

文章编号: 1001-0920(2001)02-0215-04

## 装配机器人系统快速碰撞检测算法

宋宇<sup>1</sup>, 孙茂相<sup>1</sup>, 吴镇炜<sup>2</sup>, 谈大龙<sup>2</sup>

- (1. 沈阳工业大学 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110023;
2. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110003)

**摘要:** 提出一种面向操作手装配系统的快速碰撞检测算法。该算法以机器人运动学和空间解析几何为基础, 将判断机械手臂与障碍物是否发生碰撞问题转化为直线段与有界平面是否存在公共点的简单解析几何问题, 并以 PUMA 560 操作手为例对算法加以说明。该算法不仅适用于静态的障碍物已知的环境, 而且适用于障碍物运动规律已知的动态环境, 减少了碰撞检测占用的时间, 提高了路径规划的效率。

**关键词:** 机器人; 路径规划; 碰撞检测

**中图分类号:** TP 24      **文献标识码:** A

## Rapid Collision Detection Algorithm for Multi-robot Assembly System

SONG Yu<sup>1</sup>, SUN Mao-xiang<sup>1</sup>, WU Zhen-wei<sup>2</sup>, TAN Da-long<sup>2</sup>

- (1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China; 2. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy, Shenyang 110003, China)

**Abstract:** A new rapid collision detection algorithm for assembly system is presented, which is based on robot kinematics and space analytic geometry. The algorithm converted the problem of judging collision between the manipulator's arm and the obstacles into a space analytic geometry problem, i.e. the existence of the intersection between each line segment and the bounded plane of polyhedron. A real-scale articulated robot, PUMA 560, is used to expound the algorithm. It can be applied to the environment not only with the static obstacle but also with the moving obstacle. It decreases time spent on collision detection during robot path planning and increases the efficiency of path planning.

**Key words:** robot; path planning; collision detection

### 1 引言

装配作业空间中的机械手臂和杆件常用多面体来近似, 在研究中通常假定包围机械手的多面体具有垂直的侧面和水平或倾斜的上平面和底平面。

为节省规划避碰路径的时间, 将机器人的手臂进行细化, 用等长的直线段来代替; 同时, 将操作手周围的多面体进行凸包化处理, 以弥补手臂细化的尺寸。尽管各种近似算法有所区别, 但这类物体扩展方法在一定程度上都类似于 Lozano Pérez<sup>[1]</sup>的工作。

收稿日期: 2000-04-11; 修回日期: 2000-07-25

基金项目: 国家 863 计划项目 (863-512-9805-14)

作者简介: 宋宇 (1975—), 女, 辽宁台安人, 硕士, 从事机器人规划与控制、计算机应用与仿真研究; 孙茂相 (1938—), 男, 辽宁普兰店人, 教授, 从事优化方法和智能控制等研究。

本文以机器人运动学<sup>[2]</sup>和空间解析几何学为基础, 提出面向多机器人装配系统的碰撞检测算法, 该算法具有快速、简便、实用的特点; 并以 PUMA 560 操作手为例, 验证了该算法的有效性和可行性。

## 2 操作手臂的细化

为了简化机器人手臂与障碍物间的碰撞检测问题, 对 PUMA 560 的结构做如下近似:

1) 将机器人手臂用柱体或长方体代替, 其横截面近似为圆形或矩形。

2) PUMA 560 为高自由度机械手, 它的 6 个自由度分别位于腰关节、肩关节、肘关节和腕关节。由于腕关节上的 3 个自由度只决定机器人的姿态, 而机器人的位置则由另外 3 个关节确定, 所以将腕关节上的关节 4 和关节 5 视为小臂的一部分。考虑到末端执行器的工作空间是以腕关节为中心的球形的一部分, 将 D-H 参数坐标系<sup>[2]</sup>(图略) 中工具坐标系的原点  $O_6$  移至腕关节点  $O_4, O_5$ , 则 D-H 参数中  $d_6 = 0, R = d_6 +$  工具长度。将该部分近似为球状, 末端执行器所处的不同姿态用半径所处的不同空间位置表示。

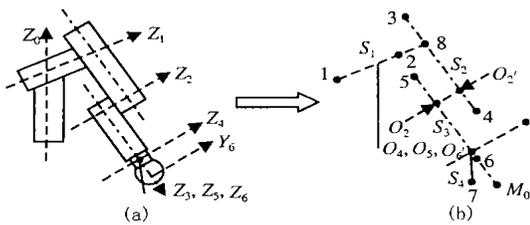


图1 机械手臂细化

(a) 机械手手臂示意 (b) 手臂细化结果

经过上述近似, 机器人的基座和肩为圆柱体, 大臂和小臂为长方体, 末端执行器的工作空间为球体的一部分, 它们均为轴对称图形, 如图 1(a) 所示。杆件细化的规则为: 圆柱体和长方体细化到各自的对称轴上, 用等长的直线段表示; 末端执行器用其对称轴上等长的直线段表示, 该直线段位于  $Z_6$  轴上, 长度等于半球体的半径。细化的结果如图 1(b) 所示, 机器人的肩、大臂、小臂和末端执行器分别用直线段  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_4$  表示, 它们的端点分别为 1 和 2, 3 和 4, 5 和 6, 6 和 7。

根据机器人运动学正解、逆解原理<sup>[2]</sup>, 计算出上述各点在基础坐标系下的坐标, 由空间中两点可以确定一条直线公理, 可得出直线段  $S_1 \sim S_4$  在基础坐标系下的表达式为

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{z - z_1}{z_2 - z_1} = t \quad (1)$$

$$t \in [0, 1]$$

## 3 障碍物的扩展

### 3.1 操作手工作空间的确定

#### 3.1.1 操作手工作空间确定方法

装配系统作业空间中物体较多, 考虑到在线规划实时性的要求, 只有进入操作手工作空间的物体才将其视为障碍物, 并进行碰撞检测, 否则不予考虑。下面说明在给定始末位姿的情况下操作手工作空间的确定与数学描述。

设操作手的始末位姿分别为  $(X_0, Y_0, Z_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$  和  $(X_d, Y_d, Z_d, \alpha_d, \beta_d, \gamma_d)$ , 工作台在基础坐标系下的位置为  $Z = Z_0$ , 房高为  $Z = Z_w$ 。操作手在始末状态下的位姿如图 2 所示。

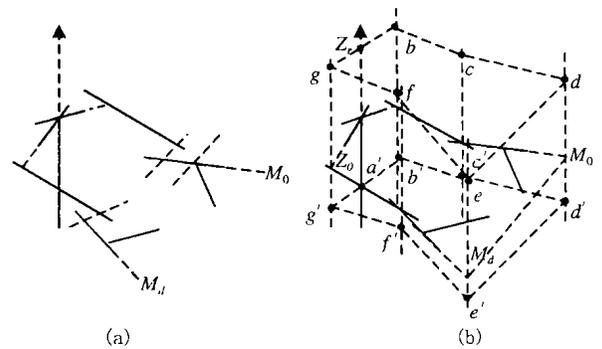


图2 操作手始末位姿及工作空间

(a) 操作手始末位姿 (b) 操作手工作空间

在 D-H 参数坐标系<sup>[2]</sup>中, 将工具坐标系原点  $O_6$  沿  $Z_5$  轴负向移动  $d_6$  至  $O_4(O_5, O_6)$  后, 将杆 2(大臂) 同体坐标系原点  $O_2$  移至杆 2 的对称轴上得  $O_2$ , 小臂和腕关节也随之平移一段距离。移动后的坐标系称为 D-H 坐标系。此时, 工具坐标系  $O_6 - X_6 Y_6 Z_6$  与基础坐标系  $O_0 - X_0 Y_0 Z_0$  之间的齐次变换矩阵为

$$\begin{cases} T = {}^0A_1 {}^1A_2 T_{(c,d)(o_2,o_2)} {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 \\ d_6 = 0, \quad {}^2A_3 = {}^2A_3 \end{cases} \quad (2)$$

移动后小臂两端点在基础坐标系中的位置为

$$P_{5-0} = T * P_{5-6}, \quad P_{6-0} = T * P_{6-6} \quad (3)$$

通过式 (1) 可确定出新的小臂直线段方程。

如图 2(a) 所示, 若操作手处于工具坐标系的轴  $Z_6$  与轴  $Z_5$  重合时的姿态, 则工具末端点所处的始末位置分别为点  $M_0$  和点  $M_d$ 。在 D-H 坐标系下, 该末

端点在小臂坐标系  $O_3-X_3Y_3Z_3$  中的位置为  $P_n = (0, 0, d_4 + R, 1)$ , 它在基础坐标系中的位置为

$$P = {}^0A_1A_2T_{(c,d)(o_2,o_2)}{}^2A_3 * P_n \quad (4)$$

连接  $M_0$  和  $M_d$  两点, 构成直线段  $M_0M_d$ , 分别过始末状态下肩、大臂、新小臂和直线段  $M_0M_d$ , 做垂直于工作平台  $Z = Z_0$  的垂直面, 相交后围成闭合的广义圆柱体。该广义圆柱体被平面  $Z = Z_0$  和  $Z = Z_r$  两平面所截, 获得的封闭空间  $g\text{-}abcdefg\text{-}a\text{-}bc\text{-}d\text{-}ef\text{-}g$  便定义为操作手在始末状态下的工作空间。

### 3.1.2 工作空间的数学表示

如图 2(b) 所示, 在  $D-H$  坐标系下, 操作手臂经坐标平移后的 4 条直线段  $S_1 \sim S_4$  在初始位姿、终止位姿下分别确定的 4 条直线段可按式 (1) 写出。

过空间已知直线 (1), 垂直于  $Z = Z_0$  或  $Z = Z_r$  的垂直平面方程为

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} \quad (5)$$

式 (5) 可表示为  $x = f(y)$ 。不失一般性, 以  $x$  轴为不等式方向的参考标准, 通过方向余弦确定空间区域的选择方向。由方向余弦的符号, 可做出如下判断

$$\cos \alpha \geq 0 \Rightarrow \begin{cases} 0 & \alpha < \pi/2 \\ x - f(y) & 0 \end{cases}$$

$$\cos \alpha < 0 \Rightarrow \begin{cases} \pi/2 & \alpha < \pi \\ x - f(y) & 0 \end{cases}$$

则在  $D-H$  坐标系下, 新的手臂位置与  $S_1 \sim S_4$  所在平面相交, 围成闭合的操作手工作空间。对各面划分空间后形成区域的选取原则如下:

在初始位姿下

$$\begin{cases} \cos \alpha \geq 0 \Rightarrow \\ x \frac{x_2^0 - x_1^0}{y_2^0 - y_1^0} y + \frac{x_1^0 y_2^0 - x_2^0 y_1^0}{y_2^0 - y_1^0} \\ \cos \alpha < 0 \Rightarrow \\ x \frac{x_2^0 - x_1^0}{y_2^0 - y_1^0} y + \frac{x_1^0 y_2^0 - x_2^0 y_1^0}{y_2^0 - y_1^0} \\ i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (6)$$

在终止位姿下, 各面划分空间后形成区域的选取原则与初始位姿下的选取原则相反, 设定直线段  $M_0M_d$  所在平面划分空间后形成区域的选取原则与初始位姿下的选取原则相同。这样, 图 2(b) 所示的工作空间为

$$\begin{cases} p_{11}x + p_{12}y + p_{13}z & q_1 \\ \vdots \\ p_{i1}x + p_{i2}y + p_{i3}z & q_i \\ \vdots \\ p_{71}x + p_{72}y + p_{73}z & q_7 \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned} |p_{i1}| &= |y_{i+1} - y_i|, & |p_{i2}| &= |x_{i+1} - x_i| \\ |p_{i3}| &= 0, & |q_i| &= |x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1}| \\ & & & i = 1, 2, \dots, 7 \end{aligned}$$

### 3.2 空间物体的凸包化

空间中的物体往往用多面体表示。多面体可分为凸多面体和凹多面体, 而凹多面体常可分解为若干个凸多面体, 所以, 本文仅以凸多面体为例进行讨论。

为用直线段表示机械手臂, 机械手臂周围的物体都必须向外扩展。物体向外扩展的比例应弥补机械手臂横截面细化的尺寸, 这是一个基本原则。下面以障碍物操作手臂为例说明扩展的方法。

如图 3 所示, 已知机械手臂横截面为矩形  $abcd$ 。操作手杆 1, 2 和 3 横截面上轴对称中心到杆边缘的最短距离分别为  $D_1, D_2$  和  $D_3$ 。考虑到末端执行器, 球形半径为  $R$ , 取  $D = \max\{D_1, D_2, D_3, R\}$ 。多面体向外扩展的具体步骤详见文献 [3] 的平面解析几何方法, 保证横截面边缘各点均向外扩展  $D$ , 扩展的结果为多边形  $a_1a_2b_1b_2c_1c_2d_1d_2$ 。

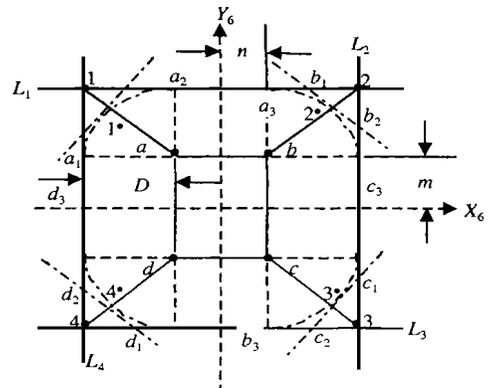


图 3 操作手臂扩展

对于多面体纵向长度的扩展, 如文献 [3] 所述: 如果顶面与横截面平行, 则端面沿纵向外扩  $D$ ; 如果端面与横截面夹角为  $\varphi$ , 则长度增加  $D / \cos \varphi$ 。如果纵向某端面固定于水平面、天花板, 或与其它物体相连, 则该端面不需扩展。凸包后多面体的表达式可通过空间解析几何获得, 表示如下

$$\begin{cases} a_{11}x + a_{12}y + a_{13}z & d_1 \\ a_{21}x + a_{22}y + a_{23}z & d_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x + a_{m2}y + a_{m3}z & d_m \end{cases} \quad (8)$$

### 3.3 障碍物的确定

前面已确定了操作手的工作空间及其周围凸包

化后的多面体所占的空间区域。于是,障碍物的确定问题便转化为判断两个线性不等式组(7)和(8)所围成的凸集是否为空的问题。若不为空,则可判断该多面体为障碍物,对其进行碰撞检测。

文献[4]给出了判断两不等式组是否有公共解的算法。本文则直接引用该算法,判断空间中的物体是否为机器人工作空间的障碍物。

## 4 碰撞检测算法

如上所述,操作手的肩、大臂、小臂和末端执行器均用等长的直线段代替,其参数式方程为

$$\begin{cases} x_i = (x_{i2} - x_{i1})t_i + x_{i1} \\ y_i = (y_{i2} - y_{i1})t_i + y_{i1} \\ z_i = (z_{i2} - z_{i1})t_i + z_{i1} \\ t_i \in [0, 1], \quad i = 1, 2, 3, 4 \end{cases} \quad (9)$$

凸包化后的障碍物用空间中的不等式组(8)表示。这样,操作手臂与障碍物是否发生碰撞便转化为各条直线段与多面体上的各有界平面是否相关的解析几何问题。不等式组(8)取等号,可得障碍物各面的表达式为

$$\begin{aligned} a_{j1}x + a_{j2}y + a_{j3}z &= d_j \\ j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (10)$$

操作手与障碍物之间只要发生表面接触就会发生碰撞,所以本算法的主要思想是:计算直线*i*与障碍物的某一面*j*的交点 $t_{ij}$ ,如果 $t_{ij}$ 满足 $t_{ij} \in [0, 1]$ ,且使描述障碍物所占空间的不等式组成立,则可判断操作手与障碍物发生碰撞;如果4条直线段 $S_1 \sim S_4$ 测试后都不满足上述条件,则判断操作手与障碍物不发生碰撞。具体步骤如下:

- 1) 初始化数据:  $\text{flag} = 0, f_d = 0, f_p = 0, i = 0, j = 0$ ;
- 2)  $i = i + 1$  ( $\text{flag} = 1, i > 4$  为循环判定条件);
- 3)  $j = j + 1$ , 将直线*i*的参数方程代入平面*j*的方程,计算交点

$$t_{ij} = \frac{d_j - (a_{j1}x_1 + a_{j2}y_1 + a_{j3}z_1)}{a_{j1}(x_2 - x_1) + a_{j2}(y_2 - y_1) + a_{j3}(z_2 - z_1)}$$

4) 如果 $t_{ij} \in [0, 1]$ , 则 $f_d = 1$  (交点在直线段上, 直线段与该平面区域可能有交点);

5) 如果 $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$  满足不等式组(8), 则 $f_p = 1$  (交点在障碍物的有界平面*j*上, 直线段与该平面区域可能有交点);

6)  $\text{flag} = f_d * f_p$ , 如果 $\text{flag} = 1$ , 则输出发生碰撞标志  $\text{flag} = 1$ , 重新规划路径点的指令;

7) 如果 $j < m$ , 则转 3) (*m* 为多面体的维数);

8) 如果 $i < 4$ , 则转 2);

9) 输出无碰撞标志  $\text{flag} = 0$

## 5 结 语

空间中静止的多面体经凸包化后, 可通过空间解析几何方法描述它所占空间区域的不等式组; 对于空间中运动的多面体应知其运动规律, 实时地描述其状态变化, 以确定它的动态解析表达式。在确定了障碍物多面体的解析表达式后, 上述两种状态的碰撞检测算法是相同的。

本文提出的面向操作手装配系统的碰撞检测算法, 具有简便、快速、实用的特点, 解决了系统在线检测的实时性和快速性问题, 提高了路径规划的效率。

## 参考文献:

- [1] T Lozano Pérez. An algorithm for planning collision free paths among polyhedral obstacles [J]. Comm ACM, 1979, 22(10): 560-570
- [2] 付京逊, R C 冈萨雷斯, C S G 李. 机器人学(控制 传感技术 视觉 智能) [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1989.
- [3] Ching Shioh Tseng, Tsunsun Lue. Path planning for robot manipulator in polyhedral objects environment [J]. J of Robotics System, 1995, 12(10): 637-646
- [4] 任世军, 洪炳熔. 智能机器人路径规划器快速碰撞检测算法 [J]. 中南工业大学学报, 1998, 29(专辑): 93-95