

- ◆ “十四五”汽车类精品课程规划教材
- ◆ 汽车类高素质技术技能人才理实一体化系列教材



校企合作汽车专业系列丛书

智能网联汽车 环境感知技术

段付德 崔金魁 林 香 主编



哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

CONTENTS

目录

项目一

环境感知概述 / 1

- 任务一 环境感知的定义 / 2
- 任务二 环境感知的对象 / 4
- 任务三 环境感知传感器 / 5
- 任务四 环境感知传感器的配置 / 7
- 任务五 传感器配置实例 / 8

项目二

视觉传感器 / 16

- 任务一 视觉传感器的定义 / 17
- 任务二 视觉传感器的组成 / 18
- 任务三 视觉传感器的特点 / 19
- 任务四 视觉传感器的类型 / 21
- 任务五 视觉传感器的技术参数 / 23
- 任务六 视觉传感器的标定 / 28
- 任务七 视觉传感器的环境感知流程 / 31
- 任务八 视觉传感器的产品及应用 / 35

项目三

超声波雷达 / 42

- 任务一 超声波雷达的认知 / 43
- 任务二 超声波雷达的组成 / 45
- 任务三 超声波雷达的原理 / 46
- 任务四 超声波雷达的类型 / 47
- 任务五 超声波雷达的技术参数 / 48
- 任务六 超声波雷达的测试 / 48
- 任务七 超声波雷达的产品及应用 / 49
- 任务八 超声波雷达常见故障类型 / 56
- 任务九 超声波雷达的常见故障 / 57
- 任务十 超声波雷达的故障案例 / 57
- 任务十一 超声波雷达标定 / 58
- 任务十二 超声波雷达标定原理 / 60

项目四

毫米波雷达 / 63

- 任务一 毫米波雷达的定义 / 64
- 任务二 毫米波雷达的组成 / 65



- 任务三 毫米波雷达的优缺点 / 66
- 任务四 毫米波雷达的原理 / 66
- 任务五 毫米波雷达的类型 / 67
- 任务六 毫米波雷达的技术参数 / 68
- 任务七 毫米波雷达的测试 / 69
- 任务八 毫米波雷达模组的产品及应用 / 79

项目五

激光雷达 / 92

- 任务一 激光雷达的定义 / 93
- 任务二 激光雷达的组成 / 95
- 任务三 激光雷达的优缺点 / 96
- 任务四 激光雷达的原理 / 96
- 任务五 激光雷达的类型 / 98
- 任务六 激光雷达的技术参数 / 100
- 任务七 激光雷达的标定 / 101
- 任务八 激光雷达的产品及应用 / 104

项目六

环境感知传感器的目标识别 / 117

- 任务一 车辆识别 / 118
- 任务二 行人识别 / 126
- 任务三 交通标志识别 / 131
- 任务四 交通信号灯识别 / 137
- 任务五 道路识别 / 141

项目七

环境感知传感器的实训 / 148

- 任务一 环境感知传感器的认知 / 149
- 任务二 环境感知传感器的装配 / 151
- 任务三 环境感知传感器的调试 / 156
- 任务四 环境感知传感器的测试 / 161
- 任务五 环境感知传感器的标定 / 166
- 任务六 环境感知传感器图像目标的识别 / 170

参考文献 / 172



项目二 视觉传感器



学习目标

学习本项目，能够掌握视觉传感器的定义与组成，了解其特点、类型和技术参数，掌握其标定方法，了解其环境感知流程、产品及应用状况。



教学要点

知识要点	能力要求
视觉传感器的定义	掌握视觉传感器的定义，掌握智能网联汽车视觉传感器和普通视觉传感器的区别
视觉传感器的组成	掌握视觉传感器的组成并了解图像传感器的类型和区别
视觉传感器的特点	了解视觉传感器的特点，掌握智能网联汽车视觉传感器的特殊要求
视觉传感器的类型	掌握视觉传感器的类型，了解单目、双目、三目及环视摄像头的特点
视觉传感器的技术参数	了解图像传感器的技术指标，掌握视觉传感器的内部参数和外部参数，以及它们与拍摄图像质量的关系
视觉传感器的标定	掌握视觉传感器的各种坐标系及其转换，掌握视觉传感器的标定方法
视觉传感器的环境感知流程	了解智能网联汽车视觉传感器的环境感知流程，以及每个流程的作用
视觉传感器的产品及应用	了解车载视觉传感器的发展现状，熟悉视觉传感器在智能网联汽车中的应用



案例导入

无人驾驶汽车或者智能网联汽车在高速公路行驶时，有时候车辆会偏离行驶车道，如图 2-1 所示。



图 2-1 车辆偏离行驶车道

如果出现车辆偏离行驶车道这种情况，不进行及时纠正，就会产生危险。如何依靠视觉传感器测试车辆是否偏离行驶车道？在智能网联汽车上视觉传感器有哪些类型？视觉传感器的作用是什么？学习本项目可以得到准确的答案。

任务一 视觉传感器的定义

视觉传感器是指利用光学元件和成像装置获取外部环境图像信息的仪器，通常用图像分辨率来描述视觉传感器的性能。视觉传感器的精度不仅与分辨率有关，而且与被测物体的检测距离有关。被测物体的检测距离越远，其绝对的位置精度越差。

视觉传感器是整个机器视觉系统信息的直接来源，主要由一个或者两个图形传感器组成，有时还要配以光投射器及其他辅助设备。视觉传感器的主要功能是获取足够的机器视觉系统要处理的原始图像。

视觉传感器在智能网联汽车或无人驾驶汽车上的应用是以摄像头（机）形式出现的，搭载先进的人工智能算法，便于目标检测和图像处理，如图 2-2 所示。

图 2-3 是百度 Apollo 2.0 无人驾驶汽车推荐使用的摄像机（LI-USB30-AR023ZWDR）。Apollo 2.0 无人驾驶汽车中使用了两个同样的摄像机，通过 USB 3.0 的转接线接入控制器，传递彩色图像信息。两个摄像机的镜头的焦距分别是 6 mm 和 25 mm，分别用于检测近处和远处的红绿灯。



图 2-2 视觉传感器



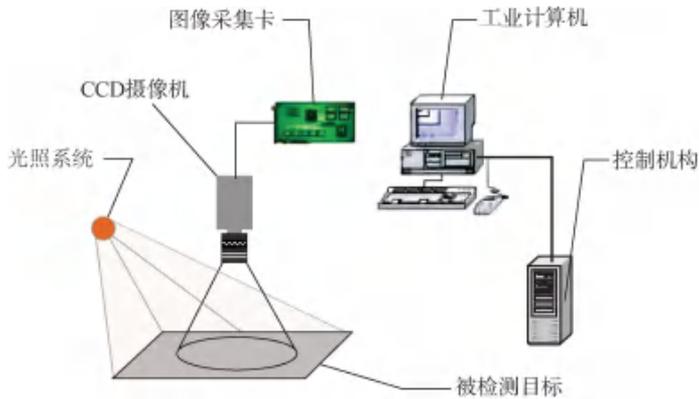


图 2-3 百度 Apollo 2.0 无人驾驶汽车推荐使用的摄像机

任务二 视觉传感器的组成

视觉传感器主要由光源、镜头、图像传感器、模数转换器、图像处理器、图像存储器等组成（图 2-4），有时还要配以光投射器及其他辅助设备。视觉传感器通过对摄像机拍摄到的图像进行处理，来计算对象物的特征量（面积、重心、长度、位置等），并输出数据和判断结果，其主要功能是获取足够的机器视觉系统要处理的原始图像。

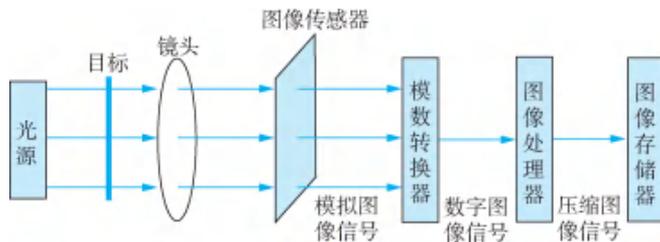


图 2-4 视觉传感器的组成

图像传感器是将光信号转换为电信号的装置，在数字电视、可视通信市场中有着广泛的应用。目前应用广泛的图像传感器主要有电荷耦合器件（Charge-Coupled Device, CCD）与互补金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS）这两种，如图 2-5 所示。

CCD 的成像原理是，在 CCD 内部每个像素点包含一个光敏物质和一些电子设备，这些设备通过电极相连，并沿着行和列分布。当光照射到 CCD 数组上时，其光敏元件便开始吸收光子，将其转化为电子，存储在电荷传感器中；行电极和列电极通过电场力定期激励，将生产的电子从每个像素按顺序传输到下一个像素，并在 CCD 输出端读取出来，还原成数字信号，生成最终的图像。



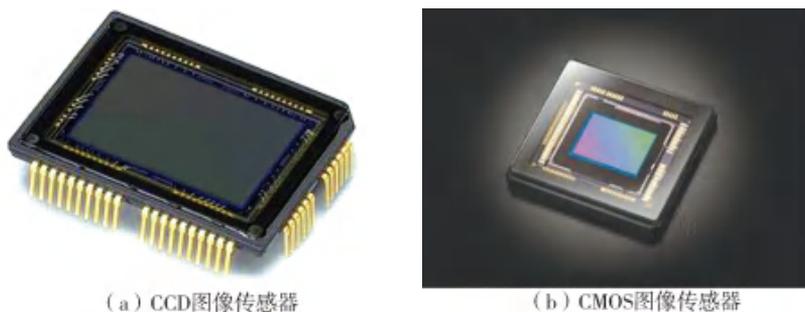


图 2-5 图像传感器

CMOS 成像的原理是，通过行选择电路和列选择电路选取希望操作的像素，并将像素上的电信号读取出来。在选取过程中，行选择逻辑单元不仅可以对像素阵列逐行扫描也可隔行扫描，列同理；行选择逻辑单元与列选择逻辑单元配合使用可以实现图像的窗口提取功能，然后把相应的像素单元进行信号处理。

CCD 与 CMOS 的主要差别在于信号的读出过程不同。CCD 需在同步时钟的控制下，以行为单位，一位一位地输出信息，速度较慢；而 CMOS 采集光信号的同时就可以读取出电信号，还能同时处理各单元的图像信息，速度比 CCD 快很多。

CMOS 传感器的加工采用半导体厂家生产集成电路的流程，可以将数字相机的所有部件如光敏元件、图像信号放大器、信号读取电路、模数转换器、图像信号处理器及控制器等，都集成到一块芯片上，还可以附加 DRAM。只需要一个芯片就可以实现很多功能，因此采用 CMOS 芯片的光电图像转换系统的整体成本很低。

任务三 视觉传感器的特点

视觉传感器具有以下特点。

(1) 信息量极为丰富。不仅包含有视野内物体的距离信息，还有该物体的颜色、纹理、深度和形状等信息。

(2) 多任务检测。在视野范围内可同时实现道路检测、车辆检测、行人检测、交通标志检测、交通信号灯检测等。视觉传感器的多目标检测如图 2-6 所示。

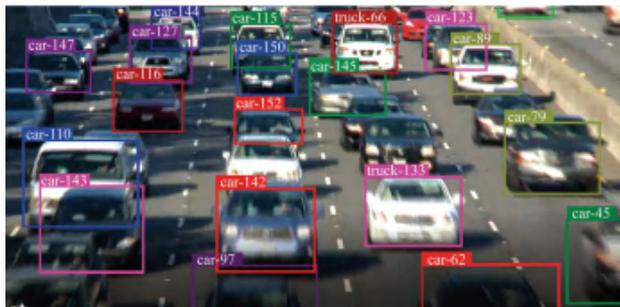


图 2-6 视觉传感器的多目标检测



(3) 视觉同时定位与建图 (SLAM)。如图 2-7 所示, 通过摄像头可以实现同时定位和建图。

(4) 实时获取场景信息。提供的信息不依赖于先验知识, 例如 GPS 导航依赖地图信息, 有较强的适应环境的能力。

(5) 与机器学习、深度学习等人工智能加快融合。

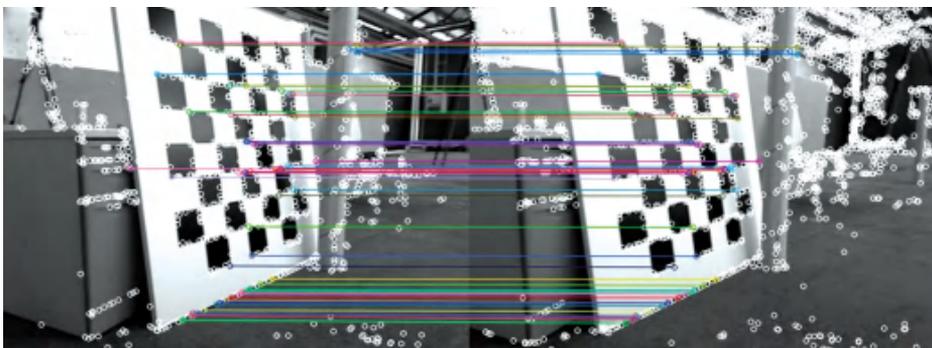


图 2-7 视觉同时定位与建图

智能网联汽车使用的视觉传感器比工业级别的视觉传感器要求更高, 主要表现为以下三个方面。

(1) 工艺要求级别不同。车载摄像头是比工业级别要求更高的车载安全级别, 尤其是对前置 ADAS 的摄像头安全等级要求更高。

①温度要求。车载摄像头的温度范围为 $-40\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

②防磁抗震。汽车启动时会产生极高的电磁脉冲, 车载摄像头必须具备极高的防磁抗震的可靠性。

③较长的寿命。车载摄像头的寿命至少要在 $8\sim 10$ 年才能满足要求。

(2) 功能要求差异。车载摄像头要保证在复杂的运动路况环境下也能采集到稳定的数据。

①高动态。在较暗环境以及明暗差异较大情况下仍能实现识别, 要求摄像头 CCD 或 CMOS 具有高动态的特性。

②像素要求。摄像头的像素越高, 芯片的处理负担越大, 二者之间应合理匹配。像素有逐渐增大的趋势。

③角度要求。对于环视和后视, 一般采用 135° 以上的广角镜头, 而前置摄像头对视距要求更大, 一般采用 55° 的范围。

(3) 认证要求高。汽车行业把安全放在第一位, 倾向于使用有口碑的厂商零部件, 进入车厂体系需要较长的认证周期。

尽管摄像头模组由 2 级、3 级供应商供应, 对品质的要求仍然严苛, 前置摄像头车仍普遍采用大厂制造的摄像头。车厂选择供应商后不会轻易更换, 一旦得到认可将形成较强的壁垒。

车载摄像头是自动驾驶汽车的视觉传感器, 主要包括镜片、滤光片、CMOS、PC-



BA、DSP 和其他封装、保护材料等。不同于手机摄像头，车载摄像头的模组工艺难度较大，其需要在高低温、湿热、强微光和震动等各种复杂工况条件下长时间保持稳定的工作状态。

任务四 视觉传感器的类型

视觉传感器在智能网联汽车上的应用是以摄像头方式出现的，根据不同的镜头和布置方式，一般分为单目摄像头、双目摄像头、三目摄像头和环视摄像头。

1. 单目摄像头

单目摄像头（图 2-8）一般安装在前挡风玻璃上部，用于探测车辆前方环境，识别道路、车辆、行人等。

单目摄像头的测距原理是，先通过图像匹配进行目标识别（各种车型、行人、物体等），再通过目标在图像中的大小来估算目标距离。想要识别各种车型，就要建立车型数据库。

单目摄像头的优点是可以识别具体的障碍物种类，有很高的算法成熟度，识别准确度高。单目摄像头成本低、功耗小，适用于一些对成像效果要求不高的场景，如普通的视频聊天、图像采集等。

单目摄像头的缺点是，镜头的焦距短，会缺失远处的信息；单目测距的精度比较低，它不能识别无明显轮廓的障碍物，工作的准确率和外部光线条件有密切关系；受限于数据库，缺乏自主学习的功能。

视觉传感器的成像图是透视图，即越远的物体成像越小。近处的物体需要用几百甚至上千个像素点来描述；而处于远处的同一物体，可能只需要几个像素点即可描述出来。这种特性会导致越远的地方，一个像素点代表的距离越大。因此，对单目摄像头来说，物体越远，测距的精度越低。

2. 双目摄像头

双目摄像头（图 2-9）既可以用于自动制动系统，也可以用于车道偏离预警系统和交通标志识别系统等。



图 2-8 单目摄像头



图 2-9 双目摄像头



双目摄像头与单目摄像头在成像质量方面存在差异。由于双目摄像头可以捕捉两个不同视角下的图像，并将它们融合成一张具有深度和颜色信息的图像，因此它的成像效果相对来说更加逼真、清晰。而单目摄像头需要依靠计算机视觉算法来实现类似的深度感知功能，因此在成像质量方面相对较弱。

双目摄像头的算法思路是先测距后识别，首先利用视差直接测量目标与本车的距离，原理与人眼类似。简单地说，测距离就是通过算法算出被拍摄物体与左右摄像头的角度 θ_2 ，再加上固定的 y 值（即两个摄像头的中心距），就非常容易算出 z 值（即物体到摄像头的距离）。

根据双目测距原理应用在图像上每一个像素点时，即可得到图像的深度信息。双目摄像头成像如图 2-10 所示。深度信息的加入不仅便于对障碍物的分类，更能提高高精度地图定位匹配的精度。

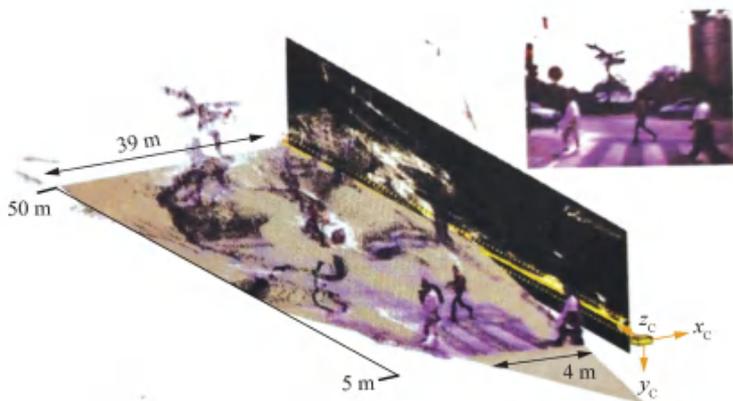


图 2-10 双目摄像头成像

双目摄像头需要两个摄像头有较高的同步率和采样率，技术难点在于双目标定及双目定位。相比单目摄像头，双目摄像头没有识别率的限制，无须先识别，可直接进行测量，直接利用视差计算距离精度更高，无须维护样本数据库。

双目成像是利用机器视觉，通过两个相机同时同步对图片进行采集，由获取左右两相机对一幅图像的对应点成像的像素差来获取深度信息，进而获取三维信息，实现对物体的重建。该技术在现有阶段只能对短距离的物体进行测距与三维重建。

双目成像技术最重要的是对相机拍摄的图像的处理。图像的预处理直接决定了立体匹配与深度预测的效果。想要有所突破，应当在图像处理上进行推敲。

3. 三目摄像头

三目摄像头（图 2-11）本质上是三个不同焦距单目摄像头的组合。三目摄像头感知范围更大，但同时标定三个摄像头，工作量大。

三目摄像头的感知范围由远及近，分别为前视窄视野摄像头，最远感知 250 m；前视主视野摄像头，最远感知 150 m；前视宽视野摄像头，最远感知 60 m。

由于三目摄像头的每个相机的视野不同，因此近处的测距交给宽视野摄像头，中



距离的测距交给主视野摄像头，更远的测距交给前视窄视野摄像头。这样，每个摄像头都能发挥其最大优势。

三目摄像头的缺点是需要同时标定三个摄像头，因此工作量更大一些。其软件部分需要关联三个摄像头的数据，对算法要求也很高。三个摄像头在判断、测算障碍物距离的时候，还会出现一个核心的逻辑问题。由于摄像头的精准度存在一定的误差范围，因此三个不同的摄像头，检测障碍物的精准性都会有一定的误差。



图 2-11 三目摄像头

4. 环视摄像头

环视摄像头一般至少包括 4 个鱼眼摄像头，安装位置是朝向地面的，能够实现 360°环境感知。

环视摄像头的感知范围并不大，主要用于车身 5~10 m 内障碍物检测、自主泊车时的库位线识别等。鱼眼摄像头为了获取足够大的视野，代价是图像的畸变严重。

摄像头有红外摄像头和普通摄像头。红外摄像头既适合白天工作，也适合黑夜工作；普通摄像头只适合白天工作，不适合黑夜工作。目前车辆使用的主要是红外摄像头。

任务五 视觉传感器的技术参数

1. 图像传感器的技术指标

图像传感器的技术指标主要有像素、帧率、靶面尺寸、感光度和信噪比等。

(1) 像素。像素是图像传感器的最小感光单位，即构成影像的最小单位。一帧影像画面由许多密集的亮暗、色彩不同的点组成，这些小点称为像素。像素的多少由 CCD 或 CMOS 上的光敏元件数目决定，一个光敏元件对应一个像素。因此，像素越大，意味着光敏元件越多，相应的成本就越大。像素用两个数字来表示，如 720×480 ，720 表示在图像长度方向上所含的像素点数，480 表示在图像宽度方向上所含的像素点数，二者的乘积就是该相机的像素数。

(2) 帧率。帧率代表单位时间内记录或播放的图片的数量，连续播放一系列图片就会产生动画效果。根据人的视觉系统，当图片的播放速度大于 15 幅/秒时，人眼就基本看不出来图片的跳跃了；当图片的播放速度达到 24~30 幅/秒时，人眼就已经基本觉察不到闪烁现象了。帧率表示图像传感器在工作时每秒能够更新的次数。高的帧



率可以得到更流畅、更逼真的视觉体验。

(3) 靶面尺寸。靶面尺寸是图像传感器感光部分的大小。一般用英寸 (1 in=25.4 mm) 来表示, 通常这个数据指这个图像传感器的对角线长度, 如常见的有 1/3 in。靶面越大, 意味着通光量越好; 而靶面越小, 则比较容易获得更大的景深。例如, 1/2 in 可以有较大的通光量, 而 1/4 in 可以比较容易获得较大的景深。

(4) 感光度。感光度代表通过 CCD 或者 CMOS 以及相关的电子线路感应入射光线的强弱。感光度越高, 感光面对光的敏感度就越强, 快门速度就越高, 这在拍摄运动车辆、夜间监控的时候显得特别重要。

(5) 信噪比。信噪比是指信号电压对于噪声电压的比值, 单位为 dB。一般摄像机给出的信噪比值均是自动增益控制 (AGC) 关闭时的值。当 AGC 接通时, 会对小信号进行提升, 使得噪声电平也相应提高。信噪比的典型值为 45~55 dB。若为 50 dB, 则图像有少量噪声, 但图像质量良好; 若为 60 dB, 则图像质量优良, 不出现噪声。信噪比越大, 说明它对噪声的控制就越好。

2. 相机的内部参数

相机的内部参数是与相机自身特性相关的参数, 主要有焦距、光学中心、图像尺寸和畸变系数等。

(1) 焦距。焦距是指镜头的光学中心到图像传感器的距离。相机的焦距如图 2-12 所示。

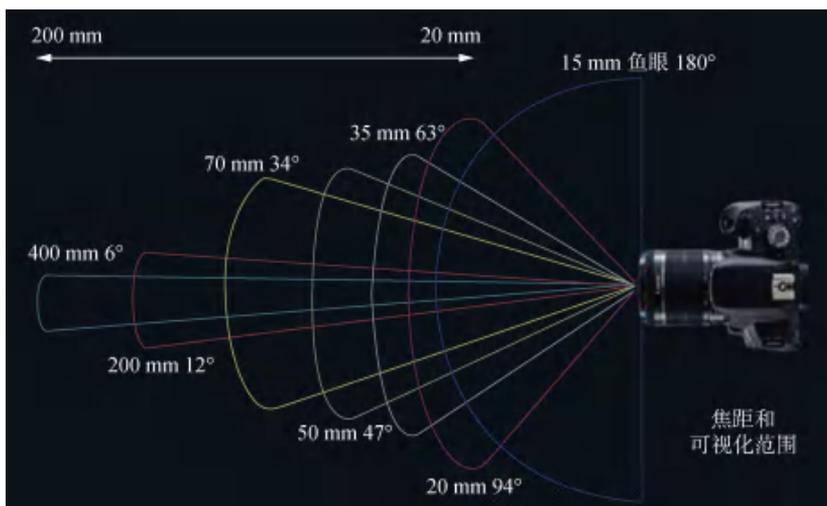


图 2-12 相机的焦距

焦距一般用 mm 表示, 如 18~135 mm 代表焦距可以从 18 mm 到 135 mm 进行变化, 说明该摄像机的焦距是可变的; 而 50 mm 代表摄像头的焦距只有 50 mm, 说明该摄像头的焦距是不可变的。

焦距不同, 拍摄的目标图像效果是不一样的。焦距对拍摄图像的影响如图 2-13 所示。



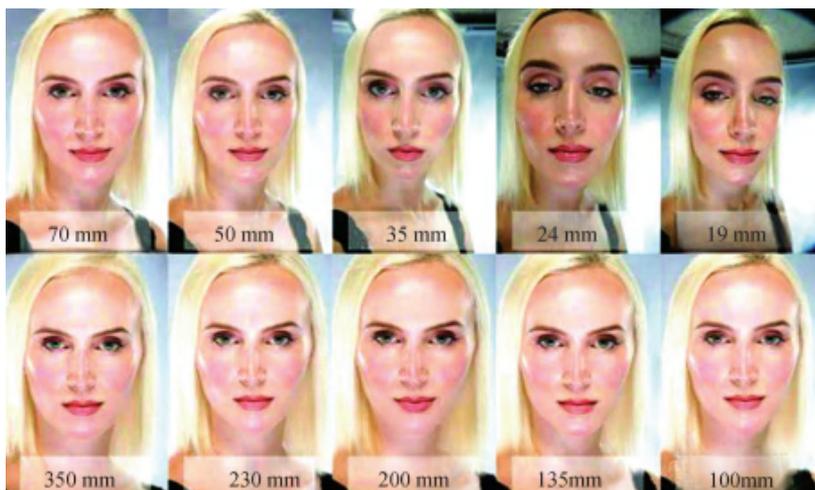


图 2-13 焦距对拍摄图像的影响

焦距与水平视角、图像大小密切相关。焦距越小，光学中心就越靠近图像传感器，水平视角越大，拍摄到的图像越大；焦距越大，光学中心就越远离图像传感器，水平视角越小，拍摄到的图像越小。因此，焦距与水平视角成反比，如图 2-14 所示。

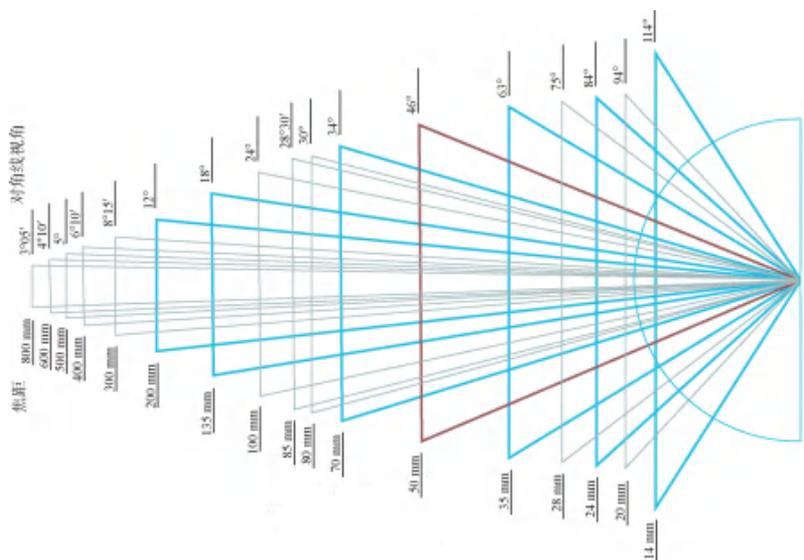


图 2-14 焦距与水平视角成反比

智能网联汽车或者无人驾驶汽车安装不同的焦距和视角的摄像头，可以获得不同位置的交通标志、交通信号灯和各种道路标志的检测和识别能力。

(2) 光学中心。相机的镜头是由多个镜片构成的复杂光学系统。

光学系统的功能等价于一个薄透镜，实际上薄透镜是不存在的。光学中心是这一等价透镜的中心，如图 2-15 所示。不同结构的镜头，其光学中心位置也不一样，大部分在镜头内的某一位置，但也有在镜头前方或镜头后方的。



(3) 图像尺寸。图像尺寸是指构成图像的长度和宽度，可以用像素作为单位，也可以用厘米 (cm) 作为单位。

图像尺寸与分辨率有关。分辨率是指单位长度中所表达或截取的像素数目，即表示每英寸图像内的像素点数，单位是像素/英寸。图像分辨率越高，像素的点密度越高，图像越清晰。

图像的像素、尺寸和分辨率具有以下关系。

①像素相同的情况下，图像尺寸越小，单位面积内像素点越多，分辨率越大，画面越清晰。这也就是为什么同一张图片，尺寸越大，画面越模糊。

②图像的分辨率取决于图像的像素和尺寸，像素高且尺寸小的图片分辨率大，画面看起来清晰。

③图像的像素越高，并不意味着画面越清晰，但是在同等分辨率的情况下能够显示更大尺寸的图片。

如果把英寸改为厘米单位，则需要进行换算。72 像素/in=28.346 像素/cm，300 像素/in=118.11 像素/cm，1 cm=0.3937 in，1 in=2.54 cm。

(4) 畸变系数。畸变系数分为径向畸变系数和切向畸变系数。径向畸变发生在相机坐标系转向物理坐标系的过程中；切向畸变产生的原因是透镜不完全平行于图像。

径向畸变就是沿着透镜半径方向分布的畸变，产生原因是光线在远离透镜中心的地方比靠近中心的地方更加弯曲，这种畸变在普通廉价的镜头中表现得更加明显。径向畸变主要包括枕形畸变和桶形畸变两种，如图 2-16 所示。

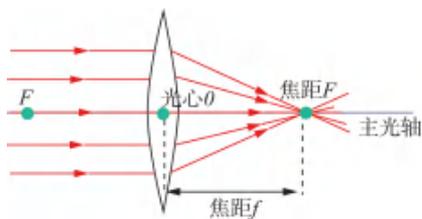
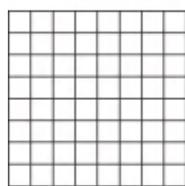
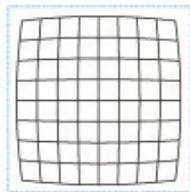


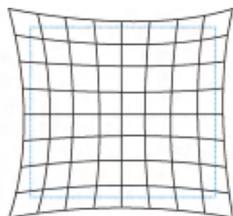
图 2-15 光学中心



(a) 正常图像



(b) 桶形失真



(c) 枕形失真

图 2-16 径向畸变

在实际情况下，常用 $r=0$ 处的泰勒级数展开的前几项来近似描述径向畸变。用参数表示的径向畸变模型为

$$\begin{aligned} x_d &= x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \\ y_d &= y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \end{aligned} \quad (2-1)$$

式中， k_1 、 k_2 和 k_3 分别为径向畸变系数； x 、 y 分别为畸变前的坐标； x_d 、 y_d 分别为畸变后的坐标。

切向畸变是因透镜本身与摄像头传感器平面（像平面）或图像平面不平行而产生的，这种情况多是透镜被粘贴到镜头模组上的安装偏差导致的。切向畸变模型为

$$x_d = x + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2)$$



$$y_d = y + 2p_2xy + p_1(r^2 + 2y^2) \quad (2-2)$$

式中, p_1 和 p_2 分别为切向畸变系数。

切向畸变产生的图像如图 2-17 所示。

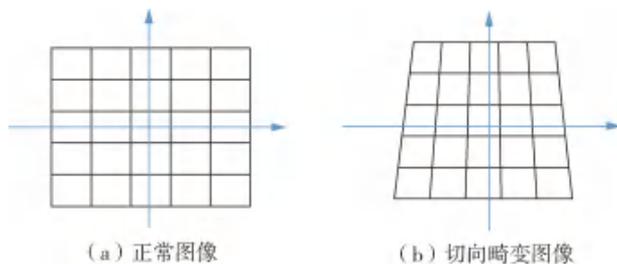


图 2-17 切向畸变产生的图像

3. 相机的外部参数

外部参数是指相机的安装位置, 即相机离地高度以及相机相对于车辆坐标系的旋转角度。

(1) 离地高度。离地高度是指从地面到相机焦点的垂直高度。相机离地高度如图 2-18 所示。

(2) 旋转角度。相机相对于车辆坐标系的旋转角度有俯仰角、偏航角和横滚角。俯仰运动 (Pitch) 是指相机绕车辆坐标系 y_v 轴的转动; 偏航运动 (Yaw) 是指相机绕车辆坐标系 z_v 轴的转动; 横滚运动 (Roll) 是指相机绕车辆坐标系 x_v 轴的转动。摄像头的旋转运动如图 2-19 所示。

俯仰角是指车辆的水平面与相机光轴之间的夹角; 偏航角是指车辆的 x_v 轴和相机光轴间的夹角; 横滚角是指相机绕光轴的转角。

外部参数可以通过棋盘格标定获得, 但要注意标准镜头和鱼镜头的差别。

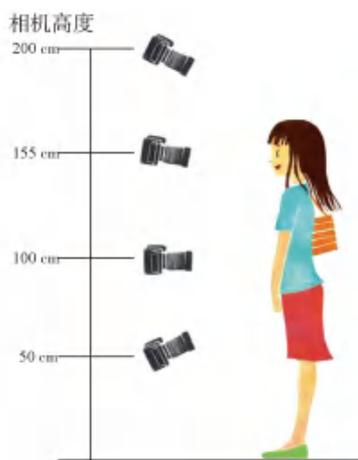


图 2-18 相机离地高度

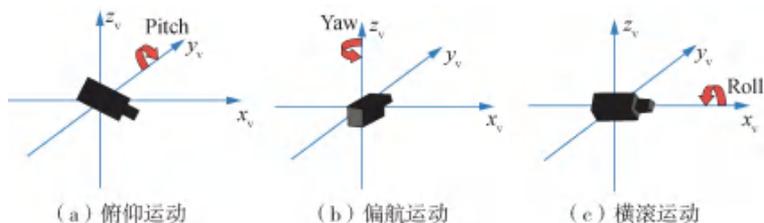


图 2-19 摄像头的旋转运动



任务六 视觉传感器的标定

1. 视觉传感器的坐标系

视觉传感器通过其低廉的价格以及丰富的图像信息而成为智能网联汽车必不可少的传感器。视觉传感器的作用是把三维世界中的形状、颜色信息压缩到一张二维图像上。基于视觉传感器的感知算法则是从二维图像中提取并还原三维世界中的元素和信息，如车道线、车辆、行人等，并计算它们与自己的相对位置。

相机投影相关坐标系有世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系、像素坐标系，如图 2-20 所示。

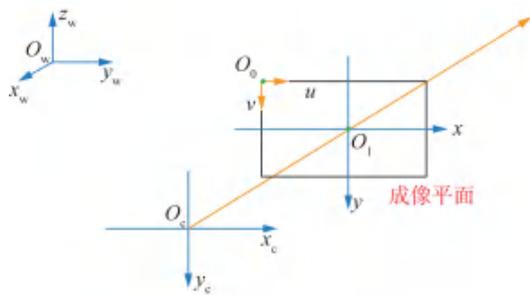


图 2-20 相机投影相关坐标系

(1) 世界坐标系。世界坐标系是系统的绝对坐标系，在没有建立用户坐标系之前画面上所有点的坐标都是以该坐标系的原点来确定各自的位置的。它可描述物体相对空间位置关系和相机的相对位置。图 2-20 中的 $O_w x_w y_w z_w$ 为世界坐标系，用于描述视觉传感器的位置，单位是 m。

(2) 相机坐标系。以相机光学中心为原点，过原点垂直于成像平面的光轴为 z_c ，建立相机坐标系 $O_c x_c y_c z_c$ ，单位是 m。

(3) 图像坐标系。以光轴和成像平面的交点为原点，建立图像坐标系 $O_l x y$ ，单位为 mm。

(4) 像素坐标系。以成像平面左上角为原点，建立像素坐标系 $O_o u v$ ，单位为像素。

从世界坐标系到相机坐标系，涉及旋转运动和平移运动。世界坐标系向相机坐标系转换可以用旋转矩阵和平移矩阵来表示，即

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{L}_w \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-3)$$

式中， \mathbf{R} 为 3×3 旋转矩阵； \mathbf{T} 为 3×1 平移矩阵； $0 = [0 \ 0 \ 0]$ ； \mathbf{L}_w 为 4×4 矩阵。



从相机坐标系向图像坐标系转换，是从三维转换到二维，属于透视投影关系，用矩阵表示为

$$\mathbf{Z}_c = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

式中， f 为焦距。

从图像坐标系向像素坐标系转换，转换矩阵为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

式中， u_0 、 v_0 为图像坐标系原点在像素坐标系中的坐标值； d_x 和 d_y 表示每一列和每行分别代表多少毫米，即 $1\text{pixel} = d_x \text{mm}$ 。

任意一点从世界坐标系转到像素坐标系为

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{1}{d_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & f_y & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-6)$$

最右边等式的第一个矩阵是相机的内部参数，第二个矩阵是相机的外部参数，它们可以通过标定来获取。

相机的焦距、像素尺寸和图像中成像中心的位置称为相机的内部参数，用来确定相机从三维空间到二维图像的投影关系。在实际应用中，相机的内部参数会更复杂，还包括图像的畸变系数等参数。在自动驾驶应用中，相机的内部参数为常数，使用中不会发生变化，但需要在使用前做好标定工作。相机的拍摄过程可以抽象成从三维相机坐标系映射到二维图像平面坐标系，再映射到图像坐标系的过程，图像感知算法则是这一过程的逆过程，通过二维图像推断物体在三维相机坐标系中的位置，如获得距离信息。

如果需要获得物体在世界坐标系中的位置，则还需要知道相机在世界坐标系中的位置。这一位置称为相机的外部参数，用来决定相机坐标系与世界坐标系之间的相对位置关系。在自动驾驶应用中，得到这一位置关系还需要一系列的标定和定位工作。



2. 利用棋盘格进行相机标定

在使用视觉传感器之前，必须对它进行标定。在机器视觉领域，相机的标定是一个关键的环节，它决定了机器视觉系统能否有效地定位、能否有效地计算目标物。

相机标定可以利用像棋盘一样的标定图像估计摄像头的内部参数和外部参数，以便配置相机的模型。

相机的外部参数是指相机的安装位置，即相机离地高度以及相机相对于车辆坐标系的旋转角度。

在估计外部参数之前，必须从相机中捕获棋盘格图案的图像，使用与估计的内部参数相同的棋盘模式。

棋盘坐标系主要用于摄像头的标定，如图 2-21 所示。在棋盘坐标系中， x_p 轴指向右方， y_p 轴指向下方。棋盘坐标系原点是棋盘左上角的右下角。每个棋盘代表表系中的另一点。例如，原点右侧的角为 $(1, 0)$ ，原点下方的角为 $(0, 1)$ 。棋盘格的尺寸 [高度，宽度] 用格数表示。

车辆坐标系如图 2-22 所示， x_v 轴指向车辆前方， y_v 轴指向左方。从正面看，原点位于道路表面，直接位于摄像头焦点下方。当放置棋盘格时， x_p 轴和 y_p 轴必须与车辆的 x_v 轴和 y_v 轴对齐。

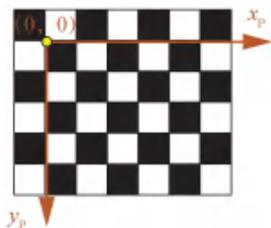


图 2-21 棋盘坐标系

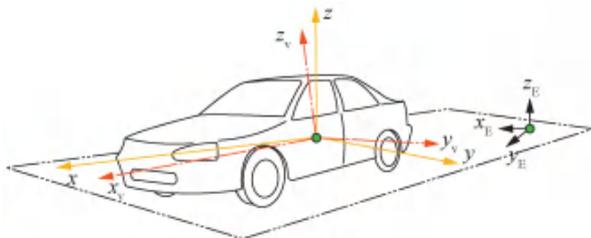


图 2-22 车辆坐标系

(1) 水平方向标定。在水平方向上，棋盘格放在地面上或平行于地面，可以将棋盘格放在车辆的前面、后面、左面或右面，如图 2-23 所示。

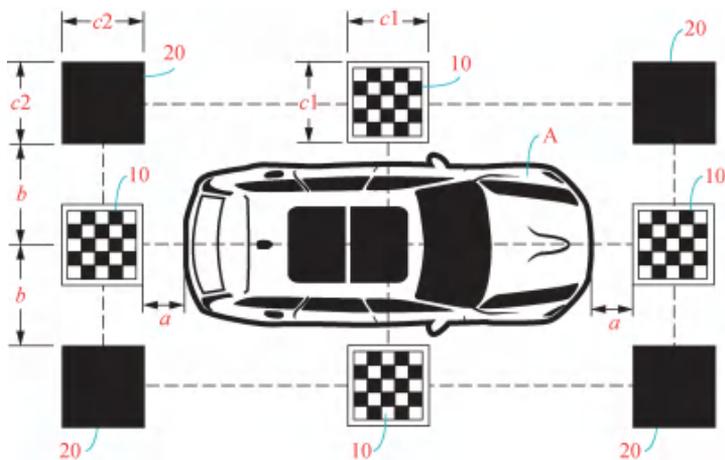


图 2-23 水平方向标定



(2) 垂直方向标定。在垂直方向上，棋盘格垂直于地面，可以将棋盘格放置在车辆前面、后面、左面或右面，如图 2-24 所示。

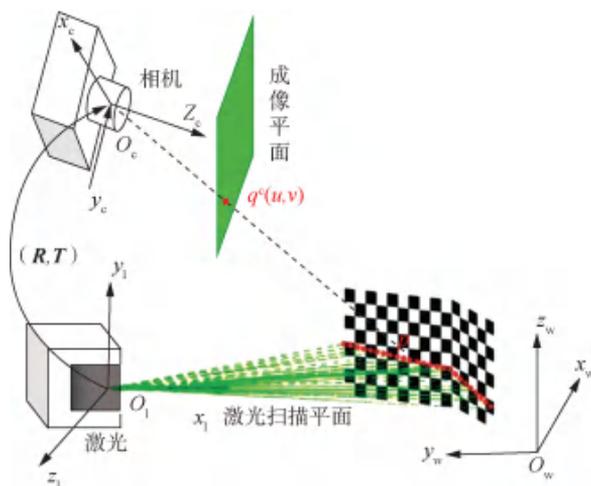


图 2-24 垂直方向标定

任务七 视觉传感器的环境感知流程

视觉传感器的环境感知流程一般包括图像采集、图像预处理、图像特征提取、图像模式识别、结果传输等。根据具体识别目标和采用的不同识别方法，环境感知流程会略有差异。

下面以车道偏离预警系统为例，介绍视觉传感器的感知流程。

1. 图像采集

图像采集主要是通过摄像头采集图像，如果是模拟信号，则要把模拟信号转换为数字信号，并把数字图像以一定格式表现出来。根据具体研究对象和应用场合，选择性价比高的摄像头，由于摄像头包括 CCD 摄像头和 CMOS 摄像头，所以应充分考虑车载的实际情况。图 2-25 所示为 Sony HDR-XR520E 高清摄像机采集的车道线原始图像。

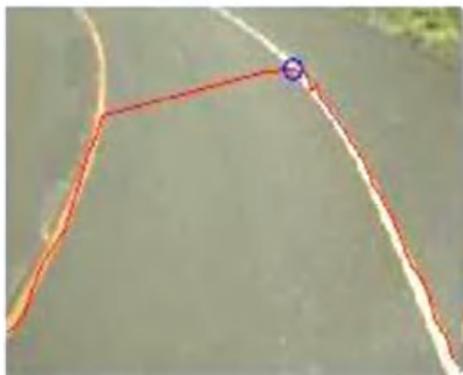


图 2-25 Sony HDR-XR520E 高清摄像机采集的车道线原始图像

2. 图像预处理

图像预处理包含的内容较多，要根据具体实际情况进行选择。



(1) 图像灰度化。视觉传感器采集的原始图像是彩色图像，即由红色 (Red)、绿色 (Green)、蓝色 (Blue) 三通道构成的图像，直接对采集到的图像进行处理时需要每个像素点的三个颜色分量信息进行处理，需要处理的数据量很大。而灰度图像是 $R=G=B$ 的一种特殊的彩色图像，其中 $R=G=B$ 的值就叫作灰度值。在灰度图像中，每个像素点的信息只需一个变量来表示，即灰度值（数据处理范围为 $0\sim 255$ ，需要处理的数据量小）。灰度图像与彩色图像一样可以完整地反映图像的色度和亮度的分布和特征。彩色图像灰度化常用方法有分量法、最大值法、平均值法等。图 2-26 所示为车道线的灰度图像。

(2) 图像压缩。图像压缩技术可以减少描述图像的数据量，以便节省图像传输、处理时间，并减少所占用的存储器容量。压缩既可以在不失真的前提下获得，也可以在允许失真的条件下进行。比较常用的数字图像压缩方法有基于傅里叶变换的图像压缩算法、基于离散余弦变换的图像压缩算法、基于小波变换的图像压缩算法、基于 NNT（数论变换）的图像压缩算法、基于神经网络的图像压缩算法等。

(3) 图像增强和复原。图像增强和复原的目的是提高图像的质量，如去噪声、提高图像的清晰度等。

图像增强技术有两类方法：空域法和频域法。空域法主要是在空域内对像素灰度值直接运算处理，如图像灰度变换、直方图修正、图像空域平滑和锐化处理、伪彩色处理等；频域法就是在图像的某种变换域内，对图像的变换值进行计算，如傅里叶变换等。图 2-27 所示为增强处理后的车道线图像。

图像复原技术与增强技术不同，它需要了解图像降质的原因，一般要根据图像降质过程的某些先验知识，建立降质模型，再用降质模型按照某种处理方法恢复或重建原来的图像。



图 2-26 车道线的灰度图像



图 2-27 增强处理后的车道线图像

(4) 图像分割。图像分割就是把图像分成若干个特定的、具有独特性质的区域并提出感兴趣目标的技术和过程，它是图像处理和图像分析的关键步骤之一。图像分割方法有阈值分割法、区域分割法、边缘分割法和特定理论分割法等。

3. 图像特征提取

为了识别图像中的目标，要在图像分割的基础上提取需要的特征，并将某些特征



计算、测量、分类，以便计算机根据特征值进行图像分类和识别。在图像识别中，图像主要有以下特征。

(1) 边缘特征。图像的边缘特征往往体现了图像属性的显著变化，主要包括场景照明的变化、深度上的不连续性、表面方向的不连续性、物体属性的变化。因此，图像边缘包含大量信息（如物体形状、纹理等），不仅可以反映图像局部的不连续性，还可以根据图像边缘的特点将图像划分为不同的区域。对图像进行边缘检测能保留图像重要的结构属性信息，剔除不相关信息，大大减少后续处理的计算量。常用来获取图像边缘的检测算子有 Canny 算子、Roberts 算子和 Prewitt 算子等。图 2-28 所示为不同检测算子的边缘检测结果。

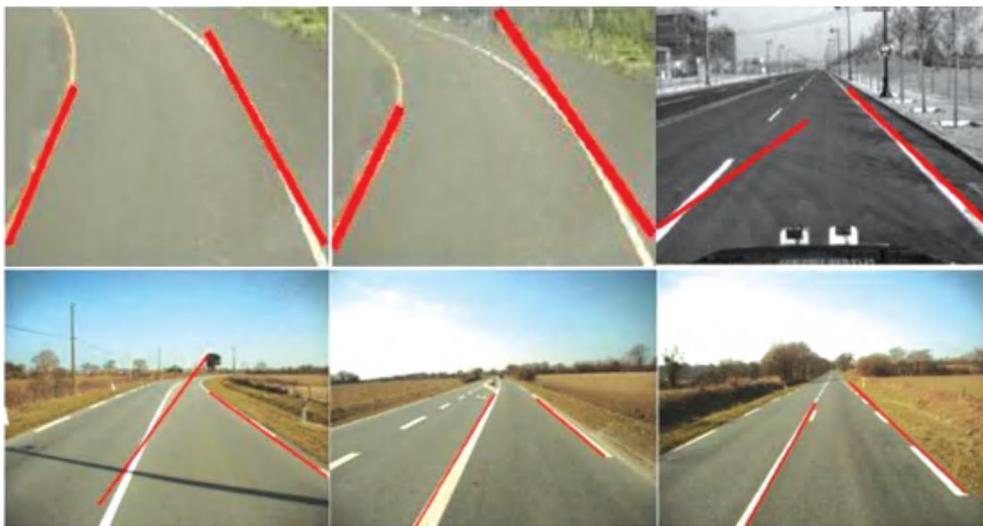


图 2-28 不同检测算子的边缘检测结果

(2) 图像幅度特征。图像像素灰度值、RGB、HSI 和频谱值等表示的幅值特征是图像的最基本特征。

(3) 直观性特征。图像的边沿、轮廓、纹理和区域等都属于图像灰度的直观性特征。它们的物理意义明确，提取比较容易，可以针对具体问题设计相应的提取算法。

(4) 图像统计特征。图像统计特征主要有直方图特征、统计性特征（如均值、方差、能量、熵等）、描述像素相关性的统计特征（如自相关系数、协方差等）。

(5) 图像几何特征。图像几何特征主要有面积、周长、分散度、伸长度、曲线的斜率和曲率、凸凹性、拓扑特性等。

(6) 图像变换系数特征。如傅里叶变换、Hough（霍尔）变换、Wavelet（小波）变换、Gabor（伽柏）变换、哈达玛变换、K-L 变换等。

此外，还有一些其他描述图像的特征，如纹理特征、三维几何结构描述特征等。

4. 图像模式识别

图像模式识别的方法有很多。从图像模式识别提取的特征对象来看，图像识别方法可分为基于形状特征的识别技术、基于色彩特征的识别技术，以及基于纹理特征的



识别技术等。

根据模式特征选择及判别决策方法的不同，图像模式识别方法可分为统计模式（决策理论）识别方法、句法（结构）模式识别方法、模糊模式识别方法和神经网络模式识别方法等。

为了减少图像识别的运算量，一般要对图像感兴趣的区域进行划分。车道线图像划分如图 2-29 所示，区域 A 和区域 B 构成了感兴趣区域。其中，A 为近视区域，大约为道路区域的 $3/4$ ；B 为远视区域，大约为道路区域的 $1/4$ 。

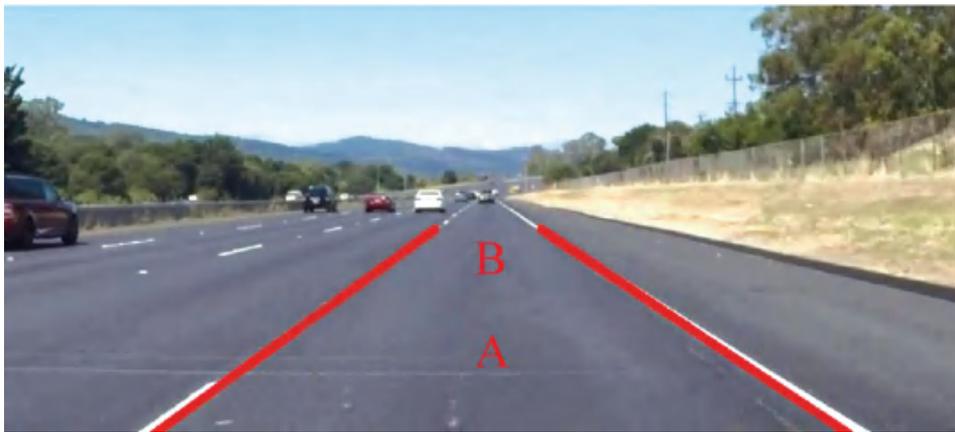


图 2-29 车道线图像划分

车道线基于形状特征的识别结果如图 2-30 所示。

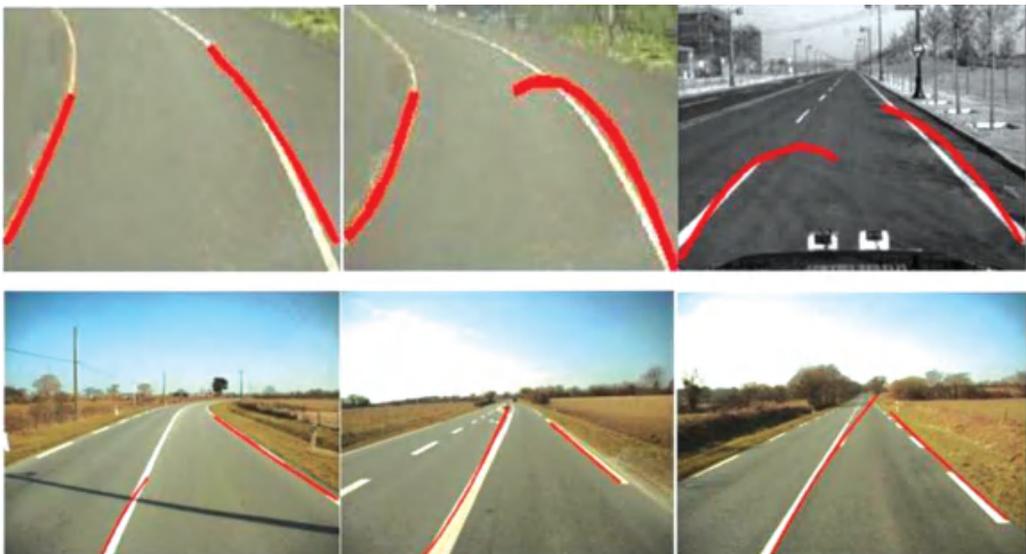


图 2-30 车道线基于形状特征的识别结果

5. 结果传输

结果传输是指通过环境感知系统识别出的信息，传输到车辆其他控制系统或者传



输到车辆周围的其他车辆，完成相应的控制功能。把车道线识别结果输入到车道偏离预警系统中，可以对车道偏离进行预警，如图 2-31 所示。



图 2-31 结果传输

任务八 视觉传感器的产品及应用

视觉传感器在智能网联汽车上的应用广泛，但公开资料非常少，特别是技术参数。

1. 博世汽车 ADAS 摄像头 MPC2

图 2-32 所示为博世汽车 ADAS 摄像头 MPC2，其主要性能参数见表 2-1。



图 2-32 博世汽车 ADAS 摄像头 MPC2

表 2-1 摄像头 MPC2 性能参数表

项目	参数
图像分辨率	1 280 像素×960 像素
最大探测距离	大于 120 m



(续表)

项目	参数
水平视场角	50°
垂直观场角	28°
帧率	30 帧/s
波长	400~750 nm
工作温度	-40~+85 °C

博世汽车 ADAS 摄像头 MPC2 具有以下特点。

(1) 实现多重安全性和舒适性功能，包括行人警告、前方碰撞预警、车道偏离预警、车道保持或车道引导支持、道路标志辅助及智能大灯控制。

(2) 在开发硬件、图像处理技术和功能时始终采用统一的博世内部流程，确保了所有部件的一致性。

(3) 博世开发的全面功能组合可与其他传感器（尤其是雷达）相结合，来提升紧急制动系统和自适应巡航控制的性能。

(4) 满足新车碰撞测试（NCAP）安全标准。

(5) 可扩展硬件概念，使部件可根据功能的复杂情况做优化配置。

(6) 支持 CAN、FlexRay（收发器）和 Ethernet（以太网）接口，满足不同的车辆通信需求。

(7) 遵循汽车开放系统架构（AUTOSAR）规范，可整合客户特定的代码。

(8) 可根据安装位置空间设计壳体。

(9) 紧凑型设计保证了其可以安装在车内后视镜的碰撞保护区内。

(10) 高度灵活的接插件。

博世汽车 ADAS 摄像头 MPC2 具有以下应用。

(1) 物体探测。MPC2 基于预定义的物体类别探测物体，经过训练的系统能够区分行人、自行车、摩托车、乘用车和卡车。被探测的物体具有距离、速度、横向定位、角度及碰撞时间等属性。探测距离与物体的大小有关，车辆的可探测距离超过 120 m，行人可探测距离约为 60 m。行人探测功能是按照 ISO 26262 风险等级 ASIL A（汽车安全完整性等级 A）开发的。

(2) 车道探测。无论道路标线是连续、不连续、白色、黄色、红色还是蓝色的，MPC2 所用的车道探测算法都会对前方约 60 m（能见度极佳条件下可达 100 m）以内的所有常见车道标线进行记录和分类。摄像头甚至可以探测凸起型道路标线。系统不仅能够探测道路标线的横向几何结构，还可记录表面坡度，以跟随上下坡度的路面轨迹。如果不存在明显的道路标线，则系统会提取附属的信息，如路边的草地边缘，以决定行车道如何延续。算法能够十分精确地确定车辆在车道中的横向位置和角度，这一点对于车道偏离预警、车道保持、车道引导支持等功能具有十分重要的意义。即使道路标线暂时消失或某路段上没有标线，使用这种车道探测算法的车道辅助功能仍能



完全发挥作用并能随时提供支持。

(3) 道路标志识别。MPC2 能够探测和区分圆形、三角形和矩形道路标志,包括限速路段或禁行路段的起点和终点。同时,它能识别“禁止驶入”“停车”“可通行”和“道路施工”等标志,还能区分时段限制、仅针对特定车辆类型的标志及转向箭头等相关辅助标志。系统能可靠地探测到道路标志,无论是实际的标牌、可变信息牌系统,还是龙门架上的标牌,对国际上各种不同类型的道路标志牌均有极高的覆盖。

(4) 光源探测。除物体探测外,MPC2 还可在黎明、黄昏或黑暗条件下识别并区分单个、成对和成组的光源。其算法测量光源的水平和垂直角位置与距离,区别前大灯和尾灯,以区分光源是迎面来车还是前方同向行驶的车辆。它还能探测和区分道路基础设施,如路灯和反光标志。利用这些数据,并结合环境光线信息,其算法将评估车辆是否在市內行驶,从而决定是否开启远光灯。

迎面来车大灯的探测和分辨距离可达 800 m,前方车辆尾灯的可探测距离约为 400 m。MPC2 能够提供一系列智能照明功能,满足包括远光灯控制、自适应远光灯控制和连续远光灯控制等系统在内的基于现代大灯技术的高级功能。

2. 视觉传感器的典型应用

视觉传感器在智能网联汽车上有以下典型应用。

(1) 车道偏离预警系统。车道偏离预警系统可比较道路标线与车辆在车道中的位置。当车速达到设定车速时,一旦系统探测到驾驶员存在无意识偏离行车道的危险,系统便会发出视觉信号、听觉信号或触觉信号,如转向盘的振动,如图 2-33 所示。这些警告提示驾驶员车辆正在偏离车道,使驾驶员有足够的时间纠正方向,从而避开危险。当驾驶员打开转向灯有意变换车道或转向时,该功能不会发出警告。



图 2-33 车道偏离预警系统

(2) 车道保持辅助系统。当车道保持辅助系统探测到车辆以不低于设定车速(如 60 km/h)行驶时,过于靠近车道标线,系统会轻微但可感知地反向转动转向盘,以使车辆保持在正确的道路中,如图 2-34 所示。驾驶员可以单独设定转向干预点和干预强度,选择在早期进行轻微干预或者在稍后进行较强干预。系统可通过电子助力转向直接进行干预,也可通过对车辆一侧施加制动而间接进行干预。驾驶员可随时接管该功

