

机械手三维操作空间建立与路径规划

姚舜, 付永忠, 周航

(江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对传统路径规划算法在机械手路径规划中未考虑机械臂干涉、搜索效率低、路径不合理等问题, 在建立了机械手空间模型, 采用二次投影法分析和计算机械手操作空间的基础上, 将障碍模型和操作空间栅格化, 并提出了改进的遗传算法; 在遗传算法的设计中, 使用实数编码和三维坐标编码相结合的编码方式将栅格进行编码, 改进交叉算子, 定义最小基因交叉片段数量比, 提高了搜索效率, 简化了计算过程; 通过 Matlab 建立了机械手仿真模型, 验证了算法的有效性, 且在实验条件和实验对象等各项参数相同的情况下, 相对于传统路径规划算法, 搜索效率, 最优路径比等得到明显提升。

关键词: 机械手; 空间模型; 栅格化; 遗传算法; 交叉算子

Three-dimensional Operation Space Establishment and Path Planning of Manipulator

Yao Shun, Fu Yongzhong, Zhou Hang

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: According to the traditional path planning algorithm in robot path planning without considering the mechanical arm interference, low searching efficiency and unreasonable path, an improved genetic algorithm is proposed based on the establishment of manipulator space model and the analysis and calculation of manipulator operation space by using two projection method after dividing barrier model and operation space into cubic mesh. In the design of genetic algorithm, methods of using combination of real number coding and 3D coordinate coding, improving crossover operator and defining the minimum gene crossover ratio improve the search efficiency and simplify the calculation process. The simulation model of manipulator is established by Matlab, and the validity of the algorithm is verified. Compared with the traditional path planning algorithm, the search efficiency and the optimal path ratio have been significantly improved under the same experimental conditions and experimental objects.

Keywords: manipulator; space model; cubic mesh; genetic algorithm; crossover operator

0 引言

在以机械加工代替手工劳作的自动化发展进程中, 机械手在上下料、安装、搬运、喷涂、焊接、采摘等领域充当着举足轻重地位。机械手根据接收到的指令信息, 按照一定的评判标准(如时间最短, 距离最短, 能量最低等)规划出一条符合标准的最优路径, 从空间一点运动到空间另一点, 从而完成整个指令操作。

机器人路径规划的研究可以分为二维平面移动机器人的路径规划和三维机械手的操作路径规划^[1-2]。对于二维平面移动机器人的路径规划的技术研究已经较为成熟。机械手空间三维路径规划需要解决的问题包括: 1 重构三维空间环境模型。2 建立机械手空间障碍干涉操作模型。3 搜索满足避障要求的路径。4 对路径合理性进行探讨实现路径优化。5 满足动力学约束以及其它约束问题。

在国外, Khatib 提出的人工势场法^[3]虽然在机械手末端执行器的局部路径规划算法方面已经取得了应用, 但在全局避障路径规划上还需要深入研究。贾庆轩等采用 A*

算法^[4]对机器人路径进行了规划, 虽然满足了避障要求, 但对路径的合理性没有进行深入探讨。伊华伟等采用蚁群算法^[5]对机械手三维操作空间路径完成了优化, 但没有考虑机械手臂连杆与障碍物的干涉情况。

本文在采用栅格法建立机械手的环境模型以及垂直平面两次投影法^[6]建立机械手操作空间栅格模型的基础上, 提出了基于改进遗传算法的机械手三维操作空间路径规划方法。最后采用 Matlab 工具建立了机械手仿真系统, 验证了算法的有效性, 保证了机械臂连杆与障碍物不发生干涉, 且相对于传统路径规划算法, 搜索效率, 最优路径比等得到明显提升。

1 问题描述及空间模型的建立

1.1 问题描述

因为机械手路径规划研究的是机械手末端的位置变化, 不考虑机械手末端的姿态, 因此可以将机械手的末端作为质点处理。本文以 Scara 机械手为研究对象, 机械手避障问题描述如图 1 所示。图中 A 为障碍物, B 为机械手末端。末端 B 从起始点 q_0 运动到目标点 q_1 , 要求保证机械臂本体与障碍物不发生碰撞且使机械手末端点 B 从 q_0 到 q_1 运动路径最短。与行走机器人路径规划相比, 机械手路径规划必

收稿日期:2018-03-04; 修回日期:2018-04-03。

作者简介:姚舜(1992-), 男, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要从事机电控制方向的研究。

须避开机械臂与障碍物的干涉。

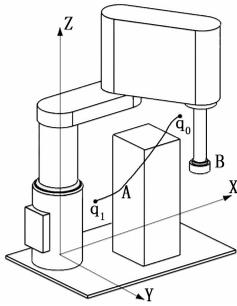


图 1 Scara 机械手避障问题描述模型

机械手三维操作空间的路径规划流程如图 2 所示。机械手获取到外部环境信息，内部建立起障碍物模型，并根据自身尺寸、关节角等信息建立起关节空间障碍模型，通过路径搜索算法获得空间点位，最后运用机械手运动学逆解求解各关节角，机械手根据获取指令从而完成相应的动作。本文主要研究的是机械手的三维操作空间路径规划，因此空间环境信息以一个标准的立方体块作为障碍物。

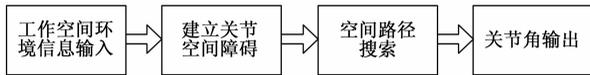


图 2 机械手三维操作空间的路径规划流程图

1.2 空间模型及操作模型的建立

本文运用两次投影的思想研究 Scara 机械手操作空间模型。Scara 机械手操作空间模型 V 平面投影即为障碍物空间的 V 平面投影， H 平面的投影如图 3 所示。上临界碰撞角 θ_{2UC} 和下临界碰撞角 θ_{2LC} 之间的变化关系如式 (1) 和式 (2) 所示：

$$\theta_{2UC} = \theta_1 - \arctan\left(\frac{y - a_1 \sin\theta_1}{x - a_1 \sin\theta_1}\right) - \arctan\left(\frac{w_2}{2a_2}\right) \quad (1)$$

$$\theta_{2LC} = \theta_1 + \arctan\left(\frac{y - a_1 \sin\theta_1}{x - a_1 \sin\theta_1}\right) + \arctan\left(\frac{w_2}{2a_2}\right) \quad (2)$$

点 $A(x, y)$ 和点 $B(x, y_1)$ 为临界碰撞点坐标， a_1 、 a_2 分别为两杆的长度， w_1 、 w_2 分别为两杆的宽度，障碍物高度为 z 。关节坐标 $(\theta_{2UC}, \theta_{2LC})$ 到空间坐标 (X, Y) 的转换公式如式 (3) 和式 (4) 所示：

$$X = a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 - \theta_{2UC}) \quad (3)$$

$$Y = a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 - \theta_{2LC}) \quad (4)$$

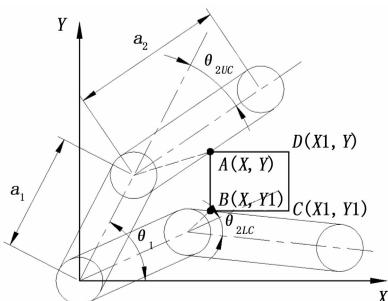


图 3 Scara 机械手临界避障点 H 平面投影

垂直于 H 平面的障碍物空间体集合表示为 D_H ，垂直于 V 平面的障碍物空间体集合表示为 D_V ， D_H 和 D_V 的集合表示如下：

$$D_H = \left\{ \begin{aligned} &(X, Y, Z) \mid x > a_1 \cos\theta_1 + a_2 \cos(\theta_1 - \theta_{2UC}) \\ &y > a_1 \sin\theta_1 + a_2 \sin(\theta_1 - \theta_{2LC}), \\ &Z \in (-\infty, +\infty) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$D_V = \{ (X, Y, Z) \mid x < X < x_1, 0 < Z < z, Y \in (-\infty, +\infty) \} \quad (6)$$

则最终的障碍物操作空间即为 H 平面障碍物空间体构成的集合与 V 平面障碍物空间体构成的集合的交叉部分，集合 D_B 可以表示为：

$$D_B = D_H \cap D_V \quad (7)$$

2 路径规划算法设计

针对在解决二维路径规划的问题上，遗传算法在众多的文章中提出，众多学者尝试将其不断改进更好得解决了路径规划的问题，被证明是一种有效的路径规划算法^[7-9]。将这种算法应用到三维空间，本文提出了栅格化操作空间模型，采用改进遗传算法对机械手三维操作空间进行路径规划。三维路径规划的遗传算法主要改进方案有下面几点：采用三维编码和实数编码相结合的编码方式，适应度函数包括了路径最短和避障的要求。

2.1 遗传算法基本原理

1) 遗传算法的原理。

遗传算法是模拟生物界自然选择学说提出的，完全符合了“物竞天择，适者生存”的观点。自然选择学说主要包括生物种群的遗传、变异、生存斗争和适者生存。遗传算法将生物种群特征串联起来并进行相应的编码，将大自然的选择作为适应度函数，使用适应度函数评估现有的种群个体，适应度值大的个体将被保留，按照适应度值提供的方向进行交叉变异等操作从而产生新的后代个体，新的后代个体组成的种群再次被评估执行下一步操作，周而复始，得出问题的最优解。遗传算法以初始种群为问题的解，以适应度函数为导向，确定解搜索方向，避免了传统优化算法求导和不可行解的问题；同时它是一种全局搜索方法，能够有效解决局部最优的问题；概率选择的方法增加了遗传算法使用的灵活性，针对不同问题都可以灵活的建立相应问题的解决模型。

2) 遗传算法的步骤。

遗传算法的流程图如图 4 所示。观察流程图可以知道遗传算法的主要步骤包括如下几步^[10]。

Step1: 将种群特征进行编码，使实际问题的解 X 转化为编码解 D 的问题。

Step2: 确定个体编码特征参数 x, y, z, \dots ，确定适应度函数 $fit(x, y, z, \dots)$ 。

Step3: 确定遗传策略，包括确定种群数量 M ，选择、交叉、变异方法，交叉概率 p_c ，遗传概率 p_m 等。

Step4: 随即产生由初始个体编码构成的初始种群 p_0 。

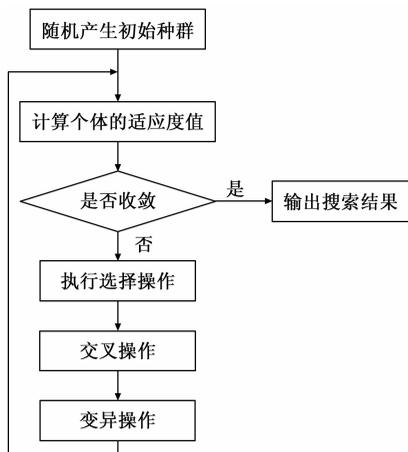


图 4 遗传算法流程图

Step5: 将个体编码特征参数代入适应度函数 $fit(x, y, z, \dots)$, 计算适应度函数值。

Step6: 按照遗传策略, 进行选择、交叉和变异等操作, 进化出下一代新的个体组成的种群。

Step7: 判断是否所需求解问题的最终解或者中间解是否趋达到终止条件, 若达到条件则结束当前循环, 输出搜索结果, 若没有达到终止条件则跳到 Step5, 计算新一代个体的适应度值, 直到满足终止条件。

2.2 环境模型及遗传算法路径编码

机器人路径规划的研究都要基于环境模型和操作模型, 对二维平面移动机器人路径规划的研究一般都是以栅格化的方法建立栅格模型。将这种方法应用到三维空间建立三维栅格模型如图 5 所示。三维栅格模型由空间 $N \times N$ 个立方体素构成。体素分为两个状态, 障碍物体素 (如体素 A) 和自由体素 (如体素 B)。对于环境模型, 障碍物体素表达的是空间障碍物模型, 对于操作空间而言障碍物体素除了表达空间障碍物模型外还表达机械臂与障碍物的干涉模型, 即为上述障碍物操作空间集合的栅格化模型。每一个体素的位置由笛卡尔空间坐标系来表达。对于 Scara 机械手而言, 将机械手末端作为质点处理, 笛卡尔空间坐标系中每一个体素的位置与机械手关节空间一一对应。

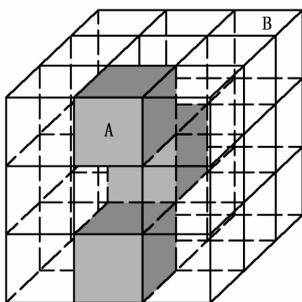


图 5 三维栅格模型

图 5 中, 将环境栅格模型的左下角作为原点, 建立如图所示坐标系, 则每一个栅格的位置可以用坐标表示, 如左下角第一个栅格的坐标即为, 沿着轴方向的第二个栅格

坐标为, 依次将栅格进行编号。路径编码策略主要有实数编码, 浮点数编码, 二进制编码等, 实数编码能够方便遗传算子的交叉和变异等操作。同时, 若将三维坐标进行编码则能简单直观表示出各编码实际路径, 方便计算出路径的长度, 评估路径的可行性。综合考虑以上两点, 针对空间三维路径规划的问题, 本文提出实数编码与三维坐标编码相结合的编码策略。实数编码栅格编号 i 与三维坐标编码栅格坐标 (x_i, y_i, z_i) 的映射关系如下:

$$N = \text{int}(\sqrt[3]{i}) + 1$$

$$x_i = N$$

if

$$0 < i - (N - 1)^3 \leq N^2$$

then

$$y_i = \text{mod}([i - (N - 1)^3] / N)$$

$$z_i = \text{int}([i - (N - 1)^3] / N)$$

else

$$y_i = \text{mod}([i - (N - 1)^3 - N^2] / N)$$

$$z_i = \text{int}([i - (N - 1)^3 - N^2] / N)$$

上述运算关系中, mod 表示取余运算, int 表示取整运算, N 为实数编号栅格 i 的 x 轴坐标, 空间中表示了该栅格在第 N 个阵列层, 求栅格 i 的 y 轴和 z 轴坐标即为求该栅格所在阵列层的相应位置坐标。该映射关系的主要思想为正方体素的空间阵列, 将正方体素作为基本单位, 以正方体素构成的正方体的一个边角顶点为起始点, 不断以正方体素向空间三维的同一个方向延伸构成由 i 个正方体素构成的新正方体。

2.3 适应度函数

由于机械手臂与障碍的干涉已经在操作空间模型中考虑到了, 所以在正确建立了机械手操作空间模型之后, 机械手的三维操作空间的路径规划的适应度函数与普通的二维平面行驶机器人路径规划适应度函数所满足的条件类似, 即在保证机械手不与障碍物发生碰撞的基础上使得总规划路径最短, 对应到栅格操作空间即要求各自由编码栅格之间的连线不经过障碍物编码栅格的基础上, 使整条编码栅格的总长度最短。

1) 任意一条路径内的编码栅格 (用 p_i 来表示) 必须为自由编码栅格即不能落在障碍物编码栅格内。将障碍物栅格编码的集合表示为 W , 则路径点编码栅格不落在障碍物编码栅格内的适应度函数可以表示为:

$$Fit_{11} = \begin{cases} 1, p_i \notin W (i = 0, 1, 2, \dots, n) \\ 0, p_i \in W (i = 0, 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (8)$$

式中, p_i 表示操作路径上第 i 个栅格点, n 表示操作路径中栅格点个数。公式表明, 路径中的栅格点落在障碍物栅格区域的适应度函数为 0, 落在自由栅格区域的适应度函数为 1。

2) 用 p_i 和 p_{i+1} 来表示路径中相邻的两点, $p_i p_{i+1}$ 表示相邻两点的连线, 则连线不经过障碍物栅格的适应度函数可以表示为:

$$Fit_{12} = \begin{cases} 1, p_i p_{i+1} \cap W \neq 0 (i = 0, 1, 2, \dots, n) \\ 0, p_i p_{i+1} \cap W = 0 (i = 0, 1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (9)$$

综合以上两点，可以得出机械手路径规划中，机械臂能够有效避免碰撞的适应度函数为：

$$Fit_1 = Fit_{11} \times Fit_{12}$$

对适应度函数的要求除了避免碰撞之外还要求运动的路径最短，即要求计算出每条路径的长度，相邻两点路径 $p_i p_{i+1}$ 的长度计算公式如下：

$$L_{(i)} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \quad (10)$$

设整条操作路径栅格点数为 n ，则整条路径的总长度为：

$$Length = \sum_{i=1}^{n-1} L_{(i)} \quad (11)$$

适应度函数值越大基因编码被保留下来的概率越大，因此可以得到最短路径的适应度函数为：

$$Fit_2 = \frac{1}{Length} \quad (12)$$

综合考虑免碰撞以及路径最短适应度函数，可以得到用于机械手三维操作空间路径规划的最优适应度函数可以表示为：

$$Fit = C_{max} Fit_1 + a \times Fit_2$$

公式中 C_{max} 的取值与操作空间的复杂程度有关， a 为不可行操作路径的惩罚系数。

2.4 遗传算子

2.4.1 选择算子

选择操作是建立在适应度值的基础上的，适应度值越大的个体被保留，作为父代进行交叉变异等操作，从而产生下一代个体。选择算子的种类较多，比较常用的选择算子有轮盘赌选择、随机竞争选择、最佳保留选择、无放回随机选择等。本文采用轮盘赌和精英保留策略相结合的方法进行遗传算法的选择操作。轮盘赌和精英保留策略的思想是每个个体进入下一代的概率等于它的适应度值与整个种群中个体适应度值和的比例，然后将当前群体中适应度最高的个体结构完整地复制到下一代群体中。

2.4.2 交叉算子

遗传算法中，交叉操作应用在选择操作之后，通过染色体之间基因的互换从而产生新的基因序列，每一条新的基因序列组成的染色体即一种新的路径方案。交叉操作是产生新的路径方案的必要手段。基因的交叉互换是随机的，交叉操作主要包括单点交叉、两点交叉、多点交叉、均匀交叉和算术交叉。交叉方法的选择应针对不同的编码策略进行选择，针对前面提出的实数编码策略，本文采用的是单基因片段的交叉即两点交叉。各编码路径是按照实数编码从小到大顺序排列，通过预先设定基因片段交叉最低长度，比较基因片段实数编码的大小，来选择可交叉的基因片段。基因片段长度设定值越小，可交叉的基因片段种类越多，搜索情况越复杂，搜索效率越低。相反设定值越大基因种类越少，不能保证种群的多样性，容易陷入局部最优。本文根据与总路径长度的比值取值为 0.1。

假设两个待交叉的父代个体 (27, 98, 103, 371, 483, 978, 1 239, 1 755, 3 982)，父代个体 (81, 99, 271, 372, 771, 1 560, 2 040, 3 961, 4 092)，如图 5 所示，基因交叉片段长度为 6，按照顺序排序进行实数编码，通过比较各实数编码的大小，父代个体在 103 和 1 755 之间的基因片段与父代个体在 99 和 2 040 之间的基因片段存在可互换性。从三维坐标编码看，每个基因片段表示路径的子路径编码，且这两段子路径可以相互替代，交换得到的染色体仍然是优良的后代，与传统遗传算法的无序随机交叉相比，采用实数顺序编码的编码方式大大加快了算法的收敛速度。



图 6 两父代个体基因片段交叉

2.4.3 变异算子

遗传算法的变异过程是指在原始染色体上的基因位通过一些等位基因来替代，产生新的基因片段的过程。变异方法主要有基本位变异、均匀变异、边界变异、非均匀变异和高斯近似变异等。变异算子是保证种群多样性的必要手段，本文对实数编码进行非均匀变异操作，通过对染色体原有基因位做随机的微小扰动，每个基因位以相同的概率进行变异操作后从而产生新的染色体，在空间路径解中即产生了新的解决方案。变异操作的概率通常取值范围为 0.001~0.4，本文取值为 0.01。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

本文基于酷睿 i7-6700 处理器，内存 6 GB，Windows7 旗舰版 X64 位操作系统，采用 Visual Studio2013 和 Matlab2014a 64 bit 混合编程的方式验证了算法的有效性。

实验中各项参数设定如下：种群规模为 $M=80$ ，交叉操作概率 $P_c=0.75$ ，变异操作的概率为 $P_m=0.01$ ，最大的迭代次数为 $T=500$ ，基于实数编码的交叉基因片段长度比例 $l_c=0.1$ 。Scara 机械手的 Matlab 仿真模型及仿真结果如图 6 所示，为起始点，为目标点，机械手末端从沿着仿真结果的连续路径点运动到，此路径即为最优路径，既避免了机械臂与障碍物的碰撞，同时使得从起始点到目标点路径最优。观察图 7 可以看到，本文提出的改进遗传算法在迭代到第 240 次左右趋向于收敛，即找到了最优路径，总长度为 11.2，单位为栅格。

3.2 算法对比

将本文算法与其它三维路径规划算法进行性能参数比较，从表 1 中可以看出本文所提出的改进遗传算法在最优路径的选择上比传统的一些算法获取的最优路径更短，在相同的实验条件的基础上搜索效率得到提高。在重复性实验过程中所得到的最优路径比例明显高于其它算法。由于目