文章编号:1001-9014(2011)04-0354-07

可见光-热红外视频运动目标融合检测的研究进展及展望

张秀伟, 张艳宁*, 郭 哲, 赵 静, 仝小敏
(西北工业大学 计算机学院,陕西 西安 710129)

摘要:在智能视频监视领域,协同利用可见光和热红外传感器,使全天时、精确、鲁棒的智能监视成为可能,具有显著的优势.对可见光-热红外运动目标融合检测的研究进展进行分析和总结.首先,分析了多源传感器融合检测问题,着重说明了融合检测的显著优势、关键步骤及已有公开测试数据集等;然后,详细分析了该类算法的研究进展,从融合策略、运动检测策略和融合结构三个不同方面进行了对比说明,讨论了其优缺点和适用范围;最后,对目前所面临的问题和可能的研究方向进行了探讨.

关 键 词:热红外视频;可见光视频;融合;运动目标检测
中图分类号:TP751.1 **文献标识码**:A

Advances and perspective on motion detection fusion in visual and thermal framework

ZHANG Xiu-Wei, ZHANG Yan-Ning*, GUO Zhe, ZHAO Jing, TONG Xiao-Min
(School of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: Multiple visual sensor fusion provides an effective way to improve the robustness and accuracy of visual surveillance system. This paper gives a review of moving object detection with visual-thermal fusion. Firstly, the problem is analyzed, including its procedure, key problems, advantages, testing data sets. Then the existing algorithms are analyzed according to several different rules: fusion strategy, detection method and fusion structure. By comparing different kinds of methods, we analyzed the advantage, disadvantage and applicability. Finally we conclude with discussion on difficulties, challenges and possible future research directions of this kind of method.

Key words: thermal video; visual video; fusion; moving object detection
PACS: 42.30.Tz

引言

在智能视觉监视领域,随着网络摄像机和新型视觉传感器的快速发展,越来越多的学者和研究机构将多源视觉传感器运用于视觉监控中,利用多源视觉信息融合处理,提高系统性能.

多传感器数据融合/信息融合是指"对来自多个传感器的数据进行多级别、多方面、多层次的处理,从而产生新的有意义的信息,这种信息是任何单一传感器所无法获得的"[1-2].按照融合的目的,视觉信息融合可分为基于图像的表示型融合和基于视频的分析型融合[3].基于图像的表示型融合通过综合多源图像信息产生具有更好视觉效果的融合图像,是前期视觉信息融合所主要关注的内容,现有大多数研究也集中在这个方面[2,4].基于视频的分析型融合,面向具体问题,如运动检测、跟踪、识别等,近年才得到较多关注,目前尚无全面的综述型文献,有些仅在视觉监控问题中提及了多源视觉传感器的应用,但未作全面分析[3].

可见光和热红外图像具有互补性,协同利用这

收稿日期:2010-11-18,**修回日期**:2011-04-03 **Received date**: 2010-11-18, **revised date**: 2011-04-03
基金项目:国家863计划(2009AA01Z315);国家自然科学基金(60872145);教育部科技创新工程重大项目培育资金项目(708085);博士后科学基金(20090451397);中国博士后特别基金(201003685)
作者简介:张秀伟(1981-),女,新疆额敏人,博士研究生,主要研究方向为智能视频分析和多源视觉传感器信息协同处理,E-mail:weirui20011@163.com.
* **通讯作者**:E-mail:ynzhang@nwpu.edu.cn.

两类传感器优势突出,使得全天时的鲁棒智能监控成为可能. 而运动检测是数字视频处理的基本问题,是跟踪、识别、视频检索、压缩编码等应用的基础和关键. 因此,文中关注基于可见光-热红外视频的运动目标融合检测方法.

由于热红外相机价格较昂贵,基于可见光和热红外的运动目标融合检测并没有得到充分的研究. 但该类方法可有效改善运动目标检测性能,从而可推动智能视频分析在自动飞行器/机器人导航、智能汽车、公共安全监控、战场监视等领域的进一步应用,具有十分重要的学术研究意义和应用价值.

1　多源图像运动检测问题分析及描述

基于可见光-热红外融合的运动目标检测,其优势主要体现在:能有效解决背景与目标特征相似、场景突然变化、背景与目标间的遮挡等难题. 这是由于可见光图像反映目标反射特性,热红外图像反映目标热辐射特性,两者具有互补性. 背景和目标的反射特征和辐射特征通常情况并非同时具有相似性,一定程度上可克服背景与目标特征相似的难题;而红外对光照变化不敏感,可见光对温度变化不敏感,融合检测可应对场景在光照和温度两方面的突然变化;且热红外成像具有一定的"透视"能力,可探测到隐藏在背景后的热目标. 图 1 给出了可见光-热红外融合检测优势的图例说明,图 1(a)中背景-前景在反射特性方面具有良好的区分性,图 1(b)中背景-前景在热辐射特性上具有良好的区分性,同时也体现了热红外的"夜视"能力,图 1(c)、图 1(d)说明热红外具有穿透烟雾和树木遮挡的"透视"能力.

基于可见光-热红外视频运动目标融合检测问题的关键部分是数据对准和融合检测. 其中,数据对准是融合的前提,融合检测是问题的核心. 数据对准包括时间对齐和空间对准,如图 2 所示.

1.1　时间对齐

时间对齐包括时间同步和数据对齐两部分.

时间同步,保证采集单元具有相同的时间基准.

图 1　可见光-热红外图像对示例
Fig. 1　Examples of visual-thermal image pair

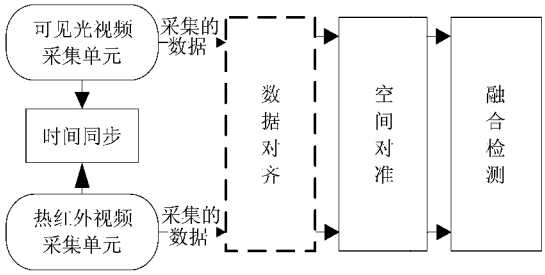

图 2　可见光-热红外融合检测的基本流程
Fig. 2　The flowchart of visual-thermal fusion detection

同一时间基准下,不同采集单元获得图像序列才能真实反映观测场景在时间上的变化. 时间基准有很多,如原子钟、光频标、铯钟等,大多采用授时和守时结合的方式进行时间同步.

数据对齐旨在解决多个传感器单元间由于采集频率和采集起始时刻不相同所造成的数据不对齐问题. 可使用各类插值算法实现不同采集单元的数据在时间上对齐. 该步骤在融合检测问题中不是必要的,有些算法对数据对齐不作要求.

实验室环境中,多相机间的时间对齐多采用外触发方式,当接收到来自触发器的触发信号(软触发/硬触发)时,采集单元执行数据的采集,从而严格保证了多传感器采集起始时刻和采集频率的一致;同时,随着网络相机的发展,基于网络服务器的时间同步也是一种有效的方式.

1.2　空间对准

空间对准是将不同传感器单元所获得图像变换到同一个空间坐标系下. 空间对准是可见光-热红外融合检测的前提. 现有的可见光-热红外配准主要集中在基于灰度互信息最大化的配准、基于几何特征的配准、基于标定物的配准和基于运动统计特征的配准等几个方面.

1.3　融合检测

融合检测是指对具有统一空间基准的多传感器同步图像序列,运用数据融合技术进行运动目标检测. 其目标是:充分发挥各个传感器自身的优点,来提高检测的精度和鲁棒性.

相关学者和研究机构已发布若干相关的多源图像同步数据集,其详细分析及对比情况见表 1. 但相对于可见光监控数据集 PETS 等仍显匮乏,未包含监控场景中各类问题(如拥挤、背景温度突变等),且缺少基准数据,有待于进一步丰富和完善.

2　可见光-热红外融合检测研究进展

可见光-热红外运动目标融合检测的目标是利用融合手段来提高运动检测的精度和鲁棒性. 该问题既与融合策略相关,也与检测策略密切相关,同时在算法实现时还需考虑传感器、融合中心及传感器信息处理单元间的分布关系,即融合结构. 因此,从融合策略、检测策略和融合结构三个方面对现有可见光-热红外融合检测算法进行分析总结.

2.1 融合策略

按照融合在数据处理过程所发生层次的不同,可分为数据层、特征层和决策层三个方面.

2.1.1 数据层融合

对于运动检测而言,数据层融合是指对来自同类型不同传感器的原始数据进行融合,再基于融合后的传感器数据进行运动目标检测.

基于数据层融合的运动检测方面,国内外尚未见相关报道. Cvejic N[7] 就可见光-热红外视频像素级融合对目标跟踪性能的影响进行了研究. 其结果表明,对于跟踪问题,平均融合方法比小波、拉普拉斯金字塔等多分辨率融合方法性能好. 多分辨率方法在像素级融合方面具有显著优势,却难以胜任融合跟踪问题. 故将表示型融合的各种理论和方法直接用于面向问题的分析型融合是不可行的. 如作者所分析,引起这种观测的潜在原因可能是前景和背景像素分布间的距离,融合两种类型的图像不能保证增加前景和背景分布间的距离,还很有可能降低这种距离. 因此,对于面向问题的像素级融合,需要建立与之适应的融合方法和融合测度.

表1 可见光 热红外同步数据集的分析对比

Table 1 Comparison of visual thermal synchronous datasets

数据集	数据提供者	帧率	数据组个数	分辨率	配准关系	基准	观测目标及场景描述	补充描述
OSU 彩色-热红外数据集	俄亥俄州大学的 James W. Davis	30	6 组	320×240	已配准	无	白天室外静止背景,观测场景和目标包括建筑、道路和行人	隶属于 OTCBVS 数据集,学者 Leykin A 提供了其 2007 年发表文章[5]的跟踪结果,可用于检测跟踪结果的对比,可从网站 ImageFusion.org 下载
AIC 红外/可见光夜晚数据集	都柏林城市大学的 Ciarán Ó Conaire	25	1 组	320×240	已配准	无	夜晚室外静止背景,观测场景为建筑物、道路、行人、汽车	下载地址:ImageFusion.org 网站
ITIV 红外/可见光数据集	蒙特利尔理工学院 Torabi A	17	3 组	320×240	提供配准参数	无	室内场景,行人目标	可用于测试可见光-热红外序列配准算法,数据下载网址如下:http://www.polymtl.ca/litiv/en/vid/index.php
OCTEC 红外/可见光数据集	OCTEC 公司的 David Dwyer	-	1 组	640×480	已配准	无	白天室外静止背景 烟幕弹遮挡情况的建筑和人	"-"表示帧率未知,该组数据未给出采集帧率,以下下同 下载地址:ImageFusion.org 网站
TNO 红外/可见光数据集	荷兰 TNO Human Factors 研究机构的 Lex Toet	-	3 组	505×510	已配准	无	第1组为白天静背景,一行人翻越栏杆;第2组为白天动背景,行人行走在树丛中;第3组仅前几帧有晃动,可视为白天静背景	下载地址:ImageFusion.org 网站
TNO 短波红外/中红外/可见光数据集	荷兰 TNO Human Factors 研究机构	-	2 组	360×270	已配准	无	第1组为傍晚,马路上行驶的汽车;第2组为傍晚,海面上的行驶的舰船	下载地址:ImageFusion.org 网站
IRIS 热红外/可见光人脸数据集	田纳西大学 IRIS 实验室 Besma Abidi	-	31 组	320×240	未配准	无	室内环境 31 个人在不同姿态、不同光照、不同表情的人脸图像	隶属于 OTCBVS,包括3种不同的表情;5种不同光照情况;每组目标都具有不同姿态。下载地址如下:http://www.cse.ohio-state.edu/otcbvs-bench/
Eden 计划多传感器数据集	布里斯托尔大学和 Waterfall Solutions 公司	-	多组仅数据集3可下载	720×576	已配准	有	室外场景,包括了夜晚、白天多个时段;考虑树木遮挡;目标有行人、车辆等	数据集说明文件[6]中声明有基准数据,包括相机位置、目标位置和环境数据等 部分已在 ImageFusion.org 网站上公开

2.1.2 特征层融合

基于特征层融合的运动检测,对每个传感器分别进行特征提取,然后对所提特征作融合处理,再基于融合特征向量进行运动目标检测.

基于特征融合的可见光-热红外运动目标融合检测是一类新颖的、具有吸引力的方法,处于融合的中间层次,易获得准确的结果. 该类方法已取得了一定进展,但相关研究工作仍较少,且主要集中在边缘特征上.

Davis J W[8]等提出了一种面向运动目标检测问题的边缘特征融合方法. 该方法使用单高斯背景差法获得可见光和热红外前景,分别针对不同传感器运动区域进行显著轮廓提取、轮廓细化和重要轮廓选择,然后采用"或"策略融合两类传感器获取轮廓,并基于融合轮廓进行轮廓闭合和区域填充,从而获得运动目标区域. Sharma V[9]方法与 Davis J W[8]方法主要不同点在于未直接采用"或"融合运算,而是基于互信息选择轮廓特征. 该方法可获得运动目标较精确的剪影,但算法复杂度较高.

2.1.3　决策层融合

基于决策层融合的运动检测,对每个传感器独立进行检测判决,然后对判决结果进行融合,获得最终的检测判决结果.

在融合领域中,决策层融合方法主要有投票法(最大投票法、平均投票法、M 分之 N 投票法)、布尔算子(与/或/与或算子的组合)、基于概率的方法、模糊逻辑法、信度模型(D-S 证据理论、可传递信度模型)等. 前两者属于硬判决,其原理较简单,后三者属于软判决. 在融合检测中,基于概率的融合方法、布尔算子和信度模型的应用较多.

2.1.3.1　基于概率的融合检测

该类方法需要已知概率分布模型,对所获得的多传感器数据观测概率进行定量计算,并基于融合概率进行决策.

Ju H[10]等采用单高斯背景差计算红外和可见光的前景概率,基于两类前景概率对比加法、乘法、取最大和取最小四种概率融合运算,其实验认为加法策略效果较好. Conaire C O[11]等基于四类特征(LUV 色彩空间的三个分量和红外灰度)来描述背景,使用非参数背景法建模,通过乘法策略融合四类特征获得背景概率. Torabi A[12]将相机配准、检测和跟踪有机结合起来,将融合跟踪结果反馈给配准,提高配准精度,其在融合检测时也使用了基于概率的加法融合.

该类融合具有良好的理论基础,适用于有明确概率分布/表示的情况,但难以处理相互矛盾和不确定的情况.

2.1.3.2　基于布尔算子的融合检测

布尔算子融合策略计算简单,假设各信息源及结果的可信度相同,对其不作区分,直接进行"与"/"或"的运算,因此各信息源对融合结果的贡献相同.

Conaire C O[13]等基于混合高斯背景差和多帧平均背景差分别获得可见光和热红外前景,"或"策略获得融合前景,在去除红外背景差分图像噪声时,使用了可见光与热红外检测结果互信息的最大化来获得自适应分割阈值. Leykin A[14]等使用码本(codebook)背景建模法构建可见光-热红外多模型背景,"与"策略融合提取运动目标前景. Bertozzi M[15]等使用一组双目可见光和一组双目热红外相机检测道路上的行人,基于视差聚类获得各自目标区域,"或"策略融合获得最终结果. Davis J W[8]等在可见光和热红外目标轮廓融合阶段采用"或"策略. Sharma V 等[9]基于互信息最大化进行选择性的"或"融合.

当各信息源的结果间存在矛盾时,直接应用布尔算子很难得到精确的结果,"与"策略易引起漏检率增大,"或"策略易导致虚警率增大. 该类融合方法需要先验知识的支持,或者与其他策略结合使用. 如,文献[8]认为热红外检测不易受光照影响,结果更好,因而在可见光运动目标检测时采用"与"策略来去除可见光虚警.

2.1.3.3　基于信度模型的融合检测

信度模型[16-17]泛化了贝叶斯概率理论,能够处理相互冲突的情况. Nadimi S[18]等基于 RGB 三通道的混合高斯背景差结果,实现并对比了三种融合策略("与"、"或"和 D-S 证据推理),其实验结果认为"与"策略检测率较高. Praveen A[19]提出一种可见光-热红外融合跟踪方法,在运动目标融合阶段,使用证据理论进行运动目标真实性的判定.

基于信度模型的融合方法缺少理论基础,实际应用中需要解决信度的动态更新、随着证据增加计算量急剧增加等问题.

2.1.3.4　基于混合策略的融合检测

不同的决策层融合策略各具优势和不足,多类策略的混合使用成为一种趋势.

Zhang Y N 等[20]提出一种基于多传感器信息协同处理机制的可见光-热红外运动检测方法,针对一致、冲突和目标分裂/合并等目标关联情况,综合采用布尔算子、概率融合等多种融合策略,并将最后的结果反馈给检测算法. Denman S[21]等提出了基于运动检测性能评价的多源跟踪方法. 在运动目标融合阶段,使用重叠区域进行目标关联,继而基于检测性能指标对关联目标进行加权平均获得融合目标,并结合性能指标和目标出现连续性判断非关联目标的真实性.

2.2　检测策略

对融合检测而言,需要考虑各检测策略的优点

和适用范围,谨慎选择或综合运用多种检测策略.现有检测算法主要有背景差、帧差、模式识别法及其他分割算法(如马尔科夫随机场、视差聚类等).

背景差法通过对当前帧图像与背景图像作减法获得差异图像,通过差值阈值化得到运动前景,其关键在于背景模型的建立及更新.该类方法具有较好的检测精度和鲁棒性,已发展出一系列算法,如平均法、单高斯法、混合高斯法、核密度法、码本法等.其中大多算法都能给出前景概率的度量,为基于概率的融合所青睐[10,13-14,20],在其他类融合检测中使用得也较多[8-9,11-14,18].

背景差法存在着难以克服的问题,如背景前景相似性、场景突变、大量频繁运动和慢运动情况下背景建模不精确等问题.Conaire C O[11]针对人体动目标检测,在背景建模初始阶段,利用热红外图像分割人体目标,并将非人体目标区域作为背景区域进行背景建模,从而避免了背景建模易受频繁运动干扰的问题.

除了这种基于已有背景差模型获得前景,再混合利用多种策略进行融合检测外,Nadimi S 等[22]还研究了红外和可见光背景建模问题,采用混合高斯背景差法,但在背景估计和更新时,不是将红外和可见光视频单独考虑,而是使用协同进化思想,使得两类背景协同进化,其适应性函数不仅考虑了统计模型,还考虑了物理模型,通过物理模型预测评价背景模型置信度.为准确预测,作者还将场景分割为5类区域,通过实验分析获得各类区域在不同时间段的反射和辐射特性.其实验结果表明,算法在各种光照和温度变化情况下均适用.该方法尽管可获得很好的实验结果,但需要过多的先验信息,影响其使用和推广.

帧差法即在相邻帧间作减法获得帧间的差异,并通过对差值进行阈值化来获取运动区域.帧差法易面临空洞等问题,但在处理弱小目标检测和大致确定运动区域方面具有优势.Jones D G[23]等则通过可见光序列帧差初步获得运动区域,使用马尔科夫随机场进行目标分割,设计能量函数时同时考虑了可见光和热红外前景的类条件概率.

在拥有双目设备的情况下,视差信息有助于区分背景和前景,但其精度依赖于视差信息的精确提取.文献[15]基于视差聚类进行红外和可见光图像的行人目标检测.Krotosky J S[24]使用具有可见光立体相机和热红外立体相机的四元相机设备,结合视差与目标大小间关系约束对行人目标初步分类,再分别提取目标在红外、可见光和视差图中的方向梯度直方图 HOG 特征,使用 SVM 再次分类.文献[25]分析对比了双目相机、三目相机、混合光谱双目相机三种装备情况下的行人目标检测,认为基于三目相机的行人检测分类可同时利用红外、可见光和视差信息,具有更好的检测精度和鲁棒性.

2.3 融合结构

在融合检测算法的设计和实现时,融合结构起着至关重要的作用,按照传感器、信息处理单元及融合中心间的不同分布关系,可分为集中式、并行、串行、带反馈复合型等4类.

集中式融合检测如图3(a)所示,融合检测中心接收来自各个传感器的原始数据,并直接对其进行检测和融合处理.集中式结构具有通讯简单、一致性好等优点,但对融合中心的计算性能要求较高,适合于直接基于观测数据进行融合的策略,如文献[22,24,25].

串行融合结构如图3(b)所示,每个传感器都具有与之对应的传感器处理单元,分别接收各自的传感器数据,先由传感器1的处理单元做出局部检测判决 R1,并将 R1 通信给传感器2,由传感器处理单元2根据 R1 和自身的检测进行融合,并形成最终判决 R 输出.串行融合结构具有顺序处理的特点,时间效率较低,适合于数据间在时间轴上存在顺序关系的情况及前一个传感器的处理结果可指导后续传感器检测的情况,如文献[8,11,13]中可见光、热红外相互指导进行运动检测的融合部分.

并行结构融合检测,每个传感器处理单元根据原始数据单独做出局部判决,并提交给检测中心.由融合检测中心通过融合得到全局判决,如图3(c)所示.并行式结构简单、速度快、易于并行化,适用于简单的基于传感器处理结果的融合策略,如文献[10,14,15,18].

带反馈的复合式融合结构如图3(d)所示,该结构综合了集中、并行和串行融合结构,在各处理单元间存在着可能的信息反馈.混合式结构复杂,但可适用于复杂的融合策略(多融合策略的混合、信息处理间存在指导和反馈),如文献[8~9,11~13,19~21,23].其中信息反馈可增加判决依据,有助于改善判决质量,但目前融合检测中还使用的较少.

3 现在的主要问题和进一步研究方向

基于可见光-热红外视频的运动目标融合检测问题,已得到了许多研究学者的关注,但其仍存在很

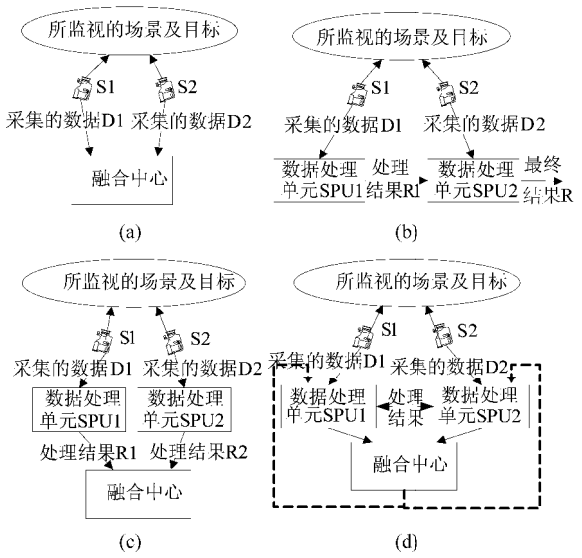

图 3　四类融合结构 (a)集中式融合 (b)串行融合结构 (c)并行融合结构 (d)带反馈的复合式融合结构

Fig. 3　Structure chart of 4 kinds of fusion model (a) centralized model (b) serial model (c) parallel model) (d) combined model

多问题值得深入研究.

3.1　传感器信息自身的可靠性度量问题

融合问题的关键之一是传感器信息可靠性的判断. 这里的可靠性有两类,一是信息源处理结果的可靠性,二是信息源自身相对于其他信息源的可靠性[26]. 现有可见光-热红外运动目标融合检测算法缺少对第二类可靠性的充分关注. 当第二类可信问题得不到确定或发生错误时,融合结果性能将下降,甚至远不及单源传感器处理的结果. 因此,对于可见光和热红外融合运动检测而言,迫切需要研究可见光和热红外传感器信息随时间、空间变化的可靠性度量问题.

3.2　融合策略及多策略组合

基于数据层融合的可见光-热红外运动目标检测方法,目前无文献报道,可通过建立与检测问题相适应的融合测度来研究数据层融合检测算法;基于特征层融合的运动目标检测是一类新颖的方法,具有较好的处理精度,目前相关报道文献较少,主要集中在边缘特征上,有待于深入的研究;基于决策层融合的运动目标检测主要集中在基于概率的融合、布尔算子和置信模型三个方面,单一融合策略难以取得理想的效果,综合运用多类融合策略目前已成为一种趋势.

多种融合策略如何进行分工和互补,特别是数据层、特征层和决策层三层融合策略如何组合,并没有现成的理论和指导方法,值得进一步研究.

3.3　检测策略与融合策略的有机结合

现有的融合检测,大多在单传感器检测结果的基础上使用融合策略进行检测,这种方式需要通过某种评价来判断单传感器处理结果的正确性. 不加区分的简单融合策略易将单源处理的错误引入到融合结果中,而无基准数据情况下运动检测结果的准确评价仍是个较难的问题. 因此,对于融合运动检测而言,将融合思想渗入到检测算法中,利用多源信息的优点来改善检测算法自身是有效提高检测精度的可行途径之一.

3.4　融合过程各信息源及处理环节的信息反馈

现有的融合算法很少应用反馈机制,其融合策略是固定不变的,很难适应动态变化的场景. 信息源之间及处理子过程之间的信息反馈将有助于提高融合处理的精度,这是因为利用反馈信息可以修正可能存在的问题,使得融合策略不再是一个静止的策略,能够随观测信息做自适应的调整,是融合检测中十分具有潜力的研究方向.

另外,现有算法主要集中在静止背景下的融合检测问题,运动背景下的动目标融合检测问题尚未得到较多关注. 对该问题的研究也具有十分重要的研究意义和实用价值.

4　结论

尽管多源信息融合技术已有近 40 年的发展史,但其研究大多集中于表示型融合技术,基于视频的分析型融合近些年才得到关注.

基于可见光-热红外视频的运动目标融合检测,可有效提高检测性能,使得全天时的鲁棒智能视觉监视成为可能. 由于热红外相机价格昂贵等因素,该问题并没有得到较好的研究和发展,在理论和应用上还存在很多需要进一步研究和完善的地方. 该领域的研究将有着光明的前景,其研究成果将推动战场监视、自动飞行器/机器人导航、智能汽车、公共安全监控等领域的进一步发展.

REFERENCES

[1] HE You, WANG Guo-Hong, PENG Ying-Ning, *et al*. *Multisensor Information Fusion with Application*[M]. Beijing: Publication House of Electronics Industry(何友,王国宏,彭应宁,等. **多传感器信息融合及应用**. 北京:电子工业出版社),2000.

[2] Maiter H, Bloch I. Image fusion[J]. *Vistas in Astronomy*, 1997,**41**(3):329 - 335.

[3] Kumar P, Mittal A, Kumar P. Study of robust and intelli-

gent surveillance in visible and multi-modal framework[J]. *Informatica*,2008,**32**:63-77.

[4] Dong J, Zhuang D F, Huang Y H, *et al.* Advances in multi-sensor data fusion: algorithm and applications[J]. *Sensor*,2009,**9**(10):7771-7784.

[5] Leykin A, Yang R, Hammoud R. Thermal-visible video fusion for moving target tracking and pedestrian classification [C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition -Workshops, 2007:1-8.

[6] Lewis J J, Nikolov S G, Loza A, *et al.* The Eden Project multi-sensor data set[R]. University of Bristol, Waterfall Solutions Ltd, 2006.

[7] Cvejic N, Nikolov G S, Knowels D H, *et al.* The effect of pixel-level fusion on object tracking in multi-sensor surveillance video[C]. In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition,2007:1-7.

[8] Davis J W, Sharma V. Background-subtraction using contour-based fusion of thermal and visible imagery[J]. *Computer Vision and Image Understanding*,2007,**106**(2-3):162-182.

[9] Sharma V, Davis J W. Feature-level fusion for object segmentation using mutual information[J]. *Augmented Vision Perception in Infrared*,2008,**6**:295-319.

[10] Ju H, Bhanu B. Fusion of color and infrared video for moving human detection[J]. *Pattern Recognition*,2007, **40**(6):1771-1784.

[11] Conaire C O, Cooke E, Connor O N, *et al.* Background modeling infrared and visible spectrum video for people tracking[C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005:20.

[12] Torabi A, Mass e G, Bilodeau G A, Feedback scheme for thermal-visible video registration, sensor fusion, and people tracking[C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition -Workshops,2010:15-22.

[13] Conaire C O , Cooke E , Connor O N, *et al.* Fusion of infrared and visible spectrum for indoor surveillance[C]. In Proceedings of International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Service,2005:382.

[14] Leykin A, Hammoud R. Robust multi-pedestrian tracking in thermal-visible surveillance videos[C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition - Workshops, 2006:136.

[15] Bertozzi M, Broggi A, Felisa M, *et al.* Low-level pedestrian detection by means of visible and far infra-red tetra-vision[C]. In Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium,2006:231-236.

[16] Shafer G. *A mathematical theory of evidence*[M]. Princeton: Princeton Univ. Press,1976.

[17] Smets Ph, Kennes R. The transferable belief model[J]. *Artificial Intelligence*,1994,**66**:191-243.

[18] Nadimi S, Bhanu B. Multistrategy fusion using mixture model for moving object detection[C]. In Proceedings of International Conference Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems,2001:317-322.

[19] Kumar P, Mittal A, Kumar P. Addressing uncertainty in multi-modal fusion for improved object detection in dynamic environment[J]. *Information Fusion*,2010,**11**(4):311-324.

[20] Zhang Y N, Tong X M, Zhang X W, *et al.* Pedestrian detection based on multi-modal cooperation[C]. In Proceedings of International Workshop on Multimedia Signal Processing,2008:148-152.

[21] Denman S, Fookes C, Sridharan S, *et al.* Multi-modal object tracking using dynamic performance metrics[C]. In 7th IEEE International Conference on Advanced Video and Signal-Based Surveillance,2010:286-293.

[22] Nadimi S, Bhanu B. Physics-based cooperative sensor fusion for moving object detection[C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-Workshops, 2004,**6**:108.

[23] Jones D G, Allsop E R, Gilby H J. Bayesian analysis for fusion of data from disparate imaging systems for surveillance[J]. *Image and Vision Computing*,2003,**21**(10): 843-849.

[24] Krotosky S J, Trivedi M M. Person surveillance using visual and infrared imagery[J]. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*,2008,**18**(8):1096-1105.

[25] Krotosky S J, Trivedi M M. On color-, infrared-, and multimodal-stereo approaches to pedestrian detection[J]. *IEEE Transaction on Intelligent Transportation System*, 2007,**8**(4):619-629.

[26] Rogova G, Nimier V. Reliability in information fusion: literature survey[C]. In Proceedings of International Conference on Information Fusion,2004:1158-1165.

(上接353页)

[21] Rand B P, Peumans P, Forrest S R. Long-range absorption enhancement in organic tandem thin-film solar cells containing silver nanoclusters[J]. *J. Appl. Phys.*,2004, **96**(12):7519-7526.

[22] Pillai S, Catchpole K R, Trupke T, *et al.* Surface plasmon enhanced silicon solar cells[J]. *J. Appl. Phys.*,2007,**101**(9):3105-3112.

[23] Zhou J F, Zhang L, Tuttle G, *et al.* Negative index materials using simple short wire pairs[J]. *phys. Rev. B.*, 2006,**73**(4):1101-1104.

[24] Chen X, Grzegorczyk T M, Wu B, *et al.* Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials[J]. *Phys. Rev. E*,2004,**70**(1):6608-6614.