

文章编号: 1000 6893(2007) 04 0897 04

P 向量实现快速星图识别的方法

杨 建, 张广军, 江 洁

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

Fast Star Identification Algorithm Using P Vector

YANG Jian, ZHANG Guang-jun, JIANG Jie

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 提出了一种快速的星图识别方法。该方法识别时提取出描述观测三角形的一维特征量 P , 根据该值快速检索到对应的导航三角形, 减少了计算过程。由于获得星点位置的时候存在误差, 所以将一定误差范围内的三角形均作为待选三角形考虑。上述识别后引入了验证识别环节, 保证识别的准确性。随机实验统计表明, 同等星点位置噪声方差下, 该方法和栅格算法相比识别率提高约 1%, 识别时间约为后者的 1/5。

关键词: 天文仪器; 星敏感器; 快速星图识别; P 向量; 星三角形; 主成分分析

中图分类号: V321.1; P111 文献标识码: A

Abstract This article proposed one kind of fast celestial chart recognition method. This method extracts the one dimensional feature P which marks the triangle uniquely. Computation of P value from the observed star map speeds up the get of the correspondence navigational triangle. This method reduces the computation process. Because of the star position error, more triangles within some scope should be selected. Then verification process is introduced to confirm the identification results. The stochastic experiment indicates that the identification rate of this method can be enhanced approximately 1% as compared to that of the grid algorithm at the same position noise level. The identification time of proposed algorithm reduces to 1/5.

Key words: astronomical instrument; star sensor; fast star identification; P vector; star triangle; principle component analysis

星敏感器根据某时刻星图分布的情况, 可以计算出此时飞行器的姿态, 在现代航天领域受到广泛的应用。星敏感器硬件的速度和算法的优劣很大程度上影响了姿态更新的频率。星图识别是星敏感器算法的重要组成部分。大多数现有的星图识别算法依赖星对角距实现匹配, 存储的单元为星对角距, 有的算法直接存储三角形。直接处理三角形的算法有以下几种: Liebe^[1] 将三角形的两条边长和这两边的夹角存储起来, 同时考虑到星等噪声和位置噪声存在的情况, 存储了冗余的三角形; Accardo^[2] 分析了星敏感器光学器件的成像特性, 从标准星表中提取出了可能在视场中出现的恒星, 提出了与星等无关的三角形算法; Lamy^[3] 使用三角形的两条边的夹角作为参数, 将三角形分类, 从而实现快速检索三角形; 华中科技大学的郑胜提出了用一个特征量来部分描述星三

角形的结构的方法^[4]。本文提到的 P 向量 (projection vector) 将三角形的三条边整合成一个参数 P , P 值充分利用了 3 条边, 反映了三角形特征, 使得 P 值和三角形一一对应, 从而实现快速的星图识别。

三角形算法普遍存在的问题, 是导航星构成的三角形数目巨大, 造成存储和检索上的困难。减少三角形数目一般可以通过以下几个途径实现: ①限定导航星的数量, 减少星表容量; ②只挑选一部分有特征的三角形存储; ③组织优化好三角形的存储结构。但是这些方法都需要和观测三角形比较三次角距, 不能从根本上解决比较次数太多的问题。本文提出的基于 P 向量的方法, 选择每颗星的特征三角形作为研究对象, 计算其特征值, 通过该特征值快速找到与之匹配的导航三角形。

1 特征提取与存储

1.1 特征三角形的选取

特征三角形由导航星和周围最亮的两颗星构

收稿日期: 2006 06 15; 修订日期: 2007 01 20

基金项目: 航空科学基金(02151019, 03151004); 武器装备预研基金(51420050203HK01)

通讯作者: 杨 建 E-mail: yangjian@buaa.edu.cn

成。每颗导航星都有惟一的特征三角形,该导航星称为主星,构成特征三角形的邻星在如下范围内选择:为了保证特征三角形出现在视场中,识别时应该优先选择处于视场中心的星作为主星,因此主星和邻星的距离必须小于视场半径;星敏感器运动的时候,恒星成像发生拖影,两颗距离很近的星会连接到一起,为了避免主星和邻星发生连接,二者距离必须大于某一阈值 σ 。该三角形为天球上的球面三角形,因此边长为两颗星之间的角距。和主星相连的两条边中,如果从短边旋转到长边为逆时针方向,那么 θ 定义为正,否则 θ 为负。构造的特征三角形如图1所示。

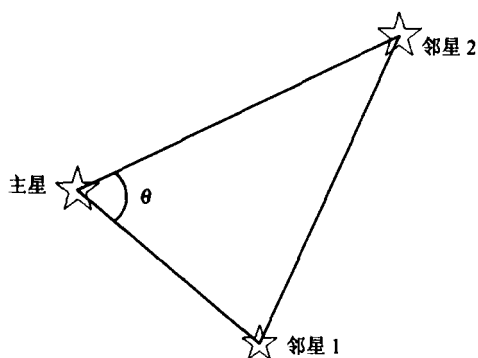


图1 构造特征三角形

Fig. 1 Constitution of feature triangle

根据上述规定构造的特征三角形,其3条边构成一个三维向量。 θ 为正时,该向量的3个坐标均取正值,否则取负值。如图1,主星和邻星1的距离为 3.654° ,和邻星2的距离为 5.864° ,邻星1和邻星2之间的距离为 7.012° 。主星到邻星1的距离小于主星到邻星2的距离,且旋转方向为逆时针,因此 θ 为正,并且和该特征三角形对应的三维向量为 $[3.654 \ 5.864 \ 7.012]^\top$ 。

1.2 求解最优投影主轴

为了快速地查找到特征三角形,需要将数据按照一定规律组织起来。三维向量可以看做三维空间中的一个点,所有特征三角形构成的向量形成一个点集。将这些点投影到一条直线上,如果投影点位置分散,没有重叠在一起,那么就可以根据投影点找到唯一的特征三角形。求解最优投影主轴用到了主成分分析的方法^[5],这种方法可以使数据降维,投影后的点有最佳的综合能力,并且投影点之间的相似性改变最小,也就是说可以通过观察投影点的相对位置来判断原始点的相互关系。

假设投影直线的方向为 $\Omega = [\omega_1 \ \omega_2 \ \omega_3]^\top$,

原始点的坐标为 $X_i = [x_i \ y_i \ z_i]^\top$,投影点的坐标为 $P_i = \Omega^\top X_i$ 。

那么投影点 P_i 的均值和方差分别为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Omega^\top X_i \quad (1)$$

$$D(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - P)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Omega^\top X_i)^2 - c \quad (2)$$

式中: N 为投影点数量; c 为常数。如果在某个方向的直线上,投影点能够分开的最好,也就是 P_i 的方差最大,那么该直线称为最优投影主轴。最优投影主轴的关键参数是直线方向,因此可以加上约束条件 $\Omega^\top \Omega = 1$ 使问题简化而不影响结果。

那么,求解最优投影主轴方向就转化为

$$\left. \begin{aligned} \max(D(P)) &= \max(\Omega^\top Z \Omega) \\ \Omega^\top \Omega &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: Z 为对称矩阵, $Z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i X_i^\top$ 。

求解最优投影主轴方向可以通过求二次型极大值实现,该方向就是矩阵 Z 最大特征根对应的特征向量。求解式(3)所得直线和点集的位置关系,如图2所示。检验 P 值的数据,并没有出现完全相同的值。即使部分投影点在最优投影主轴上距离很近,在识别过程中也都会作为待选值加以考虑,不会影响识别结果。

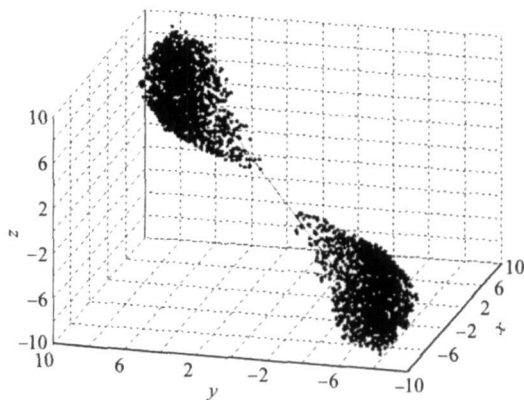


图2 三角形最优投影主轴示意图

Fig. 2 Optional projection of triangle on principle axes

1.3 导航数据库的构造

导航数据库中除了提取出来的导航星表数据之外,还有描述恒星模式特征的数据库。导航星表包含了恒星的星等、赤经、赤纬等信息,这些数据是星图识别和姿态计算的基础。

为了便于识别,还要将导航星的特征信息预先提取并且保存。该方法的导航数据库包括特征三角形库和 P 值向量表。特征三角形库存储了三角形的基本信息——顶点和边长; P 值向量表存储了每个三角形的 P 值以及三角形的序号,并且将 P 值按照由小到大的顺序排序。导航数据库划分成两部分进行管理,是为了存储和检索方便。

(1) P 值向量表的结构

P 为由特征三角形计算所得 P 值, index 为该三角形的索引号。 P 向量表的结构如图 3 中左边表格所示。此外,最优投影主轴的方向也存储在该库中。

(2) 特征三角形库

特征三角形库存储了三角形顶点和边长的结构,其中的数据按照导航星 i 的索引排列。

i 为主星在导航星表中的索引号; j 为距离主星较近的邻星的索引号; k 为距离主星较远的邻星的索引号; short_edge 为主星 i 和邻星 j 之间的角距; long_edge 为主星 i 和邻星 k 之间的角距; third_edge 为邻星 j 和邻星 k 之间的角距。该库的结构如图 3 右边表格所示。

(3) 二者的映射关系

P 值向量表和特征三角形库的映射关系如图 3 所示。

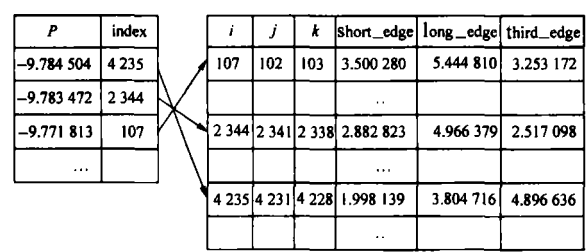


图 3 P 值向量表和特征三角形库的映射关系

Fig 3 Mapping relationship between P vector table and feature triangle database

2 匹配识别

识别时,首先构造出观测星的特征三角形,然后计算该特征三角形的 P 值,根据 P 值快速检索到与之对应的导航三角形。识别出一个三角形就意味着得到了 3 颗星的方位信息,选择其中两颗计算出该时刻星敏感器的粗略姿态,进而根据星敏感器成像模型可以计算获得仿真星图。对比观测星图和仿真星图的相似度,判断识别成功与否。

2.1 初始匹配

获得一幅观测星图后,首先判断是否有 3 颗

或者 3 颗以上的观测星存在,如果小于 3 颗则不能识别。如果有足够的星,就要选择主星,并将观测星按照亮度和距离约束条件构造特征三角形。靠近边缘的观测星,其特征三角形中的邻星可能没有出现在视场中,所以应该优先选择靠近视场中心的观测星作为主星。将该主星周围的邻星按照亮度排序,分别计算与主星间的角距。按照距离约束找到其中两颗作为邻星,这两颗邻星和主星一起构成主星的特征三角形。根据角距可以得到描述其特征的三维向量 $X=[x_1\ y_1\ z_1]$,读取 P 值向量表存储的投影轴矢量,计算该向量在最优投影主轴上的投影,即 P 值的大小,并且判断短边到长边的旋转方向,确定 P 值的符号。由于各种噪声的影响,投影点的位置会发生偏离,因此需要将满足误差范围($P-\epsilon$, $P+\epsilon$)内所有 P 值对应的三角形都作为待选三角形进一步比对。然后分别比较观测三角形和待选导航特征三角形的 3 边。如果与之匹配的导航三角形唯一,那么二者的顶点一一对应。

2.2 验证过程

上述初始匹配过程只能识别出 3 颗观测星,为了增加识别结果的可靠性及识别更多的观测星便于姿态计算,需要比对周围天区其他恒星的分布情况,因此引入了验证过程。验证过程首先根据两颗星计算出星敏感器的粗略姿态^[6],然后生成参考星图,与观测星图进行比对,如果二者一致,那么识别成功;如果经过验证过程,没有满足条件的导航三角形存在,需要确定另外一颗主星,重新构造特征三角形进行匹配。

3 试验结果和讨论

试验中采用的数据库来自 SAO 星表,选择 6 等以上的恒星构成导航数据库,共有 5 103 颗。视场大小为 $19^{\circ}\times 19^{\circ}$,镜头焦距为 44.05 mm。像元尺寸为 0.015 mm,像素为 $1\ 024\times 1\ 024$ 。仿真过程在 Pentium4 2.0 的计算机上实现。

3.1 位置噪声对识别率的影响

星敏感器的光学器件畸变,CMOS 成像时的误差以及星点定位时的计算误差,造成图像平面上的星点位置和通过共线方程计算的结果不一致。为了模拟真实星图的成像情况,常常需要在数字仿真星图上加上高斯噪声,模拟实际星图。对位置噪声的抗干扰能力是星图识别算法的一项

重要指标。在试验中,星点加上了不同方差的噪声,对比同等条件下和其他算法识别结果的差异。此外为了准确地评价算法识别性能,每种噪声水平下,采用蒙特卡罗法从全天球随机抽取 1 000 幅星图识别,统计识别结果。图 4 所示为位置噪声方差从 0 个像素到 2 个像素时识别率的变化曲线,可以看到该算法有较强的抗位置噪声能力。

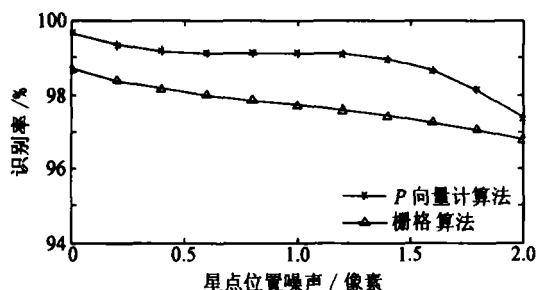


图 4 位置噪声对识别率的影响

Fig. 4 Identification rate against position noise

3.2 其他性能比较

星图识别所需的空间和时间是两个重要的指标。为了减少对硬件的要求,需要尽量减少数据存储存储空间。特征三角形库需要 218 kBytes, P 值向量表需要 89 kBytes, 存储导航星的导航星表为 179 kBytes, 将导航星划分成子块的库为 57 kBytes, 共计 543 kBytes; 栅格算法所需的存储空间为 570 kBytes。本算法平均识别时间为 2 064 ms, 栅格算法平均识别时间为 10.5 ms。从存储空间和识别时间上来看,使用 P 向量的三角形识别算法较有优势。

4 结 论

针对实际应用情况,提出了一种快速的星图识别方法。这种方法将描述三角形的三维数据投影到一维直线上,通过对一维数据的检索达到匹配目的,考虑到部分数据投影后,相互距离很近甚至重合,因此将一定门限范围内的所有三角形作为待选三角形考虑。实验表明,该方法计算量小,识别速度快,可以很大程度上提高星敏感器的工作频率;而且占用存储空间少,抗干扰能力强。

参 考 文 献

- [1] Liebe C C. Star trackers for attitude determination[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems, 1995, 10(6): 10 16.
- [2] Accardo D, Rufino G. Brightness independent start up routine for star tracker[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(3): 813 823.
- [3] Lamy R G, Bostel J, Mazari B. Star recognition algorithm for APS star tracker: oriented triangles[J]. Aerospace and Electronic Systems Magazine, IEEE, 2005, 20(2): 27 31.
- [4] 郑胜, 吴伟仁, 田金文, 等. 一种新的全天自主几何结构星图识别算法[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 4 7.
Zheng S, Wu W R, Tian J W, et al. A novel all sky autonomous triangle based star map recognition algorithm[J]. Opto electronic Engineering, 2004, 31(3): 4 7. (in Chinese)
- [5] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 94 116.
Wang H W. Partial least squares regression method and application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999: 94 116. (in Chinese)
- [6] 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 X G, Zhang G J, Jiang J. Full sky autonomous star identification algorithm using radial and cyclic features[J]. Opto electronic Engineering, 2004, 31(8): 4 7. (in Chinese)

作者简介:



杨 建(1980 -) 男, 博士研究生。主要研究方向: 机器视觉与模式识别。
E mail: yangjian@buaa.edu.cn

张广军(1965 -) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 激光精密测试、机器视觉、光学传感与人工智能。

E mail: gjzhang@buaa.edu.cn

江 洁(1973 -) 女, 副教授。主要研究方向: 光电信息处理和光电导航。

E mail: jiangjie@buaa.edu.cn

(责任编辑: 鲍亚平)