DOI:10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.003
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

一种基于 Hausdorff 距离的改进星图识别方法

全 伟 王广君 房建成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100083)

摘 要:针对基于 Hausdorff 距离 HD(Hausdorff Distance)识别法存在识别速度慢和对星敏感器镜头旋转特别敏感的问题,提出了一种基于 Hausdorff 距离进行星图识别的改进算法,它采用有向距离和绝对距离相结合的方法,利用恒星的空间结构信息,构建有向距离匹配模型;根据镜头旋转特性,建立绝对距离抗旋转模型;对两种模型测试研究确定加权因子,同时选取恰当的匹配识别门限,最终实现匹配识别的性能达到最优.仿真实验结果表明,改进后的算法不但保持了原有算法的高识别率,强抗噪性,而且还具有更快的识别速度和好的抗旋转特性.它在实际工程中已得到成功应用.

关 键 词:星敏感器;自主天文导航;Hausdorff 距离;星图识别;有向距离;绝对距离
中图分类号:V 448.2;TP 273
文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2006)01-0008-05

Improved star map identification algorithm based on Hausdorff distance

Quan Wei Wang Guangjun Fang Jiancheng

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

Abstract: To solve two problems that the identification algorithm based on Hausdorff distance have the slow recognition speed and being very sensitive for the rotation of lens of star sensor, an improved star map identification algorithm based on Hausdorff distance was proposed. In this method, vector distance was combined with scalar distance. The information of star dimensional configuration was used, and a matching model of vector distance was constructed. According to the rotation peculiarity of lens, a anti-rotation model of scalar distance was set up, the weighted factor was ascertained by testing and researching the two models, right matching and recognizing threshold was choosed, and the final optimum performance of recognition was achieved. The simulation results show that it improved algorithm not only had good identification rate and strong anti-noise characteristic of original algorithm but also had better recognition speed and good anti-rotation characteristic. It was used successfully in the actual projects.

Key words: star sensor; autonomous navigation; Hausdorff distance; star map identification; vector distance; scalar distance

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,其作用是对航天器飞行姿态的精确测量.自主星图匹配识别算法是姿态确定的核心,不但要能实现姿态的快速获取,当由于某种原因造成姿态丢失时,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,它们都取得了良好的效果,但在天空覆盖、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

收稿日期:2004-10-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60174031);国家 863 计划资助项目(2002AA713031);民用航天预研资助项目
作者简介:全 伟(1977—),男,山东临沂人,博士生,qw_quanwei@sina.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

数的限制,而且对测量比较敏感. Hausdorff 距离 HD(Hausdorff Distance)是两图像间相似性的一种度量方法[4],在计算时无需建立两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[4,5],其不足之处有 2 点:一是由于利用的是 HD 的有向性,而星敏感器安装时面阵是有旋转误差的,这一误差对识别率的影响特别大;二是在识别时由于采用的是全局最小值匹配,因而在识别速度上不是很高,特别在星多的区域更是如此. 本文针对以上 2 点不足,提出了一种基于 HD 进行星图识别[6]的改进算法,首先采用有向距离和绝对距离相结合的方法,保证识别率,利用有向距离进行恒星空间结构的相似匹配,同时利用绝对距离来消除由于初始安装造成的旋转误差;再通过选取恰当的匹配门限进行识别以提高识别速度. 半物理仿真实验结果表明,改进后的算法不但保持了原有的高识别率、强抗噪性,而且还具有更快的识别速度和良好的抗旋转特性.

1　有向距离和绝对距离

1.1　HD

对于 2 个有限点集 $A=\{a_1, a_2, \cdots, a_p\}$ 和 $B=\{b_1, b_2, \cdots, b_q\}$, A, B 之间的 HD 定义为

$$H(A,B)=\max\{h(A,B), h(B,A)\} \tag{1}$$

$$h(A,B)=\max_{a\in A}\min_{b\in B} d(a,b) \tag{2}$$

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,其意义为:设点 $a\in A$ 为到集合 B 中任一元素最远的点, $b\in B$ 为距 a 最近的点,则 a 与 b 之间的距离就是 $h(A,B)$; $H(A,B)$反映了集合 A 和集合 B 的不匹配程度,HD 越大,说明 2 个集合相差越远.

在二值图像的匹配中,一般将式(2)中的 $d(a,b)$取以下的表达式:

$$d(a,b)=|x_a-x_b|+|y_a-y_b| \tag{3}$$

或

$$d^2(a,b)=|x_a-x_b|^2+|y_a-y_b|^2 \tag{4}$$

1.2　二值图像的有向距离和绝对距离

根据 HD 的思想,结合二值图像空间分布的结构信息,设两个图像 M_A 和 M_B 分别包含的有限点集为 $A=\{a_1, a_2, \cdots, a_p\}$ 和 $B=\{b_1, b_2, \cdots, b_q\}$, $p\leqslant q$. 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 a_i 的横纵坐标.

定义 a_i, a_j 两点的有向距离:

$$\left.\begin{aligned} d_x^L(a_i,a_j)&=(x_{a_i}-x_{a_j})\\ d_y^L(a_i,a_j)&=(y_{a_i}-y_{a_j})\\ a_i\in A,\ a_j&\in A \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

定义 a_i, a_j 两点的绝对距离:

$$d^l(a_i,a_j)=\sqrt{(x_{a_i}-x_{a_j})^2+(y_{a_i}-y_{a_j})^2}\quad a_i\in A,\ a_j\in A \tag{6}$$

定义数列 $S_A^i(n)=\{d^L(a_i,a_n)\}$,表示点 a_i 到集合 A 内所有点的有向距离数列;同样定义数列 $R_A^i(n)=\{d^l(a_i,a_n)\}$,表示点 a_i 到集合 A 内所有点的绝对距离数列, $n=1,2,\cdots,p$, $a_i\in A$, $a_n\in A$. 元素 $S_A^i(j)=d^L(a_i,a_j)$表示 a_i, a_j 两点的有向距离;元素 $R_A^i(j)=d^l(a_i,a_j)$表示 a_i, a_j 两点的绝对距离.

设

$$\left.\begin{aligned} h_L^{ik}(A,B)&=\sum_{j=1}^{p}\min_{0<m<q+1}[S_A^i(j)-S_B^k(m)]\\ h_l^{ik}(A,B)&=\sum_{j=1}^{p}\min_{0<m<q+1}[R_A^i(j)-R_B^k(m)]\\ k&=1,2,\cdots,q \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

其中, $h_L^{ik}(A,B)$($h_l^{ik}(A,B)$)表示以 a_i 为基准点在集合 A 中形成有向(绝对)距离数列的各个元素同以 b_k 为基准点在 B 中形成有向(绝对)距离数列的各个元素之间的最佳匹配值,也称为以 a_i 为参考点的图像 M_A 和以 b_k 为参考点的图像 M_B 之间最佳有向(绝对)匹配程度.

则称:

$H_L^i(A,B)=\min_{0<k<q+1} h_L^{ik}(A,B)$为以 a_i 为参考点的图像 M_A 和图像 M_B 之间的全局最佳有向匹配值,简称以 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.

$H_l^i(A,B)=\min_{0<k<q+1} h_l^{ik}(A,B)$为以 a_i 为参考点的图像 M_A 和图像 M_B 之间的全局最佳绝对匹配值,简称以 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.

对于相同的参考点,理论上全局最佳有向匹配点和全局最佳绝对匹配点是同一个点,但是在实际工程应用中,由于图像的旋转误差,有时会存在差异,特别在点集 A 中含有的元素个数少的情况下更是如此,这主要是由于有向距离的有向性,

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对图像旋转误差特别敏感而造成的.

换位思考,以有向距离为例,假设集合 A 是经过图像处理后得到的点集,点集 B 中的所有元素都是真值数据,即不存在伪数据;则以 a_i 为参考点求解出的对应匹配点 b_k,当 $H_L^i(A,B)$ 的值满足预定的匹配门限时可认为是最佳匹配点,反之如果 $H_L^i(A,B)$ 的值不满足门限,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 就可作为伪数据或奇异点而被去除.

设匹配比较门限为 T,即:

$$b_k \leftrightarrow a_i = \begin{cases} 1, \cdots\cdots, H_L^i(A,B) \leqslant T \\ 0, \cdots\cdots, H_L^i(A,B) > T \end{cases}$$

其中,1 表示 a_i 是 b_k 的全局最佳匹配点;0 表示 a_i 为伪数据.

2 基于改进 HD 的星图识别

2.1 基于改进 HD 的识别算法条件

导航星库是航天器中星敏感器进行恒星匹配识别的唯一依据.它一般装载于航天器上的存储器中,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.

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 N 要小于等于导航星库中的最高星等 M,并且理论上要保证视场内至少有 2 颗导航星[7].

2.2 基于改进 HD 的识别算法

星图识别系统要求精度高、速度快、识别率高、抗噪性强.其主要思想是将通过星敏感器敏感到的星图原始数据设为 M_A,通过星图图像的预处理(有背景分割、滤波和畸变校正等)得到质量高的星图数据,经过星点质心提取算法提取出星点数据点集设为 A,利用星图匹配识别算法对 A 进行数据处理形成可供识别的特征信息,并将特征信息与导航星库中的标准特征信息进行匹配识别,从而达到星图识别的目的.

将改进的 HD(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(设其含有 p 个恒星光点元素)一定是一个由所有导航星所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.在这里假设确定的区域内,由于 $N \leqslant M$,M_A 比全天星图中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,考虑识别速度的问题,由于星库中可识别星的数目较多,识别速度慢,因而一般采用有先验知识的星图匹配识别.通常星敏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,星敏感器的视场应在特定的范围内变化.这样如果在这个特定的范围内进行星图匹配,不仅可以降低误识别率,同时还可大大提高识别速度.

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

$$(x,y) = \begin{cases} x \in p(\alpha)(\alpha+\Delta\alpha-F_x-f(\beta+\Delta\beta), \alpha+\Delta\alpha+F_x+f(\beta+\Delta\beta)) \\ y \in q(\beta)(\beta+\Delta\beta-F_y, \beta+\Delta\beta+F_y) \end{cases} \tag{8}$$

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[8],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.下式为坐标变换公式:

$$\left.\begin{aligned} x_{a_i} &= \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan(F_x/2)} \times \frac{\cos\delta_i \sin(\alpha_i-\alpha_0)}{\sin\delta_i\sin\delta_0+\cos\delta_i\cos\delta_0\cos(\alpha_i-\alpha_0)} \\ y_{a_i} &= \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan(F_y/2)} \times \frac{\sin\delta_i\cos\delta_0-\cos\delta_i\sin\delta_0\cos(\alpha_i-\alpha_0)}{\sin\delta_i\sin\delta_0+\cos\delta_i\cos\delta_0\cos(\alpha_i-\alpha_0)} \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

其中,$\alpha_0=\alpha+\Delta\alpha$,$\delta_0=\beta+\Delta\beta$;$(x,y)$分别为 CCD 平面上目标点的位置:

$$x_{a_i} \in \left(-\frac{N_x}{2}, \frac{N_x}{2}\right)$$

$$y_{a_i} \in \left(-\frac{N_y}{2}, \frac{N_y}{2}\right)$$

N_x,N_y 分别为 CCD 平面上每行,每列像素的个数;F_x,F_y 分别为 x,y 方向上的视场角.

由以上原理得到 2 个有限点集 $A=\{a_1, a_2, \cdots, a_p\}$ 和 $B=\{b_1, b_2, \cdots, b_q\}$,针对此信息基于 HD 改进的星图匹配识别算法具体步骤如下:

1) 从点集 A 中选取尽可能接近 M_A 图像中心

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的点 a_i,求解其对应的数列 $S_A^i(n)$, $R_A^i(n)$, $n=1,2,\cdots,p$,并初始 $j=1$, $m_k=0$;

2) 在点集 B 中以 b_j 为参考点求解 $S_B^j(m)$, $m=1,2,\cdots,q$;

3) 计算 $h_L^{ik}(A,B)$, $H_L^i(A,B)$;

4) 判断 $H_L^i(A,B)$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, $j=j+1$,并转到2);

5) 根据 $H_L^i(A,B)$得出元素 a_i 所对应的 b_k,求解 $R_B^k(m)$, $h_l^i(A,B)$, $H_l^i(A,B)$;

6) 判断 $H_l^i(A,B)$是否小于绝对匹配门限 T_l,满足则转到8),否则转到7);

7) 将 a_i 作为伪星点从 A 中去除,如果 A 中已无元素,则 $m_k=1$,转到8),否则转到1);

8) 识别算法结束, $m_k=1$ 表示识别失败, $m_k=0$ 表示识别成功,这时 b_k 所对应恒星的信息,就是 a_i 所对应的信息.

其中 T_L 和 T_l 的大小同星敏感器系统噪声带来的提取位置误差和提取星点的个数以及采用的匹配方法有关,简单表达式可写为如下形式:

$$T_L = \rho_L \times n \times \overline{\omega}$$

$$T_l = \rho_l \times n \times \overline{\omega}$$

其中, ρ_L, ρ_l 为匹配算法调节因子; n 为提取星点个数; $\overline{\omega}$ 为提取位置误差.

3　仿真实验与分析

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 $F_x \times F_y$ 为 $8^\circ \times 6^\circ$, CCD 面阵 $N \times N$ 为 768×576, CCD 透镜焦距 f 为 181.527 mm,每个像素大小 $d_h \times d_v$ 为 $26\,\mu m \times 26\,\mu m$.采用 Tycho2 星表中亮于 6.95 星等的星(大约有 14 581 颗)为完备基本星表,其包含信息为恒星编号、赤经、赤纬和星等.取 $p(\alpha)=q(\beta)=1.2$, $f(x)$取为二次多项式:

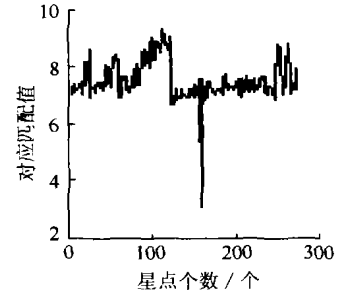
$$f(x) = \frac{360^\circ - F_x}{8\,100} \times x^2 + F_x$$

提取位置误差取 1 个像素(1σ),进行半物理仿真实验.

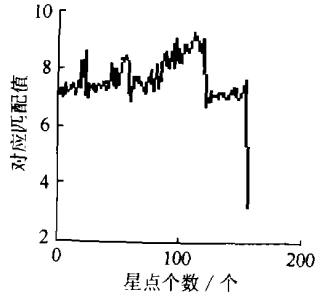
基于 HD 的星图识别算法具有高的识别率、强的抗噪性,这在文献[6]中已有有力的验证,本文主要从识别的速度和抗旋转性 2 个方面进行了深入的研究和仿真实验.

以光轴指向(90°,0°)为例,以下 4 幅图仿真显示,在利用匹配识别门限时有限点集 B 中参与识别的元素个数由不利用门限时的 272 降到了 161;加入旋转时对基于 HD 识别法影响很大,但对基于 HD 的改进识别法没有什么影响.

图 1,图 2 通过选取恰当的匹配门限进行识别对基于 HD 的识别法和基于 HD 的改进的识别法都大大的提高了识别速度;图 1 显示最佳匹配值为 3.079 1;图 2 显示的最佳匹配值为 1.576 6.

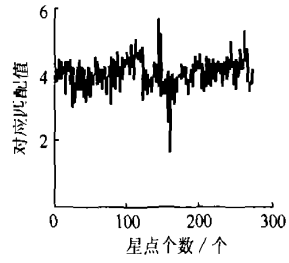


a　没设门限

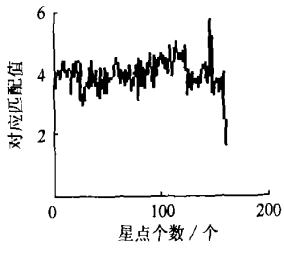


b　设定门限

图 1　基于 HD 识别法,无旋转, $T_L=10$ 时的识别曲线



a　没设门限



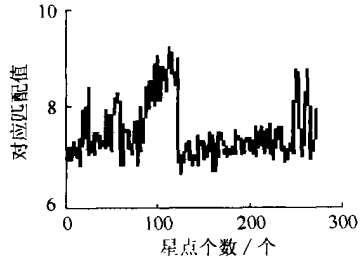
b　设定门限

图 2　基于 HD 改进识别法,
无旋转, $T_L=10$, $T_l=0.3$ 时的识别曲线

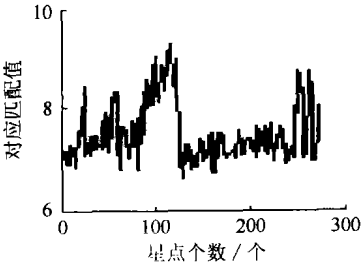
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图3,图4分别加以5°的旋转进行识别,从图3看出旋转对HD识别法影响特别大,匹配值由无旋转时的3.0791增大到了6.6460;图4显示最佳匹配值为1.5766同没有旋转时的相等.

综上,仿真实验表明,同基于HD的识别算法相比较,改进的算法不但在最佳匹配程度上有很大的提高,这对定姿非常重要;而且在抗旋转性上也有很好的特性;统计表明,同时在采用了匹配识别门限后,识别速度可提高一倍.

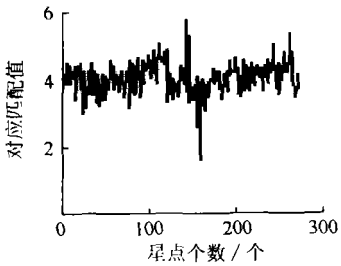


a 没设门限

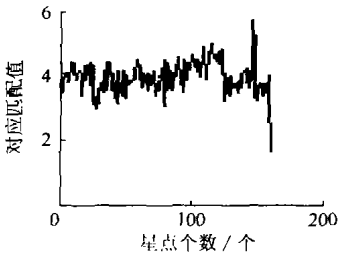


b 设定门限

图3 基于HD识别法,旋转5°,$T_L=10$时的识别曲线



a 没设门限



b 设定门限

图4 基于HD改进识别法,旋转5°,$T_L=10$,$T_l=0.3$时的识别曲线

4 结束语

本文在基于HD星图识别法的基础上提出了一种改进的识别算法.这种算法采用有向距离和绝对距离相结合来保证识别率,抗噪性和消除旋转误差;同时还通过选取恰当的匹配门限来提高识别的速度,本算法已经用在同时代电子的合作项目中,半物理实验显示它具有很高的工程实用价值.

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 Xiaogang, *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] 汪亚明. 图像匹配的鲁棒型Hausdorff方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2002, 14(3): 238~241
Wang Yaming. Image matching based on robust hausdorff distance [J]. Journal of Computer Aideddesign & Computer Graphics, 2002, 14(3): 238~241(in Chinese)

[5] 沈庭芝,臧铁飞,朱少娟,等. 一种改进的部分HD检测技术和遗传算法在图像匹配识别中的应用[J]. 通信学报,2001, 22(12): 112~116
Shen Tingzhi, Zang Tiefei, Zhu Shaojuan, *et al*. One technique of improved Hausdorff distance and genetic algorithm in image matching recognition [J]. Journal of China Institute of Communications, 2001, 22(12): 112~116(in Chinese)

[6] 王广君,房建成. 基于Hausdorff距离的星图识别算法[J].北京航空航天大学学报, 2005,31(5):508~511
Wang Guangjun, Fang Jiancheng. New star pattern recognition approach based on HD distance [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(5): 508~511(in Chinese)

[7] Hye-Young Kim, John L Junkins. Self-organizing guide star selection algorithm for star trackers: thinning method [J]. IEEE AC paper #52, 2001, 5: 2275~2283

[8] Roelof W H, Van Bezooijen. True-sky demonstration of an autonomous star tracker[A]. In: Proc SPIE[C], 1994. 2221: 156~168

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net