基于单目视觉的道路图像理解综述

孟丽霞,孙富春,邵宇

(清华大学 智能技术与系统国家重点实验室,北京 100084)

(mlx08@mails.tsinghua.edu.cn)

摘要:基于视觉的道路图像提供了车辆运行局部环境的丰富的信息,对这些序列图像的分析理解在车辆辅助驾驶、自动导引车、室外移动机器人等多领域得到了广泛的应用。详细介绍了道路检测系统以及道路偏离预警等系统中对道路图像进行处理、分析、理解的各种方法,阐述了道路识别与跟踪的技术和方法,并进行了比较。最后给出了该领域今后的研究方向和发展趋势。

关键词:计算机视觉;道路检测;道路识别;道路跟踪

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Survey on road image interpretation based on monocular vision

MENG Li-xia, SUN Fu-chun, SHAO Yu

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and System, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Vision-based road images provide rich information about local environment during travelling. These serial images were analyzed and interpreted in many fields such as automatic guided vehicle, mobil robots, driving assistant systems and so on. Technologies and methods of road image processing, analyzing and interpreting in lane detection system and lane departure system were introduced in detail. Technologies of lane recognition and tracking were introduced and compared in detail. Finally future research and development direction were given.

Key words: computer vision; lane detection; lane recognition; lane tracking

0 引言

基于单目视觉的道路图像在移动机器人、自动导引车、辅助驾驶、智能交通系统等领域得到了广泛的应用。道路图像包含了丰富的周围环境信息,依据不同的应用,道路图像对周围场景给出不同程度的解释。道路检测是从道路图像中检测出道路区域或道路的边缘,它是道路理解的基础。针对结构化道路和非结构化道路,人们已经采用了多种基于特征^[1-2]和基于模型^[3-4]的方法。在此基础上,基于序列图的道路检测利用前一帧的结果,使当前帧的检测范围大大缩小,从而利用序列图跟踪每一帧的道路。在道路偏离检测系统中^[5-6],系统不仅检测出道路区域,还要给出车辆偏离道路中心的程度并在适当时候发出警报。传统的道路识别与道路跟踪系统采用卡尔曼滤波^[3,7]或粒子滤波^[8-9],在给出道路信息的同时,给出车辆相对于道路的位置信息,利用序列图不断估计和更新车辆运行状态参数,保证车辆自主安全正常行驶。文献[10]则考虑卡尔曼滤波和粒子滤波的优缺点,提出了卡尔曼粒子滤波方法。

本文将着重介绍道路检测、道路偏离预警系统,以及道路识别与跟踪系统中对道路图像进行处理、分析、理解的各种技术及方法,并对今后的研究进行展望。

1 道路图像理解

1.1 道路检测

道路检测的目的是检测出道路图像中的道路区域或者道

路边缘。道路检测的方法大致分为基于特征的方法和基于模型的方法两种。

1.1.1 基于特征的方法

基于特征的方法不需要道路的几何结构信息,主要利用图像中道路区域的颜色、纹理、边缘等低级特征从图像中检测出路区域或路边缘从而确定车体安全行驶的有效区域。

1) 道路区域检测。

道路区域检测可以看成是一个图像分割问题。传统的方法是首先计算道路灰度直方图以选取适当的阈值将道路图分为几个灰度级别的区域,然后采用区域生长、分裂合并^[11-12]等方法分出路区域和非路区域。文献[2]将图像分为3个区域,路、非路和不确定区域,然后将难以判断的不确定区域使用假设检验的策略依据道路的形状、路宽和面积信息综合判断,把不确定区域合并到路或非路区域。文献[13]则不是计算整个图的灰度直方图,它假设图像最下面中间的一个小区域为路区域,计算该区域的灰度直方图,并用决策树方法得到路区域。道路区域检测还可以看成是一个复杂的模式识别问题,由于道路区域有着区别于非路区域的特征,因此可以用聚类的方法识别道路区域。文献[1]使用颜色特征检测道路,它认为道路的颜色接近于深灰,并将深灰定义成RGB的R、G、B值近似相等。文献[14]基于纹理特征进行道路分割。另外概率的方法越来越多地应用于道路区域检测,特别是非结构化道路检测,例如文献[15]用DS证据理论计算一个小切片属于路的概率程度。

2) 道路边缘检测。

收稿日期:2009-12-25;修回日期:2010-03-04。

基金项目:国家863计划项目(2007AA04Z232);国家自然科学基金资助项目(90820304)。

作者简介:孟丽霞(1971-),女,山西平遥人,讲师,博士研究生,主要研究方向:移动机器人导航;孙富春(1964-),男,江苏宝应人,教授,主要研究方向:智能控制、网络;邵宇(1986-),男,湖南益阳人,博士研究生,主要研究方向:无人驾驶车辆的视觉感知系统。

道路边缘检测主要包括图像预处理、边缘抽取和二值化。图像预处理一般先选定感兴趣区域,然后用中值滤波^[16]、高斯滤波^[17]等消除噪声,再进行边缘增强^[16-17]。在边缘抽取中,常用的边缘算子包括 Canny^[4]、Roberts、Laplace、Prewitt、Sobel 等算子。边缘算子的选取主要依据处理时间和抽边结果综合考虑。在实时性要求高的情况下,可选取 Sobel 算子^[16]。文献[18-19]使用自己的边缘检测算子。文献[20]则使用方向可调滤波器(steerable filters)检测道路边缘。边缘抽取后进行图像二值化,得到边缘图。图像二值化的一个主要问题是阈值的选取。一般基于灰度直方图采用固定阈值^[16]、自适应阈值^[21]、双阈值^[13]、动态阈值^[17]。二值化后的边缘可能不连续,用哈夫变换可以得到连续的道路直线,但仅适用于道路是直线的情形。

1.1.2 基于模型的方法

基于特征的方法要求道路标记明显和完整,否则识别困难或不可行。基于模型的方法可以克服此困难,其过程一般分为建立道路模型、提取车道线像素、拟合车道模型3个步骤。

1) 建立道路模型。

道路模型是对道路形状的假设。一般来说,简单模型不能准确表达复杂道路,但鲁棒性强;复杂模型比较灵活,但对噪声敏感。建立道路模型前适当地引入一些关于道路的基本假设有助于问题的简化,常用的基本假设:道路宽度假设、路面特征一致假设、道路平坦假设。常用的道路模型有:直线模型^[22-23]、同心圆曲线模型、多项式模型(二次曲线^[1,13]和抛物线^[23])、直线-抛物线模型^[17,21]、回旋曲线^[7-10]、样条曲线^[4]、分段曲率模型^[24]、自主直线模型(active line model)等。文献[25]分别对左右车道建立各自的模型。文献[26]在近区域采用直线,远区域为宽度不等的分段直线。

2) 提取车道线像素。

车道线像素提取的目的是从前景像素集中将属于每一条车道线的像素提取出来,作为拟合车道模型的依据。采用1.1.1节介绍的边缘检测的方法可以提取车道线像素。车道线像素提取方法还有边缘跟踪^[27]、哈夫变换^[21]、模板匹配^[28],以及像素扫描等。模板匹配技术首先根据车道线的各种可能的位置和方向建立许多模板,然后将预处理后的道路图像与原先定义好的车道线模板一一匹配,由于不同的模板代表了不同的车道类型(如直线车道、左转弯、右转弯等),因此,匹配效果最佳的模板所蕴含的数据就表示了图像中道路的车道信息。扫描是普遍采用的一种车道线像素提取技术,即在二值化图像中沿某一方向扫描,当扫描到前景像素时,按照预先确定的某种规则进行判断,以确定该像素是否是真正的车道线像素。

3) 拟合车道模型。

拟合车道模型是根据检测到的车道线像素,确定道路模型的最优参数,其方法主要有直接拟合、哈夫变换和似然函数方法。直接拟合的方法有最小二乘法、插值法等。文献[13]采用了加权最小方差估计;文献[23]采用最小均方误差估计,并对估计结果的可靠性给出具体的度量;文献[21]根据道路模型和道路图像中的边缘像素点的坐标定义一个误差函数 E ,然后极小化 E 得到最优道路参数。哈夫变换可以用来拟合直线模型^[22],其基本思想是点线的对偶性。哈夫变换把图像空间中的直线检测问题转换到参数空间里对点的检测问题,通过参数空间里进行简单的累加统计来完成。哈夫变换

可以检测多条直线。似然函数方法^[4,30]避免了采用阈值方法的弊端,该方法首先根据道路模型及投影模型建立道路形状参数集合,它描述了道路边缘在图像中出现的所有可能的方式,然后定义一个似然函数,它的值正比于特定的道路参数集合与特定图像中像素数据的匹配程度,极大化这个似然函数就可以找到最优道路形状参数,从而检测出道路。似然函数方法一般包括3个构件:道路模型、似然函数、优化算法。

1.2 连续帧道路检测

连续帧道路检测是车辆运行过程中对摄像机采集到的连续帧道路图像进行的实时道路检测。尽管道路检测的实时性处理的运算量非常大,但根据物理约束和连续性约束,可以通过相邻帧之间的时间相关性加以简化。将图像处理限制在上一帧图像的结果的邻域可以显著提高道路检测的速度,降低对硬件的要求,满足实时性要求。首帧的处理可以采用上面道路检测的方法,后面帧图像的处理主要是感兴趣的区域(ROI)的选取。

由于不同的道路模型和不同的道路检测算法,感兴趣区域的选取也各不相同。例如文献[28]以计算得到的新坐标的 k 邻域作为下次边缘检测的区域。文献[16]利用哈夫变换检测出的直线的 (ρ, θ) 为中心得到感兴趣邻域。文献[18]在感兴趣区域采用自己的边缘算子提取边缘后,以边缘的 X 坐标、强度、角度组成三维特征向量,当连续两帧的同一边缘的特征向量之间的距离足够近就将其作为候选边缘,并以道路边缘是平坦且形状为梯形的约束决定其是否为真正的边缘。文献[21]以检测出的车道线为中心将车道线向左右扩展成较“粗”的带状的车道作为下帧检测的感兴趣区域。文献[7]以预测位置为中心,3倍方差区域为下一帧检测区域。

1.3 道路偏离检测

道路偏离检测是在道路检测的基础上,不仅给出道路信息,还要给出车辆偏离道路中心的信息。当司机由于中毒、疲劳、疏忽等原因偏离车道时,道路偏离报警系统发出警告,提醒司机采取正确措施,从而减少事故的可能性。

道路偏离检测有两种方法:基于偏移距离的方法^[5]和基于偏移角度的方法^[6,17]。

基于偏移距离的方法简单而易于理解,这种方法要求获得车体中心与道路中心的准确偏移距离,为此需要摄像机标定参数、道路模型参数、路宽等信息,因此该方法易受这些参数的影响。在文献[29]中还假设了一个虚拟道路,其宽度小于实际道路宽度,当车轮压到虚拟车道线时,发出警报。文献[30]采用似然函数的方法输出车辆偏离道路的参数,以此作为状态向量采用卡尔曼滤波预测下一帧位置,设定一阈值确定是否报警。文献[29,31]预测车辆的路径并与传感器得到的道路几何信息比较来估计TLC(Time to Lane-Crossing)以决定是否发出报警。文献[32]提取到车道线像素的坐标后,只考虑 X 坐标,不考虑 Y 坐标,即只估计出图中车道线中心点的横向位移,并适当地作出补偿即可。

基于偏移角度的方法基于这样一个事实:当车辆行进的方向偏离车道线方向时,道路图像中车道线的方向发生相应的变化,因此,这种方法不会受摄像机模型道路模型等的影响。文献[6]定义了一个边缘分布函数(Edge Distribution Function, EDF),计算 $0^\circ \sim 180^\circ$ 每个角度方向的边缘梯度值的和,得到边缘分布直方图,由直方图的两个局部峰值可以得到左右车道线的角度,然后寻找左右车道线的对称中心来度量偏离中心的程度。文献[17]假设道路为直线,算法检测出

左右车道线得到其斜率,如果相邻帧的车道线斜率变化不大,认为没有发生偏离,如果斜率变化超过某个阈值认为发生道路偏离。文献[21]在近区域采用直线模型,用哈夫变换检测出左右车道线,根据斜率计算出左右车道线的倾斜角度 θ_1 、 θ_2 ,当车行驶在路中心时, $\theta_1 = -\theta_2$,令 $\beta = |\theta_1 + \theta_2|$,则 β 值度量了车偏离道路的程度,选取某一阈值则可以发出偏离警报。文献[17]在近区域采用直线模型,在道路宽度一定时,在图像坐标中,左右车道线与图像水平线的夹角的和度量了车辆偏离中心的程度,因此设置一阈值决定是否发出警报。

在检测到的道路偏离中,有一种是正常的转道。这种情况一般由其他综合信息来判断,例如转向灯、转向角、速度、刹车等。这时,系统不发出警报。文献[29]还考虑了转道、急转弯、紧急情况下的闪避等特殊情况的判断。

1.4 道路识别与跟踪

道路识别与跟踪系统建立在道路模型、运动学模型和动力学模型的基础上,系统不仅要给出道路参数,还要给出车辆相对于道路的位置信息和运动信息。道路识别与跟踪常用的方法有卡尔曼滤波^[3,7]和粒子滤波^[8-9]。

1.4.1 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波首先建立动态系统方程:

$$\mathbf{X}(t+1) = \mathbf{A}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{W}(t)$$

$$\mathbf{Z}(t) = \mathbf{H}(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{V}(t)$$

其中: $\mathbf{X}(t)$ 为状态向量,一般包括道路模型参数、摄像机标定参数、运动学动力学模型参数和车辆位姿和运行速度等参数; $\mathbf{Z}(t)$ 为观测向量; $\mathbf{A}(t)$ 一般由道路模型结合运动模型和动力学模型得到; $\mathbf{H}(t)$ 一般主要由投影变换得到; $\mathbf{W}(t)$ 和 $\mathbf{V}(t)$ 分别为系统噪声向量和观测噪声向量,一般为高斯白噪声。

卡尔曼滤波过程为:根据世界坐标系、摄像机坐标系和图像坐标系之间的转换关系及摄像机参数建立道路模型。当前的模型参数和误差方差阵根据动力学模型由上一帧的模型参数和方差阵来更新。从模型参数的估计结果计算图像上道路的预测位置,把它作为搜索域的中心,搜索域的宽度由模型误差方差阵计算,由搜索域内的道路边缘的观察值通过扩展卡尔曼滤波更新模型的参数和方差阵。

图1 卡尔曼滤波

1.4.2 粒子滤波

粒子滤波与卡尔曼滤波的不同在于它能给出类似于“某像素点属于道路的可能性比属于背景的可能性更大”的信息。粒子滤波的思想基于蒙特卡洛方法,它利用粒子集来表示概率,可以用在任何形式的状态空间模型上。其核心思想是通过从后验概率中抽取的随机状态粒子来表达其分布,是一种顺序重要性采样法。简单来说,粒子滤波法是指通过寻找一组在状态空间传播的随机样本对概率密度函数进行近似,以样本均值代替积分运算,从而获得状态最小方差分布的过程。这里的样本即指粒子,当样本数量 $N \rightarrow \infty$ 时可以逼近任何形式的概率密度分布。

1.4.3 卡尔曼粒子滤波^[10]

卡尔曼滤波在初始化后包括两个步骤(如图1所示):

1) 预测。预测下时刻状态向量和误差方差阵。2) 更新。状态向量和误差方差阵由观察值更新。在粒子滤波中,预测步骤的粒子用多种特征计算权值,在选择阶段根据这些权值对粒子抑制或繁殖,最后加一噪声做下一次预测,如图2所示。

与粒子滤波相比,卡尔曼滤波的优点在于得到预测值的同时也得到误差方差矩阵,缺点是卡尔曼滤波在曲率变化率大的乡村道路会预测错误,而且更正步骤用到的度量是唯一的。粒子滤波则可以用多种特征加权度量,例如文献[26]所使用的统计量包括像素的灰度值、颜色、纹理特征,以及边缘的信息,而不需要任何的阈值来筛选。但粒子滤波的误差方差阵是手工加入的,太大太小都会影响滤波器性能。所以卡尔曼粒子滤波结合两者优点,采用多特征度量并将卡尔曼滤波得到的方差阵用于粒子滤波如图3所示。

图2 粒子滤波

图3 卡尔曼粒子滤波

2 结语

目前基于单目视觉的道路图像在移动机器人、自动导引车、辅助驾驶、智能交通系统等领域得到了广泛的应用,但仍有很多的问题需要解决,今后的研究将在以下3个方面深入:

1) 进一步提高系统的实时性、可靠性、鲁棒性。

提高系统的实时性意味着系统必须在有限的时间内完成特定的任务,因此很多系统采用了缩小处理范围的方法。提高系统的可靠性意味着除去包括路面上斑马线、转弯标志、箭头标志等类似于道路边界的干扰信息。实际的道路标示线由于磨损而变得模糊,或者被道路上的其他物体所遮挡,或者由于天气等原因光照条件比较差,提高鲁棒性意味着在各种不同的条件下算法依然有效,并能应用于各种道路标志条件下。

2) 从适合结构化道路转向适合各种自然道路。

结构化道路有着明显的道路标志,易于检测,准确性高。一般的城市道路、乡村道路从建立道路模型到道路检测与识别跟踪都仍然是富有挑战性的课题。其挑战性在于:路上有更多的停止的或行使中的车辆,车道线不明显质量差,树、建

筑物和其他车辆的阴影,急转弯道路,多岔口路,太阳强光,路面其他标志如人行行走斑马线,道路质地、斜坡等。

3) 多传感器信息融合。

计算机视觉具有信息量丰富、信号探测范围广、获取信息完整、智能化水平高等优点,激光雷达、GPS、测距器传感器等则可提供精确的检测物方位与距离信息,将其结合起来可以更好地检测跟踪道路。充分利用多个传感器资源,将各种传感器在空间和时间上的互补与冗余信息依据某种优化准则组合起来,可产生对观测环境的一致性解释和描述。

参考文献:

- [1] CHIU K Y, LIN S F. Lane detection using color-based segmentation [C]// Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2005: 706–711.
- [2] 胡明昊, 杨文杰, 任明武, 等. 一种基于视觉的道路检测算法[J]. 计算机工程与设计, 2005, 26(7): 1704–1706.
- [3] TAKAHASHI A, NINOMIYA Y. Model-based lane recognition [C]// Proceedings of the 1996 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 1996: 201–206.
- [4] WANG Y, SHEN D, TEOH E K. Lane detection using Catmull-Rom spline [C]// IEEE International Conference on Intelligent Vehicles. Washington, DC: IEEE, 1998: 51–57.
- [5] REDMILL K A. A simple vision system for lane keeping [C]// IEEE Conference on Intelligent Transportation System. Washington, DC: IEEE, 1997: 212–217.
- [6] LEE J W. A machine vision system for lane-departure detection [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2002, 86(11): 52–78.
- [7] GERN A, FRANKE U, LEVI P. Advanced lane recognition using vision and radar [C]// Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2000: 45–51.
- [8] FRANKS U, LOOSE H, KNOPPEL C. Lane recognition on country roads [C]// 2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2007: 99–104.
- [9] WATANABE A, NAITO T, NINOMIYA Y. Lane detection with roadside structure using on-board monocular camera [C]// 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2009: 191–196.
- [10] LOOSE H, FRANKE U, STILLER C. Kalman particle filter for lane recognition on rural roads [C]// 2009 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2009: 60–65.
- [11] 张振武, 丁冬花. THMR-V 道路检测算法设计[J]. 微计算机信息, 2005, 21(35): 115–117.
- [12] 刘化胜, 王友仁. 车辆视觉导航系统中的实时道路检测[J]. 计算机测量与控制, 2004, 12(10): 901–904.
- [13] GONZALEZ J P, OZGUNER U. Lane detection using histogram-based segmentation and decision trees [C]// Proceedings of the Intelligent Transportation Systems. Dearborn: IEEE, 2000: 346–351.
- [14] ZHANG J, NAGEL H H. Texture-based segmentation of road images [C]// IEEE Symposium on Intelligent Vehicles. Washington, DC: IEEE, 1994: 260–265.
- [15] WU X W, PENG Y X, DING D H, *et al.* Color vision-based multi-level analysis and fusion for road area detection [C]// 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2008: 602–607.
- [16] GONG J W, WANG A S, ZHAI Y, *et al.* High speed lane recognition under complex road conditions [C]// 2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2008: 566–570.
- [17] YU B, ZHANG W G, CAI Y F. A lane departure warning system based on machine vision [C]// Proceedings of the 2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application. Washington, DC: IEEE, 2008: 197–201.
- [18] KIM S, Park J, IKCHO S, *et al.* A Framework for the development of robust lane recognition systems [C]// IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Washington, DC: IEEE, 2007: 754–759.
- [19] YU B, ZHANG W G. A robust approach of lane detection based on machine vision [C]// IITA International Conference on Control, Automation and Systems Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 195–198.
- [20] MCCALL J C, TRIVEDI M M. An integrated, robust approach to lane marking detection and lane tracking [C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2004: 533–537.
- [21] JUNG C R, KELBER C R. Lane following and lane departure using a linear-parabolic model [J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(13): 1192–1202.
- [22] BORKAR A, HAYES M, SMITH M T, *et al.* A layered approach to robust lane detection at night [C]// IEEE Workshop on Computational Intelligence in Vehicles and Vehicular Systems. Washington, DC: IEEE, 2009: 51–57.
- [23] KLUGE K. Extracting road curvature and orientation from image edge points without perceptual grouping into features [C]// IEEE Symposium on Intelligent Vehicles. Washington, DC: IEEE, 1994: 109–114.
- [24] DICKMANN S E D, MYSLIWETZ B D. Recursive 3-D road and relative ego-state recognition [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 199–213.
- [25] TRUONG O B, LEE B R. New lane detection algorithm for autonomous vehicles using computer vision [C]// International Conference on Control, Automation and Systems. Washington, DC: IEEE, 2008: 1208–1213.
- [26] TAOKA T, MANABE M, FUKUI M. An efficient curvature lane recognition algorithm by piecewise linear approach [C]// IEEE 65th Vehicular Technology Conference Spring. Washington, DC: IEEE, 2007: 2530–2534.
- [27] JOCHEM T M, POMERLEAU D A, THORPE C E. Vision-based neural network road and intersection detection and traversal [C]// International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington, DC: IEEE, 1995: 344–349.
- [28] KUANG P, ZHU Q X, LIU G C. Real-time road lane recognition using fuzzy reasoning for AGV vision system [C]// 2004 International Conference on Communications, Circuits and Systems. Washington, DC: IEEE, 2004, 2: 989–993.
- [29] RISACK R, MOHLER N, ENKELMANN W. A video-based lane keeping assistant [C]// Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington, DC: IEEE, 2000: 356–361.
- [30] KREUCHER C, LAKSHMANAN S, KLUGE K. A driver warning system based on the LOIS lane detection algorithm [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicles. Washington, DC: IEEE, 1998: 17–22.
- [31] LEBLANC D J, JOHNSON G E, VENHOVENS P J, *et al.* A road-departure prevention system [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1996, 16(6): 61–71.
- [32] REZOUQ A, DJOUADI M S. Visual based lane following for non-holonomic mobile robot [C]// IEEE EUROCON 2009. Washington, DC: IEEE, 2009: 902–907.