

基于网格法的机械臂无碰撞轨迹规划^①

鲁守银, 韩佳林

(山东建筑大学 机器人研究所, 济南 250101)

摘要: 介绍了高压带电作业机械臂在三维空间中进行无碰撞轨迹规划的一种方法, 通过对整个作业空间进行网格化划分, 完整的描述出自由空间与障碍物空间, 并对每一个网格进行索引对应, 使其在利用 A*算法搜索路径是可以迅速准确的得到最优的无碰撞路径, 减少系统的运行时间.

关键词: C 空间; 网格法; A*算法; 无碰撞路径

Collision-Free Path Planning for Manipulator Based on the Grid

LU Shou-Yin, HAN Jia-Lin

(Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: This article describes a method of high voltage operation mechanical arm trajectory planning of collision-free in three-dimensional space. By mesh partition the whole workspace, a complete description of the free space and the obstructions space is made. And each grid is corresponding to an index. Then in the search path which used A* algorithm can be quickly and accurately get the best collision-free path and reduced the running time of the system.

Key words: C space; grid method; A* algorithm; collision-free plan

1 引言

随着电力行业的发展, 能够在高压线路上进行带电作业的电力机器人的发展越来越受到重视, 但高压杆塔周围的环境较为复杂, 机器人的机械臂在带电作业时稍有不慎便会引起安全事故和线路损坏, 因此, 机械臂路径规划研究对于高压带电作业机器人来说至关重要.

针对机械臂的路径规划需要在三维空间内进行分析, 目前多采用的是C空间法. 在多维C空间中, 障碍物和自由空间之间的边界面呈现为复杂曲面, 正确的描述这种以曲面为边界的空间是解决机器人路径规划的关键所在^[1]. 鉴于已有的机械臂避障轨迹规划算法复杂, 三维空间建模困难等因素, 本文提出了建立网格化划分的作业空间模型, 在此模型中, 机器人手臂的每个位姿可以表示成为一个点, 模型中机器人手臂与障碍物发生碰撞的位姿集合构成C空间障碍. 求出C障碍物空间后路径规划问题就转变为求从初始位姿

点到目标位姿点的不与C障碍物空间发生碰撞的路径问题.

本文假设实际作业环境内的所有物体的形状和构型已知, 在C空间内通过对障碍物进行底面与侧面投影, 利用网格法近似得到障碍物的障碍区域, 对机械臂的路径规划展开探讨.

2 作业环境分析

本文研究的机械臂为Kraft液压机械臂(图1), 共有六个自由度, 在目前研究现状下, 针对六自由度机械臂在六维度空间内进行分析尚无法实现^[2], 考虑到Kraft机械臂的小臂与手抓关节的活动空间比较小, 我们将其与中臂合并成为一个前臂整体进行研究分析(图2), 经过现场的调试试验, 证实这种分析在实际作业操作中是可行的.

作业时机械臂安装在带电作业机器人的操作平台上, 通过平台上的双目摄像机实时获取当前的作业环

^① 基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(2012AA041506)

收稿时间:2013-11-05;收到修改稿时间:2013-12-25

境及障碍物和机械臂的坐标信息。机械臂的作业是在室外的高压线路或杆塔上,可以实现高压线剥皮,更换绝缘套管和跌落开关等动作。在作业时,现场环境比较复杂,机械臂很容易误碰到绝缘子,线杆或者高压线等物体,可能会引起线路损坏或者断电等事故。

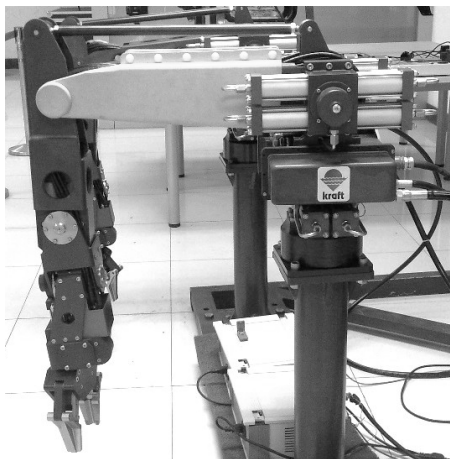


图 1 Kraft 机械臂

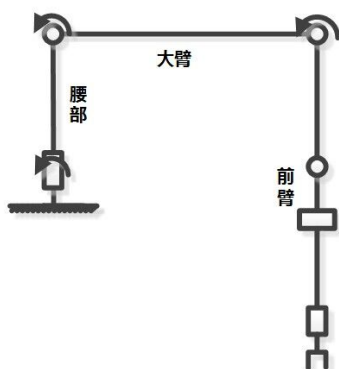


图 2 机械臂简单表示

3 C空间分析

C空间又被称为构型空间(Configuration Space, 简称 C Space),其本质为一广义空间,是用来表示物体自由度的参数空间^[3]。在构型空间中,机械臂及其他固定物体互不干涉的构型集合被称为自由空间。构型空间所描述的工作空间中的障碍物被称为 C 障碍物(C-Obstacle)。

通过操作平台上的双目摄像机得到当前的作业环境及障碍物和机械臂的坐标信息后,首先在计算机上对障碍物进行 C 空间分析。由于高压线路附近的障碍物形状不规则且各种障碍物的形状各不相同,出于通用性考虑,本文采用一种随机的障碍物形状进行分析。

障碍物在三维空间中的障碍物空间难以描述,我

们通过对障碍物进行底面与两个侧面进行投影,首先对其在二维平面内进行相关分析,然后扩展到三维空间中,对于机器人的轨迹规划而言,这种分析能够比较准确的描述出其障碍物空间。

底面投影即从障碍物顶部垂直向下做投影,对机械臂的作业区域进行等单元网格分割,沿着单元的边界我们可以描述出最接近于障碍物投影的障碍区域(图 3)。这样我们可以得到近似的底面障碍物区域和自由区域。同样的,对障碍物进行两次侧面投影,对得到的侧面投影区域进行等单元网格分割,并描绘出的近似障碍物区域及自由区域。

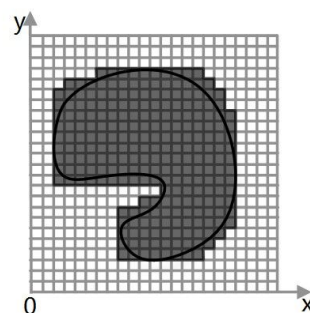


图 3 底面二维投影

由上述的投影分析,我们得到在底面与两个侧面二维平面内的障碍物区域与自由区域,然后我们对这三个平面在三维空间内进行拓展(图 4),由此,我们将整个实际空间分割为若干个小立方体单元,这些小立方体单元能够近似的描述出自由空间与障碍物空间。

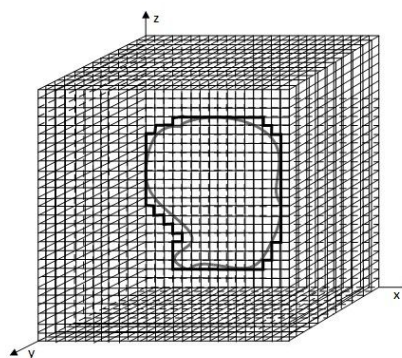


图 4 三维空间网格化

在机械臂的路径规划过程中,我们通常是将机械臂描述为几条线段来简化求解过程,因此得到近似的障碍物空间以后,我们还需对障碍物空间进行扩展^[4],以避免实际运动中机械臂与障碍物发生碰撞。

障碍物空间的扩展过程为: 将机械臂外形简化为圆柱形状, 取机械臂大臂的半径 d , 对障碍物空间向外以半径 d 做各个方向上的扩展, 凡是与扩展范围内相交的小立方体都纳入到障碍物空间中.

至此, 我们将作业空间分割, 将整个 C 空间分为障碍物空间与自由空间, 并使用网格法将整个空间用相等的小立方体单元表示. 对于每一个小立方体单元, 都加上其对应的索引值^[5], 对于自由空间内的小立方体, 其索引值为 $index(x, y, z)$, 而障碍物空间内的小立方体对应的索引值为 $index(x', y', z')$, 索引值 $index(x, y, z)$ 对应于每个小立方体的某个顶点, 可以在小立方体的八个顶点中任取, 但是必须选取统一方向上的顶点, 本文中选取每个小立方体最接近于原点 O 的顶点为索引点. 索引值 $index(x, y, z)$ 中 (x, y, z) 分别代表从原点开始到索引点处对应于 x, y 和 z 方向上的小立方体个数, 并不代表其坐标值, 取小立方体的边长为 $length$, 那么索引点处的坐标为

$$\begin{cases} P_x = x \times length \\ P_y = y \times length \\ P_z = z \times length \end{cases}$$

由此, 我们得到了整个作业空间的网格化模型, 将整个作业空间划分为有毗邻关系的各个单元, 每一个单元都对应一个单独的索引值.

4 路径搜索

得到作业空间的网格化模型以后, 需要在网格化的自由空间内进行路径搜索, 以得到机械臂的最优运动路径. 在搜索实际路径之前, 应该先对所有的单元进行一番调查, 把不包含障碍物的自由单元的毗邻关系记录下来, 于是路径规划问题就可以归结为图形搜索问题. 常见的图形搜索方法有最佳优化搜索、A*算法、双向搜索等.

A*算法的估价函数可以表示为:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

这里, $f(n)$ 是节点 n 的估价函数, $g(n)$ 是在状态空间中从起始节点到 n 节点的实际代价, $h(n)$ 是从 n 到目标节点最佳路径的估计代价[1].

A*算法的具体步骤如下:

- 1) 把起始节点添加到 *Open* 列表.

- 2) 重复如下的工作:

- a) 寻找 *Open* 列表中 $f(n)$ 值最低的节点. 我们称它为当前节点.

- b) 把当前节点移动到 *Close* 列表

- c) 对当前节点的每个相邻节点

- * 如果它已经在 *Close* 列表中, 略过它.

- * 如果它不在 *Open* 列表中, 把它添加进去. 把节点作为这一节点的父节点. 记录这一格的 $f(n)$, $g(n)$ 和 $h(n)$ 值.

- * 如果它已经在 *Open* 列表中, 用当前节点的 $g(n)$ 值为参考检查新的路径是否更好. 更低的 $g(n)$ 值意味着更好的路径. 如果是这样, 就把这一节点的父节点改成当前节点, 并且重新计算这一节点的 $g(n)$ 和 $h(n)$ 值. 如果保持 *Open* 列表按 $f(n)$ 值排序, 改变之后要重新对 *Open* 列表排序.

对于起始节点 n_0 的任意后续节点 n_i , 其估值函数为

$$f(n_i) = g(n_i) + h(n_i)$$

如果 n_i 为扩张节点 n_0 的同一平面的相邻节点(图 5 中情况 1), 则 $g(n_i)$ 的值有递归方程为

$$\begin{cases} g(n_{i+1}) = g(n_i) + length & ; i \geq 1 \\ g(n_i) = length & ; i = 0 \end{cases}$$

如果 n_i 为扩张节点 n_0 的同一平面的对角相邻节点(图 5 中情况 2), 则 $g(n_i)$ 的值有递归方程为

$$\begin{cases} g(n_{i+1}) = g(n_i) + length & ; i \geq 1 \\ g(n_i) = length & ; i = 0 \end{cases}$$

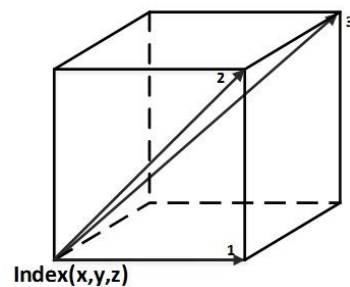


图 5 $h(n)$ 三种情况

如果 n_i 为扩张节点 n_0 的不同平面的对角相邻节点(图 5 中情况 3), 则 $g(n_i)$ 的值有递归方程为

$$\begin{cases} g(n_{i+1}) = g(n_i) + length & ; i \geq 1 \\ g(n_i) = length & ; i = 0 \end{cases}$$

而对于 $h(n_i)$, 我们通过计算其曼哈顿距离来求得^[6], 设结束节点 n_D 的索引点坐标为

$$\begin{cases} P_{x_D} = x_D \times length \\ P_{y_D} = y_D \times length \\ P_{z_D} = z_D \times length \end{cases}$$

d) 停止, 当

* 把目标节点添加进了 *Close* 列表, 这时候路径被找到.

* 没有找到目标节点, *Open* 列表已经空了. 此时路径不存在.

3) 保存路径. 从目标节点开始, 沿着每一节点的父节点移动直到回到起始节点, 这就是所求的路径.

5 仿真验证

根据上述介绍的 C 空间网格法及路径搜索算法, 我们使用建立相应的仿真系统^[7], 仿真系统基于 Windows7 的 32 位操作系统, 配有 Intel E7400 处理器和 2G 内存, 使用 C#与 Matlab 语言混合编程, 以 Microsoft Visual Studio 2008 为开发环境.

在计算机上对 Kraft 机械臂进行无碰撞运动规划仿真, 利用该仿真系统, 只要给出机械臂与障碍物非碰撞的起始和目标位姿, 系统会自动对空间内的障碍物进行分析网格化并搜索出机械臂的最优无碰撞轨迹. 仿真实验时输入起始与目标位姿, 然后按下“仿真”按钮, 如图 6 所示.



图 6 仿真控制台

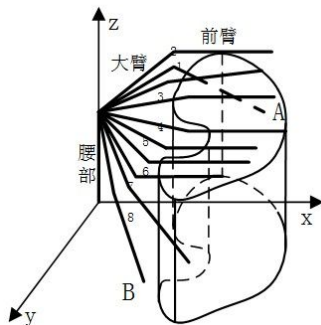


图 7 仿真结果

图 7 给出了基于此仿真系统的一个仿真结果, A 点为起始位姿, B 点为目标位姿, 1-8 表示机械臂的运动顺序. 可以看出, 在给出起始位姿和目标位姿的情况下, 机械臂可以准确的避开障碍物, 并在保证不与障碍物发生碰撞的情况下, 寻求从起始点到目标点最优的运动路径, 保证机械臂能够准确的完成作业任务.

6 结论

本文针对 Kraft 机械臂设计了一种基于网格法的路径规划算法. 通过对工作空间进行底面及两个侧面投影和网格划分, 然后在三维空间内进行扩展, 得到 C 空间内近似的自由空间和障碍物空间, 将整个空间划分为均等的单元网格, 并对每一个单元网格进行索引对应, 然后在网格化后的三维空间内运用 A*算法求出最优的无碰撞路径, 减少了规划过程中的估计代价, 提高了三维空间无碰撞路径规划的实时性, 降低了机械臂路径规划的复杂程度.

本文以高压带电作业机器人采用的六自由度的 kraft 液压机械臂展开仿真研究, 对于推动高压线路作业机器人的避障路径规划有积极意义.

参考文献

- 1 宗光华,程君实,等.新版机器人技术手册.北京:科学出版社,2007.
- 2 Hasegawa T, Terasaki H. Collision avoidance: Divide-and-conquer approach by space characterization and intermediate goals. IEEE Tran. on Systems, Man and Cybernetics, 1988, 18(3): 337-347.
- 3 Lozano-Pérez T, Wesley MA. An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. Communications of the ACM, 1979, 22(10): 560-570.
- 4 徐毓良,杨起帆.机器人三维空间无碰撞路径规划.机器人,1991,13(5):1-6.
- 5 孟赞,刘邦权.三维场景中角色自动寻径算法研究.武汉理工大学学报,2011,33(12):125-130.
- 6 施达雅,滕忠坚,陈清华.基于图搜索 A*算法的估价函数比较.电脑知识与技术,2008,3(26).
- 7 马如奇,郝双晖,郑伟峰,等.基于 MATLAB 与 ADAMS 的机械臂联合仿真研究.机械设计与制造,2010,(4):93-95.