

星敏感器高动态下自主星跟踪算法

李葆华¹, 陈希军¹, 郑循江², 泮宏梁²

- (1. 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;
2. 上海航天控制工程研究所, 上海 200233)

摘要: 当飞行器大角速度机动时, 采用传统的星跟踪算法来提取星像坐标时, 必须选取较大的扫描星图区域, 从而增加了区域内包含其它星像部分像元或全部像元的可能, 需要多次采用星对角距比较来选取正确的星像坐标, 因此, 在选取正确的星像坐标时增加了误匹配的可能。为此, 文中提出一种星敏感器高动态下自主星跟踪算法, 首先根据前邻时刻的瞬时姿态来预测下一时刻的输出姿态, 再利用预测姿态预测当前时刻恒星在下一时刻的星像坐标, 最后扫描在以预测的星像坐标为中心的星图范围内提取实际的恒星星像坐标。这样克服了采用传统星跟踪算法带来的数据更新率低、可能误匹配高甚至不能提取正确地星像坐标的缺点。最后, 采用该方法进行了仿真验证以及外场观星试验。

关键词: 天文导航; 星敏感器; 星跟踪算法; 星像预测

中图分类号: TH74 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0190-06

Autonomous star tracking algorithm with high dynamic spacecraft

Li Baohua¹, Chen Xijun¹, Zheng Xunjiang², Pan Hongliang²

- (1. Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Shanghai Aerospace Control and Engineering Institute, Shanghai 200233, China)

Abstract: The number of pixels scanned in star image can be large with conventional star tracking algorithm under large maneuvering of the vehicle. The feasibility of irrelevant star within threshold scan windows is increased. And the number of calculating angular separation between two stars is increased. This results in the decreasing of the update rate of star sensor. Therefore, the feasibility of error stars from star image is increased. Above all, an autonomous star tracking algorithm with high angle velocity was presented in this paper. Firstly, the next frame potential attitude was estimated according to previous attitudes. Secondly, the next frame ideal star centriodings of stars in FOV was calculated according to the potential attitude. Finally, all the real star centriodings would be obtained within the threshold scan windows of the ideal star centriodings. This algorithm can not only improve update rate of star sensor, but also avoid fault star pattern recognition. At last, the algorithm was tested by simulation and night sky experiment. The algorithm will be applied star sensor of satellite GNC.

Key words: celestial navigation; star sensor; star tracking algorithm; predictive star centrioding algorithm

收稿日期: 2011-05-15; 修订日期: 2011-06-22

基金项目: 国家 863 基金(2005AA745060); “十一五”共性技术(51320050301); 航天科工支撑基金课题

作者简介: 李葆华(1977-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为图像处理、模式识别、嵌入式控制、星模拟技术等方面。

Email: libaohua@hit.edu.cn

0 引言

星敏感器是一种高精度的飞行器姿态敏感测量仪器，它通过探测地球上不同位置的恒星来确定飞行器姿态，提供航天飞行器相对于惯性坐标系的三轴姿态^[1-3]。目前，很多学者提出各种全天球星图识别算法或者改进各种全天球星图识别算法来提高星敏感器数据更新率^[4-9]。这些算法虽然从某种程度上提高了姿态更新率，但是由于全天球星图识别前，必须从整幅星图中提取星像坐标，该过程占了整个全天球星图识别模式的绝大部分时间。随着像平面面阵的增大，每次提取星像坐标过程的时间也相应增加。然而宽视场、大面阵的像平面是新一代星敏感器的发展趋势。因此，完全从全天球星图识别算法考虑来提高星敏感器的姿态更新率必然受到限制。同时，由于全天球识别没有先验姿态信息，必须将观测星与整个导航星表进行对应匹配。所以星敏感器纯粹工作在全天球识别模式也增加了误识别的可能，降低了数据的可靠性。为了进一步提高星敏感器数据更新率，在有足够先验信息时，星敏感器工作在星跟踪模式下^[10]。

因飞行器应用任务的需求，须控制飞行器在短时间内进行大范围的快速姿态机动调整，在大角速度机动过程中，传统的飞行器姿态测量方法是应用速率陀螺测量飞行器绕各轴的转速，然后通过动力

学方程求解飞行器的姿态参数。然而，由于陀螺的姿态测量系统具有慢速漂移特性，所以求解的姿态参数必然存在一定的误差，往往不能满足当前飞行器高精度姿态控制的需求。而为了使星敏感器尽可能工作在星跟踪模式下，通常选取较大的扫描星图区域。如果增大扫描星图区域，那么在提取星像坐标过程中增加了扫描星图像元的数量，从而降低了数据更新率；同时由于增大的扫描星图区域，增加了区域内包含其它星像部分像元或全部像元的可能，因此需要多次采用星对角距比较来选取正确的星像坐标，在选取正确的星像坐标时增加了误匹配的可能。这种方法同样增加了处理器的计算量，从而降低了数据更新率。文中提出了一种星敏感器高动态下自主星跟踪算法，首先根据先验的姿态信息递推出下帧姿态，根据该姿态预测恒星在下帧的理想坐标，在以理想坐标为中心的范围提取相应实际坐标。从而满足无陀螺飞行器在大角速度机动时的高精度的控制要求。

1 算法描述

首先根据上帧预测的理想星像坐标来提取星图中相应实际星像坐标，其次采用提取的星像坐标计算当前帧的姿态，再次根据当前帧的姿态和上帧的姿态来预测下帧的姿态，最后采用预测的姿态预测当前帧视场内所有已知恒星在下帧的理想坐标，如图 1 所示。

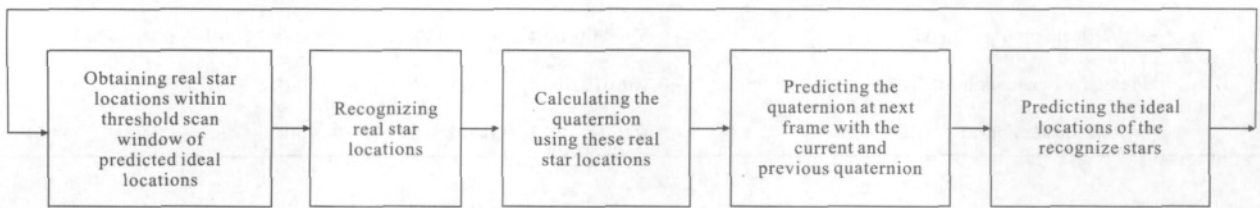


图 1 星敏感器高动态下自主星跟踪算法流程
Fig.1 Process of autonomous star tracking algorithm with high angle velocity

1.1 大角速度机动时星敏感器姿态的自主预测

令初始时刻 T_1 的姿态四元数为 q ，下一时刻 $T_1+\Delta T$ 的姿态四元数为 q'' 。按代数四元数的乘法顺序和乘法规则，计算出这两时刻之间的姿态机动四元数 q' 。

$$q' = q^{-1}q'' \quad (1)$$

从控制回路角度， q' 可视为现在姿态相对目标

姿态的四元数偏差。再根据四元数 q'' 和姿态机动四元数 q' 以及代数四元数的乘法顺序和乘法规则，那么 $T_1+2\Delta T$ 的姿态四元数 q''' 。

$$q''' = q'q'' \quad (2)$$

式中： $q=q_1i+q_2j+q_3k+q_4$ ， $q'=q'_1i+q'_2j+q'_3k+q'_4$ ， $q''=q''_1i+q''_2j+q''_3k+q''_4$ ， $q'''=q'''_1i+q'''_2j+q'''_3k+q'''_4$ 。

根据预测姿态结果可计算出 $T_1+\Delta T$ 时刻星敏感

器的光轴指向(A,D)以及星敏感器的滚动角 θ :

$$\begin{cases} A = \arctan \left(\frac{2(q''_2 q''_3 - q''_1 q''_4)}{2(q''_1 q''_3 + q''_2 q''_4)} \right) \\ D = \arcsin(-q''_1 q''_1 - q''_2 q''_2 + q''_3 q''_3 + q''_4 q''_4) \end{cases} \quad (3)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{-2(q''_1 q''_2 - q''_3 q''_4)}{-q''_1 q''_1 + q''_2 q''_2 - q''_3 q''_3 + q''_4 q''_4} \right) \quad (4)$$

式中: $A \in [0, 2\pi)$, $D \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\theta \in [0, 2\pi)$ 。

同理, 根据公式(1)和(2)的结果以及 $T_1 + \Delta T$ 时刻和 $T_1 + 2\Delta T$ 时刻的姿态信息, 可以预测 $T_1 + 3\Delta T$ 时刻的姿态信息。依次类推。

1.2 星敏感器视场内恒星星像坐标的预测

星像坐标的预测就是建立起恒星在星图中理想坐标(x,y)和天球坐标(α, δ , 即恒星在天球坐标系中的赤经和赤纬)的数学模型。根据星敏感器光学透镜成像原理, 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为:

$$\begin{cases} x = \frac{\cos\delta \sin(\alpha - A)}{\sin\delta \sin D + \cos\delta \cos D \cos(\alpha - A)} \\ y = \frac{\sin\delta \cos D - \cos\delta \sin D \cos(\alpha - A)}{\sin\delta \sin D + \cos\delta \cos D \cos(\alpha - A)} \end{cases} \quad (5)$$

表 1 飞行器在 0.95 (°)/s 时预测的姿态四元数

Tab.1 Predictive quaternion of star sensor with 0.95 (°)/s at time $T_1 + \Delta T$

	Quaternion ($q = qi + qj + qk + qs$)
Quaternion at T_1	(-0.346 983 134 7, 0.861 876 010 9, -0.356 333 077 0, -0.098 991 133 3)
Quaternion at $T_1 + \Delta T$	(-0.354 039 460 4, 0.859 045 922 8, -0.357 087 880 4, -0.095 835 015 2)
Predictive quaternion at $T_1 + 2\Delta T$	(-0.361 071 614 8, 0.856 157 186 3, -0.357 818 304 7, -0.092 672 354 5)
Real quaternion at $T_1 + 2\Delta T$	(-0.360 897 988 1, 0.856 160 521 5, -0.357 910 424 5, -0.092 961 743 5)

表 2 星敏感器某帧的预测星像坐标(单位:像素)

Tab.2 Predictive star locations in star image with 0.95 (°)/s at time $T_1 + \Delta T$ (Unit: pixel)

Stellar locations (x,y) at $T_1 + \Delta T$	Predictive stellar centroiding (x,y) at $T_1 + 2\Delta T$	Real stellar centroiding (x,y) at $T_1 + 2\Delta T$
(503.235, 235.880)	(476.670, 257.318)	(480.813, 252.017)
(490.709, 384.017)	(463.396, 399.097)	(469.373, 400.301)
(482.841, 227.724)	(456.549, 249.385)	(460.348, 244.054)
(494.896, 354.509)	(467.477, 370.804)	(473.317, 370.569)
(46.595, 348.423)	(24.346, 361.163)	(24.933, 367.639)
(225.671, 473.243)	(200.087, 482.409)	(204.832, 491.301)
(253.386, 343.171)	(229.031, 358.116)	(231.711, 361.007)

式中:(A,D)是理想坐标系中心(即光轴指向)在天球坐标系的指向。

如果图像平面坐标系与天球坐标系不可能完全平行, 根据星敏感器的滚动角 θ , 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为:

$$\begin{cases} x' = x \cos \theta - y \sin \theta \\ y' = x \sin \theta + y \cos \theta \end{cases} \quad (6)$$

2 试验结果及分析

2.1 实验室环境下仿真结果

为了评价文中算法, 从 SKY2000 星表中选取了星等在 0~5.5 中的 5 062 颗恒星作为导航星, 其中星图大小为 1 024 pixels×1 024 pixels, 星敏感器的视场为 20°×20°, 用 P 800 MHz 主频的微机, 在 Windows2000 环境下, 用 VC++6.0 工具进行实验。采用 Monte Carlo 方法随机产生星敏感器的光轴指向。任意选取某个视场内的测试结果, 如表 1~表 6 所示(表 1~表 3 是飞行器在 0.95(°)/s 的运行结果; 表 4~表 6 是飞行器在 2.25(°)/s 的运行结果)。

表 3 飞行器在 0.95 (°)/s 时提取星像坐标时扫描像元数量

Tab.3 The number of scanning pixels while obtaining star locations with 0.95 (°)/s

Algorithm	The number of scanning pixels
Conventional star tracking algorithm	252 00
Algorithm in this paper	1 575

表 4 飞行器在 2.25(°)/s 时预测的姿态四元数

Tab.4 Predictive quaternion of star sensor with 2.25 (°)/s at time $T_1+\Delta T$

	Quaternion ($q=q_0i+q_1j+q_2k+q_3$)
Quaternion at T_1	(-0.424 513 220 8, 0.826 667 845 2, -0.363 393 873 0, -0.065 983 951 1)
Quaternion at $T_1+\Delta T$	(-0.440 430 253 7, 0.818 190 276 6, -0.364 842 027 4, -0.058 961 018 9)
Predictive quaternion at $T_1+2\Delta T$	(-0.456 181 490 4, 0.809 404 698 1, -0.366 152 837 3, -0.051 915 889 10)
Real quaternion at $T_1+2\Delta T$	(-0.457 248 389 7, 0.808 919 727 8, -0.365 964 412 7, -0.051 408 078 5)

表 5 星传感器某帧的预测星像坐标(单位:像素)

Tab.5 Predictive star locations in star image with 2.25 (°)/s at time $T_1+\Delta T$ (Unit:pixel)

Stellar locations (x,y) at $T_1+\Delta T$	Predictive stellar centroiding (x,y) at $T_1+2\Delta T$	Real stellar centroiding (x,y) at $T_1+2\Delta T$
(511.185,214.421)	(453.189,256.533)	(452.993,256.740)
(530.526,478.353)	(494.269,208.900)	(494.368,211.963)
(591.886,350.477)	(536.395,390.908)	(533.220,386.706)
(86.001,216.747)	(28.109,265.984)	(33.080,259.263)
(513.089,362.820)	(457.843,404.777)	(455.418,398.858)
(516.825,310.486)	(460.615,352.352)	(458.832,353.559)

表 6 飞行器在 2.25 (°)/s 时提取星像坐标时扫描像元数量

Tab.6 The number of scanning pixels while obtaining star locations with 2.25 (°)/s

Algorithm	The number of scanning pixels
Conventional star tracking algorithm	135 000
Algorithm in this paper	1 350

2.2 外场试验结果

为了进一步验证文中所提出的方法,运用某星传感器对该方法进行了地面观星测试。外场观星测试结果如下:星传感器全天球识别成功后即进入星跟踪模式,之后,调整星传感器转台角速度为 0.967(°)/s 进行长时间转动,上位机实时接收星传感器输出的姿态信息并将该信息与实际姿态作差,利用 MATLAB 软件显示长时间运行后的作差的姿态信息曲线,如图 2 所示。调整转台的角速度到 2.217(°)/s,然后重复

上述过程,得到的姿态误差曲线如图 3 所示。

2.3 结果讨论

传统的星跟踪算法提取下一帧恒星星像坐标时,扫描星图中以上一帧的坐标为中心的星图局部范围内,当飞行器大角速度机动时,为了使星传感器尽可能工作在星跟踪模式下,通常选取较大的扫描星图区域。如果增大扫描星图区域,那么在提取星像坐标过程中增加了扫描星图像元的数量,随着角速度增大,扫描的区域面积越大,如表 3 所示,当飞行

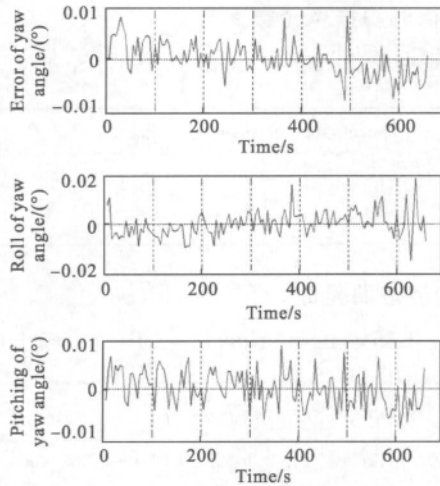


图 2 转台在 0.967 (°)/s 时试验结果

Fig.2 Test results of night sky experiment with 0.967 (°)/s

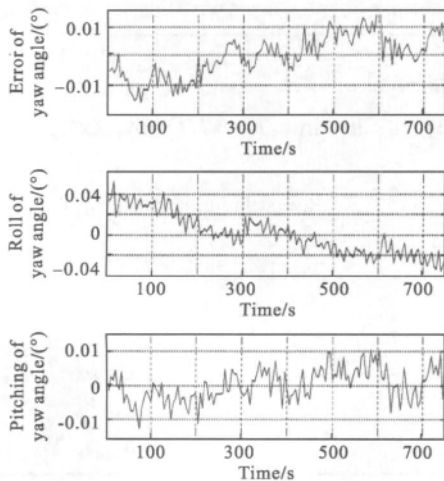


图 3 转台在 2.217 (°)/s 时试验结果

Fig.3 Test results of night sky experiment with 2.217 (°)/s

器在 0.95 (°)/s 的角速度转动时,扫描的像元总数为 252 000。表 6 中当飞行器在 2.25 (°)/s 的角速度转动时,扫描的像元总数为 135 000。而文中算法采用先预测恒星的星像坐标,再在预测的星像坐标为中心范围内提取相应的实际星像坐标。因此,在提取实际的星像坐标时,只需扫描星图中较小的区域,如表 3 和表 6 所示, $T_1+2\Delta T$ 时刻预测星像坐标与 $T_1+\Delta T$ 时刻实际星像坐标距离只有 5 个像素,提取正确的星像坐标时,选取扫描星图区域的半径 R 小于 15。从表中可以看出,采用该方法只需扫描 1 575 个像元就能正确提取星像坐标(即 $225 \times n$ 个像元。其中 n 为视场内已知恒星的数目)。所以该方法能够克服传统星跟踪算法的缺点。

3 结 论

为了进一步提高星敏传感器数据更新率,在有足够先验信息时,星敏传感器工作在星跟踪模式下。传统的星跟踪算法提取下一帧恒星星像坐标时,扫描星图中以上一帧的坐标为中心的星图局部范围内。当飞行器大角速度机动时,为了使星敏传感器尽量能工作在星跟踪模式下,一般尽可能地选取较大的扫描星图区域。如果增大扫描星图区域,那么在提取星像坐标过程中增加了扫描星图像元的数量,从而降低了数据更新率;同时由于增大了扫描星图区域,增加了区域内包含其它星像部分像元或全部像元的可能,因此需要多次采用星对角距比较来选取正确的星像坐标,在选取正确的星像坐标时增加了误匹配的可能。这种方法同样增加了处理器的计算量,从而降低了数据更新率。文中提出的一种星敏传感器高动态下自主星跟踪算法,首先根据先验的姿态信息递推出下帧姿态,根据该姿态预测恒星在下帧的理想坐标,以理想坐标为中心的范围提取相应实际坐标。因此该方法提取星像坐标过程中,不会随着飞行器角速度增大而增加,克服了传统星跟踪算法的缺点,具有很好的鲁棒性。

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] Mortari D. Search-less algorithm for star pattern recognition [J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1997, 45(2): 179-194.
- [4] Wang Chen, Wang Hongqiang, Chen Minghua, et al. Effect of image processor's noise on magnitude sensitivity of star sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 858-862. (in Chinese)
王辰,王宏强,陈明华,等.成像器噪声对星敏传感器星等灵敏度的影响[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 858-862.
- [5] Scholl M S. Star field identification algorithm-performance verification using simulated star field [C]//SPIE, 1993, 2019: 275-290.

- [6] 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.
- [7] Li Baohua, Zhang Yingchun, Li Huayi, et al. Star map recognition method of star sensor using KMP algorithm[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(1): 9-11.
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.
- [8] Liu Zhaoshan, Huang Xin, Liu Guangbin. A convex polygon star pattern identification algorithm for celestial guidance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 7-10.
刘朝山, 黄欣, 刘光斌. 凸多边形星图识别算法[J]. 光电工程, 2004, 31(9): 7-10.
- [9] Li Deliang, Ruan Jin. Method adapting to the star sensor's star extraction[J]. *Laser and Infrared*, 2009, 39(12): 1348-1350.
李德良, 阮锦. 一种适用于星敏感器的星点提取方法[J]. 激光与红外, 2009, 39(12): 1348-1350.
- [10] Li Baohua, Zhang Yingchun, Li Huayi, et al. A star tracking algorithm suitable for star sensor [C]//The 6th Asia-Pacific Conference Fundamental Problems of Opto-and Microelectronics, 2006.

下期预览

空间锥形目标的红外成像仿真

李 阳, 赵 菲, 张志勇, 张 路, 卢焕章

(国防科学技术大学 ATR 国防科技重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 由于应用需求的驱使, 红外成像仿真技术越来越受到国际社会的关注, 并已成为现代国防科技的关键技术之一。针对深空背景条件下的锥形目标, 可利用结点热网络法求解其表面温度分布, 然后计算目标与背景的红外辐射, 再将探测器接收的辐射照度转化为灰度, 并加入探测器自身效应的影响, 最后就可仿真得到锥形目标不同成像状态的图像。此方法完整地实现了空间锥形目标在红外探测器上的成像过程, 同时考虑了多种因素的影响, 具有很高的真实性与逼真度, 可为红外成像系统的研制及目标检测识别算法提供测试场景与依据。