

分布式无线传感网络的协作目标跟踪策略

王 雪,王 晟,马俊杰

(清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室,北京 100084)

摘 要: 基于图像序列的目标跟踪是目标跟踪的重要研究问题之一. 由于受图像解析度和跟踪范围限制,单视角跟踪准确性和鲁棒性不足. 本文提出了分布式无线传感网络测量环境下的多视角协作融合跟踪方法,并引入了渐进分布式数据融合,采用基于能耗参数和信息有效性参数的综合优化函数动态选择融合节点,规划融合过程,平衡融合精度与网络能耗. 通过目标跟踪准确性、网络能耗及传输延时对比实验表明:基于渐进分布式数据融合的协作信号处理方法提高了分布式多视角跟踪的准确性与实时性,减少了网络拥塞,降低了通讯能耗及延时.

关键词: 分布式无线传感网络; 协作信号处理; 目标跟踪; 数据融合

中图分类号: TP1, TP3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 05-0942-04

Collaborative Target Tracking Strategy in Distributed Wireless Sensor Networks

WANG Xue, WANG Sheng, MA Jun-jie

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Target tracking in complex situations is challenging, especially in visual tracking, which is always performed in single-view system. Because of the conflict between resolution and tracking range, however, single-view tracking is not robust and accurate. This paper presents a distributed multi-view tracking system using collaborative signal processing (CSP) in distributed wireless sensor networks (DWSNs), and introduces a progressive distributed data fusion mechanism. This mechanism dynamically chooses the optimal sensor nodes and schedules the fusion process with several measures of energy consumption and information utility. Finally, an indoor target tracking experiment is illustrated, and then tracking performance, execution time and energy consumption of progressive distributed data fusion based CSP are compared with centralized data fusion based CSP. Experimental results demonstrate that the distributed multi-view tracking system using progressive distributed data fusion based CSP in DWSNs can track the 3-D positions of targets quickly and accurately, and decrease the congestion, energy consumption and time latency in communication.

Key words: distributed wireless sensor networks; collaborative signal processing; target tracking; data fusion

1 引言

基于图像序列的目标跟踪是目标跟踪的重要研究问题之一. 相比于单视角跟踪,多视角信息融合有利于扩大跟踪范围,减少观测干涉,提高跟踪准确性^[1]. 分布式无线传感网络由中心处理节点和大量无线传感节点组成,为多视角跟踪策略的实现提供了硬件必备条件. 各传感节点独立完成不同视角的图像采集、目标提取、目标分类等工作,并将结果发送至中心处理节点完成数据融合.

由于无线传感网络节点的能量、带宽资源、感知范围和信号处理能力有限,节点的协作可以提高网络性能和容错能力^[2]. 如何有效地协调网络资源,实现无线传感网络协作信号处理已成为当前无线传感网络研究的热点问题之一^[2,3]. 为解决这一问题,本文提出基于协作信号处理(collaborative signal processing,简称 CSP)的分布式多视角跟踪方法. 同时本文针对集中式数据融合方法能耗高、延时长不足,采用渐进分布式数据融合方法降低网络拥塞,减少网络能耗及延迟,并针对节点选

择提出了采用能量熵和马氏距离的能耗、剩余能量、信息有效性、节点特性、信息反馈等多参数评价方法. 最后针对复杂环境下多目标跟踪情况进行了室内条件下的多目标分类跟踪实验.

2 渐进分布式融合方法

无线传感网络信息融合可分为集中式和分布式两类. 由于集中式融合需将各节点信息直接传送给中心处理节点实现融合,各节点的无序传输将导致无线网络联接拥塞,降低传输可靠性,减少网络寿命. 分布式融合方法根据节点信息进行分簇,并选择簇首节点. 融合过程中,先在簇首节点处完成簇内融合,再将融合结果传递至中心处理节点实现最终融合. 分布式融合方法通过簇内融合减少传输能耗,但簇内信息融合和传递仍由节点自主实现,且无法实现节点动态选择.

本文引入一种新的渐进分布式融合方法,实现网络能耗与融合精度的优化平衡. 测量过程中,中心处理节点根据评价参数选择节点. 该节点根据周围节点状况选择下一节点,并传递数据信息. 新节点将接收到的信息

与本地信息融合后选择下一节点,并传递融合结果.循环节点选择和渐进融合直至结果满足精度要求,最后将融合结果传递至中心处理节点.由于该方法根据各节点当前状态动态选择节点完成数据融合,并通过顺序传输共享决策信息,因此可以减少网络传输拥塞,降低网络能耗和延时.动态节点选择还有利于提高网络的适应性和稳定性.当系统延时低于一个测量周期时,可将顺序信息传输视为同步过程.

3 分布式无线传感网络目标跟踪方法

分布式无线传感网络目标跟踪方法由基于动态背景构建的目标测量^[4]、采用主元分析和支持向量机方法的目标分类^[5]、多视角协作融合定位、无迹 Kalman 滤波目标跟踪^[6]和最优似然估计数据关联^[7]五个基本步骤组成.本文主要介绍多视角协作融合定位中所采用的渐进分布式数据融合方法.

3.1 多视角融合定位

如图 1 所示,假设目标位置测量不确定度可用 2 维 Gaussian 分布表示.图 2 中,多视角融合定位将各节点的 2 维 Gaussian 分布映射为相应目标区域内的概率分布,然后融合映射后的概率分布获取目标位置分布:

$$P(X | Z_1, \dots, Z_n) = \left[\prod_{i=1}^n P(X | Z_i) \times P(Z_i) \right] \quad (1)$$

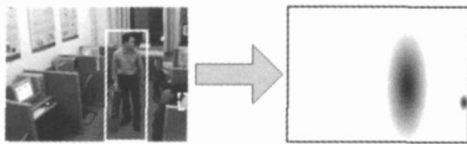


图 1 目标位置不确定度的 2 维 Gaussian 分布

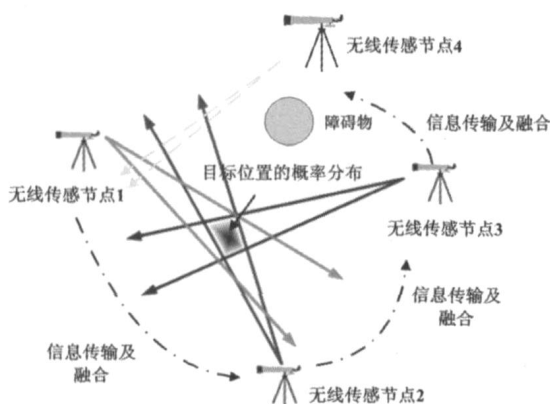


图 2 多视角融合定位方法的基本原理

其中, X 为目标位置随机变量, $P(X | Z_i)$ 代表节点 i 测得的 Gaussian 分布, $P(Z_i)$ 为相关系数, 此处为目标与节点距离的倒数, 是归一化算子. X 的数学期望即为目标位置的估计结果:

$$E(X) = \sum_{i=1}^s x_i \cdot p(x_i) \quad (2)$$

由式(1)可知,若各节点工作正常,则融合精度将

高于节点最高精度.若部分传感节点失效或目标被遮挡(如图 2 中节点 4),则这些节点的信息不能用于融合.事实上,若节点信息存在以下任一情况则认为该节点不可用:不提供方位信息;所提供信息融合后使目标概率分布为零;融合后(归一化前)的目标概率分布值偏小(即只有少部分交集).

3.2 渐进分布式多视角融合

渐进分布式多视角融合采用渐进分布式融合方法,其节点选择目标函数为:

$$M(S_i) = - \cdot \text{Cost}(S_i) + (1 -) \cdot \text{Utility}(S_i) \quad (3)$$

其中, S_i 指第 i 个传感节点, Cost 为能耗参数, Utility 是信息有效性参数, 为调节系数.节点选择可定义为如下优化问题:

$$\hat{\lambda} = \arg \max_{i \in \Lambda} (M(S_i)) \quad (4)$$

能耗参数 Cost 主要考虑通讯能耗的影响.给定标准距离 d_0 下的最小传输能耗 $P_{0,trans}$,即时传输能耗与中心节点 S_i 和 S_j 之间的空间距离 $d_{i,j}$ 相关^[8]

$$P_{i,trans} = \frac{d_{i,j}^2}{d_0^2} \times \frac{(4)^2}{G_i G_r} \times P_{0,trans} \quad (5)$$

式中, G_i 为中心节点 S_i 发射系数, G_r 为中心节点 S_j 接收系数, 为无线通讯波长, 为系统功耗因子. $\frac{(4)^2}{G_i G_r} \times P_{0,trans}$ 为常数,因此可采用 $\frac{d_{i,j}^2}{d_0^2}$ 作为单位数据传输能

耗评价指标.

除能耗外,无线传感网络寿命也是评价任务分配控制策略的重要指标.为延长网络寿命,使用过程中应平衡各节点能量.各节点剩余能量的平均性可采用能量熵理论衡量.当 t 时刻完成数据传输后,无线传感网络的剩余能量熵定义如下:

$$H(S_{it}) = - \sum_{it \in S_g} p(E_{it}) \log p(E_{it}) \quad (6)$$

综上,网络传输能耗评价参数为:

$$\text{Cost}(S_i) = - \frac{d_{i,j}^2}{d_0^2} \cdot H(S_{it}) \quad (7)$$

Cost 越大表示信息传输对网络能量造成的影响越大.

信息有效性参数 Utility 可用各节点对融合精度的贡献度衡量.文献[3]采用马氏距离预测节点对当前置信状态更新效果的贡献度 Mahal :

$$\text{Mahal}(S_i) = - (P_{s_i} - \bar{X})^T \Lambda^{-1} (P_{s_i} - \bar{X}) \quad (8)$$

其中, P_{s_i} 是节点 s_i 的位置, \bar{X} 和 Λ 是目标位置置信状态的均值和协方差.

信息有效性还受环境影响.本文以节点预测结果与融合结果的相似性为置信因子 Trust ,用于评价环境对节点测量产生的影响.

$$Trust(X_{s_i}, \hat{X}, \hat{\Sigma}) = \frac{1}{(X_{s_i} - \hat{X})^T \hat{\Sigma}^{-1} (X_{s_i} - \hat{X})} \quad (9)$$

其中 X_{s_i} 是前一时节点 i 的测量结果, \hat{X} 和 $\hat{\Sigma}$ 是前一时节点最终融合结果的均值和协方差.

将能耗参数和信息有效性参数带入式(3)可得节点选择目标函数:

$$M(S_i) = \frac{1}{\lambda} \left(d_{i,j}^2 \cdot H(S_{i,j}) - (1 - \frac{(P_{s_i} - \hat{X})^T \hat{\Sigma}^{-1} (P_{s_i} - \hat{X})}{(X_{s_i} - \hat{X})^T \hat{\Sigma}^{-1} (X_{s_i} - \hat{X})}) \right) \quad (10)$$

4 实验结果

4.1 实验设置与多目标跟踪结果

如图3所示,无线传感网络由18个无线传感节点和1个中心处理节点组成.传感节点包含一个60°视角的CMOS图像传感模块和一个热释红外传感模块,图像采集速率30帧/秒、分辨率160×120像素.每个渐进融合过程周期为0.1秒,数据包大小1kbytes,包含目标位置预测信息、不完全融合结果和已传递节点列表.能量信息共享周期为60秒.无线传感网络通讯参数设置如表1所示.

信道参数	参数值
数据率	19.2kbps
基频	900MHz
MAC协议	CSMA/CA
带宽	7.2MHz

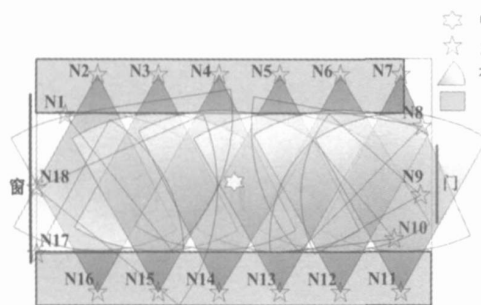


图3 无线传感网络布置视图

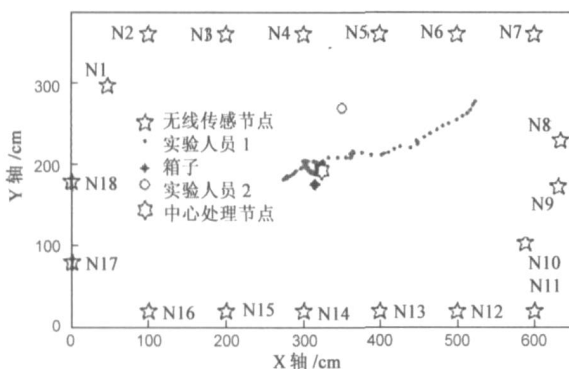


图4 渐进分布式多视角协作融合多目标跟踪实验结果

图4为渐进分布式多视角协作融合多目标跟踪实验结果.实验结果与实际目标移动一致.实验表明渐进分布式多视角协作融合跟踪方法能有效实现多目标的测量、分类和跟踪.

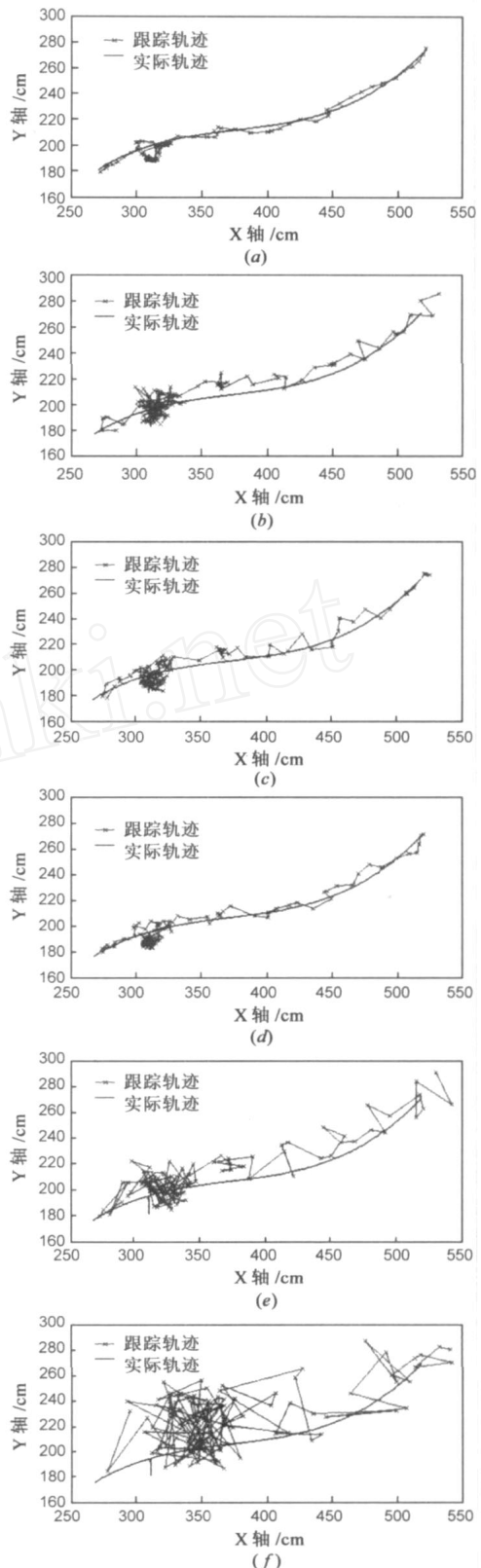


图5 不同多视角协作融合方法跟踪轨迹

4.2 性能对比

如图5所示,分别采用渐进分布式和集中式多视角

协作融合方法实现跟踪,比较不同融合方法对跟踪性能的影响,其中图 5(a) 为渐进分布式融合轨迹,图 5(b)~5(f) 为固定节点数量为 5~9 的集中式融合结果。

随参与融合节点数量增加,集中式融合跟踪准确性先提高后降低。这是由于传感节点与中心处理节点间的无序数据传输使无线联接产生拥塞,导致丢包。当网络延时超过测量周期时,将出现信息序列紊乱,融合精度迅速下降。而渐进分布式融合算法能根据融合精度要求动态选择节点,通过顺序传递共享决策信息,减少网络拥塞,降低耗时,使融合过程能满足实时性要求。由实验结果看,渐进分布式融合跟踪性能优于集中式融合。

如图 6 所示,实验比较了不同融合方法的多视角协作融合跟踪通讯延时和能耗随融合节点数量变化的情况。两种融合方法的通讯延时和能耗都随融合节点数量的增加而增加,而渐进分布式融合方法在通讯延时和能耗上均优于集中式融合方法。

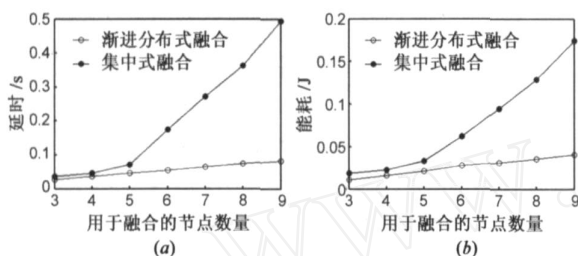


图 6 不同融合方法的延时与能耗随融合节点数量变化的趋势

5 结论

本文探讨了分布式无线传感网络中多目标跟踪问题,提出了一种基于协作信号处理的分布式多视角跟踪方法,针对多视角协作融合定位问题,提出了渐进分布式融合方法,对集中式融合和渐进分布式融合方法进行了多目标多视角融合移动跟踪实验,实验表明:

(1) 渐进分布式多视角协作融合跟踪方法能适应并准确的完成复杂环境下的多目标跟踪。

(2) 多视角协作融合定位方法可以有效提高目标定位的精度与鲁棒性。

(3) 渐进分布式融合方法通过动态、渐进式、低能耗数据融合过程,减少了分布式无线传感网络的带宽占用和网络能量消耗,满足了实时移动目标跟踪的要求。与集中式融合方法相比,提高了跟踪准确性,减少了网络传输拥塞,降低了网络传输能耗和网络传输延迟。

参考文献:

- [1] Meesookho C, Narayanan S, Raghavendra C S. Collaborative classification applications in sensor networks [A]. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop [C]. New York, NY, USA: IEEE, 2002. 370 - 374.
- [2] Xu Y, Qi H. Distributed computing paradigms for collaborative signal and information processing in sensor networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2004, 64 (8): 945 - 959.
- [3] Zhao F, Shin J, Reich J. Information-driven dynamic sensor collaboration for tracking applications [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19 (3): 61 - 72.
- [4] Haritaoglu I, Harwood D, Davis L S. W4: real-time surveillance of people and their activities [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (8): 809 - 830.
- [5] Lu S, Zhang J, Feng D. Classification of moving humans using eigenspace features and support vector machines [A]. CAIP [C]. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2005. 522 - 529.
- [6] Julier S J, Uhlmann J K. A general method for approximating nonlinear transformations of probability distributions [R]. Oxford University Engineering Science Department, Oxford, U.K. 1996.
- [7] Li X R, Bar-Shalom Y. Tracking in clutter with nearest neighbor filters: analysis and performance [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32 (3): 995 - 1010.
- [8] Wu Q, Rao N S V, Barhen J. On computing mobile agent routes for data fusion in distributed sensor networks [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16 (6): 740 - 753.

作者简介:



王 雪 男,清华大学仪器科学与技术研究所所长,博士,副教授。主要研究方向为计算机测控技术和现代传感技术及其信号处理。
E-mail: wangxue@mail.tsinghua.edu.cn

王 晟 男,博士研究生。主要研究方向为计算机测控技术、传感信号处理和虚拟测量等。