

基于运动模型的道路识别与跟踪算法的研究

苏开娜 任文君 易小琳 丰丽军

(北京工业大学计算机学院, 北京 100044)

摘要 自动驾驶与辅助导航是目前国际上研究的热点问题. 通过对室外行驶车辆上的 CCD 摄像机所采集的长序列立体图象的处理与分析, 研究公路汽车自动视觉导航中的道路识别与跟踪问题. 该文提出一种基于长序列立体图象处理的三维运动参数估计算法, 算法的核心是采用了能有效抑制噪声的边缘检测模板, 建立了车辆行驶过程中的道路曲率动态模型、车自身的运动模型和摄像机的透视投影模型, 并通过卡尔曼滤波器进行三维运动参数的估计. 算法具有快速、鲁棒性好及实用性强的优点. 文章还给出了在室外环境下拍摄的真实图象的实验结果. 实验证明, 此方法取得令人满意的道路识别与跟踪结果, 所以这对提高公路汽车视觉导航系统性能的研究是非常有益的.

关键词 运动模型 长序列立体图象 运动参数估计 道路识别与跟踪

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2000)03-0226-06

A Kinematic Model-Based Road Recognition and Tracking

SU Kai-na, REN Wen-jun, YI Xiao-lin, FENG Li-jun

(Computer Institute of Beijing Polytechnic University, Beijing 100044)

Abstract The problem of autonomous driving and co-navigating has received increasing attention in recent years. This paper researches on road recognition and tracking in automatic visual road vehicle guidance system by processing and analysing a long sequence stereo images of real road which are gathered on an autonomous vehicle driving outside. An algorithm is proposed for estimating the parameters of three-dimensional motion, based on long sequence stereo images processing. It is our core method to build the road's curvature dynamic model, vehicle's state kinematic model and camera's perspective model, and to estimate the 3D motion parameters using Kalman filter. The algorithm is fast, robust and practical. Experimental results with real scene images are given. Experiments prove that the results are satisfying for road recognition and tracking, so the approach could actively improve the research on the performance of the visual road vehicle guidance system.

Keywords Kinematic model, Long sequence of stereo images, Estimation of motion parameters, Road recognition and tracking

0 引言

近年来, 智能车辆的自动驾驶与辅助导航不仅具有特殊的军用价值, 而且在公路管理、交通运输等民用方面也有着广阔的应用前景. 视觉传感器较声纳、激光雷达等传感器可获得更高、更精确的信息; 视觉方法还具有不需重新铺设路面, 较大灵活性等潜在优点, 所以目前在自然环境或其它复杂环境的

导航中, 视觉方法特别受到了重视.

本系统的应用背景为高速公路或等级公路, 以摄像机为唯一的传感器, 仅仅依靠已有的车道线实现车辆的视觉导航. 通过对在室外行驶车辆上的 CCD 摄像机所采集的实际道路环境的长序列立体图象的处理和分析, 进行自然背景下的道路识别和跟踪(车道线的检测与跟踪)是这个视觉导航系统所要完成的重要功能之一, 而且这也是本文要解决的主要问题.

1 道路识别与跟踪

1.1 车道线检测

由于车速对实时提出的要求较高, 为了检测各幅图象上的车道线, 应用一种鲁棒性能好、简单和快速的 $3 \times n$ 的带状边缘检测模板-褶皱模板. 该模板充分考虑到车道线的形状特点; 而且模板一侧的加权系数为 + 1, 另一侧的加权系数为 - 1, 避开了传统

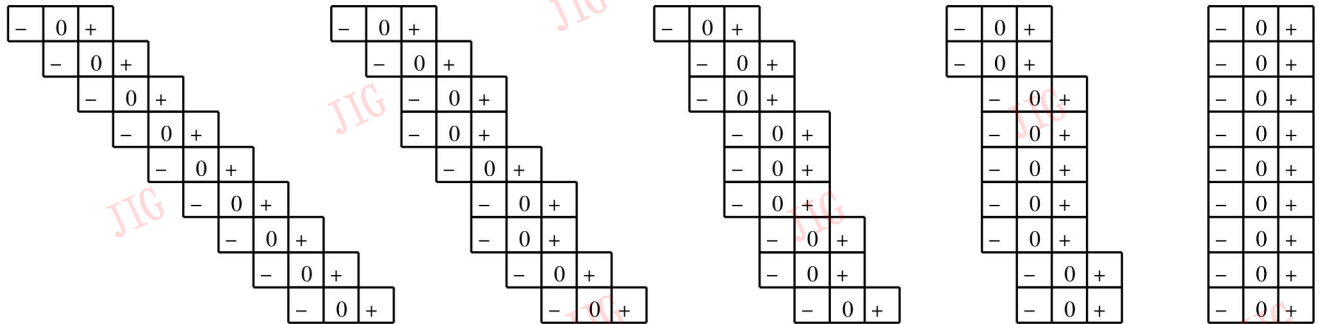


图 1 长度为 9 的带状边缘检测模板(与之对称的另外 4 块模板略)

1.2 空间-时间模型的建立^[1]

为了进一步实现车道线的自动检测与跟踪, 直接建立三维空间中的道路水平、垂直曲率动态模型, 车自身的运动模型及摄像机的透视投影模型, 并利用基于模型的卡尔曼滤波器, 由长序列立体图象进行三维运动参数的递推估计.

1.2.1 运动模型(状态方程)

(1) 道路模型

由于车辆的运动, 使原本静止的道路曲率变成一个动态的连续时间系统. 交通部的有关资料表明, 我国在修建高速公路或等级公路时, 还参考了德国^[1]和日本^[2]的线性设计, 即道路走向由直线、圆弧和回旋(clothoid)曲线 3 种路段构成.

鉴于道路的曲率改变及作用于车上的横向力是连续变化的, 可以利用线性曲率构造公式, 建立描述车辆行驶时道路水平曲率和垂直曲率实时变化的道路模型.

$$C = C_0 + C_1 \times l \quad (1)$$

$C = 1/R$ (R 为曲率半径) 是车道线上坐标 l 处的局部曲率, C_0 为 $l = 0$ 处的初始曲率, $C_1 = dC/dl$ (曲率随弧长的变化率), 故

$C_0 = 0, C_1 = 0$ 为直线, $C_0 \neq 0, C_1 \neq 0$ 为回旋曲线, $C_0 \neq 0, C_1 = 0$ 为圆弧.

车道线由这 3 种类型的多个图段组成, 回旋曲线图段又称为过渡段, 形成直线图段和圆弧图段之

边缘检测中的乘法运算, 计算速度得以提高. 我们设计了 $n = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17$ 共 8 种褶皱模板(本文采用了 $n = 9$ 的模板, 见图 1), 显然, 模板越长, 可检测的边缘方向精度越高, 抗噪能力也越强, 当然时间开销也越大. 进而采用视觉窗口技术(见 2.1 节及图 4), 用褶皱模板仅处理感兴趣的小窗口区域的局部信息; 并利用来自卡尔曼滤波器递推估计的信息反馈, 由上一幅图象对本幅图象视觉窗口可能出现的位置进行预测.

间的平滑过渡.

① 道路水平曲率动态模型

水平曲率 $C_h(l)$ 随弧长 l 线性变化, 则根据线性曲率式(1)有:

$$C_h(l) = C_{0h} + dC_h/dl \times l = C_{0h} + C_{1h}l \quad (2)$$

当车辆行驶时, 道路水平曲率随时间的变化率为

$$dC_h/dt = dC_h/dl \cdot dl/dt = C_{1h} \cdot V \quad (3)$$

由于每一视程 L (见图 2, L 为车道线上待检测点与摄像机所在位置之间的距离) 内并不一定包含同一种类型的图段(即 C_{1h} 不一定等于常数), \dot{C}_{1h} 函数为 Dirac 脉冲序列, 而且 C_{1h} 函数中每个脉冲的位置是随机的, 不能模型化, 为此引入了描述局部变化的平均模型. C_{0hm} 和 C_{1hm} 是平均模型所利用的、覆盖视程 L 的平均参量, 它们与理论参量 C_{0h} 和 C_{1h} 对曲率的影响是等价的, 即在视程 L 内产生相等的水平偏移量 Δy :

$$\Delta y_{cm}(C_{0hm}, C_{1hm}, L) = \Delta y_c(C_{0h}, C_{1h}, l_c) \quad (4)$$

另外, 用高斯分布的白噪声过程来表示 C_{1h} 的时间变化率, 这样, 最终建立的水平曲率动态模型为:

$$\dot{C}_{0hm} = C_{1hm} \cdot V, \dot{C}_{1h} = n_{c1h}(t)$$

$$\dot{C}_{1hm} = -3V/L \cdot C_{1hm} + 3V/L \cdot C_{1h}, \quad (5)$$

② 道路垂直曲率动态模型

同理, 道路垂直曲率动态模型(垂直曲率 C_v 的阶跃变化通常在道路修建过程中已被平滑了)为:

$$\dot{C}_{0vm} = C_{1vm} \cdot V, \dot{C}_{1vm} = n_{c1v}(t) \quad (6)$$

综合式(5)和(6),将水平和垂直曲率动态模型写成矩阵形式为

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{n} = \begin{pmatrix} 0 & V & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3V}{L} & \frac{3V}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & V \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} C_{0hm} \\ C_{1hm} \\ C_{1h} \\ C_{0hm} \\ C_{1hm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ n_{c1h} \\ 0 \\ n_{c1v} \end{pmatrix} \quad (7)$$

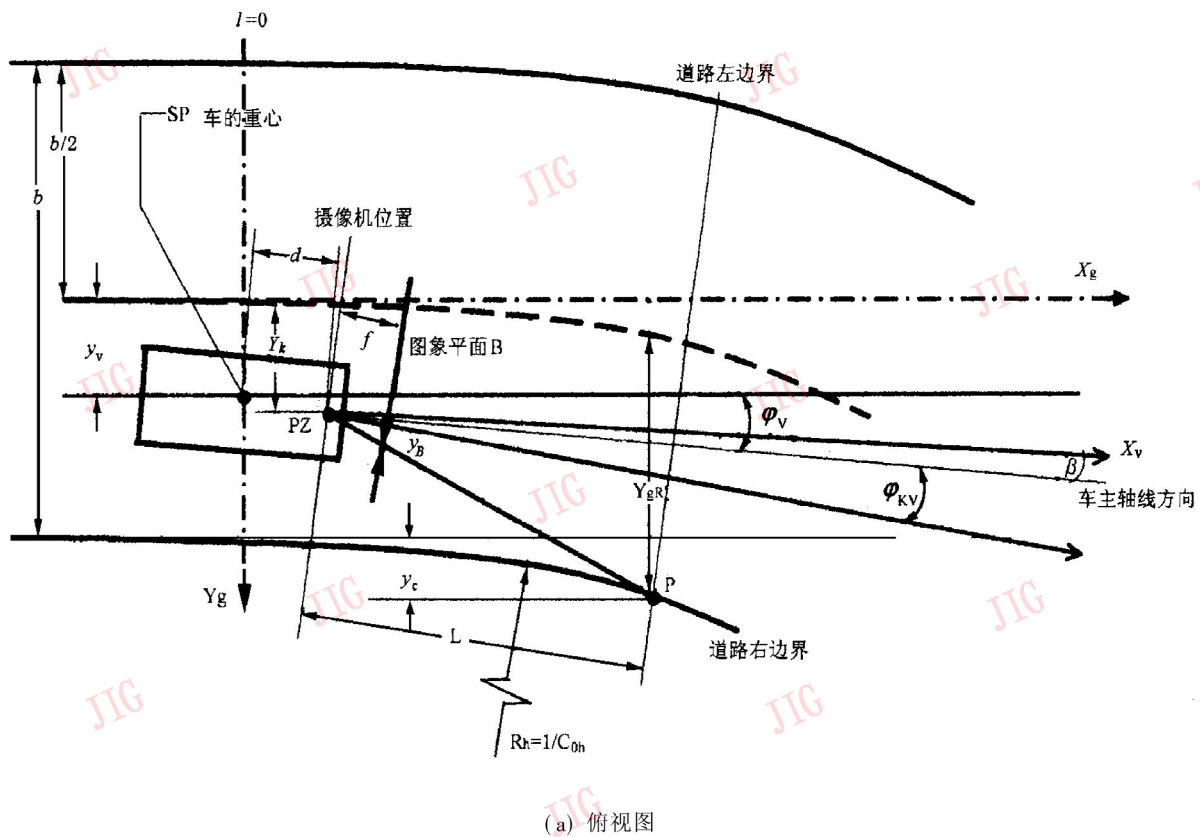
(2) 车辆状态模型

图2为车辆行驶过程中,道路、车辆、摄像机之间的几何关系示意图(俯视图和侧视图). 车辆状态

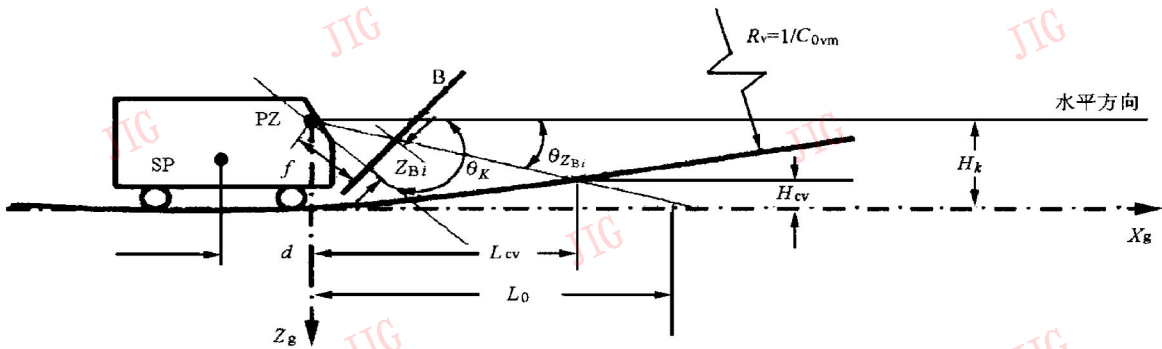
模型描述了车辆在行驶过程中与道路相对位置的变化及相关参数的实时变化. 由于车辆行驶时,完全被动地依赖于道路的垂直曲率,所以只需考虑车辆水平动态模型.

① 车辆横向动态

在描述车辆横向动态过程中引入了静态模型参数 a (前后轴间距), k_r (轮胎水平力系数) 和 m (车辆质量). 状态变量是车偏离道路中心线的横向距离 y_v , 车身纵轴方向与道路切线方向之间的偏航角 Φ , 车身纵轴与车行进方向之间的浮动角 β 及车前轮相对于车身纵轴方向的转向角 λ .



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图2 道路、车辆、摄像机几何关系示意图

当车辆在道路上以速度 V 行驶时, 道路的水平切向变化率为

$$\dot{\lambda} = C_{0h} \cdot V \quad (8)$$

因为在每一采样周期内车走的距离很短, 所以这里忽略了 C_{0h} 的影响. 当车辆重心沿曲线向前移动一无穷小量时 ($a \gg dl$), 有下面微分方程近似成立:

$$dl \cdot \sin \lambda = a \cdot \sin(\varphi) \quad (9)$$

因为式(9)中的 λ, φ 很小, 所以它的时间导数近似为

$$\dot{\varphi} = V \cdot Na \quad (10)$$

又车前轮的偏转由步进电机实现, 根据步进电机的积分器模型有

$$\dot{\lambda} = k_{\lambda} \cdot U \quad (11)$$

因此, 由式(8)和(10), 可以得到

$$\dot{\varphi} = V \cdot (Na - C_{0h}) \quad (12)$$

但车辆前进方向和实际速度方向有一点偏移, 这是由于轮胎的变形与轮胎和地面的滑动造成的, 所以, 真正的相对于道路切向的轨道角(速度方向)应为

$$\lambda = \varphi + \beta \quad (13)$$

于是, 车辆的横向速度为:

$$\dot{y}_v = V \cdot \sin \lambda = V \cdot \lambda \quad (14)$$

滑动角 β 的大小由下面车辆动力学公式决定:

$$\dot{\beta} = -2K \cdot \beta + (V/a - K) \cdot \lambda \quad (15)$$

$$K = k_r / (m \cdot V)$$

② 车辆状态模型

综上所述, 最后得到的车辆状态模型(矩阵形式)为

$$\dot{x}_v = A_v \cdot x_v + b_v \cdot U + b_c \cdot C_{0h} \quad (16)$$

其中: $a_F = -2K, b_F = c_F - K, c_F = V/a$.

$$A_v = \begin{bmatrix} \lambda & & & & & \\ \beta & & & & & \\ y_v & & & & & \\ \varphi & & & & & \end{bmatrix} \quad A_v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_F & a_F & 0 & 0 \\ 0 & V & 0 & V \\ c_F & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$b_v = \begin{bmatrix} k_{\lambda} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad b_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -V \end{bmatrix}$$

1.2.2 测量模型(建立测量方程)

车辆行驶过程中, 车本身和道路的状态不断发生变化, 车、道路与摄像机之间的相对位置也不断发生变化, 这些变化都会引起车道线上待检测点投影到象平面的二维象点的投影坐标的变化, 不过由摄像机透视投影模型可对它们的实时变化进行描述

(见图 2, 摄像机焦距为 f , 透镜中心 PZ 与车辆重心 SP 的距离为 d , 垂直高度为 H_k , 摄像机的光轴与车辆前进方向的水平夹角为 φ_v , 与车辆纵轴的垂直夹角为 θ_k , 二维图象平面第 i 条水平扫描线对应的第 i 个垂直方向视角为 θ_{ZBi} , L_0 为道路无垂直曲率时的视程, L_{cv} 的道路有垂直曲率时的实际视程。), 建立所谓的测量模型-摄像机透视投影模型。

设对摄像机和三维点定位的绝对坐标系为 (X, Y, Z) , 摄像机坐标系为 (x, y, z) , 象平面为 (xz) 及二维像点为 v^* . 摄像机安装在一个平台上, 并设象平面中心与平台中心重合. 平台摆动角为 θ , 俯仰角为 α , 摆动角定义为 x 与 X 两轴间的夹角, 俯仰角定义为 z 与 Z 两轴间的夹角。

求摄像机模型, 考虑到: ① 将绝对坐标系移至摄像机坐标系, 使平台中心偏离原点; ② 产生摆动运动, 即 x 轴逆时针旋转 θ 角; 产生俯仰运动, 即 z 轴逆时针旋转 α 角; ③ 透视投影; 最后得到:

$$\begin{aligned} x &= f \frac{(X - X_0) \cos \theta + (Y - Y_0) \sin \theta}{(X - X_0) \sin \theta \cos \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \cos \alpha + (Z - Z_0) \sin \alpha} \\ z &= f \frac{(X - X_0) \sin \theta \sin \alpha - (Y - Y_0) \cos \theta \sin \alpha + (Z - Z_0) \cos \alpha}{(X - X_0) \sin \theta \cos \alpha + (Y - Y_0) \cos \theta \cos \alpha + (Z - Z_0) \sin \alpha} \end{aligned} \quad (17)$$

根据摄像机的基本模型可近似得到:

$$\begin{aligned} x &= f \frac{(X - y_v) - (Y - d)(\varphi + \varphi_v)}{(X - y_v)(\varphi + \varphi_v) + (Y - d) - (Z - H_k)\theta_k} \\ z &= f \frac{(X - y_v)(\varphi + \varphi_v)\theta_k + (Y - d)\theta_k + (Z - H_k)}{(X - y_v)(\varphi + \varphi_v) + (Y - d) - (Z - H_k)\theta_k} \end{aligned} \quad (18)$$

另外, 道路为双行线, 每个方向的道宽约为 b , 则根据道路模型有:

$$y_c = (L + d)^2 / 2 \cdot C_{0hm} + (L + d)^3 / 6 \cdot C_{1hm}$$

$$H_{cv} = (L + d)^2 / 2 \cdot C_{0vm} + (L + d)^3 / 6 \cdot C_{1vm}$$

最后设待检测点为视程 L 处右车道线的左右边缘上的点, 即

$$(X, Y, Z) = (y_c \pm b/2, L + d, H_{cv})$$

设: $y_{\varphi} = L \cdot \varphi, y_{\varphi_v} = L \cdot \varphi_v$, 代入式(18)得二维象点横坐标 y_B 为:

$$\begin{aligned} x &= y_B \approx f \frac{y_c \pm b/2 - y_v - y_{\varphi} - y_{\varphi_v}}{L} \\ z &= z_B \approx f \frac{L\theta_k + (H_{cv} - H_k)}{L} \end{aligned} \quad (19)$$

1.3 卡尔曼(Kalman)滤波^[3]

1.3.1 空间时间视觉方法

图 3 为本文所采用的空间-时间视觉方法的逻辑

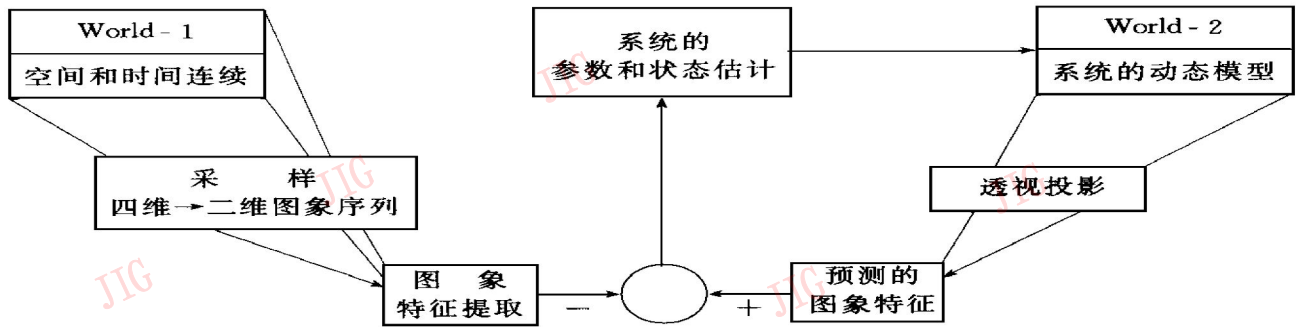


图3 逻辑框图

辑结构框图, World-1 代表了空间和时间连续的三维外部现实世界. 显然, 在车辆行驶过程中, 车本身和道路的连续变化都将引起这个世界的外观变化. 这些变化被自动车前端安装的 CCD 摄像机记录下来, 再经过采样和量化, 就得到了在空间和时间上离散的二维数字图象序列. 同时, 我们根据透视投影理论, 构造了一个与现实世界相对应的内部世界 World-2, 它利用实时运动模型来描述在行驶过程中车本身和道路的动态. 如果内部世界正确地反映了现实世界的情况, 那么 World-1 和 World-2 就会具有相同的特征; 反之若有差距, 特征值就会不同. 因此, 通过提取这些特征, 并采用适当的方法去缩小它们的差值, 就可以求得与现实世界最接近的动态模型.

1.3.2 卡尔曼滤波

卡尔曼滤波器的作用是: 把与运动模型(道路曲率模型和车辆状态模型)有关的 9 个状态参量($X = [\lambda, \beta, \gamma_v, \mathcal{Q}, C_{0hm}, C_{1hm}, C_{1h}, C_{0vm}, C_{1vm}]^T$) 从噪声中提取出来, 实现所谓的空间-时间视觉方法.

至于系统噪声, 如随机变化的道路曲率、速度计的误差和模型的近似等, 都会造成状态参量的不准确, 进而还引起运动模型和现实世界的偏移. 卡尔曼滤波器可以过滤掉噪声, 并求得与现实世界最接近的动态模型. 针对我们的实验(见 2.1 节), 来自于外

部世界的观测值为: 利用褶皱模板对 CCD 摄像机采集的每幅图象处理后得到的右车道线右边缘上点的水平坐标 y_B ; 而估计值则来自于利用运动模型和摄像机透视投影模型构造的, 与外部世界相对应的内部世界(见公式(19)). 因此, 利用信号的前一个估计值和最近一个观测值, 在线性无偏最小方差估计准则下估计信号的当前值, 预测一个将来值, 如此循环下去, 进行三维运动参数的递推估计, 并完成对每幅图象的视觉窗口中心位置坐标的预测. 最终实现道路的识别与车道线的自动跟踪.

另外, 由于本课题的测量方程是非线性的, 所以我们采用了扩展的卡尔曼滤波器, 即当状态估计值离真实值不是很远时, 将测量模型进行线性化处理^[4].

2 实验结果与总结

2.1 实验结果

我们利用室外行驶车辆上采集的长序列立体图象, 在室内的实验环境(PC586-200 微机, CA-CPE-1000 图象采集卡, 录像机)上, 进行了本文所述方法的实验(在右车道线上开了 2 个视觉窗口). 经实验, 无论在直道和弯道上, 车道线跟踪都取得了良好的效果(如图 4); 计算速度也令人满意, 每一周期的时间开销为 110ms^[5].

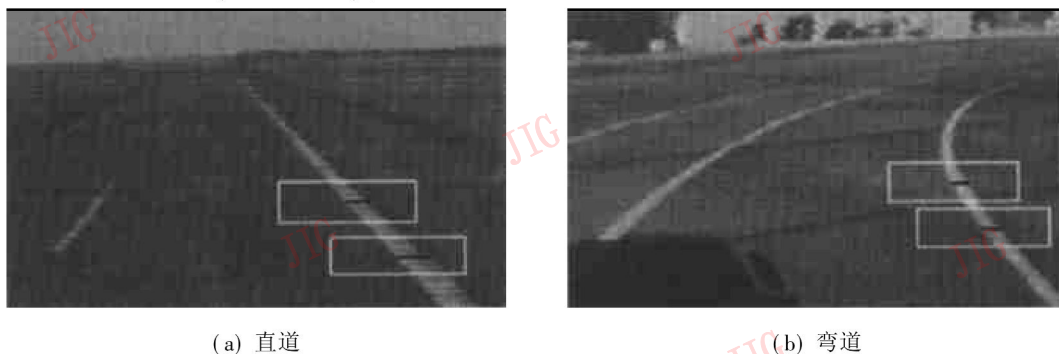


图4 车道线跟踪结果

2.2 总结

本文所述研究方法有如下特点:

(1) 采用褶皱边缘检测模板, 提高了系统的鲁棒性和实时性。

(2) 在计算机视觉领域, 由序列图象进行 3D 运动分析占有重要的地位, 以往的运动估计方法多基于 2~3 帧图象, 而本文所述方法利用了行驶车辆上的 CCD 摄像机(摄像机处于运动状态) 所采集的长序列立体图象, 具有方便、灵活及信息利用率高等优点。

(3) 采用卡尔曼滤波器的递推估计, 只对图象序列中的上一帧图象进行处理, 不必对图象序列进行存储, 提高了系统的实时性; 还充分考虑到测量中出现的不可靠和系统所受的干扰, 这又为图象识别提供了一条抗噪新途径。

参考文献

- 1 Dickmann E D, Mysliwetz B D. Recursive 3-D road and relative ego-state recognition. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 199~ 213.
- 2 岩间滋, 七宫大著. 透视图法在公路设计中的应用. 任力译. 北京: 人民交通出版社, 1980.
- 3 张元编著. 数字信号处理 II. 北京: 北京工业大学出版社, 1995.
- 4 马颂德, 张正友著. 计算机视觉—计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998.
- 5 任文君. 基于运动模型的道路识别算法的研究[学位论文]. 北京工业大学计算机学院, 1998.



苏开娜 北京工业大学计算机学院教授. 1970 年清华大学无线电电子学系本科毕业, 1984 年联邦德国卡尔斯鲁厄大学信息科学系研究生毕业. 主要从事图象处理与机器视觉的研究。



任文君 1998 年 6 月北京工业大学计算机学院研究生毕业. 主要从事图象处理与机器视觉的研究。



易小琳 北京工业大学计算机学院高级工程师. 1982 年清华大学计算机系本科毕业. 主要从事图象处理和计算机网络的研究。



丰丽军 北京工业大学计算机学院硕士研究生. 主要从事图象处理与机器视觉的研究。