

文章编号:1007-6735(2016)05-0479-08

DOI:10.13255/j.cnki.jusst.2016.05.011

基于视频的交通参数检测综述

王 翔, 肖建力

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为使智能交通系统发挥作用,必须对流量、密度及速度等交通流的核心参数进行检测,目前已经有许多常见的方法,但在实际的检测中,使用一种检测方法只能检测出部分参数,未能够实现全部参数的检测,尤其是密度参数非常难以检测.现有的密度检测方法大部分集中在局部场景的交通密度检测上,对于连续场景的交通密度检测很少涉及.现主要综述了流量、密度及速度3个方面的检测方法,并重点关注仅通过视频数据能够方便地检测出多个交通参数的文献.

关键词: 智能交通系统; 视频; 交通参数; 检测

中图分类号: TP 391 **文献标志码:** A

Overview of Video-Based Traffic Parameters Detection

WANG Xiang, XIAO Jianli

(School of Optical-Electrical Information and Computer Engineering, University of
Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: To make the intelligent traffic systems (ITS) work well, it needs to obtain the core traffic parameters, including the flow, speed, density, and so on. There are a lot of methods to detect the core traffic parameters currently. But, none of them can detect all of the core parameters at once. Especially, the density is difficult to be detected. There is only a few methods focusing on detecting the density in a local sense. As for in the global sense, there is not yet any feasible method. The detection methods were summarized from three aspects, such as the flow, density and speed. Those references which suggest that traffic parameters can be easily detected only by the video were studied deeply.

Keywords: intelligent traffic systems; videos; traffic parameters; detection

智能交通系统在现代城市生活中发挥着至关重要的作用,它对于保证城市交通的平稳运行、保障人民的安全出行起着不可替代的作用.要使智能交通

系统发挥作用,首先必须获得交通流的核心参数,具体包括流量、密度及速度等.对于这些核心参数的检测,已经有许多常见的方法.根据使用的传感器种类

收稿日期: 2016-08-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603257, 61503250); 上海理工大学国家级项目培育基金资助项目(16HJPY-QN03); 上海高校青年教师培养资助计划(ZZslg15018)

第一作者: 王 翔(1991-),男,硕士研究生.研究方向: 智能交通. E-mail: 1083703369@qq.com

通信作者: 肖建力(1982-),男,讲师.研究方向: 智能交通、数据挖掘. E-mail: audyxiao@sjtu.edu.cn

可以分为基于环形线圈的检测方法^[1-4]、基于超声波的检测方法^[5-6]以及基于红外检测的方法^[7-8]。

环形线圈检测器常用来检测交通流量、速度及占有率等交通参数。该方法的工作原理是利用埋在车道路面下的环型线圈,当有车辆通过环型线圈时,环型线圈的电磁感应会发生变化,从而引起谐振回路的谐振频率变化,通过对谐振频率的计数采样后,分析出是否有车辆通过^[1]。环形线圈检测具有成本低、安装方便、灵敏度高及受气候影响小等优点。但是,在实际运用中,环形线圈容易因道路变形、施工等因素而损坏,其维护成本高,而且维护量大^[2-4]。另外,环形线圈对交通参数的检测存在局限性,它仅能检测交通速度、车辆类型等参数。

超声波检测主要用来检测高速公路上车辆的速度和流量^[5]。超声波检测器是由一个控制单元和一个探针组成。探针用于发送和接收信号,通过探针发射一束超声波,再接收从车辆或地面的反射波,根据反射波返回时间的差别来判断是否有车辆通过,从而计算出交通流量。此外,基于位置固定的、成组的超声波检测器可以分别检测出车辆通过各检测器的时间,从而检测出车辆的速度^[6]。超声波检测器具有检测简便、可移动及寿命长等优点,但检测精度不高,且检测精度很容易受检测环境的影响。

红外检测器是具有良好应用前景的悬挂式或路侧式交通检测器,它常被用来检测交通流量。红外检测器一般采用反射式检测技术。反射式检测器探头包括一个红外发光管和一个红外接收管,其工作原理是通过调制脉冲发生器产生调制脉冲,再由红外探头向道路上辐射,当有车辆通过时,从车体反射回来的红外线脉冲会被探头的接收管接收,由红外解调器解调,再经过选通、放大、整流和滤波后触发驱动器输出一个检测信号^[7-8]。这种检测方法具有快速准确、轮廓清晰的特点。但是,检测精度易受气候条件以及大气中的悬浮颗粒或粉尘影响。

以上常见的交通参数检测方法,可以检测出流量、速度、密度3大核心交通参数中的一种或两种,但是,无法同时实现对3大参数的全部检测。尤其对于密度检测来说,往往只能检测出断面上的密度,对于路段层面上的密度检测来说无法实现。基于路段层面上的密度检测一直是智能交通领域的一个难点。近些年,不少学者开始将研究的方向瞄准基于视频的交通参数检测。究其原因,一是因为目前交通监控摄像头的安装已经十分普及,大量的监控视频数据

还没有发挥应有的作用;二是分布在道路上的摄像头已经组成了摄像头网络,为实现路段层面的密度检测提供了很好的数据支撑。为此,本文将对基于视频数据进行交通参数检测的方法进行重点回顾,分别从流量检测、速度检测、密度检测3个方面对相关的文献进行探讨和分析。

1 基于视频的交通流量检测

基于视频的交通流量检测的方法相对速度和密度检测方法来说比较普遍,大体上包括基于目标检测的光流法^[9-13]、帧间差分法^[14-19]、背景差分法^[20-24]等。

1.1 光流法

计文平等^[9]提出了一种基于虚拟线圈数据,使用光流法的车流量检测方法。该方法通过设置虚拟线圈,取相邻2帧图像并通过光流法进行多次迭代计算出光流场信息,再根据光流场信息变化来判断是否有车辆,最后对车辆数进行统计。该方法对双车道和四车道的流量进行统计,其结果表明,该方法的检测精度高,测量结果与实际结果相差比较小。光流法可以获得被测物体的运动信息及其三维结构信息,光流法检测也可以不用考虑场景信息,适用于视频检测器运动的情况^[10-12]。但是,光流法也存在缺陷,光流法是根据光流信息来判断的,而光流是由于图像的灰度变化引起的,因此,当光照变化或者图像灰度对比度不够时,也会造成光流信息变化,从而造成误判^[13]。该方法的具体步骤总结于算法1。

算法1 基于虚拟线圈的光流法车流量检测算法^[9]。

步骤1 设置虚拟线圈,选择检测区域。

步骤2 取出相邻的2帧图像,并通过光流法迭代 n 次来得到图像的光流场信息,光流法迭代的次数由噪声的大小确定,一般迭代次数达到10次就可以达到要求。

步骤3 根据光流场信息的变化来判断是否有车辆,光流场数据发生变化则表明有车通过,否则,表示没有车辆通过。最后对判断结果进行统计,得到车流量,并返回步骤2。

1.2 帧间差分法

帧间差分法是对视频图像序列中相邻2帧图像作差分,从而获得运动目标边缘轮廓的方法。该方法的优势在于可以适用于多个运动目标,即使摄像机移动也不影响运动目标的检测结果^[14-15]。该方法主

要通过运动物体会在视频相邻的2帧图像之间出现较为明显的差别将运动目标提取出来.其关键之处在于比较相邻2帧图像像素差的绝对值和设定的阈值,通过对两者大小的比较来分析图像序列运动特性,从而确定是否有运动物体^[16].帧间差分法的稳定性比较好,能够满足实时性的要求,与光流法相比,帧间差分法不易受到光照的影响,但是,帧间差分法不能够检测出静止的物体,而且对于运动速度过快的物体会造成检测失误.另外,该方法无法很好地区分图像中物体重叠的区域,从而也会对检测结果产生影响^[17-19].为了弥补帧间差分法的不足,夏丽等^[20]采用面积融合法与帧间差分法结合来解决.帧间差分法可以实现车辆的计数,但是,当发生车辆距离很近、车辆遮挡等问题时,检测精度较低.而采用面积融合法与帧间差分法结合,可以利用面积融合法有效地解决车辆粘连、车辆遮挡问题,提高了计数范围.其具体步骤总结于算法2.通过对不同路段的大量测量,其结果表明,该方法具有较为准确的精度,但对于不同的路段环境,检测精度变化有些大.

算法2 面积融合法与帧间差分法相结合的交通流量检测算法^[20].

步骤1 读入视频,进行背景的初始化.

步骤2 采用混合高斯模型结合贝叶斯决策规则实现背景的自适应更新,以实现运动目标的提取.

步骤3 设立检测区域,在检测区内设置2条检测线,对相邻的2帧图像进行帧间差分,若检测线的像素差值有变化,则说明有车辆通过.

步骤4 记录车辆进入和离开2条检测线的帧号,分别用不同的成员变量来表示,通过步骤3的方法对车辆驶入和驶出检测线作出判断.

步骤5 对车辆的状态进行判断.若当前帧的检测状态为1,而前一帧的检测状态为0,表示车辆驶入检测线;反之,为驶出检测线.若两状态均为1,则表明车辆正在通过检测线.对车流量进行统计.

1.3 背景差分法

背景差分法是指在理想背景的条件下,用当前帧与理想背景相减,从而比较精确地获得运动物体.背景差分法的基本流程是首先根据视频序列得到背景的初始化模型,然后将当前帧图像与背景图像作差分处理,提取出前景点;由于光照变化等影响,背景也会发生变化,所以,在运动检测过程中背景模型要进行实时更新^[21].与光流法相比,背景差分法的计算量较小、速度快,且满足实时性的要求,但是,该

方法对背景质量要求很高,涉及天气及光照的影响,背景图像需要不断地更新^[22-24].因此,背景提取是该方法的核心.关于背景提取的方法主要有统计中值法、均值法、单高斯模型法及混合高斯背景模型法等.

a. 统计中值法.

统计中值法是由中值滤波的方法演变而来的.中值滤波是一种非线性平滑技术,它将每一像素点的灰度值设置为该点某邻域窗口内的所有像素点灰度的中值^[25].统计中值法的基本思路如算法3所示.从背景合成的方面来看,统计中值法能够较好地实现背景的提取,但统计中值法的运算复杂度较大,所占用的内存空间比较多.

算法3 统计中值法^[25].

步骤1 假定在一定时间段内有 n 幅图像.

步骤2 将 n 幅图像进行灰度化,对每帧图像上的某个点作时间上的采样,并将该时段内通过目标的像素点视为噪声,对其排序.

步骤3 取排在中间的像素点作为背景点.

b. 均值法.

均值法是选取某点在一段视频序列中灰度值的平均值来代替该点的像素值.将运动车辆当作噪声,用车辆运行一段时间的连续图像作平均,就可以得到背景图像^[26-28].与统计中值法相比,均值法的模型简单、计算量小.但是,考虑到实际上通过车辆的灰度值大小不均,有时偏大,有时偏小,从而会导致背景出现亮暗不均的情况.

c. 单高斯模型法.

单高斯模型法最早是由Wren等提出来的,其基本思想是利用单个高斯背景模型来模拟图像中的每个像素,其中,每一个点的高斯模型都是独立的^[29].基于该思想,单高斯模型法的基本思路如算法4所示.单高斯模型法适用于处理微小变化和物体运动缓慢的场景.当场景比较复杂时,单高斯模型法得到的背景不如统计中值法和均值法,而且模型的稳定性不是很好,抗干扰能力不强.针对单高斯背景的不足,目前也有一些改进的方法,如陈银等提出利用mean shift算法修正使背景更接近于真实背景模型,通过帧差法检测出运动目标,并运用于流量统计^[30].

算法4 基于单高斯模型的交通流量检测算法^[29].

步骤1 构建初始背景.对于视频图像序列中的每一个像素点,其在视频序列中的变化可视为随

机过程,该过程可表示为 $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 而且该过程满足高斯分布.

步骤2 背景匹配.当场景发生变化时,需要对新场景的每个像素点进行判断.这里要设定一个阈值,通过该阈值与每个点的像素和灰度平均值相减的绝对值的比较,来确认该点属于前景还是背景.

步骤3 更新背景模型.运用视频序列提供的实时信息来对背景模型进行更新.

d. 混合高斯背景模型法.

混合高斯模型是一种直观概率密度模型,具有在一定时间内反映图像运动的统计特性.混合高斯背景模型的基本思想是将每一个像素点所呈现的特征用 K 个状态来表示, K 取值越大,处理复杂场景的能力就越强,但运算量也随之变大,影响实时效果^[31-34].混合高斯模型是一种高级背景统计模型,它能够准确地反映像素值分布和动态变化.目前已有许多基于混合高斯背景模型实现交通流量统计的方法.如田辉^[35]提出了一种基于改进混合高斯模型的车流量统计方法,该方法的流程如图1所示,整个算法包含2个主要部分.第一部分用于构建稳定的背景模型 B .首先算法读入第一帧图像,并将第一帧图像作为最初的背景模型,接着算法继续读入下一帧图像,并用来更新背景模型,直到读取到第 T 帧图像,则稳定的背景模型构建完毕. T 值一般根据实际的经验进行人工设定.假设整个视频一共 m 帧图像,从第 $T+1$ 到第 m 帧图像被用来检测交通流量.因此,算法的第二部分即为交通流量检测以及背景模型的选择性更新.从第 $T+1$ 帧图像开始,如果当前图像矩阵 I_n 与背景模型的差异大于设定的阈值 t_h (如式(1)所示)则需要使用当前图像对背景进行更新,然后再利用背景差分法进行交通流量检测;否则,直接利用背景差分法进行交通流量检测.

$$|B - I_n| \leq t_h \quad (1)$$

通过对车流量统计结果分析表明,基于改进混合高斯模型的车流量统计算法的检测精度能够达到90%以上,但也存在一定的漏检率^[35],其主要主要是由于车辆遮挡、车辆行驶过程中的横向距离较小以及摄像机角度造成的.总之,该方法弥补了混合高斯模型在背景更新时会对每个像素点的 K 个模型进行更新,造成了模型的计算量非常大的缺陷,采用对有变化的背景区域的更新,提高运算效率,同时利用车辆的质心到检测线的距离来判断车辆,检测精度较高.

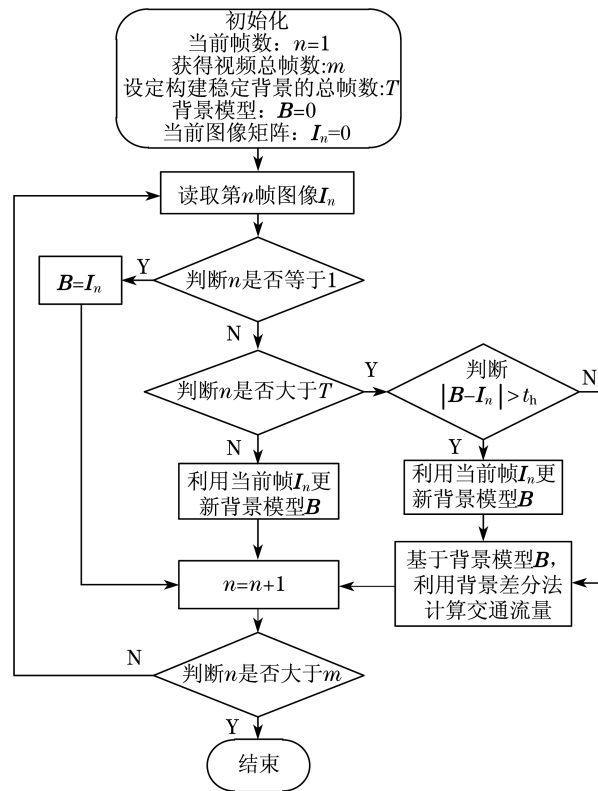


图1 基于改进混合高斯模型的车流量统计算法

Fig.1 Traffic flow detection algorithm based on the improved Gaussian mixture model

除了上述几种常见的检测方法外,还有一些改进的检测方法可运用于车流量统计方法.如 Zhang 等^[36]提出了一种改进的前景检测方法来实现流量检测,其主要的流程如算法5所示.该方法的优点在于硬件需求少、成本低,消除了光照、恶劣天气对车流量检测精度的影响.与混合高斯背景建模相比,该方法可以有效地检测出与背景颜色相似的运动对象,提高了检测精度;刘腾飞^[37]提出一种针对车体遮挡的车流量统计算法;何清等^[38]通过利用现有的路面标记进行图像对称分割并计算图像灰度值方差来判断有无车辆通过,进而实现车流量统计;陈兆学等^[39]提出了运用 Mean Shift 算法实现视频车流量检测的方法等.

算法5 改进的前景检测算法^[36].

步骤1 输入视频帧,以 SCLTP 模型作为纹理特征,通过纹理和颜色特征来实现前景检测.

步骤2 融合纹理和颜色特征实现背景建模.

步骤3 计算纹理和颜色距离 l .

步骤4 计算车流量.如果纹理和颜色距离 l 大于设定的阈值,则表示有车辆通过并进行车辆计数.

2 基于视频的交通速度检测

目前已有一些基于视频的交通速度检测方法^[40-44].例如,宋焕生等^[40]提出利用帧差法提取灰度图像序列并选取特征值点,通过特征值点的真实位置与时间的关系,用最小二乘法拟合车辆速度;张帆^[41]运用混合高斯模型提取运动目标,通过区域特征点的方法对车辆进行跟踪以获得运动轨迹来实现速度测量等.现介绍几种比较典型的基于视频的交通速度检测方法:基于目标跟踪的交通速度检测^[42]、基于序列图像的交通速度检测^[43]以及基于运动矢量聚类的交通速度检测^[44].

2.1 基于目标跟踪的交通速度检测

基于视频的交通速度检测主要需解决2个问题:一是目标车辆检测和跟踪;二是视频检测器的标定.针对上述问题,卢彬等^[42]提出了通过调用Opencv库自带的运动目标检测方法,来实现对目标车辆的检测和跟踪,再依据公式来计算出目标的运动速度,其主要步骤如算法6所示.该方法利用Opencv库提供的运动目标跟踪框架来实现行驶车辆的定位和跟踪,结合摄像机自动标定结果获得车辆在检测的2帧图像间的行驶距离,从而检测出车辆的行驶速度.速度 v 的计算如式(2)所示.

$$v = kl'p/\Delta N \quad (2)$$

式中: k 为比例系数; l' 为车道线长度; p 表示摄像机采集帧率; ΔN 为帧数差.

通过实验数据表明,该方法存在一定的误差.造成误差的原因主要有:一是Opencv库团块检测法需要判断许多帧才能确定团块;二是由于实际速度由汽车经过的测试距离以及花费的时间所决定,而计算中所用的帧数为整数,利用帧数差求得的通过测试距离的时间有偏差,从而结果会有一定的误差.但该方法比传统的摄像机标定方法更加灵活,节省了大量的时间和计算量.

算法6 基于目标跟踪的交通速度检测算法^[42].

步骤1 输入视频帧,通过Opencv自带的运动目标检测处理视频,利用背景差分法结合帧差法得到运动区域,再经过图像二值化及形态学处理,从而完整地检测出运动目标.

步骤2 通过Kalman滤波器预测车辆行驶轨迹在当前图像中的大小和具体位置,完成前后帧的目标匹配.

步骤3 完成摄像机的标定,得到图像坐标与

车辆空间坐标之间的转换关系,接着根据平面坐标求得车辆实际空间的坐标,再根据速度式(2)求得所测车辆的速度.

2.2 基于序列图像的交通速度测量

视频图像法通常将摄像机安装在道路中央上方的一定高度,对来往的车辆进行直接测速,这种视频检测的方法只能够在特定的区域内进行测速,而且检测精度受到安装设备精度的影响^[43].针对常见车速测量方法存在测速准确性较低、自主性较差及灵活性不足等问题,刘红亮等^[45]建立了车载自主测速模型,将车辆的测速问题转化为序列图像的匹配问题.该方法主要思路为道路表面存在大小不同、形状各异的颗粒,这些颗粒对光线的反射能力各有差异,不同强度和角度的反射光经过车载成像设备就可以得到路面信息的序列图像,再借助于图像匹配技术便可间接实现对车辆速度的连续自主测量^[46-47].该方法的基本原理如图2所示,相邻帧图像 A' 、 B' 之间拥有共同的地面成像区域,假定有一点 m' 处于共同的地面成像区域内,通过对相邻2帧图像 A' 、 B' 的序列图像匹配来确定点 m' 的坐标,从而计算出点 m' 的像的运动速度,再结合成像设备透镜放大倍率求出车辆的运动速度.该方法的检测精度与GPS(global positioning system)测速的检测精度相近,其测速误差基本上控制在 ± 0.5 m/s内,且速度误差的均值与方差不大.该方法利用了车辆运行状态的连续性和序列图像的成像特性,具有测量精度高、自主性及灵活性好等优点.该方法的计算复杂度低、运行效率高,但该方法存在安装相机困难,且不适合测量速度慢的物体等问题.

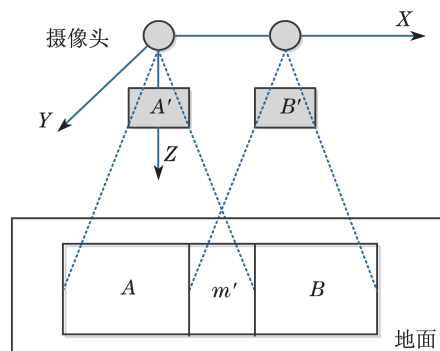


图2 基于序列图像的交通速度测量^[45]

Fig.2 Traffic speed measurement based on the sequence image

2.3 基于运动矢量聚类的交通速度检测

与传统摄像机相比,无人机具有较好的可移动性,这使其在交通参数检测中得以运用.使用无人机

可以同时监测连续拉伸道路,也可以集中在一个特定的道路段.无人机监测可以快速地为应急人员提供有用信息.Ke等^[44]提出基于运动矢量聚类的交通速度检测,该方法主要流程如算法7所示,通过设立特征点,运用光流法追踪特征点并获取特征点的运动矢量,然后对特征点的运动矢量聚类来求得交通流的平均速度,而具体某辆车的速度可以根据式(3)求得.

$$v = (l_a/l_p)d_p/f \quad (3)$$

式中: l_a 为标记检测区的实际长度; l_p 为标记检测区的像素; d_p 为车辆行驶的像素距离; f 为视频的帧率; v 为车辆实际速度.

通过实际检测数据与理论计算对比,得到该方法的平均错误率小于12%,检测精度较高.

算法7 基于运动矢量聚类的交通速度检测算法^[44].

步骤1 选取特征点.通过 Shi-Tomasi 特征法获取特征点.

步骤2 追踪特征点.运用 Kanade-Lucas 算法获取特征点运动到下一帧的运动矢量.

步骤3 特征点运动矢量聚类.使用 k-means 聚类算法对特征点的运动矢量进行聚类,求取交通流的平均速度.

步骤4 求取车辆的实际速度.利用式(3)求取车辆的实际速度.

3 基于视频的交通密度检测

交通密度是描述交通流特性的重要参数.交通流密度是衡量道路服务水平的指标之一,在研究划分道路服务水平、分析交通瓶颈状况、制定交通管理与控制政策均有重要运用^[48].交通密度是指在某瞬时内,每单位道路长度上一条车道或整个道路上的车辆数,反映了道路上车辆的密集程度^[49].基于视频的交通密度参数检测方法较少,Wasantachat等^[50]提出利用在线支持向量机分类器结合背景建模技术实现交通密度测量;Asmaa等^[51]提出利用车辆所占图像的像素值与整个图像的比值代替记录车辆数来进行交通密度测量等.

楼俊杰等^[52]提出基于时间占有率的交通密度测量方法.所谓时间占有率是指在道路观测断面上,车辆占用的时间累计值与测定时间的比值,时间占有率不仅与交通流量有关,还与车辆的长短及速度有关^[53].该方法主要是利用时间占有率与交通密度

的关系来计算密度.时间占有率与交通密度的关系为 $w = pt/L$. w 为交通密度, p 为时间占有率, t 为观测时间, L 为车辆长度与检测区域长度和.通过对多个车道的密度测量后计算出平均交通密度,其结果表明,该方法虽然可以检测出断面上的密度,但是,其检测的精度不高.该方法的具体步骤如算法8所示.

算法8 基于时间占有率的交通密度测量算法^[52].

步骤1 读取视频图像,利用背景差分法实现背景的更新,将图像进行二值化处理,提取出运动目标.

步骤2 选择检测区域,设置2条比车身稍长的检测线.当车辆通过第一条检测线时,进入检测区域的灰度值会发生变化,直到大于阈值时,则判断有车辆通过,统计车流量.

步骤3 记录目标车辆通过2条检测线的时间差,根据2条检测线的像素差以及摄像机标定参数估算出2条检测线的实际距离,用该距离除以通过的时间差来得到车辆速度.

步骤4 计算时间占有率,根据时间占有率与交通密度的关系来推导出交通密度.

4 基于视频的交通参数检测发展展望

数据资源被认为是推动社会向前发展的重要“能源”.目前交通监控摄像头在道路上的安装已经非常普遍,海量的交通视频数据正在产生.但是,对于这些视频数据的利用还非常不充分,远远没有发挥这些视频数据资源的重要价值.可以预见,将来对于交通视频的研究与分析将会是一个十分热门的研究领域,如果研究人员能够直接从视频数据中获取交通流的流量、密度、速度等信息,这对于智能交通系统的发展来说,将会是一个十分重要的突破,它将解决在目前的交通参数检测方法中还没有哪一种方法能够实现一次完成交通流的流量、密度和速度检测的难题.由于大量安装的交通监控摄像头能够非常便捷地组成摄像头网络,这使得通过同一路段上的摄像头网络所采集到的视频数据检测出路段层面的交通密度成为可能,这将进一步提升智能交通系统的性能.未来交通参数的检测方法可以向深度学习方向发展,基于神经网络技术可以实现目标特征的检测,再结合深度学习得到的特征,可以大大提高交通参数检测的精度.另外,迁移学习也可运用于交

通参数的检测,迁移学习可以从现有的数据中迁移知识,用来帮助将来的学习,这样可以大大提高检测效率。总之,未来的交通参数检测技术应向着智能化、网络化、自主学习的发展方向,基于视频的交通参数检测方法将会是智能交通系统中更具有潜力的检测方法。

参考文献:

- [1] 王树欣,伍湘彬.地感线圈在交通控制领域中的应用[J].电子世界,2005(8):47-48.
- [2] 皮晓亮,王正,韩皓,等.基于环形线圈检测器采集信息的交通状态分类方法应用研究[J].公路交通科技,2006,23(4):115-119.
- [3] CARUSO M J, WITHANAWASAM L S. Vehicle detection and compass applications using AMR magnetic sensors [C] // Proceedings of the Sensors Expo. Baltimore: Honeywell Inc. Solid State Electronics Center, 1999: 477-489.
- [4] 童亮,李隐,谷云秋,等.基于微型地感线圈检测器在交通流量调查系统中的研究与应用[J].公路交通科技(应用技术版),2015(4):271-272.
- [5] 马枫,张庆英.基于以太网的超声波车流量自动检测系统设计[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2007,31(1):180-182.
- [6] JO Y, JUNG I. Analysis of vehicle detection with WSN-based ultrasonic sensors[J]. Sensors, 2014, 14(8): 14050-14069.
- [7] 艾红,孙硕.红外测量在车流量监测中的应用[J].红外技术,2008,30(4):201-204.
- [8] IWASAKI Y, MISUMI M, NAKAMIYA T. Robust vehicle detection under various environmental conditions using an infrared thermal camera and its application to road traffic flow monitoring [J]. Sensors, 2013, 13(6): 7756-7773.
- [9] 计文平,郭宝龙,丁贵广.基于虚拟线圈的光流法车流量检测[J].计算机仿真,2004,21(1):109-110.
- [10] GLOWACZ A, MIKRUT Z, PAWLIK P. Video detection algorithm using an optical flow calculation method [M] // DZIECH A, CZYŻEWSKI A. Multimedia Communications, Services and Security. Berlin Heidelberg: Springer, 2012: 118-129.
- [11] TAN H L, ZHAI Y P, LIU Y, et al. Fast anomaly detection in traffic surveillance video based on robust sparse optical flow [C] // Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Shanghai: IEEE, 2016: 1976-1980.
- [12] DO V D, WOO D M. Multi-resolution estimation of optical flow on vehicle tracking under unpredictable environments [J]. Advanced Science and Technology Letters, 2016, 129: 32-36.
- [13] 丁箫.基于视频检测技术的车流量统计系统设计研究[D].郑州:郑州大学,2014.
- [14] 郝毫刚.基于五帧差分法和背景差分的运动目标检测算法[J].计算机工程,2012,38(4):146-148.
- [15] SENGAR S S, MUKHOPADHYAY S. A novel method for moving object detection based on block based frame differencing [C] // Proceedings of the 2016 3rd International Conference on Recent Advances in Information Technology. Dhanbad, India: IEEE, 2016: 467-472.
- [16] 刘章军.基于差分图像的车流量检测算法及实现[D].成都:西南交通大学,2011.
- [17] AL-SMADI M, ABDULRAHIM K, SALAM R A. Cumulative frame differencing for urban vehicle detection [C] // Proceedings of the SPIE 10011 First International Workshop on Pattern Recognition. Tokyo, Japan: International Society for Optics and Photonics, 2016: 100110G.
- [18] 肖本贤,陆诚,陈昊,等.基于帧间差分法和不变矩特征的运动目标检测与识别 [C] // 第27届中国控制会议论文集.昆明:中国自动化学会,2008:34-36.
- [19] KACHROO P, SHLAYAN N, PAZ A, et al. Model-based methodology for validation of traffic flow detectors by minimizing human bias in video data processing [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 1851-1860.
- [20] 夏丽.基于视频检测技术的车流量统计算法研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.
- [21] 郭怡文,袁飞虎.基于背景差分的多车道车流量检测系统[J].电光与控制,2010,17(9):90-93.
- [22] JOUDAKI S, BIN SUNAR M S, KOLIVAND H, et al. Background subtraction methods in video streams: a review [J]. Journal of Soft Computing and Decision Support Systems, 2016, 3(1): 53-60.
- [23] SEENOUVONG N, WATCHAREERUETAI U, NUTHONG C, et al. A computer vision based vehicle detection and counting system [C] // Proceedings of the 2016 8th International Conference on Knowledge and Smart Technology. Chiangmai, Thailand: IEEE, 2016: 224-227.
- [24] 许伦辉,卜文萍,陈衍平,等.基于帧差法和背景差法融合的车流量检测方法[J].计算机仿真,2012,29(2):353-357.
- [25] 汪彩霞.视频交通分析中背景估计与更新算法研究[D].西安:长安大学,2010.

- [26] 耿秀丽, 尤星星, 吕文元. 基于直觉模糊 C-均值的客户聚类识别方法[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(1): 13-17.
- [27] 代建辉. 智能交通系统车辆流量检测技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [28] TIAN B, YAO Q M, GU Y, et al. Video processing techniques for traffic flow monitoring: a survey[C]// Proceedings of the 2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Washington, DC, USA: IEEE, 2011: 1103-1108.
- [29] 王小平, 张丽杰, 常佶. 基于单高斯背景模型运动目标检测方法的改进[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(21): 118-120.
- [30] 陈银, 任侃, 顾国华, 等. 基于改进的单高斯背景模型运动目标检测算法[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 239-247.
- [31] 夏海英, 何利平, 黄思奇. 基于时空分布的混合高斯背景建模改进方法[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(5): 1546-1548.
- [32] WANG M J, JIN J S, HAN X F, et al. An algorithm of detecting moving foreground based on an improved Gaussian mixture model[C]// Proceedings of the 11th Chinese Conference on Image and Graphics Technologies. Singapore: Springer, 2016: 125-136.
- [33] ZHANG Y S, ZHAO C H, HE J, et al. Vehicles detection in complex urban traffic scenes using Gaussian mixture model with confidence measurement[J]. IET Intelligent Transport Systems, 2016, 10(6): 445-452.
- [34] XIA H Y, SONG S X, HE L P. A modified Gaussian mixture background model via spatiotemporal distribution with shadow detection[J]. Signal, Image and Video Processing, 2016, 10(2): 343-350.
- [35] 田辉. 基于视频的车流量统计算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [36] ZHANG L B, WANG F, HU M, et al. A vehicle counting algorithm using foreground detection in traffic videos[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Multimedia Technology. Paris: Atlantis Press, 2013.
- [37] 刘腾飞. 针对车体遮挡的车流量统计算法[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [38] 何清, 陈海进, 施慧华. 一种新型多车道车流量检测算法[J]. 电视技术, 2014, 38(19): 192-195.
- [39] 陈兆学, 郑建立, 施鹏飞. 基于 Mean Shift 方法的视频车辆检测与分割[J]. 上海理工大学学报, 2007, 29(2): 195-199.
- [40] 宋焕生, 张辉, 付洋, 等. 一种基于视频的车辆速度检测方法: 中国, CN102622895A[P]. 2012-08-01.
- [41] 张帆. 基于单目视频的车辆对象提取及速度测定方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [42] 卢彬, 陈域, 李冬生, 等. 基于视频图像的车速检测方法[J]. 电视技术, 2014, 38(7): 199-201.
- [43] 金守峰, 胡永彪, 田明锐, 等. 基于序列图像的车载测速方法与实验[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(3): 271-274.
- [44] KE R M, KIM S, LI Z B, et al. Motion-vector clustering for traffic speed detection from UAV video [C]// Proceedings of the 2015 IEEE First International Smart Cities Conference. Guadalajara, Mexico: IEEE, 2015: 1-5.
- [45] 刘红亮, 陈维义, 许中胜. 基于序列图像匹配的车载自主测速方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(4): 964-968.
- [46] BOUMEHED M, ALSHAQAQI B, AMRAOUI M. Distance and speed measurement and classification of road traffic [J]. International Journal of Applied Engineering Research, 2016, 11(2): 1347-1352.
- [47] NAEEM S, SIRAJ S. A framework to select edge detection method using multi-criteria decision making [C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Manchester, United Kingdom: IEEE, 2013: 730-735.
- [48] ARASAN V T, DHIVYA G. 混合交通流密度测定方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(4): 50-61.
- [49] FU M, XU P, LI X D, et al. Fast crowd density estimation with convolutional neural networks [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 43: 81-88.
- [50] WASSANTACHAT T, LI Z D, CHEN J, et al. Traffic density estimation with on-line SVM classifier[C]// Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance. Washington, DC, USA: IEEE, 2009: 13-18.
- [51] ASMAA O, MOKHTAR K, ABDELAZIZ O. Road traffic density estimation using microscopic and macroscopic parameters[J]. Image and Vision Computing, 2013, 31(11): 887-894.
- [52] 楼俊杰. 基于视频的交通参数检测与分析[D]. 大连: 大连交通大学, 2013.
- [53] 敖谷昌, 贾元华, 张惠玲. 基于时间占有率分析的车辆折算系数研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(3): 106-110.

(编辑: 石 瑛)