



驾驶员行为模型共享对交通安全的提升

Improving Driving Safety by Sharing Driver Behavior Models

江智浩

上海科技大学
信息科学与技术学院

上海科技大学信息学院 Cyber-Physical Systems (CPS) Lab

- 基于模型的软件开发与验证
- 应用领域
 - 智能医疗仪器软件
 - 车联网应用软件



演讲结构

- 研究动机：如何利用车联网在复杂驾驶环境中提升交通安全？
- 解决方案：在联网车辆间分享驾驶员行为模型
- 研究路线：由虚拟到现实
- 前期工作：虚拟简单驾驶环境下的可行性验证

车辆驾驶是一项社会活动

- 仅了解周边交通参与者的当前状态（位置、速度等）不足以保证行车安全
- 其他交通参与者（车辆、行人）大多为陌生人，其行为很难预测



科技进步提升交通安全

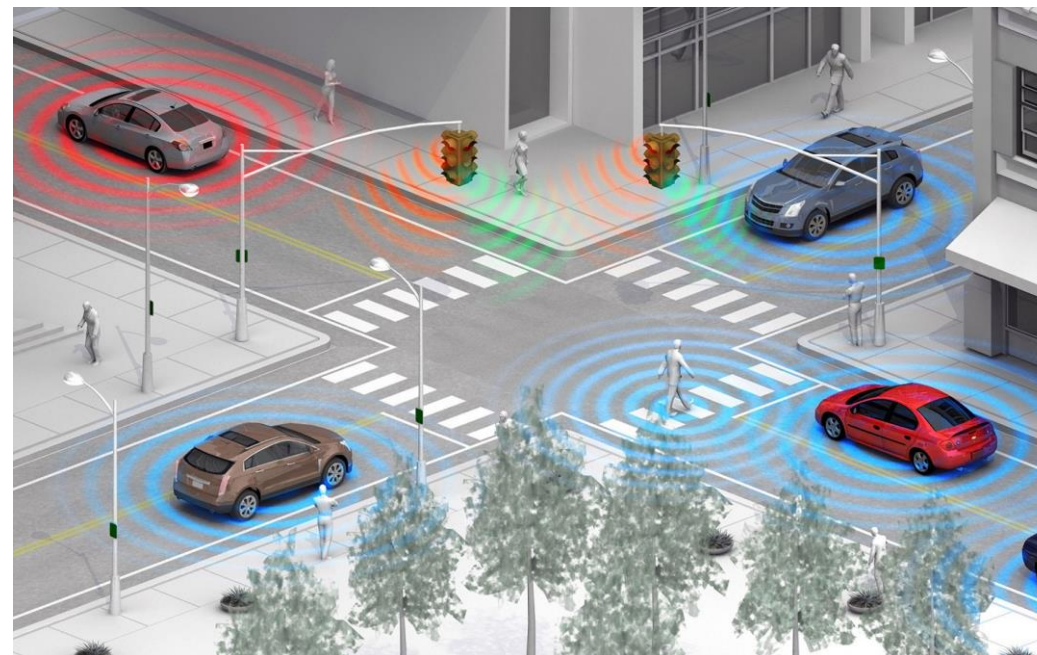
高级驾驶辅助系统(ADAS)

- 提升车辆对环境状况的把控



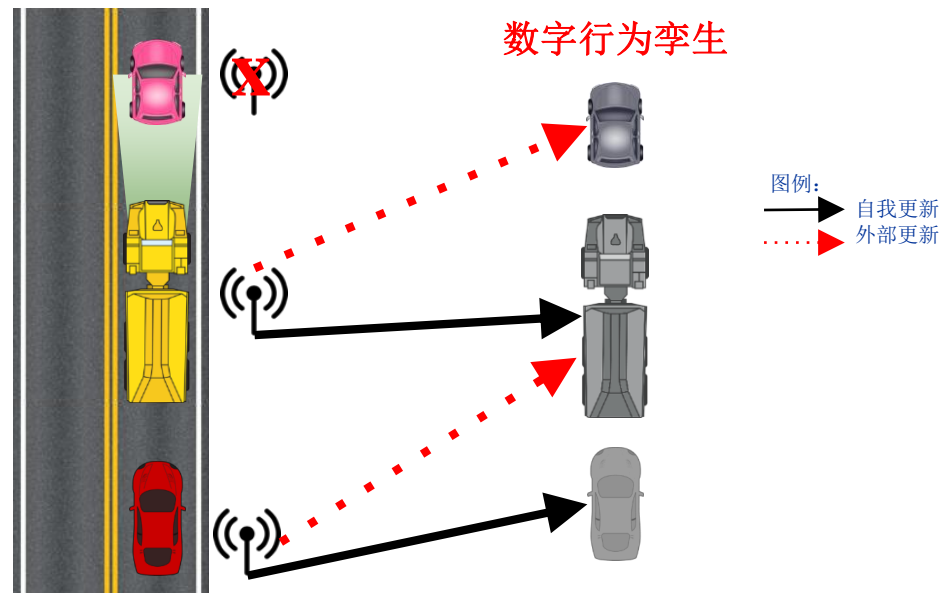
车联网(V2X)

- 共享驾驶环境信息

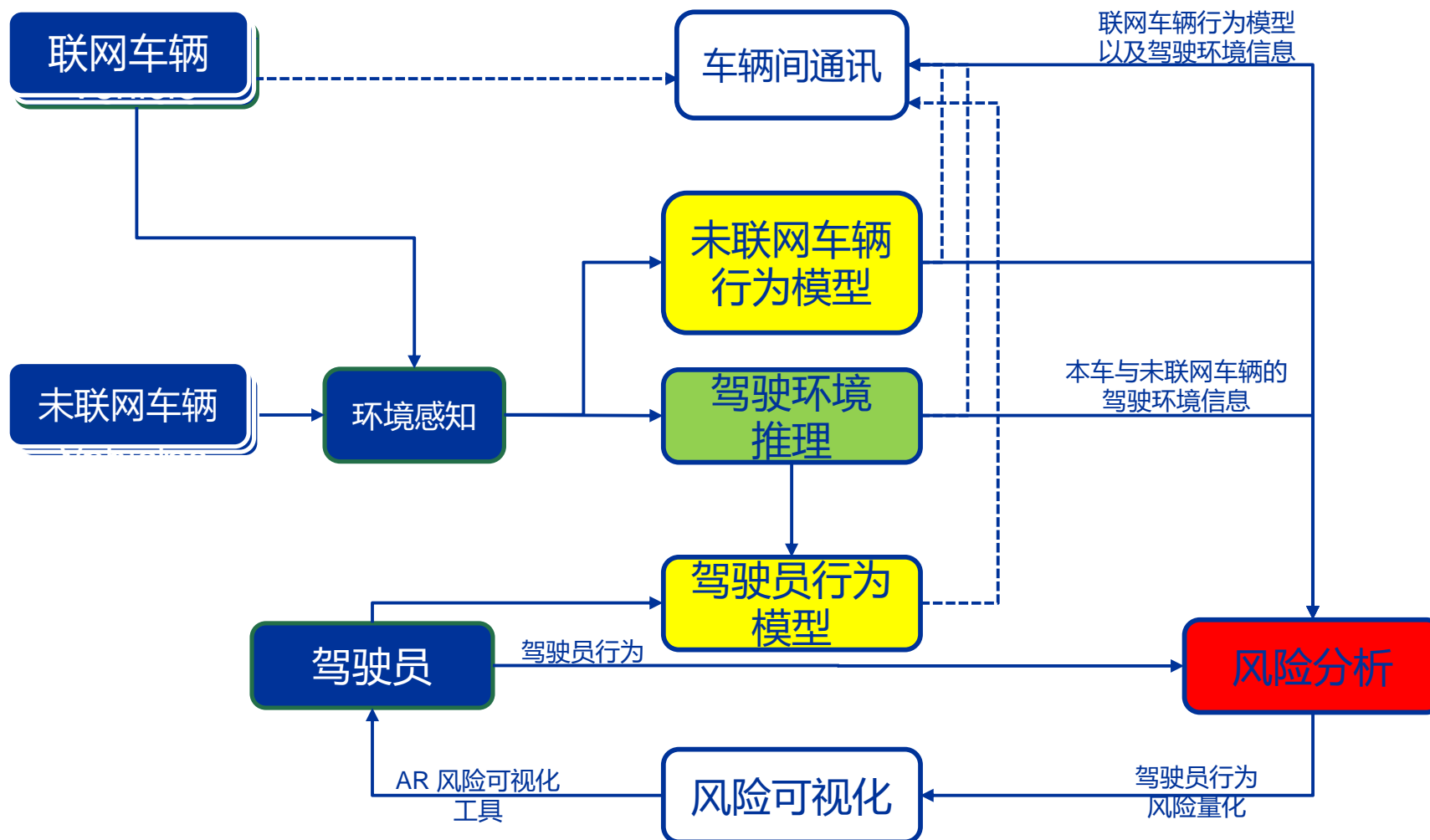


数字行为孪生 (Digital Behavioral Twin)

- 每个驾驶员在云端都有一个驾驶员行为模型 (数字行为孪生)
- 利用驾驶员历史行为观测更新驾驶员行为模型
- 在联网车辆间共享, 辅助车辆行为判断以及碰撞风险预测



数字行为孪生系统架构





研究问题

- 根据当前驾驶环境预测驾驶员行为
 - 使用决策树建立驾驶员行为数字孪生
- 根据当前驾驶环境以及预测附近车辆的行为，预测碰撞风险
 - 使用Markov Decision Process对当前驾驶环境建模并预测碰撞概率

技术路线

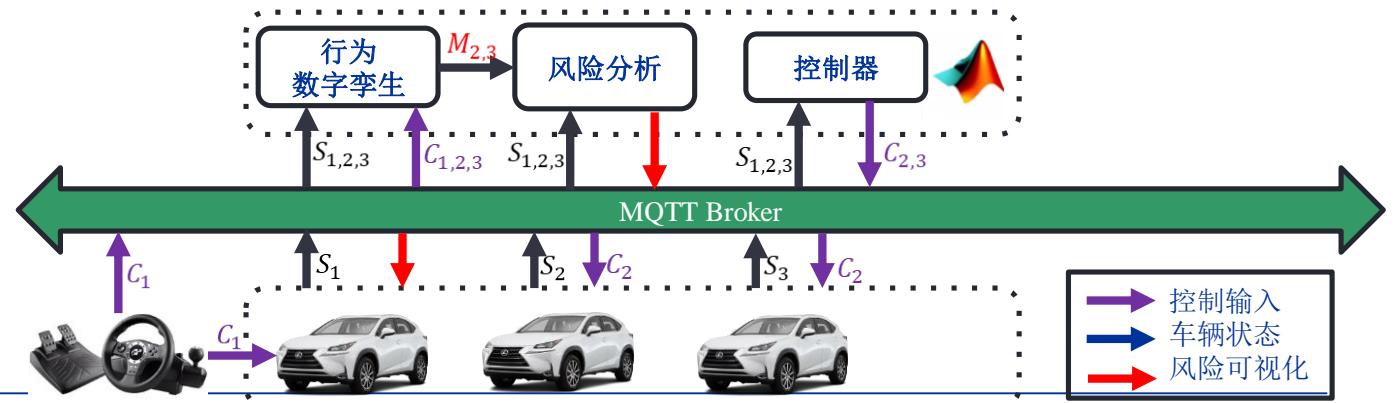
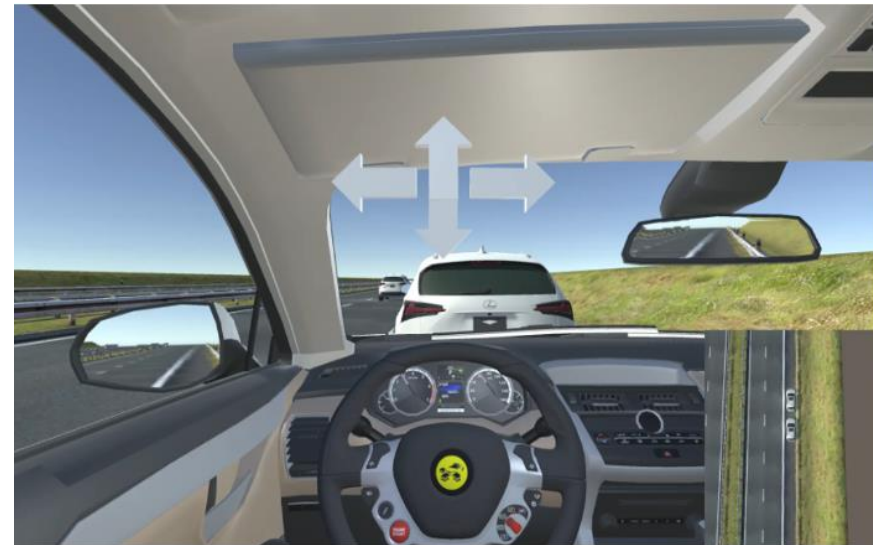
- 驾驶环境
 - 虚拟->真实
 - 简单->复杂
 - 全信息->有限信息
- 驾驶员行为
 - 虚拟->真实
 - 确定->不确定
 - 基于规则->真实

前期工作

- 发表论文
 - “Digital Behavioral Twins for Safe Connected Cars” ACM/IEEE 21st International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems (MODELS), 144-153, 2018
- 在美国申请专利
 - 丰田信息技术研究中心 (Toyota InfoTechnology Center USA)
 - 16/007,693
 - 16/007,796

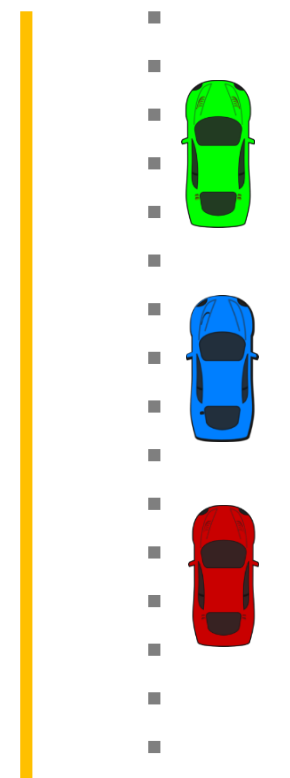
虚拟驾驶环境开发

- 仿真驾驶环境
 - 物理引擎
 - 驾驶环境可视化
- MATLAB
 - AI车辆控制算法
 - 行为数字孪生更新
 - 风险分析
- Mosquitto MQTT broker
 - 数据链



简单驾驶环境测试

- 单向2车道高速路
- 3辆车
 - 1辆人工驾驶，2辆按设定模式行动
- 设定模式行为
 - 匀速行驶
 - 保持车距
 - 变换车道
- 设定模式策略
 - 跟车策略
 - 让车策略
 - 超车策略



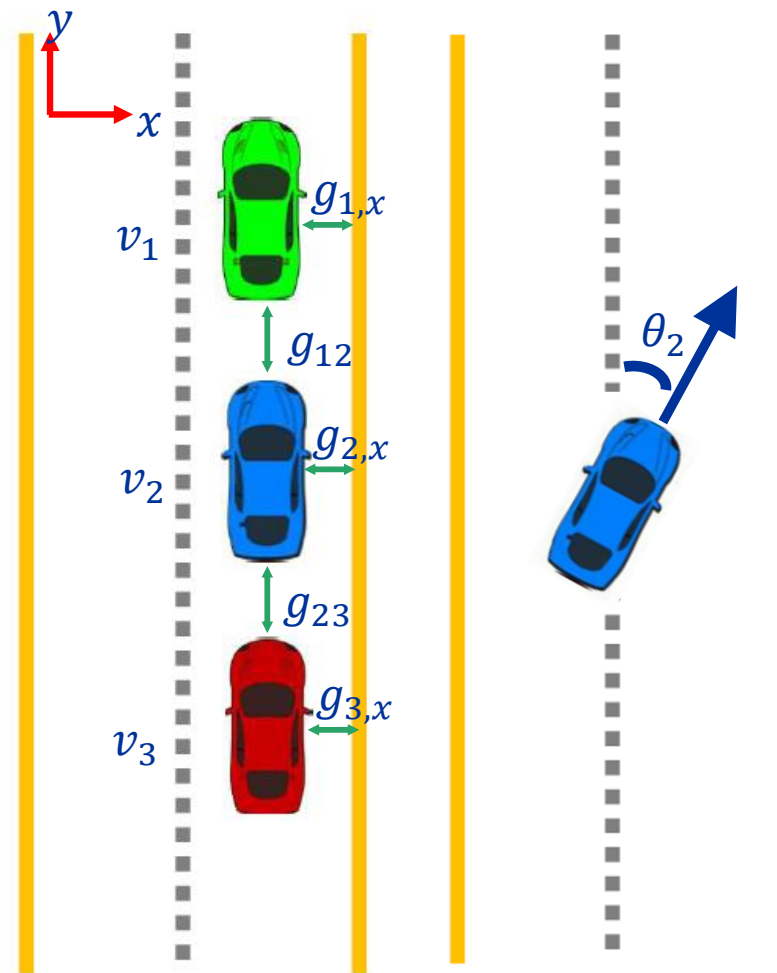
学习驾驶员行为

• 车辆行为预测

- 车辆驾驶环境: $[g_{1,x}, g_{2,x}, g_{3,x}, v_1, v_2, v_3, g_{12}, g_{13}, \theta_1, \theta_2, \theta_3]$
- 车辆行为: 从1到5
 1. 加速
 2. 减速
 3. 保持速度
 4. 左换道
 5. 右换道

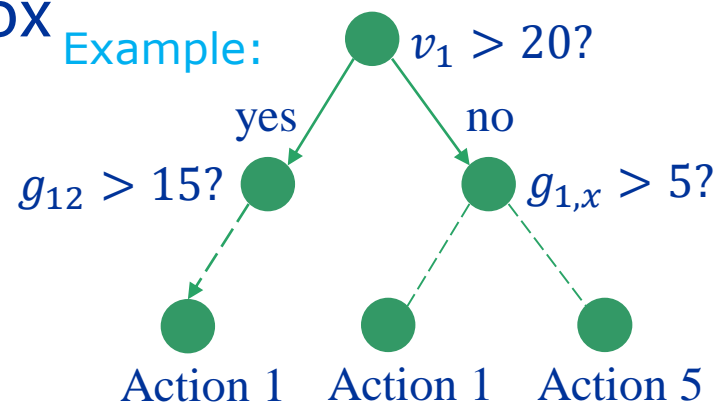
• 虚拟环境中的数据采集

- 2、3号车使用统一的设定模式运行并交互
- 设定不同的初始状态
- 1号车使用人工驾驶增加驾驶环境多样性



学习驾驶员行为

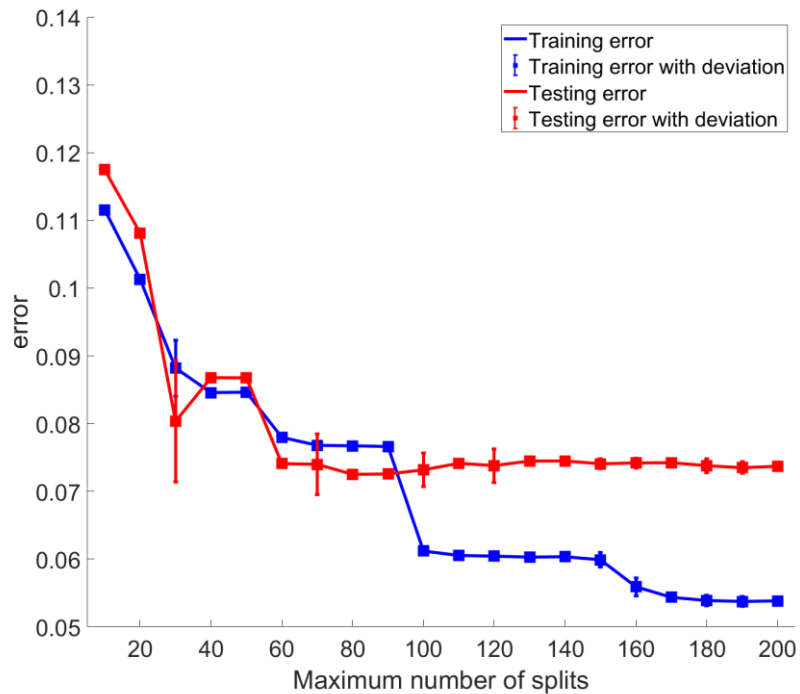
- 使用决策树进行分类
 - Statistics and Machine Learning Toolbox
 - `tree = fitctree(Tbl,ResponseVarName)`
 - `label = predict(Mdl,X)`
- 使用决策树的原因：
 - 易解读
 - 适合对人类决策进行建模



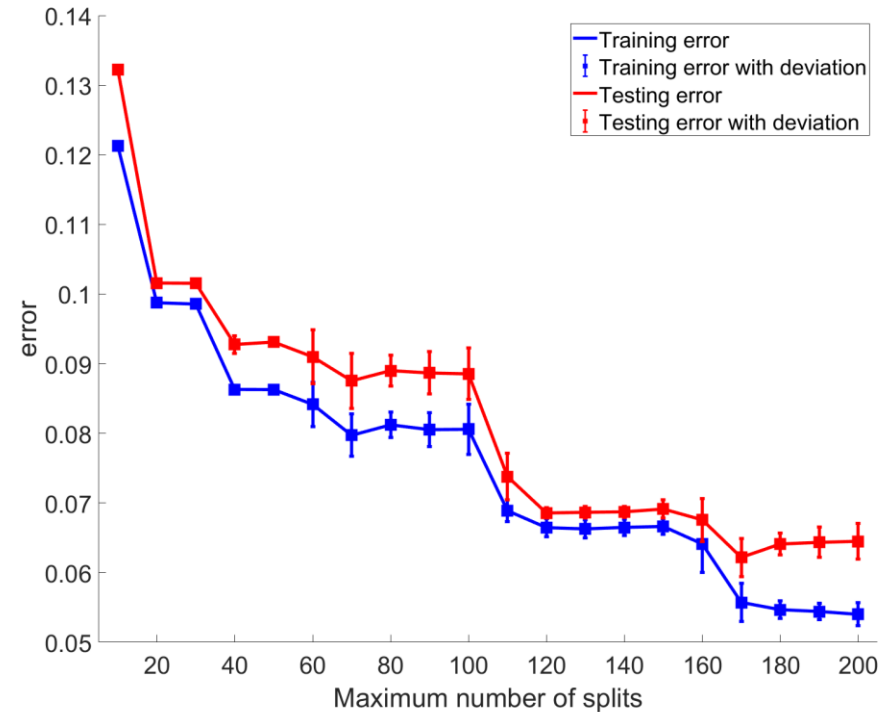
学习驾驶员行为

• 分类依据选择

- Cross entropy: 最大信息量



- Gini index: 最低错误率



学习驾驶员行为

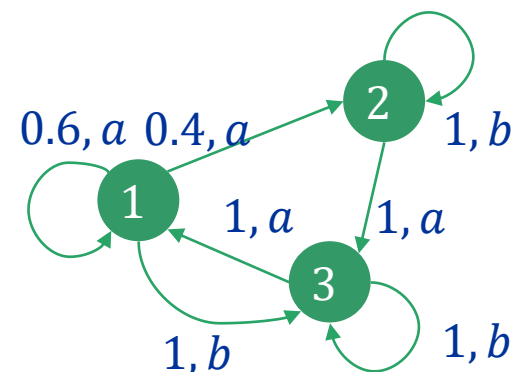
- 在虚拟驾驶环境中预测AI驾驶员行为



使用MDP进行驾驶环境建模

- Markov Decision Process (MDP)
 - S : 状态空间
 - A : 行为空间
 - $P: S \times A \times S \rightarrow [0,1]$ transition probability
 - E.g. $\mathbb{P}(2 | 1, a) = P(1,2, a) = 0.4$
- 在行为数字孪生框架下
 - **假设: 全信息**
 - 状态空间为所有可能出现的驾驶环境
 - 行为空间为所有可能出现的驾驶员行为组合
- MDP 驾驶环境模型
 - 集中式
 - 分布式

Example: $S = \{1, 2, 3\}, A = \{1, 2\}$



集中式驾驶环境模型

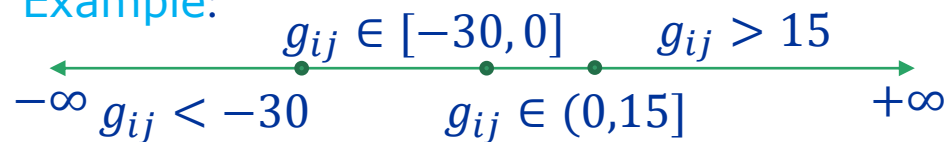
• 定义行为空间

- 单个车辆行为: $A_1 = A_2 = A_3 = \{\text{左变道、右变道、加速、减速、保持速度}\}$
- 行为组合: $A = A_1 \times A_2 \times A_3$

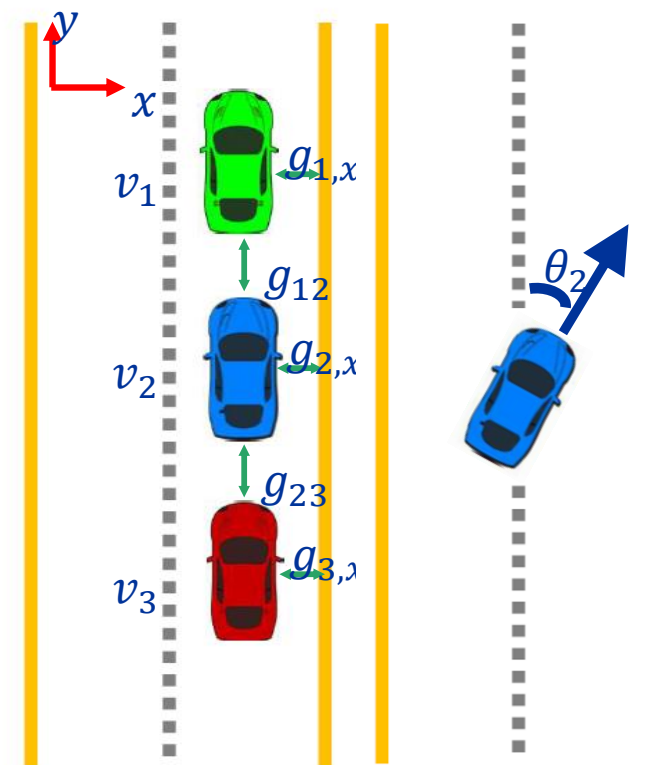
• 定义状态空间 – 对特征值进行量化

- 将车辆间距 g_{ij} 量化为 k_g 个值

Example:



- 将速度差量化为3或5个值
- 将角度量化为3个值
- 将与右侧墙的间距量化为3个值

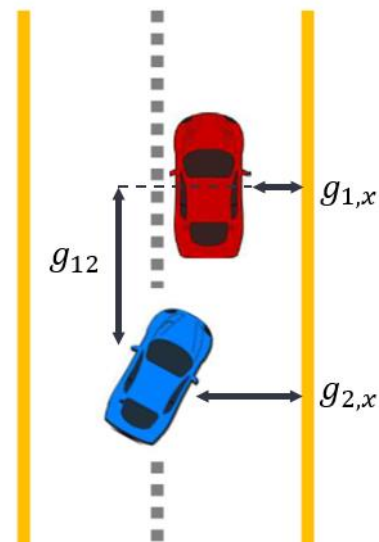


集中式驾驶环境模型

- **优点**
 - 模型完整性
- **缺点：状态空间尺寸过大**
 - 状态空间尺寸 = $3^3 \times k_g^3 \times 5^3 \times 3^3$
 - 当 $k_g = 3$ 时, 状态空间尺寸为 2460375
 - 行为空间尺寸 = 5^3
 - 概率转移矩阵大小 $> 7 \times 10^{14}$
- 计算复杂
- 数据不足

分布式驾驶环境模型

- 采用原因
 - 可扩展性强
 - 可能与车辆产生碰撞的范围有限
- 分布式驾驶环境模型
 - 仅保留一对车辆相关的信息
 - 车辆间距: g_{12}
 - 与右侧墙间距: $g_{1,x}, g_{2,x}$
 - 车辆角度: θ_1, θ_2
 - 速度差: v_{diff}
- 行为空间
 - 两个车辆的行为组合



状态抽象

- 抽象的粒度对驾驶环境模型的影响

Example - 细粒度



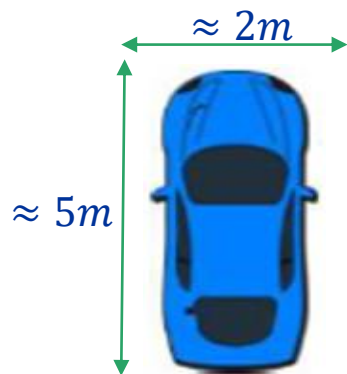
状态空间过大

Example - 粗粒度

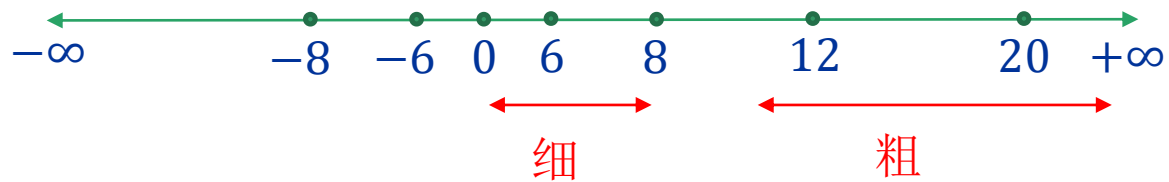


预测错误率高

- 非均质抽象



Example:



转移矩阵学习

- P为一个三维矩阵 $s \times s' \times a$
 - s 为驾驶环境模型的当前状态
 - s' 为驾驶环境模型1秒后的状态
 - a 为两车的行为
- 相隔一秒的数据中如出现 (s_1, s_2) , 则 $P(1,2)++$
- 数据遍历后对P的行和列进行normalization

风险分析

- 碰撞概率预测:
 - 假设 c 为状态空间中两辆车碰撞的状态
 - 预测本车做出某种行为时产生碰撞的概率
- 有驾驶员行为模型共享
 - 已知本车与其他车辆的分布式环境模型以及其他车辆行为
 - 针对本车所有可能行为, 计算 $\mathbb{P}(c \mid a_1, s_1, a_2, s_2)$
- 无驾驶员行为模型共享
 - $\mathbb{P}(c \mid a_1, s_1) = \sum_{a_2, s_2} P(s, a, c) \mathbb{P}(a_2, s_2 \mid a_1, s_1)$

应用结果评估

- 模型训练

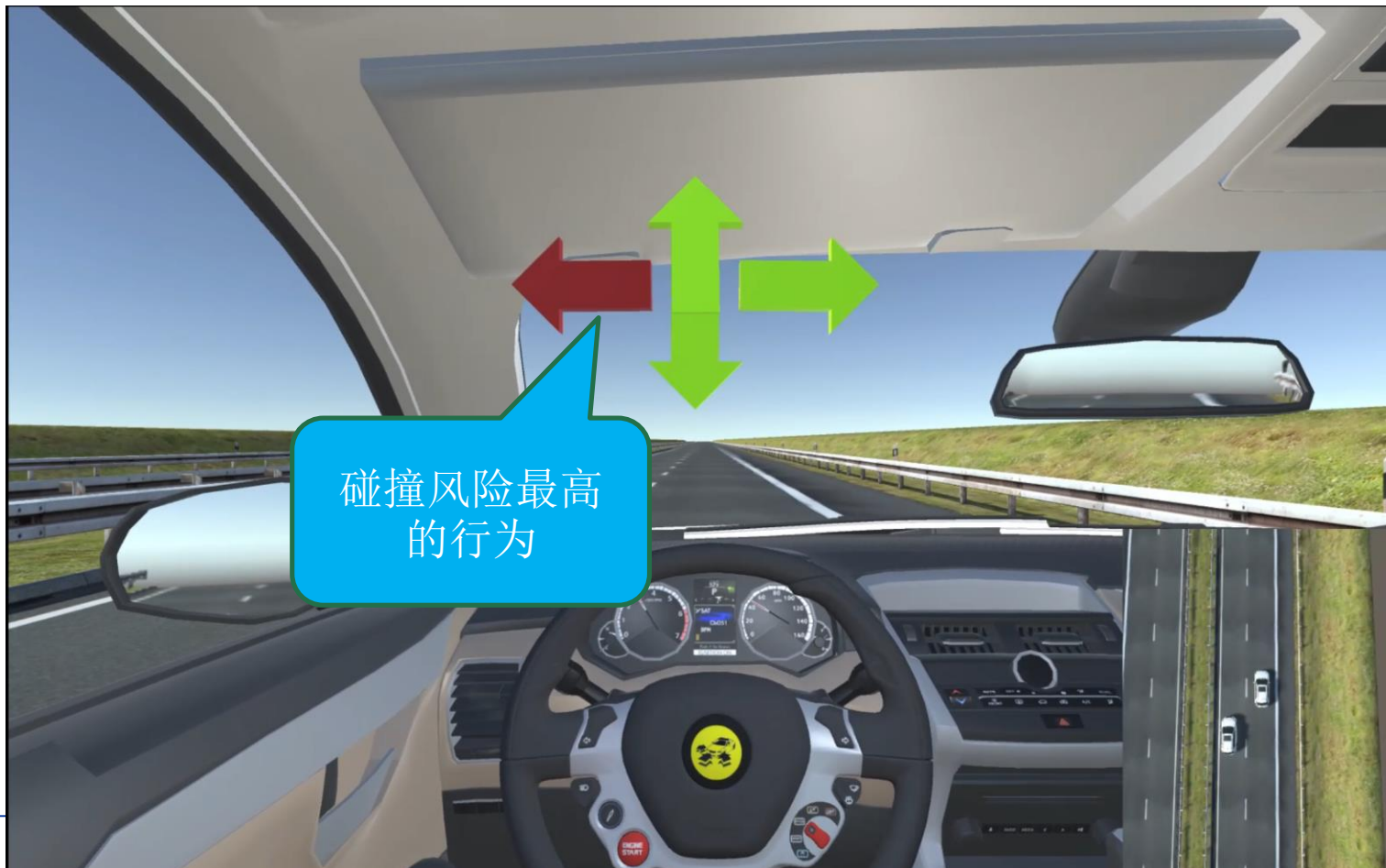
- 不同初始状态下进行3000次仿真
- 每次仿真时间为1秒
- 转移矩阵
 - $1944 \times 1944 \times 25$
 - 0.18% 覆盖率
- 利用物理定律清除不可行的状态转换

- 模型测试

- 全新初始状态下进行784次仿真
- 无干预情况下出现332次碰撞
- 干预规则
 - 如1号车初始设定的行为碰撞概率最高, 将该行为改为“保持速度”
 - If $a1 == \text{argmax}(P(c))$, $a1 = 1$
- 剩余83次碰撞 (极端初始条件)

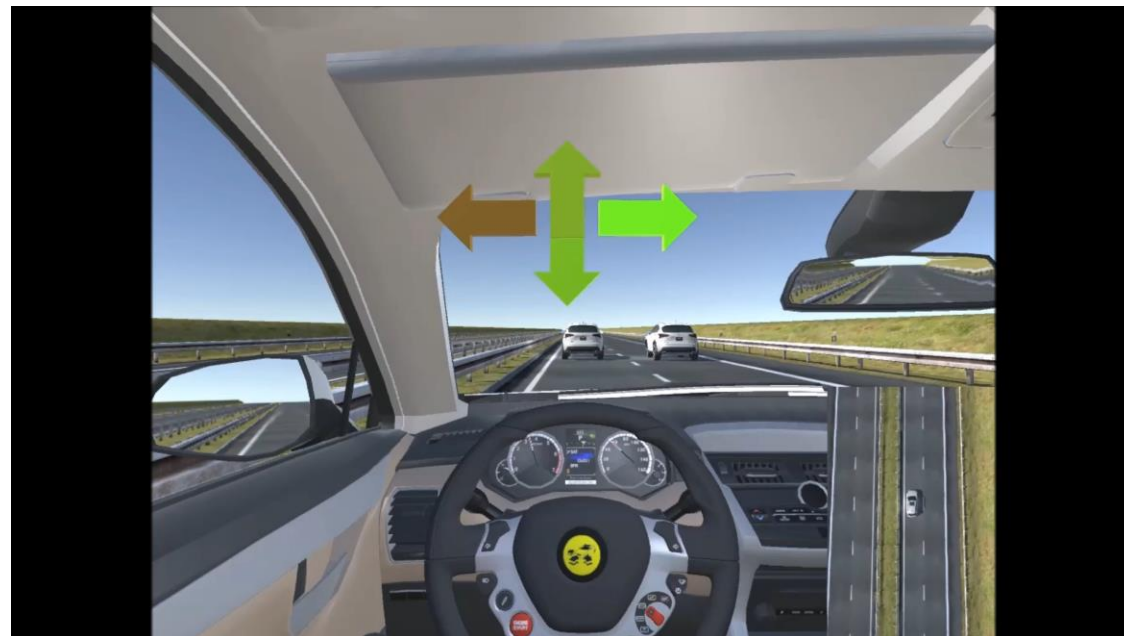
风险可视化

- 对驾驶员高风险的行为进行警示



正在进行的工作

- 完整版评估: 结合行为预测与碰撞预测
- 拓展性: 复杂驾驶环境
- 真实性提升: 不完备的观测
 - 驾驶环境建模: Partially-Observable MDP (POMDP)
 - 驾驶环境推测: 如何消除歧义?





Thank you! Questions?
