

一种适用于多媒体传感器网络的图像拼接算法^{*}

熊哲源¹, 樊晓平^{1,2}, 刘少强¹, 李勇周¹, 钟 智¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410075; 2. 湖南财政经济学院 网络化系统研究所, 长沙 410205)

摘要: 为充分利用有限的资源产生高分辨率、宽视角图像, 考虑到相邻无线视频节点之间的信息冗余性, 提出一种适用于无线多媒体传感器网络的图像拼接算法。使用分块搜索算法进行图像配准以降低能耗, 改进绝对差值和算法以提高图像配准的精度, 并使用渐进渐出的加权平均算法对图像进行缝合, 图像拼接之后与基站间的通信量减少, 可以有效降低网络负载。仿真实验结果表明, 所提出的算法在保证一定图像配准精度和图像质量的情况下, 计算复杂度较低, 可以有效节约能量。

关键词: 无线多媒体传感器网络; 图像拼接; 分块搜索; 加权平均融合

中图分类号: TN911.21

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)05-1970-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.05.098

Image mosaicking algorithm for wireless multimedia sensor networks

XIONG Zhe-yuan¹, FAN Xiao-ping^{1,2}, LIU Shao-qiang¹, LI Yong-zhou¹, ZHONG Zhi¹

(1. School of Information Science & Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Institute of Networked Systems, Hunan University of Finance & Economics, Changsha 410205, China)

Abstract: For sufficient utilization of constraint resource on generating high-resolution images with wide field of view, this paper proposed an algorithm took fully account the redundant visual information among multiple video sensors. It applied the image block searching algorithm for image registration to decrease the energy consumption, adapted sum of absolute difference algorithm to improve the accuracy of image registration, and applied weighted mean algorithm for image stitching. It decreased data volumes of transmission after image mosaicking, which could efficiently reduce the network loading. Simulation results demonstrate that the computation complexity of proposed algorithm is lower than other image mosaicking algorithm, under certain image registration accuracy and image quality.

Key words: wireless multimedia sensor networks(WMSN); image mosaicking; block searching; weighted mean fusion

0 引言

无线多媒体传感器网络(WMSN)由多个无线视频传感器节点组成,这些节点装备有摄像头、嵌入式处理器和无线电收发器。由于部署迅速、灵活、维护成本低和鲁棒性等特点,WMSN具有十分广泛的应用前景,如安全系统、跟踪系统和远程监控系统等^[1]。理想的监控模式是能进行视频回顾,但是视频压缩会消耗相当多的能量,占用大量计算资源和传输带宽。此外,如果一帧图像丢失,需要重传数据,会产生严重网络延迟。因此,目前WMSN主要使用静态图像进行视频监控。然而,无线视频节点所捕获的图像分辨率低、视角小,难以满足视频监控的需求,利用WMSN的有限资源完成视频监控任务是具有挑战性的工作。

视频监控大多是从一个特定的场景捕获图像,为了满足更多的需求,扩大图像的视角,增加图像的分辨率是十分有必要的。而无线视频节点装备的低端摄像头所捕获图像大多分辨率较低,难以满足许多应用的需求。高覆盖率、高可靠性、低功耗、高功能性是监控应用达到更高性能的必要因素。最近,增强区域覆盖,提高分辨率,扩大视角成为了WMSN的研究热点

之一。面向WMSN的视频监控应用,学者们应用图像融合技术,使用新的编码方法等手段,将一组低分辨率的图像变成高分辨率图像。

Tezcan等人^[2]通过调整无线视频传感器的方向使得WMSN的覆盖最大化,依靠环境而不是视频传感器部署时的初始位置,动态地寻找视频传感器的最佳方向,决定节点的覆盖范围,使得遮挡效果和感知重叠区域最小化。之后,Tezcan等人^[3]改进了之前的工作,采用分布式算法决定每个传感器节点最能受益的方向,使用局部信息,这样只有邻居节点之间互相通信。由于能够灵活地调整视频节点的方向,可以显著增加覆盖范围。但这些方法也存在缺陷:a)这些方法基于单层拓扑结构,而WMSN使用多层拓扑结构可以在功耗、覆盖、功能性、可靠性方面达到平衡;b)使用大功率节点,装备可旋转的摄像头平台,功耗较高;c)视频节点的转向是由机械设备操作的,不适用于实时监控应用;d)因为没有保证一个节点和它的邻居节点覆盖同一个区域,使得WMSN的可靠性降低,如果一个节点失效,部分区域可能不会被覆盖^[4]。

Kansal等人^[5]在WMSN中给视频节点增加运动功能,包括平移、倾斜和变焦,帮助避开障碍物和摄像头重叠区域,以获

收稿日期: 2011-09-09; 修回日期: 2011-10-11 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60776834, 60870010)

作者简介: 熊哲源(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为无线多媒体传感器网络、图像处理;樊晓平(1961-),男,教授,博导,主要研究方向为智能控制、无线传感器网络、智能信号处理等;刘少强(1964-),男,副教授,博士,主要研究方向为传感器及智能检测技术、无线传感器网络;钟智(1982-),男,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络定位、路由协议。

得虚拟高分辨率图像。但是,这个方法并不实用,因为节点运动会增加延迟,而且节点小范围运动并不一定能捕获高分辨率图像,却会消耗许多能量。

Soro 等人^[6]提出一种面向应用的路由算法,减少视频节点的重叠区域,优化视频节点的覆盖方案。由于使用单层拓扑结构,节点要转发大量数据,会减少网络寿命。此外,节点的处理能力低,无法过滤信息,传输的都是原始数据。

Balasubramanian 等人^[7]提出一种面向低像素视频传感器网络的图像配准算法,但是并没有给出传感器网络的拓扑结构和通信标准。其能耗和所达到的最优覆盖和像素的优化依赖于网络拓扑结构、节点之间的通信方案以及视频节点的选择算法。而该算法使用的仿射变换不适用于传感器网络,因为视频节点的方向各不相同。

国内学者也对这个问题进行了研究。文献[8]在进行图像融合前假定已找到对感兴趣目标实施共同监测且相关性最大的一对视频节点,该条件需要大量计算才能实现,且其融合算法复杂度较高。文献[9]在无线视频节点上进行彩色图像融合,其计算复杂度高,会消耗许多能量。这些算法没有充分考虑 WMSN 资源受限的特性,不能满足 WMSN 的应用需求。

WMSN 的监控任务通常由多个无线视频节点完成,邻近无线视频节点采集的信息存在冗余性,即图像之间有重叠区域。将两幅或更多具有重叠区域的图像拼接起来,组成宽视角、高分辨率的图像,既可以满足视频监控的高级应用需求,也可以有效地降低网络负载,从而延长网络生命周期。现有的图像拼接算法计算复杂度高,不适用于 WMSN。为了利用 WMSN 有限的资源产生高分辨率、宽视角的图像,本文研究了一种适用于 WMSN 的图像拼接算法。

1 系统模型

WMSN 视频监控的主要性能要求有高覆盖率、高可靠性、低功耗和高功能性。绝大多数单层传感器网络只能满足监控性能要求中的一项。例如,使用多个低功耗视频节点可以增加覆盖,但是由于这些节点能力有限,降低了网络的功能性。另外,使用高端节点可以增加网络的功能性,而通过增加网络密度来提高可靠性会消耗许多资源。多层拓扑结构可以在功耗、功能性、可靠性和覆盖之间实现较好的平衡。例如,底层使用功能性较弱的低端传感器,而上层则使用功能性较强的高端传感器来弥补这个缺陷。为了实现功耗、功能性、覆盖和可靠性之间的平衡以满足 WMSN 各类应用需求,本文使用一种两层的 WMSN 体系结构。上层节点不装备摄像头,但具有较强的处理能力、通信单元和存储能力,负责管理下层节点、信息收集和处理,并将处理结果发送到基站。底层节点装备低端视频传感器。由于上层节点处理能力较强,可以将底层节点捕获的低分辨率图像拼接得到高分辨率、宽视角的图像。

将整个网络划分为几个簇,每个簇包括一些视频节点和一个簇头节点,分散在监控区域。每个视频节点由一个低功耗图像传感器连接到一个嵌入式传感器平台组成。每个视频节点负责从兴趣区域到簇头节点的图像检索、处理和传输。在模型中使用两个假设:a) 视频节点适当地分布在监控区域并保证网络完全连通,每个节点和邻居节点的距离在通信半径 d 内,所有节点都不可移动且能量有限;b) 每个视频传感节点通过

一个定位算法知道自己的位置,并知道邻居节点的 ID 和剩余能量。

2 图像拼接算法

WMSN 中视频节点的分辨率较低和视场较小,但是大多数应用需要高分辨率、宽视角的图像。可以使用图像拼接方法将视频节点捕获的图像拼接产生一幅监控区域的宽视场、高分辨率图像。图像拼接一般包括图像预处理、图像配准和图像缝合三个步骤。考虑到图像去噪和图像增强的计算量较大,而节点资源有限,本文对待拼接图像不作预处理。虽然,光照条件的变化,图像采集过程中的噪声干扰,图像的比例变化、旋转、遮挡等都会严重影响图像匹配结果。但是,由于 WMSN 使用同质的无线视频节点,其成像条件如光照条件、成像系统性能、大气条件等基本相同,因此不需要进行灰度值偏差修正。

本文的图像拼接算法步骤如下:首先,视频节点捕获图像,使用 JPEG 标准进行编码,将图像传输至簇头节点;然后,进行图像配准,找到两幅图像中相似度最高的分块进行图像对准;最后,进行图像缝合,得到图像拼接的结果。

2.1 图像配准

图像配准的目标图像是从不同视角获得的相同场景图像,有一部分反映了同一目标区域,为扩大二维场景的视角进行配准。图像配准主要使用直接法和基于特征的方法。直接法基于重叠区域的像素差值使用迭代函数,适用于源图像发生平移和旋转运动的情况,当源图像有多种分辨率或者经历其他复杂的运动时计算复杂度会很高;基于特征的方法要建立点、线或其他几何实体之间的联系,以各类特征作为判断准则,对图像的缩放和变形具有不变性。直接法的计算复杂度明显低于基于特征的方法,因为直接方法使用块匹配来比较相似度,只把像素灰度值作为相似度准则。由于 WMSN 使用同质的视频节点,图像分辨率相同,可能发生平移或旋转运动,不会进行图像缩放,相邻节点图像具有重叠区域。另外,无线视频节点资源受限,因此,使用计算复杂度较低的直接法进行图像配准。本文采用图像分块搜索算法对两幅图像配准,用改进的绝对差值和算法搜索相似度最高的分块,进行图像对准。

1) 确定分块尺寸 图像分块搜索配准以块为单位进行相似度估计,在进行图像配准之前应该确定分块的尺寸,分块过大或过小都会增加图像配准失败的可能性。一个合适的分块尺寸应该能够充分识别信息和最小的无价值数据。根据 Richard 等人^[10]的实验,当分块尺寸约为图像尺寸的百分之一时误配准率最小,分块尺寸偏离这个值都会增加误配准的数量。然而,本文采用 JPEG 图像编码,源图像被划分为若干 8×8 的块进行编码,且图像信息主要集中于分块的低频部分,因此,以 8×8 的分块尺寸进行图像配准更加合适。

2) 图像分块搜索 传统的图像配准算法在确定了分块的尺寸后,检测两幅待配准图像中以每个像素作为起点的所有备选分块对。本文的图像分块搜索算法将两幅图像中的一幅图像按照预先设定的尺寸分割为若干块,将所得到的分块和另一幅图像中所有的分块进行检测,这样可以降低计算复杂度,且如果分块尺寸合适,同样可以获得较好的配准效果。

相似度用于判别每两幅图像中所有像素块的灰度差值。一个理想的相似度应该精确地体现每一块对的相似性程度,且

计算量较小。离差平方和算法、绝对差值和算法、归一化交叉相关算法是进行块对匹配的主要判别准则。

离差平方和算法将两幅图像所有分块的每个像素的灰度值进行比较,估计两幅图像中一对分块之间的差异。离差平方和最小的一对分块具有最高的相似度,并且包含最多共同特征,这一对分块在两幅图像中的位置将被用于图像对准。给定一幅图像 $k+1$ 和它的参考图像 k , 设定分块尺寸为 $m \times n$, $I(i, j)$ 是在位置 (i, j) 的一个像素灰度值, 则离差平方和的计算为

$$SSD_k(i, j) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j))^2 \quad (1)$$

虽然, 离差平方和算法的配准精度较高, 但是, 由于乘法运算的计算开销和内存消耗都很高, 因此, 本文使用更加简单有效的绝对差值和法来估计两个块的相似度, 用绝对函数替代平方函数可以使得方程式效率更高, 降低了计算复杂度。与离差平方和算法类似, 绝对差值和最小的一对分块之间也具有大量的共同特征。其计算公式为

$$SAD_k(i, j) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |I_{k+1}(i, j) - I_k(i, j)| \quad (2)$$

绝对差值和算法比其他相似度准则的运算更快, 其使用的绝对函数比较简单, 尽管绝对差值和考虑了一个分块中的每个像素, 但计算量还是比较小。绝对差值和算法适合于需要使用穷举搜索来搜索两幅有重叠区域的图像中相似度最高的一对分块。因为绝对差值和算法的计算量可以忽略, 所以加快了穷举搜索的速度。由于绝对差值和法简单且有效, 适用于 WMSN 中图像配准的相似性度量, 可以提高视频监控应用的性能。尽管如此, 绝对差值和算法也存在误配准的问题, 因此, 需要对其进行改进以减小误配准的概率。

引入以下几个参数: $SAD_{\min}$ 表示两幅图像中分块之间的最小灰度差值, SAD_{self} 表示每个像素的灰度值和分块灰度平均值之间的差值, Rate 表示 SAD_{self} 和 $SAD_{\min}$ 的比值。 SAD_{self} 和 $SAD_{\min}$ 由图像 k 按照预先设定的分块尺寸进行分割后计算得到。

为得到图像 k 中每个分块的 $SAD_{\min}$, 先计算图像 k 中全部分块和图像 $k+1$ 中所有合适分块之间的灰度差值, 将最小的 SAD 设置为 $SAD_{\min}$, 它在图像 $k+1$ 中相应的块就是与图像 k 中的块最匹配的块, 并保存块对的地址。如果检测到多对分块具有相同的 SAD 且为最小值, 设第一个块对为图像 k 和 $k+1$ 最相似的块对, 其差值为 $SAD_{\min}$ 。如果两个块的灰度值相同, 则 $SAD_{\min}$ 等于零。但是, 在计算 Rate 时 $SAD_{\min}$ 为分母, 因此放弃 $SAD_{\min}$ 为零的块对, 即使它们非常相似, 选取最小非零差值作为 $SAD_{\min}$ 。

如果一对分块的 SAD_{self} 很大, 而 $SAD_{\min}$ 很小, 则说明这对分块包含丰富的信息。当一对相似的分块具有丰富的信息时, 其误匹配可能性要低于那些信息量较少的块对。Rate 是 SAD_{self} 和 $SAD_{\min}$ 的比值, 用于识别具有丰富内容的块对, 过滤误匹配的块对, 以达到精确的图像配准。采用改进的绝对差值和进行图像分块搜索配准的算法步骤如下:

- 按 8×8 的分块尺寸对图像 k 和 $k+1$ 进行分割;
- 计算图像 k 中每一分块的 SAD_{self} , 获取块的位置;
- 计算图像 k 和 $k+1$ 中具有 $SAD_{\min}$ 的块对, 得到具有 $SAD_{\min}$ 的块在图像 k 和 $k+1$ 中的位置;
- 初始化, 将 Rate 置零;
- 如果 $SAD_{\min}$ 为零, 放弃这一对分块;
- 如果 $SAD_{\min}$ 不为零, 且 $SAD_{\text{self}}/SAD_{\min} > \text{Rate}$, 则 $\text{Rate} = SAD_{\text{self}}/SAD_{\min}$;
- 如果一对分块的 Rate 值较小, 则认定为误匹配块对, 放弃这一

对分块。

2.2 图像缝合

在图像配准之后进行图像缝合的目的是保证在图像与图像的重叠区域能够连续, 并且没有可见的缝合线。由于受到各种噪声影响, 以及晕映(灰度值沿着图像边缘的方向递减)、光中心的运动引起的视差、径向畸变等作用, 一些图像的边缘在图像缝合后仍然可见。目前有很多的图像缝合算法, 主要包括中值滤波、小波变换、加权平均等, 都能较好地消除拼接缝合线。然而, WMSN 资源受限, 要求图像拼接算法在保证一定图像质量的情况下, 计算复杂度尽可能低。

三种典型图像缝合算法中: 中值滤波算法计算速度快, 但图像质量下降严重; 小波变换算法计算量大; 加权平均算法能提高融合后图像的信噪比, 还能很好地处理曝光差异, 融合速度快, 适用于实时处理, 在计算复杂度和图像质量方面能达到较好的平衡。因此, 本文使用加权平均算法, 图像重叠区域中像素点的灰度值由两幅图像中对应点的灰度加权平均得到。待拼接的两幅图像中像素点的灰度值是 $I_1(x, y)$ 和 $I_2(x, y)$, 使用加权平均融合重叠区域图像后得到的灰度值 $I(x, y)$ 为

$$I(x, y) = d_1 I_1(x, y) + d_2 I_2(x, y) \quad (3)$$

其中: d_1 和 d_2 分别是两幅图像重叠区域对应的灰度权值, 并满足 $d_1 + d_2 = 1, 0 \leq d_1, d_2 \leq 1$ 。根据加权平均权值函数的选取方法不同, 加权平均又分为渐进渐出法、帽子函数法。本文选取实际应用中使用的更多的渐进渐出法, 以像素点到图像中心的欧氏距离作为权值的选择依据, 渐进渐出方法为

$$I(x, y) = d I_1(x, y) + (1 - d) I_2(x, y) \quad (4)$$

其中: $d = (x_2 - x) / (x_2 - x_1)$, $x_1 \leq x \leq x_2$, d 为一渐变系数。当 d 由 1 慢慢变化到 0 时, x_1 和 x_2 是重叠区 x 轴最小值和最大值, 图像从 $I_1(x, y)$ 慢慢过渡到了 $I_2(x, y)$ 。

3 仿真实验及分析

本文选取户外场景监控图像在 MATLAB 上进行仿真实验, 底层节点是两个安装在高处的同质视频传感器, 对同一个路口的车辆和行人进行监控, 所捕获灰度图像分辨率为 560×420 , 使用 JPEG 编码后发送至簇头节点进行图像拼接。图 1 和 2 所示为节点 k 和 $k+1$ 第 0510 和 0800 帧图像的拼接结果。

美国克尔斯博公司的无线传感器节点平台 Imote 2 是目前比较先进的节点平台, 它具有 256 KB 的 SRAM, 传输速率为 250 kbps 的无线收发装置。假设一个簇头节点管理两个视频节点, 两个视频节点捕获的 560×420 分辨率灰度图像大小约为 100 k, 则簇头 1 s 能发送两个视频节点各一帧图像。图像拼接之后文件大小约为两幅未拼接图像大小的三分之二, 如表 1 所示, 则簇头 1 s 能发送两幅拼接之后的图像, 可以有效节约通信能耗, 提高视频节点的采样频率。

表 1 拼接后图像与原始图像尺寸对比

图像编号	图像 k	图像 $k+1$	拼接后图像	拼接后与拼接前的文件比例/%
0510	74.5 k	100 k	120 k	68.8
0630	94.1 k	111 k	141 k	68.7
0720	94.1 k	109 k	141 k	69.4
0800	99.6 k	104 k	121 k	59.4

图像配准是图像拼接中最重要的步骤, 也是计算复杂度最高的步骤, 因为有大量像素要进行匹配。图像配准的计算复杂

度可以看做是整个图像拼接算法的计算复杂度。在图像配准过程中,搜索最相似的块对是产生巨大计算量的步骤。穷举搜索算法要搜索两幅图像中所有可能的块对,如果图像的分辨率为 $m \times n$,那么穷举搜索的计算复杂度为 $O(m^2 n^2)$ 。如果使用分块搜索,将一幅图像分为 $mn/64$ 块,可能的块对数量减少为 $m^2 n^2/64$,则计算复杂度为 $O(m^2 n^2/64)$,相比于穷举搜索的复杂度有所降低。



(a) 节点k的第0510帧图像 (b) 节点k+1的第0510帧图像 (c) 拼接后的图像
图1 节点k和节点k+1第0510帧图像的拼接



(a) 节点k的第0800帧图像 (b) 节点k+1的第0800帧图像 (c) 拼接后的图像
图2 节点k和k+1第0800帧图像的拼接

4 结束语

本文提出一种适用于 WMSN 的图像拼接算法,图像分块搜索算法加快了图像配准速度,减少了潜在相似块对的数量,绝对差值和算法降低了图像配准的计算复杂度,引入几个参数对图像分块的信息量进行判断,减小了误配准的概率。仿真实验表明,该算法计算复杂度低,图像拼接精度较高,可以有效提高无线多媒体传感器网络的视频监控性能,扩大监控视野。

参考文献:

- [1] AKYILDIZ I F, MELODIA T, CHOWDHURY K R. A survey on wireless multimedia sensor networks [J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.
- [2] TEZCAN N, WANG Wen-ye. Self-orienting wireless multimedia sensor networks for maximizing multimedia coverage [C]//Proc of IEEE ICC. New York: Elsevier North-holland, 2008: 2206-2210.
- [3] TEZCAN N, WANG W. Self-orienting wireless multimedia sensor networks for occlusion-free viewpoints [J]. *Computer Networks*, 2008, 52(13): 2558-2567.
- [4] HADI S A, POUYA B, MOHSEN E M, *et al.* High-resolution images with minimum energy dissipation and maximum field-of-view in camera based wireless multimedia sensor networks [J]. *Sensors*, 2009, 9(8): 6385-6410.
- [5] KANSAL A, KAISER W, POTTIE G, *et al.* Virtual high-resolution for sensor networks [C]//Proc of the 4th ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2006: 43-56.
- [6] SORO S, HEINZELMAN W B. On the coverage problem in video-based wireless sensor networks [C]//Proc of the 2nd IEEE Workshop on Broadband Advanced Sensor Networks. 2005: 932-939.
- [7] BALASUBRAMANIAN H, KUMAR M P, NAMUDURI K R. Image registration in low resolution visual sensor networks [C]//Proc of IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks. Washington DC: IEEE Computer Society, 2008: 551-552.
- [8] 陶丹, 马华东. 视频传感器网络中基于相关性图像融合算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2007, 19(5): 656-666.
- [9] 王玉斐, 王汝传, 曾鸣, 等. 多媒体传感器网络中基于颜色空间的图像融合方案 [J]. *电子学报*, 2009, 37(8): 1659-1663.
- [10] RICHARD W P, AZZEDINE B, JING F, *et al.* A novel image mosaicking technique for enlarging the field of view of images transmitted over wireless image sensor networks [J]. *Mobile Network Application*, 2010, 15(4): 589-606.