

文章编号: 1671-7848(2007)04-0445-04

## 空间机械臂在线实时避障路径规划研究

陈靖波, 赵 猛, 张 珩  
(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)



**摘 要:** 针对目前空间机械臂避障路径规划算法计算量大难以达到在线实时规划的缺点, 对空间机械臂的在线实时避障路径规划问题进行了研究和探讨。采用规则体的包络对障碍物进行建模, 并借助 C 空间法的思想, 把障碍物和机械臂映射到两个相互垂直的平面内, 将机械臂工作空间的三维问题转化为二维问题, 并结合二叉树逆向寻优的方法进行路径搜索, 从而大大减少了计算量, 达到了在线实时规划的要求。最后在空间机器人仿真系统上对其进行仿真研究, 验证了该方法的可行性。

**关键词:** 空间机械臂; 实时; 避障; 路径规划  
**中图分类号:** TP 24 **文献标识码:** A

## On-line Real-time Obstacle Avoidance Path Planning of Space Manipulator

CHEN Jing-bo, ZHAO Meng, ZHANG Heng

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** To reduce the large amount of calculation during the space manipulator on-line real-time obstacle avoidance, a method path planning, is presented by means of the theory of configuration space. Using the method of regular enveloping modelling of obstacles, and projecting obstacle and manipulator to two planes, the three-dimensional problem is transformed to two-dimensional one and then the path is searched by binary tree algorithm. It greatly reduces the calculation and meets the requirements of on-line real-time path planning. Simulations on the VR System of Space Robot, show that this algorithm is available.

**Key words:** space manipulator; real-time; obstacle avoidance; path planning

### 1 引言

空间机器人能够代替宇航员完成空间任务, 如释放与回收卫星、完成空间科学试验等, 用以减小宇航员舱外作业的风险。但空间机器人处于自由飘浮状态, 使得系统控制变量与非独立的变量之间存在强烈的运动耦合, 运动控制难度加大, 从而使空间机械臂的路径规划变得特别复杂。如果运动的机械臂与静态的物体发生碰撞, 空间机器人本体位姿会发生改变, 从而给作业任务的完成带来很大的困难。因此, 空间机械臂避障路径规划对空间机器人来说至关重要。

与传统机器人避障路径规划方法相比, 空间机器人避障路径规划算法应从安全性以及规划效率两方面考虑。目前机器人路径规划算法主要有: C-空间法<sup>[1,2]</sup>, 人工势场法<sup>[3]</sup>, 预处理-规划算法<sup>[4,5]</sup>等, 而这些方法都存在建模复杂计算量大等缺点。

本文在保证安全的条件下进行空间机械臂远程在线实时规划。在保持较高精度的前提下, 通过在相互垂直平面上投影确定障碍域, 将三维避障路径规划问题转化成二平面内的二维问题, 有效地解决了空间机械臂的避障路径规划问题。

### 2 建模

1) 障碍域建模 三维障碍物一般具有不规则的几何形状, 因此它在 C 空间法等方法中难以获得精确的障碍域。Schwartz<sup>[6]</sup>和王伟<sup>[7]</sup>等人提出通过利用边界点和特征点来确定障碍物在 C 空间下的障碍域, 而徐毓良等<sup>[8]</sup>把障碍物投影到平面上形成多面体障碍域, 但由于不规则几何形状障碍物的边界点过多, 并且特征点不易确定, 即使能确定, 其计算量也相当大, 直接影响了规划速度, 难以满足实时性要求。因此, 本文提出利用障碍物规则体的包络来近似建模, 这种近似虽然扩大了障碍域, 但是使

收稿日期: 2006-05-31; 收修定稿日期: 2006-06-12

基金项目: 国家 863 高技术研究计划资助项目(2004AA742060)

作者简介: 陈靖波(1980-)男, 湖南郴州人, 研究生, 主要研究方向为空间机器人, 虚拟现实技术等; 张珩(1961-)男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师。

障碍域的描述大大简化,有效地提高了规划的效率,并满足安全性的要求。对障碍物用规划体的包络近似建模,如图 1 所示。

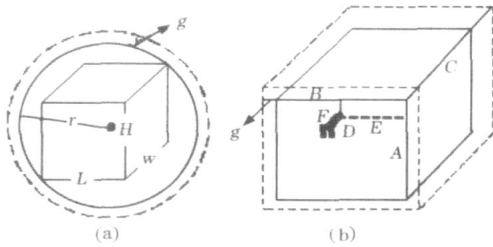


图 1 对障碍物用规则体的包络近似建模

Fig. 1 Regular enveloping modeling of obstacles

图 1(a) 为在满足精度的条件下障碍物采用最小外接球的近似,图 1(b) 是对障碍物采用长方体的近似。

2) 机械臂工作空间建模 机械臂工作空间即机器人所在环境为三维空间,鉴于空间机械臂的在线规划的实时性和高效性的要求,本文把机械臂以及障碍物映射到互相垂直的两个平面内,将空间机械臂的三维工作空间转换为二维问题来解决,以达到简化的目的。

3) 平面内障碍域简化 三维障碍物在平面内的投影,如图 2 所示。

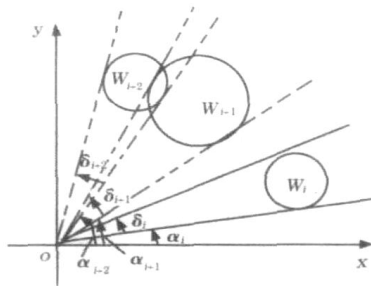


图 2 平面内的障碍物

Fig. 2 Obstacles in plane

平面内障碍物可以描述为  $W_i(x, y, z, r)$ , 其中  $i$  为障碍物序号,  $x, y, z$  为球心在基坐标系中的坐标,  $r$  为球的半径。障碍物在平面上形成的障碍域为  $(i_1, i_1 + i_1), (i_1 + 1, i_1 + 1 + i_1 + 1), (i_1 + 2, i_1 + 2 + i_1 + 2) \dots$ 。其中,当多个障碍域有重叠时,可将这些障碍域进行合并,经过整理后的平面的障碍域为  $(i_1, i_1 + i_1)$ 。

### 3 路径搜索

目前路径搜索有 A\* 算法<sup>[9]</sup>等,而本文利用二岔树逆向寻优方法对避障路径规划进行搜索,如图 3 所示。

机械臂避障路径规划的二岔树共由  $T$  段组成,每段又分为  $g$  级。第  $i$  段通过调解每一级的关节

角,避开第  $i$  段的障碍域,形成第  $i$  个中间规划点  $\bar{c}(i)$ 。依此类推,最终到达机械臂目标位姿  $\bar{c}(J)$ 。其中  $l_j^L$  和  $l_j^U$  为本结点到下一级结点的连接权值(在整个二岔树中,虽然表述相同,但由于父结点不同,所以其值不同)。在每一级的规划中,若这个结点满足机械臂关节角的硬约束时,此结点为实心结点,否则为空心结点。空心结点没有子结点,规划时返回到父结点并沿另一岔规划。

二岔树逆向寻优方法:从最后一级子结点开始逆向返回到根结点,同时计算每一条路径(每一条都是可行的避障规划路径)的权值  $l_{i=1}^J(\bar{c}(i) \cdot E)$ ,最后根据罚函数  $\min_{i=1}^J(\bar{c}(i) \cdot E)$ ,确定一条“路径最短”的最优路径。其中,  $E_g x_1 = [1, 1, \dots, 1]^T$ 。

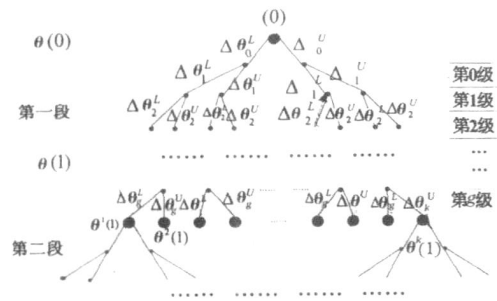


图 3 机械臂避障路径规划的二岔树

Fig. 3 Binary tree of manipulator obstacle avoidance path planning

### 4 算法描述

利用规则体的包络对障碍物以及机械臂基座进行近似建模,通过把机械臂工作空间影射到两个空间平面上的投影确定障碍域的方法,采用改进的二岔树法进行路径搜索。

具体避障路径规划由以下几步组成。

确定机械臂初始状态  $\bar{c}(0)$  和目标状态  $\bar{c}(J)$  ( $\bar{c} = [c_0, c_1, \dots, c_g]$ ,  $g$  为机械臂的级数)。

以  $h$  为时间步长,将障碍物在水平平面上投影,并确定水平平面上的障碍域  $(i_1, i_1 + i_1)$ 。

令  $i = 1, j = 1$ 。

旋转  $\theta_0$  至  $\theta_i$ , 建立垂直平面  $V_i$  平面,并确定  $V_i$  平面内的障碍域。

建立  $z_j o_j v_j$  坐标系,并计算出障碍物  $W_i$  在此坐标系下的参数,如图 4 所示。

$$\text{其中, } M_i = |O_j W_i|; N_i = (M_i^2 - r_i^2)^{1/2};$$

$$i = \sin^{-1}(z_{W_i}/M_i); i = \sin^{-1}(r_i/M_i)。$$

通过调解  $j$  对连杆  $l_j$  进行避障  $W_i$  处理,同时记录  $j$ , 以备全局优化。

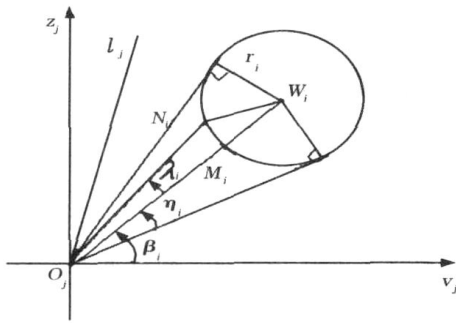


图 4 障碍物在平面内的参数

Fig. 4 Obstacle parameters in plane

当  $j \notin (i - i, i + i)$  时, 不调整  $j$ , 直接进入 ; 当  $j \in (i - i, i + i)$  时, 且连杆长度  $l_j < M_i - r_i$  时, 不调整  $j$ , 直接进入 ; 当  $j \in (i - i, i + i)$  时, 且  $l_j > N_i$  时, 调整  $j$  为  $i \pm i$ , 然后判断这两个角是否满足机械臂关节角的自身角度硬约束, 若全都满足, 则两者都保留; 若只有一个满足, 则保留这一个; 若两者都不满足, 则令  $j = j - 1$ , 即返回上一级关节角, 重新规划; 当  $j \in (i - i, i + i)$  且  $M_i - r_i < l_j < N_i$  时, 计算:

$$\alpha_i = \cos^{-1} [(M_i^2 + l_j^2 - r_i^2) / (2M_i l_j)]$$

若  $j \notin (i - i, i + i)$ , 则不调整  $j$ ; 若  $j \in (i - i, i + i)$ , 调整  $j$  为  $i \pm i$ , 然后判断这两个角是否满足机械臂关节角的自身角度硬约束, 若全都满足, 则两者都保留; 若只有一个满足, 则保留这一个; 若两者都不满足, 则令  $j = j - 1$ , 即返回上一级关节角, 重新规划。

判断  $l_j$  是否在障碍域外, 若是, 进入 , 否则令  $i = i + 1$  并返回 。

判断  $j$  是否等于  $g$ , 若是, 则进入 , 否则令  $j = j + 1$  并返回 。

记录此刻的  $(o_0, o_1, o_2, \dots, o_g)$ , 作为一个中间规划点  $\bar{w}(i)$ 。

判断  $o_0(i)$  是否等于  $o_0(I)$ , 若是, 则进入 ⑪, 否则令  $i = i + 1$  并返回 。

⑪ 调解关节角  $\bar{w}$  为目标位姿  $\bar{w}(I)$ 。

⑫ 利用二岔树逆向寻优方法, 确定  $\min_{i=1}^T (\bar{w}(i) \cdot E)$  的最优路径 (路径最短), 输出中间点的关节角序列  $\bar{w}(0), \bar{w}(1), \dots, \bar{w}(i), \dots, \bar{w}(I-1), \bar{w}(I)$ , 完成规划。

### 5 仿真研究

利用计算机建立的空间机器人仿真系统对不同的障碍物进行了两组仿真试验。仿真对象为带 6 自由度空间机械臂的空间机器人系统。

第一组实验中障碍物为方形基座以及方形障碍物。机械臂由初始关节角  $45^\circ, 82^\circ, -120^\circ, 180^\circ, 17^\circ, 90^\circ$  绕过方形障碍物到达目标关节角  $175^\circ, 82^\circ, -90^\circ, 180^\circ, 47^\circ, 90^\circ$  的仿真。在步距为 3 的条件下共产生 67 条指令, 所用时间为 0.185 3 s。仿真中机械臂运动过程, 如图 5 所示。

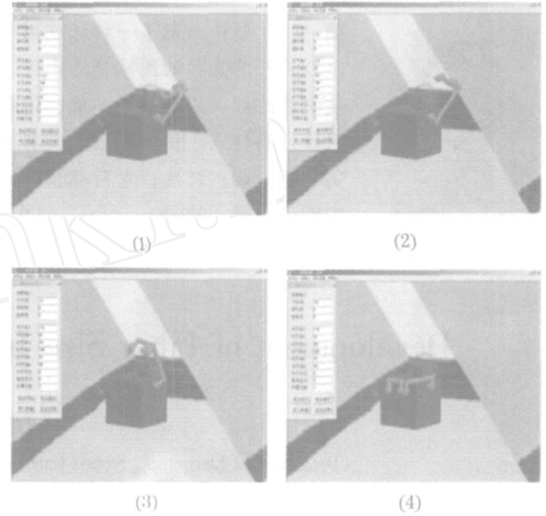


图 5 仿真过程图 1

Fig. 5 Simulation 1

第二组中障碍物为方形基座以及细圆柱形障碍物。仿真中机械臂运动过程, 如图 6 所示。

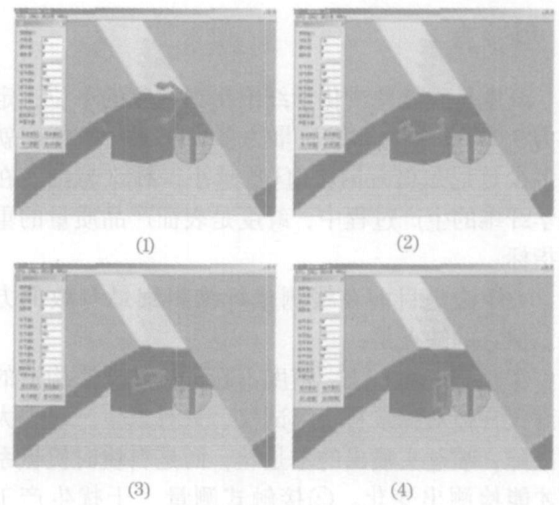


图 6 仿真过程图 2

Fig. 6 Simulation 2

机械臂由初始关节角  $90^\circ, 42^\circ, -120^\circ, 180^\circ, -17^\circ, 90^\circ$  到目标关节角  $90^\circ, -90^\circ, 180^\circ, 0^\circ, 180^\circ, 90^\circ$  的仿真, 并在仿真系统中用网状球表示了障碍物进行规则体包络建模的外接球。在步距为  $3^\circ$  的条件下共产生 121 条指令, 所用时间为 0.3124 s。在仿真中可以看到, 虽然算法具有一定的保守性, 但符合了空间系统的高安全性的要求。

(下转第 450 页)

则在测头上利用 DSP 完成采集和处理工作, 直接计算出纤度值, 因而具有更短的响应时间和更快的处理速度。信号采集与处理工作原理如下:

CCD 光采样的光积分启动控制信号由 DSP 产生。每隔  $T_{SH}$  时间, DSP 的定时器产生 1 次中断, 输出 1 个宽度为  $10 \mu\text{s}$ 、周期为  $T_{SH}$  ( $T_{SH} = 0.5 \text{ ms}$ ) 的 CCD 光积分控制信号  $T_{ccd}$ 。该  $T_{SH}$  信号的下降沿启动 CCD 的光积分, 同时 CCD 输出上一次光积分的信号。采用 DSP 的定时器中断产生 CCD 光积分控制信号  $T_{ccd}$ , 这样在光强容许的范围内可以灵活调整 CCD 光积分时间  $T_{SH}$ <sup>[3]</sup>。MAX1419 (15 位 80M-spADC) 工作于 WR-RD 方式,  $T_{ccd}$  信号的下降沿启动 ADC 采样时钟电路, 产生 10 MHz 的 AD 采样启动信号 WR (脉宽为 50 ns), 对每一次 CCD 光积分输出的 4 096 个有效光敏元信号进行 1 组 AD 采样 (共 4 096 次), 而每一次 ADC 转换完成都产生 1 次中断, 将采样结果保存到 cy7c4255 (8 K × 18B FIFO) 中, 当 FIFO 中数据半满 (4 K) 时, 再产生中断, 将 4 K 数据保存到 DSP 的 RAM 中进行处理。CPU 可以利用下一组光积分时间处理数据。采用这种方式, 不但软件设计更为简单, 且每次保存 A/D 转换结果不需采用中断方式, CPU 工作可不被打断, 处理能力得到充分发挥<sup>[4]</sup>。因而可实现高速高精度视频采集和信号处理。

3) 功能的设计 数字信号处理器 TMS320F2812 实际上为一能处理大量数据的单片机, 除了做图像处理工作外, 还能使纤度测试仪具有一些智能化的功能, 具体如下:

(上接第 447 页)

## 6 结 语

本文从空间机械臂在线实时规划所要求的安全性、实时性和高效性出发, 利用规则体的包络对障碍物进行建模, 并借鉴了 C 空间法思想把三维问题转化为二维问题, 实现了空间机械臂在线规划的安全性和实时性的要求, 并在带 6 自由度机械臂的空间机器人仿真系统上开展了仿真研究, 在障碍物相对速度较小和障碍物静止时达到了令人满意的效果。这对于推动空间机器人的在线实时操作有重要意义。

## 参考文献 (References):

[1] Lozano P T. Spatial planning: a configurations space approach[J]. IEEE

现场测试标准试样的纤度值, 以确定本次仪器安装定位后纤度修正系数。调节 CCD 光积分控制信号  $T_{SH}$  的周期  $T_{SH}$ , 以便快速得到化纤丝的视频信号。设置报警值。自动显示测试结果。

4) 功能的设计 最近, 日本东芝公司推出了 TCD2901D 线阵 CCD, 有效光敏元素为 10550, 像点尺寸为  $4 \mu\text{m}$ 。用它替代 TCD1503D, 为保证测量范围 100 mm, 光学放大系数改为 1/2, 化纤丝直径绝对误差可降低到  $2 \times 4 \mu\text{m} = 8 \mu\text{m}$ 。随着新的光电子器件的不断出现, 纤度测试仪的精度也会不断提高。目前, 化纤行业已经喷出了直径小于  $1 \mu\text{m}$  的超细旦丝, 人们期待像点尺寸更小的 CCD 出现来构造纤度仪, 以确保这类超细旦丝的产品质量。

## 4 结 语

根据上述原理设计的纤度仪没有机械装置, 结构简单、成本低, 还具有测试过程简单、快速、不干扰生产工艺、便于维护的特点。该仪器目前已经成功地在线运行在聚酯长丝的检测中, 不过, 这种纤度仪的工业化生产还有一段距离。

## 参考文献 (References):

- [1] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. (Wang Qingyou. Application technology of CCD[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000.)
- [2] Texas Instruments Incorporated. TMS320F28xx DSP system control and interrupts reference guide [Z]. Texas: Instruments Incorporated, 2003.
- [3] Yan W B, Zhao B. CCD auto-gain regulation based on DSP[J]. Journal of Transducer Technology, 2004, 23(3): 74-76.
- [4] Li W M, Xing X Z, Dai L R. Application of DSP in the linear CCD measuring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2002, 23(2): 183-185.

Trans Computers, 1983, 32(2): 108-120.

- [2] Lozano P T. A simple motion planning algorithm for general robot manipulators[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, RA23(3): 224-238.
- [3] Hwang Y K, Ahuja N. Potential field approach to path planning[J]. IEEE Trans Robotics Automation, 1992, 8(1): 23-32.
- [4] Kavraki L E, Latombe J C, Motwan R, et al. Randomized query processing in robot path planning[M]. Las Vegas Nevada United States CA: 94305 IEEE, 1995.
- [5] Kavraki L E, Latombe J C. Randomized processing of configuration space for path planning articulated robots[M]. United States CA: 94305 IEEE, 1994.
- [6] Schwartz J T, Sharir M. On the 'piano movers' problem I: the case of a two-dimensional rigid polygonal body moving amidst polygonal barriers [J]. Comm Pure Applied Math, 1983, 36(4): 345-398.
- [7] 王伟, 杨扬, 原魁, 等. 机器人 C 空间障碍边界建模与无碰撞路径规划[J]. 机器人, 1998, 20(4): 280-286. (Wang Wei, Yang Yang, Yuan Kui, et al. Robot C-obstacle boundary modeling and collision-free path planning[J]. Robot, 1998, 20(4): 280-286.)
- [8] 徐毓良, 杨启帆. 机器人三维空间无碰撞路径规划[J]. 机器人, 1991, 13(5): 1-6. (Xu Yuliang, Yang Qifan. Robot collision-free path planning in 3-D space[J]. Robot, 1991, 13(5): 1-6.)
- [9] Tang P, Yang Y M. Study on algorithm A\* of intelligent path planning based on method of representation environment with both quad tree and binary tree[J]. Control Theory & Application, 2003, 20(5): 770-772.