



# 机器人学(第三版)

蔡自兴 主编

中南大学

2016

## 第八章 机器人高层规划



- 自动规划从某个特定的问题状态出发，寻求一系列行为动作，并建立一个操作序列，直到求得目标状态为止。与一般问题求解相比，自动规划更侧重于问题的求解过程，而不是求解结果。
- 机器人规划（robot planning）是机器人学的一个重要研究领域，也是人工智能与机器人学一个令人感兴趣的结合点。



## 8.1 机器人规划概述

### 8.1.1 规划的作用与问题分解途径

- 规划的概念 及作用

- 一个规划是一个行动过程的描述。

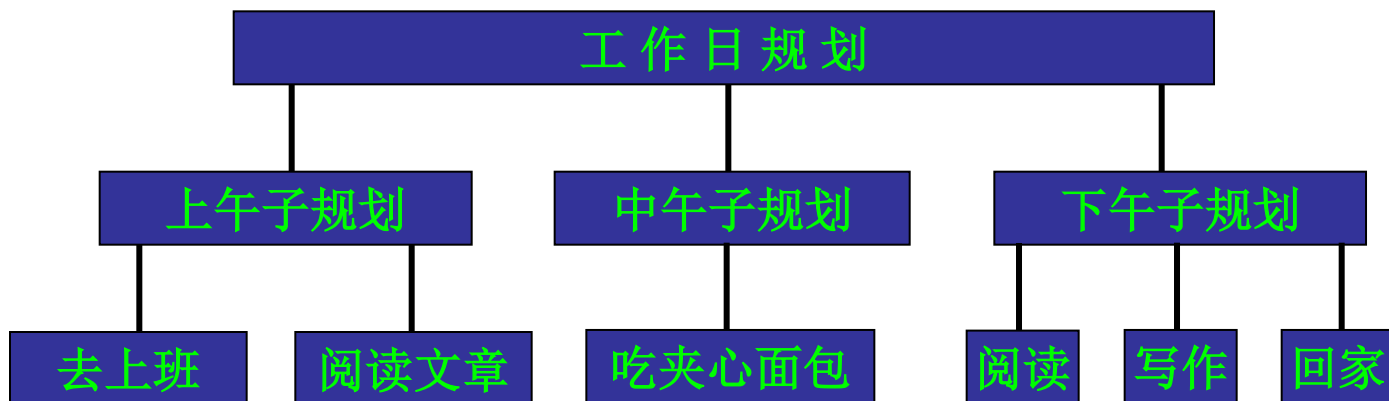


图8.1 子规划的分层结构例子

## 8.1 .1 规划的作用与问题分解途径

### ■ 问题分解途径

把某些比较复杂的问题分解为一些比较小的子问题。

- 第一条重要途径是当从一个问题状态移动到下一个状态时，无需计算整个新的状态，而只要考虑状态中可能变化了的那些部分。
- 第二条重要途径是把单一的困难问题分割为几个有希望的较为容易解决的子问题。



## 8.1 .1 规划的作用与问题分解途径

### ■ 域的预测和规划的修正

#### ■ 域的预测

规划方法的成功取决于问题论域的另一特性——预测。

#### ■ 规划的修正

为便于修订，在规划过程中不仅要记下规划的执行步骤，而且也要记下每一步骤必须被执行的理由。

## 8.1.2 机器人规划系统的任务与方法



在机器人规划系统中，必须具有执行下列各项任务的方法：

- 根据最有效的启发信息，选择应用于下一步的最好规则。
- 应用所选取的规则来计算由于应用该规则而生成的新状态。
- 对所求得的解答进行检验。
- 检验空端，以便舍弃它们，使系统的求解工作向着更有效的方向进行。
- 检验殆正确的解答，并应用具体技术使之完全正确。

## 8.1.2 机器人规划系统的任务与方法



### ■ 选择和应用规则

- 首先要查出期望目标状态与现有状态之间的差别集合，然后辨别出那些与减少这些差别有关的规则。

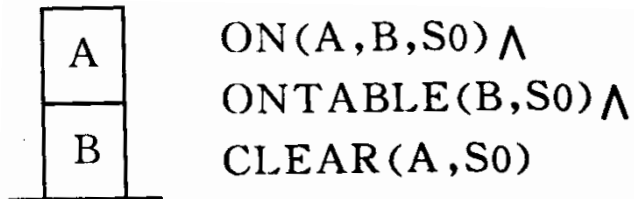


图8.2 简单的积木世界描述

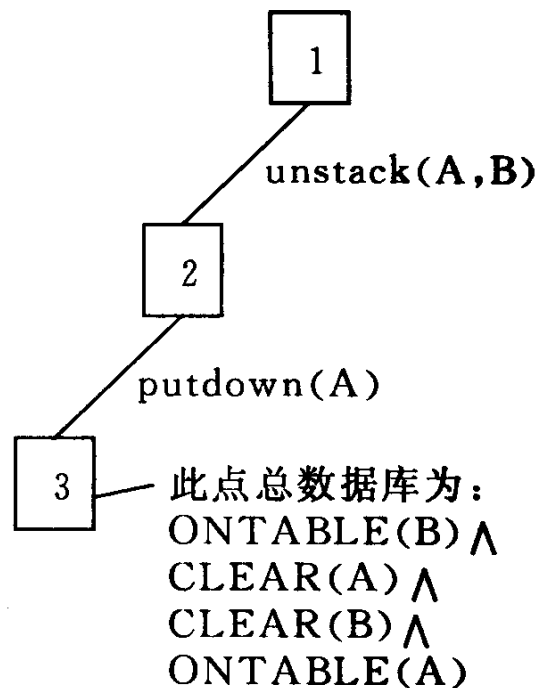


图8.3 一个简单的搜索树

## 8.1.2 机器人规划系统的任务与方法



### ■ 检验解答与空端

- 注意有关出错的知识，然后加以直接修正。
- 最少约定策略

修正一个殆正确的解答的更好办法实际上不是对解答进行全面的修正而是不完全确定地让它们保留到最后的可能时刻。

当有尽可能多的信息可供利用时，再用一种不产生矛盾的方法来完成对解答的详细说明

推迟决定操作符的执行顺序。



## 8.2 积木世界的机器人规划



### 8.2.1 积木世界的机器人的问题

积木世界由一些有标记的立方形积木，互相堆迭在一起构成；机器人有个可移动的机械手，它可以抓起积木块并移动积木从一处至另一处。

- $\text{unstack}(a,b)$ : 把堆放在积木 $b$ 上的积木 $a$ 拾起。在进行这个动作之前，要求机器人的手为空手，而且积木 $a$ 的顶上是空的。
- $\text{stack}(a,b)$ : 把积木 $a$ 堆放在积木 $b$ 上。动作之前要求机械手必须已抓住积木 $a$ ，而且积木 $b$ 顶上必须是空的。

## 8.2.1 积木世界的机器人的问题

- **pickup( $a$ ):** 从桌面上拾起积木 $a$ , 并抓住它不放。在动作之前要求机械手为空手, 而且积木 $a$ 顶上没有任何东西。
- **putdown( $a$ ):** 把积木 $a$ 放置到桌面上。要求动作之前机械手已抓住积木 $a$ 。

## 8.2.1 积木世界的机器人的问题

- 机器人问题的状态描述和目标描述均可用谓词逻辑公式构成：
  - $ON(a,b)$ : 积木 $a$ 在积木 $b$ 之上。
  - $ONTABLE(a)$ : 积木 $a$ 在桌面上。
  - $CLEAR(a)$ : 积木 $a$ 顶上没有任何东西。
  - $HOLDING(a)$ : 机械手正抓住积木 $a$ 。
  - $HANDEMPY$ : 机械手为空手。

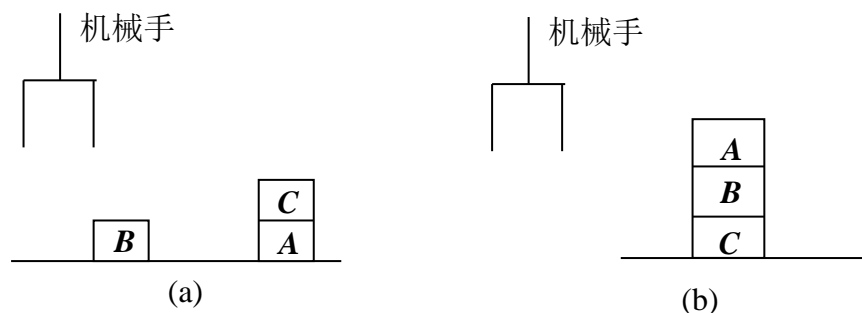


图8.4 积木世界的机器人问题

## 8.2.2 积木世界机器人规划的求解

$\text{move}(x, y, z)$ : 把物体 $x$ 从物体 $y$ 上面移到 $z$ 上面。

先决条件:  $\text{CLEAR}(x)$ ,  $\text{CLEAR}(z)$ ,  
 $\text{ON}(x, y)$

删除表:  $\text{ON}(x, z)$ ,  $\text{CLEAR}(z)$

添加表:  $\text{ON}(x, z)$ ,  $\text{CLEAR}(y)$

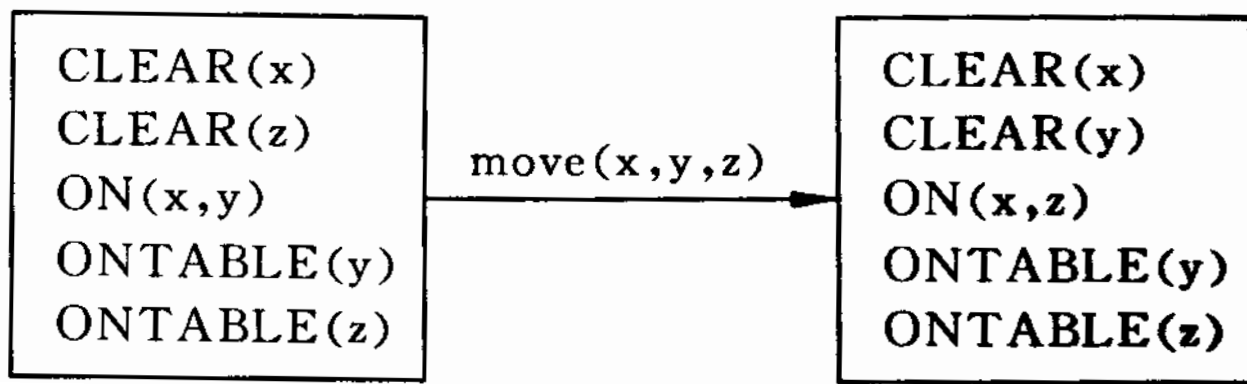


图8.5 表示move动作的搜索树

## 8.2.2 积木世界机器人规划的求解

STRIPS形式表示如下：

- **stack(x,y)**

先决条件和删除表:  $\text{HOLDING}(x) \wedge \text{CLEAR}(y)$

添加表:  $\text{HANDEEMPTY}, \text{ON}(x,y)$

- **unstack(x,y)**

先决条件:  $\text{HANDEEMPTY} \wedge \text{ON}(x,y) \wedge \text{CLERA}(x)$

删除表:  $\text{ON}(x,y), \text{HANDEEMPTY}$

添加表:  $\text{HOLDING}(x), \text{CLEAR}(y)$

- **pickup(x)**

先决条件:  $\text{ONTABLE}(x) \wedge \text{CLEAR}(x) \wedge \text{HANDEEMPTY}$

删除表:  $\text{ONTABLE}(x) \wedge \text{HANDEEMPTY}$

添加表:  $\text{HOLDING}(x)$

## 8.2.2 积木世界机器人规划的求解

STRIPS形式表示如下：

- putdown( $x$ )

先决条件和删除表：HOLDING( $x$ )

添加表：ONTABLE( $x$ ), HANDEEMPTY

{unstack( $C, A$ ), putdown( $C$ ), pickup( $B$ ), stack( $B, C$ ),  
pickup( $A$ ), stack( $A, B$ )}

## 8.3 基于消解原理的机器人规划系统



一个基于消解原理的机器人规划系统，STRIPS（Stanford Research Institute Problem Solver），即斯坦福研究所问题求解系统，是从被求解的问题中引出一般性结论而产生规划的。

### 8.3.1 STRIPS系统的组成

- Fikes、Hart和Nilsson 3人在1971及1972研究成功的STRIPS，是夏凯（Shakey）机器人程序控制系统的一个组成部分。
- 主要部分
  - 车轮及其推进系统；
  - 传感系统，由电视摄像机和接触杆组成；
  - 一台不在车体上的用来执行程序设计的计算机。
  - 无线电通讯系统，用于在计算机和车轮间的数据传送。



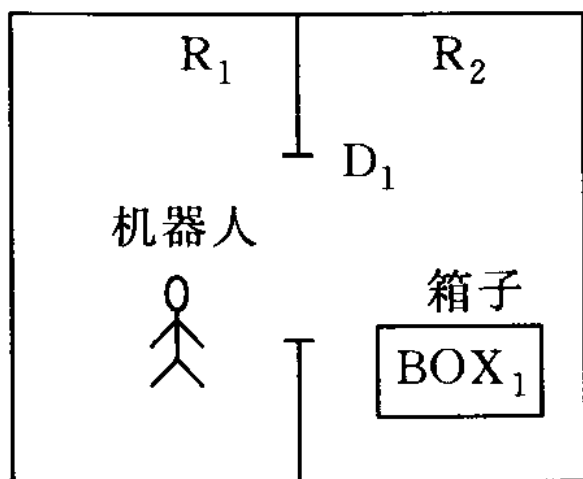
## 8.3.1 STRIPS系统的组成

- 整个STRIPS系统的组成如下：
  - 世界模型。为一阶谓词演算公式；
  - 操作符（F规则）。包括先决条件、删除表和添加表；
  - 操作方法。应用状态空间表示和中间一结局分析。

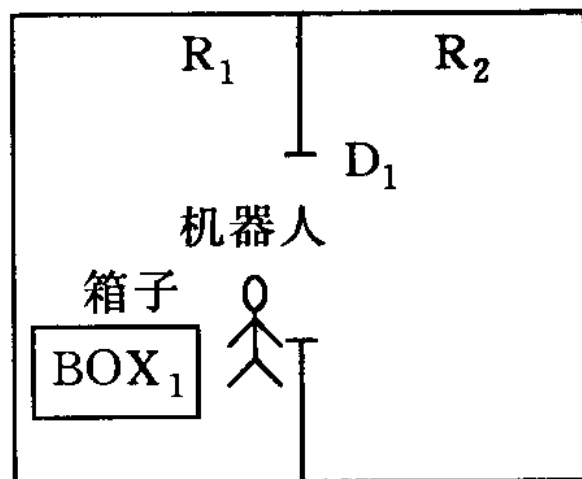
## 8.3.2 STRIPS系统规划过程

### ■ 例8.1

要求机器人到邻室去取回一个箱子。机器人的初始状态和目标状态的世界模型示于图8.7。设有两个操作符，即gothru和pushthru（“走过”和“推过”）。



(a)初始世界模型



(b)目标世界模型

图8.7 STRIPS的一个简化模型

## 8.3.2 STRIPS系统规划过程

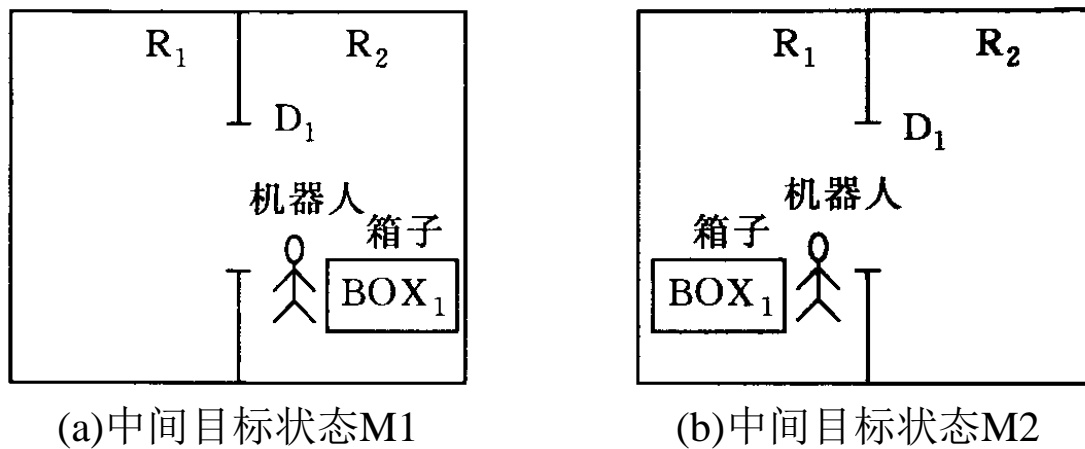


图8.8 中间目标状态的世界模型

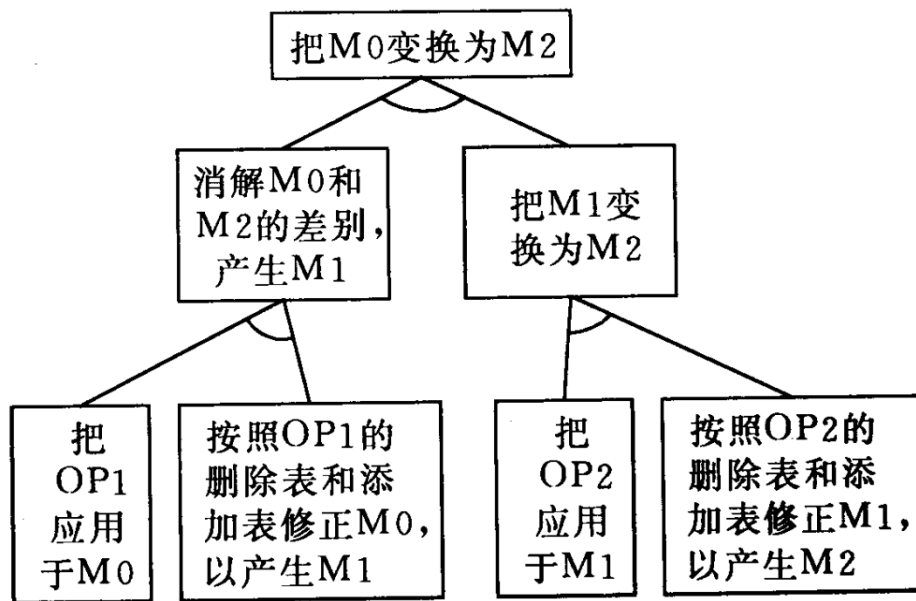


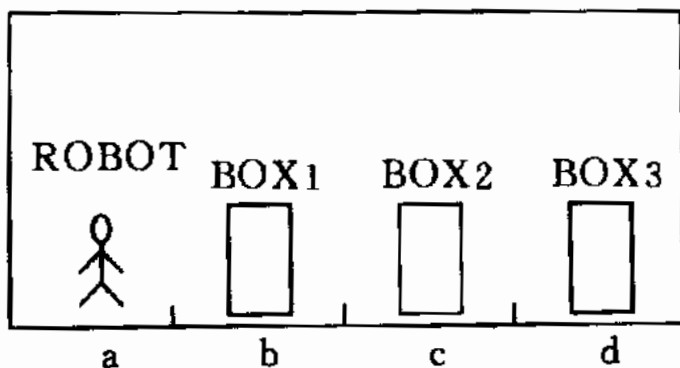
图8.10 机器人规划例题的与或图

### 8.3.3 含有多重解答的规划

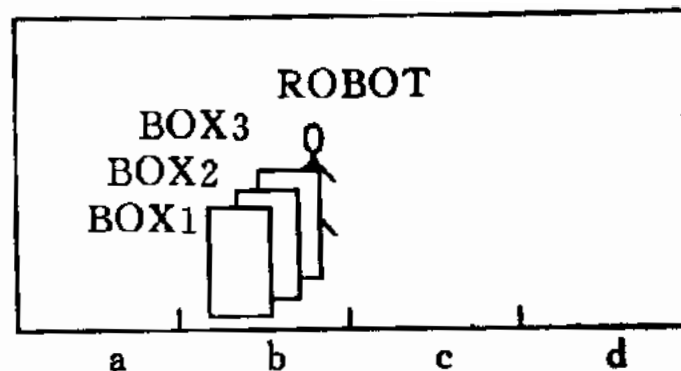


#### ■ 例8.2

要求机器人ROBOT把3个在不同区域（如b、c和d区）的箱子BOX1，BOX2和BOX3移到同一个区域（如b区）内。其初始世界模型M0和目标世界模型G0如图8.11(a)和(b)所示。



(a)初始世界模型M0



(b)目标世界模型G0

图8.11 把箱子移到一起的机器人规划

## 8.4 基于专家系统的机器人规划

### 8.4.1 规划系统的结构和机理

#### ■ 系统结构和规划机理 机器人规划专家系统组成

- 知识库
- 控制策略
- 推理机
- 知识获取
- 解释与说明

#### ■ 任务级机器人规划 三要素

- 建立模型
- 任务说明
- 程序综合

## 8.4 基于专家系统的机器人规划

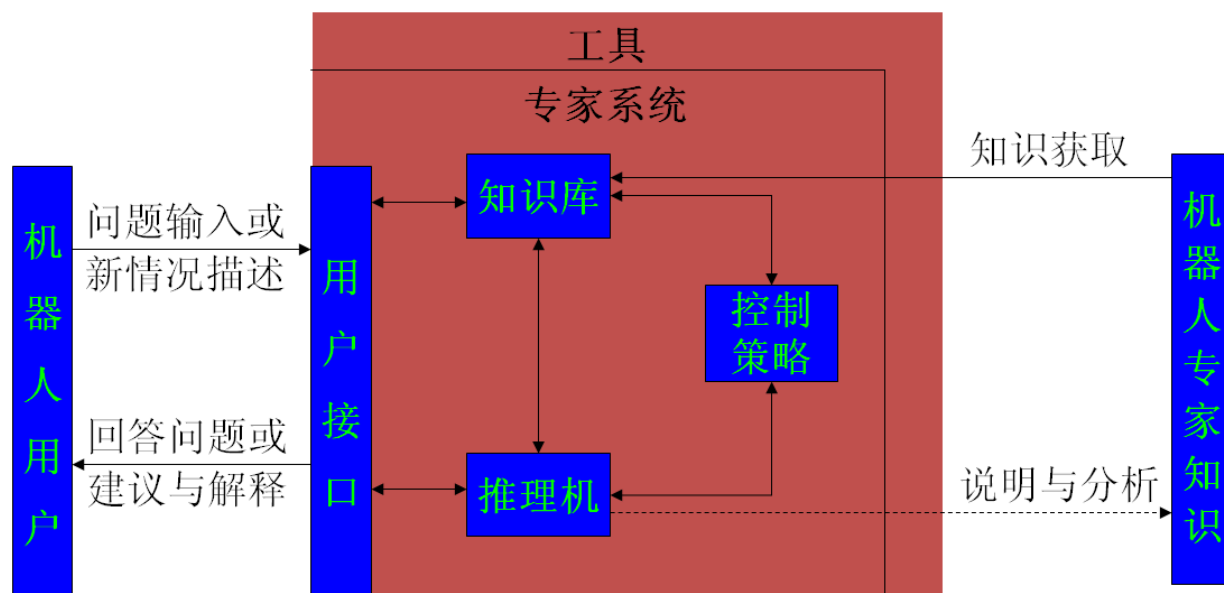


图8.14 机器人规划专家系统的结构

## 8.4.2 ROPES机器人规划系统



### ■ 系统简化框图

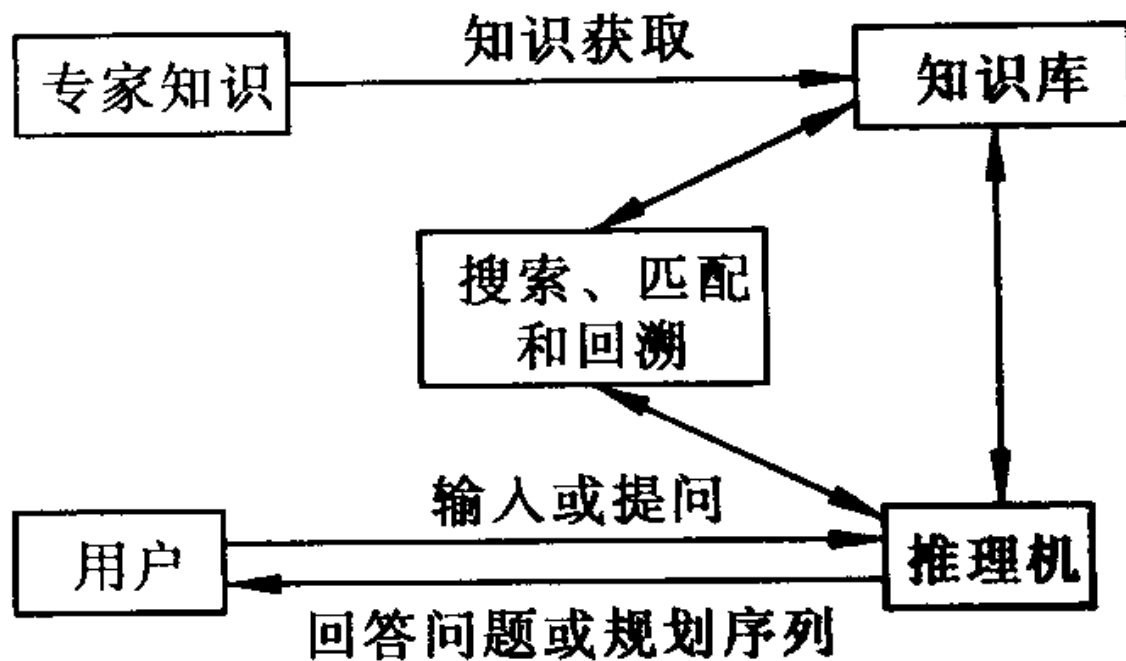


图8.15 ROPES系统简化框图

## 8.4.2 ROPES机器人规划系统



### ■ 世界模型与假设

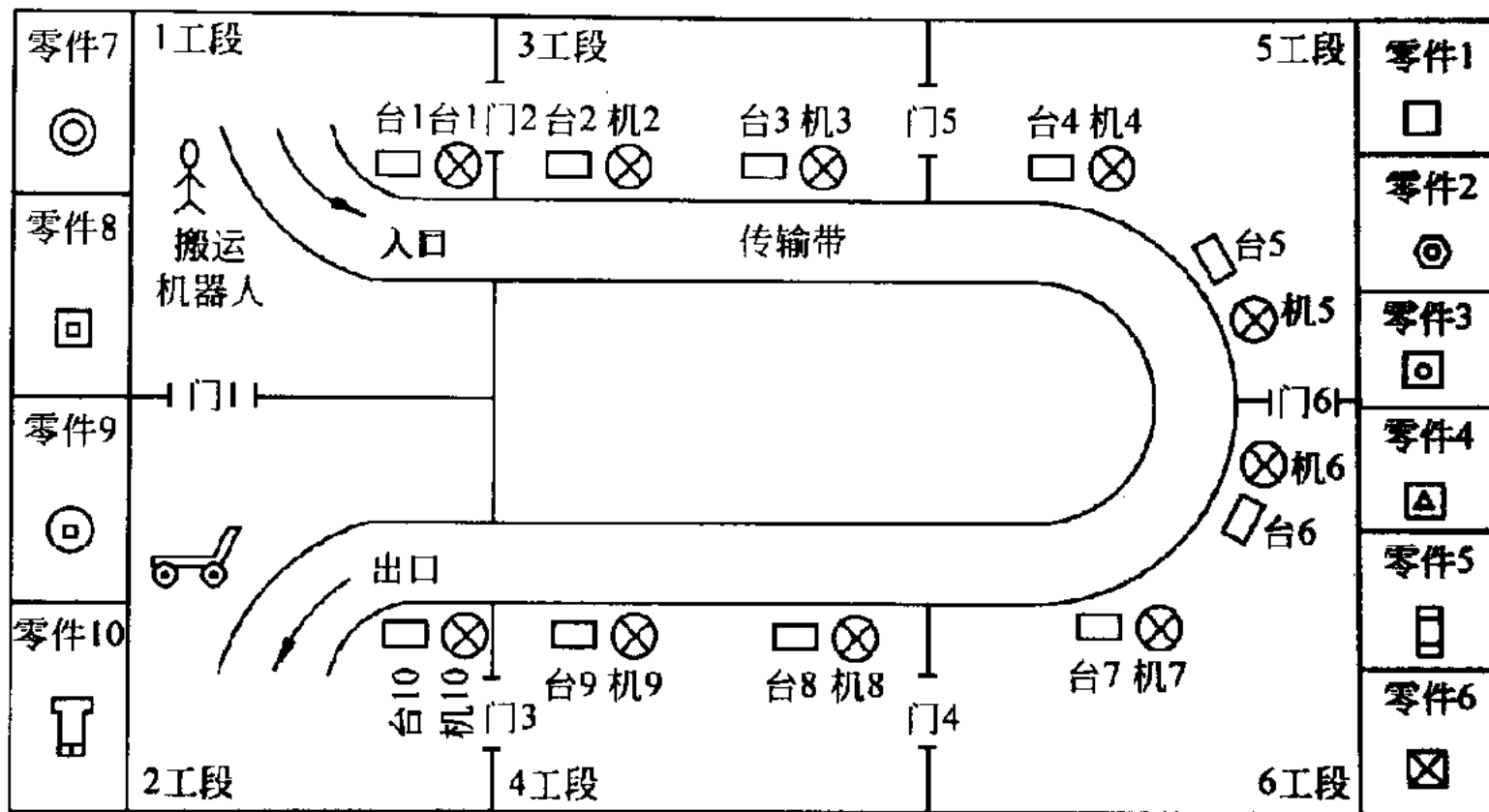


图8.16 机器人装配线环境模型



## 8.4.2 ROPES机器人规划系统



### ■ 规划与执行结果

表8.2 各规划系统世界模型的比较

系统名称	物体数目				
	房间	门	箱子	其它	总计
STRIPS	5	4	3	1	13
ABSTRIPS	7	8	3	0	18
PULP- I	6	6	5	12	27
PULP-24	6	7	5	15	33

## 8.5 机器人路径规划

- 所谓路径规划是指移动机器人按照某一性能指标(如距离, 时间, 能量等)搜索一条从起始状态到达目标状态的最优或次优路径。
- 主要涉及的问题
  - 利用获得的移动机器人环境信息建立较为合理的模型
  - 用某种算法寻找一条从起始状态到达目标状态的最优或近似最优的无碰撞路径
  - 能够处理环境模型中的不确定因素和路径跟踪中出现的误差, 使外界物体对机器人的影响降到最小;
- 如何利用已知的所有信息来引导机器人的动作, 从而得到相对更优的行为决策。

## 8.5.1 机器人路径规划的主要方法和发展趋势



- 移动机器人路径规划方法的三种类型
  - 基于事例的学习规划方法
  - 基于环境模型的规划方法
  - 基于行为的路径规划方法
- 路径规划的发展趋势

新的发展趋向于将多种方法相结合

- 基于反应式行为规划与基于慎思行为规划的结合
- 全局路径规划与局部路径规划的结合
- 传统规划方法与新的智能方法之间的结合

## 8.5.2 基于近似VORONOI图的机器人路径规划



- 移动机器人运行环境的空间表示方法
  - 人与动物的空间认知
  - 空间知识的表示方法
    - 度量表示（Metric representation method），采用世界坐标系中的坐标信息来描述环境的特征。
    - 拓扑表示（Topological representation）用节点来表示某个特定的位置，用边来表示这些位置的联系。
    - 混合表示（Hybrid representation）是一种从全局度量地图中提取拓扑特征的方法，在机器人导航过程中，采用声纳传感器的距离信息提取特征。
- 移动机器人的分层次空间知识表示

## 8.5.2 基于近似VORONOI图的机器人路径规划



- 近似VORONOI边界网络 (AVBN) 建模方法
  - 俄国数学家G. Voronoi在1908年提出的Voronoi图

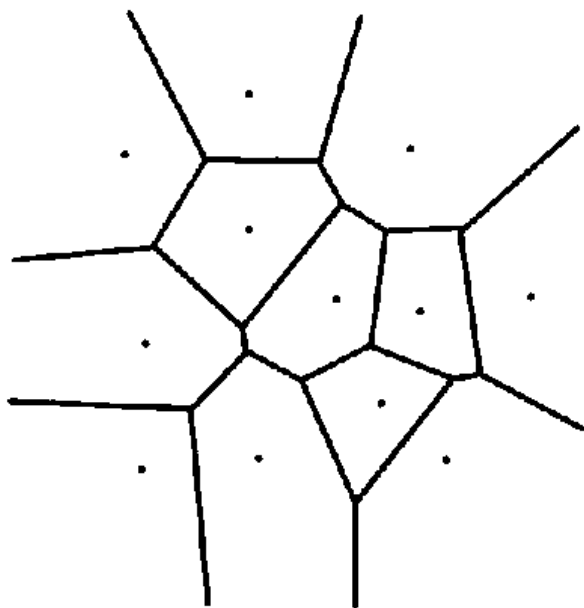


图8.20 点集的Voronoi图

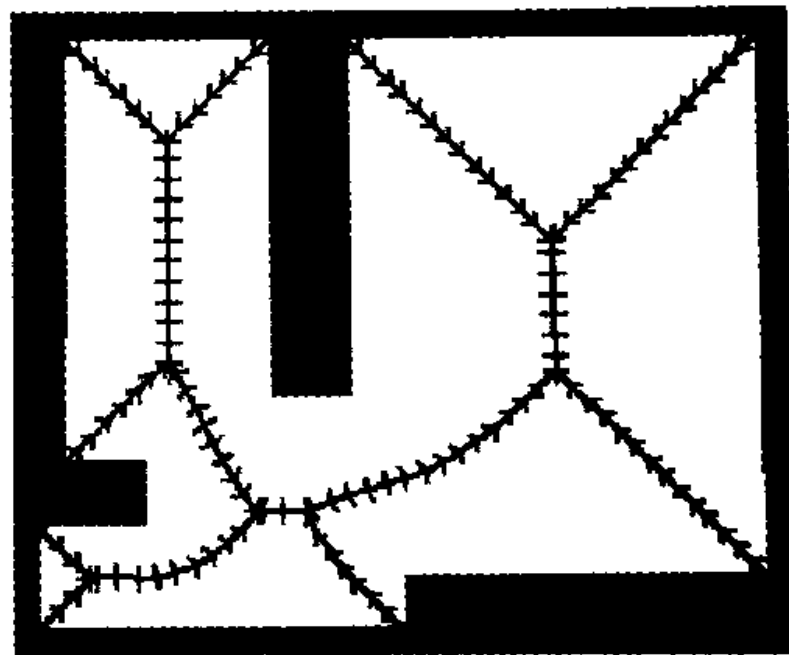


图8.21 采用草地火法产生GVG图 (引自文[51])

### 8.5.3 基于模拟退火算法的机器人局部路径规划



#### ■ 局部规划方法概述

在未知环境下，局部规划应当将有目的性的目标趋向行为与漫游扰动下进行目标搜索的随机性行为相结合，体现目标、局部陷阱以及传感器信息对移动机器人局部行为的综合约束。

把向目标方向运动的有向性与通过布朗运动进行可行路径搜索的随机性相结合。

机器人首先按照局部滚动窗口内目标方向优先的搜索原则，确定机器人下一步的运动方向。

通过监控距离势能的变化判断机器人处于局部陷阱时，对目标方向角施加一个扰动量。

通过随机扰动，引导机器人克服局部势能陷阱。当机器人运行到一个新的势能最小值区域时，意味着已经脱离原来的势能陷阱区域，此时结束扰动状态恢复目标趋向运动。

### 8.5.3 基于模拟退火算法的机器人局部路径规划



#### ■ 基于模拟退火的扰动规则设计

##### ■ 模拟退火（Simulated Annealing, SA）算法

- 是一种随机搜索算法，其原理是依据金属物质退火过程和优化问题之间的相似性。
- 是一个马尔可夫（Markov）决策过程，基于马尔可夫过程理论，可以证明模拟退火算法以概率1收敛于全局最优值。
  -
- 是一种解决组合优化问题的通用算法
- 通常应用于组合优化问题，典型的如：TSP问题,大规模集成电路设计等。

### 8.5.3 基于模拟退火算法的机器人局部路径规划



#### ■ 基于模拟退火的扰动规则设计

- 确定滚动优化窗口
- 计算势能函数与方向函数
- 建立局部寻优的评估函数
- 局部陷阱的判断
- 扰动角度的产生
- 扰动量作用效果的评价

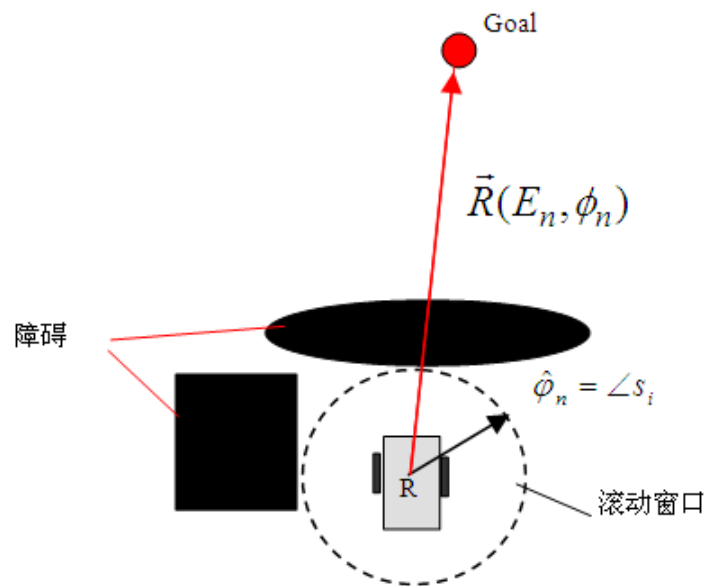


图8.23 基于滚动窗口的局部规划



### 8.5.3 基于模拟退火算法的机器人局部路径规划



#### ■ 基于SA的局部规划程序设计

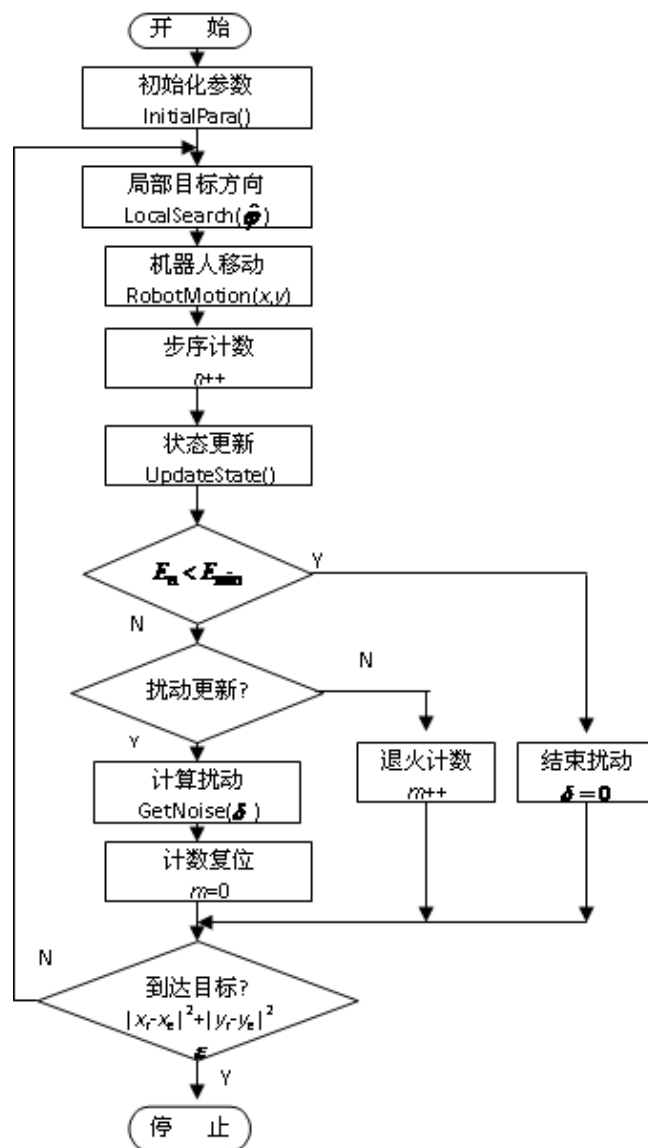


图8.24 基于SA扰动控制的局部规划程序流程图



## 8.5.4 基于免疫进化和示例学习的机器人路径规划

### ■ 个体的编码方法

一条路径是从起点到终点、若干线段组成的折线，线段的端点叫节点，绕过了障碍物的路径为可行路径。一条路径对应进化种群中的一个个体，一个基因用其节点坐标 $(x, y)$ 和状态量 $b$ 组成的表来表示， $b$ 刻画节点是否在障碍物内和本节点与下一节点组成的线段是否与障碍物相交，以及记录使用绕过障碍物的免疫操作状态。个体 $X$ 可表示如下：

$$X = \{(x_1, y_1, b_1), (x_2, y_2, b_2), \dots, (x_n, y_n, b_n)\}$$

其中， $(x_1, y_1)$ ， $(x_n, y_n)$ 是固定的，分别表示起止。

群体的大小是预先给定的常数 $N$ ，按随机方式产生 $n-2$ 个坐标点。

## 8.5.4 基于免疫进化和示例学习的机器人路径规划

### ■ 适应度函数

$$Fit(X) = dist(X) + r\phi(X) + c\phi(X)$$

### ■ 免疫和进化算子

- 交叉算子
- I型变异算子
- II型变异算子
- 免疫算子(immune operator)



图8.25 免疫算子



## 8.5.4 基于免疫进化和示例学习的机器人路径规划

### ■ 算法描述与免疫、进化算子分析

开始

{

初始化群体;

评价群体的适应度;

若不满足停机条件则循环执行:

{

从示例库中取出若干个体替换最差个体;

交叉操作;

I型变异操作;

II型变异操作;

删除操作;

交换操作;

裁角;

免疫操作接种疫苗;

免疫选择;

评价群体的适应度;

淘汰部分个体, 保持种群规模;

}

## 8.5.5 基于蚁群算法的机器人路径规划



- 蚁群优化算法的简介
- 蚂蚁群在觅食过程中具有一些显著自组织行为的特征
  - 蚂蚁在移动过程中会释放一种称为信息素的物质；
  - 释放的信息素会随着时间的推移而逐步减少；
  - 蚂蚁能在一个特定的范围内觉察出是否有同类的信息素轨迹存在；
  - 蚂蚁会沿着信息素轨迹多的路径移动。

## 8.5.5 基于蚁群算法的机器人路径规划



- 基于蚁群算法的路径规划
  - 环境建模
  - 邻近区的建立
  - 气味区的建立
  - 路径的构成
  - 路径的调整
  - 路径方向的选择
  - 信息素的更新

## ■ 算法描述

基于蚁群算法的路径规划(PPACO)步骤如下:

步骤1 环境建模;

步骤2 建立巢穴邻近区和食物产生的气味区;

步骤3 在邻近区放置足够多的蚂蚁;

步骤4 每只蚂蚁根据6点的方法选择下一个行走的栅格;

步骤5 如果有蚂蚁产生了无效路径, 则将该蚂蚁删除, 否则直到该蚂蚁到达气味区并沿气味方向找到食物为止;

步骤6 调整蚂蚁走过的有效路径并保存调整后路径中的最优路径;

步骤7 按8点更改有效路径的信息素;

重复步骤3、4、5、6、7直达到达到某个迭代次数或运行时间超过最大限度为止, 结束整个算法。

## 8.6 小结



- 规则演绎法，用 F 规则求解规划序列
- 逻辑演算和通用搜索法
- 基于专家系统的规则
- 基于近似Voronoi图的路径规划。
- 基于模拟退火的局部路径规划。
- 基于免疫进化和示例学习的移动机器人路径规划
- 基于蚁群算法的移动机器人路径规划