

## 均匀快速的导航星选取方法

陆敬辉<sup>1</sup>, 王宏力<sup>1</sup>, 袁宇<sup>2</sup>, 崔祥祥<sup>1</sup>, 许哲<sup>1</sup>

(1. 第二炮兵工程大学自动控制系, 陕西西安 710025; 2. 第二炮兵驻航天十院代表室, 北京 100854)

**摘要:** 为解决导航星表分布的均匀性、构建的快速性问题, 提出了一种基于极坐标细分法(PCSM)及“距离-星等”加权法相结合的导航星选取方法。通过在近似均匀分布的球面基准点的邻域附近选取导航星, 用来保证所选导航星分布均匀性, 并解决坐标极值越界问题; 为了提高搜星过程整体速度, 引入了  $k$ -vector 快速搜索方法搜索基准点邻域内候选星; 最后, 综合考虑导航星的均匀性与亮度指标, 设计了“距离-星等”加权方法筛选导航星。仿真结果表明: 该方法简单、易行、适用性强, 选取的导航星分布均匀性好。

**关键词:** 星敏感器; 导航星表; PCSM; 分布均匀性

**中图分类号:** V448 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0348-06

## Method of uniformity and rapidity for selecting guide stars

Lu Jinghui<sup>1</sup>, Wang Hongli<sup>1</sup>, Yuan Yu<sup>2</sup>, Cui Xiangxiang<sup>1</sup>, Xu Zhe<sup>1</sup>

(1. Department of Automatic Control, The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China;

2. The Second Artillery MAD Stationed the 10th Academy of China Aerospace, Beijing 100854 China)

**Abstract:** To solve the problem of the distribution uniformity and construction rapidity of guide star catalog, a method for guide star selection was proposed, which was based on Polar Coordinates Subdivision Method (PCSM) and “separation-magnitude” weighting method. In order to ensure the distribution uniformity of guide star, the guide star was selected near the reference points on spherical surface neighbourhood, and to insure the results does not overstepp coordinate boundary; by using  $k$ -vector method to search candidate stars which was in reference points neighbourhood, the speed of the algorithm could be improved obviously; at last, considering the guide star performance of distribution uniformity and brightness, guide star was selected by “separation-magnitude” weighting method. Simulation results show that the algorithm is simple in realization, and it has strong universality, and the selected guide stars have good uniform distribution.

**Key words:** star sensor; guide catalog; PCSM; distribution uniformity

收稿日期: 2014-05-10; 修订日期: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61374054); 陕西省自然科学基金(2014JM2-6107)

作者简介: 陆敬辉(1983-), 男, 博士, 讲师, 主要从事组合导航、星敏感器方面的研究。Email: lujinghui.com@163.com

## 0 引言

星敏感器作为高精度的姿态测量器件,被广泛应用于航空、航天领域,其利用星光矢量确定星敏感器视轴在天球坐标系的瞬时指向,从而确定飞行器的姿态<sup>[1-3]</sup>。主要工作过程包括:星图预处理、星提取、星图识别、姿态确定等。其中,星图识别和姿态确定是以导航星表作为信息标准。因此,导航星表建立是星光制导技术的一项重要工作。建立导航星表最首要的步骤是选取导航星。导航星的亮度、分布均匀性等指标直接影响到星敏感器工作时视场中导航星的分布密度、最小可观测星数与星图识别过程中的最小可匹配星对数、观测星能够被匹配识别的概率等,进而影响星图识别及星跟踪匹配算法的效率、成功率等。

目前,导航星的选取方法大多是与星图识别算法相对应的,最常用的还是星等滤波法(Magnitude Filtering Method, MFM)<sup>[4]</sup>,该方法是依靠某一阈值将恒星分为导航星和非导航星,将会使某些视场中出现过多的导航星或者“空洞”,不能保证星敏感器任意视场中恒星分布的均匀性,很容易导致星图识别效率降低甚至无法正常工作。Vedder<sup>[5]</sup>从概率方面对导航星表进行分析和研究,给出了针对导航星分布的全球均匀分布准则(Global Uniformity Criterion, GUC)和局部均匀分布准则(Local Uniformity Criterion, LUC)。Robert<sup>[6]</sup>在充分考虑恒星之间的位置关系和恒星分布密度基础上,提出了一种基于Voronoi diagram/Delaunary triangulation的导航星选取方法。Kim<sup>[7]</sup>提出了一种被称为“瘦法”(Thinning Method)的导航星逐级缩减方法,选取的导航星数近似最小,且从理论上解决了“空洞”问题。国内阚道宏等对导航星应具备的基本条件及导航星的视场密度进行了分析;郑胜等用基于动态星等阈值的支持向量机理论自动筛选导航星,以建立导航星数少且分布较均匀的导航星数据库;房建成等提出了基于Delaunary剖分法构建导航星表并进行星图识别验证<sup>[8]</sup>;田宏等通过分析恒星在视场中的分布规律,建立起星表的完备性和冗余性与星敏感器视场内导航星的数量之间的关系,提出了筛选导航星的原则和方法,采用了分区存储的方式实现了星表的快速搜索<sup>[9]</sup>。

虽然国内外众多学者对导航星的选取问题进行研究,但如何根据恒星的分布,快速选取分布均匀的导航星,依然是构造完备性、均匀性较好的导航星表研究的关键问题。文中从导航星的均匀性指标出发,提出了基于极坐标细分法及“距离-星等”加权的导航星选取方法。

## 1 PCSM的基本思想

极坐标细分法<sup>[10]</sup>(Polar Coordinates Subdivision Method, PCSM)(下文统称PCSM基准点)的基本思想是:鉴于天球坐标系中赤纬分布均匀、而赤经分布不均匀的特点,首先在满足赤纬坐标分布均匀的基础上,再按照一定的准则,保证同一赤纬坐标下,基准点的赤经坐标的分布也是均匀的,从而确保所有生成的基准点具有较好的分布均匀性。其具体构造方法如下:

(1) 在天球坐标系中,将赤纬划分为 $(n_d-1)$ 条等间隔赤纬圈,则每条赤纬圈对应的赤纬坐标为:

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

(2) 在每条赤纬圈 $L_j$ 上,从赤经为 $0^\circ$ 开始,设置 $n_{raj}$ 个等间隔的基准点:

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

式中: $\lfloor x \rfloor$ 表示向下取整;则生成的基准点总数为

$$N_p = \sum_{j=1}^{n_d-1} n_{raj}$$

当取 $n_d=30$ 时,图1给出了极坐标细分法生成的992个PCSM基准点分布示意图。

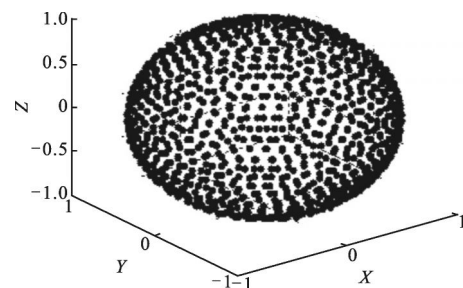


图1 极坐标细分法生成的球面基准点( $n_d=30, N_p=992$ )

Fig.1 Reference points on spherical surface by PCSM( $n_d=30, N_p=992$ )

由PCSM基准点的构造过程可见,PCSM方法能够实现导航星的均匀选取,并且在生成基准点时

就具备了赤经、赤纬坐标对应的编号,为对基准点进行处理和搜索计算时提供便利条件。

## 2 航星选取方法及流程

为了快速得到分布均匀的导航星,文中给出导航星选取方法的具体流程如图 2 所示。

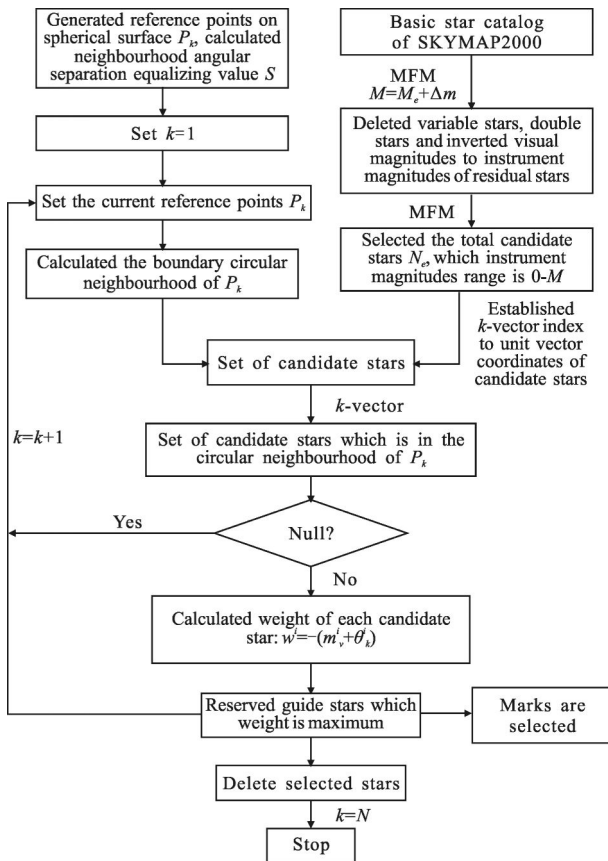


图 2 导航星选取方法流程图

Fig.2 Method for selecting guide stars

具体实现过程如下。

步骤 1: 提取候选星

(1) 采用星等滤波方法, 提取出 SKYMAP 2000 天文星表中星等小于  $M$  的所有恒星, 共计  $N_M$  颗。其中  $M=M_c+\Delta m$ ,  $M_c$  为星敏感器的仪器星等阈值,  $\Delta m$  是为了确保部分暗星在仪器星等转换后能被星敏感器探测到而设置的星等冗余量;

(2) 剔除  $M_c$  颗恒星中的变星和双星, 将剩余星点的星等转换为星敏感器对应的仪器星等; 而后在其中选取仪器星等为  $0\sim M_c$  的  $N_c$  颗恒星作为候选星。

步骤 2: 计算球面基准点的邻域

在基准点附近进行选星, 为了提高方法效率, 应先搜索出位于每个基准点邻域内的候选星, 然后再进一步筛选。按照以下步骤确定基准点邻域。

(1) 以每个基准点坐标为圆心, 以  $s=M_c$  为半径的圆形区域 ( $s, M_c$  仅在数值上相等, 以矢量之间的角距为度量, 其单位为( $^\circ$ ))作为基准点的邻域; 搜索某基准点邻域内的候选星, 可以将每个基准点的坐标看作星敏感器视轴的一个指向, 半径为  $s$  的圆形邻域视为星敏感器的圆形视场, 从而将问题转化对指定天区观测星的搜索问题;

(2) 设当前基准点  $P_k$  的单位矢量坐标为  $(x_k, y_k, z_k)^T$ , 则该基准点的圆形邻域边界对应的坐标范围可通过公式(3)得到:

$$\begin{cases} x \in [\cos s \cdot x_k - \sin s \cdot \sqrt{1-x_k^2}, \cos s \cdot x_k + \sin s \cdot \sqrt{1-x_k^2}] \\ y \in [\cos s \cdot y_k - \sin s \cdot \sqrt{1-y_k^2}, \cos s \cdot y_k + \sin s \cdot \sqrt{1-y_k^2}] \\ z \in [\cos s \cdot z_k - \sin s \cdot \sqrt{1-z_k^2}, \cos s \cdot z_k + \sin s \cdot \sqrt{1-z_k^2}] \end{cases} \quad (3)$$

即单位矢量坐标  $x, y, z$  同时满足上式中三个比较条件的候选星(解决坐标越界问题), 就是位于当前基准点  $P_k$  邻域内的候选星。

步骤 3: 基准点邻域内快速搜索候选星

由于候选星及基准点数量较多, 搜索每个基准点邻域都需要对大量的候选星进行搜索、计算坐标范围并进行比对, 这一过程是最为耗时的环节。为简化计算、提高速度, 采用  $k$ -vector 区间搜索算法<sup>[11]</sup>加速搜星过程, 可以很快得到满足条件的候选星。该算法的基本原理和主要思想是: 首先对数据库中的数据信息按照函数映射的方法建立索引表, 即  $k$ -vector 索引表; 而后在查找搜索时通过几步简单的运算得到被搜索数据的索引, 就可以实现简单、快速的数据搜索, 其实现步骤如下:

(1) 根据  $k$ -vector 方法的原理, 分别构建候选星三个单位矢量坐标  $x, y, z$  的  $k$ -vector 索引表  $K_x, K_y, K_z$ ;

(2) 计算得到基准点  $P_k$  的邻域坐标范围即为所需要搜索的区间, 搜索得到满足条件的候选星坐标值, 通过比较判断, 剔除冗余结果后得到真实结果  $k_{res}^x, k_{res}^y, k_{res}^z$ ;

(3) 为进一步加速算法效率, 在此引入了标志位向量法, 即对三个搜索结果  $k_{res}^x, k_{res}^y, k_{res}^z$  所对应的候选星设置标志位, “1”表示被选中, “0”表示未选中;

因此,同时获得 3 个标志位的候选星为最终所需要的、位于基准点邻域内的候选星。

步骤 4:“距离-星等”加权方法筛选导航星

导航星应尽量使星敏感器观星视场内满足星图识别所需最少导航星数的要求,且导航星的亮度越高、数量越少、分布越均匀、相互之间角距越大,对成功完成星图识别越有利。综合考虑上述要求,为能挑选出性能指标更好的导航星,在对每个基准点邻域内搜索到的候选星进行筛选处理时,提出了基于“距离-星等”加权方法实现导航星的优化筛选。该方法的基本思想为:距离球面基准点越近的星,选取的导航星的整体分布均匀性越好;亮度越大的星对星提取和星识别效果越有利。因此,赋予距离基准点越近、星等越低(星亮度越大)的候选星权值越大,反之赋予的权值越小。从而使距离基准点近、亮度高的星被选取、保留作为导航星,达到了同时兼顾均匀性与亮度两个指标的目的,实现了更加科学合理地筛选导航星。对“距离-星等”加权方法的权值设计分析如下:

由于每个基准点的圆形邻域半径为  $s=M_c$ ,即在此邻域内搜索到的候选星与当前基准点间的角距均在  $0\sim M_c^0$  范围内;而候选星的仪器星等也为  $0\sim M_c$ ,候选星的星等、候选星与基准点的距离二者在数值上的度量是一致的。因此,设计候选星的综合评价权值为:

$$w^i = -(m_v^i + \theta_k^i) \quad (4)$$

式中:  $m_v^i$  为第  $i$  颗候选星的仪器星等;  $\theta_k^i$  为第  $i$  颗候选星与当前基准点之间的角距值。

3 仿真验证及结果分析

为了验证文中方法的有效性,能够快速均匀地选取视场中的导航星,分别给出定性和定量的仿真结果,并与星等阈值法进行比较。

仿真条件设置:设置星敏感器的仪器星等阈值  $M_c=6.0$ ,星等冗余量  $\Delta m=1.5$ ,在 SKYMAP 2000 天文星表中选取了 4908 颗候选星,计算每颗候选星的单位矢量坐标,并分别建立坐标的  $k$ -vector 索引表。设置 PCSM 基准点  $n_d=53, N_p=3\ 100$ 。基准点分布如图 3 所示。

如图 3 所示,最终选取了 3086 颗 (PCSM 基准点)导航星。图 4、图 5 分别表示候选星和导航星的天文位置分布示意图。

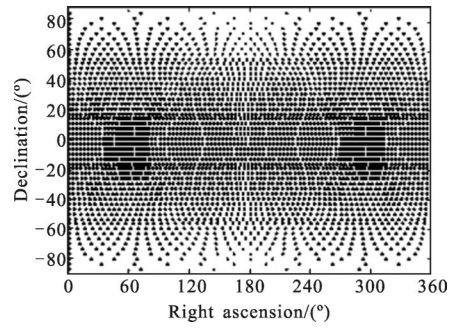


图 3 球面 PCSM 基准点分布图

Fig.3 Distribution map of reference points on spherical surface by PCSM

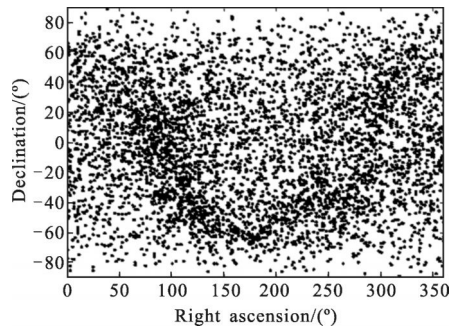


图 4 候选星分布(4 908 颗)

Fig.4 Distribution of candidate star (4 908)

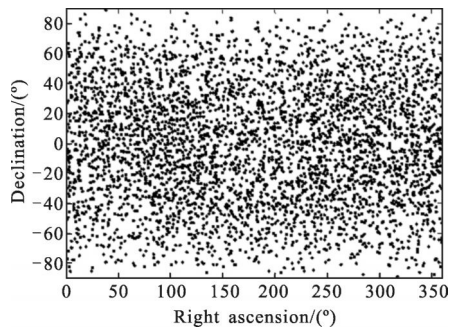


图 5 基于 PCSM 基准点选取的导航星分布(3 086 颗)

Fig.5 Distribution of the selected guide stars based on PCSM reference points (3 086)

由图 4 和图 5 可直观地看出:图 4 中候选星在局部区域分布过于密集;而图 5 中采用文中方法剔除了分布过于密集的星,使选取的导航星分布更加均匀。

根据参考文献 [5], Vedder 提出的一种全球分布均匀性的评价指标(GUC):

$$\begin{cases} \delta_i = \text{eig} \left( \frac{1}{N} A^T A \right) \\ \Phi = \sum_{i=1}^3 \delta_i \ln(\delta_i) \end{cases} \quad (5)$$

式中:矩阵  $A$  为  $N$  个单位矢量构成的  $N \times 3$  维矩阵;  $\delta_i$

为矩阵  $\frac{1}{N}A^T A$  的 3 个特征值。 $\delta_i$  越接近 1/3, 则  $\Phi$  的值越接近 0, 说明这个点的分布越近似于标准均匀分布。

根据公式(5)计算选取的候选星及两种导航星的均匀性指标, 记录于表 1 中。

根据表中的数据也可以看出, 基于 PCSM 基准点选取的导航星均匀性指标  $\delta_i$  更趋近于 1/3, 更趋近于 0, 从而也证明选取的导航星分布均匀性更好。

设置不同大小的星敏感器视场, 生成 10 000 个基准点代表星敏感器的视轴指向坐标, 进行观星仿真实验, 统计视场内观测到的导航星数, 并计算其标准差(std), 统计结果如表 2 所示。

由表 1 和 2 的结果看出: 文中提出的均匀快速

的导航星选取方法所选取的导航星相对星等滤波方法选取的候选星, 分布均匀性更好, 有效降低了星敏感器视场内可观测星数的标准差, 即减轻了视场内导航星数的变化程度, 同时减少了可观测星数较多的视场, 使可观测星数保持在平均值附近。

表 1 候选星及选取的导航星分布均匀性指标  
Tab.1 Distribution uniformity performance for candidate and guide stars

Category	Quantity	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$	$\Phi$
Candidate star	4 908	0.256 2	0.363 2	0.380 5	$1.418 9 \times 10^{-2}$
Guide star (PCSM)	3 086	0.329 5	0.334 1	0.336 5	$3.796 0 \times 10^{-2}$

表 2 不同视场(圆形)大小, 10 000 次随机视场仿真结果(星等阈值: 6.0)

Tab.2 Simulation results for 10 000 random FOV of different FOV (circle)(magnitude threshold:6.0)

Radius of FOV	Methods	Number of guide stars in FOV				Different numbers of observation star for FOV ratio/%		
		Min	Max	Mean	Std	$[\text{Min}, \frac{\text{Mean}}{2}]$	$[\frac{\text{Mean}}{2}, 2\text{Mean}]$	$(2\text{Mean}, \text{Max}]$
6°	MFM	0	34	17.00	3.93	5.26%	90.82%	3.92%
	PCSM	3	19	9.90	1.96	0.36%	99.64%	0
8°	MFM	9	89	27.99	11.60	2.15%	94.48%	3.37%
	PCSM	9	27	17.61	2.40	0	100%	0
10°	MFM	17	124	43.73	16.92	0.89%	96.62%	2.49%
	PCSM	16	37	27.52	2.88	0	100%	0
12°	MFM	24	155	62.95	23.03	0.34%	97.28%	2.38%
	PCSM	24	52	39.62	3.35	0	100%	0
14°	MFM	35	193	85.67	29.83	0.10%	98.03%	1.87%
	PCSM	35	68	53.91	3.93	0	100%	0

为了分析文中提出导航星选取方法的快速性, 与二分搜索法进行比较搜星耗时。二分搜索方法是一种应用广泛的、成熟的快速搜索方法, 许多学者在对导航星数据进行处理时也采用了该方法<sup>[12]</sup>。对每个基准点处对候选星进行搜索和筛选时分别采用  $k$ -vector 搜索方法与二分搜索方法, 分别统计耗时情况, 结果如图 6 和表 3 所示。

由图 6 和表 3 的仿真结果可以看出, 引入  $k$ -vector 搜索方法后, 搜星效率明显得到改善。与二分搜索方法相比, 导航星选取的速度平均提高了约 10 倍。

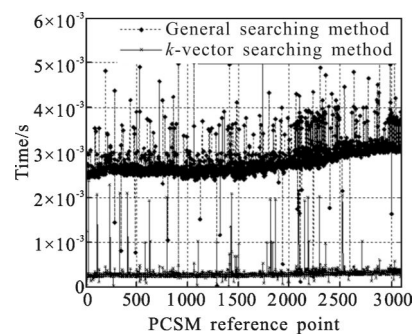


图 6 基于 PCSM 基准点搜星耗时比较  
Fig.6 Comparison of searching guide star spent time based on PCSM reference points

表 3 不同搜索方法的平均耗时统计

Tab.3 Mean spent time of different searching methods

Methods	PCSM reference points/ms
Dichotomy	2.814 4
$k$ -vector searching method	0.291 9

## 4 结 论

建立导航星表最重要的步骤是选取导航星,文中从导航星的均匀性指标出发,提出了基于 PCSM 基准点及“距离-星等”加权相结合的导航星选取方法,使得最终选取的导航星同时兼顾亮度和均匀性指标,并在导航星选取过程中采用了快速高效的  $k$ -vector 方法,且极大地提高了方法的整体效率,为解决导航星的选取问题提供了有效途径,为实现均匀、完备的导航星表快速构建奠定了基础。

### 参考文献:

- [1] Chen Cong, Wang Hongli, Cui Xiangxiang, et al. A method of improving real-time of star sensor based on predicting and tracking star catalog [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2190–2196. (in Chinese)  
陈聪, 王宏力, 崔祥祥, 等. 基于预测跟踪星表提高星敏传感器实时性方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2190–2196.
- [2] 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. 星敏传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.
- [3] Qiao Peiyu, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Calibration of high-accuracy star sensor[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2779–2784. (in Chinese)  
乔培玉, 何昕, 魏仲慧, 等. 高精度星敏传感器的标定[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2779–2784.
- [4] Michael K. Geometric voting algorithm for star trackers [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2008, 44(2): 441–456.
- [5] Vedder J D. Star trackers, star catalog, and attitude determination: probabilistic aspects of system design [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1993, 16(3): 499–504.
- [6] Robert B. Distribution of points on a sphere with application to star catalogs [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2000, 20(1): 130–135.
- [7] Kim H Y, Junkins J L. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: thinning method [C]//Proceeding of Aerospace Conference, IEEE, 2002: 2276–2283.
- [8] Fang Jiancheng, Quan Wei, Meng Xiaohong. All-sky autonomous star map identification algorithm based on delaunay triangulation cutting algorithm [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(3): 311–315. (in Chinese)  
房建成, 全伟, 孟小红. 基于 Delaunay 三角剖分的全自主星图识别算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(3): 311–315.
- [9] Tian Hong, Lin Ling, Hao Zhijie, et al. Build a navigation star catalog for star tracker [J]. *Aerospace Control and Application*, 2010, 36(3): 43–46. (in Chinese)  
田宏, 林玲, 郝永杰, 等. 星敏传感器导航星表建立[J]. *空间控制技术与应用*, 2010, 36(3): 43–46.
- [10] Mathematics S. Statistics. Distributing points on the sphere [EB/OL]. [2014-05-10]. <http://www.maths.unsw.edu.au/school/articles/me100.html>.
- [11] Mortari D, Junkins J L, Samaan M A. Lost-in-space pyramid algorithm for robust star pattern recognition [C]//Guidance and Control 2001, Proceedings of the Annual AAS Rocky Mountain Conference, 2001: 49–68.
- [12] Benjamin B Spratling, IV Daniele Mortari. A survey on star identification algorithms[J]. *Algorithms*, 2009, 2: 93–107.