

基于单目摄像头标定的道路监控测速技术路线对比和误差原理分析

金 淦¹ 刘宇宁¹ 陈 颖²

1. 上海联合道路交通安全科学研究中心 上海 201804

2. 上海市公安局青浦分局交管支队 上海 201706

摘 要: 日益普及的道路监控摄像头为司法鉴定领域中车速鉴定带来了帮助。目前虽然存在多种基于单目摄像头的车速计算方法, 然而这些方法的可靠度未经充分验证, 其误差根源也缺乏深入分析。本文围绕车速计算比较了四种不同车速计算方法的优缺点。找到了不同计算方法的误差根源和控制原理, 为优化道路摄像头自动标定方法奠定了基础。

关键词: 交通安全; 道路监控; 车速勘测; 误差分析

引言

车辆速度是交通事故定责的关键证据, 直接影响碰撞后果和制动能力。传统测速方法依赖人工目测特征点与参照物, 误差较大。近年来, 基于深度学习的车辆特征点自动检测技术发展迅速, 但其在道路监控实际场景中的适用性仍需验证。由于道路摄像头多为单目系统, 单目视觉测速更具实用性。

1. 单目摄像头测速误差的理论基础

单目摄像头测速系统误差涉及车辆特征点误差、摄像头的标定误差以及测算误差的评估三个关键方面。

1.1 车辆特征点的检测误差

车辆特征点检测是从连续图像中提取能表征车辆位置或外形的关键点, 是视频自动测速的关键技术之一。现有方法主要包括: 基于中心点的检测^[1,2], 即以车辆轮廓或二维边框的中心表示位置^[3,4], 方法简单但定位可靠性较低。基于车辆关键点的检测, 即通过深度学习定位车轮中心、车窗角点等具体特征, 比中心点方法更具一致性和准确性, 能更好描述车辆姿态。当前基于深度学习的检测方法多源于人体姿态识别模型^[5,6], 但由于训练数据与道路监控场景在拍摄高度、角度等方面存在差异, 可能引发模型迁移适应问题。

1.2 摄像头的标定误差

摄像头的标定是自动测速系统的关键技术及核心问题。摄像头标定的数学模型可用映射矩阵 $P=K[R \ T]$ 表示。其中 K 是摄像头内部参数, 表示镜头的投影模型; R 和 T 是摄像头外部参数, 表示摄像头相对世界坐标系的旋转和平移。

对于不便于测量的快速路段, 自动化标定方法无疑是最好的选择, 但准确性存在问题。相对而言, 人工标定方法对摄像头内外参数的估计准确度要高于自动标定方法。比如 Sochor 等人发现 Dubsk á 等提出的自动标定方法在实际应用中表现出很大的误差, 主要原因在于该方法对第二个消失点的自动定位准确度不够^[7]。

1.3 车速计算误差的评估

一旦确定了车辆特征点在道路平面上的位置, 即可通过测量一定时间内特征点的移动距离或一定距离内所经过的时间计算平均车速, 也可根据相邻帧图像连续计算车辆的瞬时速度, 并利用运动平滑^[8]、滤波器(如 Kalman 滤波器)^[9]等技术对瞬时速度进行滤波。

标定道路摄像头所需的假设条件在实际情况下不可能完全被满足, 导致获取的摄像头内外参数与真实值难免存在偏差。目前的研究绝大多数聚焦于最终的车速结果, 并未对车速计算过程中各环节的误差追根溯源, 并未研究这些误差的传播模型。

2. 实验设计

针对交通事故司法鉴定需求, 根据计算机视觉的基本原理和深度学习领域的既有成果, 构建了道路交通监控数据集, 设计实验对不同的摄像头标定方法和测速方法展开比较分析。

2.1 实验工具

选择上海市某个典型路段采集交通监控录像。该监控区域包括直行路段和十字路口, 限速 80 km/h, 由四个不同

位置的摄像头覆盖。利用 Autocad 软件对场景 1:1 数字化建模。在每个摄像头视野中选择若干个地面标记点, 利用标尺定位路面标记点以及标记点正上方高度处在对应摄像头图像中的像素位置(图 1)。



图 1. 道路标记点的定位



图 2. 车身特征点的静态标记

测量每辆实验车的大灯角点、后视镜外缘等车身特征点的离地高度(图 2)。在实验车辆出现的监控视频中, 首先剔除了车速波动案例以及严重遮挡案例, 然后对保留的视频以每 10 帧为间隔, 人工标注目标车辆车身特征点的像素位置(图 3)。



图 3. 人工标记工具和标记样本

此外, 采用 Openpipaf 预训练模型自动化提取车身特征点, 发现较多漏检测对象。可能是由于训练数据和测试数据摄像头视角不一致导致。

3. 摄像头标定

为比较不同摄像头标定方法的优缺点, 采用人工标定和自动标定两种方法获取摄像头模型参数。

3.1 人工标定

人为标定包括两种方法: 软标定和硬标定。前者事先利用多张不同角度标定图案获取摄像头内参, 然后在现场利

用同一标定图案获取外参。后者则只需要单张图片中的已知参数一次性获取映射矩阵。在此采用硬标定法, 原理如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K(Rt) \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = P_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 s 为任意尺度因子, $(u, v, 1)$ 为像素点图像坐标, (X_w, Y_w, Z_w) 为空间点世界坐标, K 为摄像头投影矩阵(成像模型/内参数), (R, t) 为摄像头相对世界坐标系的旋转和平移(外参), P 即为图像平面和道路平面之间的映射矩阵。通过 MATLAB 中相机标定工具包利用基于直接线性变换法(DLT)求解。为降低人为误差的影响, 确保标定方法的可靠度, 标记点要尽量分散并包围目标测速区域, 为此设计了相机标定界面, 以助于寻找最优的标记点组合, 如图 6 所示。

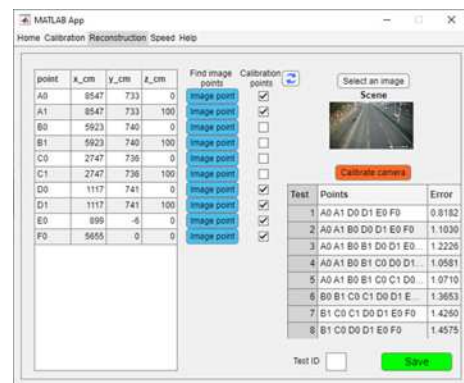


图 4. 道路摄像头标定操作界面



图 5. 摄像头标定结果

图 5 展示了实际道路上的摄像头标定结果。完成图像平面到世界平面的映射后, 即可铺设等距路面网格, 并能够将一定高度处的车身特征点投影到地面。

3.2 自动标定

基于 Dubsk á 和 Sochor 等提出的基于自动追踪道路上所有移动车辆图像特征计算两个消失点的道路摄像头自动

标定方法。在数据集上对该方法进行测试采用 YOLOV8^[10] 直接从视频中对车辆进行语义分割获取前景图，消失点延伸于道路尽头、平行于车辆行驶方向（或道路长度方向）。通过已知的车辆外形统计参数平均值预测像素尺寸与物理世界尺寸之间的比例因子，构建车辆外形三维包围框和路面参考点。

4. 车速测算和结果误差分析

4.1 四种不同的方法测算车速

人工法：由四位经验丰富的司法鉴定专家在不对摄像头进行标定，不知情本实验方案的情况下，采用传统视频测速法，通过肉眼确定车身特征点、接地点或车辆路面阴影通过某个路面标记标线的时刻。

滤波法：利用摄像头人工标定结果，结合人工标注的车辆特征点位置以及车辆特征点离地高度计算车速。瞬时车速为车辆在 10 帧图像时间内（0.4s）的平均速度，之后利用卡尔曼滤波器对瞬时车速进行平滑处理。

特征点法：利用摄像头人工标定结果，结合由 Openpipaf 获取的车辆特征点位置以及车辆特征点离地高度计算车速。

自动标定法：利用 3.2 中自动化相机标定方案计算车速。

车速计算误差的衡量使用相对误差（ err_{rel} ），如式（2）所示。

$$err_{rel} = (v_{prd} - v_{ref}) / v_{ref} * 100\% \quad (2)$$

其中 v_{prd} 为计算出的车速结果， v_{ref} 为车速真值。

4.2 对比分析

总体而言，基于滤波法的车速计算结果最为可靠。摄像头近端的车速相对误差大多位于之内（平均绝对值为 0.80%），摄像头远端的车速相对误差大多位于之内（平均绝对值为 1.51%）。该结果符合预期，因为车速计算过程中使用了包括道路测量信息、车身特征点位置以及车身特征点离地高度在内的先验知识。该方法的误差来源主要包括在图像中选择摄像头标定点和车辆特征点过程中产生的人为偏差。当目标位于摄像头远端时，分辨率的降低会导致图像中特征位置不确定性的增高。然而，该方法对不同位置处车速计算却表现出一定的稳定性。因为相对于摄像头近端，远端车速计算的方差和相对误差的增大并不明显。虽然该方法能够提供可靠的车速计算结果，但是其对先验知识的高要求，是其走向大规模应用最大的障碍。

基于人工法的计算结果相对于滤波法，不仅显示了较高的相对速度误差（平均绝对值为 4.10%），而且方差也大幅增加。而且随着图像分辨率的降低，通过目测确定对齐关系的难度大幅增加（相对误差平均绝对值为 7.01%），这就导致摄像头远端的车速计算误差相对于近端明显增大。此外，鉴定专家的计算结果一致低于真实的车速，表明了该方法的保守倾向。

特征点法是滤波法中车辆特征点人工标注环节的自动化实践。由结果可知，当 Openpipaf 预训练模型成功追踪目标车辆特征点时，相应的车速计算误差甚至低于滤波法，并且也表现出更小的方差。因为图像中车辆特征点的自动化定位避免了人为因素不确定性的影响。此外，比较摄像头近端和远端的车速相对误差，并未发现明显差异。该方法在车速计算的自动化过程中具备一定的应用前景，不足之处在于其在道路监控摄像头中较高的漏检率。

自动标定法结果不及预期，可靠性甚至低于传统的视频测速法。该发现与该领域研究人员近期研究结果相一致。其根本问题在于该方法无法顺利地通过车辆横向边缘特征找到第二个消失点的位置，导致无法准确获取依赖于车辆横向尺寸的尺度因子，进而为相机标定和车速计算带来影响。该模型中使用的车辆统计学参数与国内车辆参数平均值之间的差异也可能导致车速计算误差。

最后，本项目中用于测试的数据集只包括了白天、路面可见度较高的视频数据，以上方法在晚间或者不同天气情况下的效果尚不得而知。

5. 总结

本研究构建了道路摄像头监控数据集，理论性的讨论了高准确度道路摄像头标定方案，对不同测速技术的准确度展开比较，深入探讨了不同方法的优缺点和误差机理。为将来的研究将围绕车辆特征点的自动化检测，道路监控摄像头的自动化标定和更多交通场景的拓展应用提供了研究参考。

参考文献：

- [1] Cheng G, Guo Y, Cheng X, et al. Real-time detection of vehicle speed based on video image; proceedings of the 2020 12th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), F, 2020 [C]. IEEE.
- [2] Julina J K J, Sharmila T S, Gladwin S J. Vehicle speed detection system using motion vector interpolation; proceedings

of the 2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT), F, 2019 [C]. IEEE.

[3] Rahim H, Sheikh U, Ahmad R, et al. Vehicle velocity estimation for traffic surveillance system [J]. World Academy of Science, Engineering, 2010: 772.

[4] Afifah F, Nasrin S, Mukit A. Vehicle speed estimation using image processing [J]. Journal Adv Res Appl Mech, 2019, 48(1): 9–16.

[5] Kreiss S, Bertoni L, Alahi A. Openpipaf: Composite fields for semantic keypoint detection and spatio-temporal association [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021.

[6] Chen Y, Wang Z, Peng Y, et al. Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation; proceedings of the Proceedings of the IEEE conference on computer vision and

pattern recognition, F, 2018 [C].

[7] Sochor J, Juránek R, Špaňhel J, et al. Comprehensive data set for automatic single camera visual speed measurement [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 20(5): 1633–43.

[8] Huang T. Traffic speed estimation from surveillance video data; proceedings of the Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, F, 2018 [C].

[9] Wang C, Musaev A. Preliminary research on vehicle speed detection using traffic cameras; proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Big Data (Big Data), F, 2019 [C]. IEEE.

[10] 贾常明, 吴文龙, 王乾, et al. 视频方法鉴定车速的准确性研究 [J]. 刑事技术, 2020, 45(02): 160–4.