

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2014.11.022

一种利用参考图象与路面信息的道路 监控摄像机标定方法

张润初¹, 杜倩云¹, 俞祝良¹, 刘浩², 张可³

(1. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641; 2. 北京市交通信息中心, 北京 100161;
3. 北京市交通运行监测调度中心, 北京 100161)

摘要: 鉴于基于视频处理技术的交通流检测系统需要进行摄像机的标定才能得到准确的车流速度信息, 而传统的人工标定法无法满足道路监控摄像机发生人为转动时的这一要求, 提出了一种基于参考图象与路面信息的道路监控摄像机标定方法。该方法利用车道标线的宽度和间距以及一条垂直于车道标线的线段, 即可估计出摄像机的焦距、俯角、水平偏角和距离地面的高度, 同时, 为了计算“病态条件”下的摄像机参数, 提出了在焦距保持不变的情况下, 通过旋转摄像机来获取一组合适的参考图象, 再通过参考图象来实现标定。在摄像机发生人为转动的情况下, 也能方便地通过参考图象和路面信息来实现重标定。仿真试验表明, 该方法具有操作方便、计算简单精确的优点, 且无需人工现场操作, 大大减少了外业工程量。

关键词: 交通工程; 交通流检测; 摄像机标定; 车道标线; 视频处理

中图分类号: U491

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2014)11-0137-05

A Calibration Method for Road Monitoring Cameras Exploiting Reference Images and Roadway Information

ZHANG Run-chu¹, DU Qian-yun¹, YU Zhu-liang¹, LIU Hao², ZHANG Ke³

(1. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510641, China;
2. Beijing Transportation Information Center, Beijing 100161, China;
3. Beijing Transportation Operation Coordination Center, Beijing 100161, China)

Abstract: Aiming at the fact that the video processing based traffic flow detection system needs to calibrate camera to get accurate vehicle speed while the traditional manual calibration methods cannot satisfy this requirement once the camera has been manually rotated, a roadside monitoring camera calibration method is proposed which exploits the reference images and the roadway information. The proposed method only requires two parallel lane markings with known width and a line perpendicular to the lane markings, then the camera parameters such as focal length, tilt angle, pan angle and the camera height can be estimated. Meanwhile, to calculate the ill-condition cameras' parameters, a method based on reference images is proposed, the reference images are gained by rotating camera under the condition of keeping the focal length unchanged. It can easily realize cameras re-calibration through reference images and roadway information when the cameras have been rotated manually. The simulation experiment demonstrates that the proposed method has advantages of convenient operation and simple but accurate calculation, in addition, it requires no manual operations and saves much manpower on spot.

Key words: traffic engineering; traffic flow detection; lane marking; camera calibration; video processing

收稿日期: 2014-02-17

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z131106002813012); 中国博士后基金项目; 北京市博士后工作经费资助项目

作者简介: 张润初 (1987-), 男, 广东高要人, 硕士. (rancherzhang@yeah.net)

0 引言

近几十年来,智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)中基于机器视觉的研究得到了越来越多科研人员的重视^[1-2]。图像识别技术在交通领域的应用也日益广泛,道路监控摄像机的标定一直是一个热门课题^[3-4]。通过对道路摄像机的标定,可以构建起2-D图像平面与3-D实际场景的对应关系,从而获取到更为准确的交通参数,如车辆平均速度^[5]、车辆类型^[6]、路面占有率和车流量^[7]等信息。

摄像机的标定从广义上可以分为:传统标定和自标定^[8]。传统标定具有标定精度高的特点,但需要在场景中放置标定参照物;自标定不需要标定参照物,但需要获取同一场景不同角度的图像信息。

针对交通场景的摄像机标定,研究者们提出了各种不同的解决方法。这些方法可以归结为:(1)已知某些摄像机的参数,如摄像机的高度或者俯角等^[9-10]。当摄像机的高度已知时,可以通过道路标志线的动态检测来实现摄像机参数的动态校正,但是对于高度比较难测量或者高度信息未知情况,这种方法就不适用了。(2)使用消失点^[11-12]或者消失线^[13]。一般都需要附加已知的先验知识,如车道宽度、平行于车道的一条线段的实际长度、摄像机距离车道边线的最短水平距离和摄像机离地面的高度等,这些先验知识中有的易于测量的,有的则不然,而车道的宽度则可以依据道路标准来得到;而且,当使用的消失点数目多于一个时,有可能出现其中的一个消失点趋于无穷的“病态条件”^[15],这时就不能单纯通过消失点的值来计算摄像机的参数。(3)使用场景中的已知几何模型,如文献[14]使用交通标线端点构成的矩形框。该方法在测量精度和抗噪上有较好的效果,但需要找到实际场景中的矩形框,对于单车道或者双车道中缺乏两组白色虚线的情况要找到这样的矩形框是较难的,需要人工放置标志物,而且摄像机在监控的过程中,人工操作可能使得摄像机视野发生改变,因此标志物需要一直放置在场景中才能实现动态的校正。

本文研究了基于两个消失点的摄像机标定,并提出了“病态条件”下的可行解决方法。在一般情况下,只需要利用场景中两条已知宽度的车道标线以及一条垂直于车道标线的线段即可恢复出摄像机的参数,如焦距、俯角、与车道方向的水平夹角和距离地面的高度等。而当垂直于车道标线的线段在

图像上与水平坐标轴平行或者趋于平行时,在这种病态条件出现的情况下,垂直方向的消失点在图像上将趋于无穷远,此时,无法直接通过获取消失点的值来计算摄像机的参数。为解决这一情况下的摄像机标定问题,本文提出在焦距保持不变的情况下,通过旋转摄像机来获取一组合适的参考图像,再通过参考图像来实现“病态条件”下的标定。

1 摄像机空间模型

摄像机标定的本质是为了确定内部和外部的摄像机参数,从而构建出图像坐标和世界坐标的对应关系。其中内参数包括焦距、主点、倾斜角和纵横比等;外参数包括旋转矩阵和转移向量^[7,14],表示摄像机坐标与世界坐标之间的相对位置。与大部分文献一样,为了简化模型计算,本文作了一个合理的假设:主点与图像中心重合,成像平面与光轴垂直,内参数只有焦距是未确定的,其他量都是已经校正好的。

图1(a)为摄像机与道路的几何模型,它与文献[5,7,16]是类似的,图1(b)为摄像机与路面的俯视图。

摄像机架设在道路旁的支柱上,离地面的高度为 h ,俯角为 ϕ ,与车道标志线的水平夹角为 θ ,光轴与道路平面交于点 O ,两条水平道路边线 L_1 和 L_2 的实际距离为 w , L_3 垂直于 L_1 , L_4 过坐标原点 O 并与 L_1 平行。摄像机的坐标原点标记为点 C ,它在水平面的垂直投影记为点 C' , CO 与 L_4 夹角为 β 。由图1(a)可知,世界坐标系 $O-XYZ$ 和摄像机坐标系 $C-X_cY_cZ_c$ 都是服从右手定则的,其中 X 轴和 Y 轴平行于路面并且 Y 轴与 $C'O$ 共线, Z 轴垂直于路面向上。辅助坐标系 $O-UVW$ 的 U 轴与 X 轴重合,坐标系绕着 U 轴旋转使得 W 轴和 Z 轴夹角为 ϕ 。摄像机坐标系的 X_c 轴与 W 轴同向, Y_c 轴和 Z_c 轴分别与 U 、 V 轴反向, CO 的实际距离记为 F 。

由针孔摄像机原理以及射影几何可以得到摄像机坐标与图像坐标的关系,如式(1)所示:

$$\begin{aligned} u &= f \frac{Y_c}{Z_c}, \\ v &= -f \frac{X_c}{Z_c}, \end{aligned} \quad (1)$$

上述 u 、 v 两个公式的符号是与摄像机坐标系 $C-X_cY_cZ_c$ 的选取有关系的,如图1(c)所示。又因为坐标系 $O-UVW$ 可以看做是坐标系 $O-XYZ$ 绕 X 轴旋转 ϕ 角形成的,所以它们的关系为:

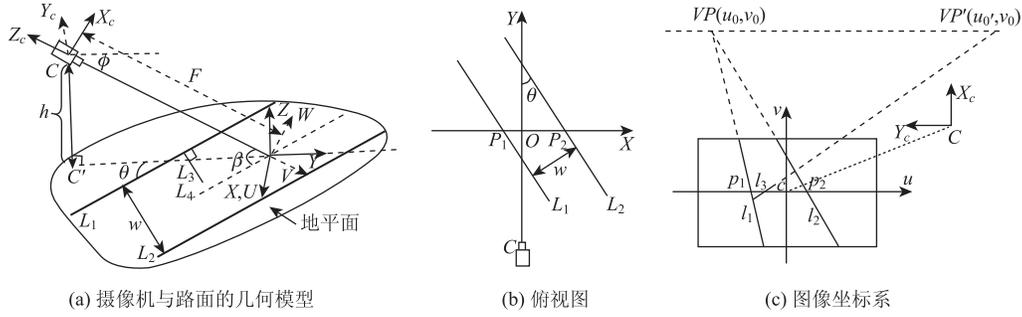


图 1 摄像机与路面的坐标图

Fig. 1 Coordinate graphs of camera and road pavement

$$\begin{aligned} U &= X, \\ V &= Y \cos \phi - Z \sin \phi, \\ W &= Y \sin \phi + Z \cos \phi. \end{aligned} \quad (2)$$

由摄像机坐标系 $C - X_c Y_c Z_c$ 与辅助坐标系 $O - UVW$ 的平移 ($|\vec{CO}| = F$) 和反转关系以及式 (2) 可以得到摄像机坐标与世界坐标的关系, 如式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} X_c &= W = Y \sin \phi - Z \cos \phi, \\ Y_c &= -U = -X, \\ Z_c &= -V - F = -Y \cos \phi + Z \sin \phi - F. \end{aligned} \quad (3)$$

另外, 由于我们研究的对象都是在路面上运动的, 因此可以假设 $Z = 0$, 使得模型的运算更简便。此时, 将式 (3) 和 $Z = 0$ 代入 (1), 可以得到如下式 (4):

$$\begin{aligned} u &= f \frac{Y_c}{Z_c} = f \frac{X}{Y \cos \phi + F}, \\ v &= -f \frac{X_c}{Z_c} = f \frac{Y \sin \phi}{Y \cos \phi + F}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 f 为摄像机的焦距。

由上述公式可知, 坐标平面 $X - O - Y$ 与图像平面 $u - c - v$ 具有一一对应的关系, 因此可以通过图像坐标得到道路平面的世界坐标 X, Y 的值, 将 $F = hc \sec \phi$ 代入式 (4) 可得:

$$\begin{aligned} Y &= \frac{hv}{f \sin^2 \phi - v \sin \phi \cos \phi}, \\ X &= \frac{hu}{f \sin \phi - v \cos \phi}. \end{aligned} \quad (5)$$

2 摄像机参数计算

由式 (5) 可知, 为了从图像坐标重构实际场景的坐标, 需要求取 h, f 和 ϕ 值, 我们引入两个消失点来求取。由文献 [11 - 12] 可以知道, 消失点指的是实际场景中的一组平行线在图像上的交点。如图 1 (c) 所示, l_1 和 l_2 分别对应实际场景中的车道

边线 L_1 和 L_2 , l_3 对应垂直于车道边线 L_1 且与路面平行的线段 L_3 。 L_1 和 L_2 在无穷远处的消失点在图像上的投影为 l_1 和 l_2 的交点 $VP(u_0, v_0)$ 。由 (4) 可知, Y 与 v 是一一对应的, 所以一组与车道边线垂直的平行线的消失点将落在消失线 $v = v_0$ 上, 见图 1 (c) 上的点 $VP'(u_0', v_0)$ 。

2.1 考虑 $\theta \neq 0$ 的情况

令 $X = Y \tan \theta$, 可得:

$$\begin{aligned} u_0 &= \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{X}{Y \cos \phi + F} \right) = \\ \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{X/Y}{\cos \phi + F/Y} \right) &= f \tan \theta \sec \phi, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} v_0 &= \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{Y \sin \phi}{Y \cos \phi + F} \right) = \\ \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{\sin \phi}{\cos \phi + F/Y} \right) &= f \tan \phi, \end{aligned} \quad (7)$$

同理, 令 $X = -Y \cot \theta$ 可以得到垂直车道方向上的另一个消失点的坐标, 如式 (8):

$$\begin{aligned} u_0' &= \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{X}{Y \cos \phi + F} \right) = \\ \lim_{Y \rightarrow \infty} \left(f \frac{X/Y}{\cos \phi + F/Y} \right) &= -f \cot \theta \sec \phi. \end{aligned} \quad (8)$$

由式 (6), (7), (8) 这三个方程可以解出 f, θ 和 ϕ 三个未知量, 如式 (9) 所示:

$$\begin{aligned} \phi &= \arcsin [v_0 \sqrt{-1/(u_0 u_0')}], \\ f &= v_0 / \tan \phi, \\ \theta &= \arctan \left(\frac{-u_0 \cos \phi}{f} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

为了得到摄像机的高度 h , 假设车道边线 L_1 和 L_2 分别与 OX 轴交于点 $P_1(X_1, Y_1, 0)$ 和 $P_2(X_2, Y_2, 0)$, 图像上分别对应点 $p_1(u_1, 0)$ 和 $p_2(u_2, 0)$ 。由 (4) 可以得到 u_1 和 u_2 :

$$u_1 = f \frac{X_1}{F}, \quad u_2 = f \frac{X_2}{F}. \quad (10)$$

又由图 1 (b) 的几何关系可以得到:

$$X_2 - X_1 = w \sec \theta \tag{11}$$

记 $\Delta u = u_2 - u_1$ ，则由式 (10)，式 (11) 以及 $h = F \sin \phi$ 可以得到：

$$h = f \frac{X_2 - X_1}{\Delta u} \sin \phi = \frac{f w \sin \phi}{\Delta u \cos \theta} \tag{12}$$

2.2 考虑 $\theta = 0$ ，即摄像机与车道线的水平偏角为 0° 的情况

由式 (8) 可知，当 $\theta = 0^\circ$ 时， u'_0 趋于无穷大，此时要获取车道线垂直方向上的消失点在图像上的坐标是不可能的，因此不能直接通过消失点的值来计算摄像机的参数，而由式 (6) 和 (8) 相乘可以得到：

$$u_0 u'_0 = -f^2 \sec^2 \phi = -f^2 \cdot (\tan^2 \phi + 1) = -(f^2 + v_0^2) \tag{13}$$

从上述公式可以看到， $u_0 u'_0$ 是与 θ 无关的，且可以通过平行于车道线方向的消失点和焦距来计算得到，所以可以间接通过 $u_0 u'_0$ 的值来解式 (9) 中的摄像机参数。鉴于道路监控系统中广泛采用云台摄像机，可以通过远程控制来实现摄像机焦距和旋转角度的调整，因此可以在焦距保持不变的情况下，通过旋转摄像机的角度（水平偏角和俯角）来获取一组合适的参考图像，这些参考图像都是可以方便得到水平和垂直于车道方向的消失点的，然后再利用这些参考图像来得到病态条件下的摄像机参数。根据式 (9) 可以方便计算得到这些参考图像下的摄像机焦距，再通过均值处理，用均值作为病态条件下的焦距，从而可以计算出其他的摄像机参数。

2.3 光轴与车道线方向的夹角

如图 1 所示，光轴与车道线方向的夹角为 β 。由几何关系和三角函数变换可以得到 β 与 ϕ ， θ 的关系为： $\cos \beta = \cos \phi \cos \theta$ 。所以，当 $\theta = 0^\circ$ 时， $\beta = \phi$ ；而当 $\theta = 90^\circ$ 时， $\beta = 90^\circ$ 。图 2 为图 1 (a) 中光轴 CO 与 L_4 的侧视图。

由图 2 可以看到，摄像机观察到的一段长为 l 、端点在 O 点的线段的实际大小应为该线段在垂直于

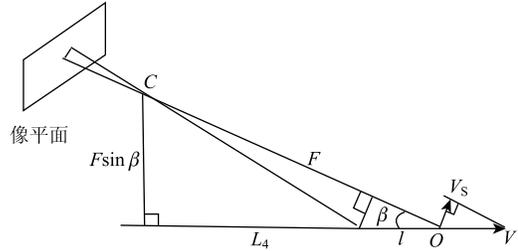


图 2 光轴与车道平行线 L_4 的侧视图

Fig. 2 Side view of optical axis and line L_4 which parallel to lane

光轴方向的投影，长度为 $l \sin \beta$ ，所以，当 θ 由 0° 增大到 90° 时， β 则由 ϕ 增大到 90° ，摄像机观察到的物体的长度将会变长。此时，若通过的实际车速为 V ，则摄像机观察到的速度应为： $V_s = V \sin \beta$ ，所以摄像机观察到同一速度下沿不同方向运动的物体的速度也会不同，纵向运动的物体速度最小，而横向运动的物体速度最大。

3 试验

在试验前，需要找到场景中两组互相垂直的平行线，但是，由于实际场景间会存在较大差别，因此，提取的方法也有所不同。可以归结为以下两种情况：

3.1 场景中可以找到与车道线垂直的情况

这种情况常见于多车道路段中有两组或以上白色虚线，可以通过相应的虚线端点来找到与车道方向垂直的线，如图 3 所示。当场景中有相应的人行斑马线时，也可以利用斑马线来进行提取。此外，还有公交站路段中出现的白色虚线块也能够提取到垂直车道方向的一组平行线。

3.2 场景中不能找到与车道线垂直的情况

在这种情况下可以考虑人工现场标志和非人工的方式。人工现场标志可以通过放置 T 形架的方式来实现，将 T 形架的底边与车道线平行，则另一端线即为车道方向的垂直线；非人工方式可以通过提取直线的方式^[12]，或者通过车辆的对称性来提取，如车窗的角点、车灯、车牌和车辆的底部边缘^[16]等。



(a) 场景中平行和垂直车道方向的线 (b) 测试场景1 (c) 测试场景2

图 3 实际的交通场景 Fig. 3 Real traffic scene

本文对两幅场景 (图 3 (b) 和 (c)) 进行了试验, 并对场景中两条已知长度的线段进行了验证, 结果如表 1 所示。

表 1 试验结果

Tab. 1 Experiment result

参数	场景 1: 图 3 (b)	场景 2: 图 3 (c)
已知	车道宽度 $w = 3.5$ m; 白色虚线 (图中粗线) 长度 $l = 6$ m	车道宽度 $w = 3.35$ m; 公交站白色虚线 (图中粗线) 长度 $l = 5$ m
中间量	消失点的坐标: $u_0 = -5 181.3$ $v_0 = 3 661.3$ $u'_0 = 8 379.7$ $\Delta u = 1 122.5$	消失点的坐标: $u_0 = 2 493$ $v_0 = 2 845.7$ $u'_0 = -3 097.1$ $\Delta u = 1 125.7$
恢复值	摄像机参数: $f = 20 512.79$ pixels $\phi = 10.12^\circ$ $\theta = -13.96^\circ$ $h = 11.58$ m	摄像机参数: $f = 8 313.5$ pixels $\phi = 18.90^\circ$ $\theta = 15.84^\circ$ $h = 8.33$ m
测试值	$l = 6.29$ m, 相对误差为: 4.83%	$l = 5.22$ m, 相对误差为: 4.4%

4 结论

由上述试验结果可以看到, 该方法具有较高的精度, 而且操作方便, 因此, 在交通场景中具有广泛的适用性。本文的校正目前采用的是人工提取标线的方法, 因此存在较大的人为误差, 而为了提高系统的精度和实现智能化处理, 后期的研究将通过车辆的对称信息和运动光流来实现消失点的提取。

参考文献:

References:

- [1] COIFMAN B, BEYMER D, MCLAUCHLAN P, et al. A real-time Computer Vision System for Vehicle Tracking and Traffic Surveillance [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1998, 6 (4): 271-288.
- [2] BUCH N, VELASTIN S A, ORWELL J. A Review of Computer Vision Techniques for the Analysis of Urban Traffic [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12 (3): 920-939.
- [3] MASOUD O, PAPANIKOLOPOULOS N P. Using Geometric Primitives to Calibrate Traffic Scenes [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2007, 15 (6): 361-379.
- [4] CATHEY F W, DAILEY D J. One-parameter Camera Calibration for Traffic Management Cameras [C] // Proceedings of the IEEE 7th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, D. C.: IEEE, 2004: 865-869.
- [5] SCHOEPFLIN T N, DAILEY D J. Algorithms for Calibrating Roadside Traffic Cameras and Estimating Mean Vehicle Speed [C] // Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Intelligent Transportation Systems. Seattle, USA: IEEE, 2007: 277-283.
- [6] HUANG L. Roadside Camera Calibration and Its Application in Length-based Vehicle Classification [C] // 2010 2nd International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR). Wuhan, China: IEEE, 2010: 329-332.
- [7] WANG K, HUANG H, LI Y, et al. Research on Lane-marking Line Based Camera Calibration [C] // 2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety. Beijing, China: IEEE, 2007: 1-6.
- [8] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述 [J]. 自动化学报, 2000, 26 (1): 43-55.
- [9] QIU Mao-lin, MA Song-de, LI Yi. Overview of Camera Calibration for Computer Vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26 (1): 43-55.
- [10] BAS E K, CRISMAN J D. An Easy to Install Camera Calibration for Traffic Monitoring [C] // 1997 IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Boston, USA: IEEE, 1997: 362-366.
- [11] CHAUSSE F, AUFRERE R, CHAPUIS R. Recovering the 3D Shape of a Road by On-board Monocular Vision [C] // Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition. Barcelona, Spain: IEEE, 2000: 325-328.
- [12] KANHERE N K, BIRCHFIELD S T. A Taxonomy and ANALYSIS of Camera Calibration Methods for Traffic Monitoring Applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11 (2): 441-452.
- [13] ZHENG Y, PENG S. A Practical Roadside Camera Calibration Method Based on Least Squares Optimization [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15 (2): 831-843.
- [14] WANG L L, TSAI W H. Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13 (4): 370-376.
- [15] FUNG G S, YUNG N H, PANG G K. Camera Calibration from Road Lane Markings [J]. Optical Engineering, 2003, 42 (10): 2967-2977.
- [16] ZHUANG H, WU W C. Camera Calibration with a Near-parallel (Ill-conditioned) Calibration Board Configuration [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996, 12 (6): 918-921.
- [17] SCHOEPFLIN T N, DAILEY D J. Dynamic Camera Calibration of Roadside Traffic Management Cameras for Vehicle Speed Estimation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2003, 4 (2): 90-98.