

采用混合粒子群算法的星图识别方法

毛海岑, 刘爱东, 王 亮

(华中光电技术研究所, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为提高大视场高灵敏度星敏感器的星图识别速度和识别成功率, 提出了一种基于混合粒子群算法的星图识别方法, 该方法首先根据星图中星点的灰度信息确定候选识别主星集合; 然后选择该集合中的一个星点为圆心, 以一定角距为半径画圆, 将圆内的所有星点构成特征数据集合; 然后利用混合粒子群算法对圆内的星点进行快速路径寻优; 最后利用最优路径长度进行索引, 并利用最优路径中前三个星点间的角距以及它们的星等信息进行匹配识别; 实验结果表明, 与现有识别方法相比, 该方法具有高的识别率, 良好的实时性和鲁棒性, 且所需的导航星库容量小。

关键词: 星图识别; 导航星库; 混合粒子群算法; 遗传算法; 模拟退火

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)11-3762-05

Star recognition method based on hybrid particle swarm optimization algorithm

Mao Haicen, Liu Aidong, Wang Liang

(Huazhong Institute of Electro-Optics, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new star recognition method based on hybrid particle swarm algorithm was developed to increase recognition speed and success rate for large field high sensitivity star sensors. Firstly, several candidate recognition main stars were determined with the gray information. Then a circle was drawn with the given circle radius, and all stars in the circle were selected to constitute a characteristics data collection. Hybrid particle swarm algorithm was used for fast path optimization to construct recognition characteristics. Finally, the optimal path length was used for indexing to search matching star, and preceding three star angular distance and magnitude in the optimal path were used for matching recognition to enhance recognition speed and success rate. Experimental results show that, compared with existing recognition methods, star recognition method based on hybrid particle swarm optimization algorithm has a higher recognition rate, good real-time and robustness to noise, and it requires small star database capacity.

Key words: star recognition; navigation star database; hybrid particle swarm optimization; genetic algorithm; simulated annealing

收稿日期: 2014-03-08; 修订日期: 2014-04-11

基金项目: 总装基金; 华中科技大学青年教师基金(2013QN052)

作者简介: 毛海岑(1973-), 男, 博士, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。Email: 42205974@qq.com

0 引言

星敏感器是天文导航系统中的主要工作部件,能为飞行器提供高精度的姿态信息,且误差不随时间积累,具有体积小、运算速度快、测量精度高、自主性强等优点。其中星图识别算法是星敏感器的核心,而星图识别的关键是利用星图中的星点分布信息,尽可能地为每颗导航星构造唯一的特征模式,使得在有噪声的情况下,仍能较好地区分每一颗导航星,实现导航星的快速匹配识别。因此,识别速度和识别成功率成为衡量星图识别算法的关键指标。

在星图识别方面,目前已有许多较为成熟的星图识别方法,如三角形算法^[1],凸多边形算法^[2],栅格算法^[3],基于神经网络的星图识别算法^[4],基于遗传算法的星图识别方法^[5],以及基于蚁群算法的星图识别方法^[6]等。其中三角形算法最为成熟,应用最为广泛,但该方法易产生冗余匹配。这些识别算法都取得较为良好的效果,但它们在识别速度、识别成功率、数据库大小以及对噪声的鲁棒性各有优劣。特别在大视场、高灵敏度的星敏感器条件下,由于光学系统畸变大、敏感星点多、星点质心提取困难等原因,识别速度和成功率更是明显降低。

粒子群优化算法^[7]是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1995 年受人工生命研究结果启发,在模拟鸟群觅食过程中的迁徙和群集行为中,提出了粒子群优化算法。传统粒子群优化算法局限于速度-位移更新算子,只适合于求解连续性问题。在此基础上,提出了混合粒子群算法^[8-10],使粒子群算法适用于离散及组合优化问题。

针对大视场高灵敏度星敏感器,首次将混合粒子群算法引入星图识别,利用该算法具有的路径寻优特点以及并行处理能力,构造导航星的特征模式,实现导航星的快速匹配识别。

1 基于混合粒子群算法的星图识别方法

混合粒子群优化算法(HPSO)的本质是利用粒子自身信息、个体极值信息以及全局极值信息,指导粒子下一步的迭代位置。将遗传操作算子作为粒子的更新策略,对数据集中的星点进行路径寻优,用于星点的快速匹配识别。

1.1 基于混合粒子群算法的路径寻优

星图识别方法主要利用混合粒子群算法的路径寻优特点,为导航星构造易于匹配识别的特征模式,实现导航星的识别。混合粒子群算法路径寻优就是寻找一条路径:将星图中确定区域内的导航星构造数据集合,然后从某个星点出发,经过所有星点且每个星点仅经过一次,最后回到出发点,使得走过的路径长度最短。

在路径寻优的过程中,需对特征数据集中的导航星进行编码,将粒子遍历所有导航星的顺序以自然数排列,作为粒子的解。假设特征数据集中共有 m 颗导航星,则粒子的解由 $1 \sim m$ 之间的整数排列而成。同时,取粒子遍历所有导航星的角距之和作为粒子的适应度函数。基于混合粒子群算法的快速路径寻优步骤如下。

(1) 初始化混合粒子群算法的参数,首先设定粒子个数 n ,规定迭代次数 N_{\max} ,然后随机产生 n 个初始解(初始路径),并计算各个粒子的适应度值,初始化各个粒子的个体极值,以及所有粒子的全局极值。

(2) 将粒子的当前解与个体极值进行交叉,具体交叉方法如下:对于粒子的当前解,随机选择一个交叉区域,删除解中与个体极值交叉区域相同的元素,然后将个体极值交叉区域中的元素插入粒子的当前解,得到一个新解。

(3) 将得到的新解与全局极值进行交叉,其交叉方法与步骤(2)中的方法一致。

(4) 将步骤(3)得到的新解进行变异。具体变异方法如下:为使路径长度之和达到最小,以较大的概率(概率大的更容易被选取)选取路径中相邻星点间距离较大的两个星点,然后在它们之间插入其他星点,得到变异后的新解。

(5) 个体极值更新,根据该粒子的适应度变化量,采用模拟退火机制确定是否接受该新值,更新粒子的个体极值。

(6) 全局极值更新,根据所有粒子的个体极值,确定全局极值和全局极值路径,若迭代次数大于规定迭代次数,则路径寻优结束,否则,返回步骤(2)。

1.2 导航星库构造

导航星库是恒星敏感器进行星图匹配识别的基本依据,装载于星敏感器的存储器中,其数据来源于基本星表(采用 SAO 星表,最大星等为 6.5),包含恒

星的编号、星等、赤经、赤纬。针对基于混合粒子群算法的星图识别方法,其导航星库的构造步骤如下。

(1) 选取导航星,导航星的选取应使导航星库具备较高的完备性、低冗余性以及较好的均匀性,其选取原则如下:从基本星表中选取导航星,尽可能覆盖整个天球,剔除星等变化较大的恒星以及恒星间角距小于某一值(一般取 5~7 个像素)的双星,得到用于星图识别的基本星表。

(2) 构造特征数据集合,选取基本导航星表中的每颗导航星为圆心,然后以给定角距 r 为半径画圆,将圆内所有的导航星组成特征数据集合,如图 1 所示。黑色表示亮度较暗的星点,白色表示亮度高的星点。

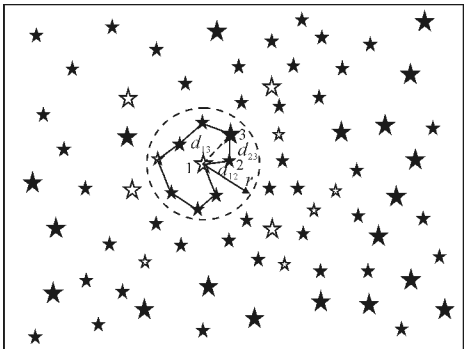


图 1 基于混合粒子群算法的路径寻优

Fig.1 Path optimization based on hybrid particle swarm algorithm

(3) 混合粒子群算法路径寻优,求取特征数据集合中两两导航星间的角距,然后以圆心处的导航星为起始点,利用混合粒子群算法进行路径寻优,得到最优路径,然后选取最优路径中离圆心最近的导航星为最优路径前进的下一颗导航星,得到最优路径中的前三颗导航星。

(4) 根据步骤(3)得到的最优路径,将最优路径长度升序方式存储,作为最优路径长度表。存储最优路径中前三颗导航星间的角距 d_{12} 与 d_{23} 以及这三颗星的赤经和赤纬信息,作为导航星的基本识别信息。同时存储最优路径中第一颗与第三颗导航星间的角距以及前三颗导航星的星等,以此作为星图识别的验证信息。

在星图识别过程中,采用二分查找法来实现导航星的快速检索与匹配。基于混合粒子群算法的星图识别方法的导航星库包括以下几个部分:最优路径长度表、角距识别星表以及识别验证星表。导航星库中各星表存储信息如表 1~3 所示。

表 1 最优路径长度表

Tab.1 Optimal path length

Optimal path length/(°)
...
11.030 192
11.453 998
11.607 923
...

表 2 识别验证表

Tab.2 Verification chart of recognition

Angle distance /(°)	Magnitude 1	Magnitude 2	Magnitude 3
...
4.516 492	5.7	5.2	6.3
3.090 185	6.3	6.5	5.8
2.203 262	5.4	6.4	6.4
...

表 3 角距识别表

Tab.3 Verification chart of angle distance

Angle distance /(°)	Angle distance /(°)	Ra 1	Dec 1	Ra 2	Dec 3	Ra 3	Dec 3
...
2.682 591	3.831 108	48.137 904	-57.321 636	45.903 517	-59.737 742	53.214 933	-61.016 722
2.761 853	5.601 960	47.819 796	-16.025 144	47.771 804	-13.263 681	49.671 696	-18.559 589
1.184 397	1.059 622	213.017 000	69.432 614	210.460 967	68.678 717	207.745 563	68.314 947
...

1.3 圆半径 r 的自适应确定

星图识别是一种特征匹配算法,需要为导航星

构造唯一的特征模式,然后利用构造的特征实现导航星的匹配识别。基于混合粒子群算法的星图识别

方法在构造特征模式时,需要给定圆半径 r ,而圆半径 r 的大小影响圆内导航星的个数,进而决定混合粒子群路径寻优的难易程度。

一般情况下,若半径 r 越大,则圆内星点个数越多,利用混合粒子群路径寻优的难度也越大,影响算法的识别速度和成功率;若半径 r 太小,则圆内的导航星个数可能太少,不利于构造唯一的特征模式,无法较好地实现导航星的匹配识别。为了提高识别算法的准确性和实时性,提出了一种自适应调整方法来确定圆半径 r 的大小,以保证混合粒子群算法的寻优规模。

为保证星图识别算法的准确性和实时性,要求圆内星点数目不至于太多或太少,文中对以上两种情况下的圆半径 r 进行调整。当圆内星点个数小于 6 时,增大圆半径 r 为 5° 。对于圆内星点个数大于 25 的导航星,减小圆半径 r 为 2.5° 。

通过自适应调整策略确定圆半径,圆内的星点数目基本在 4~25 之间,能够较好地利用星图中的星点信息进行匹配识别,同时能够保证算法的识别速度。

1.4 基于混合粒子群算法的星图识别

对于一幅星图,经过星图预处理、星体质心提取得到星图中星点的位置坐标后,接下来就进行星图识别。基于混合粒子群算法的星图识别方法的流程如下。

(1) 确定候选识别主星,选取的识别主星应具有亮度大且离视场边缘角距均大于圆半径 r ,其选取方法如下:首先选取星图中所有离视场边缘角距大于圆半径 r 的星点;然后对这些星点按灰度进行排序;最后选择灰度大的几颗星点作为候选识别主星,并构成识别主星集合。

(2) 星点快速路径寻优,在候选识别主星集合中,依次选择离视场中心最近的候选识别星作为圆心,然后以角距 r 为半径画圆,把圆内的星点构成数据集,并利用混合粒子群算法对集合中的星点进行路径寻优。根据混合粒子群算法的路径寻优结果,记录最优路径长度,计算最优路径中前三颗导航星两两间的角距值(d_{12}, d_{23}, d_{13})以及三颗导航星的星等。

(3) 星图匹配识别,利用最优路径长度采用二分查找法在最优路径长度表中查找与该值相近的导航星,并把它们作为候选识别星;然后利用最优路径中的角距信息 d_{12} 和 d_{23} 进行匹配,得到匹配结果。基于

混合粒子群算法的星图识别方法特征构造方式如图 2 所示。

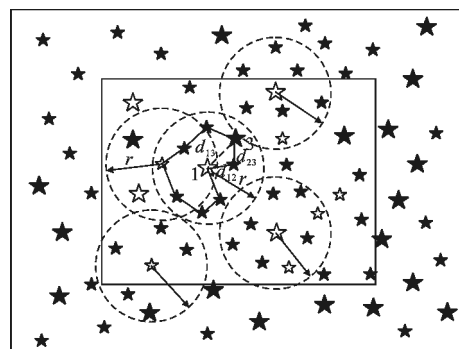


图 2 混合粒子群星图识别算法特征构造

Fig.2 Characteristics constitution based on hybrid particle swarm algorithm

(4) 导航星验证,对步骤(3)得到的匹配结果进行验证。若匹配结果中仅含一颗导航星,则利用步骤(2)得到的角距 d_{13} 进行验证,进一步确认识别是否成功。若没有与导航星匹配上,则认为此次星图匹配失败。若存在多颗导航星匹配上,利用步骤(2)得到的 d_{13} 进一步匹配。对于进一步匹配的结果,如果仅有一颗导航星匹配上,则认为此次匹配成功;如果没有导航星匹配上,则认为此次匹配失败;如果仍有多颗导航星,再利用最优路径中前三颗导航星的星等信息进行匹配,若无导航星匹配或仍有多颗导航星匹配上,则认为此次识别失败,否则识别成功。

(5) 识别结果判断,若星图识别成功,则此幅星图识别结束;若识别失败,此幅星图识别失败次数加 1,若识别失败次数大于 N ,则此次星图识别失败,否则返回步骤(2)再次识别。

2 实验仿真与分析

星敏感器的视场大小为 $20^\circ \times 20^\circ$,星敏感器面阵大小为 1024×1024 ,像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$,采用 SAO 星表作为基本导航星表,星敏感器能敏感到的最大星等为 6.5,经剔除双星后的基本导航星表共有 8996 颗导航星,包含恒星的编号、星等、赤经和赤纬信息。基于混合粒子群算法的路径优化的粒子种群个数为 80,最大迭代次数 200。

导航星库由最优路径长度表、角距识别表以及识别验证表等组成,其中最优路径长度表容量为 97 kB,角距识别表容量为 802 kB,识别验证表容量为 220 kB。

2.1 算法识别率与位置误差的关系

由于在大视场、高灵敏度的恒星敏感器条件下,光学系统畸变大、敏感星点数多且星点质心提取困难,因而星点位置误差是影响识别算法识别率的主要因素。因此,文中对星点位置误差对识别成功率的影响进行了仿真分析。

在仿真实验中,随机产生 1 000 幅星图,取星点位置误差 $0^{\circ}\sim 120^{\circ}$,分别采用基于混合粒子群算法的星图识别方法、传统三角形算法以及改进神经网络星图识别方法进行测试。三种识别算法在不同星点位置误差下的识别率如图3所示。

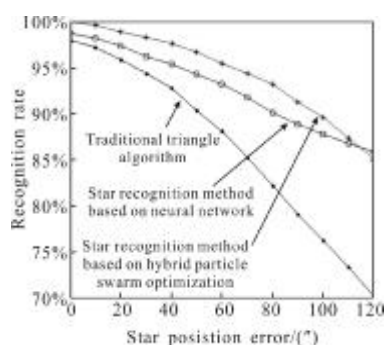


图3 算法识别率与星点位置误差的关系

Fig.3 Relation between recognition rate and error of star position

由图3可以看出,当星点位置误差小于 110° 时,基于混合粒子群算法的星图识别方法识别成功率最高,改进的神经网络算法识别率次之,传统三角形算法的识别率最低。当星点位置误差大于 110° 时,基于混合粒子群算法的星图识别方法的识别率开始小于改进的神经网络识别方法,但优于传统三角形算法。

2.2 识别算法的速度

对于算法的识别速度,在 Intel Core i3 处理器 2.39 GHz PC 机上,采用 VS2010 进行测试,基于混合粒子群算法的星图识别方法从特征模式的构造到星图的匹配识别,所需的平均时间为 75 ms 左右。文中采用二分查找法对最优路径值进行搜索与匹配,其平均匹配时间不足 1 ms。其匹配识别速度比传统三角形算法快,与改进的神经网络星图识别算法相当,但在导航星的特征构造上,三种识别算法的速度从小到大依次是传统三角形算法、改进的神经网络星图识别方法以及基于粒子群的星图识别方法。

3 结 论

文中提出了一种基于混合粒子群算法的星图识别

方法,适合于大视场、高灵敏度星敏感器条件下的星图识别。该方法利用混合粒子群算法对星点集合进行快速路径寻优,对最优路径值采用二分查找法进行检索,从而实现星图的快速匹配与识别,最后对识别的结果进行验证。该方法克服了三角形识别算法由于特征维数低而易陷于冗余匹配的缺点,以及基于神经网络识别算法因输入维数大造成的导航星库容量大的不足。仿真实验结果表明,基于混合粒子群算法的星图识别方法具有较好的实时性和鲁棒性,识别成功率高,且所需导航星库的容量小,检索速度快。

参考文献:

- [1] Padgett C, Kreutz-Delgado K, Udomkesmalee S. Evaluation of star identification techniques [J]. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 20(2): 259-267.
- [2] Liu Chaoshan, Huang Xin, Liu Guangbin. A convex polygon star pattern identification algorithm for star sensor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(9): 7-9. (in Chinese)
- [3] Hyunjae Lee, Hyochong Bang. Star pattern identification technique by modified grid algorithm[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2007, 43(3): 1112-1116.
- [4] Yang Jing, Wang Liang. An improved star identification based on neural network [C]//The 10th IEEE International Conference on Industrial Informatics, 2012: 25-27.
- [5] Paladugu L, Williams B G, Schoen M P. Star pattern recognition for attitude determination using genetic algorithms [C]//The 17th AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2003.
- [6] Quan Wei, Fang Jiancheng. A star recognition method based on the adaptive Ant Colony algorithm for star sensors [J]. *Sensors*, 2010, 10(3): 1955-1966.
- [7] Eberhart R C, Kennedy J. A new optimizer using particle swarm theory [C]//Proc Sixth Int Symposim on Micro Machine and Human Science, 1995: 39-43.
- [8] Gao Haibing, Zhou Chi, Gao Liang. General particle swarm optimization mode [J]. *Chinese Journal of Computer*, 2005, 28(12): 1980-1987. (in Chinese)
- [9] Gao Shang, Han Bin, Wu Xiaojun, et al. Solving traveling salesman problem by hybrid particle swarm optimization algorithm[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(11): 1286-1289. (in Chinese)
- [10] Wang Kangping. Particle swarm optimization for traveling salesman problem [C]//Proceedings of the Second International on Machine Learning and Cybernetics, 2003: 2-5.