

# 天文导航中星图识别算法的研究\*

吕岩甲 王养柱

(北京航空航天大学 无人机所,北京 100191)

**摘要** 本文着重对基于大视场星敏感器的天文导航中星图识别算法进行了研究。传统的星图识别算法大都是基于理想情况下的星图识别,算法复杂、速度慢,有的存储容量大、抗干扰能力差,不利于对航天器控制。为克服传统算法的这些缺点,本文对基于 Hausdorff 距离的星图识别算法进行详细的讨论,并通过编写可视化软件仿真验证其有效性。

**关键词** 天文导航 星敏感器 Hausdorff 距离 星图识别

## Research of Star Pattern Recognition Approach in Celestial Navigation

Lü Yanjia, Wang Yangzhu

(Research Institute of Unmanned Aerial Vehicle, Beijing University of  
Aerionautics and Astronautics, Beijing 100191)

**Abstract** This paper focuses on the star pattern recognition algorithm in the celestial navigation based on the star sensor with wide field of view. Most of traditional star pattern recognition algorithms are based on ideal circumstances, of which some algorithms are complex, slow, or have large storage and poor anti-jamming ability, and not conducive to the control of spacecraft. To overcome these disadvantages, this paper discusses the star pattern recognition algorithm based on the Hausdorff distance in detail and verifies its effectiveness through simulation by programming visualization software.

**Key words** celestial navigation, star sensor, Hausdorff distance, star pattern recognition

### 1 引言

天文导航系统(CNS)是利用天空中的恒星作为导航信息源,能提供不随时间漂移的

位置和航向等辅助信息的一种高精度、高可靠性的全自主导航系统,在高空导航中有着重要的地位。以惯性导航系统为核心构成的 SINS/GPS/CNS 组合导航系统能充分发挥各个系统的优势,已经成为组合导航技术发

展的重要方向。

基于大视场星敏感器的天文导航主要包括导航星库的建立、星图预处理、星图识别、导航解算四部分,本文在完成前两步的基础上,重点对星图识别算法进行了研究并仿真验证其有效性。

目前常用的星图识别算法主要有三角匹配算法、主星识别法、栅格算法等,这些算法各有特点,大都是通过特征提取后基于理想情况下的星图识别。实际从星敏感器得到的星图一般都带有较强噪声和各种畸变,畸变主要是星敏感器的成像失真和传感器安装造成的系统误差。由于天空中的陨石、流星以及卫星等不确定因素,也造成待识别星图的噪声,使得在特征点的抽取过程中产生虚假特征点或者丢失特征点。以往的这些算法鲁棒性不高,容易被亮星或卫星干扰,对存储量要求也很高,实时性差<sup>[1]</sup>。与之相比,基于Hausdorff距离的星图识别算法可以较好地解决这些问题。

## 2 基于 Hausdorff 距离的星图识别算法<sup>[1,2]</sup>

Hausdorff(HD)距离是两幅图像间相似性的一种度量方法,在计算时不需要建立两幅图像间点与点之间的对应关系,从而可以很好地适应被噪声污染或严重失真的图像。

### 2.1 Hausdorff 距离

对于两个有限点集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ , A、B 之间的 Hausdorff 距离定义为:

$$H(A, B) = \max(h(A, B), h(B, A))$$

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} (d(a, b))$$

其中,  $d(a, b)$  为  $a$  和  $b$  之间的距离;  $h(A, B)$  为 A、B 间的有向 HD, 其意义参考相关文献<sup>[2]</sup>;  $H(A, B)$  反映了集合 A 和集合 B 的不匹配程度, HD 越大说明两个集合相差越远。

在二值图像的匹配中,一般将  $d(a, b)$  取以下的表达式:

$$d(a, b) = |x_a - x_b| + |y_a - y_b| \text{ 或}$$

$$d(a, b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2} \quad (2)$$

### 2.2 二值图像的有向距离和绝对距离

设两个图像  $M_A$  和  $M_B$  分别包含的有限点集为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ ,  $p \leq q$ 。其中  $a_i, b_j$  分别表示为  $a_i(x_{a_i}, y_{a_i}), b_j(x_{b_j}, y_{b_j})$ ,  $0 < i < p, 0 < j < q, x_{a_i}, y_{a_i}$  为点的横纵坐标。

定义  $a_i, a_j$  两点的有向距离:

$$\begin{cases} d_x^i(a_i, a_j) = (x_{a_i} - x_{a_j}) \\ d_y^i(a_i, a_j) = (y_{a_i} - y_{a_j}) \\ \text{其中 } a_i \in A, a_j \in A \end{cases} \quad (3)$$

定义  $a_i, a_j$  两点的绝对距离:

$$d^i(a_i, a_j) = \sqrt{(x_{a_i} - x_{a_j})^2 + (y_{a_i} - y_{a_j})^2},$$

其中  $a_i \in A, a_j \in A$ ,

$$\text{设: } \begin{cases} h_L^k(A, B) = \sum_{j=11 \leq m \leq q} \min [S_A^i(j) - S_B^k(m)] \\ h_R^k(A, B) = \sum_{j=11 \leq m \leq q} \min [R_A^i(j) - R_B^k(m)] \\ \text{其中 } k=1, 2, \dots, q \end{cases} \quad (4)$$

其中元素  $S_A^i(j) = d^i(a_i, a_j)$  表示  $a_i, a_j$  两点的有向距离;  $R_A^i(j) = d^i(a_i, a_j)$  表示  $a_i, a_j$  两点的绝对距离。  $H_L^i(A, B) = \min_{1 \leq k \leq q} h_L^k(A, B)$  为以  $a_i$  为参考点的两图像的有向距离; 点  $b_k$  为  $a_i$  的全局最佳有向匹配点。同理  $H_R^i(A, B)$  为以  $a_i$  为参考点的两图像的绝对距离; 点  $b_k$  为  $a_i$  的全局最佳绝对匹配点。由于篇幅限制,其他参数的定义请参考相关文献<sup>[2]</sup>。

对于相同的参考点,理论上全局最佳有向匹配点和绝对匹配点是同一个点,但在实际应用中,由于图像的旋转误差,有时会存在差异。以有向距离为例,假设集合 A 是经过图像处理得到的点集,点集 B 中的所有元素都是真值数据。以  $a_i$  为参考点求解出的

对应匹配点  $b_k$ , 当  $H_L^i(A, B)$  的值满足预定的门限时可认为是最佳匹配点, 反之由假设点集  $B$  中的元素都是真值数据可知,  $b_k$  对应的  $a_i$  就可作为伪数据除去。设匹配门限为  $T$ , 即

$$a_i \rightarrow \begin{cases} b_k, H_L^i(A, B) \leq T \\ Invalid, H_L^i(A, B) > T \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 基于 Hausdorff 距离的星图识别算法

文中把全天星图参考星库作为一个标准数据集, 把从星传感器中提取的待识别星作为待识别数据集, 利用两个集合之间的最小 Hausdorff 距离来确定待识别星的位置。将 Hausdorff 的有向和绝对距离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, 即在满足识别算法条件的前提下, 每一幅星图图像  $M_A$ , 经星点质心提取后所形成的有限点集  $A$  一定是一个由所有导航星形成的整个全天星图的子图像, 图像一确定则其所包含的区域就确定了。  $M_A$  比全天星图对应的这一确定区域少的星点, 认为被噪声淹没, 多的部分认为是伪星点。在实际工程应用中, 考虑识别速度和识别率问题, 一般采用有先验知识的星图匹配识别。通常星传感器在前一时刻的方向已知, 实际情况中航空器的方向和位置不可能突变, 星传感器的视场应在特定的范围内变化。假设星敏

感器在前一时刻的光轴指向赤经赤纬值为  $(\alpha, \beta)$ , 时间  $t$  内光轴指向的变化为  $(\Delta\alpha, \Delta\beta)$ , 星传感器的视场大小为  $F_x \times F_y$ , 则选取导航星确定其赤经赤纬的满足范围  $(x, y)$  应该为:

$$\begin{cases} x \in p(\alpha)(\alpha + \Delta\alpha - F_x - f(\beta + \Delta\beta), \\ \alpha + \Delta\alpha + F_x + f(\beta + \Delta\beta)) \\ y \in q(\beta)(\beta + \Delta\beta - F_y, \beta + \Delta\beta + F_y) \end{cases} \quad (6)$$

其中,  $p(\alpha), q(\beta)$  为特定范围的调整因子;  $f(x)$  为根据赤纬求解赤经跨度的函数。则从基本星表中, 只要恒星的赤经赤纬在  $x, y$  的取值范围之内, 就将其选为导航星。将每个选定的导航星, 根据坐标变换原理, 令  $\alpha_0 = \alpha + \Delta\alpha, \delta_0 = \beta + \Delta\beta$ , 得到 CCD 平面上的位置坐标, 存入点集  $B$  中, 完成标准特征数据的生成操作。从而得到了两个有限点集  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_p\}$  和  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_q\}$ 。

那么基于 Hausdorff 的星图匹配识别算法流程如下:

- (1) 从点集  $A$  中选取尽可能接近  $M_A$  图像中心的点  $a_i$ , 求解其对应的数列  $S_A^i(n), R_A^i(n)$ , 其中  $n=1, 2, \dots, p$ 。初始化  $j=1, m_k=0$ ;
- (2) 在点集  $B$  中以  $b_j$  为参考点求解  $S_B^j(m)$ , 其中  $m=1, 2, \dots, q$ ;
- (3) 计算  $h_L^i(A, B), H_L^i(A, B)$ ;

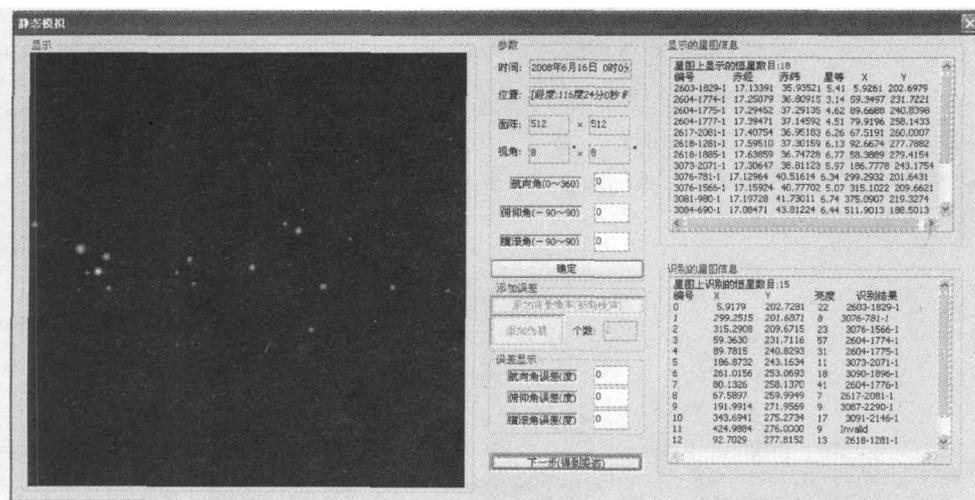


图 1 天文导航仿真软件主界面

(4)判断  $H_i^j(A, B)$  是否小于有向匹配门限  $T_L$ , 如果满足则转到(5), 否则当  $j=q$ , 转到(7),  $j < q$  时  $j++$ , 并转到(2);

(5)根据  $H_i^j(A, B)$  得出元素  $b_k$ , 求解  $R_B^k(m), h_i^j(A, B), H_i^j(A, B)$ ;

(6)判断  $H_i^j(A, B)$  是否小于绝对匹配门限  $T_i$ , 满足表示  $a_i \rightarrow b_j$ , 转到(8), 否则转到(7);

(7)将  $a_i$  作为伪星从  $A$  中去除, 转到(8);

(8)如果  $A$  中已无元素则识别算法结束, 否则转到(1)。

### 3 可视化软件仿真实现

由于条件限制, 通过编写可视化软件来进行仿真。仿真主要分成两个部分: 星图模拟和星图处理。主界面如图 1 所示。

星图的模拟(即二值图像的生成):

模拟星图首先需要有一个星库, 本文所用的主导航星库摘自 *Tycho2* 星表, 使用星等亮于 6.95 的星数据(大约 14581 颗), 坐标历元  $J2000$ 。由四部分组成: *Tycho2* 星表的恒星编号、赤经(以时  $h$  为单位)、赤纬(以度  $^\circ$  为单位)、星等。星敏感器的视场大小为  $8^\circ \times 8^\circ$ , CCD 面阵分辨率为  $512 \times 512$ 。星图模拟的算法流程如图 2 所示。

通过上述算法便可以实现星图的模拟, 然后经过对星图的预处理、星图背景分割、星体定位, 最后完成星图识别和姿态解算。

在基于 Hausdorff 的星图匹配算法当中, 根据前面讨论的公式, 取  $p(\alpha) = q(\beta) = 1.2$ ,  $f(x)$  取为二次多项式:

$$f(x) = \frac{360 - F_x}{8100} \times x^2 + F_x \quad (7)$$

表 1、表 2 分别为星图上所显示的各个恒星的信息和星图识别的结果。

由表 1、表 2 的对比可以看出, 有的恒星被噪声淹没, 有的由于噪声被识别成伪星。但在被识别的恒星中, 星体细分定位的精度

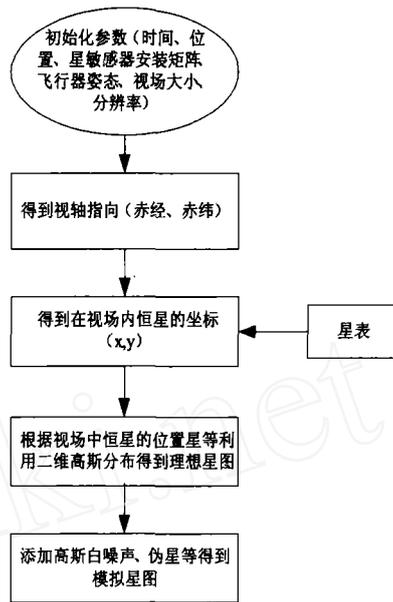


图 2 星图模拟算法流程



图 3 理想星图



图 4 加噪声后的星图

表 1 星图上显示的恒星数目:18

编号	赤经	赤纬	星等	X	Y
2603-1829-1	17.13391	35.93521	5.41	5.9261	202.6979
2604-1774-1	17.25079	36.80915	3.14	59.3497	231.7221
2604-1775-1	17.29452	37.29135	4.62	89.6688	240.8398
2604-1777-1	17.39471	37.14592	4.51	79.9196	258.1433
2617-2081-1	17.40754	36.95183	6.26	67.5191	260.0007
2618-1281-1	17.59510	37.30159	6.13	92.6674	277.7882
2618-1885-1	17.63859	36.74728	6.77	58.3889	279.4154
3073-2071-1	17.30647	38.81123	5.97	186.7778	243.1754
3076-781-1	17.12964	40.51614	6.34	299.2932	201.6431
3076-1566-1	17.15924	40.77702	5.07	315.1022	209.6621
3081-980-1	17.19728	41.73011	6.74	375.0907	219.3274
3084-690-1	17.08471	43.81224	6.44	511.9013	188.5013
3086-2092-1	17.40063	38.58270	6.55	171.8574	259.0075
3087-2290-1	17.51117	38.88217	6.44	192.0221	271.9820
3090-1896-1	17.36211	39.97480	5.57	260.8182	253.0613
3091-2146-1	17.55203	41.24359	5.73	343.7139	275.2403
3100-2307-1	17.67709	43.47054	6.37	489.9929	280.0608
2604-1776-1	17.39465	37.14677	5.40	79.9739	258.1344

表 2 星图上识别的恒星数目:13

编号	X	Y	亮度	识别结果
0	5.9179	202.7281	22	2603-1829-1
1	315.2908	209.6715	23	3076-1566-1
2	59.3630	231.7116	57	2604-1774-1
3	89.7815	240.8293	31	2604-1775-1
4	186.8732	243.1634	11	3073-2071-1
5	261.0156	253.0693	18	3090-1896-1
6	80.1326	258.1370	41	2604-1776-1
7	191.9914	271.9569	10	3087-2290-1
8	343.6941	275.2734	17	3091-2146-1
9	424.9884	276.0000	10	Invalid
10	92.7029	277.8152	13	2618-1281-1
11	490.0064	280.0701	10	3100-2307-1
12	330.9895	326.0000	10	Invalid

大约在 0.01 个像素的数量级,而 Hausdorff 的星图匹配算法可以正确地识别出恒星和伪星。

## 4 结论

本文通过软件形式模拟星图,在对星图预处理、星图背景分割、星体定位基础上,重点研究了天文导航中的星图识别算法,针对传统算法中的一些不足,提出了基于 Hausdorff 距离的星图匹配算法,仿真结果验证了算法的有效性。可根据星图识别的结果通过定姿原理得到飞行器的姿态,为今后的工作奠定了理论基础和实践基础。

### 参考文献

- [1] 王广君,房建成. 基于 Hausdorff 距离的星图识别方法. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(5): 508-511.
- [2] 全伟,王广君,房建成. 一种基于 Hausdorff 距离的改进星图识别方法. 北京航空航天大学学报, 2006, 1(32): 8-12.
- [3] 王波. CMOS 星敏感器星图识别方法研究. 华中科技大学硕士学位论文, 2004.