

文章编号: 1002-0446(2002)02-0112-03

## 双臂机器人无碰撞运动规划\*

陈 峰 丁富强 赵锡芳

(上海交通大学机器人研究所 上海 200030)

**摘 要:** 双臂 SCARA 型机器人的操作臂的运动可以看成是平面内的四边形的运动, 得出表示主臂四边形位置的不等式, 将表示从臂的四边形的边界取点离散, 然后将从臂的关节空间进行等分, 在关节空间等分点上求从臂在此位置时其边界离散点的笛卡尔坐标, 并将其代入表示主臂位置的不等式以判断主从臂是否碰撞, 然后用 A\* 算法求取一条最优的无碰撞运动轨迹

**关键词:** 双臂机器人; 四边形; 运动规划; 离散

**中图分类号:** TP24 **文献标识码:** B

## COLLISION-FREE PATH PLANNING OF DUAL-ARM ROBOT

CHEN Fen DING Fu-qiang ZHAO Xi-fang

(Robotics Research Institute, Shanghai Jiaotong University)

**Abstract:** The motion of the arms of the SCARA type dual-arm robot can be simplified to be the motion of quadrangles. Get the inequality representing the position of the master-arm and discretize the boundary of the quadrangles representing the slave-arm, then divide the joint space of slave-arm into several equal parts and get the Cartesian coordinate of those discretizing point in the Cartesian space corresponding the dividing point. put those coordinates into the inequality and check the inequality to judge if the master-arm collide with the slave-arm, finally search the collision free point to get the optimal path.

**Keywords:** dual-arm robot, quadrangle, path planning, discrete

### 1 引言(Introduction)

多机器人的协同作业是制造业发展的必然要求, 双臂机器人就是适应这一要求而开发出的一种新型机器人, 它可以大大增强机器人对复杂装配任务的适应性, 同时可以提高工作空间的利用效率. 但是, 当机器人执行任务时, 两个操作臂在同一工作空间中同时运动, 每一个操作臂均是另一操作臂的运动障碍物, 它们之间存在着碰撞的可能. 因此, 它的无碰撞运动规划具有其独特的特点.

关于机器人无碰撞运动规划的研究开展已有二十多年, 有关人员进行了大量的研究, 开发的方法主要有文献[1]的 C 空间法, 文献[2]的人工势力场法等. 这些基础性研究主要是针对单臂机器人和静态障碍物的情形. 文献[3]研究了两个 SCARA 机器人

的避碰问题, 但该文只研究了两机器人的两上臂碰撞问题而没考虑上下臂的碰撞问题. 在多机器人协调操作方面, 文献[4]采用基于层级控制的避碰算法, 在其算法中引入一个假想的、始终和主机器人手臂末端发生碰撞的机器人, 通过实时比较该机器人和从机器人的相互位姿, 得出主从机器人发生碰撞的可能性, 并由此规划出从臂的轨迹. 算法虽然提供了较为实际和系统的方法, 但层级协调控制器的建立较复杂. 文献[5]为解决双臂机器人运动规划问题, 引入了虚拟障碍物和虚拟坐标空间两个概念, 在只考虑静态障碍物条件下分别规划出两个机器人的路径, 然后通过调整两个机器人的运动速度以避免碰撞, 因此算法在路径规划阶段还需要静态障碍物避碰算法.

本文中所要解决的问题是: 给定双臂机器人左、

\* 基金项目: 国家自然科学基金(59875059)资助.

收稿日期: 2001-01-03

右臂末端的各自起点、目标点, 规划出机器人双臂无碰撞最优运动轨迹. 在本算法中, 规定双臂机器人的左臂为主臂, 右臂为从臂, 主臂相对从臂具有较高的运动优先权, 从臂根据主臂规划好的轨迹, 进行碰撞检测, 然后应用 A\* 法搜索出从臂的最优无碰撞运动轨迹.

## 2 双臂机器人结构特征及其运动特点 (The structural feature and moving character of SCARA type dual-arm robot)

本文的研究对象为两自由度 SCARA 型机器人, 根据其结构特征和运动特点可以简化如图 1, 即两个臂的运动都可以分别看成由 XY 平面内的两个四边形的运动.

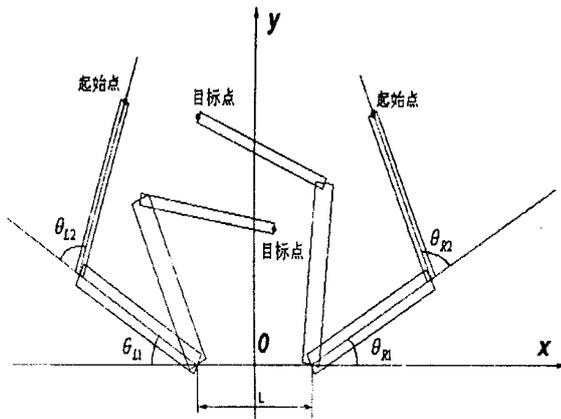


图 1 双臂 SCARA 型机器人  
Fig. 1 SCARA type dual-arm robot

在 XY 平面中, 四边形可以表示为集合

$$P = \{x \in R^2: N^T x + d \leq 0\}$$

其中

$$N = [n_1, \dots, n_4] \in R^{2 \times 4}$$

$$d = [d_1, \dots, d_4] = [-n_1^T p_1, \dots, -n_4^T p_4]$$

$$d \in R^4$$

$N$  是一个  $2 \times 4$  阶矩阵, 它的第  $i$  列  $n_i$  是四边形的外向单位法向量;  $d$  是一个 4 维矢量, 它的第  $i$  个元素是沿负的  $n_i$  方向度量的从原点到垂直第  $i$  边的矢量的长度;  $p_i (i=1, \dots)$  是四边形  $P$  边上的一点. 当左上臂运动时, 将其平面运动看作为由转动和平动合成的, 此时的四边形表示为

$$P(t) = \{x \in R^2: N^T R(\theta(t))^T (x - q(t)) + d \leq 0\} \quad (1)$$

其中  $R(\theta(t))$  是一个旋转正交矩阵  $\begin{vmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{vmatrix}$ ,

$q(t)$  是  $P$  中参考点 (取左上臂和左下臂间的关节处) 的平移矢量其值为

$$q(t) = [-L/2 - l_1 \cos\theta_1(t), l_1 \sin\theta_1(t)] \quad (2)$$

其中  $L$  如图 1,  $l_1$  是左下臂的长度,  $\theta_1(t)$  为左下臂的转角. 左下臂只有定轴转动, 故可以应用上述  $P(t)$  来表达左下臂, 只是需要将  $q(t)$  去除. 由于假定左臂为主臂, 可以根据需要进行 CP 或 PTP 控制, 故  $R(\theta(t))$  和  $q(t)$  是已知的, 从而可以获得任意时刻的左臂四边形的位罝.

在实际装配工作中, 为了避免碰撞的发生, 要根据速度和加速度来选择适当的安全距离  $\delta$ , 在本规划方法中, 将此距离放在左臂上, 将左臂的四边形向外扩大距离  $\delta$ . 即在计算①中的  $d$  时, 按放大了距离  $\delta$  的四边形来计算.

对从臂的两个四边形的边界分别进行离散化, 从四边形的一顶点开始沿长度和宽度方向以不大于  $2\delta$  的间距取点, 当到另一顶点的剩余长度不足一个间距时将点取在该顶点处, 然后从此顶点开始按上述方式继续取点. 在图 1 所示坐标系下, 右上臂四边形左侧边上一点的坐标可以表示为

$$X = L/2 + l_1 \cos\theta_1 + l \cos(\theta_1 + \theta_2) - \frac{b}{2} \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

$$Y = l_1 \sin\theta_1 + l \sin(\theta_1 + \theta_2) + \frac{b}{2} \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4)$$

其中  $l_1$  是右下臂的长度,  $b$  是其宽度,  $l$  是右上臂左侧边界上一点距关节处顶点的距离,  $\theta_1, \theta_2$  是右臂关节的转角. 右上臂边界上其它离散点以及右下臂边界上的离散点可以类似得出.

## 3 从臂最优无碰撞轨迹的搜索 (The search for the collision avoidance path of slave-arm)

考虑从臂的二维关节空间  $\theta_{R1} \times \theta_{R2}$ , 并将其等分成  $m \times n$  部分, 每一部分的长宽分别  $\delta_{\theta R1}, \delta_{\theta R2}$ , 即

$$m = 2\pi/\delta_{\theta R1}$$

$$n = 2\pi/\delta_{\theta R2}$$

需要说明的是, 在进行关节空间划分时, 要参照关节额定上限角速度, 使得机器人转动时, 在时间段  $\Delta t$  内每次最多可到达如图所示的 8 个邻接坐标点.

假设在开始工作时, 主臂和从臂不处在相互碰撞位置.

整个算法分为碰撞检测和最优无碰撞轨迹的搜

索两个部分. 碰撞检测的步骤为: (1) 取上述从臂离散关节空间中 8 个邻接坐标点中的一个的关节坐标值; (2) 以此关节坐标值按与③式、④式基本相似的公式可得到这个关节空间邻接坐标点在从臂上各个划分点的相应的笛卡儿坐标值; (3) 将获得的这些笛卡儿坐标值再代入①式和②式, 判断①式不等式的左边的值是否大于 0; (4) 如果对从臂上各划分点, 步骤(3)中的值是大于 0 的, 则这些点均不在主臂四边形内. 由前述从臂四边形边界上的这些划分方法保证了从臂四边形边界上的所有点都不在主臂的四边形边界, 即此关节位置的主从臂不相互碰撞. 相反, 如果对从臂上各划分点, 步骤(3)中的值有任一个小于或等于 0, 则说明这一点在主臂四边形内, 也就是说在此关节位置主臂和从臂相碰撞; (5) 对关节空间中 8 个邻接坐标点其余的点分别执行步骤(1)~ (4) 进行碰撞检测.

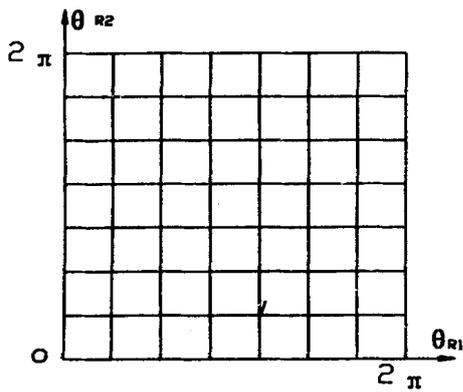


图 2 离散的从臂关节空间

Fig. 2 discreted joint space of slave-arm

通过碰撞检测可以得到从臂下一步运动可能与主臂碰撞的关节位置和不发生碰撞的位置. 发生碰撞的位置是不可取的位置, 不发生碰撞的位置是下一步的可能运动位置. 在上述离散关节空间中, 由于同一从臂关节位置与下一步运动不发生碰撞的位置常常不止一个, 需要对其进行选择. 本算法采用人工智能中的 A\* 搜索算法, A\* 搜索算法不断利用节点发生器产生节点, 并不断利用代价函数  $f(c)$  选择从起始点到目标节点所要经过最优节点. 本算法中选代价函数为  $f(c) = g(c) + h(c)$  其中:  $f(c)$  表示节点  $C$  的代价函数;  $g(c)$  表示从起始点到  $C$  点所需要的时间,  $h(c)$  表示从  $C$  点到目标点的直线距离, 其值不大于  $h^*(c)$ .

#### 4 算法的计算机仿真 (Simulation of the algorithm)

利用上述介绍的算法, 我们建立了相应的仿真系统, 并在奔腾 166 型微机上对 TESCOON 公司的 SC3200 型双臂机器人进行了无碰撞运动规划的仿真.

利用该仿真系统, 只要给出左、右臂非碰撞的起始和目标位姿, 就可自动搜索出左、右臂的无碰撞最优轨迹, 图 3、4 给出了二个仿真实例, 图中的各个分段圆弧所包围的闭区间分别为左右臂的工作区间. 在图中左臂将按照预先给定的任务运动, 左臂的运动状态进行调整自身运行轨迹以实现无碰撞轨迹运动.

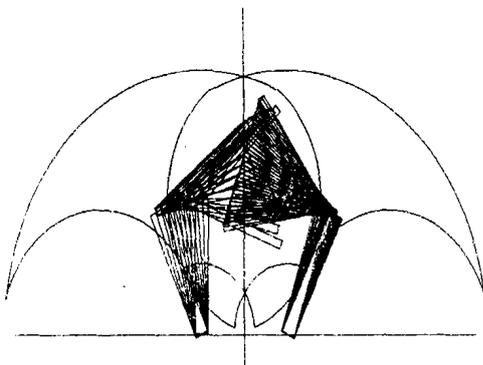


图 3 双臂同时运动仿真图

Fig. 3 Simulating result with the motion of both arms

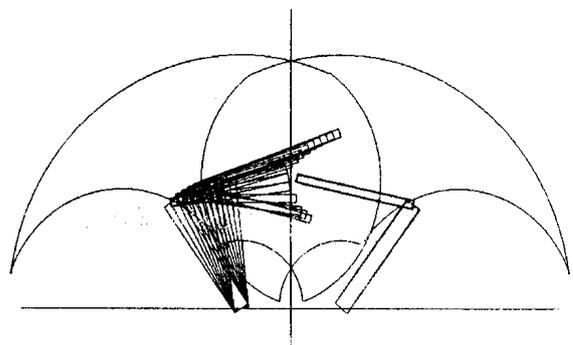


图 4 左臂不运动仿真图

Fig. 4 Simulating result with no motion of left arm