

## L2 范式距离的星图识别方法

王泽文<sup>1,2</sup>, 王广君<sup>1,2,3\*</sup>, 刘小波<sup>1,2</sup>, 余锦华<sup>1,2,4</sup>

- (1. 中国地质大学(武汉)自动化学院, 湖北 武汉 430074;
2. 复杂系统先进控制与智能自动化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;
3. 地球探测智能化技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉, 430074;
4. 东京工科大学 工程学院, 日本 东京, 192-0982)

**摘要:** 在 Hausdorff 距离的基础上, 提出一种不依赖于星敏感器的旋转方向和焦距等因素的星图识别方法。在构造 Hausdorff 距离的数据点集合时, 采用基于 L2 范数对应的相对欧氏距离作为集合元素, 解决星敏感器滚动对星图识别的影响; 另一方面, 由于受星敏感器焦距的影响, 星敏感器图像与标准参考图也会存在误差。在构造标准数据点元素时, 考虑到如果一个数据点集包含另一个数据点集, 在这两个数据点集之间至少有两个数据点之间的 L2 范式距离是相同的。对 L2 范式 Hausdorff 距离进行比例化处理, 每个集合中的相对空间距离除以本集中最小的相对空间距离, 构成一种新的数据点集。这种方法不需要对星敏感器图像由于焦距不同进行标定, 避免了星敏感器焦距对星图识别的影响。给出了距离的计算公式和实现步骤, 并给出了实验结果。结果表明: 在星敏感器转动、尺度变换等情况下, 该算法可以正确得到星图识别结果, 从而获得星敏感器的姿态信息。

**关键词:** 星传感器; 星图识别; Hausdorff 距离; 自主导航

**中图分类号:** V448.22      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200040

## Star map recognition method of L2 normal distance

Wang Zewen<sup>1,2</sup>, Wang Guangjun<sup>1,2,3\*</sup>, Liu Xiaobo<sup>1,2</sup>, She Jinhua<sup>1,2,4</sup>

- (1. School of Automation, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China;
2. Hubei key Laboratory of Advanced Control and Intelligent Automation for Complex Systems, Wuhan 430074, China;
3. Engineering Research Center of Intelligent Technology for Geo-Exploration, Ministry of Education, Wuhan 430074, China;
4. School of Engineering, Tokyo University of Technology, Tokyo 192-0982, Japan)

**Abstract:** Based on the Hausdorff distance (HD), a star map recognition method was presented that did not depend on the rotation direction and focal length of the star sensor. When constructing the data point set of Hausdorff distance, the relative Euclidean distance corresponding to norm L2 was used as the set element to solve the influence of star sensor rolling angle on star pattern recognition. On the other hand, due to the influence of the focal length of star sensor, there were errors between the star sensor image and the standard reference image. When constructing standard data point elements, if a data point set contained another data point set, the L2 normal distance between at least two data points between the two data point sets was the same. Therefore, the relative distance was scaled, and the relative spatial distance in each set was divided by the smallest relative spatial

收稿日期:2020-01-12; 修订日期:2020-02-04

基金项目:中国地质大学(武汉)中央高校基本科研业务费资助项目(G1323519204)

作者简介:王泽文(1994-),男,硕士生,主要从事控制理论与应用研究。Email: wangzewen@cug.edu.cn

通讯作者:王广君(1963-),男,教授,博士,主要从事天文导航、遥感图像处理、电子信息技术和智能仪器方面的教学和研究工作。

Email: gjwang@cug.edu.cn

distance in the set to form a new set of data points. This method was not necessary to calibrate the star sensor image due to different focal lengths influence. The calculation formula, implementation steps and the simulation results were presented. The experimental results show that the algorithm can obtain the star map recognition results correctly and get the attitude information of star sensor in the case of star sensor rotation, scale transformation, etc.

**Key words:** star sensor; star pattern recognition; Hausdorff distance; autonomous navigation

## 0 引言

天文导航由于不存在累计误差常被用于飞行器的自主导航或组合导航中。飞行器自主天文导航的重要技术就是星图的快速识别方法,通过实时星图识别方法获取飞行器的姿态。星图识别算法很多,有基于 Hash Map 的星图识别算法<sup>[1]</sup>、自主星图识别算法<sup>[2-4]</sup>、基于 KL 变换算法<sup>[5]</sup>、多特征匹配算法<sup>[6]</sup>、三角形匹配算法<sup>[7-10]</sup>以及其他算法<sup>[11-15]</sup>。目前研究最多的是三角形匹配算法。但是,三角形匹配算法受星图提取位置精度的影响容易造成误识别。特别是在大视场情况下计算速度慢,实时性差。近年来基于 Hausdorff 距离的星图识别算法由于其抗干扰能力强被广泛关注<sup>[16-17]</sup>。在对基于 Hausdorff 距离的星图识别方法研究中,主要是由星敏传感器获得图像和参考星库中星图中恒星的空间位置构成两个不同的数据点集,然后通过计算两个点集之间的 Hausdorff 距离进行识别。在理想情况下,当一个数据点集包含另一个数据点集时,它们之间的 Hausdorff 距离为零。但是,由于星敏传感器的成像不仅与方向有关,而且与星敏传感器的滚动角和光学焦距都有关系。当星敏传感器发生转动时,恒星在星敏传感器图像中的位置会发生变化;当星敏传感器的焦距不同时,图像的大小也不同。参考文献<sup>[16-17]</sup>是利用 L1 范数距离进行局部 Hausdorff 识别,但是, L1 范数对应的距离是有方向的矢量距离,尽管识别准确性高,但是,需要有先验知识,适合于与惯导结合的组合导航中。如果没有先验知识,利用 L1 距离范数进行的 HD 距离计算方法需要考虑星敏传感器旋转问题,其计算速度大大降低。为了使 HD 距离具有更好的鲁棒性,文中介绍了一种利用 L2 范数的 HD 距离星图识别方法,这种方法不依赖于星敏传感器的旋转和星敏传感器焦距,可满足任意状态下自主导航对星敏传感器的要求。

## 1 Hausdorff 欧氏距离

Hausdorff 距离是两个点集之间相似度的一种描述方法,假设两个点集分别为  $A=\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$  和  $B=\{b_1, b_2, \dots, b_M\}$ ,  $A$  和  $B$  之间的双向 Hausdorff 距离描述为:

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

式中:  $h(A, B)$  称为  $A$  到  $B$  的单向 Hausdorff 距离,  $h(B, A)$  称作  $B$  到  $A$  的单向 Hausdorff 距离,它们分别表示为:

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (2)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (3)$$

这里  $\|\cdot\|$  是一种距离范式,参考文献<sup>[16-17]</sup>中采用 L1 范式距离作为度量。L1 范式是指向量中各个元素绝对值之和,由于向量对方向非常敏感,其应用受到限制。当采用 L2 范式时,对应的是欧氏距离。欧氏距离没有方向性,对星敏传感器旋转不敏感。从公式(1)可以看出,双向  $H(A, B)$  距离取单向  $h(A, B)$  距离和  $h(B, A)$  距离的最大值,这个值越大表示  $A$  和  $B$  的不相似性越大。反过来,这个值越小,表示  $A$  和  $B$  的相似性越大。参考文献<sup>[16-17]</sup>中数据点集是利用图像的空间直角坐标进行构造,即:

$$A = \{(x_i - x_1, y_i - y_1) | br_{ai}\}, (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

即点集  $A$  是由第一颗星为原点的相对星图坐标构建,其中  $br_{ai}$  为图像灰度,它与星库中的星等相对应。在实际应用中,星图的空间坐标依赖于星敏传感器的转动方向。在惯性与天文组合导航或已知先验知识的情况下,这种方法具有很强的星图识别能力。但是,在纯自主天文导航中,飞行器状态一旦丢失,它需要很长时间对所有星敏传感器滚动角进行计算才能重新获得星敏传感器的状态,自主恢复能力较差。如果采用范数 L2 对应的欧氏距离构造数据点集  $A$ ,则可以消除滚动角对星图识别的影响。由此,公式(4)改为:

$$A = \{d_{ai}|br_i\} (i = 1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

式中:  $d_{ai} = \sqrt{(x_i - x_1)^2 + (y_i - y_1)^2}$  表示星图中任意一恒星点到第一颗恒星点之间的欧氏距离。

## 2 参考星图中点集 B 的构建方法

在星图识别中,参考星图是由标准星库构成的。标准星库中的恒星一般是由经纬度坐标和星等构成。为了构造与星传感器星图一样的点集,需要把星库中天球坐标系下的经纬度坐标转换成星传感器的平面坐标。由于恒星到地球的距离可以认为是无穷远处,对恒星方位角来说,从地心赤道坐标系到星传感器坐标系的转换无需顾及坐标平移所带来的误差。设原点  $O$  指向地心,  $O_x$  轴指向春分点,  $O_z$  轴指向北极,  $O_y$  为右手准则拇指方向,从天球坐标系到平面坐标系转换的基本公式为<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} x = \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{FOV_x}{2}} \times \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ y = \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{FOV_y}{2}} \times \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$x \in \left(-\frac{N_x}{2}, \frac{N_x}{2}\right), y \in \left(-\frac{N_y}{2}, \frac{N_y}{2}\right) \quad (7)$$

式中:  $(N_x, N_y)$  分别是在  $x$  和  $y$  方向上星库中恒星的经纬度坐标转换成星传感器平面坐标系后的最大像素数,它与星传感器的焦距有关;  $(FOV_x, FOV_y)$  分别是在  $x$  和  $y$  方向上的视场角;  $(\delta, \alpha)$  为恒星的经纬度坐标;  $(\delta_0, \alpha_0)$  为作为参考方向的经纬度坐标。用上面同样的方法可以构造相对于参考星点  $K$  的 L2 范式距离点集  $B$ :

$$B_k = \{d_{bjk}|br'_j\}, (j = 1, 2, \dots, M), (1 \leq k \leq M) \quad (8)$$

式中:  $d_{bjk} = \sqrt{(x_{bj} - x_{bk})^2 + (y_{bj} - y_{bk})^2}$  表示任意一点到参考点  $K$  之间的欧氏距离;  $br'_j$  为与星等对应的图像灰度,需要与传感器图像进行定标,文中在星图识别中忽略了星等的影响。参考点  $K$  不同,点集  $B$  也不同,遍及星库中所有恒星作为参考点,可得到  $M$  个不同的点集  $B$ 。在实际计算中,为了提高计算速度,

根据星传感器视场角大小,选取参考星周围锥形范围内的星即可。

## 3 L2 范式距离点集 A 和 B 的构建

上面算法尽管对星传感器的滚转角没有要求,但是,从公式 (6) 中可以看出,构造参考星图时与参数  $(N_x, N_y)$  有关,也即与星传感器的焦距有关。在进行图像匹配时需要对不同的星传感器进行单独标定,既麻烦又带来一定的标定误差。为此,文中在上述基础上采用相对距离方法构建数据点集  $A$  和  $B$ 。

假设在星传感器中恒星距离构成的点集  $A$  中,距离  $\{d_{ai}\}, (i = 1, 2, \dots, N)$  是由小到大排序的,星传感器  $A$  的点集可以改写为:

$$A = \left\{ \frac{d_{ai}}{d_{a2}} | br_{ai} \right\} = \left\{ \left( 0, 1, \frac{d_{a3}}{d_{a2}}, \dots, \frac{d_{aN}}{d_{a2}} \right) | br_{ai} \right\}, \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

因为集合中  $A$  中的元素是所有星传感器中对应所有星的位置相对于第一颗星之间的欧氏距离,所以,第一个值为零。

同样,假设星传感器的图像不变,参考星图在星传感器坐标系中表示为:

$$\begin{cases} x = a \times \frac{N_x}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{FOV_x}{2}} \times \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} = a \times x_0 \\ y = a \times \frac{N_y}{2} \times \frac{1}{\tan \frac{FOV_y}{2}} \times \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} = a \times y_0 \end{cases} \quad (10)$$

则,点集  $B$  中点数据元素可以表示为:

$$d_{jk} = a \times d_{0jk} \quad (11)$$

同样,对标准点集  $B$  中相对  $k$  的 L2 范式距离排序,并改写  $B$  为:

$$B_k(j) = \left\{ \frac{d_{bjk}}{d_{b2k}} | br'_j \right\} = \left\{ \left( 0, \frac{d_{b3k}}{d_{b2k}}, \dots, \frac{d_{bMk}}{d_{b2k}} \right) | br'_j \right\}, \quad (j = 1, 2, \dots, M) \quad (12)$$

从公式 (10) 可以看出,相对距离  $B_k(i)$  中的元素不依赖于  $a$ 。  $B_k(i)$  表示以参考星  $k$  为方向,所有相对于  $k$  的欧氏距离排序,然后除以序列  $i$  的欧氏距离。

## 4 基于 Hausdorff L2 范式距离的星图识别算法

对于范数 L2 点集  $A$  中任意一数据点到点集  $B$  之间的最小 Hausdorff 距离定义为:

$$D_{\min(i,k)}(A, B) = \min\left\{\left\{w_1|d_{ai1} - d_{bjk}|^m + w_2|br_{ai} - br_{bj}|^m\right\}\right\} \quad (13)$$

式中:  $W_1$  和  $W_2$  为权值;  $m$  为一个距离范数, 当  $m=2$  时对应的距离就是欧氏距离;  $D_{\min(i,k)}$  表示集合  $A$  中的任意点到参考点为  $k$  的  $B$  集合的最小 Hausdorff 距离集合。如果集合  $B$  包含集合  $A$ , 理论上,  $A$  中的任何点到  $B$  中的最小距离都为零。星敏传感器不同指向对应的星图中的恒星个数不同, 取最小 Hausdorff 距离的平均和作为评判标准, 表示为:

$$HD_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{\min(i,k)}, \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

理论上当星图匹配时,  $HD_k$  应为零。考虑到噪声影响, 取  $HD_k$  式中最小值对应的  $k$  即为识别结果。

$$HD_{\min} = \min\{HD_k\} \quad (15)$$

## 5 实验及分析

根据上述方法, 在没有任何先验知识的情况下, 根据上面方法进行了实验。实验过程中, 没有考虑星等的影响, 相当于  $w_2$  为零。仿真实验中, 星敏传感器视场角为  $6^\circ \times 6^\circ$ 。为了提高计算速度, 选取大于二倍以上星敏传感器视场区域作为参考区域进行计算。识别过程中, 随机选取星敏传感器的方向, 并对识别结果进行统计分析, 其具体计算步骤如下:

- (1) 在星库中, 任意选取一颗星作为星敏传感器的方向, 并选取该星  $6^\circ \times 6^\circ$  区域内的所有恒星;
- (2) 利用公式 (6) 产生星敏传感器平面图像  $\{x_{ai}, y_{ai}\}$ , 然后把该图像旋转任意角度, 并对每个像素增加 0.5 像素的随机噪声, 生成仿真用的星星敏传感器图像;
- (3) 利用公式 (9) 生成星敏传感器星图相对距离集  $A$ ;
- (4) 在星库中, 任意选取第  $k$  颗星作为标准星图的参考方向, 并选取该星  $30^\circ \times 30^\circ$  区域内的所有恒星作为参考星;
- (5) 利用公式 (12) 产生参考星相对距离集  $B$ ;

(6) 利用公式 (13) 计算相对于  $k$  的最小 Hausdorff 距离  $HD_k(i)$ ;

(7) 重复步骤 (4)~(6), 直到计算完所有参考星为止。

(8) 利用公式 (14) 求最小距离和;

(9) 利用公式 (15), 求 Hausdorff 最小距离和的最小值, 此最小值对应的参考星即为星敏传感器对应的恒星。

理想情况下, 星敏传感器图像信息与星库中某一位置信息完全一致时, Hausdorff 最小距离为零, 所有星的 Hausdorff 最小距离和也为零。图 1 为在星库中, 经纬度坐标为 (30, 5)、视场大小为  $6^\circ \times 6^\circ$  时利用公式 (6) 转换得到的星敏传感器坐标系下的平面图像, 此图像模拟作为星敏传感器图像。图 2 为利用 L2 范式距离计算得到的在所有标准星库中获得的最小 Hausdorff 距离和, 纵坐标为最小 Hausdorff 距离和, 横坐标为恒星序列数。标准星库中星等从 -1.09~6.95 之间的恒星个数为 14 581 颗。从图中可以看出: 当星图匹配时, 最小 HD 距离和为零, 其他位置的 HD 距离和非常大, 从计算结果中很容易获得识别结果。但是, 由于标准星库中恒星个数太多, 计算速度非常慢。为了提高计算速度, 验证该算法的有效性, 在标准星库中任意选取了  $30^\circ \times 30^\circ$  的局部区域作为标准参考区域进行实验。为了对 L1 范式距离和 L2 范式距离两种方法的识别结果进行比较, 在相同条件下分别对两种方法进行了仿真实验。图 3 和图 4 分别为利用 L1 范式距离和 L2 范式距离在局部星库的识别结果。从图中可以看出, 如果没有旋转, 无论是利用 L1 范式距离方法或是利用 L2 范式距离方法, 其对应的最小 Hausdorff 距离和几乎都为零, 而其他位置的最小 Hausdorff 距离和非常大, 并且具有随机性, 说明在没有旋转情况下, 两种方法都可以获得正确的识别结果。图 5 为在旋转角分别为  $0.5^\circ$ 、 $1.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.0^\circ$  情况下利用 L1 范式距离对应的最小 Hausdorff 距离和。最小 Hausdorff 距离和随着旋转角的增加而增加, 这说明随着旋转角的增加, 可识别性降低。图 6 为不同旋转角下利用 L1 范式距离计算的正确识别位置 Hausdorff 距离和与次最小 Hausdorff 距离和之间的差值, 此差值越大表明可识别性越好 (纵坐标为正确识别位置的最小 HD 减次最小 HD 距离)。从图中可以看出: 当旋转角度超

过 1.5°时,采用 L1 范式距离计算的最小 Hausdorff 距离识别方法的可识别性大大下降,当旋转角超过 2°时几乎无法识别。说明利用 L1 范式距离进行星图识别时,星敏感器不能随意转动。一旦发生较大转

动,通过 L1 范式距离的 Hausdorff 识别方法将无法获得正确的识别结果。图 7 为在 L2 范式距离下星敏感器转动对最小 Hausdorff 距离识别结果的影响。在旋

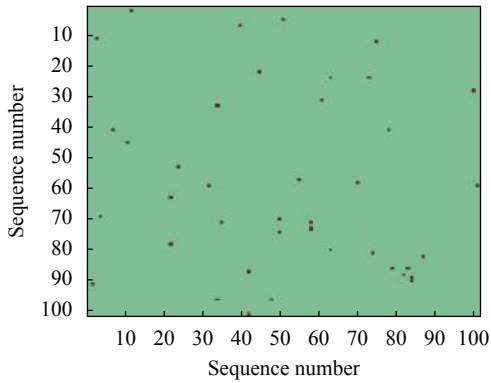


图 1 模拟星敏感器图像

Fig.1 Image of analog star sensor

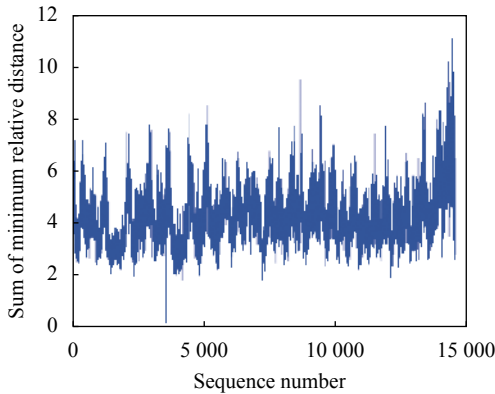


图 2 标准星库下基于 L2 范式距离的识别结果

Fig.2 Recognition results based on L2 normal form distance under standard star Library

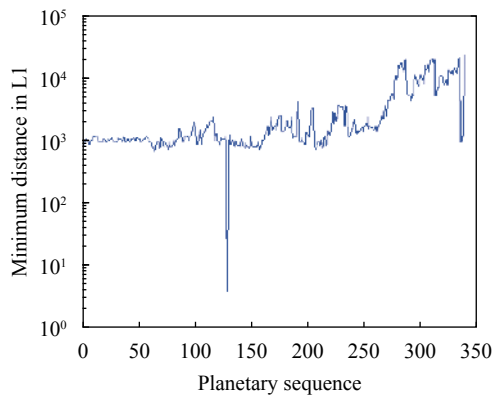


图 3 L1 范式下的最小 Hausdorff 距离和

Fig.3 Sum of minimum Hausdorff distance based on L1 normal form

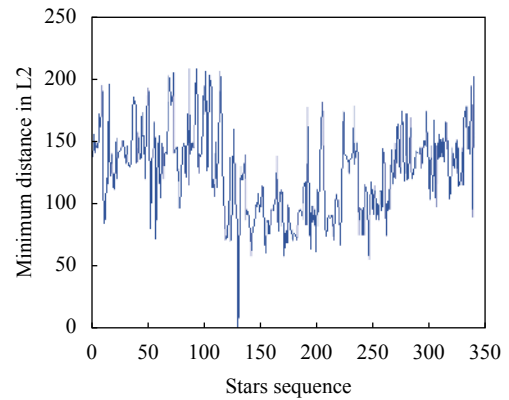


图 4 L2 范式下的最小 Hausdorff 距离和

Fig.4 Sum of minimum Hausdorff distance based on L2 normal form

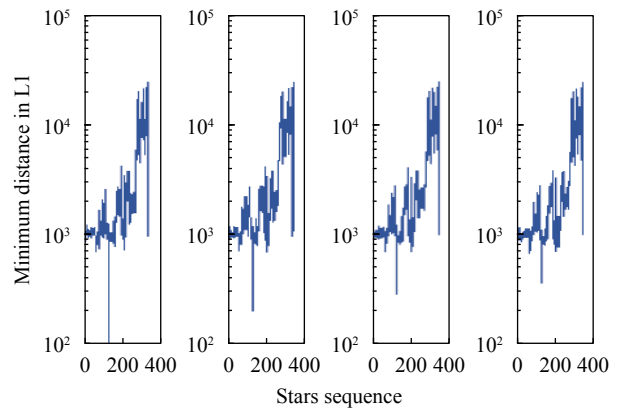


图 5 L1 范式下滚动角分别为 0.5°、1.0°、1.5°和 2.0°时的最小 HD 距离

Fig.5 Minimum HD distance at rolling angle is 0.5°, 1.0°, 1.5°and 2.0° in L1 normal form respectively

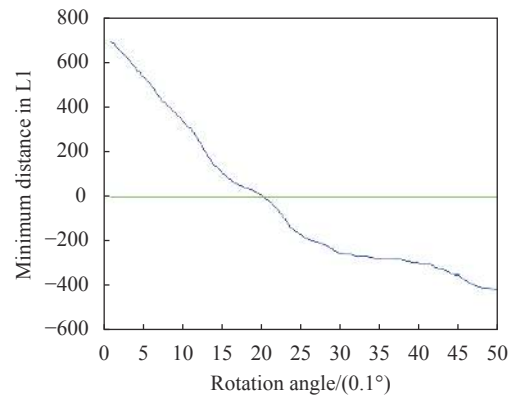


图 6 L1 范式下可识别性随滚动角的变换

Fig.6 Transformation of identifiability with rolling angle under normal form L1

转角分别为 0.5°、1.0°、1.5°和 2.0°情况下,最小 Hausdorff 距离和的位置没有任何改变。图 8 为在 0~180°旋转情况下,利用 L2 范式距离计算的最小 Hausdorff 距离和与次最小 HD 距离和之间的差值,这个差值几乎是一条水平线。这个差值说明,利用 L2 范式进行的最小 Hausdorff 距离识别方法不受旋转角的影响。沿星敏感器轴向无论如何转动,都可以获得正确的识别结果。所以,在利用 L2 范式距离对星图识别时,不用考虑前一刻的状态。星敏感器焦距不同获得的星敏感器图像大小也不同。图 9、10 分别显示了星敏感器图像大小不一致时两种范式距离的识别结果。图 9 是星敏感器图像大小分别为原始图像的 1、1.05、1.1、1.15 倍时利用 L1 范式距离得到的相对最小 Hausdorff 距离,从图中可以看出,当图像大小发生变换时,图像的匹配特征快速消失,可识别性变差。图 10 是星敏

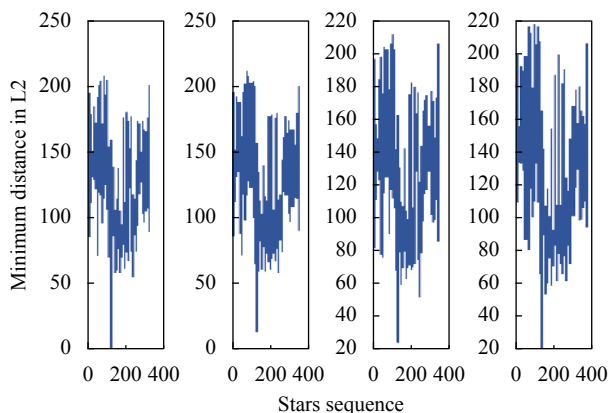


图 7 转动角 0.5°、1.0°、1.5°和 2.0°时,L2 范式下的最小 HD 距离  
Fig.7 Minimum HD distance under normal form L2 when rotation angle is 0.5°, 1.0°, 1.5° and 2.0° respectively

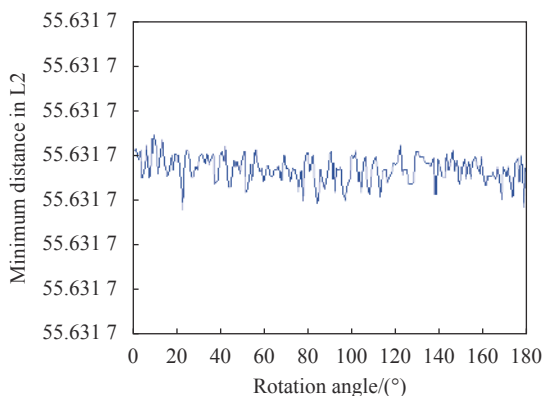


图 8 L2 范式下 HD 最小距离与次最小距离之间的差  
Fig.8 Difference between the HD minimum distance and the secondary minimum distance in L2 normal form

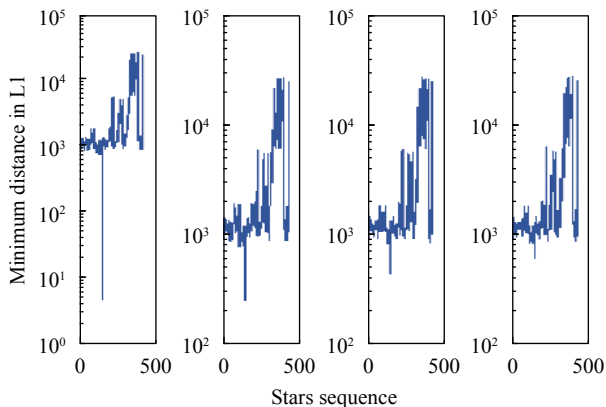


图 9 星敏感器图像膨胀 1、1.05、1.10、1.15 倍时,L2 范式下的最小 HD 距离

Fig.9 Minimum HD distance under normal form L2 when the image of star sensor expands 1,1.05, 1.10, 1.15 times respectively

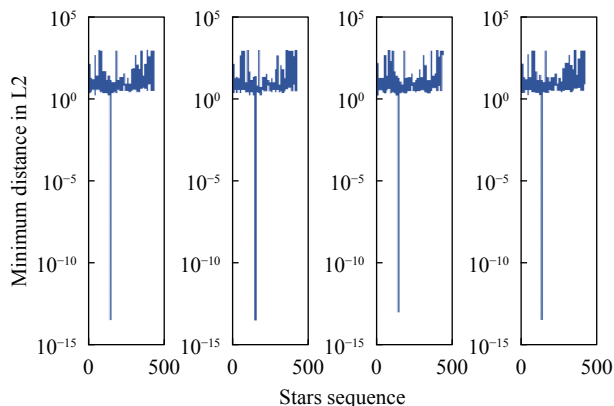


图 10 星敏感器图像膨胀 1、2、3、4 倍时,范式 L2 范式下的最小 HD 距离

Fig.10 Minimum HD distance under L2 normal form when the image of star sensor expands 1, 2, 3, 4 times respectively

感器图像大小分别为原始图像的 1、2、3、4 倍时利用 L2 范式距离得到的相对最小 Hausdorff 距离,从图中可以看出,无论图像大小如何变换,图像的匹配特征基本不变。这说明 L2 范式相对距离方法不需要对星敏感器的焦距进行校正。

## 6 结论

文中研究的基于 L2 范式 Hausdorff 星图识别方法与基于 L1 范式的 Hausdorff 距离识别方法不完全相同,基于 L1 范式的 Hausdorff 距离识别方法对星敏感器的初始状态有较高要求,适合于与惯导的组合导航中。文中研究的基于 L2 范式的 Hausdorff 距离识

别方法既可以不考虑星敏感器光学焦距的影响,也不用考虑星敏感器滚动带来的影响,具有完全自主的星图识别能力。

#### 参考文献:

- [1] Wang G, Li J, Wei X. Star identification based on Hash Map [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(4): 1591-1599.
- [2] Pham M D, Low K S, Chen S S. An autonomous star recognition algorithm with optimized database [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 1467-1475.
- [3] Li J, Wei X, Zhang G J. Iterative algorithm for autonomous star identification [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2015, 51(1): 536-547.
- [4] Zhu Hailong, Liang Bin, Zhang Tao. All-sky automation star identification algorithm based on ordered star points set [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1577-1586. (in Chinese)  
朱海龙, 梁斌, 张涛. 基于星点有序集的全天球自主星图识别算法[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1577-1586.
- [5] Zhao Y, Wei X G, Li J, et al. Star identification algorithm based on k-l transformation and star walk formation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(13): 5202-5210.
- [6] Wang Jun, He Xin, Wei Zhonghui, et al. Fast star identification algorithm based on multi-feature matching [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(8): 1870-1879. (in Chinese)  
王军, 何昕, 魏仲慧, 等. 基于多特征匹配的快速星图识别[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1870-1879.
- [7] Zhao Y, Wei X G, Li J, et al. A fast triangular star map recognition algorithm [J]. *Journal of Applied Optics*, 2018, 39(1): 71-75.
- [8] Liu Yan, Xi Hongxia, Cao Jun, et al. A star pattern recognition method based on self-organizing map network and triangle algorithm [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2018, 38(4): 1-10. (in Chinese)  
刘焯, 席红霞, 曹珺, 等. 结合自组织映射网络及三角形算法的星图识别方法[J]. *中国空间科学与技术*, 2018, 38(4): 1-10.
- [9] Li X L, Yang J H, Zhang L, et al. Further optimization of selected observation triangles technique before star pattern matching [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(1): 76-81.
- [10] Zong Hua, Liu Yan, Gao Xiaoying, et al. All-sky triangle algorithm of stars identification aided by star coordinates [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2018, 39(9): 322045. (in Chinese)  
踪华, 刘焯, 高晓颖, 等. 星点坐标辅助的全天区三角形星图识别算法[J]. *航空学报*, 2018, 39(9): 322045.
- [11] Gao Yang, Zhao Jinyu, Chen Tao, et al. Radial neighbor feature with compensate code star pattern recognition algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1627-1634. (in Chinese)  
高扬, 赵金宇, 陈涛, 等. 添加补偿码的快速径向伴星特征星图识别[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(6): 1627-1634.
- [12] Li B H, Sun Q, Zhang T S. A star pattern recognition algorithm for the double-FOV star sensor [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2015, 30(8): 24-31.
- [13] Gou Bin, Cheng Yongmei, Zhao Mingyan, et al. Multi-stage star image identification method of three field-of-view star sensor [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2019, 37(3): 541-546. (in Chinese)  
苟斌, 程咏梅, 赵明艳, 等. 三视场星敏感器的多级星图识别算法[J]. *西北工业大学学报*, 2019, 37(3): 541-546.
- [14] Sun L, Jiang J, Zhang G J, et al. A discrete HMM-based feature sequence model approach for star identification [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(4): 931-940.
- [15] Yoon H, Paek S W, Lim Y, et al. New star pattern identification with vector pattern matching for attitude determination [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(2): 1108-1118.
- [16] Wang Guangjun, Fang Jiancheng. New star pattern recognition approach based on Hausdorff distance [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(5): 508-510. (in Chinese)  
王广君, 房建成. 基于Hausdorff距离的星图识别方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, 31(5): 508-510.
- [17] Quan W, Xu L, Fang J C. A new star identification algorithm based on improved Hausdorff distance for star sensors [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(3): 2101-2109.