

光学学报

光电信息事件识别感知关键技术研究进展

刘铁根^{1*}, 刘琨¹, 戴林², 江俊峰¹, 王健², 丁振扬¹, 桑梅¹, 胡浩丰¹, 王双¹, 薛超², 王景彬², 邓晔²

¹天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津市光纤传感工程中心, 天津 300072;

²天地伟业技术有限公司, 天津 300392

摘要 目前随着公共安全领域非法入侵事件的数量急剧增加, 迫切需要新型传感技术来侦测非法入侵事件。针对精确定位、准确识别、多参量融合等瓶颈问题, 天津大学、天地伟业技术有限公司等研究机构提出了光电信息事件识别感知关键技术, 其紧密融合了视频监控和分布式光纤传感两种技术的优势, 通过光时域与光频域分布式扰动定位技术、干涉信号模式识别技术、超星光图像识别技术、视频捕捉分析识别技术、多参量感知融合技术、主动式偏振跟踪感知技术等, 实现了重点区域内异常事件的全天候、全覆盖监控识别。重点介绍了光电信息事件识别感知的关键技术研究进展。

关键词 光纤光学; 分布式光纤传感; 视频监控; 事件识别; 多参量感知

中图分类号 TN274

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0106002

Research Progress of Key Technologies in Recognition Sensing for Opto-Electronic Information and Event

Liu Tiegeng^{1*}, Liu Kun¹, Dai Lin², Jiang Junfeng¹, Wang Jian², Ding Zhenyang¹, Sang Mei¹, Hu Haofeng¹, Wang Shuang¹, Xue Chao², Wang Jingbin², Deng Ye²

¹*School of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics*

Information Technology, Ministry of Education, Tianjin Optical Fiber Sensing

Engineering Center, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²*Tiandy Technologies Co., Ltd., Tianjin 300392, China*

Abstract At present, the number of illegal intrusion incidents in the field of public security is increasing rapidly, so new sensing technologies are urgently needed to detect illegal intrusion events. Aiming at the bottleneck problems of accurate positioning, accurate identification, and multi parameter fusion, Tianjin University, Tiandy Technologies Co., Ltd., and other research institutions have proposed the key technology for event recognition and perception of photoelectric information. It closely integrates the advantages of video monitoring and distributed optical fiber sensing technology. This technology has realized all-weather and full coverage monitoring and recognition of abnormal events in key areas through the optical time and frequency domain distributed disturbance positioning technology, interference signal pattern recognition technology, superstar optical image recognition technology, video capture analysis and recognition technology, multi parameter sensing perception and fusion technology, active polarization tracking and sensing technology, etc. This paper focuses on the research progress of key technologies of event recognition and perception in photoelectric information events.

Key words fiber optics; distributed optical fiber sensing; video monitoring; event recognition; multi parameter perception

OCIS codes 060.2370; 100.3008; 100.5010; 120.4640

收稿日期: 2020-07-24; 修回日期: 2020-08-26; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家 973 计划 (2010CB327806)、国家电子信息产业振兴和技术改造项目 (发改投资[2009]1168 号)、国家物联网发展专项资金 (工信部科[2011]353 号)、国家自然科学基金 (61475114, 61505138)

* E-mail: tgliu@tju.edu.cn

1 引言

对重点设施和区域进行事件位置精确定位、事件模式准确识别以及事件多参量融合感知是国际上光电检测技术的前沿制高点。传统视频监控技术具有可视化、便于记录和可追溯等优点,在国家安全反恐、平安城市等领域起到重要作用^[1-4]。传统分布式光纤传感技术具有长距离传感能力,其结构简单,易形成大容量、高灵敏传感网络,在周界、管道等领域应用较为广泛^[5-12]。但是,上述传统方法对事件的定位精度较低,且难以对复杂入侵事件进行实时主动捕捉和分析;同时,传统方法较难实现入侵行为模式识别,通常需要人工值守和事件遍历查询,人工强度大,且易受光照、天气影响;此外,传统单一技术采用分离监测,缺乏对多参量特征融合感知的能力,不利于实现全天候条件下事件的有效监测^[13-15]。上述不足使得传统方法对重点区域进行安防监控的联动融合、开放共治水平不高,如对于非法聚集、异常行为、夜间入侵等事件的监测手段有限,导致暴力或恶性事件时有发生,这给国家和社会安全带来巨大隐患。

为了克服精确定位、准确识别、多参量融合等瓶颈问题,满足无人值守、自动识别入侵事件、全天候全覆盖目标监控的迫切需求,天津大学等研究机构提出了光电信息融合事件识别感知关键技术^[13-15]。其紧密融合了视频监控和分布式光纤传感两种技术的优势。通过光时域与光频域分布式扰动定位技术、干涉信号模式识别技术、超星光图像识别技术、视频捕捉分析识别技术、多参量感知融合技术、主动式偏振跟踪感知技术等,将分布式光纤传感同视频监控技术相融合,形成光纤视频混合联动传感技术;通过光纤分布式传感网得到入侵的模式与位置信息;通过发送警报并与视频系统进行实时数据融合,同时实现对入侵位置与行为的可视化,实现了对重点区域内异常事件的全天候、全覆盖监控识别,从而满足了平安城市、司法设施、石油化工、铁路运输等重要行业不同应用场景和实际工程的重大需求。本文针对光电信息事件识别感知关键技术进展进行介绍。

2 分布式光纤事件识别技术

2.1 基于光频域反射事件识别感知技术

基于光纤中背向瑞利散射的光频域反射(OFDR)技术的空间分辨率与频谱分析精度有关,与探测器带宽无关,可以获得非常高(微米级)的空间分辨率,是分布式扰动识别的理想技术^[16-19]。

OFDR 技术使用了相干探测技术,其灵敏度较传统光时域反射(OTDR)技术有较大提高^[20]。天津大学在 OFDR 事件识别感知技术方面进行了深入研究,并取得了一定的成果。在长距离 OFDR 研究方面,OFDR 测试距离往往受限于激光器的相干长度。天津大学的研究从 OFDR 的信号模型和相位噪声理论出发,利用 OFDR 信号中的洛伦兹型相位噪声项,通过提高激光器调谐速率,仅用相干长度为 13.6 km 的激光器,测量了 120 km 的瑞利散射和 170 km、反射率为 -14 dB 的非涅耳反射(图 1),OFDR 测试距离较国际最先进的由美国 NP Photonics 公司生产的产品延长了 78%^[21]。该方法可实现广域范围内事件的精确定位监测。

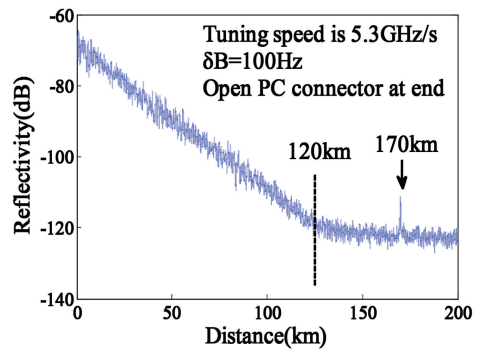


图 1 长度为 170 km 待测光纤的瑞利散射和末端由 FC/PC 接头引起的反射率为 -14 dB 的非涅耳反射的测试结果^[22]

Fig. 1 Measured Rayleigh scattering and far-end Fresnel reflection with reflectivity of -14 dB from FC/PC connector for 170 km^[22]

在 OFDR 分布式扰动测量方面,光纤中的瑞利散射是由于光纤中随机波动的折射率产生的。对于一段光纤,其瑞利散射的幅度或反射率是随距离随机变化的,但这种变化又是相对静态的特征信息,瑞利散射可以理解为光纤的“指纹”^[23]。天津大学等研究单位开展了基于 OFDR 的长距离扰动传感研究,采用多瑞利散射信号特征进行扰动事件的定位与识别。利用瑞利散射光谱相似性特征、频移特征和距离域 V 型凹陷特征,无光放大单端 OFDR 系统可同时探测 92 km 附近的两处位置扰动事件,定位扰动位置的空间分辨率约为 13 m,如图 2 所示^[24-26]。

2.2 基于双马赫-曾德尔的光干涉事件识别感知技术

干涉型分布式传感技术在振动传感领域如周界安全、管道安全、线路安全监控中应用比较广泛,其类型包括双马赫-曾德尔结构^[27]、白光干涉 Sagnac 结构^[28]、fox-smith 结构^[29]。基于马赫-曾德尔的光

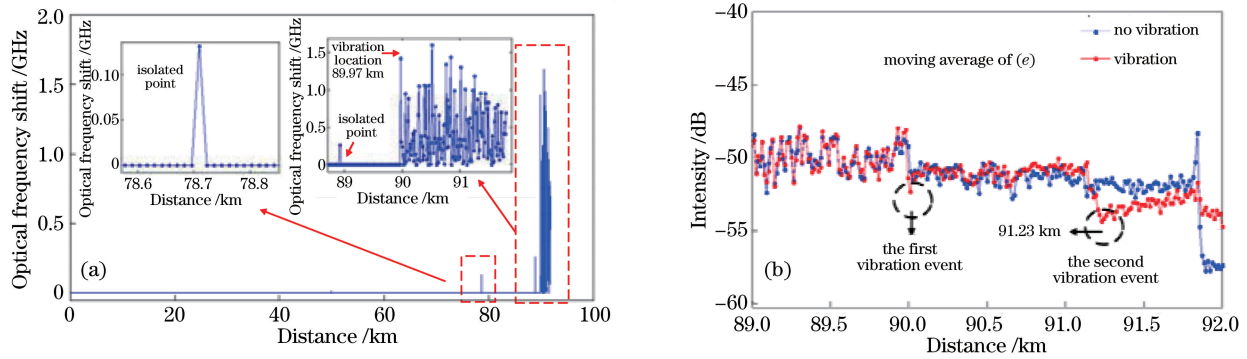


图 2 OFDR 长距离多点扰动事件传感结果^[24]。(a)瑞利散射光谱频移特征;(b)距离域 V 型凹陷特征

Fig. 2 Sensing results of long range multi-point disturbance events by OFDR^[24]. (a) Rayleigh scattering spectral shift characteristic; (b) V shape sunken characteristic in spatial domain

干涉技术是分布式扰动检测的主要技术之一^[30-31]。为解决扰动信号定位精度不高的现状,构建了干涉光路偏振衰落理论模型,定量分析了沿线环境信号对光的随机作用的叠加机理,采用基于混沌粒子群、遗传和退火相融合的偏振优化补偿方法,消除了偏振衰落现象对长臂干涉信号的影响,该方法为干涉型扰动事件的精确定位感知提供了理论和方法基础。例如,天津大学提出了一种改进的混沌粒子群优化算法进行偏振控制。该算法采用粒子群算法作为基本框架,这样就继承了基本粒子群算法易于实

现、收敛速度快、不需要目标函数的梯度信息等诸多优点。该算法最大的改进在于初始化步骤,初始化的时候采用混沌算法随机生成一组能够遍历整个解空间的粒子群,因此该算法从一开始就能够进行全局的搜索,并且在一次迭代之后还对最优解进行混沌优化,这样在陷入局部最优的时候能够有效地跳出,最终趋向全局最优解。该方法可应用于马赫-曾德尔型时域干涉扰动传感系统中,其偏振补偿前后的干涉信号及定位结果对比如图 3 所示,事件定位感知的精度可提高至±20 m 以内^[32-33]。

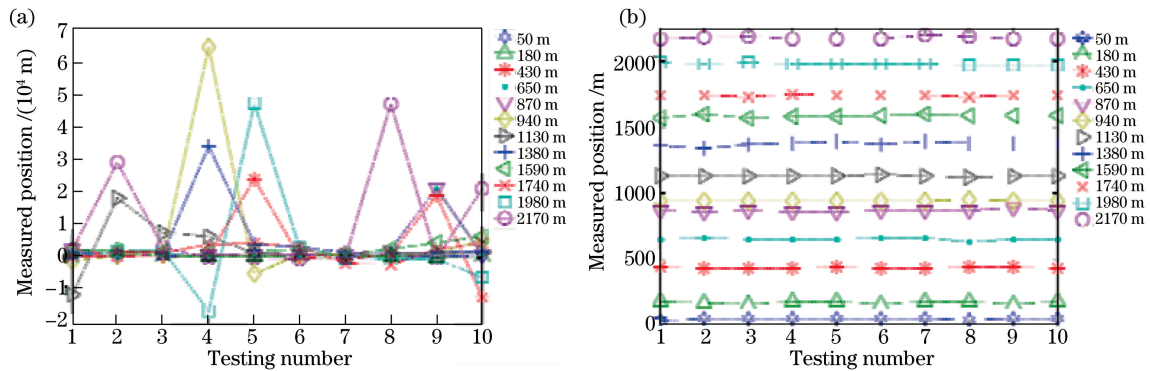


图 3 偏振补偿前后的光干涉信号及扰动定位结果对比^[32]。(a)未补偿;(b)补偿后

Fig. 3 Optical interference signals and disturbance locating results before and after polarization compensation^[32].

(a) Before compensation; (b) after compensation

为了抑制后向瑞利散射光对光纤扰动传感器信噪比(SNR)的影响,基于双光源和光纤滤波器提出了一种抑制背向散射的系统结构,并在此基础上,天津大学相关研究人员构建了一种基于非对称双马赫-曾德尔结构的光纤扰动传感系统,如图 4 所示。基于非对称双马赫-曾德尔结构的光纤扰动传感技术能够保留传统双马赫-曾德尔结构的优势,采用双窄带宽光源和匹配光纤滤波器的组合有效地排除了背向散射噪声对信噪比的影响。考虑到基于非对称双马赫-曾德尔结构

的光纤扰动传感技术所用的光源波长不同,对于不同波长的干涉光,同一扰动行为所引起的相位变化是不相同的,此时两路干涉光是非对称的,不能直接用互相关算法求取时延并进行定位,因此天津大学相关研究人员提出一种基于干涉信号相位变化趋势的扰动位置解调方法,该方法首先提取两路信号的相位变化趋势,再用变化的相位信号替代干涉信号来求时延,最终通过实验实现扰动位置的解调,在传感距离为 125 km 时,该系统的信噪比能够达到 1 dB^[34-35]。

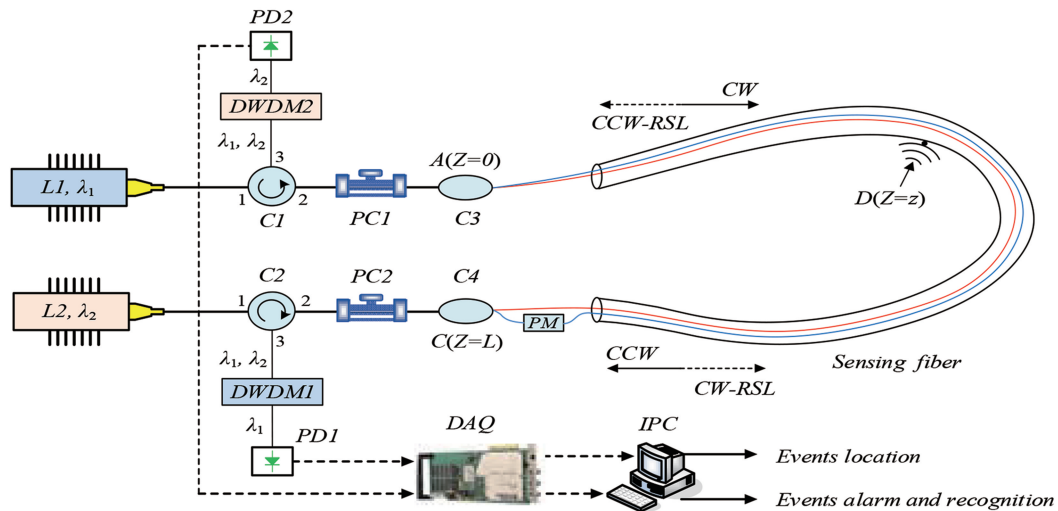


图 4 基于非对称双马赫-曾德尔干涉仪的光纤扰动传感系统^[34]

Fig. 4 Schematic diagram of fiber disturbance sensing system based on asymmetric dual Mach-Zehnder interferometers^[34]

2.3 基于相干光时域反射事件识别感知技术

近年来, φ -OTDR 型分布式光纤振动传感技术以其多点定位、灵敏度高、结构简单等突出优点受到了国内外学者的广泛关注^[36-40]。该技术的一大突出优势是无需复杂的信号处理即可实现多点定位,然而该技术也存在一些技术难点,如较弱的后向瑞利散射信号严重限制了传感距离、脉冲重复频率限制频率响应等。为突破这些瓶颈,天津大学提出一种双啁啾脉冲与弱光纤光栅(WFBGs)相结合的分布

式声传感技术(图 5),该技术有助于获得更高的信噪比。双啁啾脉冲是由一个延时光纤产生的,并且正弦载波是由相邻 WFBGs 反射的两个啁啾脉冲之间的干涉产生的。正弦载波的相位表示传感光纤上的动态应变变化。利用离散傅里叶变换可以提取相位信息,进而实现动态应变解调。双啁啾脉冲与 WFBGs 结合的分布式声传感系统的传感距离达到了 101.64 km,信噪比达到 3.324 dB^[41],实验结果如图 6 所示。

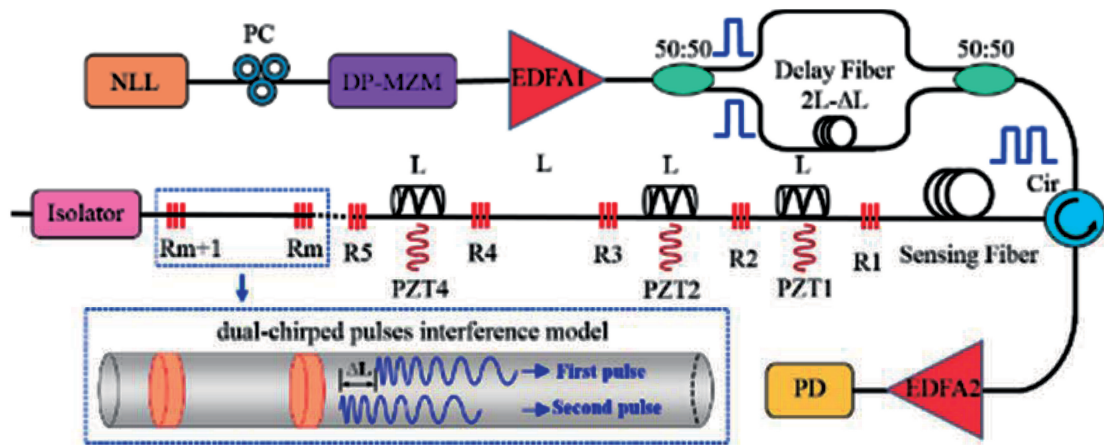


图 5 双啁啾脉冲与 WFBGs 相结合的分布式声传感系统^[41]

Fig. 5 Schematic diagram of distributed acoustic sensing system combining double chirped-pulse and WFBGs^[41]

从多传感机理融合角度提出了基于双光源密集波分复用技术的马赫-曾德尔干涉与 φ -OTDR 融合型分布式振动测量结构,该结构能够同时实现多点定位与宽频响应的分布式振动测量,突破了非对称双马赫-曾德尔干涉型分布式振动传感技术无法实现多点定位的瓶颈。研究了初始相位差与振动幅度

大小对融合系统频率探测的影响机理,基于改进型 3×3 耦合器解调计算相对相位差,并利用相对相位差替代干涉信号进行频率探测以提升系统动态范围。采用一种反馈环干涉与 φ -OTDR 融合的单端单光纤传感结构,在单根光纤上同时实现了多点定位与宽频响应的分布式振动测量^[42]。

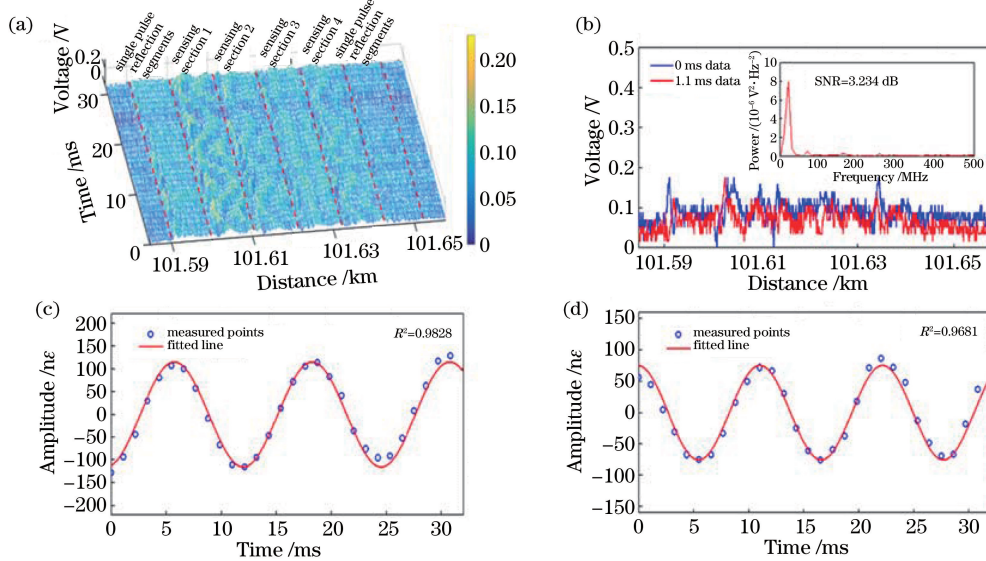


图 6 101 km 附近拍频信号与相位解调结果^[41]。(a) 三维时空域图;(b)信号功率谱;
(c)位置 1 信号解调结果;(d)位置 2 信号解调结果

Fig. 6 Beat frequency signal and phase demodulation results at about 101 km^[41]. (a) 3D spatial-temporal profile; (b) signal power spectrum; (c) signal demodulation result of sensing position 1; (d) signal demodulation result of sensing position 2

2.4 分布式光纤扰动模式识别技术

针对事件准确识别的瓶颈问题,提出了混合特征提取与动态阈值检测相融合的可配置光纤扰动事件端点检测方法,实现了扰动事件起始端点的高精度灵活检测^[43-46]。针对振动起始端点精准探测的需求,提出一种基于可变模态分解的高精度端点检测方法,使得检测精度较传统方法提升近 2 个数量级。提出一种基于 S 变换的高精度定位算法和一种基于改进 3×3 耦合器解调的快速定位算法,通过提取两路干涉信号的相位变化特征有效地消除了长臂干涉结构的非对称性对定位精度的影响。同时,针对实际安防监控的应用需求,提出基于概率分析的多事件识别机制,弥补现有硬判决输出识别方法的不足,减小由错误决策所带来的损失^[47-49]。

将光电信息技术相融合,提出可配置的流水式事件识别方法,根据外界环境条件自动配置光模式和图像模式的权重因子,有效克服风、雨、雷、电等环境因素的影响;提出扰动信息多模态识别与分析方法,实现了对光强度、光谱、相位、偏振多模态扰动信息的分析;采用全相位滤波和经验模态分解相融合的方法提取事件信号的频域特征向量,结合神经网络的概率模式分析判别方法,利用多尺度排列熵和过零率进行入侵信号的特征提取,从不同的维度更加全面地描述入侵信号的特征,弥补了现有的一些特征提取方法需要信号的变换或分解处理(降低了识别效率)以及特征提取信息较为单一的不足。基于上述特征提取方法,提出了一

种概率分析多事件识别机制,通过求解凸二次规划问题求得入侵事件所属类别的概率,识别结果通过分析样本的概率信息后给出。实验结果表明,所提出的混合特征提取方法可以很全面地描述入侵事件的特征,与现有的硬判决输出识别方法相比,所提出的概率识别方法不仅能够降低决策的成本,而且能够减小错误决策带来的损失,对晃动围栏、剪切围栏、攀爬围栏、敲击光缆、轰砸围栏、脚踢围栏 6 种事件的平均识别率达到 92.8%, 信号如图 7 所示^[50]。

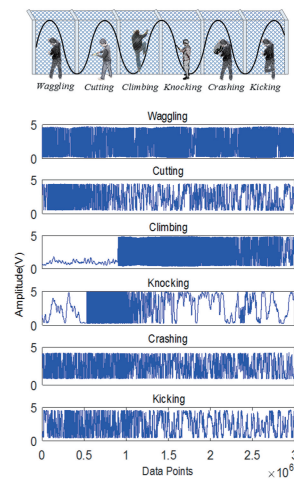


图 7 晃动围栏、剪切围栏、攀爬围栏、敲击光缆、轰砸围栏、脚踢围栏 6 种事件的信号图^[50]

Fig. 7 Signals of six intrusion events of wagging fence, cutting fence, climbing fence, knocking cable, crashing fence, and kicking fence^[50]

3 视频事件识别技术

3.1 超星光图像识别技术

星光技术是一种在只有星光的夜晚也能看清监控场景的技术。星光级摄像机对光线照度的要求通常是等于或小于 0.001 lx。超星光级摄像机对光线照度的要求更低^[51]。夜晚过低的照度会导致图像噪声放大,信息被掩盖,而增大曝光时间会导致运动模糊,难以进行视频拍摄,为解决这些问题,目前常采用的方法包括基于卷积神经网络的低照度与近红外融合视频技术^[52]、基于视网膜大脑皮层(Ret-inex)模型的技术^[53]、小波多尺度融合技术^[54]等。

天地伟业技术有限公司相关人员采用基于噪声估计的双边滤波算法,结合超星光图像统计特性分析,提高了超低照度条件下图像的信噪比;利用基于拉式金字塔的高动态光照渲染(HDR)融合增强图像细节,对多曝光低照度 CMOS 图像进行融合,显著增强了低照度图像中的细节信息;开发了基于照度图、自适应均衡直方图以及对比度拉伸图提取融合的图像对比度增强算法,高质量地实现了超星光环境下的彩色视频还原,采用了大靶面、超高灵敏度传感器,结合 debayer 算法、降噪算法、宽动态算法、智能光控算法、复杂场景自适应算法等,实现了自然光 0.0001 lx 条件下的彩色视频图像事件定位^[55],如图 8 所示。

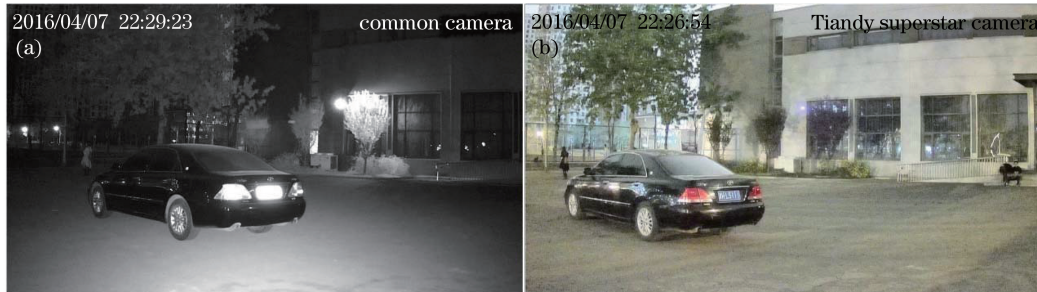


图 8 超星光图像识别技术在自然光 0.0001 lx 条件下的彩色视频图像事件定位。(a)普通摄像机;(b)天地伟业超星光相机

Fig. 8 Image event locating of color video when irradiancy of natural light is 0.0001 lx using superstar optical image recognition technology. (a) Common camera; (b) Tiandy superstar camera

3.2 视频捕捉分析的事件模式准确识别

人体图像视频不仅包含了复杂的运动背景,光照变化、人体外貌变化等不确定性因素使得基于图像视频的行为识别具有一定的局限性^[56]。传统方法基于人体几何特征或运动信息的特征,利用运动能量图像^[57]和运动历史图像来解释图像序列中人的运动^[58]。深度学习的引入为行为识别带来了新的发展方向。利用深度学习模型自动提取数据中的特征,避免了人工设计特征过程的盲目性和差异性^[59]。深度学习模型利用端到端的神经网络结构进行深度特征提取和动作分类。近年来,深度神经网络多用于行为识别中^[60]。天地伟业技术有限公司的相关研究人员采用基于运动轨迹的 3D 卷积神经网络,开发了基于深度学习的运动目标检测算法、行人细粒度检测与精细化识别算法,实现对行人属性和轨迹的准确识别;采用跨媒体视频大数据类人解析策略,实现视频数据智能分析。针对运动人员的检测中存在的几个易干扰因素,例如行人运动姿态的不同、场景中不同景物的遮挡干扰及场景光照阴影干扰等问题。通过对多尺度滤波器进行深度信

息融合,开发出星型结构人体部位模型,标记人体部位的各个坐标,计算各部位积径和积角统计直方图,分析不同姿态和角度(正面、侧面)的影响要素,将计算结果作为视频特征。该方法对人体不同姿态的形变具有强鲁棒性,提高了复杂背景环境下行人检测的准确性和精准度。双向光流跟踪数字图帧技术基于双向光流跟踪算法、上下文目标跟踪(STC)算法、方向梯度直方图(HOG)特征提取方法、神经网络识别等算法,实现了对高清视频中异常行为和人体行为的智能分析,如入侵检测、越界检测、聚集检测、遗留检测、智能跟踪、丢失检测、视频诊断、报警查询、智能视频检索、视频浓缩等。双向光流跟踪数字图帧技术的优势主要表现为:数字图帧技术可在海量数据信息中有效滤除大量冗余,及时发现图像中运动的物体,并对其进行跟踪、分析,及时发现异常行为,触发报警并采取其他措施进行干预,从而降低人力成本;数字图帧技术区别于传统的移动侦测技术,可实现场景中背景和目标的分离,识别出真正的目标。图 9 展示了数字图帧技术对行人属性、行为、事件等的识别效果^[61]。

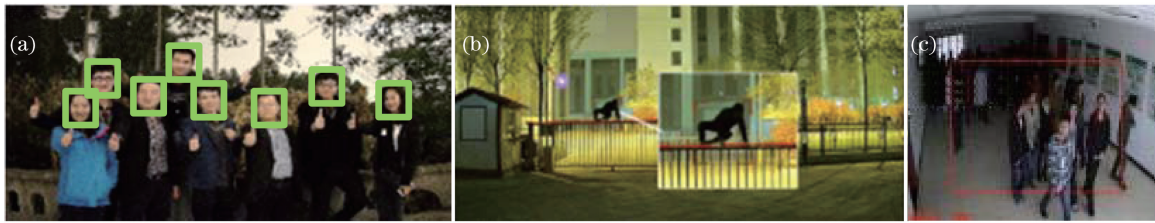


图 9 图像事件模式识别效果。(a)人脸;(b)翻越;(c)聚集

Fig. 9 Performance of imaging event pattern recognition. (a) Human faces; (b) climbing; (c) gathering

4 多参量传感信息融合方法

4.1 光纤多参量传感信息融合

在光电信息融合事件识别感知技术中,传统事件感知技术往往采用“触觉”或“视觉”单一技术,缺少多机理融合,可靠性和可扩展性不高,导致感知能力有限,这限制了其在实际监测应用中的多参量融合感知效果。

天津大学相关研究人员通过光纤分布式传感得到多参量传感信息与位置信息,通过发送警报并与视频系统进行实时数据融合,实现了入侵位置与行为的可视化,并可同时实现扰动、行为、应变、温度、声音等多参量的光电信息融合识别感知。天津大学相关研究人员通过对瑞利散射光中强度、偏振、相位、波长、光谱等多模态信息进行分析,结合拉锥光纤、细径光纤等特种光纤和磁致伸缩材料,实现了 OFDR 光纤力、热、声、磁、折射率等多参量分布式传感^[62-67]。例如,通过利用 OFDR 解调锥形微纳光纤锥区倏逝波与外界溶液相互作用引起的瑞利散射频移,实现了连续分布式光纤折射率传感,传感空间分辨率为 4.25 mm,折射率传感长度为 2.1 cm,灵敏度为 68.52 nm/RIU,首次实现了连续分布式光纤折射率传感,如图 10 所示^[65]。从图 10 可以看出,由于甘油溶液的扩散,折射率数值从

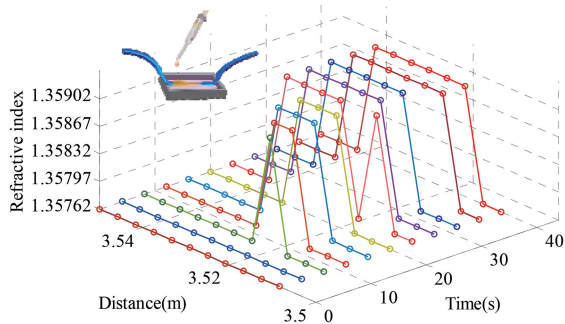


图 10 甘油扩散过程中折射率时间距离分布情况^[65]

Fig. 10 Distance-time distribution of refraction index in diffusion process of glycerol solution^[65]

锥形光纤一端到其另一端有明显的变化。所提出的方法结合分布式生化传感与成像,在光纤导管前端使用锥形光纤作为敏感元件,能够实现在毫米量级的分布式测量,这种分布式折射率传感的能力是先前提到的单点或准分布式的折射率传感方法无法实现的。

4.2 光电信息事件融合感知

传统技术往往基于“触觉”或“视觉”单一技术且存在分布式光纤传感中缺少多机理融合的问题,其感知能力有限,光电信息融合事件识别感知有望解决这一问题。光纤分布式传感通过光时域与光频域分布式扰动定位技术、干涉信号模式识别技术得到多参量传感信息与位置信息,并通过发送警报并与视频系统进行实时数据融合,在视频技术中采用超星光图像识别技术、视频捕捉分析识别技术等,实现了监控入侵位置与行为的可视化,可同时实现扰动、行为、应变、温度、声音等多参量的光电信息融合识别感知,如图 11 所示。为提升光纤信息融合感知系统的可靠性和可扩展性,基于深度学习算法开发了融合主动式跟踪感知分析软件、融合主动式跟踪感知组网软件,实现了异常事件的主动式跟踪感知。天津大学等单位成功研制出“触”之所感、“目”之所及的系列化光电信息融合事件感知设备,解决了全天候事件监测难题,实现了“触”“目”式主动预警。

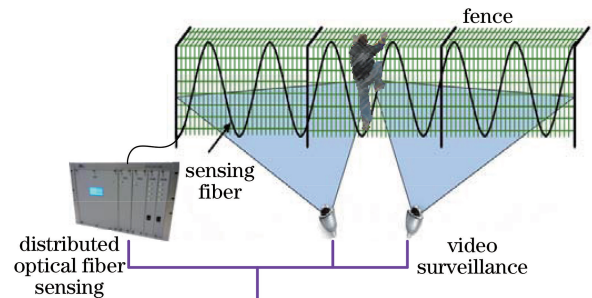


图 11 光电信息融合识别感知

Fig. 11 Opto-electronic information fusion recognition sensing

5 结 论

光电信息事件识别感知关键技术紧密融合了视频监控和分布式光纤传感两种技术优势,通过光时域与光频域分布式扰动定位技术、干涉信号模式识别技术、超星光图像识别技术、视频捕捉分析识别技术、主动式偏振跟踪感知技术、多参量感知融合技术等,实现了重点区域内的异常事件全天候、全覆盖监控识别,从而满足了平安城市、司法设施、公共安全等重要行业不同应用场景和实际工程的重大需求。

参 考 文 献

- [1] Qi G, He X B. Analysis of key technologies in intelligent video surveillance[J]. Computer Knowledge and Technology, 2014, 10(21): 5093-5094.
齐刚, 何先波. 浅析智能视频监控中的关键技术[J]. 电脑知识与技术, 2014, 10(21): 5093-5094.
- [2] Deng Z H. Ensure that the public safety video surveillance system is autonomous and controllable[EB/OL]. (2020-05-19) [2020-07-24]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2020-05-19/2574838.shtml>.
邓中翰. 确保公共安全视频监控系统自主可控[EB/OL]. (2020-05-19) [2020-07-24]. <http://www.rmzxb.com.cn/c/2020-05-19/2574838.shtml>.
- [3] Wang G Y. Problems and countermeasures of video surveillance in public places in my country [J]. Legal System and Society, 2019(34): 151, 169.
王广遇. 我国公共场所视频监控存在的问题及其对策[J]. 法制与社会, 2019(34): 151, 169.
- [4] Xu C. Intelligent video surveillance system under new security form[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016(16): 90.
许岑. 新安全形式下的智能视频监控系统[J]. 电子技术与软件工程, 2016(16): 90.
- [5] Liu D M, Sun Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
- [6] Cao Y K. Distributed optical fiber sensing technology helps intelligent maintenance of communication lines [J]. Information Technology and Informatization, 2019(8): 217-219.
曹玉考. 分布式光纤传感技术助力通信线路维护智能化[J]. 信息技术与信息化, 2019(8): 217-219.
- [7] Chen L A. Research on application of distributed optical fiber sensing system in petroleum pipeline monitoring[J]. Automation Application, 2017(1): 77-79, 81.
陈流安. 分布式光纤传感系统在石油管道监测中的应用研究[J]. 自动化应用, 2017(1): 77-79, 81.
- [8] Liu T G, Yu Z, Jiang J F, et al. Advances of some critical technologies in discrete and distributed optical fiber sensing research[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 070705.
刘铁根, 于哲, 江俊峰, 等. 分立式与分布式光纤传感关键技术研究进展[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 070705.
- [9] Tang J X, Xie C L, Fang B M, et al. Application of optical fiber sensing technology to rail transit operation lines[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(z2): 398-405.
汤继新, 谢长岭, 方宝民, 等. 光纤感测技术在轨道交通运营线路中的应用[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(z2): 398-405.
- [10] Yuan F C. Application of distributed optical fiber sensing technology based intelligent monitoring system on OCS of high speed railway[J]. Electric Railway, 2019, 30(S1): 58-60.
苑方丞. 基于分布式光纤传感技术智能监测系统在高铁接触网中的应用[J]. 电气化铁道, 2019, 30(S1): 58-60.
- [11] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [12] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57-79.
- [13] An J C, Jiang J F, Xu Z Y, et al. Design of composite intrusion detection system based on optical fiber sensor and infrared video[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(5): 20190446.
安建昌, 江俊峰, 徐中原, 等. 光纤传感与红外视频的复合入侵监控系统设计[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 20190446.
- [14] Liu K, Zhang L W, Jiang J F, et al. Distributed optical fiber sensor perimeter security system based on UAV video linkage[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2019, 30(12): 1244-1251.
刘琨, 张立旺, 江俊峰, 等. 基于无人机视频联动的分布式光纤传感周界安防系统[J]. 光电子·激光, 2019, 30(12): 1244-1251.
- [15] Li Y, Liu T G, Wang S J, et al. All fiber distributed long-distance perimeter security monitoring system with video linkage function[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2013, 24(9): 1752-1757.
李玉, 刘铁根, 王绍俊, 等. 全光纤分布式视频联动长距离周界安防监控系统[J]. 光电子·激光, 2013, 24(9): 1752-1757.
- [16] Shiloh L, Eyal A. Distributed acoustic and vibration

- sensing via optical fractional Fourier transform reflectometry[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 4296-4306.
- [17] Wang S, Fan X Y, Liu Q W, et al. Distributed fiber-optic vibration sensing based on phase extraction from time-gated digital OFDR[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33301-33309.
- [18] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed optical fiber sensors based on optical frequency domain reflectometry: A review[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): E1072.
- [19] Steinberg I, Shiloh L, Gabai H, et al. Over 100 km long ultra-sensitive dynamic sensing via Gated-OFDR[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9634: 96341B.
- [20] Venkatesh S, Sorin W V. Phase noise considerations in coherent optical FMCW reflectometry[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(10): 1694-1700.
- [21] Geng J H, Spiegelberg C, Jiang S B. Narrow linewidth fiber laser for 100-km optical frequency domain reflectometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(9): 1827-1829.
- [22] Ding Z Y, Yao X S, Liu T G, et al. Long measurement range OFDR beyond laser coherence length[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(2): 202-205.
- [23] Soller B J, Kreger S T, Gifford D K, et al. Optical frequency domain reflectometry for single- and multi-mode avionics fiber-optics applications [C] // *IEEE Conference Avionics Fiber-Optics and Photonics*, Sept 12-14, 2006, Annapolis, MD, USA. New York: IEEE Press, 2006: 38-39.
- [24] Ding Z Y, Yang D, Liu K, et al. Long-range OFDR-based distributed vibration optical fiber sensor by multicharacteristics of Rayleigh scattering[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(7): 6604410.
- [25] Liu T G, Du Y, Ding Z Y, et al. 40-km OFDR-based distributed disturbance optical fiber sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 28(7): 771-774.
- [26] Ding Z, Yao X S, Liu T, et al. Long-range vibration sensor based on correlation analysis of optical frequency-domain reflectometry signals[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28319-28329.
- [27] Xie S R, Zou Q L, Wang L W, et al. Positioning error prediction theory for dual Mach-Zehnder interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(3): 362-368.
- [28] Hoffman P R, Kuzyk M G. Position determination of an acoustic burst along a Sagnac interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(2): 494-498.
- [29] Hong G W, Jia B, Tang H. Location of a wideband perturbation using a fiber fox-smith interferometer[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(10): 3057-3061.
- [30] Mahmoud S S, Katsifolis J. Elimination of rain-induced nuisance alarms in distributed fiber optic perimeter intrusion detection systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7316: 731604.
- [31] Sun Q Z, Liu D M, Wang J, et al. Distributed fiber-optic vibration sensor using a ring Mach-Zehnder interferometer[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1538-1544.
- [32] Chen Q N, Liu T G, Liu K, et al. An elimination method of polarization-induced phase shift and fading in dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(19): 3135-3141.
- [33] Pan L, Liu K, Jiang J F, et al. An improved polarization compensation method for interferometric fiber-optic intrusion sensors[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(10): 834-837.
- [34] Ma C Y, Liu T G, Liu K, et al. A gain compensation method for the long-range distributed fiber disturbance sensor[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10025: 100250B.
- [35] Ma C Y, Liu T G, Liu K, et al. Long-range distributed fiber vibration sensor using an asymmetric dual Mach-Zehnder interferometers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2235-2239.
- [36] Wang Z N, Zhang L, Wang S, et al. Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection[J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 853-858.
- [37] Muanenda Y, Faralli S, Oton C J, et al. Dynamic phase extraction in a modulated double-pulse ϕ -OTDR sensor using a stable homodyne demodulation in direct detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 687-701.
- [38] Lu B, Pan Z, Wang Z, et al. High spatial resolution phase-sensitive optical time domain reflectometer with a frequency-swept pulse[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 391-394.
- [39] He X, Xie S, Liu F, et al. Multi-event waveform-retrieved distributed optical fiber acoustic sensor using dual-pulse heterodyne phase-sensitive OTDR[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 442-445.
- [40] Peng F, Duan N, Rao Y J, et al. Real-time position and speed monitoring of trains using phase-sensitive OTDR[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2055-2057.
- [41] Liang G H, Jiang J F, Liu K, et al. Phase demodula-

- tion method based on a dual-identical-chirped-pulse and weak fiber Bragg gratings for quasi-distributed acoustic sensing[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(7): 1093.
- [42] Ma P F, Liu K, Sun Z S, et al. Distributed single fiber optic vibration sensing with high frequency response and multi-points accurate location[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 129:106060.
- [43] Huang X D, Yu J, Liu K, et al. Configurable filter-based endpoint detection in DMZI vibration system [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(19): 1956-1959.
- [44] Ma C Y, Liu T G, Liu K, et al. A continuous wavelet transform based time delay estimation method for long range fiber interferometric vibration sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(16): 3785-3789.
- [45] Huang X D, Wang Y D, Liu K, et al. High-efficiency endpoint detection in optical fiber perimeter security[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(21): 5049-5055.
- [46] Chen Q N, Liu T G, Liu K, et al. An improved positioning algorithm with high precision for dual Mach-Zehnder interferometry disturbance sensing system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(10): 1954-1960.
- [47] Ma P F, Sun Z S, Liu K, et al. Distributed fiber optic vibration sensing with wide dynamic range, high frequency response, and multi-points accurate location[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 124: 105966.
- [48] Liu K, Ma P F, An J C, et al. Endpoint detection of distributed fiber sensing systems based on STFT algorithm [J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 114: 122-126.
- [49] Liu K, Ma P F, Jiang J F, et al. An S-transform-based positioning method for asymmetric interferometer disturbance sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3201-3207.
- [50] Ma P F, Liu K, Jiang J F, et al. Probabilistic event discrimination algorithm for fiber optic perimeter security systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2069-2075.
- [51] Li Y L. Key technology analysis of HD surveillance cameras[J]. *China Digital Cable TV*, 2019(1): 84-87.
李育林. 高清监控摄像机关键技术分析[J]. *中国有线电视*, 2019(1): 84-87.
- [52] Tang C Y, Pu S L, Ye P Z, et al. Fusion of low-illumination visible and near-infrared images based on convolutional neural networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1610001.
唐超影, 浦世亮, 叶鹏钊, 等. 基于卷积神经网络的低照度可见光与近红外图像融合 [J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1610001.
- [53] Jung T Y, Son D M, Lee S H. Visible and NIR image blending for night vision[C]//International Conference on Image Processing, Computer Vision and Pattern Recognition (ICPR). 2019. Las Vegas: CS-REA Press, 2019: 110-113.
- [54] Su H, Jung C. Multi-spectral fusion and denoising of RGB and NIR images using multi-scale wavelet analysis[C]//2018 24th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Beijing, China. New York: IEEE Press, 2018.
- [55] Dai L, Tang B. Original image data noise reduction system and method based on FPGA platform: CN201210526985.2[P]. 2016-12-21.
戴林, 唐波. 基于 FPGA 平台的原始图像数据降噪系统及降噪方法: CN201210526985.2 [P]. 2016-12-21.
- [56] He L, Shao Z P, Zhang J H, et al. Review of deep learning-based action recognition algorithms [J]. *Computer Science*, 2020, 47(S1): 139-147.
赫磊, 邵展鹏, 张剑华, 等. 基于深度学习的行为识别算法综述 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(S1): 139-147.
- [57] Bobick A, Davis J. An appearance-based representation of action[C]//Proceedings of the 13th International Conference on Pattern Recognition. August 25-29, 1996, Vienna, Austria. New York: IEEE Press, 1996.
- [58] Weinland D, Ronfard R, Boyer E. Free viewpoint action recognition using motion history volumes [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2006, 104(2/3): 249-257.
- [59] Wang Y B, Xu W. Leveraging deep learning with LDA-based text analytics to detect automobile insurance fraud [J]. *Decision Support Systems*, 2018, 105: 87-95.
- [60] Ijjina E P, Krishna Mohan C. Hybrid deep neural network model for human action recognition[J]. *Applied Soft Computing*, 2016, 46: 936-952.
- [61] Dai L, Li Z G, Zhu M. Vehicle-behavior analysis and identification method based on holder and camera device: CN103646544A[P]. 2014-03-19.
戴林, 李志国, 朱明. 基于云台和相机设备的车辆行为分析识别方法: CN103646544A [P]. 2014-03-19.
- [62] Du Y, Liu T G, Ding Z Y, et al. Distributed magnetic field sensor based on magnetostriction using Rayleigh backscattering spectra shift in optical frequency-domain reflectometry [J]. *Applied Physics*

- Express, 2015, 8(1): 012401.
- [63] Ding Z Y, Wang C H, Liu K, et al. Distributed measurements of external force induced local birefringence in spun highly birefringent optical fibers using polarimetric OFDR [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 951-964.
- [64] Ding Z Y, Du Y, Liu T G, et al. Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in OFDR [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(19): 2055-2058.
- [65] Ding Z, Sun K, Liu K, et al. Distributed refractive index sensing based on tapered fibers in optical frequency domain reflectometry [J]. Optics Express, 2018, 26(10): 13042-13054.
- [66] Ding Z Y, Yang D, Du Y, et al. Distributed strain and temperature discrimination using two types of fiber in OFDR [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 1-8.
- [67] Cui J, Zhao S, Yang D, et al. Investigation of the interpolation method to improve the distributed strain measurement accuracy in optical frequency domain reflectometry systems [J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1424-1431.