

径向特征下的改进三角形星图识别算法*

刘先一, 张志利, 周召发, 常振军

(火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 三角形星图识别可靠性与可操作性较强, 目前仍在广泛使用, 但是三角形星图识别算法存在冗余匹配和误识别。通过星点的几何分布构建星点的径向特征量, 依据径向特征量对星图进行初始识别, 将拍摄星点的识别结果限定在数颗导航星上。在初始识别的基础上, 运用三角形星图识别算法再次进行识别, 使三角形星图识别更具针对性, 同时提高识别的正确性。实验结果表明, 采用基于径向特征的改进三角形识别算法, 星图识别的准确性和针对性都得到了提高。

关键词: 三角形; 星图识别; 径向特征; 初始识别; 准确性

中图分类号: P222 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2020)06-042-05

Modified algorithm of triangle star identification based on radial feature

LIU Xianyi, ZHANG Zhili, ZHOU Zhaofa, CHANG Zhenjun

(College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

Abstract: Triangle star identification has strong reliability and operability, and is still widely used at present, but the triangle star identification algorithm poses problems of redundant matching and wrong identification. The radial feature quantity of the star point was constructed by the geometric distribution of the star point. The star point was initially identified, and the navigation star corresponding to the star point was limited to several navigation stars by initial recognition. On the basis of initial identification, the triangle segmentation identification algorithm was used to identify the initial recognition result again, which improves the pertinence and efficiency of star map identification. The experimental results show that when the new algorithm is used to identify the stars, the accuracy and rapidity of star identification are improved.

Keywords: triangle; star identification; radial feature; initial identification; accuracy

星传感器是一种依靠获取的星图进行定姿的高精度天文装置, 已经广泛运用于航空航天领域^[1], 对获取的星图进行识别是一项重要的工作。目前, 常用的星图识别算法主要分为模式识别和子图同构类星图识别算法两大类^[2-4]。栅格识别算法作为典型的模式识别算法, 受选星的影响较大, 星点的选择会影响到栅格算法的识别率^[5-6]。三角形星图识别算法是子图同构类星图识别算法的典型算法, 具有可靠性高等优点, 在工程实践中仍然在广泛使用^[7], 但是在识别的过程中需要遍历星点, 存在冗余匹配和误匹配, 且识别效率较低^[8-9]。近年来, 又出现了对三角形识别算法的改进算法, 如三角形内切圆等算法^[10-11], 但这些算法并未从根本上克服三角形识别算法的不足, 实用性都有待进一步提高^[12-13]。

考虑到三角形星图识别算法的广泛使用性,

本文将对该算法进行改进, 以克服三角形星图识别算法存在冗余匹配和误匹配的不足。本文拟构建拍摄星点与导航星的径向分布特征, 通过径向特征对星点进行初始识别, 针对初始识别的结果, 再进行三角形星图识别。这样可使星图识别更具针对性, 从而提高星图识别的准确性。

1 改进三角形星图识别算法

在对三角形星图识别算法进行改进时, 主要涉及星点径向特征的构建以及在初始识别结果基础上的三角形星图识别两个方面的内容。

1.1 星点径向特征的构建

在进行星图识别时, 通过识别星点和导航星的几何分布分别构建识别星点与导航星的唯一“描述量”, 通过几何描述量对拍摄的星点进行初

* 收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41404022)

作者简介: 刘先一(1991—), 男, 河南信阳人, 博士研究生, E-mail: 1397559188@qq.com;

张志利(通信作者), 男, 教授, 博士, 博士生导师, E-mail: effortyao@163.com

始识别。

如图 1 所示,把待识别恒星 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。将径向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} 。分别计算特征区域内恒星与待识别星 S 之间的角距,确定该恒星所处的圆环,并将此圆环的特征值记为 1。径向特征量表示为 $A = (B_1, B_2, \dots, B_h)$, $h = 1, 2, \dots, N_q$ 。当 $B_h = 1$ 时,表示在该环带里存在着恒星星点;当 $B_h = 0$ 时,表示在该环带里没有恒星星点。

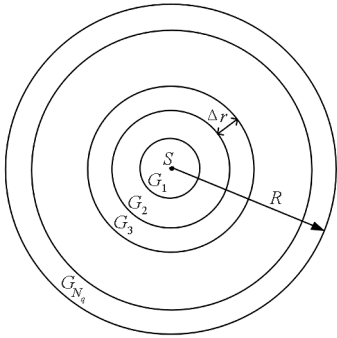


图 1 星点径向特征

Fig. 1 Radial feature of star point

为了更加细致准确地对星点的几何分布进行描述,在选取识别半径 R 和圆环宽 Δr 时,首先分别计算提取的恒星星点角距以及导航星之间的角距,然后选取最大的角距值作为识别半径 R ,选取最小的角距值作为圆环宽 Δr ,从而分辨出每一颗星点。如图 2 所示,任意两颗导航星之间的角距为 $d(i, j)$ 。

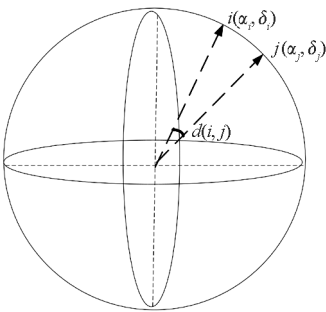


图 2 导航星之间的角距

Fig. 2 Angular distance of navigation star

$$d(i, j) = \arccos\left(\frac{s_i \cdot s_j}{|s_i| |s_j|}\right) \quad (1)$$

式中, $s_i = \begin{pmatrix} \cos\alpha_i \cos\delta_i \\ \cos\alpha_i \sin\delta_i \\ \sin\delta_i \end{pmatrix}$, $s_j = \begin{pmatrix} \cos\alpha_j \cos\delta_j \\ \cos\alpha_j \sin\delta_j \\ \sin\delta_j \end{pmatrix}$, 其中 (α, δ)

为视场范围内导航星的天文坐标。

如图 3 所示,在电荷耦合器件 (Charged Coupled Device, CCD) 芯片上每两颗恒星星点之间的角距为 d_m^{ij} 。

$$d_m^{ij} = \arccos\left(\frac{k_i \cdot k_j}{|k_i| |k_j|}\right) \quad (2)$$

式中, $k_i = \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{pmatrix}$, $k_j = \frac{1}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \\ -f \end{pmatrix}$,

其中 (x, y) 为拍摄星点的图像坐标, f 为仪器的焦距。

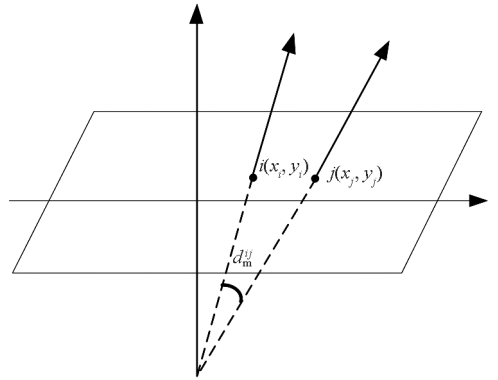


图 3 恒星星点之间的角距

Fig. 3 Angular distance of star point

这里选取的识别半径 R 和圆环宽 Δr 分别为:

$$\begin{cases} R = \max(d(i, j), d_m^{ij}) \\ \Delta r = \min(d(i, j), d_m^{ij}) \end{cases} \quad (3)$$

显然,圆环数目 $N_q = \text{int}(R/\Delta r)$, int 表示向上取整。依据计算的恒星角距值和圆环宽对星点的几何分布进行描述,构建的每一颗观测星点 k 的径向特征量为 $A_{kh} = (B_{k1}, B_{k2}, \dots, B_{kh})$, $h = 1, 2, \dots, N_q$, 每一颗导航星 i 的径向特征量为 $A_{ih} = (B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{ih})$, $h = 1, 2, \dots, N_q$ 。对构建的导航星与观测星的径向特征量的每一位数值进行逻辑与值运算。

$$l = \sum_{h=1}^{N_q} (B_{ih} \cap B_{kh}) \quad (4)$$

通过 l 值进行初始识别,当 l 值越大时,表示导航星与观测星之间的几何分布相似度越高,可能为一对识别结果。本文设定 $l \geq \frac{3}{4} N_q$ 时为一对初始识别结果。基于径向特征的初始识别结果如表 1 所示。

表 1 径向特征的识别结果

Tab. 1 Identification result of radial feature

观测星点	导航星
(x_1, y_1)	$(\alpha_{11}, \delta_{11})$
	$(\alpha_{12}, \delta_{12})$
	\vdots
(x_2, y_2)	$(\alpha_{1m}, \delta_{1m})$
	$(\alpha_{21}, \delta_{21})$
	$(\alpha_{22}, \delta_{22})$
\vdots	\vdots
	$(\alpha_{2m}, \delta_{2m})$
	\vdots
(x_n, y_n)	$(\alpha_{n1}, \delta_{n1})$
	$(\alpha_{n2}, \delta_{n2})$
	\vdots
$(\alpha_{nm}, \delta_{nm})$	

在此基础上再进行三角形星图识别时不再需要遍历导航星, 这样将大大减小冗余匹配, 使星图识别更具有针对性, 提高星图识别的效率。

1.2 三角形星图识别算法

目前, 三角形星图识别算法为边一边一边匹配模式, 如图 4 所示。

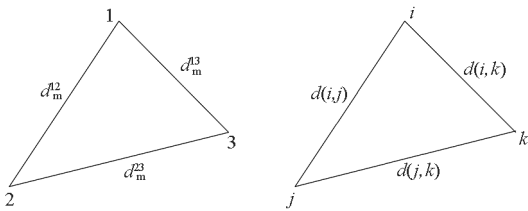


图 4 三角形匹配

Fig. 4 Triangle matching

若由拍摄星点构成的观测三角形与星表中的导航三角形能够匹配, 则必须同时满足:

$$\begin{cases} |d(i, j) - d_m^{12}| \leq \varepsilon \\ |d(j, k) - d_m^{23}| \leq \varepsilon \\ |d(i, k) - d_m^{13}| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中, d_m^{12} 、 d_m^{13} 和 d_m^{23} 为所挑选观测三角形的三条边(角距), $d(i, j)$ 、 $d(j, k)$ 和 $d(i, k)$ 表示导航三角形的三条边(角距), ε 为识别阈值。

在直接采用三角形星图识别时, 对由观测星点构建的三角形进行识别, 需要构建 C_m^3 个导航三角形(m 为导航星点的数目)。在采用径向特征进行初始星图识别后, 将拍摄星点对应的导航星限定在数颗星上, 此时只需要在初始识别后的观测星点和导航星中构建三角形进行匹配。完成

对由观测星点构建的三角形的识别, 只需要构建 $m_1 \cdot m_2 \cdot m_3$ 个导航三角形, 其中 m_1 、 m_2 、 m_3 分别为观测星点对应的导航星。显然有:

$$m_1 \cdot m_2 \cdot m_3 \ll C_m^3 \quad (6)$$

由以上分析可知, 采用基于径向特征的改进三角形进行星图识别时, 不再需要遍历所有的导航星, 这样使星点识别更具针对性, 同时减少了计算量。

2 试验数据分析

为了验证基于径向特征的改进三角形星图识别算法的有效性, 采用星敏传感器在地面条件下进行多幅恒星星图的拍摄。实验过程中采用的星敏传感器的视场角为 $4^\circ \times 4^\circ$, 星敏传感器中的 CCD 图像传感器的分辨率为 4096×4096 , 像素大小为 $9 \mu\text{m}$ 。

对任意一幅星图进行处理, 提取出拍摄的星点坐标数据, 并结合视场范围的导航星数据进行星图识别。采用径向特征对星点进行初始识别, 初始识别的结果如表 2 所示(由于篇幅所限, 这里只给出部分初始识别的结果)。

表 2 初始识别的结果

Tab. 2 Results of initial identification

序号	观测星点		导航星	
	$x/\text{像素}$	$y/\text{像素}$	经度/ $(^\circ)$	纬度/ $(^\circ)$
1	3122.60	2055.53	108.404 1	34.976 0
2	4008.00	1900.00	108.067 1	35.761 9
3	983.55	1646.07	109.703 9	34.803 9
4	1575.91	1644.83	110.157 0	35.124 5
5	1653.10	1488.10	109.710 2	34.146 2
6	3130.05	931.81	109.710 2	34.146 2
7	623.06	930.80	109.802 5	34.275 8
8	2292.79	664.37	110.869 9	33.794 3
9	1012.41	609.07	110.932 4	35.124 5
10	2784.52	604.04	110.720 8	33.166 6
			110.932 4	34.225 4
			109.901 6	35.530 1

从表 2 初始识别的结果可以看出, 存在着一个观测星点对应多颗导航星的情况。在初始识别的基础上通过三角形星图识别方法再次进行识别, 使识别过程更具有针对性, 识别的结果如表 3 所示。

表3 识别结果

Tab.3 Identification results

序号	观测星点		导航星点	
	x/像素	y/像素	经度/(°)	纬度/(°)
1	2615.43	3576.52	107.444 3	33.958 1
2	1389.63	3262.98	108.425 8	33.240 0
3	2284.39	2201.92	108.819 1	34.388 4
4	4008.00	1900.00	108.067 0	35.761 9
5	1575.91	1644.82	109.710 2	34.146 2
6	1653.10	1488.10	109.802 5	34.275 8
7	623.06	930.80	110.869 9	33.794 3
8	2292.79	664.37	110.157 0	35.124 5
9	1012.41	609.07	110.932 3	34.225 4
10	1465.18	423.47	110.840 2	34.639 6
11	1500.28	66.71	111.134 6	34.830 3
12	2784.52	604.04	109.901 5	35.530 1
13	3122.60	2055.53	108.404 0	34.976 0

从表3可以看出,对初始识别的结果再次进行识别时,能够有效减少误识别的可能性,使识别结果更具有针对性。

直接采用三角形星图识别算法对该幅星图进行识别时,在识别的结果中存在着误识别的星点数据。此时存在着不同的观测星点对应同一颗导航星的现象,部分误识别数据如表4所示。

表4 部分误识别数据

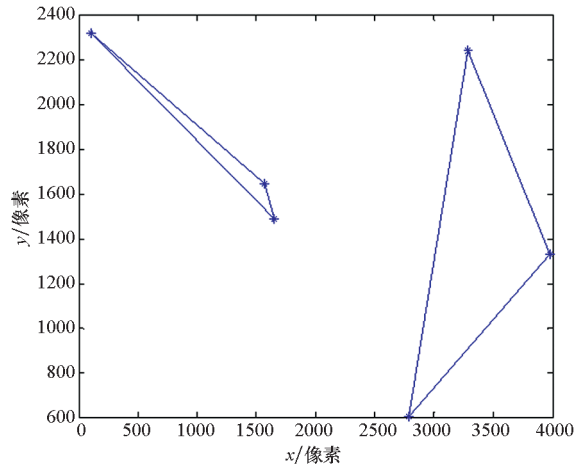
Tab.4 Partially misidentified data

序号	观测星点		导航星点	
	x/像素	y/像素	经度/(°)	纬度/(°)
1	1389.63	3262.98	108.425 8	33.240 0
2	2178.05	3464.10		
3	1575.91	1644.82	109.710 2	34.146 2
4	3284.58	2239.62		

图5展示了星点出现误识别时的情况,此时拍摄的两颗恒星像点识别对应的是同一颗恒星。

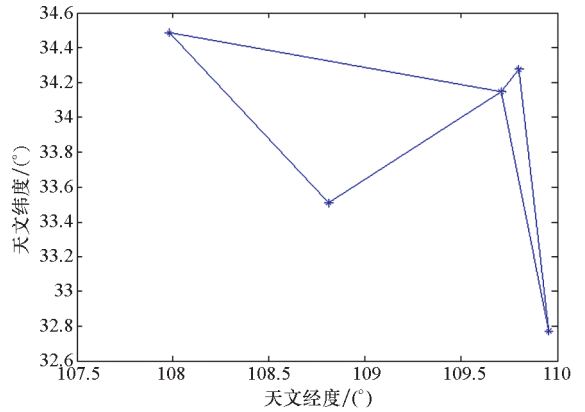
分别采用三角形星图识别算法与基于径向特征的改进三角形星图识别算法对拍摄的多幅星图进行识别,误识别的星点数目如图6所示。

显然,从图6可以看出,相较于三角形星图识别算法而言,基于径向特征的改进三角形星图识别算法减少了对星点的误识别,提高了星图识别的正确性。



(a) 误识别恒星的图像坐标

(a) Image coordinates of mismatched stars



(b) 误识别恒星的天文坐标

(b) Astronomical coordinates of mismatched stars

图5 误识别的恒星

Fig.5 Mismatched stars

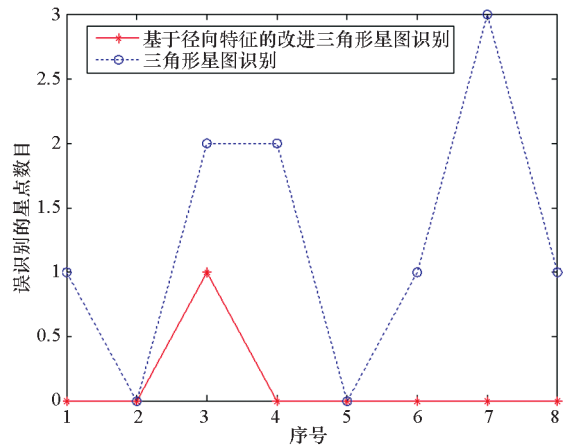


图6 误识别的星点数目

Fig.6 Number of misidentified stars

3 结论

星图识别方法是天文测量装置中的一项关键技术,当前对星图识别算法的研究虽然较多,但是

三角形星图识别算法依赖其可靠性与可操作性仍在广泛使用。本文引入了星点分布的径向特征量进行初始识别,并在此基础上进行三角形识别,使星图识别的准确性和针对性都得到了提高,克服了三角形星图识别算法存在冗余匹配与误识别的不足。

参考文献 (References)

- [1] 程会艳, 钟红军, 王龙, 等. 一种快速全天星图识别算法[J]. 空间控制技术与应用, 2017, 43(4): 73 - 77. CHENG Huiyan, ZHONG Hongjun, WANG Long, et al. A fast algorithm of all-sky star map automated identification [J]. Aerospace Control and Application, 2017, 43(4): 73 - 77. (in Chinese)
- [2] 邢飞, 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. XING Fei, YOU Zheng, DONG Ying. A rapid star identification algorithm based on navigation star domain and K-vector [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(10): 2302 - 2308. (in Chinese)
- [3] 王海涌, 费峥红, 张超. 改进的基于主星的星图识别算法[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 220 - 224. WANG Haiyong, FEI Zhenghong, ZHANG Chao. An improved star pattern identification algorithm based on main star[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(1): 220 - 224. (in Chinese)
- [4] 邢一凡, 王建华. 一种改进的基于奇异值分解的星图识别算法[J]. 智能计算机与应用, 2014, 4(2): 21 - 24. XING Yifan, WANG Jianhua. An improved star recognition algorithms based on singular value method [J]. Intelligent Computer and Applications, 2014, 4(2): 21 - 24. (in Chinese)
- [5] Hirt C. Prediction of vertical deflections from high-degree spherical harmonic synthesis and residual terrain model data[J]. Journal of Geodesy, 2010, 84(3): 179 - 190.
- [6] 张仁斌, 王鹿, 李钢. 一种基于三角形的快速星图识别方法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(10): 170 - 173. ZHANG Renbin, WANG Lu, LI Gang. Quick star map identification algorithm based on triangle[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(10): 170 - 173. (in Chinese)
- [7] 贺鹏程. 一种改进的三角形识别算法[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(4): 42 - 44. HE Pengcheng. An improved triangle matching recognition algorithm[J]. Ship Electronic Engineering, 2012, 32(4): 42 - 44. (in Chinese)
- [8] 郑万波. 基于星敏感器的全天自主分层算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2003. ZHENG Wanbo. Fully autonomous layered star identification algorithm research based on star sensor [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (in Chinese)
- [9] 崔祥祥, 王宏力, 陈聪, 等. 星三角形识别中的选星策略及实现[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(3): 296 - 299. CUI Xiangxiang, WANG Hongli, CHEN Cong, et al. Star selection strategy and realization in star triplet identification[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012, 20(3): 296 - 299. (in Chinese)
- [10] 全伟, 房建成. 一种基于蚁群聚类算法的快速星图识别方法[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 438 - 443. QUAN Wei, FANG Jiancheng. A rapid star map identification method based on ant colony clustering algorithm[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 438 - 443. (in Chinese)
- [11] Kumar M, Mortari D, Junkins J L. An analytical approach to star identification reliability [J]. Acta Astronautica, 2010, 66(3/4): 508 - 515.
- [12] 张磊, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于星图识别的空间目标快速天文定位[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 3074 - 3080. ZHANG Lei, HE Xin, WEI Zhonghui, et al. Fast celestial positioning for space objects based on star identification[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(11): 3074 - 3080. (in Chinese)
- [13] 刘晓平, 何士双. 基于三角划分的多连通域图形匹配研究[J]. 工图图学学报, 2010, 31(1): 61 - 66. LIU Xiaoping, HE Shishuang. Research on graphics matching of multiply connected region based on triangulation [J]. Journal of Engineering Graphics, 2010, 31(1): 61 - 66. (in Chinese)