

# 多关节机械手抓取-放置操作的运动规划

李永成 张 钹

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘要** 本文基于拓扑法对机械手的抓取-放置操作的运动规划进行了研究. 文中主要讨论了规划的方法及相应的算法. 最后的实验结果用来显示该方法的有效性.

**关键词:** 状态空间 局部规划 全局规划

## 1 引言

障碍环境中运动物体的无碰撞路径规划作为智能机器人领域中的一个基本问题, 已有很多人对其进行了研究<sup>[1-3]</sup>. 但是, 人们一般只是对物体的有限几个自由度, 如 2、3 个自由度进行讨论, 为了能给实验机械手设计一个有效的运动规划算法, 我们就必须面对并解决多自由度的规划问题.

我们将讨论类似 PUMA 型的工业机械手的抓取-放置操作的无碰撞路径规划问题.

对一个有 6 个自由度的 PUMA 型机械手, 如图 1 所示, 抓取-放置操作可分为两个主要的阶段, 一是从抓取分离点到抓取逼近点的手臂的全局运动, 另一个是从抓取分离(逼近)点到抓取(放置)位置的手腕粗细运动, 如图 2 所示. 因此, 带有双指手爪的 PUMA 手(图 1)的运动规划也可相应地分为近似独立的两步, 一是三关节手臂的运动规划, 或全局规划; 另一个是手腕的笛卡尔坐标系中的运动规划, 或局部规划.

这里我们的讨论主要基于拓扑降维法<sup>[4,5]</sup>, 采用拓扑降维法我们已设计出三关节机械手在障碍环境中路径规划的算法, 并已在 SUN 工作站上实现了该系统<sup>[6]</sup>, 我们对机械手抓取-放置操作的运动规划的研究也进一步显示了拓扑法的优越性.

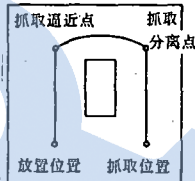
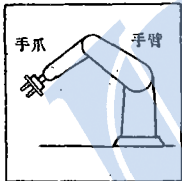


图 1 机械手模型

图 2 抓取-放置操作的主要过程

## 2 拓扑降维法

至今运动规划的主要方法有: 几何法<sup>[1]</sup>, 拓扑法<sup>[4]</sup>等等. 它们的共同之处是将物体空间映射到状态空间, 即机械手的状态参数空间. 通过这种映射, 物理空间中运动物体的无碰撞路径规划问题就转换到状态空间中, 所谓的拓扑法就是研究状态空间中连通块的划分以及连通块之间的连通性判别问题等<sup>[4-6]</sup>.

### 2.1 自由状态空间的划分

设自由状态空间为图  $F(D)$ ,  $D$  为自由状态空间的定义域, 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

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

## 2.2 构建特征网

将每个  $(D_i, F(D_i))$  看做一个父节点  $(i)$ , 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, 我们便得到一个树状网络称为特征网.

## 2.3 路径搜索

在特征网中寻找一条从初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体的无碰路径.

## 3 抓取-放置操作运动规划的基本思路

采用拓扑法直接在一个 6 维状态空间中进行路径规划还是很困难的, 这里我们采用一种分步规划的策略, 即大范围内主要考虑手臂的避碰规划, 而在抓取或放置的局部范围则着重规划手腕的运动.

### 3.1 全局规划

全局规划是一个 3 关节手臂的规划, 这里有两种类型的全局规划, 一个称为  $g$ -规划, 即将抓有物体的手爪以一个球来代替, 该球的半径为包含被抓取物体的手爪的长度  $g$ , 球心为手腕的中心  $x$ , 如图 3 所示; 另一个称为  $o$ -规划, 即去掉被抓取物体和手爪. 显然这两种全局规划为一般的三关节机械手的路径规划, 它们的算法与 [6] 所讨论的一致, 仅有的差别在于在  $g$ -规划中将原始障碍的边界扩展了长度  $g$ . 由此, 我们得到两种特征网,  $g$ -特征网和  $o$ -特征网.

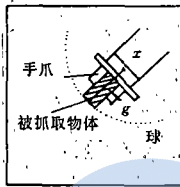


图 3 全局规划

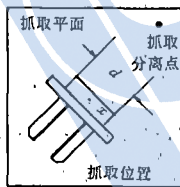


图 4 局部规划

### 3.2 局部规划

根据用户指定的被抓取物体及其需放置的位置, 我们可选取一系列的抓取特征, 这里我们就不讨论如何选取这些特征. 经过以上的选择之后, 我们就可得到手爪的位置和方向以及它所对应的机械手臂的状态  $S_a$ , 如果  $S_a$  对应于  $g$ -特征网上的一个节点, 且存在一条从该节点到目标节点的连通道路, 则我们就有了一条从抓取位置到抓取逼近点的无碰道路, 否则的话, 我们必须进行局部规划. 当我们选择了抓取特征之后, 我们就可确定抓取平面和抓取分离点, 然后在抓取平面上进行局部规划(图 4).

首先, 机械手所对应的手臂状态  $S_a$  必须属于  $o$ -特征网上的某个节点, 否则规划失败. 其次, 将位于抓取位置附近的障碍向垂直于抓取平面的方向扩展  $d/2$ , 其中  $d$  为手爪的宽度. 然后用抓取平面切割这些障碍, 这样局部规划就等效为抓取平面上的一个二维的路径规划. 经过规划, 我们就可得到手腕的运动轨迹及其方向, 当然, 它们所对应的机械手臂的状态必须位于  $o$ -特征网的节点上. 对从逼近点到放置位置的局部规划亦可采用相同的方法.

需要指出的是全局规划和局部规划是交互地进行的, 例如, 如果我们在  $g$ -特征网上找不到

一条从抓取分离点到抓取逼近点之间的连通道路,我们就必须在障碍较密集的地方进行局部规划.相反地,当我们在抓取平面上完成局部规划后,我们还应校核手臂的相应状态是否在 $o$ -特征网上等.

#### 4 算法

根据上面所讨论的基本思想,我们可设计如下的算法来实现机械手的抓取-放置操作的路径规划.

首先,我们定义一些符号:

$S_i$ :机械手起始状态;

$S_{pk}$ :机械手位于抓取点时的状态;

$S_{pd}$ :机械手位于放置点时的状态;

$S_e$ :机械手目标状态;

SET( $x_{pk}$ ):机械手在抓取位置抓取物体时的手臂末端点集;

SET(plane,  $x_{pk}$ ):过点  $x_{pk}$  的抓取平面集合;

SET( $x_{pd}$ ):机械手在放置位置放置物体时的手臂末端点集;

SET(plane,  $x_{pd}$ ):过点  $x_{pd}$  的放置平面集合;

path A connected(B, C):存在 A 特征网上从节点 B 到 C 的一条连通路径.

规划算法如下:

- 1) 将环境中的障碍分别进行相应的扩展.
- 2) 划分状态空间并构造  $g$ -特征网和  $o$ -特征网.
- 3) 根据用户指定的物体的特征在抓取和放置位置选取抓取点的抓取平面.
- 4) 如果 SET( $x_{pk}$ )=NULL, 转 6); 否则选一点  $x \in$  SET( $x_{pk}$ ), SET( $x_{pk}$ )=SET( $x_{pk}$ )- $\{x\}$ ;
- 4.1) 如果  $S_{pk}(x) \in g-CN$  且 path  $\exists$  connected( $S_i, S_{pk}$ ) 转 5);
- 4.2) 如果 SET(plane,  $x_{pk}$ )=NULL, 转 4); 否则选一平面  $p \in$  SET(plane,  $x_{pk}$ ), SET(plane,  $x_{pk}$ )=SET(plane,  $x_{pk}$ )- $\{p\}$ ;
- 4.3) 用平面  $P$  切割三维障碍, 然后在相应的切面上规划并验证所得的路径;
- 4.4) 如果 4.3) 失败, 转 4.2).
- 5) 如果 SET( $x_{pd}$ )=NULL, 转 4); 否则选一点  $x \in$  SET( $x_{pd}$ ), SET( $x_{pd}$ )=SET( $x_{pd}$ )- $\{x\}$ ;
- 5.1) 如果  $S_{pd}(x) \in g-CN$  且 path  $\exists$  connected( $S_{pk}, S_{pd}$ ) 转 5.2), 否则转 5.3);
- 5.2) 如果 path  $\exists$  connected( $S_{pd}, S_e$ ), 转 6);
- 5.3) 如果 SET(plane,  $x_{pd}$ )=NULL, 转 5), 否则选一平面  $p \in$  SET(plane,  $x_{pd}$ ), SET(plane,  $x_{pd}$ )=SET(plane,  $x_{pd}$ )- $\{p\}$ ;
- 5.4) 用平面  $P$  切割三维障碍, 然后在相应的切面上规划并验证所得的路径;
- 5.5) 如果 5.4) 失败则转 5.3).
- 6) 规划成功, 并给出相应的路径, 结束.
- 7) 宣告规划失败, 结束.

## 5 实验结果和分析

我们已在 SUN 工作站上用 C 语言初步实现了上述算法, 图 5 给出了一个抓取-放置操作规划的例子, 该例被抓取物体环境中共有 9 个障碍. 自由状态空间划分的结果为:  $g$ -特征网共有 367 个叶子节点,  $o$ -特征网上共有 391 个叶子节点. 这里我们所采用的路径搜索算法是  $A^*$  算法, 规划从读取环境障碍的数据到输出机械手的运动路径共需 CPU 时间 27.6s, 其中自由状态空间的划分占去了较多的时间, 如果环境中障碍保持不变的话, 当我们进行新的规划时所需的时间就很短了. 另外划分自由状态空间的算法中很大一部分是可以采用并行机制进行处理的, 由此规划所需的时间还可进一步地缩短. 通过上述的分析, 我们可以看到该规划方法还是很有有效的.

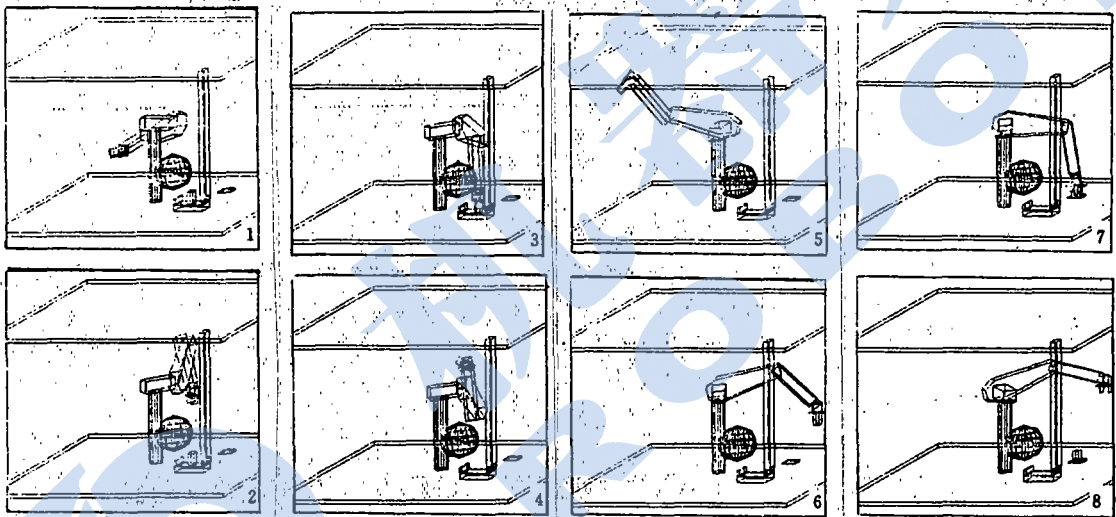


图 5 抓取-放置操作运动规划的一个例子

### 参 考 文 献

- 1 Lozano-Pewewz T. Spatial planning, a configuration space approach. IEEE Trans on Comput, 1983; 2(c-32)
- 2 Brooks R A, Lozano-Perez T. A Subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation. Proc of 8th IJ-CAI-83, 789-806
- 3 Whitesides S.H. Computational geometry and motion planing in computational geometry. G T Toussaint (ed.), Elsevier Science Publishers B V (North-Holland), 1985
- 4 Chien R T, ZHANG Ling, ZHANG Bo. Planning collision-free paths for robotic arm among obstacles. IEEE Trans, PAMI, 1984; PAMI-6(1)
- 5 ZHANG Bo, ZHANG Ling *et al.* Motion planning for robots with topological dimension reduction method. J of Comput Sci & Technol, 1990; 5(1); 1-16
- 6 李永成. 基于拓扑降维法的路径规划. 硕士论文, 1990

# MOTION PLANNING FOR PICK-AND-PLACE OPERATIONS OF A MULTI-JOINT ROBOTIC ARM

*LI Yongchen ZHANG Bo*

(Dept of Computer Sci and Tech, Tsinghua Univ, Beijing 100084)

## Abstract

In this paper, we present a topology-based approach to deal with pick-and-place operations for a robotic arm. The planning method and its algorithm are discussed. The final experimental results are presented to show the feasibility of the approach.

**Key words:** state space local planning global planning

(本文第一作者李永成:男,26岁,博士生)

(上接第 23 页)

## 参 考 文 献

- 1 Hamamatsu. Position-sensitive detector. User Manual.
- 2 Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In: Proc IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986, 364-374
- 3 Sid-Ahmed M A, Boraie M. Photogrammetric aerotriangulation using matrix CCD cameras for close-range position sensing. Computer in Industry, 1989, 12: 307-311
- 4 沈兰孙. 数据采集与处理. 能源出版社, 1987

# INVESTIGATION AND DESIGN OF A SYSTEM FOR ROBOT DYNAMIC TRACE MEASUREMENT

*WANG Hongyu*

(Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences)

## Abstract

This thesis introduces a kind of system for robot dynamic position measurement, and describes the construction of the system. Also, it analyses the ways of calibration. Data processing and hardware design for enhancing the performance. Long time tests and preliminary application show the system has high reliability and effectiveness.

**Key words:** PSD intrinsic parameters extrinsic parameters system calibration

(本文作者王宏玉,男,26岁,硕士)