

11-20-2019

Novel Star Map Identification Algorithm Using Improved Radial Features

Junyang Zhao

1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; ;

Zhili Zhang

1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; ;

Dianjian Liu

2. Army 96833 of PLA, Huaihua 418000, China;

Zhaofa Zhou

1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Novel Star Map Identification Algorithm Using Improved Radial Features

Abstract

Abstract: In order to improve the star map identification efficiency and insure the identification veracity, the radial feature is ameliorated by cyclic feature, and *a new star map identification method based on the ameliorative radial feature matching is proposed. The star map data are processed according to quadrant order to establish the database of new radial feature. The radial feature matching between the observation stars in the matching star map and the reference star in the feature database is carried out in the order of circumferential quadrant. The star with the largest count in the star database is the final identification result.* Experimental data analysis indicates that the identification accuracy of the proposed method is higher than that of traditional raster identification method under noise condition. This method can complete the recognition process through partial quadrant matching. The single star recognition efficiency improves about 30% compared with original radial feature recognition method.

Keywords

star map identification, radial feature, cyclic feature, digital zenith camera

Authors

Junyang Zhao, Zhili Zhang, Dianjian Liu, Zhaofa Zhou, and Zhenjun Chang

Recommended Citation

Zhao Junyang, Zhang Zhili, Liu Dianjian, Zhou Zhaofa, Chang Zhenjun. Novel Star Map Identification Algorithm Using Improved Radial Features[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 601-607.

一种利用改进径向特征的星图识别方法

赵军阳¹, 张志利¹, 刘殿剑², 周召发¹, 常振军¹

(1. 火箭军工程大学, 陕西 西安 710025; 2. 中国人民解放军 96833 部队, 湖南 怀化 418000)

摘要: 为进一步提高恒星识别效率和准确性, 本文结合环向特征对径向特征进行改进, 提出了一种新的径向特征星图识别方法, 按环向象限对星图数据进行处理, 建立径向特征数据库; 对待匹配星图中的观测星与特征星库中的参考星按环向象限顺序进行径向特征匹配, 星库中与待识别星验证匹配计数值最大的恒星即为最终识别结果。实验数据分析表明, 该方法噪声条件下的识别准确率高于传统栅格识别方法, 且仅需通过部分象限的匹配即可完成识别过程, 单颗恒星平均识别效率提高约 30%。

关键词: 星图识别; 径向特征; 环向特征; 数字天顶仪

中图分类号: V448.22 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 04-0601-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0098

Novel Star Map Identification Algorithm Using Improved Radial Features

Zhao Junyang¹, Zhang Zhili¹, Liu Dianjian², Zhou Zhaofa¹, Chang Zhenjun¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. Army 96833 of PLA, Huaihua 418000, China)

Abstract: In order to improve the star map identification efficiency and insure the identification veracity, the radial feature is ameliorated by cyclic feature, and a new star map identification method based on the ameliorative radial feature matching is proposed. The star map data are processed according to quadrant order to establish the database of new radial feature. The radial feature matching between the observation stars in the matching star map and the reference star in the feature database is carried out in the order of circumferential quadrant. The star with the largest count in the star database is the final identification result. Experimental data analysis indicates that the identification accuracy of the proposed method is higher than that of traditional raster identification method under noise condition. This method can complete the recognition process through partial quadrant matching. The single star recognition efficiency improves about 30% compared with original radial feature recognition method.

Keywords: star map identification; radial feature; cyclic feature; digital zenith camera

引言¹

利用数字天顶仪或星敏传感器进行定位时, 需要

根据星表对拍摄的星图进行精确识别, 建立星像点与恒星之间的对应关系, 获得恒星的相关坐标。快速准确地完成星图识别, 对于提高天文定位精度和效率具有重要的意义^[1-2]。

随着天文导航定位技术的广泛应用和发展, 星图识别技术也得到极大发展。星图识别方法目前主要有两大类: 第一类是基于子图同构的识别方法; 第二类是基于模式识别的方法。第一类应用最成熟



收稿日期: 2019-03-08 修回日期: 2019-03-20;
基金项目: 国家自然科学基金(41174162);
作者简介: 赵军阳(1981-), 男, 浙江东阳, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为定位定向与基准传递技术;
张志利(1966-), 男, 河南濮阳, 博士, 教授, 博导, 研究方向为兵器发射系统仿真与自动检测。

<http://www.china-simulation.com>

的是三角形匹配算法^[3]，通过构建观测星三角形，利用角距匹配进行识别。三角形算法实现简单，但也存在特征维数较低容易造成冗余匹配的问题。随后，许多学者不断提出改进的三角形算法，如三角形内切圆识别算法^[4]、基于最大内角的三角形算法^[5]，基于哈希链表的快速三角形算法^[6]等。第二类方法通过建立模式数据库将星图识别过程转化为观测星的模式识别过程。较早采用模式识别方法的是 Padgett C 于 1997 年提出的栅格算法^[7]，将星图划分为栅格，并为每颗恒星构建特征模式向量，搜索领域伴星，极大提高了特征维度，且搜索匹配过程简单，速度快，但要求识别观测星太多，影响其在线应用。随后，Clouse D^[8]采用贝叶斯模式分类理论，踪华^[9]利用星点在星图中的位置编号和星点坐标构建一种新的星图描述模式，钱华明^[10]利用相似性度量函数对栅格算法进行改进，取得很好的效果。然而，上述算法在构造恒星特征模式时仍需要进行星图旋转，为此研究人员进一步构建了具有旋转不变性的特征，如魏新国^[11]利用径向和环向特征构建模式库，胡坤^[12]采用恒星星对角距构建观测星的特征量，并采用查表或 Hausdorff 距离进行匹配识别。文献[13]从集合论角度出发，利用 KNN 算法和有向图理论建立星点有序集作为星图识别的特征，进一步提高了星图识别算法的抗噪声能力和鲁棒性。

从星图识别方法发展现状来看，模式识别类算法对星点位置噪声与星等亮度噪声不敏感，整体上较子图同构类算法鲁棒性强，且所需存储空间小，速度较快，是今后星图识别算法的发展方向^[12]。但传统的模式匹配方法在星点提取误差较大的情况下，临近星错误选择易导致匹配失败。为了进一步提高星图识别的效率和准确率，本文首先构建了一种新的径向特征并建立特征数据库，然后在星图识别过程中对径向特征根据象限分别进行匹配，在不改变星模式库储存量的同时，可有效提高星图识别速度，并保证匹配的准确性。

1 基于径向和环向分布特征的星图识别方法

基于径向和环向特征的星图识别方法是将待识别恒星邻域伴星的几何分布特征分为径向和环向两种，并建立相应的特征模式库。由于径向特征只和待识别星与周围恒星的径向距离有关，具有旋转不变性，因此非常适合作为模式特征。因此，首先利用径向特征作初始匹配。但是不同的待识别星在同一径向距离上可能都存在恒星，导致不同待识别星的径向特征一致，出现识别失误，因此使用环向特征进行后续匹配，筛除冗余恒星，以得到正确的匹配结果。待识别星的径向特征与环向特征通过以下步骤确定，如图 1~2 所示。

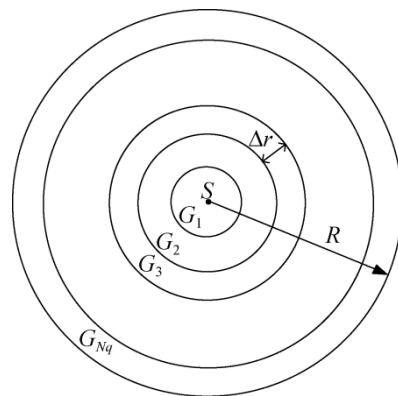


图 1 径向特征示意图

Fig. 1 Sketch map of radial feature

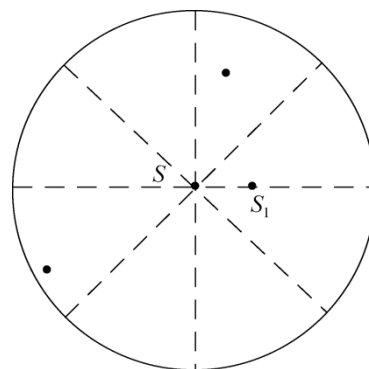


图 2 环向特征示意图

Fig. 2 Sketch map of cyclic feature

1) 径向特征

(1) 把待识别星 S 作为中心，选择识别半径 R ，

将半径 R 内的圆形区域作为径向特征区域。

(2) 将沿径向的特征区域划分为等间距的圆环, 圆环宽为 Δr , 以待识别星 S 为中心沿径向向外的圆环依次为 G_1, G_2, \dots, G_{N_q} 。

(3) 分别计算特征区域内恒星与待识别星 S 的角距, 确定该星位于某一圆环, 则径向特征表示为:

$$S = (B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_{N_q}), j = 1, 2, \dots, N_q$$

式中: $B_m = \begin{cases} 1, G_m \text{ 环带有伴星} \\ 0, G_m \text{ 环带无伴星} \end{cases}$ 。

2) 环向特征

(1) 把待识别星 S 作为中心, 计算出在特征区域内, 任意两颗恒星和待识别星 S 构成的夹角大小。

(2) 找出其中夹角最小的那个, 以其中一颗恒星 S_1 与待识别星 S 的连线为起始边, 逆时针方向将特征区域均分为 8 个象限。

(3) 按逆时针方向, 将各象限的恒星分布情况记为环向特征, 若象限内有恒星记为 1, 没有恒星则记为 0。

(4) 将特征量进行循环位移, 找出数值最大的特征量作为环向特征。

进行星图识别时, 首先根据径向特征和环向特征的求取方法, 将星库中的恒星转换为径向特征与环向特征表示, 并储存起来作为特征数据库; 然后对需要识别的星图运用质心定位方法确定各星点坐标, 采用同样的方法, 计算出星点的径向特征与环向特征; 最后将待识别星点特征与星库特征数据进行匹配, 完成星图识别。径向特征由于具有旋转不变性的优点, 匹配较为稳定可靠, 而环向特征相对于径向特征并不可靠, 是对径向特征匹配的一种补充。因此, 在算法具体匹配的过程中, 首先进行径向特征匹配, 然后再进行环向特征匹配。运用径向与环向特征进行识别恒星的详细步骤如图 3 所示。

2 改进的径向特征星图识别方法

2.1 改进径向特征的构建

采用径向与环向特征的星图识别方法是一种

效果较好的星模式识别方法, 相对于栅格识别方法, 其特征量的选取更具有唯一性, 同时避免了栅格识别方法中由于星图旋转等带来的固有误差, 识别结果更加准确可靠^[11]。虽然径向和环向特征识别方法有着较好的识别准确率和识别速度, 但由于该方法需要先进行一次径向特征匹配, 再进行一次环向特征匹配, 并采用遍历匹配的方式, 即匹配过程需要进行两次特征遍历, 运算量依然很大, 导致星图识别效率较低。

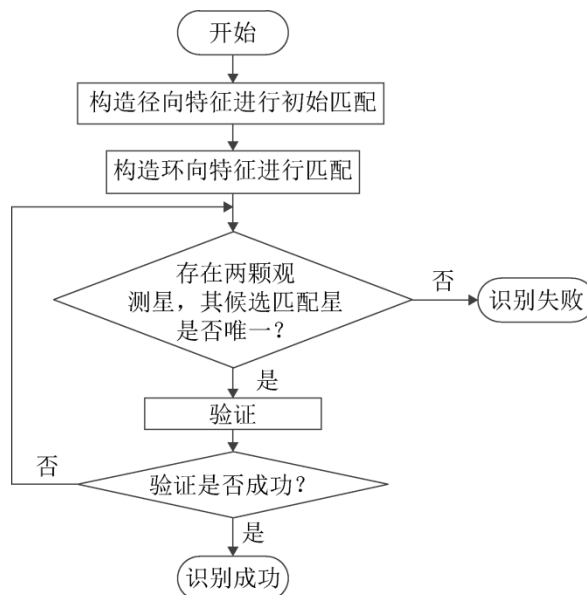


图 3 采用径向与环向特征的星图识别方法流程图
Fig. 3 Star identification flow using radial and cyclic features

为了进一步提高识别效率, 本文结合环向特征对径向特征进行改进, 建立了一种新的径向特征及其确定方法, 如图 4 所示。改进径向特征的建立过程如下:

(1) 计算待识别星 S 与半径为 R 的特征区域内恒星的角距, 找出其中角距最小的恒星 S_1 , 将 S 与 S_1 之间的连线作为起始边, 按逆时针方向将特征区域划分为 8 个等分的象限。

(2) 将特征区域沿径向划分为等间距的圆环, 圆环宽为 Δr , 以待识别星 S 为中心沿径向向外的圆环依次为 G_1, G_2, \dots, G_{N_q} 。

(3) 对环向划分的 8 个象限, 分别依照步骤(1)

中计算的角距大小，确定该星位于某一圆环内，则对于 i 象限的径向特征表示为：

$$S_i = (B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_{N_q}), i = 1, 2, \dots, 8; j = 1, 2, \dots, N_q$$

式中： $B_m = \begin{cases} 1, G_m \text{ 环带有伴星} \\ 0, G_m \text{ 环带无伴星} \end{cases}$

则根据上述方法建立的改进径向特征可表示成如图 5 所示的数据结构。

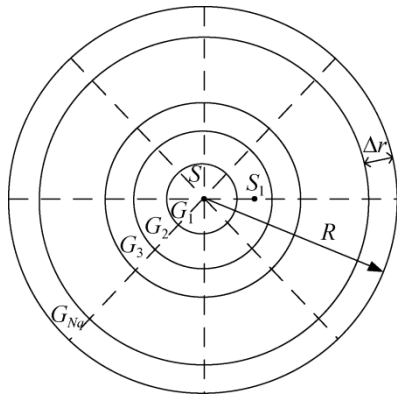


图 4 改进的径向特征示意图

Fig. 4 Sketch map of improved radial feature

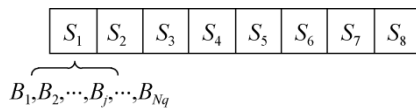


图 5 改进的径向特征数据结构图

Fig. 5 Data structure of improved radial feature

2.2 特征数据库的建立

为了利用改进的径向特征进行星图匹配，需要预先构建新的特征数据库。以待识别星 S 为中心，选取半径为 R 的区域作为特征区域，这里选择特征区域半径为 $R = 10^\circ$ ，同时将特征区域划分为等间距的环带，共有 N_q 个环带区域，取 $N_q=200$ 。为了提高搜索速度，将星表数据直接转换为改进径向特征的查找表。查找表的建立方法如下：

(1) 对星表中的某一颗恒星 S 建立特征数据，首先确定与恒星 S 角距最小的恒星 S_1 ，将二者的连线当做起始边，按逆时针方向将特征区域划分为 8 个等分的象限。

(2) 选择第一象限部分，建立恒星的径向特征量，如果恒星 S 在环带 N_i 中有恒星，则在 N_i 后记

录下恒星 S 的恒星序号。

(3) 对恒星 S 的其他象限采用同样的方法进行处理。

(4) 对星表中的其他恒星采用步骤(1)~(3)完成特征提取，并将环带 N_i 中的恒星序号按照升序排序，完成特征查找表的构建。

改进的径向特征查找表的存储结构见图 6。

	环带数	恒星序号
象限数	1	1 27 35 92 135 354 633 769 ... 2 75 88 95 216 368 641 756 ... ⋮
	2	1 74 81 82 320 321 328 476 ... 2 23 24 296 297 373 374 930 ... ⋮
	⋮	⋮
8	⋮	

图 6 改进的径向特征储存结构图

Fig. 6 Storage structure of improved radial feature

2.3 星图识别过程

特征查找表建立后，对待识别星构建特征量即可进行星图匹配识别。利用改进的径向特征进行星图识别的实施过程如图 7 所示。下面以待识别恒星 S 为例进行具体说明。

首先根据改进径向特征的建立过程确立恒星 S 的改进径向特征，表示为：

$$\begin{pmatrix} 13 & 24 & 36 & 92 \\ 21 & 53 & & \\ & & \vdots & \\ 11 & 102 & 133 & \end{pmatrix}$$

该特征共有 8 行，分别表示 8 个象限的径向特征量，先将第 1 象限的特征量进行匹配，匹配过程如图 8 所示。

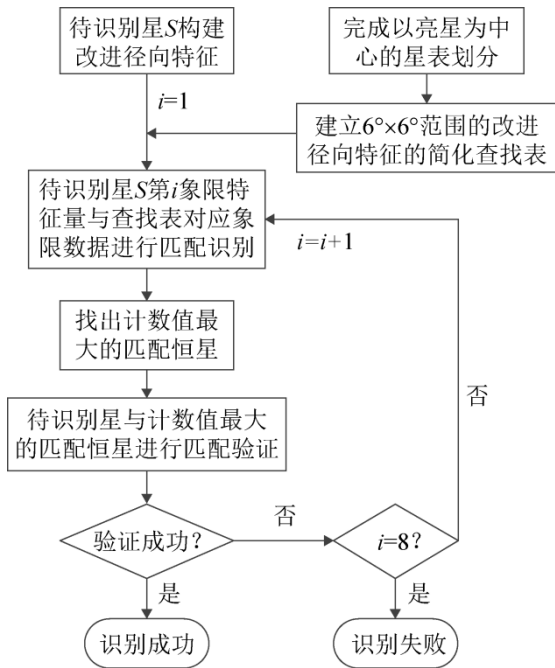


图 7 利用改进径向特征的星图识别方法流程

Fig. 7 Star map identification flow using improved radial feature

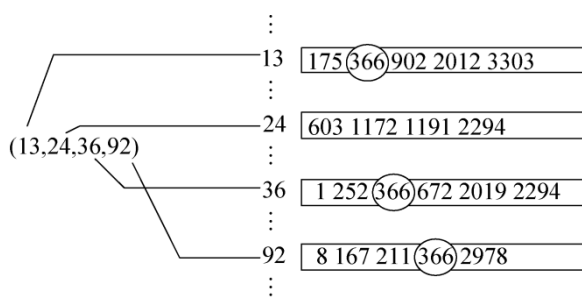


图 8 特征匹配过程示意图

Fig. 8 Sketch map of feature matching

在匹配的过程中, 对恒星 S 特征量环带中出现的恒星序号, 记录下恒星序号并在对应的计数值上加 1, 依次对恒星 S 其余特征量环带查找并计数, 匹配完成后, 计数值最大的恒星就是具有最大可能性的待识别星。图 8 中, 序号为 366 的恒星出现了 3 次, 则待识别星为 366 号恒星的可能性最大。将待识别星 S 其余象限的特征量与 366 号恒星进行验证匹配。如果验证成功, 则可以确定待识别星 S 就是 366 号恒星; 如果验证失败, 则在第一象限匹配和计数的基础上, 继续对第二象限特征量进行匹配并累加计数, 找出计数值最大的恒星与待识别星进行验证匹配, 判断匹配是否成功; 如果失败, 继

续采用上述方法, 直至匹配出正确结果, 或者匹配完第 8 象限特征数据仍未正确匹配, 则匹配完全失败。在识别过程中, 如果出现计数值相同的情况, 则同时对计数值相同的恒星进行验证匹配。

3 数据实验及结果分析

假设实验中改进径向特征的半径 $R=10^\circ$, 环向划分象限数为 8, 径向划分环带数 $N_q=200$ 。将数字天顶仪架设在野外, 其 CCD 像素为 4096×4096 , 视场角大小为 $3^\circ \times 3^\circ$, 一个工作循环中拍摄 16 幅实际星图, 分别使用三角形识别方法、环向与径向特征识别方法和改进径向特征识别方法识别拍摄得到的星图。每幅星图与依巴谷星表匹配识别出的恒星数量如图 9 所示。

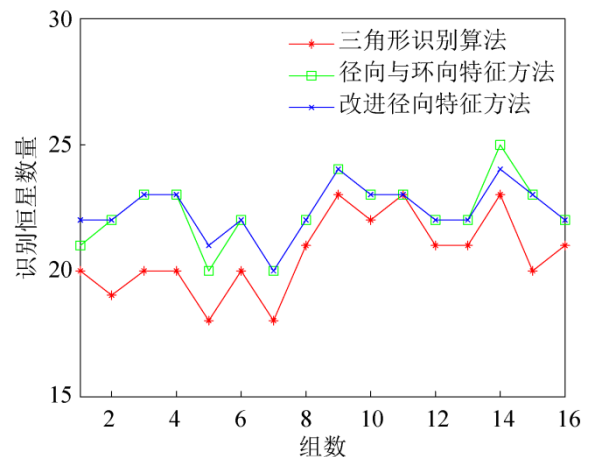


图 9 几种不同方法识别的恒星数量

Fig. 9 Star numbers identified by different methods

从图 9 中可以看出, 改进径向特征方法识别的恒星数量与径向和环向特征识别方法相近, 高于传统的三角形识别方法。

为了研究本文识别方法的准确率, 随机生成了 500 幅星图, 在星点坐标上增加了标准差为 0~2 个像素的高斯分布位置噪声, 对比了栅格识别方法和改进径向特征方法的识别率, 结果如图 10 所示。

图 10 中改进径向特征方法的识别率明显高于栅格算法。栅格算法的识别率伴随位置噪声的增大出现了明显的下降, 当噪声标准差达到 2 个像素

时, 识别率是 94%, 而同等情况下, 改进径向特征方法的识别率仍然达到 96.7%。

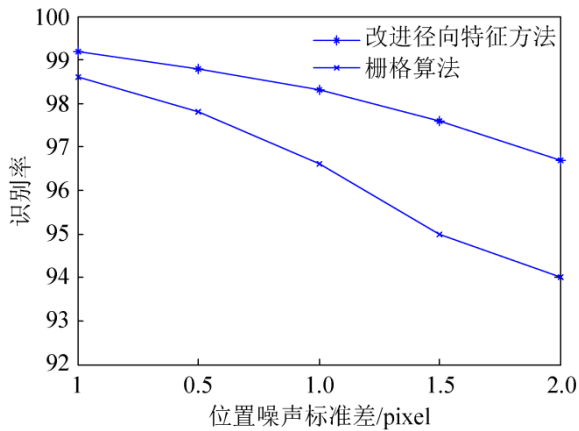


图 10 位置噪声对星图识别率的影响
Fig. 10 Influence of situation noise to star map identification rate

改进径向特征的星图识别方法是将待识别星的特征量与特征数据库中的特征量区分象限实施匹配, 在匹配并验证成功唯一的恒星后, 便不再需要和剩余象限中的特征量进行匹配运算。为分析其星图识别效率, 采用 CPU 为 Intel Core I5 1.17 GHz 的计算机随机生成了 1 000 颗恒星, 使用改进径向特征识别方法对 1 000 颗恒星进行匹配识别, 其中仅 11 颗恒星识别失败。统计恒星完成识别时的象限数, 其分布结果如图 11 所示。通过图 11 分析可得, 改进径向特征方法完成识别时的象限数大多集中在 3~4 象限, 对 81.4% 的恒星只需要识别到第 5 个象限即可完成识别, 且相比径向和环向特征识别方法, 不需要进行后续的环向特征识别。该方法单颗恒星的平均识别时间为 8.7 ms, 而同等条件下的径向和环向特征识别方法单颗恒星的平均识别时间为 11.2 ms, 识别效率提升约 30%。

从存储空间分析, 改进径向特征的星图识别方法在建立新的特征数据库时, 将依巴谷星表数据转换为 8 个象限的改进径向特征量, 每个象限的特征量仅为原特征数据库的一部分, 且总量并未增加。设每个恒星序号占用存储空间为 2 B, 改进径向特征的新特征数据库共占用存储空间约为 228 kB,

径向与环向特征方法对应的特征数据库占用存储空间约为 230 kB, 其中径向特征占用 225 kB, 环向特征占用 4.03 kB, 两种识别方法的特征数据库存储空间大致相同, 未产生额外存储。

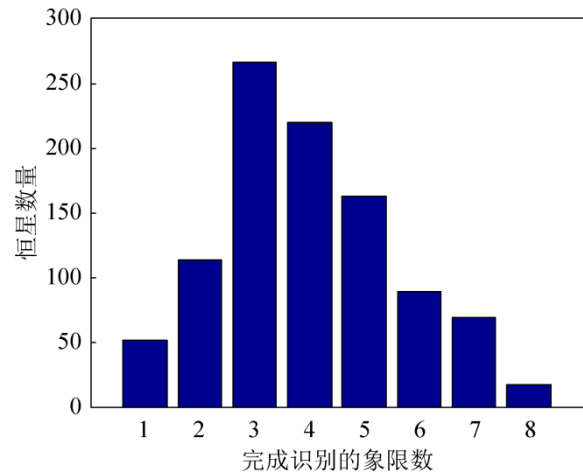


图 11 完成识别时的象限数分布
Fig. 11 Sketch map of quadrant distribution after completing recognition

4 结论

在确保星图识别准确度的条件下, 为进一步提高识别效率, 本文对径向和环向特征识别方法进行了改进, 提出一种采用改进径向特征的星图识别方法, 对待识别恒星分象限进行识别, 减少单个象限内的特征数据量, 在每一象限识别完成后, 计数值最大的匹配恒星与待识别恒星进行验证匹配, 验证成功则不必进行后续象限的特征匹配运算, 也无需进行环向特征识别。通过实验结果分析, 该方法只需完成 5 个象限的特征匹配即可实现多数星点的识别, 识别效率得到明显提高, 且没有增加特征数据库存储空间, 其抗噪性能也优于栅格算法。

参考文献:

- [1] 张广军. 星图识别[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011. Zhang Guangjun. Star Identification[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [2] 孟靖. 大地天文测量星图定位与识别算法的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2010. Meng Jing. The Algorithm Research of Star Pattern Location and Recognition in Astronomical Geodesy[D].

- Xi'an: Xidian University, 2010.
- [3] 时圣革, 雷肖剑, 于长海. 星图识别三角形算法综述[J]. 光电技术应用, 2014, 29(5): 1-6.
Shi Shengge, Lei Xiaojian, Yu Changhai. Triangle Algorithm Overview of Star Pattern Recognition[J]. Electro-Optic Technology Application, 2014, 29(5): 1-6.
- [4] 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, 40(4): 752-756.
Lu Jinghui, Wang Hongli, Sun yuan, et al. Star Pattern Identification Algorithm by Triangle Incircle[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(4): 752-756.
- [5] 张同双, 郭敬明, 柏杨, 等. 基于最大内角的三角形星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 208-216.
Zhang Tongshuang, Guo Jingming, Yang Bai, et al. Star Identification Algorithm based on The Maximum Interior Angle in Triangle[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(1): 208-216.
- [6] 张磊, 周宇, 林荣峰, 等. 一种快速三角形星图识别算法[J]. 应用光学, 2018, 39(1): 71-75.
Zhang Lei, Zhou Yu, Lin Rongfeng, et al. Fast Triangle Star Pattern Recognition Algorithm[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(1): 71-75.
- [7] Padgett C, Kreutz-Delgado K. A Grid Algorithm for Autonomous Star Identification[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 1997, 33(1): 202-213.
- [8] Clouse D, Padgett C W. Small Field-of-view Star Identification Using Bayesian Decision Theory[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2000, 36(3): 773-783.
- [9] 踪华, 汪渤, 周志强, 等. 一种基于模式匹配的自主星图识别算法[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(10): 1032-1037.
Zong Hua, Wang Bo, Zhou Zhiqiang, et al. An Autonomous Star Identification Algorithm Based on Patterns Matching[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2015, 35(10): 1032-1037.
- [10] 钱华明, 郎希开, 李猛. 一种改进的栅格星图识别算法[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(6): 150-153.
Qian Huaming, Lang Xikai, Li Meng. A Modified Grid Algorithm for Star Map Identification[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(6): 150-153.
- [11] 魏新国, 张广军, 江洁. 利用径向和环向分布特征的星图识别方法[J]. 光电工程, 2004, 31(8): 4-7.
Wei Xinguo, Zhang Guangjun, Jiang Jie. A Star Map Identification Algorithm Using Radial and Cyclic Features[J]. Opto-electronic Engineering, 2004, 31(8): 4-7.
- [12] 胡坤, 陈嘉鸿, 谢元平. 一种基于旋转不变特征的星图识别算法[J]. 光电工程, 2015, 42(6): 20-26.
Hu Kun, Chen Jiahong, Xie Yuanping. A Novel Star Pattern Identification Algorithm Based on Rotation-invariant[J]. Opto-electronic Engineering, 2015, 42(6): 20-26.
- [13] 朱海龙, 梁斌, 张涛. 基于星点有序集的全天球自主星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(6): 1577-1586.
Zhu Hailong, Liang Bin, Zhang Tao. All-sky Automation Star Identification Algorithm based on Ordered Star points Set[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(6): 1577-1586.