基于 Delaunay 三角剖分的全天自主星图识别算法

房建成 全 伟 孟小红

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083) (中国地质大学 地球物理与信息技术学院, 北京 100083)

摘 要: 在地球物理建模中, Delaunay 三角剖分因其对给定点集进行三角剖分具有剖分结果唯一性这一重要特点而得到广泛应用. 采用 Delaunay 剖分这一性质, 首次将 Delaunay 剖分算法应用到星图识别中. 利用全天球星图的剖分不变性, 采用有界曲面剖分的边界递归法, 生成有序且容量小的完备导航星库; 利用二维 Delaunay 三角剖分对视场内恒星星图进行剖分, 将其结果进行快速匹配识别. 仿真实验结果表明与现有的星图识别算法相比, 此算法具有高的识别率, 良好的实时性和鲁棒性, 且所需导航星库的容量小, 检索速度快.

关 键 词: Delaunay 三角剖分; 星图识别; 导航星库

中图分类号: V 448.2; TP 273

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965 (2005) 03-0311-05

All-sky autonomous star map identification algorithm based on Delaunay triangulation cutting algorithm

Fang Jiancheng

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

Quan Wei Meng Xiaohong

(School of Physical Geography and Information Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In the field of geophysical model building, Delaunay triangulation cutting algorithm has been widely used because of having a very important characteristic which is the result of this triangulation cutting method being unique in a specifically set of points. This character was adopted, the algorithm to identify star map for the first time was used. Making use of the invariability of cutting in all-sky star atlas and adopting the boundary recursive method for constrained triangulation of surfaces, the guidance stars database which was arranged under specific rules and whose size was comparatively small was constructed; the recognition algorithm utilized the result generated by Delaunay cutting star map in a specified field of view to match and identify quickly. The simulation results show that compared with the current star map identification algorithms, this algorithm has a high rate of discrimination, the advantages of real-time properties and robust; and it only needs a small content database and searches more rapidly.

Key words: Delaunay triangulation; star map identification; database of guide star

自主天文导航是指不依赖地面设施, 通过星敏感器获得空间恒星信息, 自主完成航天器定位导航任务, 其关键因素是对航天器飞行姿态的精确测量. 目前, 新一代 CMOS (Complementary Metal Oxide Semicomductor) 星敏感器作为飞行器姿态测量敏感器因其指向精度高, 无姿态累积误差, 快速的故障恢复能力和智能化而受到人们青睐. 它可为航天器提供精确到几个角度的飞行姿态, 而无需任何先验知识. 自主星图匹配识别算法作为它的核心, 不但要能实现姿态的快速获取,

收稿日期: 2003-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60174031); 民用航天预研资助项目; 国家 863 计划资助项目 (2002AA713031)

作者简介: 房建成 (1965 -), 男, 山东临沂人, 教授, qw-quanwei @sina. com.

当由于某种原因造成姿态丢失时，而且还能实现快速重建. 因此，识别速度和识别成功率就成为衡量识别算法性能好坏的关键指标. 在星图匹配识别方面，目前较流行的算法有三角形匹配算法[1]，多边形角距匹配算法[2]，Bezooijen 提出的主星识别法[3]等，它们都达到了较为良好的效果，但它们在天空覆盖、数据库大小、噪声稳定、速度上各有优劣，而且当测量误差较大时，余度匹配和误匹配将会导致识别成功率的显著下降. 虽然也有不少改进的算法，但都会受到特征维数的限制，而且对测量比较敏感. 本文从另一角度来考虑星图识别，首次提出利用地球物理建模中广泛使用的 Delaunay 剖分算法进行星图匹配识别，利用全天体星图的剖分不变性，采用对观测区域的剖分结果，进行局部匹配，从而达到识别的目的. 本算法具有高的识别率，良好的实时性和鲁棒性，且所需导航星库的容量小，检索速度快.

1 Delaunay 剖分算法

1.1 Delaunay 三角形概念

Delaunay 证明：对于平面上任意给定的点集，存在一种唯一的三角化，满足所有的三角形的最小内角和最大的条件. 目前应用最广泛的是 Delaunay 三角形化方法[4].

Delaunay 三角形的定义从 Dirichlet 多边形说起. 在每个网格点附近画出一个邻域，邻域内的任一个点到该网格点的距离小于到其它网格点的距离. 这个邻域多边形称为 Dirichlet 多边形（图 1）. 将每个多边形内的格点与相邻的多边形的网格点连接起来，构成的三角形，称为 Delaunay 三角形（图 2）. 它具有尽可能的避免形成过瘦三角形的性质.

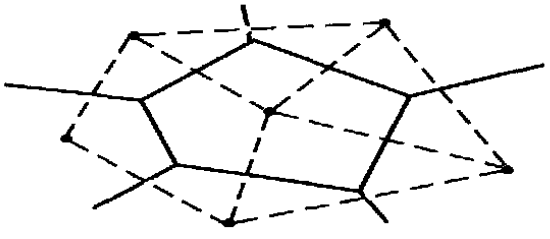

图 1 Dirichlet 多边形

1.2 Delaunay 三角形剖分算法

目前 Delaunay 剖分较好的算法是：Lawson 和 Bowyer 提出的步进插入法，它计算效率高，平均计算时间快，其时间复杂度为 $O(5n/4)$.

算法的实现是通过不断增加网格点迭代计算的，其步骤如下：

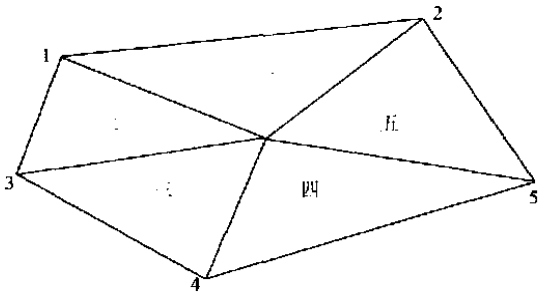

图 2 由图 1 构成的 Delaunay 三角形

1) 判断新加入的网格点与三角形外接圆的内外关系，如果在某个三角形外接圆内，则这个三角形需要改造；

2) 将需要改造的三角形集中起来，把它们的相邻边去掉，构成一个凸的多边形；

3) 找到这个多边形的外边界，并利用它们的相邻关系把它们连接起来构成一个头尾相接的环；

4) 将环上的每 2 个相邻的网格点取出，与待加入的网格点构造三角形，计算其外心，并将相邻三角形的信息建立起来，将三角形网格点和相邻三角形信息储存在只包含这些三角形的 Delaunay 剖分的数据结构数组中；

5) 将上述新加入的三角形数据结构数组替换三角形数据结构数组中需要改造的三角形，并对三角形重新编号，从而得到新的结构数组.

依照上面 1) ～5) 步，直至将所有点集中的点都加完.

1.3 结点删除算法

在对一特定点集进行 Delaunay 剖分后，有可能存在点集中的结点是伪结点的情况，设 V 是一个伪结点，需要找到所有与 V 相连的三角形，将其中与待删除点相连的边去掉，其外边构成一个环，下面步骤将在构成这个环的数据结构中进行：

1) 如果环中仅剩 3 个顶点，就到 4)，否则从中任选 3 个相互相邻的结点 V_1，V_2，V_3；

2) 如待删除点在该三角形内，则到步骤 3)，否则到步骤 1)，选取新的 3 个点；

3) 除掉 V 和 V_2 连线，将 V_1 和 V_3 连上，返回到 1)；

4) 当仅剩下 3 个顶点连接到待删除点时，删除掉与待删点相连的边，从中得到最后一个三角形.

局部修改完成后，将其代入总的数据结构中，更新原有的信息，从而完成消除一个点的任

务，为去除伪星算法提供了理论基础.

2　导航星库的构造

2.1　导航星座数据库

导航星库是飞行器中星跟踪器或星敏感器进行恒星匹配识别的唯一依据. 它一般装载于飞行器上的存储器中，其数据来源于基本星表，包含一定数量的恒星星等、星号、某历元坐标等基本信息以及用于星图识别的信息.

导航星库的构造同识别算法紧密结合，星图识别的速度和成功率在很大程度上取决于导航星库的容量及其存储和读取方式. 选取的导航星集合确定 (如按文献 [5] 中所采用的导航星选取方法)，即用于 Delaunay 剖分算法的初始点集已确定，对此点集进行剖分，有唯一的剖分结果 (图 2). 但此点集具有特殊性，如将全天体看成一个完备空间，则所有点不均匀的散布在其中，形成一点集天球，而非一平面，因而在形成导航星库时，不能单纯用二维的 Delaunay 剖分，须采用文献 [6] 中边界递归法来完成.

2.2　针对剖分算法导航星库的构造

针对 Delaunay 剖分算法，导航星座数据库的构造步骤如下:

1) 对点集 M 中的每一点求其位置矢量[7]: 设恒星 (图 3) 在地心天球坐标系中的坐标为 (赤经 α, 赤纬 β)，则其在地心天球坐标系中的位置矢量 V 可以由下式得到:

$$\mathrm{V}=\begin{bmatrix}x\\y\\z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\beta\\\sin\alpha\cos\beta\\\sin\beta\end{bmatrix}$$

其中，$x^2+y^2+z^2=1$.

2) 经过 1) 处理，完备空间中的所有点都变换到单位球面上，即闭合曲面 f. 这时采用曲面剖分的边界递归法，即: 在给定曲面 f 上不共线的 3 点 P_1, P_2, P_3，定义球面 S: $(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2+(z_i-z_0)^2=r^2$, $i=1,2,3$，其中 (x_0, y_0, z_0) 满足 $z_0=f(x_0, y_0)$，该球是点 P_i ($i=1,2,3$) 的外接曲面球，用 S 去切割曲面 f 得出内外两部分 f_1, f_2 及交线 C, C 是 3 点曲面外接球上的曲线，称为外接曲面拟圆. 如果此外接曲面拟圆区域内部没有内环，且不包含点集 M 中的任意点，则称由 P_1, P_2, P_3 这 3 点所构成的三角形是局部最优三角形.

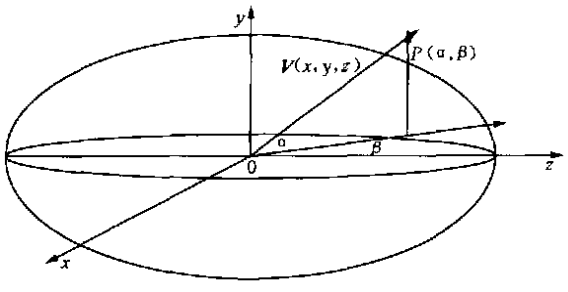

图 3　惯性坐标系与位置矢量 V 的示意图

3) 经过 2) 的处理，即可完成整个点集 M 的曲面剖分，形成球状的三角形剖分网. 将剖分结果按照三角形的特征信息 (取 3 个顶点之间的角距，顶点星等等信息) 进行排序，存储到导航星库中的识别信息库子库中，同时将相应三角形的 3 个顶点信息 (即导航星的信息: 星等、星号、星名等) 存储到另一基本信息子库中. 这样就完成了针对剖分算法的导航星库的构造. 用这种方法形成的导航星库，不但容量小，而且由于是按一定规则排序的，则检索的速度快.

3　基于 Delaunay 剖分的星图识别

3.1　Delaunay 剖分识别算法的条件

导航星库存储的是整个导航星集合的 Delaunay 剖分结果信息. 在星图识别过程中，此算法要求星敏感器所能识别的最高星等同导航星库中的最高星等相等，并且要保证视场内至少有 3 颗导航星.

3.2　Delaunay 剖分识别算法原理

采用 Delaunay 剖分算法，针对一点集，从中选取 5 个点进行剖分如图 4，逐渐增加到 10 个点，并逐次对其进行剖分，图 4 是这一过程剖分结果的变化图.

由图 4 可看出从图 4b 到图 4c 的变化: 一是增加了新点 P，其次是 A 所代表三角形，在图 4c 中还有，而 B 所代表的三角形，在图 4b 中有，在图 4c 中已没有了，原因是新增加的点 P 落在 A 所代表三角形的外接圆外，而落在了 B 所代表三角形的外接圆内，所以根据 Delaunay 剖分性质，需要对其进行修改，使之符合 Delaunay 剖分特性，因而由图 4b 经新加点后就重新剖分成了图 4c 的形式.

从图 4 可得出结论: 针对某一剖分三角形，只要新加入点没有落在它的外接圆以内，则对新加入点后的点集进行重新剖分，其剖分后产生的三角形集合中一定包含此剖分三角形.

由此可进一步推导出: 假设对一特定图像 P_0 区域是某一图像 Q_0 的子图，P_0 包含 m 个光

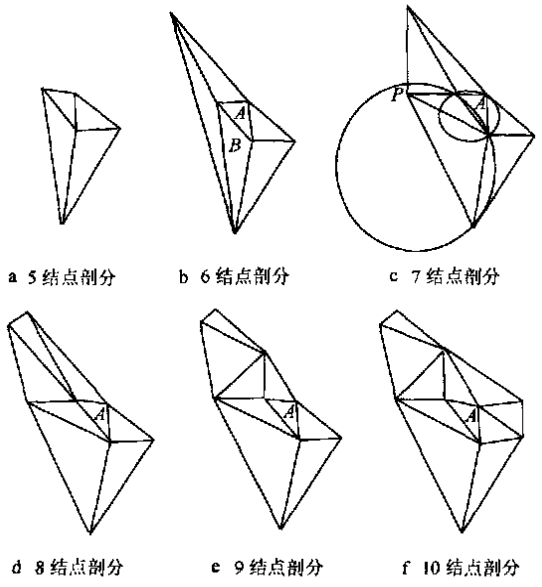

图 4 从 5 个逐一增到 10 个结点的剖分结果变化图

点，对这 m 个光点进行剖分，形成剖分三角形集合 M，Q_0 包含 n 个光点，对这 n 个光点进行剖分，形成剖分三角形集合 N，即：$P_0 \subseteq Q_0$，$m \subseteq n$，$m \in P_0$，$n \in Q_0$. 从 M 集合中取一个三角形 A_0（$A_0 \in M$），其三角形的外接圆记为 R_0，如果 $R_0 \subseteq P_0$，则 $A_0 \in N$.

3.3 Delaunay 剖分识别算法

将 Delaunay 剖分算法运用到星图的匹配识别中，主要是由于星图图像有一个重要的特性，即在星敏感器识别的最高星等和导航星库的最高星等相等的前提下，每一幅星图图像 IMG 一定是一个由所有导航星所形成的整个全天星图 IMAGE（设其含有 R 个恒星光点的点集）的子图像，图像一旦确定则其所包含的区域就确定了. 由上面的结论可知，如果 IMG 中包含有 Q（$Q \leq R$）个恒星光点的点集，对其进行 Delaunay 三角形剖分，形成的剖分结果，如果能够确定至少有一个三角形（如图 4b 内的 A 所代表的三角形），其形成的外接圆内没有其它的导航星，也即此外接圆区域包含在 IMG 中，这时可以肯定，在其父图像中由 R 个点所形成的剖分结果中一定包含此三角形（如图 4c～图 4f 都含有 A 所代表的三角形）.

因而，在一定的门限内，此三角形的特征信息在上面所形成的导航星库内必定有一条记录与其对应，如有多条记录与其对应，应适当调整门限并匹配三角形的其它信息. 如果一条记录都没有，这时也可以适当的放宽门限，但当达到可允许的最大门限时如果仍然没有相对应的记录，则认为有伪星存在，这时应选择其它的三角形（要求在其形成的外接圆内没有其它的导航星）再进行匹配识别，此时如果已没有其它三角形可以选，应在点集 Q 中临时减去一点 S_0（从边界点开始），重新剖分，再进行比较识别，如还没有匹配成功，则加上点 S_0 再临时减去 S_1，……，S_Q，临时减去 2 个点……，直到匹配成功，如果各种情况都执行完，仍没有匹配成功，则此次匹配失败.

根据上面所说，如果 IMG 中包含恒星光点个数 Q 小于 3，显然经 Delaunay 剖分处理后是形不成三角形的，因而就实现不了匹配识别. 所以此算法的前提条件是，在所形成的星图内至少要保证有 3 颗导航星存在. 根据文献 [8] 中指出，如果识别的最高星等取七等星，在 8°×8°的视场内，由表 1 显示，则可保证视场内至少有 4 颗导航星，因而可完全满足剖分条件.

表 1 在 8°×8°的视场范围内不同星等区域下的统计情况

星等（≥）	视场内恒星均值	视场内最少星数	视场内最多星数	选取导航星数
6.5	13.96	1	52	8971
6.6	15.61	1	59	10033
6.7	17.41	2	65	11194
6.8	19.57	3	68	12579
6.9	21.89	3	75	14090
7.0	24.58	4	85	15823
7.1	27.22	6	93	17508

4 实验结果与分析

本文用 Monte Carlo 方法随机产生一满足要求的模拟圆形视场，其视场大小 $FOV_x \times FOV_y$ 为 8°×8°，CCD 面阵 $n \times n$ 为 512×512，CCD 透镜焦距 f 为 98.8 mm，每个像素大小 $d_h \times d_v$ 为 27μm×27μm. 采用 Tycho2 星表中亮于 6.95 星等的星（大约有 14581 颗）为完备基本星表，其包含信息为：恒星编号，赤经（以时（h）为单位），赤纬（以度（°）为单位）和星等.

在这次测试中，参数的小数有效位数设定为 6 位，位置误差假设为服从正态分布的随机变量，位置精度 10″（1σ），角距比较门限设定为 0.01″，得到的统计识别成功率如图 5 中曲线 A 所示，但随着位置误差的增大识别成功率呈快速下降趋势，此次与改进的三角形识别法（曲线 B）和传统的三角形识别法（曲线 C）做了比较，其实验结果如图 5 所示（改进三角形识别数据和传统的三角形识别数据来源于文献 [9]）.

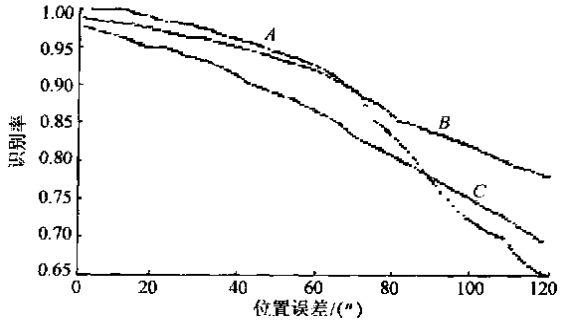

图 5　位置误差与识别成功率的关系图

从图 5 可以看出随着位置误差的增大，识别成功率快速下降，主要是因为此剖分算法利用剖分三角形的三顶点的角距信息进行识别，当位置误差增大时，其剖分三角形的准确性降低，其特征信息变的更加的不准确而造成的. 从图 5 中可看到此算法的识别率在位置误差小于 70 时优于改进的三角形识别法.

在识别速度上，导航星库采取数据库存取形式；由于基本星表经过 Delaunay 剖分形成唯一的三角形剖分结果，因而没有数据冗余，存储容量小；在星图匹配识别时，采用剖分三角形三顶点之间角距的信息比较，按照角距排序存储；因而在检索速度上更体现其优势，本次识别测试，采用实时的识别处理，模拟观测视场的时间加上加入随机噪声的时间以及一次识别时间平均约为 0. 2 s.

5　结 束 语

本文提出了一种基于 Delaunay 剖分算法的全天自主星图识别算法，该算法一方面克服了三角形识别算法由于识别特征维数低而易于出现的冗余匹配的缺点，另一方面克服了算法检索速度慢以及导航星库存储容量大的缺点. 本文算法在地球物理建模方面已经得到非常广泛的应用，其实现容易；将其运用在星图识别上，在导航星库的容量，识别算法的实时性和鲁棒性等方面均比传统的星图识别有明显的改善，因而此算法有较高的实用价值.

参考文献（References）

[1] 李力宏，林　涛，宁永臣，等. 一种改进的全天自主三角形星图识别算法 [J]. 光学技术，2000，26（4）：372～374
Li Lihong，Lin Tao，Ning Yongchen，*et al*. Improved all-sky autonomous triangle star-field identification algorithm [J]. Optical Technique，2000，26（4）：372～374（in Chinese)

[2] 林　涛，周建林，张钧萍，等. 四边形全天自主星图识别算法 [J]. 宇航学报，2000，21（2）：82～85
Lin Tao，Zhou Jianlin，Zhang Junping，*et al*. All-sky automated quaternary star pattern recognition [J]. Journal of Astronautics，2000，21（2）：82～85（in Chinese)

[3] 林　涛，刘瑞宽，贾晓光，等. 一种基于主星的导航星座构造方法 [J]. 中国空间科学技术，2000，20（1）：48～52
Lin Tao，Liu Ruikuan，Jia Xiaoguang，*et al*. Structure of guidance pattern based on primary bright star [J]. Chinese Space Science And Technology，2000，20（1）：48～52（in Chinese)

[4] 孟小红，王卫民，姚长利，等. 地质模型计算机辅助设计原理与应用 [M]. 北京：地质出版社，2001
Meng Xiaohong，Wang Weimin，Yao Changli，*et al*. Geological modeling CAD theory and application [M]. Beijing：Geological Press，2001（in Chinese)

[5] 李立宏，徐洪泽，张福恩. 一种改进全天自主栅格星图识别算法 [J]. 光电技术，2000，26（3）：204～210
Li Lihong，Xu Hongze，Zhang Fuen. A kind of improved grid algorithm for all-sky autonomous star field identification [J]. Optical Technique，2000，26（3）：204～210（in Chinese)

[6] 孔德慧，陈其明. 有界曲面剖分的边界递归法 [J]. 计算机辅助设计与图像学学报，1996，8（5）：345～351
Kong Dehui，Chen Qiming. Boundary recursive method for constrained triangulation of surfaces [J]. China J CAD&CG，1996，8（5）:345～351（in Chinese)

[7] 李立宏，曹　泉，张福恩，等. 基于 CCD 星跟踪器的飞行器姿态估计算法研究 [J]. 光电工程，2000，27（1）：20～24
Li Lihong，Cao Quan，Zhang Fuen，*et al*. Research of spacecraft attitude estimation algorithm based on CCD star tracker [J]. Opto-Electronic Engineering，2000，27（1）：20～24（in Chinese)

[8] Hye-Young Kin，John L Junkins. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers：thinning method [J]. IEEE AC，2001，5（11）：2275～2283

[9] 海　峰，袁家虎，毛羽国. 快速星图匹配算法的研究 [J]. 光电工程，1998，25（6）：70～74
Hai Feng，Yuan Jiahu，Mao Yuguo. Research on rapid star map matching algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering，1998，25（6）：70～74（in Chinese)