

基于多视场星敏感器的三角形星图识别方法

熊雪, 王庆

(西北工业大学 计算机学院, 西安 710072)

摘要: 为解决现有基于单星敏感器的星图识别中由于成像视角小, 星图恒星数量不足而造成的星图识别率偏低的问题, 提高星图识别的准确度和精确度, 提出了一种基于多视场星敏感器的改进三角形星图识别方法; 该方法通过将相同位置相同时间不同姿态角获得的多幅星图基于星图自身径向特征拼接成一幅多视角、不失真的星图, 利用拼接后的星图进行星图识别, 同时采用分块方式存储星对角距以及利用哈希查找提高星图识别效率; 实验随机识别 500 幅星图, 仿真结果表明, 与传统的单视场星图匹配算法相比, 该方法具有更高的星图识别率和匹配精度, 当星图恒星数量达到 30 以上时, 平均识别率能基本达到 97%, 且识别速度提高了 11 倍左右。

关键词: 多视场星敏感器; 星图识别; 星图拼接; 三角形算法; 哈希查找

An Improved Triangle Star Identification Method Based on Multi-FOV Star Sensor

Xiong Xue, Wang Qing

(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to solve the problem of the low star identification rate of the existing star pattern recognition based on one-FOV star sensor due to the small imaging perspective, the insufficient number of stars, improve the accuracy and precision of star identification, an improved triangle star identification method based on multi-FOV star sensor is proposed. The novel method stitches the pieces of star maps obtained in the same position and time but different attitude angle into a piece of star map which is multi-FOV and undistorted, and make use of the star map to complete the star identification. To improve the computation time, the angular of star identification based on block storage and Hash search are used to finish the star identification. 500 star maps are identified randomly and the simulation results show that compared with the traditional one-FOV star map, the novel algorithm has a higher rate of star identification and higher matching accuracy, the average identification rate can reach 97% when the number of stars are more than 30 and identification time also improve 11 times faster.

Key words: multi-FOV star sensor; star identification; star stitching; triangle algorithm; hash search

0 引言

基于星敏感器的天文导航系统是一种高精度飞行器自主导航系统, 它完全不依靠供保障。星敏感器是天文导航系统的关键部件, 主要完成星图获取、恒星检测、星图识别等过程。星图识别的结果直接影响飞行器卫星等其他辅助手段, 具有高精度、完全自主、隐蔽性好等特点, 即使在辐射干扰较大的特殊情况下, 也可为飞行器的安全飞行提供保障。星敏感器是天文导航系统的关键部件, 主要完成星图获取、恒星检测、星图识别等过程。星图识别的结果直接影响飞行器姿态确定的精度, 因此星图识别算法是姿态确定能否成功的关键^[1-3]。

现有的基于星敏感器的星图识别方法都是单星敏感器, 因此获得的星图成像视角小, 星图范围有限, 在某些区域获取的星图中恒星数量也较少, 从而导致星图识别失败, 无法为飞行

器提供精确、实时的定姿。而多视场星敏感器则可提高姿态测量精度、且具有可靠性、多个视场可同步或异步工作、配置灵活、工作方式多样化的优点。

当前的星图识别算法中, 较典型的是网格算法^[4]、匹配组算法^[5]、三角形算法^[6-7]。网格算法是模式匹配策略的一种, 因此该算法具有星图识别率高, 计算效率高, 所需内存少的优点, 但该算法也容易生成错误的星图模式, 从而易导致星图识别失败。匹配组算法是利用多颗观测星构成具有一定几何形状的星座, 然后在导航星表中寻找一个与该星座匹配程度最大的模式作为星图识别的结果。但该算法运算量较大, 而且容易产生伪匹配。三角形算法是从观测星图中选取三颗恒星组成三角形, 利用三角形中三颗恒星相互之间的角距作为特征向量, 从而与存储的导航三角形进行星图匹配。该算法具有直观, 识别精度较高的优点。但由于导航三角形数量较多, 因此计算的星对角距数量很大, 从而使识别时间较长且存储空间较大。因而文中将计算的星对角距采用分块存储并且采用哈希表进行匹配查找, 从而有效减少单个存储空间存储量和有效提高星图识别时间。

基于以上分析, 提出了一种基于多视场星敏感器的改进三角形星图识别方法, 克服了单视场星敏感器视场角小的缺点, 能够有效地提高识别精度和识别率, 减少识别时间, 提高运算

收稿日期:2013-07-12; 修回日期:2013-09-11。

基金项目:航空科学基金(2011ZC53036)。

作者简介:熊雪(1988-),女,四川眉山人,硕士研究生,主要从事基于机载综合导航系统的多视场星敏感器测星技术方向的研究。

王庆(1969-)男,陕西西安人,教授,博导,主要从事图像处理、计算机视觉和模式识别方向的研究。

效率。

1 基于多视场星敏感器的星图识别方法

1.1 多视场星敏感器模型

基于单视场的星敏感器虽然已经得到了较好应用，但由于其视场范围小，获取的星图中会出现恒星数量不足的缺点，进而导致星图识别失败并最终影响姿态确定结果的准确度，因此提出了采用多视场的算法，通过扩大星敏感器的视场，提高测量精度和可靠性。基于多视场的星图识别算法能够精确识别恒星，且能为高精度姿态确定提供精准的参数。多视场模型采用三视场模型作为代表。三视场星敏感器模型^[8]如图 1 所示。其成像模型^[7]如图 2 所示。

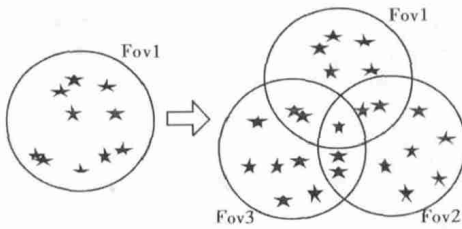


图 1 单视场到三视场星敏感器模型

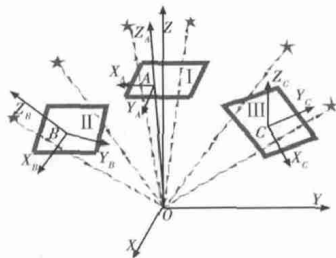
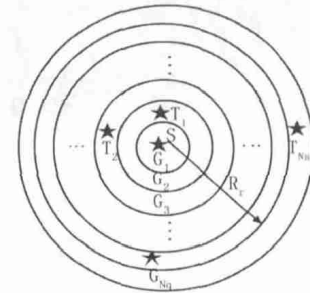


图 2 三视场成像模型

1.2 多视场拼接的星图特征模式提取

多视场星敏感器的核心是获得视场角大、不失真的星图，采用图像拼接技术可以实现。而图像拼接技术的本质是将多张有重叠部分的图像（可能是不同时间、不同视角、或者不同传感器获得的）配准并融合成一幅包含各图像序列信息的大型的、宽视野的、完整的无缝高分辨率的图像。传统的图像拼接技术都是基于区域和特征的配准方法，虽然这两种方法也都具有很好的拼接效果，但是都不基于星图自身的图像特征，因此提取的特征不太可靠，而且容易受图像旋转变化的影响。根据星图的特点，本文采用基于径向特征的星图特征^[9]，该特征提取的都是可靠信息，而且具有旋转不变性，提取特征简单等优点。其特征如图 3 所示。径向特征提取步骤如下：

- 1) 选择观测星的一颗恒星 S 作为中心，选择一个合适的距离作为径向特征的半径 R_r 。
- 2) 把以恒星 S 为圆心的圆形区域均匀的分为 N_q 个环带，命名为环带 G_1, G_2, \dots, G_{N_q} ，且环带之间的距离为 $\frac{R_r}{N_q}$ 。
- 3) 计算中心恒星 S 与其他环带恒星 $T_i (i = 1, 2, \dots, N_s)$ 之间的距离 $d(S, T_i)$ 。
- 4) 定义径向模式，用下式来表示 $pat_r(S) = (B_1, B_2, \dots, B_{N_q})$ ，其中



R_r → 径向模式半径
 G_{Nq} → 一环带个数
 T_{Nq} → 在 R_r 中环带之类恒星的个数

图 3 径向特征星图模式

$$B_j = \begin{cases} 1 & \text{if } j = \text{int}(d(S, T_i) \cdot \frac{N_q}{R_r}) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

5) 对每一幅星图中的每一颗星都采取相同的操作，提取观测星的径向星图特征。从而得到每一幅星图的径向特征。

1.3 多视场星图拼接算法

在获得三幅相同位置相同时间不同姿态角的星图之后，选取一幅星图作为参考星图，接着提取三幅星图的径向特征模式，比较三幅星图的径向特征值，从而根据径向特征值获得初始匹配。多视场星图拼接的流程图如图 4 所示。具体拼接过程如下：首先如图 5 所示，星图 C1 中以恒星 S_A 为中心的环带之中第 j 个环带有恒星 T_A ，其他环带之中都没有恒星，则 S_A 和 T_A 之间的距离为 $d(S_A, T_A)$ ，经计算 $j = \text{int}(d(S, T_i) * N_q / R_r)$ 。

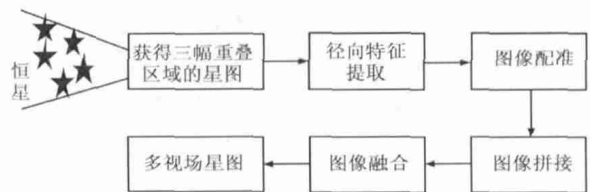


图 4 多视场星图拼接流程图

所以 $pat_r(S_A) = B_j = 1$ 。在星图 C2 中，在以恒星 S_B 和 S_{B_1} 为中心的环带中，也只有第 j 个环带有恒星，因此计算 $d(S_B, T_B)$ 和 $d(S_{B_1}, T_{B_1})$ 之后， $pat_r(S_B)$ 和 $pat_r(S_{B_1})$ 都等于 1，所以初匹配结果 S_A 能和 S_B 及 S_{B_1} 匹配，因此明显有误差匹配。接下来，我们采用 RANSAC 算法^[10]对星图的径向特征进行提纯，该方法可以快速的去除误匹配恒星对，提高图像配准的准确性。

RANSAC 算法计算单应的过程如下：当两个相机之间存在单应 H ，我们可以将任意一个空间中的 3D 点在不同相机之间的坐标转换关系表示为：

$$X_2 = HX_1 \quad X_1, X_2 \in \mathbb{R}^3$$

公式展开得：

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow X_2 = HX_1$$

非齐次坐标表示为

当 $z_1 = 1$ 时，公式 (10) 转换为 (1)

(11) 转换为 (2)

$$x'_2(H_{31}x_1 + H_{32}y_1 + H_{33}) = H_{11}x_1 + H_{12}y_1 + H_{13} \quad (1)$$

$$y'_2(H_{31}x_1 + H_{32}y_1 + H_{33}) = H_{21}x_1 + H_{22}y_1 + H_{23} \quad (2)$$

接着变换 (1) 和 (2) 为

$$a_x^T h = 0 \quad (3)$$

$$a_y^T h = 0 \quad (4)$$

式中:

$$h = (H_{11}, H_{12}, H_{13}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{31}, H_{32}, H_{33})^T \quad (5)$$

$$a_x = (-x_1, -y_1, -1, 0, 0, 0, x'_2x_1, x'_2y_1, x'_2)^T \quad (6)$$

$$a_y = (0, 0, 0, -x_1, -y_1, -1, y'_2x_1, y'_2y_1, y'_2)^T \quad (7)$$

给定多个对应的恒星点对, 便可以得到对应的方程

$$Ah = 0 \quad (8)$$

式中:

$$A = (a_{x1}^T a_{y1}^T \cdots a_{xN}^T a_{yN}^T)^T \quad (9)$$

最后再用最小二乘法即可求得单应 H 。经过比较单应 H_A 和 H_B 能一一匹配。最终的匹配效果如图 6 所示。接着采取帧到帧合成方式将图像映射到参考图像的坐标空间, 映射方法使用后向映射法。即首先将待拼接图像的 3 个边界坐标映射到参考图

像坐标系中, 每个边界点取与其最近的整数, 从而确定待拼接图像在参考图像中的映射图像范围。然后在该范围内逐行、逐像素进行扫描, 通过变换矩阵 H 的逆矩阵后向映射到待拼接图像坐标系中并寻找对应的输入像素点, 从而完成图像拼接。拼接完图像之后, 可能存在阴影, 影响拼接效果, 因此还要对图像进行融合, 即依次遍历所有像素点, 对三幅待拼接图像上同一像素点取灰度最大值, 填充在一副新的图像中, 完成图像的融合, 生成广视角的图像。星图拼接实例如图 7 所示。图 7 表示为 C_1, C_2, C_3 三幅相同时间相同位置不同姿态角的星图拼接为 C 这一幅多视角的不失真的星图。

$$x'_2 = \frac{H_{11}x_1 + H_{12}y_1 + H_{13}z_1}{H_{31}x_1 + H_{32}y_1 + H_{33}z_1} \quad (10)$$

$$y'_2 = \frac{H_{21}x_1 + H_{22}y_1 + H_{23}z_1}{H_{31}x_1 + H_{32}y_1 + H_{33}z_1} \quad (11)$$

2 改进三角形星图识别方法

2.1 星对角距分块存储

由于导航三角形数量很多, 因此计算的三角形之间的角距数量也很多, 从而造成存储容量庞大, 冗余匹配多的问题。因此将星对角距进行从小到大的升序排列并分块存储将减少单个存储空间存储量, 且提高识别运算效率。星对角距利用反余弦公式计算, 因此角距的范围属于 $[0, \pi]$ 。反余弦公式如下所示。

$$\begin{aligned} w_{ij} &= \arccos \left[\frac{(w_i w_j)}{|w_i| |w_j|} \right] \\ v_{ij} &= \arccos \left[\frac{(v_i v_j)}{|v_i| |v_j|} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

式中: w_{ij}, v_{ij} 分别为导航三角形和观测三角形的星对角距, w_i, w_j 为导航星观测矢量, v_i, v_j 为星敏感器观测矢量。总共计算出 499 500 个角距数据, 在 $[0, \pi]$ 将星对角距每隔 0.01 进行分块存储, 因此总共分为 315 块存储空间。存储结果如图 8 所示。

2.2 哈希查找

哈希表^[11]是目前较快的搜索算法, 由于其速度快的优点

在数据查询中有着广泛的应用。其基本原理是在记录的存储位置和它的关键字之间建立一个对应关系 f , 因而在查找时, 只要根据对应关系 f 便可找到给定值 K 的像 $f(K)$ 。若表中存在关键字和 K 相等的记录, 则必定在 $f(K)$ 的存储位置上, 而不需要比较便可直接取得所查记录。星表子块和角距之间的对应关系如下所示。

$$f = \text{floor}(K * 10\ 000) \quad (1.15)$$

式中: $\text{floor}(\cdot)$ 表示取小于等于的整数值, K 为观测星角距。并且采用链地址法处理冲突。具体在进行星图匹配和识别时, 观测星的角距通过对应关系确定出角距所在的存储子块, 从而该子块内的所有角距即在 0.01 度的角距误差允许范围内的匹配和识别。

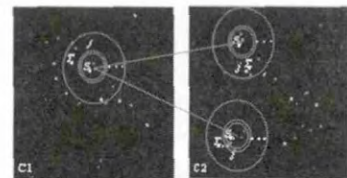


图 5 径向特征初匹配

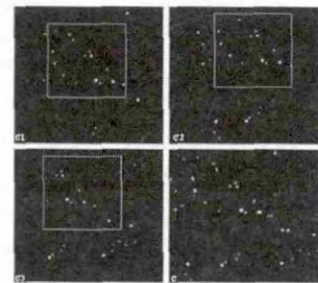


图 6 比较单应之后的匹配

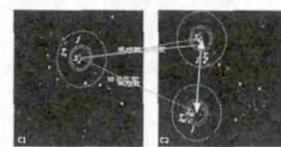


图 7 多视场星图实例

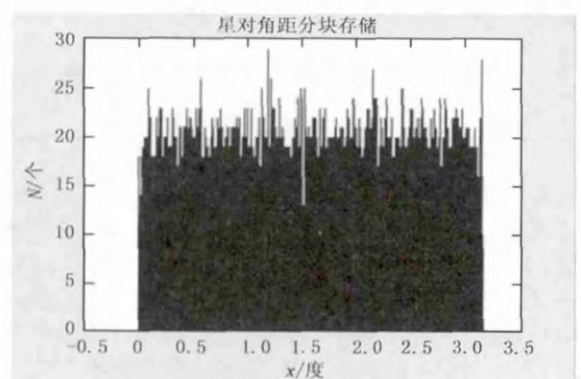


图 8 星对角距分块存储

2.3 改进三角形星图识别

星图识别是将星敏感器获得的观测星图与导航星组成的星

图通过特征匹配和星图识别算法来确定观测星与导航星的对应关系。改进三角形星图识别算法的基本流程为：在观测星图中选择三颗恒星 m_1, m_2, m_3 构成三角形，前提是这三颗恒星的角距较小。然后分别计算这三颗星之间的角距 $e_1(m_1, m_2)$, $e_2(m_1, m_3)$, $e_3(m_2, m_3)$ 。先判断这个角距属于哪个存储范围，然后在对应的存储范围内得到一定角距容差范围内的星图匹配，如果某个三角形的角距能够和导航三角形中某一块的角距在一定容差范围内形成一对一匹配，则认为匹配成功^[6]。改进三角形星图识别算法流程如图 9 所示。

算法：基于改进三角形的星图识别算法
 功能：实现观测星和导航星之间的一一匹配
 输入：一幅星图（单视场和多视场）
 输出：观测星的 ID 对应导航星的 ID
 处理过程：
 1 预处理每一幅星图（当阈值小于 100 时，设置灰度值为 0）
 2 提取每一幅星图中恒星的中心坐标
 3 从观测星图中选择三颗恒星组成三角形
 4 计算星图中三角形中恒星之间的角距并将角距由小到大排序
 5 将排序之后的角距每隔 0.01 进行分块存储
 6 采用哈希查找在一定的角距容限范围内比较星对象角距
 7 输出星图识别结果

图 9 改进三角形星图识别算法

3 仿真结果

在仿真过程中，采用标准天文星表 Hipparcos 作为恒星数据来源，并从中提取了星等亮度超过 6.5 的 8 875 颗恒星作为导航星表。实验中的恒星星图是编写星图模拟算法生成的。星敏感器视场大小为 $10^\circ \times 10^\circ$ ，CCD 面阵分辨率为 512×512 ，环带数 $N_q = 20$ ，径向半径 $R_r = 200$ 。实验分别比较了单幅星图和三幅星图拼接为一幅多视场星图的星图识别率和精确识别率。识别率表示为识别出的所有观测星的恒星数与观测星星图中恒星总个数之商，精确识别率表示为识别出的观测星与导航星一一匹配的恒星个数与观测星星图中恒星总个数之商。表 1 中提取了部分星图识别结果，其中红色标记的结果为冗余匹配，其余为一一匹配。

表 1 部分星图识别结果

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 观测星 编号 | 7 | 12 | 14 | 4 | 6 | 9 | 9 | 18 | 16 |
| 导航星 编号 | 5493 | 110991 | 96441 | 79754 | 3821 | 26966 | 94712 | 41321 | 17351 |

部分星图识别率比较结果如表 2 所示。其中 $X_i (X = A, B, \dots, F; i = 1, 2, 3)$ 为单幅星图， X' 代表 X_1, X_2, X_3 三幅星图的平均， X' 下方的恒星数为平均恒星数。 X 为 X_1, X_2, X_3 拼接之后的星图。随着 X 的增加，星图中恒星的数目也随之增加。实验中利用星图模拟软件随机获得 500 幅星图，因此实验仿真 500 次，所用的平均识别时间为 54 ms，而采用传统顺序查找

的平均时间为 602 ms。

表 2 单视场与多视场星图识别率比较

| 星图名称 | A' | A | B' | B | C' | C | D' | D | E' | E | F' | F |
|----------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|
| 平均恒星个数 | 4.7 | 10.0 | 9.0 | 18.0 | 16.7 | 33.0 | 24.3 | 41.0 | 32.3 | 46.0 | 46.0 | 65.0 |
| 平均识别率(%) | 27.7 | 40.2 | 33.3 | 50.0 | 61.0 | 91.0 | 94.2 | 100.0 | 97.8 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| 精确识别率(%) | 15.3 | 22.1 | 21.2 | 35.6 | 37.9 | 58.0 | 58.8 | 76.0 | 74.9 | 82.6 | 95.0 | 97.3 |

4 讨论与结论

从仿真结果可以看出，星图中恒星数量越多，识别率和精确识别率就越高，而当星图恒星数量达到 30 以上时，平均识别率能基本达到 97%，平均精确识别率也能基本达到 75%，当恒星数量达到 40 时，识别率可达到 100%，精确识别率也可达到 95%。而且多视场星图识别率明显比单视场星图识别率高，且识别时间也有较大的提高。因此从实验结果可以得到结论：基于多视场星敏感器的改进三角形星图识别算法是有效的，而且较高的精确识别率可以为姿态确定提供精准的参数，提高姿态确定精度。

参考文献：

[1] 刘朝山, 刘光斌, 王新国. 弹载星敏感器原理及系统应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
 [2] 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, 2007, 28 (4): 1020-1024.
 [3] 刑飞, 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, 2010, 31 (10): 2302-2308.
 [4] Yi W, Liu H, Yang J, et al. Three-Dimensional Grid Algorithm for All-Sky Autonomous Star Identification [J]. International Society for Optics and Photonics, 2012; 842008-842008-7.
 [5] Kosik, Jean Claude. Star pattern identification aboard an inertially stabilized aircraft [J]. Journal of Guidance Control Dynamics 14 (1991): 230-235.
 [6] Liebe, Carl Ch. Star trackers for attitude determination [J], Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE 10. 6 (1995): 10-16.
 [7] 胡海东, 黄县林, 介鸣. 一种基于星体特征值的全天星图识别法 [J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2007, 24 (6): 731-735.
 [8] Mortari, Daniele, and Andrea Romoli. StarNav III: a three fields of view star tracker [A]. Aerospace Conference Proceedings, 2002 [C], IEEE 2002: 1-57.
 [9] Zhang G J, Wei X G, Jiang J. Full-sky autonomous star identification based on radial and cyclic features of star pattern [J]. Image and Vision Computing, 2008, 26 (7): 891-897.
 [10] 王真, 魏新国, 张广军. 多视场星敏感器结构布局优化 [J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (20): 2469-2473.
 [11] 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, 2010, 18 (6): 1390-1393.