

# 车辆超车视觉辅助导航系统研究

王伟莉 曲仕茹

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

**摘要** 为了能够提高行驶速度,保障行车安全,提高行驶环境认知,设计了一个基于单目视觉的车辆自适应道路、前车检测、超车指导系统,其主要应用于双车道结构化道路,而且在晴天与阴天不同天气情况下,车道线以及深色、浅色车辆均可识别,并可跟踪、超越前车。实验结果表明,该系统可以应用于不同环境背景下,该系统已通过了远距离自动、安全、准确地检测,并进行了超越前车的仿真实验。

**关键词** 单目视觉 道路检测 前车检测 超车

中图法分类号: TP242.62 TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)04-0709-07

## A Vehicle Overtake Accessorial Navigation System Based on Monocular Vision

WANG Wei-li, QU Shi-ru

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

**Abstract** A lane and preceding vehicle detection and overtake system based on the monocular vision is designed for intelligent vehicle in structural two-lane road environment, which can work in both sunny and cloudy days. Experimental results show that the algorithm used in the system can detect the lane and the different preceding vehicle and overtake vehicle automatically, safely and exactly under different visibility conditions.

**Keywords** monocular vision, lane detection, preceding vehicle detection, overtake vehicle

### 1 引言

近几十年来,随着计算机技术迅猛发展,车辆导航的研究开发得到广泛关注。在车辆导航研究领域,利用计算机视觉理解道路环境一直是一个十分活跃的研究课题。经过多年的发展,各种智能化实验车已经逐步进入实用阶段,其中比较著名的有德国的 VaMoRs、Caravelle 实验车和 EMS-Vision 视觉系统<sup>[1]</sup>,美国卡内基梅隆大学(CMU)的 NAVLAB 系统<sup>[2]</sup>等都是些较为典型和成功的智能车系统。其中, VaMoRs 实验车能够在川流不息的普通高速公路上,以 130km/h 速度与有人驾驶的车辆一起行驶,并能完成超车换道等动作; Navlab5 系统于 1995 年首次进行了横穿美国

大陆的长途驾驶实验,它自主驾驶的平均速度为 88.5km/h,并可以识别道路的水平曲率和车道线。若要理解道路环境,则首先要准确定位出道路中的障碍物。由于在结构化公路环境下,障碍物主要是车辆和路边护栏,因此,识别车道线和定位图像中的车辆障碍物是实现车辆自动导航和辅助导航的基础,而在超车过程中,对行车道、超车道同时进行检测及对前车进行相对不同位置的动态检测是一个关键的难点技术环节。针对当前流行的双目视觉导航中存在的对应点匹配困难和计算成本、硬件成本较高的问题,本文设计了一个稳健性较好的基于单目视觉的行车指导系统,该系统可进行道路及前车检测,并可指导超越前车,其可应用于晴天和阴天不同环境的超车辅助导航。

基金项目:国家自然科学基金重点项目(60134010)

收稿日期:2006-10-09;改回日期:2006-11-30

第一作者简介:王伟莉(1980~),女,西北工业大学自动化学院在读硕士研究生。主要研究方向为交通图像识别与处理。E-mail:wweili@hotmail.com, wangweili@126.com

## 2 车辆导航系统原理

车辆导航系统是通过车内前窗玻璃后的 CCD 摄像机拍摄到的  $152 \times 123$  (pixels) 大小的前方路景图像序列取得的环境信息来计算得到模拟道路线、前车位置(在结果图像中标注)以及根据本车相对于道路的位置及与前车的相对位置,给出相应的驾驶指令。

该系统由道路检测、道路跟踪、车辆检测、车辆避让<sup>[3]</sup> 4 部分组成(见图 1)。系统得到第 1 帧图像后,首先检测道路,然后启动车辆检测,若存在障碍物车辆,则设目标存在标志为真,否则为假。其中道路跟踪和车辆跟踪与避让分别独立进行,道路跟踪在首帧图像的信息基础上进行就进搜索,并每隔 20 帧重新检测 1 次,若发生道路信息丢失,则重新启动道路检测;同理,车辆检测也在前一帧图像信息的基础上进行判断,由于在高速公路上车辆行驶速度快,因此在距前车很远时就需检测出前车,而远距离前车检测与远距离前车信息模糊相矛盾,为此需采用概率判定目标存在与否,若目标存在,则启动车辆跟踪与避让指导,若车辆目标丢失或误判,则设目标存在标志为假,重新进行车辆检测。

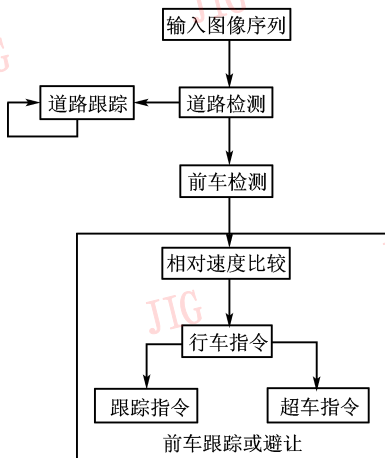


图 1 系统组成框图

Fig. 1 The block diagram of system composing

## 3 道路检测及跟踪

结构化道路一般是高速公路和部分结构化较好的公路,这类公路具有清晰的车道线(一般为连续的白线或白色的短划线)。在结构化道路情况下,

车道检测可以简化为车道线检测。由于结构化公路的设计都具有严格的行业标准,车速为  $120\text{km/h}$  时的极限转弯半径为  $650\text{m}$ ,一般最小半径为  $1000\text{m}$ ,因此,近视野内的车道线完全可以近似为直线。

### 3.1 车道线检测

为了减小运算量,应尽可能避免道路背景中复杂的自然景物对车道线检测的影响,在车道线的初始检测过程中,可将研究区域取为陆天分界线下的图像下半平面中的矩形区(见图 2)。在此区域内进行研究,首先划分出以下 3 条车道线:行车道两边的车道线与超车道左侧的车道线(若车辆行驶在超车道上时,则检测高速公路护栏的位置)。本系统主要研究高速路上的运行对象,而高速路为了缓解司机长期驾驶的视觉疲劳和保证车辆能长期快速行驶,绝大部分路段由于都采用曲率较小的弯道设计,因此可暂不考虑车道的曲率,但在拟合车道线时,应从研究区域的上方开始,即尽量取前方道路模型,以保证车辆快速行驶。

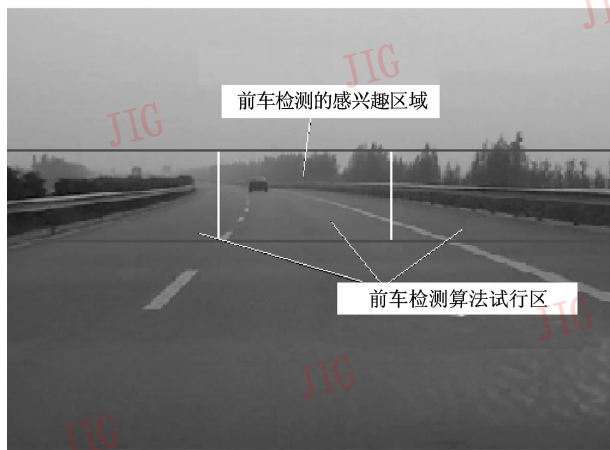


图 2 检测范围示意图

Fig. 2 The sketch map of detect range

检测车道线时,算法应该尽量利用车道线特征。一种常用的方法是利用车道线灰度高于其两侧邻域灰度的知识来检测车道线,但灰度信息受光照条件影响很大。文献[4]就是利用灰度边缘检测车道线,虽然差分后的图像不容易受原始图像的亮度变化影响,但对外来边缘造成的噪声比较敏感。

本文在提取车道线特征时,先利用道路的先验知识确定特征点来抑制噪声的影响;然后用加权线性最小二乘法拟合特征点来取得车道线模型  $f(x) = kx + b$ 。由于越靠近底端的车道线离本车越近,特征越明显,因此,为拟合残差需加上一个与纵坐标

相关的权值:一个简单分段函数——降半二次凸函数:

$$w = \begin{cases} \frac{(h-a)^2}{(c-a)(g-a)} & 0 < h \leq 0.3 \times H \\ 0 & h > 0.3 \times H \end{cases}$$

其中,  $a$  为 0,  $c = 0.3 \times H$ ,  $g = \frac{(a+c)}{2}$ ,  $h$  代表图像高度变量,以图像平面的左下角为坐标原点,  $H$  为图像的高度。所选直线  $f(x)$  的匹配程度为

$$\Delta = \sum_{(x_i, y_i) \in \Omega} T_i (y_i - f(x_i))^2$$

其中

$$T_i = \begin{cases} 1 & w_i > 0.6 \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$\Omega$  为近视野中特征点的集合,  $x_i$ 、 $y_i$  为所得第  $i$  个特征点的坐标值。计算后匹配程度最大的直线即为拟合结果,若使目标函数  $\Delta$  对两个参数  $k$  和  $b$  的偏导数为 0,则得到的  $\Delta$  取最大值时的  $k$  和  $b$  为

$$k = \frac{mm_{xy} - m_x m_y}{mm_{xx} - m_x m_x}, b = \frac{m_y - m_x k}{m}$$

其中,  $m = \sum_{i=1}^n T_i$ ,  $m_x = \sum_{i=1}^n T_i x_i$ ,  $m_y = \sum_{i=1}^n T_i y_i$ ,

$$m_{xy} = \sum_{i=1}^n T_i x_i y_i, m_{xx} = \sum_{i=1}^n T_i x_i^2。$$

最后在结果展示图像中标记出左、右车道线及超车道边界线的拟合直线,并由左、右车道线模型获得道路中线(参考路径),同时计算本车距道路中线的水平偏移量和偏航角。

### 3.2 车道线跟踪

为了减少运算量,并保证车道线检测的精度,可采用检测与跟踪相结合的方法。车道线跟踪的过程其实就是道路模型动态更新的过程。由于图像序列的时空连续性,对于结构化道路上信息提取采样率(8fps)足够高的图像序列,车道线位置不会突然改变,因此,本文不考虑动力学影响,直接将前一帧车道线位置作为下一帧车道线的预测位置。

VaMoRs、Navlab5 等系统在更新道路模型前,需要先将特征由 2 维变换到 3 维,然后再重投影回 2 维,由于这里采用的跟踪算法是直接 在 2 维平面内更新模型,因而不会受到 3 维重建和投影过程中误差的影响,这样计算机处理图像时就无需做运算量大的数据匹配,可节约时间。

车道线跟踪时,在前一帧特征点左右 24pixels 宽的水平邻域内搜索新的特征点。即将左、右车道

线的搜索区域缩小为两个狭长的带状区域,同时将超车道边界线范围限定在一个小范围内。若车辆在行车道上,则检测跟踪行车道两侧边界线及超车道边界线;当车辆行驶在超车道上时,则可以转换成检测跟踪超车道两侧的车道线及边界护栏,以保证行车安全。

同样可采用线性加权最小二乘法拟合来提取新特征点,由于处理范围小,因此跟踪算法所需时间远少于初始检测。若跟踪算法无法定位新的车道线位置或前后两帧位置差异太大,则继承上一帧车道线位置;若连续 3 帧无法定位或差异太大,则认为道路丢失,需重新启动检测模块。以后每跟踪 20 帧,同样重启道路检测。在超车换道过程中,中间的车道线可以暂时不划,但需时时检测,当车辆跨过中间的车道线时,则左侧的车道线需及时提供,以避免车辆越界,当车辆行驶在超车道上时,可根据前车和车道线的检测结果来进行是否换回行车道的抉择,并提供指令。另外,在整个行车过程中,应随时提供行车指导,以保证车辆安全行驶。

## 4 车辆检测与避让

车道线检测后,再根据每帧所得结果进行前方障碍物检测。车辆前方图像中包含很大视野内的物体,如天空、树木、桥梁、其他车辆及由于道路的弯度而看不到 的前方道路边界的障碍物等。由于障碍物的干扰及车辆逆光行驶时的车窗反光造成的信息丢失,以及高速行驶时,致使远距离检测前车与前车信息模糊相矛盾,因此,远距离准确检测出前方车辆是一项困难的工作,必须适应不断变化的道路场景和光照条件。在超车过程中,由于要不断检测前车的相对位置、速度、大小变化,并及时更新检测范围,因此,需要一种适应性强的综合算法,用于进行实时检测,以便从 2 维图像中能尽可能多地提取空间信息。

### 4.1 车辆检测

车辆检测是在道路检测的基础上进行。从道路的序列图像中前 10 帧图像信息中拟合车道线,先取得车辆所行车道的两车道线交点坐标,若 10 帧图像中交点的纵坐标相差值在 5pixels 内的概率大于 80%,则保存纵坐标值,并取交点纵坐标上下 25pixels 之间的整个横向区域即为前车检测算法得到的试行区(见图 2)。

而前车检测的感兴趣区域,在整个超车过程中,为了避免环境对前车的干扰,检测区域需根据前一帧前车位置、当前帧前车检测结果、检测区域边界值的设定来确定。检测时,首先,用前车检测算法计算试行区水平边缘投影图,投影图中的自底向上第 1 个对应的水平位置必须是前方车辆绝大部分时段下边缘所在处,为了保证算法的鲁棒性,可将此行向下的第 3 行作为检测到的下边缘,上边缘检测同理,并在此范围内实时检测前车存在与否;然后,定义以下边缘所在行,并将其作为底边,并将图像中间位置左右 45pixels 间的部分作为前车感兴趣区(图 2)。此感兴趣区在后面的车辆避让过程中,将随着前车检测频率与位置的改变而改变。由于文献[4]中未对车辆进行精确检测,导致后续计算量增大,因此可在粗检测矩形框内,做检测目标的竖直边缘投影,首先找到投影图中最大值和与最大值横向间隔不小于 8pixels 的差值,若两值相差不大,则竖直投影分别对应检测目标的左右边缘,否则认为目标不存在或足够小,不会对本车造成威胁。

在实际的检测过程中,由于天气、道路弯度、前车颜色、车窗反光等的影响,给前方车辆的检测带来很多困难,本文通过晴天和阴天的检测,基于高通滤波的算法对边界比较敏感的特点,笔者发现超车过程中,前车在图像中的视觉效果变化较大,其对于车体整体颜色相近的深色车检测效果比较好,而对于白色的前车,则由于车灯和车体颜色差异太大,还需要通过形态学变换来排除干扰。综合上述两种情况,局部高通滤波后,还需先进行形态学变换的全方位腐蚀,再采用概率检测前车位置,通过实验,此方法可行。由于本文是采用二值形态学的腐蚀算法,在进行运算时,要求图像只能有“亮”和“暗”两种取值,因此在程序实现时,对于待处理的图像需进行二值判断,而经过巴特沃斯高通滤波后,由于高频的区域已赋成白色,因此为了防止道路边缘的树木等干扰,腐蚀算法的阈值应取接近白色的 230 灰度值,以减少道路边界造成的干扰。

获得假设目标后,再用目标位置和检测稳定性来验证假设。如果验证成功,则设目标存在标志为真;否则为假。

#### 4.2 前车跟踪检测

在道路序列图像中,由于前方车辆并不会立即从视野中消失,因此可以用前一帧图像获得的

信息来指导当前帧前车的检测,以提高处理速度和鲁棒性。在超车过程中,由于本车与前车的相对位置随时改变,且受高速路曲率的影响,图像背景干扰很大,而常用的模板匹配法计算复杂,且不适用于检测范围随时改变的情况,因此应先采用高通滤波器预测下一帧中目标矩形中心的位置,然后在其附近建立新的搜索窗,并根据车辆相对检测框的位置变化趋势来改变检测框的位置。与检测框位置有关的因素有:①前一帧检测到的前车边界及其与检测框间距离的限制;②根据前 20 帧内检测到前车的概率判定前车存在与否;③检测框与图像边界的距离限制。由于车辆跟踪过程中需要注意的是目标车辆相对于本车的相对 2 维位置和速度,因此可利用目标的 2 维动态模型,采用以下 4 维状态变量来判定:

$$s(n) = [x(n), v_x(n), y(n), v_y(n)]^T$$

包括目标点在时刻  $n$  的相对横坐标、横向速度、纵坐标及纵向速度。一旦检测到车辆,就创建参考模板,先确定当前目标状态向量,并从下一帧开始跟踪,同时预测图像中车辆的位置,然后用预测值与真实测量值之间的差来更新模型状态变量。

在检测过程中,在新的搜索窗中自底向上检测前方障碍物,检测框横向位置随着前一帧前车位置与当前帧前车的相对位置取得左右偏移量,若是在 5 帧内没有检测到前方车辆,则将检测框居中;检测框纵向位置由于在行车过程中,需要观察的前方景物范围不大,因此可设定一个固定的检测范围。检测结果可通过定义一个似然度函数(包含模板的熵值差、平均灰度差、灰度对称性、边缘对称性 4 个影响因子)来验证目标<sup>[5]</sup>,该函数具体为

$$\left(\frac{S_{\text{grey}}^H + 1}{2}\right) \times \left(\frac{S_{\text{edge}}^V + 1}{2}\right) \times f(\alpha_1, d_{\text{entropy}}) \times f(\alpha_2, d_{\text{grey}})$$

$S_{\text{grey}}^H$  和  $S_{\text{edge}}^V$  分别为新目标矩形的水平灰度对称和边缘对称测度,  $d_{\text{entropy}}$  是目标与模板的熵值差,  $d_{\text{grey}}$  是目标与模板的灰度差,  $f$  是罚函数,  $f(\alpha, t) = \frac{1}{1 + \alpha t^2}$ ,  $d_{\text{entropy}}$  是比特数,取值较小,而  $d_{\text{grey}}$  是灰度绝对值,取值较大,为了平衡其对似然度的影响,可取  $\alpha_1 = 1$ ,  $\alpha_2 = 0.0025$ 。似然度函数的取值范围为  $[0, 1]$ , 取值越大,越可能是车辆障碍物,判断阈值取为 0.5, 若大于此阈值,则验证成功,需更新参考模板,继续下一帧的跟踪,否则认为车辆目标丢失或误判,设目标存在标志为假,再重新检测。

### 4.3 车辆避让

在车辆跟踪一段时间后,通过测速雷达计算本车和前车的相对车速,决定是否超车。在车辆行驶的序列图像中,由于车辆在超车过程中,左右车道切换比较复杂,包括检测范围的重新定义,车道线的斜率变化范围比较大,因此最后的检测效果不理想。考虑到在车辆换道过程中,车道线可暂时不显示,但在换道即将结束时,需及时提供左侧车道线,以避免车辆与道路边界冲突。在避让前车过程中,前车在图像中的位置变化较大,为了能准确检测前车位置和排除干扰,检测范围需要通过前一帧与当前帧信息进行比较及当前帧检测结果是否合理两方面因素的综合分析才能给出判断。

(1) 当前帧前车检测结果左边界大于检测框左边界内 10pixels,且检测框右边界小于图像右边界时,则检测框可以右移;

(2) 当前车左、右边界没有检测到或检测框范围大于图像边界时则检测框复原回到图像中心;

(3) 当检测到的前车很小,且前车左边界与检测框左边界很近时(小于 15pixels),则检测框左移,同理,当前车右边界与检测框右边界相距很近时,则检测框右移。

系统流程图如图 3 所示。整个车辆辅助指导包括检测前车、跟踪前车、换道超车、返回行车道几个过程,在整个超车过程中,系统界面用于提供行车指导。提示语言的选择由左右车道的检测概率、前方车辆检测概率及与本车的相对位置来决定。

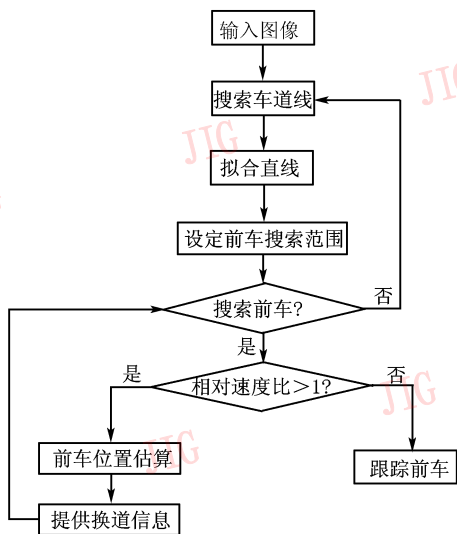


图 3 系统流程图

Fig. 3 Flow chart of system

### 4.4 与前车车距估算

使用单目视觉传感器检测时,距离不能直接获得,需要事先作离线标定,即先用最小二乘法得到消失点纵坐标  $H_0$  和焦距与像素在  $y$  轴方向上物理尺寸的比值  $a_y$ ,再通过测距模型<sup>[6]</sup>

$$d = ha_y / (y_{low} - H_0)$$

计算行驶距离,其中  $h$  为摄像机的高度,  $y_{low}$  为目标车辆的下边缘纵坐标,而在实际超车过程中,只有本车与前车的相对距离并不是确切距离才能超车,可以取

$$d = ha_y / (y_{low} - 2.5 - h_0)$$

这样取的目的是尽可能安全有效地取超车决策时的两车距离值。

车辆行驶瞬间可看作是匀速运动,本文的系统采用下面的临界安全车距公式来动态地得到安全车距<sup>[7]</sup>:

$$S_{\text{临}} = 0.36V_r + 0.33V_b + \frac{V_r(2V_b - V_r)}{25.92j_{\text{max}}}$$

其中,  $V_b$  为本车车速,可由速度传感器得到;  $V_r$  为相对车速,由车辆跟踪模块中的测速雷达得到;  $j_{\text{max}}$  为车辆最大持续减速度,对于每一辆车最大持续减速度应限定在一个很小的范围内,临界车距的单位为  $m$ ,速度单位为  $m/s$ 。

## 5 实验结果分析

系统框架及所有算法在 Microsoft Visual C++ 6.0 环境下编译完成。为了验证系统算法的可靠性和实时性,本文利用高速公路上采集的不同车型、不同路段、不同光照、不同天气情况下多组道路图像作为测试序列,进行了大量实验。实验时,可根据前方车辆的大小,采用一个 2 维模型——红色和黄色两条横向线段表示检测到的车辆,由于前车的上下边界对车辆超车影响不大,因此这里重点考虑前车左右边界,即两线段的左右边界,检测信息在前车高低边界之内即可。图 4 是系统的车辆检测结果图。

下面给出 2 组不同情况下道路和前车的检测、跟踪、超车过程结果图(见图 5,图 6)。由图 5 及图 6 可以看出,在前车为不同车型和颜色的情况下,本文提出的算法都能够鲁棒地跟踪检测到前方车辆。算法中采用了频域滤波操作,响应时间约为 110ms,可基本满足实时性要求。

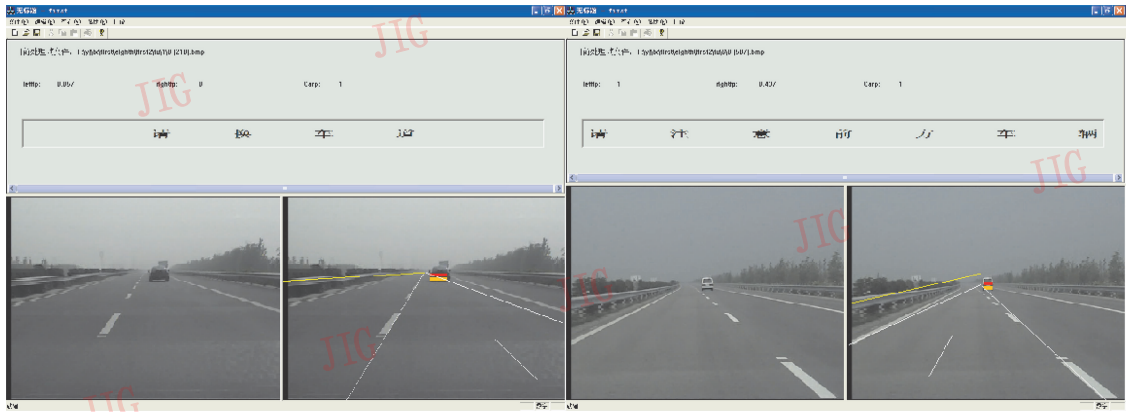


图 4 系统车辆检测结果图

Fig. 4 Result map of system

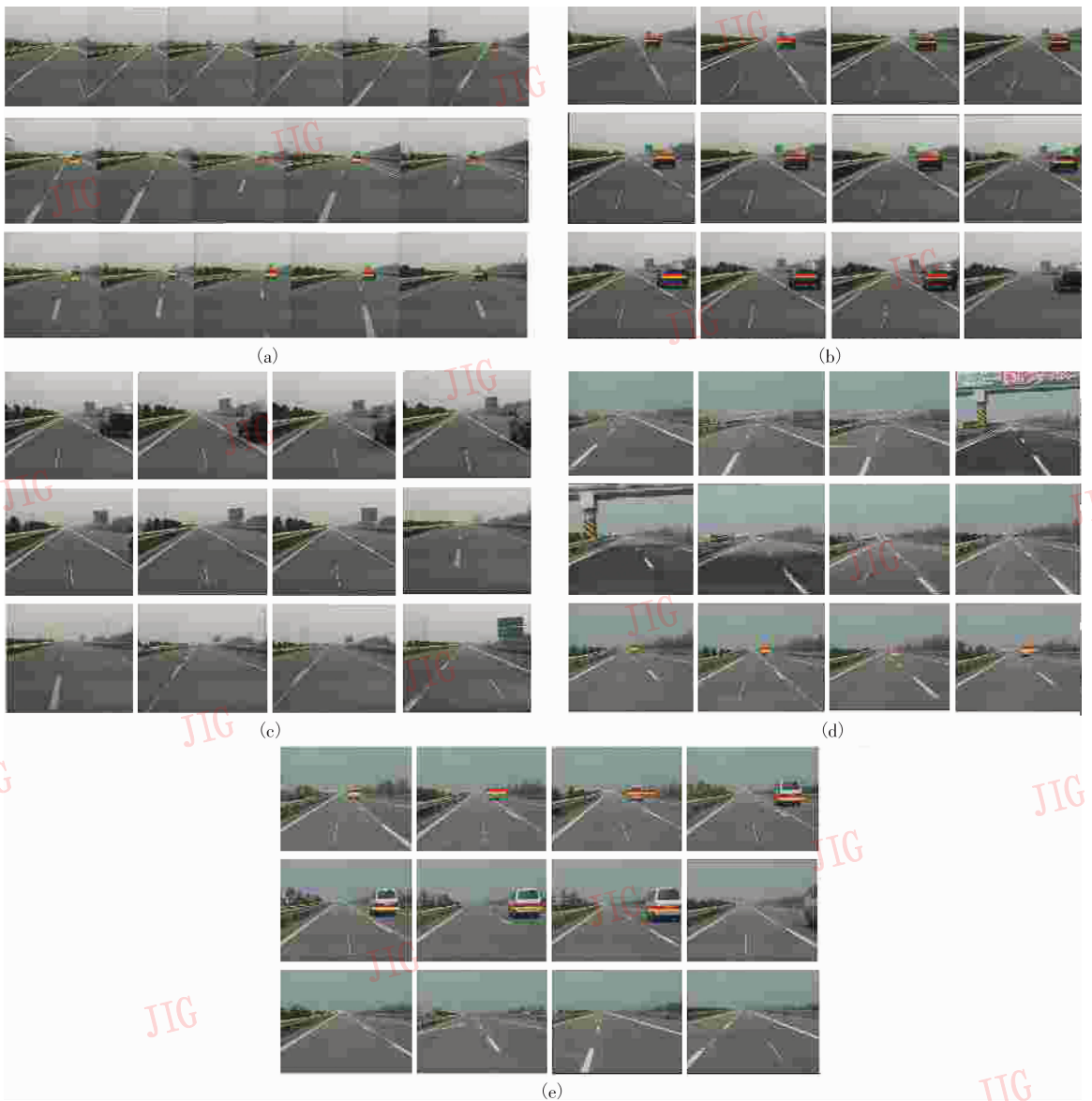


图 5 前方为深色小车的检测跟踪结果序列图

Fig. 5 Result map of detect black car and roads



图6 前方为浅色面包车的检测结果图

Fig. 6 Result map of detect write van and roads

## 6 结论

本文设计了一个基于单目视觉的车辆前车检测、跟踪、超车辅助指导系统,并提出了一种在不同背景下能自适应检测和跟踪道路、障碍物,并指导超越前车的算法。其在进行车辆检测、跟踪、超越时,能适应晴天和阴天不同的天气情况,以及前车为黑色轿车和白色面包车的不同车型和颜色的情况。检测时,通过分析前视图像的水平垂直边缘投影图,首先获得前车检测的信息;然后,利用高通频域滤波器跟踪目标,并设计了一种新的验证目标的似然度函数,实验结果表明,检测跟踪效果令人满意。该系统适用于障碍物主要为车辆的结构化双车道道路环境,具有工程实用价值。目前该系统只考虑了车辆较少的高速公路的情况,且只能检测前方的障碍车辆,而对于后方的驾驶环境和前方为多车辆的情况,则还有待于进一步研究探讨。

### 参考文献 (References)

1 Gregor R. Liitxeler M, Pelllcofer M, *et al.* EMS-Vision: A perceptual system for autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions, on Intelligent Transportation Systems, 2002, **3**(1): 48 ~ 59.

2 Thorpe Charles, Hebert Martial H, Kande Takeo, *et al.* Vision and navigation for the Carnegie-Mellon Navlab [J]. IEEE Transactions on Pattern and Machine Intelligence, 1988, **10**(3): 362 ~ 373.

3 Massimo Bertozzi, Alberto Broggi, Massimo Cellario, *et al.* Artificial vision in road vehicles [J]. Proceedings of the IEEE, 2002, **90**(7): 1258 ~ 1271.

4 Su Kai-na, Ren Wen-jun, Yi Xiao-ling, *et al.* A kinematic model-based road recognition and tracking [J]. Journal of Image and Graphic, 2000, **5A**(3): 226 ~ 231. [苏开娜, 任文君, 易小琳等. 基于运动模型的道路识别与跟踪算法的研究 [J]. 中国图象图形学报, 2000, **5A**(3): 226 ~ 231]

5 Pi Yan-mi, Shi Zong-ke, Huang Jin. A lane and preceding vehicle detection system based on monocular vision [J]. Computer engineering, 2005, **23**(03): 186 ~ 188. [皮燕妮, 史忠科, 黄金. 智能车视觉导航的道路和前车检测系统 [J]. 计算机工程, 2005, **23**(03): 186 ~ 188.]

6 Wang Rong-ben, Li Bin, Chu Jiang-wei, *et al.* Study on the method of measuring the leading vehicle distance based on the On-board monocular camera [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, **18**(6): 94 ~ 98. [王荣本, 李斌, 储江伟等. 公路上基于车载单目机器视觉的前方车距测量方法的研究 [J]. 公路交通科技, 2001, **18**(6): 94 ~ 98.]

7 Zhong Yong, Yao Jian-feng. A Formula of the critical safety distance between two moving vehicles [J]. Journal of hunan university, 2001, **28**(6): 54 ~ 58. [钟勇, 姚剑锋. 行进中车辆临界安全车距的探讨 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2001, **28**(6): 54 ~ 58.]