

文章编号 1004-924X(2015)05-1443-07

用于快速星跟踪的双向递推匹配识别

李欣璐^{1*}, 杨进华¹, 张 刘², 金 光², 支 帅^{2,3}

- (1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 针对星敏感器跟踪过程的稳定性对星敏感器整体性能的影响, 讨论了如何利用跟踪过程中前后两帧星图上的星点位置信息进行匹配识别的问题。为了使跟踪过程具有较高的稳定性, 分析了现有星跟踪过程中匹配识别方法的优缺点, 提出用“先排序后双向递推匹配”的方法来获得在“参考星邻域内出现多颗观测星”时的成功匹配能力, 从而增加每一帧快速星跟踪时被成功跟踪恒星的数目; 同时通过引入先确定视场边缘区域, 再选取有效参考星进行匹配的思想, 有效地减小误匹配发生概率, 进而保证匹配的有效性。在外场对某星敏感器从初始姿态运动到最终状态的跟踪进行了实验, 对蒙特卡洛法生成的全天球 100 个视轴方向进行星跟踪的对比分析结果表明: 在姿态运动角速度较大时, 利用本文提出的匹配识别方法, 平均可实现约 91.44% 的快速星跟踪; 而利用相应的对比方法, 平均只能实现 77.18% 的快速星跟踪。分析显示本文提出的匹配识别方法具有重要的工程应用价值。

关键词: 星敏感器; 星跟踪; 星图识别; 跟踪算法; 匹配识别

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1443

Bidirectional selective rule out matching recognition of fast star tracking

LI Xin-lu^{1*}, YANG Jin-hua¹, ZHANG Liu², JIN Guang², ZHI Shuai^{2,3}

- (1. School of Opt-electronics Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
 2. National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)
- * Corresponding author, E-mail: lixinlu1986@126.com

Abstract: In consideration of the effect of stability of star tracking processing on its overall performance, how to track the stars in the current visual field according to the star information identified in the previous moment is discussed. To obtain a higher stability in star tracking, the advantages and disadvantages of existing star tracking algorithms are analyzed, and the method of "sorting before bidirectional selective rule out matching" is proposed. The first step selects the effective reference star on the basis of determining the marginal area of the FOV (Field of View), which effectively reduces the probability of mismatching and ensures the validity of matching.

收稿日期: 2014-05-21; 修订日期: 2014-06-10.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 61008046)

Following that it uses bidirectional recurrence idea to obtain the successful matching capacity that “there are more observation stars within the neighborhood of the reference star”, so as to increase the number of stars successfully tracked in each frame of rapid star tracking. A tracking experiment was performed in a outdoor field for a star sensor. The comparison experiments on start tracking in 100 directions generated by Monte Carlo method show that when the attitude movement has a very large angular velocity, the proposed method can achieve about 91.44% fast star tracking. However, it just is 77.18% by other traditional methods. The proposed method has a significance to improve the overall performance of the star sensor.

Key words: star sensor; star tracking; star pattern recognition; tracking algorithm; matching recognition

1 引言

作为天文导航系统的主要设备,星敏感器是一种以恒星作为测量对象的高精度飞行姿态测量装置。它通过观测恒星来确定航天器姿态,具有体积小、精度高、自主性强等优点,在航天领域应用非常广泛^[1-2]。星敏感器包含两个工作模式^[3-4],初始姿态捕获模式和跟踪模式。在正常工作状态下,星敏感器绝大部分时间均处于跟踪模式,即跟踪模式是星敏感器的主要工作模式,故跟踪的稳定性是星敏感器主要的性能指标。星跟踪过程中一个很重要的问题是如何利用前后两帧星图上星点的位置信息进行匹配识别。

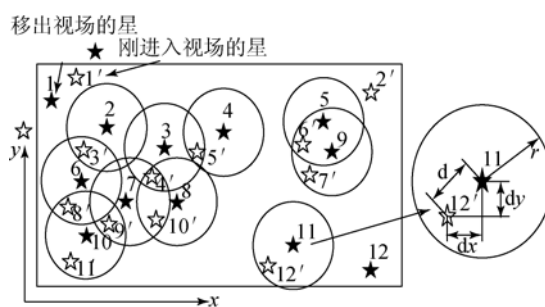
目前,国内外星跟踪过程中匹配识别环节主要采用基于窗口形式的跟踪方法^[5-7]。这种方法根据前一时刻跟踪到的星体位置信息来估计当前时刻星体可能的位置,并用一定形式的窗口去捕获星点数据,如果捕获到唯一一颗星,则认为该观测星是和上一帧对应位置的观测星是同一颗星。但这类算法受图像传感器和信号处理单元之间接口速度的限制,不能传输太多的星点数据,另外,跟踪过程采用子窗口方式驱动图像传感器也增加了图像传感器驱动逻辑的复杂性;而采用卡尔曼滤波算法虽然可以提高跟踪准确性,但同时也提高了计算复杂度,不利于快速跟踪。针对星敏感器对星跟踪的要求,文献[8-9]在星跟踪过程的匹配环节中提出先排序后匹配的方法。该方法虽然减少了星跟踪过程中匹配识别的比较次数,但能否成功识别观测星的判定条件比较苛刻,当有且只有一颗观测星位于参考星的邻域时,才认为观测星图中这颗观测星被成功识别,若参考星邻域内出现一颗以上观测星时,则认为识别失败。由于这样会导致每次被跟踪的恒星数量减少,故在快速星跟踪过程中极易出现跟踪失败的情况。同

时,该方法未考虑由于新进入视场的恒星引起的误匹配,从而会严重影响跟踪算法的稳定性。

本文通过分析以上匹配识别方法的优缺点,提出“先排序后双向递推匹配”方法。该方法首先在确定视场边缘区域的基础上选取有效参考星,从而减小了误匹配发生的概率,进而保证了匹配的有效性。然后,利用双向递推思想可在“参考星邻域内出现多颗观测星”时成功匹配,从而可增加每一帧快速星跟踪时被成功跟踪恒星的数目。

2 视场边缘区域确定

为方便说明快速星跟踪过程中的匹配识别方法,本文在后面的论述中,均假设跟踪过程中的第 k 帧及其以前帧星图的识别结果为已知,这里是对当前第 $(k+1)$ 帧的观测星图进行跟踪识别,如图 1 所示。



dx : 两颗星 x 坐标的差值; dy : 两颗星 y 坐标的差值; r : 邻域半径; d : 两颗星之间的距离; \star : 参考星图中的导航星; \star : 观测星图中的导航星

dx : Difference of x -coordinates; dy : Difference of y -coordinates; r : Neighborhood radius; d : Distance between two stars; \star : Reference stars; \star : Observation stars

图 1 星跟踪中观测星与导航星的对应匹配

Fig. 1 Matching of navigation stars and observation stars in star tracking

星传感器在实际工作过程中,由于平台姿态运动,将导致在星传感器视场边缘区域的恒星“不稳定”,即这些恒星可能是刚进入视场的,也可能在下一帧星跟踪时移出视场^[10]。因此,为保证成功匹配的有效性,视场边缘区域出现的参考星不应参与匹配识别。首先要根据星传感器具体工程约束条件,确定视场边缘区域。图 2 为星传感器每一帧视场边缘区域变化的极限情况, O 是星传感器像空间坐标系的原点, O' 是像面中心点。当星传感器像平面绕着 OZ 轴旋转时,点 A 为星传感器前后两帧成像区域差别最大处。

假定星传感器的积分时间是 t_0 ,像平面尺寸是 $N \text{ pixel} \times N \text{ pixel}$,姿态运动角速度是 ω ($^\circ/\text{s}$),则:

$$\theta = \omega t_0, \quad (1)$$

$$L = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot N \cdot \tan(\theta). \quad (2)$$

若在保证匹配识别的有效性,参与匹配识别的恒星在前后两帧成像过程中,应始终位于星传感器的视场范围内。因此,定义距离视场边缘 $L \text{ pixel}$ 以内的区域为视场边缘区域,在该区域出现的参考星不参与匹配识别。

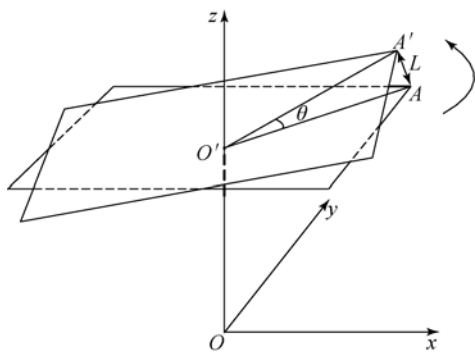


图 2 星传感器相邻两帧视场区域变化示意图

Fig.2 Schematic diagram of visual field area changes in adjacent frame images of star sensor

3 匹配识别

在实际星跟踪的过程中,参考星邻域内出现一颗以上观测星的概率非常大,如图 1 所示。若采用文献[8-9]的识别方法,星图中只有 5 对星被成功识别(1-1',2-3',4-5',5-6',11-12'),其中 1-1' 星对是误匹配(1 号参考星在当前时刻已经移出视场,而在 1 号参考星邻域内有且仅有

一颗刚进入视场的 1' 号观测星,此时将误认为 1 号参考星与 1' 号观测星匹配成功)。

经过深入分析参考星与观测星在星图中的位置关系后,可以看出,当 5 号参考星与 6' 号观测星成功匹配时,9 号参考星的邻域内可视为仅有一颗 7' 号观测星,即 9 号参考星可与 7' 号观测星成功匹配;当 4 号参考星与 5' 号观测星成功匹配时,3 号参考星邻域内可视为仅有一颗 4' 号观测星,即 3 号参考星可与 4' 号观测星成功匹配。按照上述双向递推思想继续进行跟踪识别后,星图中增加了成功识别的 6 对星(3-4',6-8',7-9',8-10',10-11',9-7')。

基于以上分析,本文提出“先排序后双向递推”的快速星跟踪匹配方法。该方法通过先确定视场边缘区域,并选取有效参考星参与匹配识别,故可避免由于新进入视场的恒星引起的误匹配,从而提高了星跟踪算法的有效性;然后利用双向递推思想进行匹配识别,大大提高了每一步被跟踪匹配的恒星数目。具体匹配识别过程如下:

(1)将两幅星图中的星点按照 X 坐标升序排列,坐标系是以视场图像的左下角为坐标原点,X、Y 轴分别平行于图像的两边,图 3 所示的是图 1 中两幅星图的排序。

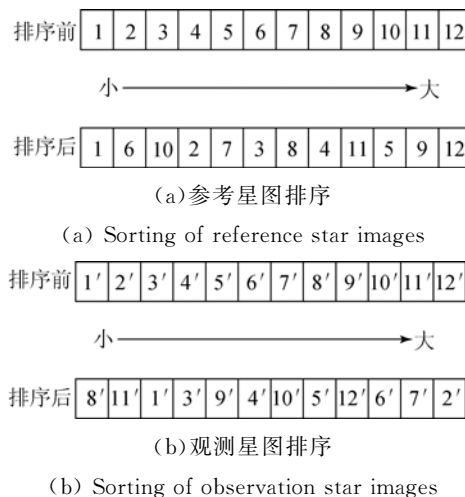


图 3 第 $k+1$ 帧参考星图和观测星图的排序

Fig.3 Sorting of reference and observation star images in the $(k+1)$ -th frame

(2)将排序后的第 $k+1$ 帧参考星图和其观测星图分别记为参考星序列和观测星序列。对每颗参考星分别设置匹配数量状态标识(该状态标识

代表参考星邻域内出现观测星的数量)和边缘状态标识(该状态标识代表参考星出现在视场中的位置,用于判断参考星是否出现在视场边缘区域)。在进行匹配识别前对其状态标识均设置为零,如图 4 所示。

边缘	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
匹配数量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
参考量序列	1	6	10	2	7	3	8	4	11	5	9	12
观测量序列	8'	11'	1'	3'	9'	4'	10'	5'	12'	6'	7'	2'

图 4 参考星、观测星序列的初始状态

Fig. 4 Initial state of reference star and observation star sequences

(3)依次判断参考星序列中每颗星是否出现在视场中的边缘区域,若参考星出现在视场边缘区域,则将此参考星对应的边缘状态标识设置为零;若参考星未出现在视场边缘区域,则将此参考星对应的边缘状态标识设置为 1,如图 5 所示。边缘状态为零的参考星不进行匹配识别。

边缘	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
匹配数量	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
参考量序列	1	6	10	2	7	3	8	4	11	5	9	12
观测量序列	8'	11'	1'	3'	9'	4'	10'	5'	12'	6'	7'	2'

图 5 对出现在视场边缘区域的参考星进行标记

Fig. 5 Marking of reference stars appearing in edge area of visual field

(4)为减少计算量,提高计算速度,且保证成功匹配后的有效性,这里不比较两颗星的距离 d ,而是比较坐标差值 dx (X 坐标差值)、 dy (Y 坐标差值),公式如下:

$$dx = |x - x'|, dy = |y - y'|. \quad (3)$$

(5)以参考星序列的 3 号星和观测星序列匹配为例,如图 6 所示。参考星序列的 3 号星和观测星序列的比较是从 9'号星开始的,9'号星是在参考星序列的 7 号星和观测星序列比较时,首先使 dx 小于 r 的观测星序列的星。也就是说,7 号星和 9'号星前面的 1'、3'号的 dx 值大于 r 。由于

是升序比较,那么 7 号星后面的 3 号星和 1'、3'号的 dx 值必然也大于 r ,因此 3 号星没有必要再和它们比较了。以此类推,参考星序列的 8 号星和观测星序列的比较是从 4'号星开始的。

(6)在比较时,如果 3 号星和观测星序列的星 dx 小于 r ,则继续和观测星序列的下颗星比较。本例中 3 号星将依次和 9'、4'、10'、5'、12'号星进行比较。

(7)在 3 号星和 12'号星比较时,若发现两颗星的 dx 值大于 r ,则 3 号星停止和观测星序列比较,因为是升序比较,3 号星和 12'号星后面的 6'、7'、2'号星的 dx 值必然也大于 r ,因此,没有必要再进行比较。

(8)在 3 号星和观测星序列比较的过程中,其与 4'、5'号星的 dx 、 dy 值同时小于 r ,即在 3 号星的邻域内出现了两颗观测星,此时,将 3 号星的匹配数量状态标识设置为 2。

边缘	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
匹配数量	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
参考量序列	1	6	10	2	7	3	8	4	11	5	9	12
观测量序列	8'	11'	1'	3'	9'	4'	10'	5'	12'	6'	7'	2'

---- 进行匹配识别的观测星
 ---> 满足关系($dx, dy < r$)的观测星

图 6 参考星序列的 3 号星和观测星序列匹配

Fig. 6 Matching between star 3 in reference star sequence and observation star sequence

(9)在匹配过程中,若参考星与观测星成功匹配,则参考星的匹配数量状态标识设置为 1,并将匹配成功的观测星进行“锁定”,即在之后的匹配过程中,若该观测星出现在其他参考星的邻域内,可将此观测星“删除”,此时,其他参考星所对应的匹配数量状态标识相应的减 1。如图 7 所示,当 5 号参考星与 6'号观测星成功匹配时,将 6'号观测星进行“锁定”,在之后的 9 号参考星匹配过程中,其邻域内出现 6'、7'号观测星,由于 6'号观测星已经被“锁定”,故可视为 9 号参考星的邻域内仅有一颗 7'号观测星,即 9 号参考星可与 7'号观测星成功匹配,同时,将 9 号参考星所对应的匹配数量状态标识相应的减 1。

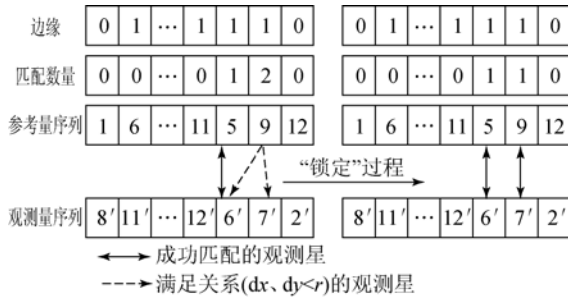


图 7 观测星的“锁定”过程

Fig. 7 “Locking” process of observation star

(10)根据递推思想,将参考星序列和观测星序列进行比较,完成正向递推匹配识别,如图 8 所示。

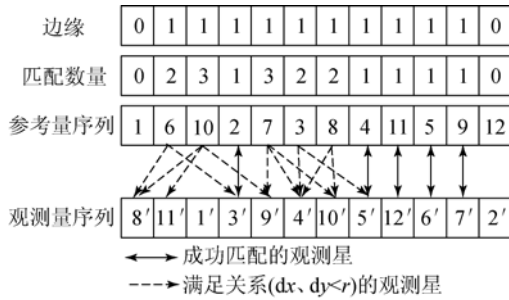


图 8 正向递推匹配识别

Fig. 8 Positive recurrence matching identification

(11)以参考星序列中最后一颗成功匹配的参考星为基准进行逆向递推匹配,将与其成功匹配的观测星进行“锁定”,即该观测星若出现在其他参考星的邻域内,可视为“删除”,此时,其他参考星所对应的匹配数量状态标识相应的减 1。根据递推思想,完成逆向递推匹配识别。此帧观测星图最终的匹配识别结果如图 9 所示。

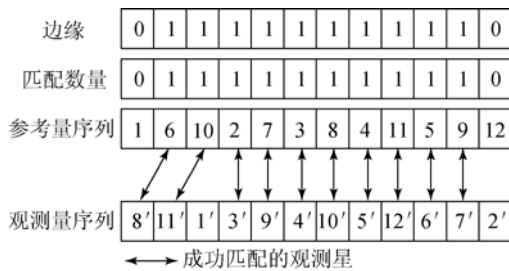


图 9 观测星图匹配识别结果

Fig. 9 Matching identification results of observation star images

(12)在匹配过程中,为使编程计算量更小,将匹配数量状态标识和边缘状态标识数组进行按位“与”计算,若结果为 1,则认为匹配成功。

采用“先排序后双向递推匹配”识别方法,不仅减少了无谓的比较,而且排除了由于新进入视场的星引起的误匹配,最重要的是大大提高了每一步被跟踪匹配的恒星数目,进而提高了跟踪算法的稳定性。

4 实验与结果分析

为验证本文提出的匹配识别算法的稳定性,对工程中某型号星敏传感器从初始姿态运动到最终状态进行跟踪实验,星敏传感器成像系统参数如表 1 所示。

表 1 星敏传感器模型参数

Tab. 1 Parameters of star sensor model

Parameters	Parameter values
FOV/(°)	23×23
Pixel elements/pixel	2 048×2 048
Focal length/mm	40
Pixel size/μm	8
Uncertainly of location/(')	1
Angular distance error threshold/(')	3
Magnitude of error threshold	0.75

利用蒙特卡洛法随机选取 100 个视轴方向,在每个视轴指向下,仿真跟踪过程分 80 步进行,每步都会根据当时的姿态产生一幅星图,利用其参考星图对此观测星图进行跟踪识别,以求出此时星敏传感器的姿态(与这一步的姿态对比,可以验证跟踪的正确性)。设置星敏传感器积分时间为 0.1 s,邻域半径 r 是 50 pixel,根据方程(1)、(2)确定视场边缘区域为距离视场 26 pixel 以内的区域。在姿态运动角速度分别为 0.2 (°)/s 和 10 (°)/s 时进行快速星跟踪,比较两种快速星跟踪算法性能。图 10、图 11 为一典型的视轴指向下两种快速星跟踪算法仿真对比结果。

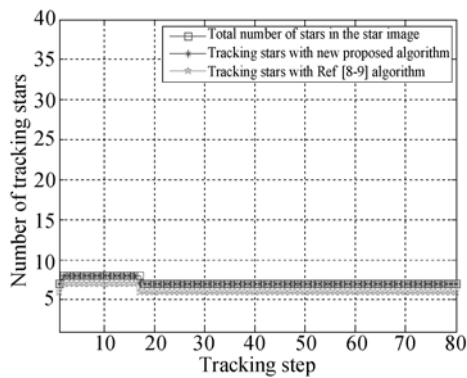


图 10 姿态运动角速度为 $0.2 (^{\circ})/s$ 时,两种快速星跟踪算法性能比较

Fig. 10 Performance comparison of two tracking algorithms at attitude movement angular velocity of $0.2 (^{\circ})/s$

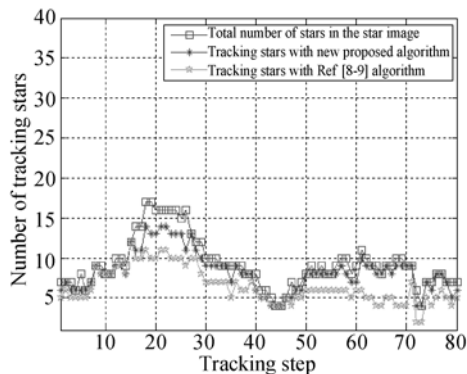


图 11 姿态运动角速度为 $10 (^{\circ})/s$ 时,两种快速星跟踪算法性能比较

Fig. 11 Performance comparison of two tracking algorithms at attitude movement angular velocity of $10 (^{\circ})/s$

由图 10、11 可以看出,在该视轴方向上,当姿态运动角速度较小时,本文提出的匹配识别方法对每一步观测星图中出现的恒星可以达到近 100% 的跟踪,保证了星跟踪算法的精度要求;而

利用文献[8-9]的方法,只能对 85.9% 的恒星进行跟踪。在姿态运动角速度较大时,利用本文提出的匹配识别方法,可对每一步观测星图中 90.4% 的恒星进行跟踪,而利用文献[8-9]的方法,只能对 70.9% 的恒星进行跟踪。但在整个跟踪过程中,出现了连续两步跟踪星数目为 2 的情况,从而认定快速星跟踪失败,需进入全球星图识别环节。这严重影响了星跟踪过程的实时性和星敏感器的整体性能。

对采用蒙特卡洛法生成的全星球 100 个视轴方向进行星跟踪的对比分析统计显示,当姿态运动角速度较小时,利用本文提出的匹配识别方法,平均可实现 99.88% 的快速星跟踪,而利用文献[8-9]的方法平均只能实现约 90.86% 的快速星跟踪;在姿态运动角速度较大时,利用本文提出的匹配识别方法,平均可实现约 91.44% 的快速星跟踪,而利用文献[8-9]的方法,平均只能实现 77.18% 的快速星跟踪,由此可见,本文提出的匹配识别方法具有重要的工程应用价值。

5 结 论

本文立足于工程应用中的实际问题,通过深入分析现有快速星跟踪过程中匹配识别方法,提出了先排序后双向递推的匹配识别方法。外场实验表明,该方法在姿态运动角速度很大的情况下,仍具有较高的跟踪精度和跟踪速率,同时,可有效避免由于新进入视场的恒星引起的误匹配,进而提高了星敏感器的整体性能。

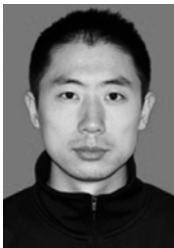
参考文献:

- [1] 魏新国,徐佳,张广军. 星敏感器质心定位的 S 曲线误差补偿[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(4): 849-857. WEI X G, XU J, ZHANG G J. S-curve error compensation of centroiding location for star sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 849-857. (in Chinese)
- [2] 江帆,吴清文,刘巨,等. 低轨道轻质星载一体化空间光学遥感器的热设计[J]. 中国光学, 2013, 6(2): 237-243.

- JIANG F, WU Q W, LIU J, *et al.*. Thermal design of lightweight space remote sensor integrated with satellite in low earth orbit [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 237-243. (in Chinese)
- [3] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1992, 7(6): 34-41.
- [4] 魏新国,王清龙,李健,等. 星敏感器和遥感相机主光轴交联角的在轨检校[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(2): 274-280.

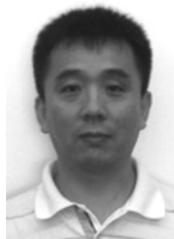
- WEI X G, WANG Q L, LI J, *et al.*. On-orbit calibration for cross-angle between optical axes of star sensor and remote sensing camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(2): 274-280. (in Chinese)
- [5] LAHER R. Attitude control system and star tracker performance of the wide-field infrared explorer spacecraft [J]. *American Astronomical Society, AAS 2000*, 145: 723-751.
- [6] 陈雪芹, 耿云海, 王峰, 等. 敏捷小卫星对地凝视姿态跟踪控制 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(5): 1031-1040.
- CHEN X Q, GENG Y H, WANG F, *et al.*. Staring imaging attitude tracking control of agile small satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 1031-1040. (in Chinese)
- [7] SAMMAN M A. *Toward faster and more accurate star sensors using recursive centroiding and star identification* [D]. Texas: Dept Texas A & M University, 2006.
- [8] JIANG J, LI X, ZHANG G J, *et al.*. Fast star tracking technology in star sensor [J]. *Proc. SPIE*, 2006: 6358, 63580A.
- [9] JIE J, ZHANG G J, WEI X G, *et al.*. Rapid star tracking algorithm for star sensor [J]. *IEEE A & E Systems Magazine*, 2009, 24(9): 23-33.
- [10] 徐伟, 朴永杰. 从Pleiades剖析新一代高性能小卫星技术发展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(1): 9-19.
- XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 9-19. (in Chinese)

作者简介:



李欣璐(1986—),男,吉林长春人,博士研究生,2009年于长春理工大学获得学士学位,主要从事卫星自主导航技术、星图识别算法等方面的研究。
E-mail: lixinlu1986@126.com

导师简介:



杨进华(1969—),男,山西孝义人,教授,博士生导师,1990年于西安电子科技大学获得学士学位,1997年于北京理工大学获得硕士学位,2001年于长春光学精密机械学院获得博士学位,主要从事光电测试和视觉检测方面的研究工作。E-mail: yangjh@cust.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)