

文章编号: 1002-0268 (2004) 12-0114-04

基于扩展卡尔曼滤波的车道融合跟踪

陈莹, 韩崇昭
(西安交通大学综合自动化研究所, 陕西 西安 710049)

摘要: 车道检测算法的研究是智能车辆自动驾驶的首要环节。与目前基于视觉的车道检测与跟踪系统不同, 本文提出一种基于扩展卡尔曼滤波的车道融合跟踪方法。该方法利用毫米波雷达探测到前方车辆的距离信息, 并采用扩展卡尔曼滤波技术和图像处理技术, 建立车道跟踪的动态视觉窗口, 提取车道边界, 并判断前方车辆相对于车道的位置。该方法大大缩减了处理时间, 且增强了系统的鲁棒性。

关键词: 扩展卡尔曼滤波; 目标检测; 车道跟踪; 视觉窗口

中图分类号: TP391.41; U46 **文献标识码:** A

Lane Fusion Tracking System with Extended Kalman Filter

CHEN Ying, HAN Chong-zhao
(Xi'an Jiaotong University, Shaanxi Xi'an 710049, China)

Abstract: It's a principal link to detect lane robustly and rapidly under a wide variety of conditions for intelligent vehicle navigation, which posed a challenge for current lane detection and tracking systems focusing on vision-based algorithms. The paper proposed a lane fusion tracking method based on extended Kalman filter. The method first made use of the range information detected by millimeter radar, and estimated the obstacle's position of next frame relative to host vehicle with extended Kalman filter. Then, the projective relationship between image and the real world was used to build dynamic visual window for lane tracking, and finally lane boundary markings were extracted using vision technology, and the relative position of vehicle ahead to the lane was determined. As image processing was made only within the window, the time cost was significantly reduced which made it better satisfying realtime request, meanwhile it strengthened the system's robustness for shadowed, broken or interrupted lane.

Key words: Extended Kalman filter; Target detecting; Lane tracking; Visual window

0 简介

综合国内外文献, 目前对车道的研究一般集中在视觉技术上, 因为车道最明显的标志为条形车道标识, 它通过视觉技术得到很好的检测。Kreucher. C 等将车道识别系统分为两代^[1], 第一代基于视觉的车道检测系统是基于边界的, 且假定车道为一直线; 与第一代系统单独地对边缘点进行检测和分组不同, 第二代识别系统试图通过结合原始图像的灰度阵列, 使用车道形状的整体模型对车道进行识别, 比较成熟的系统包括: ARCADE^[2], RALPH^[3], LOS^[4], 目前大

多数的车道识别系统都是在上述系统的基础上建立起来的。

虽然视觉技术在车道跟踪领域得到了广泛的应用, 并取得了一定的成果, 但也存在一些问题。第一代识别系统在车道对比度小、缺损、被污染时, 通常识别能力较差; 第二代系统能克服第一代系统存在的很多问题, 但是当车道上出现明显且有结构的边界, 比如车辆的轮廓时, 第二代系统的识别将有可能偏移真实的车道标志。为了避免前方障碍对车道识别的影响, 有必要获得前方障碍的位置信息, 并以此为依据, 开设车道跟踪的视觉窗口。这样, 一方面可避免

收稿日期: 2003-09-26
基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2001CB309403)
作者简介: 陈莹 (1976-), 女, 浙江丽水人, 博士生, 研究方向为智能交通系统和多传感信息融合。

障碍对车道识别的影响, 另一方面, 也降低了图像处理的计算量, 提高了对目标所处车道位置的估计精度。然而, 单凭视觉技术无法准确得到前方车辆的距离信息, 难以定义窗口的开设位置。相反, 目前在 IV 领域颇受欢迎的毫米波雷达能在任何天气环境下准确地获取前方车辆的距离信息。本文所介绍的车道检测和跟踪系统, 利用毫米波雷达探测到的距离信息, 采用扩展卡尔曼滤波对车辆下一时间的位置进行估计, 并通过图像坐标与三维真实世界坐标之间的映射关系, 建立动态视觉窗口, 从而对前方车道进行实时、有效地跟踪, 并能较为准确地判断出障碍车辆相对于车道的位置。

1 雷达目标跟踪

毫米波通常指波长介于 $1 \sim 10\text{mm}$ 之间的电磁波。与微波相比, 它有频带宽、角分辨率高、测速能力强的优点; 与激光和红外光波相比, 虽然它没有后者的分辨率高, 但具有穿透烟、灰尘和雾的能力, 基本上可全天候工作^[5]。随着 Ga As 高频器件和单片微波集成电路 MMIC (Microwave Monolithic Integrated Circuits) 的出现和应用, 毫米波雷达的性能有了很大的提高, 成本则大幅下降, 并且雷达的外型尺寸可以做得很小, 便于在汽车上安装。因此, 毫米波雷达就成了汽车前视雷达的首选。毫米波雷达能在任何天气条件下, 实时监测车辆前方, 精确测量目标的纵向距离和相对速度。

考虑较为简单的情况。目标的运动模型采用 CV 模型, 其状态方程为

$$X(k+1) = \Phi(k+1, k)X(k) + GV(k) \quad (1)$$

$$Z(k) = F[X(k)] + W(k) \quad (2)$$

其中, 状态向量为 $X(k) = [x \ x \ y \ y \ z \ z]^T$, $V(k)$ 的协方差为 $q = \text{diag}(\sigma_q^2)$, G 为

$$G = \begin{bmatrix} \frac{t^2}{2} & t & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t^2}{2} & t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{t^2}{2} & t \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

其中, t 为采样间隔。 $W(k)$ 的协方差为 R_k , $F[X(k)]$ 表示量测是状态向量的非线性函数

$$F(X) = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (4)$$

其中, r 为距离。

采用下列方法用 EKF 进行滤波跟踪。根据 Taylor 展开

$$F[X(k)] = F[X(k|k-1)] + \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X=X(k|k-1)} \times [X(k) - X(k|k-1) + \dots] \quad (5)$$

只保留前二阶, 则可得到

$$F[X(k)] \approx F[X(k|k-1)] + H(k)[X(k) - X(k|k-1)] \quad (6)$$

$$\text{其中, } H(k) = \left. \frac{\partial F}{\partial X} \right|_{X=X(k|k-1)} =$$

$$\left[\frac{x(k|k-1)}{r} \ 0 \ \frac{y(k|k-1)}{r} \ 0 \ \frac{z(k|k-1)}{r} \ 0 \right] \quad (7)$$

定义

$$\bar{z}(k) = Z(k) - F[X(k|k-1)] + H(k)X(k|k-1) \quad (8)$$

则有

$$\bar{z}(k) = H(k)X(k) + W(k) \quad (9)$$

然后以此为更新量测, 进行滤波增益、状态更新和协方差更新, 方程与线性滤波相同。

2 视觉窗口的建立

车辆行驶过程中, 车本身和道路的状态不断发生变化, 车、道路与雷达、摄像机之间的相对位置也不断发生变化。根据上述方法对雷达量测的距离信息进行滤波后, 得到世界坐标系下前方车辆与摄像机之间各个坐标轴上的距离估计, 可通过坐标映射对它们在二维图像上进行实时描述。

2.1 三维世界与图像平面的映射

假设世界坐标系与摄像机坐标系重合, 此处我们需要建立两种坐标系, 即摄像机坐标系和图像坐标系。假设焦距为 f , 图像坐标系的原点在图像中心, 且摄像机的俯仰角为 θ , 则图 1 中 $O-XYZ$ 空间中路面上一点 $P(X, Y, Z)$ 与其在图像平面 s 上对应像素点 $p(x, y)$ 之间存在如式(10)所示的映射关系。

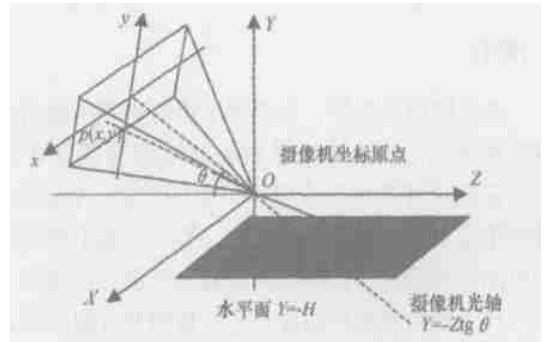


图 1 系统的坐标映射

$$\begin{aligned} x &= f \frac{X}{Z \cos \theta - Y \sin \theta} \\ y &= f \frac{Z \sin \theta + Y \cos \theta}{Z \cos \theta - Y \sin \theta} \end{aligned} \quad (10)$$

2 2 车道宽度的估计

根据上述坐标系映射,并假定摄像机离地面的距离 H 保持不变,则图像中车道边缘线上左右对应两点 p_1, p_2 的坐标存在如下关系

$$\begin{cases} x_1 = f \frac{X_1}{Z_1 \cos \theta - Y_1 \sin \theta} \\ x_2 = f \frac{X_2}{Z_2 \cos \theta - Y_2 \sin \theta} \\ Z_1 = Z_2 = r \\ X_1 - X_2 = W_{\text{lane}} \\ Y_1 = Y_2 = -H \end{cases} \quad (11)$$

其中, $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 分别为 p_1, p_2 在图像坐标系下的坐标; $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2)$ 分别为 p_1, p_2 在世界坐标系下的坐标; W_{lane} 表示车道线的真实宽度, 它为一个常数。

联立上述方程, 可得到图像平面上车道的宽度为

$$w_{\text{lane}} = x_1 - x_2 = c(X_1 - X_2) = cW_{\text{lane}} \quad (12)$$

式中, c 为常数。

2 3 建立视觉窗口

为实时有效地对车道进行检测, 在每帧图像上左右各开设一个矩形视觉窗口, 窗口中心的 x 坐标分别为 $x \pm w_{\text{lane}}/2$, 窗口上边界的宽度映射到世界坐标下分别对应为 1.5m (大约为一般车道宽度的一半), 高度为 8 像素, 如图 3 所示。

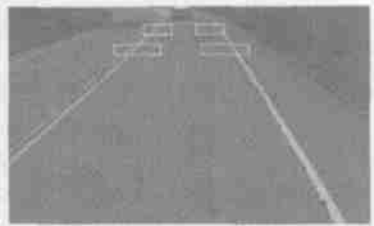


图 3 视觉窗口

3 车道的检测

车道的检测大致包括阈值设置、轮廓提取与直线拟合 3 个部分。

3 1 阈值设置与轮廓提取

采用模式识别中的最大类间方差准则确定图像阈值的最佳设置。其基本思想是对像素进行划分, 通过使划分得到的各类之间的距离达到最大来确定合适的门限。

设窗口内图像灰度为 $1 \sim L$ 级, 灰度为 i 的像素个数为 n_i , 总像素数为

$$N = \sum_{i=1}^L n_i \quad (13)$$

各灰度出现的概率为

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (14)$$

设以灰度 k 为门限将图像分为两个区域, 灰度为 $1 \sim k$ 的像素和灰度为 $k+1 \sim L$ 的像素分别属于区域 A 和 B , 则区域 A 和 B 的概率分别为

$$w_A = \sum_{i=1}^k p_i, w_B = \sum_{i=k+1}^L p_i \quad (15)$$

定义 $w_A = w(k)$, 则区域 A 和 B 的平均灰度为

$$\mu_A = \frac{1}{w_A} \sum_{i=1}^k i \times p_i = \frac{\mu(k)}{w(k)} \quad (16)$$

$$\mu_B = \frac{1}{w_B} \sum_{i=k+1}^L i \times p_i = \frac{\mu - \mu(k)}{1 - w(k)}$$

其中, μ 为全图的平均灰度

$$\mu = \sum_{i=1}^L i \times p_i = w_A \mu_A + w_B \mu_B \quad (17)$$

两个区域的方差为

$$\sigma^2 = w_A (\mu_A - \mu)^2 + w_B (\mu_B - \mu)^2 = \frac{[w(k)\mu(k) - \mu]^2}{w(k)[1 - w(k)]} \quad (18)$$

按照最大类间方差的准则, 从 1 至 L 改变 k , 并计算类间方差, 使上式最大的 k 即是区域分割的门限, 即车道检测系统的灰度阈值。

得到阈值之后, 在视觉窗口内将每行从头至尾的灰度数据与阈值作比较, 直到找到第一个灰度值大于阈值的像素, 否则转向下一行。最后, 得到了窗口内的白线轮廓点。取两帧结果, 如图 4 所示, 黑色各点即为车道轮廓点。

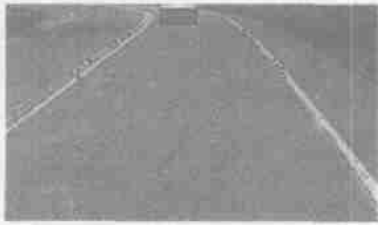


图 4 车道轮廓提取

3 2 直线提取

利用 Hough 变换法提取直线是一种变换域提取直线的方法, 它把直线上点的坐标变换到过点的直线的系数域, 巧妙地利用了共线和直线相交的关系, 使直线的提取问题转化为计数问题。

平面 $o-xy$ 上的直线方程为

$$y = ax + b \quad (19)$$

采用直线方程的法线式表示, 则有

$$x \cos \theta + y \sin \theta = \rho \quad (20)$$

式中, ρ 是直线到坐标系原点的距离; θ 是直线法线与

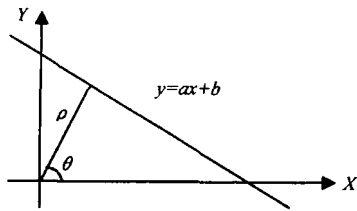


图5 直线的参数空间 (ρ, θ) 表示

x 轴的夹角,如图5所示。于是,坐标平面 $o-xy$ 中的一条直线和坐标平面 $o-\rho\theta$ 中的点一一对应, $o-xy$ 坐标平面中的一点和 $o-\rho\theta$ 中的一条曲线一一对应,并且 $o-xy$ 中的共线点所对应的 $o-\rho\theta$ 中的曲线交于一点,如图6所示。Hough 变换的运算量较大,但由于只应用于一个小区域,能很快找到共线点。

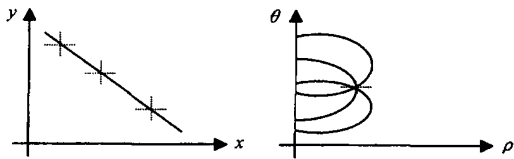


图6 共线点对应的曲线相交于一点

3.3 障碍相对于车道的位置估计

对找到的道路边缘点采用最小二乘拟合直线

$$y = a_k x + b_k \quad (21)$$

设雷达探测到的前方障碍的位置在图像平面的投影位置为 (x_k, y_k) ,则我们很容易可以判断出障碍车辆离车道边界的距离。将 y_k 代入(21)式,得

$$x'_k = \frac{y_k - b_k}{a_k} \quad (22)$$

则显然 $|x_k - x'_k|$ 即为图像平面内障碍距离车道的水平距离。同样利用三维世界与图像平面的映射,可得障碍与车道的实际距离为

$$|X_k - X'_k| = \frac{Z \cos \theta - Y \sin \theta}{f} \cdot |x_k - x'_k| \quad (23)$$

(上接第106页)

施的使用期限长,如何在公路网的建设中,讲求经济效益,把有限的资金用在最急需的建设项目上,以较少的投资,求得最大的经济效益,具有重大意义。

本文在对路网进行单元重要度分析的基础上,以路网综合效益最大为优化目标,并考虑道路建设的投资约束,建立了公路网建设投资优化模型,确定出路网规划期的合理建设项目。利用该方法确定的建设项目投资方案,不仅满足了决策者的实际需要,而且满足了规划路网交通需求,并确保了资金的有效利用。实例表明,该方法具有较强的实用性及可行性。

4 总结

目前的车道识别系统大多采用基于视觉技术的方法,本文提出的基于卡尔曼滤波的车道融合跟踪法,以图像传感器为主传感器,毫米波雷达为辅助传感器,利用毫米波雷达探测到的前方车辆准确的距离信息,建立车道跟踪视觉窗口,能有效地识别前方车道,判断障碍相对于车道的位置;同时,由于开设的窗口小,可大大降低图像的处理时间,也在一定程度上增强了基于边界的车道识别系统在车道发生污染等情况下系统识别的鲁棒性。

参考文献:

- [1] C Kreucher, S Lakshmanan LANA: A Lane Extraction Algorithm that Uses Frequency Domain Features [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15 (2): 343—350.
- [2] K Kluge Extracting Road Curvature and Orientation from Image Edge Points without Perceptual Grouping Into Features [C]. Proceedings Intelligent Vehicle Symposium, 1994: 109—114.
- [3] D Pomerleau, T Jodhem. Rapidly Adapting Machine Vision for Automated Vehicle Steering [J]. IEEE Expert [see also IEEE Intelligent Systems], 1996, 11 (2): 19—27.
- [4] S Lakshmanan, K Kluge IOIS: A Real-time Lane Detection Algorithm [C]. Proceedings of the 30th Annual Conference on Information Sciences and Systems 1996: 1007—1012
- [5] 向敬成, 张明友. 雷达系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [6] 丰丽军. 公路汽车视觉导航中的运动目标检测与跟踪 [D]. 北京工业大学硕士学位论文 2001.
- [7] 孙兆林. MATLAB 6 x 图像处理 [M]. 清华大学出版社, 2002
- [8] A Suzuki, N Yasui, N Nakano, M Kaneko. Lane Recognition System for Guiding of Autonomous Vehicle [C]. Intelligent Vehicles '92 Symposium, 1992: 196—201.
- [9] S Shetty, A T Alouani A Multisensor Tracking System with an Image-based Maneuver Detector [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1996, 32 (1): 167—181.

参考文献:

- [1] Transportation Research Board Highway Capacity Manual 2000 [M]. Washington: National Research Council, 2000.
- [2] 陈艳艳, 梁颖, 杜华兵. 可靠性在路网运营状态评价中的应用 [J]. 土木工程学报, 2003.
- [3] 朱顺应, 王伟, 邓卫, 等. 交通网络可靠性及其通路算法研究 [J]. 中国公路学报, 2000.
- [4] 杨涛. 公路网规划 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1998
- [5] 王光远, 顾平, 王东伟, 等. 工程结构与系统抗震优化设计的实用方法 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [6] 陈艳艳, 杜华兵, 梁颖. 城市路网畅通可靠性优化遗传算法 [J]. 北京工业大学学报, 2003