

文章编号 1004-924X(2017)06-1627-08

添加补偿码的快速径向伴星特征星图识别

高 扬*, 赵金字, 陈 涛, 王 敏

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:针对传统的基于径向特征的星图识别算法在构建星模式的过程中由于位置噪声的干扰导致识别率较低的问题,本文提出一种添加补偿码的快速径向伴星星图识别算法。该算法以比特向量的形式构建基于径向特征的特征向量,同时将伴星间的角距信息以及位置噪声的补偿信息添加到特征向量中,从而有效地减小了特征库的容量,提高了星图识别算法的稳定性和识别率。最后本文根据比特向量的特点采用最小相似差方法快速完成观测星与导航星之间的初匹配,再根据同一视场内星点位置信息的相关性完成对观测星的唯一识别。实验仿真结果表明,在位置噪声为 0.5 像素的情况下星图识别成功率达到 97.8%;在星等噪声为 0.8 Mv 的情况下星图识别成功率达到 96.4%;当以真实星图为实验对象时,星图识别的成功率达到 94.2%。与传统的三角形算法以及未添加补偿码的径向特征星图识别算法相比,本文算法在识别成功率和识别时间上均有着不同程度的提高。

关键词:星图识别;补偿码;径向特征;快速匹配

中图分类号: TP301.6; V448.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172506.1627

Radial neighbor feature with compensate code star pattern recognition algorithm

GAO Yang*, ZHAO Jin-yu, CHEN Tao, WANG Min

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: 87040544@qq.com

Abstract: A fast radial featured star pattern recognition algorithm with compensate code was proposed to solve star model that constructed by traditional radial featured star pattern recognition algorithm could be vulnerable to position noise, lead to low recognition rate. This algorithm adopt byte vector form to construct radial feature vector, meanwhile neighbor angle distance and compensate information were added to feature vector to reduce guide star catalogue capacity and to effectively increase stability and recognition rate of star pattern recognition algorithm. In addition a minimum similar difference matching method was formulated according to the characteristics of byte vector thus completing initial matching between the observation star and the guide star. Furthermore, the characteristic of position information coherency of stars in the same field of view was applied for accomplish exclusive recognition. The result of the experiment shows that recognition rate is 97.8% under position noise of 0.5 pixel, and under magnitude noise of 0.8 Mv is 96.4%. For recognition of

收稿日期:2016-09-28;修订日期:2016-11-21.

基金项目:国家 863 高科技研究发展计划(No. 2011AAxx2035)

real star images, the recognition rate of this algorithm achieves 94.2%. Compared with the triangle algorithm and the traditional radius recognition algorithm, the recognition rate and time of this algorithm are improved in various degrees.

Key words: star pattern recognition; compensate code; radius feature; fast matching

1 引言

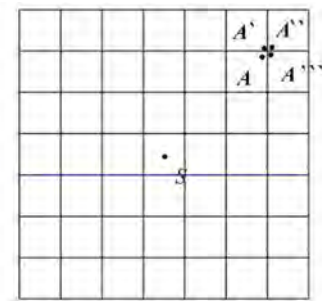
星图识别^[1]是天文定位定向系统^[2]的关键,星图识别算法的优劣直接影响天文定位定向精度的高低^[3,4]。星图识别算法本质上是一种特征匹配算法,其目的是为导航星构建唯一的特征模式^[5,6]。星图识别中匹配特征的选择是决定能否快速、准确识别的重要一环。目前国内外对星图识别算法的研究大致可分为三类:一是直接或间接利用角距元素构成匹配特征的子图同构类算法,如经典的三角形算法^[7]、六特征算法^[8],及在其基础上衍生的金字塔算法^[9]等;二是以主星邻域内伴星的几何分布特征作为匹配特征的星模式匹配算法,如栅格算法^[10]、径向特征算法^[11]等;三是采用神经网络的星图识别方法,如三角剖分以及径向基函数神经网络的星图识别方法^[12]。三角形识别算法,结构简单,易于实现,但所需数据库较大,搜索时间长,实时性差^[7];星模式算法储存容量小,识别速度快,且对星等噪声有较强的抗干扰能力,但位置噪声较大时,会造成星模式构建错误,无法完成识别^[12];基于神经网络的星图识别方法大大简化了星图识别过程,但由于复杂度较高且有着大量的并行结构,在实际应用中实现难度较大^[14]。

本文在星径向特征的基础上加以改进,并采用比特向量的形式构建基于径向伴星特征的特征向量,同时将伴星间的角距信息以及位置噪声的补偿信息添加到特征向量中,从而有效降低了位置噪声、星等噪声和干扰星对星模式构建造成的影响,减少了因星模式构建错误带来的识别失败。与传统的三角形算法以及未添加补偿码的径向特征星图识别算法相比,本文算法在识别成功率上有着不同程度的提高。并且本文算法在添加了位置噪声和星等噪声的情况下,仍能保持着较高的星图识别成功率。

2 特征星模式的构建

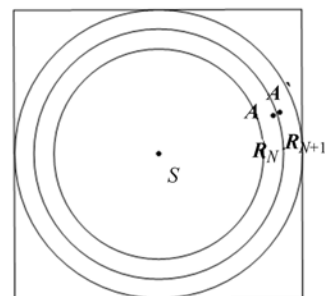
2.1 传统径向特征星模式的优点与不足

径向特征星图识别算法是指将观测星(或导航星)一定邻域内的其它星(称为伴星)按照其到观测星的径向距离分类作为该观测星特征模式的一种星图识别算法^[15]。采用径向特征作为特征模式的星图识别算法特征数据库小、匹配速度快,具有较好的实时性。此外这种特征模式只利用了伴星的位置信息,因此这种算法能较好的抑制亮度噪声对星图识别成功率造成的影响。由于位置噪声的影响会使观测星的伴星的位置漂移,从而导致特征向量构建不唯一的情况。在栅格算法中伴星 S 可位置漂移至三个不同方向产生 4 种不同的特征向量,如图 1(a)。在径向特征算法中伴星



(a) 栅格算法

(a) Grid algorithm



(b) 径向特征算法

(b) Radial feature algorithm

图 1 栅格算法与径向特征算法中的伴星的位置漂移问题

Fig. 1 Star position drift in grid and radial feature algorithm

S 仅可位置漂移至一个不同方向产生 2 种不同的特征向量,如图 1(b)。因此径向特征星图识别算法相较于经典的栅格算法而言更易于补偿由错误确定近邻星而引起的误识别。

尽管传统的径向特征星图识别算法具有以上优点,但其在特征提取方面仍然存在不足之处,主要表现在以下两个方面。第一,位置噪声仍能造成由错误确定近邻星而引起的误识别。第二,仅由径向特征作为特征模式往往不能为每颗观测星构建唯一的特征星模式,还需要其它特征以保证观测星特征的唯一性。基于以上分析,本文将伴星间的角距信息以及对位置噪声的补偿信息添加到特征向量中,完成观测星特征的唯一匹配,提高了星图识别算法的识别成功率。

2.2 添加补偿码的径向伴星特征星模式构建

为了方便补偿由位置噪声引起的误识别,同时简化计算提高匹配速度,本文采用比特向量的形式来表示观测星(或导航星)的特征向量。该特征向量共由两部分组成,一部分由观测星的径向特征组成,一部分由观测星的伴星特征组成。其

构成方法如下:沿径向方向将以观测星 S 为中心以 R_r 为半径的邻域划分成间隔为 e 的 N_{max} 个环带, N_{max} 也即观测星径向特征向量的有效位数:

$$N_{max} = \frac{R_r}{e} \tag{1}$$

对于观测星 S 及其邻域内的伴星 A 其位置信息分别为 (α_s, δ_s) 和 (α_a, δ_a) ,其中 α 和 δ 分别表示赤经和赤纬。则如图 2(a),S 与 A 间的角距 v_{sa} 可由下式计算:

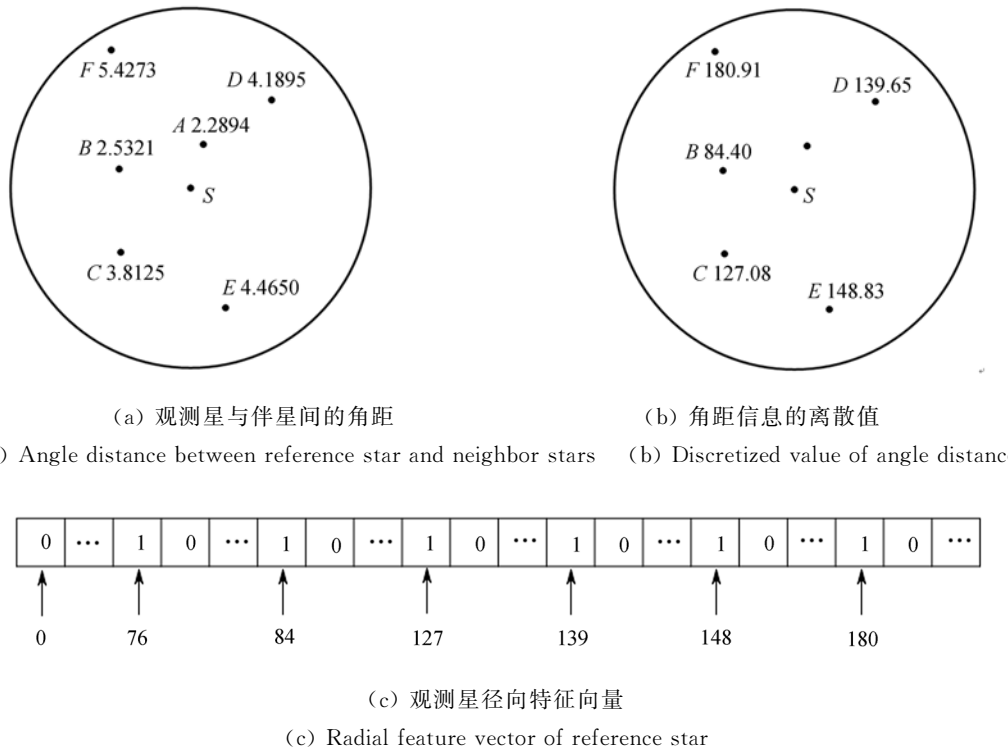
$$v_{sa} = \arccos[\cos(\delta_s) * \cos(\delta_a) * \cos(\alpha_s - \alpha_a) + \sin(\delta_s) * \sin(\delta_a)] \tag{2}$$

为了更好地区分星对可将角距信息离散化,如图 2(b),S 与 A 间的角距 v_{sa} 的离散值记为 v_{sa}^* 则有:

$$v_{sa}^* = \frac{v_{sa}}{e} + 1 \tag{3}$$

根据角距信息的离散值,由式(4)可以确定观测星径向特征向量中置 1 的位即为第 $[V_{sa}]$ 位。例如:星对 SA 的角距离散值为 76.31,那么观测星径向特征向量中的第 76 位将被置 1,如图 2(c)所示。

$$V_{sa} = floor(v_{sa}^*) \tag{4}$$



(a) 观测星与伴星间的角距 (b) 角距信息的离散值
(a) Angle distance between reference star and neighbor stars (b) Discretized value of angle distance

(c) 观测星径向特征向量
(c) Radial feature vector of reference star

图 2 观测星径向特征向量构造方法

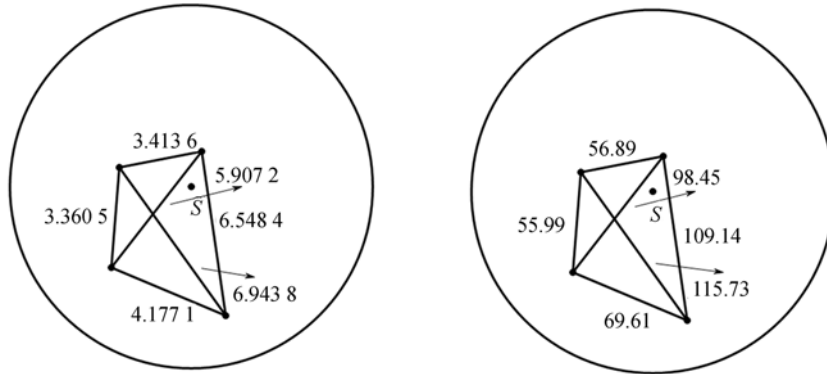
Fig. 2 Construction of radial feature vector of reference star

同理,根据观测星邻域内伴星间的分布关系,可得伴星 A 与伴星 B 间角距的离散值 v_{ab}^* 。

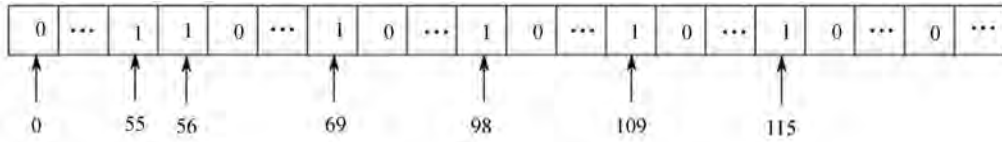
$$v_{ab}^* = \frac{v_{ab}}{2e} + 1, \tag{5}$$

则根据式(4)可以确定观测星伴星特征向量中置 1 的位。由于伴星间的最大角距为 $2R_s$, 因此式(5)中

的除数为 $2e$, 同时也保证了观测星径向特征向量与观测星伴星特征向量具有相同的位数, 如图 3 所示。



(a) Angle distance between neighbor stars (b) Discretized value of angle distance



(c) 观测星伴星特征向量

(c) Radial feature vector of neighbor stars

图 3 观测星伴星特征向量构造方法

Fig. 3 Construction of radial feature vector of neighbor stars

尽管根据上述方法构建的特征能很好地描述特征半径中星点的分布关系, 但这种特征很容易受到位置噪声的干扰。因此本文将位置噪声补偿码添加到导航星的特征向量中, 用以补偿由位置噪声引起的伴星的位置漂移问题。由图 4(a) 可见观测星 S 与伴星 A 角距的离散值距环带的边界很近, 为了补偿由位置噪声引起的误识别, 假定伴星 A 既在第 76 环内也在第 77 环内, 即在导航

星的径向特征向量中第 76 位和第 77 位均被置 1。同时, 为了尽量减少添加补偿码的数量, 可设置阈值 $\sigma_L=0.3, \sigma_H=0.7$ 。只有当观测星 S 与伴星 A 角距离散值的小数小于 σ_L 或大于 σ_H 时, 才相应的在特征向量的第 $[V_{sc}]-1$ 位或第 $[V_{sc}]+1$ 位添加补偿码(置 1)。

同样的, 在导航星的伴星特征向量中, 也根据相同规则添加补偿码, 如图 4(b)。

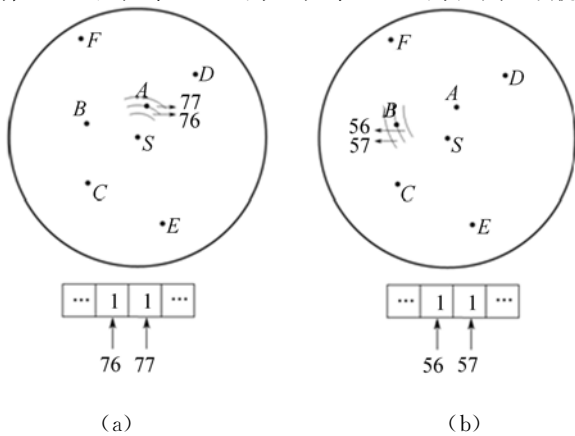


图 4 添加补偿码的导航星特征向量

Fig. 4 Guide star feature vector with compensation bits

3 添加补偿码的径向伴星星图识别

在添加补偿码的径向伴星星图识别过程中, 本文采用多步匹配的方法。首先利用径向伴星特征完成初匹配, 将搜索范围限定到一个较小的量级, 然后采用同一视场内各星点位置信息的相关性逐层筛选, 最终完成对观测星的唯一识别。

3.1 特征库的建立

在保证星图识别成功率的前提下, 为了获得存储容量更小的特征库, 对基本星表中的星点进行筛选。首先根据 CCD 的探测能力过滤掉无法

被探测到的星,再去除其中的双星和变星,然后采用螺旋基准点方法^[16]在星点密度较大的区域剔除其中星等较高的星点。按上述方法对 Tycho2 星表进行预处理,得到 5 742 颗星点作为导航星。

按文中 2.2 节的方法,选取观测星 $R_r = 4^\circ$ 邻域内的伴星,并取环数 $N_{\max} = 200$,构建特征库。特征库构建模式由两部分构成,一是星点的自然特征,包括星号、星等和坐标,每颗导航星的自然特征占用 128 bit;另一部分是 2.2 节中构建的星点模式特征,包括星点的径向特征和伴星间的角距特征,每颗导航星的模式特征占用 400 bit。本文添加补偿码的径向伴星方法构建的特征库占用存储空间为 379.1 KB,经典的查找表方法构建的特征库占用存储空间为 1 930.2 KB,可见,本文采用比特向量形式存储的特征库比传统方法存储的特征库占用更小的存储空间。

3.2 添加补偿码的径向伴星星图识别算法

为了降低星图识别算法的计算量,提高效率,从特征库中只选取了星等较低的星点作为导航星,星图经相关预处理^[17,18]后将观测到的星点按星等由低到高排列,并只选择前 m 颗星作为待匹配的观测星。星图经过质心提取并按星点亮度排序后,依次在前 m 颗星中取一颗作为主星,将其余的 $m-1$ 颗星作为该主星的伴星,再根据主星及其伴星的质心坐标构建出 m 个特征向量。然后计算观测星特征向量与特征库中导航星特征向量的最小相似差 f_T , f_T 小于等于阈值 F 的观测星即被选为候选星。

$$f_T = [T_s - \sum_{i=1}^{N_{\max}} S'(i)]^2 + [T_a - \sum_{j=1}^{N_{\max}} C'(j)]^2, \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_s = \sum_{i=1}^{N_{\max}} S(i) \& S'(i) \\ T_a = \sum_{j=1}^{N_{\max}} C(j) \& C'(j) \end{cases}, \quad (7)$$

其中, $S(i)$ 表示观测星径向特征向量的第 i 位, $S'(i)$ 表示导航星径向特征向量的第 i 位, $C(j)$ 表示观测星伴星特征向量的第 j 位, $C'(j)$ 表示导航星伴星特征向量的第 j 位。则候选星由公式(8)确定:

$$f_T \leq F. \quad (8)$$

通常,一颗观测星的径向伴星特征会与几颗导航星的径向伴星特征相似,从而造成冗余匹配。

为了解决这一问题,本文利用同一视场内各星点位置信息的相关性进一步筛选候选星,排除误匹配以得到唯一的星图识别结果。

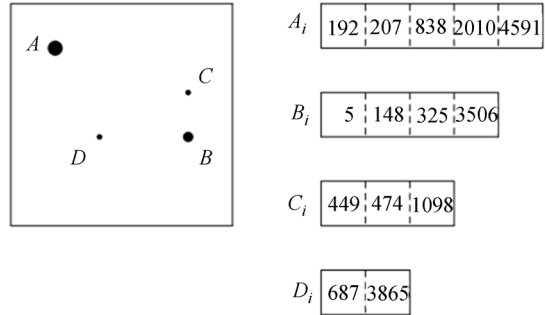


图 5 最小相似差方法得到的候选星

Fig. 5 Candidate stars from minimum similar difference method

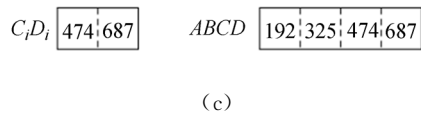
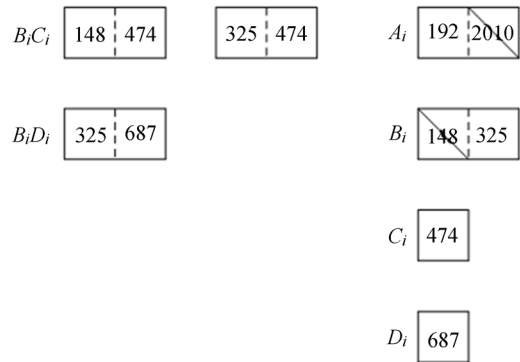
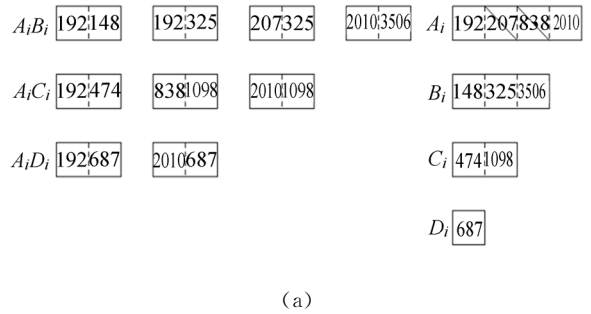


图 6 候选星中误匹配星的剔除过程

Fig. 6 Elimination of spurious candidate stars

图 5 为利用最小相似差法得到的候选星,在此基础上按照同一视场内观测星中任意两颗之间

的角距不会超过 CCD 视场尺寸以及星等越小的候选星误匹配率越低的原则,逐步将候选星中的误匹配星剔除。具体方法如下:首先按观测星亮度由高到低排序,如图 5。然后计算观测星 A 的候选星与观测星 B、C、D 的候选星之间的角距 A_iB_j 、 A_iC_j 、 A_iD_j ,选出其中满足角距小于视场尺寸的候选星对,同时剔除不符合条件的候选星对。如图 6(a)中,观测星 A 的 5 颗候选星中只有 A_1 192 号星和 A_4 2010 号星满足与其他星点角距小于视场尺寸的条件,因此其他不满足条件的候选星 A_2 、 A_3 、 A_5 将被剔除。再依次对观测星 B、C、D 重复上述步骤,如图 6(b)所示,对 B 的候选星排查后就得到了唯一匹配结果,若此时排查结果不唯一则继续排查观测星 C、D,直到得到唯一的匹配结果,候选星对的匹配结果如图 6(c)。具体星图识别算法流程图如图 7。

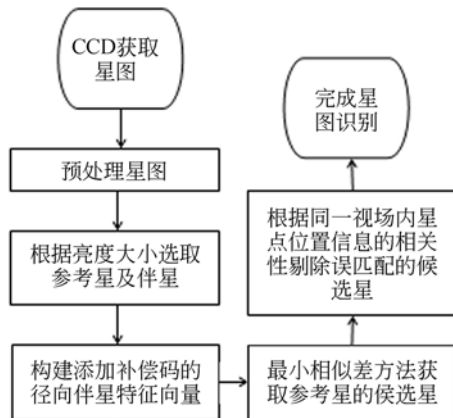


图 7 算法流程图

Fig. 7 Flowchart of our algorithm

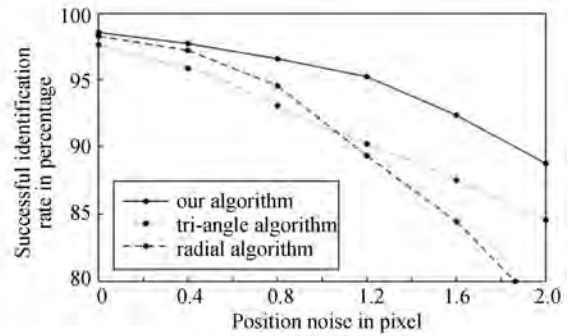
4 实验结果及分析

为了验证本文算法的有效性,使用本文算法分别对仿真星图和真实星图进行识别,并与其他经典算法进行对比,所得实验结果如下。

4.1 仿真星图实验结果

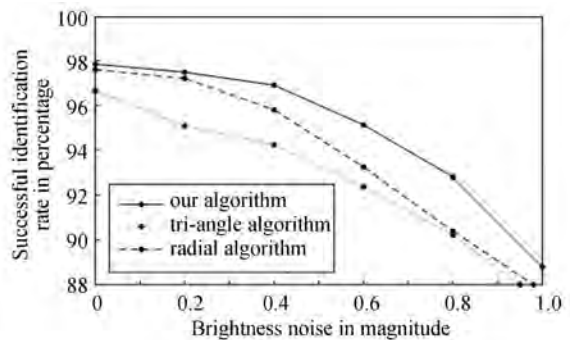
仿真星图实验在 MATLAB 环境下进行,选取观测星 $R_s = 4^\circ$ 邻域内的伴星,并取环数 $N_{max} = 200$,补偿码添加范围为 $[\sigma_{le}, \sigma_{He}]$,对 1 000 个随机视轴方向进行星图识别。图 8(a)是添加位置噪声时的实验结果对比图,可见本文算法的星图识别在位置噪声为 0.5 pixel 时,识别成功率为

97.8%,高于其他两种对比算法。图 8(b)是添加星等噪声时的实验结果对比图,可见本文算法在添加星等噪声为 0.8Mv 的星图识别成功率为 96.4%,高于其他两种对比算法。



(a) 识别成功率和位置噪声之间的关系

(a) Relationship between identification rate and position noise



(b) 识别成功率和星等噪声之间的关系

(b) Relationship between identification rate and magnitude noise

图 8 仿真星图实验结果

Fig. 8 Experiments on simulation star image

星图识别算法的识别时间是评价算法好坏的另一项重要指标,本文算法在主频为 2.7 GHz 的 PC 机上进行 1000 次识别的平均时间为 20.6 ms,三角形算法的平均识别时间为 158.9 ms,未添加补偿码的径向特征星图识别算法的平均识别时间为 10.8 ms。可见相比于三角形算法,本文算法在平均识别时间上有较大提高。

4.2 真实星图实验结果

在野外实验时选择 IMAGING SOURCE 公司的单色工业 CCD 相机,分辨率为 1024×768 ,像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$,光学系统口径为 73 mm,光学视场尺寸为 $4.5^\circ \times 3.375^\circ$ 。原始星图由地基 CCD 获得,图 9 为原始星图过去噪

和去除暗星等处理后的星图,真实星图的实验结果见表1。



图9 真实星图示例

Fig.9 Real star image

表1 不同算法平均识别用时与成功率比较

Tab.1 Time consumptions and recognition success rates of different algorithms

算法	本文算法	径向特征算法	三角形算法
平均用时/ms	21.3	12.5	158.9
识别成功率/%	94.2	82.7	91.5

由表1可见本文算法与三角形算法相比,在星图识别成功率方面略有提高,在识别速度方面有较大提高;本文算法与未添加补偿码的径向特

征星图识别算法相比,在星图识别成功率方面有较大提高,在识别速度方面略有下降。

5 结 论

本文提出了一种添加补偿码的快速径向伴星星图识别算法,该算法在星径向特征的基础上添加位置噪声的补偿信息,减小了位置噪声的影响,并以比特向量的形式储存基于径向伴星特征的特征向量,大大减小了算法对内存大小的需求。在匹配方面,本文算法用最小相似差法获取候选星,这种方法采用逻辑与运算,大大减小了算法的识别时间,再根据同一视场内星点位置信息的相关性完成对观测星的唯一识别。仿真星图的实验结果表明,本文提出的算法相比于其他两种经典算法对位置噪声和星等噪声有着更好的鲁棒性,且在平均识别时间方面也有着一定程度的提高。在真实星图仿真结果中,本文算法的识别成功率可达94.2%,平均识别时间为21.3ms,能满足大部分实际宇航任务的要求。

参考文献:

- [1] 吴量,王建立,王昊京. 基于最小损失函数的三视场天文定位定向[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 904-912.
WU L, WANG J L, WANG H J. Three FOVs celestial positioning and orientation with minimum loss function [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 904-912. (in Chinese)
- [2] 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 H, WANG B, ZHOU Z Q, et al.. An autonomous star identification algorithm based on patterns matching [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2015, 35(10):1032-1037. (in Chinese)
- [3] 毛海岑,刘爱东,王亮. 采用混合粒子群算法的星图识别方法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11):3762-3766.
MAO H C, LIU A D, WANG L. Star recognition method based on hybrid particle swarm optimization algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11):3762-3766. (in Chinese)
- [4] 江浩,郑佳怡,凌思睿. 新型复合多视场光学敏感器及其导航方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(1):1-7.
JIANG J, ZHENG J Y, LING S R. Study of navigation method based on a new multi-field optical sensor [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2016, 42(1):1-7. (in Chinese)
- [5] 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 Z H, et al.. Modification of triangle identification algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(2):458-463. (in Chinese)
- [6] 刘先一,周召发,张志利,等. 基于数字天顶仪的视场角分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 617001-0617001.
LIU X Y, ZHOU Z F, ZHANG Z L, et al.. Anal-

- ysis of field of view angle based on digital zenith camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 617001-0617001. (in Chinese)
- [7] LIEBE C C. Pattern recognition of star constellations for spacecraft applications [J]. *IEEE Aeronautics and Electronic Systems Magazine*, 1992, 8(1):34-41.
- [8] MS Scholl. Star field identification algorithm-Performance verification using simulation star fields [J]. *SPIE*, 1993, 2019:275-290.
- [9] MORTARI D, JUNKINS L J, SAMAAAN M A. Lost-in-space pyramid algorithm for robust star pattern recognition [C]. *Breckenridge CO: AAS*. 2001.
- [10] PADGETT c, KREUTZ-DELGADOK. A grid algorithm for star identification [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 1997, 33(1):202-213.
- [11] WEI X G, ZHANG G J, 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.
- [12] 张少迪, 王延杰, 孙宏海. 三角剖分以及径向基函数神经网络在星图识别中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2):365-402.
- ZHANG S D, WANG Y J, SUN H H. Application of triangulation and RBF neural network to star pattern recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):365-402. (in Chinese)
- [13] 唐武盛, 杨建坤, 衣文军, 等. 全天自主星图识别网格算法问题分析与改进 [J]. *激光与光电子进展*, 2016(2):96-102.
- TANG W S, YANG J K, YI W J, *et al.*. Analysis and improvement of the grid algorithm for autonomous star identification [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016(2):96-102. (in Chinese)
- [14] LINDSEY C S, LINDBLAD T. A method for star identification using neural networks [J]. *Proc SPIE*, 1997, 3077:471-478.
- [15] 李超兵, 袁艳艳, 王丹. 基于特征图形匹配法的高效星图识别方法 [J]. *中国空间科学技术*, 2016, 36(6):9-16.
- LI CH B, YUAN Y Y, WANG D. An efficient stellar map identification method based on characterized graphics matching method [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2016, 36(6):9-16. (in Chinese)
- [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.
- CHENG 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] 王凯, 王延杰, 樊博. 基于暗通道先验的图像去雾算法改进 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(8):840-845.
- WANG K, WANG Y J, FAN B. Improved method for single image dehazing using dark channel prior [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8):840-845. (in Chinese)
- [18] 龚昌来, 罗聪. 一种改进的容差机制图像去雾算法 [J]. *液晶与显示*, 2016, 31(11):1098-1104.
- GONG CH L, LUO C. Improved haze removal algorithm based on tolerance mechanism [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(11):1098-1104. (in Chinese)

作者简介:



高扬(1989—),女,黑龙江七台河人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,主要从事星图识别,天文定位等方面的研究。E-mail:87040544@qq.com



赵金宇(1977—),男,内蒙古赤峰市人,博士生导师,研究员,2006年于长春光机所获得博士学位,主要从事数字图像信号处理软硬件技术、图像跟踪与目标识别、图像恢复等方面的研究。E-mail: zhaoyj@ciomp.ac.cn