

文章编号 1004-924X(2004)02-0144-07

一种星图模拟中观测星提取的方法

饶才杰, 房建成

(北京航空航天大学, 北京 100083)

摘要: 为了利用计算机动态实时地模拟生成星敏传感器拍摄到的星图, 针对球坐标系特点, 提出了一种改进的高效且适应性强的观测星提取方法。通过对天球分区法在高纬度区域的完善, 解决了星敏传感器圆形视场在高纬度区域实际的赤经范围计算问题。进一步介绍了一种新的对分区节点进行判断的改进方法, 还对提高观测星提取效率的措施(细化分区、采用坐标变换和分步提取)进行了探讨。分析表明, 改进的分区法可减轻动态实时模拟星图时的计算压力, 效率高, 能适应天球中各纬度区域, 且逻辑描述简洁, 适宜编程。将该方法运用于软件的实现, 满足了星图动态实时模拟的要求。

关键词: 星敏传感器; 星图模拟; 观测星提取

中图分类号: V249.323 文献标识码: A

A way of extracting observed stars for star image simulation

RAO Cai jie, FANG Jian cheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A highly efficient and adaptive way of extracting observed stars from the sky is proposed according to the characteristics of celestial coordinates for real time computer simulation of star images. By calculating the vertical FOV span to ameliorate the zoning method, an improved zoning method is proposed for identification of nodes in the zone of celestial sphere. Measures to improve its efficiency further, such as shortening span of zone, coordinate transformation, and two step extraction, are discussed as well. Analyses indicate that the method proposed is highly efficient and adaptive, and suitable for real time simulation of star images, and its logic description is simple to program.

Key words: star sensor; star image simulation; observed stars extraction

1 引言

自主天文导航通过星敏传感器观测天空中不同位置的恒星, 并迅速进行星图识别以确定卫星姿态。高效率的星图快速匹配算法是天文导航中的关键技术和难点之一。要进行星敏传感器星图识别算法的测试, 必须获得星图, 然后从中提取需要识

别的目标及其模式特征。由于航天实验费用昂贵, 星敏传感器的调试不可能都进行实际星空拍摄。因此, 有必要根据实验室条件, 利用计算机动态实时模拟生成星敏传感器拍摄到的星图。

计算机模拟星图首先根据星敏传感器光轴的赤经和赤纬, 给定星敏传感器视场大小以及视场绕光轴旋转的角度, 从观测星库中进行观测星的提取; 然后分别进行坐标和星等的变换; 最后将这些星

以二维图像的形式显示于模拟光源的屏幕上,实现星空模拟。落入星敏感器视场内的观测星与模拟天球分布的所有观测星(在这里采用的观测星表为 SAO 星表)相比只占极少数,这就存在一个对落入星敏感器视场的观测星快速提取的问题。因此,设计高效率的快速提取落入星敏感器视场内观测星的方法是提高模拟星图速度,实现动态和实时模拟飞行器工作星空环境的关键。

国内外有关星图模拟的资料主要集中在观测星坐标变换的问题,关于观测星快速提取问题涉及的很少。文献[1]中提出的方法是按赤经和赤纬将天球分成不重叠区域,并以星敏感器光轴所在分区和其相邻分区为提取区域。当星敏感器光轴落在天赤道附近时,该方法简单而有效。但文献[1]中没有阐明如何适应星敏感器光轴落在天极附近区域的情形。本文在此基础上,对观测星快速提取方法进行了深入研究,提高了分区法的适用性,提出了一种通过对天球分区相关节点判断,进行观测星快速提取的改进方法。同时,对如何提高观测星提取方法的效率进行了研究。

2 分区法在高纬度的适用

2.1 分区法

由赤经圈和赤纬圈将天球分成不重叠的区域,如分区间隔可取接近星敏感器视场的半径。对于 FOV 为 $10^\circ \times 10^\circ$ 时,FOV 的视场半径约为 7° ,为便于分区,间隔可取 7.5° ,则天球由赤经分为从 1 到 48,由赤纬分为从 1 到 24,整个天球共有 1 152 个区域。例如,1 号库中存储的是赤经 -180° 到 -172.5° ,赤纬 -90° 到 -82.5° 范围的星。所有的观测星按赤经和赤纬增长的顺序被存入相应的库中。每个星的存储格式为该星的赤经、赤纬、星等。选择合适的星库存储方法和有效的读取方式,可以从整个星库中快速提取观测星。

观测星库根据基本星表来制定。基本星表中包含有一定数量恒星的星号、星名、星等,对应某一基本历元的星位置(平赤经与平赤纬)等数据。其包含的恒星的视星等越高,基本星表越完整,恒星的数目也越多。观测星库应保证在每一视域范围至少有 3 颗观测星,即基本星表应有足够的容量,以保证星敏感器方形视场内的观测星满足星图识别算法的要求。

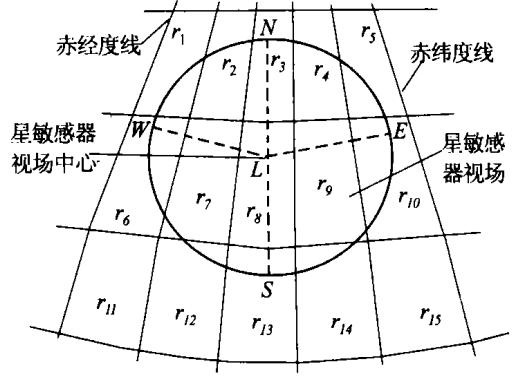


图 1 分区法的示意图

Fig. 1 Schematic of zoning method

如图 1 所示,当星敏感器的中心落在点 L 时, W, E 为星敏感器视场最小、最大赤经度的点, N, S 为过 L 点的赤纬度线与星敏感器视场边界的交点,则确定的观测星提取分区为 $r_1 \sim r_{15}$ 。以星敏感器的中心落在天球坐标系赤道上,赤经为 63° 为例。假设星敏感器视场 $10^\circ \times 10^\circ$,观测星库的分区间隔取 7.5° ,天球的半径为 r ,则

$$R = 2 \int_0^{75.3\pi/180} d\theta \int_{82.5\pi/180}^{\pi/2} r^2 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi = 0.03263\pi r^2$$

整个天球的曲面面积为 $4\pi r^2$ 。需提取观测星的分区集合 R 只占整个天球的曲面面积的 0.81579%。为了简化分析,假设观测星在整个天球的分布是均匀的,那么需要做落入星敏感器视场成像平面判别的观测星只占整个观测星库的 0.81579%,即绝大部分观测星不需要提取和计算,从而提高了效率。

2.2 将分区法推及到高纬度

文献[1]中,将星敏感器视场最小、最大赤经度点间的赤经度差简单等于星敏感器横向视场,这样做不仅不能适应星敏感器视场绕光轴发生旋转时同时进行球面几何分析,而且由于赤经区间线在天球球面分布的特点,当星敏感器的中心落在天球高纬度区域的时候,星敏感器视场最小、最大赤经度点间的赤经度差要大于星敏感器的视场。所以,要使分区法适应天球不同纬度区域,必须解算出星敏感器的中心落在天球不同纬度区域的时候,星敏感器视场最小、最大赤经度点的实际赤经度。

如图 2 所示,当星敏感器的中心落在天球 L 点时,极点 P 和切点 E (最大赤经度点)以及 L 点构成一个球面三角形。根据几何原理可以证明以

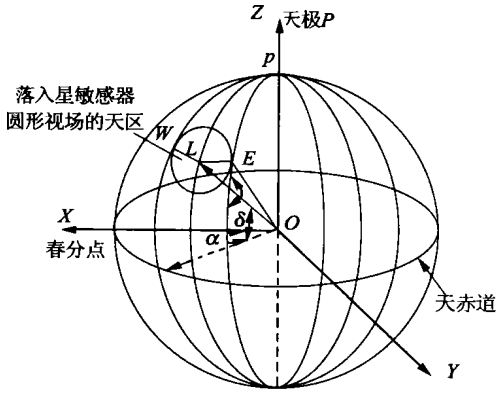


图 2 球面三角形 PLE
Fig. 2 Sphere triangle PLE

一步缩小提取观测星的范围。

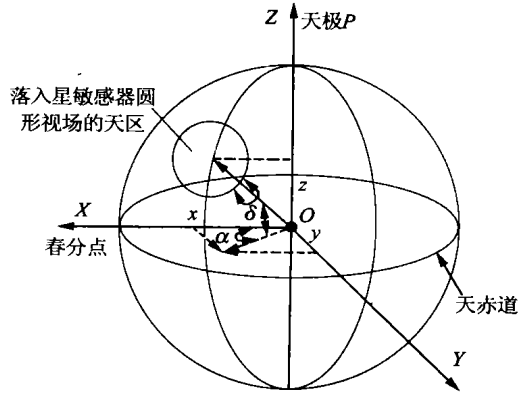


图 3 坐标系 1
Fig. 3 Coordinates 1

E 点为顶点的内球面角为直角, 同时以 P 点为顶点的内球面角 P 等于 E 点和 L 点的赤经度差, 然后可计算出点 E 和 W 的赤经和赤纬。

根据球面三角形的正弦定理和球面直角三角形计算公式, 可得到:

$$\sin P = \frac{\sin \text{FOV}_r}{\sin (90 - \delta_L)}, \quad (1)$$

$$\sin (90 - \delta_E) = \tan \text{FOV}_r \cdot \cot P, \quad (2)$$

$$\tan (\text{FOV}_r) = \sqrt{(\tan (\text{FOV}_y / 2))^2 + (\tan (\text{FOV}_x / 2))^2}. \quad (3)$$

其中, δ_E 和 δ_L 为 E 点和 L 点的赤纬; FOV_r 为星敏感器视场半径; $\text{FOV}_x, \text{FOV}_y$ 为星敏感器成像面 x, y 方向上的视场角。

如以星敏感器的中心 L 落在赤经 60° 和赤纬 67° 为例, E 点和 L 点的赤经度差为 18.361° , 需提取观测星的分区集合 R 的面积为 $0.043143\pi r^2$, 占整个天球的曲面面积的 1.0786% 。

为了节省观测星库存储空间, 对分区法观测星库的组织方法加以完善。当上一星区所有观测星数据依次存储完毕后, 紧接着存储下一星区的观测星数据 (不论上一星区有多少观测星)。所以, 须建立星区数据地址索引表, 存储格式为该星区数据记录的起始地址和该星区观测星的个数, 即该星区数据记录的数目。

3 改进的分区法

如图 3 所示, 在分区法提取观测星分区中有些分区在星敏感器圆形视场之外, 如 r_{11}, r_{15} 。如果能通过对分区节点做一些简单的判断, 可以进

判断分区节点是否在星敏感器视场内的方法比较简单。对恒星方位来说, 从地心天文坐标系到姿态坐标系的转换无须顾及坐标平移所带来的误差, 即姿态坐标可移至地心, 只需考虑旋转变换^[2]。假如星体在绝对惯性天球坐标系中的赤经 α 与赤纬 δ 已给定, 其在坐标系 1 的投影坐标 x, y, z 为:

$$\begin{cases} x = \cos \alpha \cos \delta \\ y = \sin \alpha \cos \delta \\ z = \sin \delta, \end{cases} \quad (4)$$

角距 e 的定义为两星点与观测中心的球面角, 由于恒星与地球的中心距离以光年计, 可以认为以地心为观测中心^[3]。设 S_i 和 S_j 代表两星体的单位矢量, e_{ij} 为 S_i 和 S_j 的角距。则

$$e_{ij} = \arccos \frac{S_i \cdot S_j}{|S_i| \cdot |S_j|}, \quad (5)$$

3.1 方法的描述

为了快速从观测星库中提取出星敏感器视场内的观测星, 可对分区法作进一步改进。方法描述如下:

如图 4 所示, 分区节点 $n_1, n_2, n_3 \dots$ 为赤经度分区线与赤纬度分区线的交点。

通过判别邻近的分区节点是否在星敏感器视场内, 再根据这些节点相邻关系, 判断分区内可能有观测星落在星敏感器视场内的分区, 其集合为 R_1 。再判断 N, S, W, E_4 个点各所在分区, 这些分区的集合为 R_2 。需提取观测星分区的集合 $R = R_1 R_2$, 其他区域的观测星则不需提取, 从而提高了观测星提取的效率。

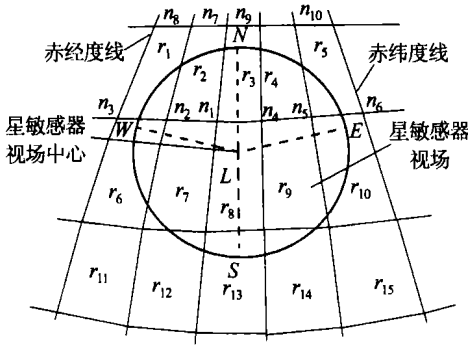


图 4 改进的分区法示意图

Fig. 4 Schematic of improved zoning method

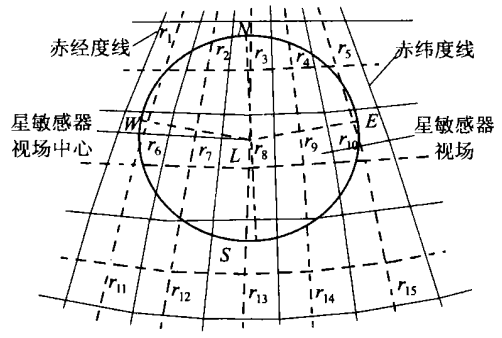


图 5 细化分区

Fig. 5 Shorten span of zone

例如在图 4 中, n_2 点在星传感器视场内, 则与 n_2 点相邻的分区 r_1, r_2, r_6, r_7 必都属于 R 。 n_3 点不在星传感器视场内, 则要根据与 n_3 相邻的节点是否在星传感器视场内, 再判断与 n_3 相邻的分区是否属于 R 。

当 $e_{li} < FOV_r$, 节点 n_i 在星传感器视场内;

当 $e_{li} = FOV_r$, 节点 n_i 在星传感器视场的边界上;

当 $e_{li} > FOV_r$, 节点 n_i 在星传感器视场外。

根据公式 (5) 计算 e_{li} 。

在图 4 中, 需提取观测星的分区集合 $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, r_9, r_{10}, r_{12}, r_{13}, r_{14}\}$ 。

3.2 方法分析

由此可见, 改进的分区法将在星传感器圆形视场之外的一些分区排除了, 这无疑缩小了提取观测星范围, 减少了需要判断是否在星传感器视场内的观测星, 提高了提取观测星工作的效率。

同样以星传感器的中心落在赤经 60° 和赤纬 67° 为例, 需提取观测星的分区集合 R 的面积为 $0.031\ 031\pi r^2$, 占整个天球的曲面面积的 $0.775\ 78\%$, 提高效率 $28.0\ 74\%$ 。可见采用改进的分区法确定的提取观测星范围更小, 提取的效率更高。

4 提高观测星提取方法效率的研究

4.1 细化分区

缩小分区间隔, 细化分区, 可以缩小提取观测星范围, 更加逼近星传感器圆形视场。细化分区后的效果如图 5 所示。

从图 5 可见, 细化分区对以上 2 种提取观测星的方法都有效。但采用改进的分区法的提取观测星范围仍然比分区法的要小, 这与前面的分析是相一致的。

对于改进的分区法, 分区越细, 集合 R 则越小, 但需要判断的分区节点数将越多。相反, 分区越大, 需要判断的分区节点数将越少, 但集合 R 则越大, 需要判断是否在星传感器视场内的观测星越多。

在实际编程中, 可以通过利用 L, W, E, N 和 S 点之间的关系, 简化程序逻辑描述, 并不一定要对每一个相关节点进行判别。如可以采取边缘检测的方法, 对边缘相关节点进行判别, 减少需要判别的节点数。

但是, 也不能由此而分区过细, 因为分区过细也将增加星区数据地址索引表的存储容量。分区的大小应由观测星库的容量来决定。

4.2 坐标系转换

对天极附近区域分区过密的情况, 如图 6 所示:

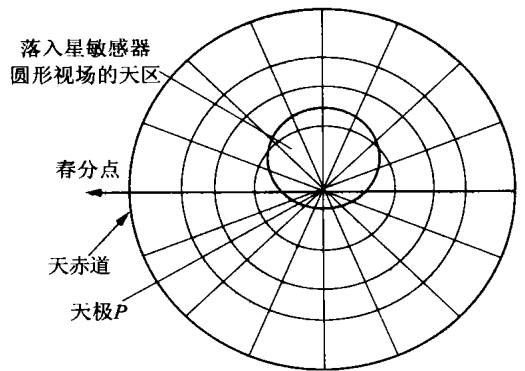


图 6 星传感器视场在天极附近区域的情形

Fig. 6 FOV of star sensor in zenith region

故可以考虑采用坐标变换, 措施如下:

在赤纬 $0^\circ \sim 75^\circ$ 区域采用球坐标系 1, 如图 3 所示。在赤纬 $75^\circ \sim 90^\circ$ 区域采用球坐标系 2, 如图 7 所示。

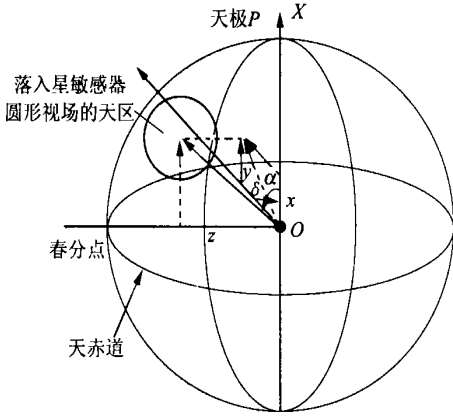


图 7 坐标系 2
Fig. 7 Coordinates 2

两坐标系的赤经和赤纬可以相互转换计算^[4]。令 $O-UVW$ 表示天球直角坐标系 1; $O-XYZ$ 表示直角坐标系 2, O 为地球的中心。初始时刻

$O-XYZ$ 与 $O-UVW$ 坐标轴重合, 原点 O 指向地心, OX 轴指向春分点, OZ 轴指北极, OX, OY, OZ 构成右手坐标系。用 UVW 坐标来表示 XYZ , 即将 UVW 的坐标基经过若干次旋转后变成 XYZ 坐标基, 表示为

$$[X \ Y \ Z]^T = M[UVW]^T, \quad (6)$$

M —— 旋转矩阵。

令 UVW 坐标系先绕 W 轴转 φ 角, 得到 $U_1V_1W_1$ 坐标系, 再绕 U_1 轴转 θ 角, 使 W_1 轴与 Z 轴重合, 得到 $U_2V_2W_2$ 坐标系, 最后再绕 W_2 轴旋转 μ 角, 得到 XYZ 坐标系。则:

坐标系之间的关系由 3 个独立的欧拉角 φ, θ, μ 就可确定, 然后可得到 $[X, Y, Z]$, 再根据公式(4) 分别计算出观测星在球坐标系 2 的赤经和赤纬 α 与 δ , 这里 $\varphi = \theta = \mu = 90^\circ$ 。这样球坐标系 1 中高纬度的区域在球坐标系 2 中对应为低纬度的区域。除了球坐标系 1 对应了观测星库数据, 附加球坐标系 2 对应的观测星库存储 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 范围的观测星数据。使用时, 当星敏感器光轴对于球坐标系 1 的赤纬 $|\delta| > 75^\circ$ 时, 采用球坐标系 2 对应的观测星库。

$$M = \begin{vmatrix} \cos \mu & \sin \mu & 0 \\ -\sin \mu & \cos \mu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos \varphi \cos \mu - \sin \varphi \sin \mu \cos \theta & \sin \varphi \cos \mu + \cos \varphi \sin \mu \cos \theta & \sin \mu \sin \theta \\ -\cos \varphi \sin \mu - \sin \varphi \cos \mu \cos \theta & -\sin \varphi \sin \mu + \cos \varphi \cos \mu \cos \theta & \cos \mu \sin \theta \\ \sin \varphi \sin \theta & -\cos \varphi \sin \theta & \cos \theta \end{vmatrix}, \quad (7)$$

从图 8 可见, 当赤纬 $|\delta| > 75^\circ$, 采用球坐标系 2 的赤经和赤纬分区, 可以减少所要提取的分区数。

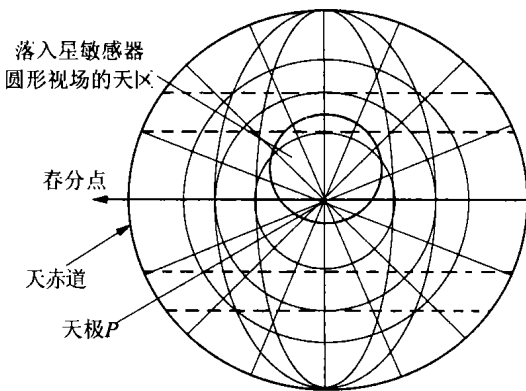


图 8 在天极附近区域坐标系转换的效果
Fig. 8 Effect of coordinate transformation in zenith region

以星敏感器的中心落在赤经 270° 和赤纬 86° 为例, 采用分区法, 在球坐标系 1 下, 需提取观测星的分区集合 R 的面积为 $0.06815\pi r^2$, 占整个天球的曲面面积的 1.7037%。在球坐标系 2 下, 需提取观测星的分区集合 R 的面积为 $0.0325\pi r^2$, 占整个天球的曲面面积的 0.8111%, 效率提高了 52.39%。

对改进的分区法而言, 坐标系转换的效率也能有所提高, 但不如分区法提高的显著。这是因为分区法在低纬度区域效率与改进的分区法相差不多, 但在高纬度区域效率较低, 可提高效率的余地较大。不过, 坐标系转换对于改进的分区法还有另一个好处, 就是避免因为高纬度分区的形状特殊所增加复杂度的问题, 减少需要判别的节点数, 降低复杂度。

但坐标系转换由于要增加球坐标系 2 局部观测星库, 即要占用更多的存储空间

4.3 分步提取

由于判断观测星落入星敏感器圆形视场内比判断观测星落入方形成像面视场内的计算要简单得多, 所以如果在第 1 步能用简洁的方法提取落入星敏感器圆形视场内的观测星, 尽可能避免对过多不必要的观测星进行是否落入方形成像面视场内的判别, 减少冗余计算, 无疑能提高整个工作的效率。

从确定的分区范围, 提取观测星的工作主要可分为 2 步:

(1) 先判别观测星是否在星敏感器圆形视场内, 这样可进一步缩小提取观测星的范围。判别方法和判别节点是否在星敏感器视场内的方法一样。

设星敏感器视场内的天区的曲面面积为 S_1 , 天球的半径为 r , 则:

$$S_1 = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\sqrt{2} \cdot 57.180} r^2 \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi = 0.015 2\pi r^2$$

如星敏感器视场内的天区占整个天球曲面面积的 0.38%, 则需要做落入星敏感器视场成像

平面判别的观测星只占整个观测星库的 0.38%。

(2) 对落入星敏感器圆形视场内的观测星进行判别是否落在成像面方形视场内。

为了判别落入星敏感器圆形视场内的观测星是否落在方形的成像面视场内, 需要将观测星的赤经和赤纬转换成星敏感器成像平面的坐标, 以便判断, 如图 9 所示。文献[2, 5, 6] 都介绍了坐标变换的方法和计算公式。

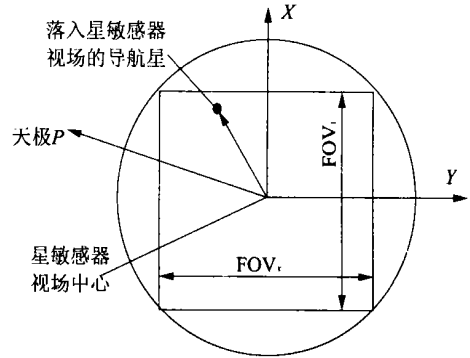


图 9 星敏感器视场示意图

Fig. 9 Schematic of star sensor FOV

落入观测星的判别如下。在模拟显示天区的成像平面上的坐标为:

$$x = \frac{1}{\tan(\text{FOV}_x/2)} \times \frac{\cos \varphi \cos \delta_i \sin(\alpha - \alpha_0) - \sin \varphi \cos \delta_i \sin(\alpha - \alpha_0) + \sin \varphi \cos \delta_0 \sin \delta_i}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}, \quad (8)$$

$$y = \frac{1}{\tan(\text{FOV}_y/2)} \times \frac{\cos \varphi \sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \varphi \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0) - \sin \varphi \cos \delta_i \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}, \quad (9)$$

式中 x, y 为观测星在星敏感器视场成像平面 X, Y 方向上的平面坐标;

当 $|x| \leq 1, |y| \leq 1$, 则观测星落在星敏感器视场内或边界上, 并将显示在模拟星图的成像平面上。至此, 完成了落入星敏感器视场成像平面观测星的判别, 并进行了归一化, 为模拟星图打下了基础。

但采取分步提取, 预先加入对观测星是否落入星敏感器圆形视场内的判别, 也要付出一定的计算时间。一般说, 对于观测星提取区域比较大时, 如分区间隔较大, 或者分区法在高纬度区域, 效果比较明显。

5 结 论

分区法相对简单, 通过完善使之可以适应于高纬度区域。对天球分区相关节点进行判断的提取方法有助于进一步缩小提取观测星的范围, 减轻实现动态实时模拟星图时的计算压力, 效率高; 逻辑描述简洁, 适宜编程; 同时改进的分区法适应性强, 在天球各纬度区域使用效率变化不大。通过对提高观测星提取方法效率的讨论, 实现了采用细化分区、坐标变换和分步提取来提高方法的适应性和效率。在星图动态实时模拟软件中, 采用了改进的分区法进行编程, 实际动态模拟的效

果满足了系统的要求。

参考文献:

- [1] 王南华, 张陶, 赵旭行. 小型动态星模拟器设计[J]. 航天控制, 1996, 4: 13-20.
WANG N H, ZHANG T, ZHAO X X. Design of small dynamic star simulator[J]. *Aerospace Control*, 1996, 4: 13-20. (in Chinese)
- [2] 许世文, 龙夫年, 付苓, 等. 实时星场模拟器中的坐标变换[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, (30) 5: 118-120.
XU SH W, LONG F N, FU L, *et al* . Coordinate transformation in real time star field simulator[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, (30) 5: 118-120. (in Chinese)
- [3] 陈元枝, 郝胜国, 郝志航. 连通聚类星识别方法[J]. 光学精密工程, 2000, 8(6): 217-220.
CHEN Y ZH, HAO SH G, HAO ZH H. Method for star identification using connection cluster[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(6): 217-220. (in Chinese)
- [4] 胡小平. 自主导航理论与应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2002.
HU X P. *Theory and application of autonomous navigation* [M]. Changsha: Publishing House of National University of Defense Technology, 2002.
- [5] 郝胜国, 郝志航. 星敏感器星像模拟软件的研究[J]. 光学精密工程, 2000, 8(3): 208-212.
HAO SH G, HAO ZH H. Star image simulation software of star tracker[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(3): 208-212. (in Chinese)
- [6] 张文明, 林玲, 郝永杰, 等. 小型星模拟器中星图动态显示系统的设计[J]. 光电工程, 2000, 27(5): 11-14.
ZHANG W M, LIN L, HAO Y J, *et al* . Design of a dynamic display system for star map in small sized star simulator[J]. *Optoelectronic Engineering*, 2000, 27(5): 11-14. (in Chinese)

作者简介: 饶才杰(1971-), 男, 江西省南昌市人, 北京航空航天大学宇航学院硕士研究生;

房建成(1965-), 男, 山东人, 北京航空航天大学宇航学院教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为精密仪器及机械, 导航与控制技术。