星图匹配观测三角形优化选取技术

李欣璐[1]，杨进华[1]，张 刘[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：为了提高三角形星图识别算法的成功率，减少匹配过程中的计算量，进而提高星敏感器实时输出姿态的性能，提出一种星图匹配前“二次优化”选取观测三角形方法，该方法在在初选观测三角形的基础上，对观测三角形进行第二次优化筛选，进而提高星图识别环节的效率。优化选取观测三角形是基于 QUEST 定姿原理，将观测三角形的边与夹角的约束关系转换到像平面上。全天球遍历分析统计结果表明：在 12° ×12°视场中，采用本文提出的方法，可使一次匹配成功并输出可用于星图验证环节的较高精度姿态信息的概率提高 60.9%，从总体上可大大减少星敏感器星图识别环节的计算量，并且每帧全天球定姿输出的时间一致性也被大大提高。

关键词：星敏感器；星图识别；观测三角形；优化方法
中图分类号：V448.22 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-1328(2015)01-0076-06
DOI：10.3873/j.issn.1000-1328.2015.01.010

Further Optimization of Selected Observation Triangles Technique Before Star Pattern Matching

LI Xin-lu[1], YANG Jin-hua[1], ZHANG Liu[2], ZHI Shuai[2,3]
(1. The School of Opt-electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 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, Jilin 130033, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A new secondary optimization of selected observation triangles algorithm before star pattern matching is proposed to improve the success rate of the triangle-based star pattern identification algorithm, to reduce the computational complexity of the matching process, and to improve the performance of the star sensors for providing real-time attitudes. The originally selected observation triangles are optimized again before matching and verification to improve the efficiency of star pattern identification. The observation triangles are optimized according to the Quarternion Estimation (OUEST) attitude determination principle, and the constraints with respect to the observation triangle edges and included angles are converted to the image plane. Statistical results of ergodic analysis of the whole celestial sphere show that in the 12 ° × 12°FOV, the proposed method can improve the success rate of 60.9% that the match is established at the first attempt and the accurate attitude information for is provided star pattern verification. Meanwhile, our method can also significantly reduce the overall computational complexity of star pattern identification for star sensors and enhance the temporal consistency of the output attitude for the whole celestial sphere in each frame.

Key words: Star sensor; Star pattern recognition; Observation triangle; Optimization algorithm

收稿日期：2014-04-21； **修回日期**：2014-06-17
基金项目：国家自然科学基金项目(61008046)

0 引 言

星敏感器是一种高精度、高可靠性的空间姿态测量仪器,它通过观测恒星来确定航天器姿态,在航天领域应用非常广泛[1-2]。星敏感器工作原理为:图像传感器拍摄当前视场范围内的星空图像,提取拍摄星点在观测视场中的位置和亮度信息,并由星图识别算法在导航星库中搜索与观测星对应匹配的导航星,最后利用这些匹配星对在空间坐标系中的方向矢量信息计算出星敏感器的三轴姿态[3-4]。

在星敏感器刚刚进入工作状态的初始时刻或者由于故障遇到姿态丢失的情况下,星敏感器需要对初始姿态进行捕获,这是自主导航星敏感器研究的重点和难点[5-6]。目前,实际工程中主要以 Liebe 和 Quine 研发的三角形星图识别算法为主,从而确定姿态。三角形星图识别算法以全等三角形原理为匹配识别标准。如何选取观测三角形进行星图识别和建立适合三角形算法的导航星特征库是解决"太空迷失"问题的关键技术,同时也是近年来各国学者的研究重点。文献[7]提出采用存储星对角距的形式来实现三角形匹配,理论上,N 颗导航星可以组成 $N(N-1)/2$ 个星对角距,要远小于可能组成的导航三角形的数目,这将直接减小导航星特征库存储容量和冗余匹配次数,缩短匹配时间等问题。

Quine 等和 Kruijff 等[8-9]针对如何选取合适的观测星组成三角形进行星图识别,提出不同的选取原则,Quine 等[8]认为每颗观测星只需一个三角形即可,其观测三角形选取的原则:将观测星 S_1 作为三角形的第一颗星,在一个较小邻域半径(内径) r 和较大的邻域半径(外径) R 之间的区域选取最亮的和次亮的两颗观测星 S_2 和 S_3 作为三角形的另两颗星来构成观测三角形,如图 1 所示。采用这种方法,N 颗观测星只需要 N 个观测三角形,减少了匹配次数,缩小了识别时间。但观测星位置靠近视场边缘时,观测三角形极有可能选择错误而导致错误的识别。

Kruijff[9]在 Liebe 和 Quine 三角形算法的基础上提出一种 Douma/DUDE (Delta-Utec Douma Extension)算法,该算法选取观测三角形的原则:将每颗观测星赋予一个概率值,该概率值与测量得到的星等信息有关,具有最大概率值的观测星被挑选

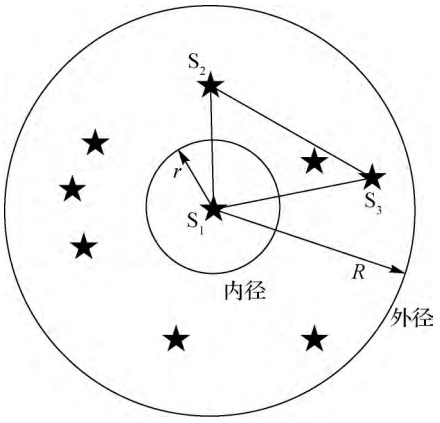


图 1　Quine 三角形

Fig. 1　Quine triangle

的可能性最大,同理,具有最大出现概率的三角形会被优先选择。Douma/DUDE 算法中在构造观测三角形的时候还考虑到观测星在视场中的位置(是否靠近边缘)对识别的影响。Douma/DUDE 算法虽在观测三角形的挑选上更加合理一些,但是由于需要比较准确的亮度信息,因此其在实际应用中也受到一定的局限。

文献[10]在此基础上,优先选取视场中最亮的星构成观测三角形,其原则与 Quine 等和 Kruijff 等[8-9]的类似。但有所不同的是,这里并不是选取唯一一个观测三角形来进行识别,而是从中选取数量为 N_B 的一组亮星,任意组成观测三角形,优先选取最亮的星构成的观测三角形进行识别。如果某一观测三角形组合识别失败,则按顺序选取剩余的观测三角形组合来进行识别,若识别成功,则利用已识别的观测星信息解算出星敏感器当前的姿态进行验证。文献[10]给出的观测三角形选取方法是目前最经典的方法之一,但由于在实际情况中,所选取的 N_B 颗观测星中可能存在双星或者其中三颗亮星在视场中的位置近似成一条直线的情况,这将导致用于星图识别验证环节的实时姿态解算误差较大,为提高一次匹配成功即可输出可用于星图验证环节的较高精度姿态信息的能力,本文通过深入分析现有观测三角形选取方法的优缺点,提出一种对初选观测三角形组进行第二次补充筛选、再匹配识别的方法。

本文针对以上几种观测星选取方法的优缺点,以角距匹配识别为基础,提出一种先初选观测三角形,然后对观测三角形进行第二次优化筛选的方法,

从而可确保一次匹配成功并输出可用于星图识别验证环节的高精度姿态信息。

1 观测三角形约束条件的建立

在实际星图识别过程中,由于星图匹配一次的计算量要远大于视场中选取出最优观测三角形所需要的计算量,而且有时即使星图识别成功,但因观测星在视场中的位置近似一条直线,这将导致解算出的姿态误差较大,在星图验证环节中失败,进而需要重新选取观测三角形进行匹配识别,因此优先选取优化观测三角形进行星图识别可大大加快星敏感器定姿输出速度,对提高星敏感器性能和实时输出姿态信息具有重要意义。

观测三角形只有满足一定的条件,才能实现一次匹配、定姿有效计算。为提高计算效率,本文研究在初选观测三角形的基础上,对观测三角形进行再次优化筛选,最后再匹配的星图识别算法。观测三角形优化选取,要根据同时满足正确匹配与高精度定姿计算的双重约束,为提高在轨计算速率,需要通过深入分析,转化为具体、易计算的像面直接约束条件。

双星对匹配识别的成功率影响很大,双星是指在视线方向上相距较近(实际距离可能很远),在星敏感器成像面上的星点不能互相区分开的两颗星[11],一般的星图识别算法无法对双星进行正确识别。由于文献[10]中指出两颗星角距值小于0.047°时按双星来处理,因此所选取的观测三角形边长应至少大于双星门限阈值(4 个像素),同时为提高星点位置的定位精度,一般采用离焦技术,以像点大小 5×5 像素为例,为使两颗观测星质心完全分离,其边长距离应至少大于 10 个像素。以上因素作为二次优化筛选观测三角形约束条件 1,该约束条件决定观测三角形最小边长 $d_{\min}$ 阈值的选取。

组成观测三角形的三颗星在视场中的位置关系对星敏感器最终输出姿态的结果影响很大,例如某三颗观测星近似一条直线时,这将直接导致星敏感器定姿失败[12],这主要是因为参考矢量阵 $\boldsymbol{V}_{3\times k}=[\boldsymbol{V}_1,\boldsymbol{V}_2,\cdots,\boldsymbol{V}_k]$ 在矩阵求逆的计算过程中,当观测三角形三颗星位置相关性较强的时候,$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}$ 高度近似奇异。

将观测三角形的边与夹角的约束关系转换到像平面上分析,如图 2 所示,星敏感器像空间坐标系示意图,O 是星敏感器像空间坐标系的原点,Star1、Star2、Star3 是恒星在像平面上的投影,f 是星敏感器的焦距,h 是 Star2 到底边 c 的垂线,θ 是三角形中最小夹角,即 a 边与 c 边的夹角,β 是 h 边对应的夹角。

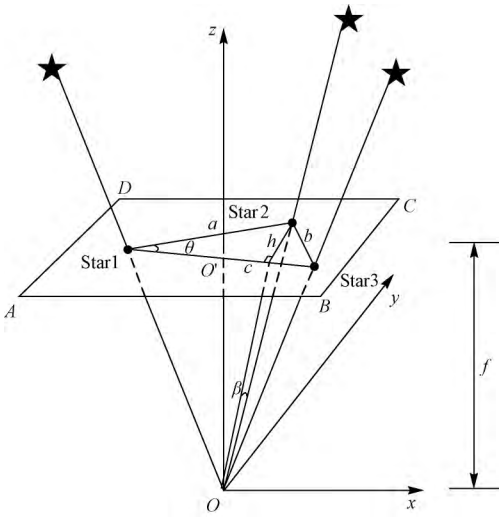


图 2 星敏感器像空间坐标系示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of star sensor image space coordinate system

由图 2 三角形关系得:

$$h = a\sin\theta \tag{1}$$

为避免双星对星图识别的干扰,同时减小三颗观测星在像平面上位置的相关性,即三颗观测星在像面上不共线,从 Quaternion Estimation (QUEST)[13] 定姿原理分析,h 应至少大于双星门限阈值,即:

$$h = f\tan\beta > \delta \tag{2}$$

其中 δ 为双星门限阈值,式(1)、(2)作为二次优化筛选观测三角形约束条件 2,该约束条件决定了观测三角形最小夹角 $\theta_{\min}$ 阈值的选取。

本文在初选观测三角形的基础上,对观测三角形进行二次优化筛选。初选观测三角形是指优先选取视场中最亮的 $N(N=5\sim6)$ 颗星任意组成观测三角形,将这些观测三角形组成待选观测三角形集合。二次优化筛选观测三角形以如下约束条件为基础进行:

约束条件 1:像面上,组成观测三角形的最小边应大于 $d_{\min}$ 个像素。

约束条件 2:像面上,观测三角形中最小夹角应大于 $\theta_{\min}$。

2　优化观测三角形选取方法

图 3 是优化观测三角形选取方法流程图。m 为观测视场中出现观测星的数目，$d_{\min}$ 是观测三角形最小边长阈值，$\theta_{\min}$ 是观测三角形最小夹角阈值，N 为观测星序号，初始值设为 1，n 为所选三颗亮星以外第四颗亮星序号。

步骤 1: 将星敏感器视场中出现的观测星按其星等信息进行升序排列(星等越小亮度越高) 。

步骤 2: 以第 N(N 的初始值设为 1) 颗亮星为基准，依序选取第 $N+1$、$N+2$ 颗亮星组成三角形，将 $N+3$ 的值赋给 n 。

步骤 3: 计算组成的三角形三边边长，判断最小边长是否大于 $d_{\min}$，如果是，执行步骤 4 进一步判断; 如果不是，输出“观测三角形存在双星”，执行步骤 9。

步骤 4: 判断三角形中最小夹角是否大于 $\theta_{\min}$，如果是，将此三颗亮星组成三角形进行识别后执行步骤 5; 如果不是，输出“三颗观测星近似一条直线”，执行步骤 12。

步骤 5: 验证(根据已识别的观测星信息解算出星敏感器当前姿态，根据这个姿态产生一幅模拟星图并与原始的观测星图作对比) ，若验证成功，即模拟星图与观测星图中星点的位置对应一致，则输出“识别成功”; 若验证失败，执行步骤 6。

步骤 6: 剔除已选三颗星中最暗的一颗星，引入第 n 颗星组成新三角形，执行步骤 7。

步骤 7: 判断第 n 颗亮星是否为视场中最后一颗亮星，如果是，将 $N+1$ 的值赋给 N，执行步骤 8; 如果不是，$n+1$ 的值赋给 n，执行步骤 3。

步骤 8: 判断第 N 颗亮星是否为视场中倒数第二颗亮星，如果是，观测三角形识别失败; 如果不是，执行步骤 2。

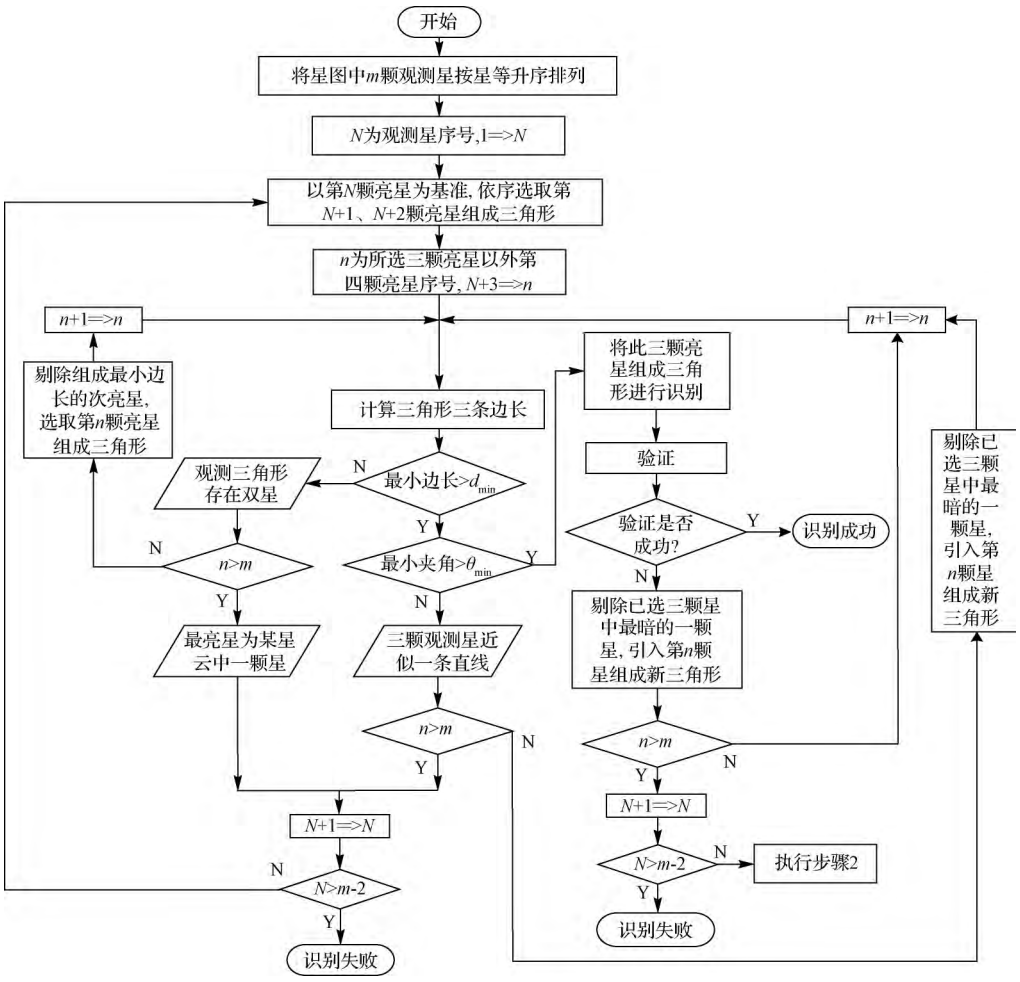


图 3　优化观测三角形选取方法流程图

Fig. 3　Flowchart of optimization the observation triangular selection method

步骤9: 判断第 n 颗亮星是否为视场中最后一颗亮星，如果是，输出“最亮星为某星云中一颗星”，将 $N+1$ 的值赋给 N，执行步骤10; 如果不是，执行步骤11。

步骤10: 判断第 N 颗亮星是否为视场中倒数第二颗亮星，如果是，未进入识别环节，识别失败; 如果不是，执行步骤2。

步骤11: 剔除组成最小边长的次亮星，选取第 n 颗亮星组成三角形，然后将 $n+1$ 的值赋给 n，执行步骤3。

步骤12: 判断第 n 颗亮星是否为视场中最后一颗亮星，如果是，将 $N+1$ 的值赋给 N，执行步骤10; 如果不是，执行步骤13。

步骤13: 剔除已选三颗星中最暗的一颗星，引入第 n 颗星组成新三角形，然后将 $n+1$ 的值赋给 n，执行步骤3。

3 仿真试验与结果分析

以经典的“仅选取视场中最亮的 N_B 颗观测星组成观测三角形组再星图识别”方法[10]为基准，选取 $N_B=6$，即从观测星图中挑选出最亮的6颗星用以组成观测三角形，若观测星数目不足6颗，则挑选所有的观测星。6颗星所能组成的三角形数目为 $C_6^3=20$。利用工程上某型号星敏感器对全天球遍历成像，其成像系统参数如表1所示。分别以赤经、赤纬3°为间隔，在全天球产生7200个均匀分布的视轴指向，基于自研的星图模拟软件，严格按照物像投影关系，对这7200个视轴指向依次进行扫描，在 $12°\times12°$ 视场中，统计视场中不满足约束条件1、2的观测三角形(无法解算得到可用于星图验证环节的较高精度的姿态信息)数目的概率分布，如图4所示。

表1 星敏感器成像系统参数

Table 1 Parameters of star sensor image system

参数	参数值
视场	$12°\times12°$
像元数	512pixel×512pixel
焦距	40mm
像元尺寸	16μm
位置不确定度	1′
角距误差门限	3′
极限星等	6
星等误差门限	0.75

由图4分析可得，在每个视场中，优先选取的20个观测三角形，平均有7.74个观测三角形无法解算出用于星图验证环节的较高精度的姿态信息，这意味着在每次星图识别时，平均仅有61.3%的概率可一次解算得到可用于星图验证环节的较高精度的姿态信息，这将严重影响星敏感器输出姿态的实时性。

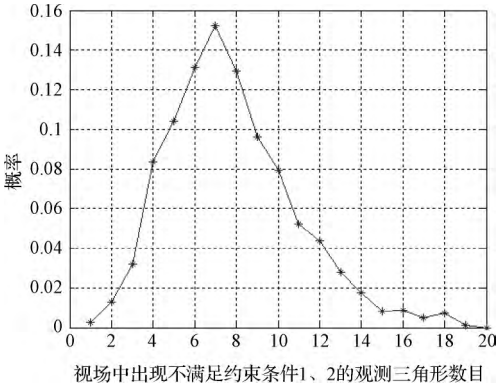


图4 不满足约束条件1、2的观测三角形数目的概率分布

Fig. 4 Dissatisfy with constraint conditions 1, 2, observation of the triangle number of probability distributions

表2进一步给出了在全天球7200个视轴指向的视场中，以视场中最亮的两颗星为基准，依次选取第3、4、5颗亮星组成观测三角形时，不满足约束条件1、2的观测三角形具体统计数据。

表2 不满足约束条件1、2的观测三角形具体情况统计

Table 2 Dissatisfy with constraint conditions 1, 2, observation of the triangle specific statistics

以视场中最亮的两颗星为基准，依次选取第 N 颗亮星组成观测三角形	7200个视轴指向中，不满足约束条件1、2的观测三角形出现的次数
$N=3$，即选取第1、2、3颗亮星组成观测三角形	2729
$N=4$，即选取第1、2、4颗亮星组成观测三角形	1343
$N=5$，即选取第1、2、5颗亮星组成观测三角形	671

注. 观测星数目小于等于5的视场数目是6。

由表2分析可得，在所有观测星数目大于5的视场中，最亮的三颗星组成的不满足约束条件1、2的观测三角形(姿态解算的误差将较大)出现的次数为2729，即第一次匹配后有37.9%的概率使得相对姿态解算误差较大，若直接用于星图验证环节，则极有可能验证失败; 对于每个“最亮三颗星组成的观测三角形不满足约束条件1、2”的视场，保留最亮的两颗星并同第4亮星组成新的观测三角形，经统计，此时不满足约束条件1、2的观测三角形出现的次数为1343，即至少存在18.66%的遍历统计概率，

使得通过连续两次三角形匹配均不能实现输出可用于星图验证环节的较高精度姿态信息。

为克服上述不足,深入分析观测三角形中双星及三颗星相对位置对星图识别和最终姿态输出过程的影响机理后,提出星图匹配前“二次优化”选取观测三角形的方法: 将观测三角形中最小边长与最小夹角作为两个约束条件,按照图 3 的过程对观测三角形进行优化选取,实现了“首次匹配已优化后的观测三角形”即可满足本文所提出的约束条件,从而可保证“一次匹配成功即可输出用于星图验证环节的较高精度姿态信息”,实现了约 100% 的一次匹配并成功星图识别能力。而文献[10]中“仅选取视场中最亮的 N_B 颗观测星组成观测三角形组再星图识别”的方法,仅有 62.1% 一次匹配成功并输出可用于星图验证环节的较高精度姿态信息的概率,即使经过连续两次匹配验证环节,也仅有81.34% 的概率可以成功实现高精度姿态解算进而成功完成星图识别的能力。因此,本文所提出的星图匹配前“二次优化”选取观测三角形的方法从总体上可大大减小星敏感器星图识别环节中的计算量,进而提高了星敏感器整体性能。

4　结　论

星敏感器是航天应用中最精确的姿态测量光学传感器,本文介绍了选取的观测三角形对姿态输出的影响,对现有观测三角形选取方法进行了深入分析,并以三角形识别算法为基础,从 QUEST 定姿原理分析,重点考虑双星和观测三角形中三颗星在像面上的位置关系对星图识别和姿态输出的影响,提出一种先对观测三角形优化选取、再匹配识别的方法。仿真试验数据显示,相对文献[10]的方法,采用优先选取的观测三角形进行星图识别,可使一次匹配成功并输出可用于星图验证环节的较高精度姿态信息的概率提高了 60.9%,从总体上可大大减小星敏感器星图识别环节中的计算量,并且每帧全天球定姿输出的时间一致性也被大大提高。

参　考　文　献

[1] 李超,张利强,吴佳泽,等. 使用 GPU 并行加速的星表检索算法[J]. 宇航学报,2012,33(5):584 – 589. [Li Chao, Zhang Li-qiang, Wu Jia-ze, et al. Parallel acceleration for a GPU-based star catalogue retrieval algorithm [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(5):584 – 589.]

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

[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] Liebe C C. Stars trackers for attitude determination [J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 1995,6:10 – 16.

[5] 宁晓琳,王龙华,白鑫贝,等. 一种星光折射卫星自主导航系统方案设计[J]. 宇航学报,2012, 33(11):1601 – 1610. [Ning Xiao-lin, Wang Long-hua, Bai Xin-bei, et al. A scheme design of satellite autonomous navigation system based on stellar refraction [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11):1601 – 1610.]

[6] 张磊,何昕,魏仲慧,等. 三角形星图识别算法的改进[J]. 光学精密工程,2010,18(2):458 – 463. [Zhang Lei, He Xin, Wei Zhong-hui, et al. Modification of triangle identification algorithm [J]. Opt. Precision Eng, 2010,18(2),458 – 463.]

[7] 张广军,魏新国,江洁. 一种改进的三角形星图识别方法[J]. 航空学报,2006,27(6):1150 – 1154. [Zhang Guang-jun, Wei Xin-guo, Jiang Jie. Star map identification based on a modified triangle algorithm [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006, 27(6): 1150 – 1154.]

[8] Quine B M, Durrant-Whyte H F. Rapid star pattern identification [J]. SPIE 1996,2739: 351 – 360.

[9] Kruijff M. Star sensor algorithm application and spin-off [C]. 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation (IAF), the International Academy of Astronautics and the International Institute of Space Law, 2003.

[10] 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 72 – 78.

[11] 朱长征,居永忠,杜晓辉. 导航星库制定方法研究[J]. 宇航学报,2010,31(5): 1327 – 1330. [Zhu Chang-zheng, Ju Yong-zhong, Du Xiao-hui. Approach to founding a guide star catalogue [J]. Journal of Astronautics, 2010,31(5): 1327 – 1330.]

[12] 魏喜庆,宋申民. 基于容积卡尔曼滤波的卫星姿态估计[J]. 宇航学报,2013,34(2):193 – 200. [Wei Xi-qing, Song Shen-min. Cubature Kalman filter-based satellite attitude estimation [J]. Journal of Astronautics, 2013,34(2):193 – 200.]

[13] Shuster, M. D. The quest for better attitudes [J]. The Journal of the Astronautical Scienses, 2006,54(3):657 – 683.

作者简介:

李欣璐(1986 –),男,博士生,主要从事卫星自主导航技术、星图识别算法等方面的研究。

通信地址: 吉林省长春市高新区创新路 1616 号

电话: (0431) 86176280

E-mail: lixinlu1986@126.com

(编辑: 牛苗苗)