

文章编号:1000-582X(2003)08-0052-04

高速公路分道线识别与重建*

周欣,黄席樾,刘涛,黎昱

(重庆大学自动化学院 导航制导研究室,重庆 400044)

摘要:在智能交通系统中,自动驾驶系统是最难于实现的技术之一。许多学者努力想找到解决自动驾驶这一难题的方法。笔者介绍了一种新的思想和算法,它立足于单目视觉技术来实现高速公路的车道保持,在此基础上实现辅助导航。运用多阈值分割技术分割高速公路上当前车道的分道线,根据分道线几何投影约束跟踪提取完整的分道线,对分道线建立了圆锥曲线模型进行二维重建。本方法根据分道线模型获得保持车道所需要的车辆驾驶参数,通过这些参数实现了高速公路的车道保持。系统在四川和重庆的高速公路上以120 km/h的速度进行了试验,圆满地完成了车道保持,辅助导航的任务。

关键词:单目视觉;多阈值分割;自组织聚类;Hough变换;圆锥曲线模型

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

对所有的研究人员而言,用机器视觉技术实现自动驾驶是智能交通系统中的一项挑战性工作。从根本上说,需要解决的最关键的问题有2个:其一是防偏即保持车道;其二是检测障碍物并防撞^[1]。在此主要介绍如何解决车道保持的问题,防撞的问题在另文中再行介绍。

一部分学者致力于用多目视觉技术来解决这个问题^[2-4]。虽然这是一条很好的途径,但是一个无法回避的难题是多目视觉中的图像配准问题。另外,实时性、协作性和低成本也是用多个摄像机进行图像处理必须面临的问题。

与此同时,许多学者试图用单目技术来实现道路保持,并且已经取得了丰富的成果。一些人利用彩色图像来进行公路分割,边缘提取^[5-7]。但是这种依赖于彩色图像的算法实时性不高,而且在其论文中也没能对车道保持的信息作必要说明。也有学者尝试用三维重建的方法来进行车道保持。但是三维重建需要一些理论上的假设,而且算法复杂度也相当高^[8]。

在前人工作的基础之上,通过大量的研究试验,笔者采用单目视觉技术来解决车道保持问题。为了简化问题,只检测并重建当前车道的分道线,而不去处理其它分道线和整个路面,以此来提高实时性,保证防偏的

基本需要。文中处理的视频图像均是 CCD 摄像头捕获的灰度图像,大小为 320 × 240。摄像头安放在方向盘的旁边,其光轴与汽车底盘平行。

1 分道线提取

为了保持正确的车道,汽车应该知道自身在本车道中的位置和本车道的延伸方向。所以本车道的白色分道线是必须被提取的特征。而且基于这些特征点可以建立分道线二维模型。更进一步在提取特征点和计算二维模型时,可以获得必要的驾驶参数以防止航道偏离。当然二维模型的建立也为障碍物的检测带来方便。

1.1 多阈值分割算法

以图1为例介绍分道线提取算法。定义图像的左下角为坐标原点。由透视投影的基本原理可知,路面投影图像基本位于整个图像的下半平面。所以算法处理的范围是从y轴的0到110。首先介绍多阈值分割算法。在处理区域内均匀采样120个大小为10 × 10的正方形。用自组织聚类算法分割出路面类和非路面类,并得到路面的平均灰度值,其步骤如下:

1) 选择初始值。选择平均灰度值有差异的4~6个采样块为聚类中心;两聚类间的最小距离,如两类间

* 收稿日期:2003-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69674012)

作者简介:周欣(1974-),男,重庆市人,重庆大学博士研究生,主要从事计算机视觉、模式识别与人工智能的研究。

距离小于此值则须重新确定聚类中心;算法终止阈值,某聚类中样本超过此阈值则算法终止,本算法一般选取终止阈值为 70 较好。

2) 计算类间距离以及样本与每个聚类中心的距离,进行第一次分类。

3) 判别聚类结果是否符合要求,是则转 5), 否则转 4)。

4) 根据类间最小距离获得新的聚类中心,计算距离指标并重新分类,转 3)。

5) 计算路面类的平均灰度值,作为分割的阈值 th 。

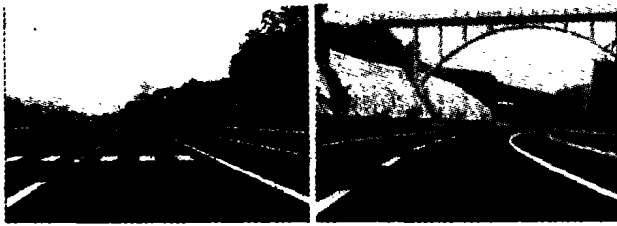


图 1 公路原始图像

用对应象素之间的灰度平均距离来计算聚类算法中的距离。由于按经验选择的合适的终止阈值和类间最小距离,本聚类算法能够很快收敛。观察图像发现,由于投影的光学效果,一般近处的对比强烈,而在远处分道线与路面灰度的对比度会有所下降,因此用一个统一的阈值进行分割效果不是特别好,尤其是远处分道线容易与路面形成粘连效果。因此考虑根据距离变化,另外增加阈值。这里计算每一行的平均灰度值 α_j 作为第二阈值,根据阈值 th 和 α_j 构造分割算法如下:

```

if(image[i][j] > max(th, alpha_j) + lambda &
  1/9 * sum_{u=-1 to 1} sum_{v=-1 to 1} image[i+u][j+v] > max(th, alpha_j) + lambda)
  image[i][j] = white
else
  image[i][j] = black
    
```

其中, $image[i][j]$ 是图像在点 (i, j) 处的灰度值; i 从 0 到 319; j 从 0 到 110; λ 是阈值,在通常情况下取 10。一般图像分割时考虑待分割点特征就足够了,这里不但考虑了待分割点的特征,而且考虑了该点邻域的灰度属性,这样分割更准确并且大大抑止了噪声。其结果如图 2 所示。

1.2 分道线搜索算法

可以看到分道线虽然被分割出来,但是仍然存在许多噪声不能一次性去掉。不管公路是直道还是弯道,在近处分道线都可以看成直线。因此运用 Hough 变换可以得到两条关于近处分道线的切线 AB 和 CD 。如图



图 2 双阈值二维分割结果

3 所示。为了拟合这两条直线,下面 4 条约束条件被运用于 Hough 变换中,以排除噪声点的干扰。



图 3 Hough 变换示意图

1) 高速公路上分道线有固定宽度,大约在 22 cm 左右。根据透视投影,会在图像上产生规则的变化。

2) 直线 AB 的斜率为负;直线 CD 的斜率为正。

3) 由于检测的为当前车道分道线,因此 AB 和 CD 的夹角 S 在几条分道线的夹角中为最小(斜率为正与斜率为负的分道线夹角)。

4) 根据高速公路每个行车道的固定宽度(3.75 m), CCD 的离地高度(0.85 m), 和 CDD 的最近视距(20 m), 可以标定 AB 和 CD 与 x 轴的交点之间的大致像素距离。

其中 AB 与 CD 的直线方程如下:

$$\begin{cases} y_l = k_l x + b_l \\ y_r = k_r x + b_r \end{cases} \quad (1)$$

有了这两条直线以后,可以在此基础上搜索并完整提取分道线。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,在时速可达 120 km/h 的高速公路,最小半径不得小于 670 m,而车道宽度应为 3.75 m。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距离为 d 。如果分道线为连续形,用区域生长算法可以很准确提取出完整的特征点,不再详述。下面以图 1(b) 的左分道线为例来介绍搜索算法,具有一定的代表性。由于最小视距远小于公路半径,可以认为最近视距处公路近似直线。 AB 和 CD 可以看作分道线的替代直线。如果公路有坡度 θ , 并且 CCD 光轴与当前分道线有夹角 α , 则可

推算最近视距处分道线投影方程为:

$$\begin{cases} y_i = - [H \cos \alpha / (d_i \cos \theta)] x - \\ f [(H \sin \alpha \cos \alpha + d_i \sin \theta \cos \theta) / d_i \cos^2 \theta \cos \alpha] \\ y_i = [H \cos \alpha / (d_i \cos \theta)] x + \\ f [(H \sin \alpha \cos \alpha - d_i \sin \theta \cos \theta) / d_i \cos^2 \theta \cos \alpha] \end{cases} \quad (2)$$

其实质也就是 AB 和 CD 的方程。

H 是 CCD 光心离地面的高度; d_l 与 d_r 是汽车离左右分道线的距离。分析可知式(1)与(2)是用不同方法得到的同一分道线的方程,因此联立式(1)与(2),可解出 d_l 、 d_r 、 α 、 θ 。这是 4 个很重要的驾驶参数。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) , 计算如式(3)所示。

$$\begin{cases} X_{i+1} = [d_i + R(1 - \cos(i \times d/R))] \cos \alpha - \\ [d_{\min} + R \sin(i \times d/R)] \sin \alpha \\ Y_{i+1} = -H \cos \theta - [(d_i + R(1 - \cos(i \times d/R))) \cos \alpha + \\ (d_{\min} + R \sin(i \times d/R)) \sin \alpha] \sin \theta \\ Z_{i+1} = -H \cos \theta + [(d_i + R(1 - \cos(i \times d/R))) \cos \alpha + \\ (d_{\min} + R \sin(i \times d/R)) \sin \alpha] \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

R 是曲线半径,需要在计算中调整;其取值范围是 $[670, \infty)$ (当车道为直道时, R 为无穷大)。 d_{\min} 是摄像机的最小视距; d 是每两个特征点之间的距离(前文已定义)。透视投影的基本公式为:

$$\begin{cases} x = fX/Z \\ y = fY/Z \end{cases} \quad (4)$$

联立式(3)与(4),可以计算每段分道线在图像上最可能的投影位置 (x_i, y_i) 。根据计算结果可以在图像上搜索每段分道线并反馈回式(3)修正 R ,直至搜索结束。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,判断其连通性和形状,得到最终分道线。当在计算出来的位置上无特征点或有多个特征点而不能通过间断点斜率的变化辨其真伪时,搜索算法终止。其搜索算法的结果如图 4 所示。



(a) (b)
图 4 分道线搜索结果示意图

2 分道线二维重建

为了更精确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,下一步将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像上的位置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。对于直道,用上面 Hough 变换的直线模型重建即可;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重建,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,这里把这两种类型都作为弯道来建立二维模型。

下面以图 1(b) 为例介绍弯道二维模型。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。对于弯道,可用图 3(b) 中过 AB 和 CD 交点且平行于 x 轴的直线 EF 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。那么为重建弯道,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。这里设 CD 与 EF 方程分别为:

$$y = k \times x + b$$

$$y = B$$

如果图 1(b) 的左分道线(右分道线同理)有二维模型 $f(y)$,那么应该有:

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

则二维模型 $f(y)$ 具有形式如下:

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

又 EF 为水平渐近线,也就是说:

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

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

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

这样可以得到左分道线的二维模型 $f(y)$ 如下:

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

参数 c 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。用双曲线模型进行弯道二维重建基本上符合实际情况,可以实用化。但是从结果看到对于右弯道的右分道线的重建并不是很精确。这是因为透视投影的压缩造成的偏差。对于左弯道,同样它的左分道线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。从本质上讲此算法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,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,通过实验也证明椭圆曲线在较远处对分道线的重建要优于双曲线。那么对于右弯道的右分道线就要构造分段模型。同理可推广到左弯道的左分道线。

分段模型的分段点选取在特征点曲率最大处。设此特征点坐标为 (B', \bar{B}) ,则可以根据直线方程 $y = kx + b$ 与 $x = B'$ 以及特征点构造双曲线模型如下:

$$y = kx + b + c'/(x - B')$$

同时根据方程 $y = B, x = B', y = \bar{B}$ 和特征点构造椭圆模型如下:

$$(x - \bar{x})/(B' - \bar{x})^2 + (y - \bar{B})/(\bar{B} - B)^2 = 1$$

其中参数 c' 和 \bar{x} 可由最小二乘法得到。最后的二维圆锥曲线模型重建如图5所示,结果是令人满意的。



图5 圆锥曲线模型(左分道线为双曲线,右分道线为双曲线加上椭圆曲线构成)

3 分道线参数分析

现在已经完成了分道线的提取和二维重建,但是要做到车道保持,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。

前面计算出了4个参数 d_1, d_2, α, θ 。现在有了二维模型之后,应该用曲线在图像上的最近点的切线方程代替由Hough变换得到的直线方程重新计算这4个参数。由此得到的4个参数是用来指导驾驶的有实际意义的参数。下面分析这4个参数的实际意义。 d_1 与 d_2 的意义很明显,如果想要汽车保持在车道中央行驶,那么 $d_1 = d_2$ 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光轴与当前分道线切线的夹角(世界坐标系中左右分道线对应点的切线是平行的)。CCD光轴方向实质上就是汽车行进方向。由于CCD的视角,当前分道线并不是汽车真正所处位置的分道线,而是有一个最小视距 d_{\min} 的距离。因为这个距离的存在,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。

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

4 结论

系统采用VC++6.0实现了道路保持的所有算法。采用333MHz的处理器在四川省和重庆市的高速公路上做了大量实验,如成渝、成绵、渝长和渝合线等。在单独运行道路保持子系统时,每秒可处理10帧图像。汽车以120km/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。

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] KANATANI, 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.

(下转第67页)

Computer Simulation for Liquid – Vapour Phase Equilibrium of L – J Fluid by the GEMC Method

JIANG Guo-zhu , XUE Rong-shu, WEI Shun-an

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The NVT_GEMC method was applied to the calculation of the liquid – vapour coexistence envelope for the pure Lennard – Jones fluid for several reduced temperatures from the vicinity of the triple point to the critical point employing the Metropolis sample method. Good agreement in general with the previously available literature results predicted by the equation of state using the new MBWR parameters. The potential between sites in different molecules simply calculated by the Lennard – Jones potential. Only by adjusting the initial density of the simulation model and the ratios of the three kinds of move step, the complete data of the liquid – vapour phase equilibrium are available easily. Simultaneously the several elements that would heavily impact on the simulative results are discussed in detail. The Gibbs ensemble Monte Carlo (GEMC) simulation enables us to calculate the phase equilibrium of pure components and mixtures, and it is more convenient than the indirect method involving computations of the chemical potential. The simulation program developed in this study can be used to research the liquid – vapour phase equilibrium of the small molecule fluids.

Key words: monte carlo method; gibbs ensemble; Lennard – Jones fluid; liquid – vapour phase equilibrium

(编辑 张 苹)

~~~~~  
(上接第 55 页)

## Recognition and Reconstruction for Highway Lane Line

ZHOU Xin, HUANG Xi-yue, LIU Tao, LI Yu

(Control and Navigation Laboratory, College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In the intelligent transportation systems, maybe the automatic navigation system is the most difficult problem. Many researchers try to find a way to carry out cruise assistance. This paper describes some new thoughts and new algorithms for lane keeping with a single view. We use multi – threshold to extract the lane line. Then, geometry restriction is used to track the lane line. At last, the conic model to reconstruct lane line. We have tested the system with the algorithms on highway at 120 km/h in Sichuan province and Chongqing city in China. The result shows that the algorithms can work perfectly.

**Key words:** monocular vision; multi – threshold segmentation; selforganizing data analysis; hough translation; conic model

(编辑 吕赛英)