

文章编号 1004-924X(2010)02-0458-06

三角形星图识别算法的改进

张 磊^{1,2}, 何 昕¹, 魏仲慧¹, 刘岩俊¹, 郭敬明¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 三角形识别算法是采用星敏感器为导航部件所广泛运用的星图识别算法。但由于三角形特征维数较低, 容易造成冗余匹配和错误识别。为了提高三角形识别算法的识别成功率, 对三角形识别算法的识别过程做了改进。先将满足三边判决门限的导航星对记录到匹配数组, 然后对导航星出现的次数进行计数; 利用三角形三边之间两两相交的相关性, 将导航星出现次数 <2 的星对作为整体剔除, 最后在余下的导航星对中寻找与观测三角形同构的三角形。识别过程中, 以星对角距和相对星等差为识别特征, 并对识别特征构造了散列函数, 从而减少了识别过程中特征量比较的次数, 提高了识别速度, 增加了识别成功率。同时, 也减小了内部导航星库的存储容量。

关键词: 星敏感器; 三角形识别算法; 星对角距; 相对星等差; 散列查找

中图分类号: V448.22 **文献标识码:** A

Modification of triangle identification algorithm

ZHANG Lei^{1,2}, HE Xin¹, WEI Zhong-hui¹, LIU Yan-jun¹, GUO Jing-ming¹

(1. *ChangChun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Triangle identification algorithm for star images has been widely used in attitude detection systems that take star sensor as navigation parts at present. However, its low characteristic dimensions lead to a higher redundancy and a lot of mistake identification. To improve the accuracy of triangle identification algorithm, a modified algorithm based on traditional one was proposed. By the proposed algorithm, the guide star pairs that meet interstellar angle threshold were recorded in a star matrix and the times appeared of the guide stars were counted simultaneously. According to the truth that each star must be attached to two sides of the triangle, the special star pairs that appear less than twice should be eliminated, then the guide stars for constructing triangles were searched from stars left in the star matrix. The algorithm takes the interstellar angle and relative magnitude of stars as the identification feature and also take the hashing search method into the star identification, therefore, it reduces the comparison times and increases the identification speed. Furthermore, it also decreases the capacity of guide star database.

Key words: star sensor; triangle identification algorithm; interstellar angle; relative star magnitude; hashing search

收稿日期: 2008-09-24; 修订日期: 2008-12-22.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目

1 引 言

基于星传感器的大视场天文定位系统是现代天文导航系统的发展方向之一,它以空间位置准确,不可毁灭的自然天体恒星为基准来确定飞行器方位信息。星传感器具有隐蔽性好、适用范围广、可靠性高、精度高、可独立自主全天候工作以及在战时不受敌方干扰和破坏的特点。进入 20 世纪 90 年代以来,半导体技术和电子技术有了长足的进展,越来越多功能强大的微处理器和大容量的存储器应用在航空航天领域,硬件技术的进步使得星传感器自主导航成为可能,近年来的研究重点主要集中在“太空迷失”状态下星传感器自主进行星图识别,从而确定姿态。

“太空迷失”状态下的星图识别在本质上是初始姿态捕获过程。星图识别有两项基础性工作:一是制订导航星数据库,二是设计及实现识别算法。目前,针对这两点提出的星图识别算法主要有三角形识别算法、匹配组算法、栅格算法及遗传算法等。尽管各种算法在某一方面具有较大的优势,但是也存在一些约束其实用化的条件^[1-2]。

三角形识别算法以三角形全等原理为匹配识别标准,将导航星所能构成的导航三角形都存储起来以供搜索匹配,实现起来比较简单,执行速度较快,也比较形象、直观,是目前工程应用中广泛使用的算法。但从算法识别成功率、实时性以及导航星特征库存储容量几个指标来衡量,由于三角形识别维数较少,三角形算法的识别成功率和识别速度受测量精度与镜像匹配等因素影响较大,较多的冗余识别和错误识别一直是三角形识别算法的缺点,而且大量的导航三角形也直接导致较大的存储空间,这些都是后续以三角形为核心的识别算法所竭力改进之处^[3]。本文以三角形识别算法为基础,从星图识别的两项基础性工作出发,针对当前的星图识别算法存在着的导航星数据库存储容量大、误识别率高以及算法运行速度相对较慢的问题,分别做了不同程度的改进。根据三角形三条边两两相交,而交点则是恒星星点的特性,改进了三角形识别过程,识别过程中分别以星对角距、相对星等差为主要识别特征和辅助识别特征来减少冗余匹配。试验结果表明,该

算法具有较小的导航性数据库,较高的识别成功率和较快的算法运行速度。

2 导航星数据库的制订

导航星数据库是基于星传感器进行星图识别和姿态确定不可或缺的组成部分,在星图识别过程中,它提供识别特征数据;在姿态确定过程中,它提供恒星参考矢量。导航星数据库由导航星库和导航特征库构成,它的存储内容、存储方式与星图识别算法密切相关,其存储空间的大小主要由飞行任务及星传感器设计参数决定,它们直接影响星图识别成功率和姿态确定精度。

2.1 导航星库

导航星库来源于基本星表,是基本星信息的重组,使其更利于星图识别算法的实现。基本星表中包含数以万计的恒星,每颗恒星又包含位置、亮度、光谱等参数,由基本星表提取导航星时,根据星传感器所能探测的极限星等,只需提取需要的参数即可。

2.2 导航特征库

导航特征库存储的内容是用于恒星识别的星图特征,由提取出的导航星生成。星图特征的选取及组成方式与星图识别算法息息相关,同时,尽量减小导航特征库对硬件的存储压力,如何存储这些特征,以便加快检索和识别过程,也是需要重点考虑的问题。由于本文算法选择“边—边—边”的模式判定观测三角形与导航三角形全等,而这里的边指的是星对角距,具有较高的精度和旋转不变性。如果构建导航三角形库,各三角形之间必然会存在公共边,这意味着要多存储很多相同的信息,为了避免这种冗余,本文算法选择星对角距为主要识别特征。仅靠星对角距完成识别其特征维数太低,观测星图中除了恒星位置信息外,还可利用亮度信息。但因人眼与光电器件所能接收光谱范围以及敏感度不同,视星等是种不稳定的识别特征,单颗恒星星等误差较大,不能作为主要特征直接用于匹配。为了更好的利用恒星有限的信息,选择标定后的恒星相对星等差作为辅助识别特征。因相对星等差为浮点型数据,为减小存储空间,将其放大 100 倍存为整型数据。导航特征库的数据结构为:

```

struct IdentityProperties{
    short    iStar1;        //星号 1
    short    iStar2;        //星号 2
    short    iDifMag;       //星等差
    float    fDistance;     //星对角距
};

```

3 星图识别过程

3.1 识别特征查找过程

观测星图中星体位置的获取是星图识别的前提和基础。理论上,如果当前系统没有噪声存在,星点质心提取也没有误差的情况下,星图识别是在导航数据库查找一个与观测星图中特征数据唯一匹配的过程。查找的方法有很多,如果在没有经过排序的数据库中进行查找,需要从数据库中的第一个数据开始顺序比较、查找,如果数据经过某种方式排序,查找的方法就大不相同,可以用折半查找、插补查找等,但这些查找方法都需要在很多次比较之后才能对数据记录进行定位。散列法是数据结构中被证实是最快的一种查找方法,原理是尽量减少查找的范围到只有一个,其时间复杂度接近于 $O(1)$ 。根据这种思想,将导航数据库中的数据按星对角距升序排列,以星对角距为自变量,以存储位置为因变量构造散列函数 $H(x)$,其中 x 为星对角距,这将极大缩减识别过程中数据的查找范围,提高识别速度^[4]。

但完全无噪声无误差的系统是不存在的,虽然为了准确定位星点质心利用了离焦(弥散)和内插细分的方法,也只能达到亚像元精度^[5],而且恒星之间存在自行,恒星间的星对角距并不是常量。在识别时,需要设置一个判决门限来容许这些误差因素,判决门限的设置受限于恒星位置测量精度和星等测量精度。本算法取角距判决门限为 $\epsilon_a = 3\sigma_a$,星等判决门限为 $\epsilon_b = 3\sigma_b$, σ_a 和 σ_b 分别为位置和星等测量误差的均方差。

假设观测星图中两星点 S_1 、 S_2 位置坐标分别为 $[x_1, y_1]$ 、 $[x_2, y_2]$,单颗观测星位置提取误差最大为 ϵ ,两颗观测星角距误差最大为 2ϵ , $2\epsilon < \epsilon_a$ 。根据式(1)计算观测星角距,式中 f 为光学系统焦距。因星点位置误差的存在,将 $fDis \pm \epsilon_a$ 代入 $H(x)$ 散列函数求位置闭区间 $[a, b]$,考虑到由散列函数计算得到的数据记录理论位置与真实位置

存在一定偏差,扩大位置闭区间为 $[a-d, b+d]$, d 为根据散列函数计算数据记录理论位置与真实位置最大偏差,并在位置区间 $[a-d, b+d]$ 搜索满足式(2)条件的导航星对。式中 ΔMag 为观测星相对星等差,IdentityPropertyies 为导航特征库中的数据记录。

$$fDis = \arccos\left(\frac{x_1 \times x_2 + y_1 \times y_2 + f^2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + f^2} \times \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + f^2}}\right), \quad (1)$$

$$\begin{cases} |fDis - IdentityProperties[i].fDistance| \leq \epsilon_a \\ |\Delta Mag \times 100 - IdentityProperties[i].iDifMag| \leq \epsilon_b \times 100 \end{cases} \quad (2)$$

3.2 三角形识别过程

本文采用的改进三角形识别算法,与单纯使用星对识别的算法比较,利用三角形模式各边之间的相关约束,可以删除一大批误匹配;与多边形识别比较^[6],原理和实现要简单得多,而且对视场中成像的星数量要求少,计算量小。

如图 1 所示,先将观测星按星等由亮到暗排序,再依次取三颗亮星 1#、2#、3#,构造观测星三角形,三角形三边分别为 a 、 b 、 c ,具体识别过程如下:

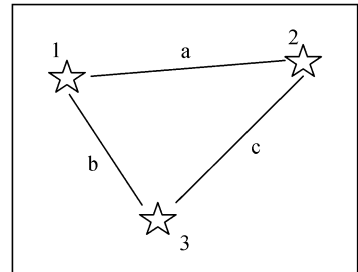


图 1 观测三角形构造示意图

Fig. 1 Star triangle from star image

(1) 构造一个宽度为 3 的 2 维数组 A 记录候选导航星对,按式(2)在导航特征库中搜索满足三角形三边星对角距和相对星等差判决门限的导航星对,记录到数组 A 中,其记录格式如图 2 所示。同时,构造一个长度为 n 宽度为 3 的导航星计数数组 B , n 为导航星数量,对数组 A 中每个三角形顶点的候选导航星出现次数进行计数;

(2) 遍历数组 A 第一列,即取出 1# 星的候选导航星星号,在数组 B 中查看其作为 1# 候选导航星出现的次数。根据三角形三边的相关性,

观测星	1#	2#	3#
候选导航星对	56	88	} a
	88	56	
	57	89	
	89	57	
	58	90	
	90	58	
	56	101	} b
	101	56	
	58	102	
	102	58	
	41	103	
	103	41	
	78	101	} c
	101	78	
	88	101	
101	88		
90	30		
30	90		

图 2 候选导航星记录数组
Fig. 2 Candidate star matrix

三条边是两两相交的,而交点则是恒星星点,也就是导航星应出现 2 次或 2 次以上,所以出现次数少于 2 的候选导航星及由这颗星组成的星对将作为整体被剔除,候选导航星相应的计数值减 1。如图 3 所示剔除动作①~⑧;

观测星	1#	2#	3#
候选导航星对	56	88	} a
	① 88	56	
	② 57	89	
	③ 89	57	
	⑤ 58	90	
	④ 90	58	
	56	101	} b
	⑤ 101	56	
	⑪ 58	102	
	⑥ 102	58	
	⑦ 41	103	
	⑧ 103	41	
	⑨ 78	101	} c
	⑫ 101	78	
	88	101	
⑬ 101	88		
⑭ 90	30		
⑩ 30	90		

图 3 剔除星对过程
Fig. 3 Reduction of candidate star matrix

(3)重复过程 2,如图 3 所示,遍历数组 A 中 2#、3# 观测星的候选导航星,依次执行剔除动作⑨~⑩和⑪~⑭;

(4)一些候选导航星,如图 3 中 1# 观测星的候选导航星 58,在执行剔除动作之前,出现次数

是 2,经过一次遍历剔除后,其次数为 1,为减小后续工作量,执行 2 遍星对剔除,即再次执行过程(2)、(3),如图 3 中剔除动作⑮;

(5)依据三角形三边相关性,将数组 A 余下的候选导航星组成三角形,如图 3 所示,由(56, 88,101)组成的三角形为观测三角形 $\triangle 123$ 的导航三角形。

4 试验结果与分析

试验中基本星表选择耶鲁亮星星表(Bright Star Catalog),依据星敏器探测能力,提取星等小于 5 Mv 为导航星,其中,根据星敏器成像系统参数(见表 1)^[7],剔除星对角距小于像元分辨率的双星以及位置、星等不确定的变星,最终得到 1 608 颗导航星,导航星数据库存储容量为 0.4 MB。

试验环境为:P4 1.8 GHz CPU,256 M 内存,Windows XP 操作系统。试验中所采用的星敏器理想模型参数和误差模型参数见表 1,当星点位置误差为 60",星等误差为 0.25 等,星等及位置误差均假设为服从正态分布的随机变量,全天球范围内随机产生 1 000 个视轴指向,并用本文所述算法对生成的星图进行识别,平均识别时间为 0.34 ms,当出现冗余匹配时,在三角形之外加入一颗亮星,对再次形成的 3 个三角形进行识别,识别成功率为 99.1%。其中,有 6 个视场观测星不满足全天识别条件,3 个视场在取第四颗星识别后仍无法完全剔除冗余。

在地面拍星试验中,该算法也获得较好的效果,图 4 所示为星敏器地面拍摄到的真实星空图像,图 5 所示为本算法识别结果。

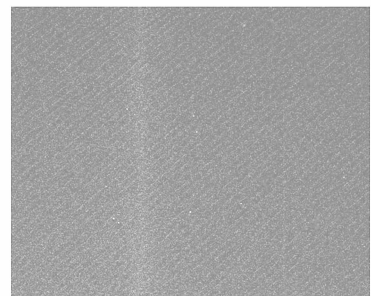


图 4 星空图像
Fig. 4 Star image

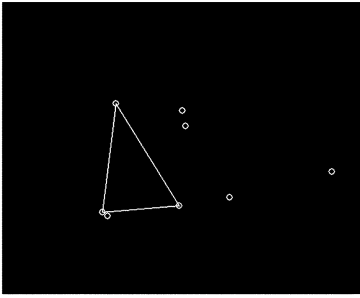


图 5 三角形识别结果

Fig. 5 Result of triangle identification

表 1 星敏传感器模型参数

Tab. 1 Parameters of star sensor model

参数	参数值
视场	$15^{\circ} \times 15^{\circ}$
像元数	1 000 pixel \times 1 000 pixel
位置不确定度	1'
角距误差门限	3'
星等误差门限	0.75

本文算法与传统三角形识别方法相比,缩减了数据库的遍历区间,得到毫秒级的全天识别时

参考文献:

- [1] PADGETT C, KREUTZ-DELGADO K, UDOMKESMALEE S. Evaluation of star identification techniques[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 1997, 20(2): 259-267.
- [2] SILANI E, LOVERA M. Star identification algorithm: novel approach & comparison study [J]. *Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(4): 1 275-1 288.
- [3] 郑万波. 基于星敏传感器的全天自主分层星识别算法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
ZHENG W B. *Fully autonomous layered star identification algorithm research based-on star sensor* [D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences, ChangChun Institute of Optics, fine Mechanics and Physics, 2004. (in Chinese)
- [4] 严蔚敏, 吴伟民. 数据结构(C语言版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

间,通过增加识别特征维数,降低了三角形的冗余识别;与文献[3]相比,由于导航星库不完备,全天识别成功率稍低,但导航星库的容量是最大的优势,只占其 1/6 的存储空间;与文献[6]采用的凸多边形法相比,本文算法原理简单,对视场中出现的恒星数目要求较低,在视场中出现伪目标时可以通过识别由其它星目标构建的三角形保证识别成功率。

5 结 论

随着半导体技术和微电子技术的不断发展,采用大视场、短焦距的第二代星敏传感器将进一步向轻小型方向发展,其星库容量更小,自主导航能力更强。本文以第二代星敏传感器为依托,立足于工程实践,通过精简导航星库的存储结构大大降低了算法对系统存储单元的要求;通过改进三角形识别过程中的查找、记录、剔除方式,提高了识别成功率,缩短了识别时间。试验结果显示,该算法在具有较高位置和星等噪声的情况下仍具有较高的识别成功率。

YAN W M, WU W M. *Data Structure (C Language Version)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)

- [5] SHORTIS M R, CLARKE T A, SHORT T. A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images[J]. *SPIE*, 1994, 2350: 239-250.
- [6] 刘朝山, 刘光斌. 星光制导中的凸多边形星图识别算法[J]. *光学 精密工程*, 2005, 13(1): 88-94.
LIU CH SH, LIU G B. Convex polygon star pattern identification algorithm for celestial guidance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 88-94. (in Chinese)
- [7] 巩岩, 胡宜宁, 赵阳. 基于数字光处理技术的小型星模拟器设计[J]. *光学 精密工程*, 2007, 15(11): 1698-1703.
GONG Y, HU Y N, ZHAO Y. Design of a mini star simulator based on digital optical processing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1698-1703. (in Chinese)

作者简介:



张 磊(1982—),男,吉林松原人,博士研究生,主要从事数字图像处理、网络控制等方面的研究。E-mail: zlxrl@tom.com



郭敬明(1985—)湖北省荆州人,研究实习生,主要从事模式识别等方面的研究。E-mail:gjm441@163.com

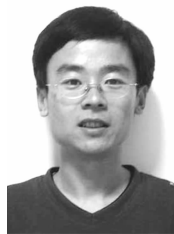


魏仲慧(1961—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、图像存储等方面的研究。E-mail:wzhlyp@sohu.com

通讯作者:



何 昕(1966—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事图像处理、光电测量等方面的研究。E-mail:hexin6627@sohu.com



刘岩俊(1978—)男,吉林长春人,副研究员,主要从事光电测量设备、数字图像处理等方面的研究。E-mail:liuyan-jun@ciomp.ac.cn

●下期预告

管线钢管 JCO 精确弯曲成形技术

李 建,赵 军,马 瑞

(燕山大学 机械工程学院,河北 秦皇岛 066004)

为了减小管线钢管 JCO 成形工艺中成形管坯的椭圆度,基于塑性弯曲工程理论和机器视觉测量技术,提出了管线钢管 JCO 精确弯曲成形工艺。在管坯首道次成形过程中,采用两次预弯法,识别出板材的弹复规律,结合管坯目标成形角,预测出精确的压制行程,在后续成形道次中利用误差补偿技术循环补偿上一道次的成形误差,实现管坯每道次精确弯曲成形。确定了适合管坯端面的图像处理算法、图像处理流程和直线检测算法,提出了采用正三角形作为标定模板求解摄像机外部参数的标定方法,由单幅图片快速、高精度地标定出摄像机的外部参数,建立了将图像角转换为管坯真实成形角的数学模型。实验结果表明,管坯成形角监测误差在 0.2° 以内,可控制成形管坯的椭圆度在 1.5% 以内。显著地减小了成形管坯的椭圆度,改变了成形管坯的椭圆度控制依赖于操作者经验的现状。