

# 基于激光雷达距离图像的道路边缘检测与跟踪

王 钊<sup>1</sup> 郭 丽<sup>2</sup> 石航飞<sup>2</sup>

(中国兵器工业第58研究所军品部 绵阳 621000)<sup>1</sup> (中国兵器工业第58研究所数控部 绵阳 621000)<sup>2</sup>

**摘 要** 论述了将激光雷达的距离图像信息用于道路检测和跟踪。首先将扫描点进行聚类分析对道路边缘进行检测和对所检测的边缘进行最小二乘直线拟合,在成功检测道路边缘后,利用 Kalman 滤波对道路边缘进行跟踪。实验证明该算法具有检测准确且鲁棒性好的特点。

**关键词** 激光雷达,距离图像,道路边缘检测,道路边缘跟踪

## Detecting and Tracking Edges of the Lane Based on Range Images

WANG Qian<sup>1</sup> GUO Li<sup>2</sup> SHI Hang-fei<sup>2</sup>

(Dept. of Armament Products, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)<sup>1</sup>

(Dept. of CNC, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China)<sup>2</sup>

**Abstract** The range image of the laser scanner could be used to detect and track edges of the lane. By clustering and analyzing the scan points, edges of the lane could be detected, edges of the lane could be substituted by fitting lines through the least square algorithm. Based on the fitting lines, edges of the lane could be tracked by Kalman filter. Experimental results show the accuracy and robust of the algorithm.

**Keywords** Laser scanner, Range image, Detecting edges of the lane, Racking edges of the lane

## 1 引言

国内外不少学者都进行了使用激光雷达距离图像信息检测道路边缘和道路中障碍物的研究<sup>[1-6]</sup>。在研究中假定:道路表面相对平坦和道路边缘在高度上有可见的几何变化。

文献[1]使用两个连续扫描点间的距离进行聚类分析,在所关注的安全区域(ROI)用道路宽度、相对于无人驾驶方向上的车辆中轴的位置和曲率参数等描述道路模型。

本文对文献[1]使用的聚类分析进行了改进,即先进行连续扫描点间聚类,之后再再将所产生的“类”按规则形成目标类——道路边缘,采用最小二乘法对其线段拟合,并利用 Kalman 滤波对道路边缘进行跟踪。

## 2 道路边缘检测

为了能检测道路的两边缘和确定道路模型,需对传感器的选型和安装、聚类、最小二乘直线拟合等进行研究。

### 2.1 传感器的选型和安装

要实现道路两边缘的检测,就必要求激光雷达具有3D的距离检测功能,经分析和比较,我们选用了德国的 IBEO 公司产 Lux 四线激光雷达。其主要技术指标为:方位角分辨率 0.25°、检测距离 100m、测量距离精度 0.25m 和扫描频率 25Hz。

根据道路两边缘的几何特征:道路宽度和边缘最小高度确定四线激光雷达的几何安装位置。如图1所示,将两个四线激光雷达对称地安装在车辆中轴线的左右两侧。

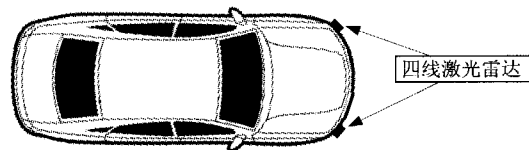


图1 两个四线激光雷达安装示意图

### 2.2 聚类

如一个四线激光雷达有  $N$  个扫描点,每个扫描点  $P_n$  值由方位角  $\alpha_n$  和距离  $r_n$  组成,则  $N$  个扫描点数组  $P$  用式(1)表示:

$$P = \left\{ P_n = \begin{pmatrix} \alpha_n \\ r_n \end{pmatrix} \right\}, n=0, 1, \dots, N(N=1080) \quad (1)$$

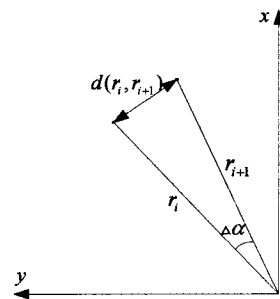


图2 两扫描点间距离示意图

根据图2,可得两个连续扫描点间的空间距离如式(2)所示:

$$d(r_i, r_{i+1}) = \sqrt{r_i^2 + r_{i+1}^2 - 2 \cdot r_i \cdot r_{i+1} \cdot \cos \Delta \alpha} \quad (2)$$

式中,  $\Delta \alpha$  为激光雷达方位角分辨率。

设置某一阈值  $T$ , 采用基于两点间欧氏距离判断准则的方法完成对扫描点的聚类。表 1 为描述该聚类算法的伪代码。

表 1 聚类算法

```

第 1 步 聚类
c=1; %c 为所聚的类数
for i=1:N
    flag=FALSE;
    for j=1:c
        if |di-wj|<T; % wj 为第 j 类中存在一点
            将 di 归入第 j 类;
            flag=TRUE;
        end
    end
    if flag==FALSE
        c=c+1;
        将 di 归入第 j 类;
    end
end
第 2 步 合并类
假设第 1 步共生成 c 个聚类。
while(1)
    for i=2:c
        for j=1:i-1
            计算 wi 和 wj 两类间的最近距离 Dij=|wi-wj|;
            if Dij<T
                将 wi 类和 wj 类合并为新的 wj;
            end
        end
    end
    if 任意两类间的距离大于阈值 T
        break;
    end
end
end

```

表 1 中第 2 步两类间最近距离在本文中有如下定义: 假设两类  $w_i$  和  $w_j$  分别含有  $M$  个点和  $N$  个点,  $w_i$  中任意一点与  $w_j$  中每一点都有一个距离  $d_{mn}$ , 其中  $1 \leq m \leq M, 1 \leq n \leq N$ , 定义两类间的最近距离为  $D_{ij} = \min_{m,n} d_{mn}$ 。

按照表 1 的聚类算法, 最终将目标聚为  $c$  类。图 3 为聚类后的示意图。

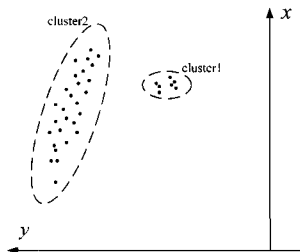


图 3 聚类示意图

### 2.3 判决

由于道路边缘和障碍物对应的扫描点在属性上有较大的区别, 因此通过对聚类后的数据进行判断, 便可以将道路边缘和障碍物区分开来。如图 3 中所示的 cluster1 对应为障碍物, cluster2 对应为道路边缘。由于障碍物的形状具有随机性, 而道路边缘一般呈现狭长形状, 所以根据这一特点可以将障碍物和道路边缘进行区分。因此通过计算各类内最远两点的欧氏距离, 选择距离最大类内的点进行道路边缘拟合。假设共有  $c$  类  $w_1, w_2, \dots, w_c$ , 定义类  $w_k (1 \leq k \leq c)$  中任意两点  $p_{ik}$  和  $p_{jk}$  之间的距离为:

$$d_{ijk} = \begin{cases} |p_{ik} - p_{jk}|, & i \neq j \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

若  $d_{ijk}$  满足:

$$d_{ijk} = \max_{1 \leq k \leq c} \{ \max_{p_i, p_j \in w_k} d_{ijk} \} \quad (4)$$

则类  $w_k$  为道路边缘扫描点。

### 2.4 拟合

假设待拟合的点数为  $N$ , 其中各点  $p_1(x_1, y_1), \dots, p_i(x_i, y_i), \dots, p_N(x_N, y_N)$  到拟合直线的距离误差平方之和准则函数为:

$$J(b) = \sum_{i=1}^N (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 = \sum_{i=1}^N e_i^2 \quad (5)$$

将式(5)改写为矩阵形式:

$$Ab = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix} = y \quad (6)$$

则  $b$  的最小二乘解为:

$$b = A^+ y = \begin{cases} (A^H (AA^H)^{-1})^{-1} y, & A \text{ 行满秩} \\ (AA^H)^{-1} A^H y, & A \text{ 列满秩} \end{cases} \quad (7)$$

对道路边缘的直线拟合示意图如图 4 所示。

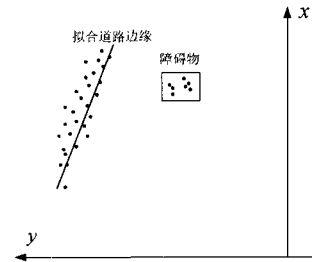


图 4 道路边缘拟合示意图

由以上聚类、判决和拟合步骤后便可以将道路边缘检测用直线拟合出来, 并根据道路边缘可以将无人车前方环境区分为行驶区和非行驶区, 行驶区即为到两条道路边缘内的区域, 对行驶区内的障碍物进行检测便可以得到无人车前方的可行行驶区与非可行行驶区。通过对无人车前方的环境进行拟合, 结果如图 5 所示。

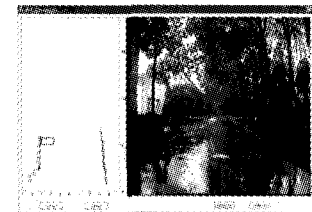


图 5 直线拟合道路边缘与障碍物检测

图 5 左侧为激光雷达检测的道路边缘的结果, 图中的点即为激光雷达的扫描点, 直线和方框分别为拟合的道路边缘和在道路边缘内检测到的障碍物, 右侧摄像机图像为无人车前方的真实环境。从和摄像机图像的对比中可以看出激光雷达真实地反映了道路两侧的边缘和障碍物。

### 3 道路边缘跟踪

在多数情况下, 车道检测和跟踪简化为在道路图像中检测车道边界。我们认为车道检测和跟踪是有区别的。车道检测是在没有强的先验知识限制的情况下在单幅图像中决定车

道的边界。而车道跟踪是在序列图像中决定车道的位置,此时可以用前一帧图像中关于车道边界位置的信息来限制当前帧车道的位置。

### 3.1 Kalman 滤波

建立 Kalman 的状态方程和观测方程,如式(8)和式(9)所示。

状态方程:

$$X(k+1) = \Phi(k)X(k) + \Gamma(k)w(k) \quad (8)$$

观测方程:

$$Y(k) = H(k)X(k) + v(k) \quad (9)$$

其中  $w(k)$  和  $v(k)$  分别为状态噪声和观测噪声且满足以下 3 式:

$$E[w(k)v(k)] = 0$$

$$\text{Cov}[w(k)w(j)] = Q(k)\delta_{kj}$$

$$\text{Cov}[v(k)v(j)] = R(k)\delta_{kj}$$

Kalman 滤波流程:

状态一步预测:

$$\hat{X}(k+1, k) = F(k+1, k)\hat{X}(k, k)$$

状态估计:

$$\hat{X}(k+1, k+1) = F(k+1|k) + K(k+1)\gamma(k+1)$$

残差向量:

$$\gamma(k+1) = [Z(k+1) - H(k+1)\hat{X}(k+1|k)]$$

滤波增益:

$$K(k+1) = P(k+1|k)H^T(k+1)[H(k+1)P(k+1|k) + H^T(k+1) + R(k+1)]^{-1}$$

一步预测误差协方差阵:

$$P(k+1|k) = F(k+1, k)P(k|k)F^T(k+1, k) + \Gamma(k+1, k)Q(k)\Gamma^T(k+1, k)$$

估计误差协方差阵:

$$P(k+1|k+1) = [I - K(k+1)H(k+1)]P(k+1|k)$$

只要给定初值  $X(0|0)$  和  $P(0|0)$ , 利用  $k+1$  时刻的量测值  $Z(k+1)$ , 即可根据以上的递推公式计算出时  $k+1$  刻的状态估计值  $\hat{X}(k+1|k+1)$ 。

### 3.2 道路边缘跟踪

由于车辆在运动中不存在机动的情况并且考虑到跟踪的实时性,因此本文中的 Kalman 滤波采用 CV 模型,其中状态矩阵和观测矩阵分别为:

$$\text{状态矩阵: } \Phi(k) = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\text{观测矩阵: } H(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中状态矩阵中的  $T$  为观测周期,由式(5)知拟合直线的表达式为:

$$y - b_0 - b_1x = 0$$

结合状态矩阵和观测矩阵得到状态方程和观测方程的具体形式:

$$X(k+1) = \begin{pmatrix} 1 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ \dot{b}_0 \\ b_1 \\ \dot{b}_1 \end{pmatrix} + I \cdot w(k)$$

观测方程的具体形式为:

$$Y(k) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b_0 \\ \dot{b}_0 \\ b_1 \\ \dot{b}_1 \end{pmatrix} + v(k)$$

通过 Kalman 滤波得到  $b$  的估计和一步预测,利用一步预测的结果,设置检测范围,可有效地排除无效扫描点的干扰,从而降低边缘检测的运算量并提高检测的鲁棒性,如图 6 所示。

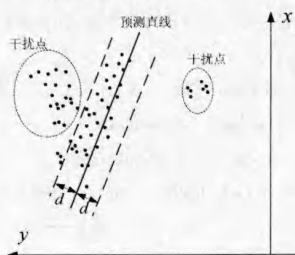


图 6 利用 Kalman 滤波排除干扰点示意图

利用 Kalman 滤波对道路边缘进行跟踪的效果如图 7 所示。从图中可以看到,在转弯的情况下,这种直线拟合方法的效果。



图 7 道路边缘跟踪结果

### 3.3 实验分析

实验证明,该算法具有较强的环境适应性,在转弯、上坡、下坡和单侧数据丢失的情况下均有着良好的检测效果。如图 8—图 11 所示。

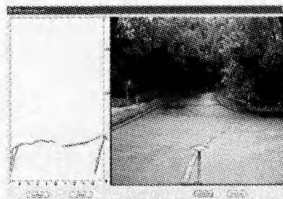


图 8 转弯前的道路边缘跟踪结果



图 9 转弯中单侧数据丢失时的边缘检测结果



图 10 转弯后的道路边缘检测结果

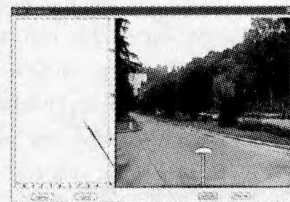


图 11 单侧数据丢失时的道路边缘检测结果

**结束语** 任何一种传感器都有其优势与不足,只有将多种传感器结合起来共同使用在同一个系统中,才是今后无人车发展的方向。下一步的工作重点就是将激光雷达和摄像机的信息进行融合,从而实现道路边缘、车道标线、障碍物、交通标识等的进一步检测和识别。

### 参 考 文 献

[1] Kirchner A, Heinrich T. Model based detection of road boundaries with a laser scanner[C]//IEEE International Conference on Intelligent Vehicles. Stuttgart, 1998

[2] Kirchner A, Timm K. Vehicle Tracking with a Laser Scanner [C]//31th ISATA. Düsseldorf, 1998

[3] Borenstein J, Everett HR, Feng L. Navigating mobile robots [C]//Wellesley MA, 1996

[4] Operating Manual Ladar Digital A AF[EB/OL]. IBEO Automobile Sensor GmbH. Hamburg, Germany, 1999

[5] Rohling H, Mende R. Systemkonzept und Leistungsfähigkeit eines Low-Cost 77 GHz Radarsensors für den Einsatz [C]//Auto-

mobil 9 Radarsymposium. Stuttgart, 1997

[6] 于金霞,蔡自兴,邹小兵,等. 移动机器人导航中激光雷达测距性能研究[J]. 传感器学报, 2006, 19(2): 356-360

[7] 于和春, 陈国斌, 刘济林. 基于多线式激光雷达的障碍检测与环境重建[J]. 浙江大学学报, 2006, 40(6): 1066-1070

[8] 于和春, 刘济林. 复杂环境下基于多层激光雷达的障碍检测[J]. 电路与系统学报, 2006, 11(4): 42-46

[9] 杨明, 王宏, 何克忠, 等. 基于激光雷达的移动机器人环境建模与避障[J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 112-116

[9] 袁夏, 赵春霞, 陈德宝, 等. 一种基于激光雷达的路面提取算法[J]. 中国图形图像学报, 2009, 14(10): 2035-2041

[10] Hancock J A. Laser Intensity Based Obstacle Detection and Tracking [D]. Robotics Institute, CMU, 1999

[11] Dudek G, et al. Just in line sensing: combining sonar and laser range data for exploring unknown worlds [C]//Proc. IEEE ICRA. 1996; 667-672

[12] Dunlay T. Obstacle avoidance perception processing for the autonomous land vehicle[J]. Proc. IEEE Robotics and Automation Conf., 1998, 2: 912-917

(上接第 368 页)

**结束语** 随着我国现代化建设和人民生活水平的日益提高,行驶在城市道路上的车辆越来越多,造成了交通拥堵、事故频发等一系列的问题。经验表明,交通监控员通过远程调阅路面监控录像,实施有效监控的推荐显示屏幕个数只有 4 个,因此,在繁忙的城市道路交通压力下,传统的交通监控模式将导致很高的交通事件漏报率和误报率。本文针对这些问题,提出了一个以人为中心的智能化城市交通监控方法,其核心思想在于:综合利用对监控员的眼球运动的追踪分析技术和 RFID 标签卡识别和监控技术,以及事件管理器技术,为城市交通监控提供更加高效的监控技术支撑。该方法的主要特点包括:1. 采用眼球追踪技术,对交通监控员的眼球活动状态进行跟踪和分析,根据已建立的事件模型和判定模型进行快速屏幕切换操作;2. 通过结合 RFID 技术,对道路上车辆的 RFID 标签进行追踪和统计分析,根据模型进行交通事件快速预警和关联分析。本方法还强调面向用户操作,所以设计简单易懂,使用方便。

### 参 考 文 献

[1] Wallace E, D C. Cctv control room ergonomics. tech. pp. Police Scientific Development Branch, UK Home Office. ACM (1998)

[2] CCTV[OL]. [http://en.wikipedia.org/wiki/Closed-circuit\\_television](http://en.wikipedia.org/wiki/Closed-circuit_television), 2013

[3] RFID[OL]. <http://en.wikipedia.org/wiki/Rfid> (2013)

[4] Itti L, K C. Computational modelling of visual attention[J]. NatRev Neurosci, 2001, 2: 194-203

[5] Itti L, B P. Bayesian surprise attracts human attention[J]. Vision Res 49, 2009, 10: 1295-1306

[6] Taylor J G, F N. Modelling human attention and emotions[C]//IEEE international joint conference on neural networks. Budapest, Hungary, 2004, 1: 501-506

[7] Wu C, Lin Y, Z W. Human attention modeling in a human-machine interface based on the incorporation of contextual features in a bayesian network [C]// IEEE international conference on systems, man and cybernetics. San Antonio, 2005, 1: 760-766

[8] M, D. Active capture: integrating human-computer interaction and computer vision/audition to automate media capture [C]// IEEE international conference on multimedia and expo. 2003, 2: 185-188

[9] Rowe L A, J R. ACM sigmm retreat report on future directions in multimedia research [C]// ACM Trans Multimed Comput Commun Appl. ACM, 2005, 1: 3-13

[10] Ma Y F, Lu L, Z H L M. A user attention model for video summarization [C]// ACM international conference on multimedia. ACM, 2002: 533-542

[11] Liu A, Zhang Y, S Y Z D L J Y Z. Human attention model for semantic scene analysis in movies [C]// IEEE international conference on multimedia and expo. IEEE, Hannover, Germany, 2008: 1473-1476

[12] Baumann M A, MacLean K E, H T M A. Emulating human attention-getting practices with wearable haptics [C]// IEEE haptics symposium. Waltham, ACM, USA, 2010: 149-156

[13] Peters C, O C. Attention-driven eye gaze and blinking for virtual humans [C]// ACM SIGGRAPH 2003 sketches and applications. ACM, San Diego, USA, 2003: 1

[14] Leykin A, H R. Real-time estimation of human attention field in lwr and color surveillance videos [C]// IEEE international workshop on object tracking and classification in and Beyond the Visible Spectrum. IEEE, Anchorage, USA, 2008: 1-6

[15] Wang J, Kankanhalli M S, Y W J R. Experiential sampling for video surveillance [C]// First ACM international workshop on video surveillance. ACM, Berkeley, California, USA, 2003: 77-86

[16] Vaiapury K, K M. Finding interesting images in albums using attention [J]. J Multimedia, 2008, 4: 1-12