

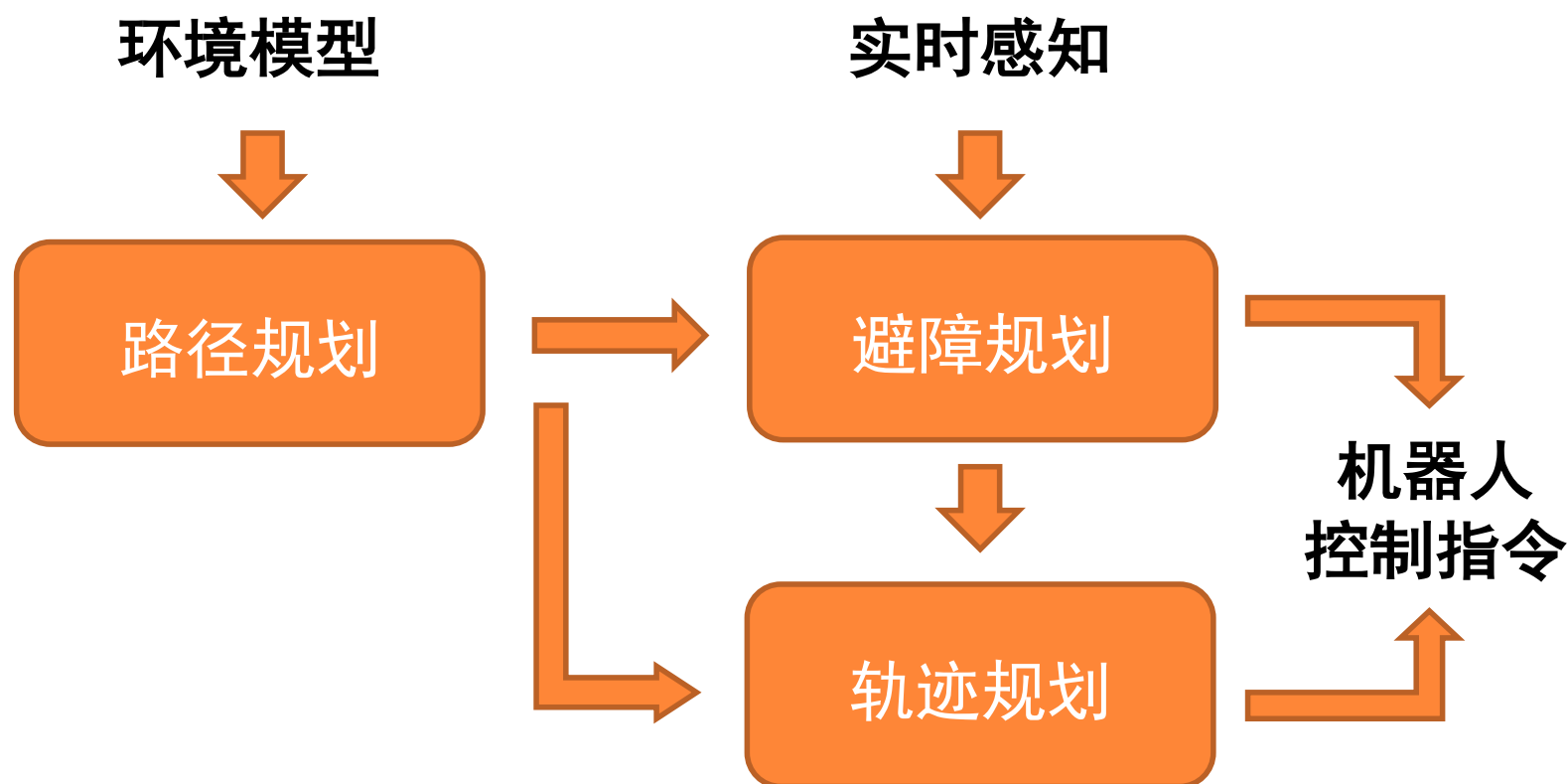


第七讲 导航规划优化

熊蓉

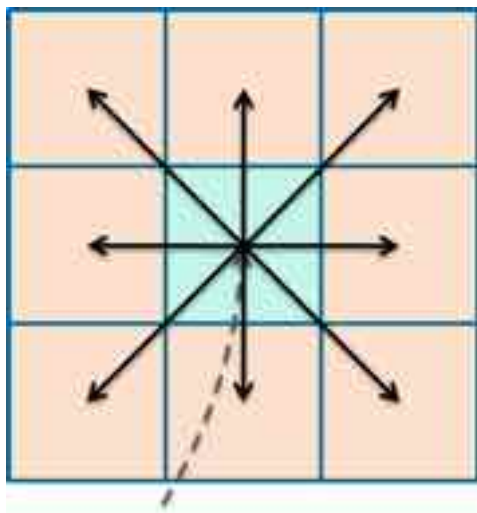
浙江大学控制科学与工程学院

回顾：路径规划、避障规划、轨迹规划三者关系



传统导航规划存在问题

1. 在路径规划中不考虑机器人的运动学约束，导致轨迹规划不能跟踪实现所有路径



(a) regular A*

例如，传统A*所规划路径并不考虑机器人当前方向，如果所规划路径要求在该点转向，当机器人存在非完整约束时会无法实现



传统导航规划存在问题

2. 如果实时避障偏离路径，避障规划和轨迹控制器没有如何到达目标的全局信息



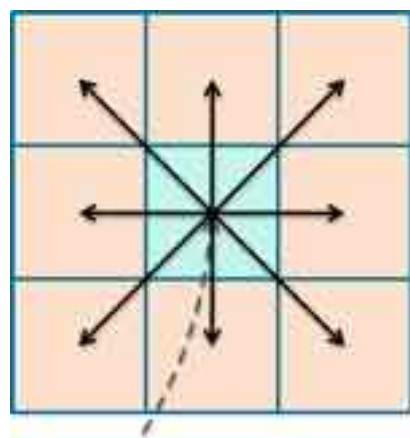
导航规划优化方法

- 混合A*：在路径规划中考虑机器人的运动学约束
- 橡皮筋算法：将全局规划和局部规划有效融合
- TEB：带有时间的橡皮筋算法，融合轨迹生成

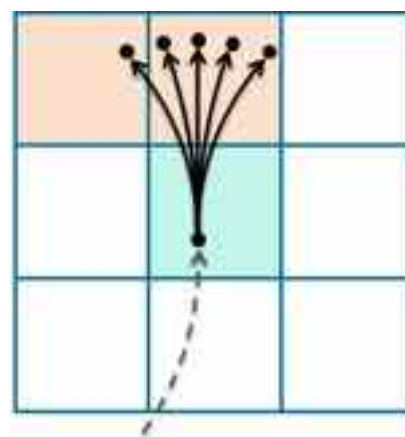


1. 混合A*

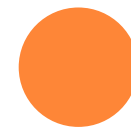
- 提出于2004年，当时是针对固定翼飞行器在三维空间中的运动学约束
- 2005年被Stanford大学应用于DARPA无人驾驶挑战赛



(a) regular A*



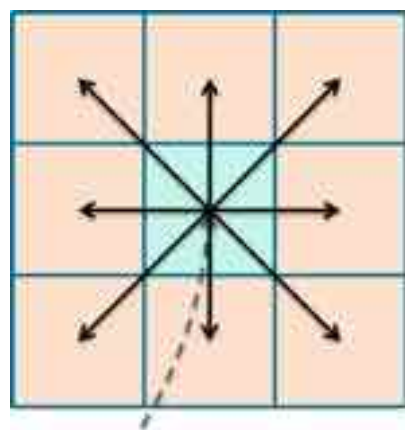
(b) Hybrid A*



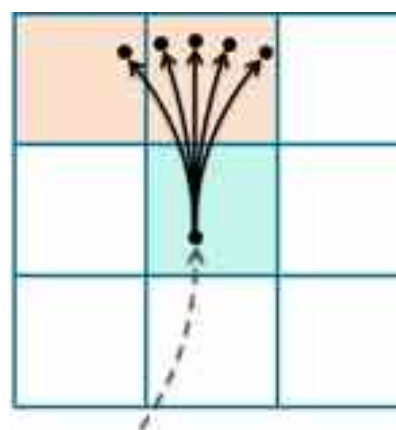
1. 混合A*

○ 与常规栅格地图A*算法的区别

- 对机器人在栅格中的位置使用连续坐标，包括位置和朝向，而不是传统的栅格中心点
- 从一个节点向下搜索时采用运动基元进行搜索，并且在同一栅格中可保存多个搜索点



(a) regular A*



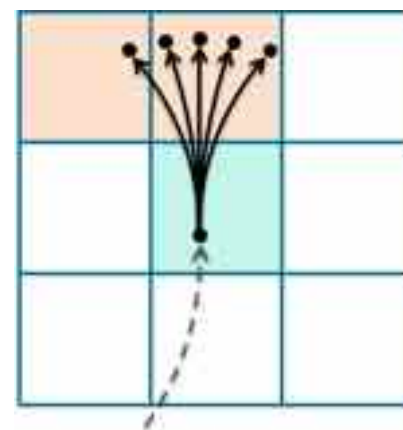
(b) Hybrid A*



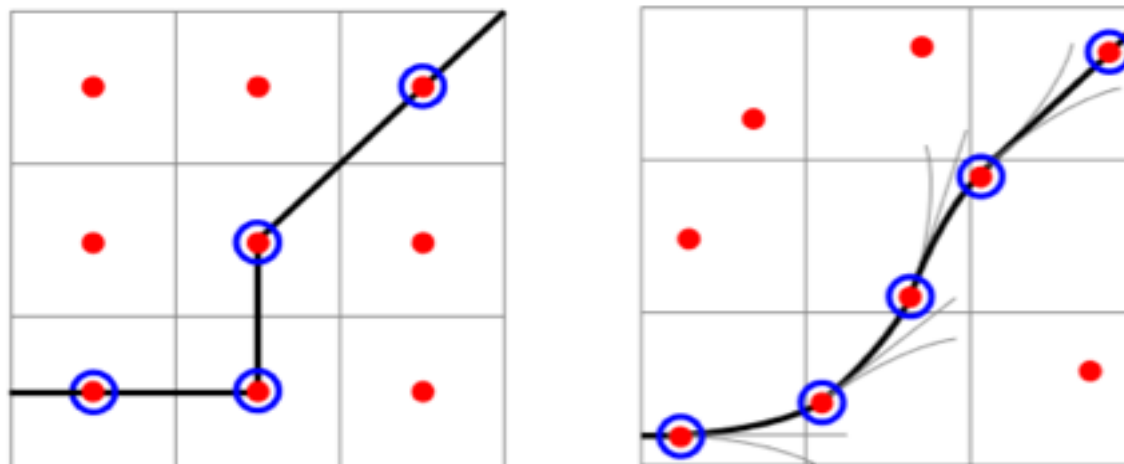
运动基元

- 指机器人一个时间片内能够实现的平移和旋转运动，受机器人的最大加速度和最大速度的约束，同时要求满足以下条件

- 路径距离要足够离开当前网格
- 路径曲率受最大转向角约束
- 朝向变化是离散转角步长的倍数



1. 混合A*



传统A*得到的是直线段组成的路径

混合A*得到的路径等同于轨迹，确保了机器人运动的平滑性和可实现性



2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

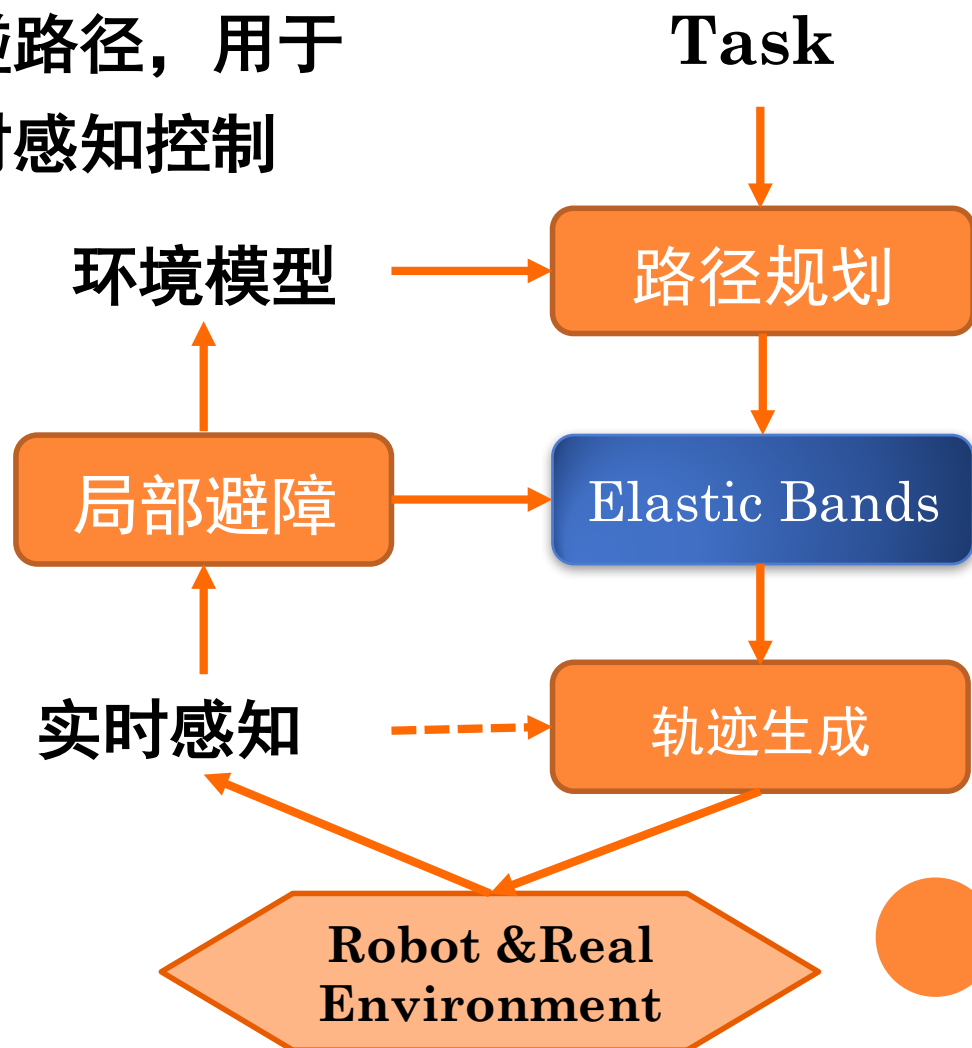
- 基本思想：可变形的无碰路径，用于融合全局路径规划和实时感知控制



Oussama Khatib

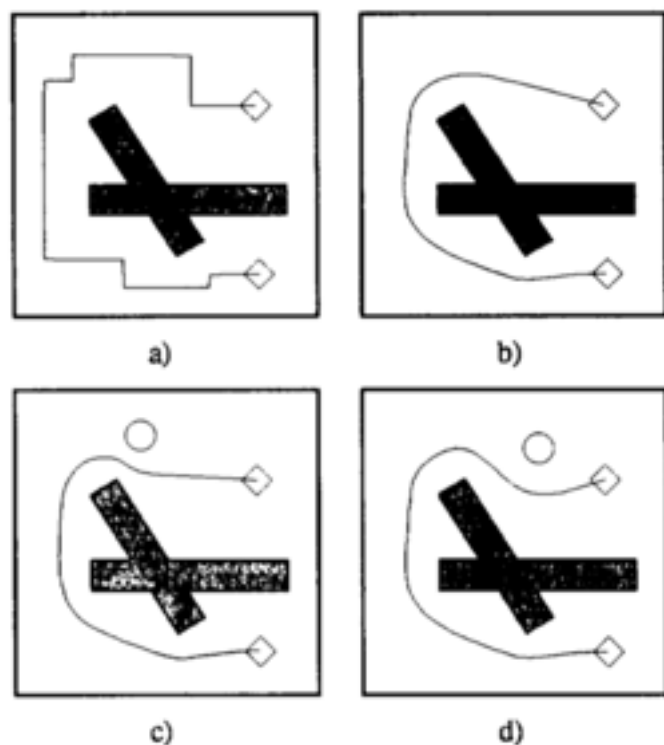
斯坦福大学机器人学家

Elastic bands: connecting path planning and control. ICRA1993



2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

- 借鉴了橡皮筋这一弹性体里力的概念，对路径上的点施加两个力



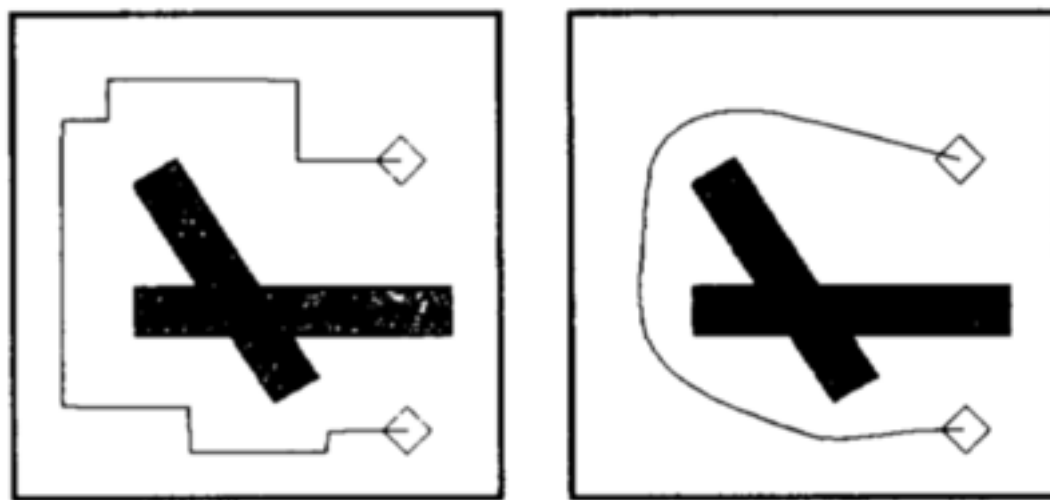
- 内部收缩力：用于模拟拉伸弹性带中的张力并消除路径中的松弛
- 外部排斥力：用于模拟障碍物排斥，抵消张力并拉开机器人与障碍物之间的距离

两种力使弹性带变形直至达到平衡
动态障碍物会改变力重新达成平衡

2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

○ 实现难点:

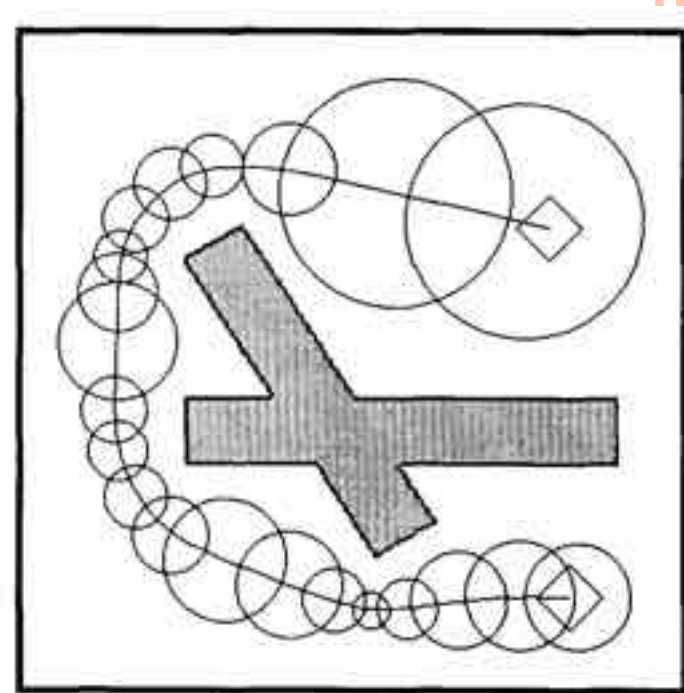
1. 弹性带是用一系列点表示，必须根据这些点生成一条连续的曲线
2. 必须实现在姿态空间中对曲线的快速有效的无碰检测



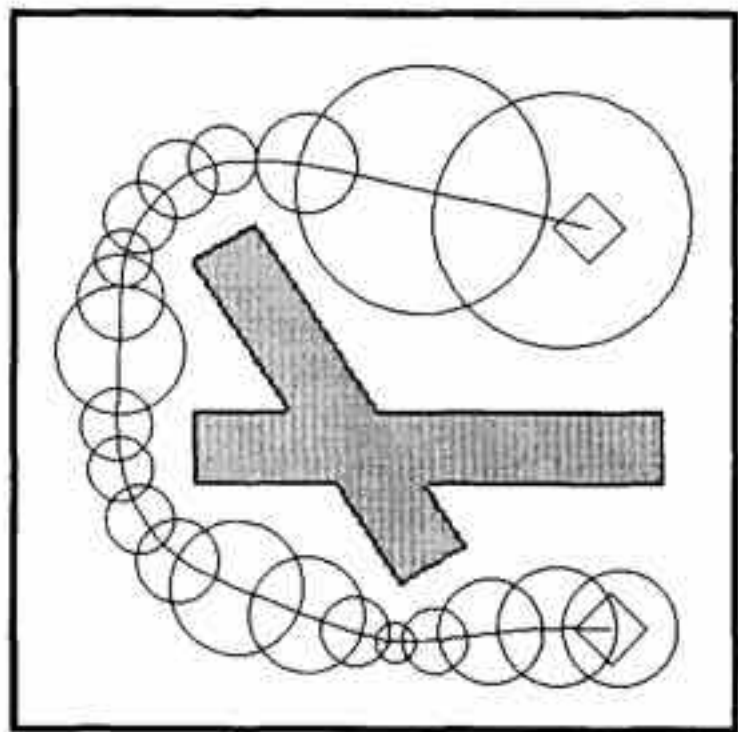
2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

○ 实现关键：气泡(Bubble)概念

- 用路径点加路径点张成的无碰气泡表示可行空间
- 不计算和表达整个的可行空间，用环境和机器人模型来生成可行空间子集
- 每个子集被称为一个bubble，通过在给定姿态空间中检查机器人的局部自由性计算得到



2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)



在姿态空间b点处的bubble为

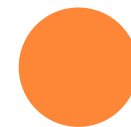
$$B(\mathbf{b}) = \{\mathbf{q} : \|\mathbf{b} - \mathbf{q}\|_2 < \rho(\mathbf{b})\}$$

$\rho(\mathbf{b})$ 机器人在b处与环境中障碍物之间最小距离

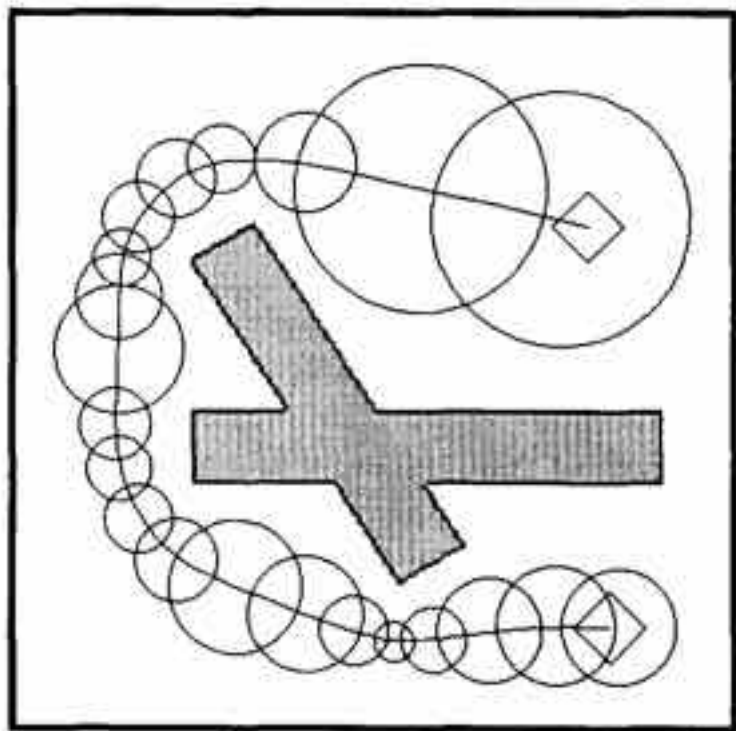
如果考虑机器人旋转

$$B(\mathbf{b}) = \{\mathbf{q} : D(\mathbf{b} - \mathbf{q}) < \rho(\mathbf{b})\}$$

$$D(\Delta\mathbf{b}) = \sqrt{\Delta\mathbf{b}_x^2 + \Delta\mathbf{b}_y^2} + r_{\max} |\Delta\mathbf{b}_\theta|$$



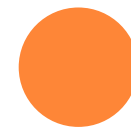
2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)



整个路径就是一系列气泡的组合，
气泡中心点就是路径上的点

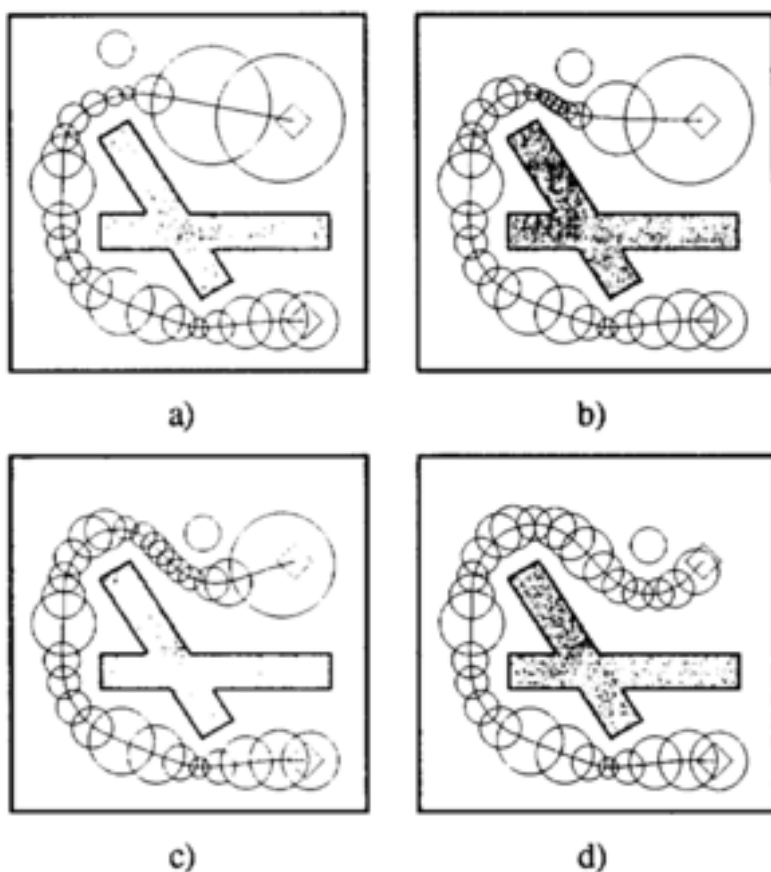
为了确保在通过点之间生成无碰
路径，要求在连续通过点上的气
泡重叠

也可用复杂模型表示气泡，需要
在计算效率和表示个数上进行折
中考虑



2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

○ 动态适应调整



如果有障碍物，可以利用橡皮筋原理进行动态调整

主要思想：相邻气泡点有收缩力，或者叫做吸引力，障碍物有排斥力，沿着气泡尺寸变化最大的方向



动态适应调整

收缩力/吸引力

$$\mathbf{f}_c = k_c \left(\frac{\mathbf{b}_{i-1} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{b}_{i-1} - \mathbf{b}_i\|_2} + \frac{\mathbf{b}_{i+1} - \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{b}_{i+1} - \mathbf{b}_i\|_2} \right)$$

排斥力，沿着气泡
尺寸变化最大方向

$$\mathbf{f}_r = \begin{cases} k_r (\rho_0 - \rho) \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{b}} & \rho < \rho_0 \\ 0 & \rho \geq \rho_0 \end{cases}$$

根据合力调整位置

$$\mathbf{b}_{new} = \mathbf{b}_{old} + \alpha \mathbf{f}_{total}$$

如果气泡分布过密或者不能相互覆盖，需要考虑气泡的增加或者删除



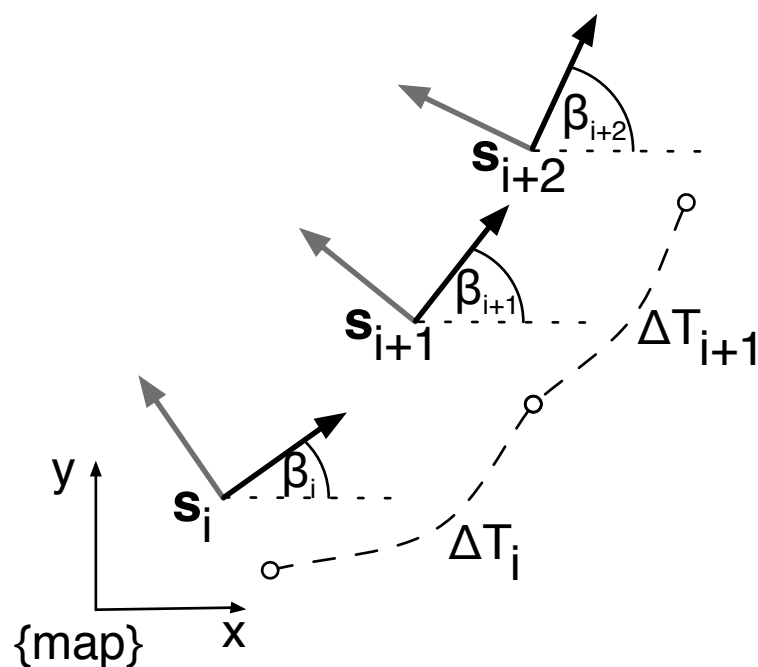
2.橡皮筋法 (ELASTIC BAND)

- 存在问题：本质上还是几何空间内的路径规划，是对路径规划和避障规划的融合，并没有考虑机器人的执行问题



3. TEB (TIMED ELASTIC BAND)

- 带有时间信息的橡皮筋
- 几何避障→可避障的轨迹生成



在EB的bubble序列的基础上增加相邻点之间的间隔时间序列

$$B := (Q, \tau)$$

$$Q = \{s_i\}_{i=0 \dots n} \quad n \in \mathbb{N}$$

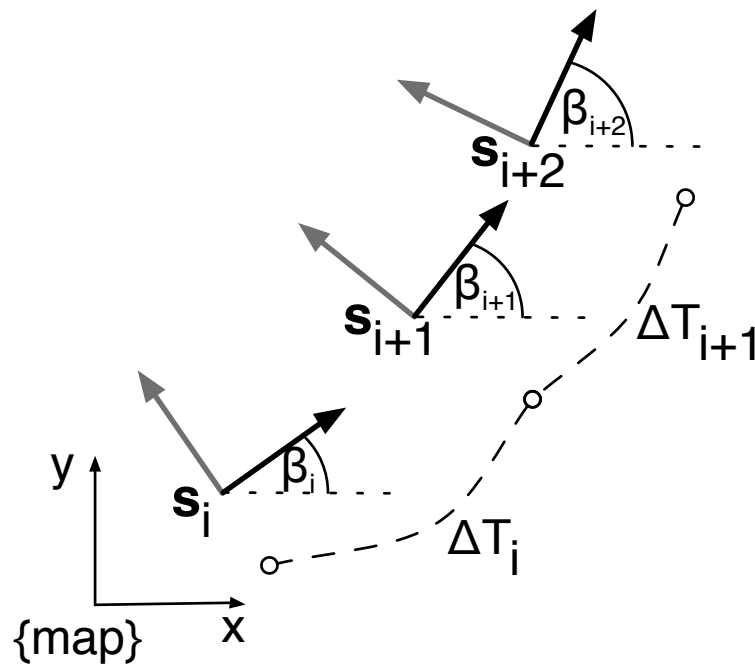
$$\tau = \{\Delta T_i\}_{i=0 \dots n-1}$$

进行多目标优化求解

$$f(B) = \sum_k \gamma_k f_k(B)$$

$$B^* = \arg \min_B f(B)$$

3. TEB (TIMED ELASTIC BAND)



$$f(B) = \sum_k \gamma_k f_k(B)$$

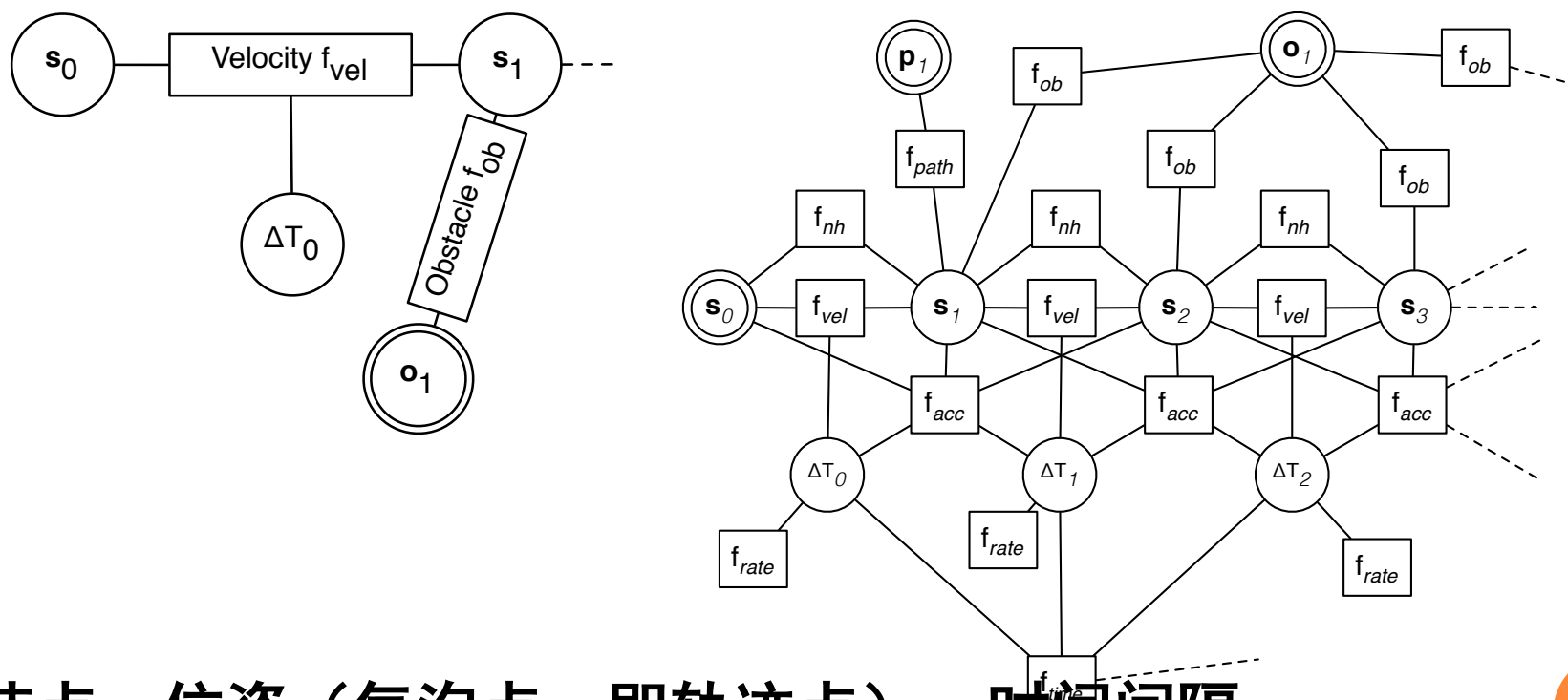
$$B^* = \arg \min_B f(B)$$

对于速度、加速度方面的约束用
罚函数表示

目标函数可以考虑最短路径、最
快执行时间、距离障碍最远等

3. TEB (TIMED ELASTIC BAND)

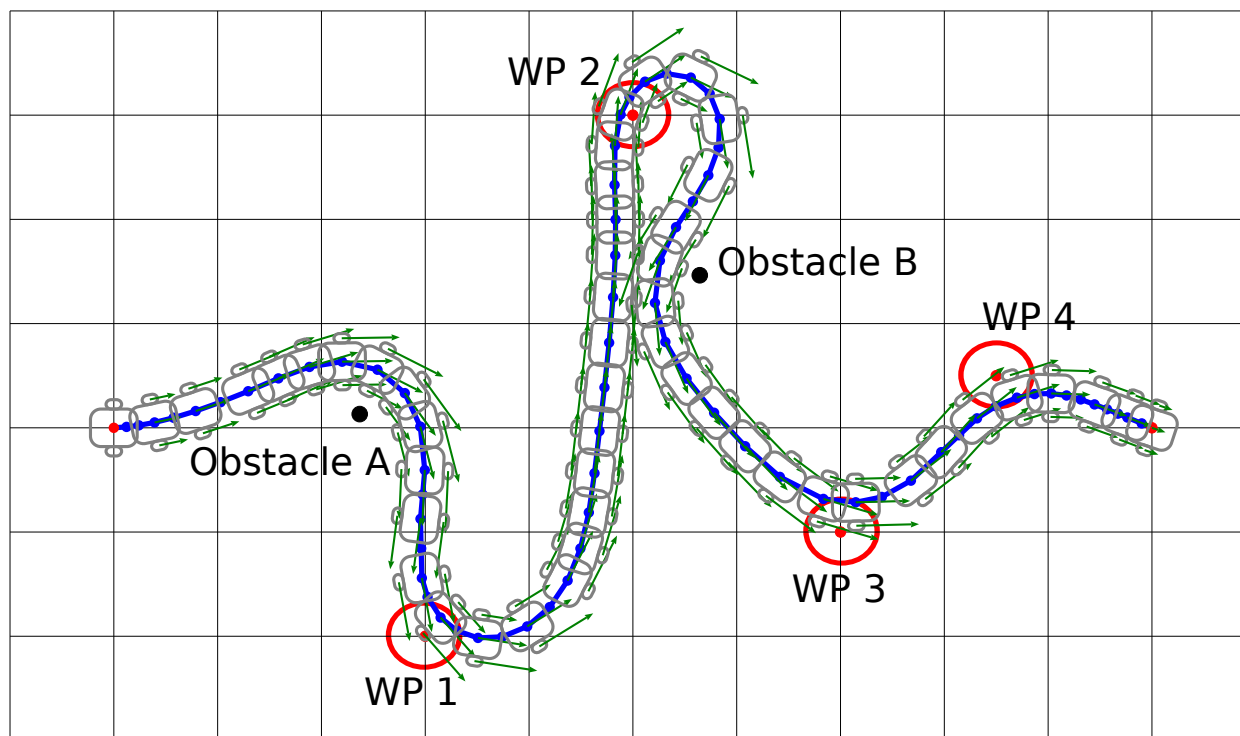
构建超图(hyper graph)模型, 采用g2o进行最优化求解



节点: 位姿 (气泡点, 即轨迹点)、时间间隔

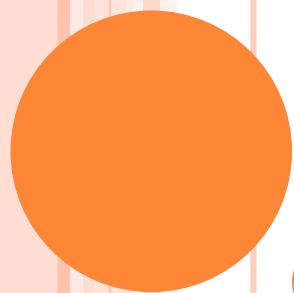
边: 目标函数, 将与目标函数相关的节点连接起来

3. TEB (TIMED ELASTIC BAND)



最优化求解存在问题：耗时与问题规模有关





END !