

群组动画

(Crowd and Group Animation)

金小刚

Email: jin@cad.zju.edu.cn

浙江大学CAD&CG国家重点实验室

蒙民伟楼512室

基于社会力模型的群体行为模拟



□ 参考文献

D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek: Simulating dynamical features of escape panic, *Nature* 407: 487 (2000) (Google citations: 4123次, 2018.12.16)

Stampedes (踩踏事件)

❑ Videos and descriptions of disasters

This is a partial list of human stampedes. The following are some well-known disasters:

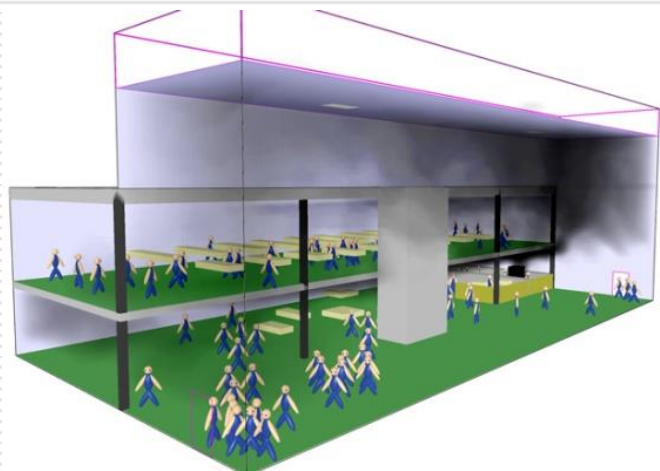
24.07.2010, Love Parade, Duisburg (Germany), [Wikipedia](#), [YouTube](#)

15.04.1989, Hillsborough, Sheffield (UK), [Wikipedia](#), [YouTube](#)

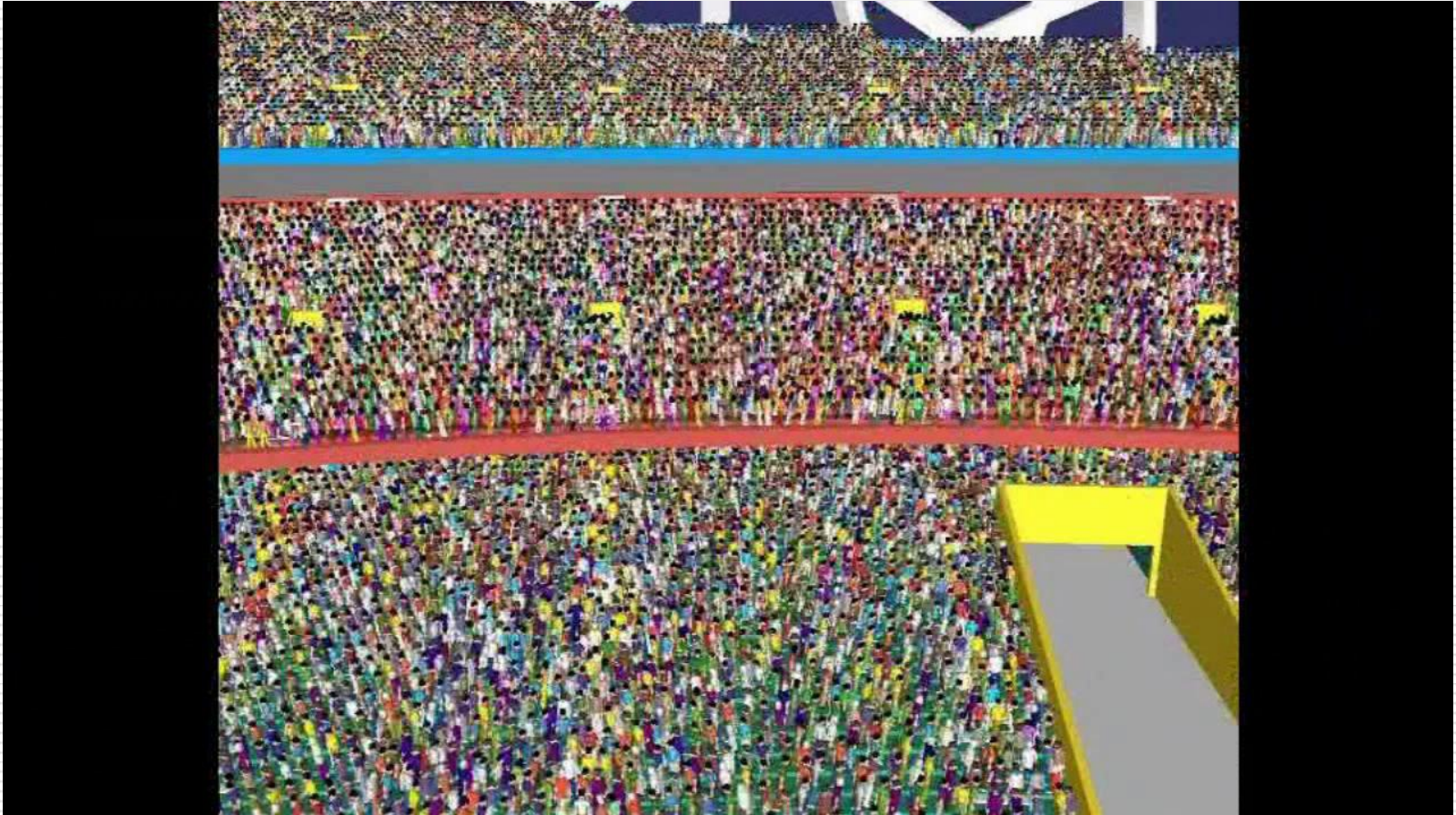
29.05.1985, Heysel stadium, Brussels (Belgium), [Wikipedia](#), [YouTube](#)

02.01.1971, Ibrox (UK), [Wikipedia](#), [YouTube](#)

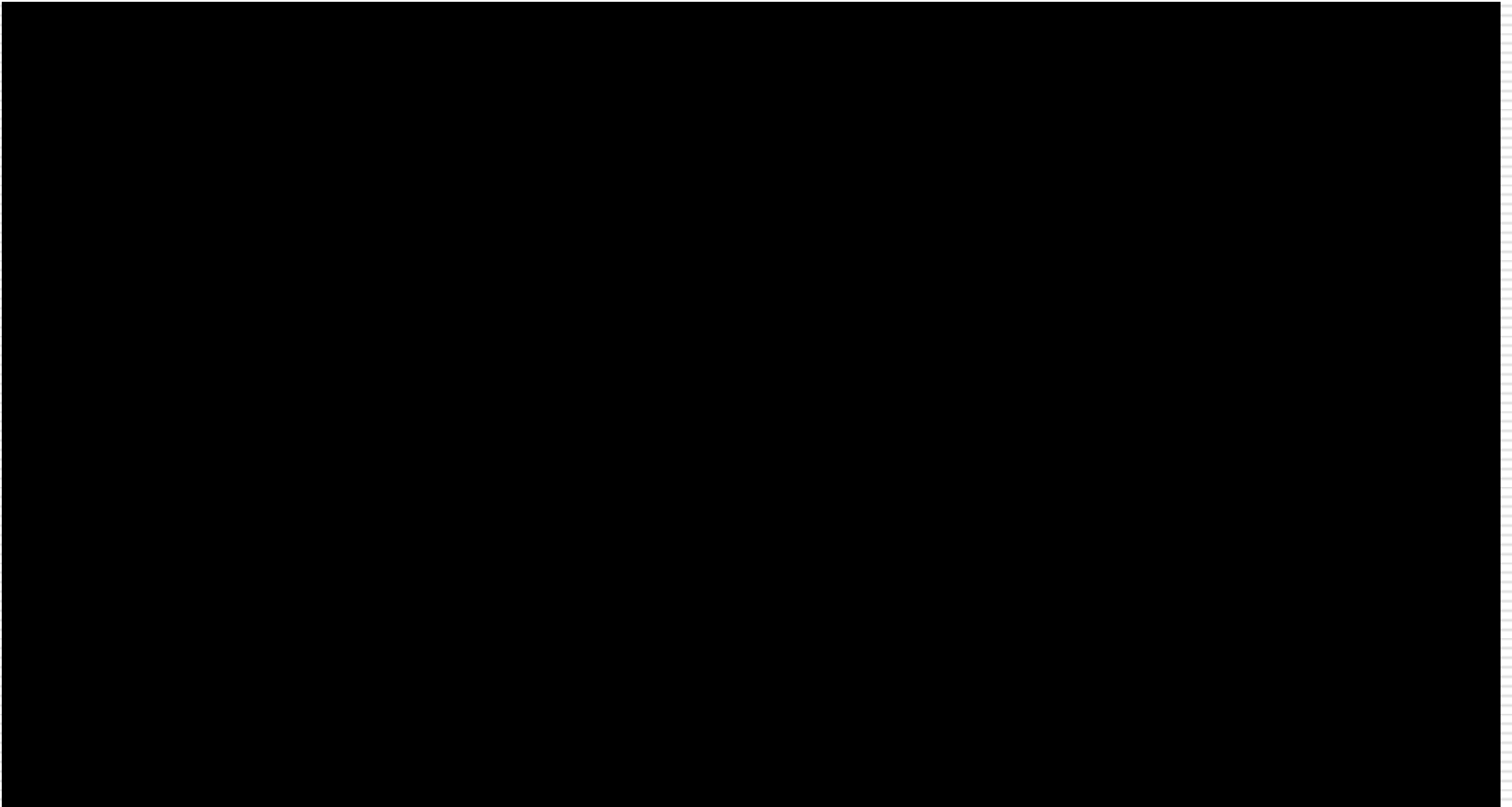
❑ Website: <http://angel.elte.hu/panic>



Demo



Duisburg (Germany) 2010



问题提出

- 人群的羊群效应可以是致命的；
- 当处于恐慌状态时，人的行为动作会变得笨拙和危险；
- 获取真实的人群恐慌行为数据是相当困难的；
- 公共场合中的人群聚集通常是事故发生的隐患，人群拥挤度越高，事故风险也就越大，而且造成的人员伤亡和损失也更为严重。
- 建立一个有效的行人群体行为仿真模型对公共安全，降低事故风险有着重要的意义。

解决方法

- Helbing等提出了社会力模型的概念，并对人群运动进行了仿真，展现了人群疏散过程中的堵塞现象。
- 把人抽象为自我驱动的质点；
- 把人群运动中的物理和社会心理学影响用社会力来进行建模；
- 模拟人群的恐慌现象并看看会发生什么。

基本原理

- 社会力模型以牛顿动力学为基础，由各个力的表达式来体现行人不同的动机和影响。在社会力模型中，由于对影响个体的因素考虑得比较全面，对个体行为的建模比较合理，该模型可以逼真地模拟人群的疏散过程。
- 个体的实际行为受主观意识、其他个体及障碍物三方面因素的影响，均可等效为力在个体上的作用。

仿真人群的牛顿动力学模型

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \underbrace{\frac{v_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i}}_{\text{自身驱动力 } \mathbf{f}_i^0(t)} + \underbrace{\sum_{j(\neq i)} \mathbf{f}_{ij}}_{\text{其他个体对 } i \text{ 产生的力}} + \underbrace{\sum_w \mathbf{f}_{iw}}_{\text{边界力}}$$

$\mathbf{v}_i(t)$ =行人*i*的实际速度

$\mathbf{r}_i(t)$ =行人*i*的位置

1. 个体*i*的自身驱动力

- 主观意识对个体行为的影响可等效为个体受自身施加的“**社会力**”，体现了行人以期望的速度移动到目的地的动机。

$$\mathbf{f}_i^0(t) = m_i \frac{v_i^0(t) \mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i}$$

m_i 为行人质量， $v_i^0(t)$ 为行人的期望速度， $\mathbf{e}_i^0(t)$ 为行人的期望运动方向； τ_i 为特征时间。

- 期望的运动方向可由行人此刻的位置 \mathbf{r}_i 和目标位置 \mathbf{p} 算出，即

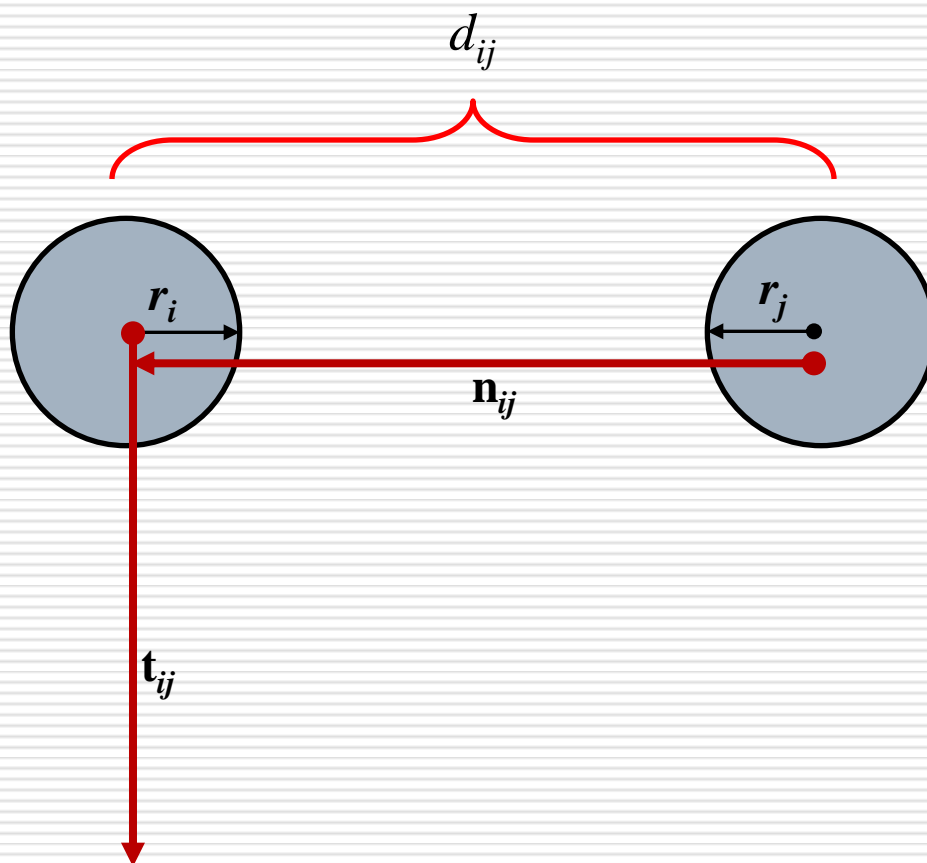
$$\mathbf{e}_i^0(t) = \frac{\mathbf{p} - \mathbf{r}_i}{\|\mathbf{p} - \mathbf{r}_i\|}$$

2. 个体j对个体i产生的力

$$\mathbf{f}_{ij} = \left\{ A_i \exp \left[\left(r_{ij} - d_{ij} \right) / B_i \right] + k g \left(r_{ij} - d_{ij} \right) \right\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa g \left(r_{ij} - d_{ij} \right) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$$

- $A_i \exp \left[\left(r_{ij} - d_{ij} \right) / B_i \right] \mathbf{n}_{ij}$ 为心理学力
- r_{ij} 为个体i和个体j的半径之和
- d_{ij} 为个体i和个体j中心之间的距离
- \mathbf{n}_{ij} 为个体j到个体i的单位矢量 $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) / d_{ij}$
- A_i 和 B_i 为常数, A_i 为相互作用的强度

2. 个体 j 对个体 i 产生的力



2. 个体 j 对个体 i 产生的力

- $kg(r_{ij} - d_{ij})\mathbf{n}_{ij}$ 个体 j 对个体 i 施加的**身体力**，是行人为避免身体接触避让他人所产生的力(k 为一很大的常数)

$$g(x) = \begin{cases} x; & x > 0 \\ 0; & x \leq 0 \end{cases}$$

- 当 $x > 0$ 时，表示两个行人之间的半径之和大于两者之间的距离，两人之间**有身体接触**；
- 当 $x \leq 0$ 时，两个行人之间**没有身体接触**，两人之间的身体力为0；

2. 个体 j 对个体 i 产生的力

$\kappa g (r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ji}^t \mathbf{t}_{ij}$ 为防止人滑倒的滑动摩擦力

- $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ 为切向方向
- Δv_{ji}^t 为切向方向的速度差
- κ 为一个很大的常数

3. 环境力

- 边界和障碍物对人的影响类似于人与人之间的作用。边界 w 对个体 i 的影响为：

$$\mathbf{f}_{iw} = \left\{ A_i \exp \left[(r_i - d_{iw}) / B_i \right] + k g (r_i - d_{iw}) \right\} \mathbf{n}_{iw} - \kappa g (r_i - d_{iw}) (\mathbf{v}_i \bullet \mathbf{t}_{iw}) \mathbf{t}_{iw}$$

- d_{iw} 为个体 i 到环境 w 之间的距离
- \mathbf{t}_{iw} 切矢量

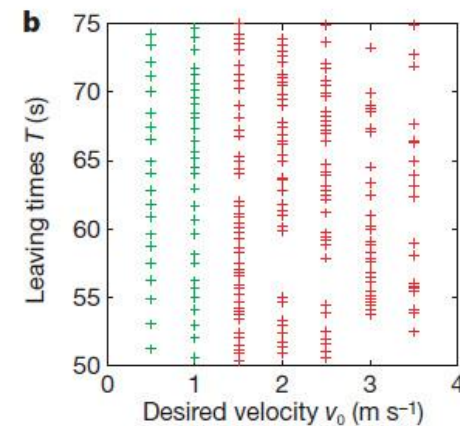
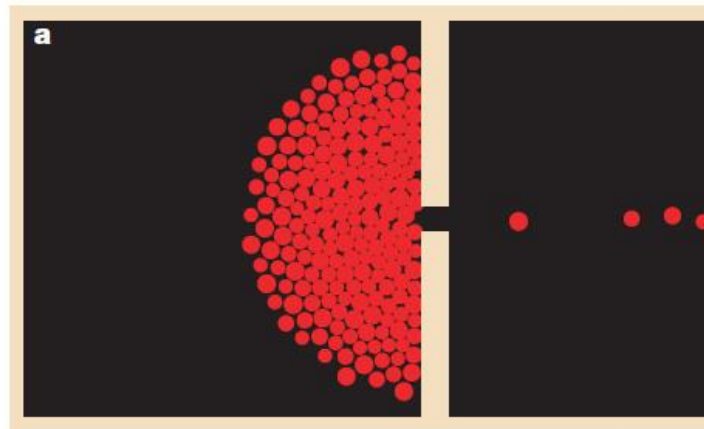
常量和参数的选择

- 根据非恐慌状态下人流的状况来选择参数;
- 行人用半径不同的圆来描述;

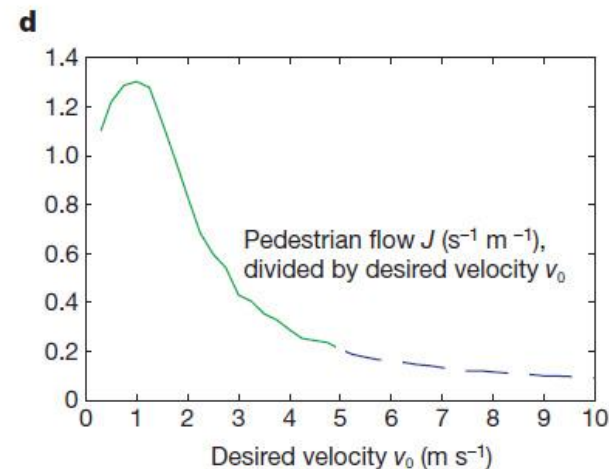
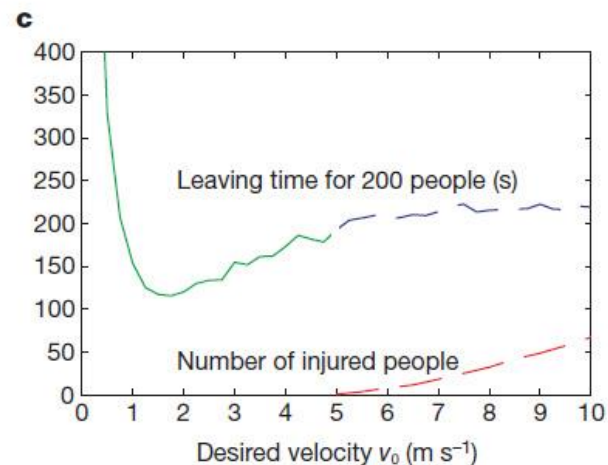
DEMO



阻塞场景的模拟



纵坐标表示：
不同个体离开的时间



“faster-is-slower effect”欲速则不达效应

羊群效应

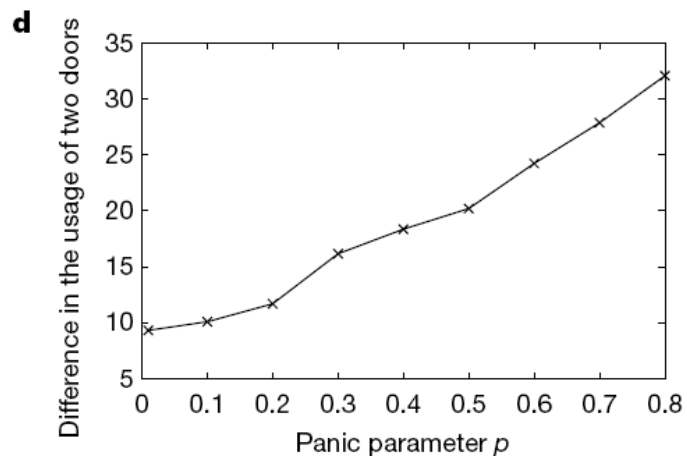
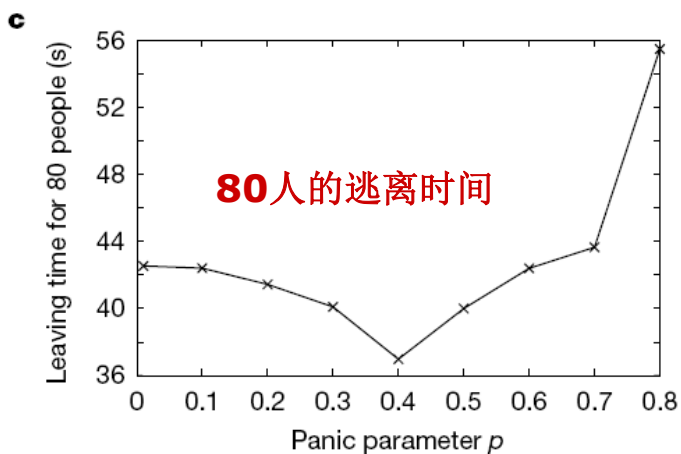
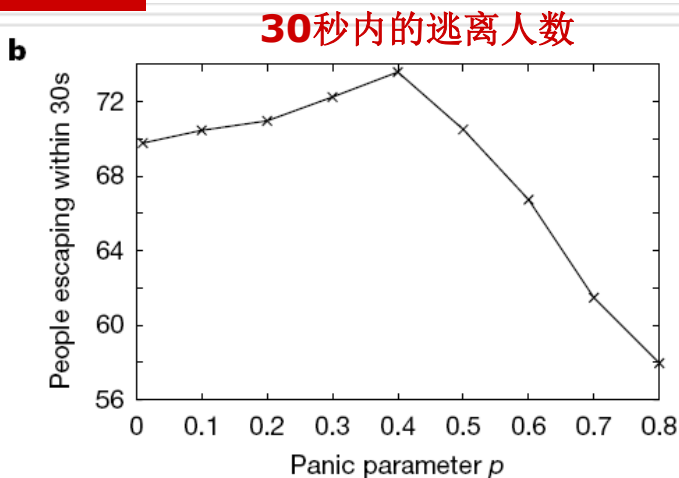
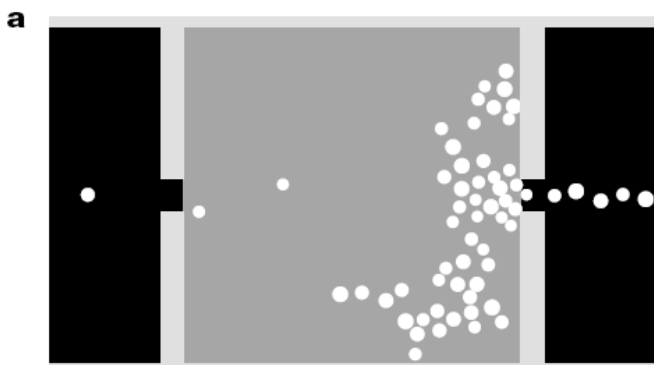
- 恐慌的人群呈现羊群效应、个体行为或两者的混合；
- 羊群效应用参数 p_i 来模拟；

$$\mathbf{e}_i^0(t) = \text{Norm} \left[(1 - p_i) \mathbf{e}_i + p_i \left\langle \mathbf{e}_j^0(t) \right\rangle_i \right]$$

↓
个体行为的方向

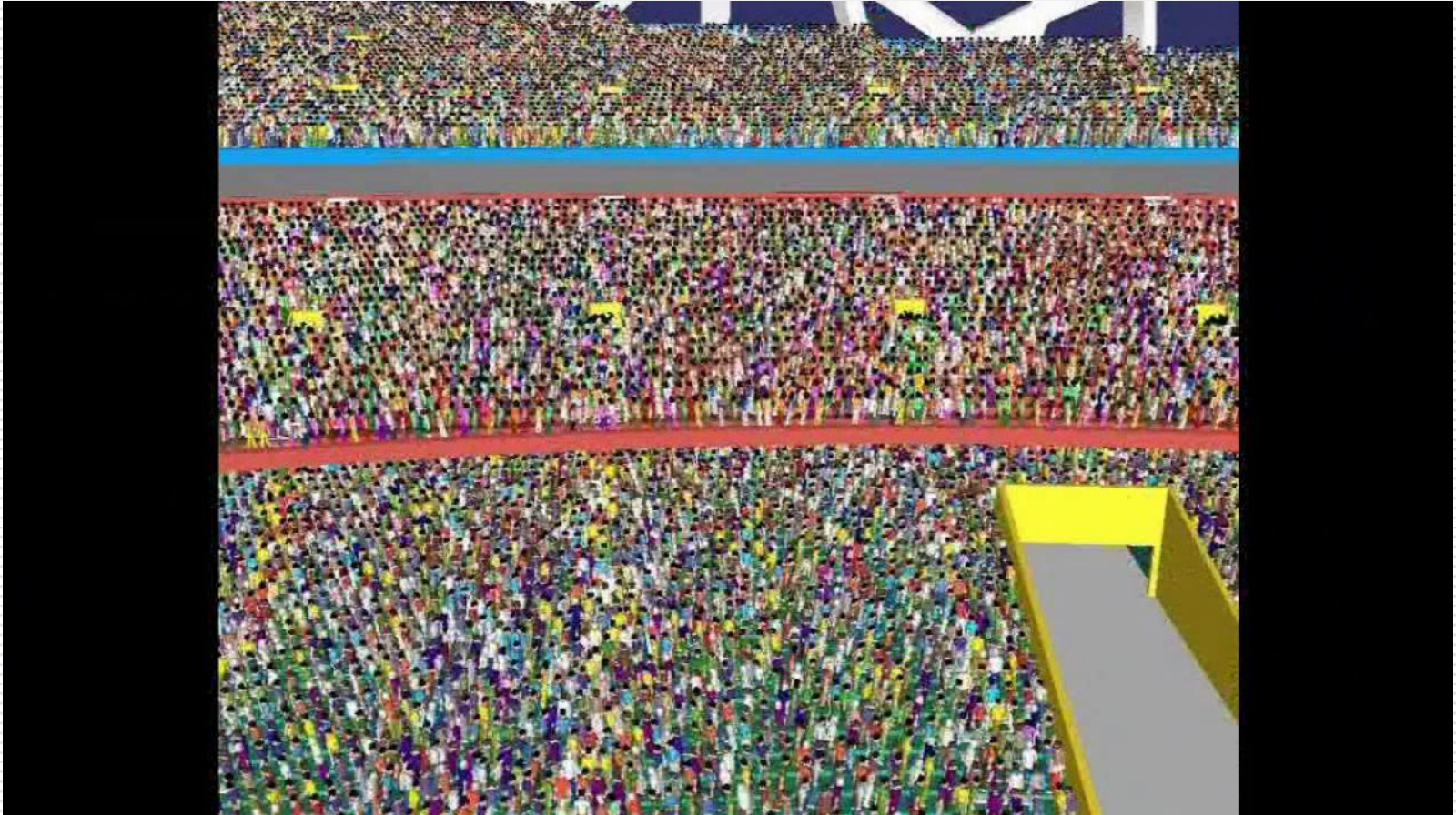
↓
个体 i 邻居行为的平均

羊群效应



若恐慌参数 p 增大，则左右两个出口的人数差异变大

Demo



参考源程序

- 行人仿真(Pedestrian simulations)

<http://pedsim.elte.hu/>

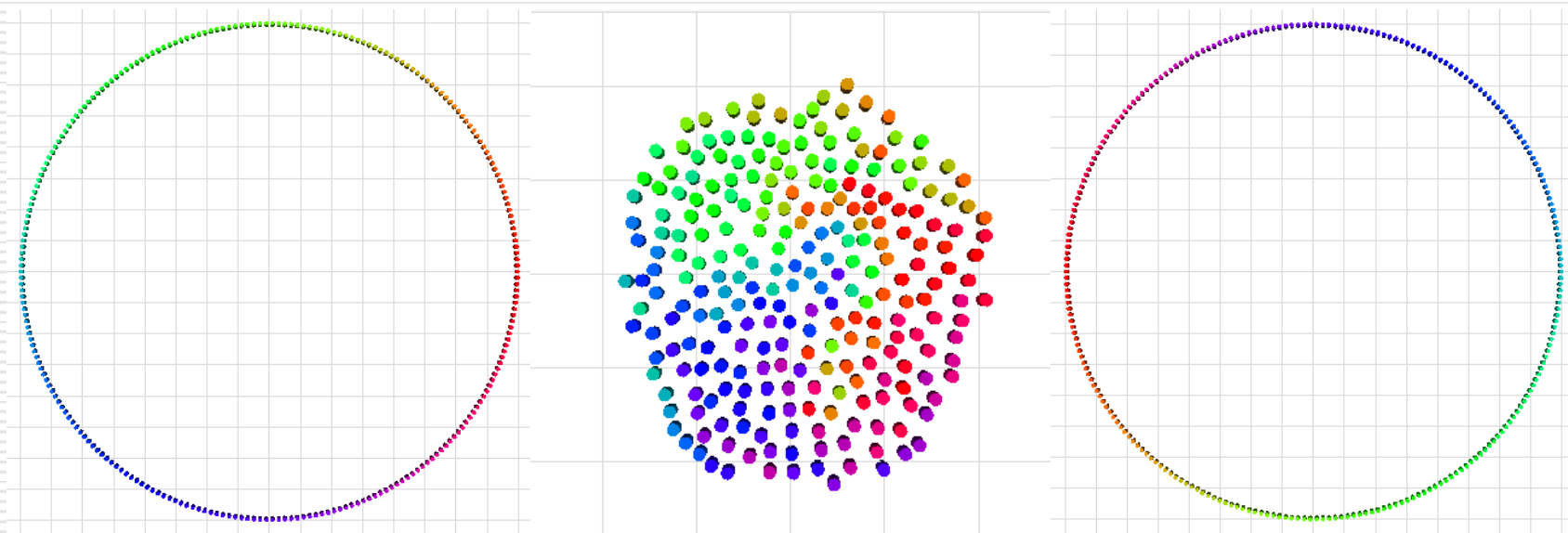
- 可向作者索取

- **Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics-An applet simulating intersecting pedestrian streams**

by Frederik Depta, Lijuan Liu and Nibras A Suleman

<http://itp.uni-frankfurt.de/~gros/JavaApplets/PedestrianCrowdDynamics/PedestrianApplet.html>

相互速度障碍物碰撞避免模型 (RVO, Reciprocal Velocity Obstacles)



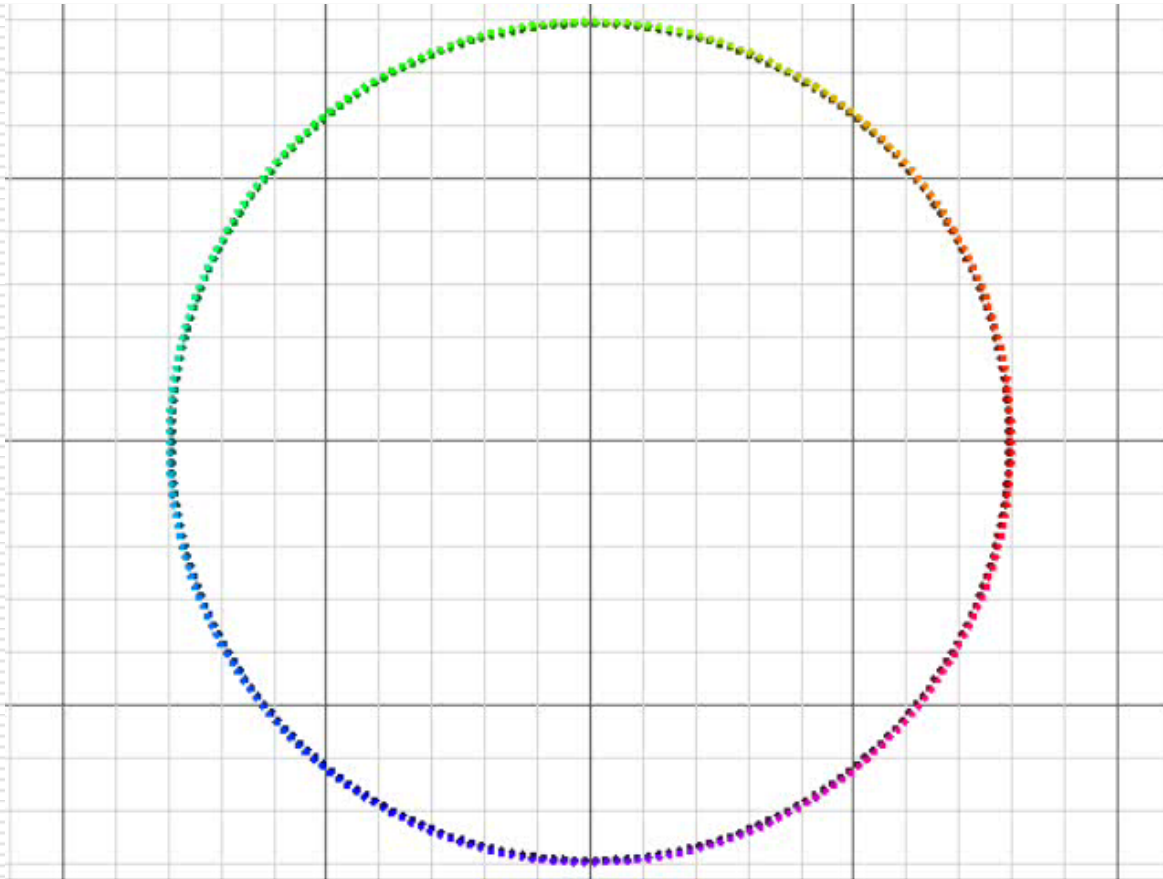
□ 参考文献

Jur van den Berg, Ming Lin, Dinesh Manocha,
“**Reciprocal Velocity Obstacles** for Real-Time Multi-
Agent Navigation”, IEEE International Conference on
Robotics and Automation (ICRA), 2008, pp. 1928-1935.



- 在群组动画中，一个关键问题是如何避免个体之间的碰撞。在现实世界中，当两个行人判断前行可能发生碰撞时，两个人会同时调整自己的速度以避免碰撞；
- 尽管碰撞避免是群体动画中常见的行为，但由于涉及到每个个体的运动能力、心理、外界环境等多种因素，这种相互作用复杂性高，合理的碰撞避免是一项极具挑战性的课题；
- 相互速度障碍物(RVO)模型是一个很好的解决方案
 - 假设个体以匀速前进
 - 每个个体在保持与周围个体相对运动的同时，在速度域中计算出可能导致碰撞的速度集合，并对自身速度进行必要的调整。在调整过程中，碰撞避免的任务同时分配给相关的个体，使它们相互协调完成碰撞避免任务。

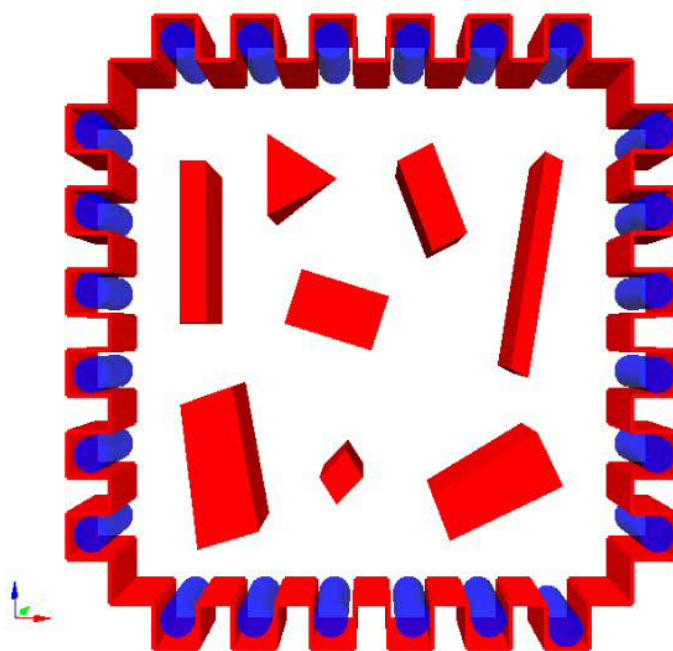
要解决什么问题？



一个园形的例子: 每个智能体(agent)走到园的正对面位置

多智能体(multi-agent)导航

- N 个智能体共享一个环境
- 一个智能体从起始点运动到目标点，相互之间不发生碰撞，并避开障碍物



多智能体(multi-agent)导航

□ 解耦处理法(Decoupled)

- 每个智能体同时自主导航
- 全局路径规划和局部碰撞避免分开处理

□ 集中处理法(Centralized)

- 在复合配置空间进行路径规划
 - 例子：大型团体操

问题描述

- 独立导航
- 感知和行动是连续的
- 全局路径规划 **vs.** 局部导航
- 在每个周期：每个智能体能观察到其它智能体(知道其它智能体的**位置**和**速度**)
- 但是不知道它们准备做什么
- 智能体该如何做？

以前的工作

□ 势能场(质点模型)

- 假设其它智能体为静态的障碍物

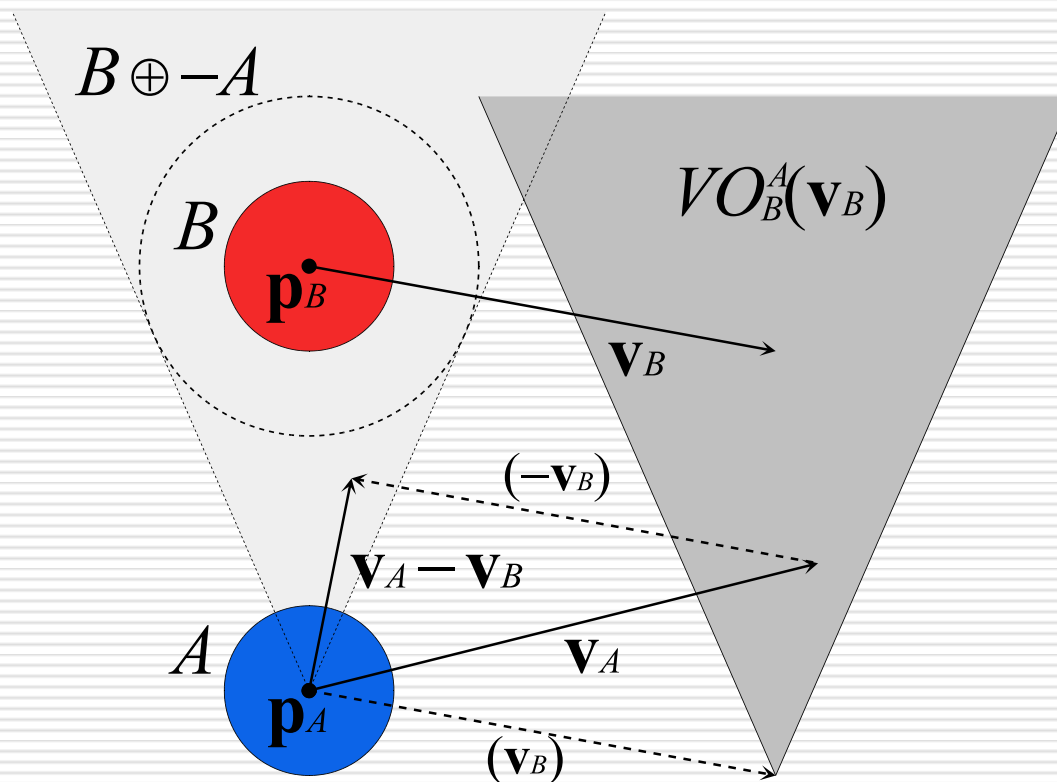
□ 速度障碍物(Velocity Obstacles)

- P. Fiorini and Z. Shiller, “Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles,” *International Journal of Robotics Research*, vol. 17, no. 7, pp. 760–772, 1998.
- 假设其它智能体为移动的障碍物(保持当前的速度一段时间)

速度障碍物

- 假设 A 为平面上的一个智能体，它的位置 \mathbf{P}_A ， B 为一个移动的平面障碍物，其位置为 \mathbf{P}_B
- 则障碍物 B 对智能体 A 的速度障碍物 $VO_B^A(\mathbf{v}_B)$ 为
 - 在某一时刻将与障碍物 B (以速度 \mathbf{v}_B 移动)碰撞的智能体 A 的所有可能的速度 \mathbf{v}_A 集合
- 在几何上，速度障碍物可以用下面的图来表示

速度障碍物



圆盘形障碍物 B 对一个圆盘形智能体 A 的速度障碍物 $VO_B^A(\mathbf{v}_B)$

速度障碍物

- 假设 $A \oplus B$ 表示 A 和 B 两个物体的Minkowski和, $-A$ 表示物体 A 在它参考点的镜像,

$$A \oplus B = \{\mathbf{a} + \mathbf{b} \mid \mathbf{a} \in A, \mathbf{b} \in B\}, -A = \{-\mathbf{a} \mid \mathbf{a} \in A\}$$

- $\gamma(\mathbf{p}, \mathbf{v}) = \{\mathbf{p} + t\mathbf{v} \mid t > 0\}$ 表示以 \mathbf{p} 为起点, 方向为 \mathbf{v} 的光线。

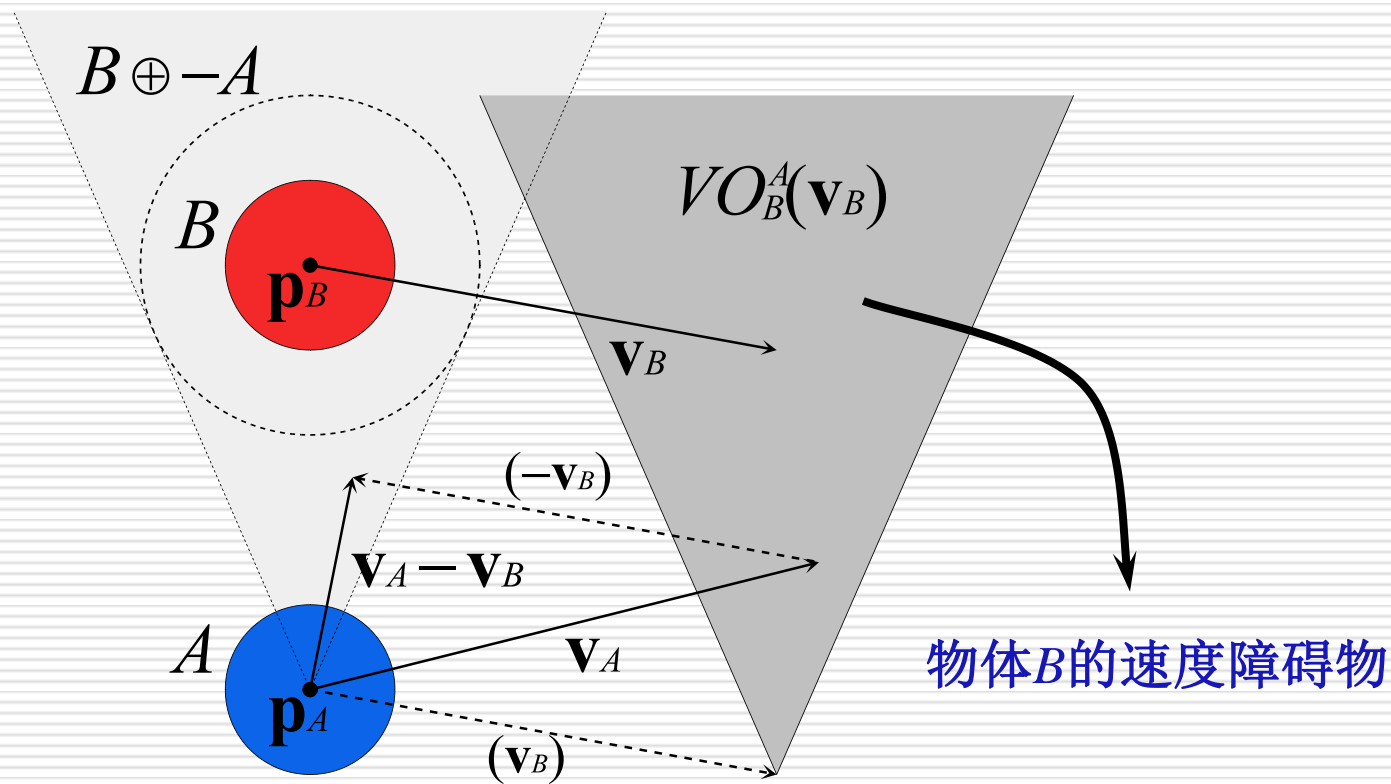
速度障碍物

- 如果以 \mathbf{P}_A 为起始点，方向为物体A和B两个物体的相对速度 $(\mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B)$ 的光线与B和-A的Minkowski和相交，则速度 \mathbf{v}_A 位于B的速度障碍物中。

$$VO_B^A = \{ \mathbf{v}_A / \lambda(\mathbf{P}_A, \mathbf{v}_A - \mathbf{v}_B) \cap B \oplus -A \neq \emptyset \}$$

- 如果 \mathbf{v}_A 属于上述集合，则在某一时刻物体A和B将碰撞；如果 \mathbf{v}_A 不属于B的速度障碍物集合，则两个物体将不会碰撞；如果 \mathbf{v}_A 位于速度障碍物的边界，则物体A在某一时刻与物体B接触。

速度障碍物



速度障碍物的性质

□ 对称性质

$$\mathbf{v}_A \in VO_B^A(\mathbf{v}_B) \Leftrightarrow \mathbf{v}_B \in VO_A^B(\mathbf{v}_A)$$

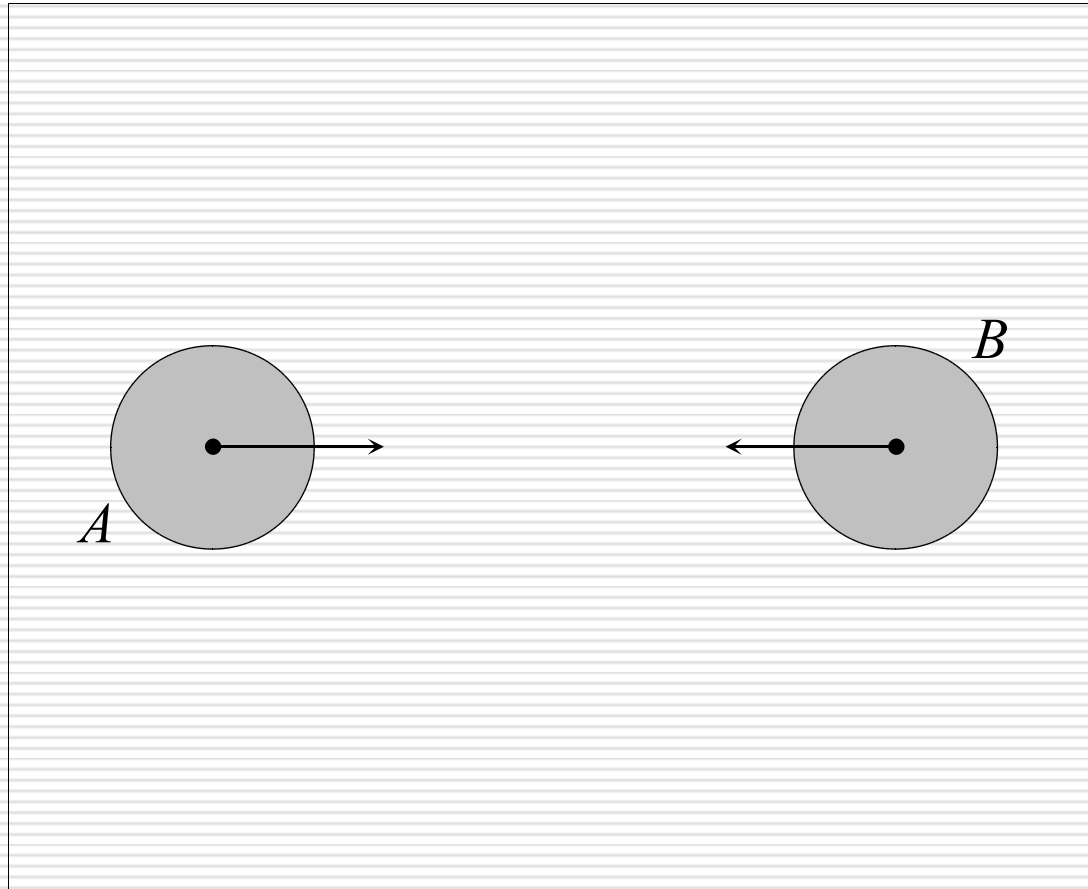
□ 平移不变性

$$\mathbf{v}_A \in VO_B^A(\mathbf{v}_B) \Leftrightarrow \mathbf{v}_A + \mathbf{u} \in VO_B^A(\mathbf{v}_B + \mathbf{u})$$

速度障碍物的应用

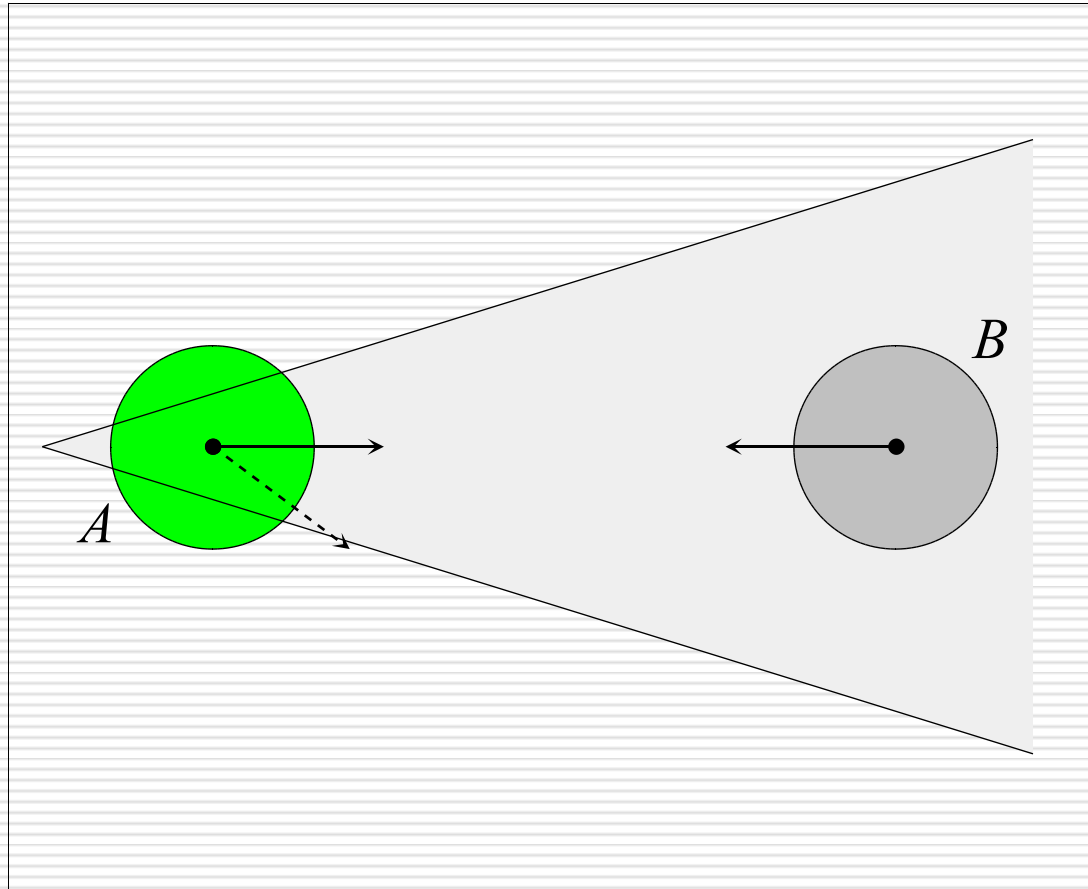
- 速度障碍物这一概念可用于移动物体的导航。在每个规划周期内，智能体选择一个位于移动物体速度障碍物外面的速度；
- 如果有很多自由的速度可选，则选择的速度为导引智能体到目标位置的最合适的速度；
- 多智能体的导航？
- 但是智能体不是被动地移动，而是相互之间做出反应；
- 结果：振荡(Oscillation)！

振荡



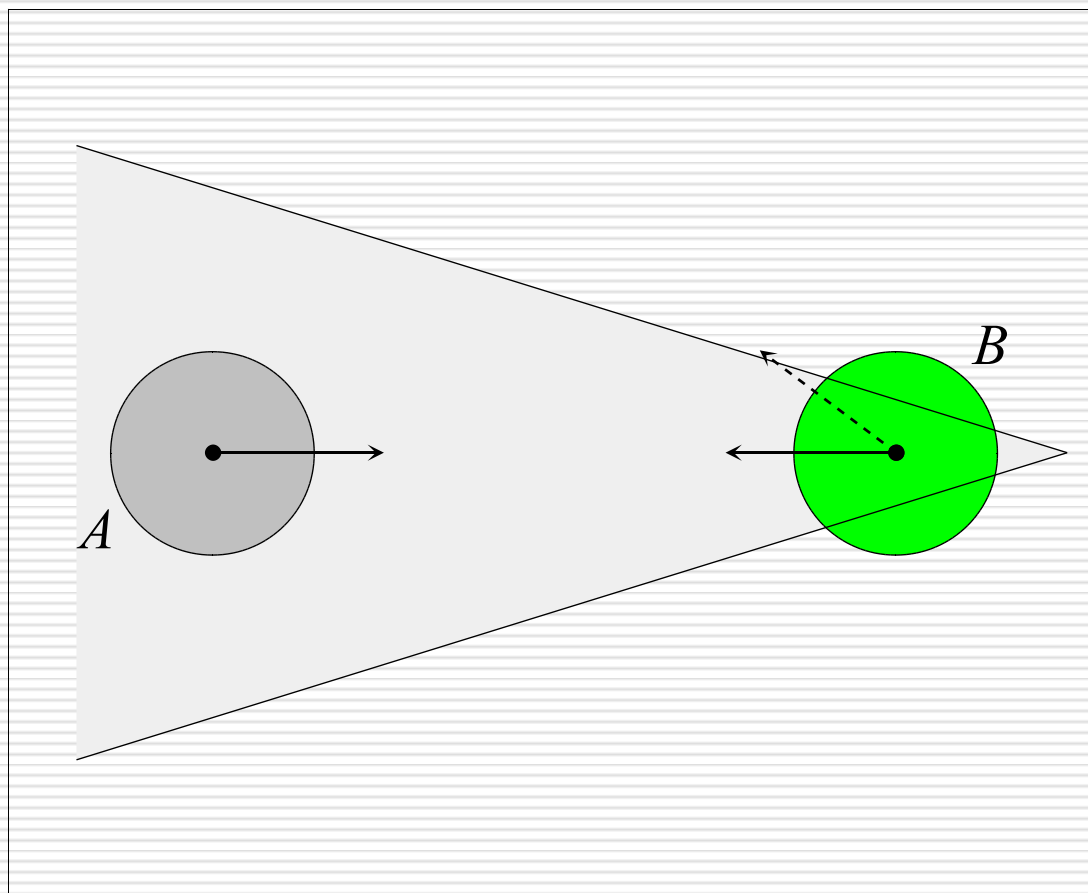
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡



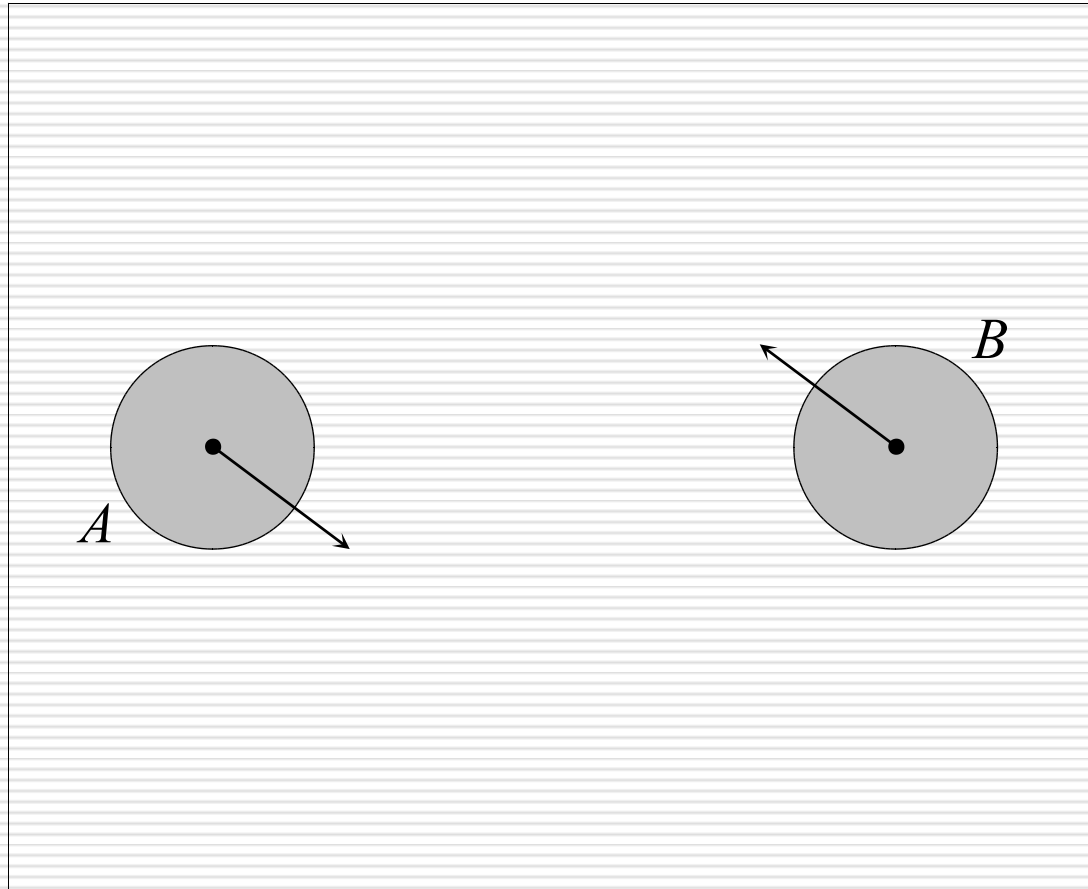
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡



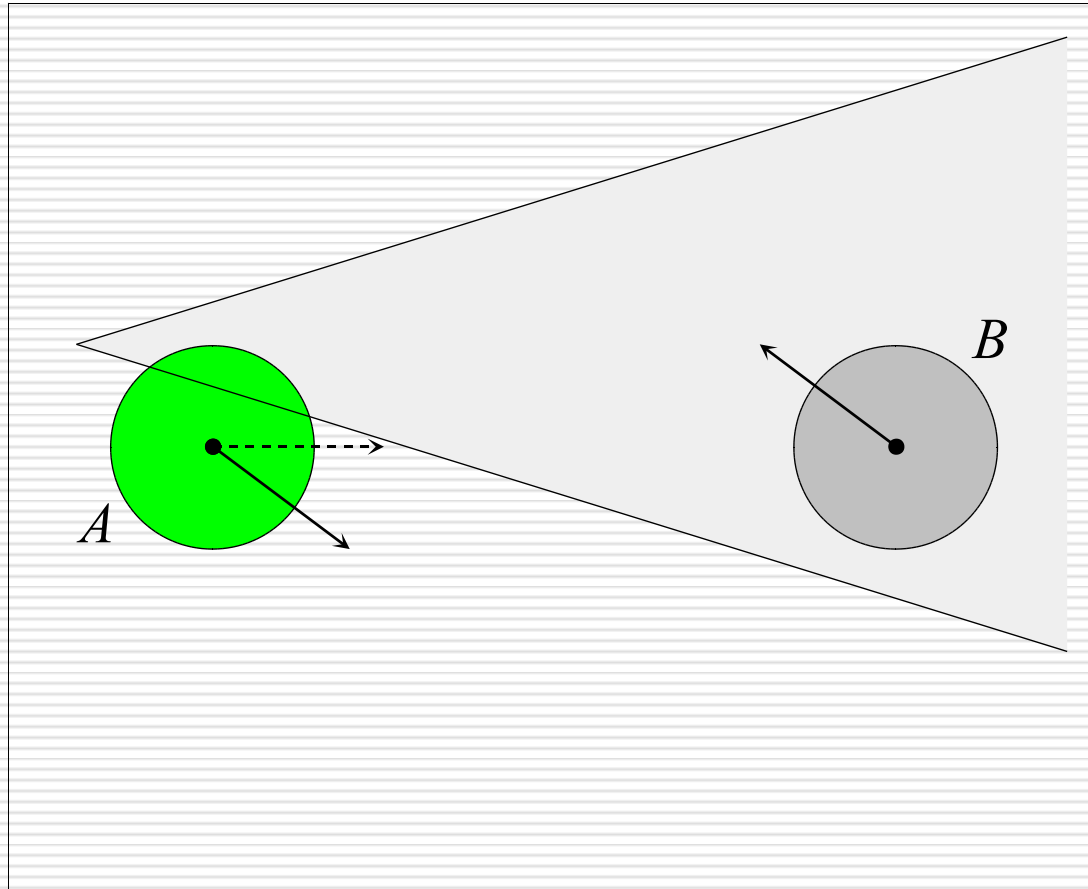
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡



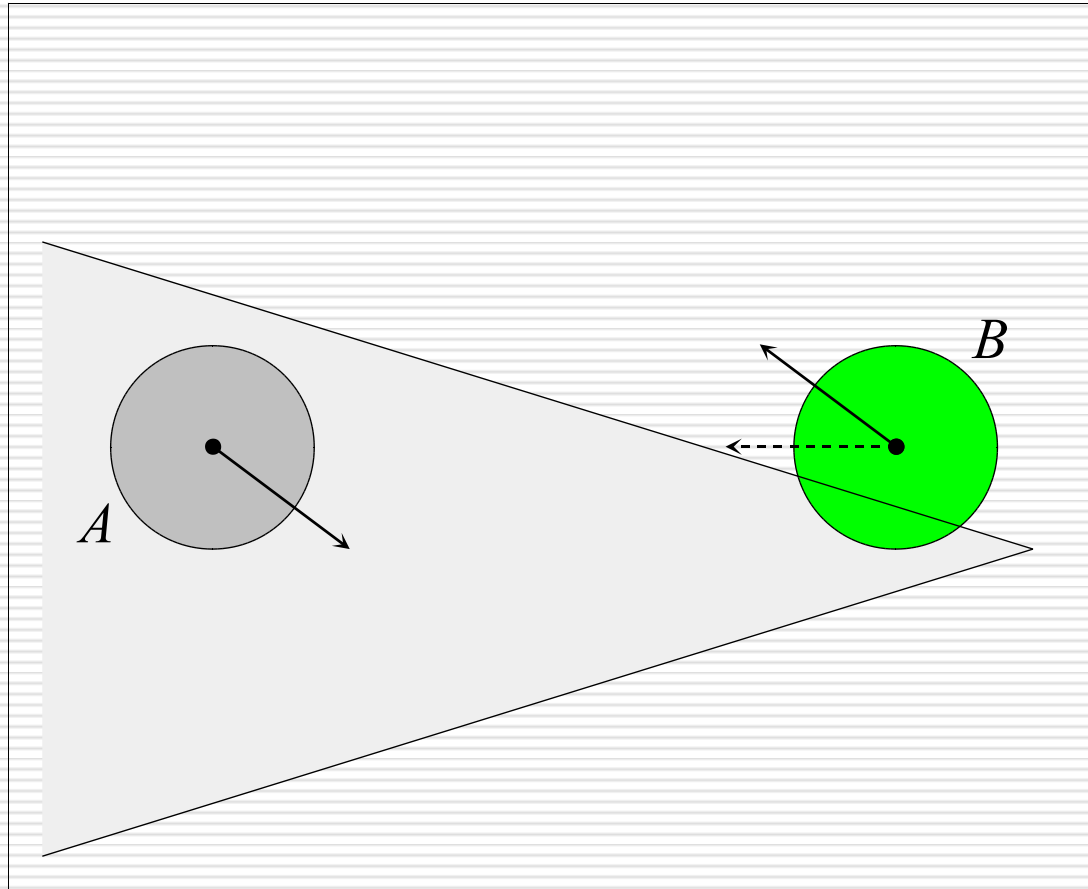
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡



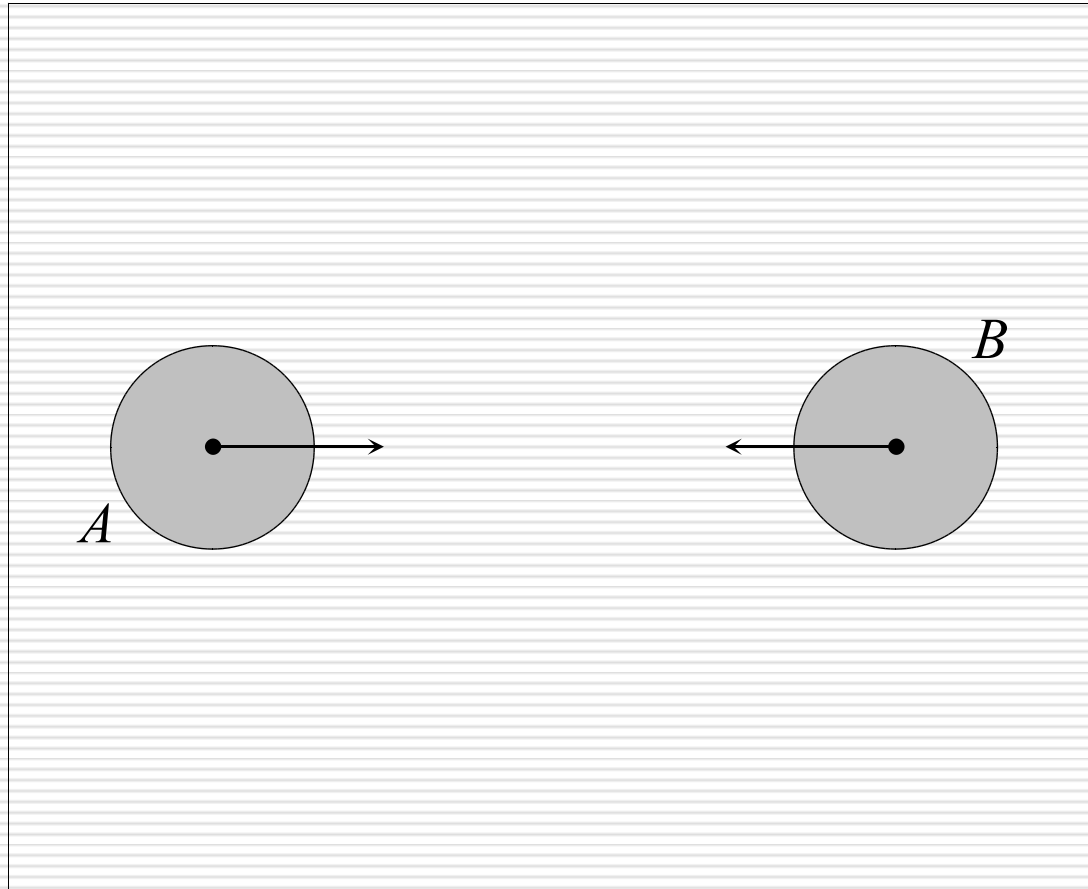
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡

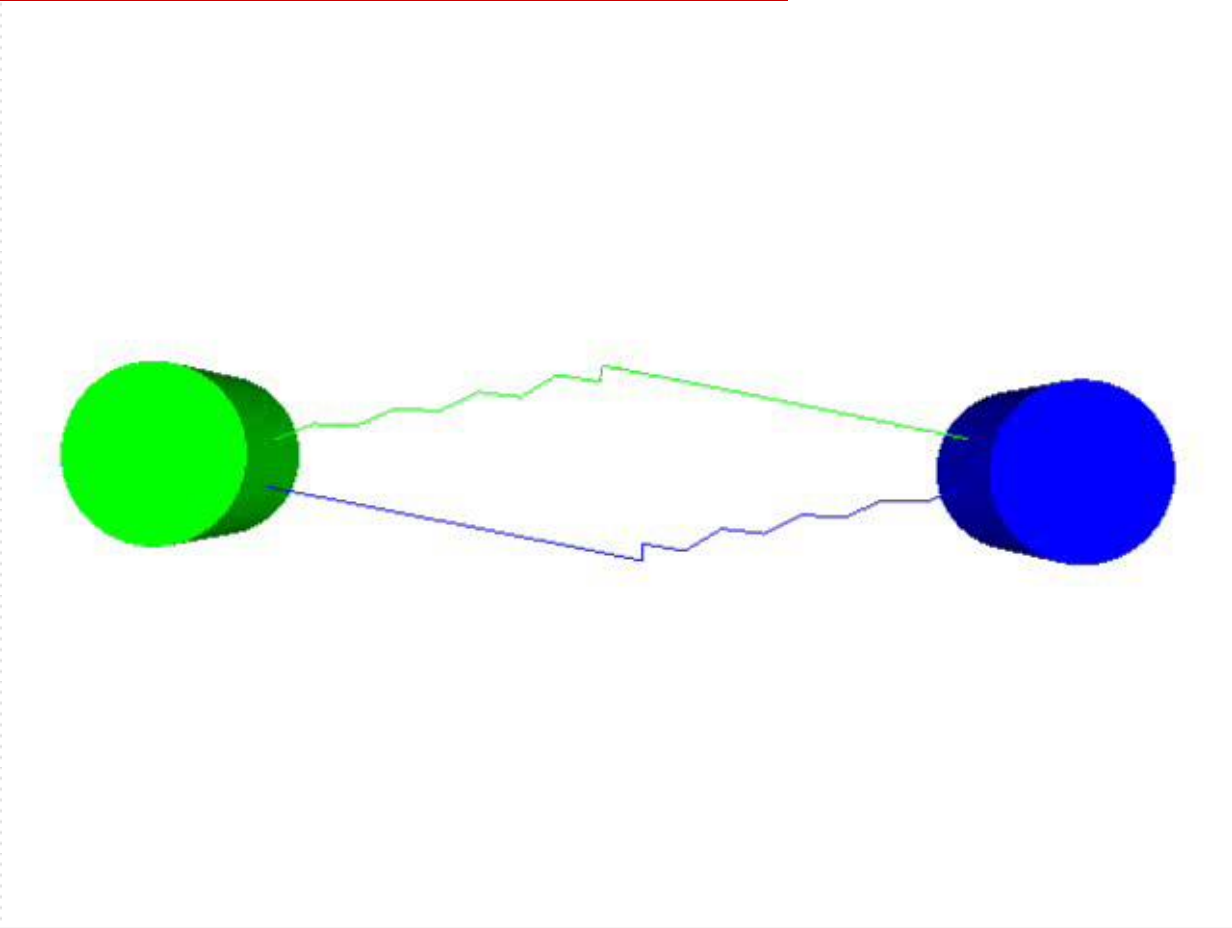


例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡

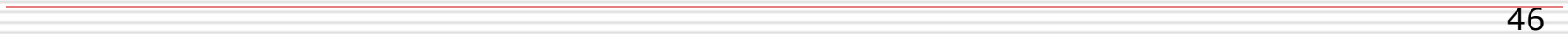


例子：以相对方向运动的两个智能体

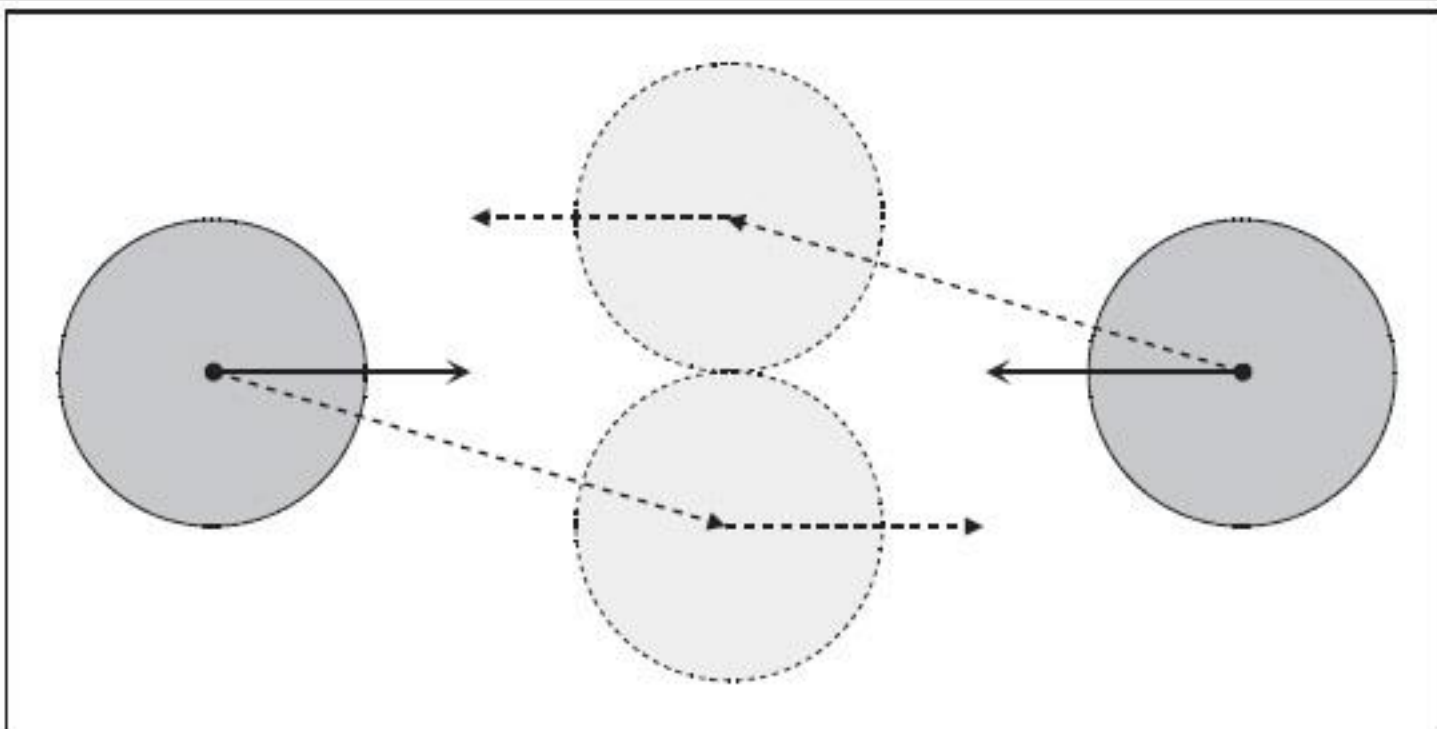


45

<p> 1.1 Introduction 1.2 Background 1.3 Objectives 1.4 Scope 1.5 Methodology 1.6 Results 1.7 Conclusion 1.8 References 1.9 Appendix 1.10 Index 1.11 Glossary 1.12 Abbreviations 1.13 Acronyms 1.14 Footnotes 1.15 Endnotes 1.16 References 1.17 Appendix 1.18 Index 1.19 Glossary 1.20 Abbreviations 1.21 Acronyms 1.22 Footnotes 1.23 Endnotes 1.24 References 1.25 Appendix 1.26 Index 1.27 Glossary 1.28 Abbreviations 1.29 Acronyms 1.30 Footnotes 1.31 Endnotes 1.32 References 1.33 Appendix 1.34 Index 1.35 Glossary 1.36 Abbreviations 1.37 Acronyms 1.38 Footnotes 1.39 Endnotes 1.40 References 1.41 Appendix 1.42 Index 1.43 Glossary 1.44 Abbreviations 1.45 Acronyms 1.46 Footnotes 1.47 Endnotes 1.48 References 1.49 Appendix 1.50 Index 1.51 Glossary 1.52 Abbreviations 1.53 Acronyms 1.54 Footnotes 1.55 Endnotes 1.56 References 1.57 Appendix 1.58 Index 1.59 Glossary 1.60 Abbreviations 1.61 Acronyms 1.62 Footnotes 1.63 Endnotes 1.64 References 1.65 Appendix 1.66 Index 1.67 Glossary 1.68 Abbreviations 1.69 Acronyms 1.70 Footnotes 1.71 Endnotes 1.72 References 1.73 Appendix 1.74 Index 1.75 Glossary 1.76 Abbreviations 1.77 Acronyms 1.78 Footnotes 1.79 Endnotes 1.80 References 1.81 Appendix 1.82 Index 1.83 Glossary 1.84 Abbreviations 1.85 Acronyms 1.86 Footnotes 1.87 Endnotes 1.88 References 1.89 Appendix 1.90 Index 1.91 Glossary 1.92 Abbreviations 1.93 Acronyms 1.94 Footnotes 1.95 Endnotes 1.96 References 1.97 Appendix 1.98 Index 1.99 Glossary 1.100 Abbreviations 1.101 Acronyms 1.102 Footnotes 1.103 Endnotes 1.104 References 1.105 Appendix 1.106 Index 1.107 Glossary 1.108 Abbreviations 1.109 Acronyms 1.110 Footnotes 1.111 Endnotes 1.112 References 1.113 Appendix 1.114 Index 1.115 Glossary 1.116 Abbreviations 1.117 Acronyms 1.118 Footnotes 1.119 Endnotes 1.120 References 1.121 Appendix 1.122 Index 1.123 Glossary 1.124 Abbreviations 1.125 Acronyms 1.126 Footnotes 1.127 Endnotes 1.128 References 1.129 Appendix 1.130 Index 1.131 Glossary 1.132 Abbreviations 1.133 Acronyms 1.134 Footnotes 1.135 Endnotes 1.136 References 1.137 Appendix 1.138 Index 1.139 Glossary 1.140 Abbreviations 1.141 Acronyms 1.142 Footnotes 1.143 Endnotes 1.144 References 1.145 Appendix 1.146 Index 1.147 Glossary 1.148 Abbreviations 1.149 Acronyms 1.150 Footnotes 1.151 Endnotes 1.152 References 1.153 Appendix 1.154 Index 1.155 Glossary 1.156 Abbreviations 1.157 Acronyms 1.158 Footnotes 1.159 Endnotes 1.160 References 1.161 Appendix 1.162 Index 1.163 Glossary 1.164 Abbreviations 1.165 Acronyms 1.166 Footnotes 1.167 Endnotes 1.168 References 1.169 Appendix 1.170 Index 1.171 Glossary 1.172 Abbreviations 1.173 Acronyms 1.174 Footnotes 1.175 Endnotes 1.176 References 1.177 Appendix 1.178 Index 1.179 Glossary 1.180 Abbreviations 1.181 Acronyms 1.182 Footnotes 1.183 Endnotes 1.184 References 1.185 Appendix 1.186 Index 1.187 Glossary 1.188 Abbreviations 1.189 Acronyms 1.190 Footnotes 1.191 Endnotes 1.192 References 1.193 Appendix 1.194 Index 1.195 Glossary 1.196 Abbreviations 1.197 Acronyms 1.198 Footnotes 1.199 Endnotes 1.200 References</</p>
--



更好的路径



相互速度障碍物方法

- 想办法避免振荡；
- 原因：智能体之间没有通讯或整体的协调；
- 简单的想法：不是选择位于速度障碍物外部的一个新的速度，而是选择当前速度和一个位于速度障碍物外部的速度的平均；
- 形成相互速度障碍物(RVO, Reciprocal Velocity Obstacle)

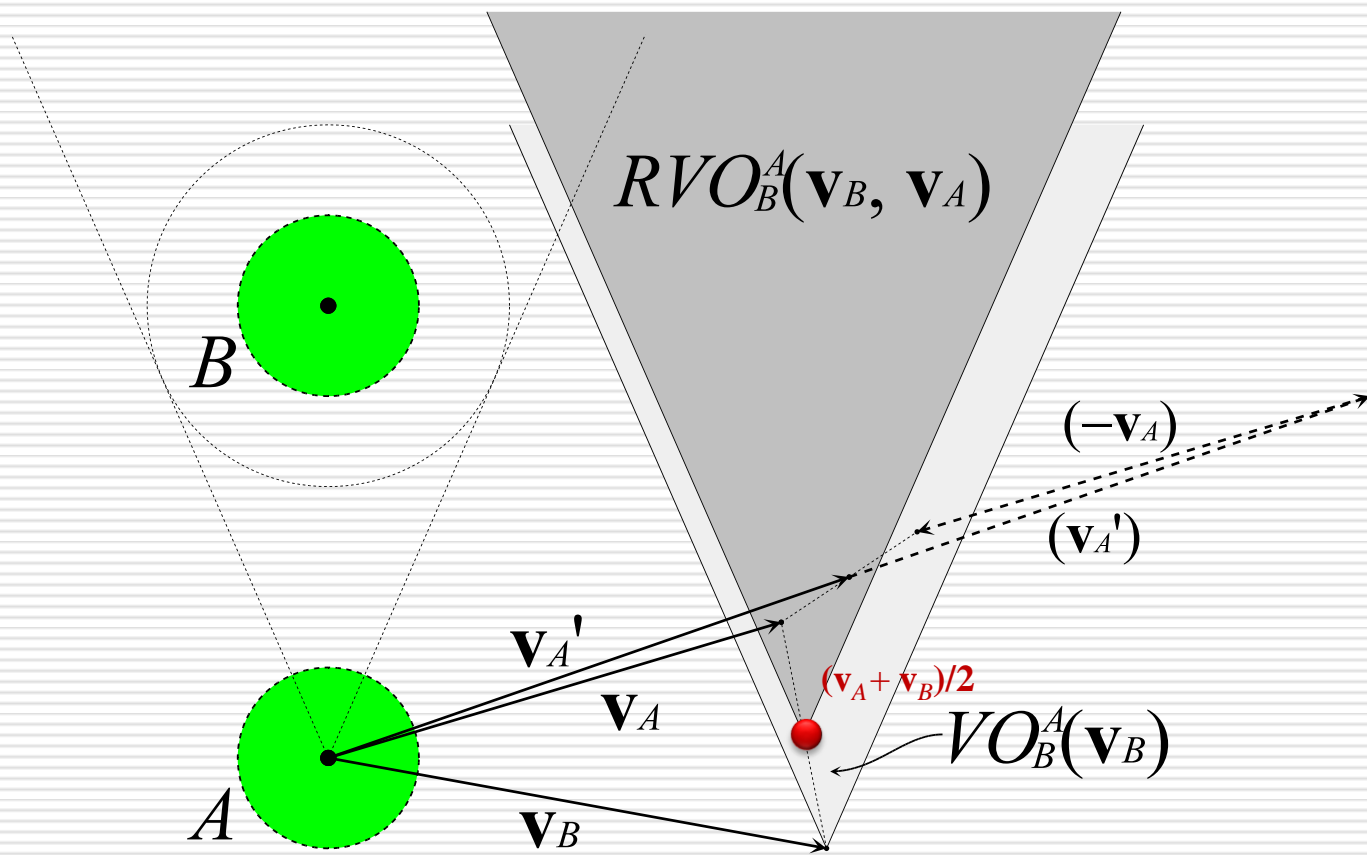
相互速度障碍物

- B 对 A 的相互速度障碍物包含 A 的所有以下速度的集合：
该集合的成员为 A 的当前速度 \mathbf{v}_A 和 B 的速度障碍物内的一个速度的平均；

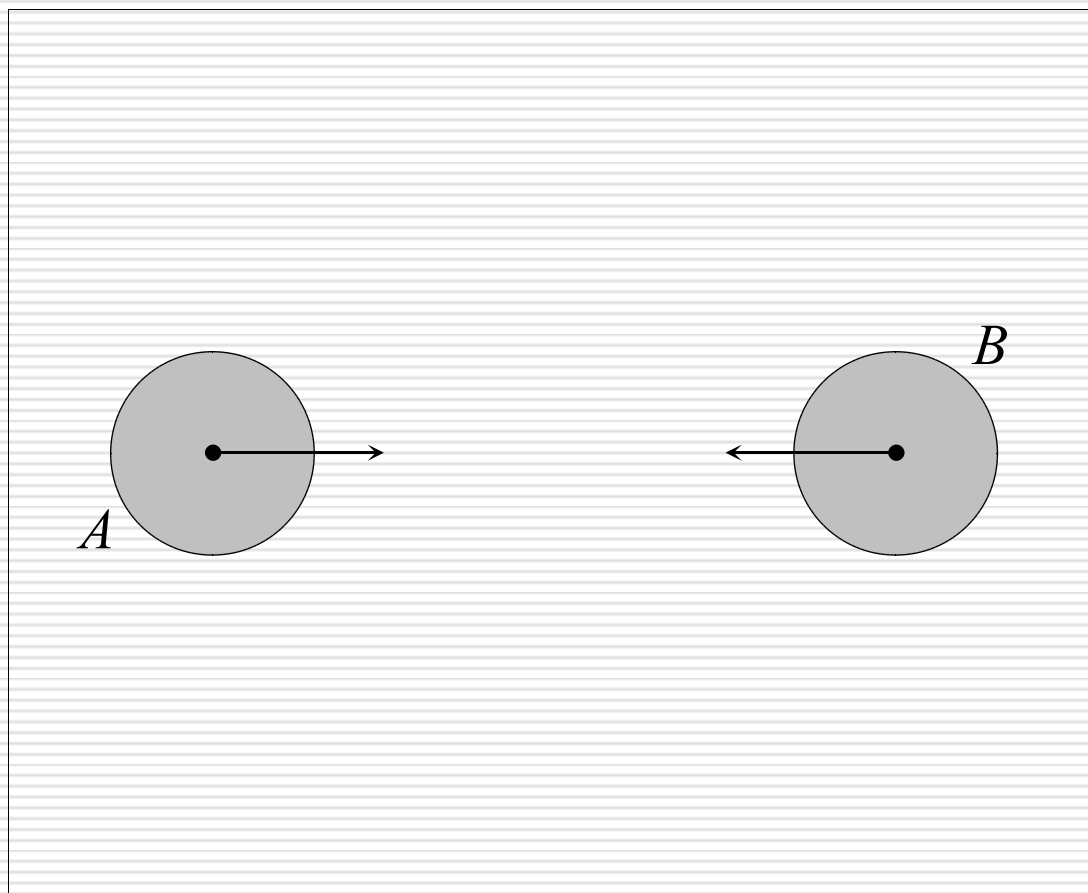
$$RVO_B^A(\mathbf{v}_B, \mathbf{v}_A) = \left\{ \mathbf{v}_A' / 2 \mathbf{v}_A' - \mathbf{v}_A \in VO_B^A(\mathbf{v}_B) \right\}$$

- 几何上，可解释为把 B 的速度障碍物 $VO_B^A(\mathbf{v}_B)$ 平移到顶点 $(\mathbf{v}_A + \mathbf{v}_B)/2$ ；

相互速度障碍物

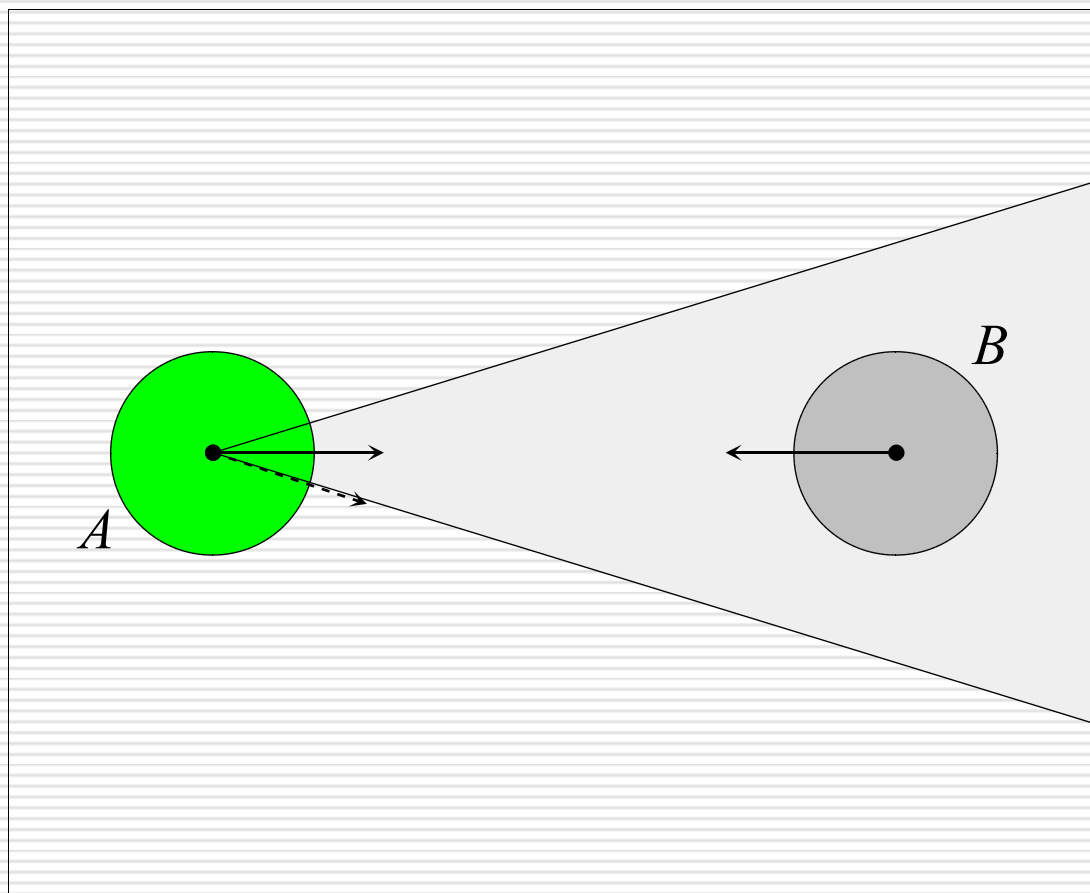


振荡?



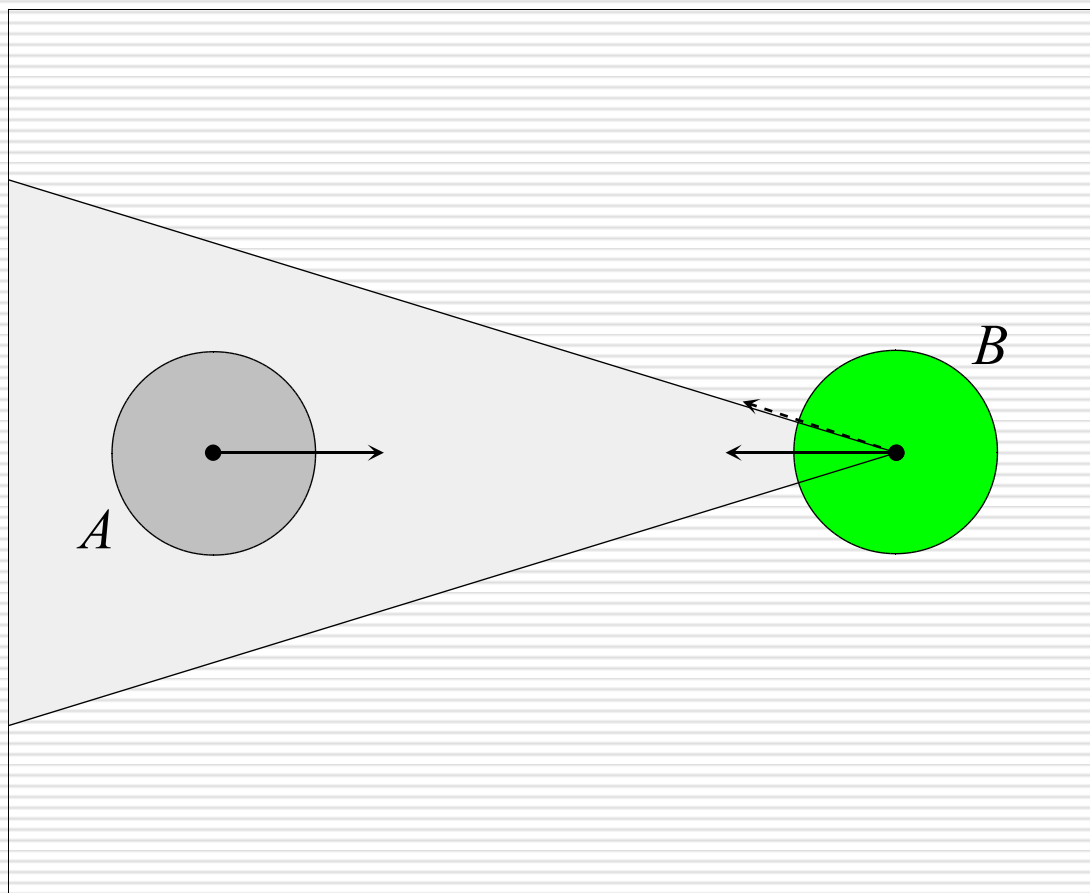
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡?



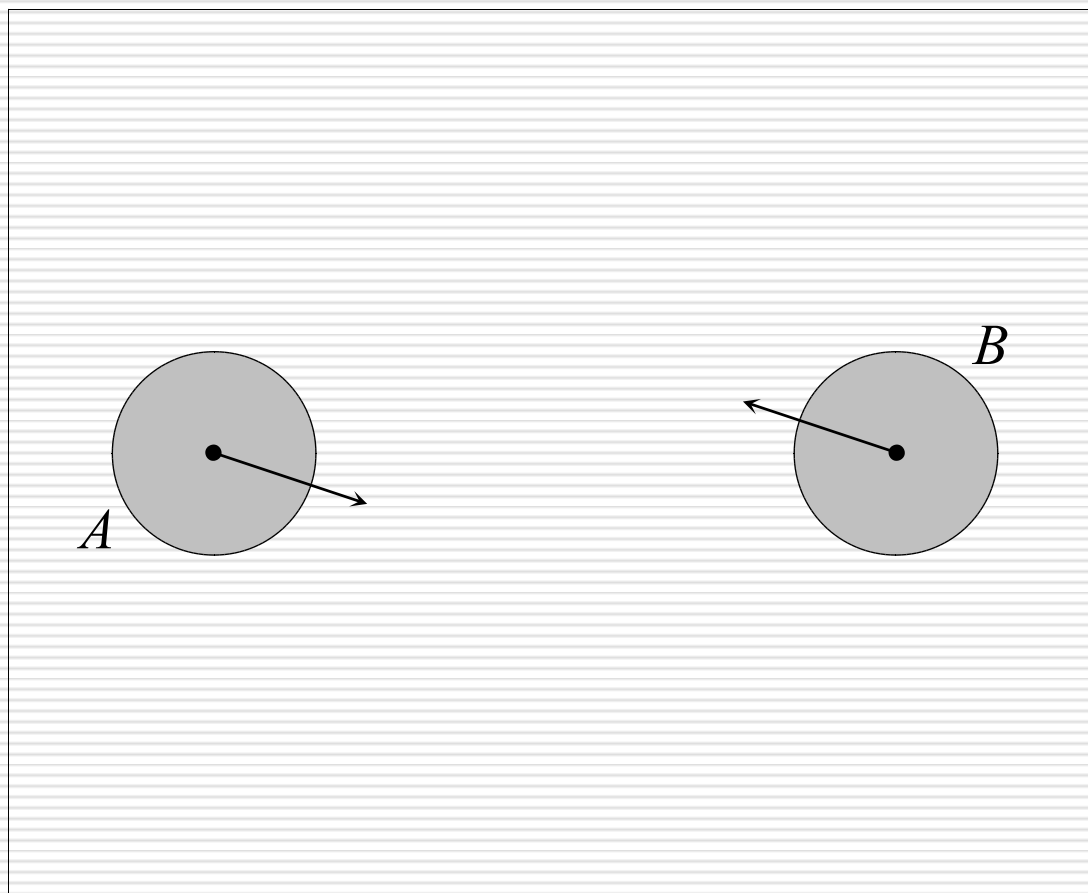
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡?



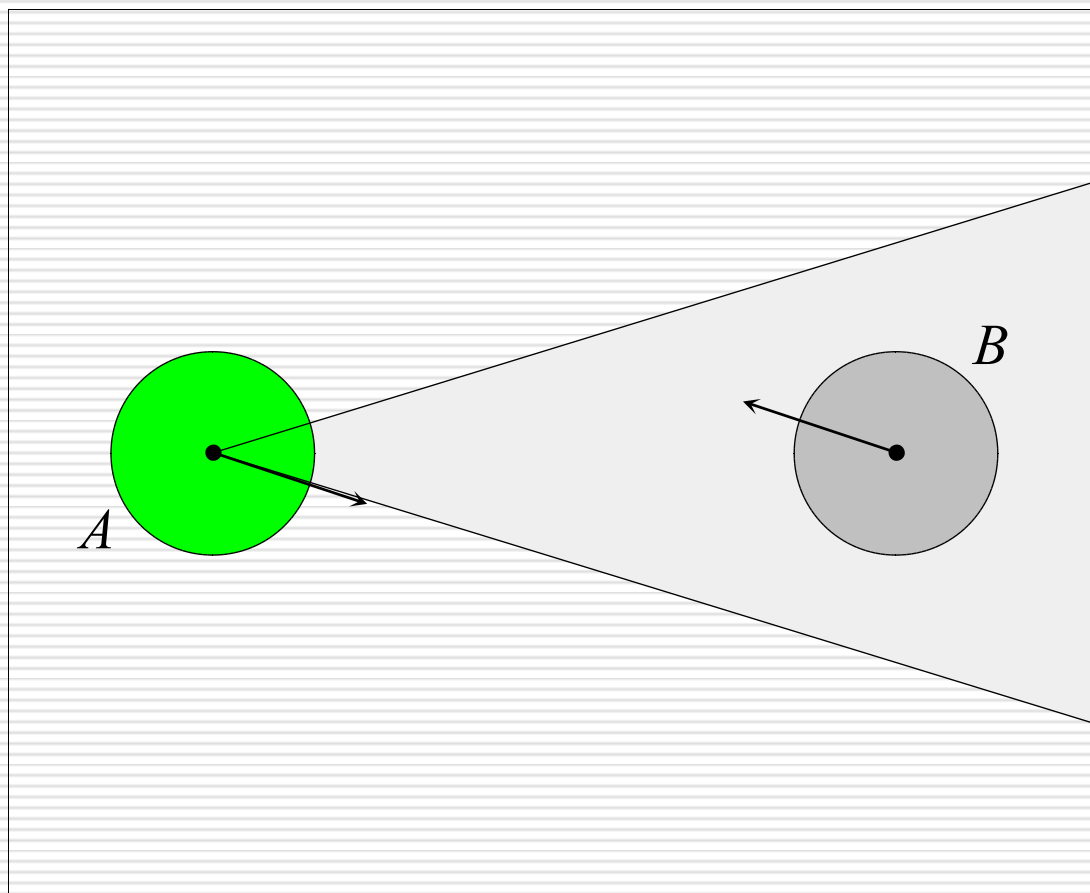
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡?



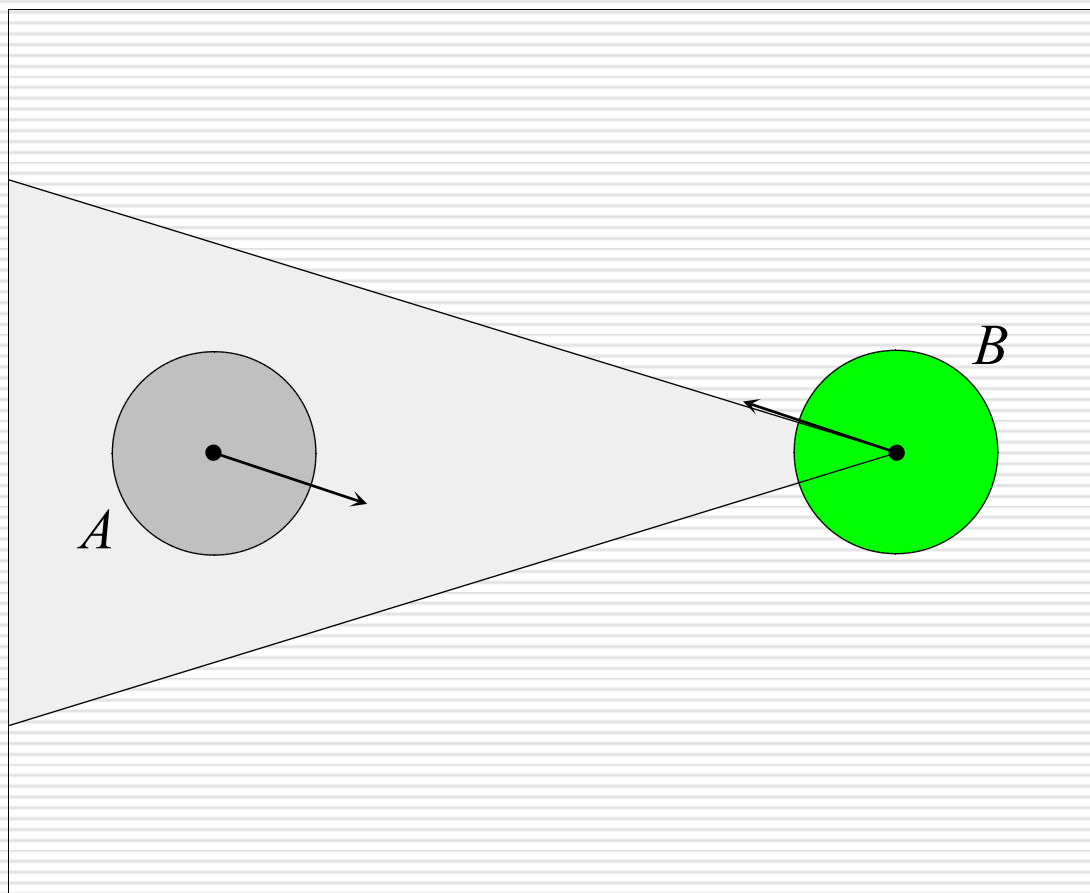
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡?



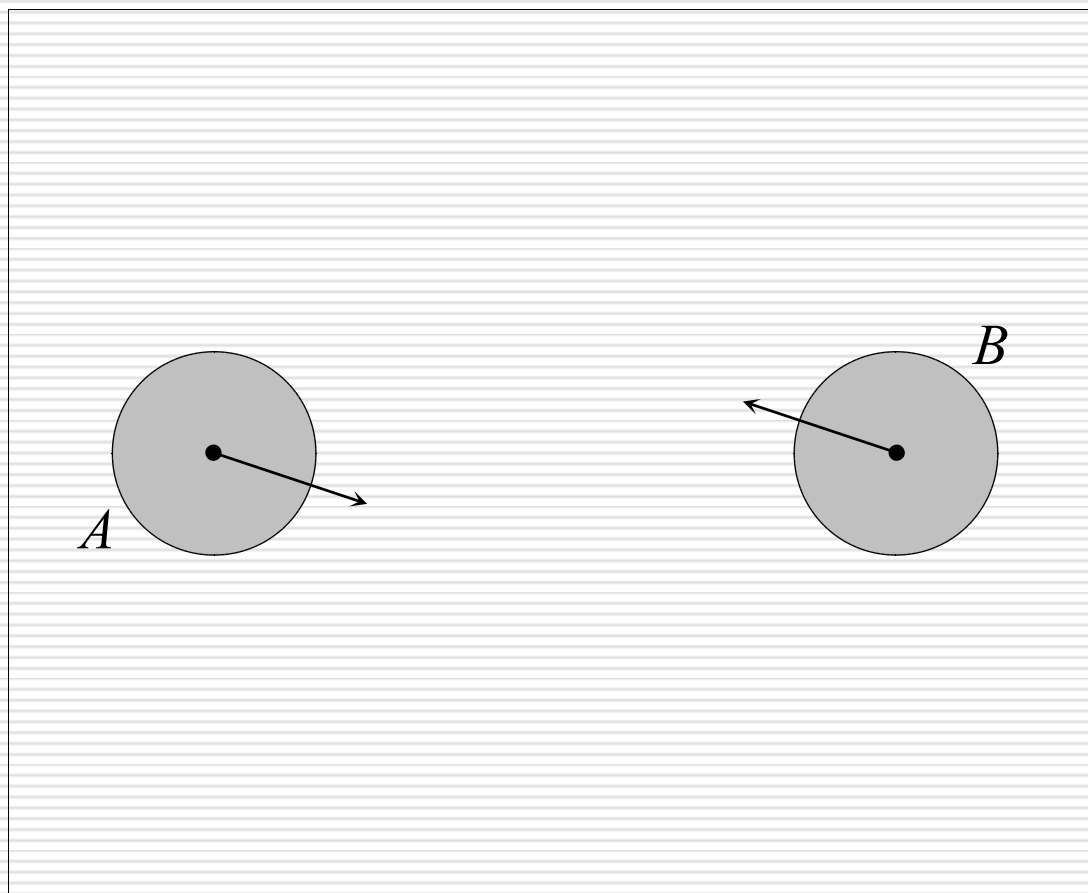
例子：以相对方向运动的两个智能体

振荡?



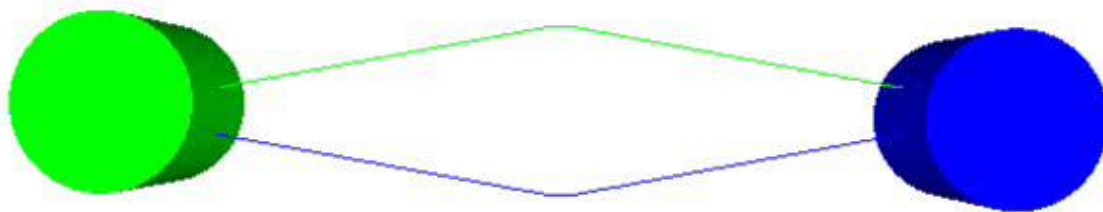
例子：以相对方向运动的两个智能体

没有振荡



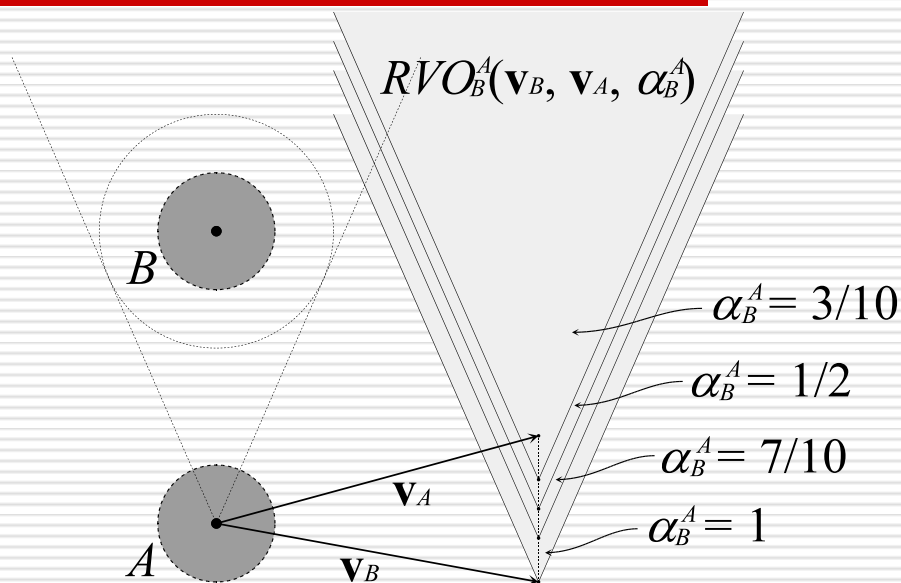
例子：以相对方向运动的两个智能体

没有振荡而且是安全的



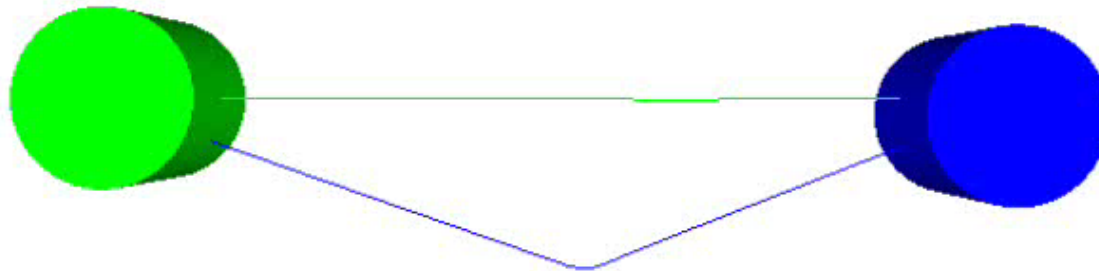
例子：以相对方向运动的两个智能体

广义相互速度障碍物(RVOs)



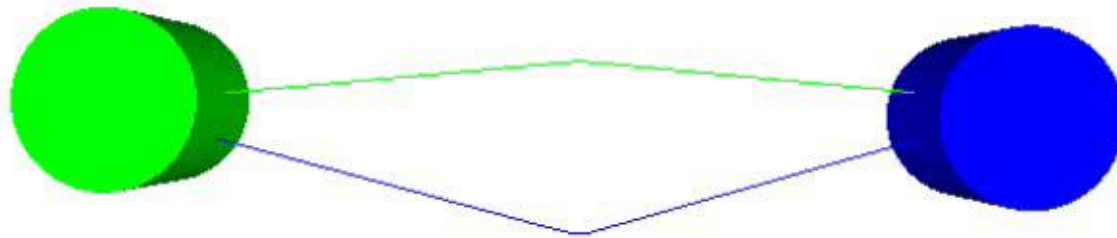
- 不采用50%-50% ， 而采用其它分布。
- 参数 α ; $\alpha \rightarrow 0$: A没有努力; $\alpha \rightarrow 1$: A尽力
- $RVO_B^A(\mathbf{v}_B, \mathbf{v}_A, \alpha) = \{\mathbf{v}'_A \mid (1/\alpha)\mathbf{v}'_A + (1 - 1/\alpha)\mathbf{v}_A \in VO_B^A(\mathbf{v}_B)\}$

广义相互速度障碍物(RVOs)



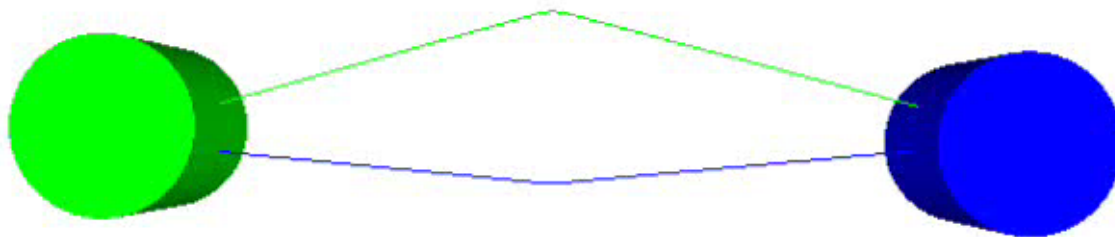
0% - 100%

广义相互速度障碍物(RVOs)



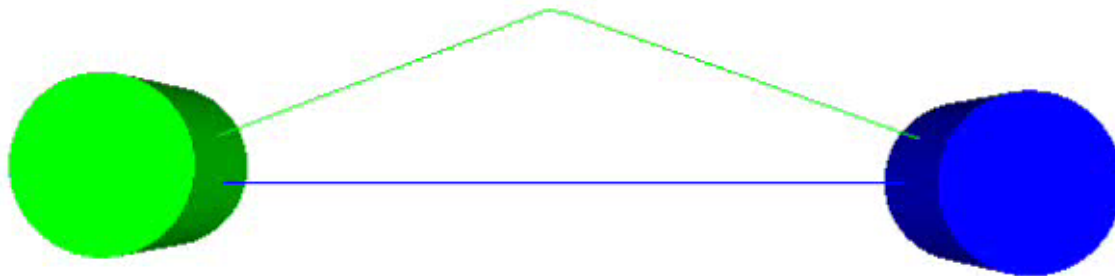
25% - 75%

广义相互速度障碍物(RVOs)



75% - 25%

广义相互速度障碍物(RVOs)

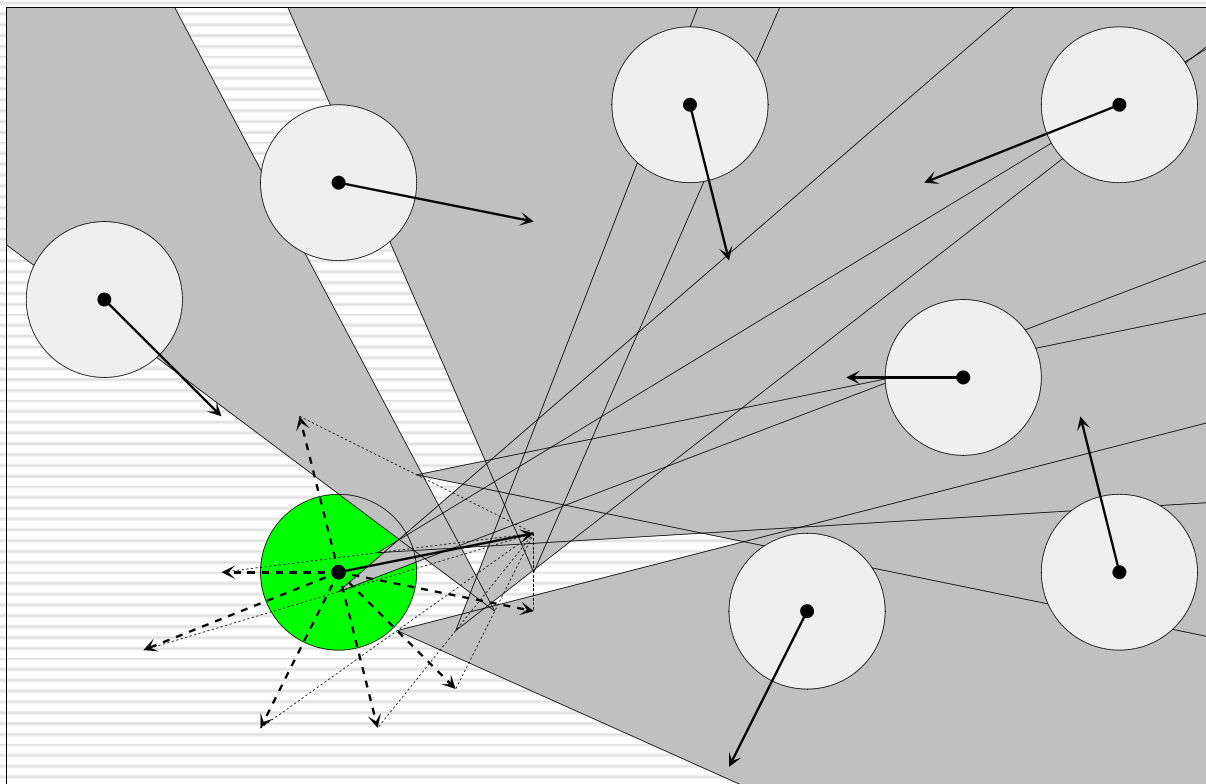


100% - 0%

多智能体的导航

- 设有 N 个智能体: A_1, \dots, A_N , 它们的位置为 p_1, \dots, p_N , 速度为 v_1, \dots, v_N , 首选的速度为 $v_1^{\text{pref}}, \dots, v_N^{\text{pref}}$, 目标位置为 g_1, \dots, g_N
- 时间步长为 Δt
- 在每个时间步, 对每个智能体:
 - 计算首选的速度
 - 选择新速度
 - 根据新的速度更新智能体的位置

选择新的速度



- 在相互速度障碍物的并集的外面，最接近首选的速度

选择新的速度

- 环境可能变得很拥挤：没有有效的速度
- 解决方法：在RVO中选择速度，但对下面这些参数进行惩罚：
 - 预计到碰撞的时间
 - 到首选速度的距离
- 以最小的惩罚选择速度

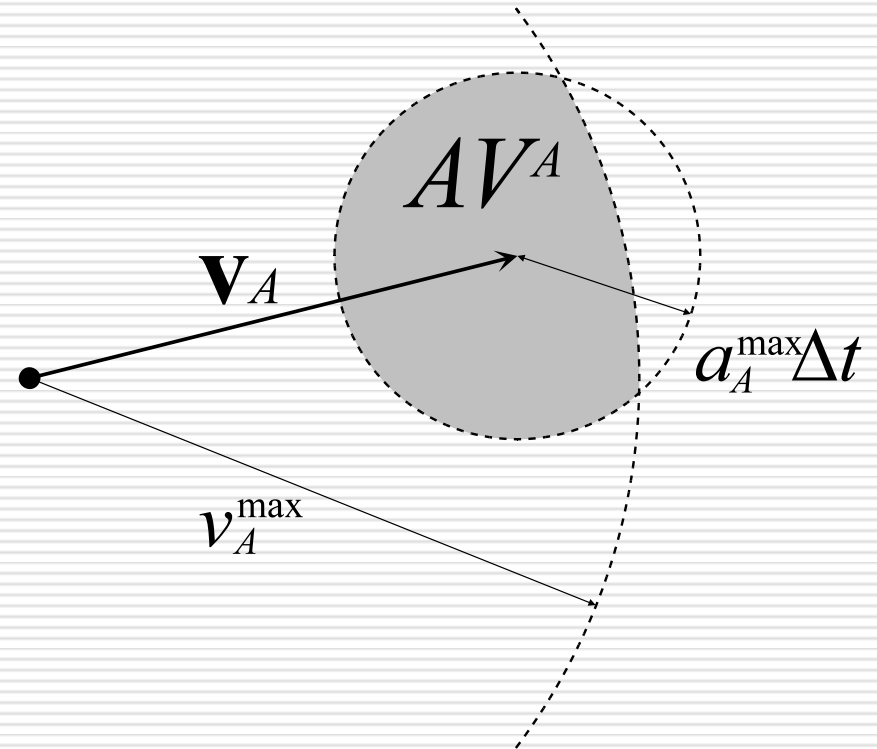
真实性

□ 动力学约束

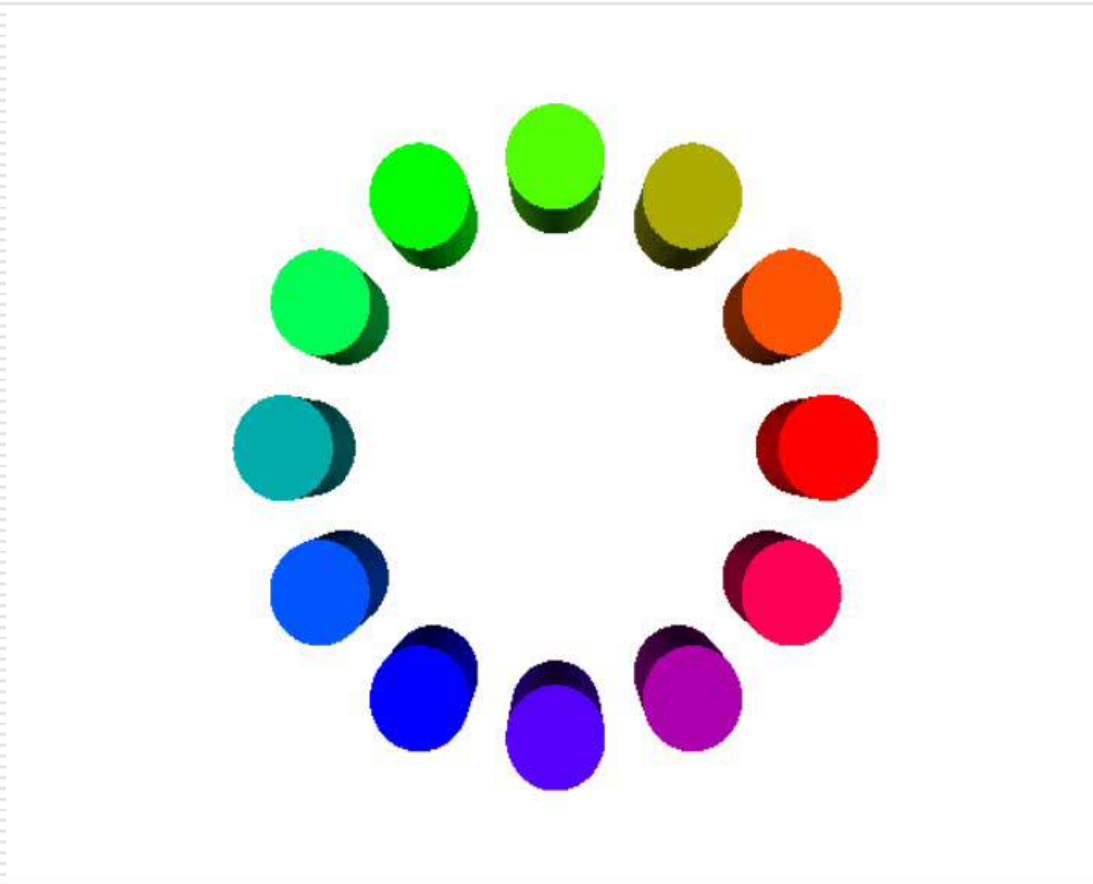
- 最大速度
- 最大加速度
- 其它...

□ 邻居

- 圆形邻居
- 可见的邻居区域...

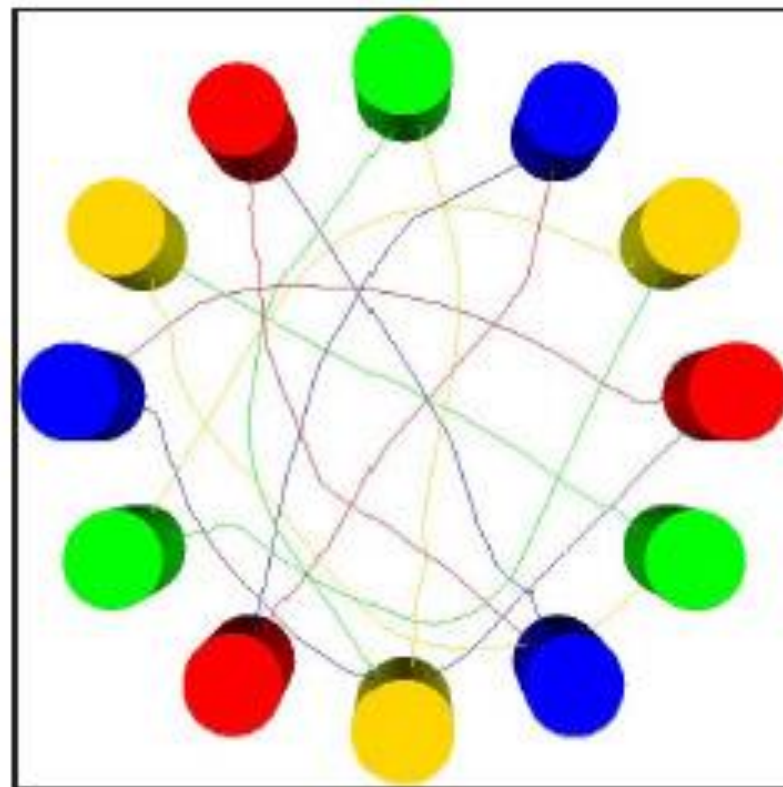
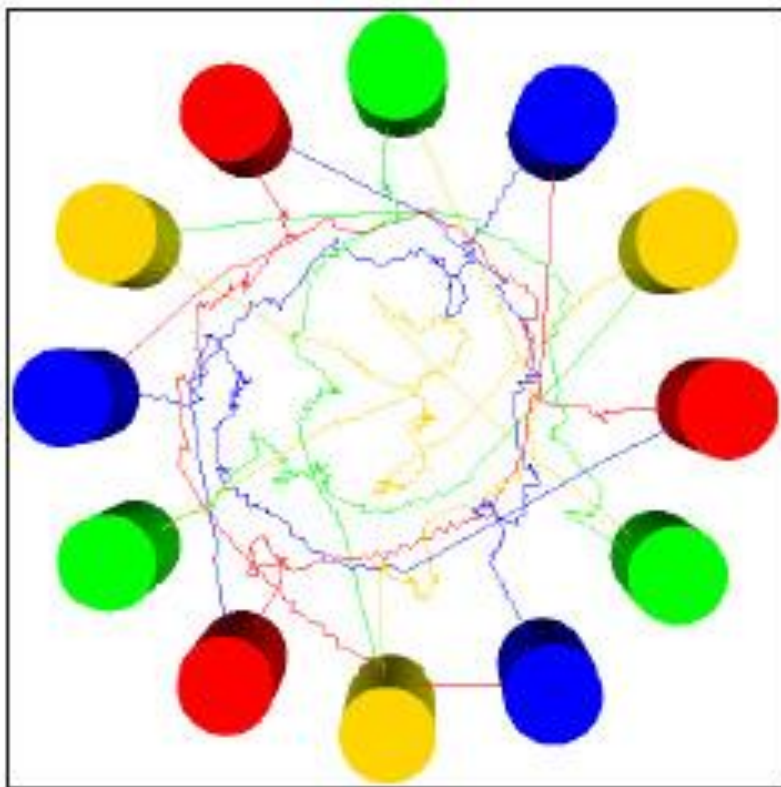


实验

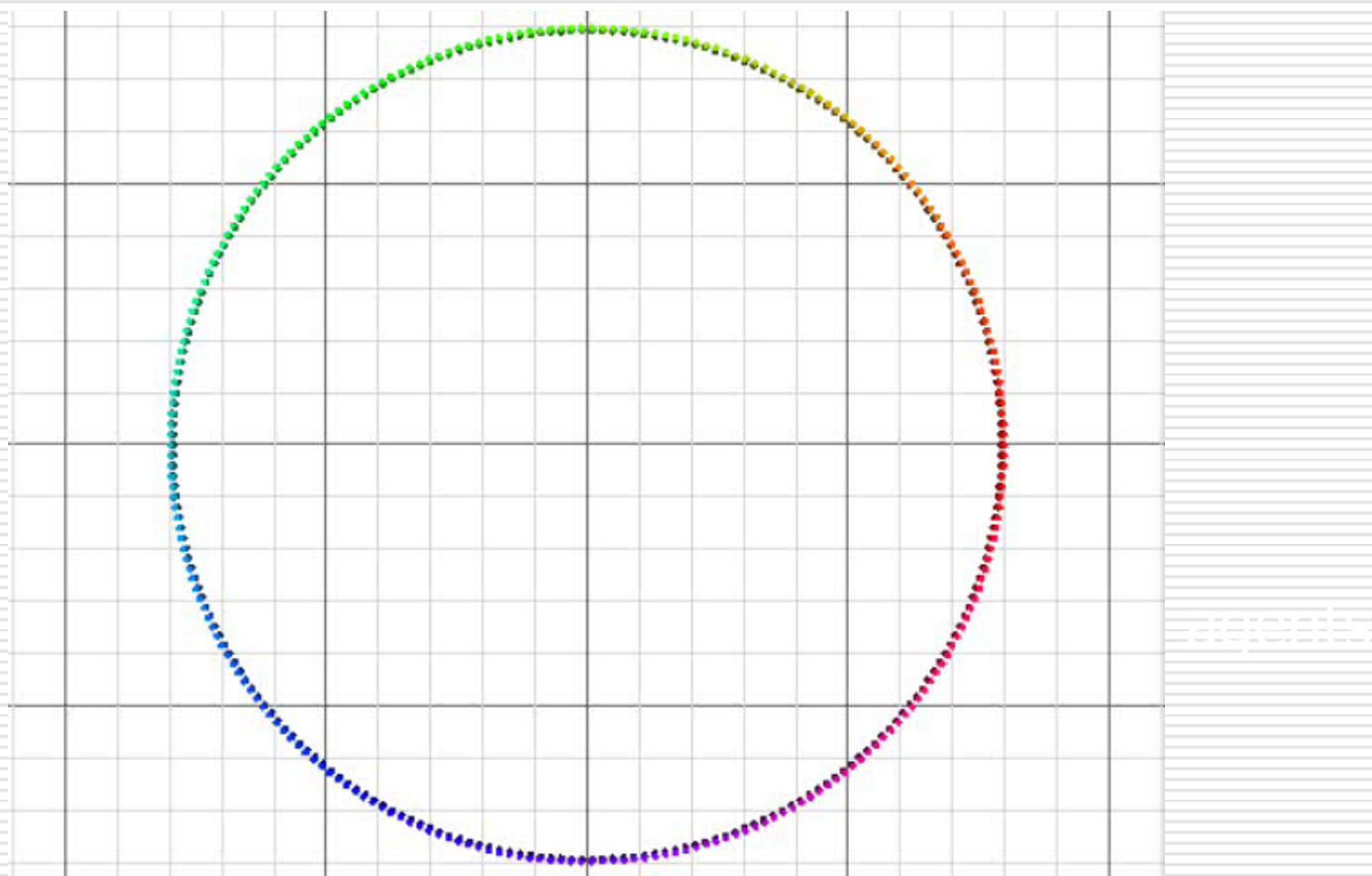


园: 每个智能体运动到园的正对面

VO和RVO的对比

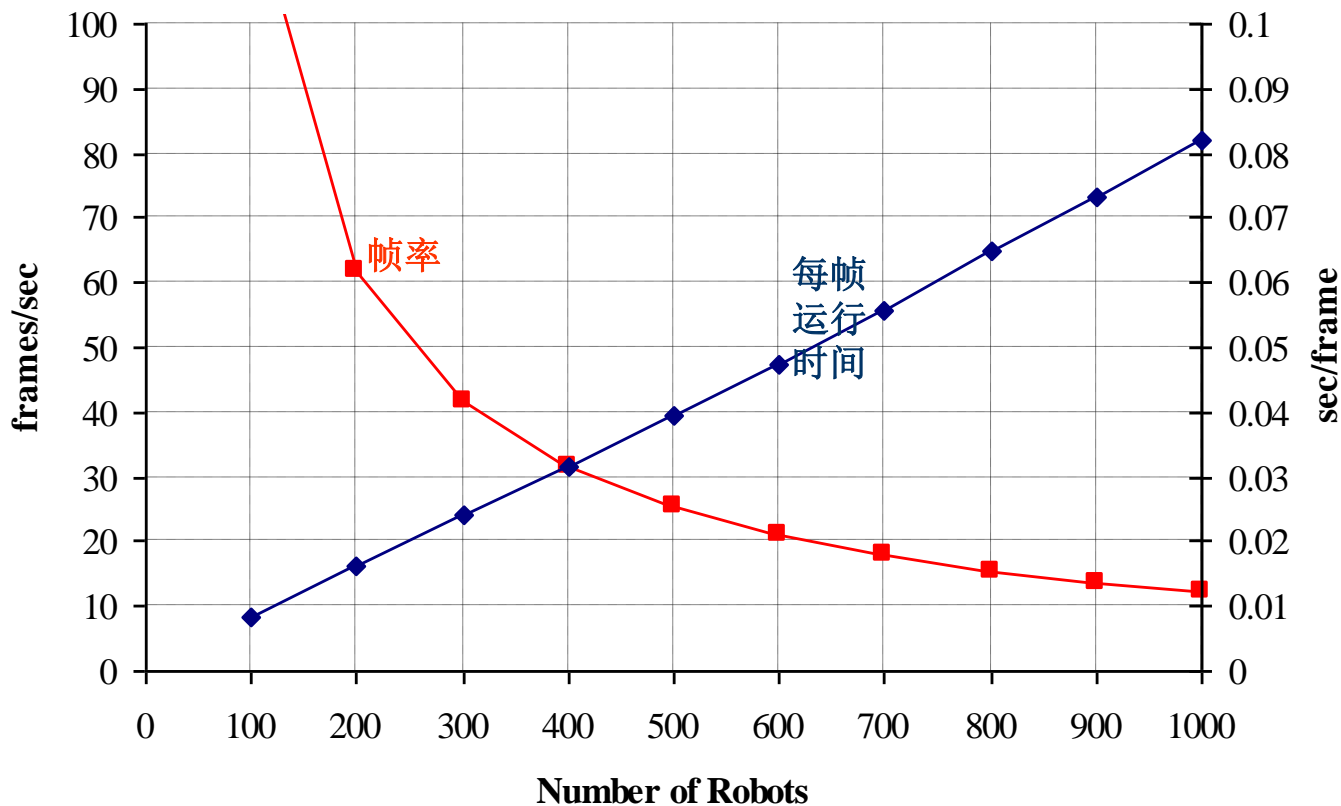


实验

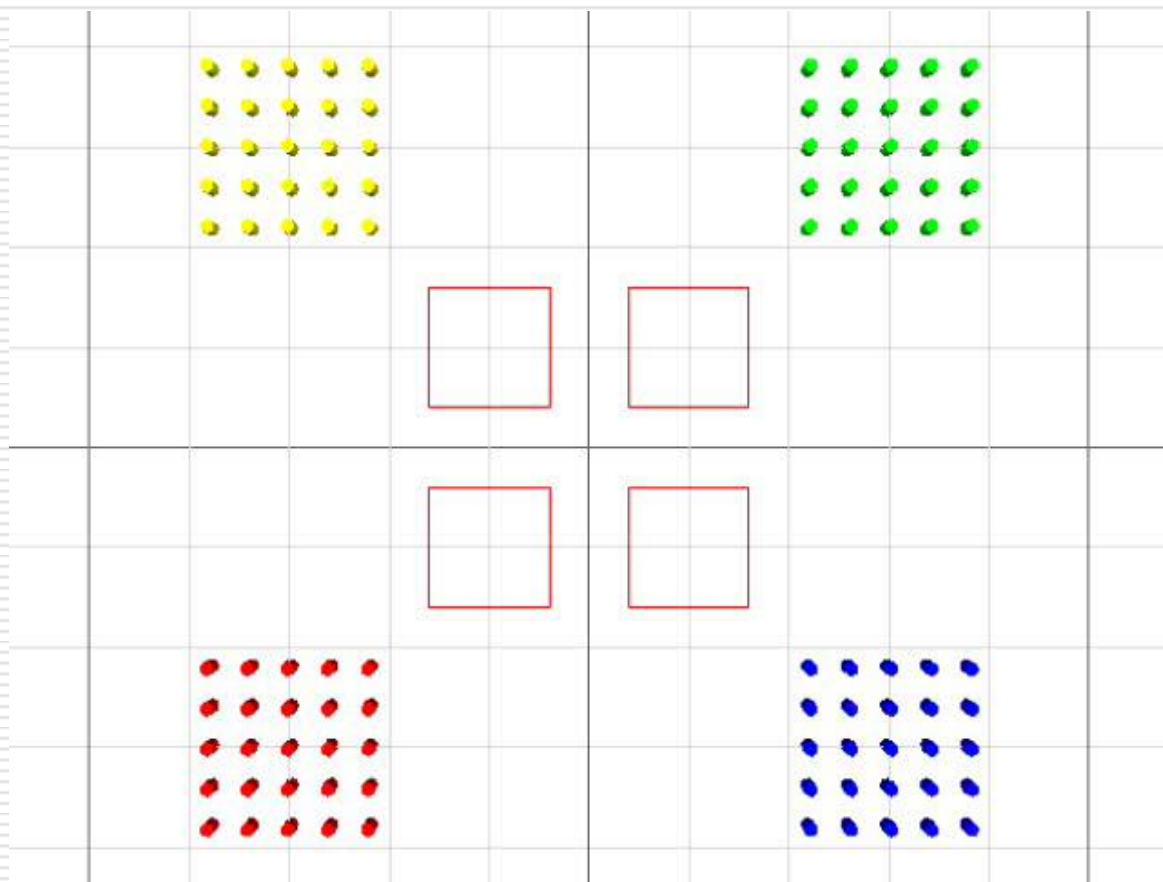


一个园形的例子: 每个智能体(agent)走到园的正对面位置

实验

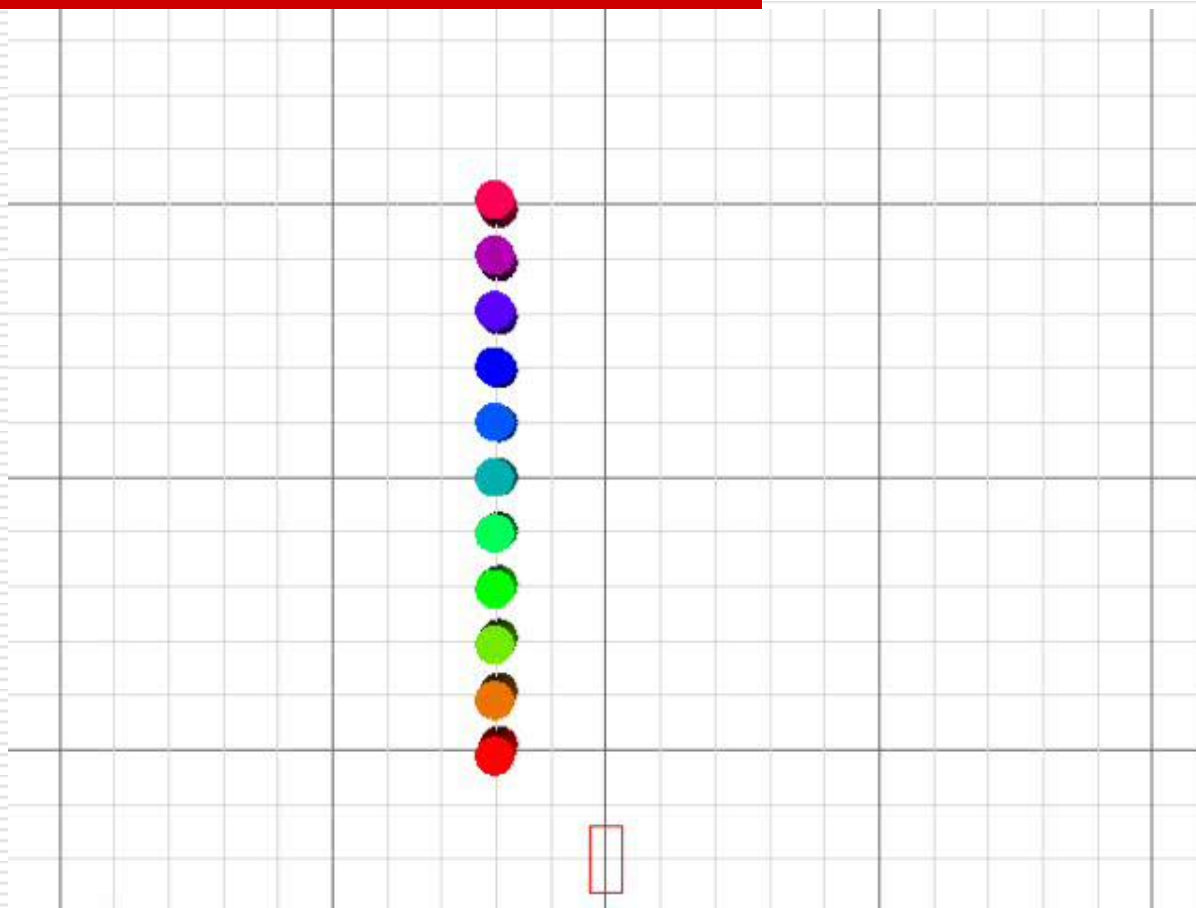


实验



静态障碍物: 窄的通道

实验

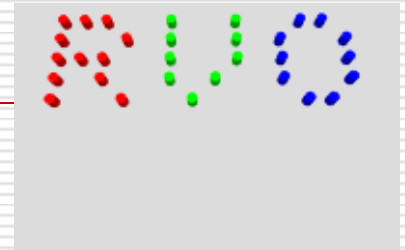


高速运动障碍物：小汽车

总结

- 针对多智能体导航的一种功能强大而且有效的局部碰撞避免方法，实现简单；
- 适合于大规模的人群；

RVO2 Library: Reciprocal Collision Avoidance for Real-Time Multi-Agent Simulation



- ❑ 免费下载网页: <http://gamma.cs.unc.edu/RVO2/>
- ❑ **Latest Versions**
 - RVO2 Library and RVO2-3D Library are **open-source software** as of May 4, 2016.
 - RVO2 Library for C++ v2.0.1, released October 26, 2010.
 - RVO2-3D Library for C++ v1.0, released May 13, 2011.
 - RVO2 Library for C# v2.0, released January 10, 2011.
- ❑ **Introduction**
 - Simulations of multiple agents sharing a common workspace have gained increasing attention recently, for various purposes such as crowd simulation, navigating a team of mobile robots, video games, studying natural flocking behavior, traffic engineering, architecture and design, emergency training simulations, etc. We present an algorithm for interactive navigation and planning of large numbers of agents in two-dimensional (crowded) environments. At runtime, each agent senses the environment independently and computes a collision-free motion based on the [optimal reciprocal collision avoidance](#) (ORCA) formalism. Our algorithm ensures that each agent exhibits no **oscillatory** behaviors.
 - *RVO2 Library for C++* is an implementation of our algorithm. It has a simple API for third-party applications. The user specifies static obstacles, agents, and the preferred velocities of the agents. The simulation is performed step-by-step via a simple call to the library. The simulation is fully accessible and manipulable during runtime. The library exploits multiple processors if they are available using [OpenMP](#) for efficient parallelization of the simulation.
 - *RVO2-3D Library for C++* is an implementation of our algorithm for applications in three dimensions without static obstacles. A C# implementation of our algorithm by Slan is available from rvo-unity.chezslan.fr. We are actively developing implementations in C and Java for future release.