

文章编号 1004-924X(2015)06-1732-10

## 三视场天文导航视场间星图识别的导航星选取

吴 量<sup>1,2\*</sup>, 王建立<sup>1</sup>, 王昊京<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

**摘要:** 研究了三视场天文导航视场间导航星的选取方法, 以提高其视场间星图识别的效率, 减小识别特征数据库规模。根据三视场天文导航星图识别的特点, 分析了导航视场间导航星数目对视场间三角形星图识别的影响。考虑视场间三角形星图识别的需求, 给出了任意视场至少包含 1 颗导航星和亮星优先选取的视场间导航星选取准则。然后, 遵从上述准则提出了一种基于星等优先的一阶自组织导航星选取算法。利用提出的算法制备了视场间导航星星库, 并对该导航星星库的性能进行了仿真分析和外场实验。实验结果表明: 使用该算法制备的导航星星库规模较星等阈值过滤方法制备的星库规模降低了 53.91%, 且库中导航星分布均匀, 符合视场间导航星的要求。

**关键词:** 天文导航; 三视场; 星图识别; 导航星选取

**中图分类号:** TP391.4; V249.323 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152306.1732

## Guide star selection for star pattern recognition between three FOVs

WU Liang<sup>1,2\*</sup>, WANG Jian-li<sup>1</sup>, WANG Hao-jing<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)  
\* *Corresponding author, E-mail: 624989202@qq.com*

**Abstract:** A guide star selection algorithm for the three Field of View(FOV) navigation system was proposed to increase the efficiency of the star pattern recognition between three FOVs, and to decrease the size of a guide star database. According to the characteristics of star pattern recognition for three FOV navigation system, the influence of the number of guide stars between three FOVs on the triangle star pattern recognition was analyzed. According to the requirement of triangle star pattern recognition between FOVs, the guide star selection principle, one guide star at least is inside the FOV and the brighter star can be selected in priority, was presented. Then the 1st order self-organizing guide star selection algorithm based on the principle magnitude mentioned above was proposed. A guide star database between FOVs was established based on the proposed algorithm, and the simulation analysis and field experiments of the capability of the guide star database were performed. Experimental results indicate that the number of the guide stars in the database selected by this method have reduced by 53.91% compared with that of the visual magnitude threshold method and the

收稿日期: 2014-07-25; 修订日期: 2014-08-21.

基金项目: 国防科技创新基金资助项目(No. CXJJ-10-M53)

guide stars in the database show uniform distribution. It satisfies the guide star selection requirement of the star pattern recognition between FOVs in celestial navigation systems.

**Key words:** celestial navigation; three FOVs; star pattern recognition; guide star selection

## 1 引言

天文导航作为重要的备用导航设备,具有精度高、隐蔽性好、可靠性高、自主性强等优势<sup>[1]</sup>。近年来,为了改善天文导航系统的可靠性,基于多视场光电探测系统的天文导航已成为一个新的发展方向<sup>[2]</sup>。国外已经研发出相关的三视场天文导航产品,如法国 SODERN 公司的 HYDRA 星敏感器<sup>[3-4]</sup>;美国 Trex 公司的多视场恒星跟踪器<sup>[5]</sup>以及 MICROCOSM 公司的 MicroMak 三视场星敏感器<sup>[6]</sup>等。然而,目前国外文献通常仅对整个多视场天文导航设备系统进行描述,内容多涉及系统的结构,光学系统设计以及装调方法,除 Trex 公司的专利<sup>[5]</sup>提到了该系统使用三角形星图识别方法完成星图识别外,其它尚未见谈及三视场导航星星库制备的方法研究。

国内在多视场天文导航方面起步较晚,北京航空航天大学<sup>[7-8]</sup>,清华大学<sup>[9]</sup>,以及中国科学院长春光机所<sup>[10-12]</sup>等单位对多视场天文导航系统的工作模式进行了研究,而针对多视场导航星星库制备方法的研究,只有文献<sup>[12]</sup>提到,该文献使用视星等阈值过滤方法制备导航星星库,并没有针对多视场星图识别特性研究导航星星库的制备方法。

导航星星库是天文导航系统的核心组成部分,是天文导航中用于星图识别和导航计算的唯一依据。为了提高星图识别效率,减小星图识别数据库的规模,以往的单视场天文导航系统通常都会对导航星进行优选,以构成导航星星库<sup>[13]</sup>。目前最常用的方法是视星等阈值过滤<sup>[14]</sup>(Visual Magnitude Threshold, VMT)。该方法直接将基本星表中星等小于或等于某一值的星选出来组成导航星库。这种方法应用简单,能够制备出与光学系统性能相匹配的导航星星库,但由于恒星分布的不均匀性,会导致某些区域的导航星仍然存在大量的冗余。该方法通常作为其他导航星星库制备方法的基础。

在 VMT 方法的基础上,对于单视场天文导

航系统,学者们提出了多种以导航星分布均匀性作为准则的导航星星库制备方法,包括球面分块法<sup>[15]</sup>,基于螺旋基准点算法<sup>[16]</sup>,玻尔兹曼熵算法<sup>[17]</sup>,支持向量机方法<sup>[18-19]</sup>,自组织算法<sup>[20]</sup>等。这些方法都是基于传统的单视场天文导航系统提出的,通常制备的导航星星库可以保证每个视场中具有 3 颗以上的导航星,但由于单视场系统的视场通常较大,很容易使导航星数目明显下降。三视场系统视场通常较小,而且视场冗余,只需要每个视场内有 1 颗导航星便可完成星图识别。若使用传统的均匀化方法制备视场间导航星星库,且每个视场中保证 3 颗导航星,则导航星星库冗余过大;如果保证每个视场内有 1 颗导航星,则容易出现空洞。已有方法中只有一阶自组织算法是以每个视场中至少存在 1 颗导航星为基础进行导航星星库均匀化的,但由于其不能满足传统的单视场星图识别要求,并且算法相对复杂,一直没有得到工程应用。目前还没有提出针对三视场天文导航系统的导航星选取算法。

本文以三视场天文导航视场间的导航星选取为研究对象,首先分析了三视场天文导航的星图识别特点,以及导航星星库对于星图识别效率的影响。然后给出了视场间导航星选取准则,通过改进一阶自组织算法,提出了基于星等优先原则的一阶自组织导航星选取算法,并利用此算法从 Tycho2 星表中对导航星进行优选,制备视场间导航星星库。最后通过计算机仿真及三视场天文导航设备样机的外场实验,对本文算法制备的视场间导航星星库性能进行了分析和验证。

## 2 三视场天文导航设备星图识别特征

### 2.1 三视场天文导航系统简介

三视场天文导航设备由 3 个完全相同的小视场星敏感器构成(图 1)。为了降低恒星识别的复杂度,三视场导航设备一般采用对称的视场排布,3 个光学视场的光轴在载体坐标系中的水平投影均匀分布,即水平投影夹角为  $120^\circ$ ;并且 3 个光学视场的光轴在载体坐标系中具有相同的高度角  $Alt$ 。

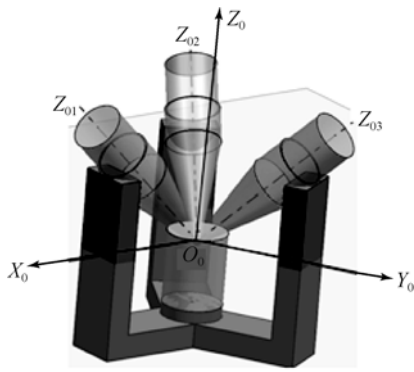


图 1 三视场天文导航设备结构图

Fig. 1 Equipment structure of three FOV celestial navigation

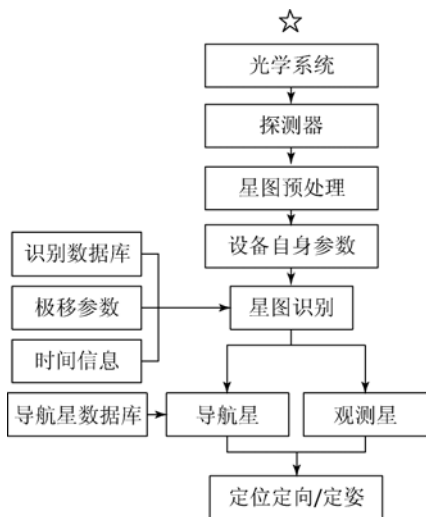


图 2 三视场天文导航的原理框图

Fig. 2 Principle block diagram of three FOV celestial navigation

三视场天文定位定向系统的工作原理如图 2 所示。天体目标由 3 个光学视场捕获,并成像在探测器上,获取探测器中的图像,通过星图预处理及质心计算即可获取各视场中天体的质心位置。通过天体的质心位置,各视场光学系统的焦距、CCD 的像素尺寸、分辨率、主点、畸变参数、光轴在载体中的矢量位置,以及 CCD 的安装旋转角等,可以计算各视场中的天体目标在载体坐标系中的位置矢量,从而在载体坐标系中算出各个星点目标之间的星图识别特征。利用此特征结合星图识别数据库进行星图识别,可获得导航星星库中的导航星与当前观测星的匹配组。使用导航星信息、观测星信息根据不同的导航应用,即可完成定位定向或姿态计算。

与传统的单视场天文导航设备相比,三视场天文导航设备可靠性更高,这主要体现在两个方面:首先,由于星点在天球上分布不均匀,单视场天文导航设备在某些指向所捕获的星点数量不足以完成星图识别;而三视场设备的各个视场指向不同天区,可以避免此问题。另一方面,在星图识别过程中,三视场天文导航设备可以联合 3 个视场中的恒星信息完成星图识别,此部分性能的提升主要依赖于三视场的星图识别方法。

### 2.2 三视场天文导航星图识别方法

三视场星图识别方法是三视场天文导航系统与单视场系统在工作原理上的一个主要区别。本文以目前应用最广泛的三角形星图识别方法为基础建立三视场星图识别方法。

三角形识别算法以三角形全等原理为匹配识别标准,将导航星所能构成的导航三角形都存储起来以供搜索匹配<sup>[21-22]</sup>,从而完成星图识别。识别特征数据库是事先离线生成的,其由识别信息对构成,并经过角距排序,包含了预先计算出的全部恒星间的星角距信息。将全球星识别数据库记作  $IdenDataBase$ ,识别信息对记作  $InfoPair$ 。识别信息对是由两颗恒星的编号和星角距组成的,有时也包括星等信息  $Mag$ 。星角距  $StarAng_{pq}$  是识别星表中编号为  $p, q$  的恒星角距信息,则  $InfoPair = \{ p, q, StarAng_{pq}, Mag_p, Mag_q \}$ ,  $IdenDataBase = \{ InfoPair \}$ 。将星图中提取的灰度信息转换为星等并和计算出的角距信息  $StarAng_{ij}$  相结合,组成识别信息对  $InfoPair_{ij}$ 。计算获取的识别信息对  $InfoPair_{ij}$  结合恒星识别数据库  $IdenDataBase$  进行辨识,将识别出的恒星分别记作  $Star_p, Star_q$ ,至此完成星图识别。

三视场星图识别方法分为视场内星图识别和视场间星图识别两部分。视场内的星图识别方法与传统的单视场三角形星图识别方法相同,当视场内的星点个数无法完成星图识别时,即联合 3 个视场中的星点信息进行视场间的星图识别;视场间星图识别方法则是多视场天文导航系统特有的,下面主要对三视场系统的视场间星图识别方法进行介绍。

#### 2.2.1 三视场系统的视场间星图识别方法

图 3 是视场间星图识别方法的流程图。

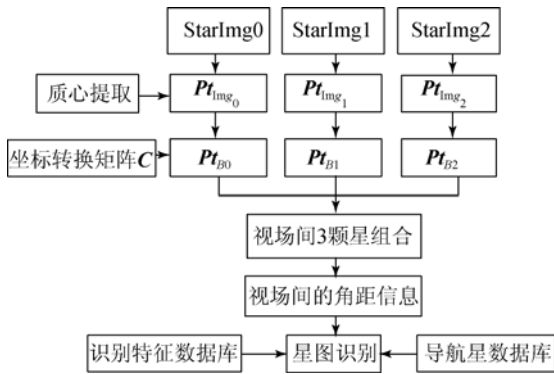


图 3 三视场天文导航视场间星图识别流程图

Fig. 3 Flowchart of star identification between three FOVs in celestial navigation

首先,将 3 个视场实际拍摄的星图进行星图预处理和星点的质心提取,分别得到 3 个视场中的星点在图像坐标系内的矢量集合  $Pt_{img_0}$ ,  $Pt_{img_1}$ ,  $Pt_{img_2}$ , 它们用点的齐次坐标表示;然后,利用预先标定的 3 个视场的光学参数及视轴在载体坐标系中的矢量位置,可以得到各视场内的矢量从图像坐标系到载体坐标系的坐标转换矩阵  $C_{img_i}^B$ ,  $i \in 1, 2, 3$ 。根据式(1),即可求得 3 个视场中的星点在载体坐标系中的矢量  $Pt_{B_i}$ ;最后,从每个视场中各取一个星点,构成一个匹配组,并计算 3 个星点之间的角距信息,与识别特征数据库中的信息进行匹配,完成星图识别。

$$Pt_{B_i} = C_{img_i}^B \cdot Pt_{img_i}, i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

### 2.2.2 视场内和视场间识别特征数据库的规模

三视场识别特征数据库包括视场内和视场间 2 个识别特征数据库,分别记作  $IdenDataBase_1$ 、 $IdenDataBase_2$ 。在图 1 中,由光轴矢量  $AxiVec_i$  可得任意光轴间的夹角,简记为  $Ang_{oc}$ ,由于三视场天文导航设备的结构对称,所以光轴间的夹角数值相等,均为  $Ang_{oc}$ ;令 3 个视场均为圆形视场,半径均为  $FOV_r$ 。对于视场间的识别信息对  $\forall InfoPair_{pq} \in IdenDataBase_2$ ,应满足下式:

$$Ang_{oc} - FOV_r < StarAng_{pq} < Ang_{oc} + FOV_r. \quad (2)$$

而对于视场内的识别信息对  $\forall InfoPair_{pq} \in IdenDataBase_1$ ,应满足下式:

$$BinAng < StarAng_{pq} < FOV_r, \quad (3)$$

其中  $BinAng$  为双星的星间角距限制,一般取星图图像中 6~8 pixel 对应的空间张角。

导航星星库选用最基本的星等滤波方法从

Tycho2 星表中选取星等小于  $Mag_H$  的子集。导航星满足下式:

$$StarCat_{Id} = \{ Star | Star < Mag_H, StarAng_{pq} > BinAng, p, q \in N \}. \quad (4)$$

星点角距范围示意图如图 4(彩图见期刊电子版)所示。

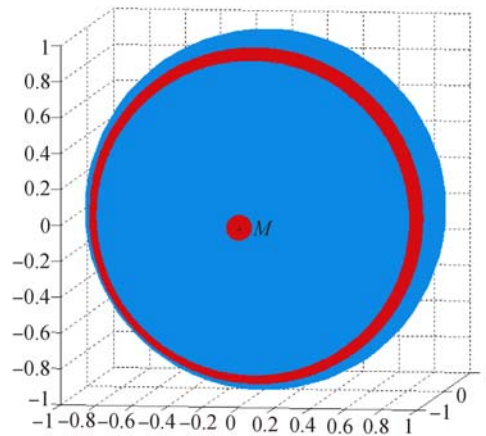


图 4 星点角距范围示意图

Fig. 4 Diagram of star angle range

由图 4 可知,  $M$  为导航星星库中的一颗导航星,根据式(2)~(3)可知,能够与导航星星库中的导航星  $M$  构成视场内识别特征的星点的位置范围为  $M$  周围的红色小圆,其面积为  $S_1$ ;能够与  $M$  构成视场间识别特征的星点位置范围为红色圆环部分,其面积为  $S_2$ 。假设导航星星库中的导航星分布均匀,则视场间识别特征数据库与视场内识别特征数据库的规模比可以近似由  $S_2$  与  $S_1$  的比值估计,如式(5)所示:

$$\frac{S_2}{S_1} = 2 \cdot \sin Ang_{oc} \cdot \cot FOV_r. \quad (5)$$

假设 3 个视场的高度角  $Alt = 45^\circ$ , 视场半径为  $2^\circ$ , 则可以得到  $Ang_{oc} = 75.5225^\circ$ , 由式(5)可知,视场间识别特征数据库的规模约为视场内的 55 倍。可见视场间星图识别与视场内星图识别若使用相同的导航星星库,会导致视场间的识别特征数据库规模远大于视场内识别数据库,这将会严重影响视场间的星图识别速度,且不利于存储。针对此问题,本文提出一种视场间导航星的选取方法,该方法可以在满足视场间星图识别的基础上,减少视场间的导航星星库容量,从而降低视场间识别特征数据库的规模。

### 3 三视场天文导航视场间导航星选取

#### 3.1 三视场天文导航视场间导航星的选取原则

研究导航星的选取方法,首先需要根据星图识别算法的要求制定导航星的选取准则。

三角形星图识别的基本要求是每次实际拍摄的星图中包含 3 颗导航星,而三视场天文导航系统的每个视场会观测到 1 颗导航星,3 个视场中的导航星组合恰好为 3 颗,可以满足视场间三角形星图识别的要求。故视场间导航星选取原则 I (简称选取原则 I)就是保证每个视场中存在 1 颗导航星。令每个视场中捕获的导航星个数为  $StarCount_i$ ,则选取原则 I 数学表示为:

$$A_i = \{ StarCount_i \geq 1 \}, i=1,2,3. \quad (6)$$

由于实际拍摄的星图中亮度较高的观测星通常不是干扰星,并且容易获得更高的质心提取精度,所以在视场间三角形星图识别过程中,优先采用各视场中亮度较高的星点进行星图识别。为了在最少的识别次数中获取与导航星匹配的观测星组合,需要采用最亮星优先的原则进行导航星选取,即尽量选取视场内最亮的星为导航星,将此作为视场间导航星选取原则 II (简称选取原则 II)。

在保证以上两条导航星选取原则的基础上,构建导航星选取算法使导航星星库的规模尽量压缩,从而降低导航星星库的冗余度。

#### 3.2 基于星等优先原则的一阶自组织导航星选取算法

##### 3.2.1 自组织导航星选取算法简介

自组织导航星选取算法是由 Texas A&M 大学提出的针对单视场的导航星选取算法<sup>[18]</sup>,该算法在保证任意视轴指向的视场内达到指定导航星数的前提下,根据恒星之间的位置关系,逐个挑选导航星,选取的导航星在局部和全天球上的分布都比较均匀。该算法分为一阶算法和二阶算法,即保证视场内至少具有 1 颗或 2 颗导航星。由于传统的单视场导航系统的视场内至少需要 3 颗导航星,才能满足星图识别要求,显然一阶算法无法满足需求;而根据文献的实验结果,二阶算法虽然基本能够满足需求,但由于算法过于复杂,目前尚未被应用于工程实践当中。

##### 3.2.2 基于星等优先原则的一阶自组织导航星选取算法

根据选取原则 I,本文使用相对易于实现的一阶自组织导航星星库制备算法,以保证每个视场中至少存在 1 颗导航星,且能够最大限度的压缩导航星星库;为了满足选取原则 II,本文采用星等优先的原则对一阶自组织导航星星库制备算法加以改进,提出基于星等优先原则的一阶自组织导航星选取算法(1st Order Self-organizing Guide Star Selection Algorithm Based on the Principle of Magnitude, 1st-SOPM 算法),用于三视场系统的视场间导航星星库制备。

根据三视场天文导航设备的光学系统极限探测能力,确定候选星的星等阈值为  $Mag_H$ 。以  $Mag_H$  为标准首先使用目前普遍应用的 VMT 从原始星表中选取星等低于  $Mag_H$  的星点,构成候选星库。目前已知的三视场天文导航系统使用的视场间导航星星库通常直接由该方法制备<sup>[12]</sup>。

设三视场天文导航系统的视场为圆形,视场半径为  $FOV_r$ 。从候选星库中任意选取一颗候选星  $S$ ,以  $S$  的天球矢量为中心轴,以  $FOV_r$  为半径的旋转体与天球的交线为球面圆  $SphC(S, FOV_r)$ ,称  $SphC(S, FOV_r)$  为星  $S$  的覆盖圆。则由几何关系可知,光轴在此覆盖圆范围内的所有视场均可观测到星  $S$ 。对于具有足够大的星等阈值  $Mag_H$  的候选星表,如果将候选星表中的所有星点都以  $FOV_r$  为半径作覆盖圆,则整个天球将被这些圆覆盖,这意味着任意指向的视场都能观测到 1 颗星。然而由于这些覆盖圆存在大量重复覆盖的情况,所以没有必要将所有的星点都作为导航星。选取过程将以三视场天文导航视场间导航星的选取原则为准则,选取重叠部分少,且互相相交的圆。

使用 1st-SOPM 算法进行导航星选取的过程如下:

(1)如图 5(a)所示,从候选星库中选取最亮的一颗恒星  $S_1$ ,称为枢纽星,该星也是选取的第 1 颗导航星。以  $S_1$  为圆心,  $2FOV_r$  为半径作球面圆  $SphC(S_1, 2FOV_r)$ ,即图中虚线圆  $C_{1,2}$ ;

(2)在  $C_{1,2}$  的范围内选取第 2 颗导航星,这样可以保证星  $S_1$  和星  $S_2$  的覆盖圆  $C_1$ 、 $C_2$  相交。并

且为了尽量满足导航星在视场内具有相对较高的亮度,选取该范围内除  $S_1$  以外的最亮候选星  $S_2$  作为第 2 颗导航星。使视场光轴在覆盖圆  $C_1$ 、 $C_2$  范围内的所有视场中,至少可以观测到 1 颗导航星( $S_1$  和/或  $S_2$ ),且导航星在视场中具有较高的亮度;

(3)如图 5(b)所示,导航星  $S_1$ 、 $S_2$  的覆盖圆  $C_1$  和  $C_2$  相交于矢量位置  $P_{1,2}$ 、 $P'_{1,2}$ ,按顺时针顺序选取  $P_{1,2}$  矢量为中心轴、 $FOV_r$  为半径做球面圆  $SphC(P_{1,2}, FOV_r)$ ;

(4)在圆  $SphC(P_{1,2}, FOV_r)$  内选取最亮的候选星作为第 3 颗导航星  $S_3$ 。这样就可以保证导航星  $S_3$  在枢纽星  $S_1$  的邻域  $C_{1,2}$  内,且  $S_3$  的覆盖圆  $C_3$  能够与  $C_1$ 、 $C_2$  相交;

(5)同理选取第 4 颗导航星  $S_4$ ,如图 5(c)所示;

(6)按照这种方法选取导航星,直到枢纽星  $S_1$  的覆盖圆  $C_1$  的圆周全部被已选取的邻近导航星的覆盖圆至少覆盖 1 次,则完成枢纽星  $S_1$  周围的导航星选取,如图 5(d)所示;

(7)选取  $S_1$  周围的一颗导航星作为枢纽星,例如选取  $S_2$  为枢纽星,则星点  $S_1$ 、 $S_3$ 、 $S_6$  成为它的邻近导航星,对于圆  $C_2$  圆周未被覆盖部分,继续重复上述过程;

直至所选取全部导航星的覆盖圆覆盖整个天球,按照此方法已经无法再找到导航星,则完成三视场天文导航系统的视场间导航星选取。

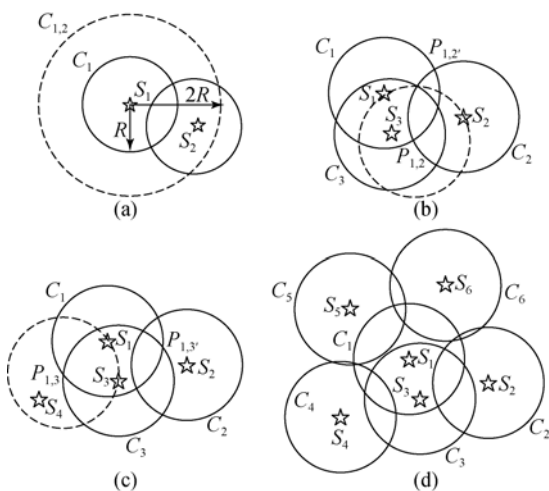


图 5 导航星选择方法示意图

Fig. 5 Diagram of guide star selection method

## 4 实验与结果

### 4.1 导航星选取结果

表 1 是在不同星等阈值  $Mag_H$  及不同的视场条件  $FOV_r$  下,使用 1st-SOPM 算法的导航星星库制备结果。由于本实验系统选用的探测器的靶面为正方形,故光学视场亦为正方形视场,而本文的导航星星库制备算法需要使用圆形视场进行操作,为了保证导航星星库的完备性,取正方形视场的内切圆半径作为导航星选取算法的  $FOV_r$ 。从结果可以看出,当光学系统的极限星等探测能力较高,并且视场较大的情况下,1st-SOPM 算法所制备的三视场天文导航视场间导航星星库规模具有更明显的优势。

表 1 导航星选取结果

Tab. 1 Selection results of guide star

星等 阈值	导航星数目			候选星 数目
	$4^\circ \times 4^\circ$ 视场	$4.5^\circ \times 4.5^\circ$ 视场	$5^\circ \times 5^\circ$ 视场	
6.5	6 794	5 916	4 919	8 057
7	8 012	6 741	5 547	14 626
7.5	8 739	6 973	5 633	25 367

### 4.2 仿真实验与结果

#### 4.2.1 仿真条件

本文采用 C++ 语言在电脑上进行仿真分析。仿真使用的三视场系统的 3 个视场大小均为  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ ,3 个视场的视轴排布如下:水平投影间隔为  $120^\circ$ ,高度角为  $45^\circ$ ,CCD 尺寸为  $768 \times 768$ ,主点位置在 CCD 的靶面中心,且光学系统无畸变,极限探测能力为 7 等星,采用可见光波段的 Tycho2 星表<sup>[23]</sup>作为基本星表。

#### 4.2.2 导航星星库制备结果

使用星等阈值为 7 的 VMT 得到的候选星星库如图 6 所示,候选星数目为 14 626。从候选星星库中使用 1st-SOPM 算法制备导航星星库,如图 7 所示,导航星数目为 6 741。导航星星库的规模较候选星减少了 53.91%。比较两图可明显看出,利用 1st-SOPM 算法可以获取均匀分布的导

航星星库。使用导航星和候选星制备的视场间三角形星图识别的识别特征数据库条目数量分别为 1 624 688 和 74 066 041, 减少了 78.06%。

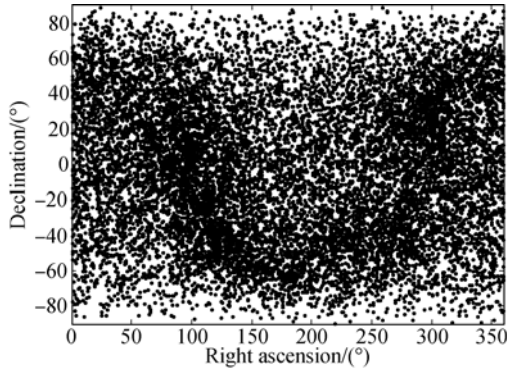


图 6 候选星星库  
Fig. 6 Database of candidate stars

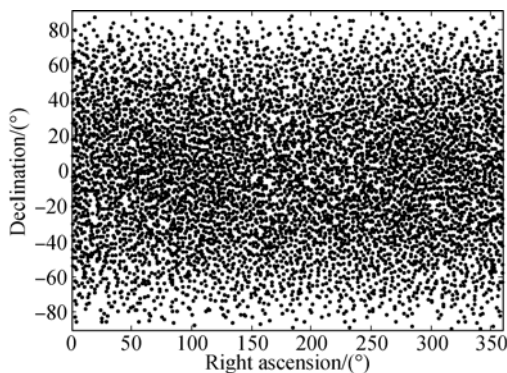


图 7 导航星星库  
Fig. 7 Database of guide stars

#### 4.2.3 导航星星库性能测试

使用蒙特卡洛模拟的方法对本算法提取的导航星星库的性能进行测试:

视场间导航星星库性能测试方法流程如图 8 所示。使用满足仿真参数的单视场对导航星星库的性能进行测试,以分析 1st-SOPM 算法制备的导航星星库是否满足三视场天文导航视场间导航星的选取原则。

设置测试的总次数  $Counts=10\ 000$ 。随机获取视轴的天球指向  $(\varphi_{Ra}, \varphi_{Dec})$ , 根据视场的尺寸,从候选星星库和导航星星库中分别提取视场内的候选星集合  $CandidateStar_{FOV}$ 、 $NavigationStar_{FOV}$ , 并计算各集合中的星点个数  $StarCount_1$ 、 $StarCount_2$ 。如果  $StarCount_1=0$ , 则说明在该探测能力下视场中无法捕获星点, 此情况对于测试无意义, 故直接

进行下一次测试。否则将记录  $StarCount_1$  和  $StarCount_2$ , 用于统计分析。然后, 计算并记录  $NavigationStar_{FOV}$  中最亮的导航星  $S$  在  $CandidateStar_{FOV}$  中的亮度排序结果, 完成一次测试,  $Counts$  减 1, 直至  $Counts$  等于零时停止测试。

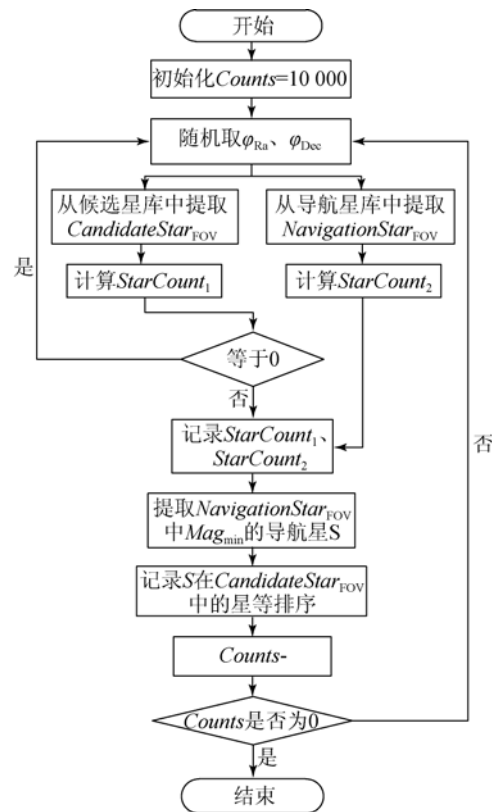


图 8 视场间导航星星库性能测试流程图  
Fig. 8 Flow chart of performance test for guide star database

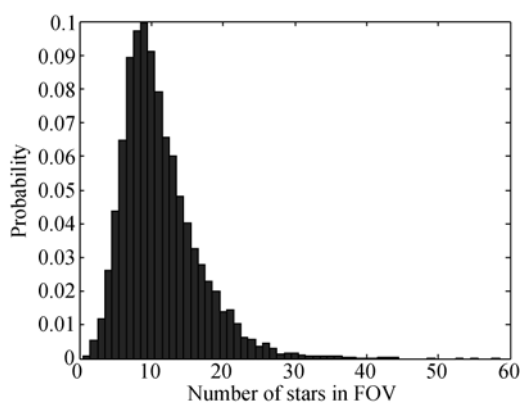


图 9  $StarCount_1$  统计结果  
Fig. 9 Statistical results of  $StarCount_1$

对于视场内星点个数  $StarCount_1$ 、 $StarCount_2$

的统计结果分别如图 9 和图 10 所示,从图 10 的  $StarCount_2$  的统计结果可以看出,任意指向的视场中至少存在 1 颗导航星,结果满足选取原则 I。图 9 中的视场内候选星的数目均值为 11.254 8,标准差为 5.368 2。图 10 中的视场内导航星的数目均值为 5.224 8,标准差为 1.405 4。可见视场内的导航星数目明显少于候选星数目,且导航星的分布较候选星均匀。

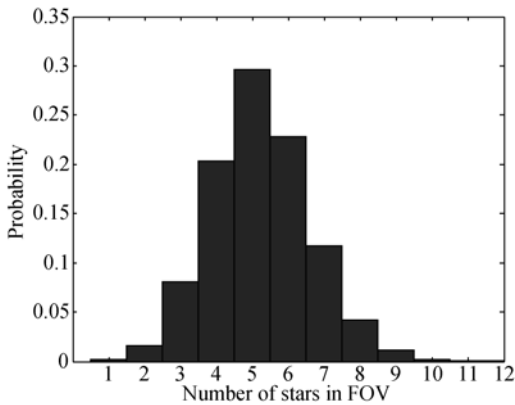


图 10  $StarCount_2$  统计结果

Fig. 10 Statistical results of  $StarCount_2$

表 2 视场中导航星亮度排序概率表

Tab. 2 Probability of brightness sorting for guide star in FOV

亮度排序	1	2	3	4	5	6
概率/%	91.35	7.45	0.98	0.16	0.05	0.01

表 2 为视场内最亮的导航星 S 在候选星中的亮度排序统计结果。视场中最亮的 3 颗星包含导航星的概率可以达到 99.78%,说明导航星选取结果能够满足选取原则 II 的要求。

### 4.3 野外实验与结果

图 11 是三视场定位定向设备的简易实验平台。3 个视场的光轴排布为水平投影间隔为  $120^\circ$ ,高度角为  $45^\circ$ 。可见光波段的 CCD 探测器分辨率为  $768 \times 768$ ,像素尺寸为  $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。光学系统的口径为 73 mm,极限探测能力为 7 等星,视场大小为  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ 。以上参数与仿真实验相符,故使用仿真实验制备的导航星星库进行外场实验测试。

实验平台下部是一个水平放置,已经标定方位的高精度转台,通过控制转台的转动使平台的方位随意变换,并且可以获取实验平台在地平坐

标系中较为精确的姿态。为了真实反映导航星星库的性能,排除星图识别对测试结果的影响,本实验利用实验平台姿态信息、GPS 系统的定位信息和时间信息,通过坐标转换计算 3 个视场光轴的天球指向,从而根据 Tycho2 星表得到各视场的仿真星图。然后使用仿真星图和真实拍摄的星图进行匹配,尽可能地减少星图识别过程对实验结果的影响。当仿真星图中没有星点时,则该次实验视为无效。

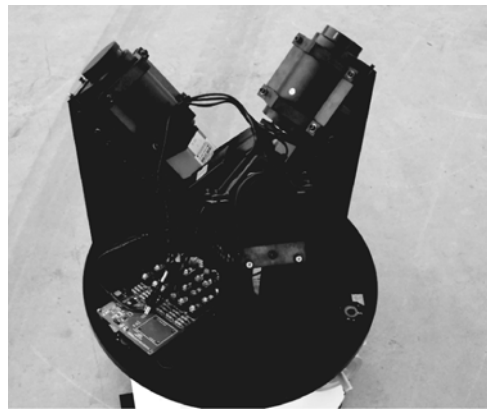


图 11 三视场天文导航设备简易实验平台

Fig. 11 Experiment platform of three FOV celestial navigation equipment

表 3 视场中导航星亮度排序统计表

Tab. 3 Statistics of brightness sorting for guide star in FOVs

亮度排序	1	2	3	4	5	6
视场 1	274	21	4	0	0	1
视场 2	263	34	1	2	0	0
视场 3	261	35	4	0	0	0

本实验对高精度转台进行了 300 次随机的旋转实验。对于各个视场内最亮的导航星在视场内观测星中的亮度排序进行统计,结果如表 3 所示。其中亮度排序是指各视场内最亮的导航星 S 在候选星中的亮度排序,视场 1,视场 2,视场 3 中的数据分别表示 3 个视场中各亮度排序的次数统计。将各视场对应的各亮度排序的次数相加,结果均与实验次数相同,证实每次实验 3 个视场都能保证观测到至少 1 颗导航星,即导航星星库满足选取原则 I。另外,从结果还可以看出,导航星通常是视场内亮度较高的观测星,基本满足选取

原则 II 要求。

## 5 结 论

研究了多视场天文导航视场间导航星的选取方法。根据视场间三角形星图识别原理,给出了导航星选取准则,并根据此准则提出了基于星等优先原则的一阶自组织导航星选取算法。然后,根据不同的星等阈值和视场大小,给出了视场间导航星星库制备结果。结果表明:星等阈值越高,

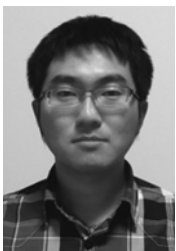
视场越大,1st-SOPM 算法选取的导航星星库规模的优势越明显;在星等阈值为 7,视场大小为  $4.5^\circ \times 4.5^\circ$  的情况下,导航星数量减少了 53.91%,视场间识别特征数据库条目数量减少了 78.06%。使用单视场的蒙特卡洛方法对导航星星库性能进行仿真分析,结果表明:使用本算法获取的导航星星库可以很好地满足导航星选取原则。三视场天文导航设备进行的野外实验验证了 1st-SOPM 算法制备的导航星星库满足三视场天文导航视场间星图识别的导航星选取要求。

### 参考文献:

- [1] 王安国. 现代天文导航及其关键技术[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2347-2353.  
WANG A G. Modern celestial navigation and the key techniques [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 35(12): 2347-2353. (in Chinese)
- [2] 刘垒, 张路, 郑辛, 等. 星敏传感器技术研究现状及发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(增): 529-533.  
LIU L, ZHANG L, ZHENG X, et al.. Current situation and development trends of star sensor technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(supp): 529-533. (in Chinese)
- [3] KOCHER Y, GELIN B, PIOT D. Hydra star tracker innovative test solution [C]. *21st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, New Orleans, LA, United states: Univelt Inc.*, 2011: 1399-1416.
- [4] BLARRE L, PERRIMON N, HYDRA M L. A new multiple heads APS based star sensor; description and discussion of the robustness improvement enabled by the APS technology[C]. *30th Annual AAS Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, United states: Univelt Inc.*, 2007: 551-566.
- [5] TREX ENTERPRISES CORP. Daytime Stellar Imager For Attitude Determination, USA: US 7, 349, 803 B2 [P]. 2008-3-25.
- [6] BROWN A, MATHEWS B, NGUYEN D. GPS/INS/STAR tracker navigation using a software defined radio [C]. *30th Annual AAS Rocky Mountain Guidance and Control Conference, Breckenridge, CO, United states: Univelt Inc.*, 2007: 111-122.
- [7] 叶生龙, 魏新国, 樊巧云, 等. 多视场星敏传感器工作模式设计[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(10): 1244-1247.  
YE SH L, WEI X G, FAN Q Y, et al.. Operation mode design of multi-FOV star sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(10): 1244-1247. (in Chinese)
- [8] 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, 2011, 40(12): 2469-2473.  
WANG ZH, WEI X G, ZHANG G J. Structure optimization for multi-FOV star sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2469-2473. (in Chinese)
- [9] 尤政, 邢飞, 董璇. 双视场星敏传感器及利用其进行星图识别的方法, 中国: CN1609549 [P]. 2005-04-27.  
YOU ZH, XING F, DONG Y. Two FOVs star sensor and its star pattern method, Chinese: CN1609549 [P]. 2005-04-27. (in Chinese)
- [10] 郭敬明. 基于星敏传感器的船姿测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.  
GUO J M. *Study on ship attitude measurement based on star sensor* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [11] 刘冰, 朱伟康, 张同双, 等. 基于双星敏传感器的船体姿态确定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 569-575.  
LIU B, ZHU W K, ZHANG T SH, et al.. Determination of ship attitude based on dual star sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 569-575. (in Chinese)
- [12] 王昊京. 三视场恒星识别天文导航方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2012.  
WANG H J. *Study on celestial navigation by three fields of view star recognition* [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2012. (in Chinese)
- [13] 阚道宏, 朱铮, 过瑞英. 星敏传感器用导航星表的建

- 立[J]. 宇航学报,1992,14(4):43-49.
- KAN D H, ZHU ZH, GUO R Y. Guide star sub-catalog generation for star sensor [J]. *Journal of Astronautics*, 1992, 14(4): 43-49. (in Chinese)
- [14] 郑胜, 吴伟仁, 田金文, 等. 一种新的导航星选取算法研究[J]. 宇航学报, 2004, 25(1): 35-40.
- ZHENG S, WU W Y, TIAN J W, et al. A novel regression selection algorithm of guide star [J]. *Journal of Astronautics*, 2004, 25(1): 35-40. (in Chinese)
- [15] SAMAAN M A, BRUCCOLERI C, MORTARI D, et al.. Novel techniques for creating nearly uniform star catalog [C]. *AIAA/AAS Astrodynamics 2003 Conference*, USA: Univelt Incsan Diego, 2003: 1-14.
- [16] 陈聪, 王宏力, 陆敬辉, 等. 基于螺旋基准点的导航星选取方法[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5): 29-32.
- CHEN C, WANG H L, LU J H, et al.. Guide star selection method based on spired reference points [J]. *Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance*, 2012, 32(5): 29-32. (in Chinese)
- [17] ZHANG C, CHEN C, SHEN X. Boltzmann entropy-based guide star selection algorithm for star tracker [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(2): 109-110.
- [18] 李光蕊. 适用于星敏感器的导航星表构造算法研究[J]. 光学技术, 2010, 36(5): 695-700.
- LI G R. The study of guide star catalog construction algorithm for star sensor [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(5): 695-700. (in Chinese)
- [19] SUN J W, DE S, LI G R. An efficient guide stars classification algorithm via support vector machines [C]. *ICICTA 2009, IEEE Computer Society, Changsha, Hunan, China*, 2009: 148-152.
- [20] HYE Y K, JOHN L J. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: thinning method [C]. *IEEE on Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, MT, United States: IEEE Computer Society*, 2002: 2275-2283.
- [21] 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 L, HE X, WEI ZH H, et al.. Modification of triangle identification algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2): 458-463. (in Chinese)
- [22] LAMY B M G, ROUSSEAU J B. New star pattern recognition algorithm for aps star tracker application: oriented triangles [J]. *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag*, 2005: 27-31.
- [23] 马鹏斌, 宝音贺西, 沐俊山. 利用火星卫星光学测量实现火星探测器自主导航[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 863-869.
- MA P B, BAOYIN H X, MU J SH. Autonomous navigation of Mars probe based on optical observation of Martian moon [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 863-869. (in Chinese)

#### 作者简介:



吴量(1987—),男,吉林长春人,博士研究生,2010年于电子科技大学获得学士学位,主要从事天文导航、模式识别等方面研究。E-mail: 624989202@qq.com



王建立(1971—),男,山东曲阜人,博士,研究员,博士生导师,主要从事空间目标探测技术和地基高分辨率成像望远镜总体技术等方面的研究。E-mail: wangjianli@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)