

基于单目视觉的高速公路车道保持与距离测量

周欣 黄席樾 黎昱

(重庆大学自动化学院导航制导研究所, 重庆 400044)

摘要 汽车智能辅助操作系统是智能交通系统的重要组成部分,也是目前国际上的热点问题.基于计算机视觉技术的车道保持,即视觉导航是辅助操作系统的核心问题之一.该文提出一种基于单目视觉的公路分道线二维重建算法和距离测量算法.其基本思想是根据分道线灰度与几何特征建立约束方程,进而跟踪提取分道线,并用二维模型重建.在此基础上,首先获得车道保持的必要道路参数,然后在二维重建的基础上,进一步实现了基于分道线几何约束的单目测距算法.在四川省与重庆市的高速公路上的实验证明,车道保持算法的实时性与精确性已基本满足实用要求;单目测距算法的精确度也能满足安全行车防止碰撞的需要.

关键词 计算机感知(520·2050) 单目视觉技术 车道保持 二维模型 单目测距

中图分类号: TP242.62 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2003)05-0590-06

Lane Keeping and Distance Measurement Based on Monocular Vision

ZHOU Xin, HUANG Xi-yue, LI Yu

(Control and Navigation LAB of Automation Department, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract Vehicle intelligent auxiliary drive system is the important part of the intelligent transport system. Using computer vision technique to solve this problem is a challenge work for every researcher in this field. The lane keeping and distance measurement based on the computer vision technique is the key problems of the auxiliary drive system. This paper describes the 2D reconstruction and distance measurement algorithms based on the monocular vision. The image is captured by CCD camera on the highway. The key thought is that establishes restriction functions for lane lines, tracks and reconstructs the lane line, gets the necessary parameters for lane keeping. Then based on the 2D reconstruction and geometric restriction, the distance between the vehicle and the obstacle can be measured with a single view. This paper also analyzes the parameters of the lane and gives the rule for lane keeping for automation navigation. All the algorithms are finished by VC++ 6.0. The experiments on highway in Sichuan province and Chongqing city show that the lane keeping algorithm is real-time and accurate enough to utility; and the accurate of monocular measurement algorithm can be accepted by the collision avoidance. The whole system can work well with 80km/h on the highway. To improve the real-time quality of monocular measurement algorithm is the next work.

Keywords Monocular vision technique, Lane keeping, 2D model, Monocular measurement

0 引言

汽车智能辅助驾驶系统是智能交通系统(Intelligent Transport System)的重要组成部分.近年来,受到越来越多的重视.对于激光、雷达和超声波等传感器,视觉信号具有探测范围宽、目标信息完

整、价格相对便宜,而且更符合人的认知习惯等优势,特别在对道路及分道线的探测方面,视觉信号具有无法替代的优势.因此,很多学者都契而不舍地尝试用计算机视觉技术来解决智能辅助驾驶系统中的辅助导航问题^[1].

许多学者曾试图用双目或多目视觉技术来解决该课题,不过他们面临的最大难点就是大家熟知的

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69674012)

收稿日期:2002-07-09;改回日期:2002-11-29

特征点匹配问题;当然实时性、协同性和价格也是其不容回避的问题^[2~4].同时许多研究人员也曾致力于单目视觉技术^[5~8]的研究,但他们的方法均缺乏实时性,而且只侧重在整个路面的处理,而忽视了分道线的作用,更没有提出车道保持的必要参数.当然也有学者尝试用三维重建的方法来解决车道保持问题^[9,10],然而其算法复杂度太高,并需依赖于一定假设,这些研究者本身也对此有疑虑:“Can the reconstruction be carried out in real time as the vehicle navigates?”^[9].

由此可以看出,辅助导航是一个相当困难的问题.在前人工作的基础上,通过长期研究,笔者提出一种新的方法用来解决这个课题,即通过对分道线特征建立约束方程来搜索提取完整的当前车道分道线;在用二维模型重建分道线的同时,得到车道保持的必要驾驶参数.这种基于二维模型的重建分道线算法实时性好,并且为当前车道上的障碍物识别打下基础.更重要的是,二维重建为单目测距提供了必要的保证,并可使用一个摄像机来实现公路上的距离测量.

系统的 CCD 摄像机安装在方向盘旁边,基本在汽车的中轴线上,光轴与底盘平行.其摄影图象为 256 级的灰度图象.另外,根据行车安全要求,调整 CCD 摄像机的视距在 35m~200m.该系统主要应用在高速公路和标准高等级公路行驶的汽车上,实现的主要功能是车道保持和避免碰撞.车道保持主要是指使车辆保持在当前车道中央行驶,并且保证行驶方向与当前车道延伸方向一致;避免碰撞主要是完成当前车道上的车辆检测、跟踪和距离测量,保持车距,保证不发生碰撞.本文主要介绍车道保持算法和障碍物距离测量算法,而障碍物的检测与识别在另文中有详细介绍.

1 车道保持算法

本方法在实现车道保持时,要完成当前车道分道线提取、分道线二维重建、分道线参数分析 3 个任务.通过对公路摄影图象的分析可以看到,因为公路区域在图象中的位置有一定规律,所以可通过采样,并聚类得到“路面类”,进而获得当前路面的平均灰度值^[11].在此基础上再进行进一步分析.

1.1 分道线提取

图 1 是一幅从行驶汽车上拍摄的高速公路左弯

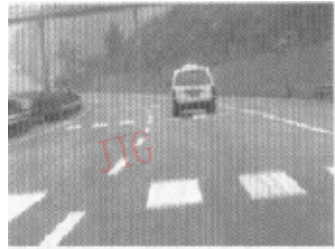


图 1 公路典型图象

道图象.由于路面有一些道路标志,比一般的道路处理难度,所以本文以它为例来说明算法具有普遍性和实用性.

为了突出特征和提高实时性,仅对分道线的边缘进行处理.预处理的第 1 步是边缘提取,这里不需要特别的边缘提取算法,传统的各种算法效果都可以接受.这里重点分析边缘图象.如图 1 所示,以左下角为坐标原点,向右为 x 轴正向,向上为 y 轴正向,以像素为单位长度,首先建立平面坐标,以便后面的分析.根据 y 轴坐标为 114 的灰度曲线(如图 2 所示)可得到分道线的两个约束条件:(1)分道线边缘有明显的阶跃,产生峰值,说明分道线的灰度远高于路面的灰度均值;(2)在分道线处的波峰宽度有一大致范围.由于我国高速公路分道线标准宽度是 0.22m 左右,且在投影图象上由近到远分道线宽度会产生规则变化,因此可在边缘图象基础上得到特征图象(如图 3 所示).

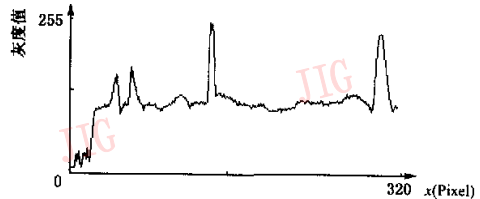


图 2 第 114 行灰度曲线



图 3 初步特征图象

从图 3 可以看出,在噪声较多的情况下,仅有上面两条约束是不够的,还必须找到更多的几何约束来确定分道线.我国高速公路线形由直线、圆曲线和回旋曲线组成,其半径产生规则变化,对于时速可达 120km/h 的高速公路,其最小半径不得小于 670m,而车道宽度应为 3.75m.分道线分为连续和间断两种(如图 1 的左右分道线所示).对于间断分道线,白线长度与间隔距离有固定值.这里设间断分道线两段白线中心间的距离为 d .这样可以运用以上条件构造搜索算法.通过 Hough 变换,可以得到两条直线 AB 和 CD (如图 4 所示).

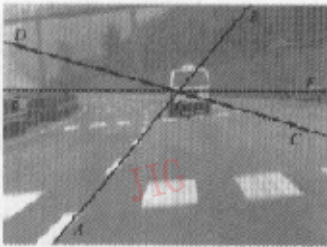


图 4 Hough 变换图

这两条直线是最小视距处分道线的切线.在图 3 中, AB 和 CD 的位置是容易确定的,因为当前车道的左右分道线与 x 轴的夹角绝对值最大,且异号,而相互之间的夹角最小(如果有多条分道线),所以当前分道线的搜索起始位置很容易确定.若分道线为连续线或直线型,则搜索不难.这里以图 1 的左分道线为例来介绍搜索算法.透视投影有基本投影方程^[12]

$$\begin{cases} x = fX/Z \\ y = fY/Z \end{cases} \quad (1)$$

式中, (X, Y, Z) 是世界坐标系, (x, y) 是图象坐标系; f 是摄像机焦距.由 Hough 变换所得 AB 和 CD ,其在图 4 中的直线方程为(y_1 为直线 AB 方程)

$$\begin{cases} y_1 = k_1x + b_1 \\ y_2 = k_2x + b_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中,下角 r 代表右(right), l 代表左(left).

由于最小视距远小于公路半径,可以认为最小视距处,公路分道线近似直线.如果公路有坡度 θ ,并且 CCD 摄像机光轴与当前分道线有夹角 α ,则可推算最小视距处分道线投影方程为

$$\begin{cases} y_1 = -\left[\frac{H\cos\alpha}{d_1\cos\theta}\right]x - f\left[\frac{H\sin\alpha\cos\alpha + d_1\sin\theta\cos\theta}{d_1\cos^2\theta\cos\alpha}\right] \\ y_2 = \left[\frac{H\cos\alpha}{d_2\cos\theta}\right]x + f\left[\frac{H\sin\alpha\cos\alpha + d_2\sin\theta\cos\theta}{d_2\cos^2\theta\cos\alpha}\right] \end{cases} \quad (3)$$

式中, H 是 CCD 摄像机光心离地面的高度; d_1 与 d_2 是汽车离左、右分道线的距离.通过分析可知,式(2)与式(3)是用不同方法得到的同一分道线的方程,因此联立式(2)与式(3),可解出 d_1, d_2, α, θ .假设每一段分道线为世界坐标系中的一个点,其坐标为 (X_i, Y_i, Z_i) ,则计算公式为

$$\begin{cases} X_{i+1} = [d_1 + R \times (1 - \cos(i \cdot d/R))] \cos\alpha - [d_{\min} + R \sin(i \cdot d/R)] \sin\alpha \\ Y_{i+1} = -H \cos\theta - [(d_1 + R(1 - \cos(i \cdot d/R))) \cos\alpha + (d_{\min} + R \sin(i \cdot d/R)) \sin\alpha] \sin\theta \\ Z_{i+1} = -H \cos\theta - [(d_1 + R(1 - \cos(i \cdot d/R))) \cos\alpha + (d_{\min} + R \sin(i \cdot d/R)) \sin\alpha] \sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

式中, $i=0, 1, 2, \dots, R$ 是曲线半径,需要在计算中调整,从直线到曲线, R 从 ∞ 到 670 变化. d_{\min} 是摄像机的最小视距.联立式(1)与式(4),就可以计算每段分道线在图象上最可能的投影位置 (x_i, y_i) .根据计算结果在图象上一定范围内搜索就可以找到每段分道线,并反馈回式(4)用于修正 R ,直至搜索结束(当在投影位置找不到分道线或多个候选者不能判定时,搜索结束).一般设定 R 的初始值为 ∞ ,通过 (x_i, y_i) 搜索到准确的 (x_{i+1}, y_{i+1}) 后,即可以计算出两点连线与 AB 在图象上的实际夹角;同时根据式(1)与式(4)可计算出其图象上的理论夹角,两者应相等,通过此等式可解得 R ,并以其作为下一步搜索的半径.

由于上面的假设和 R 的不精确性,搜索时,应在 (x_i, y_i) 附近寻找最大程度满足各项条件的特征点,并通过判断其连通性和形状来得到最终分道线,结果如图 5 所示.

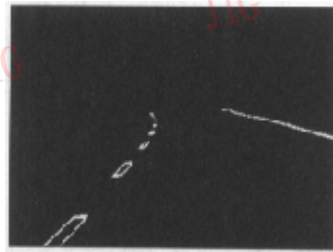


图 5 分道线特征点

1.2 分道线二维重建

为了更精确地描述公路延伸方向和实现单目测距以及便于障碍物的识别,本文将通过建立二维模型来重建分道线.在搜索特征点时,通过记录特征点在图象上位置的变化可以判断公路的大致形态,分类如下:直道,直道进入弯道,弯道,弯道进入直道.

其中对于直道,用上面 Hough 变换的直线模型进行重建即可;对于弯道进入直道的类型,近处弯道用一条直线(因为半径远大于视距),远处直道用一条直线进行重建,然后再进行光滑曲线连接即可.这两种情况均不困难,然而另两种类型仅用分段直线,则不能精确描述实际情况.为了简化问题,可以把这两种类型都作为弯道来建立二维模型.

如果路面有均匀坡度,根据透视投影原理可知,直道型公路边缘线的交汇点在地平线上^[11].对于弯道,可用图 4 中的平行于 x 轴过 Q 点的直线 EF 来代替地平线.通常情况下,这种假设与真实值仅有几个像素级的误差,不影响精度.另外,为了重建弯道,现在有以下信息可以利用:分道线特征点;分道线近处渐近线 AB 和 CD ;视距范围内远处渐近线 EF .由于 AB 和 CD 方程已知,因此可以求出其交点 Q 的 y 轴坐标值为 q .这里把上面得到的直线 AB 的方程简写为:

$$y = kx + b$$

直线 EF 的方程为

$$y = q$$

如果图 1 的左分道线有二维模型 $f(y)$,那么应该有

$$\lim_{y \rightarrow \infty} f(y)/y = 1/k$$

而二维模型 $f(y)$ 具有如下形式

$$f(y) = (y - b)/k + g(y)$$

又 EF 为水平渐近线,也就是说

$$\lim_{y \rightarrow q} g(y) = \infty$$

那么, $g(y)$ 应该具有如下形式(这里忽略了 $(y - q)$ 的高阶项)

$$g(y) = c/(y - q)$$

这样就可以得到左分道线的二维模型 $f(y)$

$$f(y) = (y - b)/k + c/(y - q)$$

式中,参数 c 可根据特征点用最小二乘法确定.这个二维模型实质上就是双曲线模型,其结果如图 6 所示.

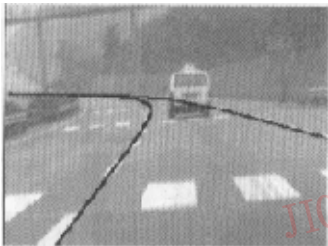


图 6 左弯道二维重建

虽然用双曲线模型来进行弯道二维重建,基本上符合实际情况,可以实用化,但是同时也发现,其对于左分道线的重建并不是很精确,这是因透视投影的压缩而造成的偏差所致;对于右弯道,同样它对右分道线的重建也会有一定偏差,而且这种偏差在曲率最大的地方最为突出.从本质上讲,该方法由于不是通过拟合特征点来重建分道线,因此不可能用调整参数的方法来修正误差,而必须对模型本身加以改进才能有更好的效果.根据透视投影原理,圆曲线、椭圆曲线、双曲线是性质类似的一组曲线,通过实验也证明,在较远处,椭圆曲线对左分道线的重建要优于双曲线,而对于左弯道的左分道线就要构造分段模型.同理可推广到右弯道的右分道线.

一般分段模型的分段点选取在特征点曲率最大处.设此特征点 t 坐标为 (x_t, y_t) ,则可以根据直线方程 $y = kx + b$ 与 $x = x_t$ 以及特征点来构造双曲线模型

$$y = kx + b + \tilde{c}/(x - x_t)$$

同时可根据方程 $y = q, x = x_t, y = y_t$ 和特征点来构造如下椭圆模型:

$$(x - \tilde{x})/(x_t - \tilde{x})^2 + (y - y_t)/(y_t - q)^2 = 1$$

其中,参数 \tilde{c} 和 \tilde{x} 可由最小二乘法得到.由左分道线的分段模型重建(图 7)可见,重建效果令人满意.

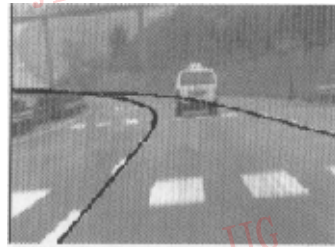


图 7 分段模型二维重建

1.3 分道线参数分析

虽然利用上述方法完成了分道线的提取和二维重建,但是要做到车道保持,还必须进一步分析计算中得到的关键参数的实际驾驶意义,才能用来指导行驶,辅助导航.

由于前面计算出了 4 个参数 d_1, d_r, α, θ ,现在又有了二维模型,因此就可以用最近点的切线方程代替由 Hough 变换得到的直线方程来重新计算这 4 个参数.总体说来,它们的差别不大.现在分析这 4 个参数的实际意义; d_1 与 d_r 的意义很明显,如果想要汽车保持在车道中央行驶,那么 $d_1 = d_r$ 是最优选择; θ 是道路的坡度,虽然高速公路上的坡度不大,

但对于高速行驶的汽车来讲,此参数亦相当重要; α 是 CCD 摄像机光轴与当前分道线切线的夹角(在世界坐标系中,左右分道线对应点的切线是平行的), CCD 摄像机光轴方向实质上就是汽车行进方向. 由于 CCD 摄像机的视角的原因, CCD 摄像机观测到的当前分道线并不是汽车真正所处位置的分道线, 两者有一个最小视距 d_{\min} 的距离差. 因为这个距离差的存在,恰好提供了保证安全的操作时间. 如果想要时刻保持汽车的正确行驶方向,应该让 $\alpha \rightarrow 0$. 当然最小视距可以根据安全行车的要求来调整.

有了对分道线的分类和重建,就可以向驾驶员提供更宏观的道路变化趋势和延伸方向. 如再结合微观的调整,则整个辅助导航系统就比较完备了.

2 单目测距算法

图 8 中的 1 与 2 是两辆汽车,一般双目或多目视觉测量的是两辆车之间的直线距离. 然而准确地讲,曲线 AB 的弧长(由于车道宽度有限,应以弯道内侧弧长作为车距)才是前后两车的实际距离(直道可以作为曲线的特例). 当然必须先分割出汽车 2,才能计算距离. 虽然分道线重建能降低分割难度,但是运动物体的分割仍然是相当难的一个课题,这里不作介绍. 但是准确的分道线二维重建结果确实证明单目测距在理论上是成立的.

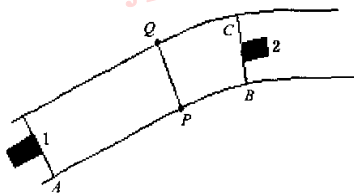


图 8 高速公路弯道俯视图

根据方程(1),可以得到如下微分方程组

$$\begin{cases} \dot{X}_e = (Z_e \dot{x}_e + x_e \dot{Z}_e) / f \\ \dot{Y}_e = (Z_e \dot{y}_e + y_e \dot{Z}_e) / f \end{cases} \quad (e = 1, r) \quad (5)$$

(X_1, Y_1, Z_1) 是左分道线坐标, (X_r, Y_r, Z_r) 是右分道线坐标. f 是焦距. 这样就得到了 (x_e, y_e) 的方程. 道路左右分道线是由一系列对应点组成,且分道线对应点有其自身的几何约束,如果能够由此确定从 A 到 B 的对应点,并且能推导出分道线的几何约束方程,则可以用数值积分法得到 AB 的长度. 假设点 P, Q 是

分道线的一一对应点,那么在世界坐标系里,直线 PQ 垂直于 P 点和 Q 点处的切线;并且 PQ 的长度为道路宽度(宽度为 w),这就是其几何约束,公式如下:

$$(\dot{P}, PQ) = 0 \quad (6)$$

$$(\dot{Q}, PQ) = 0 \quad (7)$$

$$\|PQ\| = w \quad (8)$$

对任意的对应点对,根据方程组式(1)与式(5),就可以把式(6)与式(7)改写为

$$(x_1 Z_1 - x_r Z_r)(Z_e \dot{x}_e + x_e \dot{Z}_e) - (y_1 Z_1 - y_r Z_r)(Z_e \dot{y}_e + y_e \dot{Z}_e) +$$

$$f^2(Z_1 - Z_r) \dot{Z}_e = 0 \quad (e = 1, r) \quad (9)$$

然后就可以得到如下分道线的几何约束微分方程

$$\dot{Z}_e = \frac{(x_1 Z_1 - x_r Z_r) Z_e \dot{x}_e + (y_1 Z_1 - y_r Z_r) Z_e \dot{y}_e}{(x_1 Z_1 - x_r Z_r) x_e + (y_1 Z_1 - y_r Z_r) y_e - f^2(Z_1 - Z_r)} \quad (10)$$

$(e = 1, r)$

最后分别对左右分道线进行数值积分,就可以得到如下对应点对的递推计算公式

$$\begin{cases} Z_1(k+1) = Z_1(k) + \dot{Z}_1(k) h_1(k) \\ Z_r(k+1) = Z_r(k) + \dot{Z}_r(k) h_r(k) \end{cases}$$

其中, $h_1(k)$ 与 $h_r(k)$ 是数值积分的步长,此步长可根据几何约束式(8)来确定. 有了上面的几何约束方程和数值计算,就可以根据曲线长度的计算公式来得到 AB 长度 l_{AB} 的计算公式

$$l_{AB} = \int_A^B \sqrt{(\dot{X}_e(s))^2 + (\dot{Y}_e(s))^2 + (\dot{Z}_e(s))^2} ds \quad (11)$$

把公式(5)带入式(11),并运用数值计算方法就可以得到能在计算机上实现的 AB 长度计算公式

$$l_{AB} = \sum_{i=1}^n \left\| \left(\frac{1}{f} (Z_1(i) \dot{x}_1(i) + x_1(i) \dot{Z}_1(i)), \frac{1}{f} (Z_1(i) \dot{y}_1(i) + y_1(i) \dot{Z}_1(i)), \dot{Z}_1(i) \right) \right\| h_1(i) \quad (12)$$

这里第 1 个和第 n 个点分别为 A 点和 B 点,其他量均为已知,可以编程实现全部计算.

为了验证单目测距算法的效果,笔者在重庆市的高速公路上做了距离测量实验. 由于在行驶过程中不可能准确知道两车间的实际距离,这种测量结果没有比较性,因此在交通局的协助下,又在公路上设置了距离标志. 在验证算法效果时,就可通过对捕获的图象先计算每一个距离标志的距离,再与距离标志标出的真实距离进行对照,以验证算法的计算误差. 其对比结果如表 1 所示.

表1 距离测量值与实际值及误差对照表

测量值(m)	实际值(m)	绝对误差(m)	相对误差(%)
33	33	0	0
49.2	50	0.8	1.6
68.4	70	1.6	2.3
87.7	90	2.3	2.6
97.3	100	2.7	2.7
116.5	120	3.5	2.9
135.2	140	4.8	3.4
153.4	160	6.6	4.1
171.2	180	8.8	4.9
188.2	200	11.8	5.9

从表1可以看出,随着距离的增加,因为数值运算累积误差的影响,计算误差也在不断加大。但是总的来看,在200m以内,误差基本上不会超过6%,应该说,在精度上,本单目测距算法已达到了汽车安全行驶的要求。当然,虽然从理论和算法上都证明可以完成单目测距,但是数值积分算法的速度是相对较慢的。实验也证明,算法目前只能满足80km/h的时速,因此找到快速算法是工作的当务之急。

3 实验与结论

用VC语言实现了车道保持的所有算法,实验是采用333MHz的处理器在四川省和重庆市的高速公路,如成渝、成绵、渝长线等等公路上进行的,在单独运行车道保持子系统时,每秒可处理10幅图象。实验结果表明,汽车以150km/h的速度行驶时,系统也能够稳定运行,并在实时性和精确度上能满足车道保持安全行驶的要求。下一步的工作主要是多车道和复杂车道的检测与重建,这也是目前国际国内研究人员在此课题上所面临的又一难题。另外,提高单目测距算法的实时性,使之与汽车安全行驶的要求以及其他相关系统相匹配,也是今后工作的重点。

参考文献

- 1 Broggi A. Vision-based driving assistance[J]. IEEE Expert, Intelligent System & Their Application, 1998, 13(6): 22~23.
- 2 Murphy R R. Sensor and information fusion for improved vision-based vehicle guidance[J]. IEEE Expert, Intelligent System & Their Application, 1998, 13(6): 49~56.
- 3 Bertozzi M, Broggi A. GOLD: A parallel real-time stereo vision system for generic obstacle and lane detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(1): 62~81.
- 4 Morizet-Mahoudeaux P. On-board and real-time expert control[J]. IEEE Expert, Intelligent System & Their Application,

1996, 11(4): 71~81.

- 5 Thorpe C, Hebert M H. Vision and navigation for the Carnegie Mellon navlab[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(3): 362~373.
- 6 Turk M A, Morgenhaler D G. VITS—A vision system for autonomous land vehicle navigation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(3): 342~361.
- 7 Kuan D, Phipps G. Autonomous robotic vehicle road following[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1988, 10(5): 648~658.
- 8 Giachetti A, Campani M. The use of optical flow for road navigation[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(1): 34~48.
- 9 Kanatani K, Watanabe K. Reconstruction of 3-D road geometry from images for autonomous land vehicles[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(1): 127~132.
- 10 Guiducci A. Parametric model of the perspective projection of a road with applications to lane keeping and 3D road reconstruction[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1999, 73(3): 414~427.
- 11 Zhou Xin, Huang Xi-yue. Road following and obstacle detection for automated highway application[J]. Journal of Image and Graphics, 2000, 5(Supp): 403~406.
- 12 Sonka M, Hlavac V. Image processing, analysis, and machine vision[M]. New York, United States of America: Thomson Asia Pte Ltd, 2002: 10~13.



周欣 1974年生,现为重庆大学自动化学院博士生,完成国家自然科学基金项目1项。主要研究领域为计算机视觉技术、图象处理与模式识别。



黄席越 1943年生,博士,现为重庆大学自动化学院教,博士生导师。主要研究领域为机器人技术、人工智能及计算机视觉技术。



黎昱 1974年生,现为重庆大学自动化学院博士生。主要研究领域为图象处理与模式识别、数据挖掘。