

# 基于 PGA 的全天自主星图识别算法研究\*

李立宏 宋申民 张福恩  
(哈尔滨工业大学控制工程系 150001)

**摘 要** 将星图识别视为一种组合优化问题, 并利用并行遗传算法来求解。该算法不仅在思路上有所创新, 而且所需导航星座数据库的容量较小。仿真结果表明, 该算法可以得到近似线性的加速比, 且比现有的星图识别算法具有更好的鲁棒性和实时性。

**关键词** 并行遗传算法, 星图识别, 导航星座数据库, 鲁棒性

**分类号** TP 273

## Research on All-sky Autonomous Star Field Identification Algorithm Based on PGA

*Li Lihong, Song Shenmin, Zhang Fuen*  
(Harbin Institute of Technology)

**Abstract** Star-field-identification was treated as combinatorial optimization problem, and parallel genetic algorithm was used to solve it. The idea of this new algorithm was innovative, and the database of guide-star pattern used by it was small. Simulation results indicate that nearly linear speed-up was achieved, and it was more robust and real-time than the existing algorithms.

**Key words** parallel genetic algorithm, star-field-identification, database of guide-star pattern, robustness

## 1 引 言

卫星技术向小型化方向发展, 是星载传感器、探测器等部件日益小型化、模块化、智能化的必然结果, 同时也是一种新的发展趋势。CCD 星跟踪器体积小、指向精度高、无姿态累积误差、自主性强, 利用它作为小卫星的姿态测量仪器无疑符合这种发展趋势。

早在 30 多年前, 人们就提出利用恒星建立飞行器姿态的概念, 并对其进行了系统的研究, 星图识别技术就是其中的关键问题之一。目前的星图识别算法主要有三角形算法、匹配组算法和栅格算法<sup>[1]</sup>。三角形算法所需数据库容量大且易出现冗余匹配; 匹配组算法复杂, 在识别过程中所需的运算量和存储容量都比较大; 栅格算法因要求视场中有较多的恒

星而对星跟踪器的性能有较高的要求。因此, 人们一直在探索实时性和鲁棒性均较好的星图识别算法。本文将并行遗传算法引入这一领域, 不失为一种有益的尝试。

## 2 导航星座数据库的构造

建立导航星座数据库是星图识别技术的基础工作之一。该数据库应满足完备性高、冗余性低、容量小和易于搜索等要求, 一般是根据星跟踪器的性能以及星图识别算法的要求来选取导航星和构造数据库<sup>[2]</sup>。本文用于仿真试验的星跟踪器具有以下性能:  $8 \times 8$  圆视场,  $512 \times 512$  CCD 面阵, 灵敏度为 6.5 视星等, 可同时处理的恒星数为 8 颗。根据这些性能, 从基础星表 SAO 中选取星等在  $[0.1 \sim 6.5]$  范围内的 5 953 颗恒星作为导航星来构造数据库, 其容量约为 0.6M K, 包括导航星表、区间信息表和星

对信息表 3 部分, 分别描述如下:

1) 导航星表: 由挑选出的 5 953 颗导航星排列而成, 每颗导航星含赤经、赤纬 2 项信息;

2) 区间信息表: 将星对角距每 10 (角秒) 分成一个区间, 共得到 2 844 个区间, 区间信息表由 2 844 个长整数构成, 记录每个区间中第一个元素在星座数据库中的位置偏移量;

3) 星对信息表: 根据角距将导航星对的信息存入相应的区间, 记录的信息为构成星对的 2 颗恒星的星等及其在导航星表中的排列位置。

基于该数据库匹配每个星对的过程如下: 假设观测星对为  $(m_{o1}, m_{o2}, d_o)$ , 其中  $m$  代表星等,  $d$  代表角距。由角距  $d_o$  确定星对的位置区间, 在这个区间及其相邻区间, 若存在导航星对信息  $(m_{g1}, m_{g2}, l_1, l_2)$  与观测星对的对应星等满足约束条件, 即  $|m_{oi} - m_{gi}| \leq \text{tmag}$  (tmag 为星跟踪器的星等误差门限,  $i = 1, 2$ ), 则认为该导航星对与观测星对相匹配。对单个观测星对而言, 可能没有匹配星对, 也可能存在多个匹配星对, 即存在冗余匹配或误匹配, 但多个星对结合在一起, 则可有效地消除这些不利因素的影响。

### 3 遗传算法

遗传算法(GA) 是一种新兴的优化算法。GA 固有的并行性和大规模并行机以及分布式系统的快速发展, 促使许多学者研究 GA 的并行化问题<sup>[3]</sup>。本文采用扩展分布式遗传算法(EDGA), 其基本思想是: 根处理器对整个群体执行全局选择, 而处理器单元则对相应子群体执行局部搜索, 即采用分布式子群体的概念来获取较好的加速比, 同时采用全局搜索策略以获取较好的最优解。

下面结合具体应用, 说明如何选取编码方案、适应度函数和遗传算子。本文选取星跟踪器视场中星对角距排列的矢量作为个体, 角距为实数变量, 因此采用实数编码。这样就不必进行码制转换, 而且可以直接利用对角距的约束条件。假设有效视场中有  $N$  颗观测星, 则可构造出  $M = N * (N - 1) / 2$  个星对  $\{m_{oi}, m_{oj}, d_{oij}\}$ 。其中, 下标  $o$  表明数据是观测到的原始数据,  $1 \leq i < N, 1 < j \leq N, i < j$ 。个体可表示为

$$p(t) = \{d_{12}(t), \dots, d_{ij}(t), \dots, d_{(N-1)N}(t)\} \quad (1)$$

其中,  $t$  为遗传代数,  $d_{ij}(t)$  满足  $|d_{ij}(t) - d_{oij}(t)| \leq \text{tdis}$  (tdis 为星跟踪器的角距误差门限)。为便于描述, 将个体表示为

$$p(t) = \{d_1(t), d_2(t), \dots, d_M(t)\} \quad (2)$$

其中每个分量的值与式(1) 的对应分量相同。

遗传算子除采用最优个体保留策略外, 选择、交叉和变异算子分别选择如下:

选择算子采用整体退火选择策略, 将 Boltzmann 机制引入 GA 的生存机制。若新个体的适应值为  $f$ , 变动的阈值为  $F$ , 当  $f > F$  时, 接受新个体; 否则以一定的概率  $p = \exp((f - F)/T)$  接受新个体, 其中  $T$  为热力学温度。仿真实验时,  $F$  取为群体适应度的均值,  $T$  取为 0.5。

交叉算子采用部分算术杂交, 先从父代中随机选取 2 个个体

$$P_f^{(1)} = \{d_{f1}^{(1)}, d_{f2}^{(1)}, \dots, d_{fM}^{(1)}\} \quad (3)$$

$$P_f^{(2)} = \{d_{f1}^{(2)}, d_{f2}^{(2)}, \dots, d_{fM}^{(2)}\} \quad (4)$$

然后从它们中选择部分分量, 如第  $k$  个分量以后的所有分量, 并生成  $M - k$  个  $(0, 1)$  区间的随机数  $\alpha_{k+1}, \alpha_{k+2}, \dots, \alpha_M$ 。则子代分别为

$$P_s^{(1)} = \{d_{f1}^{(1)}, \dots, d_{fk}^{(1)}, (1 - \alpha_{k+1})d_{fk+1}^{(1)} + \alpha_{k+1}d_{fk+1}^{(2)}, \dots, (1 - \alpha_M)d_{fM}^{(1)} + \alpha_M d_{fM}^{(2)}\} \quad (5)$$

$$P_s^{(2)} = \{d_{f1}^{(2)}, \dots, d_{fk}^{(2)}, (1 - \alpha_{k+1})d_{fk+1}^{(2)} + \alpha_{k+1}d_{fk+1}^{(1)}, \dots, (1 - \alpha_M)d_{fM}^{(2)} + \alpha_M d_{fM}^{(1)}\} \quad (6)$$

变异算子采用均匀性变异策略, 在父代个体中随机选择一个分量, 假设为第  $k$  个分量, 然后在其定义域中随机均匀地取一个数代替它。当父代为  $P_f = \{d_{f1}, \dots, d_{fk}, \dots, d_{fM}\}$  时, 子代为  $P_s = \{d_{f1}, \dots, d_{fk}, \dots, d_{fM}\}$ ,  $|d_{fk} - d_{ok}| \leq \text{tdis}$ ,  $d_{ok}$  为  $d_{fk}$  对应的原始测量值。

适应度函数定义为

$$f(t) = \max(g_1, g_2, \dots, g_M) \quad (7)$$

$$g_i = G_i, \quad 1 \leq i \leq M \quad (8)$$

$$l(g_i, g_j) = \begin{cases} 1, & \text{两个导航星对有公共端点且} \\ & \text{满足视场中对应的几何关系} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $G_i$  为与个体的第  $i$  个分量匹配的导航星对的集合,  $1 \leq i < M, 1 < j \leq M, i < j$ 。

### 4 算法描述及仿真结果

基于 EDGA 的全自主星图识别算法可以简

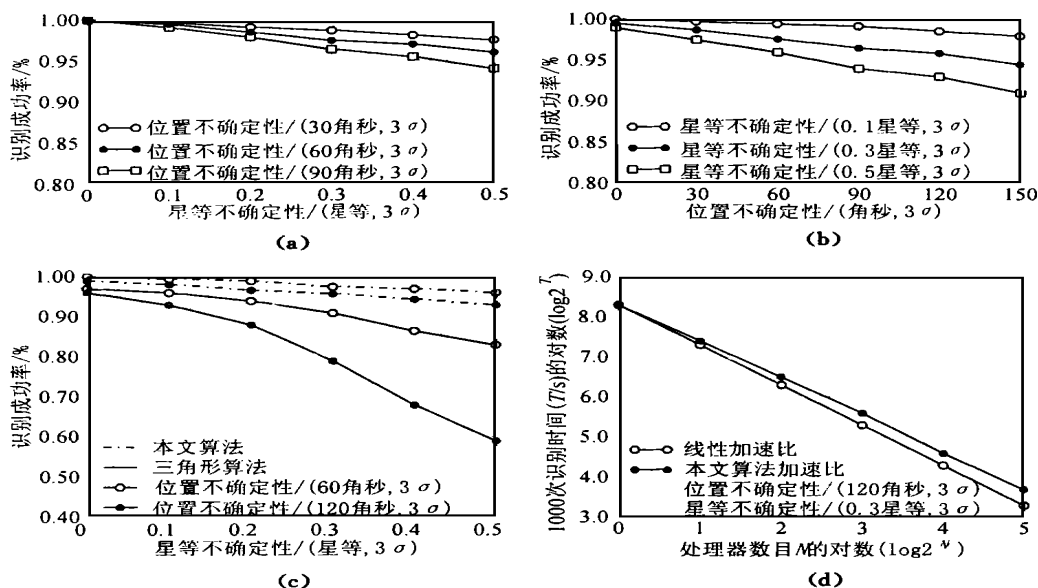


图 1 仿真结果

- (a) 识别成功率与星等不确定性的关系
- (b) 识别成功率与位置不确定性的关系
- (c) 本文算法与三角形算法性能对比
- (d) 本文算法加速比曲线

单地描述如下:

1) 根处理器根据由 CCD 星跟踪器观测视场得到的角距向量初始化种群  $P_0$ , 选择控制参数, 将  $P_0$  的一个备份划分成若干子群体, 并分配到各处理器单元(PE) 上;

2) 根处理器对  $P_0$  执行串行遗传算法, 各 PE 对自己的子群体也执行串行遗传算法; 所有的处理器都根据个体所包含的角距信息搜索星座数据库, 并计算个体适应度值, 判断是否匹配成功, 匹配成功或达到最大遗传代数则退出;

3) 经过一定的代数后, 根处理器将自身进化得到的新种群  $P_1$  分成若干子群体, 并分配到各 PE 上, 而将各个 PE 上进化得到的子群体归并为新的总群体, 重复 2)。

本文利用 Monte Carlo 方法<sup>[4]</sup>, 在不同的星等不确定性和位置不确定性条件(假定不确定性服从均值为 0, 方差为  $\sigma$  的正态分布) 以及不同处理器数目下, 每次随机产生 1 000 个视轴位置。对算法的识别成功率和识别时间进行统计, 并与传统三角形算

法进行比较, 仿真结果如图 1 所示。

可以看出, 本文算法具有较为满意的鲁棒性。由于传统星图识别算法都是串行实现的, 因此没有给出识别时间的对比曲线。而事实上, 即使将本文算法串行实现, 其实时性也优于三角形算法。另外, 本文算法达到了近似线性的加速比, 而没有完全达到线性加速比的主要原因, 是存在通信延时和各处理器间需要同步运行。

## 5 结 论

本文将并行遗传算法引入全天自主星图识别, 在局域网上的仿真结果表明可以得到近似线性的加速比。该算法不仅克服了三角形算法数据库容量大、易出现冗余匹配和对测量误差敏感的缺点, 而且算法的鲁棒性和实时性得到了显著改善。另外, 在视场中导航星较小的情况下, 达到了栅格算法所能达到的识别成功率, 从而克服了栅格算法对星跟踪器性能要求较高的缺点。

(下转第 752 页)

## 4 结 语

本文将粗集理论应用到基于案例的推理系统,充分利用案例库中冗余属性的简化,形成案例的多个索引进行检索,不仅有效地解决了具有不确定性问题,而且提高了系统的性能。该方法不需要任何先验知识,简单易行,为基于案例的推理系统提供了一条新的途径,具有广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 方明,李天太,杨军全,等. 基于案例的不确定检索模型的研究. 控制与决策, 1999, 14(1): 93~96
- 2 袁小红,王珏. 基于案例的推理——综述与分析. 模式识别与人工智能, 1995, 8(12): 18~29
- 3 Z Pawlak. Rough sets, theoretical aspects of reasoning about data. Nowowiejska 15/19, Waeaaw. Poland, 1990
- 4 曾黄麟. 粗集理论及其应用. 重庆:重庆大学出版社, 1996

- 5 Wojciech Ziarko. Variable precision rough set model. J of Computer & System Science, 1993, 46(1): 39~59
- 6 李天伟,戴建设. 基于案例系统的一种案例标引和获取方法及算法. 控制与决策, 1997, 12(1): 25~29
- 7 J Dougherty, R Kohavi, M Sahami. Supervised and unsupervised discretization of continuous features. In: Proc of the 12th Int Conf on Machine Learning. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1995. 194~202
- 8 J W Guan, D A Bell. Rough computational methods for information systems. Artificial Intelligence, 1998, 105: 77~103

### 作 者 简 介

王亚英 女, 1973年生。上海交通大学自动化系博士生。研究领域为人工智能与智能控制,粗集理论及应用等。

邵惠鹤 男, 1936年生。上海交通大学教授,博士生导师。研究方向为工业过程模型与优化控制,智能控制理论研究及应用等。

(上接第746页)

### 作 者 简 介

代冀阳 男, 1966年生。南昌航空工业学院讲师,北京航空航天大学第七研究室博士研究生。主要研究方向为鲁棒控制,智能控制及其应用。

孙秀霞 女, 1962年生。空军工程大学工程学院副教授,博士。主要研究方向为鲁棒控制,  $H$  控制及其应用。

毛剑琴 女, 1940年生。北京航空航天大学第七研究室教授,中国自动化学会常务理事,博士。主要研究领域为智能控制与智能辨识理论及应用,鲁棒控制与自适应控制理论及应用。

林 岩 男, 1955年生。北京航空航天大学第七研究室副教授,博士。主要研究领域为鲁棒与自适应控制。

(上接第749页)

### 参 考 文 献

- 1 C Padgett, K K Delgado, S Udomkesmalee. Evaluation of star identification techniques. J of Guidance, Control and Dynamics, 1997, 20(2): 259~267
- 2 P Kudva, A Throckmorton. Preliminary star catalog development for the earth observation system AMI (EOS-AMI) mission. J of Guidance, Control and Dynamics, 1996, 19(6): 1332~1336
- 3 潘正君,康立山,陈毓屏. 演化计算. 北京:清华大学出版社, 1998. 132~147
- 4 M S Scholl. Star-field identification for autonomous attitude determination. J of Guidance, Control and Dynamics, 1995, 18(1): 61~65

### 作 者 简 介

李立宏 男, 1971年生。1994年在哈尔滨工业大学控制工程系获学士学位,现为该系博士研究生。主要研究方向为计算机网络,导航技术及人工智能。

宋申民 男, 1968年生。1996年在哈尔滨工业大学控制工程系获工学博士学位,现为该系副教授。主要研究方向为鲁棒控制,神经网络、遗传算法在智能控制中的应用等。

张福恩 男, 1936年生。1961年毕业于哈尔滨工业大学,现为该校控制工程系教授,博士生导师,美国数学学会会员。主要研究领域为仿真转台技术与设备,导航技术与设备,计算机控制工程等。