



西安交通大学  
Xi'an Jiaotong University

Systems Engineering Institute,  
Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an ShaanXi,  
710049, P.R.China  
Phone: 86-29-82667771

# 第六章：机器人导航

---

## *Robot Navigation*

吕娜



## 内容提要

---

- ◇ 上节内容：直线提取、误差传递、机器人定位
- ◇ 什么是机器人导航
- ◇ 路径规划与避障（规划与反应）
- ◇ 路径规划算法
  - ◇ 基于可视图的路径规划算法
  - ◇ 基于Voronoi图的路径规划算法
  - ◇ 基于单元格分解的路径规划算法
  - ◇ 基于势场法的路径规划算法
- ◇ 避障算法

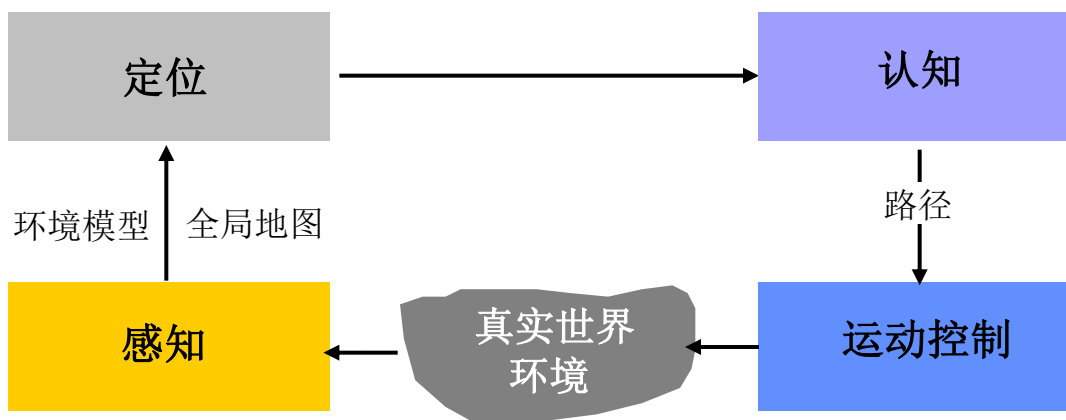




## § 6.1 什么是机器人导航

### ◇ 机器人导航的概念：

- ◇ 机器人通过先验知识及传感器感知所得环境及自身的状态信息，通过相对的长期规划（路径规划）和即时反应（避障），实现在有障碍物的环境中到达目标位置的自主运动。





## § 6.1 机器人导航的主要问题

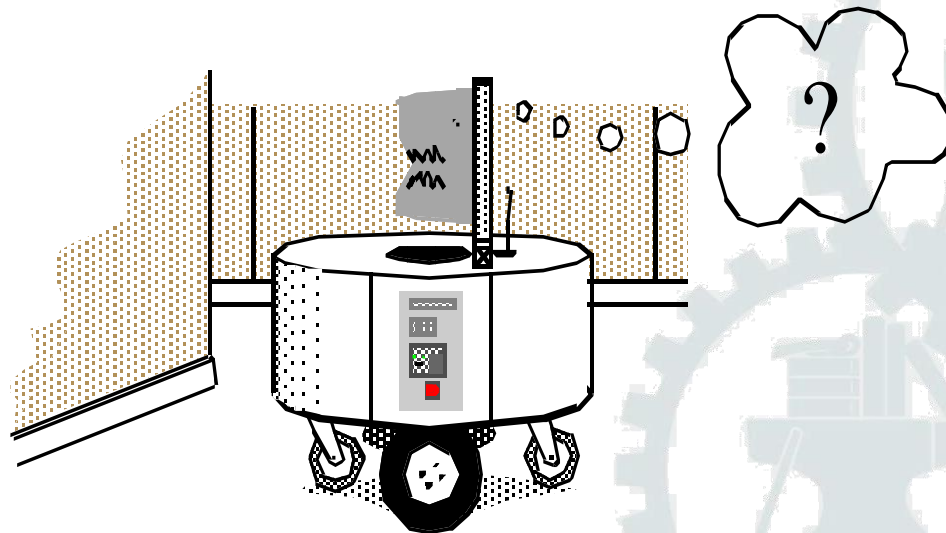
◇ 我（机器人）在何处？

◇ 我要到何处去？

◇ 我要如何到达该处？

机器人  
定位

路径规划  
问题





## § 6.1 路径规划与避障定义

---

### ◇ 路径规划:

规划一条从机器人当前位置到达目标位置的轨迹（长期战略性（long term strategic））

### ◇ 避障:

根据实时获取的传感器信息，调整所规划的运动轨迹，从而达到避障的目的（即时反应战术（tactical））

### ◇ 两者相互辅助，缺一不可





## § 6.1 机器人导航分类（环境信息可知性）

---

### ◇ 完全已知环境

- ◇ 机器人能够获得所在工作环境的所有信息，包括目标位置、方向，障碍物位置和方向
- ◇ 工业机器人

### ◇ 部分已知环境

- ◇ 机器人能够获得目标信息，以及部分环境信息

### ◇ 完全未知环境

- ◇ 机器人仅能获得目标信息，完全没有环境相关信息





## § 6.1 机器人导航分类（传感器类型）

### ◇ 惯性导航

- ◇ 最基本的导航方式
- ◇ 利用光电编码器和陀螺仪计算航程，推断当前位置和下一步目的地

### ◇ 磁导航

- ◇ 自主导引车的主要导航方式（自动化物流运输系统；柔性生产组织系统的核心设备）
- ◇ 地下线缆通不同频率电流，作为路径信息
- ◇ 磁传感器



## § 6.1 机器人导航分类（传感器类型）

---

### ◇ 光反射导航定位

- ◇ 利用光反射技术进行导航定位
- ◇ 激光、红外传感器

### ◇ 视觉导航

- ◇ 通过摄像头拍摄环境局部或者全局环境图像，通过图像处理技术（特征提取、特征识别、距离估计等）进行机器人定位及导航





## § 6.1 机器人导航分类（传感器类型）

---

### ◇ GPS卫星导航

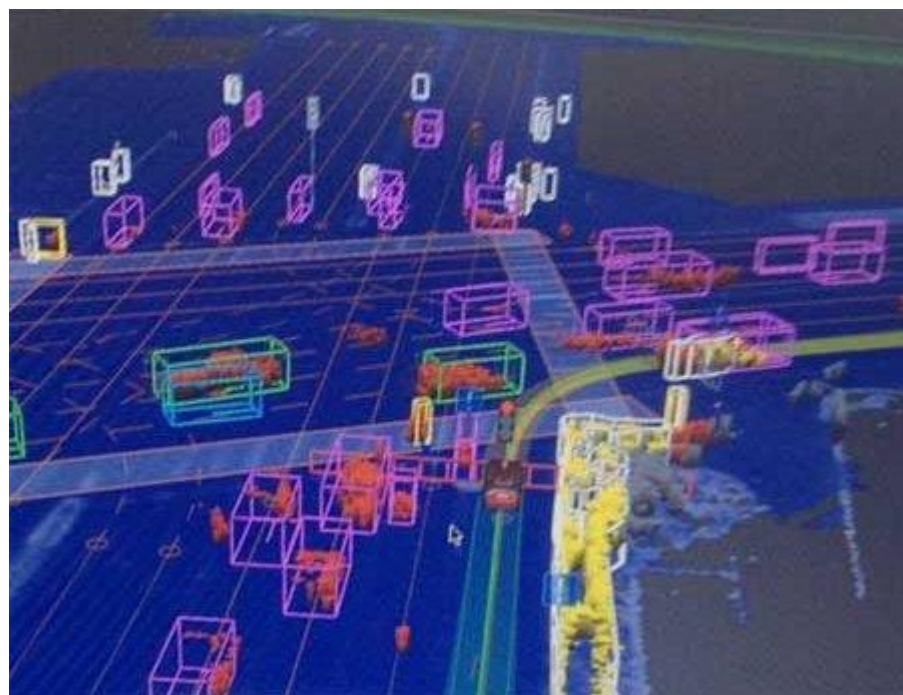
### ◇ 多传感器混合导航

- ◇ 码盘、陀螺仪、视觉传感器、超声传感器、红外传感器、接触传感器等
- ◇ 异种信息融合导航





## § 6.1 机器人导航分类（传感器类型）例：





## § 6.1 小结

---

- ◇ 移动机器人导航的主要问题(3W)
- ◇ 路径规划与避障的定义
- ◇ 机器人导航的分类





## § 6.2 路径规划算法

---

### ◇ 前提:

- ◇ 能够获得环境地图，假设全局地图已知
- ◇ 用道路图(Road Map)或者单元格(Cell)等对环境地图进行了离散化表示

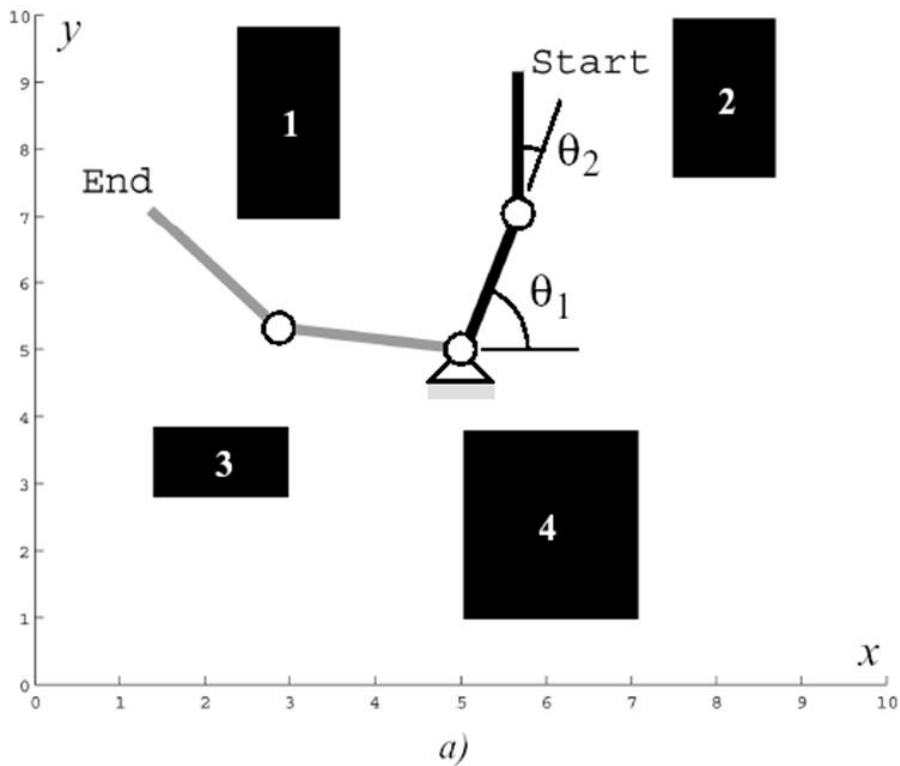




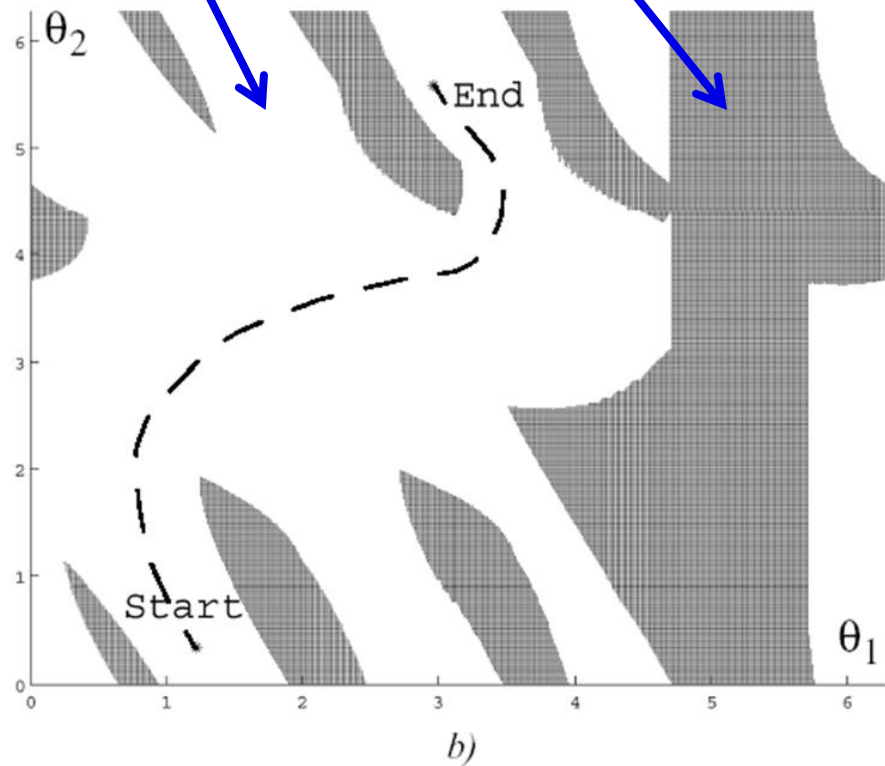
# § 6.2 物理空间与配置空间

自由空间

障碍空间



物理空间



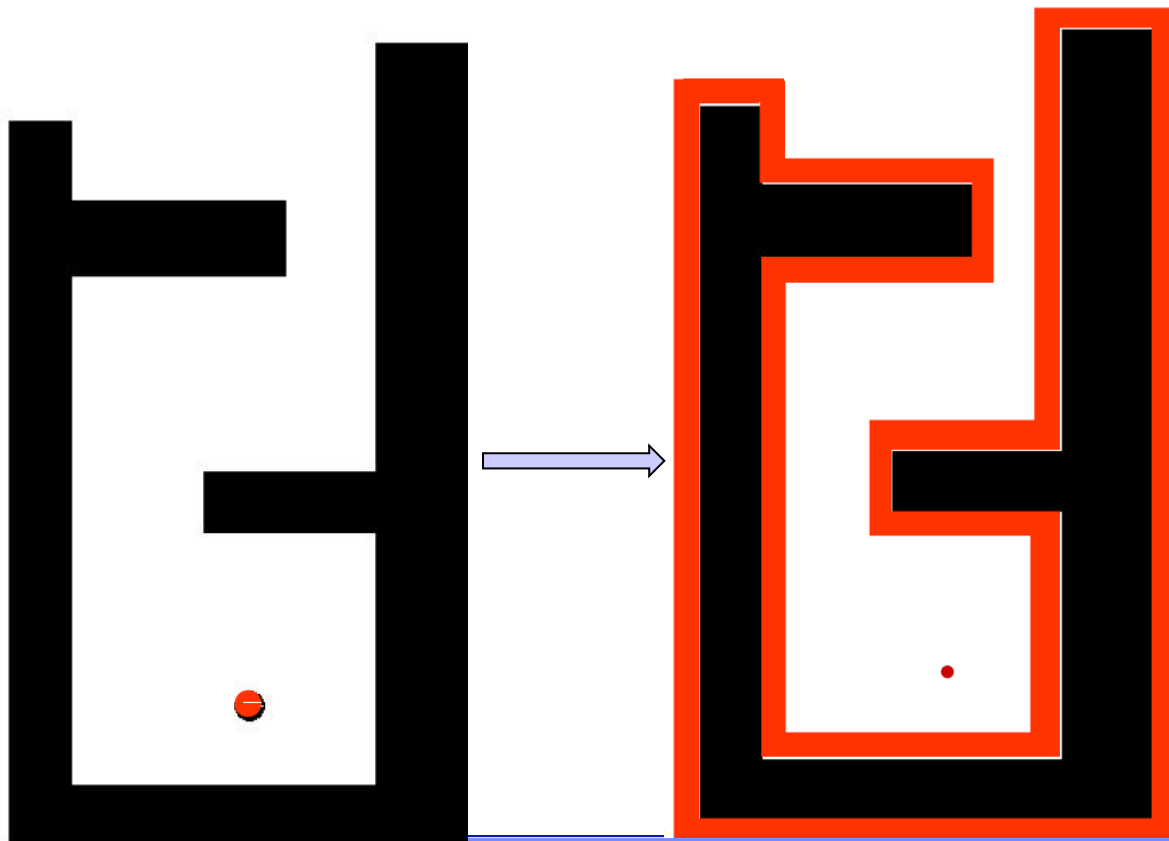
配置空间



## § 6.2 物理空间与配置空间

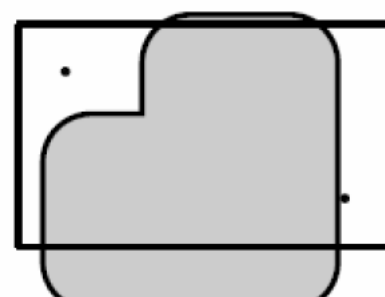
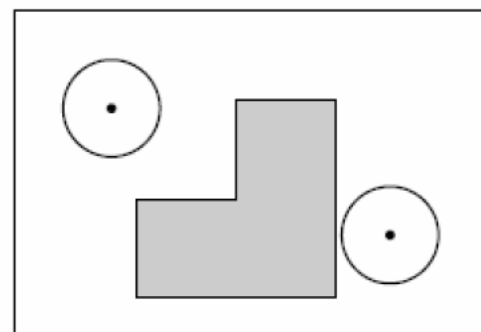
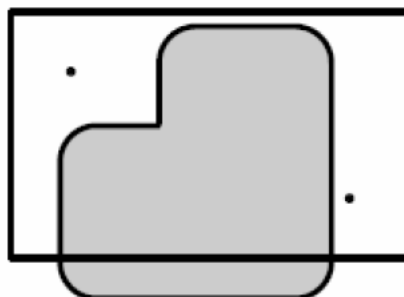
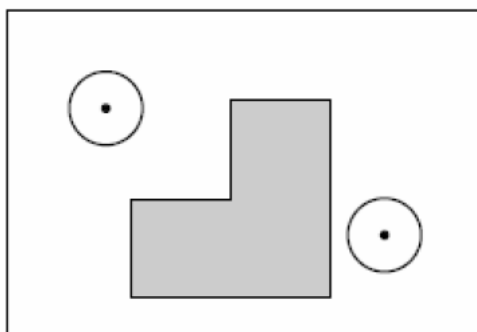
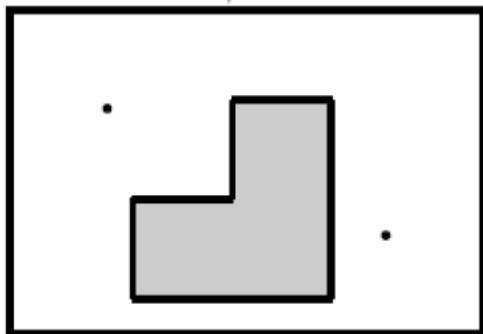
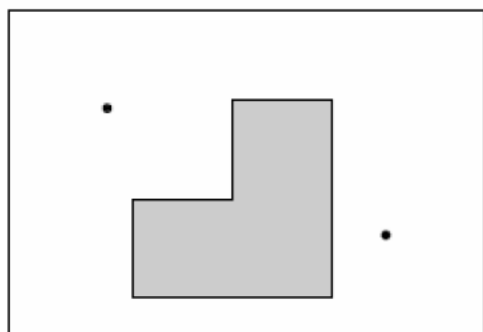
### ◇ 移动机器人配置空间：似二维物理空间

- ◇ 机器人简化为点
- ◇ 障碍物膨胀补偿





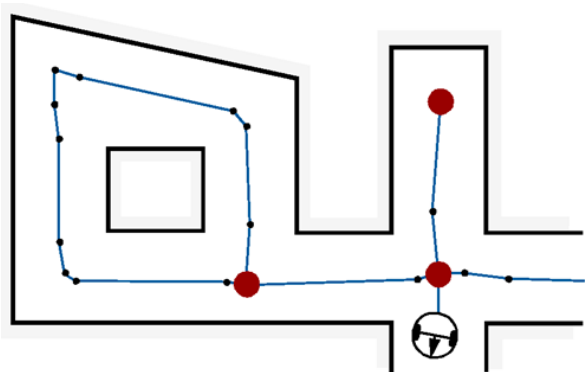
## § 6.2 物理空间与配置空间



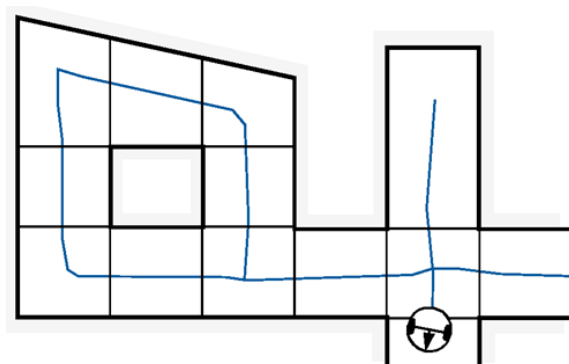


## § 6.2 移动机器人配置空间及离散地图构建

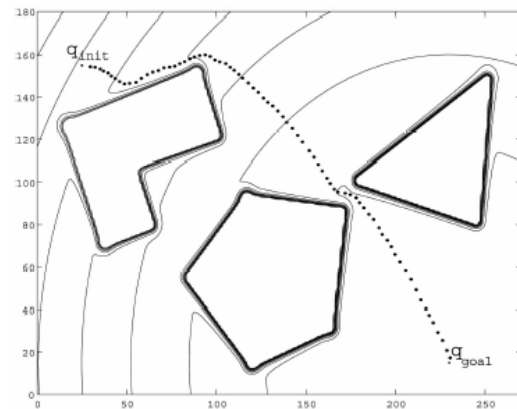
### ◇ 离散地图构建



(a) 道路图(Road Map)



(b) 单元格



(c) 势场

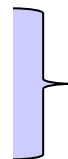


## § 6.2 路径规划算法

### ◇ 常用算法:

可视图(Visibility Graph)

Voronoi图



道路图

单元格分解(Cell Decomposition)  $\longrightarrow$  单元格

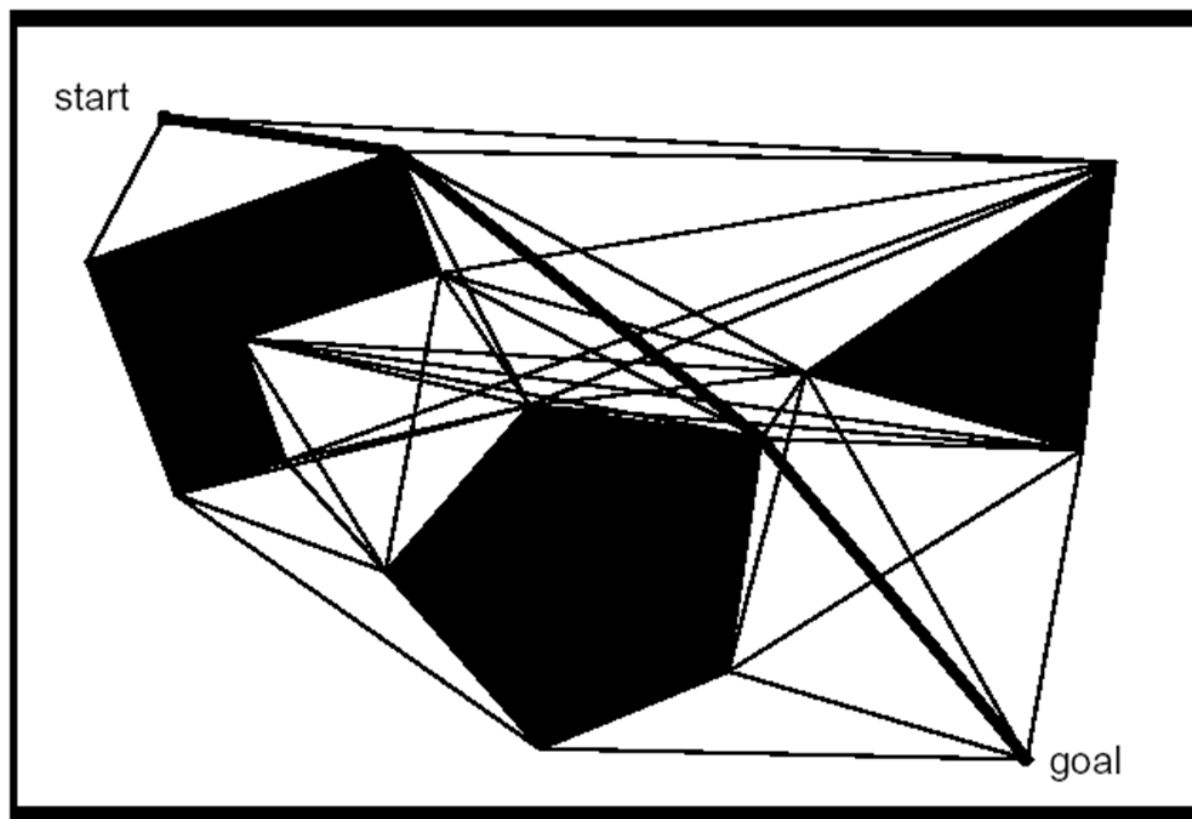
势场法(Potential Field)  $\longrightarrow$  人工势场





## § 6.2 路径规划算法——可视图法(Visibility Graph)

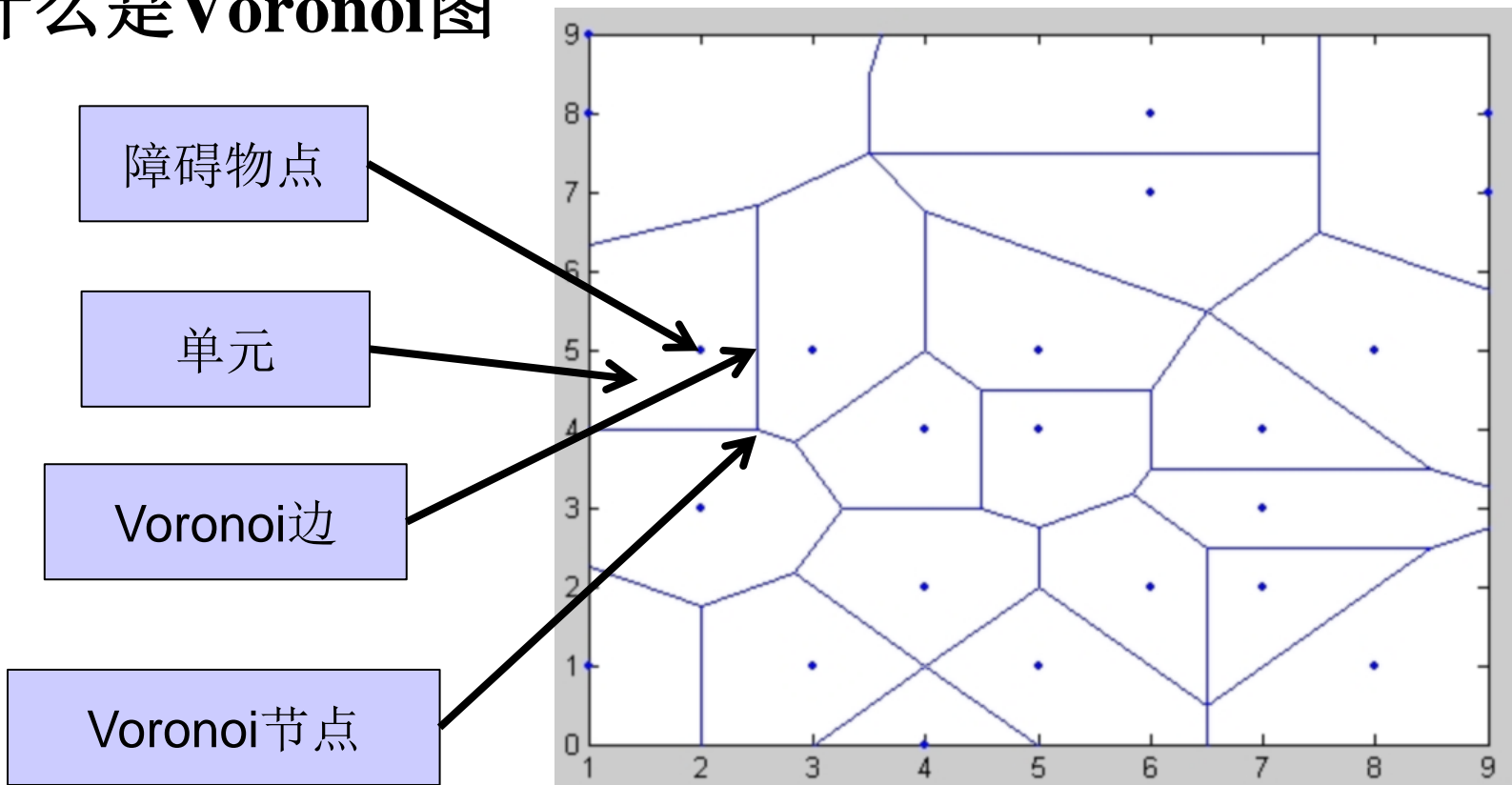
- ◇ 地图：道路图
- ◇ 节点
- ◇ 边
- ◇ 距离障碍物最近
- ◇ 最短路径





## § 6.2 路径规划算法——Voronoi图

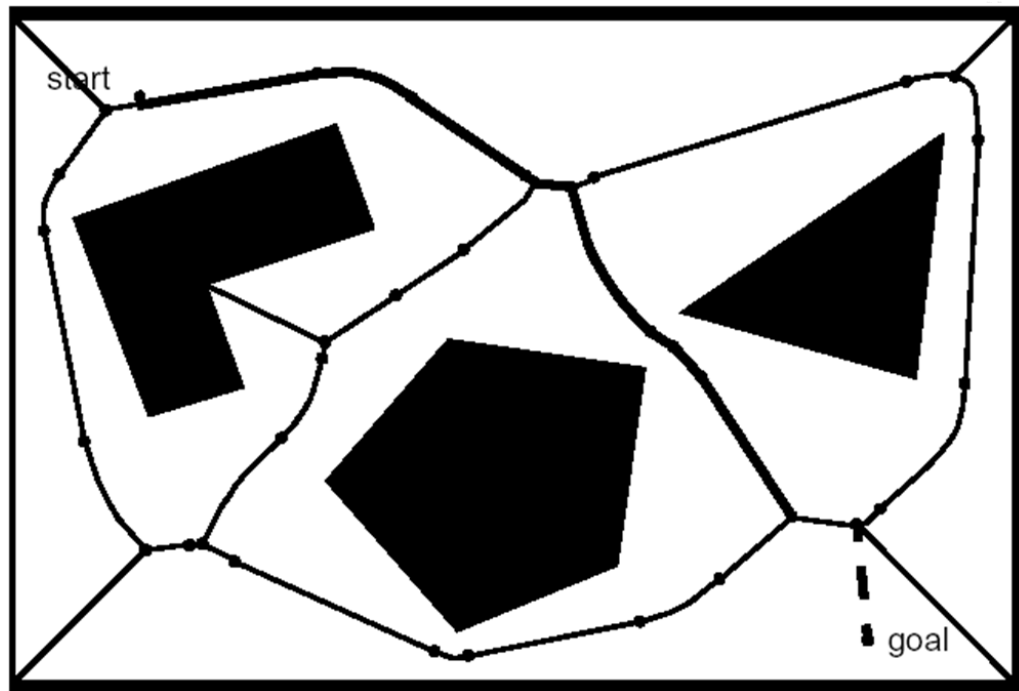
### ◇ 什么是Voronoi图





## § 6.2 路径规划算法——Voronoi图

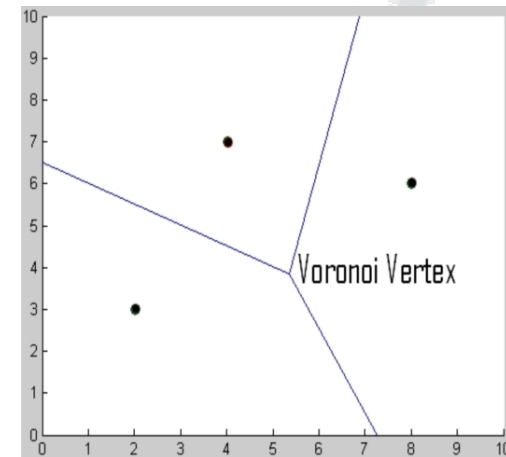
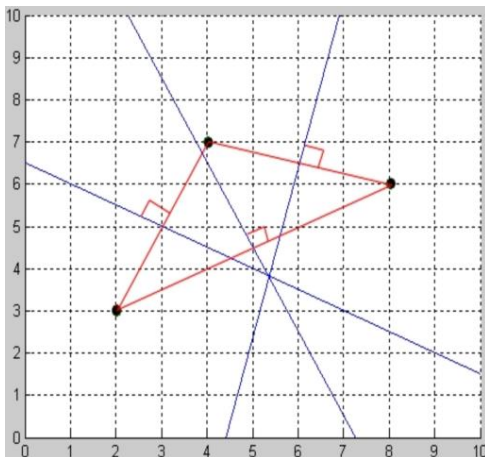
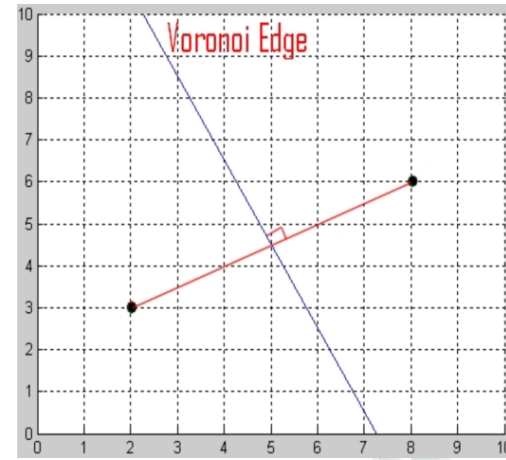
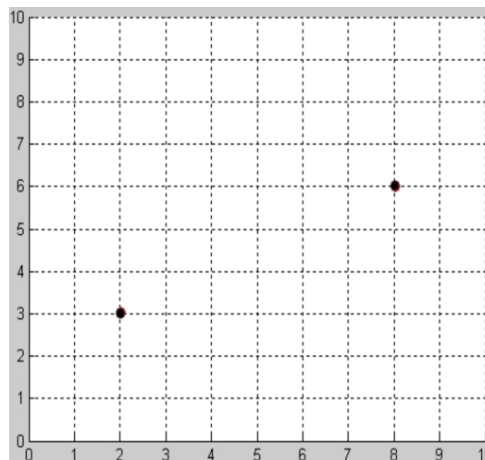
- ◇ 障碍物为中心生成Voronoi图
- ◇ 沿Voronoi图边产生路径
- ◇ 搜索选择最优路径
- ◇ 满足机器人与障碍物间距离最远





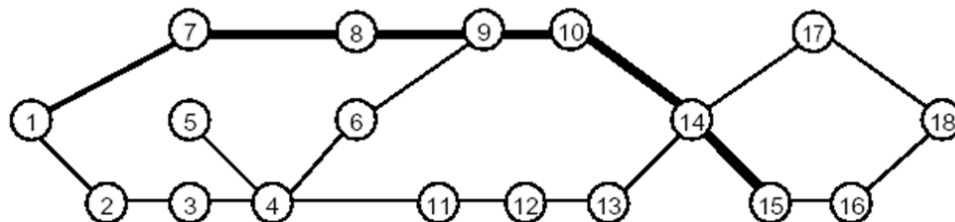
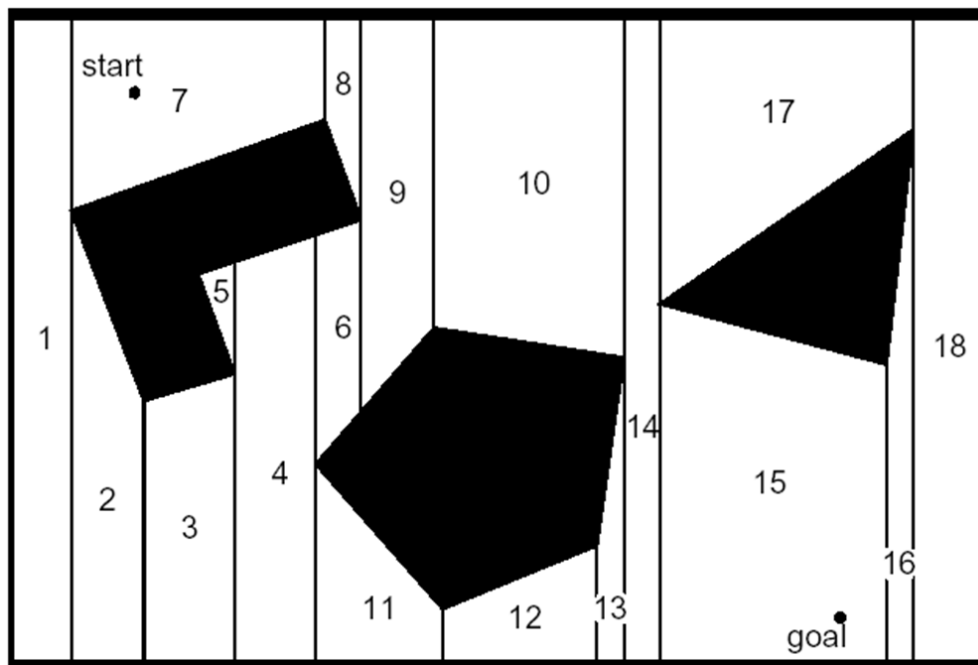
# § 6.2 路径规划算法——Voronio图

- ◇ 垂直等分法
- ◇ 分而治之  
(divide and conquer)
- ◇ Fortune法



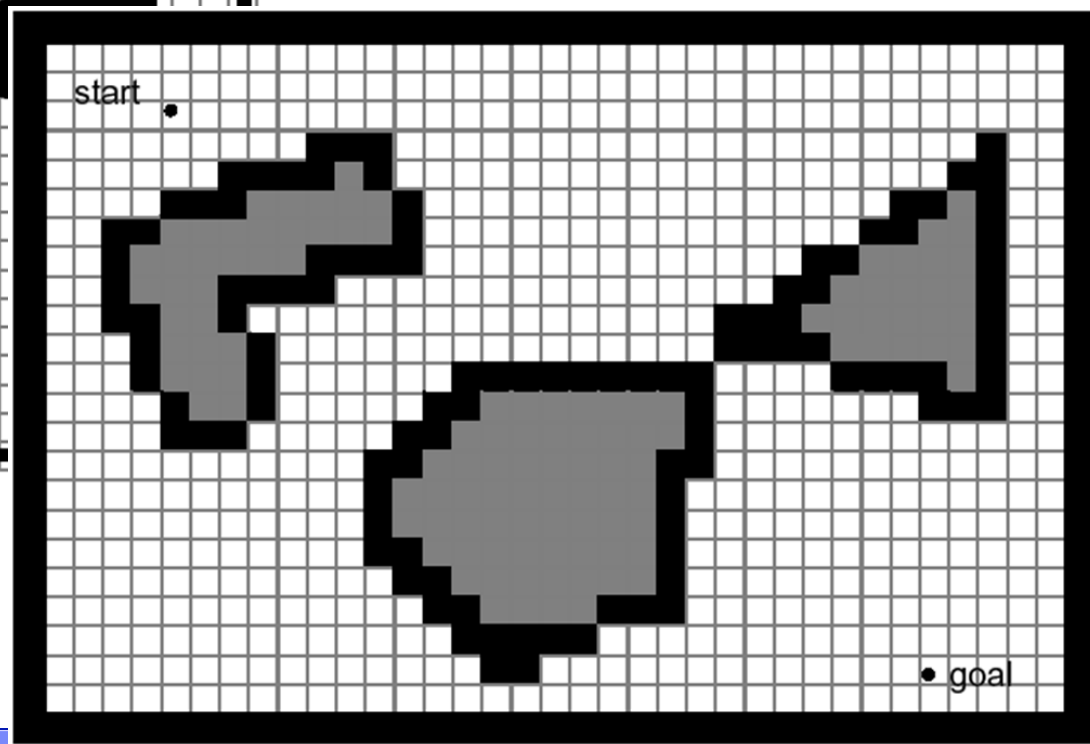
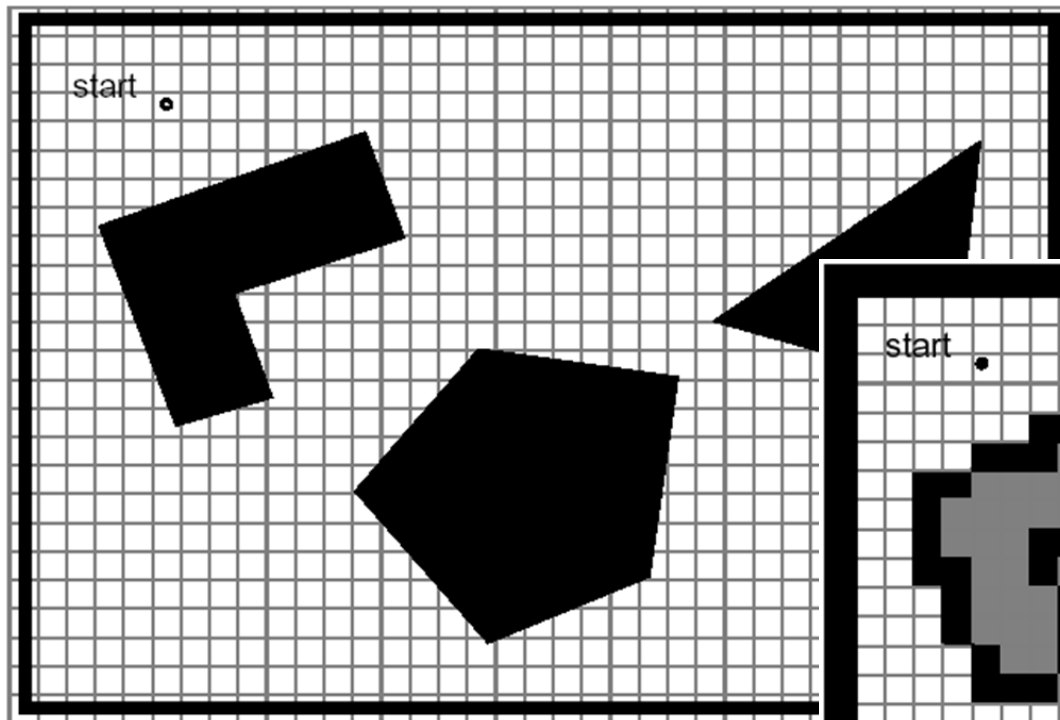


## § 6.2 路径规划算法——单元格分解



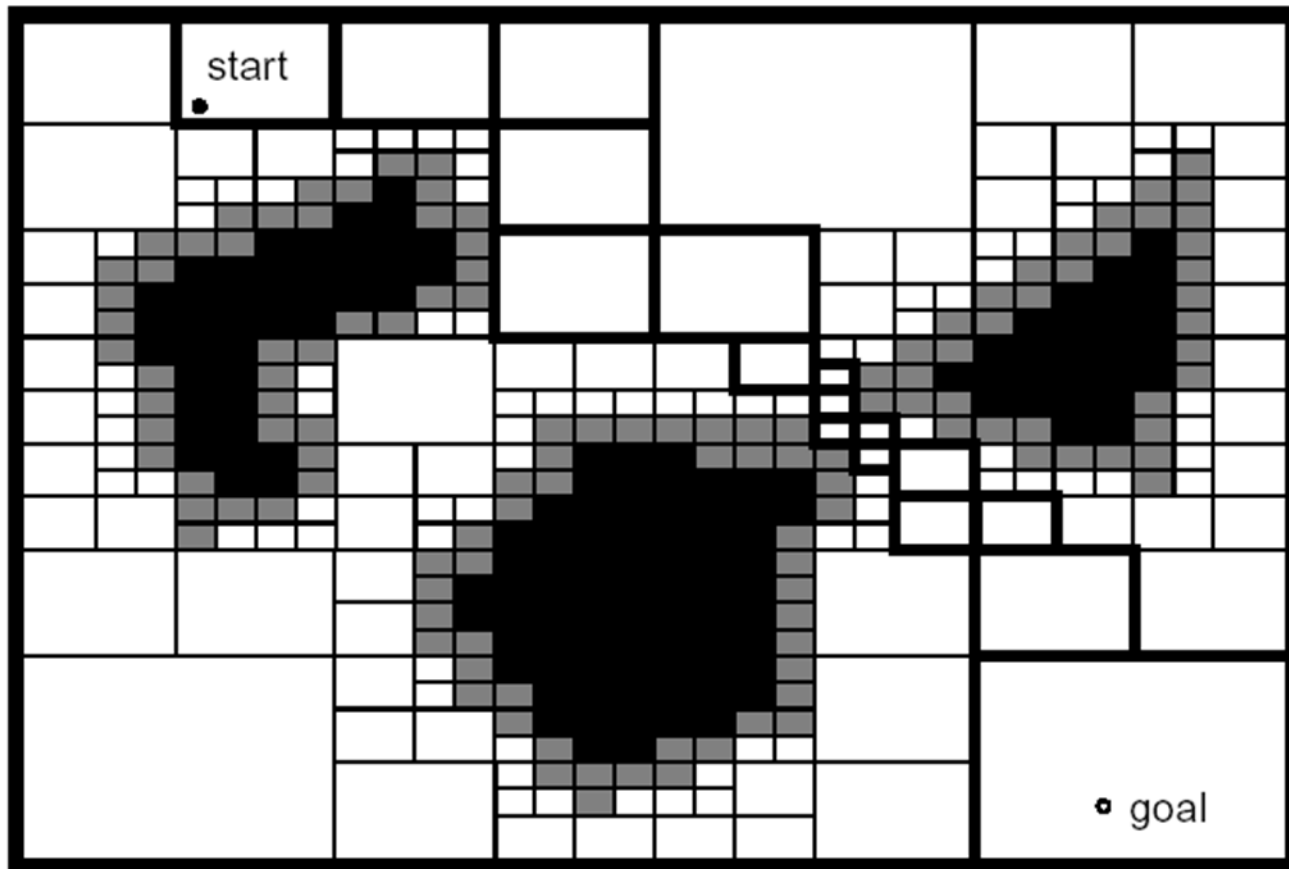


## § 6.2 路径规划算法——单元格分解



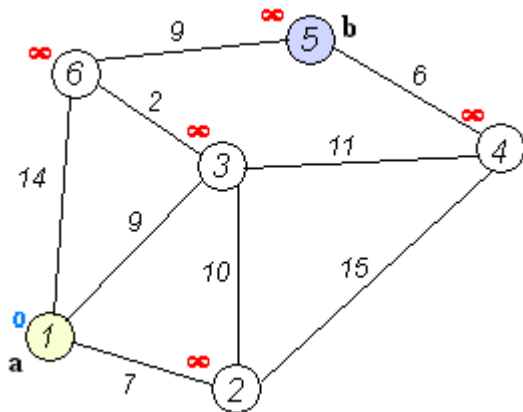


## § 6.2 路径规划算法——单元格分解





## § 6.2 Dijkstra's 算法 (Shortest path graph search)



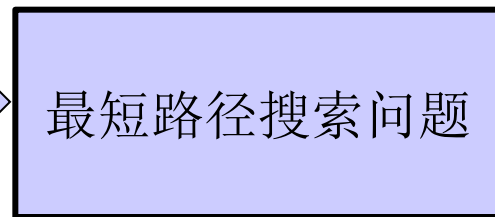
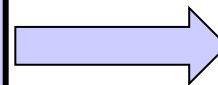


## § 6.2 小结一

可视图

Voronoi图

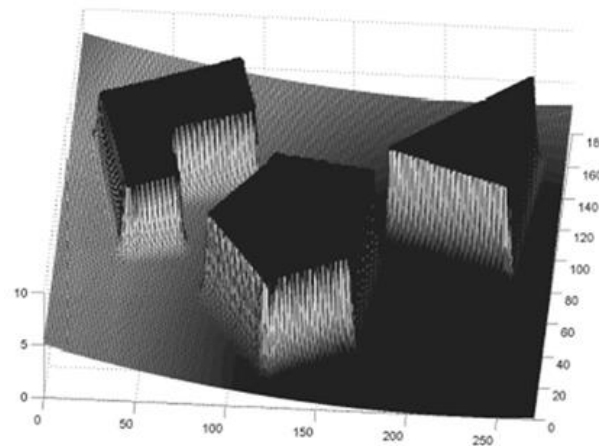
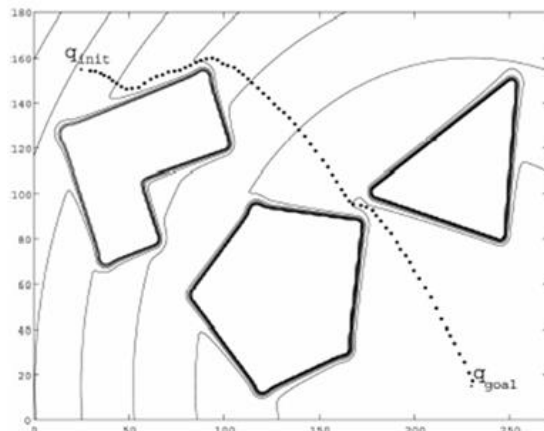
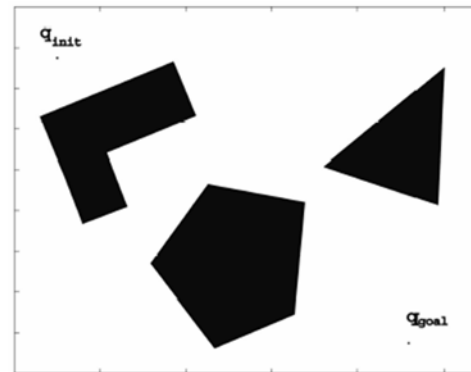
单元格分解





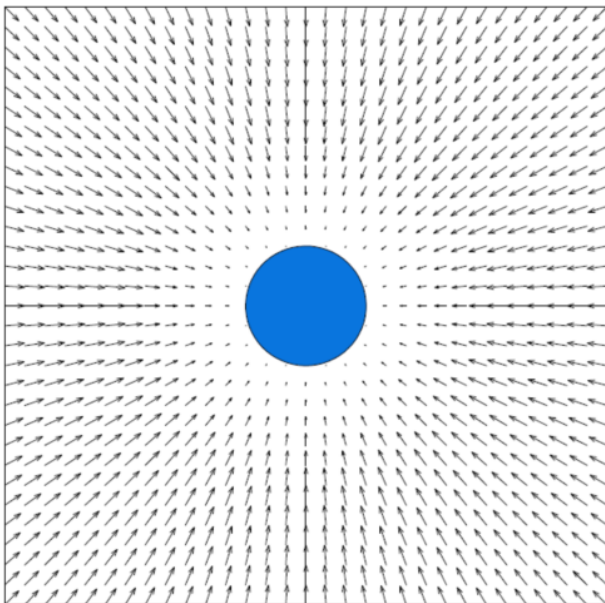
## § 6.2 路径规划算法——势场法

- ◇ 将机器人看作是处在人工势场影响中的点
- ◇ 机器人运动类似于球向山下滚动
- ◇ 目标产生吸引场
- ◇ 障碍物产生排斥场

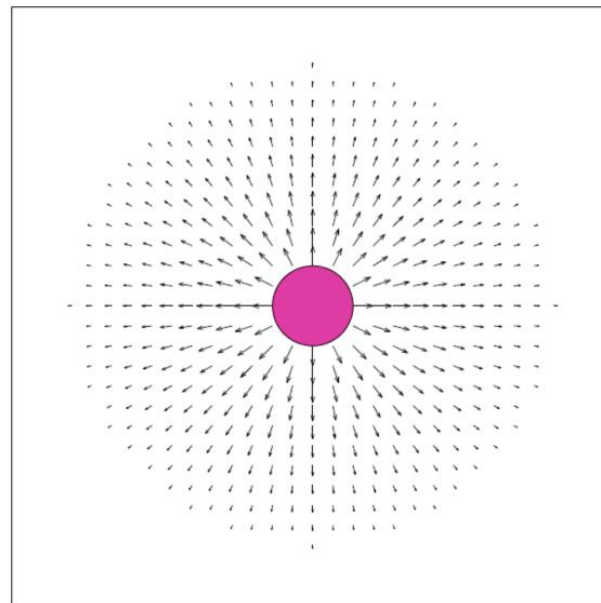




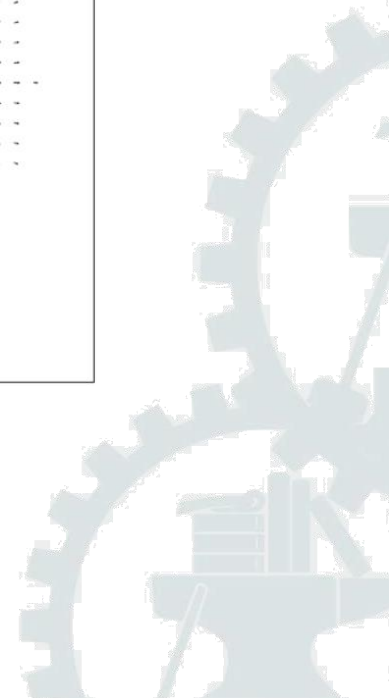
## § 6.2 路径规划算法——势场法



目标吸引场

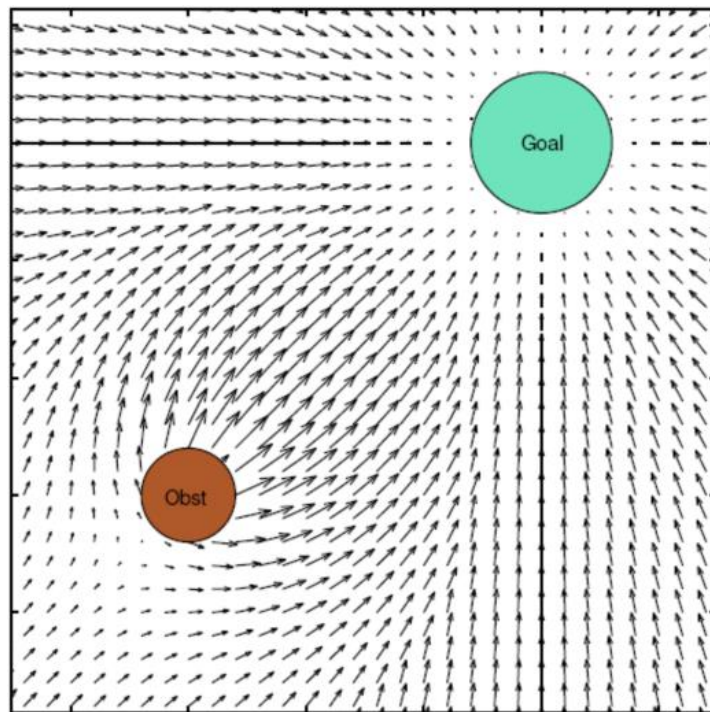


障碍物排斥场





## § 6.2 路径规划算法——势场法



合成势场





## § 6.2 路径规划算法——势场法

### ◇ 势场函数生成 $U(q)$ （能量函数）

- ◇ 目标产生吸引场，障碍物产生排斥场
- ◇ 势场函数为吸引场和排斥场的叠加
- ◇ 势场函数是可微的

### ◇ 势场力函数生成 $F(q)$

$$F(q) = -\nabla U(q) = -\nabla U_{att}(q) - \nabla U_{rep}(q) = \begin{bmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{bmatrix}$$

### ◇ 设置机器人速度 $(v_x, v_y)$ 与势场力 $F(q)$ 成正比

- ◇ 势场力驱动机器人向目标运行



## § 6.2 路径规划算法——势场法

◇ 吸引势场函数:  $\rho_{goal} = \|q - q_{goal}\|$

$$U_{att}(q) = \frac{1}{2}k_{att} \cdot \rho_{goal}^2(q)$$

◇ 吸引力函数:

$$\begin{aligned} F_{att}(q) &= -\nabla U_{att}(q) \\ &= -k_{att} \cdot \rho_{goal}(q) \nabla \rho_{goal}(q) \\ &= -k_{att} \cdot (q - q_{goal}) \end{aligned}$$





## § 6.2 路径规划算法——势场法

### ◇ 排斥场函数:

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$

◇ 在距离障碍物一定距离以外，排斥场为**0**

◇ 排斥场的值大于等于**0**，趋近障碍物时，趋近于无穷大

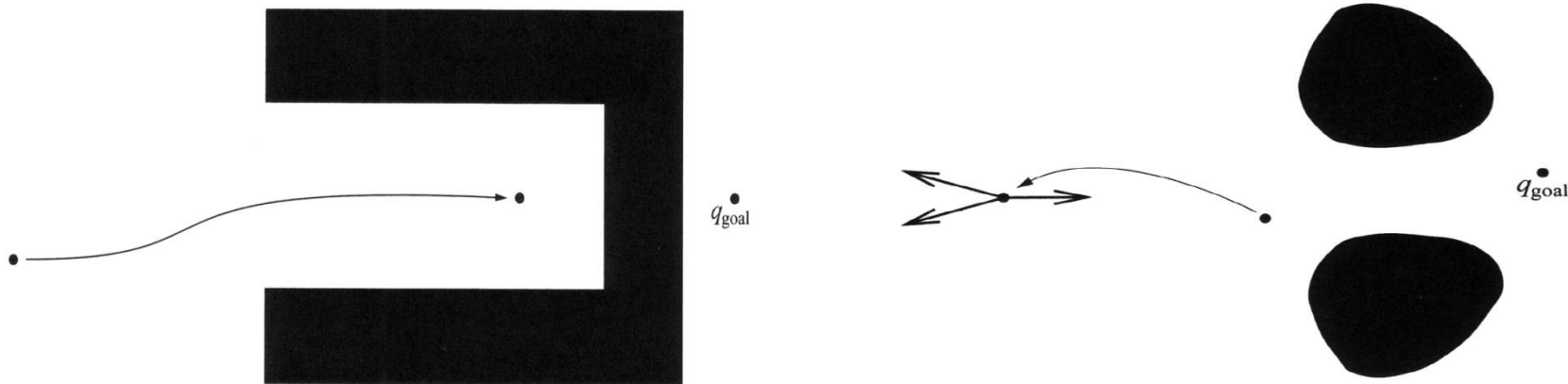
### ◇ 排斥力函数:

$$F_{rep}(q) = -\nabla U_{rep}(q) = \begin{cases} k_{rep} \left( \frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2(q)} \frac{q - q_{obstacle}}{\rho(q)} & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases}$$



## § 6.2 路径规划算法——势场法

◇ 局部极小值问题:





## § 6.2 路径规划算法——势场法

---

### ◇ 如何处理局部极小值问题：

◇ 结合高层决策引导

◇ 允许机器人进入局部极小值位置，采用其它策略跳出局部极小值

随机运动

采取跟墙或者环绕等特殊运动形式

改变障碍物势场





## § 6.2 路径规划算法——扩展势场法

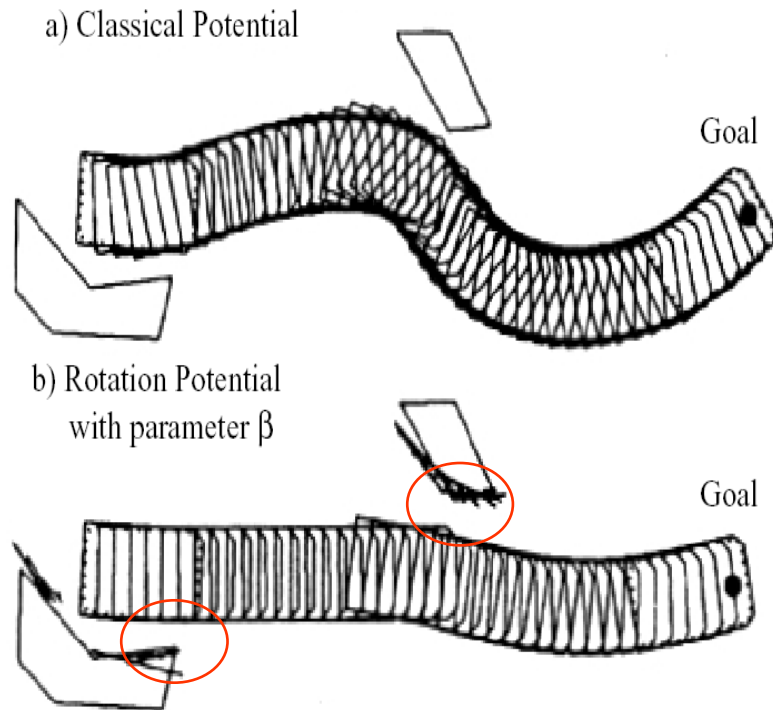
◇ 在基本势场上附加两个场：**转动势场**和**任务势场**

◇ 转动势场

◇ 力也是机器人相对于障碍物方向的函数

◇ 任务势场

◇ 滤除不可能对机器人运动有影响的障碍物。  
例如，仅考虑在机器人前方 将至 扇区内的障碍物





## § 6.2 小结二

---

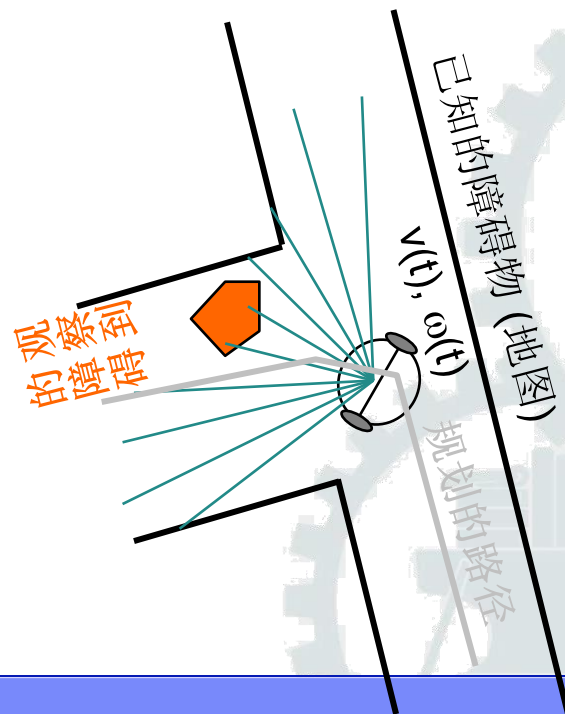
- ◇ 人工势场法
- ◇ 吸引场与排斥场
- ◇ 局部极小值问题
- ◇ 扩展势场法





## 避障 (局部路径规划)

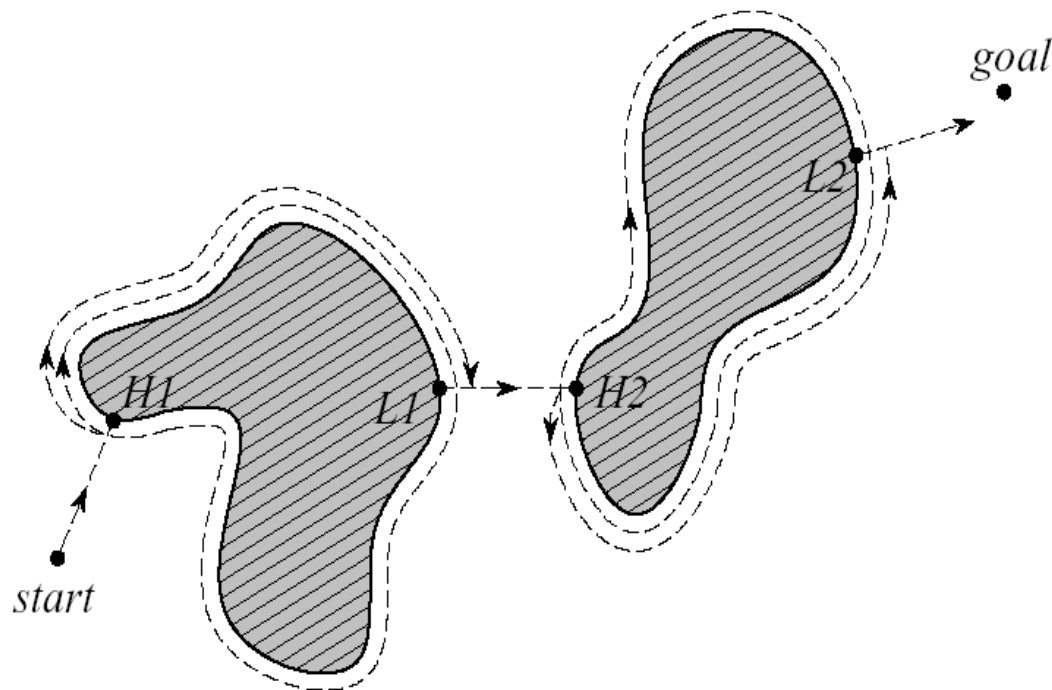
- ◇ 避障算法的目的，是防止机器人与障碍物碰撞
- ◇ 通常基于 *局部地图*
- ◇ 常常作为部分或完全 *独立任务* 实现
- ◇ 然而，有效的避障应该是关于下列项的优化结果：
  - ◇ 总体目标
  - ◇ 机器人当前速度和运动学
  - ◇ 机载传感器
  - ◇ 当前的和将来的碰撞风险





## 避障: Bug1

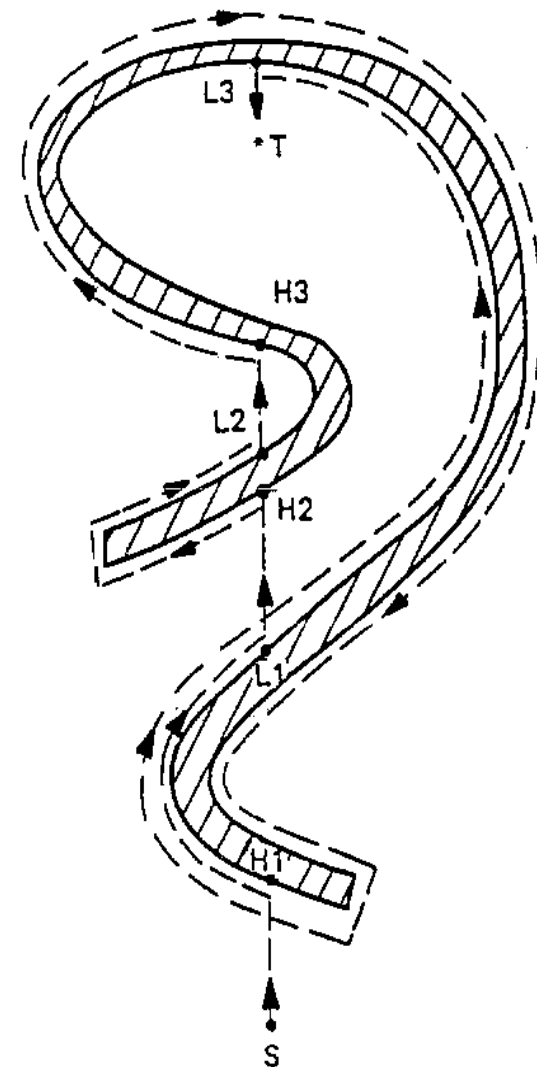
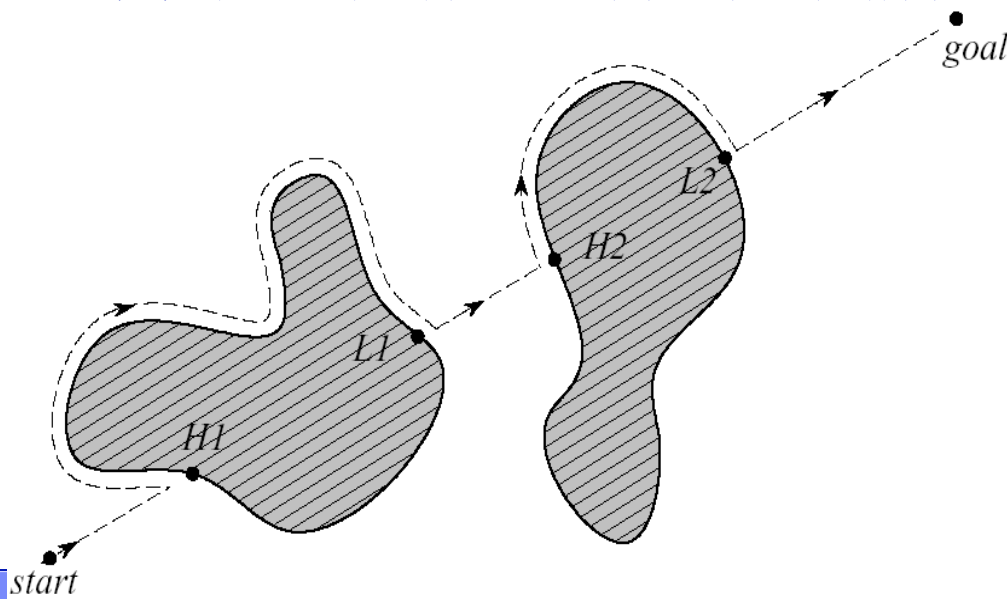
- ◇ 绕着障碍物走，避免碰上它
- ◇ 首先完全地围绕遇到的障碍物走，然后从距目标最短距离处离开
- ◇ 效率很低，但可保证到达任何可达之目标





# 避障: Bug2

- ◆ 总是沿一侧（左侧或右侧）围绕障碍物走
- ◆ 走到从起点到目标的连线处就离开障碍物
- ◆ 行走总路径短，但有时可构造无效情况



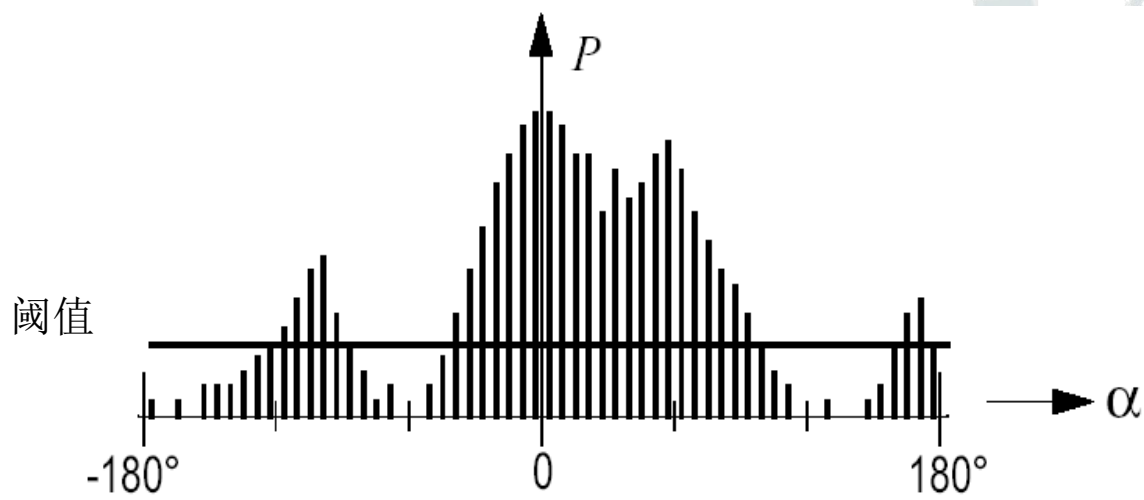
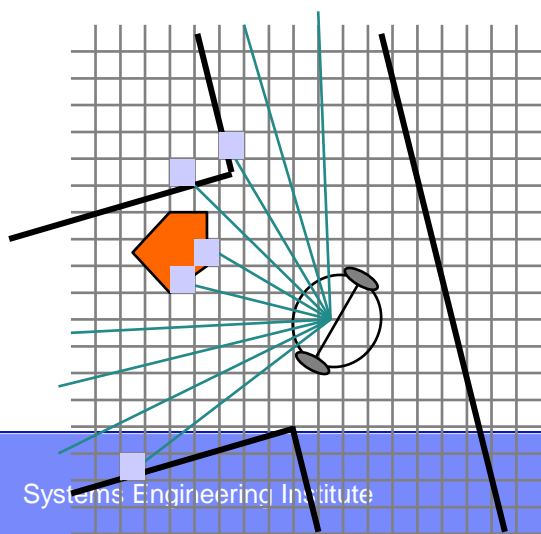


Borenstein et al.

## 避障：向量场直方图 (VFH)

- ◇ 环境以栅格表示 (2 维)
  - ◇ 单元值等于该处有障碍物的概率
- ◇ 约简为1 维直方图
  - ◇ 计算操纵方向
  - ◇ 找出所有可使机器人通过的开放道路
  - ◇ 选择具有最低费用函数  $G$  值的通路

$$G = a \cdot \text{目标方向} + b \cdot \text{轮子方向} + c \cdot \text{以前方向} + n$$



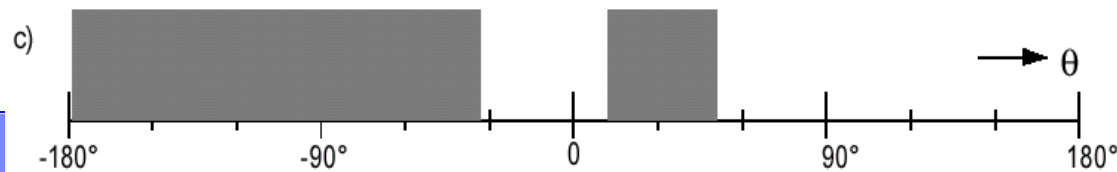
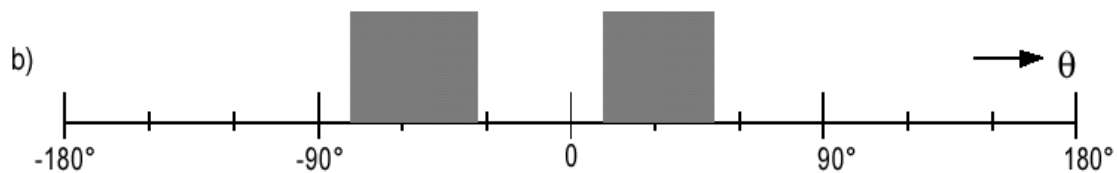
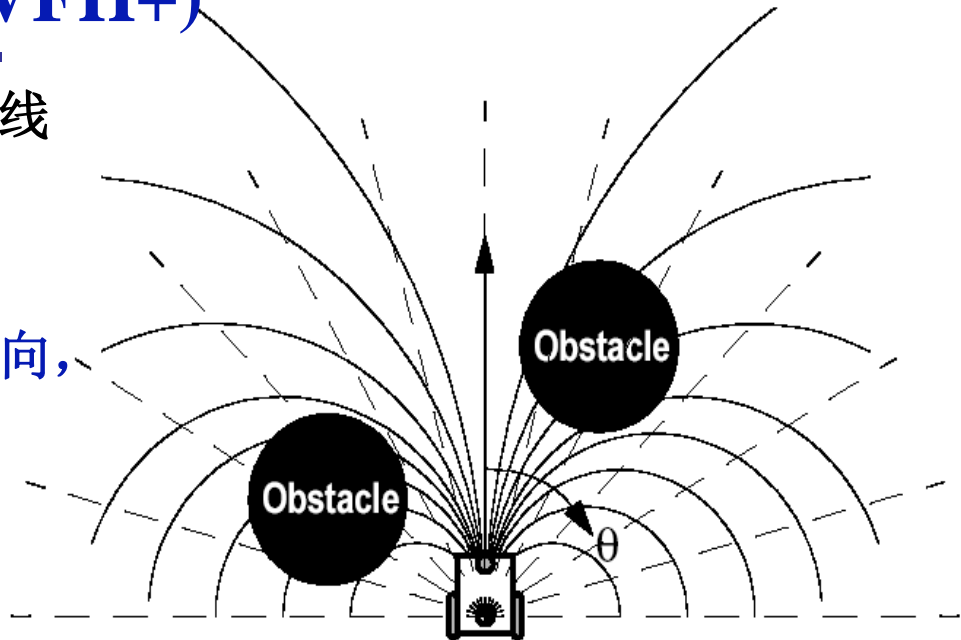


# 避障：向量场直方图 + (VFH+)

Borenstein et al.

◆ 以十分简单的方法解决运动轨线(动力学)问题

- ◆ 机器人在圆弧上移动
- ◆ 障碍物阻挡了一个给定方向，也阻挡了机器人通过该方向的所有轨线(弧线)

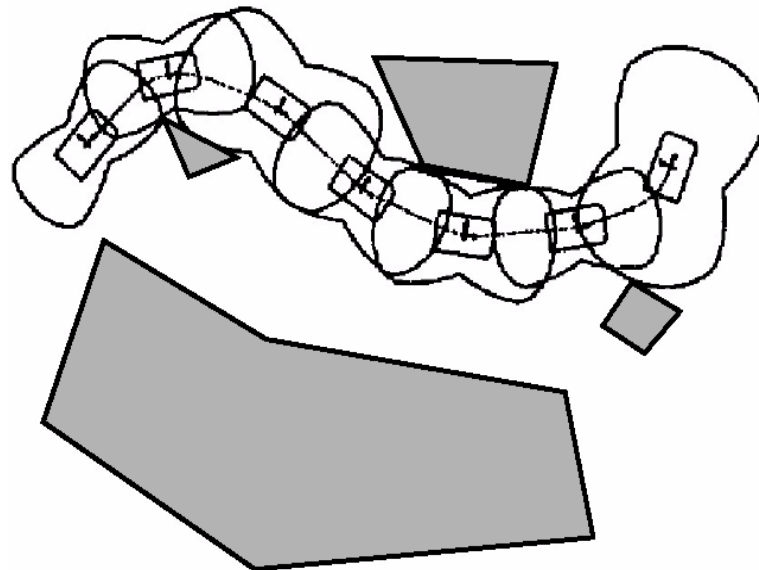
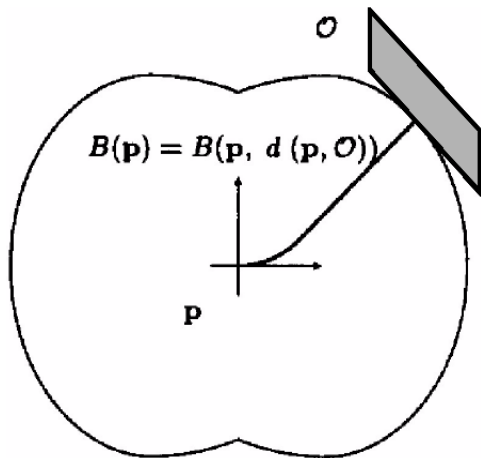




Khatib and Chatila

## 避障：气泡带概念

- ◆ 气泡 = 没有任何碰撞风险，能够到达的最大的自由空间
- ◆ 利用到物体的距离以及机器人的简化模型产生气泡
- ◆ 用气泡形成一条气泡带，它连接出发点 to 目标点

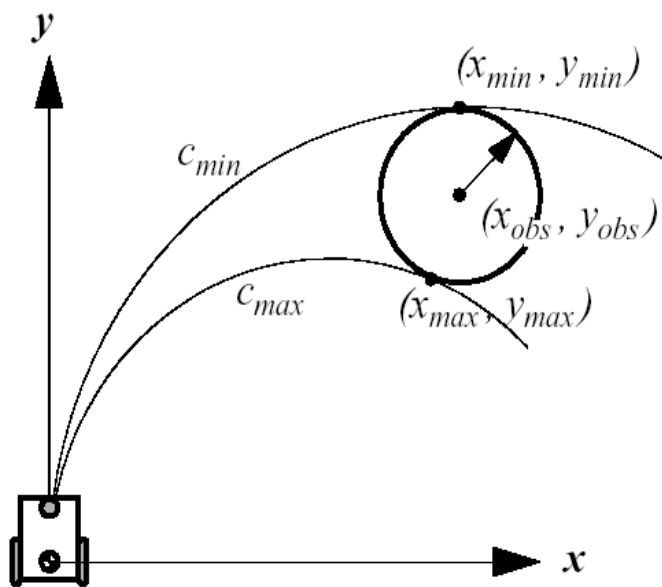
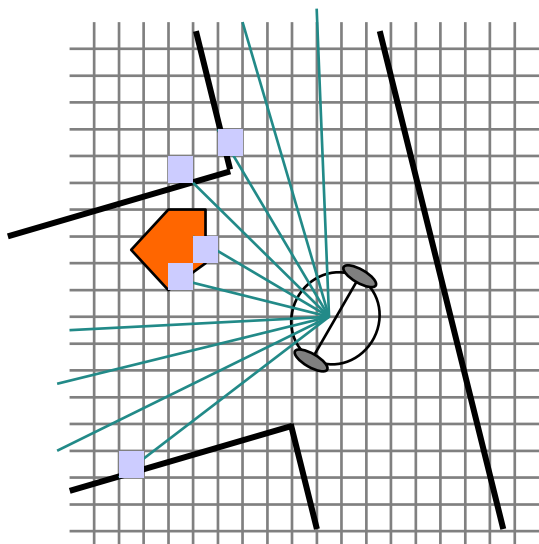




# 避障：基本的曲率速度方法 (CVM)

Simmons et al.

- ◇ 将机器人和环境的物理约束加到机器人的速度空间( $v, \omega$ )
  - ◇ 假设机器人只沿着曲率为 $c = \omega / v$ 的圆弧行走
  - ◇ 加速度约束：
  - ◇ 障碍物约束：障碍物变换到速度空间
  - ◇ 选择最优速度的目标函数





## 避障：道路曲率速度方法 (CVM)

### ◇ 基本CVM的改进

- ◇ 不单考虑圆弧
- ◇ 计算道路时，折衷考虑到最近障碍物的道路长度和宽度
- ◇ 使用一个目标函数，选择具有最好性质的道路

### ◇ 注：

- ◇ 在通过狭窄区域(如门)时有更好的性能
- ◇ 局部极小问题依然存在



## 总结

---

- ◇ 机器人导航的主要问题
- ◇ 路径规划与避障的定义
- ◇ 主要的路径规划算法
  - ◇ 基于可视图的路径规划算法
  - ◇ 基于Voronio图的路径规划算法
  - ◇ 基于单元格分解的路径规划算法
  - ◇ 基于势场法的路径规划算法
- ◇ 移动机器人避障





西安交通大学  
Xi'an Jiaotong University

Systems Engineering Institute,  
Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an ShaanXi,  
710049, P.R.China  
Phone: 86-29-82667771

# 结束

---

## 谢谢大家!

