

融合热释电红外传感器与视频监控器的 多目标跟踪算法

李方敏, 姜 娜, 熊 迹, 张景源

(武汉理工大学信息工程学院光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北武汉 430070)

摘 要: 现有基于热释电红外传感器的多目标跟踪系统在目标之间距离较近或者轨迹相交的情况下存在着误差较大的缺点. 针对此缺点, 提出了一种新型的基于热释电红外传感器与视频监控器协同工作的多目标跟踪方案. 该方案可以充分利用两种传感器的优势, 弥补在目标跟踪中的不足. 算法采用最小二乘法利用热释电信息进行定位, 并通过从图像或热释电传感器信号的幅频特性中提取特征信息来校正联合概率数据关联算法的关联矩阵, 有效避免了错误关联. 实验表明, 该方案在多目标交叉情况下跟踪误差仅为其它算法的八分之一到四分之一.

关键词: 热释电红外 (PIR) 传感器; 视频监控器; 目标跟踪; 联合概率数据关联算法

中图分类号: TP221

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2014)04-0672-07

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.04.008

Multi-Object Tracking Scheme with Pyroelectric Infrared Sensor and Video Camera Coordination

LI Fang-min, JIANG Na, XIONG Ji, ZHANG Jing-yuan

(Key Laboratory of Fiber Optical Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, School of Information Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: The error tends to be significant in many existing pyroelectric infrared sensor based multi-object tracking systems when the measured objects get close to each other or their trajectories have intersections. To solve this problem, we proposed a multi-object tracking scheme by having pyroelectric infrared sensors and video cameras work cooperatively. This scheme takes the advantages of both kinds of sensors, which help to improve the performance compared to those using any kind of such sensors. In the proposed scheme, we first achieve coarse positioning using least square method with data collected by pyroelectric infrared sensors, and then we correct the incidence matrix in joint probabilistic data association with features extracted from the images or the frequency responses of pyroelectric sensors. The coarse positioning is further filtered by joint probabilistic data association algorithm to obtain the final fine result. Such a method prevents false association effectively. Experimental results show that the tracking error of the proposed scheme in multi-object crossover scenario reduces to a quarter, even to one eighth of the errors that exist in the compared schemes.

Key words: PIR (pyroelectric infrared radial) sensor; video camera; human body tracking; JPDA (joint probabilistic data association)

1 引言

多目标人体运动的跟踪一直是智能监控、人/机交互接口、虚拟现实等领域研究的关键技术, 在灾害救助、军事侦察等方面有着非常重要的实用价值. 热释电红外传感器主要是以非接触形式, 通过检测环境中红外辐射的变化来实现对目标物体的跟踪. 它广泛地应用于报

警、自动控制、遥测等领域, 并且有被动式接收、隐蔽性好、功率小、灵敏度高和受环境光线干扰小等优点^[1]. 文献[2~5]中, Qi Hao 等人在研究热释电红外传感器进行人体跟踪方面, 对红外传感器视角域进行区域划分和编码, 通过人体在不同的区域产生不同的编码实现人体的定位, 并利用分布式 kalman 算法融合环境中四个传感器节点的数据, 来实时地对人体目标进行跟踪. 然而,

由于热释电信号精度有限,现有基于热释电红外传感器的多目标跟踪系统^[2-5],在目标之间距离较近或者轨迹相交的情况下,目标关联时容易产生错误,导致跟踪过程中出现定位错误或丢失现象,效果较差。

另一方面,目标跟踪也是当前计算机视觉和图像处理领域的一个研究热点.采用计算机视觉技术能够在图像及图像描述之间建立映射关系,从而使计算机通过图像处理技术分析和处理视频画面中的内容,并提取出关键信息.文献[6,7]在基于视频的跟踪方面,做出了一定深度的研究,跟踪效果较好.不可否认,视频跟踪技术在定位精度、目标特征库建立^[8]等方面优势十分明显.但视频流的网络传输需要一定的带宽,尤其在一些恶劣环境中(如灾区 and 山林等),视频时延、包丢失率以及网络拥塞^[9,10]等问题比较严重,而且信号处理计算复杂度较高。

针对上述情况,本文提出了一种将多个热释电红外传感器与单个低分辨率视频监控器相结合的多目标跟踪方案.该方案采用联合概率数据关联算法(JPDA)融合红外热释电传感器和视频监控器信息,对在多人跟踪的过程中所形成的错误跟踪轨迹进行更正.该方案采用单个低分辨率摄像头,最大限度的降低了成本以及对带宽和计算资源的要求.相对于单纯的热释电传感器网络,有效降低了多目标交叉场景下面的轨迹跟踪误差.而相对于基于摄像头的监控跟踪^[11]系统,其优势在于:单目标情况下摄像头无需连续工作,传输处理成本低;光照条件不佳时仍可对目标进行追踪.本文的贡献包括:提出了一种将多个热释电红外传感器与单个低分辨率视频监控器相结合的多目标跟踪方案;提出并实现了基于最小二乘法和 JPDA 的融合跟踪算法。

2 系统架构

系统是由热释电传感节点和摄像机组成的多人目标跟踪系统.其中,顶部的热释电传感器网络主要对人体目标进行定位与跟踪.识别系统主要由两部分组成,一部分是分布在侧面的热释电传感器网络;另一部分是摄像机系统.识别系统主要是作为人体跟踪的辅

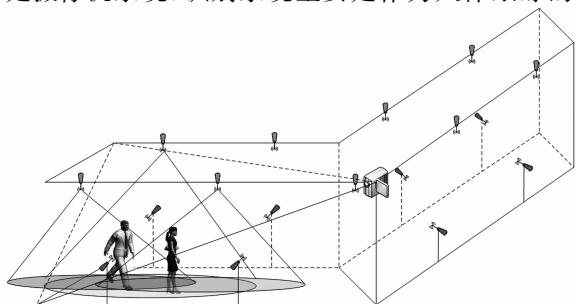


图1 场景示意图

助系统,对在多人跟踪的过程中所形成的错误跟踪轨迹进行更正,同时对人体目标进行识别.系统场景如图1所示。

在一个 L 型走廊中的天花板上安装了多个热释电传感器,并在转角处布置了一个低像素的视频监控器,监控器以固定的周期对走廊进行拍照.当单一人目标进入感应区域时,根据热释电传感网络中热释电节点的感应模型,利用最小二乘法对目标进行跟踪.当多人目标进入监控区域时,若两人距离相对较远时,即处于侧面热释电传感器辐射范围的非重叠区域,可以利用侧面的热释电传感器节点对人体的频谱特征进行提取,以实现目标识别,并传递给顶部的节点进行实时跟踪;若两人距离相对较近时,即处于同一个传感器的感测区域内,侧面的热释电传感器节点无法对目标特征进行提取,系统进行报警,切换到视频识别模式,利用图像信息进行特征提取,并将特征信息传递给顶部的热释电传感器,利用 JPDA 算法对目标进行跟踪。

3 热释电传感器网络跟踪模型

3.1 感知模式

文献[12]中提出一种新型热释电红外感知方法,采用俯视感知模式,其观测信息为距离信息,在某种程度上提高了定位精度,但是由于热释电红外传感器的信号与目标的感知部位、环境与目标温度差值^[13]等众多因素的影响,在对多目标进行跟踪时,容易造成对目标跟踪的错位或遗漏等,从而影响最终的定位和跟踪效果.另一方面,对于人体特征提取方面,基于摄像机的图像处理技术已经很成熟,对于图像信息中的特征提取比较方便。

综上所述,文中提出将摄像机用于目标特征提取,加入到热释电红外传感器网络系统中,能够在一定程度上提高传统热释电网络系统在多目标跟踪上的精度。

3.2 跟踪模型介绍

人体跟踪的基本思想是根据热释电红外传感器对一定波长的人体辐射较为敏感的特性,将空间区域进行几何分割和标记编码,借助热释电红外传感器,激发不同的传感器输出信号,将这些信号进行相应编码来对应获取目标所在位置,从而计算出人体的位置.对于

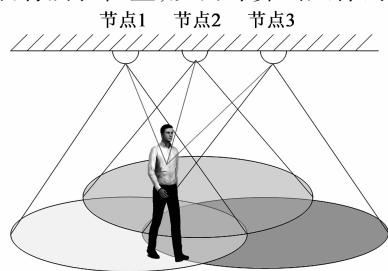


图2 测距节点观测场景示意图

热释电红外传感器节点检测单元,本文采用文献[12]提出的方法进行空间调制及运动检测,其观测场景如图2所示.节点1、节点2、节点3均为热释电红外传感器.

3.3 识别模型介绍

系统对两个人体进行跟踪时,可以使用热释电传感器模式或视频模式进行目标识别.

热释电模式:当目标人体分别位于图3中不同扇形的非重叠区域时,临近传感器节点会捕获目标红外信号,经过特征提取,并与训练好的频谱特征数据库进行比对,实现识别.

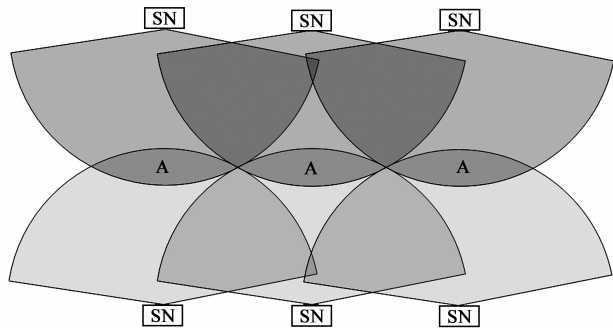


图3 侧视传感器节点检测范围分布图

视频模式:当目标人体同时位于图3中的同一扇形区域时,热释电节点同时收到多个目标的辐射信号,识别过程将出现异常.此时可以利用网络摄像头定时捕获图像信息,进行特征提取,以实现识别.(注:图3中的SN为热释电传感器节点,扇形为其检测区域)

与热释电识别模式相比,视频模式能够解决多人复杂运动轨迹场景下的识别问题;与视频模式相比较,热释电识别模式信号处理速度快,计算量小,效率高.

4 目标跟踪算法

4.1 算法整体介绍

在数据采集过程中,由于测距节点本身测距误差的影响,还会受到外界噪声的影响,数据采集结果往往受到一定干扰,因此采用单一的目标定位算法,很难精确的对目标位置进行估计.因此,这里使用最小二乘法与JPDA算法[14]相结合的方法,对采样数据进行融合处理.其信息处理过程如图4所示.

算法的整体框图如图4所示:当多个目标在观测区域运动时,三个节点分别会对目标物体进行数据采集,同一时刻会得到三组数据,每组数据包含多个目标的观测距离.首先利用最小二乘法的思想进行目标定位,然而观测互联会产生虚假量测,文中使用联合概率数据关联(JPDA)算法对所有量测集进行滤波.通过目标所在的区域选择不同的模式对JPDA的关联矩阵进行校正,并且每隔固定的时间利用图像的特征信息对JP-

DA关联矩阵进行校正,使其精度更高.

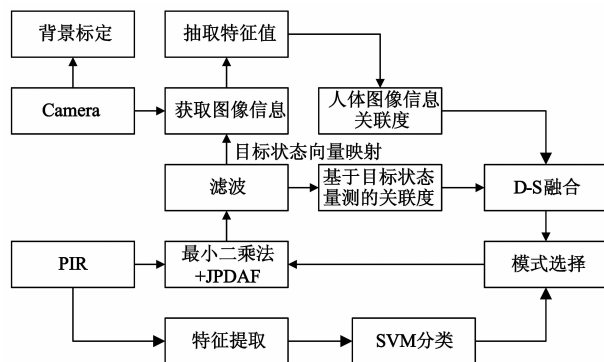


图4 信息处理流程

4.2 融合特征信息的JPDA算法

为了进一步提高JPDA算法的精度,提出将热释电以及视频特征信息周期性引入JPDA算法中,旨在热释电出现跟错时能通过视频的特征信息进行周期性校正.

首先定义三种关联度:

(1)基于目标状态量测的关联度

用 $\mathbf{Z}(k)$ 表示目标状态量测,第 k 次采样时,各个有效观测对应的状态量测与预测值的统计距离分别用 $D_1(k)$ 、 $D_2(k)$... $D_M(k)$ 表示.第 i 个观测的状态量测统计距离为:

$$D_i^2(k) = \mathbf{v}_i^T(k) \mathbf{S}_i^{-1}(k) \mathbf{v}_i(k) \quad (1)$$

其中 $\mathbf{v}_i(k) = \mathbf{Z}_i(k) - \mathbf{Z}(k/k-1)$ 为滤波残差向量, $\mathbf{S}_i(k)$ 为残差协方差.

(2)基于热释电工作频率的关联度

第 k 次采样时,各个有效观测对应的目标工作频率观测值用 $f_1(k)$ 、 $f_2(k)$... $f_M(k)$ 表示.设第 $k-1$ 次采样时该跟踪对应目标的工作频率观测值为 $f(k-1)$,记 $\Delta f_i(k) = |f_i(k) - f(k-1)|$ 为观测频差,简记为 $\Delta f_i(k)$.

基于工作频率的关联度记为 m_f ,它表示观测频差对关联程度的影响[15].

(3)基于图像信息的关联度

第 k 次采集时,各个有效观测对应的目标图像特征向量,观测值用 $\mathbf{P}_1(k)$ 、 $\mathbf{P}_2(k)$... $\mathbf{P}_M(k)$,设第 $k-1$ 次采样时该跟踪门所对应的目标图像特征向量观测值为 $\mathbf{P}(k-1)$,记 $\Delta \mathbf{P}_i(k) = |\mathbf{P}_i(k) - \mathbf{P}(k-1)|$ 为观测频率差,简记为 $\Delta \mathbf{P}_i$.其中 $\Delta \mathbf{P}_i$ 可以为人体在图像中的长宽比,矩形度,人体协方差.

基于图像特征向量的关联度记为 m_p ,它表示观测图像特征向量差对关联程度的影响,对不同的图像特征向量其定义是不同的,

$$m_p(i) = \begin{cases} a_2, & \Delta P_i \leq \xi \\ a_2 \left(\frac{(\Delta P_i - 2\xi)^2}{\xi^2} \right), & \xi < \Delta P_i \leq 2\xi \\ 0, & \Delta P_i \geq 2\xi \end{cases} \quad (2)$$

其中 $m_p(i) \in (0, a_2]$, a_2 表示权重, $m_p(i)$ 越大, 表示关联程度越高, ξ 为训练后的阈值。

由关联度定义可得关联度矩阵的定义:

$$\mathbf{F}^m = [\mathbf{f}_u^m]_{m_k \times T} \quad (3)$$

其中 $m = 1, 2, \dots, M$, $i = 0, 1, \dots, m_k$, $t = 0, 1, \dots, T$, \mathbf{f}_u^m 表示信息源 m 的第 i 个测量和目标 t 之间的关联度, m_k 是有效测量的个数, T 是目标的个数。

系统通过不同的识别方式, 来进行轨迹校正。下面给出不同针对特征信息算法的总体步骤:

(1) 热释电识别模式

i. K 时刻, 系统使用热释电来提取人体的红外信号, 并传输到数据处理终端;

ii. $K+1$ 时刻, 数据处理中心通过频谱信息提取目标特征, 得到目标的类别信息;

iii. $K+2$ 时刻, 根据上一步得到的类别信息, 进行目标关联, 同时通过热释电采集的信息进行最小二乘法与 JPDA 的计算后, 获取了人体的位置信息。

(2) 视频识别模式

i. K 时刻, 摄像机获取多人体目标的图像信息, 热释电网络获取多人体目标编码信息, 并传输到数据处理终端;

ii. $K+1$ 时刻数据处理中心通过图像处理机制获取图像信息中的人体特征信息, 同时通过热释电采集

的信息进行最小二乘法与 JPDA 的计算后获取了人体的位置信息。

iii. $K+2$ 对定位信息进行滤波, 同时并获取人体图像信息的关联度;

iv. 对人体目标状态量测进行关联度计算, 然后将人体图像信息关联度与目标状态测量关联度进行 D-S 融合^[16]。

v. $K+4$ 将融合的关联度信息反馈到 JPDA 的关联矩阵来判断跟踪门内的各个有效观测与真实目标的关联程度, 使多人跟踪更加精确, 同时可以修正错误的跟踪轨迹。

5 特征提取相关实验

5.1 基于热释电的特征提取实验

在目标跟踪的初始阶段, 利用热式电传感器检测到的目标时域波形进行快速傅立叶变换, 根据频谱的特征对目标类别信息进行区分, 从而在跟踪初始阶段实现目标的初步关联。

特征库建立过程中, 两个受试对象分别以 3 种不同速度(快速、中速和慢速)沿着指定路径行走 10 次, 共 $2 \times 3 \times 10$ 组样本数据。特征库建立过程如下:

(1) 对每组样本进行快速傅立叶变换;

(2) 通过主成分分析算法提取频谱主成分;

(3) 利用支持向量机对主成分数据进行分类;

对象 1 和对象 2 以三种不同的速度行走, 时域波形如图 5 所示, 对上述 6 组类别的信号进行快速傅立叶变换后的频谱如图 6 所示。

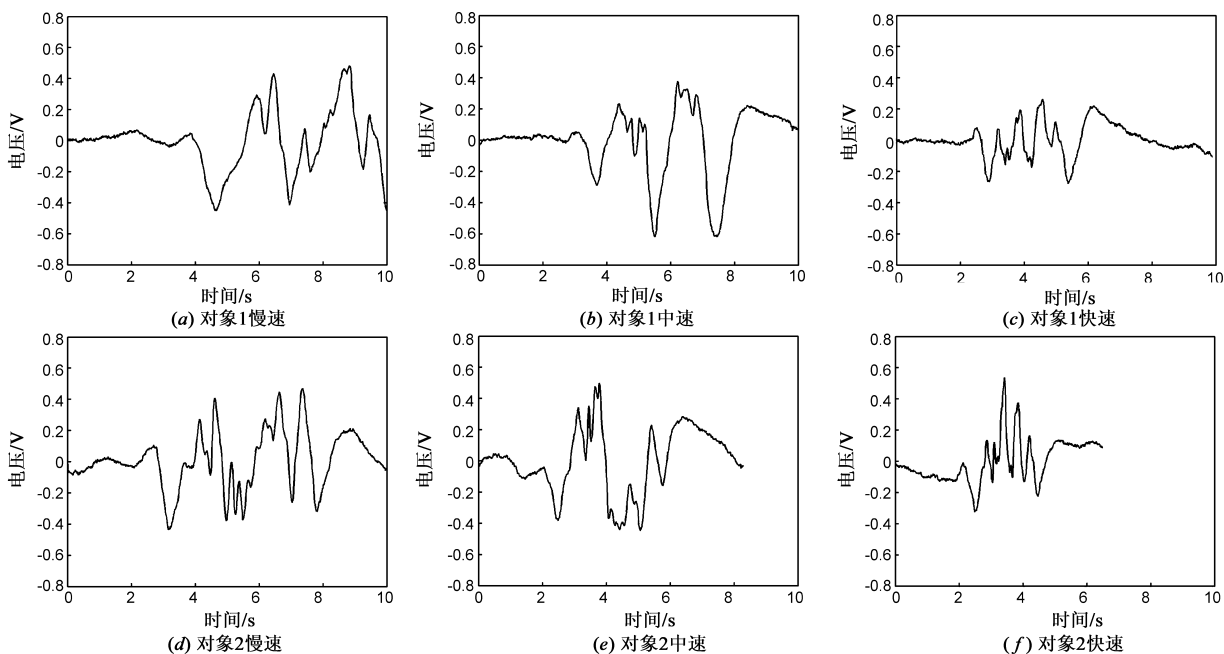


图5 两个对象以3种速度行走的时域波形

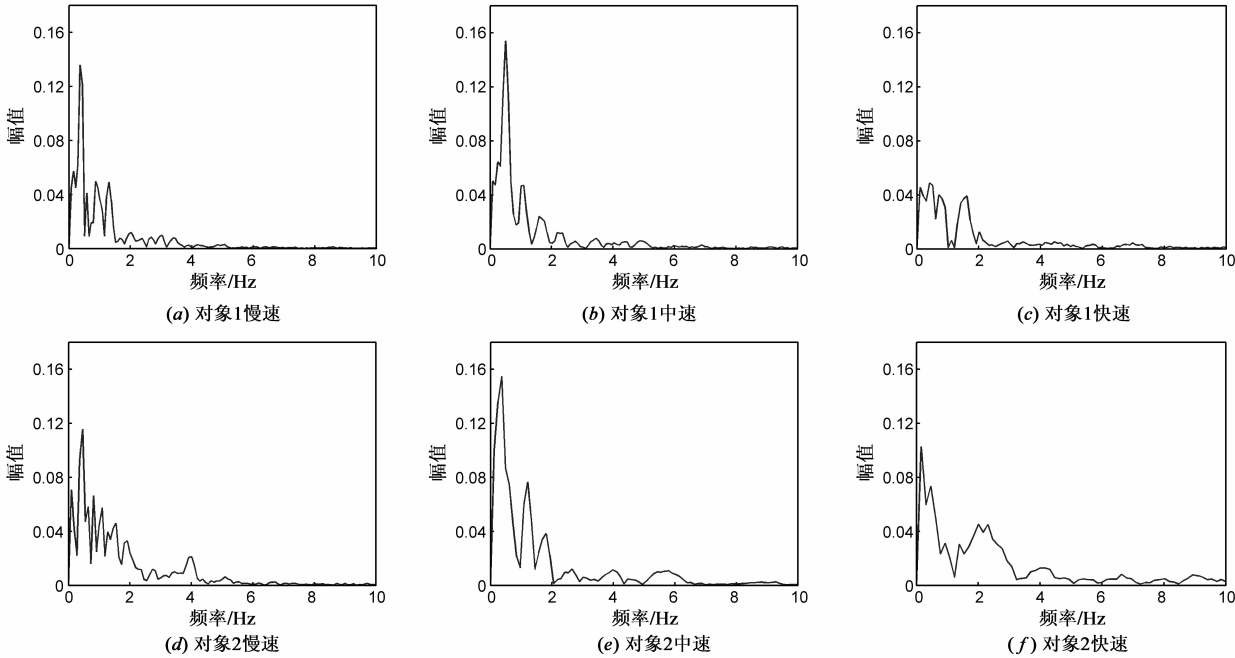


图6 两个对象以3种速度行走的频谱波形

分析可得不同对象之间时域信号波形相似,幅值不同,同一对象不同速度的时域波形幅值相似,变化快慢不同.

利用 PCA 算法提取 60 个样本频谱数据的前三个主成分,用三维图直观的描述不同样本类别之间的关系,如图 7 所示,可以将样本分为 2 类.其中,对象 1 用蓝色,对象 2 用黑色,快速用“+”,中速用“o”,慢速用“*”表示.每一个数据的分散程度体现了速度的差别.

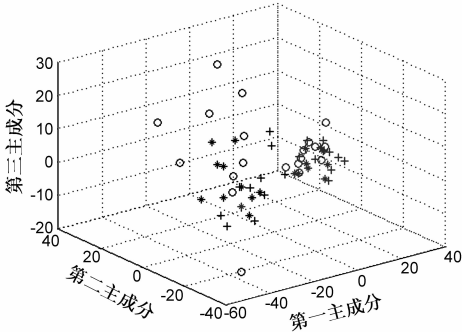


图7 对象1和对象2主成分构成的体系内的分布图

利用正确识别率作为分类器优劣的评价标准,对数据库中的 60 个样本进行分类识别,在 SVM 分类器^[17,18]中正确识别率如表 1 所示:

表 1 经过 PCA 处理后的正确识别率

频段/HZ	对象	正确识别率/%
0 ~ 10HZ	对象 1	97.67
0 ~ 10HZ	对象 2	96.33

5.2 基于视频的特征提取实验

摄像机每隔一段时间对 L 型走廊进行拍照,并将所拍照片通过无线网络传输到数据处理终端.本文使用 QT SDK 1.2.1 软件开发平台并结合计算机视觉库 OpenCV 2.3.1 完成对处理终端软件的编写,软件使用 Hog 特征算法结合 SVM 分类器进行静态人体检测并将结果存入相应存储区.实验环境为教学楼走廊,相机连续捕捉图像并传输给数据处理终端显示,当图像中出现多个人体目标时,调用存储区的检测结果并用绿色的矩形框将人体圈出,并将各个人体目标的长宽比特征和矩形度特征提取出来,同时存储到数据库中,如图 8 所示.提取到的特征值将转换为基于图像信息的关联度,配合 JPDA 算法提高关联矩阵的关联概率,提高跟踪精度.



图8 上位机实验示意图

6 实验结果及分析

实验对比了文献[2]、单纯基于热释电以及热释电与摄像头融合三种算法的效果,分别如图 9、10、11 所示.两个目标沿着先平行再相交的轨迹以 1m/s 的速度运动.仿真过程中,采样周期为 0.03s,热释电节点观测噪声的均值为 0,方差为 0.1m;实验采用蒙特卡洛仿真,仿真次数设定为 10.仿真过程中所取观测噪声均为高斯白噪声,服从正态分布.

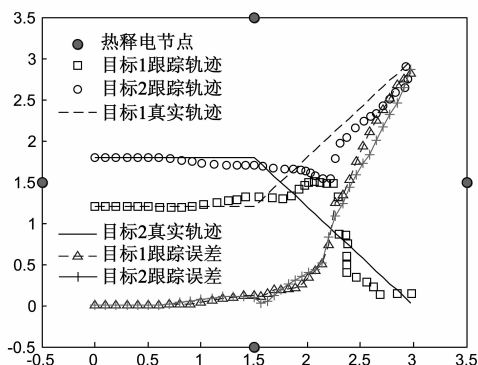


图9 基于文献[2]算法跟踪轨迹

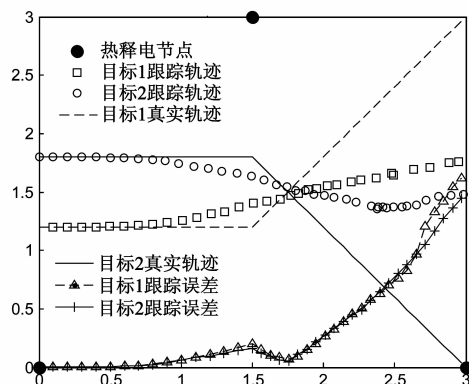


图10 单纯基于热释电算法跟踪轨迹

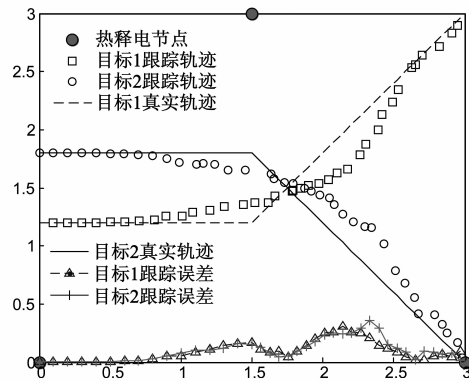


图11 热释电与摄像头融合算法跟踪轨迹

从图 9 和图 10 可以看出,当跟踪目标发生相交后,文献[2]算法和单纯基于热释电传感器的算法的误差

急剧增大,跟踪效果较差.而从图 11 则可以看出,基于热释电与摄像头融合算法在目标相交后误差略有增加,随即恢复到正常跟踪水平上,效果明显较图 9 和图 10 好.

为了进一步对误差分析,统计了不同方法的误差累计概率分布,如图 12 所示.从图中可以看出,当置信概率为 90% 时,融合算法的误差约为 0.3m,而文献[2]算法和单纯采用热释电传感器的误差分别约为 2.4m 和 1.2m,分别是融合算法的 8 倍和 4 倍;置信概率为 80% 时,融合算法的误差约为 0.2m,另外两种算法则分别为 1.7m 和 0.8m,分别是融合算法的 8.5 倍和 4 倍.可见融合算法相对于文献[2]算法和单纯采用热释电传感器的算法跟踪准确度提升明显.

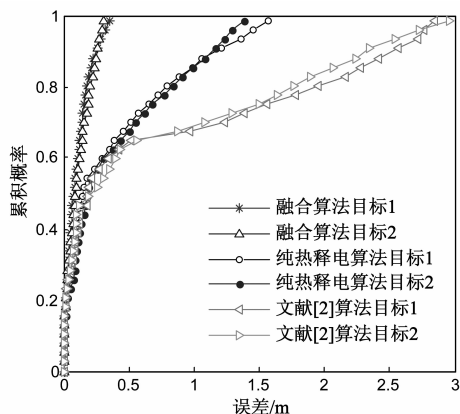


图12 误差累计概率分布图

7 总结与展望

现有基于热释电红外传感器的多目标跟踪系统在目标之间距离较近或者轨迹相交的情况下存在着误差较大的缺点.为了解决这个问题,本文提出了将多个热释电红外传感器与单个低分辨率视频监控器相结合的多目标跟踪方案.在给定的场景下,其误差仅为单纯采用热释电算法的 1/4,文献[2]的 1/8.跟踪效果提升明显.如何利用摄像机提取的特征建立特征库,进行多目标识别是今后深入研究的重点.

参考文献

- [1] 孙乔,杨卫,于海洋,等.动态下红外热释电传感器的目标定位方法[J].红外与激光工程,2012,41(9):2288-2292.
Sun Qiao, Yang Wei, Yu Haiyang, et al. New target location method based on dynamic pyroelectric infrared sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2288-2292. (in Chinese)
- [2] Qi Hao, Brady D J, Guenther Bob D, et al. Human tracking with wireless distributed pyroelectric sensors[J]. IEEE Transactions on Sensors Journal, 2006, 6(6): 1683-1696.

- [3] Qi Hao, Fei Hu, Yang Xiao. Multiple human tracking and identification with wireless distributed pyroelectric sensor systems [J]. IEEE Systems Journal, 2009, 3(4): 428 – 439.
- [4] Qi Hao, Fei Hu, Jiang Lu. Distributed multiple human tracking with wireless binary pyroelectric infrared (PIR) sensor networks [A]. Proceedings of IEEE Sensors [C]. Kona, HI: IEEE, 2010. 946 – 950.
- [5] Jiang Lu, Jiaqi Gong, Qi Hao, et al. Space encoding based compressive multiple human tracking with distributed binary pyroelectric infrared sensor networks [A]. Proceedings of IEEE Conference on MFI [C]. Hamburg: IEEE, 2012. 180 – 185.
- [6] Ken Chen, Dong Li, Tiefen Xu. A self – adaptive alternation of video tracking modes governed by detection of online kalman performance optimality [A]. Proceedings of IEEE International Conference on PIC [C]. Shanghai: IEEE, 2010. 781 – 785.
- [7] Pan Pan, Schonfeld D. Dynamic proposal variance and optimal particle allocation in particle filtering for video tracking [J]. Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(9): 1268 – 1279.
- [8] 孙倩茹, 王文敏, 刘宏. 视频序列的人体运动描述方法综述 [J]. 智能系统学报, 2013, 8(3): 189 – 198.
Sun Qianru, Wang Wenmin, Liu Hong. Study of human action representation in video sequences [J]. CAAI Transactions on Intelligent System, 2013, 8(3): 189 – 198. (in Chinese)
- [9] 卓力, 张菁, 等. 一种面向无线视频传感器网络的多径 QoS 保障路由协议 [J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1122 – 1129.
Zhuo Li, Zhang Jing, et al. A QoS-guaranteed multi-path routing protocol for WVSNs [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1122 – 1129. (in Chinese)
- [10] Li Q, Andreopoulos Y, Van der Schaar M. Streaming-viability analysis and packet scheduling for video over in-vehicle wireless networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(6): 3533 – 3549.
- [11] Sato Y, Hashimoto K, Shibata Y. A new video surveillance video tracking system based on omni-directional and network controlled cameras [A]. Proceedings of International Conference on Advanced Information Networking and Applications [C]. Bradford: IEEE, 2009. 602 – 607.
- [12] 申柏华, 罗晓牧, 王国利. 运动检测与定位的热释电红外传感新方法 [J]. 光电子·激光, 2010, 21(9): 1350 – 1354.
Shen Baihua, Luo Xiaomu, Wang Guoli. An approach for motion detecting and localization using pyroelectric infrared sensor [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 21(9): 1350 – 1354. (in Chinese)
- [13] 张晔, 杨卫, 岳元, 等. 基于热释电红外传感器探测距离影响因素的研究 [J]. 红外与毫米波学报, 2010, 29(6): 448 – 451.
- Zhang Hua, Yang wei, Yue Yuan, et al. Influencing factors research of detection range on pyroelectric infrared sensor [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(6): 448 – 451. (in Chinese)
- [14] Zhang Z, et al. Multi-target tracking using the sign of innovations in wireless sensor networks [A]. Proceedings of Control and Decision Conference [C]. Taiyuan: IEEE, 2012. 3353 – 3357.
- [15] 王杰贵, 罗景青. 基于多目标多特征信息融合数据关联的无源跟踪方法 [J]. 电子学报, 2004, 32(6): 1013 – 1016.
Wang Jiegui, Luo Jingqing. Passive tracking based on data association with information fusion of multi-feature and multi-target [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 1013 – 1016. (in Chinese)
- [16] Liu X, Leung H, Valin P, et al. Multisensor joint tracking and identification using particle filter and Dempster-Shafer fusion [A]. Proceedings of IEEE Conference on Information Fusion [C]. Singapore: IEEE, 2012. 902 – 909.
- [17] Zeng C, Ma H, Ming A. Fast human detection using mi-SVM and a cascade of HOG-LBP features [A]. Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]. Hong Kong: IEEE, 2010. 3845 – 3848.
- [18] Said Y, Atri M, Tourki R. Human detection based on integral histograms of oriented gradients and SVM [A]. Proceedings of International Conference on CCCA [C]. Hammamet: IEEE, 2011. 1 – 5.

作者简介



李方敏 男. 1968 年 6 月出生, 湖南涟源人. 教授、博士生导师, 中国计算机学会高级会员, 传感器网络专委会委员. 1990 年、1997 年和 2001 年分别在华中理工大学、国防科技大学和浙江大学获工学学士、工学硕士和工学博士学位. 主要从事无线自组织网络、新型网络体系结构、嵌入式系统等方面的工作.

E-mail: lifangmin@whut.edu.cn



姜娜 女. 1989 年 1 月出生, 河北衡水人. 2012 年毕业于武汉理工大学信息学院, 获工学学士学位. 现为该校信息与通信工程专业硕士研究生. 研究方向为信号处理、模式识别及应用等相关研究.