

DOI: 10.3901/JME.2010.20.112

基于道路特征的车载相机标定动态补偿算法*

陈 军¹ 徐友春² 彭永胜² 赵玉凡²

(1. 天津大学机械工程学院 天津 300072; 2. 军事交通学院汽车工程系 天津 300161)

摘要: 车载相机标定是基于机器视觉的车道偏离报警系统关键技术之一, 通过相机透视投影原理和针孔成像模型, 采用三线标定法获取相机静态外部参数。根据车辆行驶过程中颠簸振动的特点, 通过数学模型分析相机标定精度的影响因素。提出一种基于道路特征的动态补偿算法, 根据道路中两条车道线互相平行以及宽度不变的固有特征, 对车载相机俯仰角及高度进行动态补偿。利用补偿后的俯仰角和高度值计算车辆在车道线中的横向位置及航偏角。设计一种独立于当前车载相机系统的测试平台, 对该补偿算法进行动态测试。仿真和实车试验结果表明, 该补偿算法可以明显减小因车辆颠簸而造成的标定误差, 从而有效减少车辆横向位置和航偏角的测量误差。

关键词: 相机标定 动态补偿 车道偏离报警系统 汽车主动安全

中图分类号: TP242.62

Dynamic Compensation Algorithm for Vehicle Camera Calibration Based on Road Characteristics

CHEN Jun¹ XU Youchun² PENG Yongsheng² ZHAO Yufan²

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072;

2. Automobile Department, Military Transportation Institute, Tianjin 300161)

Abstract: The vehicle camera calibration is one of the key technologies of lane departure warning system(LDWS) based on machine vision. In according with perspective projection principle and pinhole imaging model, the external static parameters of the camera are obtained by using trilinear calibration method. Based on the characteristics of vehicle jolt during traveling, the influence factor of camera calibration precision is analyzed via the mathematical model. A dynamic compensation algorithm based on the road characteristics is proposed. The pitching angle and height of vehicle camera is dynamically compensated on the basis of the inherent characteristic that two lane lines of the road are parallel and the width is invariable. The lateral position of the vehicle in the lane and the yaw angle of vehicle running in the lane are calculated by using the pitch angle and height values after compensation. A test platform independent from the current vehicle camera system is designed and used to carry out dynamic test of the compensation algorithm. The results of simulation and real vehicle test show that the compensation algorithm can reduce the calibration error caused by vehicle jolt obviously, thus effectively reducing the measurement errors of lateral position and yaw angle of vehicle.

Key words: Camera calibration Dynamic compensation Lane departure warning system(LDWS) Vehicle active safety

0 前言

车道偏离报警系统是汽车主动安全技术的重要组成部分。该系统利用安装在车上的相机采集和处理车道前方图像, 获得车辆在当前车道中的位置。一旦检测到距离当前车道线过近而司机没有打转向

灯时, 系统将发出警告信息, 提醒司机纠正这种无意识的车道偏离, 避免车道偏离事故的发生^[1]。

车道偏离报警系统要测量车辆与车道线的相对位置, 车载相机的标定是必不可少的。相机标定分为内部参数和外部参数标定, 车载相机均采用定焦镜头, 其内部参数一次标定后不再变化, 只需要考虑外部参数的标定。意大利帕尔马大学的 ARGO 系统^[2]假定摄像机的内部参数已知, 在地面上画出已知尺寸的网格, 利用网格的交点来标定外部参数,

* 天津市自然科学基金资助项目(05YFJMJC119900)。20091202 收到初稿, 20100509 收到修改稿

此外他们还采用了一种所谓的自标定方法^[3], 使用发动机盖上的标记点作为标定目标, 这些标定目标相对于车体坐标系的位置是已知的。宾夕法尼亚大学 GRASP 实验室利用代表车道的直线进行外部参数的标定^[4], 宋雪峰等^[5]利用地面上的网格进行标定, 通过引入边缘提取、Hough 变换、灭点检测等图像处理技术, 对网格状地面图像进行了垂直和水平两个方向的直线检测, 进而确定标定目标的位置, 最终实现了相机的快速标定。李青等^[6-7]提出了一种简单实用的三线标定法, 该方法只需平坦地面上的三条平行直线, 再通过手工或自动的方式在图像内确定这三条直线的交点和另外三点的坐标, 即可进行摄像机外部参数标定, 无需专用场地。

本文在三线标定法的基础上, 提出一种基于道路特征的车载相机外部参数动态补偿算法, 以减小因车辆行驶颠簸而造成的标定误差。并且设计了一种动态的标定精度检测试验平台, 对本文提出的算法效果进行实车动态测试。

1 相机标定的基本原理

1.1 坐标系的建立

在相机的成像几何关系中, 涉及到四个坐标系: 世界坐标系(O_v, X_v, Y_v, Z_v)、相机坐标系(O_c, X_c, Y_c, Z_c)、图像平面坐标系(u, v)和像素坐标系(i, j)。如图 1 和图 2 所示, 将世界坐标系的原点建立在车体的竖直中心线和地面的交点上, X_v 指向汽车纵轴的前方, Y_v 指向垂直于汽车纵轴的右方, Z_v 指向垂直于汽车纵轴的上方。

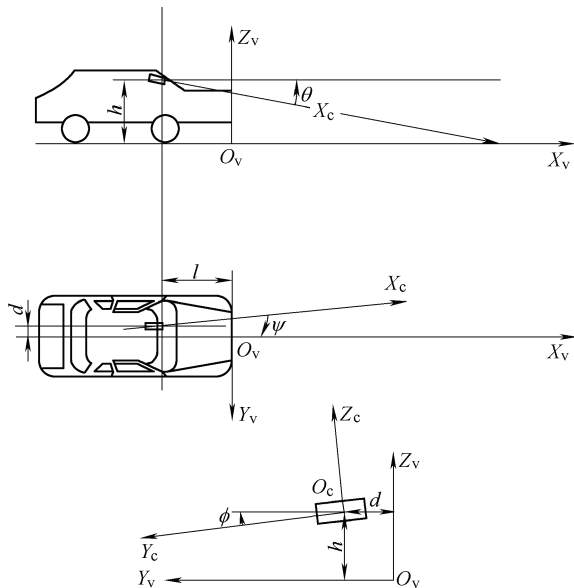


图 1 世界坐标系和相机坐标系的建立

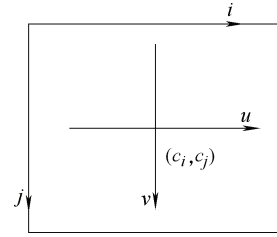


图 2 像素坐标系和图像平面坐标系建立

设地面平坦, 相机坐标系原点在相机的光心, 相对车体的侧倾角为 ϕ (沿车辆行驶方向观察顺时针倾斜为正), 俯仰角为 θ (指向上方为正), 方向角为 ψ (指向车身轴线左方为正), 光心在世界坐标系中的坐标 $t = (l, d, h)$, 若世界坐标系中有一点 $p_v(x_v, y_v, z_v)$, 它在摄像机坐标系中的坐标为 $p_c(x_c, y_c, z_c)$, 通过旋转和平移变换可以建立 $p_c(x_c, y_c, z_c)$ 和 $p_v(x_v, y_v, z_v)$ 之间的坐标变换关系

$$P_v^T = RP_c^T + t^T \text{ 或 } P_c^T = R^{-1}P_v^T - R^{-1}t^T \quad (1)$$

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} =$$

$$\begin{pmatrix} \cos\theta \cos\psi & \sin\psi \cos\phi + \cos\psi \sin\phi \sin\theta \\ -\sin\psi \cos\theta & \cos\psi \cos\phi - \sin\psi \sin\phi \sin\theta \\ \sin\theta & -\cos\theta \sin\phi \\ \sin\psi \sin\phi - \cos\psi \cos\phi \sin\theta \\ \cos\psi \sin\phi + \sin\psi \cos\phi \sin\theta \\ \cos\theta \cos\phi \end{pmatrix} \quad (2)$$

1.2 透视投影成像模型

图 2 为图像平面坐标系、像素坐标系之间的关系, 图像平面坐标系的原点在像素坐标系内的坐标为 (c_i, c_j) 。

本文所用的图像平面坐标系和像素坐标系之间存在以下变换关系

$$\begin{cases} u = (i - c_i)d_x \\ v = (j - c_j)d_y \end{cases} \quad (3)$$

式中, d_x, d_y 是相机感光器件在 u 和 v 方向的比例系数。

根据小孔成像模型, 存在如下关系

$$\begin{cases} u = f_i d_x \frac{y_c}{x_c} \\ v = -f_j d_y \frac{z_c}{x_c} \end{cases} \quad (4)$$

式中, f_i, f_j 为已知的相机内部参数, 即镜头的等效聚焦, 单位为像素。所以只要标定出 (l, d, h) 和 3 个欧拉角, 即侧倾角 ϕ 、俯仰角 θ 和方向角 ψ , 根据式 (1)~(4) 即可求出像素坐标系与世界坐标系之间的转换关系, 这 6 个参数的标定方法通过三线标定法

得出, 具体方法参考文献[6]。

2 外部参数动态补偿算法

2.1 车辆行驶影响因素

在假设道路平坦的前提下, 车辆正常行驶过程中一般会出现下列两种情况^[8]: ① 路面局部凹凸引起车体在竖直方向出现小幅颠簸和振颤; ② 各种随机扰动引起的车体横向控制偏差, 使车体水平摆动。

从车辆行驶时的颠簸特性以及图1中坐标系的建立方法, 可知外部参数 l 、 d 、 ψ 基本不随车辆的颠簸发生大的变化, 而 h 、 ϕ 、 θ 在车辆运动过程中变化较大, 尤其是 h 、 θ 这两个参数。如果根据静态标定的参数来进行坐标变换, 而不考虑车辆运动过程中外部参数变化对标定结果的影响, 必然会产生较大的标定误差。

2.2 道路特征

本系统主要适用于高速公路或高等级公路, 其车道线有固定不变的结构特征, 可以利用这些特征来对相机的外部参数进行动态补偿, 车道线的结构特征包括车道线相互平行和车道线宽度不变。

如图3所示, 在像素坐标系内通过图像识别得到的左、右车道线 l_1 、 l_2 (具体的车道线识别方法参考文献[9]), 对应到世界坐标系是直线 L_1 、 L_2 。在图像平面上选择相隔数行的两条平行线, 与 l_1 、 l_2 的交点为 a 、 b 、 c 、 d , 分别对应世界坐标系中的 A 、 B 、 C 、 D 。可知 L_1 与 L_2 平行, 且 $b_1=b_2$ 。

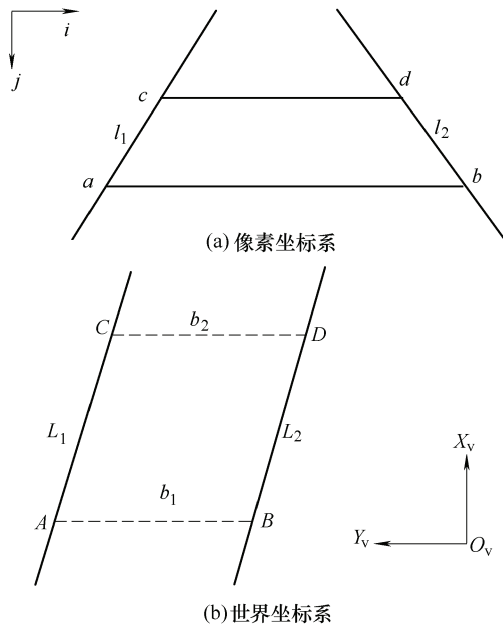


图3 道路特征示意图

2.3 动态标定算法

设点 a 、 b 、 c 、 d 在像素坐标系内的坐标分别为

(i_a, j_a) 、 (i_b, j_b) 、 (i_c, j_c) 、 (i_d, j_d) 。假设

$$\begin{cases} p = \frac{u}{f_i d_x} \\ q = -\frac{v}{f_j d_y} \\ z_v = 0 \end{cases} \quad (5)$$

展开式(1)的第3行, 并根据式(4)、(5)得出

$$\begin{cases} x_c = -\frac{h}{r_{31} + pr_{32} + qr_{33}} \\ y_c = px_c \\ z_c = qx_c \end{cases} \quad (6)$$

展开式(1)的第2行, 得

$$y_v = r_{21}x_c + r_{22}y_c + r_{23}z_c + d \quad (7)$$

令 q_a 、 q_b 、 q_c 、 q_d 以及 p_a 、 p_b 、 p_c 、 p_d 分别为由式(5)得出的 a 、 b 、 c 、 d 点的 q 和 p 值。 x_{cA} 、 x_{cB} 、 x_{cC} 、 x_{cD} 表示 A 、 B 、 C 、 D 点在相机坐标系中的 X 坐标值, y_{vA} 、 y_{vB} 、 y_{vC} 、 y_{vD} 表示 A 、 B 、 C 、 D 点在世界坐标系中的 Y 坐标值。

在像素坐标系中 $j_a = j_b$ 、 $j_c = j_d$, 由式(3)、(5)得出 $q_a = q_b$ 、 $q_c = q_d$ 。其中, 在 R 矩阵中元素 r_{32} 很小, 可以忽略式(6)中 x_c 分母中的 pr_{32} 项, 故可以认为

$$\begin{aligned} x_{cA} &= x_{cB} & x_{cC} &= x_{cD} \\ b_1 &= y_{vA} - y_{vB} = \cos\psi \cos\phi - \sin\psi \sin\phi \sin\theta \times \\ &\quad \frac{-h(p_a - p_b)}{\sin\theta + q_a \cos\theta \cos\phi} \end{aligned} \quad (8)$$

同理可得

$$b_2 = y_{vC} - y_{vD} = (\cos\psi \cos\phi - \sin\psi \sin\phi \sin\theta) \times \frac{-h(p_c - p_d)}{\sin\theta + q_c \cos\theta \cos\phi}$$

将 b_1 对 θ 和 ϕ 分别求导数

$$\frac{db_1}{d\theta} = (p_a - p_b)h \left[\cos\psi \cos\phi \frac{\cos\theta - q_a \cos\phi \sin\theta}{(\sin\theta + q_a \cos\theta \cos\phi)^2} + \frac{q_a \cos\phi \sin\phi \sin\psi}{(\cos\theta \sin\theta + q_a \cos^2\theta \cos\phi)^2} \right] \quad (9)$$

$$\frac{db_1}{d\phi} = (p_a - p_b)h \left[\frac{\cos\psi \sin\phi \sin\theta}{(\sin\theta + q_a \cos\theta \cos\phi)^2} + \frac{\sin\theta \sin\psi (\sin\theta \cos\phi + q_a \tan^2\phi \cos\theta)}{(\sin\theta + q_a \cos\theta \cos\phi)^2} \right] \quad (10)$$

由于车载相机安装时的初始位置基本保证水平, 且相机光轴基本与车辆中心线平行, 即 $\phi \approx 0$, $\psi \approx 0$, 代入式(9)、(10)可知

$$\frac{db_1}{d\theta} \gg \frac{db_1}{d\phi}$$

可以认为在式(8)中 ϕ 的变化不影响宽度。

根据 $b_1=b_2$ 可以求出

$$\tan \theta = \frac{q_a(p_c - p_d)\cos \phi - (p_a - p_b)q_c \cos \phi}{p_c - p_d - p_a + p_b} \quad (11)$$

在完成俯仰角的补偿后，根据车道线宽度不变的特征，即 $b_1=b_2=b$ ，其中 b 为已知的车道宽度。

$$b = (\cos \psi \cos \phi - \sin \psi \sin \phi \sin \theta) \frac{-h(p_a - p_b)}{\sin \theta + q_a \cos \theta \cos \phi}$$

最终可求出

$$h = \frac{b(\sin \theta + q_a \cos \theta \cos \phi)}{(\cos \psi \cos \phi - \sin \psi \sin \phi \sin \theta)(p_a - p_b)} \quad (12)$$

由式(11)、(12)推导出 θ 、 h ，为动态补偿算法得出的新值，再结合其他 4 个静态标定参数进行坐标变换。

3 试验

对车载相机采集的道路图像，通过图像识别算法提取车道线，相机标定的作用是确定车辆在车道中实际的位置、方向参数及车道线宽度信息。

如图 4 所示， y_0 为车头中点位置与两条车道线中心线的距离即横向偏移， α 为车辆中心线与车道中心线之间的夹角即航偏角。车道偏离报警系统根据这两个参数判断车辆是否偏离当前车道。

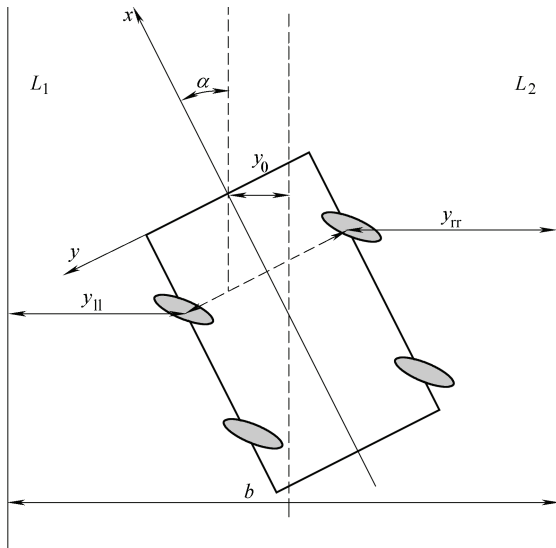


图 4 车辆在车道线中的位置

3.1 仿真分析

为了仿真车辆颠簸过程对标定结果的影响，不妨假设 y_0 和 α 的值都为 0。车体存在一定程度的颠簸，假设颠簸引起的相机俯仰角变化范围小于 2° ，高度变化范围小于 80 mm。分别仿真俯仰角和高度变化对 y_0 和 α 的影响，并进行补偿算法和未采用补偿算法两种情况下的测量误差进行比较。从图 5、6

的仿真结果可看出，俯仰角的变化对航偏角影响较大，而对横向位移影响较小，当变化超过 0.7° 时才产生影响，通过补偿算法可以有效地降低俯仰角对航偏角和位置的测量误差。

从图 7、8 的仿真结果可看出，高度的变化仅引起横向位移误差，对航偏角基本没有影响。通过补偿算法在具有高度偏移或俯仰角偏移的情况下均能将误差明显减小。

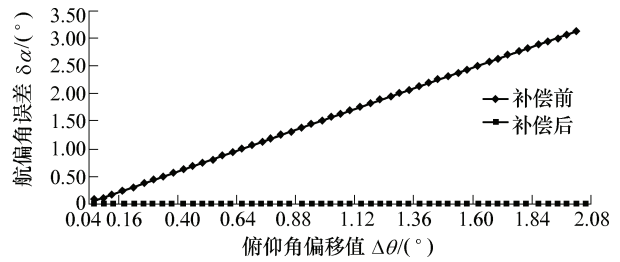


图 5 俯仰角变化引起航偏角误差仿真结果

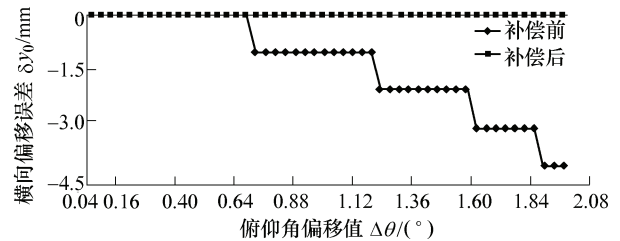


图 6 俯仰角变化引起横向偏移误差仿真结果

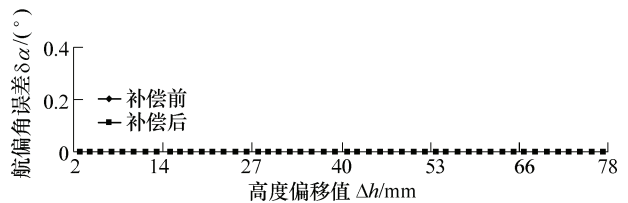


图 7 高度变化引起航偏角误差仿真结果

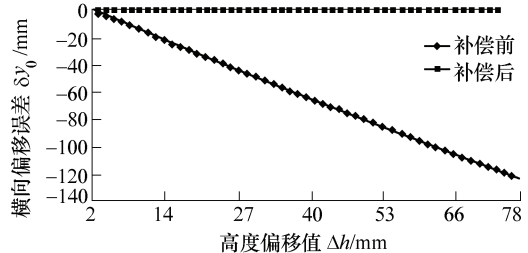


图 8 高度变化引起横向偏移误差仿真结果

3.2 试验验证

为了验证补偿算法在车辆行驶中的实际效果，设计出与前视相机独立的测量装置，能够准确快速地测量车辆的航偏角和横向偏移。参考卡内基梅隆大学机器人研究所 CHEN 的设计^[10]，将相机安装在车体的右侧，获取车体侧面的车道线，称该相机为侧视相机，如图 9 所示。与前视相机相比，侧视相

机视野小, 具有更高的测量精度, 航偏角测量误差能达到 0.1° , 横向偏移测量误差为 10 mm, 可作为评估前视相机动态标定结果的测试手段。

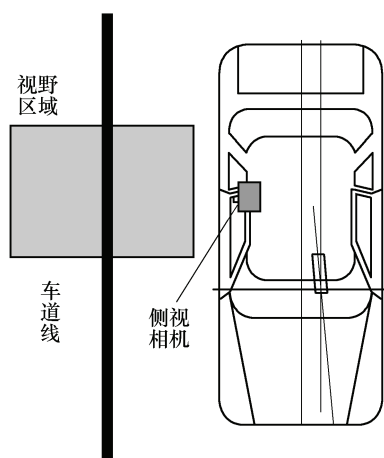


图9 侧视相机工作原理图

试验中侧视相机和前视相机同时采集图片, 分别计算车辆在车道线中的航偏角和横向偏移, 如图 10 所示, 测得数据之差作为前视相机的测量误差。

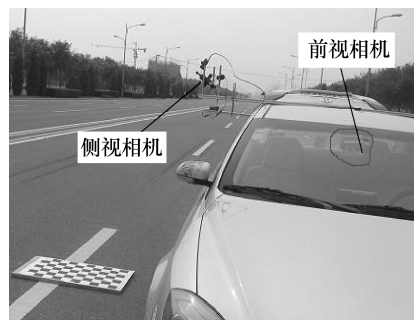
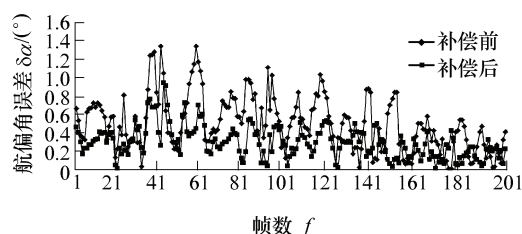
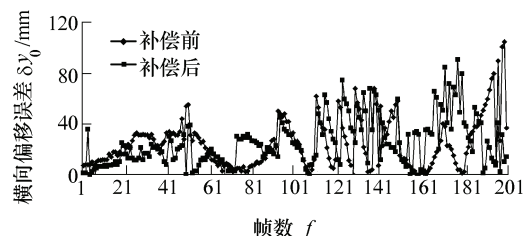


图10 前视相机标定动态测试平台

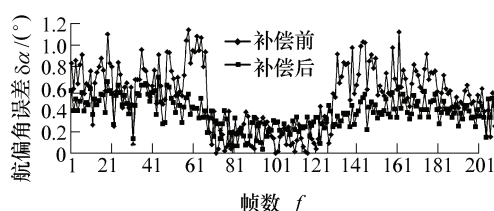
从图 11a、11b 中可以看出补偿算法可以明显提高车辆航偏角和横向位移的测量精度。图 11c、11d 表明, 当车速 v 升高时, 横向位移和航偏角误差也会变大。



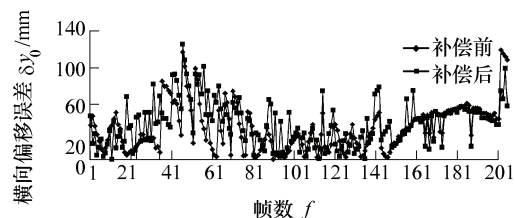
(a) 航偏角实际测量误差($v = 40$ km/h)



(b) 横向偏移实际测量误差($v = 40$ km/h)



(c) 航偏角实际测量误差($v = 90$ km/h)



(d) 横向偏移实际测量误差($v = 90$ km/h)

图11 车辆行驶试验的特征曲线

下表是在车速 40 km/h 和 90 km/h 两种情况下, 补偿前后测量误差的平均值。

表 使用和未使用补偿算法效果对比

误差类别	车速 $v = 40$ km/h		车速 $v = 90$ km/h	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
横向位移误差 δy_0 /mm	25	24	35	33
航偏角误差 $\delta \alpha$ / $^\circ$	0.49	0.30	0.51	0.37

实测方式下的补偿算法效果不如仿真方式下的效果明显, 原因是在车道线识别、相机成像环节也会引入车道线在图像中位置的变化, 补偿算法对以上因素引入的误差并没有补偿效果。但从上表的实际试验效果可以看出, 补偿算法所起到的作用比较明显, 尤其是对航偏角的补偿效果。这就可以为提高车道偏离报警系统整体功能奠定较好的基础,

而且这种方法极具实用性。

4 结论

(1) 在三线标定法的基础上, 根据车辆行驶颠簸的特点, 通过数学模型分析了相机动态标定精度的影响因素, 即相机的俯仰角及高度位置。

(2) 利用道路中两条车道线互相平行的固有特征, 对车载相机俯仰角进行补偿, 再根据车道线宽度已知且不变的特点, 对车载相机高度进行补偿。

(3) 设计了独立于前视相机的测量系统, 精度明显高于前视相机。实车试验表面, 本文提出的算法可以有效地减小车辆航偏角和横向位置的测量误差, 为提高车道偏离报警系统性能打下良好基础,

实用性强。

参 考 文 献

- [1] 陈军, 徐友春, 赵明, 等. 基于随机 Hough 变换的道路边界识别算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(5): 905-911.
CHEN Jun, XU Youchun, ZHAO Ming, et al. A randomized hough transform based on road edge identification algorithm[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(5): 905-911.
- [2] 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.
- [3] BERTOZZI M, BROGGI A, FASCIOLI A. Self-calibration of a stereo vision system for automotive applications[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul, Korea: IEEE, 2001: 3698-3703.
- [4] SOUTHALL B, TAYLOR C J. Stochastic road shape estimation[C]//Proceedings of Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. Vancouver, Canada: IEEE, 2001: 205-212.
- [5] 宋雪峰, 杨明, 王宏. 基于网格状纹理的简易摄像机标定方法[J]. 计算机工程与应用, 2002, 38(7): 72-74.
SONG Xuefeng, YANG Ming, WANG Hong. A calibration method based on grid texture[J]. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(7): 72-74.
- [6] 李青, 郑南宁, 张雪涛. 用三线法标定车载摄像机的外部参数[J]. 光电工程, 2004, 31(8): 23-26.
LI Qing, ZHENG Nanning, ZHANG Xuetao. Calibration of external parameters of vehicle-mounted camera with trilinear method[J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(8): 23-26.
- [7] 李青, 郑南宁, 张雪涛, 等. 车载摄像机的一种简易标定方法[J]. 机器人, 2003, 25(7): 626-630.
LI Qing, ZHENG Nanning, ZHANG Xuetao, et al. A simple calibration approach for camera on-board vehicle[J]. Robot, 2003, 25(7): 626-630.
- [8] 马琳, 郑南宁, 李青, 等. 自主车辆视觉系统的摄像机动态自标定算法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10): 1072-1076.
MA Lin, ZHENG Nanning, LI Qing, et al. Dynamic approach of camera auto-calibration for vision system on autonomous vehicle[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10): 1072-1076.
- [9] 陈军, 赵玉凡, 徐友春, 等. 基于启发式搜索的车道线识别算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(31): 206-209.
CHEN Jun, ZHAO Yufan, XU Youchun, et al. Study on lane mark identification algorithm based on heuristic search[J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(31): 206-209.
- [10] CHEN M, JOCHEM T, POMERLEAU D. AURORA: A vision-based roadway departure warning system CMU-RI-TR-97-21 [R]. Pittsburghers: Carnegie Mellon University, 1997.

作者简介: 陈军(通信作者), 男, 1976年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为智能汽车机器视觉、汽车主动安全。

E-mail: chenjun59114@126.com

徐友春, 男, 1972年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为车用机器视觉技术(路径识别、障碍识别与跟踪及车辆主动安全控制技术)。

E-mail: xu56419@126.com

彭永胜, 男, 1972年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为设备智能诊断与动态测控、无损检测、信号分析与处理。

E-mail: psh_peng@163.com

赵玉凡, 男, 1954年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为军车机动性和智能车辆车身控制等。