

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.017

基于改进遗传算法的空间机械臂操作序列规划

韩放^{1,2}, 刘传凯^{1,2}, 孙军^{1,2}, 蒋晓寒^{1,2}, 朱容琪^{1,2}

(1.北京航天飞行控制中心,北京 100094; 2.航天飞行动力学技术重点实验室,北京 100094)

摘要:空间机械臂执行在轨服务操作任务过程中,操作点数量繁多、存在复杂逻辑约束,且受自由度冗余影响,操作点间路径代价不唯一,造成最优操作序列规划非常困难。为此,本文提出一种基于改进遗传算法的空间冗余机械臂操作序列规划方法,首先建立空间冗余机械臂执行多点作业任务的构型转移网络模型,将操作序列规划归结为复杂化的旅行商问题。其次,采用可变长度片段随机交叉和操作点所属构型随机变更的方式对遗传算法进行改进,并且在适应度计算中引入操作点连通性代价,从而适应空间冗余机械臂操作序列的全局最优搜索。最后,以七自由度空间机械臂执行在轨多点巡检任务为例开展仿真试验。结果表明,通过该方法可有效地对操作序列进行优化从而大幅降低总路径代价,相较于传统遗传算法的运算效率更高且寻优能力更强,证实了该方法的可行性。

关键词:空间机械臂;在轨服务;操作序列;旅行商问题;遗传算法

中图分类号: TP243 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2026)01-0183-10

Operation Sequence Planning for Space Manipulator Based on Improved Genetic Algorithm

HAN Fang^{1,2}, LIU Chuankai^{1,2}, SUN Jun^{1,2}, JIANG Xiaohan^{1,2}, ZHU Rongqi^{1,2}

(1. Beijing Aerospace Control Center, Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory of Science and Technology on Aerospace Flight Dynamics, Beijing 100094, China)

Abstract: During the process of the space manipulator performing on-orbit service operation tasks, a large number of operation points and complex logical constraints exist. They are affected by the redundancy of degrees of freedom, and the path costs between operation points are not unique. Therefore, it is very difficult to plan the optimal operation sequence. This paper proposes an operation sequence planning method for spatially redundant robotic arms based on an improved genetic algorithm. Firstly, a configuration transfer network model is established for the spatially redundant robotic arm to perform multi-point operation tasks, and the operation sequence planning is reduced to a complex traveling salesman problem. Secondly, the genetic algorithm is improved by randomly crossing variable-length segments and randomly changing the configuration to which the operation points belong. Moreover, the connectivity cost of the operation points is introduced in the fitness calculation, thereby adapting to the global optimal search of the spatially redundant robotic arm operation sequence. Finally, a simulation experiment is carried out taking the on-orbit multi-point inspection task performed by a seven-degree-of-freedom space manipulator as an example. Results show that the method can effectively optimize the operation sequence and significantly reduce the total path cost. Compared with the traditional genetic algorithm, it has higher operation efficiency and stronger optimization

基金项目:国家自然科学基金(62373034)。

收稿日期:2025-05-19;**修订日期:**2025-11-03

通信作者:刘传凯,男,高级工程师,E-mail: ckliu2005@163.com。

引用格式:韩放,刘传凯,孙军,等.基于改进遗传算法的空间机械臂操作序列规划[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2026,58(1):183-192. HAN Fang, LIU Chuankai, SUN Jun, et al. Operation sequence planning for space manipulator based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(1):183-192.

ability, demonstrating the feasibility of this method.

Key words: space manipulator; on-orbit service; operation sequence; traveling salesman problem (TSP); genetic algorithm

空间机械臂可在恶劣的太空环境中辅助或代替航天员完成设备维修、部件更换和载荷安装等操作,已成为当今空间站在轨服务的主要手段^[1-4]。特别是空间冗余机械臂因其运动灵活、有效作业空间大的特点,已成为航天强国研究和应用的热点。美国、加拿大和日本等国家均已研发了冗余空间机械臂系统并在国际空间站上投入使用,中国空间站机械臂目前已开展了 60 余次在轨服务任务。

相比于工业制造领域使用的机械臂,空间机械臂执行的在轨服务任务更加复杂,通常需要根据任务需求按照一定先后顺序前往多个目标作业点位执行不同类型的操作^[5],操作序列规划对于在轨服务任务安全高效实施具有重大意义。而其困难表现在以下两个方面:(1) 作业点数量繁多且存在逻辑约束,多重串联与并联关系组合形成复杂的转移网络,从中选取代价极小的序列完成全部操作任务存在困难;(2) 冗余机械臂的特性决定了其在单个操作点位处可选择不同的操作构型,使得操作点位之间的转移代价不唯一,进一步提升了操作序列规划的复杂程度。

机械臂的操作序列规划本质上是对操作任务的合理分配,在满足各项约束条件的基础上以代价极小为目标规划任务执行的先后顺序,国内外机器人领域的专家学者在此方面已开展了许多研究。目前,空间机械臂操作序列规划主要通过分层任务网络(Hierarchical task network, HTN)和启发式搜索算法实现^[6]。

HTN 方法将宏观的操作任务逐级分解为机械臂可执行的子任务或动作,有助于降低机械臂任务规划的复杂程度,被广泛应用于机器人领域。阎慧等^[7]考虑到空间机械臂捕获卫星任务中的环境和操作交互特性,详细描述了控制对象、操作行为以及资源约束的定义,给出了空间机械臂操作序列规划模型,但该模型在机器动作基元和交互行为库构建时仅考虑了在轨抓捕任务,向其他在轨服务任务推广应用的通用性较低。Stock 等^[8]以分层任务网络给出的任务分解结果为元约束,整合不同类型的效果、时间、资源以及路径代价等知识,生成机械臂的操作序列。王一帆等^[9]在分层任务网络中融合机械臂在轨环境和行为约束,将复杂的在轨操作任务分解为空间机械臂可直接执行的操作集合并形成操作序列,进而结合 A* 算法规划得到该序列下总距离最短的机械臂运动轨迹。吴凡等^[10]针对中

国空间站及空间站机械臂的运行特性,融合测控资源、飞控事件以及机械臂行为动作等领域知识构建分层任务规划模型,可将其在轨服务任务拆解为空间机械臂直接执行的操作集合并排布至可用测控区间,形成完整的操作序列。分层任务网络可以对复杂任务逐级分解得到机械臂多个操作点位,进而形成满足逻辑约束的操作序列,但无法保证生成综合代价极小的最优序列^[11]。

为进一步对机械臂操作序列进行优化,国内外研究人员在分层任务网络的基础上,采用启发式搜索算法在所有可行的操作序列中寻求最优方案。文献[12]基于旅行商问题(Traveling salesman problem, TSP)的求解思路,采用禁忌搜索算法优化机械臂的操作任务排序策略。贾庆轩等^[13]提出一种基于图规划的改进任务规划算法,考虑不同目标的机械臂任务执行策略,利用模拟退化算法得到优化的操作序列。Sun 等^[14]利用基于有向图和 K-均值的优化方法(Graph and K-means based optimization method, GK-OPM),通过对临近操作点位进行聚类并对操作序列进行剪枝,规划生产最优操作序列。Cao 等^[15]针对机械臂在动态非结构化环境中的操作序列规划问题,将操作点之间的路径长度作为遗传算法的适应度评估标准,对六自由度机械臂的操作序列进行了优化。Cheng 等^[16]采用自适应步长策略的快速搜索随机树算法,对各操作点位之间的先后顺序进行迭代优化,改善了操作序列盲目扩展和搜索效率低下的问题。赵素平^[17]分别利用蚁群算法和遗传算法,以末端执行器路径最优、任务总用时最优和能量消耗最优为目标,对多个冗余机械臂的任务分配方式和操作序列进行优化。启发式搜索算法可以在搜索空间中快速地得到相对优化的可行解,适用于机械臂在动态环境中的无碰撞路径规划,上述工作利用启发式搜索算法,一定程度上解决了空间机械臂由于工作场景复杂、任务需求多样、操作点位众多且规划空间庞大而规划求解寻优困难且效率低下的问题。

对于冗余机械臂而言,其自由度冗余的特性决定了在单个操作点位处具有多种可选构型,操作点之间构型转移代价不唯一,造成操作序列规划求解和寻优的困难程度进一步提高,如何对冗余机械臂执行复杂任务的操作序列进行优化是当前的研究重点。文献[18-19]考虑了冗余机械臂在单个任务点处构型选择不唯一的特性,在改进遗传算法中将

操作点序列和构型序列均作为染色体组成部分并独立进行遗传、交叉和变异操作,实现了多点操作任务序列的最优规划,但该算法建立在多个操作点之间无逻辑约束的前提下,无法满足空间冗余机械臂执行复杂在轨服务任务的规划要求,且染色体构成较为繁琐,复杂操作任务序列优化的计算效率偏低。

综上所述,复杂逻辑网络约束和转移代价不唯一确定问题是当前制约空间冗余机械臂操作序列规划的核心困难。针对上述问题,本文对当前主流的遗传算法进行改进从而适应空间冗余机械臂的操作序列规划工作:一方面以各操作点位的可选构型组成染色体,从而将操作点顺序优化问题和操作构型优选问题合并求解,减少寻优计算复杂度;另一方面改进了交叉和变异算子,交叉时片段长度和交叉位置随机可变,在变异中增加了同一操作点处构型选择的随机改变,提升种群基因丰富度从而提高优化性能。此外,在种群适应度评估中引入操作点逻辑连通性代价,从而确保操作序列满足逻辑网络约束。仿真实验结果表明,本文给出的方法可以在提升路径代价优化效果的同时提高运算速度。

1 方法建模

1.1 操作序列规划问题的数学描述

如图 1 所示,空间冗余机械臂的操作序列规划可以归结为一个复杂化的 TSP,即:根据在轨服务任务的要求,令机械臂末端抵达所有操作点位执行相应操作;每个操作点位只历经一次,且抵达不同操作点的顺序满足任务逻辑约束;在任意操作点位处,仅需选用其中一种构型,使得末端以期望的位姿执行操作;以整个运动过程的综合代价最小为目标规划机械臂执行各项操作的顺序以及每个操作点位处选用的构型。

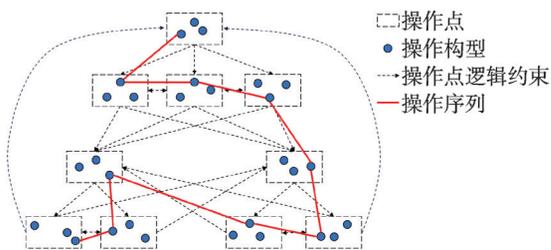


图 1 空间冗余机械臂操作序列规划

Fig.1 Operation sequence planning of space redundant manipulator

设机械臂操作点集合 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 对于给定的操作点 p_i , 机械臂的可选构型集合为 $V_i = \{v_1^i, v_2^i, \dots, v_m^i\}$, 机械臂由操作点 a 的构型 j 运动至操作点 b 的构型 k 所需代价计为 $c_{(a,j)(b,k)}$, 则操

作序列优化问题可描述为

$$\min \sum_{a \in P} \sum_{b \in P} c_{(a,j)(b,k)} \quad j \in V_a, k \in V_b \quad (1)$$

由于空间冗余机械臂通常以多关节联动模式运行,通过所有关节的转动使机械臂构型发生变化从而改变末端位置和姿态,因此本文在后续研究过程中以总关节角度变化量最小作为操作序列优化的代价函数,即

$$c_{(a,j)(b,k)} = |\theta_{j,i} - \theta_{k,i}| \quad (2)$$

式中: $[\theta_{j,1}, \theta_{j,2}, \dots, \theta_{j,f}]$ 表示机械臂处于构型 j 时的关节角序列, f 为机械臂自由度。

操作序列规划首先根据任务需求明确机械臂在各操作点处机械臂的末端位姿,随后通过逆运动学求解得到可选构型集合,然后利用路径规划算法规划操作构型间的转移路径并计算路径代价,最后以操作构型和路径代价作为算法输入对机械臂的操作序列进行迭代优化。本文针对机械臂操作序列规划问题展开研究,建立在以下假设基础上:

(1) 机械臂末端需要抵达的操作点的位置、姿态以及操作点逻辑约束为已知信息,由在轨服务任务的规划结果确定;

(2) 机械臂在某一操作点执行操作任务时,其可选构型集合为已知信息,可通过位置级运动学逆解确定,本文在后续研究过程中采用基于臂形角的逆运动学求解方法;

(3) 机械臂由一个操作点前往另一个操作点的构型转移代价为已知信息,可由轨迹规划算法给出,本文在后续研究过程中采用概率随机图(Probabilistic roadmap, PRM)算法规划机械臂由初始构型运动至目标构型的运动轨迹并给出总关节角度变化量。

1.2 机械臂运动学模型与位置级逆解

本文的研究对象为七自由度空间机械臂,采用对称分布的“肩 3+肘 1+腕 3”布局,肩部和腕部分别配备了俯仰、偏航和滚转关节,肘部配备俯仰关节,其 D-H 坐标系如图 2 所示,运动学参数如表 1 所示。

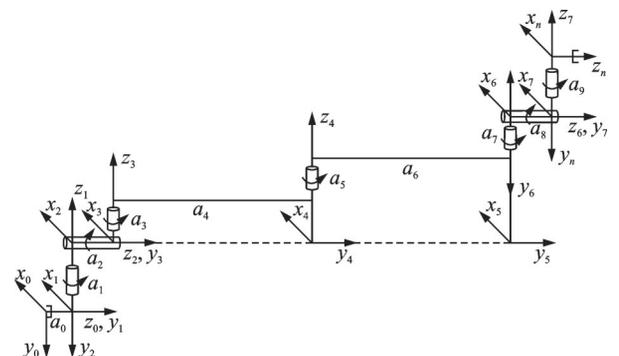


图 2 空间机械臂运动学模型

Fig.2 Kinematic model of space redundant manipulator

表 1 空间机械臂运动学参数

关节编号	d_i/mm	$\theta_i/(\text{^\circ})$	a_i/mm	$\alpha/(\text{^\circ})$
1	a_1	0	0	90
2	a_2	90	0	-90
3	0	0	a_4	0
4	$a_3 + a_5 + a_7$	0	0	0
5	0	0	a_6	90
6	a_8	-90	0	-90
7	a_9	0	0	0

受空间机械臂自由度冗余影响,理论上机械臂末端处于任意位姿时其构型具有无穷多解,常用的方法是将逆运动学求解转化为相对于待定参数的有限解问题。本文采用基于臂形角的运动学逆解方法,臂形角可以直观反映机械臂的构造形态,并且该方法可以满足空间机械臂遥操作对运动规划的实时性要求^[20]。如图 3 所示,空间机械臂的臂形角 ψ 定义为臂形面与参考平面之间的夹角,其中臂形面由关节 1 和关节 2 的轴线交点 S 、关节 6 和关节 7 的轴线交点 W 和坐标系 3 的坐标原点 E 确定,参考平面为关节 2 与关节 4 轴线平行时两条轴线所确定的平面。

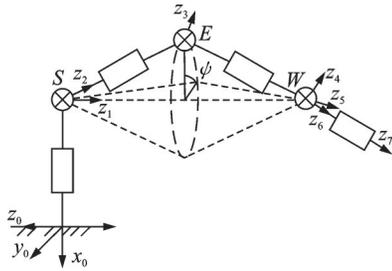


图 3 机械臂臂形角

Fig.3 Arm angle of manipulator

根据文献[21]给出的结论,基于臂形角的空间冗余机械臂逆运动学求解过程如下:令机械臂初始状态下的臂形角为 0,此时第 3 关节坐标系相对于基座坐标系的旋转矩阵为 ${}^0R_3^{\psi=0}$,则对于任意指定的臂形角 ψ ,机械臂肩部 3 个关节的角度可表示为

$$\begin{cases} \theta_1 = \arctan [2((a_{s23} \sin \psi + b_{s23} \cos \psi + c_{s23}) \sin \theta_2, \\ \quad (a_{s13} \sin \psi + b_{s13} \cos \psi + c_{s13}) \sin \theta_2)] \\ \theta_2 = \pm \arccos(-a_{s33} \sin \psi - b_{s33} \cos \psi - c_{s33}) \\ \theta_3 = \arctan [2(-(a_{s32} \sin \psi + b_{s32} \cos \psi + c_{s32}) \sin \theta_2, \\ \quad (a_{s31} \sin \psi + b_{s31} \cos \psi + c_{s31}) \sin \theta_2)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_{s13} 表示 A_s 矩阵中的第 1 行第 3 列的值, b_{s23} 和 c_{s33} 同理。 $A_s = ({}^0u_l)^\times ({}^0R_3^{\psi=0})$, $B_s = -[({}^0u_l)^\times]^2 ({}^0R_3^{\psi=0})$, $C_s = (I_3 + [({}^0u_l)^\times]^2 ({}^0R_3^{\psi=0}))$, I_3 为 3×3 的单位矩阵, $({}^0u_l)^\times$ 为从机械臂肩关节

指向腕关节的向量 l 的斜对称矩阵。

腕部 3 个关节的角度可根据机械臂运动学模型旋转矩阵的递推得到其解析表达式

$$\begin{cases} \theta_5 = \arctan [2((a_{w22} \sin \psi + b_{w22} \cos \psi + c_{w22}) \sin \theta_6, \\ \quad (a_{w21} \sin \psi + b_{w21} \cos \psi + c_{w21}) \sin \theta_6)] \\ \theta_6 = \pm \arccos(-a_{w23} \sin \psi - b_{w23} \cos \psi - c_{w23}) \\ \theta_7 = \arctan [2((a_{w33} \sin \psi + b_{w33} \cos \psi + c_{w33}) \sin \theta_6, \\ \quad (a_{w13} \sin \psi + b_{w13} \cos \psi + c_{w13}) \sin \theta_6)] \end{cases} \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} A_w = {}^0R_7^T \cdot ({}^0u_l)^\times ({}^0R_3^{\psi=0}) \\ B_w = -{}^0R_7^T [({}^0u_l)^\times]^2 ({}^0R_3^{\psi=0}) \\ C_w = {}^0R_7^T (I_3 + [({}^0u_l)^\times]^2 ({}^0R_3^{\psi=0})) \end{cases} \quad (5)$$

对于给定的末端位姿 p ,记其向基座坐标系转换的旋转平移矩阵为

$${}^0R_p = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & \gamma_x \\ n_y & o_y & a_y & \gamma_y \\ n_z & o_z & a_z & \gamma_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

则肘关节的角度可表示为

$$\theta_4 = \pm \arccos \left(\frac{A^2 + B^2 - a_3^2 - a_4^2}{2a_3a_4} \right) \quad (7)$$

式中 A 和 B 具体为(其中 $s = \sin, c = \cos$)

$$\begin{cases} A = -a_2 + a_6 [(a_x s \theta_1 - a_y c \theta_1) c \theta_7 - (n_x s \theta_1 - \\ \quad n_y c \theta_1) s \theta_7] + p_x s \theta_1 - p_y c \theta_1 - a_7 (s_x s \theta_1 - s_y c \theta_1) \\ B = a_6 [c \theta_7 ((a_x c \theta_1 + a_y s \theta_1) c \theta_2 + a_z s \theta_2) - \\ \quad s \theta_7 ((n_x c \theta_1 + n_y s \theta_1) c \theta_2 + n_z s \theta_2)] - \\ \quad a_7 [(s_x c \theta_1 + s_y s \theta_1) c \theta_2 + s_z s \theta_2 + (p_x c \theta_1 + \\ \quad p_y s \theta_1) c \theta_2 + (p_z - d_1) s \theta_2] \end{cases} \quad (8)$$

综上,对于任意给定的操作点位置姿态,可通过人工设定不同的臂形角数值从而求解相应的可选构型,作为操作序列规划工作的基础。

1.3 机械臂无碰撞路径规划与代价计算

空间机械臂在不同操作点之间的构型转移代价是其操作序列寻优计算中的重要依据。由于空间机械臂的工作环境中存在着航天器舱体以及舱外部件等障碍物,为确保机械臂安全运行需要规避上述障碍,因此需对机械臂从起始构型转移至目标构型的避障运动路径进行规划,并以最短无碰撞路径中的总关节角度变化量作为转移代价,本文基于 PRM 算法进行机械臂无碰撞路径规划。

如图 4 所示,PRM 算法的规划过程为:首先在冗余机械臂的构型空间中进行离散蒙特卡洛采样,对每个采样点进行碰撞检测计算,保留不与环境障碍发生碰撞的采样点从而生成机械臂的路标地

图。随后,对任意两个路标节点进行连通性分析,以多关节联动模式^[22]的轨迹规划算法得到两个路标节点之间的关节空间运动轨迹并进行碰撞检测,若运动过程中不发生碰撞则对该两个节点进行联通,形成路标节点的无向网络图。最后,对于给定的起始构型和目标构型,在路标地图中进行启发式搜索,得到起始构型和目标构型之间转移代价最小的中间点序列。

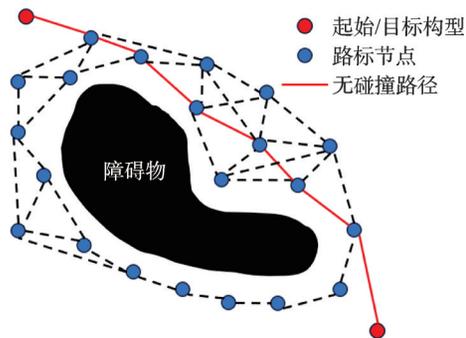


图 4 PRM 无碰撞路径规划算法

Fig.4 PRM algorithm of collision free path planning

在 PRM 算法中,设路标节点集合为 M ,机械臂经一系列避障中间点由起始构型 v_s 抵达目标构型 v_e 之间的无碰撞路径,其转移代价可表示为

$$c_{s,e} = \sum_{m,n} \sum_{i=1}^7 |\theta_{m,i} - \theta_{n,i}| \quad m, n \in M \quad (9)$$

式中: m, n 为避障中间点; $\theta_{m,i}$ 表示机械臂位于中间点 m 处第 i 个关节的角度。

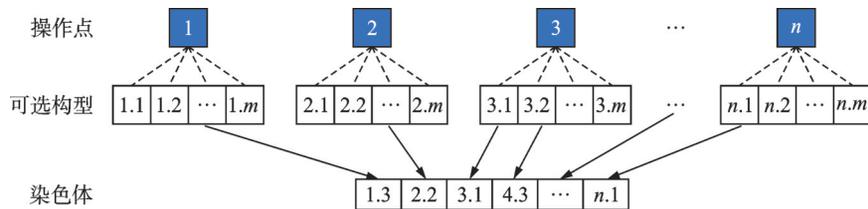


图 5 染色体构成

Fig.5 Composition of chromosomes

生成初始种群前,首先对所有操作点以及可选构型进行顺序编号,为方便种群的随机生成,每个操作点的可选构型数量保持一致。假设共有 n 个操作点,每个操作点具有 m 种可选构型,则对于任意编号为 i 的操作点,其对应的可选构型的序号取值范围为 $[(i-1)m+1, im]$ 。在构建初始种群时,首先生成取值为 $[1, n]$ 且各不相同的随机数序列,对操作点顺序进行随机排列,随后将每一个操作点的序号随机替换为某一种可选构型的序号,按规定的种群数量重复上述操作即可得到初始种群。

2.2 遗传算子

为确保遗传过程的随机性从而提升迭代寻优

2 改进遗传算法设计

在利用遗传算法规划机械臂的操作序列时,需要明确各操作点对应的可选构型集合,以及机械臂在两个操作构型间的转移代价。本文第 1 节给出了运动学逆解算法和路径规划与代价计算方法,本节重点研究如何对遗传算法进行改进以适用空间冗余机械臂的操作序列规划。

2.1 染色体及种群构成

在利用遗传算法求解序列寻优问题中,使用一组可行解作为染色体,通过遗传、交叉和变异操作改变染色体的基因(即序列中的节点)构成实现迭代优化。本文针对空间冗余机械臂执行复杂在轨服务任务的操作序列规划问题开展研究,需要同时对操作点的排列顺序和每个操作点的可选构型进行优化,传统遗传算法通常将该类问题分解为两个子问题分别求解,但受两个子问题相互嵌套耦合影响计算效率极低^[17]。为此,本文对传统遗传算法进行改进,如图 5 所示,以机械臂在某一操作点的其中一种可选构型的编号作为基因成分,以机械臂在不同操作点处的构型序列作为染色体个体。在这种染色体构成方式下,相邻两个操作构型间的转移代价可以通过路径规划算法得到,规避了操作点间转移代价不唯一问题,完备反映机械臂操作流程的同时降低了染色体的复杂性,提升后续迭代优化的计算效率。

结果的全局最优性能,在遗传过程中对父代染色体执行交叉和变异操作后生成子代染色体。

(1) 交叉算子

染色体的交叉是指从父代 1 和父代 2 中分别继承一部分片段传递至子代。本文采取可变长度和位置的交叉方式对传统遗传算法顺序交叉方式进行改进,生成随机的片段范围和位置编号,子代从该位置起继承父代 1 中的指定片段,其余位置依次从父代 2 中继承非相的基因,交叉过程如图 6 所示。

(2) 变异算子

针对空间冗余机械臂在同一操作点处可选择

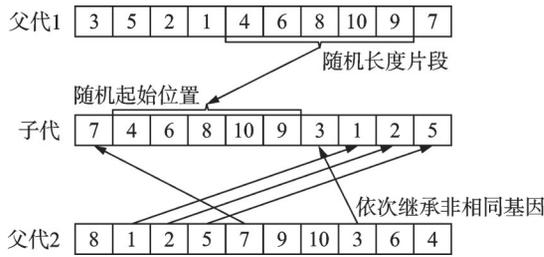


图 6 改进遗传算法的交叉操作

Fig.6 Crossover operation of improved genetic algorithm

多种不同构型的特性,对传统遗传算法的变异操作进行改进,除选择随机两个位置的基因进行对调外,增加随机更换某一操作点对应的可选构型序号的变异操作,从而进一步提升遗传种群的丰富性。

2.3 适应度计算

反映空间机械臂操作序列优劣程度最直观的物理量是总路径代价,即机械臂按该序列规定的顺序和构型执行所有操作过程中总的关节角度变化量。另外,在轨服务任务的复杂性决定了操作点之间存在逻辑约束关系,因此在适应度计算中引入了操作点连通性代价以解决复杂逻辑约束网络对操作序列规划造成的困难。本文设计的改进遗传算法的适应度函数为

$$f_{\text{fitness}} = \frac{1}{\sum_{a \in P} \sum_{b \in P} \left(c_{(a,j)(b,k)} + \frac{1}{g_{a,b} + g_0} - \frac{1}{1 + g_0} \right)} \quad (10)$$

式中: $g_{a,b}$ 为二值函数,操作点 a 与 b 逻辑联通时取1,否则取0; g_0 为趋近于零的常数项,使得操作点逻辑不联通时的代价趋近于无穷而联通时的代价为零。这样的设计确保了遗传迭代过程中产生的操作序列满足逻辑关系约束。需要说明的是,常数项 g_0 的取值应当视实际情况而确定,本文在后续仿真实验中操作点间的路径代价为 10^3 量级,设定 $g_0 = 1 \times 10^{-6}$,使得逻辑连通性代价显著大于路径代价,确保在遗传迭代过程中不满足操作点逻辑约束的操作序列被淘汰。

2.4 迭代寻优

如图7所示,本文提出的改进遗传算法的迭代运行过程如下:

- (1) 设定种群规模、迭代次数、交叉及变异概率等遗传参数;
- (2) 初始化种群,计算个体适应度值;
- (3) 采用轮盘赌机制从种群中选择适应度较高的个体;
- (4) 执行交叉和变异操作,得到遗传后的子代个体;

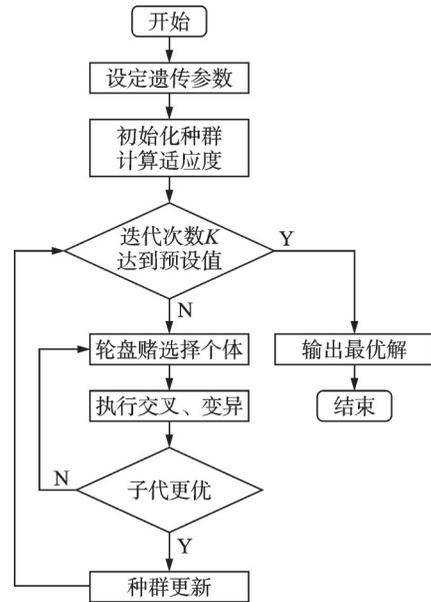


图 7 改进遗传算法流程图

Fig.7 Process of improved genetic algorithm

(5) 评估子代个体的适应度,若优于父代则使用该子代个体对种群进行更新,否则跳转至步骤(3);

(6) 重复步骤(3~5)进行不断迭代,直到次数达到预设值。

3 仿真实验与分析

为验证算法的可行性与优化性能,本文以空间站七自由度机械臂执行多点巡检拍照任务为背景进行仿真试验,设计了10个巡检操作点,基于臂形角的逆运动学求解算法对每个操作点选取了4种满足末端位姿要求且不存在碰撞风险的可选构型,基于本文所提出的遗传算法进行操作序列规划并将规划结果与传统遗传算法进行比对。10个操作点位的逻辑约束网络参照图1,即:机械臂在前往操作点2、3、4前必须完成操作点1处的操作,前往操作点6、7前必须完成操作点5处的操作,前往操作点9、10前必须完成操作点8的操作。遗传算法的参数设置如表2所示。操作点位置姿态及可选构型在表3中给出。

表 2 遗传算法参数设置

Table 2 Parameter setting of genetic algorithm

参数	数值
迭代次数	500
种群规模	5 000
轮盘赌参数	4
交叉概率	0.9
变异概率	0.25

表 3 空间七自由度机械臂多点巡检任务操作点位姿和可选构型

Table 3 Position and orientation of operating points and selectable configurations for a seven-DOF space manipulator in multi-point inspection mission

操作点序号	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4	关节 5	关节 6	关节 7
1	0.000	245.295	13.859	23.536	-37.396	114.705	-3.789
	0.000	245.295	37.396	-23.536	13.859	114.705	-3.789
	0.000	114.705	-37.396	23.536	13.859	-114.705	-1.025
	0.000	114.705	-13.859	-23.536	37.396	-114.705	-1.025
2	0.000	57.615	146.060	40.147	-186.207	32.385	90.000
	0.000	57.615	186.207	-40.147	-146.060	32.385	90.000
	0.000	57.615	124.027	78.219	-382.245	-32.385	-90.000
	0.000	57.615	202.245	-78.219	-304.027	-32.385	-90.000
3	0.000	8.163	20.640	44.783	24.577	-90.000	98.163
	0.000	8.163	65.423	-44.783	69.360	-90.000	98.163
	0.000	-141.381	-65.423	44.783	-69.360	90.000	128.619
	0.000	-141.381	-20.640	-44.783	-24.577	90.000	128.619
4	0.000	172.806	38.042	68.967	72.992	172.806	90.000
	0.000	172.806	107.008	-68.967	141.958	172.806	90.000
	0.000	172.806	46.517	75.605	-122.121	-172.806	-90.000
	0.000	172.806	122.121	-75.605	-46.517	-172.806	-90.000
5	90.000	172.806	72.992	68.967	38.015	172.806	90.000
	90.000	172.806	141.958	-68.967	107.008	172.806	90.000
	90.000	172.806	90.792	54.277	145.069	-172.806	-90.000
	90.000	172.806	145.609	-54.277	-90.792	-172.806	-90.000
6	90.000	225.767	81.749	125.865	-387.614	135.767	90.000
	90.000	225.767	207.614	-125.865	-261.749	135.767	90.000
	90.000	225.767	101.007	106.088	-207.095	-135.767	-90.000
	90.000	225.767	207.095	-106.088	-101.007	-135.767	-90.000
7	90.000	-46.599	96.769	67.666	-164.435	136.599	90.000
	90.000	-46.599	164.435	-67.666	-96.769	136.599	90.000
	90.000	-46.599	77.528	85.916	16.557	-136.599	-90.000
	90.000	-46.599	163.444	-85.916	102.472	-136.599	-90.000
8	-90.000	9.566	96.306	69.944	-166.251	80.434	90.000
	-90.000	9.566	166.251	-69.944	-96.306	80.434	90.000
	-90.000	9.566	77.066	88.043	-345.108	-80.434	-90.000
	-90.000	9.566	165.108	-88.043	-257.066	-80.434	-90.000
9	-90.000	-57.926	67.349	-52.504	-104.845	90.000	-147.926
	-90.000	-57.926	14.845	52.504	-157.349	90.000	-147.926
	-90.000	-57.926	-5.392	74.527	20.864	-90.000	32.074
	-90.000	-57.926	69.136	-74.527	95.392	-90.000	32.074
10	-90.000	12.370	30.000	109.985	-229.285	90.000	-77.630
	-90.000	12.370	139.285	-109.985	-119.300	90.000	-77.630
	-90.000	12.370	15.839	132.147	-57.986	-90.000	102.370
	-90.000	12.370	147.986	-132.147	74.161	-90.000	102.370

改进遗传算法的收敛曲线如图 8 所示,经 72 次迭代后操作序列的总路径代价收敛于 1562.20°,相较于初始种群降低了 42.87%,算法运行耗时

42.08 s。此时机械臂轨迹如图 9 所示,可见机械臂按照当前序列依次抵达 10 个巡检操作点过程中与舱外障碍物无干涉,且不存在大范围往复绕行,表

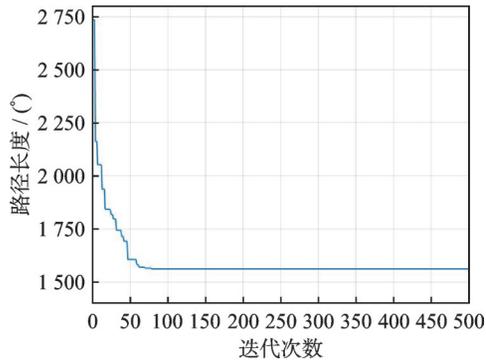


图8 改进遗传算法的迭代收敛曲线

Fig.8 Iterative convergence curve of improved genetic algorithm

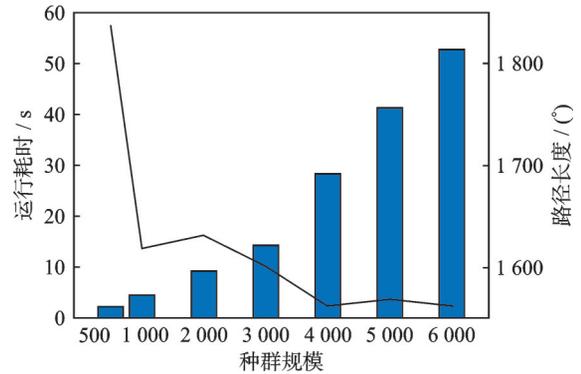


图10 改进遗传算法的计算效率

Fig.10 Computational efficiency of improved genetic algorithm

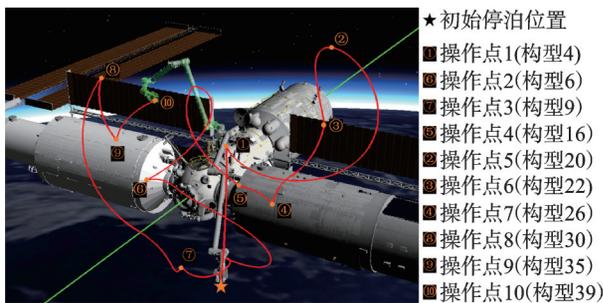


图9 空间机械臂多点巡检轨迹

Fig.9 Trajectories of space manipulator in multi-point inspection task

明该序列可行且路径代价较低。

经多次重复实验,在种群规模为5000个的条件下,经改进遗传算法迭代优化后的操作序列总路径代价稳定在 $[1562.20^\circ, 1568.14^\circ]$ 内,表明了算法具备较强的全局最优性能。

寻优计算效率方面,本文提出的改进遗传算法的迭代运算时间主要受到种群规模影响。图10给出了不同种群规模设置下的序列规划结果以及算法运行耗时,可见算法运行耗时随着种群规模的增大而增加,降低种群规模可提升计算速度,但种群规模低于4000时将无法保证获得全局最优解。当种群规模较小时,受初始种群随机生成的影响,算法单次运行获得的优化结果具有一定随机性,这是导致图10中种群规模2000时得到的最小路径代价反而比种群规模1000时更大的原因,通过将初始种群规模设定在4000以上可以相对稳定地得到最优规划结果。

此外,本算法与传统遗传算法的性能比对结果如图11所示。对于同样的操作点位姿以及可选构型,传统遗传算法将操作序列规划问题拆分为操作点顺序优化和操作点构型优选两个子问题,且遗传过程中使用未经改进的顺序交叉法。在同样的遗传算法参数设置下,传统遗传算法经过26次迭代

即达成收敛,最小路径代价结果为 1803.24° ,计算耗时64.83s,而本算法经79次迭代后最小路径代价收敛于 1562.20° ,迭代优化次数增加超过一倍,优化效果提升13.1%,运行耗时减少35.1%。对机械臂需抵达的操作构型和操作点之间的逻辑约束关系进行修改并进行多次重复实验后得到类似结果。对比结果表明,传统遗传算法的分步求解方式受子问题相互嵌套耦合影响,其计算速度偏慢,且易陷入局部最优解,本文提出的改进遗传算法可在提升运算速度的同时获得更好的优化结果。

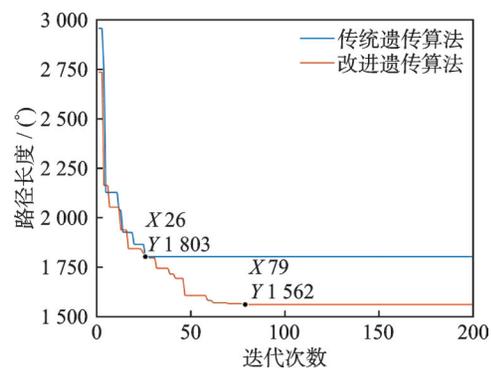


图11 改进遗传算法的迭代收敛曲线

Fig.11 Iterative convergence curves of improved genetic algorithm

4 结 论

针对空间冗余机械臂执行复杂任务的操作序列寻优问题,本文提出了一种改进遗传算法:以机械臂在不同操作点处的其中一种可选构型序列作为染色体,采用可变长度、位置的交叉、操作点顺序对调和操作点所属构型随机变更的方式进行遗传迭代,并且在适应度评估中引入操作点逻辑连通性代价。仿真结果表明,本文提出的算法能够在较短时间内得到操作序列的相对最优解,可有效解决空间冗余机械臂操作序列规划中操作点存在复杂逻

辑关系和操作点之间构型转移代价不固定造成的核心困难,对于复杂在轨服务操作任务的高效实施具有潜在应用价值。相比于传统遗传算法,本文所提出算法的运算效率更高且规划结果更优。

本文在仿真实验中以七自由度冗余机械臂为对象,设定 10 个操作点进行算法验证分析,从工程实际角度基本可以满足当前空间机械臂在轨任务的操作序列规划需求。当操作点数量提升时,需要适当提高初始种群规模以确保规划结果的全局最优性,相应的算法运行耗时将略有增加。另外需要说明的是,本文中的“操作点”是一个相对宽泛的概念,所有机械臂在执行任务中必须抵达的位置均可视为操作点,例如:对于可以通过末端交替更换改变驻留基座从而扩大工作范围的空间机械臂,可将目标基座捕获位置和末端工具存放/抓取位置等作为操作点并明确与其他操作目标的逻辑关系,进而利用本算法对整个在轨作业任务流程进行规划。

参考文献:

- [1] 陈钢,高贤渊,赵治恺,等.空间机械臂智能规划与控制技术[J].南京航空航天大学学报,2022,54(1): 1-16.
CHEN Gang, GAO Xianyuan, ZHAO Zhikai, et al. Review on intelligent planning and control technology of space manipulator[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(1): 1-16.
- [2] 胡成威,高升,熊明华,等.空间站核心舱机械臂关键技术[J].中国科学:技术科学,2022,52(9): 1299-1331.
HU Chengwei, GAO Sheng, XIONG Minghua, et al. Key technologies of the China space station core module manipulator[J]. Scientia Sinica Technologica, 2022, 52(9): 1299-1331.
- [3] 刘宏,蒋再男,刘业超.空间机械臂技术综述及展望[J].航空学报,2021,42(1): 524164.
LIU Hong, JIANG Zainan, LIU Yechao. Space manipulator technology: Review and prospect[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(1): 524164.
- [4] 胡成威,李大明,王耀兵,等.空间站机械臂方案设计及验证[J].中国航天,2023(1): 21-28.
HU Chengwei, LI Daming, WANG Yaobing, et al. Design and demonstration of space station manipulator concept[J]. Aerospace China, 2023(1): 21-28.
- [5] 王友渔,胡成威,唐自新,等.我国空间站机械臂系统关键技术发展[J].航天器工程,2022,31(6): 147-155.
WANG Youyu, HU Chengwei, TANG Zixin, et al. Key technologies development of the space station manipulator system[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 147-155.
- [6] 薛智慧,刘金国.空间机械臂操控技术研究综述[J].机器人,2022,44(1): 107-128.
XUE Zhihui, LIU Jinguo. Review of space manipulator control technologies[J]. Robot, 2022, 44(1): 107-128.
- [7] 阎慧,吴止媛,高永明,等.面向空间机器人在轨操控的任务规划模型研究[J].现代电子技术,2017,40(4): 4-8.
YAN Hui, WU Zhiyuan, GAO Yongming, et al. Research on mission planning model for on-orbit control of space robot[J]. Modern Electronic Technology, 2017, 40(4): 4-8.
- [8] STOCK S, MANSOURI M, PECORA F, et al. Hierarchical hybrid planning in a mobile service robot [J]. Springer International Publishing, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-24489-1_28.
- [9] 王一帆,孙汉旭,陈钢,等.基于分层结构的空间机械臂多约束任务规划[J].机械工程学报,2017,53(11): 104-112.
WANG Yifan, SUN Hanxu, CHEN Gang, et al. Hierarchical task planning for space manipulator with multi-constraint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 104-112.
- [10] 吴凡,赵瑞,何锡明,等.空间站机械臂任务规划方法[J].上海航天(中英文),2024,41(1): 66-76.
WU Fan, ZHAO Rui, HE Ximing, et al. Task planning method for space station manipulator[J]. Aerospace Shanghai, 2024, 41(1): 66-76.
- [11] LI Haizhen, DING Xilun. Adaptive and intelligent robot task planning for home service: A review[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023. DOI:10.1016/j.engappai.2022.105618.
- [12] ANDRAS K. Task sequencing for remote laser welding in the automotive industry[J]. Cambridge Law Journal, 2013. DOI:10.1017/S0008197300105185.
- [13] 贾庆轩,黄旭东,陈钢,等.基于改进图规划的机械臂任务规划方法[J].北京邮电大学学报,2018,41(3): 27-31.
JIA Qingxuan, HUANG Xudong, CHEN Gang, et al. Manipulator task planning method based on improved graph planning[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018, 41(3): 27-31.
- [14] SUN Yuanxi, GU Rui, CHEN Xiaohong, et al. Efficient time-optimal path planning of AUV under the

- ocean currents based on graph and clustering strategy [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 259(1): 111907.
- [15] CAO Xiaoman, ZOU Xiangjun, JIA Chunyang, et al. RRT-based path planning for an intelligent litchi-picking manipulator[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 156(1): 105-118.
- [16] CHENG Xin, ZHOU Jingmei, ZHOU Zhou, et al. An improved RRT-connect path planning algorithm of robotic arm for automatic sampling of exhaust emission detection in Industry 4.0[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2023, 33(1): 100436.
- [17] 赵素平. 冗余空间机械臂多任务轨迹规划与抗干扰控制[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
- ZHAO Suping. Multitask-based trajectory planning and anti-disturbance control of redundant space manipulator[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2020.
- [18] 赵素平, 陈超波, 阎坤, 等. 冗余漂浮空间机器人多任务轨迹规划[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(9): 1818-1825.
- ZHAO Suping, CHEN Chaobo, YAN Kun, et al. Multitask-based trajectory planning of redundant floating space robotics[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(9): 1818-1825.
- [19] 杜钰霜, 赵素平, 陈超波, 等. 冗余机械臂时间最优多任务轨迹规划[J]. *计算机仿真*, 2025, 42(4): 378-385.
- DU Yushuang, ZHAO Suping, CHEN Chaobo, et al. Time-optimal multi-task trajectory planning for redundant manipulator[J]. *Computer Simulation*, 2025, 42(4): 378-385.
- [20] 曹行, 何俊, 段文杰, 等. 七自由度机械臂逆运动学求解方法[J]. *空间控制技术与应用*, 2024, 50(1): 84-90.
- CAO Hang, HE Jun, DUAN Wenjie, et al. An inverse kinematics method of 7DOF manipulator[J]. *Aerospace Control and Application*, 2024, 50(1): 84-90.
- [21] 曾晓旭. 空间机械臂在轨巡检任务规划系统研制[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- ZENG Xiaoxu. Development of on-orbit inspection mission planning system for space manipulator[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2023.
- [22] 刘茜, 刘传凯, 朱安, 等. 空间机械臂运动控制的地面仿真验证技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(1): 58-67.
- LIU Qian, LIU Chuankai, ZHU An, et al. Ground simulation and verification method for motion control of space manipulator[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(1): 58-67.

(编辑:陈珺)