

基于改进蚁群算法的机器人轨迹规划^①

王 宪 杨国梁 (江南大学 通信与控制工程学院 江苏 无锡 214122)

摘要: 为优化机器人末端执行器的工作轨迹,提高工作效率,减少能量损耗,建立了以运动时间和路径最短、冲击最小为目标的优化模型。在传统蚁群算法的基础上,引入带方向信息的全局启发因子来提高最优路径的搜索效率,并利用蚂蚁的死亡机制和惩罚函数来避免遇到陷阱时形成的路径死锁情况。测试结果表明,改进后的蚁群算法收敛速度更快,能够在较短时间内规划出满足条件的最优路径。

关键词: 机器人; 轨迹规划; 蚁群算法; 多目标优化

Robot Trajectory Planning Based on Improved Ant Colony Algorithm

WANG Xian, YANG Guo-Liang

(Jiangnan University, Communication and Control Engineering College, Wuxi 21412, China)

Abstract: In order to optimize the work of robot end-hand trajectory, improve working efficiency, reduce energy loss, established the optimization model with the goal of shortest exercise time and path, minimum impact. Based on traditional ant colony algorithm established the overall inspiration factor with the introduction of information to improve the optimal of path searching efficiency and used the death of ants mechanisms and penalty function to avoid the pitfalls encountered in the path formed at the deadlock situation. Test results show that the improved ant colony algorithm is faster convergence and can map out the optimal path in a relatively short period of time to meet the conditions.

Keywords: robot; trajectory planning; ant colony algorithm; multi-objective optimization

1 引言

轨迹规划是指机器人末端执行器依据一定的准则(如时间最短、路径最短、能耗最小、轨迹最平滑等)搜索一条从起始状态到目标状态并绕过障碍物的最优路径,它是机器人学中一个重要而且十分复杂的问题。一方面,将轨迹规划的结果作为一个前馈项,结合反馈控制律形成二自由度控制,可以获得比一般非线性控制律更好的性能^[1];另一方面,最优轨迹规划与最优控制问题本质上是一致的,通过最优轨迹规划,可以实现满足各种约束并具有特定性能指标的运动控制^[2]。

机器人轨迹规划既可以在关节空间中进行,也可以在任务空间进行。前者,对于一个 n 自由度机器人一般以关节力矩为输入量,广义关节坐标 $\mathbf{q}(\mathbf{R}_n)$ 为输出量,由于数学模型较为简单,形成了不少成熟的算

法,如为了满足焊接机器人电弧跟踪偏差补偿和插补过程中实时速度调整的需要,设计了一种由轨迹插补算法计算实时的关节角度变化来生成关节空间轨迹的方法^[3],此方法计算简单,实时性较好。但由于关节空间和任务空间的强非线性,使得在实际应用中难以达到较高的精度,只能用在一些对精度要求不是很高的场合。任务空间由于结构复杂,轨迹规划问题多采用神经网络、遗传算法等的智能算法来解决,但众多的约束条件使得算法的复杂度大大增加。也有学者采用对偶四元数的方法,通过引入两个对偶四元数系数,把对偶球面上的点映射到四维向量空间,在该向量空间上设计样条曲线,经归一化得到象空间上的轨迹^[4]。由于这两个映射系数和轨迹的关系,目前只有一个定性的结果^[5],因此难以对样条函数中的系数进行优化。

^① 基金项目:国家自然科学基金(60574051)

收稿时间:2010-03-03;收到修改稿时间:2010-04-03

本文将善于处理大规模组合优化问题的蚁群算法(Ant Colony Algorithm)应用到任务空间的轨迹规划中,并针对一台6自由度焊接机器人做了相应的改进,引入全局方向信息,即根据蚂蚁运动中下一结点与当前节点角度的改变量和两节点距离决定状态转移概率,考虑到特殊形状(如U形)的障碍物有可能使蚂蚁进入陷阱导致死锁,加入了蚂蚁的死亡机制并采用惩罚函数更新局部信息素,使得后续蚂蚁能够顺利避开此陷阱,较好解决了搜索过程的停滞问题。

2 轨迹规划的改进蚁群算法

2.1 蚁群算法

蚁群算法是由意大利学者 Marco Dorigo 等人通过模拟自然界中蚂蚁集体寻径行为而提出的,是一种基于种群的启发式并行智能进化算法^[6]。经过大量研究发现,蚂蚁个体在寻找食物的过程中,能够在它经过的路径上留下一一种称为信息素的外激素,蚂蚁通过感知这种激素的存在及强度来指导自己运动的方向,它们总是倾向于朝着这种激素强度高的地方移动。因此,由大量蚂蚁组成的蚁群的集体行为便表现出一种信息正反馈现象,通过路径的选择机制、信息素更新机制和蚂蚁个体之间的协调机制来找寻最优路径。

2.2 路径规划建模

设机器人末端执行器要从A点运动到B点并避开途中的障碍物(A点、B点及障碍物坐标一般通过示教方式获得),运动过程中需要满足如下的约束条件:

a) 时间最短

$$f_1 = \min(\max t_i), (1 \leq i \leq 6) \quad (1)$$

式中 f_1 为机器人执行器从A点运动到B点所用的时间, t_i 为关节 i 的运动时间

b) 运动路径最平滑

$$f_2 = \min\left(\frac{1}{2} \int_0^T x^m dt\right) \quad (2)$$

式中 f_2 为最小冲量, x 为当前坐标, T 为运动所经历的时间,按照最小冲击法设计的轨迹比按照最小能量准则设计的轨迹更光滑,因此也受到了众多学者的青睐。

c) 运动距离最短

$$f_3 = \min\left(\sum_{i=1}^n \sqrt{(y_{i-1} - y_i)^2 + (x_{i-1} - x_i)^2}\right) \quad (3)$$

式中 f_3 为机器人执行器从A点运动到B点所经过的路径长度, (x_i, y_i) 为途径点的坐标。

机器人执行器的轨迹规划是一个多目标优化的问题,需要权衡一个总目标下的多个子目标的优化来达到总目标最优的目的。本文结合实际中用到的6自由度焊接机器人综合考虑认为子目标的重要程度依次为运动路径最平滑、时间最短、运动距离最短,引入权重系数,建立轨迹规划的目标函数(a 、 b 、 c 为引入的权重系数):

$$F = af_1 + bf_2 + cf_3 \quad (4)$$

2.3 状态转移概率

在一个具有 m 只蚂蚁的蚁群算法中,蚂蚁 k ($k=1,2,\dots,m$) 在运动过程中会根据各条路径上的信息量决定下一步的转移方向。设 $\tau_{ab}(t)$ 表示在 t 时刻路径 ab 上的信息量,在 t_0 时刻,各路径上的信息量均相等,即 $\tau_{ab}(0)=const$, $p_{ab}^k(t)$ 表示在时刻 t 蚂蚁 k 由位置 a 向位置 b 运动的概率,计算方式如下:

$$p_{ab}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ab}(t)]^\alpha [\eta_{ab}(t)]^\beta}{\sum_{s \in allowed(a)} [\tau_{as}(t)]^\alpha [\eta_{as}(t)]^\beta}, & b \in allowed(a) \\ 0, & other \end{cases} \quad (5)$$

式中 $allowed(a)$ 表示所有与 a 相连但尚未被蚂蚁 k 访问过的节点。 α 为信息启发因子,表示信息素在蚂蚁运动时所起的作用,越大表明蚂蚁越倾向于选择其它蚂蚁所经过的路径,蚂蚁间的协作性就越好; β 为期望启发式因子,表示启发信息在蚂蚁选择路径时的受重视程度。 $h_{ab}(t)$ 为启发函数,反映了蚂蚁从节点 a 转移到节点 b 的期望程度,由于开始时各路径上的信息量相差不大,仅依靠距离来选择下一节点算法不仅收敛速度慢还有可能导致曲线不平滑,达不到所需的最优路径,本文引进方向启发因子来解决。

$$h_{ab} = \frac{1}{d_{ab} + \gamma \Delta q_b / \rho} \quad (6)$$

式中 d_{ab} 为 a 、 b 两点间的距离。 γ 为方向系数,代表方向启发因子的重要程度。 $\Delta \theta$ 为蚂蚁运动到下一结点时方向的改变量,由下式计算得到:

$$\Delta q_{ab} = |q_a - q_b| = \left| \arctan\left(\frac{y_b - y_a}{x_b - x_a}\right) - \arctan\left(\frac{y_c - y_b}{x_c - x_b}\right) \right| \quad (7)$$

式中 (x_c, y_c) 为 b 的下一结点 c 的坐标。

2.4 信息素更新

为避免残留信息素过多引起残留信息淹没启发信息,在每只蚂蚁走完一步或完成对所有节点的访问后,需要对信息素进行更新。信息素的更新分为全局信息素更新和局部信息素更新。对于前者,在 $t+n$ 时刻路径 ab 上的更新规则为

$$t_{ab}(t+n) = (1-r)t_{ab}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta t_{ab}^k(t) \quad (8)$$

式中 ρ 表示信息素的挥发系数,为了防止信息素的无限积累, ρ 的取值范围为: $r \in [0,1]$ 。 m 为蚁群中蚂蚁的个数。由于焊接机器人工作时障碍物的形状各异,当存在形如 U 字等的障碍物时会使蚂蚁进入陷阱无法找到下一节点而导致算法终止,为防止这种情况的发生本文将局部信息素的更新规则定义为分段函数的形式。当蚂蚁没有后继节点且未达到目标位置时蚂蚁死亡,并回退 h 个节点,采用惩罚函数将这些节点的信息量设为较小的值或负值,使后面的蚂蚁不会选择此段路径。当蚂蚁 k 有后继节点时信息素更新策略为

$$\Delta t_{ab}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{F}, & \text{蚂蚁}k\text{经过}(a,b) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

2.5 算法步骤

Step1. 参数初始化。令 $t=0$, $NC=0$, 最大循环次数 $N=100$, 将 m 只蚂蚁置于起点上, 初始化信息量, 并将起点加入到禁忌表中。

Step2. 判断蚂蚁是否有后继节点, 并更新标志。根据状态转移概率公式计算概率, 确定并移动到下一节点。

Step3. 将确定的节点加入到禁忌表中, 修改循环次数 NC , 蚂蚁个数 k 。

Step4. 根据 **step2** 中设置的标志更新局部信息素。

Step5. 若所有节点未完成遍历, 即 $k < m$, 则跳到 **step2**, 否则根据全局信息素更新规则更新信息素。

Step6. 当有 90% 的蚂蚁进入同一条路径时即认为找到最优路径结束循环, 当循环次数达到预设最大循环次数时输出相应信息结束循环。否则清空禁忌表并转到 **step2**。

3 仿真验证

为了验证算法的有效性, 本文做了大量的仿真实验, 分别考虑了具有任意障碍物和复杂程度不同的工作空间。为了便于衡量改进后蚁群算法的性能, 采用 20×20 规模的栅格空间来表示实际工作空间, 用路径所占的栅格数表示可行解的长度, 用拐点数衡量路径的平滑程度。在随机位置处加入预先设计的椭圆、矩形、抛物线形状的三个障碍物, 其余各栅格以不同的概率转变为障碍点, 对传统的蚁群算法和本文改进后的蚁群算法分别进行了实验。本次试验中设栅格转化为障碍点的概率为 15%, 蚂蚁数 $m=20$, 最大循环次数 $N=200$, $\alpha = \beta = 1$, 起始点为 $(0,20)$, 目标点为 $(20,0)$, 如图 1、2。

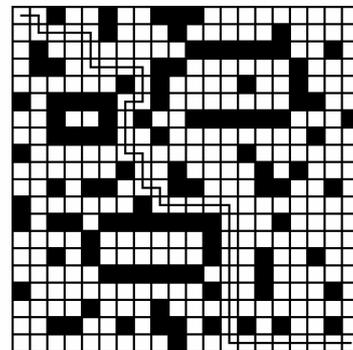


图 1 传统蚁群算法

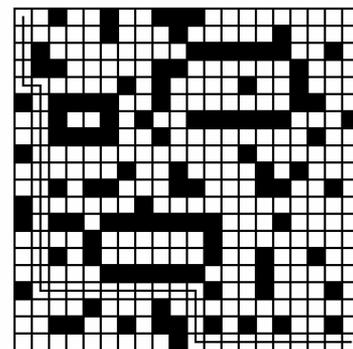


图 2 改进后的蚁群算法

同一实验条件下, 重复试验 50 次, 分别取拐点数、路径栅格数和循环次数的平均值如表 1。

经仿真对比, 传统的蚁群算法仅依靠距离和信息量选择路径使得曲线平滑性变差, 特别是算法开始时由于各个路径上信息量的差别不大, 对状态转移概率起主导作用的因素只有距离, 使得算法会优先选择离

表1 算法性能对比

	栅格数	拐点数	循环次数
传统算法	41.0	10.8	161.8
本文算法	39.2	6.4	94.9

目标点较近的路径,由此形成的路径拐点较多,机械本体运动时造成较大冲量不利于焊接机器人工作。改进后的蚁群算法由于加入了带方向信息的全局启发因子,使得拐点数目明显减少,轨迹曲线更光滑流畅。另外由于类U形区域的存在使传统的蚁群算法收敛速度受到很大限制,容易进入陷阱导致算法收敛变慢甚至停滞。加入死亡机制和回退策略加快了信息素的更新速度,从而使蚁群算法收敛速度有了明显改善,平均在第94.9次循环后达到指定要求,并且路径长度较短,目标函数值更小,能达到更好的轨迹优化效果。

4 结论

本文将蚁群算法应用到机器人的路径规划之中,引入带方向信息的全局启发因子使得算法的有效性大大提高。针对蚂蚁掉入陷阱的情况引入死亡机制并改进信息素更新策略,加快了算法的收敛速度。实验表

明改进后的蚁群算法能够在更短的时间内规划出一条满足多个约束条件的最优路径,在存在复杂形状障碍物的环境中更能体现算法优越性。

参考文献

- 1 M.v. NIEUWSTADT. Trajectory Generation for Nonlinear Control Systems[Ph.D Thesis]. California Institute of Technology, 1997.
- 2 ZEFRAN M. Continuous Methods for Motion Planning. [Ph.D Thesis]. University of Pennsylvania, 1996.
- 3 李天友,孟正大,赵娇娇,刘迎福,朱伟,刘少辉.基于焊接机器人的关节空间轨迹规划方法.电焊机, 2009, 4(39):46—50.
- 4 GE QJ, RAVANI B. Computer Aided Geometric Design of Motion Interpolants. ASME Journal of Mechanical Design, 1994,116(3):756—762.
- 5 PURWAR Q.J.GE. On the Effect of Dual Weights in Computer Aided Design of Rational Motions. Journal of Mechanical Design, 2005,127(26):967—972.
- 6 Dorigo M, Stützle T. Ant Colony Optimization. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 27—29.