which was hierarchical storage and sequentially mapping' was designed. Based on this architecture, guidance stars were homogenized, the overlapped sub-catalogs were generated, and fast searching and management of data were realized. The attitude of star sensor at next time was predicted by using the attitude data of air vehicle. The address of sub-catalog was predicted and tracked by the built index relationship between bore sight of star sensor and addresses of sub-catalogs. Once star tracking failed, full-sky star identification implemented in four redundant sub-catalogs, therefore the process of star identification was simplified, and the efficiency was improved. Experimental results show that the designed star catalog is more scientific and reasonable. The proposed method has strong robustness. The real-time property in work mode transition of star sensor at highly dynamic condition can be effectively improved.

Key words: star tracking; predicting and tracking catalog; sub-catalog; star identification; real-time

收稿日期:2012-12-11; 修订日期:2013-01-10

基金项目:国家自然科学基金

作者简介:陈聪(1988-),男,硕士生,主要从事组合导航、星敏感器方面的研究。Email:chencongdi@126.com

导师简介:王宏力(1965-),男,教授,博士生导师,主要从事组合导航、故障诊断等方面的研究。Email:cc2084@163.com

0 引言

星敏传感器具有精度高、重量轻、功耗低、无漂移和工作方式多样等优点,是天文导航系统中最常用的姿态敏感器件^[1],在卫星控制、弹道导弹以及深空探测等领域得以广泛应用^[2]。星图识别(Star-ID)是星敏传感器解决姿态确定问题的核心过程,可以通过两种工作模式来实现^[1-5]:太空迷失(LIS)下的全天自主星图识别模式,以及基于先验姿态信息的星跟踪模式。相对于全天识别模式,星跟踪模式可以充分利用上一时刻的已识别星点信息以及输出的姿态信息,极大地提高了数据更新率。因此,星跟踪模式具备了更好的实时性能,是主要的工作模式^[1-5]。当前,航天飞行任务要求星敏传感器能够提供更高的姿态精度、更高的更新率以及更高的动态性能^[4],为此可以从以下几方面入手:

(1) 提高硬件水平。可以采用性能更好的处理芯片、数据传输接口等,如参考文献[3]中采用FPGA加快星点位置提取;但这势必造成成本增加,且性能提高是有极限的;

(2) 改善 LIS 模式的星图识别效率。研究或改进各种全天星图识别方法^[5-7],加快、提高识别速度和可靠性,以使星敏传感器尽快完成姿态获取,转换到效率更高的星跟踪模式;

(3) 进一步优化星点跟踪/预测效率。研究更高效的星点跟踪算法和预测方案,以实现更稳健的已知星点信息维持和更快捷的星点信息预测,相关改进措施有:跟踪窗口方法^[8]、球面多边形搜索方法^[9]、瞬时邻域星表方法^[9]、预测跟踪识别方法^[10]、高动态下的预测跟踪方法^[1,5]等;

(4) 改善由跟踪模式向 LIS 模式切换时的效率。当视场内已知信息减少到不能满足基本姿态跟踪推算时,就需要重新进入比较耗时的全天识别 LIS 模式,目前对这方面的研究相对较少。

总结上述措施可以发现,现有方法主要的立足点是尽可能防止星跟踪失败,避免切换工作模式。而现实条件下,尤其是高动态条件下,星跟踪失败、切换工作模式是极有可能发生的。为此,文中提出一种在星跟踪的同时,根据当前姿态实时预测跟踪瞬时导航星表的方法,以提高在高动态条件下星跟踪模

式,以及由跟踪模式转换到 LIS 模式时的效率;且该方法能够均匀化筛选导航星,对提高星跟踪及全天星图识别方法的效率是有利的。

1 预测跟踪星表的总体思想及基本结构

为提高星敏传感器由跟踪模式向全天识别 LIS 模式切换时的工作效率,应充分利用模式切换之前星敏传感器最后输出的有效姿态信息,保证星敏传感器在跟踪模式下仍随时做好全天识别的准备。基于这一思想,提出预测跟踪导航星表的方法:首先将全天星表划分为多个子星表,使星敏传感器在进行星跟踪及姿态输出的同时,根据当前的姿态信息,预测跟踪下一时刻,如果星跟踪失败,需要切换为全天识别模式时,最可能对应的子星表,即实现已识别导航星与导航星表的并行跟踪。一旦切换为全天识别模式,通过预测跟踪的星表进行局部星图识别,相对全天识别更为简单、效率更高。为此,设计了“分层存储、逐层索引”结构的导航星表,如图1所示。星表主要由两部分组成。

(1) LIS 全天识别模式下的导航星表,主要存储:1) 所选导航星的基本信息;2) 用于星图识别的导航星模式量信息(如星间角距(Angular Separation, A.S.)、栅格、三角形等,文中采用星间角距作为模式量);3) 模式量索引表(如建立 k-vector 索引表);

(2) 跟踪模式下的子星表,主要存储:1) 将全天导航星表划分成的子星表中的数据信息;2) 每个子星表对应的地址索引。

以上实现了不同的数据信息的分层存储。除导航星及其模式量基本信息外,其余数据层只存储数据对应的索引或映射,如子星表中只存储星号和模式量的索引号,进而各层信息之间建立起“逐层索引映射”的关系。

“分层存储、逐层索引”结构的特点:

(1) 由于数据信息之间建立索引映射的关系,无论是星敏传感器工作于 LIS 模式还是星跟踪模式,需要对导航星表进行数据搜索和处理时,仅需几步简单计算得到相应的索引,即可完成信息存取,极大地提高了数据搜索和处理的效率;

(2) 存储的数据索引均为整型数据,占据的存储量很小,且计算和处理时更为简单高效;

(3) 实现了子星表的预测跟踪与星跟踪过程的

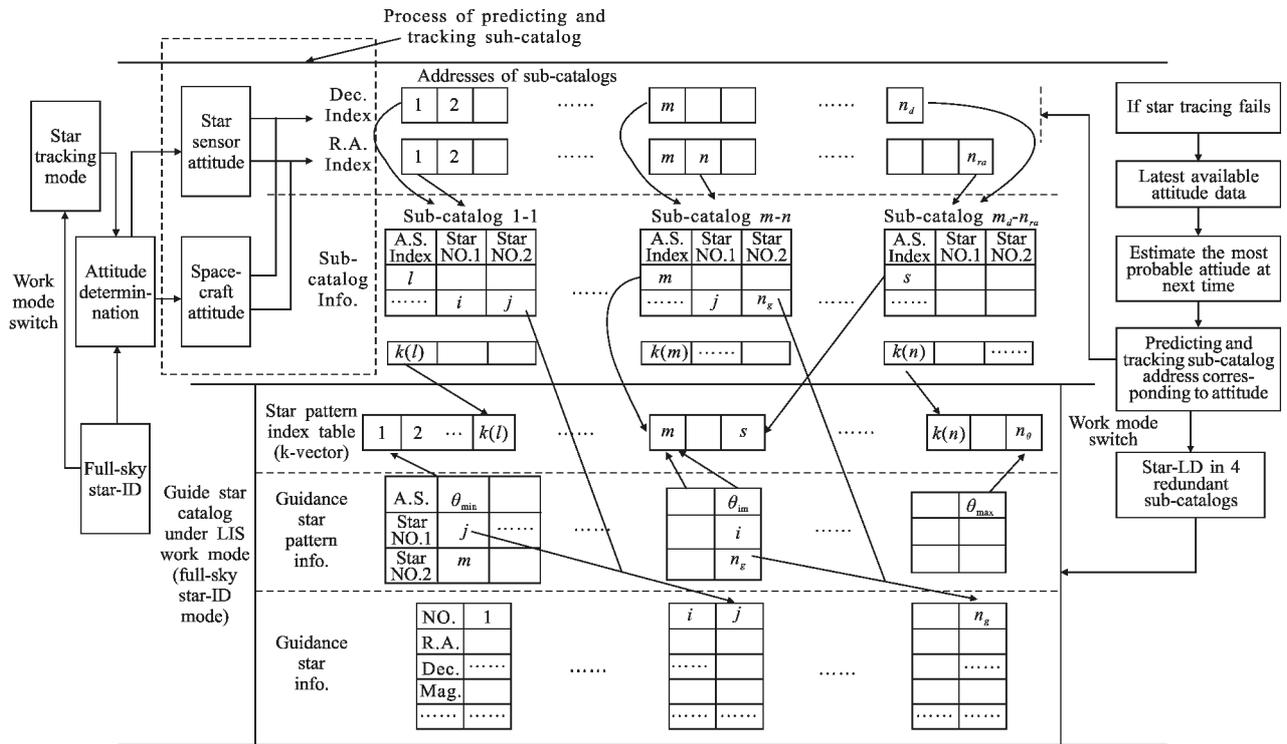


图 1 导航星表全局结构

Fig.1 Overall catalog architecture

并行工作,且仅需预测跟踪星表的地址,对星跟踪过程没有任何影响。

2 导航星表各部分结构

2.1 均匀化选取导航星

使用 SKYMAP 2000 星表作为基本星表,首先根据星敏感器的星等探测阈值 m_t ,通过星等阈值滤波方法,并剔除变星、双星,提取出 n_c 颗候选星;然后采用基于基准点的选星方法对候选星均匀化筛选,具体步骤如下。

(1) 在天球表面构造 N 个分布近似均匀的选星基准点。首先将赤纬划分为 (n_d-1) 条等间隔赤纬圈,则每条赤纬圈 L_j 对应的赤纬为:

$$\phi_j = \frac{\pi j}{n_d} - \frac{\pi}{2}, j=1, 2, \dots, (n_d-1) \quad (1)$$

而后在每条赤纬圈 L_j 上,从赤经为 0° 开始,设置 n_{raj} 个等间隔的点:

$$n_{raj} = \lfloor \frac{1}{2} + \sqrt{3} n_d \cos \phi_j \rfloor \quad (2)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整;

(2) 计算相邻基准点间隔 s_k (以角距度量) 的最大值 s_{max} 。对提取的 n_c 颗候选星进行搜索,得到位于每个基准点周围半径 s_{max} 圆形邻域内的候选星,而后只保留距离此基准点最近的一颗候选星作为导航星;共计选取出 n_g 颗导航星;

(3) 将 n_d 颗导航星的星号、仪器星等、位置(赤经、赤纬、自行等)数据统一存储。

2.2 导航星模式量

(1) 计算导航星两两之间的角距,根据星敏感器视场大小 θ_{FOV} ,找出角距在 $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ 范围内的所有星对并按角距值大小升序排列,其中, $\theta_{max} = \theta_{FOV} + \sigma$, σ 为星敏感器的最大测量误差,按照图 1 中“角距-星号 1-星号 2”的结构存储;

(2) 根据 k-vector 索引方式,构建模式量的索引表,以便于应用快速高效的 k-vector 区间搜索算法^[9] 进行搜索,具体实现过程为:

n_s 个角距值升序排列后得到向量 P 。过两点 $(1, \theta_{min} - \xi), (n_s, \theta_{max} + \xi)$ 构造直线:

$$z(x) = mx + q \quad (3)$$

式中: $m = \frac{\theta_{\max} - \theta_{\min} + 2\xi}{n_s - 1}$; $q = \theta_{\min} - m - \xi$, $\xi = \varepsilon \max[|\theta_{\min}|, |\theta_{\max}|]$, ε 为计算精度。

通过以下条件,建立 k-vector 索引表:

$$\begin{cases} k(1)=0 \\ k(i)=j, P(j) \leq z(i) < P(j+1) \\ k(n_s)=n_s \end{cases} \quad (4)$$

其中, $i=2 \sim n_s-1$ 。

当搜索 $\theta_i \in [\theta_a, \theta_b]$ 时,计算

$$j_{\text{start}} = \left\lfloor \frac{\theta_a - q}{m} \right\rfloor, j_{\text{end}} = \left\lceil \frac{\theta_b - q}{m} \right\rceil \quad (5)$$

式中: $\lfloor \frac{\theta_a - q}{m} \rfloor$ 表示向下取整; $\lceil \frac{\theta_b - q}{m} \rceil$ 表示向上取整。

令 $k = k(j_{\text{start}}) + 1, k(j_{\text{start}}) + 2, \dots, k(j_{\text{end}})$, 则 $P(k)$ 就是搜索的结果。

2.3 子星表

将天球划分为多个子星表,方法如下:

(1) N 个选星基准点同时作为构建子星表的基准点。搜索出距离每个基准点半径为 ρ_{sub} 的圆形邻域内的导航星。为保证每个子星表是相对完备的,应综合基准点之间的间隔 s_k 、对星敏传感器视轴指向估计时的偏差 δ 、以及视场(圆形视场)大小 θ_{FOV} 等因素,来确定每个子星表的大小。应考虑误差最恶劣的情况,确定半径 ρ_{sub} 为:

$$\rho_{\text{sub}} = \frac{1}{2} \lceil s_{\text{max}} \rceil + \max(\delta) + \frac{\theta_{\text{FOV}}}{2} \quad (6)$$

(2) 对搜索出的导航星,在模式库中找到导航星两两之间角距值对应的角距索引号,并按照“角距索引-星号 1-星号 2”的方式存储。

2.4 子星表地址索引

由公式(1)~(2)可以看出,每个基准点对应的子星表能够很方便地通过基准点的赤纬、赤经信息查找到,因此,星敏传感器视轴指向 (α_b, δ_b) 对应的子星表地址索引可以按公式(7)~(8)计算:

$$l_d = \begin{cases} 1, & \delta_b < \frac{(2-n_d)\pi}{2n_d} \\ n_d - 1, & \delta_b > \frac{(n_d-2)\pi}{2n_d} \\ \text{round}\left[\frac{(\delta_b + \pi/2)n_d}{\pi}\right], & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$l_{ra} = \begin{cases} 1, & \alpha_b > \frac{(2n_{\text{ral}_d} - 1)\pi}{n_{\text{ral}_d}} \text{ 或 } \alpha_b < \frac{\pi}{n_{\text{ral}_d}} \\ \text{round}\left(\frac{\alpha_b n_{\text{ral}_d}}{2\pi}\right) + 1, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

式中: l_d, l_{ra} 分别为子星表地址的赤纬、赤经索引; $\text{round}\left(\frac{\alpha_b n_{\text{ral}_d}}{2\pi}\right)$ 为四舍五入取整运算, n_{ral_d} 为 $j=l_d$ 时按公式(2)计算得到; (l_d, l_{ra}) 表示第 l_d 个赤纬圈上的第 l_{ra} 个基准点。

3 预测跟踪星表的实现

预测星敏传感器在下一数据输出时刻的姿态是实现子星表预测跟踪的关键。根据飞行器的四元数姿态信息预测星敏传感器的视轴指向^[1,5]:

(1) 当前 t 时刻,已知本体坐标系相对于惯性坐标系的姿态四元数为 $q(t)$ (惯组、星敏传感器或组合导航系统最优估计的输出);

(2) 根据飞行器相对惯性空间的角速度在本体坐标系的投影 ω ,四元数微分方程为:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \Omega(\omega(t))q(t) \quad (9)$$

$$\text{式中: } \Omega(\omega) = \begin{bmatrix} -[\omega \times] & \omega \\ -\omega^T & 0 \end{bmatrix}, [\omega \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

(3) 求解四元数微分方程得到 $t+T$ 时刻的姿态四元数 $q(t+T)=[q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4]^T$;

(4) 根据预测四元数,计算 $t+T$ 时刻星敏传感器的视轴指向 $(\alpha_{t+T}, \delta_{t+T})$:

$$\begin{cases} \alpha_{t+T} = \arctan\left(\frac{q_2 q_3 - q_1 q_4}{q_1 q_3 + q_2 q_4}\right) \\ \delta_{t+T} = \arcsin(-q_1 q_1 - q_2 q_2 + q_3 q_3 + q_4 q_4) \end{cases} \quad (10)$$

(5) 根据视轴指向 $(\alpha_{t+T}, \delta_{t+T})$,以及公式(7)~(8)得到需要预测跟踪的子星表地址 $(l_d, l_{ra})_{t+T}$ 。

4 模式切换后的星图识别

设 $t+T$ 时刻星跟踪失败,需切换至 LIS 模式,由于在 t 时刻飞行器和星敏传感器的姿态具备一定的精度,且在构建子星表的时候已考虑了一定的允许误差 δ ,因此预测跟踪的子星表是最可能成功实现星图识别的区域。为进一步提高识别的可靠性,在沿赤经、赤纬方向距离预测跟踪的子星表 $(l_d, l_{ra})_{t+T}$ 为 ρ_{sub} 的四个冗余子星表(即星敏传感器视轴指向分别为 $(\alpha_{t+T} \pm \rho_{\text{sub}}, \delta_{t+T})$ 、 $(\alpha_{t+T}, \delta_{t+T} \pm \rho_{\text{sub}})$ 时对应的四个子星表)中进行星图识别,以重新获取飞行器姿态,如图 2 所示。从理论上讲,在冗余子星表中进行星图识别,可容许对飞行器姿态的外界最大瞬时干扰为 $\delta + (\sqrt{2} - 1)\rho_{\text{sub}}$,保证了一定的鲁棒性。

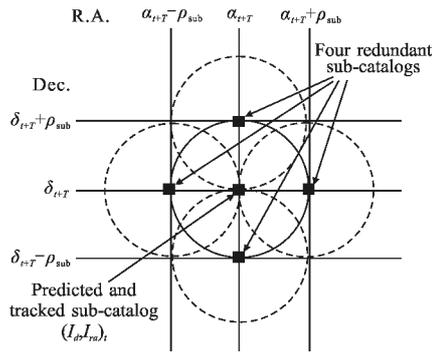


图 2 模式切换后的冗余子星表

Fig.2 Redundant sub-catalogs after work mode transition

5 仿真实验

仿真条件:星传感器为圆形视场, $\theta_{FOV}=16^\circ$, 面阵大小为 $1\ 024 \times 1\ 024$, 最大允许误差 $\sigma=100''$, 数据更新率为 $2\ \text{Hz}$, 可探测星等阈值 $m_i=6.0\ \text{Mv}$, 对星传感器视轴指向估计时的最大误差 $\max(\delta)=2^\circ$ 。设 $n_d=53$, 则生成 $N=3\ 100$ 个基准点, 计算得 $[s_k]=4^\circ$; 提取了 $4\ 908$ 颗候选星, 按照文中均匀化选取导航星的方法, 共选取出 $2\ 717$ 颗导航星, 候选星与导航星分布统计情况(统计赤经、赤纬 $6^\circ \times 6^\circ$ 的窗口内导航星数)如图 3 所示。

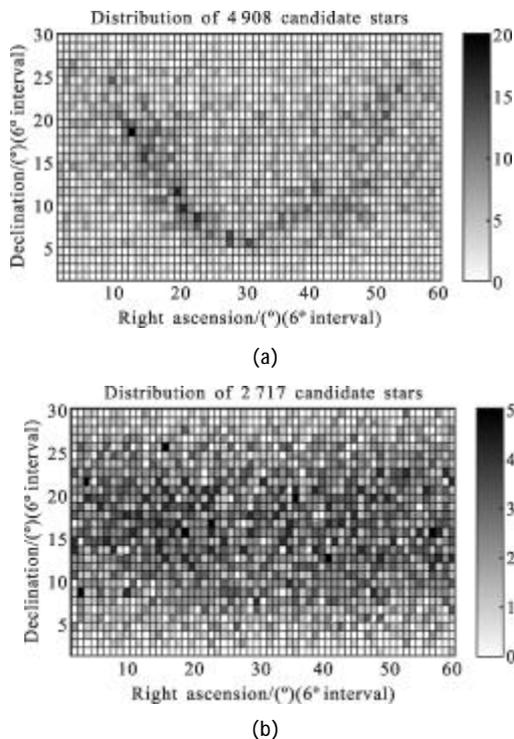


图 3 候选星和均匀化后的导航星分布

Fig.3 Statistic distribution of candidate stars and homogenized guidance stars

由图 3 可以直观地看出基于基准点均匀化选取导航星, 能够剔除导航星分布比较稠密的区域, 导航星的分布均匀性更好, 无论是对全天星图识别还是星跟踪模式, 可以提高识别效率, 以及多个观星视场下星传感器的数据输出稳定性。

共构建 $3\ 100$ 个子星表, 某时刻预测跟踪的子星表及 4 个冗余子星表如图 4 所示。

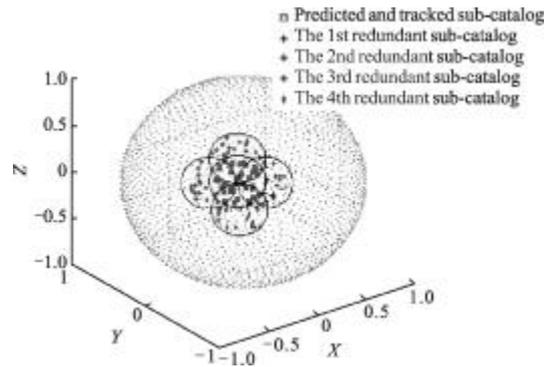


图 4 子星表示意图

Fig.4 Schematic diagram of sub-catalogs

导航星表的部分信息及参数如表 1 所示。

表 1 导航星表部分参数

Tab.1 Some parameters of guidance star catalog

Category	Size	Memory space/bit	Data type
Guide star information	$2\ 717 \times 5$	73 728	int(star No.) double(position)
k-vector table	$70\ 791 \times 1$	69 632	int
Star pattern (angular distance)	$70\ 791 \times 3$	794 624	Double(A.S.) Int(star No.)
Number of sub-catalogs	3 100		int
Number of guidance stars	Max: 46 Min: 23 Mean: 34.97	8 212 480	int
Pattern in sub-catalogs	Max: 927×3 Min: 427×3		int
Sub-catalog address	$3\ 100 \times 2$	4 096	int

根据参考文献[1]中的仿真条件:设飞行器相对惯性空间的角度沿矢量 $l = [\sqrt{2}/2, 1/2, 1/2]^T$ 以正弦规律 $\theta = (\pi/6)\sin(t)$ 变化时,采用四阶龙格库塔方法解四元数微分方程,得到飞行器的姿态四元数、预测星敏感器的视轴指向及预测跟踪的子星表地址结果如表 2 所示。

表 2 姿态及子星表地址的预测跟踪

Tab.2 Predicting and tracking of attitude data and address of sub-catalog

Time	True value of quaternion	Predicted value of quaternion	Boresight of star sensor/(°)		Sub-catalog addresses	
			R.A.	Dec.	R.A.	Dec.
0	(0.353 6, 0.250 0, 0.250 0, 0.866 0)	(0.353 6, 0.250 0, 0.250 0, 0.866 0)	62.27	38.67	38	13
T	(0.427 4, 0.302 2, 0.302 2, 0.796 0)	(0.427 6, 0.302 3, 0.302 3, 0.796 5)	65.89	26.84	34	16
...
7T	(0.295 9, 0.209 2, 0.209 2, 0.908 2)	(0.295 8, 0.209 2, 0.209 2, 0.908 3)	60.32	47.51	40	12
8T	(0.226 1, 0.159 9, 0.159 9, 0.947 5)	(0.225 6, 0.159 5, 0.159 5, 0.947 7)	58.55	57.91	44	9

随机设定 100 个时刻假定为星跟踪失败, 设外界因素对星敏传感器视轴指向造成的最大瞬时干扰为 $6.97^\circ(3\sigma)$, 等效角距测量误差为 1 像素, 单次最多识别星数 7 颗, 分别采用传统的全天识别方法和预测跟踪星表进行星图识别和姿态捕获, 实验结果显示两种方法识别率均能达到 100%, 图 5 为识别时间比较, 全天识别平均耗时约为 74.1 ms, 文中方法耗时约 14.2 ms, 仅为全天耗时的 19.2%, 星图识别效率的改善效果比较明显, 且数据输出率更加稳定。参考文献[1]中指出在最大角速度为 $30^\circ/s$ 的情况下, 通过姿态四元数实现已知导航星的跟踪, 而文中方

法在此基础上, 仍可以允许 6.97° 的最大瞬时干扰, 且可以比较迅速、准确地实现模式切换。

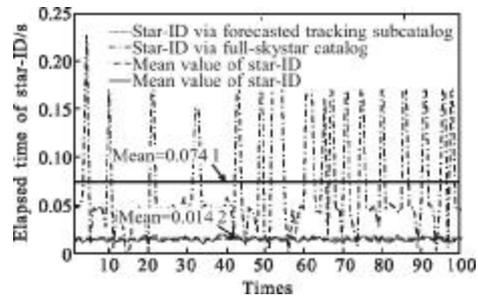


图 5 星图识别耗时比较

Fig.5 Elapsed time comparison of star-ID

另外, 与各种星跟踪方法^[1,3-5,9-10]相比, 文中方法最大的优点是不排斥星跟踪模式失败需要切换工作模式的可能, 而是在保证星跟踪模式一定的稳定性和成功率的基础上, 通过预测跟踪导航星表, 而不是某颗已知、未知的导航星或图像敏感器上的子窗口, 以随时做好切换工作模式的准备, 提高了当前研究较少的工作模式切换时的效率, 从而改善了星敏感器的实时性。

6 结 论

文中研究的基于预测跟踪星表以提高星敏传感器实时工作性能的方法, 能够充分利用导航系统的有效姿态信息, 通过构建“分层存储、逐层映射”结构的导航星表, 实现了根据基准点均匀化选取导航星及构建子星表, 索引映射的方式极大地提高了对导航星表数据搜索和处理时的效率; 依据当前时刻的姿态四元数信息预测下一时刻星敏传感器视轴指向下对应的子星表地址, 实现了高动态条件下, 已识别导航星、飞行器姿态与导航星表的并行跟踪, 以随时做好星跟踪模式失败后向全天识别模式的切换, 提高了模式切换的工作效率。理论分析和实验结果表明, 该方法能够有效提高在高动态条件下星敏传感器工作模式切换时的实时性。

参 考 文 献:

[1] Wang Changhong, Wu Zhihua, Li Baohua. Star tracking algorithm under large angular acceleration [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2010, 18(6): 706-710. (in Chinese)

- 王常虹, 吴志华, 李葆华. 一种大角加速度下的星跟踪算法[J]. 中国惯性技术学报, 2010, 18(6): 706-710.
- [2] Quan Wei, Liu Baiqi, Gong Xiaolin, et al. INS/CNS/GNSS Integrated Navigation Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)
全伟, 刘百奇, 宫晓琳, 等. 惯性/天文/卫星组合导航技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] Jiang Jie, Zhang Guangjun, Wei Xinguo, et al. Rapid star tracking algorithm for star sensor [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2009, 24(9): 23-33.
- [4] Li Baohua, Liu Guoliang, Liu Rui, et al. Key techniques of star sensors for celestial navigation [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1615-1620. (in Chinese)
李葆华, 刘国良, 刘睿, 等. 天文导航中的星敏感器技术[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(7): 1615-1620.
- [5] Li Baohua, Chen Xijun, Zheng Xunjiang, et al. Autonomous star tracking algorithm with high dynamic spacecraft [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 190-195. (in Chinese)
李葆华, 陈希军, 郑循江, 等. 星敏感器高动态下自主星跟踪算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 190-195.
- [6] Lu Jinghui, Wang Hongli, Sun Yuan, et al. Main star identification algorithm based on similar pattern vectors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(1): 164-168. (in Chinese)
陆敬辉, 王宏力, 孙渊, 等. 应用相近模式向量的主星星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 164-168.
- [7] Lu Jinghui, Wang Hongli, Sun Yuan, et al. Star pattern identification algorithm by triangle incircle [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 752-756. (in Chinese)
陆敬辉, 王宏力, 孙渊, 等. 三角形内切圆的星图识别算法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 752-756.
- [8] Carl Christian Liebe Leon, Alkalai G. Domingo, et al. Micro APS based star tracker [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002, 5: 2285-2299.
- [9] Malak A Samaan, Daniele Mortari, John L Junkins. Recursive mode star identification algorithms [J]. Journal of IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(4): 1-7.
- [10] Li Baohua, Ma Yanyu, Liu Rui, et al. A predictive centroiding algorithm of unmatched stars for star sensors[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 191-195. (in Chinese)
李葆华, 马衍宇, 刘睿, 等. 适用于星敏感器预测未知恒星星像质心算法 [J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 191-195.