

面向资源节省的传感网动态目标自适应获取系统

肖克江^{1,2}, 王睿¹, 崔莉¹

(1. 中国科学院 计算技术研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 计算机与控制工程学院, 北京 100190)

摘要: 针对图像传感网动态目标监测问题, 搭建了面向资源节省的动态目标自适应获取系统 EasiRS。利用存储空间复用技术减少存储资源需求; 提出图像完整性自适应实时检测方法, 解决由于目标动态性导致的连续图像的实时处理问题; 在图像完整性实时检测的基础上, 对获取的信息进行选择性的传输, 以减少传输数据量和传输能耗。通过室内和室外环境对该方法进行实验, 结果表明, 该系统不仅可以有效保证系统的感知性能, 而且降低了存储开销和传输能耗。

关键词: 图像传感网; 动态目标; 自适应; 感知性能

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Resource saving oriented dynamic target adaptive acquisition system in wireless sensor networks

XIAO Ke-jiang^{1,2}, WANG Rui¹, CUI Li¹

(1. Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Computer and Control Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Aiming at dynamic target detection problems in camera sensor networks, a resource saving oriented dynamic target adaptive acquisition system namely EasiRS is built up. EasiRS reuses storage space to decrease the requirement for the storage resources. To solve the problem of continuous images real-time processing caused by dynamics of the monitoring target, an adaptive real-time detection method for image integration detection is proposed. According to the real-time image integration detection, EasiRS does selective transmission for the acquired information to reduce the communication energy consumption and the amount of data that need to transmit the base station. Both indoor and outdoor environmental experiments are conducted. The results demonstrate that although EasiRS needs extra processing time cost, it can decrease storage consumption and transmission energy consumption while maintaining the sensing performance at acceptable level.

Key words: camera sensor networks; dynamic target; adaptive; sensing performance

1 引言

图像传感器因其感知信息丰富, 在环境检测、野生动物监测、车辆监控等方面得到广泛应用^[1,2], 并取得了一些研究成果^[3,4]。为了降低干扰, 对目标进行实时准确的监测, 图像传感器节点通常按照一定的采样频率一直处于工作状态, 周期性地

捕获感兴趣的场景。但是, 图像传感器节点的资源受限(比如能量有限, 节点通过电池或太阳能供电), 而图像传感器感知的图像数据量大, 需要解决大数据的存储、处理和传输问题, 它们限制了图像传感器的应用。因此, 降低图像数据的处理、存储和传输开销是增强图像传感器网络的一个必须的步骤, 对图像传感器网络的广泛应用

收稿日期: 2013-09-27; 修回日期: 2014-03-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)基金资助项目(2011CB302803); 国家自然科学基金资助项目(61379134, 61003292); 江苏省自然科学基金重点研究专项基金资助项目(BK2011007)

Foundation Items: The National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB302803); The National Natural Science Foundation of China (61379134, 61003292); The Key Project of Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK2011007)

具有重要的意义。

目前,有一些工作降低图像传感器的开销^[5~12]。最常见的方法是通过低性能传感器和图像传感器之间的协同^[5~8]来减少图像传感器在存储、处理和传输方面的开销。具体来讲,通过低性能传感器节点对环境进行监测,当探测到感兴趣的目标时,再触发图像传感器工作。这种方法减少了需要存储、处理和传输的数据量,然而由于环境的动态性,使采集的图像中仍然有很多是不完整的,即图像中所包含目标的特征信息是不完整的,它们无益于系统识别性能的提高。而通常情况下,这些图像也会被传到后台进行处理,这样会带来较大的传输能耗。将完整图像定义为包含监测目标完整的特征信息的图像,在之前的工作^[13]中讨论过。

例如,在智能交通中,通过磁传感器对道路上的车辆进行探测,当检测到车辆后,触发图像传感器工作并对路上车辆进行感知,然后识别、跟踪等。当车辆经过图像传感器的视域范围时,图像传感器采集到关于车辆的图像,其中有包含完整车型特征的图片,也有不完整车型的图像,也有只包含背景的图像。然而,要对车型进行识别,必须要获得有完整车型的图像,如果把所有的图像都进行处理或者传到后台,会带来大量的能量消耗,而且无益于车型识别性能的提高。

所以只需要把包含完整目标特征信息的图像进行传输和处理,这样可以有效地降低图像传感器的开销,节省资源,而且可以获得目标的完整特征,达到可以接受的感知性能。目前,有很多图像处理方法可以用来获取目标特征信息^[14],但是它们不涉及图像完整性判断的问题,没有考虑传感网的资源有限的特点。而文献^[15~18]中利用图像传感器来对目标进行监测,但是它们会对感知的所有图像进行存储、处理和传输,也没有对图像的完整性进行判断,带来不必要的资源开销。因此可以在图像传感器捕获到图像的时候,对该图像进行预处理,判断该图像中是否包含完整的目标特征信息,如果该图像中包含完整的目标特征信息,则将该图像进行传输,否则不对该图像做任何处理。这样降低了需要传输的数据量,从而降低传输能耗。然而要解决这个问题,监测目标的动态性是面临的主要挑战。因为目标的状态是动态变化的,不同时刻采集的图像是不同的,对当前采集的图像进行完整性检测的实时性要求比较高,而图像的数据量大,传感器节点

的处理能力弱,因此目标的动态性给图像完整性的实时检测带来了很大的挑战。

针对以上挑战,搭建了一个面向资源节省的动态目标自适应获取系统,并通过磁与图像传感器的协同以提高图像完整性检测的实时性、降低传感器的存储传感开销和传输能耗,节省资源。

本文的贡献可以归纳为以下 2 个方面。

1) 通过少量存储空间的复用来存储大量的不完整图像,以降低节点在计算过程中对存储资源的要求,节省系统的存储资源。

2) 利用了磁传感器与图像传感器的协同,并提出了一种图像完整性自适应实时检测方法。该方法通过对图像两侧的部分像素进行处理及简单的阈值方法来减少图像完整性检测的时间,以解决由于监测目标动态性带来的连续动态图像的实时处理问题,然后通过对图像完整性的判定,图像传感器只传输完整图像以减少数据传输量,降低传输能耗。

2 相关工作

目前,有一些研究工作利用低性能传感器与图像传感器的协同^[5~8]来降低开销,节省资源。这些工作通常利用低性能传感器来对监测对象进行探测,当检测到感兴趣的目标时再触发图像传感器工作,来减少图像传感器的感知和传输的数据量。比如,文献^[6]提出了一种自适应的系统级的校准方法,该方法利用低精度的传感器通过数据融合的结果来对目标是否出现进行判断,当判断有目标出现时就会触发高精度的图像传感器工作,图像传感器将感知结果发送到信息融合中心,信息融合中心根据这个结果对目标检测的阈值进行动态调整,以提高低精度传感器节点对目标的检测性能,节省资源。文献^[7]提出了一种用于 CPS 监测系统的注意保真效用控制器(fidelity-aware utilization controller)方法,该系统在事先没有安排的环境中结合了低性能传感器与图像传感器用于大规模 ad-hoc 监测,利用低性能传感器对目标进行探测,然后触发图像传感器节点工作来进行校正,将采集到的图像发送到基站,通过动态优化融合阈值、调整 CPU 效用来平衡系统开销。这些方法都减少了需要存储、处理和通信的数据量,然而由于监测目标的动态性,当前采集的图像中仍然有很多并不具备目标完整的特征信息,它们无益于系统性能的提高,如

果也对这些数据进行处理、存储和传输,会带来不必要的能量消耗。

通过选择最小的活动图像传感器节点子集对监测对象进行监测是另一种可以减少图像传感器的开销、节省资源的方法^[9~11]。比如,文献[9~10]选择最少的图像传感器节点来全覆盖监测区域,而文献[11]则不像通常研究文献[9,10]那样试图去覆盖所有事件区域,而是在资源受限的情况下试图去覆盖最有价值的事件区域。但是它们同样会对一些不完整图像进行处理、存储和传输,带来不必要的能量消耗。除了以上2类,还有一些方法用来减少图像传感器节点感知的图像数据量,比如,文献[12]通过将采样任务分布到每个图像传感器上,提出一种隔行扫描的采样策略,最小化每个图像传感器的能量消耗,虽然降低了每个图像传感器节点感知的图像数量,但总的需要传输的图像数量没有变,同样会造成较大的传输能耗。

对于图像处理,目前有很多图像处理方法,但是传统的图像处理方法^[14]依赖于PC机功能强大的计算和存储能力,比如canny算子边缘检测^[19]、HOG描述器^[20]等,它们都涉及大量的计算,不适用于资源有限的传感器节点,甚至不能移植到节点上来实现,很难保证系统的实时性要求。然而,因为图像可以提供更加全面、准确的信息,图像传感器仍然应用于传感网中^[15~18],比如文献[15]中利用一个图像传感器节点对目标进行检测和跟踪,利用2个中间滤波帧的区别来克服光线的变化,但是其仍然会带来较大的处理时延。文献[16]通过从感知到的图像中的抽取HOG特征和FFT特征,声音传感器的FFT和PSD特征,结合SVM,通过二值分类树对多媒体信息进行分类,获得较好的分类效果,但它的假设图像都是完整的,没有涉及图像完整性判断。文献[17]利用声音和图像传感器的协同对人的活动进行建模和识别,它也没有对图像完整性进行判断。文献[18]利用2种性能不同的图像传感器的协同(cyclops camera and imote2 camera)对静态的目标进行识别,使系统在识别精度和计算复杂程度上获得一个较好的折中。它综合利用了图像颜色特征和SIFT特征的优势,但是其处理时延超过2s,它不适用于目标动态变化的情况。此外它没有对图像完整性进行判断,对所有感知到的图像进行处理,因此它们同样会对一些不完整图像进行处理、存储和传

输,带来不必要的能量消耗。

3 EasiRS 算法

3.1 EasiRS 总述

EasiRS的系统结构如图1所示,本系统由3部分组成:低性能传感器、图像传感器、后台。低性能传感(比如磁)用来进行目标探测,当探测到目标后触发图像传感器工作,这时图像传感器会按照一定的采样频率采样,对于采集的前景图像复用同一存储空间,然后对图像进行预处理,用简单的阈值方法对图像的完整性进行检测,当检测到完整图像或超时,预处理过程结束,图像传感器停止采样,最后只将完整的图像传输到后台并进入睡眠状态等待下一次被触发。后台包括基站和PC机,对从图像传感器传输回来的图像进行处理。传统方法没有对图像完整性进行检测,而是将采集到的所有图像都传到后台进行处理,图像传感器需要存储和传输的数据量较大。

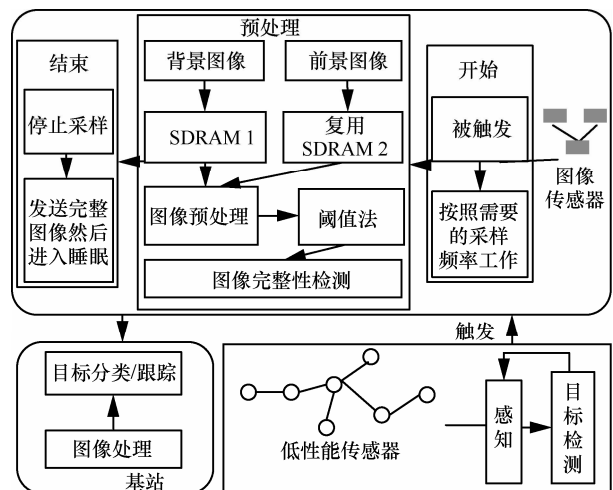


图1 系统结构

EasiRS利用了磁传感器与图像传感器的协同来节省资源,并通过前景图像复用存储空间SDRAM 2,可以有效地降低大量的图像数据对传感器节点有限的存储空间的要求;通过对图像进行部分处理来提高图像完整性的检测速度;通过图像完整性检测,只传输完整图像,可以有效降低传输能耗和需要传输的数据量。

3.2 EasiRS 设计思路

因为图像数据量大,如果将传感器感知到的图像都进行传输会带来很大的开销。由于环境的动态性,图像传感器感知的很多图像中没有完整

的目标特征信息，它们并没有给系统的性能带来较大的收益。因此，考虑只对那些包含完整目标特征信息的图像进行处理和传输以降低开销。然而传感器节点的资源受限，在传感器节点上进行实时的图像完整性检测非常困难。为了解决这个问题，需要考虑的关键问题是如何对大量的图像数据进行快速的处理，使它能够对目标的完整性进行实时的在线检测。

对于这个问题，一方面，在通常情况下目标只占据了图像中的部分空间（通常在图像的中部位置），比如，用图像传感器（IMB400）对一些运动目标（如人、自行车、小汽车灯）进行监测，它们占据整个图像空间的1/10到1/2。因此与背景相比，也只是部分像素点的变化比较大；另一方面，通过对真实实验数据的分析可以看出，由于光线变化和天气变化，即使图片中没有运动目标，不同时刻图像中同一个位置的像素点的灰度值也不相同，但是这两者差减后结果比较小，比如，对于 640×480 的灰度图像，不同时刻采集图像中的所有像素点的灰度值进行差减，然后求平均值，该值的范围一般处于1~5灰度值；如果一幅有运动目标和一幅没有运动目标的图片进行背景差减后的结果比较大，对差减后的灰度值求平均值，该值的范围通常为5~30灰度值。基于上面2个方面的考虑，可以通过部分像素的背景差减的方法来提高处理速度，然后通过简单的阈值方法对图像完整性进行判断，进而提高图像完整性检测的实时性。

此外，由于传感器的存储空间有限，图像的数据量比较大；而图像传感器感知的很多图像中没有完整的目标特征信息，它们无益于系统识别性能的提高，因此考虑对于这些不完整图像复用同一存储空间，即对采集到的不完整图像重复利用同一存储空间来降低传感器的存储开销。

假设 1 在图像传感器节点附近的磁节点检测到监测目标到目标开始离开图像传感器视域范围的这段距离 d_{magCam} （如图2所示）内，该目标做匀速直线运动。因为这段距离较短，通常为10~30 m，在较短的距离内认为目标做匀速直线运动的假设是合理的。

定理 1 设 d_{tarLen} 为目标长度， v 为目标的运动速度。如果图像传感器的采样频率 $f > v/d_{\text{tarLen}}$ ，那么图像传感器采集到的图像中至少有一幅图像是目标开始进入但又没有完全进入图像传感器视

域范围，至少有一幅图像是开始离开但又没有完全离开图像传感器视域范围。

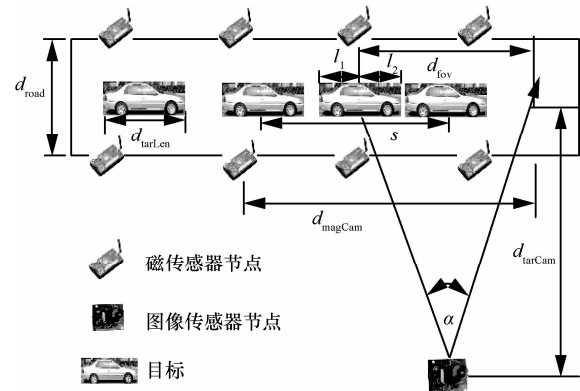


图2 定理和假设示意

证明 用反证法证明，即如果图像传感器的采样频率 $f > v/d_{\text{tarLen}}$ ，那么不存在开始进入但又没有完全进入图像传感器视域范围的目标图像，不存在开始离开但又没有完全离开图像传感器视域范围的图像。

因为不存在开始进入但又没有完全进入图像传感器视域范围的图像，设图像传感器在目标完全处于其视域外和视域内时连续采集的2张图像的时间间隔为 Δt ，那么目标在这个间隔内经过的距离为 $s > d_{\text{tarLen}}$ （如图2所示）。又因为 $f > v/d_{\text{tarLen}}$ ，所以 $s = v/f < d_{\text{tarLen}}$ ，这与 $s > d_{\text{tarLen}}$ 相矛盾。因此假设不成立，原命题成立。同理可以证明至少有一幅图像是开始离开但又没有完全离开图像传感器视域范围，证毕。

定理 2 设 d_{tarLen} 为目标长度， d_{fov} 为图像传感器的视域范围的宽度（如图2所示），如果图像传感器的采样频率 $f > \max\{v/d_{\text{tarLen}}, kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})\}$ ， $k \in N^*$ ，那么传感器至少可以采集 k 张完整图像。

证明 用反证法证明，即如果图像传感器的采样频率 $f > \max\{v/d_{\text{tarLen}}, kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})\}$ ， $k \in N^*$ ，那么最多可以采集到 $k-1$ 张完整图像。

因为， $f > \max\{v/d_{\text{tarLen}}, kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})\}$ ，所以 $f > v/d_{\text{tarLen}}$ 。根据定理1，图像传感器采集到的图像中至少有一幅图像是目标开始进入但又没有完全进入图像传感器视域范围。设没有进入和进入图像传感器视域范围的车长分别为 l_1 和 l_2 ，那么 $l_1 + l_2 = d_{\text{tarLen}}$ ， $l_1 > 0$ ， $l_2 > 0$ 。因为最多可以采集到 $k-1$ 张完整图像，那么 $(d_{\text{fov}} - l_2)/v \leq \Delta t(k-1)$ ， Δt 为图像传感器的采样间隔， $d_{\text{fov}} = 2d_{\text{tarCam}} \tan(\alpha/2)$ ，

故其采样频率为 $f \leq (k-1)v/(d_{\text{fov}} - l_2)$ ，因为 $l_1 + l_2 = d_{\text{tarLen}}$ ， $l_1 > 0$ ， $l_2 > 0$ ，故 $(k-1)v/(d_{\text{fov}} - l_2) < kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})$ ，那么 $f < kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})$ 。又因为采样频率已知条件为 $f > \max\{v/d_{\text{tarLen}}, kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})\}$ ，那么 $f > kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})$ 与 $f < kv/(d_{\text{fov}} - d_{\text{tarLen}})$ 相矛盾。因此假设不成立，原命题成立，证毕。

3.3 EasiRS 设计与实现

图像传感器节点通常按照满足系统需求的采样频率工作，因此该采样频率满足定理 1 和定理 2 的条件，因此当图像传感器节点被触发工作，至少可以捕获到一张目标开始进入但又没有完全进入图像传感器视域范围的图像，至少有一幅图像是开始离开但又没有完全离开图像传感器视域范围，且至少有 k 张包含完整目标特征信息的图像。一方面通过 SDRAM 存储空间的复用来存储不完整图像从而减少大量图像数据对有限的存储空间的要求；另一方面通过高效快速的预处理方法对图像完整性进行判断，即通过对图像传感器周期性感知的图像进行预处理，为了提高检测速度，只对图像两侧的中间部分像素进行处理，来判断每次感知的图像中是否包含完整目标特征信息，如果完整，则将完整图像发送给后台进行处理，否则对采集的图片不做任何处理。下面具体来阐述这 2 个方面的内容。

1) 存储空间复用

将图像传感器采集的第 1 张图像为背景图像存放于 SDRAM 1 中，后续采集的图像都为前景图像复用 SDRAM 2，这样只需要 2 个 SDRAM 空间就可以了，而传统方法需要存储所有采集到的图像，从而节省了存储空间。

设图像传感器的采样频率为 f ，那么其采样间隔为 $\Delta t = 1/f$ ，如图 3 所示，假设 t 时刻图像传感器被触发，采集的第 1 张图像 $image B$ 为背景图像，并存放在 SDRAM 1 中， $t + \Delta t$ 时刻采集到第一张前景图像 $image F$ 存放在 SDRAM 2 中，然后根据背景图像来判断当前的前景图像中是否包含完整目标特征信息，如果有，则传感器节点停止采样，并将该完整图像发送给基站处理，然后进入睡眠状态，否则图像传感器在 $t + 2\Delta t$ 时刻采集第 2 张前景图像并存储在 SDRAM 2 中，因为 $t + \Delta t$ 时刻采集的前景图像中不包含完整目标信息，所以可以将 $t + 2\Delta t$ 时刻采集到的前景图像存储到该空间中，即

对 SDRAM 2 复用。然后将 $t + 2\Delta t$ 时刻采集的前景图像与 SDRAM 1 中的背景图像进行比较来判断该前景图像是否完整（即是否包含完整目标特征信息），如果有，则图像传感器停止采样，并将完整图像发送给基站，然后进入睡眠状态。否则图像传感器在 $t + 3\Delta t$ 时刻采集第 3 张前景图像并存储在 SDRAM 2 中，并对该前景图像完整性进行判断直到图像传感器节点采集到完整图像为止。如果图像传感器节点的采样时间大于 T 时，则认为超时，即图像传感器在本次对目标采样中没有采集到完整图像，那么图像传感器会停止工作并进入睡眠状态。

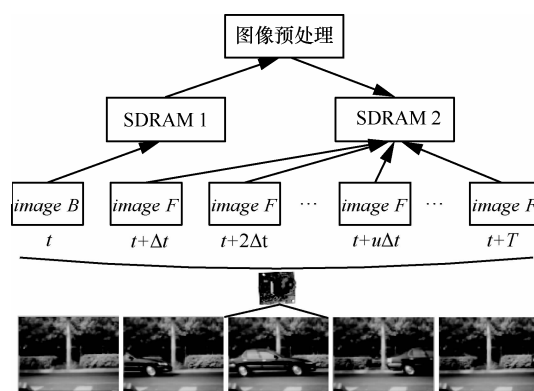


图 3 存储空间复用示意

2) 图像完整性自适应实时检测方法

设 $image B_{\vartheta}^1$ 为图像传感器第 ϑ 次被触发时采集的背景图像， $image F_{\vartheta}^{\mu}$ 表示图像传感器第 ϑ 次被触发后采集到的第 μ ($1 \leq \mu \leq T/\Delta t, \mu \in N^*$) 张前景图像， $Lsum B(\vartheta, 1)$ 和 $Rsum B(\vartheta, 1)$ 分别表示图像传感器第 ϑ 次触发后采集到的背景图像最左侧和最右侧中间部分的 $m \times n$ (高为 m 个像素点，宽为 n 个像素点) 长方形的所有像素点的灰度值之和， $Lsum F(\vartheta, \mu)$ 和 $Rsum F(\vartheta, \mu)$ 分别表示图像传感器第 ϑ 次触发后采集到的第 μ 张前景图像最左侧和右侧中间部分的 $m \times n$ 长方形的所有像素点之和，即

$$Lsum B(\vartheta, 1) = \sum_{i=(M-m)/2}^{(M+m)/2} \sum_{j=0}^n image B_{\vartheta}^1(i, j) \quad (1)$$

$$Rsum B(\vartheta, 1) = \sum_{i=(M-m)/2}^{(M+m)/2} \sum_{j=N-n}^N image B_{\vartheta}^1(i, j) \quad (2)$$

$$Lsum F(\vartheta, \mu) = \sum_{i=(M-m)/2}^{(M+m)/2} \sum_{j=0}^n image F_{\vartheta}^{\mu}(i, j) \quad (3)$$

$$Rsum F(\vartheta, \mu) = \sum_{i=(M-m)/2}^{(M+m)/2} \sum_{j=N-n}^N image F_{\vartheta}^{\mu}(i, j) \quad (4)$$

其中, M 和 N 分别表示图像 $image B_{\vartheta}^1$ (或者 $image F_{\vartheta}^{\mu}$) 的高和长, 单位为像素点。

将图像传感器被触发后采集的第 1 张图像为背景图像, 后续采集的图像为前景图像。通过后续的前景图像分别和背景图像进行比较来判断该前景图像是否为完整图像, 即图像中是否包含完整目标的特征信息。整个比较的过程分 2 个阶段, 具体阐述如下。

第 1 阶段: 目标开始出现。

目标开始出现指的是目标开始进入但又没有完全进入图像传感器视域范围。对背景图像左侧部分像素和连续采集的前景图像的左侧部分像素进行比较, 即

$$\Delta_1 = |Lsum B(\vartheta, 1) - Lsum F(\vartheta, \mu)| \quad (5)$$

如果 $\Delta_1 \geq \delta$, 则表明在第 μ 张前景图像中检测到目标出现, 否则继续对后续的采集到的图像进行检测, 直到检测到目标开始出现或超时为止。其中 δ 是根据经验得到的一个阈值。

第二阶段: 目标完全进入图像传感器视域范围。

当检测到目标出现后, 分别通过对采集到第 $\mu + \lambda$ ($1 \leq \lambda \leq T/\Delta t - 1, \lambda \in N^*$) 前景中的左右两侧的部分像素进行检测来判断目标是否完全进入图

像传感器的视域范围, 即

$$\Delta_2 = |Lsum B(\vartheta, 1) - Lsum F(\vartheta, \mu + \lambda)| \quad (6)$$

$$\Delta_3 = |Rsum B(\vartheta, 1) - Rsum F(\vartheta, \mu + \lambda)| \quad (7)$$

如果 $\Delta_2 < \delta$ 且 $\Delta_3 < \delta$, 则表明在第 $\mu + \lambda$ 张前景图像中检测到完整目标, 否则继续对后续采集到的图像进行检测直到满足上述条件或超时为止。此外, 还可以通过 Δ_3 和 δ 的关系来判断图像传感器是否已经采集到所有完整图像, 即若 $\Delta_3 \geq \delta$, 则已采集到所有完整图像。

如图 4 所示, 图像传感器节点某次触发后采集到的连续 9 张图像, 其中第 1 幅是背景图像 (图 4(a)所示), 后 8 幅为前景图像。其中 $Lsum F$ 和 $Lsum B$ 分别表示前景和背景图像最左侧中间部分的 $m \times n$ (高为 m 个像素点, 宽为 n 个像素点) 长方形的所有像素点的灰度值之和, $Rsum F$ 和 $Rsum B$ 分别表示前景和背景图像最右侧一个 $m \times n$ 长方形的所有像素点之和, **target** 表示运动目标。图像中是否包含完整目标特征信息的检测过程如图 4(b)中所示, $abs(Lsum F - Lsum B) < \delta$ 且 $abs(Rsum F - Rsum B) < \delta$ (δ 为经验数据), 表示视域范围内没有目标出现, 图像传感器节点对采集到的图片不做任何处理; 图 4(c)中 $abs(Lsum F - Lsum B) > \delta$ 且 $abs(Lsum F - Lsum B) < \delta$ 表示目标进入视域

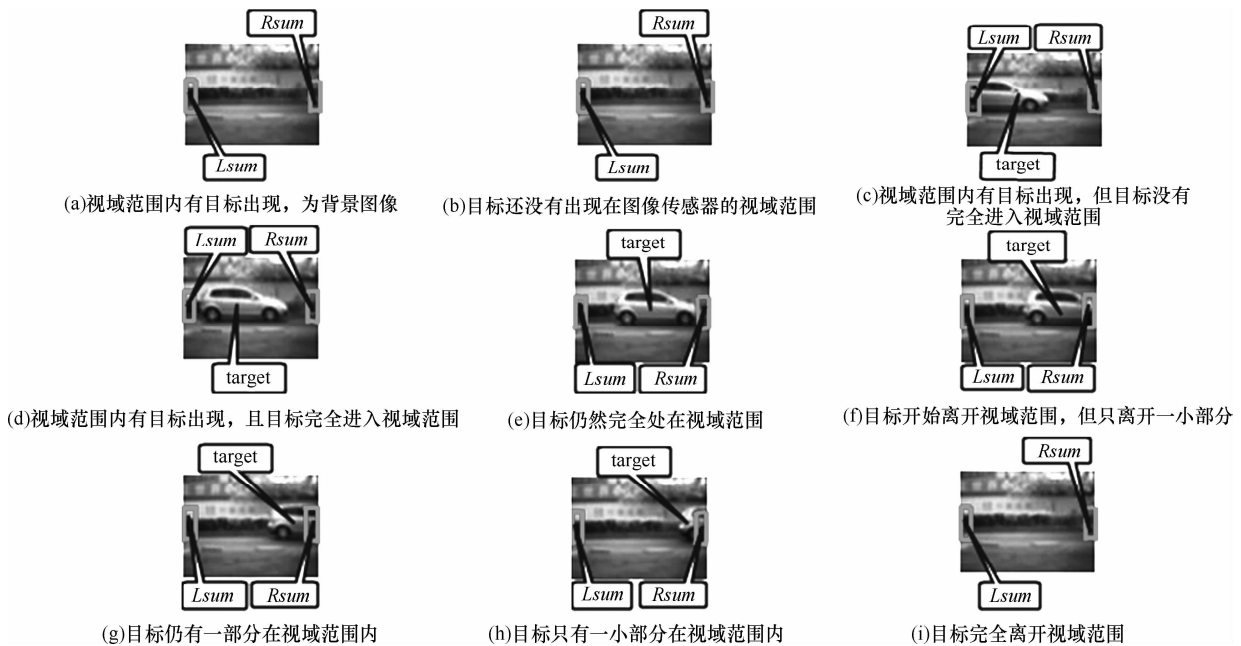


图 4 图像完整性自适应实时检测过程示意

范围,但是没有完全进入,目标图像不完整,因此图像传感器节点对采集到的目标图片不做任何处理;图4(d)中 $abs(Lsum F - Lsum B) < \delta$ 且 $abs(Rsum F - Rsum B) < \delta$ 表示目标完全进入视域范围,此时获得了完整目标。该目标的完整性检测过程结束,并只将完整图像传输到基站进行处理。否则,继续进行图像完整性检测,如图4(f)所示, $abs(Rsum F - Rsum B) > \delta$,表明车辆开始离开图像传感器的视域范围,后续采集的图像中已经没有含有当前目标的完整图像。

因此,通过少量存储空间的复用来存储大量的不完整图像数据,以降低节点在计算过程中对存储资源的要求;通过对背景和前景图像两侧的部分像素处理来对图像完整性进行检测,可以有效地减少检测时间,提高了图像预处理的实时性;最后传输完整图像,可以有效地降低传输能耗。

3.4 EasiRS 算法实现与分析

下面给出 EasiRS 算法的伪代码,并进行了分析。

算法1 EasiRS 算法

1) 磁传感器节点按照需要的采样频率 f_{mag} 感知监测目标

2) **if** 磁传感器节点探测到监测目标

then

3) 磁传感器节点发送消息触发图像传感器节点,使图像传感器节点按照一定的采样频率 f_{cam} 工作,并感知得到背景图 *image B*,存储在 SDRAM 1 中;

4) 感知到前景图像 *image F*,并将该图像存储在 SDRAM 2;

5) **for** $i=(M-m)/2$ to $(M+m)/2$ **do**

6) **for** $j=1$ to n **do**

7) 计算 $Lsum B = \text{sum}(\text{image } B(i, j))$

计算 $Lsum F = \text{sum}(\text{image } F(i, j))$

8) **end for**

9) **for** $k=N-n$ to N **do**

10) 计算 $Rsum B = \text{sum}(\text{image } B(i, k))$

计算 $Rsum F = \text{sum}(\text{image } F(i, k))$

11) **end for**

12) **end for**

13) **if** $|Lsum F - Lsum B| \geq \delta$ && $|Rsum F - Rsum B| \leq \delta$ **then**

14) $aFlag=1$;

15) **end if**

16) **if** $aFlag==1$ && $|Lsum F - Lsum B| \leq \delta$ **then**

17) 得到完整图像,图像传感器节点停止工作,并将该完整图像发送到 base station,然后进入睡眠状态

18) **else**

19) Go back to 4

20) **end if**

21) **end if**

本算法的时间复杂度和空间复杂度分析:该算法中只利用图像传感器节点的2个SDRAM存储空间就可以了,一个用于存储背景图像,另一个用于存储前景图像;时间开销主要来自2个方面:1)左右两侧大小区域的像素点的求和,其时间复杂度为 $O(m \times n)$;2)从SDRAM中读取图像数据的时间,它与 m 和 n 大小直接相关。因为 m 和 n 的取值小,因此EasiRS的图像完整性检测过程的时间短,可以保障它对实时性的要求。此外,通过图像完整性判断只将完整图像传到后台进行处理,从而减少传输能耗。在实际的应用场景中,比如车辆监测,目标一般处于图像的中间位置,而且为了防止追尾,前后车辆之间的间距一般大于 d_{magCam} ,因此对当前车辆和后续车辆的检测互不影响。此外,每次图像传感器被触发时,SDRAM 1中存放的背景图像都会更新一次,由于图像传感器每次触发后工作的时间比较短,可以近似认为在这段时间内背景变化很小。

4 实验评估

为了验证 EasiRS 的有效性,进行了室内和室外环境实验。

4.1 室内实验

在室内利用玩具车在真实的实验平台上进行实验。

1) 实验方法及参数设置

实验场景如图5所示,实验系统包括图像传感器节点(Imote2和IMB400),后台(Micaz、MIB520和笔记本电脑),磁传感器节点和玩具车(在车身上放置了一块磁铁)。图像传感器节点用来捕获经过其视域范围内的车辆并进行简单的处理,基站和笔记本电脑用来接收和保存实验数据以及来自图像传感器节点传来的图像数据,磁传感器节点用于对车辆是否出现进行检测,当其检测到目标出现

时，触发图像传感器节点工作。IMB400 的视角大小 α 为 25° ， M 为 480 个像素点， N 为 640 个像素点。根据经验将 m 和 n 分别设置为 160 和 40 个像素点，阈值 δ 设置为 32 000 灰度值。根据定理 2，在本实验中将图像传感器节点的采样频率设置为 4 Hz。其他参数设置如表 1 所示。

为了验证方法的效果，选择了如下 2 个方法进行了对比：ITC^[12]，图像传感器节点一直处在工作状态，为了获取足够的图像来避免干扰；ITMC^[6]，利用磁传感器来检测目标，当检测到目标后触发图像传感器节点工作，最后将采集到的所有图像都传回后台进行处理。

为了评估算法的有效性，定义以下 3 个指标来衡量本方法的性能。

① 图像完整率 (IIR, image integration ratio):

$IIR = n_c / N$ 。 N 表示图像传感器被触发的总次数， n_c 表示 N 次触发中能够获得完整图像的总次数。完整图像指的是图像里包含完整的目标特征信息，一般认为完整图像是有用信息量最大的图像。因此，图像完整率是衡量系统性能的一个重要指标。

② 时空复杂性：指的是所需要的处理时间和存储空间的大小，因为处理时间的大小影响到整个系统的实时性，而所需的存储空间的大小体现了系统资源消耗情况。

③ 传输能耗 (EC, transmission energy consumption): $EC = t_c \times p_c$ ，其中 $t_c = d_{size} / v_{data}$ ， t_c 、 p_c 、 d_{size} 、 v_{data} 分别表示图像传感器节点传输数据所需要的时间、功率、需要传输的数据量大小、数据传输速率。使用的传感器节点是 Imote 2，射频芯片是 CC2420，根据文献[21]， p_c 为 279.34 mW， v_{data} 为 250 kbit/s。

表 1 室内实验参数设置

参数	值
小汽车的速度范围/(cm·s ⁻¹)	7~20
需要的完整图像数量 k	1
图像传感器视域范围的宽度 d_{fov} /cm	17.6
目标与图像传感器节点之间的距离 d_{vehCam} /cm	40
磁传感器节点的采样频率 f_{cam} /Hz	100
磁传感器与图像传感器之间的距离 d_{magCam} /cm	18

2) 实验结果及分析

时间开销与 ITMC 和 ITC 相比，EasiRS 具有图像完整性自适应检测功能，需要对图像进行处理，因此会有时间开销，这里主要对这部分的时间开销进行分析。在 Imote2 节点上进行测量，其处理芯片是 PXA271，CPU 工作主频为 104 MHz，图像传感器为 OV7 649，使用 tinyos-2.x 的系统，处理的图像是 640×480 的灰白图像， m 的大小为 160 个像素点， n 的大小为 40 个像素点。通过节点上在线测试，从 SDRAM 中读取图像数据的时间为 45 ms，对 640×480 灰度图像左右两侧的 $m \times n$ 方块处理的时间为 0.4 ms，因此 EasiRS 的图像完整性自适应检测总时间开销为 45.4 ms。由于 ITMC 和 ITC 方法没有图像完整检测功能，因此这部分的时间开销是 0。然而 EasiRS 这部分时间开销对系统的性能影响不大，因为采样频率为 4 Hz，采样间隔为 250 ms，大于 45.4 ms。

存储开销和能量开销因为 IMB400 采集到的一幅 640×480 原始图像的大小为 1.1 MB，所以图像传感器节点每次被触发后，EasiRS 只需要 2.2 MB 的存储空间。对于感知能耗，ITC 只有图像传感器的感知能耗，而 EasiRS 和 ITMC 包括磁和图像传感器两部分的感知能耗。在相同的监测时间段里，由于图像传感器的感知功率 (238.05 mW) 比磁传感器感知功率 (22.044 mW) 大^[21]，所以 ITC 的感知能耗比 EasiRS 和 ITMC 大。又因为 EasiRS 采用了图像完整性检测机制，其图像传感器感知的次数比 ITMC 少，因此 EasiRS 的感知能耗比 ITMC 小。对于计算能耗，因为 EasiRS 对图像完整性进行检测，与 ITMC 和 ITC 相比，EasiRS 会带来额外的计算能耗。然而，由于 EasiRS 的图像完整性检测机制所需的计算时间短，与感知能耗和传输能耗相比，其计算能耗可以忽略不计。下面主要对 ITC、ITMC 和 EasiRS 的存储开销和传输能耗进行对比分析。

当车辆的密度不同时，图像传感器节点的存储

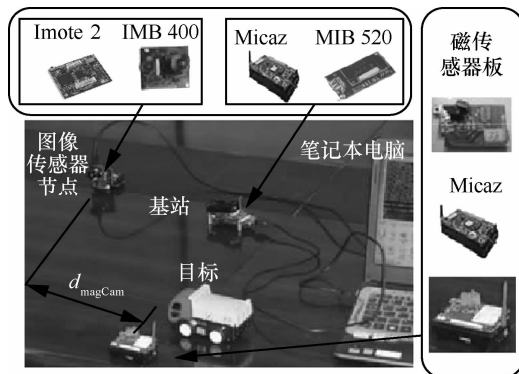


图 5 室内实验场景

开销和传输能耗会是什么结果呢？在 10 min 内有 20~50 辆车通过，EasiRS、ITMC、ITC 在存储开销和传输能耗方面的结果进行了对比，如图 6 和图 7 所示。根据表 1 中的参数设置，每次图像传感器被触发时工作 2 s，因为在 2 s 内，目标可以通过图像传感器视域范围。

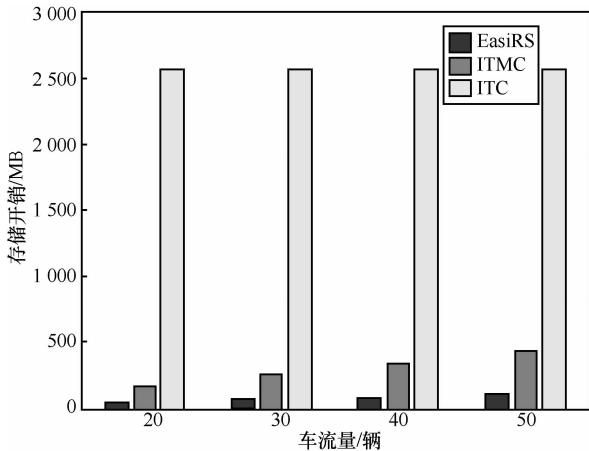


图 6 不同车流量时的存储开销

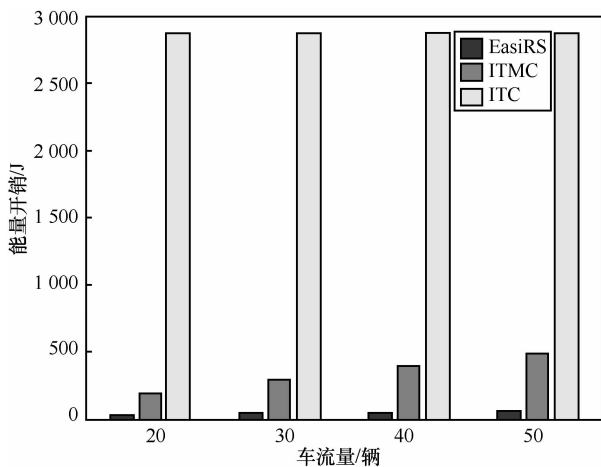


图 7 不同车流量时的传输能耗

从图 6 和图 7 中可以看出，随着车流量的增大，EasiRS 和 ITMC 的存储开销和传输能耗会不断增大。ITC 因为图像传感器一直处于工作状态，因此其存储开销和能耗不会随着车流量大小的变化而变化。同时也可以看出 EasiRS 和 ITMC 的存储开销和能耗比 ITC 要小很多。这是因为前者利用低性能传感器触发其工作使它们不用一直处于工作状态。而 EasiRS 的存储开销和传输能耗比 ITMC 低，是因为前者利用存储空间复用策略，且只传输含有完整目标特征信息的图像，因此降低了图像传感器存储开销和传输能耗。

图像完整率：分别利用 EasiRS、ITMC、ITC 方法来进行玩具车样本采集，各进行了 30 次，图像完整率的实验结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出，本方法能获得与 ITC 和 ITMC 方法相同的图像完整率，且图像完整率达到 100%，因为室内环境很稳定，且没有遮挡，所以对 ITMC 和 EasiRS 性能没有影响。

表 2 室内环境图像完整率对比结果

方法	样本数量	真实类型($i/f/n$)	图像完整率/%
EasiRS	30	30/0/0	100
ITMC	30	30/0/0	100
ITC	30	30/0/0	100

其中， i 、 f 、 n 分别是完整图像数量、不完整图像数量和误检图像数量。

噪声干扰分析：当室内环境变化时，EasiRS 的效果会怎么样呢？对前景图像加噪声，对不同信噪比（SNR）情况下的图像完整率进行了统计，实验结果如图 8 所示。从图 8 可以看出，随着信噪比的提高，图像完整率也不断提升。当 $SNR \geq 11.2$ dB 时，图像完整率开始稳定下来，处于较高的水平，大于 98%。当 $SNR \leq 10.4$ dB 时，图像完整率开始迅速下降。而通常情况下，外界环境中的 SNR 大于 10 dB，因此 EasiRS 的性能在通常情况下比较稳定。

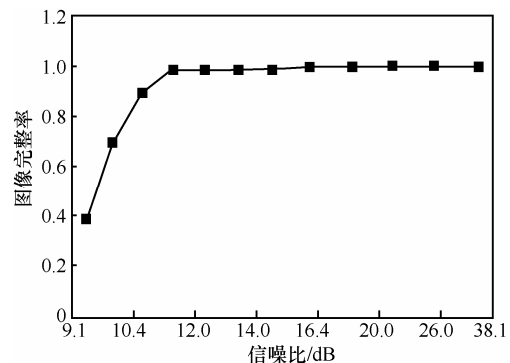


图 8 图像完整率与信噪比的关系

4.2 室外实验

1) 实验方法及参数设置

室外真实道路环境实验的参数设置如表 3 所示，其他参数设置与室内环境实验的参数设置相同。实验场景如图 9 所示，与室内实验不同的是，在室外多了一个中继转发节点（由 Imote2、IIB2 400 和电池板组成），它用来接收磁传感器节点发送的目标探测消息，然后转发给图像传感器节点，触发其工作。之所以要这么做，是因为在室外磁传感器节点距离图像传感器节点较远，且有遮挡，会导致

磁传感器节点发送的消息丢失。在室外，对路上的车辆进行感知，这里监测的运动目标是摩托车，根据定理 2 及表 3 中的参数设置，每次图像传感器节点被触发时工作 1 s，因为这个时间可以保证摩托车完全通过图像传感器节点的视域范围，实验时间长度为 600 s。

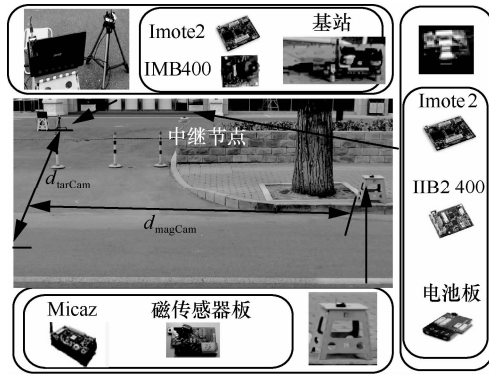


图 9 室外实验场景

表 3 室外实验参数设置

参数	值
摩托车速度范围/(m·s ⁻¹)	7~20
图像传感器视域范围的宽度 d_{fov}/m	8
目标与图像传感器之间的距离 d_{vehCam}/m	15
磁传感器与图像传感器之间的距离 d_{magCam}/m	18
图像传感器节点的采样频率 f_{cam}/Hz	10

2) 实验结果及分析

从表 4 可以看出，EasiRS 和 ITMC 方法的图像完整率分别为 90.5%和 95.2%，之所以比室内的低，原因是室内的环境比较稳定，室外的环境变化比较大，比如光线的变化，对图像完整性的检测产生一定的干扰，有一次没有获得完整图像。由于磁传感器漏检的原因，ITMC 和 ITC 有一次漏检。

表 4 室外环境图像完整率对比结果

方法	样本数量	真实类型 (if/n)	图像完整率/%
EasiRS	21	19/1/1	90.5
ITC	21	21/0/0	100
ITMC	21	20/0/1	95.2

从图 10 和图 11 可以看出，在室外环境中，EasiRS 在存储开销和传输能耗方面都比 ITC 和 ITMC 低。但是却带来了一些处理时间开销，然而这个时间开销对系统的性能影响不大，因为采样频率为 10 Hz，采样的时间间隔大于 45.4 ms。

那么当目标不同时图像完整性检测效果如何呢？下面让图像传感器节点一直处于工作状态，对不同的运动目标进行监测，这里的监测目标包括行人、自行车、三轮车、小汽车、面包车 5 类目标。其他参数设置如表 3 所示。共做了 4 组实验，每组实验 1 560 s，共 6 240 s。表 5 中给出了这 5 类目标的图像完整率的总的统计结果。

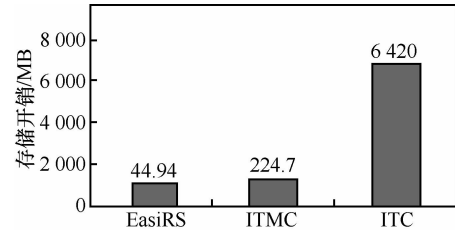


图 10 存储开销对比

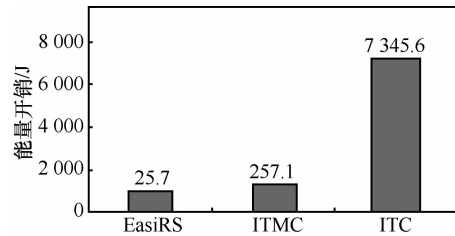


图 11 传输能耗的对比结果

从表 5 可以看出，EasiRS 对各类目标都具有较高的图像完整率，图像完整率都在 93%以上，其中行人、三轮车和面包车的图像完整率都接近 100%，平均图像完整率达到 97.6%。由于在室外环境中光线变化等干扰，使误检的情况比较多，共 18 次，但是 EasiRS 总的平均图像完整率达到 92.2%，这说明本方法在室外环境中的性能较好。

表 5 室外图像完整率实验对比结果

方法	样本数量	真实类型 (if/n)	图像完整率/%	误检图像的数量	平均图像完整率/%
行人	61	61/0/0	100		
自行车	76	75/1/0	98.7		
三轮车	11	3/0/0	100	18	92.2
小汽车	58	54/1/3	93.1		
面包车	6	6/0/0	100		

5 结束语

由于监测目标的动态性，使节点采集的图像中有很多并不具备目标完整特征信息，如果对这些图像进行处理、存储和传输，会带来一些不必要的系统开销。针对这个问题，提出了一种面向资源节省

的传感网动态目标自适应获取系统。首先,利用存储空间的复用对不完整的图像进行存储(重复覆盖),以降低大量的图像数据对存储空间的要求。其次,通过对图像的部分像素进行处理和简单的阈值方法对图像完整性进行检测以提高检测速度。最后,通过对图像的完整性进行判断,只将完整图像传到后台处理,降低了传输能耗。进行了室内和室外环境实验,结果表明,虽然需要一定的处理时延,但是 EasiRS 可以使系统的感知性能维持在一个可以接受的水平上,同时降低了系统的存储开销和传输能耗。EasiRS 的局限性主要表现在 2 个方面:1) 因为需要对图像完整性进行检测,因此需要一定的时间开销,且光线变化大的环境对实验结果有较大的影响;2) 因为该系统只传输完整图像,因此它不能用于需要对目标整个运动过程进行采集的情况。

下一步将对多车道和环境变化较大的场景中的动态目标监测进行研究和实验。此外还将考虑某些特殊情况下的实验,如当车流量较大时,2 辆车到来的时间间隔小于完整图像传输时间的情况。

参考文献:

- [1] 马华东,陶丹. 多媒体传感器网络及其研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(9):2013-2028.
MA H D, TAO D. Multimedia sensor network and its research progresses[J]. Journal of Software, 2006, 17(9):2013-2028.
- [2] AKYILDIZ F, MELODIA T, CHOWDHURY K. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. Journal Computer Networks: the International Journal of Computer and Telecommunications Networking, 2007, 51(4):921-960.
- [3] 樊小平,熊哲源,陈志杰等. 无线多媒体传感器网络视频编码研究[J]. 通信学报, 2011, 32(9):137-146.
FAN X P, XIONG Z Y, CHEN Z J, *et al.* Video coding in wireless multimedia sensor networks: a survey[J]. Journal on Communications, 2011, 32(9): 137-146.
- [4] 叶松涛,林亚平,易叶青. 视觉传感器网络中基于离散度模型的协作式图像压缩机制[J]. 通信学报, 2011, 32(3): 69-78.
YE S T, LIN Y P, YI Y Q. Cooperation image compression algorithm using divergence model for visual sensor networks[J]. Journal on Communications, 2011, 32(3):69-78.
- [5] SHIN J, KUMAR R, MOHAPATRA D, *et al.* ASAP: a camera sensor network for situation awareness[A]. Proceeding of ACM OPODIS 2007[C]. CA, USA, 2007.31-47.
- [6] TIAN R, XING G L, LIU X, *et al.* Adaptive calibration for fusion-based wireless sensor networks[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. San Diego, CA, 2010.1-9.
- [7] CHEN J, TIAN R, XING G L, *et al.* Fidelity-aware utilization control for cyber-physical surveillance systems[J]. IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems, 2012, 23(9):1739-1751.
- [8] ZHANG H T, TANG S J, LI X Y, *et al.* Tracking and identifying burglar using collaborative sensor-camera networks[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, 2012.2596-2600.
- [9] MA H, YANG M, LI D Y, *et al.* Minimum camera barrier coverage in wireless camera sensor networks[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, 2012.217-225.
- [10] WANG Y, CAO G. Barrier coverage in camera sensor networks[A]. Proceeding of ACM MobiHoc[C]. Paris, Franch, NJ, 2011. 1-10.
- [11] FANG X, YANG D, XUE G. Strategizing surveillance for resource-constrained event monitoring[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, 2012.244-252.
- [12] CHEN Z, BARRENETXEA G, VETTERLI M. Share risk and energy: sampling and communication strategies for multi-camera wireless monitoring networks[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, 2012.1862-1870.
- [13] XIAO K J, WANG R, CUI L. Adaptive collaboration for heterogeneous sensor networks in dynamic environments[A]. Proceeding of IEEE Globecom[C]. Atlanta, GA, USA, 2013.168-173.
- [14] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing[M]. New York: Prentice Hall, 2008.
- [15] HERRERO E, ORRITTE C, ALCOLEA A, *et al.* Video-sensor for detection and tracking of moving objects[J]. Pattern Recognition and Image Analysis(Springer), 2003, 2652:346-353.
- [16] LIU L, MING A L, MA H D, *et al.* A binary-classification-tree based framework for distributed target classification in multimedia sensor networks[A]. Proceeding of IEEE INFOCOM[C]. Orlando, 2012. 594-602.
- [17] PIJL M, PAR S, SHAN C. An event-based approach to multi-modal activity modeling and recognition[A]. Proceeding of IEEE Percom[C]. Mannheim, 2009.98-106.
- [18] XIE T, YAN T, GANESAN D, *et al.* Design and implementation of a dual-camera wireless sensor network for object retrieval[A]. Proceeding of IEEE IPSN[C]. St Louis, MO, 2008.469-480.
- [19] DING L, GOSHTASBY A. On the canny edge detector[J]. Patteren Recognition, 2001, 34(3):721- 725.
- [20] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[A]. Proceeding of IEEE CVPR[C]. San Diego, CA, USA, 2005. 886-893.
- [21] JUNG T, TEIXEIRA T, SAVVIDE A. Sensor node lifetime analysis: models and tools[J]. ACM Trans on Sensor Networks, 2009, 5(1): 1-33.

作者简介:



肖克江(1984-),男,河南信阳人,中国科学院博士生,主要研究方向为无线传感器网络协同处理、信息融合等。

王睿[通信作者](1975-),男,河南平顶山人,博士,中国科学院副研究员、硕士生导师,主要研究方向为无线传感器网络、自组织和信息融合等。E-mail: wangrui@ict.ac.cn。

崔莉(1962-),女,北京人,博士,中国科学院研究员、博士生导师,主要研究方向为无线传感器网络。