

· 综述 ·

## 星图识别三角形算法综述

时圣革, 雷肖剑, 于长海

(海军驻天津地区航空军事代表室, 天津 300308)

**摘要:** 在现代的航天领域, 根据星敏传感器所获得的星图分布情况, 可得到飞行器的姿态。因其具有可靠性、保密性、精度高、适用范围大而得到广泛的应用。首先对传统的识别算法进行概述, 然后对近年来提出的一些改进算法进行总结, 并分别详细地介绍了改进三角形算法、向量索引的算法、字符串索引算法、无需标定参数识别算法、基于神经网络和支持向量机的算法。这些方法在识别速度、成功率、实时性上都有一定程度的提高, 在降低虚警的情况下可以提高算法的鲁棒性, 还总结了现在星敏传感器识别方法的不足, 并展望了今后的发展方向。

**关键词:** 星图识别; 三角形匹配; 向量索引; 字符串索引

中图分类号: TP391.45

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2014)-05-0001-06

## Triangle Algorithm Overview of Star Pattern Recognition

SHI Sheng-ge, LEI Xiao-jian, YU Chang-hai

(Aviation Military Representative Office of Navy in Tianjin, Tianjin 300308, China)

**Abstract:** In modern aerospace, according to star pattern distribution status obtained by star sensors, the attitudes of space vehicle are obtained. It has widely application for high reliability, confidentiality, accuracy and widely suitable range. Firstly, traditional recognition algorithm is introduced. And then, improved algorithms referred in recent years are summarized. And improved triangle, vector index, string index, parameter identification without calibration and based on neural network and support vector machine algorithm are respectively introduced in detail. These methods in the area of recognition speed, success rate and real-time ability are improved to some extent. At the condition of low false alarm, the robustness of the algorithm is improved. Finally, the shortcomings of current star sensor identification methods are summarized and the development trends are forecasted.

**Key words:** star pattern recognition; triangle match; vector index; string index

### 1 背景介绍

星模式识别是将星敏传感器视场中的观测星组成的星模式与导航星库中导星组成的星模式进行特征匹配以确定观测星与被测星之间的关系。快速可靠的星模式识别算法是星敏传感器自主工作的前提, 星模式识别算法的效率将直接影响姿态计算的正确率和精度。

#### 1.1 典型方法

目前面向星敏传感器提出的星模式识别算法有很多种, 主要包括三角形角距匹配算法、主星识别法<sup>[2-3]</sup>、概率统计法、多边形角距匹配算法、栅格算法等。其中三角形匹配算法和主星识别法是被应用得较多的算法。三角形识别算法是将星敏传感器观测到的星组成观测星三角形, 并与导航星库中的导航三

角形进行匹配,实现起来比较容易,但由于识别过程中采用的特征维数较低,存在着较多的冗余匹配,其原理是计算找到两颗星使得 $|a_{ij} - a_{ji}| < \epsilon, \epsilon$ 为一给定测量误差容限<sup>[4]</sup>。主星识别法基本上不需要重复匹配,而且适用于全天星图识别,识别速度快,识别率高,但当有多颗星等相近的亮星同时出现在视域内时,主星识别法的识别率将严重降低<sup>[5]</sup>。

为了将三角形几何形状特征用于全天自主星图识别,这些特征必须满足比例、平移、旋转不变以及与具体形状之间有一一对应关系的要求。到目前为止,还没有一个好的几何特征能够满足这种要求<sup>[6]</sup>。为此,国内外学者由基本算法提出了很多的改进算法。

### 1.2 改进方法

改进的目的主要有两个,一是提高识别成功率;二是减少识别时间以满足实时性。改进的方法中包括各种改进的三角形算法<sup>[7-10]</sup>、四边形算法<sup>[11]</sup>、栅格算法<sup>[12]</sup>、KMP算法<sup>[13]</sup>、连通聚类星识别算法、基于字符匹配的算法<sup>[14-15]</sup>等。为了减少匹配次数,先后提出K矢量法<sup>[4,16]</sup>、P矢量法等星库搜索算法,可以提高三角形算法的搜索效率。近年来基于遗传算法<sup>[17]</sup>和基于神经网络的算法<sup>[18-19]</sup>等星模式识别算法,将视场中的星图作为直接识别的模式,具有较快的模式识别速度。比如神经网络结构本身包括了导航星的特征信息,因此它无需导航星库。但这些算法的样本训练时间较长,算法实现比较复杂,不能直接在实际星敏感器中应用。

## 2 星模式识别方法概述

### 2.1 改进三角形算法

为克服传统三角形的缺点,文献[7]从三个方面提出改进方法,一是为减小导航星库容量,采用正交网格的方法对星表均衡化,将全天区按照 $4^\circ$ 的均匀间隔划分为重叠的 $8 \times 8^\circ$ 视场,将视场内亮度前10颗星的值赋为1,其余的为0,提取所有视场中标为1的星,这样可有效降低星表中星的数量;二是在匹配时采用哈希查找的方式,其原理是通过事先建立好的映射关系直接计算出所要查找信息的存储地址,采用这种方式只用1次就可以得到查找地址,从而可以提高识别速度。在构建导航星库时按照角

距升序的方式排列,并按照 $0.01^\circ$ 的角距间隔分块,如图1所示;三是加入星等判断环节以减少冗余和误匹配,即选择第4颗星校验是否与前面的匹配组存在相同的公共边。

子块编号	亮星星号	暗星星号	星对角距	相对星等
0	4 375	4 376	0.00090011	0.892
	...	...	...	...
	5 842	5 843	0.00990521	0.693
543	1 247	1 409	5.43000390	0.863
	...	...	...	...
	24	115	5.43998270	0.034
1 131	...	...	...	...
	1 731	1 776	11.31367847	0.116

图1 导航星库存储模式图

文献[8]提出的改进算法是构造一个由观测三角形三个角距组成的平面单位法向量,并对其进行投影求解最优主轴,匹配时先用该投影值对导航星库进行索引,再利用三角形三个角距进行匹配,若有冗余匹配,则利用归一化星等来消除冗余匹配。导航星库的构建也分为这三个部分,在构造特征三角形时采用主星识别法<sup>[3]</sup>,可有效减少数据库容量。在查找时可采用分块查找,减小搜索时间,如图2和图3所示。文献[9]首先是将天球均匀的分成486个区域,提出“内接正方体法”,采用角距匹配的方法对观测三角形进行识别,并通过设置星对角距状态标识,完成星对角距的快速匹配搜索。最后,引入验证环节有效地解决观测三角形与匹配三角形产生的冗余问题。

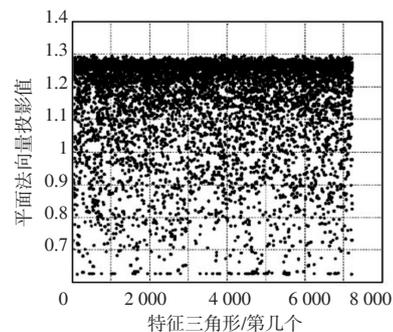


图2 平面法向量投影集

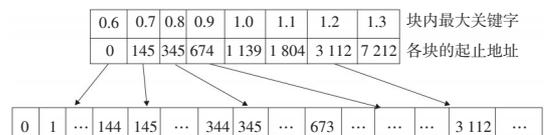


图3 平面法向量投影索引顺序表

通过仿真实验表明,各种改进的三角形识别方法对星点位置噪声和星等噪声均具有较强的抗干扰能力,在识别时间和存储空间方面均比传统的三角形算法具有较大的优势。

### 2.2 基于向量索引的方法

文献[12]提出一种基于  $P$  向量索引的导航三角形,这种方法将描述三角形的三维数据投影到一维直线上,通过对一维数据的检索达到匹配目的<sup>[12]</sup>。根据星对角距提取出  $P$  向量,其值充分利用三边关系,能够与三角形一一对应。构造  $P$  向量时求解其最优投影主轴,如图4所示。使在某个方向上投影点分开的最好,根据该值可以通过一次对比,很快的检索到导航三角形,减少计算过程,最后设置一定门限引入校验环节,保证准确性。在构造导航星库时该方法包括导航三角形库和  $P$  值向量表。导航三角形库中包括三角形定点和边长,通过二者的交叉映射关系进行匹配。

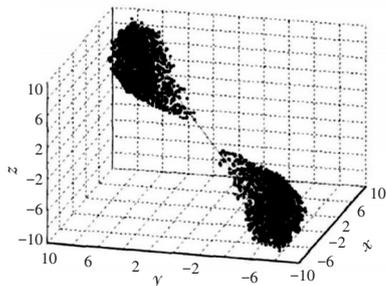


图4 三角形最优投影主轴示意图

传统的三角形算法需构造大量的三角形,且特征维数低,存储和检索都有一定的困难,识别时要进行三次比较。文献[20]提出了以三角形内切圆半径为识别量的星图识别算法,减少了比较次数。该方法依据是三角形三边长之比和内切圆半径可唯一确定三角形。在星图识别时,根据三边关系构造特征向量  $T$  进行搜索,用内切圆半径  $R$  来识别,如图5。若识别的结果不唯一,再利用三角形角距方法进行识别。构造的特征量与三角形内切圆具有平移、旋转不变的特性。构建的导航星表是以挑选出来的导航星为中心,以最近的三颗星组合构成三角形,把角距按照升序排列存储,方便查找。按特征量  $T$  和  $R$  排列,并设置一定的阈值,分成多个子表。

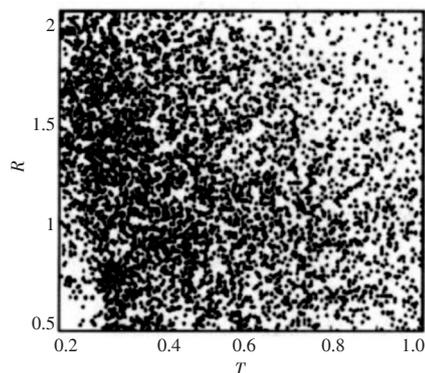


图5  $T, R$  确定的导航三角形

文献[21]将上两种方法融合,提出基于  $P$  向量与三角形内切圆的星图识别算法,识别时方法与之前相同。只是在构造导航星表时,将星表分成三个子表,分别对应  $P$  向量,内切圆半径  $R$  和第三边。

文献[4]提出一种可以完成全天星图识别的快速星图识别算法。提出了基于  $K$  矢量查找表和导航星域联合进行超快速星图识别的方法。该方法不同之处在于星敏传感器中要观测4颗星,构成6组星对角距,将其中的5组所对应的  $K$  矢量进行导航星域的变换,用最后一组所对应的  $K$  矢量对前5组值进行索引比较。文章最后分别用纯软件仿真、实验室模拟仿真、真实星空仿真对该方法进行验证。目前此方法特别适合于大视场和低星等情况下使用,对于高星等情况,算法对于存储器需求量较高。

### 2.3 字符串索引

文献[14]将 Log\_Polar 变换引入星图识别中,这是一种将平面直角坐标系转换到对数半径的极坐标系的一种变换。该方法通过  $LPT$  变换,提取观测星和导航星的特征,并将特征以字符串的形式进行编码,最后利用字符串匹配的方法,如图6所示。寻找与观测星对应匹配的导航星。在  $KMP$  算法<sup>[13]</sup>的基础上进行改进,使字符具有一定的容错能力。导航星表中利用字符串代替导航三角形的星角距,使存储容量降低,通过改进字符串的识别算法,有望进一步提高识别速度。

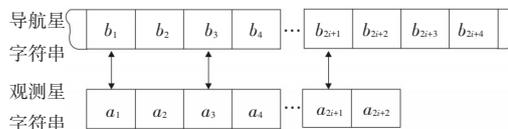


图6 字符串中的字符匹配

文献[22]指出在应用字符匹配的方法时,当相机所拍摄的星图出现平移或旋转时是无法识别的。此文提出一种新的导航星库的构建方法来克服这个问题。该算法在建立导航星数据库时以一定范围内最亮星为中心将整个天球划分成多个有一定重叠的四方形区域,而之前的算法是划分成多个不重叠区域<sup>[23]</sup>。每个区域的尺寸比星传感器视场的尺寸大,如图7,使拍摄的星图对应的区域尽可能包含在全天球上某一个四方形区域内。因此文中提出的算法在识别发生位移的星图时仍然表现出很好的性能。

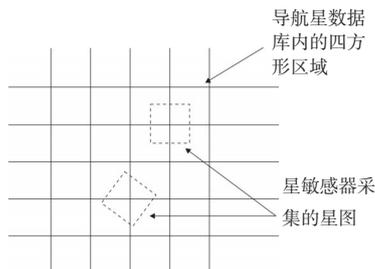


图7 拍摄的星图与导航星库内的区域存在相对位移

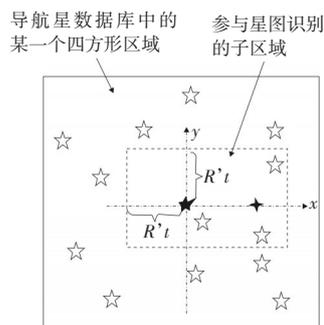


图8 从导航星库中的某一个四方形区域内选取参与星图识别的子区域

## 2.4 无需标定参数的识别

文献[24]提出了一种无需标定参数的识别方法,即该方法与星传感器的光学参数标定无关,仅和图像平面上的星点位置有关。该方法引入比例距离作为径向特征,角度作为环向特征,即使在没有准确的系统参数情况下,仍能得到很高的识别率。在匹配识别时主要分两步完成,首先通过计算比例距离,如图9所示。配置计数器并查找计数器中的最大值来完成初始匹配,第二步通过计算两颗星之间的角距,判断相互的关系,最后得到唯一的结果。由于比例距离的计算量小于角距的计算量,而且采用了快速分组的方法,因此识别时间短。

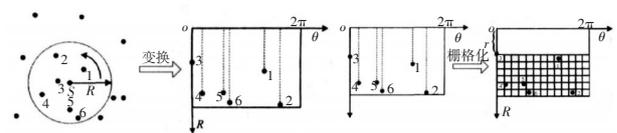


图9 星图模式构造过程

## 2.5 神经网络

以上方法在查找星表进行匹配时都有一个共同点,都是通过将星图按照某个模式建模,然后将导航星表衍生出若干星表,都不可避免地产生重复查找,导致实时性不高<sup>[18]</sup>。由于星图识别可以看成一种模式识别,所以可以采用将神经网络的方法来进行星图识别。文献[18]采用BP神经网络识别星图特征,其缺点是在处理海量星图信息时容易陷入局部极值,但一旦训练完成便可很快获得当前星图信息。传统三角形算法数目庞大,冗余度高,文中提出基于星图特征的三角形剖分算法,如图10。其中以De-launay剖分为最优<sup>[25]</sup>。在星图识别过程中利用PSO(粒子群算法)进行优化<sup>[19]</sup>,防止神经网络陷入局部极小值而偏离最优情况。

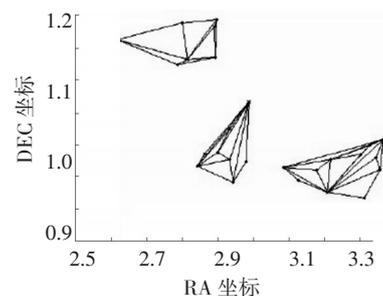


图10 基于星等的三角形剖分示意图

文献[33]设计了一个包含多个并联的BP子网的识别系统。首先对网络结构进行设计,如图11。先根据星传感器获取的恒星分布情况并构造一个平面映射的矩阵作为系统的输入,然后通过分类器判断,决定应该将输入矩阵送入哪一个子网,并送入相应子网进行训练,最后得到最终结果。BP网络的训练时间长,需要迭代的次数多,但其学习属于线下学习,一旦训练完毕,可以很快获得当前星图信息,实现星传感器星图识别算法的实时性和鲁棒性

## 2.6 支持向量机

支持向量机(SVM)是在统计学习理论上发

展起来的一种新的机器学习算法。在选取导航星时,应优先选择星等较小的星。为此将导航星三角形中最暗星所对应的星等称为星三角形的符号星等(LVM)。LVM越小,则该三角形成像的信噪比越高,越应优先被选作导航星三角形<sup>[34]</sup>。假设将基本的导航三角形表划分成导航星三角形表和非导航三角表。从而将三角形的选取优化问题变成一个以符号星等阈值超平面为最优分类面的分类问题。要得到期望的三角形数目少、分布均匀性好的导航星三角形信息表,就是求解符号星等阈值超平面。这个最优决策分类面可以通过一种支持向量机方法进行求解。

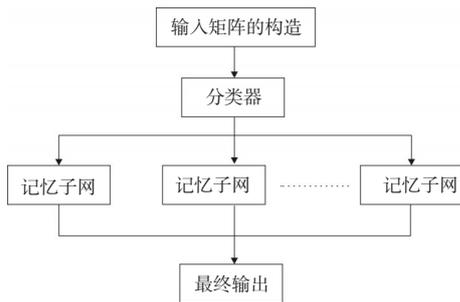


图 11 识别系统模块图

### 3 现状评述

星敏感器作为目前最精确的空间姿态测量设备,其能完成包括星图获取、质心提取、星模式识别和姿态确定等工作,对于航天设备和利用天文星光导航的设备起着至关重要的作用。随着相关领域的发展,新型星敏感器的使用,需要研究更高效更可靠的星图识别算法。星图识别算法发展的方向就是尽量提升其在运算速度与识别精度两方面的性能,并能够具备较强的抗干扰能力及较好的鲁棒性能,进而为任务提供实时、高效的识别结果。目前研究的各种算法已经在经典的三角形算法上取得了很大的提高。当存在位置误差、噪声、星等误差等情况下,均能获得良好的识别效果。一些新的算法和应用于其他领域的知识也逐渐被引用到星图识别的算法上来,如神经网络、遗传算法、Dirichlet多边形、三角剖分、Log-Polar变换等。文献[27]详细地分析了影响星敏感器姿态计算精度的因素,为在实际天空中获得高精度姿态测量精度提供理论参考。在导航星库的构建上,根据不同的星识别模

式和搜索方法构建不同的导航星库,满足存储数据少搜索速度快等特点。基于特征向量的搜索可减少查找次数,基于分块的索引模式可快速地找到搜索空间,还有基于交叉索引,字符串搜索等方式。通过实验仿真证明,所得结果都比原三角形算法的导航星库容量小且搜索速度快。

### 4 发展前景

虽然星敏感器已经得到了广泛的应用,其算法也已相当成熟,但仍存在一些不足。如姿态角不能精确输出(滚动角的精度较俯仰角、偏航角精度低);视场中恒星的分布及太阳光等杂散光的影响会降低可靠性,甚至使其无法正常工作<sup>[28]</sup>。为进一步改善其性能,多视场星敏感器(如图12)将是未来的重要发展方向。其优点是与传统单视场星敏感器相比,在测量精度及可靠性方面有明显优势,且配置灵活、工作方式多样等特点。随着天文导航应用的日益广泛,近年来国外出现多视场星敏感器的概念。法国SODERN公司研制的HYDRA<sup>[29]</sup>星敏感器;日本三菱电机的SIS<sup>[30]</sup>星敏感器以及丹麦科技大学的 $\mu$ ASC<sup>[31]</sup>星敏感器。国外已有基于多视场星敏感器设计出的舰船导航设备<sup>[32]</sup>。目前,在多视场星敏感器的测量模型、工作方式、布局优化等方面,还没有系统性的研究,等待广大学者探讨研究。

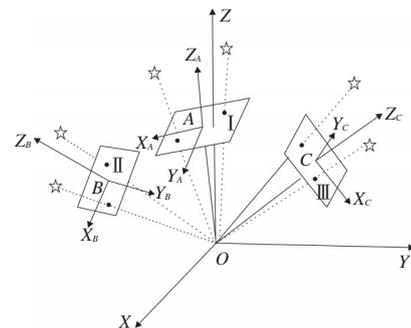


图 12 三视场星敏感器

### 5 结论

针对天文观测相机星图识别的要求,其处理步骤主要为天文星表的选择、导航星数据库的建立、观测星数据库的建立和具体算法。其中,具体算法的实现最为重要,文中首先介绍了最为典型的基于三角形的星角距算法和主星识别算法。在此基础

上,总结了近几年相关学者提出的一些新的算法,并对方法的原理性进行了简要的概述。新的改进方法在存在位置误差,星等误差等条件下,识别成功率均有所提高。在导航星库的构建上,数据容量有所减少,识别时间加快。新的方法大多改进了算法的搜索模式,引入了目前比较流行的智能算法,扩展了算法的实用性和适用性。

## 参考文献

- [1] 孙晓雄,王宏力,陆敬辉.一种基于星三角形的星图识别算法[J].传感器与微系统,2011,23(2):35-41.
- [2] Bezooijen Van R W. True-sky demonstration of an autonomous star tracker [J]. SPIE, 1994, 2221: 156-168.
- [3] 王海涌,费峥红,张超.改进的基于主星的星图识别算法[J].光学精密工程,2009,17(1):220-224.
- [4] 邢飞,尤政,董瑛.基于导航星域和K矢量的快速星图识别算法[J].宇航学报,2012,5(3):175-180.
- [5] 张华.高精度双视场星敏传感器关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [6] 郑胜,吴伟仁,田金文,等.一种新的全天自主几何结构星图识别算法[J].光电工程,2004,31:4-7.
- [7] 吕春红,周军,贺元军,等.一种改进的快速星图识别算法[J].计算机测量与控制,2012,45(7):35-41.
- [8] 伍玲玲,杨静.一种改进的三角形星图识别算法[J].宇航学报,2009,56(8):1643-1647.
- [9] 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,2013,43(9):945-951.
- [10] 冉晓强,汉德胜.一种新的多三角形星图识别算法[J].光子学报,2009,38(7):1867-1871.
- [11] 林涛,周建林.四边形全天自主星图识别算法[J].宇航学报,2000,21(2):82-85.
- [12] 杨建,张广军,江洁.P向量实现快速星图识别的方法[J].航空学报,2013,17(8):756-762.
- [13] 李葆华,张迎春,李化义,等.用KMP算法进行星敏传感器星图识别的方法[J].光电工程,2012,40(8):32-36.
- [14] 魏新国,张广军,江洁.基于Log\_Polar变换的星图识别方法[J].光学技术,2010,34(7):23-27.
- [15] 许士文,李葆华,张迎春,等.用字符匹配进行星图识别的导航库存储方法[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(6):519-521.
- [16] Mortari D. K-vector range searching techniques[J]. Adv. Astronaut. Sci., 2000, 105:449-464.
- [17] 李立宏,张福恩,林涛.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.
- [18] 张少迪,王延杰,孙宏海.三角形剖分以及PSO-BP神经网络在星图识别中的应用[J].光电工程,2011,36(9):78-82.
- [19] GAO Hai-bing. Particle swarm optimization based algorithm for neural network learning [J]. ACTA Electronic Sinica, 2004, 32(9):1572-1574.
- [20] 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,2011,65(3):1345-1349.
- [21] 陆敬辉,王宏力,孙渊,等.基于P向量与三角形内切圆的星图识别算法[J].光学技术,2012,45(1):76-80.
- [22] 蒋明,喻明艳,王进祥,等.一种新的全天自主星图识别算法[J].宇航学报,2011,34(7):145-148.
- [23] 许士文,李葆华,张迎春,等.用字符匹配进行星图识别的导航库存储方法[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(6):819-821.
- [24] 杨建,张广军,江洁.一种非标定的快速星图识别方法[J].光学技术,2010,4(10):67-72.
- [25] 房建成,全伟,孟小红.基于Delaunay三角剖分的全天自主星图识别算法[J].北京航空航天大学学报,2010,45(11):1643-1647.
- [26] 刘太阳,王仕成,刘志国,等.基于星三角形角度的竞选式星图识别[J].光电工程,2013,45(13):654-657.
- [27] 王真,魏新国,张广军.多视场星敏传感器结构布局优化[J].红外与激光工程,2009,76(19):874-878.
- [28] Blarrie L, Perrimon N, Airey S. New multiple head starsensor (HYDRA) description and development status: a highly autonomous, accurate and very robust system to pave the way for gyroless very accurate AOCs systems [R]. Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2005:AIAA-2005-5932.
- [29] Miyatake K, Shimoji H, Hama K, et al. Development of SIS-satellite controller integrated with star sensors[C]//Proceeding of the 7th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, 2003: AS-16.
- [30] Jorgensen J L. MicroASC a miniature star tracker, in small for earth observations [C]//4th International Symposium of the IAA, 2003.
- [31] 李春延,李恪,张龙云,等.基于神经网络技术的星图识别方法[J].科学通报,2010,34(12):65-69.
- [32] 田金文,胡涵,郑胜,等.导航星三角形分类选取算法研究[J].华中科技大学学报,2013,12(6):90-94.