

一种基于摄像机标定的车辆视频测速方法

陈骞东, 马 影, 马增强

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:以 Tsai 两步法为摄像机标定原理, 提出了一种车辆速度视频测量方法, 并对摄像机标定误差和车速检测误差进行了分析。首先利用 Tsai 两步法得到摄像机的内部和外部参数, 然后将图像空间提取出的运动车辆特征点位移转换到世界坐标系, 最后利用帧差时间求得车辆的瞬时速度。实验结果表明, 基于摄像机标定的车辆速度视频测量方法, 具有简单实用、鲁棒性强、精确度高等优点, 满足车辆视频测速系统的要求。

关键词: Tsai 两步法; 摄像机标定; 车辆速度检测; 误差分析

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-0373(2010)03-0081-05

车辆速度是智能交通系统中需要检测的最基本的参数之一。传统的车辆测速装置主要包括: 地感线圈测速、雷达测速、激光测速等, 这些测速方式都存在各自不同的缺陷, 最重要的是这些方法均不能为执法部门提供直观的视频信息。而原有的基于视频图像的车辆测速方法, 大都是根据图像信息按照一定的比例, 估计图像中的距离与真实世界坐标系中距离的映射关系^[1-3]。这些方法存在较大的系统误差, 更不能满足系统鲁棒性要求。

以 Tsai 两步法为摄像机标定原理, 提出了一种车辆速度视频测量方法。Tsai 两步法标定精度高、过程简单、鲁棒性强, 满足实际测速系统的要求。利用标定结果将车辆在连续两帧之间的位移从图像坐标系转换到世界坐标系, 再根据帧差确定时间, 从而求得车辆的瞬时速度。

1 摄像机标定

摄像机的成像过程可以通过一个数学模型来大致的模拟, 通过它可以获得被测物体与图像之间的几何关系。本文采用的是 Tsai 两步法^[4]的摄像机标定方法。

1.1 摄像机模型

图 1 为所采用的摄像机模型, 涉及 4 个相互关联的坐标系: 世界坐标系、摄像机坐标系、像平面坐标系、计算机图像坐标系。

其中, (x_w, y_w, z_w) 为世界坐标系中物体点 P 的三维坐标; (x, y, z) 是 P 在摄像机坐标系中的三维坐标; (X_u, Y_u) 是理想针孔摄像机模型下 P 点的图像坐标; (X_d, Y_d) 为 P 点的实际图像坐标; (X_f, Y_f) 是 P 点的计算机图像坐标, 以像素为单位。

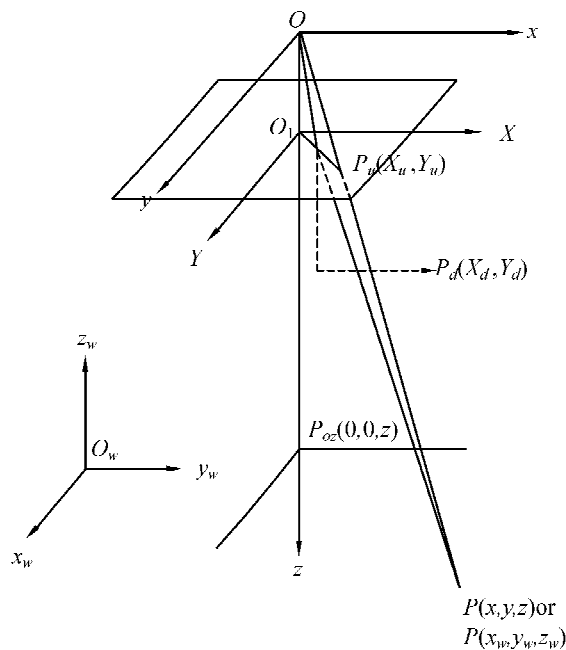


图1 摄像机模型

收稿日期: 2010-05-24

作者简介: 陈骞东 男 1984 年出生 硕士研究生

1.2 Tsai 两步法标定原理

摄像机模型的建立就是从 (x_w, y_w, z_w) 到 (X_f, Y_f) 的过程^[5]。利用 Tsai 两步法,其简单的标定过程如下步骤所示:步骤1:从世界坐标 (x_w, y_w, z_w) 到摄像机3-D坐标 (x, y, z) 变换。步骤2:从摄像机3-D坐标 (x, y, z) 到无失真像平面坐标 (X_u, Y_u) 的变换。步骤3:从无失真的像平面坐标 (X_u, Y_u) 到受镜头径向失真影响的实际像平面坐标 (X_d, Y_d) 的变换。步骤4:实际像平面坐标 (X_d, Y_d) 到计算机图像坐标 (X_f, Y_f) 的变换。

1.3 摄像机标定步骤^[6-7]

第一步:数据采集。

首先在公路交通现场选定并标识 $2N$ 个实验点,测量其在水坐标系中的坐标,即 $(x_w, y_w, 0)$;然后通过图像处理提取各实验点在计算机图像坐标中的坐标,即 (X_f, Y_f) 。随后将这 $2N$ 个实验点分为两组,第一组的 N 个实验点用于摄像机标定的过程,另一组的 N 个实验点用于检验摄像机标定算法的误差。

第二步:摄像机参数初始化。

在摄像机标定算法中,还需要用到一些由摄像机、图像采集卡的型号所决定基本的参数,如摄像机 x 方向像元个数、图像采集卡 x 方向像素个数等。这些参数的初始化非常重要,直接关系到实验结果是否正确。

第三步:编写程序,将第一组中 N 个实验点的坐标,即 $(x_w, y_w, 0)$ 和 (X_f, Y_f) 代入程序,得到标定结果,即摄像机内部和外部参数。

1.4 摄像机标定结果

利用 Tsai 两步法摄像机标定理论编写了摄像机标定程序,得到的摄像机标定结果如下: $T =$

$$[-7\ 973\ 692\ -2\ 727\ 892\ 5\ 465\ 714]^T \text{ mm}; R = \begin{bmatrix} -0.013\ 8 & 0.999\ 8 & 0.011\ 0 \\ 0.157\ 3 & 0.013\ 0 & -0.987\ 5 \\ -0.987\ 5 & -0.011\ 9 & -0.157\ 4 \end{bmatrix}; \kappa_1 = 3.07\ 9 \times$$

$10^{-3}\ 1/\text{mm}^2; f = 22.912\ \text{mm}$, 其中, T 为平移矢量; R 为旋转矩阵; κ_1 为透镜畸变系数; f 为有效焦距。

1.5 摄像机标定误差分析

为验证摄像机标定算法的精确性,利用另外 N 个标定点来“检验”标定算法的误差。第二组中 N 个实验点的坐标,即 $(x_w, y_w, 0)$ 和 (X_f, Y_f) 已经在 1.3 节中测量得到,利用图像坐标 (X_f, Y_f) 和 1.4 节得到的摄像机参数: T, R, κ_1, f 求取相应点的世界坐标系坐标 $(x_w', y_w', 0)$, 用求解得到的世界坐标系坐标 $(x_w', y_w', 0)$ 与实际测量得到的世界坐标系坐标 $(x_w, y_w, 0)$ 作比较,以此完成算法的误差评价。

摄像机标定误差如图 2 所示。从图中可以看出, y 方向的误差百分比在 1% 左右, x 方向的误差百分比基本在 2% 以下,其标定结果的相对误差大部分控制在 2% 以内,能够满足系统精度要求。Tsai 两步法能够高效并精确的标定摄像机内、外部参数,可以有效地应用于智能交通系统的车辆测速过程中。

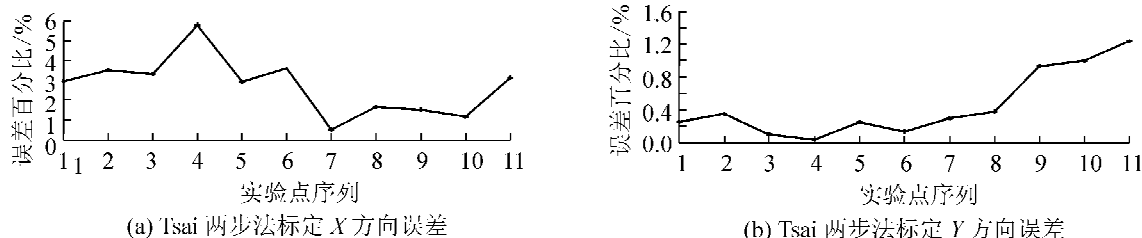


图 2 摄像机标定误差分析

2 视频测速原理

视频测速通过对摄像机拍录的视频序列进行分析以实现车辆的定位和测速,当前常用的方法主要有虚拟线圈法和目标跟踪法^[8]。目标跟踪法效果更为理想,但实现起来较为困难;虚拟线圈法易于实现,但精度不高。

本文提出了一种将虚拟线圈法和目标跟踪法结合的方法。在图像上划定矩形的速度检测区域(如图3所示),蓝框中的七条红线将检测区域划分成6块有效区域,用于计算车辆的6个瞬时速度。当检测到车辆“触线”时启动速度计算模块,速度由路程除时间得到

$$v = \Delta d / \Delta t = (d_i - d_{i-1}) / (t_i - t_{i-1}) \quad (1)$$

式中, t_i, t_{i-1} 代表用于速度计算的两帧图像的采集时刻, d_i, d_{i-1} 代表两帧图像中运动车辆特征点在世界坐标系下的位置。具体测速流程如图4所示。

采用海康威视网络硬盘录像机(HIK/DS-8004HF-S/-AF-DVR-II-A/4-4型),其视频监控信号中帧间时距是固定的(50 ms),因此时间 Δt 可以很方便的通过帧间差来确定,车辆在 Δt 时间内运动的实际位移 Δd 的计算需要分几步完成:利用背景差分法在两帧图像中分别检测出同一运动车辆,并提取该车辆的车灯作为特征点^[3],获得该特征点在图像空间中的位移;然后利用 Tsai 两步法完成摄像机标定,得到摄像机内部和外部参数;最后利用标定结果将特征点在图像空间中的位移转换为世界坐标系中的车辆实际位移 Δd ,这一步是本方法关键的一点,其实质为标定过程的逆运算。

具体计算过程如下:

第一步:计算 (X_d, Y_d)

$$\begin{cases} X_d = s_x^{-1} d_x' (X_f - C_x) \\ Y_d = d_y (Y_f - C_y) \end{cases} \quad (2)$$

第二步:计算 (X_u, Y_u)

$$\begin{cases} X_u = X_d + D_x = X_d [1 + \kappa(X_d^2 + Y_d^2)] \\ Y_u = Y_d + D_y = Y_d [1 + \kappa(X_d^2 + Y_d^2)] \end{cases} \quad (3)$$

第三步:计算 $(x_w, y_w, 0)$

$$\begin{cases} X_u = f \frac{r_1 x_w + r_2 y_w + 0 + T_x}{r_7 x_w + r_8 y_w + 0 + T_z} \\ Y_u = f \frac{r_4 x_w + r_5 y_w + 0 + Y_y}{r_7 x_w + r_8 y_w + 0 + T_z} \end{cases} \quad (4)$$

然后利用 (X_u, Y_u) 作为已知量,求解 x_w, y_w ,将上式整理得

$$\begin{cases} y_w = \frac{(fr_4 - r_7 Y_u)(fT_x - T_z X_u) + (fT_y - T_z Y_u)(r_7 X_u - fr_1)}{(r_7 Y_u - fr_4)(fr_2 - r_8 X_u) + (r_8 Y_u - fr_5)(r_7 X_u - fr_1)} \\ x_w = \frac{fr_2 - r_8 X_u}{r_7 X_u - fr_1} y_w + \frac{fT_x - T_z X_u}{r_7 X_u - fr_1} \end{cases} \quad (5)$$

需要说明的是,前面的计算是在假设坐标 $z_w = 0$ 的前提下实现的,根据逆投影定理可说明这个问题^[8]。

3 实验结果

系统能够实时的显示汽车经过设定的每个检测区域的速度。汽车前沿到达有效区域的下沿,就将汽



图3 汽车速度检测结果

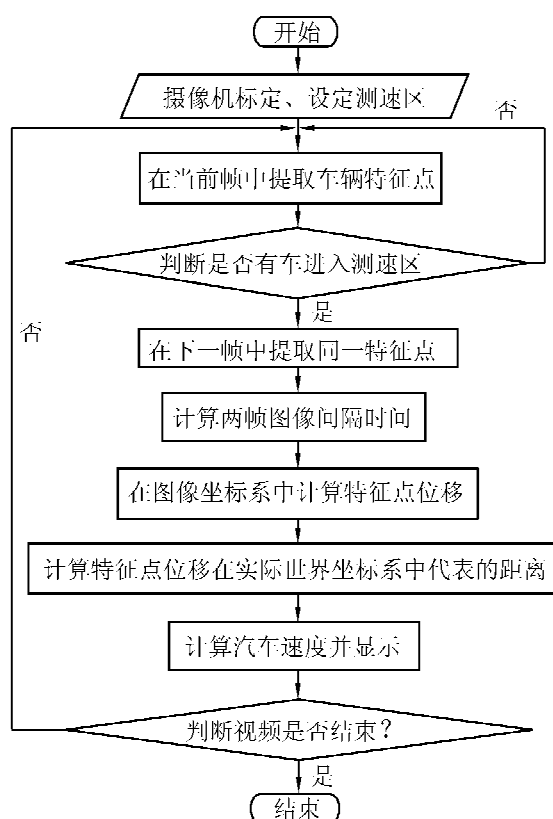


图4 车辆测速流程图

车在该区域的速度显示在该区域的左侧。图 3 记录了该车通过检测区域过程中所计算的瞬时速度(单位:km/h)。表 1 为汽车分别撞到七根白线时的特征点的位置及相关信息。

表 1 汽车特征点位置及相关信息

撞线 帧数	特征点图像 坐标(像素)	特征点世 界坐标/m	帧间差 (帧数)	实际距 离/m	时间/s	速度/ (km·h ⁻¹)
49	(353.5,153.5)	(0.536,5.195,0)	—	—	—	—
87	(364.5,193.5)	(6.948,5.423,0)	12	6.415 8	0.60	38.494 8
127	(368.5,233.5)	(11.972,5.482,0)	10	5.024 0	0.50	36.172 8
161	(373.5,273.5)	(15.976,5.543,0)	8	4.004 9	0.40	36.044 1
188	(378.5,313.5)	(19.234,5.592,0)	6	3.258 2	0.30	39.098 4
215	(384.5,353.5)	(21.925,5.645,0)	5	2.691 3	0.25	38.754 7
240	(388.5,393.5)	(24.182,5.666,0)	4	2.257 5	0.20	40.635 1

4 车速检测误差分析

在图 5 中可以清晰地看到,汽车的瞬时速度相对于汽车司机所报的标准参考值之间的误差较小,已经在可控制的范围之内。

根据表 1 中记录的瞬时速度和公式 $\bar{V} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 V_i$, 容易得到平均速度 $\bar{V} = 38.2 \text{ km/h}$ 。与汽车司机所报汽车当前速度 $V_0 = 39 \text{ km/h}$ 作比较, 平均速度的相对误差为 $\frac{|\bar{V} - V_0|}{V_0} \times 100\% = 2.05\%$, 说明本文基于视频方式的汽车速度检测算法误差较小, 达到了实际测速系统对精度的要求。

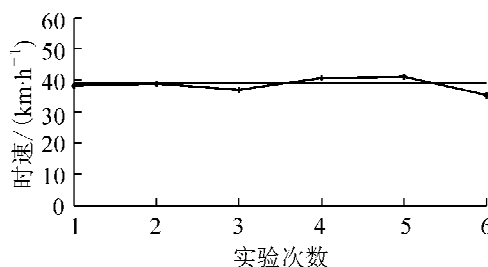


图 5 汽车瞬时速度的误差分析

样本均方差是衡量一个样本波动大小的量, 速度 V_i 的均方差 $\sigma = \sqrt{\frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 (V_i - \bar{V})^2} = 1.627 3$ 。均方差越大, 样本数据的波动就越大。基于摄像机标定的参数得到的汽车速度的均方差 $\sigma = 1.627 3$, 数值很小, 说明本文基于视频方式的汽车速度检测方法精度较高, 方案可行。

5 结论

提出了一种利用视频图像序列测量汽车速度的一种方法, 即基于摄像机标定的汽车测速。利用摄像机标定结果将车辆特征点在图像空间中位移转换为实际世界坐标系中的距离, 这样大大提高了系统的精确度与鲁棒性。另外, 需要提到的一点是摄像机标定程序尽管复杂, 但它可以看做是系统初始化的一个过程, 摄像机标定做完之后, 系统可以直接应用摄像机标定结果, 系统的运算速度也能够得到保证。

在实验过程中, 汽车经过两条线的时间可以通过视频帧差来得到精确值, 影响系统精度的关键在于特征点提取是否精确。

造成汽车速度检测误差的原因主要有两个方面: 一是在摄像机标定过程中实地距离测量引起的误差, 二是图像分析处理过程中运动车辆的精确分割和特征点提取方面还存在一定的误差。因此, 针对视频信号的特点, 如何进一步提高特征点的定位精度是需要进一步研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 高浩军, 杜宇人. 基于视频序列图像的车辆测速研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(2): 40-45.
- [2] 鲜海滢, 李晓峰, 李在铭. 基于摄像机的车辆测速仪[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22(3): 94-99.
- [3] 童剑军, 邹明福. 基于监控视频图像的车辆测速[J]. 中国图象图形学报, 2005, 30(2): 192-196.
- [4] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.

- [5] 章毓晋, 图像工程(下册): 图像理解[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2007: 47-60.
- [6] Rafael C. Gonzalez, Richard E. Woods, Steven L. Eddins. 数字图像处理(MATLAB版)[M]. 阮秋琦, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [7] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms[J]. IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [8] 章毓晋. 图像工程(上册): 图像处理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2006: 31-33.

Research of Vehicle Speed Measurement by Video Image Based on Tsai's Two-stage Method

Chen Qiangdong, Ma Ying, Ma Zengqiang

(School of Electrical and Electronics Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the camera calibration principle of Tsai's two stage method, a vehicle speed measurement method by video is put forward and the error analyses of camera calibration and vehicle speed measurement are obtained in this paper. Firstly, the internal and external parameters of the camera are gained based on Tsai's two-stage method. Secondly, the displacement offset of the same vehicle's feature point in every image is extracted and converted to the world coordinate system. Finally, instantaneous velocity of the vehicles is carried out based on the time difference between two sequential frames. Experimental result shows that the vehicle speed measurement method in this paper is not only simple and practical but also highly robust and accurate, and can fulfill the requirements in the vehicle speed measurement system by video.

Key words: Tsai's two-stage method; camera calibration; measurement of vehicle speed; error analysis