

基于三维重建的交通流量检测算法

刘光耀 叶秀清 顾伟康

(浙江大学信息与通信工程研究所, 杭州 310027)

摘要 在智能交通系统中, 道路交通流量信息实时、有效的检测是交通信息系统的关键环节。固定相机的视频图象检测法具有诸多优点, 为此, 提出了一个基于知识的视频图象交通流量检测系统, 其中, 车辆的分割和识别是视频检测法的核心。根据车辆具有较大的运动惯性等运动规律, 在短间隔内, 可以近似认为车辆运动为刚体匀速直线运动。在这一条件下, 将刚体上的运动点重投影到道路平面, 则重投速度与该点的空间位置到路面的高度具有固定的比例关系。运动特征采用具有较好定位精度的边缘特征, 并拟合为直线进行运动跟踪匹配。在识别过程中, 先假定车辆的模型及其高度, 然后再根据重投速度, 重建车辆的三维空间结构, 进行基于知识规则的假设校验。试验结果表明, 该方法可以较好地解决车辆视频检测中的遮挡、粘连、阴影等情况。

关键词 计算机图象处理(520·6040) 三维重建 三维结构识别 智能交通系统 交通流量检测 规则检验
中图法分类号: TP391.4 U491.111-39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2003)06-0631-06

3D Reconstruct Based Traffic Flux Detection Algorithm

LIU Guang-yao, YE Xiu-qing, GU Wei-kang

(Institute of Information & Communication Engineering Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract In Intelligence Traffic System (ITS), the accurate detection of traffic flux at real time on road scene is very important steps. The still camera based video detection approach is one of the most important methods with much superiority to others. In this paper, a knowledge based video traffic flux detection system is presented. The traffic segmentation and recognition is the main algorithm of this system. According to the knowledge of vehicles' movement, vehicles have huge inertia, we assure that vehicles are moving at straight line in short period. With this premise, we reproject the movement of features to the road plane. The reprojected velocity of a points of the vehicle have a proportion with the height to the road plane. In the detection system, the Canny edge feature was used to fit a straight line and to match in image sequences. In the recognition stage, we assign a vehicle model and the height to the type of vehicle and reconstruct the 3D space model and verify this model with rules. The experiment results show that this algorithm is better than previous method to detect vehicle in congest, occlusion and shadow cases.

Keywords Computer image processing, 3D restructure, 3D structure recognition, Intelligence traffic system, Traffic flux detection, Rules based detection

0 引言

在智能交通系统 ITS (Intelligent Transport System) 中, 如何实时、有效地从道路场景中得到道路交通的流量、行驶速度、占道率、车辆类型等道路状况信息, 是一个很重要的环节。目前常用的道路交

通状况信息的采集方法主要有在路面下预埋感应线圈的磁环检测方法; 在路旁安装摄像机的视频图象检测方法; 雷达或红外线检测等 3 种方法。采用图象检测方法具有以下明显的优越性: 检测的覆盖范围大, 检测的参数多; 安装简便, 维护方便, 不破坏路面, 工程造价低; 适用面广, 可适用于路段、交叉路口等; 可以适应多种气候条件等。由于视频检测方法的

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(600025)

收稿日期: 2002-08-15, 改回日期: 2002-12-04

诸多优点,基于视频图象检测方法一直是人们研究的热点。

基于图象检测的方法有多种检测技术,按检测的技术可以分为基于二维图象特征的检测方法和基于运动信息三维恢复的检测方法^[1]。二维图象特征的检测方法主要是检测运动的图象块,将当前图象与背景图象相减,再将运动像素聚合为运动区域,经运动跟踪后分割为单个的车辆区域。在车辆比较少的环境下,基于二维图象特征的检测方法能够得到很好的检测效果。但是在道路拥挤时,车辆间有遮挡,或是有阴影等道路场景较复杂时,基于二维特征的检测方法的检测效果往往较差。由于工程上的要求,摄像机安装高度不能很高,一般在 6~9m 之间,并且常安装于道路的两侧,在这种情况下,车辆间遮挡,粘连情况十分严重,采用基于二维特征的检测方法,检测效果很难满意,而基于三维运动信息重建的方法却可以检测到更多的信息,并能很方便地利用车辆的先验知识^[1,2]。基于运动信息三维恢复的检测方法是首先检测图象特征的运动信息,然后由运动信息恢复刚体的三维结构^[3],即 SFM (Structure From Motion),再根据三维信息判断车辆的类型、空间位置以及运动速度等信息。但是在固定单一相机的情况下,要根据车辆图象特征的运动信息完全恢复车辆三维空间信息有很大的困难,因为在刚体做平移运动时,由一个相机只能恢复出刚体的相对结构信息,却没法恢复出刚体的真实三维空间信息。然而车辆在道路上的运动实际情况是:车辆绝大部分时间是在做平移运动或近似的运动。在实时或短间隔内,可以认为车辆的运动为匀速平移运动。经过研究发现,在平移运动情况下的三维运动恢复中,如果已知刚体某一点的高度和路面重投影速度,就可以完全恢复出刚体的三维结构信息。由此,提出了一种新的车辆检测方法,即先将运动特征的速度投影到路面上,在车辆的识别过程中,将车辆假定为某个高度,然后根据路面投影速度重建车辆的三维结构,再根据三维信息进行车辆的特征聚类与识别、校正等步骤,检测车辆的类型、位置、速度等有关参数,进而计算出各种交通流量信息参数,从而得到一种基于假定高度的三维重建的车辆检测方法。

1 系统描述

基于三维运动重建的交通流量参数检测系统,主要由运动特征检测、车辆分割与识别、运动车辆跟

踪和系统初始化等 4 个功能模块组成。

其中,第 1 个模块用于直线边缘的检测和运动跟踪;第 2 个模块用于运动特征的分割聚类和车型识别;第 3 个模块用于识别车辆跟踪;第 4 个模块用于基于初始化相机高度以及和道路平面之间的关系。其系统结构框图如图 1 所示。

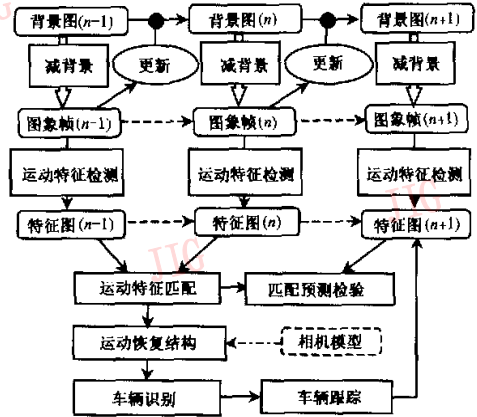


图 1 车辆检测系统结构

2 空间点的重投影速度与高度的关系

在实际的道路场景中,车辆的运动是在已知的路面上进行的,即车辆的运动是平行于路面的运动。因此可以大大地降低问题的复杂度。同时,由于车辆的质量较大,车辆的惯性也很大,在实时或近实时的图象处理过程中,在较短时间间隔内,可以近似地认为车辆的运动为匀速直线运动,而且不会产生很大的误差,因此假定车辆的运动为匀速直线运动,并基于该假定提出了一种新的车辆推理识别方法,即假定高度的三维刚体运动重建方法。

图象坐标系与世界坐标系及路平面重投影坐标之间的关系如图 2 所示, $OXYZ$ 为世界坐标系,路平面为 OXY 平面, oxy 为图象坐标系, O_c 为相机的光心位置。

对于三维空间的点 P ,光心 O_c 与点 P 连直线,与图象平面交于点 q ,与路平面交于点 Q ,称 Q 为 P 的重投影位置,点 O_w 为光心垂直于路平面的交点位置, H 为光心到路平面的高度, h_p 为点 P 到路平面的垂直距离。假定相机的成像模型为小孔成像,则由投影关系,路平面上的重投影点 $Q(X,Y)$ 与图象上的点 $q(x_i,y_i)$ 之间有如下关系:

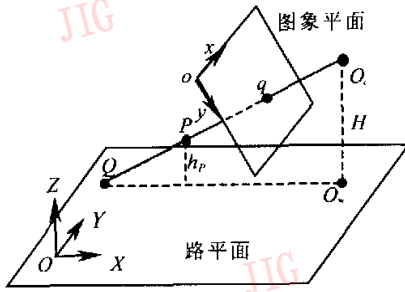


图 2 摄像机的透视投影关系

$$\begin{cases} X = \frac{a_1x_i + a_2y_i + a_3}{a_7x_i + a_8y_i + 1} \\ Y = \frac{a_4x_i + a_5y_i + a_6}{a_7x_i + a_8y_i + 1} \end{cases} \quad (1)$$

其中, a_1, a_2, \dots, a_8 为变换系数, 可以由定标时的 $n(n \geq 4)$ 个采样点的世界坐标和对应的图象坐标之间的对应关系求解得到。在相机定标时, 同时需要确定点 $O_w(X_w, Y_w)$ 的位置。

对于图象平面中的任意点, 在路平面上都有一个重投影点与之对应, 并与图象平面的成像位置有关系(式(1)), 其对应的三维空间中的点在重投影线 O_cQ 上。由此可以根据点在图象平面上的位置与运动矢量, 计算出其重投影点在路平面上的位置与运动矢量。

如图 3 所示, 点 Q 为点 P 在路平面上的重投影点, 点 O_w 为光心 O_c 在路平面上的投影点, P_R 为点 P 在路平面上的投影, P_{RX}, P_{RY} 分别为点 P_R 在 O_wZX 和 O_wZY 平面上的投影位置, $O_cP_xQ_x$ 为直线 O_cPQ 在 O_cXZ 平面上的投影, $O_cP_yQ_y$ 为直线 O_cPQ 在 O_cYZ 平面上的投影。如果已知点 P 的高度 h_p , 则可以根据相似三角形, 有

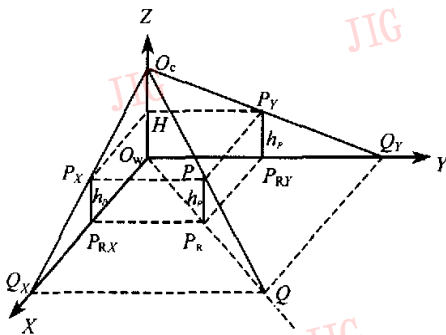


图 3 由高度计算空间位置的三角关系

$$\frac{H - h_p}{H} = \frac{\overline{O_wP_{RX}}}{\overline{O_wQ_x}} = \frac{\overline{O_wP_{RY}}}{\overline{O_wQ_y}} \quad (2)$$

其中, $\overline{O_wQ_x}$ 表示线段 O_wQ_x 的长度。

由式(2)得知, 如果已知高度 h_p , 则可以计算出点 P_{RX} 和 P_{RY} 到点 O_w 的长度, 进而计算出点 P 的三维空间位置。

下面考虑三维世界坐标系下, 空间的点投影到路平面的位置与该点的空间位置间的运动关系。如图 4 所示, O_c 点为相机的光心位置, 点 P 为三维空间的点, 点 P 按匀速直线由 $P(t_1)$ 点运动至点 $P(t_2)$ 。点 Q 为点 P 在路平面上的重投影位置, P_0, Q_0 分别为直线 $P(t_1)P(t_2), Q(t_1)Q(t_2)$ 与 $X-Z$ 平面的交点。点 P_0 到点 $P(t_1)$ 的距离为 $dp(t_1)$, 点 P_0 到点 $P(t_2)$ 的距离为 $dp(t_2)$, $dq(t_1)$ 和 $dq(t_2)$ 的定义类似, 则由相似三角形的关系得

$$\frac{dp(t_1)}{dq(t_1)} = \frac{L - l_p}{L} = \frac{dp(t_2)}{dq(t_2)} \quad (3)$$

和

$$\frac{L - l_p}{L} = \frac{H - h_p}{H} \quad (4)$$

则由式(3)和(4)可得

$$\frac{dp(t_2) - dp(t_1)}{dq(t_2) - dq(t_1)} = \frac{H - h_p}{H} = \frac{v_p}{v_q} \quad (5)$$

其中, v_p, v_q 分别为点 P 和点 Q 的运动速度, h_p 为点 P 到路平面的高度, H 为光心到路平面的距离, 则由式(5)可以得到以下的结论:

结论 1 三维空间中, 作匀速直线运动的点 P , 其重投影到路平面点 Q , 点 Q 的速度与该 P 点的高度有关, 重投影点 Q 的运动速度称为点 P 的重投影速度。对于同一个刚体上相同高度的点, 其路平面重投影速度是相同的。对于不同高度的点, 高度越高, 其路平面重投影速度越大。

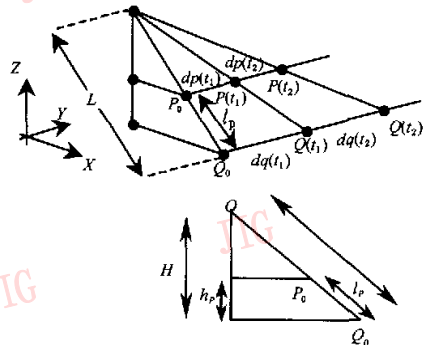


图 4 三维空间点的位置与重投影位置关系

由式(1)、式(2)和式(5)可知,对于做平移运动的刚体,如果已知其中任意一点离路平面的高度,那么就可以由重投影位置和速度求出刚体上所有运动特征点的三维空间位置和结构。

3 边缘特征检测与跟踪

如何准确得到图象特征的运动速度,是三维结构运动恢复方法的基础。图象特征运动速度的求解有连续和离散两种基本方法。基于光流场的连续方法由于计算量大,很难满足交通流量检测的实时性要求,故采用基于特征检测与跟踪的离散方法来检测图象特征的运动速度。

在图象特征中,边缘特征是很重要的视觉感知线索,边缘特征一般定义为局部灰度值发生剧烈变化的位置。边缘特征常常对应目标的轮廓或边界线。对于车辆图象,具有很多重要的边缘特征,如车窗、车顶、保险杠等,而且边缘特征容易提取,稳定性好,定位精度高。因此,在该交通流量参数检测系统中,采用 Canny 边缘检测方法^[4],将边缘点连接为直线段,然后在前后连续的 $n-1, n$ 两帧图象中进行直线段的匹配跟踪,同时,假定车辆的运动为匀速直线运动,从而可以在随后的一帧图象 $n+1$ 帧中对匹配的直线段进行验证。

直线段匹配方法采用文献[5]提出的方法,定义了几个特征来描述直线段的性质。用直线的方向、长度、亮度、对比度等进行直线的匹配。匹配函数定义为

$$F(L_a, L_b) = \sum W_i D_i(L_a, L_b) \quad (6)$$

其中, $D_i(L_a, L_b)$ 为直线段 L_a, L_b 的第 i 个特征的差异, W_i 为第 i 个特征差异的权重,并且有 $W_i > 0$ 和 $\sum W_i = 1$ (对直线性质的详细描述请参见文献[5])。

匹配函数的数值越小,匹配程度越高。将匹配函数的数值小于阈值的直线段对,作为候选直线段对,同时,根据式(1)计算出候选直线段对的路面重投影位置,并计算重投影速度,估计直线段在第 $n+1$ 帧中位置,然后再验证是否可以在估计位置找到匹配的直线段(如图5所示)。

经过直线段匹配和验证过程后,根据直线段的对应关系,可以计算出特征点在路面上的重投影速度。根据重投影速度,就可以进行三维重建和车辆分

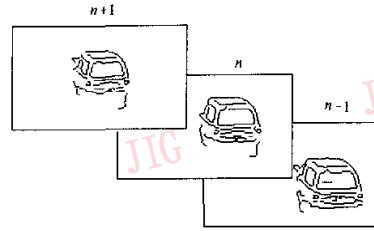


图5 直线段匹配与验证

割与识别。

4 假定高度的三维重建与车辆检测

在通常情况下,汽车是在路面上行驶的,即汽车的车轮与路面是相互接触的,也即车轮与路面的接触点的高度为0。如果能够精确地检测到接触点及其运动速度,就可以重建车辆特征的三维位置,进而完成车辆的识别与定位。然而由于成像过程中的模糊现象、车辆间的遮挡,以及接触点的特征太小等原因,不可能精确检测车轮与路面的接触点在图象上的位置与运动矢量。

通过研究视频图象发现,由于相机的安装位置、光源等因素,车辆图象的车顶、背面等特征很明显,而且不易受噪声和模糊等因素的影响,同时,对于车辆,车顶具有最高的高度,也即具有最大的路面重投影速度,因此,通过检测车顶的位置来检测车辆是可行的。然而这种方法却存在另一个问题,即对于待检测的车辆,车辆的真实高度是未知的。为了解决这个问题,采用一个新的三维车辆识别算法,即在车辆的假设检验过程中,将车顶的高度假定为一个确定的高度,根据假定的车顶高度,计算车辆的三维空间位置,进而检测车辆的宽度、高度以及车背面、侧面是否满足假定车辆所必须满足的规则,从而检测出车辆的类型与空间位置。

显然,假定的高度与特征的三维真实高度间存有误差,由式(2)、式(5)及图3可知,当假定高度与真实高度有误差 Δh_p 时,该点仍在投影线上,该点到光心的距离的误差与真实的距离之比为 $r = \Delta h_p / H$ 。如果以假定高度为基准点,由式(5)可知,对于刚体上的其他点,其误差比也为 r 。因此有结论:

结论2 对于同一刚体上的点,以假定高度为基准计算出的三空间位置,其到光心的距离的误差比与假定高度的误差比相同。

即将基准假定为不同的高度,计算出来的三维刚体结构,空间位置关系没有改变,只是位置与尺寸按同一个比例尺度进行变化。

在车辆的识别过程中,可以将有关车辆的知识应用到车辆的识别过程中。根据先验知识,对不同类型的车辆,其长度、高度和宽度均在确定的范围之内,而且变化不大,例如对于轿车,其高度一般在1m左右,宽度在2m左右,而对于大型车辆,其高度在2.8~3.5m之间,宽度在3m左右。因车顶具有最大的投影速度,所以容易检测。当有新的车辆进入相机的视场,在跟踪几帧图象后,就可以得到边缘点的重投影速度,并可检测到最大投影速度,这时,根据运动特征的位置等信息,对最大投影速度的边缘特征假定一个高度和车型,重建三维位置,并根据车型限定长、宽、高的范围来进行检测。基于知识的三维车辆识别算法如下:

- (1) 检测图象中特征的运动方向和运动速度;
- (2) 将图象中的特征运动重投影到道路平面上;
- (3) 将图象位置相近的特征聚类为待检测车辆;
- (4) 检测具有车顶特性的特征(重投影速度较大,具有水平特性等);
- (5) 假定车辆的类型(大、中、小车),并将假定车辆类型的高度赋给车顶;
- (6) 根据假定高度,计算三维空间位置;
- (7) 对三维结构进行知识规则检验,验证假设的正确性,对非车辆运动作拒绝决策;
- (8) 对检测出的车辆,计算其运动参数、位置参数等运动信息。

该算法的重点在于,在假定车辆类型的情况下,根据三维结构重建的结果,检验车辆的三维结构是否满足知识规则约束。为了有效地检验假设的正确性,需要有许多知识规则,下面是一些重要的检验规则:

- (1) 车辆的长、宽、高是否在有效的尺寸范围之内。
- (2) 车辆的宽、高比是否在有效范围之内。
- (3) 是否可以聚类为有效的平面,如车顶面、车背面、侧面等。
- (4) 车的底部特征是否在有效的范围之内。
- (5) 阴影处理规则。
- (6) 遮挡推理规则。

经过假设检验过程后,就得到了分割好的车辆三维运动速度和空间位置,系统根据分割的结果初始化跟踪模块,在跟踪模块中,采用区域的方法进行车辆跟踪,得到稳定的跟踪效果。

5 实验结果与结论

在实验过程中,对3种类型的实际交通场景进行了测试。3种交通场景分别为中等拥挤程度的交通流、具有长阴影的交通流和雪天的交通流场景。图象大小为 320×240 pixels,对时间的采样频率为10 frame/s。相机安装相对于运动车辆采用远离方式,即车辆初始进入图象视野时图象较大,然后渐渐驶离相机位置,如图6所示。相机的高度为7~9m,安装于车道侧边约3m处,交通场景中车辆的遮挡和粘连情况比较严重。检测的总时间约为1.5h,检测结果如表1所示。

表1 车辆检测结果

	雪天	长阴影	中等拥挤
检出车辆	784	1032	2478
车辆总数	843	1134	2816
正确率(%)	93	91	88



图6 道路场景

由实验结果来看,采用该方法可以较好地解决遮挡、阴影等因素的影响,检测到准确的交通流量信息。图7~图9是检测的结果图,可以看出,这种方法可以有效地分割部分遮挡和粘连的情况。



图7 检测的边缘图象



图 8 车辆的最大重投影速度

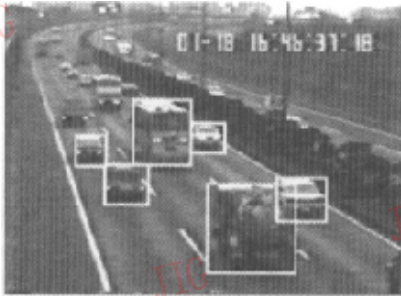


图 9 车辆检测结果图

基于假定高度的三维运动重建方法,可以较好地解决车辆视频检测中的遮挡、粘连、阴影等情况.但由于采用运动恢复的方法,边缘运动速度的误差对三维空间位置恢复的结果影响很大,导致有较大的检测错误.以后拟采用亚像素边缘检测技术和卡尔曼滤波方法检测边缘的运动速度.

参 考 文 献

- 1 Beymer D, Malik J. Tracking vehicles in congested traffic[A]. In: Proceeding of SPIE Transportation Sensors and Controls: Collision Avoidance, Traffic Management and Intelligence traffic system[C]. Boston, MA, USA, 1996, 2902: 8~18.
- 2 Tan T N, Sullivan G D, Baker K D. Model-based localisation and recognition of road vehicles [J]. International Journal of Computer Vision, 1998, 27(1): 5~25.

- 3 Weng Juyang, Huang T S, Narendra AHUJA. Motion and Structure from Two Perspective View: Algorithm, Error Analysis, and Error Estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 11(5): 451~476.
- 4 Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679~698.
- 5 Liu Yuncai, Huang T S. Determining straight line correspondences from intensity images[J]. Pattern Recognition, 1991, 24(6): 489~504.



刘光辉 1973年生,1999年获江苏理工大学硕士学位,现为浙江大学信电系博士研究生.目前研究方向为图象处理、计算机视觉、模式识别、机器学习.



叶秀清 现为浙江大学信息与通讯研究所教授.研究方向为计算机视觉、图象处理.



顾伟康 浙江大学信息与通信研究所教授,博士生导师.研究方向为计算机视觉、图象处理、模式识别、智能机器人.