

文章编号: 2096-1618(2019)03-0263-04

人工势场法与 A* 算法结合的机械臂避障路径规划研究

孙泾辉, 朱毅, 卢军

(成都信息工程大学软件工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对人工势场法在机械臂避障路径规划中容易陷入局部极小值的问题,提出了人工势场法与 A* 算法相结合的路径规划方法。首先使用人工势场法控制机械臂沿合势场梯度下降方向运动,若陷入局部极小值,则采用 A* 算法控制其运动到虚拟目标点以逃离局部极小值,然后再转换回人工势场法继续搜索直到抵达目标点。最终的仿真实验表明,改进方法可以成功规划出一条无碰撞的最优路径,并且对较复杂的工作环境具有较高的适应性。

关键词:机械臂;人工势场法;A* 算法;避障路径规划;虚拟目标点

中图分类号:TP241

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2019.03.010

0 引言

机械臂避障路径规划是指在其工作空间内,机械臂各连杆在相关算法的控制下,搜索出一条从初始状态到目标状态的无碰撞轨迹^[1]。该方法与传统的机器人路径规划方法有些不同^[2-5],因为机械臂具有多个关节,各个关节相互联系彼此制约,对机械臂进行避障路径规划不仅需要考虑末端执行器的运动状态,还需要考虑其他连杆的运动状态,在规划的过程中需要分析每个连杆是否与障碍物发生碰撞。由于机械臂避障路径规划对实时性要求较高,所以通常使用算法简明的人工势场法^[6](artificial potential field, APF)对其进行避障路径规划。但该算法属于局部路径规划方法,因为缺乏全局信息,比较容易陷入局部极小值^[7]。目前学者们对人工势场法的缺陷提出了两种优化方向^[8-10]:一种是将人工势场法与其他方法结合以此来克服其缺点;另一种是对其势函数进行变形优化。文中将人工势场法与 A* 算法进行结合,首先使用人工势场法对机械臂进行整体路径规划,当判断其进入局部极小值的时候,通过自适应的方法建立虚拟目标点,使用 A* 算法控制末端执行器移动到该点以逃离局部极小值,此时再切换为人工势场法继续搜索路径直到抵达目标点。

1 系统环境建模

文内实验对象是一个 6 自由度的机械臂,在对机械臂进行路径规划时,需要了解机械臂各关节的具体坐标,以及从基座到末端执行器的位姿(位置和姿态)转化关系^[11]。采用改进的 DH 建模方法,在机械臂各连杆上建立对应的坐标系,把两个连杆的位姿变换转

化为两个坐标系之间的齐次坐标变换^[12]。因此只要求出相邻连杆之间的齐次变换矩阵,通过该矩阵就可以建立基座到末端执行器的位姿关系。上述齐次变换矩阵只受关节角 $\theta[i]$ ($i=1,2,\dots,6$) 的影响,只要求出机械臂各关节角就可以确定各关节在全局坐标系中的位置 C_i ($i=1,2,\dots,6$)。

文中机械臂连杆和空间的障碍物都是不规则的形状,如果要尽可能地拟合其形状,将会极大增加碰撞检测建模的难度^[13]。因此,采用形状规则的包围盒方法^[14]对障碍物和机械臂连杆进行近似拟合。方法虽然增大了物体的体积,但极大地减少了碰撞检测算法的计算量,同时也增加了安全距离。本文使用球体包围盒对障碍物进行包围,使用圆柱体包围盒^[15]对机械臂各连杆进行包围,这样就把机械臂与障碍物的碰撞检测问题转化为球体和圆柱体之间的相交问题。

2 人工势场法与 A* 算法结合的研究

2.1 算法基本原理

人工势场法的基本原理是将机械臂在工作空间中的运动抽象为一种在虚拟势力场中的运动^[16],在目标点周围构造引力势场 U_{att} ,在障碍物周围构造斥力势场 U_{rep} ,则每一时刻机械臂受到的合势场为 $U = U_{att} + U_{rep}$,机械臂将沿着合势场梯度下降方向(目标点的方向)运动,直到抵达目标点。将机械臂受到的合势场简化为末端执行器受到的合势场,其受到的引力场为

$$U_{att}(C_6) = \frac{1}{2} k_a \rho^2(C_6, C_{goal}) \quad (1)$$

其中 k_a 为引力系数, C_6 为末端执行器的坐标, C_{goal} 为目标点的坐标, $\rho(C_6, C_{goal})$ 为末端执行器到目标点的距离。斥力场的情况比较复杂,当目标点周围存在障碍

物,机械臂在接近目标点的同时也在靠近障碍物,这可能使得目标点不是搜索空间合势场最低点,因此在原有斥力场势函数的基础上融入了距离影响因素(末端执行器和目标点之间的距离 $\rho^n(C_6, C_{\text{goal}})$),虽然靠近障碍物会让斥力场增大,但减小的距离会在一定程度上牵制斥力场的增长,修改后的斥力场势函数为

$$U_{\text{rep}}(C_6) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_r \left(\frac{1}{\rho(C_6, C_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^n(C_6, C_{\text{goal}}), \\ \rho(C_6, C_{\text{obs}}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(C_6, C_{\text{obs}}) > \rho_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 k_r 为斥力系数, C_{obs} 为障碍物的坐标, $\rho^n(C_6, C_{\text{goal}})$ 为机器人到障碍物的距离, ρ_0 为障碍物斥力场的影响范围。由于人工势场法属于局部路径规划方法,缺少全局状态信息,有时机器人会比较容易陷入局部极小值,如果没有对应的逃离措施,就会导致路径规划失败。

A*算法是一种状态空间的启发式直接搜索方法,与比较盲目的快速遍历随机树算法相比,其在搜索空间中加入了启发式函数,这使得搜索的方向更加明确^[17]。算法的核心思想是对初始位置周围的每个点进行评估,找到估价函数值最小的点并将其加入表中,再从该点继续搜索周围估价函数值最小点,如此循环往复直到抵达目标点,这样就可以找到从初始点到目标点的最优路径。A*算法的估价函数为 $f(n) = g(n) + h(n)$,其中 $g(n)$ 表示从初始节点到当前节点 n 所花费的实际代价, $h(n)$ 为从当前节点 n 到目标点所花费的估计代价。该算法的核心就是选取较好的启发式函数 $h(n)$,目前常用的启发式函数有曼哈顿距离、对角线距离和欧几里得距离,文中使用欧几里得距离作为启发式函数,这样可以使估计花费小于等于实际花费以提高搜索的效率。

2.2 APF 中局部极小值的处理

在人工势场法中,陷入局部极小值的具体表现为:机械臂在搜索过程中,找到一个位置使得合势场在相邻关节空间中达到最小值,向任何方向移动都会使合势场增大,因此机械臂会停止运动或者在某个很小的关节空间中震荡^[18],若该点不是之前路径规划的目标点,则认为机械臂陷入局部极小值。当判断机械臂当前各关节角与前10步各关节角差的绝对值小于一定的角度,并且这个位置不是目标点,则认为机械臂陷入局部极小值。针对该问题通常的处理方法是改变该点附近合势场梯度下降的方向,而这只适用于简单的环境,当空间信息复杂的时候该方法将很难奏效,通过自适应的方法计算虚拟目标点的位置,使机械臂运动到该点以逃离局部极小值。

自适应计算虚拟目标点位置的方法如图1所示, L_i 为简化的机械臂连杆 i 模型, C_i 和 C_{i+1} 为关节 i 和关节 $i+1$ 的位置, C_{goal} 为关节 $i+1$ 实际目标点位置, C_{obs} 为障碍物包围球的球心位置, C_{temp} 为虚拟目标点位置。此时,机械臂连杆 i 在 C_{i+1} 位置处陷入局部极小值。经过运动学分析,当连杆从包围球被平面 $C_i C_{i+1} C_{\text{goal}}$ 截取的体积最小的方向逃离用时最短,最容易摆脱局部极小值的束缚,因此虚拟目标点的位置应当处于这个方向。过包围球球心 C_{obs} 作平面 $C_i C_{i+1} C_{\text{goal}}$ 的垂线,该垂线与包围球交于 D ,过 C_i 和 D 作一条直线,虚拟目标点 C_{temp} 的位置就可以选择在这条直线上,并且 $C_i C_{\text{temp}}$ 的距离等于连杆 L_i 的长度(即 $C_i C_{i+1}$),通过该方法就确定了虚拟目标点的位置。

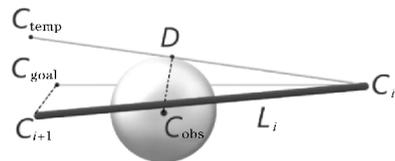


图1 虚拟目标点的位置

2.3 结合算法的设计

针对上述两种算法各自存在的问题,考虑使用人工势场法结合A*算法进行机械臂避障路径规划研究,这样既避免了机械臂在人工势场法的规划下陷入局部极小值无法逃离的问题,又避免了A*算法实时性相对较低的问题。

在改进算法中,首先使用人工势场法对机械臂进行整体的路径规划,其搜索空间为当前各关节角 $\theta[i]$ 的相邻关节空间 $(\theta[i] - \lambda, \theta[i], \theta[i] + \lambda)$, λ 为搜索步长,通过连杆间的约束关系可计算出末端执行器的关节坐标 C_6 ,选取其中合势场最小的无碰撞的一组关节角作为机械臂下一步的运动目标。当判断其进入局部极小值后,将使用自适应的方法计算虚拟目标点的位置,使用A*算法控制末端执行器移动到该点。在本文的A*算法中,末端执行器的当前关节坐标为 P_0 (局部极小值点);虚拟目标点坐标为 P_{goal} ;搜索空间为当前各关节角 $\theta[i]$ 的相邻关节空间 $(\theta[i] - \mu, \theta[i], \theta[i] + \mu)$, μ 为搜索步长,通过齐次坐标变换可计算出末端执行器的第 n 步坐标 P_n ;第 n 步搜索的最佳关节坐标为 $P_{\text{best}(n)}$ (该点的估价函数 $f(n)$ 最小),其后继关节坐标为 $P_{\text{son}(n)}$;启发式函数 $h(n) = \rho(P_n, P_{\text{goal}})$,实际代价函数 $g(n) = \sum_{m=1}^n \rho(P_{m-1}, P_m)$ 。为了统计搜索的路径信息,还需要建立open表和close表,open表保存等待检查的关节坐标,close表保存已经符合条件的不需要再次检查的关节坐标。其算法的具体步骤如下:

步骤1 末端执行器从 P_0 位置开始进行搜索,把

P_0 放入 open 表,计算该点的估价函数 $f(0)$,根据步长 μ 搜索 P_0 的相邻关节坐标并放入 open 表,将这些关节坐标的前驱坐标设置为 P_0 。此时把 open 表中的 P_0 删除,将其放入 close 表。

步骤2 遍历整个 open 表,找出估价函数 $f(n)$ 最小的关节坐标并设置为最佳关节坐标 $P_{best(n)}$,将其从 open 表中删除,放入 close 表。

步骤3 判断 $P_{best(n)}$ 是否为虚拟目标点,若是则路径规划成功停止搜索,否则根据步长 μ 继续搜索该点周围的相邻关节坐标,在每个关节坐标中检查各连杆是否与障碍物发生碰撞,保留未发生碰撞的关节坐标。如果这些坐标既没有在 open 表也没有在 close 表,则将其加入 open 表,设置其前驱坐标为 $P_{best(n)}$ 并转到步骤5;否则转到步骤4。

步骤4 如果存在一个坐标 $P_{son(n)}$,其已经处于 open 表中,则记录下该点之前的实际代价函数 $g(n)$ 同时计算经过 $P_{best(n)}$ 到该点新的实际代价函数 $g_{new}(n)$ 。若 $g_{new}(n) < g(n)$,则认为新的实际花费更少,将 $P_{son(n)}$ 的前驱坐标修改为 $P_{best(n)}$;否则不做任何处理。

步骤5 计算 open 表中所有关节坐标的估价函数 $f(n)$,转到步骤2。

当在 open 表中搜索到虚拟目标点 P_{goal} 时,表明路径已经找到,此时可以在 close 表中按照前驱坐标依次索引到初始位置 P_0 ,该路径就是使用 A* 算法搜索的最佳路径。当末端执行器运动到虚拟目标点并逃离局部极小值时,再转换为人工势场法控制机械臂继续搜索路径直到抵达目标点。

3 仿真实验

为了验证算法的有效性,在 Wolfram Mathematica 软件中进行仿真实验。实验中以机械臂各关节角为控制对象,控制机械臂在复杂的环境中从初始位置运动到目标位置,当其顺利避开障碍物抵达目标点时,说明机械臂避障成功。

机械臂运动控制参数为:初始关节角 $(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$;目标点的坐标 $C_{goal} = (170, 350, 100)$;1号障碍物的坐标 $C_{obs1} = (250, -100, 450)$,2号障碍物的坐标 $C_{obs2} = (320, 300, 150)$;搜索步长 $\lambda = 2^\circ$, $\mu = 0.5^\circ$;引力系数 $k_a = 40$,斥力系数 $k_r = 45$,斥力场的影响范围为 $\rho_0 = 50$ 。

使用传统的人工势场法对机械臂进行避障路径规划,机械臂的各关节角度变化情况如图2所示。在使用传统人工势场法的情况下,机械臂在第0步到第281步之间,其一直沿着合势场梯度下降方向运动,但在第281步后各关节停止运动,当前各关节角为 $(46^\circ, 55^\circ, 16^\circ, -65^\circ, -44^\circ, 75^\circ)$,通过计算得知此时并未到

达目标点,机械臂陷入局部极小值,路径规划失败。

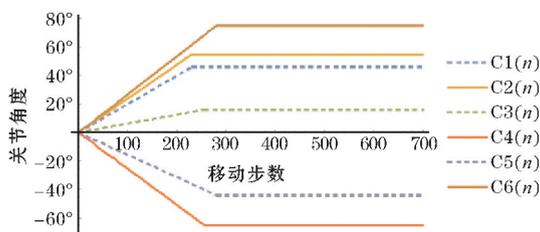


图2 传统 APF 算法中各关节角的变化情况

使用提出改进算法对机械臂进行避障路径规划,机械臂的各关节角度变化情况如图3所示。在使用改进算法对机械臂进行路径规划的情况下,当机械臂判断自身陷入局部极小值时,其按照自适应的方法计算虚拟目标点位置,使用 A* 算法控制机械臂逃离局部极小值,最终在第671步时到达目标点 C_{goal} ,此时机械臂的各关节角为 $(109^\circ, 67^\circ, 47^\circ, -29^\circ, 26^\circ, 36^\circ)$ 。与传统的人工势场法相比,改进算法更能适应较复杂的工作空间,具体的避障路径规划效果如图4所示。

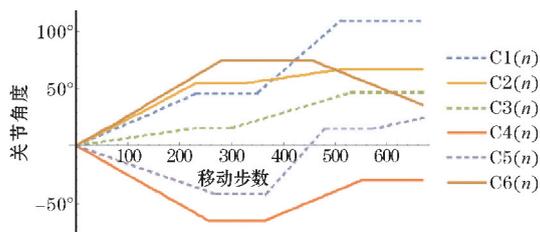


图3 改进算法中各关节角的变化情况

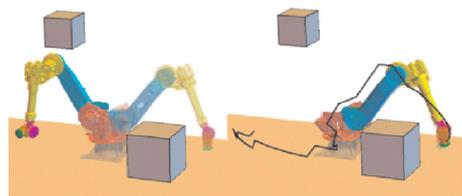


图4 机械臂避障路径规划的仿真

4 结束语

将人工势场法与 A* 算法进行结合,以此来弥补各个算法的缺点。首先使用运动学模型建立机械臂基座到末端执行器的位姿关系,使用包围盒技术对机械臂进行碰撞检测,然后运用人工势场法和 A* 算法对机械臂进行避障路径规划,采用自适应的方法指定虚拟目标点以帮助其逃离局部极小值。仿真实验结果表明,改进算法对于较复杂的工作环境具有较好的适应性,并且算法简单,实时性较高。但通过仿真实验也发现此算法规划出的路径并不是非常光滑,在现实世界中这将会使机械臂出现抖动而影响路径规划的效果,如何通过算法改进规划出一条比较光滑的运动轨迹将是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 张智,邹盛涛,董然,等.复杂环境建模与机器人避障规划研究[J].哈尔滨工程大学学报,2016,37(10):1373-1380.
- [2] Sekmen A, Challa P. Assessment of adaptive human-robot interactions [J]. Knowledge-based systems,2013,42(3):49-59.
- [3] Ramik D M, Sabourin C, Madani K. Autonomous knowledge acquisition based on artificial curiosity: application to mobile robots in an indoor environment [J]. Robotics and autonomous systems, 2013,61(12):1680-1695.
- [4] 鲍庆勇,李舜酩,沈垣,等.自主移动机器人局部路径规划综述[J].传感器与微系统,2009,28(9):1-4.
- [5] 马黎鹏.基于六自由度机械臂的路径规划研究[D].广州:华南理工大学,2013.
- [6] 张殿富,刘福.基于人工势场法的路径规划方法研究及展望[J].计算机工程与科学,2013,35(6):88-95.
- [7] 王俊龙,张国良,羊帆,等.改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J].计算机工程与应用,2013,49(21):266-270.
- [8] 肖本贤,余雷,李善寿,等.逃逸人工势场法局部极小值策略的研究[J].系统仿真学报,2007(19):4495-4498.
- [9] Vadakkepat P, KAI Chen-tan, WANG Ming-liang. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning[C]. Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation, La Jolla, California, USA, Volume 1. Piscataway, NJ: IEEE, 2000:256-263.
- [10] YUN Xiao-ping, TAN Ko-Cheng Tan. A wall-following method for escaping local minima in potential field based motion planning [C]. ICAR 97 Proceedings of 8th International Conference on Advanced Robotics, 1997, Monterey, California, USA. California: IEEE, 1997:421-426.
- [11] 王勇,李秀娟.某四自由度机械臂建模与 MATLAB 仿真研究[J].电子测量技术,2015,38(2):32-36.
- [12] 张化平,王宇航,陈汉卿.六自由度机械臂运动学分析与仿真[J].工业仪表与自动化装置,2017(5):127-130.
- [13] Hasan A T, Ismail N, Hamouda A M S. Artificial neural network-based kinematics jacobian solution for serial manipulator passing through singular configurations[J]. Advances in engineering software, 2010,41(2):359-367.
- [14] 金旻,叶明,刘洪广.一种基于包围盒技术的机械臂碰撞检测算法[J].机电工程,2008(10):63-66.
- [15] 何兆楚,何元烈,曾碧. RRT 与人工势场法结合的机械臂避障规划[J].工业工程,2017,20(2):56-63.
- [16] 祝敬,杨马英.基于改进人工势场法的机械臂避障路径规划[J].计算机测量与控制,2018,26(10):205-210.
- [17] 孙炜,吕云峰,唐宏伟,等.基于一种改进A*算法的工业机器人路径规划[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(4):94-101.
- [18] 肖本贤,李善寿,王晓伟,等.基于 PSO 和人工势场的机器人路径规划[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2007(6):718-722.

Research on Obstacle Avoidance Path Planning of Manipulator based on Artificial Potential Field Method and A* Algorithm

SUN Jinghui, ZHU Yi, LU Jun

(College of Software Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: Aiming at the problem that artificial potential field method is easy to fall into the local minimum in obstacle avoidance path planning of manipulator, this paper proposes a path planning algorithm based on artificial potential field method and A* algorithm. Firstly, artificial potential field method controls the manipulator to move along the gradient descent direction of the resultant potential field. If the manipulator gets into the local minimum, A* algorithm will be used to control its movement to the virtual target point to escape from the local minimum. Finally, it is converted to artificial potential field method to guide the manipulator to the target point. The final simulation experiments show that the improved algorithm can successfully plan a collision-free optimal path and have higher adaptability to more complex working environments.

Keywords: manipulator; artificial potential field method; A* algorithm; obstacle avoidance path planning; virtual target point