

关键技术及材料

光流法在地铁车辆测速中的应用研究

吕红强¹, 黄涛¹, 聂兴家², 陈柯宇², 蔡正凯², 单奇²

(1. 中车南京浦镇车辆有限公司, 江苏 南京 210031;
2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 地铁车辆速度是列控系统的一项重要参数, 传统的地铁车辆测速方法存在一定的缺陷。文章利用图像处理中的光流法研究地铁车辆测速新方法, 提出了满足地铁车辆测速实时性和精度要求的快速光流计算方法。引入图像金字塔, 通过由粗到精、逐层细化的步骤求解大位移运动光流, 解决了LK光流法无法计算大位移运动的缺陷; 提出了将GPU用于光流计算, 实现图像特征点检测计算并行化, 显著提升光流计算速度; 设计了线路仿真软件进行测速仿真试验。结果表明, 基于图像金字塔的光流改进算法提高了大位移情况下光流估计精度, 基于GPU的光流并行计算有效提高了光流计算速度, 满足地铁车辆测速系统的实时性要求。通过搭建支撑平台, 并进行实际线路试验, 进一步验证了光流测速方法的可行性。

关键词: 地铁; 测速; 光流法; GPU加速; 实时性; 仿真

中图分类号: U231

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2022)02-0129-06

Application of optical flow method in metro train speed measurement

LYU Hongqiang¹, HUANG Tao¹, NIE Xingjia², CHEN Keyu², CAI Zhengkai², SHAN Qi²

(1. CRRC Nanjing Puzhen Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210031, China;
2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Subway speed is an important parameter of train control system. The traditional subway speed measurement methods have some defects. In this paper, a new method of subway speed measurement by using the optical flow method in image processing was explored, and a fast optical flow calculation method to meet the requirements of real-time and accuracy of subway speed measurement was put forward. The image pyramid was introduced to solve the optical flow of large displacement motion through the method of coarse to fine and layer by layer refinement, which solved the defect that LK optical flow method could not calculate large displacement motion; GPU was used in optical flow calculation to realize the parallelization of image feature point detection and calculation, which significantly improved the speed of optical flow calculation; The line simulation software was designed for speed measurement simulation experiment. The results show that the improved optical flow algorithm based on image pyramid can improve the accuracy of optical flow estimation under large displacement, and the optical flow parallel calculation based on GPU can effectively improve the optical flow calculation speed and meet the real-time requirements of metro speed measurement system. The feasibility of the speed measurement method in this paper is further verified by building the machine support platform and carrying out the actual line experiment.

Keywords: metro train; speed measurement; optical flow method; GPU acceleration; real time; simulation

0 引言

作为综合交通运输体系下规模最大的铁路行业,

正面临着前所未有的机遇和挑战^[1]。地铁车辆运行过程中的速度信息是列控系统的重要参数之一, 对于获取地铁车辆运行状态, 保证地铁安全平稳运行具有重要

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51605393); 国家重大技术装备攻关工程项目(系列化中国标准地铁列车研制及试验)

通信作者: 单奇(1965—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为测控网络技术与系统集成; E-mail: 759173178@qq.com

的意义。目前应用较广泛的地铁车辆测速方法中主要有轮速法、多普勒雷达测速等,但是这些测速方法都存在一定的缺陷^[2]。譬如,轮速法测速精度受制于轮对空转、打滑、磨损等因素的影响;多普勒雷达测速的精度受仪器安装角度和周围测速环境影响较大,尤其在列车低速行驶时测速精度差。光流法在计算机视觉技术中占有重要地位,是研究者获取图像序列中目标运动信息的常见方法。随着计算机的数据处理能力显著提高,研究基于光流法的地铁测速技术成为可能。

近年,国内外学者对光流法进行了大量的研究。在国外,文献[3]为了克服基于张量的光流方法在计算大位移运动方面的局限性,提出由粗到精,通过金字塔变换将原始图像分成不同分辨率的图层。文献[4]利用加性因素和乘性因素减少运动不连续和光照变化对光流计算的影响。文献[5]针对由粗到精、多分辨率分层细化策略不适用非刚体运动的问题,提出了将变分法和匹配法相结合的方法,解决了非刚体的大位移运动在光流计算上的问题,并提高了计算精度和计算速度。在国内,文献[6]分析了光流场计算存在的问题,并进行了深入的研究,提出基于时间关联约束的Multi-vector图像滤波方法来提高光流计算精度等。文献[7]提出一种改进的LK算法,通过计算置信度因子和剔除不可靠的光流估计结果,进行邻域填充,以改善纹理欠丰富区域光流计算的效果。文献[8]将彩色图像的色彩信息引入光流计算,提出了基于色彩饱和度的梯度计算的彩色光流计算方法,该算法提高了光流法对光照变化的鲁棒性。文献[9]通过建立噪声约束对光流计算基本方程进行修正,并使用变分法得到了在噪声环境下的光流计算方程,有效消除了图像噪声对光流估计准确性的影响。文献[10]为了提高光流计算效率和准确性,提出一种自适应动态伪特征点移除算法,在金字塔光流计算模型中动态移除伪特征点。文献[11]针对运动背景下难以有效检测出运动目标的问题,利用Shi-Tomasi角点检测法得到的图像角点作为金字塔LK光流法计算光流的像素点,有效地减弱了运动背景对目标光流计算的影响。

将光流法应用于地铁车辆测速具有一定的探索性,本文基于图像金字塔和GPU加速的光流法,可提高算法的执行速度,满足地铁车辆测速的实时性和准确性要求。

1 光流法

光流法是利用图像序列中像素在时间域上的变化和相邻帧之间的相关性寻找上一帧跟当前帧之间存在的对应关系,从而计算出相邻帧之间物体运动信息的一种方法。Gibson^[12]在1950年第一次提出:光流是空间物体的三维速度矢量在二维成像平面上的投影,可

以使用二维的光流场描述三维场景。

1.1 光流约束方程

假设像素点的灰度值在间隔很小的时间内保持不变,即灰度不变,光流约束方程为

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (1)$$

式中: I_x , I_y , I_t 分别为像素点的灰度值在 x 轴方向、 y 轴方向、时间 t 上的偏导数; u , v 分别为光流矢量在 x 轴和 y 轴上的分量。

1.2 LK光流法

为求解光流约束方程,需要建立其他约束条件,其中基于梯度的方法应用最广泛,最具有代表性的是LK光流法。LK光流法是在局部空间邻域上建立约束方程,假设在一个很小的空间邻域 Ω (大小为 $n, n \geq 2$) 内所有像素点的光流值一致,并且满足光流约束基本方程,对邻域 Ω 中的不同像素点赋予不同的权值。

其中,光流估计误差为

$$\varepsilon = \sum_{\Omega} W^2(i, j) (I_x u + I_y v + I_t)^2 \quad (2)$$

式中: ε 为光流估计误差; $W^2(i, j)$ 为像素点 (i, j) 的权重函数。

光流矢量为

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum W^2(i, j) I_x^2(x) & \sum W^2(i, j) I_x(x) I_y(x) \\ \sum W^2(i, j) I_y(x) I_x(x) & \sum W^2(i, j) I_y^2(x) \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -\sum W^2(x) I_x(x) I_t(x) \\ -\sum W^2(x) I_y(x) I_t(x) \end{pmatrix} \quad (3)$$

2 基于图像金字塔的大位移光流改进算法

针对LK光流法无法计算大位移问题,建立图像金字塔,对图像的尺度进行缩放,将大位移转化为小位移,满足LK光流法的约束条件。

基于图像金字塔的大位移光流改进算法的流程图如图1所示。

设计一组静态试验,用于检测在大位移情况下,LK光流法和基于图像金字塔的大位移光流改进算法对光流估计的准确性。具体做法为:选定一组图像,使用图像处理技术将图像整体向右平移固定像素,超出图像范围的部分填充于图像左边。

如图2所示,移动像素分别为20 pix、40 pix和60 pix,使用LK光流法和基于图像金字塔的大位移光流改进算法,进行光流估算图像位移。由图2可以看出,当图像位移为20 pix时,LK光流法在部分帧出现3 pix以上的误差,基于图像金字塔的大位移光流改进算法的计算误差不超过1 pix;当图像位移为40 pix时,LK光流法在部分图像误差超过10 pix,而基于图像金字塔的大位移光流改进算法的整体计算误差不超过2 pix;

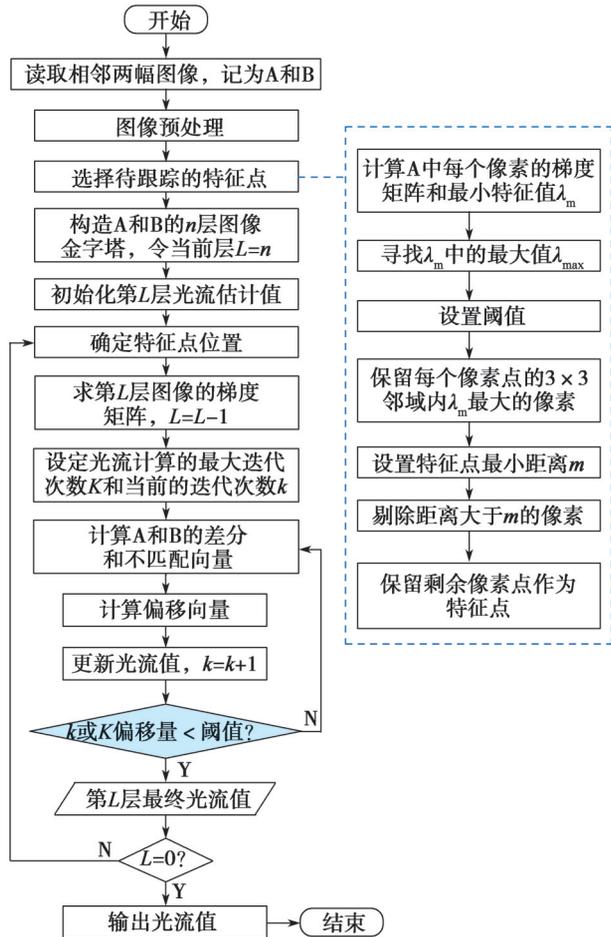
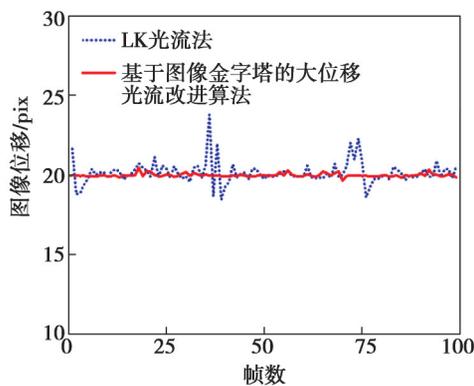
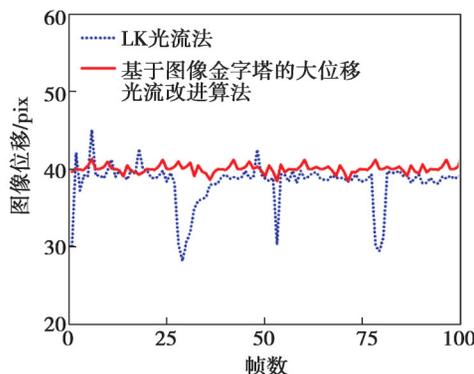


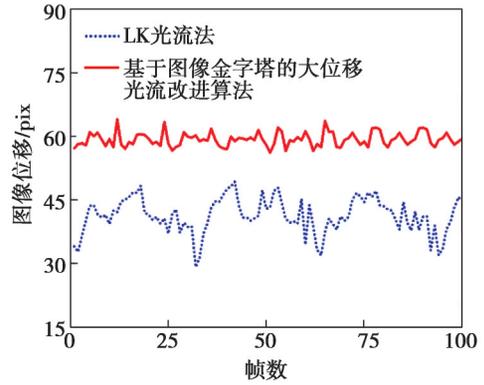
图1 基于图像金字塔的大位移光流改进算法流程图
Fig. 1 Large displacement optical flow improved algorithm based on image pyramid flowchart



(a) 移动 20 pix



(b) 移动 40 pix



(c) 移动 60 pix

图2 不同图像位移光流计算试验结果

Fig. 2 Experimental results of different optical flow computation of image displacement

当图像位移为 60 pix 时, LK 光流法的计算结果完全偏离实际位移, 而基于图像金字塔的大位移光流改进算法的计算误差不得超过 5 pix, 测试结果较为准确。由此可知, 基于图像金字塔的大位移光流改进算法可以有效地提高大尺度运动情况下的光流计算精度。

3 基于图像金字塔的光流法

GPU 具备强大的并行计算能力, 将光流法的复杂求解过程移植到 GPU 上并行计算, 整个算法的执行速度将大幅提高, 可以满足地铁车辆测速的实时性要求。本文提出的基于图像金字塔和 GPU 加速光流法的计算包括图像预处理、构造图像金字塔、图像梯度计算和光流计算 4 个部分, 这 4 部分在 GPU 上并行处理。算法流程图如图 3 所示。

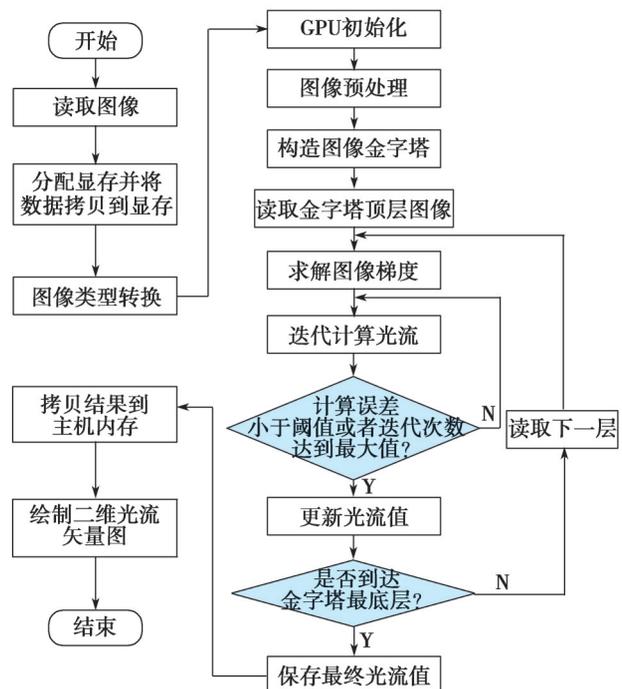


图3 本文光流法算法流程图

Fig. 3 Flow chart of optical flow method in this article

基于图像金字塔的大位移光流改进算法在使用GPU加速前和加速后,对不同分辨率图的光流计算结果如表1所示。由表1可见,本文提出的光流法对于不同分辨率图像的光流计算速度均有明显提高。

表1 GPU加速前后耗时对比

Table 1 Comparison of time consumption before and after GPU acceleration

图像分辨率	GPU加速前耗时/ms	GPU加速后耗时/ms	加速比
360×270	18.54	3.42	5.42
720×540	23.36	4.05	5.77
1 440×1 080	87.71	8.55	10.26

4 线路仿真试验

线路仿真软件设计的思路为:利用OpenCV图像处理库对轨道图像中的目标进行平移,超出图像范围的部分用于填充图像;根据平移像素大小,合成不同的图像序列,模拟地铁车辆在实际运行过程中相机拍摄的图像。标准车速为根据合成图像的位移计算得出的速度,然后将使用光流法得到的速度与标准车速进行对比,验证算法的正确性。其中,光流速度是根据相邻帧间光流矢量大小确定的,具体为

$$v = \frac{x}{t} = \frac{p}{wt} W \quad (4)$$

式中: v 为地铁车辆运行速度; x 为相机拍摄周期内地铁车辆的实际位移; t 为相机拍摄周期,是相机帧频的倒数; p 为光流大小; w 为试验图像的宽度; W 为相机视野宽度。

线路仿真软件算法流程图如图4所示。

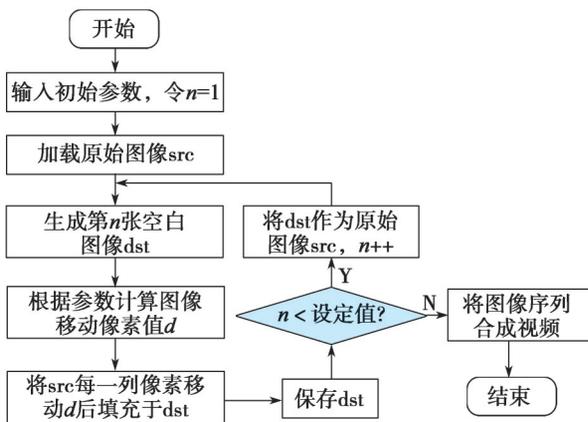


图4 线路仿真软件算法流程图

Fig. 4 Flow chart of circuit simulation software algorithms

算法的准确性采用方均根误差^[13] (σ_{RMSE}) 评估, RMSE对测量数据中的极大或极小误差非常敏感,能较好反映出测量精度,计算如下

$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{\text{true},i})^2} \quad (5)$$

式中: n 为样本数量; X_i 为第*i*次观测值; $X_{\text{true},i}$ 为第*i*次基准值。

在线路仿真试验中,分别设置标准车速为20 km/h、40 km/h、60 km/h、80 km/h,每个车速下生成图像200幅,用于合成视频,仿真试验结果如表2所示。由表2可知,本文所提光流法的处理速度是基于图像金字塔的大位移光流改进算法的5~6倍;当地铁车辆速度为80 km/h时,每秒约可处理188帧图像,完全可以满足地铁测速的实时性要求,并且2种算法的测速有效值基本相当。

表2 线路仿真试验结果统计

Table 2 Statistics of line simulation experiment results

算法类别	标准车速/ (km·h ⁻¹)	处理每帧图像 平均耗时/ms	测量速度的有效值/ (km·h ⁻¹)
基于图像金字塔的大位移光流改进算法	20	21.55	0.38
	40	23.84	1.52
	60	26.32	2.47
	80	29.14	2.71
本文的光流法	20	4.08	0.61
	40	4.46	1.78
	60	5.33	2.99
	80	5.31	3.89

5 实际线路试验

本试验选用的相机为Basler acA720-290gm GigE,镜头为RICOH FL-CC0614A-2M,相机最大帧频为291 f/s,感光芯片长边尺寸为5 mm,水平分辨率为720 px,镜头焦距为6 mm。在实际测量中,地铁底部与轨面距离为1 200 mm,由于光流法测速需要相邻帧间有重叠区域,实际测速中要能够实现相机对同一像素点的连续拍摄,本光流法在地铁车辆中的测速应该满足以下条件:

$$w_x = \frac{S_s}{F_1} \times O_d \times P_x \leq 720 \quad (6)$$

$$P_x \times f_{\text{fps}} \times w_x \times \frac{1}{n} \geq v \quad (7)$$

式中: w_x 为采集图像的长边尺寸; S_s 为成像传感器长边尺寸; F_1 为镜头焦距; O_d 为相机与检测目标之间的物距; P_x 为单位像素对应的真实尺寸; f_{fps} 为相机帧频; v 为地铁车辆运行速度; n 为保证相机对同一像素点连续拍摄的次数。

本试验中列车行驶速度小于80 km/h,相机帧频设置为200 f/s,同一像素点连续拍摄的次数*n*为3。

如图5所示,在实际线路试验中,将相机和镜头安装在设备支撑架上,支撑架安装于地铁车辆底部,相机光轴垂直于地面,试验中列车从静止加速到较高速

度, 匀速运行一段时间, 然后减速至停止。需要注意, 本次线路试验是对本文算法的验证试验, 尚未考虑实际工程环境, 对设备未做特殊防护, 后续研发中会考虑采用专用的防护装置。

实际线路的测速结果如图6所示。由图6可知, 当地铁车辆速度低于40 km/h时, 本文所提光流法可以较为准确地测量地铁车辆实时速度; 当地铁车辆速度超过40 km/h后, 测量值会产生波动, 并且波动范围随着速度增加而变大, 原因是当车速较大时相机采集的照片存在拖影, 并且地铁车辆振动加剧, 成像质量变差。通过数据惯性滤波平滑处理后, 测速曲线在60 km/h以下与标准速度吻合较好, 车速超过60 km/h后, 测量速度与真实速度存在一定的偏差。



图5 图像采集设备测试现场图

Fig. 5 Image capturing device test site map

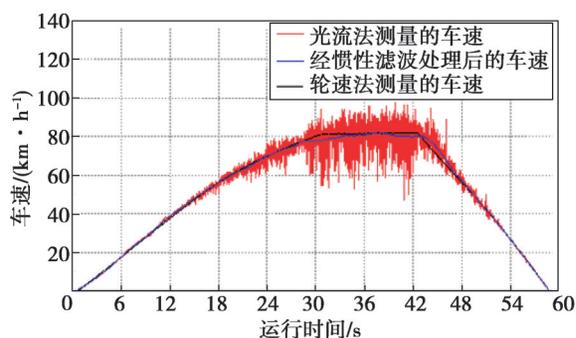


图6 光流法线路试验对比结果

Fig. 6 Comparison of optical flow method circuit experiment results

6 结论

本文提出了基于图像金字塔和GPU加速的光流法, 并探索将其应用于地铁车辆测速的可行性, 通过线路仿真试验和实际线路试验对其进行了验证。

①线路仿真试验和实际线路试验结果表明, 采用本文提出的测量系统在车速60 km/h以下所测速速度值与采用轮速法所测速度值吻合较好。

②基于GPU的光流并行计算可以有效提高光流计算速度, 为列车实时测速提供了一种新的方法, 对速度不高的城轨列车具有工程应用价值。

③分析验证了基于图像金字塔的大位移光流改进算法可以有效提高大位移光流的计算精度, 可以满足地铁车辆测速的精度要求。

参考文献:

- [1] 陆东福. 交通强国 铁路先行 为促进经济社会持续健康发展做出更大贡献——在中国铁路总公司工作会议上的报告(摘要)[J]. 铁路计算机应用, 2018, 27(1): 1-3.
LU Dongfu. Transportation power, railway first behavior and make greater contribution to the sustainable and healthy development of economy and society-report at the working meeting of China railway corporation (Abstract)[J]. Railway Computer Application, 2018, 27(1): 1-3.
- [2] 蔡伯根, 王剑, 刘江, 等. 列车运行控制系统测速定位技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
CAI Bogen, WANG Jian, LIU Jiang, et al. Speed measurement and positioning technology of train operation control system[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [3] LAUZE F, KORNPORST P, MEMIN E. A coarse to fine multiscale approach for linear least squares optical flow estimation[C]// Proceedings of the British Machine Vision Conference. [S.l.]: BMVA Press, 2004. DOI: 10.5244/C.18.79.
- [4] KIM Y H, MARTINEZ A M, KAK A C. Robust motion estimation under varying illumination[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23: 365-375.
- [5] BROX T, MALIK J. Large displacement optical flow: descriptor matching in variational motion estimation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(3): 500-513.
- [6] 卢宗庆. 运动图像分析中的光流计算方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2007.
LU Zongqing. Research on optical flow computation for motion image analysis[D]. Xi'an: Xidian University, 2007.
- [7] 张永亮, 卢焕章, 高劼, 等. 一种改进的Lucas-Kanade光流估计方法[J]. 海军航空工程学院学报, 2009, 24(4): 443-446.
ZHANG Yongliang, LU Huanzhang, GAO Jie, et al. Improvement of Lucas-Kanade method for optical flow estimation[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2009, 24(4): 443-446.
- [8] 齐蕴光, 安钢, 张建. 基于饱和度梯度的彩色序列图像光流场计算[J]. 装甲兵工程学院学报, 2012, 26(3): 69-73.
QI Yunguang, AN Gang, ZHANG Jian. Optical flow field computation of color image sequence based on saturation gradient[J]. Journal of Armored Force Engineering Institute, 2012, 26(3): 69-73.
- [9] 马龙, 王鲁平, 陈小天, 等. 噪声环境下光流场估计方法[J]. 信号处理, 2012, 28(1): 87-91.
MA Long, WANG Luping, CHEN Xiaotian, et al. Determining optical flow field in the presence of noise[J]. Signal Processing, 2012, 28(1): 87-91.

- cessing, 2012, 28(1): 87-91.
- [10] 李喆. 一种 Lucas-Kanade 光流金字塔算法的伪特征点移除方法[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
LI Zhe. A method of removing false features of Lucas-Kanade flow pyramidal implementation[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [11] 李成美, 白宏阳, 郭宏伟, 等. 一种改进光流法的运动目标检测及跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(5): 249-256.
LI Chengmei, BAI Hongyang, GUO Hongwei, et al. Moving object detection and tracking based on improved optical flow method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(5): 249-256.
- [12] GIBSON J J. The perception of the visual world[M]. Boston: Houghton Mifflin, 1950.
- [13] 杨盛伟. 无人机光流测速优化算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
YANG Shengwei. Research on optical flow velocity measurement optimization algorithm for rotor UAV[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.

广告索引

- | | |
|---------------------|----------------------------|
| 人本集团上海轴承有限公司(中插1) | 株洲时代新材料科技股份有限公司(后插4) |
| 郑州机械研究所有限公司(中插2-3) | 宝鸡中车时代工程机械有限公司(后插5) |
| 山东朗进科技股份有限公司(中插4) | 湖南省宁乡县中南散热器有限公司(后插6) |
| 成都天马铁路轴承有限公司(中插5) | 株洲中车时代半导体有限公司(后插7) |
| 吉林瑞电科技有限公司(中插6) | 舟山市庆丰铁路仪表有限公司(后插8) |
| 石家庄国祥运输设备有限公司(中插7) | 咸阳亚华电子电器有限公司(后插9) |
| 南京康尼机电股份有限公司(中插8) | 湖南中车时代通信信号有限公司(后插10) |
| 株洲中车时代电气股份有限公司(后插1) | 汕头华兴冶金设备股份有限公司(后插11) |
| 株洲中车机电科技有限公司(后插2-3) | 南通江海电容器股份有限公司(后插12) |
| | 中车株洲电力机车研究所有限公司风电事业部(后插13) |
| | 深圳市宝创科技有限公司(后插14-封三) |
| | 登钛电子技术(上海)有限公司(封底) |