

基于拓扑法的多关节机械手无碰路径规划

李永成 张 钹

(清华大学计算机系,北京 100084)

COLLISION—FREE PATH PLANNING FOR A MULTI—JOINT ROBOTIC ARM BASED ON TOPOLOGICAL METHOD

Li Yongcheng and Zhang Bo

(Department of Computer Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract In this paper, a collision—free path planning for a multi—joint robotic arm based on topological method is presented. The problems of how to partition the Configuration Space, how to judge the connectivity between connected blocks and how to search for a path are mainly discussed, finally an experimental result is given to show the feasibility of the planning method.

摘要 本文提出了一种基于拓扑法的多关节机械手无碰路径规划方法,文中重点讨论了三关节机械手路径规划时如何划分状态空间、判别各连通块之间的连通性以及路径搜索等问题,最后我们给出了一个实验结果以示该方法的有效性。

§ 0. 引 言

无碰路径规划是人工智能中的一个重要研究课题,由于它在智能机器人中有着明确的应用背景,因此近几年来很受各方面学者的重视。

无碰路径规划的任务是,给定一个障碍环境,一个运动物及其起始与目标的位置(姿态),求一条从已知起点到目标点的路径,使该运动物体能安全、无碰撞地绕过其间的障碍。如果无碰路径存在,则具体求出来;否则,该问题无解。

人工智能中目前普遍采用的路径规划方法是各种几何法,它的基本原理如下。

先根据运动物的大小和姿态,将已知的障碍物扩展,变换为扩展障碍(grown obstacles),与此同时,运动物缩成一个点。从而使原来物理空间中求运动物的无碰路径规划,变为新的空间中(状态空间 Configuration Space)求质点的运动轨迹问题。

用状态空间表示法求解无碰路径规划始于1968年(见 W. E. Howden)^[1]后经 S. Udupa,^[2]Lozano—Pérez, M. A. Wesley, R. A. Brooks^[3-5]等人的工作,目前已形成各种不同的

几何规划方法,如可视图法(visibility graph),切块投影法(slice projection)和切分法(subdivision)等.几何法直接在状态空间中寻找路径,其共同缺点是,当状态空间维数很高时,如五维、六维,计算量很大,因此程序实现上仍有不少困难.

1981年前后,张钹、张铃等提出用状态空间的连通性分析的拓扑方法来解决无碰路径规划问题,^[6,7]1983年 J. T. Schwartz 和 M. Sharir 等也独立地用拓扑方法来求解运动规划问题.^[8]目前运动规划的拓扑方法已为更多的人所接受,它与几何法一起,已成为解决运动规划问题的两个主要方法.

本文将简要地介绍拓扑法的基本原理,重点讨论如何基于拓扑法的基本思想在实际环境中进行三关节机械手的运动规划.

§ 1. 拓扑法的基本原理

拓扑法主要包含三个部分:划分状态空间,将划分的结果构建成一个特征网,然后在特征网上搜索路径.

1.1 状态空间的划分

设自由状态空间为一个图 $F(D)$, D 为状态空间的定义域,我们将用 r -增长线,消失线和障碍边缘线将 D 分解为 $\{D_i\}$ ($i=1, \dots, r$).

对 $\{D_i\}$ 中的所有 D_i ,我们找出 $F(D_i)$ 的连通分支如下

$$F(D_i) = \bigcup_{j=1}^{n_i} F_j(D_i)$$

由此, $F(D) = \{D_i, F_j(D_i)\}$ ($i=1, \dots, r; j=1, \dots, n_i$)

1.2 构建特征网

将每个 $(D_i, F(D_i))$ 看作一个父节点 (i) , 每个 $(D_i, F(D_i))$ 对应若干个子节点 (i, j) 作为它的后继节点,并用实线在叶子节点上连接互相连通的连通分支,我们得到一个树状网络称为特征网.

1.3 路径搜索

首先找到运动物的起始点和目标点所对应的特征网上的起始节点和目标节点,然后在特征网上的叶子节点中寻找一条从起始节点到目标节点的连通道路,由此我们可得到相应的物理空间中运动物的无碰路径.

§ 2. 三关节机械手的无碰路径规划

我们所要讨论的运动物是一个三关节的关节型机械手,设这三个关节为 $\{A_{i-1}A_i, l_i, r_i, \theta_i\}$ ($i=1, 2, 3$), 这里手臂 $A_{i-1}A_i$ ($i=2, 3$) 在由 $A_{i-2}A_{i-1}$ 和 $A_{i-1}A_i$ 决定的平面上绕端点 A_{i-1} 旋转, 而 A_0A_1 绕自身旋转, A_0 端固定, l_i 为 $A_{i-1}A_i$ 的长度, r_i 是 $A_{i-1}A_i$ 的半径, θ_i 为 $A_{i-1}A_i$ 的方向角. 假设环境中的障碍为一些棱柱、圆柱、球及墙, 如图 1 所示.

以下我们将依次讨论如何划分状态空间、如何构建特征网以及如何在特征网上搜索路径.

2.1 划分状态空间

机械手的状态空间为 $\Theta_1 \times \Theta_2 \times \Theta_3$, 其中每个连通块可表示为 $(D_i, F_j(D_i)), G_k(D_i)$,

$F_j(D_i)$). 状态空间的划分可按如下过程进行.

首先将 D 划分为 $\{D_i\}$, 使得 $\forall x \in D_i, F(x)$ 有相同的连通枝组合, 即 $F(x)$ 有相等的连通枝数 n , 且 $F_j(x) (1 \leq j \leq n)$ 有相同的划分形式, 亦即 $F_j(x)$ 由相同的障碍的边界或相同的障碍的 r -增长线划分而成.

其次, 将 $F(D_i)$ 划分为 $\{F_j(D_i)\}$, 使得 $\forall y \in \{D_i, F_j(D_i)\}, G(y)$ 有相同的连通枝组合, 然后计算 $\{G_k(D_i, F_j(D_i))\}$.

状态空间 $\Theta_1 \times \Theta_2 \times \Theta_3$ 中, Θ_1 的划分最为复杂和困难, 因为划分 Θ_1 时还需考虑到后两个关节的影响, 下面我们重点讨论 Θ_1 的划分.

2.1.1 Θ_1 的划分

Θ_1 的划分主要由以下四个部分组成.

2.1.1.1 用障碍的边界划分 Θ_1

这里我们主要考虑障碍对关节 A_1A_2 的影响. 设 $[\alpha_1, \alpha_2]$ 、 $[\alpha_2, \alpha_3]$ 和 $[\alpha_3, \alpha_4]$ 分别表示关节 A_0A_1 的三个运动区间, $\forall \alpha \in [\alpha_2, \alpha_3]$, 存在方向角 β , 使得关节 A_1A_2 位于方向角 β 时与某障碍有交, 而 $\forall \alpha \in [\alpha_1, \alpha_2] \cup (\alpha_3, \alpha_4]$ 时, 关节 A_1A_2 均与该障碍不交, 则我们应求出区间 $[\alpha_2, \alpha_3]$ 的端点 α_2, α_3 作为 Θ_1 的划分点.

2.1.1.2 用障碍的 l_3 -增长线划分 Θ_1

这里我们主要考虑障碍的 l_3 -增长线对关节 A_1A_2 的影响, 其基本方法与 2.1.1.1 相同, 不同之处为在计算时只需将关节 A_1A_2 的长度用 l_2+l_3 来代替即可.

2.1.1.3 用消失面划分 Θ_1

[6,8]中提出了平面上二维消失线的概念, 我们通过对多关节机械手划分状态空间的研究, 提出了三维空间中消失面的概念.

在 Θ_1 的某一个小区内作三个不同的垂直切面, 如图 2 所示, 当关节 A_0A_1 从图 2.1(a) 所对应的方向角运动到图 2.1(b) 及图 2.1(c) 所对应的方向角时, Θ_2 的连通状况发生了改变, 其连通枝数减少了一个, 因此图 2.1(b) 所对应的垂直剖面为一种分界面, 我们称之为消失面, 应求出该图所对应的关节 A_0A_1 的方向角作为 Θ_1 划分点. 消失面的产生有两种情况, 一是由障碍的边界线产生, 一是由障碍的 l_3 -增长线产生.

2.1.1.4 关节 A_1A_2 的运动死区对划分 Θ_1 的影响

关节 A_1A_2 的活动范围并不是 2π , 而是存在一个运动死区, 这个运动死区会对 Θ_1 的划分产生影响. 如图 3 所示, 我们在 Θ_1 的某个小区内作三个不同的垂直切面, 当关节 A_0A_1 从图 3(a) 所对应的方向角运动到图 3(b) 及图 3(c) 所对应的方向角时, Θ_2 的连通状况发生了改变, 其连通枝数减少了一个, 由此我们可看出图 3(b) 对应一种分界状态, 应求出该图所对应的关节 A_0A_1 的方向角作为 Θ_1 的划分点. 与 2.1.1.3 类似, 这种划分点的产生也有两种原因, 一是由障碍边缘线, 一是由障碍的 l_3 -增长线.

2.1.2 Θ_2 的划分

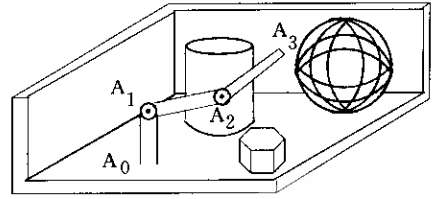


图1 机械手及其环境

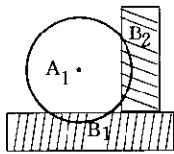


图2.1(a)

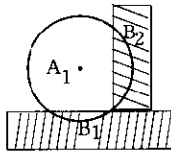


图2.1(b)

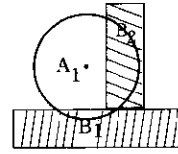


图2.1(c)

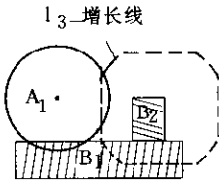


图2.2(a)

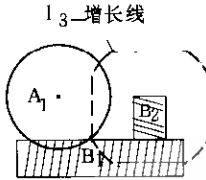


图2.2(b)

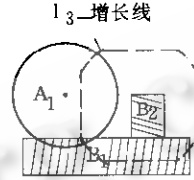
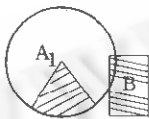


图2.2(c)

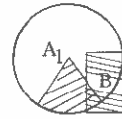
图 2 消失面对划分 Θ_1 的影响



死区
图3(a)



死区
图3(b)



死区
图3(c)

图 3 关节A1A2的运动死区对划分 Θ_1 的影响

作过 A_1 的垂直切面,在切面上用障碍的边缘线及障碍的 l_3 增长线来划分 Θ_2 即可.

2.1.3 Θ_3 的划分

在过 A_1 的垂直切面上仅用障碍的边缘线来划分 Θ_3 即可.

2.2 构建特征网

经过上述对机械手的状态空间划分之后,我们便得到 $\Theta_1 \times \Theta_2 \times \Theta_3$ 上的许多连通块,只要我们能够判别这些连通块之间的连通性,我们便可构建特征网了.下面我们重点讨论连通性的判别问题.

设有两个连通块 $(D_i, F_j(D_i), G_k(D_i, F_j(D_i)))$ 和 $(D_m, F_n(D_m), G_p(D_m, F_n(D_m)))$,它们之间连通有两种可能,一是 $D_i = D_m$,一是 D_i 与 D_m 相邻,下面就分别进行讨论.

1) $D_i = D_m$

此时,它们之间的连通条件为 $F_j(D_i)$ 与 $F_n(D_m)$ 相邻,设 $F_0 = F_j(D_i) \cap F_n(D_m)$,则 $G_k(D_i, F_0) \cap G_p(D_m, F_0) \neq \emptyset$.

2) D_i 与 D_m 相邻

设 $D_0 = D_i \cap D_m$,则连通条件为 $F_c(D_0) = F_j(D_0) \cap F_n(D_0) \neq \emptyset$,且 $\exists F_0 \in F_c(D_0)$,使得 $G_k(D_0, F_0) \cap G_p(D_0, F_0) \neq \emptyset$.

判别条件 2) 从理论上并不复杂,但要用计算机程序实现却较困难,因为它意味着要扫描 $F_c(D_0)$ 上的每一点.通过研究 $G_k(D_i, F_j(D_i))$ 的变化情况,我们发现如下规律:

$(D_i, F_j(D_i))$ 可近似划分为一个个小的区间,在这些区间上 $G_k(D_i, F_j(D_i))$ 的最大、最小

值的变化是单调的,且这些最大、最小值的变化率近似相等,即可用一条直线来表示,见图 4.

设有两个映射 $f_1(x), f_2(x)$, 它们的最大、最小值呈单调直线变化,如图 5 所示,则 $f_1(x)$ 与 $f_2(x)$ 相交的最大部分不是在 x_1 就是在 x_2 , 即 $f_1(x) \cap f_2(x) \neq \emptyset$, 当且仅当 $f_1(x_1) \cap f_2(x_1) \neq \emptyset$ 或者 $f_1(x_2) \cap f_2(x_2) \neq \emptyset$, 其中 $x \in [x_1, x_2]$.

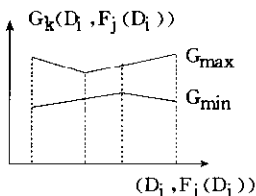


图 4

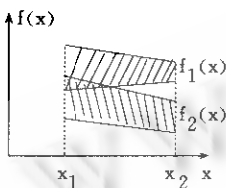


图 5

由此,通过计算出 $(D_i, F_j(D_i))$ 上的这些 x_1, x_2 点, 2) 所描述的连通条件就很容易计算了.

一旦所有的连通块之间的连通性判别完毕后, 我们便可很方便地建立起相应的特征网来.

2.3 路径搜索

在特征网上找到机械手的三个关节的初始状态和目标状态所对应的叶子节点, 然后便可根据特征网上的连通信息进行搜索了. 搜索的方式可采用深度优先或宽度优先及启发式搜索等, 其中启发式搜索可采用 A 算法或 A* 算法.

当我们采用 A 算法时, 我们设计的启发函数如下

$$f(n_1, n_2, n_3) = g(n_1, n_2, n_3) + h(n_1, n_2, n_3)$$

其中 (n_1, n_2, n_3) 为当前节点的序号; $g(n_1, n_2, n_3)$ 为从起始节点到当前节点所经过的节点个数; $h(n_1, n_2, n_3) = c_1 |n_1$

$- n_{e1}| + c_2 |n_2 - n_{e2}| + c_3 |n_3 - n_{e3}|$, 其中 (n_{e1}, n_{e2}, n_{e3}) 为目标节点的序号, c_1, c_2, c_3 为所设置的权, $c_1 \geq c_2 \geq c_3 \geq 0$. 若取 $c_1 = 1, c_2 = c_3 = 0$, 则相应的 A 算法就成为 A* 算法了.

路径搜索成功后, 我们可得到一条由特征网上的叶子节点所组成的路径, 由此我们还要进一步给出机械手各关节的角度值, 当然机械手的关节角可从相应节点中任意选, 但任选的角度值往往使得机械手的运动轨迹不平滑, 跳动性很大, 因此我们还应该设计一个优先权的权函数, 原则上使得这次所选的关节角尽可能与上次所选的关节角接近, 这样我们便可得到一组使得机械手运动起来较平滑的数据, 通过实验观察这样做的效果还是较好的.

2.4 系统的结构

根据上述的讨论结果, 我们可建立一个多关节机械手的路径规划系统, 其中系统结构的主框图如图 6.

§ 3. 实验结果和分析

本文所讨论的基于拓扑法的多关节机械手无碰路径规划算法已在 SUN3/260 工作站上用 C 语言实现, 其源程序长约 200K 字节, 经过许多典型例子的测试, 该系统都能有效地规划出路径. 图 7 为带有手爪的多关节机械手抓取、放置一个物体时路径规划的一个例子, 其中机械手在大范围内的避障运动便是采用三关节机械手无碰路径规划算法规划的结果. 在这个例子中, 环境中共有 9 个障碍, 其自由状态空间共划分为 391 个连通块, 需消耗 CPU 时间 105 秒, 而搜索仅花了 1.7 秒. 由此我们可知当环境中的障碍保持不变而进行新的规划时, 搜索所需要的时间是很短的.

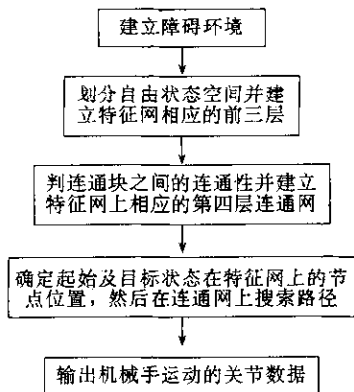


图6 多关节机械手路径规划系统的结构主框图

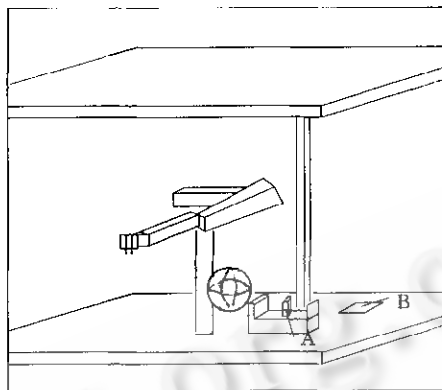


图7 机械手运动规划的一个例子: 抓取物体A放置在位置B

参考文献

- 1 Howden, W. E. ,The Sofa Problem,Comput. J. ,Vol. 11,1968,299—301.
- 2 Udupa,S. ,Collision Detection and Avoidance in Computer Controlled Manipulators,Proc. 5th Int. Joint Conf. Artificial Intell. ,Massachusetts Inst. Technol. 1977,737—748.
- 3 Brooks,R. A. and Lozano—Pérez T. ,A Subdivision Algorithm in Configuration Space for Findpath with Rotation, MIT Artificial Intell. Lab. Rep. AIM—684,Dec. 1982.
- 4 Lozano—Perez, T. and Wesley, M. A. ,An Algorithm for Planning Collision—Free Paths Among Polyhedral Obstacles,Commun. Ass. Comput. Math. ,Vol. ACM—22,1979,560—570.
- 5 Brooks,R. A. ,Solving the Find—Path Problem by Good Representation of Free Space,IEEE Trans. on SMC,Vol. SMC—13, No. 3,1983,190—197.
- 6 Chien,R. T. ,Zhang Ling and Zhang Bo,Planning Collision—Free Paths for Robotic Arm Among Obstacles,IEEE Trans. ,PAMI—6(1),1984,91—96.
- 7 张铤,张铃,解无碰路规划的降维法,《机器人》,1988,6,32—38.
- 8 Schwartz,J. T. and Sharir,M. ,On the Piano Movers' Problem ; V. The Case of a Rod Moving in Three—Dimensional Space Admist Polyhedral Obstacles, New York University,Courant Institute Robotics Research Report 13, Oct. 1983.

欢 迎 订 阅

《计算机辅助设计与图形学学报》(季刊)

国际标准刊号:ISSN 1003—9767

国内统一刊号:CN11—2925/TP

全国各地邮局订购 邮发代号:82—456 定价:4.00 元

1994 年将试刊彩色插面版,单价不变。