

# 前 言

对于智能车辆来说，能灵活应对行驶过程中遇到的各种静态与动态障碍物并给出合理的通行决策是实现安全行驶的基本要求。当智能车辆面对静态障碍物时，通常只需要感知障碍物的位置并调整自身的运动轨迹，便可实现安全合理的避障决策。然而，在城市道路环境中，车辆通常需要面对多元复杂的动态交通参与者（如行人、非机动车与其他机动车辆等），简单的位置感知已不足以确保行驶安全。在此情景下，智能车辆需要具备正确识别交通参与者意图、预测其与主车的交互行为的能力，并能结合预测结果做出合理决策。因此，了解如何预测交互行为，并结合交互信息生成相应决策，对智能车辆的大规模应用和产业化具有重要的现实意义。

本书的前四章针对智能车辆行为识别与预测展开叙述。人类驾驶员在交通环境里，总是在不断判断周围车辆、行人或其他交通参与者的行为方式，从而做出相应的反应。智能车辆的行为识别与预测，就是智能车辆通过模型与算法来判断机动车驾驶员以及周围交通参与者的意图并预测其未

来时刻的运动轨迹。本书从两个方面介绍行为的识别与预测，分别是主车驾驶员和交通参与者。前者关注机动车驾驶员本身对车辆的操作；后者则以主车周围交通参与者为研究对象，对参与者与主车的交互行为进行识别与预测。

本书的后四章介绍智能车辆的行为决策技术。基于识别与预测的结果，智能车辆的行为决策主要关注如何帮助主车做出合理且安全的通行决策。例如，在车辆换道的过程中，需要考虑周围车辆的动态变化、当前环境是否拥堵、自身的行为是否会给其他车辆带来不便等因素，从而选择最佳的换道时间与换道轨迹。在本书中，我们从早期的基于规则的决策方法出发，一步步深入探讨随机过程、强化学习等决策方法，思考如何用更加智能的方法让智能车辆在给出通行决策的同时，也能像人类驾驶员一样思考。

本书旨在探索和展现当智能车辆面对复杂的城市交通环境时，如何理解环境并与交通参与者交互的手段与方法，为课题组形成较为系统的学习资料，方便后续研究；此外，本书可供从事智能交通系统、智能车辆、地面无人车辆及移动机器人等涉及行为预测与决策技术的研究者们参考。

北京理工大学智能车辆研究所研究团队自1990年开始研究无人驾驶车辆，其作为地面无人机动平台国防科技创新团队，以及无人车技术工业和信息化部重点实验室的重要组成团队，为本研究提供了大量的测试和支撑条件，感谢团队陈慧岩、熊光明、吴绍斌、席军强、翟涌、刘海鸥、胡宇辉等在本书相关工作中的付出；团队学科公司北理慧动在其多个产业化项目工作中应用相关成果，推动了成果的应用，为方法的改进提出了需求，公司技术负责人齐建永在无人车辆测试和数据采集过程中开展了大量工作，在此深表感谢。

此外，实验室研究生陈昕、陈雨青、崔格格、杜明明、龚乘、贺先祺、胡风青、侯耀东、曲舫兵、宋威龙、谭颖琦、徐优志、易扬天、尹旻、于洋、臧政、张哲雨、左寅初参与了部分章节的初稿写作和全书校

对,北京理工大学出版社的编辑在本书的出版过程中付出了大量心血,在此一并致谢。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目“智能车辆类人驾驶行为知识迁移原理与在线学习建模方法研究”(61703041)、“城区真实交通环境无人驾驶车辆关键技术与平台研究”(91420203)、“地面移动平台脑机混合操控基础理论与关键技术”(U19A2083)支持,还得到了国防基础研究项目“基于驾驶行为学习的决策规划与运动控制技术”支持,以及上海汽车基金项目“人类驾驶员城区环境下道路交叉口行驶的决策规划模型研究与应用”支持。

由于智能车辆交互行为预测与决策技术仍在不断发展中,加之作者水平与能力有限,书中难免存在不当之处,望广大读者批评指正。

# 目 录

<b>第 1 章 智能车辆行为识别、预测与决策概述</b> .....	1
1.1 智能车辆系统构成 .....	1
1.2 数据采集与处理 .....	4
1.3 驾驶行为识别与预测 .....	5
1.3.1 主车驾驶行为识别与预测 .....	6
1.3.2 交通参与者行为识别与预测 .....	7
1.4 智能车辆行为决策 .....	7
<b>第 2 章 数据采集系统与场景建模</b> .....	9
2.1 数据采集系统构成 .....	9
2.1.1 仿真传感器数据采集系统 .....	9
2.1.2 车载传感器数据采集系统 .....	10
2.1.3 路基传感器数据采集系统 .....	13

2.2	数据处理与特征提取 .....	14
2.2.1	车载传感器数据处理 .....	14
2.2.2	路基传感器数据处理 .....	20
2.3	场景构建 .....	22
<b>第3章</b>	<b>主车驾驶行为识别与预测 .....</b>	<b>25</b>
3.1	驾驶行为识别 .....	25
3.1.1	问题定义 .....	25
3.1.2	基于 LR 的驾驶行为识别方法 .....	27
3.1.3	基于 SVM 的驾驶行为识别方法 .....	31
3.2	操作轨迹预测 .....	43
3.2.1	问题定义 .....	43
3.2.2	基于 GMM - GMR 的操作轨迹预测方法 .....	44
3.3	基于分布域自适应的模型泛化方法 .....	49
3.3.1	问题定义 .....	49
3.3.2	分布域自适应 .....	54
3.4	基于流形对齐的模型自适应方法 .....	64
3.4.1	问题定义 .....	64
3.4.2	基于 SMA 和 KEMA 的驾驶行为识别方法 .....	65
3.4.3	基于 DTW - LPA 的操作轨迹预测方法 .....	80
<b>第4章</b>	<b>交通参与者行为识别与预测 .....</b>	<b>95</b>
4.1	周边车辆行为识别与预测 .....	97
4.1.1	周边车辆行为识别与预测问题概述 .....	97
4.1.2	基于高斯混合模型的目标运动模式识别模型 .....	97
4.1.3	基于高斯过程回归的轨迹预测模型 .....	103
4.1.4	预测模型评价指标 .....	111
4.1.5	基于路基数据的试验验证及结果分析 .....	112
4.2	行人与非机动车行为识别与预测 .....	130

4.2.1	行人行为识别与预测问题概述 .....	130
4.2.2	轨迹预测场景 .....	130
4.2.3	地平线相机数据处理 .....	133
4.2.4	基于 LSTM 的行人轨迹预测模型 .....	135
4.2.5	非机动车行为识别——以自行车为例 .....	142
<b>第 5 章</b>	<b>智能车辆行为决策概述 .....</b>	<b>145</b>
5.1	智能车辆行为决策概述 .....	145
5.2	智能车辆行为决策的常用方法 .....	147
5.2.1	基于规则的行为决策 .....	148
5.2.2	基于随机过程的行为决策 .....	150
5.2.3	基于机器学习的行为决策 .....	154
<b>第 6 章</b>	<b>基于规则的行为决策 .....</b>	<b>157</b>
6.1	状态机 .....	158
6.1.1	状态机原理及概述 .....	158
6.1.2	基于有限状态机的横向决策模型 .....	159
6.2	基于规则的分层超车决策框架 .....	161
6.2.1	超车决策过程 .....	161
6.2.2	评价指标选取 .....	161
6.2.3	超车规则制定 .....	166
6.3	高速公路场景应用实例 .....	167
6.3.1	试验内容 .....	167
6.3.2	试验结果与分析 .....	168
6.4	城市道路场景应用实例 .....	172
6.4.1	周围车辆分布试验 .....	173
6.4.2	换道决策模型实车试验 .....	174
6.4.3	换道决策模型类人分析与评价 .....	179

第7章 基于随机过程的行为决策 .....	182
7.1 马尔可夫决策过程 .....	183
7.2 部分可观测马尔可夫决策过程 .....	184
7.2.1 部分可观测马尔可夫决策过程简介 .....	185
7.2.2 基于 POMDP 的智能车辆纵向决策模型 .....	186
7.3 无信号灯十字路口场景仿真试验 .....	190
7.3.1 仿真场景 .....	191
7.3.2 仿真试验结果 .....	192
7.4 交叉口场景应用实例 .....	200
第8章 基于机器学习的行为决策 .....	204
8.1 基于强化学习的行为决策 .....	204
8.1.1 强化学习简介 .....	205
8.1.2 Q 学习算法 .....	206
8.1.3 神经网络 Q 学习算法 .....	208
8.1.4 真实交通长直路路况实车试验及分析 .....	216
8.2 基于逆强化学习的行为决策 .....	222
8.2.1 逆强化学习理论基础 .....	222
8.2.2 基于逆强化学习的评价函数建模及试验分析 .....	231
8.2.3 基于特定驾驶行为的类人驾驶学习系统试验及分析 .....	236
参考文献 .....	242
附录 术语表 .....	253

# 1

## 第 1 章

# 智能车辆行为识别、预测与决策概述

## 1.1 智能车辆系统构成

智能车辆是一种能够以较高速度移动的机器人，它能够感知驾驶环境、进行自主决策、规划行驶路径，并控制车辆跟踪期望路径，到达设定的目的地。与机器人类似，智能车辆可以独立地（或协调合作）完成设定任务。随着视觉识别技术的突破性发展，智能车辆面临的环境感知、决策等难题逐渐得以解决，智能车辆也逐渐走入大众的视野。但是智能车辆系统远非只包含感知，其本身就是一个极为复杂的系统，其中车辆平台底层的控制包含电控技术、传感器技术等，控制和规划涉及最优化理论，决策涵盖机器学习理论。无疑，智能车辆系统是人工智能技术的理想验证平台。

根据以上定义，智能车辆系统可以分为感知、决策、路径规划和车辆控制与平台四个模块。

### 1. 感知模块

智能车辆需要实时获取行驶环境信息和驾驶员信息。获取环境信息的途径一般有两种：其一，通过智能车辆环境感知系统利用车载传感器获取环境，结合环境模型对环境信息进行融合，理解和识别行驶环境；其二，通过通信网络提供的外部环境信息，例如，车联网向智能车辆提供前方道路状况和周围车辆行驶趋势、路基交通设施发送的路口交通状况和变化趋势，驾驶员信息主要通过车载传感器获得。在通过感知系统获得环境信息和驾驶员信息后，结合先验模型，智能车辆可以对行驶环境和驾驶员行为进行识别与预测，为后续的决策与规划提供信息。智能车辆感知模块如图 1-1 所示。

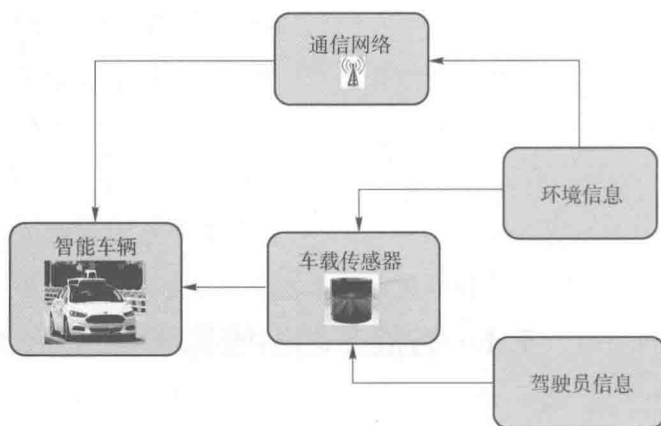


图 1-1 智能车辆感知模块

### 2. 决策模块

智能车辆需要根据任务特性、自身功能条件和已知环境信息进行决策。智能车辆的决策需要根据任务和全局环境信息的变化进行调整，是一种动态过程。以车辆换道过程为例，智能车辆决策系统基于交通场景中其他车辆的行为预测、自身车辆的运动状态，以及对应的交通环境等信息对无人车辆进行行为决策，而这些信息都处于动态变化过程中，因此智能车辆的决策结果可能在“换道”和“保持直行”两种状态中切换，如图 1-2 所示。

### 3. 路径规划模块

路径规划是指智能车辆按照一定的评价标准寻找一条从起始点到目标点的无碰撞路径,如图1-3所示。智能车辆的路径规划主要继承了机器人研究领域关于路径规划的成果,一般分为全局路径规划和局部路径规划。全局路径规划是在地图已知的情况下,在存在交通导航路网信息的道路环境中根据拓扑路网连接关系进行规划;在存在障碍物的非结构化环境中,则根据障碍物的位置和道路边界确定可行的最优路径;但当环境发生变化时,若出现未知障碍物,则需要通过局部路径规划生成智能车辆的局部行驶路径。局部路径规划是在全局路径的引导下,依据传感器感知得到的局部环境信息来实时生成车辆所需行驶的路径。在路径规划的过程中,不但要考虑影响当前任务完成的最优原则(如路径最短、能源消耗最少),而且要考虑动态环境带来的约束问题。此外,在智能车辆局部路径规划过程中,还需要考虑运动规划,即局部路径规划要满足智能车辆的运动学和动力学约束条件。

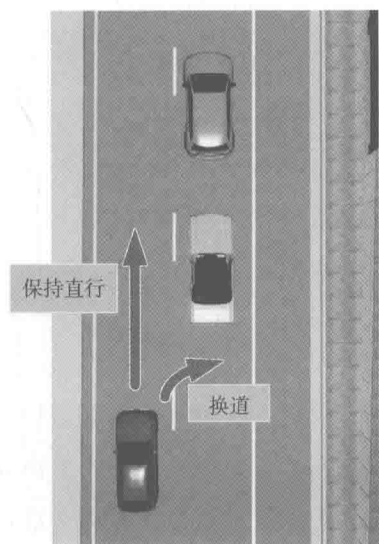


图1-2 智能车辆决策示例

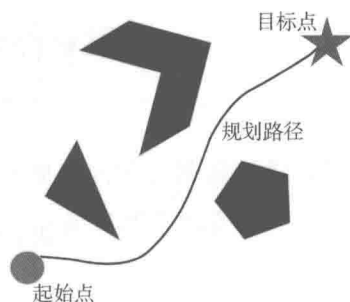


图1-3 智能车辆路径规划

### 4. 车辆控制与平台

车辆控制是指对车辆进行横向控制和纵向控制,使其跟踪路径规划模块

中得到的路径。路径跟踪的实质是通过控制车辆的运动来减少车辆与参考路径在空间上的误差。车辆平台是智能车辆的重要组成部分,环境感知、任务决策及控制必须与车辆平台进行一体化设计。各种智能车辆在行驶过程中,以较高速度行驶时都会与环境发生相互作用,这时车辆的运动学和动力学特性就会影响环境感知、决策规划和控制效果。因此,智能车辆要在运动规划阶段计算出满足车辆运动学和运动学约束的无碰撞运动轨迹,同时要在跟踪阶段生成满足非线性动力学约束和执行机构极限约束的控制量。

本书关注智能车辆的感知模块和决策模块,分别从数据采集与处理、行为识别与预测、行为决策等三个方面对智能车辆进行介绍,如图 1-4 所示。

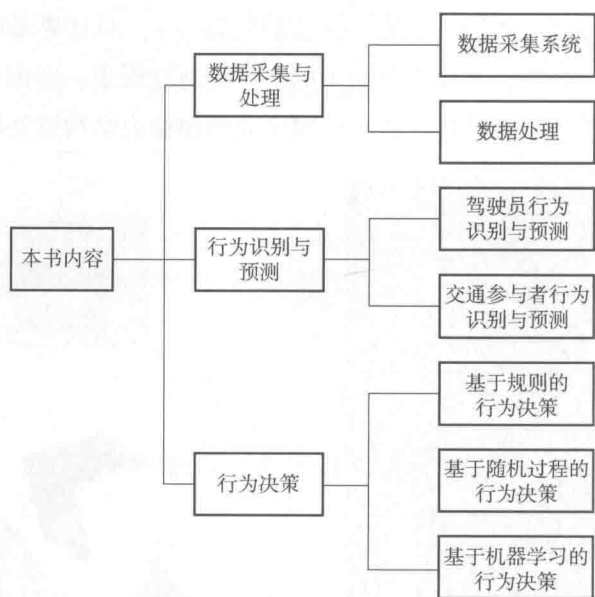


图 1-4 本书思路导图

## 1.2 数据采集与处理

数据采集和处理属于智能车辆感知模块。这一部分的主要任务是通过

仿真平台、车载传感器和路基传感器等数据采集系统来采集驾驶员和周围环境的信息，然后将这些信息进行数据处理，生成结构清晰、意义明确的数据文件，用于行为识别与预测、行为决策等研究，如图1-5所示。

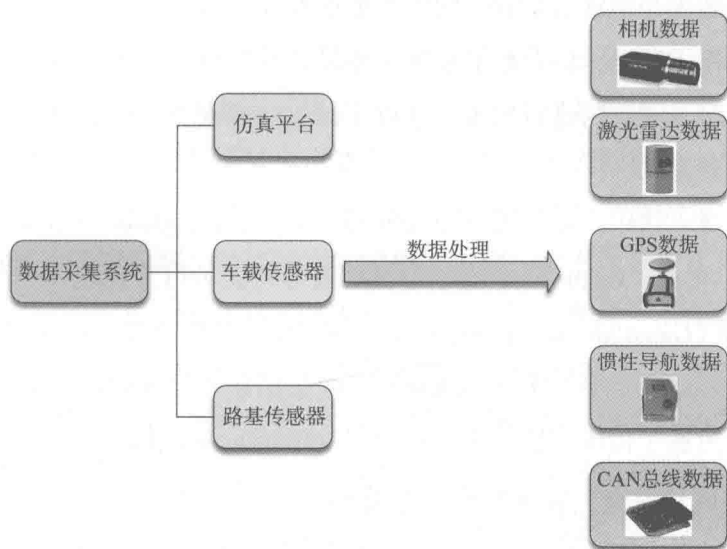


图1-5 数据采集与处理

### 1.3 驾驶行为识别与预测

对驾驶行为的识别与预测可以从两个方面来研究，即驾驶员方面和交通参与者方面。前者关注主车驾驶员行为；后者则以周围交通参与者为研究对象，对参与者进行建模。

主车驾驶员行为主要指主车驾驶员对智能车辆的操作，如油门开度、制动踏板行程或方向盘转角；交通参与者行为往往由其运动轨迹来体现，因此可以用轨迹来表示周围交通参与者的行为。

### 1.3.1 主车驾驶行为识别与预测

如果智能车辆能对驾驶员的意图进行准确识别,同时对驾驶员的驾驶操作进行准确预测,结合智能车辆对环境的强大感知能力,就可以对一些潜在的危险驾驶行为进行预警。这对于保障交通安全、提高交通效率都有十分重要的意义。

在传统方法中,常用逻辑斯谛回归(logistical regression, LR)和支持向量机(support vector machine, SVM)进行驾驶员行为识别<sup>[1-2]</sup>,用高斯混合回归(Gaussian mixture regression, GMR)进行驾驶员行为预测<sup>[3-4]</sup>。但是在实际研究当中,常常遇到自然驾驶数据量不足的情况。为了解决这一问题,可基于传统方法采用迁移学习(transfer learning, TL),将历史数据(即无法直接用于建模的数据)直接转移至新加入驾驶员对应的数据集,并充分用于新驾驶员的驾驶行为模型建模,如图1-6所示。本书将介绍分布域自适应(distribution adaptation, DA)和流形对齐(manifold alignment, MA)两种迁移学习方法。

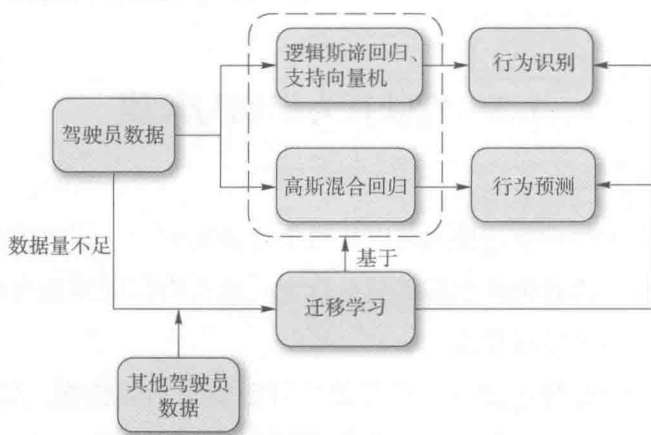


图 1-6 驾驶员行为识别与预测

### 1.3.2 交通参与者行为识别与预测

如图1-7所示,交通参与者包括交通环境中存在的机动车辆、非机动车辆和行人等。行为识别和预测的主要任务是以周围交通参与者为研究对象,识别出预先定义的意图或模式,并对其运动趋势做出预测,本书中交通参与者的行为主要是指城市交通参与者中机动车辆的行为。城市交通中的机动车辆受车道、信号灯和交通规则约束,其行为存在规范性,可以将其建模为分类问题,对其行为方式进行识别,本书中主要采用高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)对每种运动模式下的车辆行驶轨迹进行建模,基于高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)对机动车辆的运动轨迹进行预测。对于非机动车辆和行人,由于其运动缺乏规范性,难以清晰界定其运动模式之间的界限,因此本书中基于长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络直接对其运动轨迹进行预测。

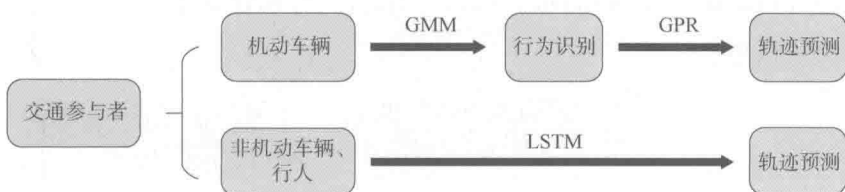


图 1-7 交通参与者行为识别与预测

## 1.4 智能车辆行为决策

智能车辆行为决策模块的主要功能是对感知模块得到的环境信息进行自主处理,提取对本车状态有影响的因素,做出有效的决策判断。例如,在车辆换道的过程中考虑周围车辆的动态变化,考虑当前环境是否拥堵、自己的行为是否会给其他车辆带来不便等问题,以选择最佳的换道时间和

换道轨迹。车辆将决策判断的结果传递给规划模块，规划模块综合考虑车辆的运动学和动力学约束以及环境中动/静障碍物的确切信息，生成无碰撞的运动轨迹，并将运动轨迹的信息发送给控制模块。控制模块处理接收到的横向与纵向的轨迹信息，将其转化为各个执行器的控制量，使智能车辆能够按照设计的轨迹行驶。

智能车辆的行为决策方法主要包括基于规则的行为决策、基于随机过程的行为决策和基于机器学习的行为决策，如图 1-8 所示。基于规则的行为决策主要依靠人类常识来决定车辆行驶状态，并不依赖于对周围交通参与者运动轨迹的准确预测。本书建立了基于有限状态机（finite state machine, FSM）的横向决策模型<sup>[5]</sup>。基于随机过程的行为决策可以分为基于马尔可夫决策过程（Markov decision process, MDP）的行为决策和基于部分可观测马尔可夫决策过程（partially observable Markov decision process, POMDP）的行为决策。机器学习作为人工智能的一种，能够实现学习人类决策行为的功能，本书基于强化学习（reinforcement learning, RL）和逆强化学习（inverse reinforcement learning, IRL），分别建立了基于机器学习的行为决策模型。

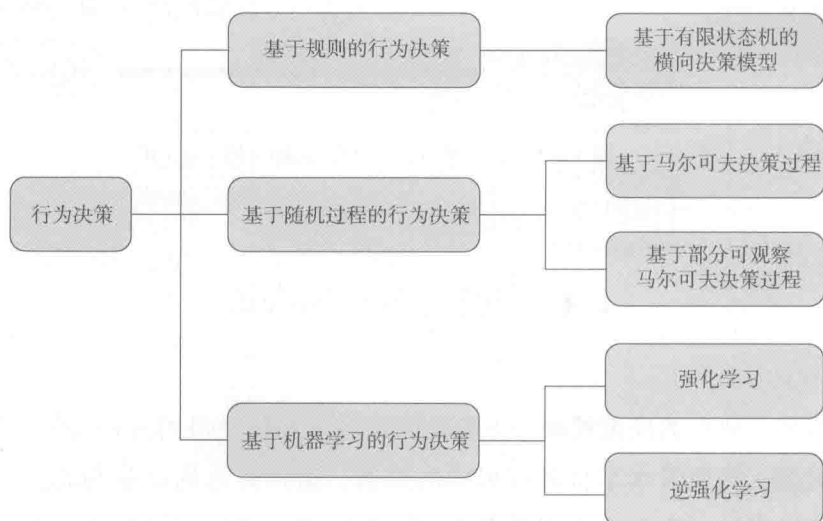


图 1-8 智能车行为决策

# 第 2 章

## 数据采集系统与场景建模

### 2.1 数据采集系统构成

数据采集系统主要分为两种，一种是车载传感器数据采集系统，另一种是路基传感器数据采集系统。本节将针对这两种数据采集系统分别举例说明。

#### 2.1.1 仿真传感器数据采集系统

本小节介绍基于 PreScan/SIMULINK 平台构建的仿真环境。为了进行试验，需要对变道场景中的数据进行采集。为了有效地收集驾驶数据进行模型训练，本小节利用 PreScan/SIMULINK 平台构建了一个仿真环境来模

拟驾驶环境，如图 2-1 所示。采集频率设定为 100 Hz。驾驶员的操作由罗技 G29 设备采集，并输入模拟的车辆动态系统；可视化的驾驶环境由监视器反馈给驾驶员。

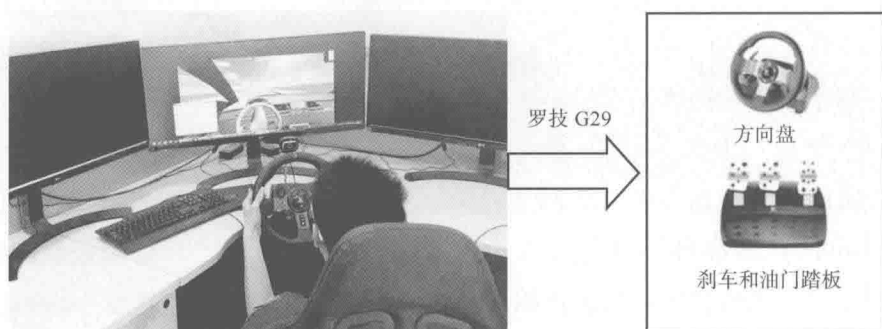


图 2-1 仿真环境下的数据采集

基于 PreScan 的仿真环境数据采集过程如图 2-2 所示。驾驶员通过操作模拟驾驶输入设备，将驾驶行为信号输入 MATLAB/SIMULINK 平台的输入模块。MATLAB/SIMULINK 平台通过从驾驶员操作模块获取驾驶员操作量，进行车辆动力学仿真解算，实现虚拟环境中的仿真车辆的控制。最终将解算结果中本车与周围环境的变化以图像的形式反馈给驾驶员。其中，PreScan 软件可为驾驶员提供较好的视觉反馈，从而保证驾驶员能够正确理解驾驶场景，从而做出尽量接近于真实环境下的驾驶行为。模拟驾驶输入设备为驾驶员提供了力学与触觉反馈，目的是尽量为驾驶员提供较真实的驾驶操作体验。MATLAB/SIMULINK 平台可保证车辆动力学的实时快速解算与数据存储。

### 2.1.2 车载传感器数据采集系统

本小节以北京理工大学智能车辆研究所比亚迪速锐智能驾驶平台为例，说明车载传感器数据采集系统的配置、数据类型等。该平台于 2013