

# 基于双目视觉的车辆速度测量方法



常子霆<sup>1</sup> 施雨晴<sup>1</sup> 王 俊<sup>1</sup> 于明鹤<sup>2</sup> 姚 兰<sup>3</sup> 赵志滨<sup>1,3</sup>

1 东北大学计算机科学与工程学院 沈阳 110819

2 东北大学软件学院 沈阳 110819

3 沈阳帝信人工智能产业研究院有限公司 沈阳 110121

(1871485@stu.neu.edu.cn)

**摘 要** 为配合高速公路入口处的货车称重工作,需要测量车辆通过称重台时的实时速度。利用双目视觉技术测速具有成本低、部署简单、稳定性高的优点,具有广阔的应用前景。双目视觉测速的技术难点是目标的位移测量,其核心问题是目标在多帧图像间的精准匹配。文中提出了一种基于空间位置的匹配区域对齐算法与基于模板匹配的空间位移计算方法。具体地,利用车轮的空间位置关系来限制车轮的匹配区域,可有效降低相似车轮的误匹配问题;使用模板匹配的方法追踪车轮的关键点,进而获得多帧之间车轮的空间位移。使用某高速公路入口的真实通行视频数据进行实验验证,结果表明,与其他双目测速方法相比,所提方法使得测速结果的 RMSE 下降了 20%~40%,且更加适用于车辆以较快速度(10~20 km/h)通过高速公路入口测速点的实际场景。

**关键词:** 车速测量;匹配区域对齐;双目视觉;模板匹配

**中图法分类号** TP391

## Vehicle Speed Measurement Method Based on Binocular Vision

CHANG Zi-ting<sup>1</sup>, SHI Yu-qing<sup>1</sup>, WANG Jun<sup>1</sup>, YU Ming-he<sup>2</sup>, YAO Lan<sup>3</sup> and ZHAO Zhi-bin<sup>1,3</sup>

1 School of Computer Science and Engineering, Northeast University, Shenyang 110819, China

2 School of Software, Northeast University, Shenyang 110819, China

3 Shenyang Dixin Artificial Intelligence Industry Research Institute Co., Ltd, Shenyang 110121, China

**Abstract** Real-time speed measurement is a vital issue to assist truck weighing at the entrance of expressway when a truck passes through a scale. Binocular vision technology technically has the advantages of low cost, easy deployment and high stability, which qualify it a potential for prospective application. The key point for binocular vision based speed measurement is displacement-measuring of a target, which is subject to accurate target matching in multiple frames. This paper presents an alignment algorithm on region matching based on spatial location and a calculation method for spatial displacement based on template matching. Specifically, relative spatial location of a wheel is introduced to restrain its matching area, which effectively reduces the mismatching on similar wheels; template matching is derived to track the key points of a wheel for spatial displacement between multiple frames. The practical traffic video data taken at an expressway entrance is applied to experiments. The results show that, compared with other binocular vision based speed measurement methods, our method declines the RMSE of the speed measurement results by 20%~40%, and it more suitable for the real scene when vehicles pass the speed measurement point at the entrance of expressway at a relatively high speed(10~20 km/h).

**Keywords** Vehicle speed measurement, Alignment on region matching, Binocular vision, Template matching

## 1 引言

为了提升高速公路的通行效率,我国正在进行高速公路入口的电子不停车收费系统(Electronic Toll Collection, ETC)改造。根据《深化收费公路制度改革取消高速公路省界收费站实施方案》,从2020年1月1日起对高速公路收费站

入口进行不停车称重检测<sup>[1-2]</sup>。对大型货车进行自动称重时要求车辆不能超速,因此需要检测货车通过称重台时的实时速度。传统的车辆测速方法包括雷达测速<sup>[3-4]</sup>、激光测速<sup>[5-6]</sup>和感应线圈测速等。这些方法需要专业设备,成本高且日常维护复杂。近年来,图像采集与处理领域软硬件水平的进步带动了双目视觉技术的快速发展<sup>[7]</sup>,使得双目视觉测速方法

收稿日期:2020-10-11 返修日期:2020-11-23 本文已加入开放科学计划(OSID),请扫描上方二维码获取补充信息。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(61902055)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China Project (61902055).

通信作者:赵志滨(zhaozb@mail.neu.edu.cn)

的优势越来越明显。

传统的双目视觉测速<sup>[8-12]</sup>需要基于全景图片或特定区域,寻找特征进行匹配,利用特征测量获得位移并除以时间得到速度。但在高速公路入口称重场景下,由于双目相机放置在称重台侧面,无法获得车辆的全景图片且车辆之间易产生遮挡,成为了应用亟待解决的问题。

本文提出了一种利用车轮的双目视觉测速方法,通过检测车轮获取匹配区域,利用模板匹配和双目视觉坐标转换可以测量出车辆通过称重台时的实时速度,与称重台联动能够准确测量车辆重量。本文的主要贡献有:

(1)提出了基于空间位置的匹配区域对齐算法。该算法可以针对大货车有多个车轮的情况,确定有效匹配区域,避免因车轮相似造成的匹配错误。

(2)提出了一种基于模板匹配的车轮空间位移测量方法。经过实践对比,选择车轮目标检测结果的左上角区域作为模板,更易获取最佳匹配。将模板坐标与模板匹配结果坐标作为测量位移的关键点对,利用双目视觉将关键点对转换为世界坐标以获取位移。

(3)采集了现场的真实通行数据并对本文方法在测速准确性和效率方面进行了性能评价,证明本文方法能够满足高速公路入口的测速需求,有效可行。

本文第2节介绍了关于双目视觉测速的相关工作,包括利用完整车辆特征以及部分车辆特征进行测速的方法;第3节介绍了基于双目视觉的车辆速度测量方法,包括基于车轮空间相对位置关系的区域对齐匹配算法和基于模板匹配的车轮空间位移测量方法;第4节介绍了实验细节和结果分析;最后总结全文。

## 2 相关工作

目前,学术界在双目视觉测速方面已经进行了一些有益的探索。Zhu等<sup>[8]</sup>通过粒子滤波算法<sup>[13]</sup>实现车辆追踪,获取车辆位移并进行测速。此方法需要在初始图像上设置追踪目标。Cai<sup>[9]</sup>通过混合高斯背景建模提取背景,采用差分法进一步提取车辆前景,再对车辆前景进行特征点匹配,利用特征点的位移变化实现车辆测速,但是该方法需要人工干预,无法自动进行匹配测速,智能化程度较低。Li<sup>[10]</sup>通过SSD神经网络<sup>[14]</sup>进行车牌检测并追踪,利用车牌位移实现车辆测速。Ju等<sup>[11]</sup>提出根据车灯对称性改进的车灯定位方法,利用车灯的准确定位来获取车辆位移,从而实现对车辆速度的测量。虽然以上基于双目视觉的测速方法都有较好的测速效果,但是这些方法依赖于车辆的整体特征或部分单一特征。而高速公路入口无法获取车辆的整体特征且车牌与车灯特征容易被遮挡,这样将会限制通过整体特征或部分特征进行测速的准确性,甚至无法达到测速的目的。Chen等<sup>[15]</sup>提出了双目特征点时序空间匹配的方法,虽然也可以测量车速,但是测速结果的稳定性较低。

为了解决上述问题,本文提出了基于空间位置的匹配区域对齐算法与基于模板匹配的车轮空间位移测量方法。获取车轮特征的关联区域后,利用车轮特征进行模板匹配获取车

辆位移,在不需要完整车辆特征和利用车轮特征的同时,能够在高速公路入口收费站完成实时测速。

## 3 基于双目视觉的车辆速度测量方法

### 3.1 车辆测速问题描述

车速测量的核心是对车辆单位时间内的位移进行测量,解决问题的基本思路是通过测量车辆上的关键点位移来获取车辆的整体位移。假设分别在 $t$ 和 $t+\Delta t$ 时刻获得某车辆的两帧图像 $f_t$ 和 $f_{t+\Delta t}$ ,通过对这两帧图像进行处理,以获取该车辆在 $f_t$ 和 $f_{t+\Delta t}$ 中的同一关键点的像素坐标 $P_t(x_t, y_t)$ 和 $P_{t+\Delta t}(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t})$ 。通过双目视觉,利用关键点的像素坐标获取到关键点的世界坐标,从而获取到车辆的实际位移,通过进一步计算可以得到车辆的瞬时速度。假设 $P_t^w(X_t, Y_t, Z_t)$ 和 $P_{t+\Delta t}^w(X_{t+\Delta t}, Y_{t+\Delta t}, Z_{t+\Delta t})$ 分别表示 $t$ 时刻和 $t+\Delta t$ 时刻该车辆的关键点 $P_t$ 和 $P_{t+\Delta t}$ 的世界坐标。将关键点的世界坐标与帧间隔时间差代入式(1)即可得到车辆的速度。显然,在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,得到车辆在 $t$ 时刻的瞬时速度。

$$v_t = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sqrt{(X_{t+\Delta t} - X_t)^2 + (Y_{t+\Delta t} - Y_t)^2 + (Z_{t+\Delta t} - Z_t)^2}}{\Delta t} \quad (1)$$

针对高速公路入口的场景,本文通过基于空间位置的匹配区域对齐算法与基于模板匹配的车轮空间位移测量方法获取到合适的关键点及其位移,从而准确地测量出车辆的速度。

### 3.2 基于空间位置的匹配区域对齐算法

由于高速公路入口处的场地限制,相机不易获取到车辆的全景图片且车辆之间易产生遮挡,本文通过YOLOv3<sup>[16]</sup>在图像中检测到的车轮区域(包括其像素坐标 $(x, y)$ ,宽 $w$ 和高 $h$ ),来选取这些车轮区域作为提取关键点的区域。将两帧图像中的车轮区域进行匹配,为后续模板匹配获取关键点对做准备。

在车辆慢速行驶的情况下,由于帧间隔的时间很短,反映在实际场景中就是车轮在帧间隔的时间内的位移很小,那么可以考虑使用交并比(Intersection over Union, IOU)<sup>[17]</sup>来实现车轮匹配。在当前帧中某个车轮区域与上一帧中该车轮区域的IOU大于0,那么认为是同一个车轮。通过实验发现,一帧图像中某车轮与其最近车轮之间的车轮中心距大于 $3w/2$ 时,那么使用IOU匹配可以在相邻帧中成功关联唯一车轮,其中 $w$ 为车轮区域的宽。

如图1所示,当A车轮区域与上一帧中A'车轮区域在同一张图片中时,两个区域的IOU大于0,即可判定A车轮关联于A'车轮。

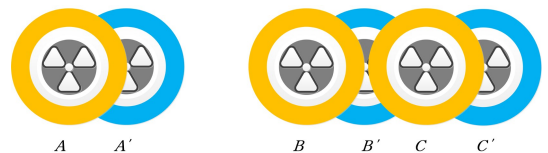


图1 车轮 IOU 重叠图

Fig. 1 Overlapping IOU of wheels

但是,对于大货车而言,常常会出现2个或3个车轮相连的情况,导致当前帧的某个车轮区域与上一帧中不止一个车轮区域的  $IOU$  大于0,从而无法直接确认与该车轮关联的车轮。如图1所示, $C$ 车轮与 $B'$ 车轮和 $C'$ 车轮都有重叠,那么就无法确定与 $C$ 车轮关联的是 $B'$ 车轮还是 $C'$ 车轮。由于在不同的时刻受车轮位置关系的影响可能会出现  $IOU(C, B') \geq IOU(C, C')$  或  $IOU(C, B') \leq IOU(C, C')$  的情况,因此无法通过设置  $IOU$  值的大小来区分 $C$ 车轮应关联于 $B'$ 还是 $C'$ 车轮。

针对以上问题,本文提出了基于空间位置的匹配区域对齐算法 ZAlign。通过 YOLOv3 在图像  $f_t$  中检测到  $n$  个车轮区域(包含车轮的矩形区域),表示为  $O_t = \{o_t^1, o_t^2, \dots, o_t^n\}$ 。对  $O_t$  中的车轮区域按照车轮间距进行分组,全部车轮区域的分组结果可表示为  $G_t = \{g_t^1, g_t^2, \dots, g_t^k\}$ 。显然,  $|G_t| \leq |O_t|$ , 即车轮组的数量不大于车轮总数。

假设车辆逐渐驶入目标检测区域,根据目标检测得到前后相邻两个车轮的中心点间距  $L$  进行车轮区域分组:若  $w \leq L \leq 3w/2$ , 则将当前车轮区域加入上一个车轮区域所在的组;若  $L > 3w/2$ , 则新增一个车轮组,并将后检出的车轮放入新增组中。

分组之后,利用组与组进行  $IOU$  匹配获得车轮组之间的关联关系,如式(2)所示:

$$ZAlign(f_t, f_{t+\Delta t}) : \langle \{G_t, G_{t+\Delta t}\} | g_t^i = g_{t+\Delta t}^i, g_t^i \in G_t, g_{t+\Delta t}^i \in G_{t+\Delta t}, \langle G_t, G_{t+\Delta t} \rangle \in f_t \times f_{t+\Delta t} \rangle \quad (2)$$

通过车轮组限制了关键点的匹配区域,以便下一步准确获取代表车辆位移的关键点。

基于空间位置的匹配区域对齐算法如算法1所示。首先初始化车轮组关联关系的集合,利用 YOLOv3 对输入图片进行目标检测,接着对目标检测结果的车轮区域进行分组,然后利用车轮组进行  $IOU$  匹配,从而获取到车轮组的关联关系。

#### 算法1 基于空间位置的匹配区域对齐算法

输入:视频帧  $\{f_t, f_{t+\Delta t}\}$

输出:车轮组的关联关系 res

1. Initialize res =  $\emptyset$
2.  $O_t \leftarrow YOLO(f_t)$
3.  $O_{t+\Delta t} \leftarrow YOLO(f_{t+\Delta t})$
4. for i in range(1,  $O_t$ .size()) do
5.  $L \leftarrow x\_distance(o_t^{i-1}, o_t^i)$
6.  $\langle G_t, G_{t+\Delta t} \rangle \leftarrow Group(O_t, O_{t+\Delta t}, L)$
7. for each pair  $G_t \times G_{t+\Delta t}$  do
8. if  $(IOU(g_t^i, g_{t+\Delta t}^i)) > 0$
9. res.add( $g_t^i, g_{t+\Delta t}^i$ )
10. return res

### 3.3 基于模板匹配的车轮空间位移测量方法

当获取到车轮组的关联关系  $\langle G_t, G_{t+\Delta t} \rangle$  时,受目标检测结果的影响,车轮组的坐标之间不能达到像素级别的关联。通过基于模板匹配的车轮空间位移测量方法,在车轮组  $g_{t+\Delta t}^i$  所在区域中获取替代车辆的关键点  $P_{t+\Delta t}$ ,在  $g_t^i$  所在区域找到与  $P_{t+\Delta t}$  关联的  $P_t$ 。

利用模板匹配获取用来测量位移的关键点的坐标。模板

匹配是一种模式识别方法,用于研究某一特定对象的图案在图像中的位置,进而识别对象<sup>[18]</sup>。模板指一幅已知的小图像,模板匹配指在一幅图像中寻找与模板最为匹配的目标,从而获取该目标的位置坐标。在车辆行驶过程中,车辆特征是不会发生改变的,应用模板匹配可以获取关键点的前后位置坐标,以测量位移。

#### 3.3.1 模板选择

在进行模板匹配之前,需要选择用来测量位移关键点的模板。每两帧之间,需要从  $G_{t+\Delta t}$  中选取一个车轮组来选择模板,相应地从  $G_t$  选取关联的车轮组来构造匹配区域。假设车辆是从右向左行驶,为了保证每次车轮在前后两帧中都存在,本文选取所有车轮组中最左侧(即  $x$  坐标最小)的车轮组作为目标车轮组。

车辆行驶过程中,车轮转动会使得轮毂的花纹变换,若模板图像包含轮毂花纹,则会导致模板与欲匹配区域中模板区域的相似程度降低,从而影响模板匹配结果的准确性。由目标检测得到的车轮目标为矩形,中间车轮部分会因为转动产生变化,而左上角与右上角的变化很少。

根据实际场景获取到的数据情况,车辆在图像帧中从右向左行驶(双目摄像机放置在车辆前进方向左侧),本文最终选取当前帧中最左侧的车轮组  $g_{t+\Delta t}^i$  左上角  $60 \times 60$  像素大小的图像作为模板。该位置区域包含小部分车身区域、车轮到车身的过渡区域以及轮胎的小部分区域,由于其包含较多的特征且这些特征在相邻帧中保持稳定,本文最终选取该位置区域作为获取测量位移关键点的模板,记作  $\mathcal{T}_{m \times n}$ ,相应地,将上一帧中的车轮组  $g_t^i$  作为待匹配区域  $Z_{m \times n}^{g_t^i}$ 。

#### 3.3.2 模板匹配

利用当前帧的模板与上一帧的待匹配区域进行模板匹配。设  $\mathcal{T}_{m \times n}$  为  $m$  行  $n$  列的模板,将  $\mathcal{T}_{m \times n}$  在  $Z_{m \times n}^{g_t^i}$  上逐像素滑动搜索,在滑动过程中被模板覆盖的区域为待匹配子区域  $Z_{m \times n}^{g_t^i}$ 。那么,模板匹配的本质就是在待匹配区域  $Z_{m \times n}^{g_t^i}$  内找到一个像素点,设其坐标为  $(x, y)$ ,使得  $Z_{m \times n}^{g_t^i}$  与  $\mathcal{T}_{m \times n}$  的像素总体归一化平方差最小,如式(3)所示:

$$(x, y) = \operatorname{argmin}_{(x, y) \in Z_{m \times n}^{g_t^i}} \left[ \frac{\| \mathcal{T}_{m \times n} - Z_{m \times n}^{g_t^i} \|}{\sqrt{\| \mathcal{T}_{m \times n} \| \cdot \| Z_{m \times n}^{g_t^i} \|}} \right] \quad (3)$$

其中,  $(x, y)$  为与模板相似度最高的待匹配子区域的坐标。对当前帧和上一帧进行灰度化,然后进行归一化的平方差匹配,选取模板在当前帧中的坐标与上一帧中的匹配结果坐标为一组关键点。

#### 3.3.3 速度测量

在模板匹配之后,可以获取到当前帧关键点的像素坐标以及上一帧关键点的像素坐标为  $P_{t+\Delta t}(x_{t+\Delta t}, y_{t+\Delta t})$  和  $P_t(x_t, y_t)$ 。每一组关键点对应一组位移,利用双目相机获取到视差图后,通过双目视觉公式(式(4))将关键点的像素坐标转换为世界坐标,从而计算出实际位移。其中,  $B$  为双目相机的基线距离,  $f'$  为左相机的焦距,  $(u, v)$  为所求世界坐标对应的像素坐标,  $d_p$  为  $(u, v)$  的视差,  $(c_x, c_y)$  为左相机光心的像素坐标。

$$\begin{cases} Z = \frac{f' \cdot B}{d_p} \\ X = \frac{u - c_x}{f'} \cdot Z \\ Y = \frac{v - c_y}{f'} \cdot Z \end{cases} \quad (4)$$

使用  $P_{t+\Delta t}$  和  $P_t$  计算出来的世界坐标为  $P_{t+\Delta t}^w(X_{t+\Delta t}, Y_{t+\Delta t}, Z_{t+\Delta t})$  和  $P_t^w(X_t, Y_t, Z_t)$ 。将两个不同时刻的关键点的世界坐标与间隔时间差代入速度计算公式(式(5))即可计算出车辆的速度。

$$v_t = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{Euclid(P_{t+\Delta t}^w, P_t^w)}{\Delta t} \quad (5)$$

## 4 基于双目视觉的车辆速度测量方法

### 4.1 实验方法

本文采用某高速公路入口收费站的视频数据作为实验数据集,其中包括 1000 余辆大货车的视频数据,30000 张车轮图片。在采集数据的同时使用高精度手持式雷达测速仪对车辆的实际速度进行记录,其中速度为 5~10 km/h 的车辆有 732 辆,速度为 10~20 km/h 的车辆有 458 辆。

对车轮图片中的车轮目标进行标注,将标注结果的 80% 作为训练集,20% 作为测试集。使用 YOLOv3 模型对训练集进行训练,获得准确率达到 98.97% 的车轮检测模型。利用该模型对现场图片进行目标检测,从而得到车轮集合。

实验选用的设备包括计算机一台、双目相机一台。计算机的配置为: Intel Core(TM) i5-8400 CPU 2.80 GHz, 8GB 内存, Ubuntu 16.04 系统。双目相机的配置为: 分辨率 1280 \* 720, 像素尺寸 3.75 \* 3.75  $\mu\text{m}$ , 基线 120.0 mm, 焦距 2.45 mm, 1.9~3.5 W@5 V DC from USB。

车辆的速度测量问题可以看作是一个回归问题。为了验证本文提出的基于空间位置的匹配区域对齐算法,采用匹配时间和匹配准确率两个指标来衡量匹配结果。车辆测速结果的评价指标为均方根误差和决定系数。其中,均方根误差用来衡量整体测速方法的测量值与真实值之间的偏差;决定系数用来反映整体测速方法,说明回归问题的拟合优度。

### 4.2 实验结果与分析

由于速度会影响区域匹配的结果,为了更好地验证本文提出的基于空间位置的匹配区域对齐算法,对数据进行分组,分为 5~10 km/h 和 10~20 km/h 两组。对两组数据采用 IOU 匹配和区域对齐算法进行区域匹配,根据匹配结果统计匹配的样本个数和匹配所需时间,计算并比较二者的匹配准

确率,统计结果如表 1 所列。

表 1 区域匹配实验结果对比

Speed/(km/h)	Algorithm	Number of correctly/wrong matched	Average time cost/ms	Accuracy/%
5~10	IOU	684/48	27	93.44
	Region alignment	719/13	35	98.18
10~20	IOU	389/69	26	84.93
	Region alignment	448/10	33	97.76

根据区域匹配实验结果可知,当车辆速度为 5~10 km/h 时,直接通过 IOU 匹配的匹配结果准确率为 93.44%,略低于区域对齐算法的匹配结果准确率 98.18%;当速度加快到 10~20 km/h 时,后者方法匹配结果的准确性明显高于前者。在两个车速范围中区域对齐算法的匹配准确率均优于 IOU 匹配的匹配准确率。以上结果表明,区域对齐在一定程度上解决了多车轮相连导致的错误匹配问题。尤其当速度加快时,两种方法匹配准确率的差值进一步扩大。由于速度加快使多车轮相连的情况更容易产生 IOU 匹配错误的问题,与实际情况相符。

对于平均匹配时间,两个速度区间中区域对齐算法的平均匹配时间略高于 IOU 匹配的平均时间,每次匹配平均多花费 7~8 ms。这是由于区域对齐算法增加了分组操作,扩大了匹配区域,从而增加了运算量,但仍然满足高速公路入口收费站的实时测速要求。

为了衡量本文测速方法的测量结果,将雷达测速仪测量的结果视为实际速度。根据匹配结果,进一步计算出速度。将实际速度、测量结果进行对比,在 10~20 km/h 的车速范围内,将本文方法与特征点时序空间匹配<sup>[14]</sup>测速结果进行对比。整体实验结果及性能分析如表 2 所列,部分测速结果及误差分析示例如表 3 所列。

表 2 整体测速结果及性能分析

Table 2 Overall speed measurement results and performance analysis

Speed/(km/h)	Algorithm	RMSE	R <sup>2</sup>
5~10	IOU+Template	0.79	0.40
	Region alignment+Template	0.61	0.65
10~20	IOU+Template	1.26	0.32
	Region alignment+Template	0.65	0.67
	Time series space matching of feature points <sup>[14]</sup>	1.17	0.79

表 3 实际场景部分车速测量结果及误差分析

Table 3 Measurement results and error analysis of part of vehicle speed in actual scene

Actual speed/(km/h)	IOU+Template			Region alignment+Template		
	Measuring speed/(km/h)	Absolute error/(km/h)	Percentage error/%	Measuring speed/(km/h)	Absolute error/(km/h)	Percentage error/%
9.8	8.82	0.98	10.00	9.12	0.68	8.32
7.8	8.45	0.65	8.33	8.36	0.56	7.24
7.6	8.48	0.88	11.56	8.20	0.60	7.87
14.2	12.29	1.91	13.45	13.13	1.07	7.54
8.4	7.45	0.95	11.30	7.71	0.69	8.24
9.1	8.25	0.85	9.34	8.60	0.50	5.57
16.4	14.29	2.11	12.9	15.00	1.40	8.53
8.5	7.69	0.81	9.53	7.89	0.61	7.23

根据整体的测速结果可知,当速度加快时,IOU匹配与模板匹配结合测速的均方根误差由0.79增大到1.26,表示速度加快会导致该方法测速的结果与真实值偏差变大;而区域对齐与模板匹配结合测速的均方根误差由0.61增大到0.65,表示速度加快对该方法测速的结果影响较小,测速结果较为稳定。在两个速度范围中,区域对齐与模板匹配结合测速的均方根误差均小于IOU匹配与模板匹配结合测速的均方根误差;在10~20km/h速度范围内,区域对齐与模板匹配结合测速的均方根误差也小于特征点时序空间匹配测速的均方根误差,这表明区域对齐与模板匹配结合的测速方法的稳定性更高。通过对均方根误差进行对比表明,在速度较快的情况下会导致IOU匹配对多车轮相连区域的匹配区域选择错误,从而进一步影响通过模板匹配计算测速的结果,而区域对齐方法受此影响较小;对于特征点时序空间匹配而言,复杂场景下匹配的错误特征点会在一定程度上干扰速度测量的稳定性,而区域对齐与模板匹配结合的测速方法则更加稳定。

当车速范围为5~10km/h时,IOU匹配与模板匹配结合的方法的决定系数为0.40,当车速范围为10~20km/h时,该方法决定系数下降为0.32,表明IOU匹配与模板匹配结合的方法对于测速问题的拟合优度较差。在不同速度范围时,区域对齐与模板匹配结合测速方法的决定系数均大于0.6,即对于测速问题的拟合优度较好。特征点时序空间匹配测速的决定系数为0.79,拟合优度更佳。以上结果说明,区域对齐与模板匹配结合测速的方法在测量误差与拟合优度上都优于IOU匹配与模板匹配结合测速的方法;虽然区域对齐与模板匹配结合测速的方法在拟合优度上略低于特征点时序空间匹配测速方法,但是在测量误差和测量稳定性方面效果更佳。

由实验结果可知,基于空间位置的匹配区域对齐算法在匹配准确性上有较好的表现,虽然耗费时间略长但是仍然满足实时测速要求。该算法与基于模板匹配的车辆空间位移测量方法结合后能够较好地解决车速测量的问题并且获得误差较小、更为稳定的测速结果。因此,使用基于空间位置的匹配区域对齐算法以及基于模板匹配的车辆空间位移测量方法能够很好地完成车速测量的任务。

**结束语** 本文提出了一种基于空间位置的匹配区域对齐算法以及基于模板匹配的车轮空间位移测量方法,可以有效地解决大货车多车轮相连、难以利用车轮目标进行位移测量的问题。通过选取恰当的模板进行模板匹配可以准确地测量出帧与帧之间车辆的位移,从而进一步获取速度。大量的实验数据表明,本文方法在高速公路入口收费站能够准确地测量出车辆的速度。

## 参 考 文 献

- [1] LIU D, DENG Z, WANG Y, et al. Method for Identifying Truck Traffic Site Clustering Using Weigh-in-Motion (WIM) Data [J]. IEEE Access, 2020(99):1.
- [2] CHEN N, LI Q, LI F, et al. A Data Processing Algorithm Based on Vehicle Weigh-in-motion Systems[C]// Ninth International Conference on Natural Computation. IEEE, 2014.
- [3] LIANG Y, LI K L, BI F H, et al. Research on LFMCW Radar Velocity Ranging Optimization System Based on FPGA[J]. Procedia Computer Science, 2020, 166: 187-194.
- [4] XIE Y S, SHEN G S, WU Q C. Vehicle-mounted radar velocity and distance measurement system based on MSP430[J]. Computer Engineering, 2011, 37(18): 236-239.
- [5] LI W T, TANG H, ZHOU J. Research on laser velocimeter for overspeed detection on highways [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(9): 149-158.
- [6] MAO X, INOUE D, KATO S, et al. Amplitude-Modulated Laser Radar for Range and Speed Measurement in Car Applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 408-413.
- [7] DEHNAVI M, ESHGHI M. FPGA based real-time on-road stereo vision system[J]. Journal of Systems Architecture, 2017, 81: 32-43.
- [8] ZHU J, YUAN L, ZHENG Y F, et al. Stereo Visual Tracking within Structured Environments for Measuring Vehicle Speed [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2012, 22(10): 1471-1484.
- [9] CAI S X. A vehicle speed-measuring system based on binocular stereo vision [D]. Hefei: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [10] LI M L. Intelligent measurement of vehicle speed trajectory based on binocular stereo vision [D]. Zhengzhou: Zhongyuan University of Technology, 2019.
- [11] JU Z Y, WANG C N, HE X L. Research on real-time detection algorithm of vehicle speed based on video images[J]. Application Research of Computers, 2017, 34(9): 2822-2824.
- [12] LI X, ZHOU Z, LI X, et al. Vehicle Segmentation and Speed Detection Based on Binocular Stereo Vision[C]// 2012 Eighth International Conference on Computational Intelligence and Security. IEEE, 2012: 369-373.
- [13] CZYZ J, RISTIC B, MACQ B. A Particle Filter for Joint Detection and Tracking of Color Objects[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(8): 1271-1281.
- [14] LIU W, ANGUELOY D, ERHAN D, et al. SSD: Single Shot Multibox Detector[C]// European Conference on Computer Vision. Cham: Springer, 2016: 21-37.
- [15] CHEN J, WANG J, MI C, et al. Speed measuring method at the highway toll-gate based on the analysis of the continuous images [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2019, 17(1): 79-84.
- [16] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An Incremental Improvement[J]. arXiv: 1804. 02767, 2018.
- [17] RAHMAN M A, WANG Y. Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation[C]// International Symposium on Visual Computing. Cham: Springer, 2016: 234-244.
- [18] YANG Y, MA T, DU S. Robust Template Matching with Angle Location Using Dynamic Feature Pairs Updating[J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105804.



**CHANG Zi-ting**, born in 1996, postgraduate, is a member of China Computer Federation. His main research interests include computer vision and so on.



**ZHAO Zhi-bin**, born in 1975, Ph.D., associate professor, is a member of China Computer Federation. His main research interests include big data management and query optimization, image processing, text analysis and so on.