

连通聚类星识别方法

陈元枝, 郝胜国, 郝志航

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要:采用星敏传感器测卫星姿态是现行方法中精度最高的,其关键是星图识别。本文阐述了只采用观测星的位置信息,利用观测星图与导航星表的星对角距进行聚类匹配,根据观测星图的连通性进行匹配识别的方法,用图论理论解释了星识别过程;用120M主频的微机模拟分析了门限和位置噪声对识别时间的影响。在门限取 0.05° ,位置噪声(单轴) $\delta = 0.02^\circ$ 以下时,在任一区域识别率达100%,识别时间平均少于0.2s。

关键词:星敏传感器;星识别;连通性;聚类

中图分类号:V556.5 **文献标识码:**A

引言

对于大部分空间飞行器必须了解它们的姿态信息(俯仰角,偏航角和滚动角),用于导航,火力推进器,定位天线和试验等。

使用面阵 CCD 星敏传感器进行姿态测定是20世纪70年代初提出的。CCD 星敏传感器是通过探测地球上不同位置的恒星来确定卫星姿态的测量系统。由于星敏传感器上所成的像点是在真空中拍摄的,当摄影时恒星的赤经和赤纬精确已知时,采用平差方法测算出的姿态角是现行方法中精度最高的。因此如何确定星敏传感器上像点在摄影时刻所对应的恒星,即星图识别,是姿态测量的关键。

目前对星识别已经提出了众多算法,主要有以下几种:

(1)多边形角距匹配算法

由 Gottlieb 提出的该算法实现过程如下:任选三颗星进行三角匹配,若不唯一选第四颗星进行匹配,直到唯一。在视域内存在伪星时,需多次重复匹配,而且能导致误识别。

(2)圆形区域法

由 School 提出,算法实现过程如下:在每个观测星周围形成一个小圆形区域,对落在该区域内的观测星,利用星对角距和星等进行匹配识别,加入匹配星组。识别过程被简化。但当存在伪匹配时,不能排除^[1]。

(3)主星识别法

由 Bezooijen 提出,观测星中一颗星被安排作为主星其余星为伴随星,对主星与伴随星间角距在一给定的门限内寻找对应的导航星对,然后进行亮度等级匹配,保留匹配组,再选下一颗星作主星,删除多余匹配星组。该算法基本上不需要重复匹配,而且适用于全天星图识别,识别速度快,识别率高。但存在三个缺陷^[2],在有許多颗星等相近的亮星的视域内,识别率严重降低^[3]。

这些算法在天空覆盖,数据库大小,噪声稳定,速度上各有优劣,而且容易产生误识别。本文提出了以图论为基础的识别算法,并通过微机模拟进行检验,取得了较好效果。

1 数学基础

1.1 基本定义

图论中将图定义为一个偶对 $G = (V, E)$,其中 V 表示顶点的集合, E 表示边的集合。边 e 用两个顶点 u 和 v 表示,可写成 $e = \langle u, v \rangle$, u 和 v 是无序对, G 为无向图。当为每条边分配一个方向时, $e = (u, v)$,称 G 为有向图。

G 图中以 v 为顶点的边数,称为 v 的度。

如果顶点 v 是边 e 的一个端点,则称边 e 和顶点 v 相关联 (incident)。对于顶点 u 和 v ,若 $(u, v) \in E$,则称 u 和 v 是邻接的 (adjacent)。若两条边有共同的顶点,则称这两条边是邻接的。

图 $G = (V, E)$ 的一个顶点和边的交替序列 $\mu = v_0 e_1 v_1 \cdots v_{k-1} e_k v_k$, 且边 e_i 的端点为 v_{i-1} 和 $v_i, i = 1, 2, \dots, k$, 则称 μ 为一条路径 (Path)。对图 $G = (V, E)$ 来说, 若 G 的两顶点 u, v 之间存在一条路径, 则称 u 和 v 是连通的。连通但没有回路的图称为树。

1.2 图的矩阵表示法

对于图 $G = (V, E)$, 构造一矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,

$$(2) B = A^2 = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & 0 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{(n-1)n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ 0 & 0 & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{(n-1)n} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} = (b_{ij})_{n \times n} \quad (2)$$

其中 $b_{ij} = \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{kj}$, b_{ij} 表示从 v_i 两步到达 v_j 的路径数目。

2 星图识别算法

我们将装载于卫星上的存储器中用于比照的恒星星表中的星称为导航星, 星表中包含星号、视星等, 赤经、赤纬、自行等信息。星敏感器 CCD 上所成的星表中星的映像称为观测星。与观测星对应的导航星称为被测星。

星识别就是将星敏感器视场中观测星组成的星图与导航星组成的星图进行特征匹配以确定观测星与被测星的对应关系。观测星组成的星图, 只具有像面坐标和仪器星等两个特征, 导航星图也具有这两个特征。由于星敏感器的光谱特性使仪器星等与视星等有较大误差 (可达 ± 1 个星等), 因此星等不能作为识别的主要特性; 而位置数据由于在真空中获取, 并采用内插细分技术 (光点中心位置精度优于 $1/10$ 像元), 因此十分可靠和精确, 它是主要的识别特征。

星识别不同于其他模式识别。它没有固定的模板, 观测星随视轴变化, 导航星区域亦随之而变。另外由于星敏感器的本身光谱特性, 有些导航星可能没被观测到, 而有些观测到的星, 可能又不是导航星 (伪星), 如行星, 太空垃圾, 暗于星表的星。因此二者无法直接进行匹配。只有通过生成相关的若干局部匹配子集, 根据相关性进行聚类, 最终得到整体匹配图。

2.1 星对角距匹配

星对角距定义为两星点与观测中心的球心

其中

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, (v_i, v_j) \in E \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

则称矩阵 A 是图 G 的邻接矩阵。给出了图的邻接矩阵, 就等于给出了图的全部信息。

从图 G 的邻接矩阵 A 可获得图的一些性质, 如

(1) $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 中, 第 i 行中非零元素的数目等于顶点 v_i 的度。

角。由于恒星与地球的中心距离以光年计, 可以认为以地心为观测中心, 由恒星视位置计算所得的星对角距与以星敏感器焦点为观测中心, 由像点计算所得星对角距的差异可忽略不计 (假设星敏感器无误差)。

星对角距 e_{ij} 是单位矢量 s_i 和 s_j 夹角。

$$e_{ij} = \cos^{-1} \frac{s_i \cdot s_j}{|s_i| \cdot |s_j|} \quad (3)$$

其中 i 和 j 为星号。

观测星图表示为 $G_{\text{观}} = (V_{\text{观}}, E_{\text{观}})$, 假设观测星数为 m 颗, 其中 $E_{\text{观}} = (u_{\text{观}i}, u_{\text{观}(i+n)})$, 具有方向性, $i = 1, 2, \dots, m-1, n = 1, 2, \dots, m-i$ 。 $E_{\text{观}}$ 的角距个数为 $\frac{m(m-1)}{2}$, 即观测星两两邻接, 而且连通。导航星图也如此表示, 但 $E_{\text{导}}$ 无方向。

寻找在一定门限内与观测星对 $E_{\text{观}}$ 匹配的导航星对 $E_{\text{导}}$, 建立匹配组, 并存储 (如表 1 所示)。其中 $(*, *)$ 为 $\langle \text{星号}, \text{星号} \rangle$ 。

Table 1 Match groups of stars pair

observed star pairs	guide star pairs		
(1, 2)	$\langle *, * \rangle$	$\langle *, * \rangle$
(1, 3)	$\langle *, * \rangle$	$\langle *, * \rangle$
(i, j)	$\langle *, * \rangle$	$\langle *, * \rangle$
(m-1, m)	$\langle *, * \rangle$	$\langle *, * \rangle$

与观测星对匹配的导航星对可能不唯一, 其数量随设定的门限的大小而增减。如果一对观测星中没有伪星, 所设门限又大于位置误差, 匹配的导航星对组中必有与之对应的一对被测星。经此匹配后, 祛除了星表中的一部分星对, 但不能确定导航星对中星号次序, 也不能排除伪星。

2.2 三角匹配

寻找能够两两邻接构成三角形的观测星对及与之对应的两两邻接构成三角形的导航星对,建立匹配组 U_{Ξ} 并存储。例如,观测星对 $(v_l, v_m), (v_l, v_n), (v_m, v_n)$, 在导航星对匹配组中,如能寻找到与之对应的导航星对 $\langle u_i, u_j \rangle, \langle u_i, u_k \rangle, \langle u_j, u_k \rangle$, 则 (v_l, v_m, v_n) 与 (u_i, u_j, u_k) 构成三角匹配。此时,大量小匹配的导航星对被排除,并使星号相对应(v_l 号观测星对应导航星 u_i ; v_m 号观测星对应导航星 u_j ; v_n 号观测星对应导航星 u_k)。为祛除可能产生的镜像匹配,如有两个以上的导航三角匹配一个观测三角,则均赋零。由于被测星具有远大于非被测星的度,因此由被测星构成的匹配三角有较大的冗余。

建立星号对应匹配组,如果观测星与导航星一一对应,匹配结束。若由于存在伪三角匹配,观测星对应的导航星的个数不唯一,进行下一步。

2.3 连通聚类匹配

导航星三角形之间,通过匹配的观测星之间的连通性而具有相关关系,由此进行聚类,寻找最大连通树。最大连通树中的导航星即是被测星。

假设对应的导航星总数为 n ,建立邻接矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$,

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & (u_i, u_j) \in U_{\Xi} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

令 $B = A^3 = (b_{ij})_{n \times n}$, b_{ij} 表示 u_i 经三步可到达 u_j 的路径数,若 $b_{ij} > 0$,即以 v_i 为首的三角形与以 v_j 为首的三角形连通,建立观测星与导航星的对应匹配组,大量小匹配的伪三角被排除。如一一对应,则观测星均被识别。不唯一,保留唯一的匹配组。如 u_m, u_k 对应同一颗观测星,分别将矩阵 B 中 m 行与 m 列相加, k 行与 k 列相加,大者具有最大连通性,确定该星即为被测星。

3 模拟结果分析

为评价这种识别方法,我们用120M主频的微机进行了模拟实验。导航星的全空数据库为9098颗星,包含星号、星等、赤经、赤纬、自行等数据。模拟主要关注位置噪声方差和星对匹配门限对识别和识别时间的影响。

模拟方法如下:观测星图取视轴指向周围,星表中落在视域范围内的最亮9颗星,每星加入正态分布的随机数以扰乱星位置,随机数分布由方差 δ 决定;在视域内一随机位置加入伪星。对观测星

编号,计算任意两星间角距并存储。导航星图取大于观测星视域范围 5° (如观测星视域为 $12^\circ \times 12^\circ$, 则导航星视域为 $17^\circ \times 17^\circ$) 的星表中的星,计算角距并存储。将两者进行匹配识别。

取星表中的星数稠密的区域,视轴指向定为赤经 117° , 赤纬 -36° , 进行识别实验。门限取定为 $0.09^\circ, 0.05^\circ, 0.03^\circ$ 时,方差对识别率影响,如图1所示;噪声方差取定为 $0.005^\circ, 0.01^\circ, 0.02^\circ$ 时,门限对识别率的影响,如图2所示。门限高端与噪声高端不能识别的原因是由于能形成多个镜像匹配而产生。镜像匹配产生的失误数多于误匹配产生的失误数。门限低端不能识别是由于噪声大于门限而导致导航星对不在匹配组中。星对匹配门限决定了聚类的标准,因此其取值大小取决于位置噪声的大小。

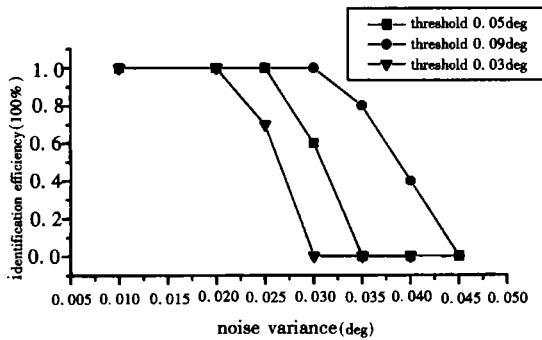


Fig. 1 Effect of noise variance on identification efficiency

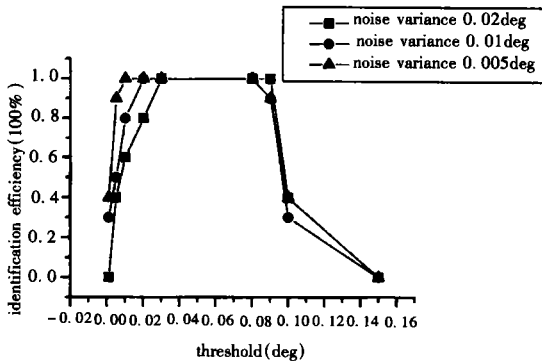


Fig. 2 Effect of threshold on identification efficiency

图3显示了当噪声 δ 取 $0.005^\circ, 0.01^\circ, 0.02^\circ$ 时,门限对识别时间的影响。在门限高端(大于 0.05°)识别时间急剧升高,说明匹配星对数量增多;而低端星对匹配数量稳定。门限取值一定时,噪声对识别时间无影响。

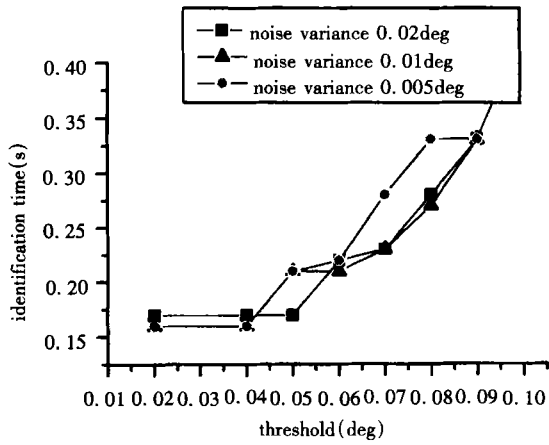


Fig. 3 Effect of threshold on identification time

4 结 论

由于篇幅所限,只列出了一个视域的判别情

参考文献:

- [1] Scholl Marija S. Star field identification algorithm-performance verification using simulated star fields[C]. Proc. SPIE, 1993, 2019: 275-290.
- [2] DeAntonio L, Udomkesmalee S et al. Star-tracker based autonomous attitude determination[C]. Proc. SPIE, 1993, 1949: 204-216.
- [3] Roelof W H, van Bezooijen. True-sky demonstration of an autonomous star tracker[C]. Proc. SPIE, 1994, 2221: 156-168.
- [4] 卢开澄, 卢华明著. 图论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.

Method for star identification using connection cluster

CHEN Yuan-zhi, HAO Sheng-guo, HAO Zhi-hang

(Optical Engineering Center, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021, China)

Abstract: The most accurate instrument for satellite attitude determination is star tracker now, in which the key problem is the identification of star map. In this paper, cluster match is performed only with the observed star position information and using the star angular distance between observed star map and guide star catalog, then match identification is made with respect to the connection of the observed star map, at last, utilizing the computer (main frequency 120M) simulation the effects of threshold and position noise on identification and identification time are analyzed. When the threshold is 0.05° , position noise δ is less than 0.02° , in any areas, the identification efficiency is 100%, and the average identification time is less than 0.2s.

Key words: star tracker; star identification; connection; cluster

作者简介: 陈元枝(1968-),男,吉林省长春市人。1991年毕业于电子科技大学自动化系生物医学及仪器专业,取得学士学位,1993年考入吉林工业大学农机系攻读硕士学位并取得学位,1996年至今在长春光机所攻读光学工程专业博士学位。主要从事卫星在轨三轴姿态测量方面研究。

E-mail: chenyz0450@sina.com

况,实际我们取了大量的视域,包括稀薄区,稠密区,南北极轴附近等,分别做了识别实验。使用120M主频的微机,采用 catalogs/5/5050/星表(包含9098颗7.0星等以下的星),视域为 $12^\circ \times 12^\circ$,10颗最亮的星用于识别,比较门限取 0.05° ,位置噪声方差 δ (单轴)取 0.02° 时,在任一区域识别率达100%,识别时间平均少于0.2s。

由于该算法的比较门限裕度较大,使导航星星表中存储的可以是观测历元的年中平位置及由平位置计算出的角距,省去了视位置换算及识别过程中的角距计算时间。但有效期最多为一年,多于一年需阶段性修正。

当采用球矩方法存储星表时,该算法既可用于具有先验粗姿态信息时的星图识别,也可用于全天星图识别。