

一种满足数据时新性的 WSN 运载路由算法

成 培, 翁艳彬, 王国军

(中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为满足无线传感器网络应用的数据时新性, 综合节点传送数据和移动设备辅助传送数据 2 种方式的优点, 提出一种能量高效的运载路由算法。通过计算移动设备的最优接收数据位置, 规划移动设备的路径, 降低传感器节点的能量消耗, 由此提高网络性能。模拟结果表明, 该算法能在保证数据时新性的前提下, 较大地减少网络能耗。

关键词: 无线传感器网络; 数据收集; 数据时新性; 运载路由问题

WSN Carrying Routing Algorithm Satisfying Data Freshness

CHENG Pei, WENG Yan-bin, WANG Guo-jun

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

【Abstract】 In order to satisfy the requirement of data freshness in Wireless Sensor Network(WSN), by combining network data transportation and mobile element transportation, this paper proposes an efficient carrying routing algorithm. It calculates the optimal node positions for mobile elements to transmit data, and plans the paths of mobile elements, so that the energy consumption of sensor nodes is reduced and the network performance is improved. Simulation results show that the proposed algorithm can reduce network energy consumption under the premise of guaranteeing data freshness.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); data collection; data freshness; Carrying Routing Problem(CRP)

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.03.022

1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)能够对目标区域进行监测。当某事件发生时, 监测到该事件的传感器节点将其报告给基站。基站为了持续监视该事件, 需要其他传感器节点定期采集数据传送到基站。同时, 为了保证数据的时新性, 必须将监测数据在一定时间内转发到基站, 避免数据失效。例如农田环境灾害监测、结构安全监测等应用^[1]。由于传感器节点能量有限, 为了延长网络生命周期, 本文引入移动设备辅助传送数据。这样可看作网络中存在 2 种数据传送方式, 一种是通过网络节点之间多跳方式进行的数据传送, 另一种是通过节点-移动设备-节点/基站方式进行的数据传送。前一种方式数据传送速度快, 但需要消耗较多的传感器能量; 而后一种方式虽然传送速度有限, 却可以节省节点能量。因此, 本文对运载路由问题(Carrying Routing Problem, CRP)进行了研究, 即如何在满足数据时新性的条件下, 利用 2 种传送方式的优点, 最大限度地延长网络生命周期。

目前已有一些对移动设备调度问题的研究, 解决方案可以分为 3 类: 随机调度, 预言调度, 可控调度^[2]。数据骡子是较早提出的随机调度方式, 骡子作为移动设备可随机移动, 当靠近传感器节点时采集数据。典型的预言调度策略为: 传感器节点根据某一算法预测移动设备的轨迹, 当移动设备靠近时, 传送数据至移动设备。可控调度体现为: 机器人作为移动基站, 在预设的轨道上运动, 运动的速度由无线信道的强弱及节点的密度决定, 逐个查询节点是否有数据传送并进行数据收集^[3-4]。本文为了满足数据时新性需求, 提出一种基于事件的可控调度策略, 通过计算移动设备最优接收数据的位置来调度移动设备的移动, 达到提高网络性能的目的。

2 运载路由问题描述与分析

2.1 问题描述

CRP 可简单描述为: 基站得知网络中某事件发生后, 要求传感器节点每隔 T_1 时间采集一次数据, 该数据必须自产生时刻开始的 T_2 时间内到达基站。网络中存在若干机器人(移动设备)辅助传输, 它们可以移动到某个节点接收数据, 然后移动到另外一个节点送出数据。问题的目标是在满足数据时新性的条件下, 调度机器人的移动, 使得网络节点消耗的能量 E 最小。

2.2 基本假设

假设数据源 S 与基站距离为 d , 有一可自由移动的机器人辅助传送数据, 速度为 V_r , 机器人从网络节点接收和送出数据所需要的时间忽略不计, 数据在网络节点之间传输的速度为 V_t (可以通过网络带宽、数据大小等计算出来)。网络初始化完成后, 节点开始采集数据信息, 机器人位于基站处, 并且有: $V_t > V_r$, $T_2 \times V_t \geq d$ 。每当机器人移动到节点接收数据并返回基站, 称其完成一轮数据收集。

2.3 机器人最优移动方式分析

如果 $d \leq V_r \times \frac{T_2}{2}$, 即机器人从基站移动到数据源的时间小于 $\frac{T_2}{2}$, 则数据可以全部用机器人传送。此时, 通过网

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61073037); 湖南省杰出青年科学基金资助项目(07JJ1010)

作者简介: 成 培(1986—), 女, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络; 翁艳彬, 博士研究生; 王国军, 教授、博士生导师

收稿日期: 2011-07-25 **E-mail:** hnpeicheng@gmail.com

络节点传输数据所消耗的能量为 0。

在 $d > V_r \times \frac{T_2}{2}$ 的情况下,先考虑从数据源采集第 1 轮数据的情况。机器人移动到某个位置点接收数据,再返回基站的总耗时不能超过 T_2 ,即机器人能够移动的最远距离是 $V_r \times \frac{T_2}{2}$ (标记此点为 P_1 点)。当机器人到达 P_1 点时,数据能到达该点的条件是:

$$V_i \times \frac{T_2}{2} \geq d - V_r \times \frac{T_2}{2}$$

即:

$$d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$$

所以,当 $V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$ 时,第 1 轮数据能利用机器人移动的最远距离为 $V_r \times \frac{T_2}{2}$ 。

当 $d > (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$ 时,在 $\frac{T_2}{2}$ 时刻机器人已到达 P_1 点但数据包还未到,若机器人在 P_1 点等待数据到达后再返回,则数据将会失效。此时,能借助机器人传送的最远距离 d_x

可以由 $V_i \times \left(T_2 - \frac{d_x}{V_r} \right) = d - d_x$ 即式(1)计算:

$$d_x = \frac{\left(V_i \times \frac{T_2}{2} - d \right) \times V_r}{V_i - V_r} \tag{1}$$

考虑 $V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$ 的情况下第 2 轮及之后的数据传输,机器人载着第 1 轮数据到达基站时,刚好赶上第 1 轮数据的到期时间 T_2 ,此时第 2 轮的数据尚未采集,机器人最多有 $T_1 - T_2 + T_2 = T_1$ 的时间往返传送,即机器人可能移动的最远距离为 $V_r \times \frac{T_1}{2}$ 。此时分 2 种情况:

(1)当 $V_r \times \frac{T_1}{2} \geq d$ 时,说明从第 2 轮开始,存在所有的数据包都可以全程借助机器人来运输的可能。具体又分以下 2 种情况:

1)机器人到达数据源时数据已经产生 ($T_1 - T_2 \leq \frac{T_1}{2}$),数据可全部借助机器人传送。

2)机器人到达数据源,数据还未产生 ($T_1 - T_2 > \frac{T_1}{2}$):若 $T_2 \times V_r \geq d$,数据采集之后可以借助机器人传送的最大距离为 d ;若 $T_2 \times V_r < d$,数据能借助机器人传送的最大距离可由式(1)计算。

(2)当 $V_r \times \frac{T_1}{2} < d$ 时,设距离基站 $V_r \times \frac{T_1}{2}$ 的点为 P_2 ,当机器人移动到 P_2 时,数据包能够赶到该点的条件是:

$$V_i \times \left(T_2 - \frac{T_1}{2} \right) \geq d - V_r \times \frac{T_1}{2}$$

即:

$$d \leq \frac{2V_i T_2 - T_1 V_i + T_1 V_r}{2}$$

因为上式是在 $V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$ 的条件下推导得出的,所以可得 $T_1 < \frac{(2V_i - V_r)}{V_i - V_r} \times T_2$ 。若机器人到达 P_2 点时数据包还未到,此时数据包借助机器人传送的最远距离 d_x

可通过式(1)计算。

综合以上分析,具体调度情况如表 1~表 3 所示。

表 1 $2T_2 \geq T_1 \geq T_2$ 时机器人的最优移动方式

条件	首轮移动距离	次轮移动距离
$d \leq V_r \times \frac{T_2}{2}$	d	d
$V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq V_r \times \frac{T_1}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d
$V_r \times \frac{T_1}{2} < d \leq \frac{2V_i T_2 - T_1 V_i + T_1 V_r}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	$V_r \times \frac{T_1}{2}$
$\frac{2V_i T_2 - T_1 V_i + T_1 V_r}{2} < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d_x
$d > (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	d_x	d_x

表 2 $\frac{(2V_i - V_r)}{V_i - V_r} T_2 > T_1 > 2T_2$ 时机器人的最优移动方式

条件	首轮移动距离	次轮移动距离
$d \leq V_r \times \frac{T_2}{2}$	d	d
$V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq V_r T_2$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d
$V_r T_2 < d \leq V_r \times \frac{T_1}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d_x
$V_r \times \frac{T_1}{2} < d \leq \frac{2V_i T_2 - T_1 V_i + T_1 V_r}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	$V_r \times \frac{T_1}{2}$
$\frac{2V_i T_2 - T_1 V_i + T_1 V_r}{2} < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d_x
$d > (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	d_x	d_x

表 3 $T_1 > \frac{(2V_i - V_r)}{V_i - V_r} T_2$ 时机器人的最优移动方式

条件	首轮移动距离	次轮移动距离
$d \leq V_r \times \frac{T_2}{2}$	d	d
$V_r \times \frac{T_2}{2} < d \leq V_r T_2$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d
$V_r T_2 < d \leq (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	$V_r \times \frac{T_2}{2}$	d_x
$d > (V_i + V_r) \times \frac{T_2}{2}$	d_x	d_x

3 运载路由算法

3.1 应用场景模型

本节考虑一个机器人轨道固定的大规模密集型无线传感器网络,图 1 给出一个应用场景模型。传感器节点随机布置在一片矩形区域内,基站位于区域中心,位置固定。有 4 个能量不受限制且能在图中固定轨道上自由移动的机器人辅助传送数据,各自负责一片区域,初始位置在基站处,移动速度为 V_r 。节点可以把数据发送给靠近轨道上的节点(称为轨道节点),由机器人帮助传送数据(机器人接收数据的节点称为投递节点),节点与机器人之间通信时间忽略不计。数据通过网络传输的平均速度为 V_i , V_r 和 V_i 对整个网络已知。节点知道自身的地理位置信息,这可以通过配备 GPS 或者通过定位算法得到。

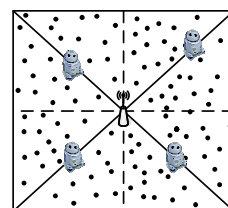


图 1 应用场景

3.2 算法描述

网络初始化时, 机器人沿着轨道往返移动, 从基站开始移动 $V_r \times \frac{T_1}{2}$ 的距离。沿途不断广播, 收到该广播消息的节点成为轨道节点, 并把自身的地理位置信息发送给机器人, 机器人进而把这些信息转发给基站。

初始化完成后, 基站计算出每个数据源 a 开始采集数据的时刻 t_a 以及其投递节点 T_a , 并把计算结果发送给数据源。数据源从 t_a 时刻开始以 T_1 的间隔产生数据, 并根据某种路由算法发送给 T_a 。同时机器人开始沿轨道移动接收数据: 先移动到距离基站最远的投递节点接收数据, 再返途接收其他投递节点数据。每个源节点数据到达其投递节点 T_a 后, 先判断运输的机器人是否已经返途到达, 如果没有到达, 先判断等待条件是否成立, 若成立, 则存储起来, 等待一段时间, 如果这段时间内机器人到达, 则传送给机器人, 否则, 数据通过网络向基站方向传递一跳, 然后继续等待机器人; 若机器人已经离去或者等待条件不成立, 则把数据向基站方向传递一跳再重复以上判断。

机器人在运输数据过程中, 每到一个轨道节点都要估算从下一个轨道节点开始通过网络传输到基站的时间是否会超过 T_2 , 超过, 则直接通过网络传输, 否则, 继续由机器人传送数据。投递节点的计算如图 2 所示。

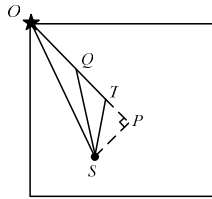


图 2 投递点的计算

设源节点 S 在轨道上投影点为 P , O 为基站所在点, d_{OP} 代表 O 和 P 之间的距离。按 2.2 节的分析, 可以推导出第 1 轮数据收集的最佳情况: 在 O 、 P 间寻找一离 P 点最近的节点 T , 并且满足条件:

$$\frac{d_{ST}}{V_i} \leq \frac{d_{OT}}{V_r} \leq \frac{T_2}{2} \quad (2)$$

或者:

$$\frac{d_{ST}}{V_i} > \frac{d_{OT}}{V_r} \quad \text{and} \quad \frac{d_{ST}}{V_i} + \frac{d_{OT}}{V_r} \leq T_2 \quad (3)$$

则 T 点为投递节点。

由于第 2 轮及其之后数据收集开始时先进行判断, 因此在满足式(2)的前提下, 若满足:

$$T_1 - T_2 + \frac{d_{ST}}{V_i} \leq \frac{d_{OT}}{V_r} \quad (4)$$

或者:

$$T_1 + \frac{d_{ST}}{V_i} + \frac{d_{OT}}{V_r} \leq 2T_2 \quad (5)$$

那么在满足式(3)的前提下, 若满足式(5), 则 T 点为此轮及之后数据收集的最优投递节点, 否则, 选择 T 点沿轨道向基站方向的下一跳节点为新的 T 点(图 2 中 Q 点), 再进行上述判断, 若满足, 则 Q 点为最新的投递点。

等待条件为: 数据发送到各自的投递节点后, 根据当前时间 t_c 和从数据产生的时间 t_p 计算出当前数据到期时间 $T_L = t_p + T_2 - t_c$, 设距基站的下一跳节点离其投递节点距离为 d_i , 投递节点距离基站跳数为 k , 每一跳之间平均延迟为 T_k , 若:

$$\frac{d_i}{V_r} + (k-1)T_k + \alpha < T_L \quad (6)$$

成立(α 是一个可以调节的正数, 考虑网络延迟的不确定性), 则等待机器人, 否则, 通过网络把数据发送给下一跳节点。

本文的运载路由算法 CRP-A 具体步骤如下:

步骤 1 初始化: 标记轨道节点, 并按顺序保存于数组 PathNode[] 中。

步骤 2 事件发生, 计算区域内源节点的首次投递节点 T :

(1) 初始选择节点的轨道投影节点为 T ;

(2) 判断是否满足式(2)或式(3), 若满足, 则 T 为投递节点, 转步骤 3; 否则, 在 PathNode[] 中选取下一跳节点为 T , 重复(2)。

步骤 3 计算源节点的下一轮的投递节点 T :

(1) 初始选择上一轮的投递节点为 T ;

(2) 根据上一轮情况, 分别判断是否满足式(4)、式(5): 若满足, 则 T 为本次及之后的投递节点, 转步骤 4; 否则, 在 PathNode[] 中选取下一跳节点为 T , 重复(2)。

步骤 4 根据某一算法建立源节点到投递节点的路由树。

步骤 5 投递节点接收到数据后判断机器人位置:

(1) 机器人未到达, 判断是否满足式(6), 转(2); 机器人到达, 则利用机器人传输, 转(3);

(2) 若满足式(6), 则等待一段时间后机器人仍未到达, 通过网络传输一跳, 重复(1); 若不满足式(6), 则通过网络传输一跳后, 重复(1);

(3) 机器人每到一个轨道节点, 估算是否会超时, 若不超时, 则继续传输, 否则, 通过网络传输。

4 模拟实验

本节使用 C++ 对 CRP-A 算法进行模拟, 并与经典的基于事件驱动的数据收集算法 EADA^[5] 做比较。在 EADA 算法中, 移动设备 MS 采用泛洪的方式通知传感器节点其位置, 同时当传感器检测到事件时, 发送索引信息给 MS, MS 移动到数据产生点, 数据产生区域的数据也向 MS 的方向传送, 以达到快速收集数据的目的。模拟中, CRP-A 算法初始路由树的建立采用与 EADA 相同的算法。算法比较的性能指标主要是全网总能耗, 包括通信能耗、计算能耗及传感能耗。

4.1 参数设置

假设传感器传输和接收数据, 电路本身的能耗为 $E_{elec} = 50$ nJ/bit, 数据包传输过程中广播器的能量消耗为 $E_{amp} = 100$ pJ/bit/m², 则在相距 d 的传感器节点间传输 k bit 数据消耗的能量为 $E_T(k, d) = E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2$, 接收数据消耗的能量为 $E_R(k) = E_{elec} \times k$, 总能量消耗为 $E_{total}(k) = (E_{elec} \times k + E_{amp} \times k \times d^2) + (E_{elec} \times k)$ ^[5]。

模拟的具体参数设置如表 4 所示, 节点的初始能量均为 10 J, 模拟持续 100 s。

表 4 模拟参数设置

参数	值
模拟区域	2 000 m × 2 000 m
节点数量	100~500
机器人速度/(m·s ⁻¹)	0~25
节点通信半径/m	100
数据包大小/Byte	64
数据传输率/(Mb·s ⁻¹)	1

4.2 结果分析

图3给出在网络规模为400个节点的情况下,机器人速度 V_r 从5 m/s变化到25 m/s时2种算法的能耗情况。CRP-A算法消耗的总能量低于EADA算法。由于CRP-A算法中,投递节点的位置事先计算,且机器人只需在轨道节点处更新位置信息,减少了位置更新带来的能量消耗。而EADA算法需要频繁更新MS的位置。

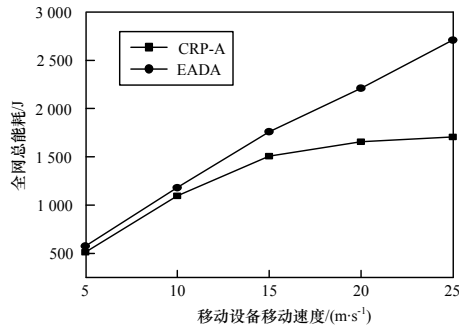


图3 网络总能耗相对于移动设备移动速度的改变

假设机器人移动速度为20 m/s,网络规模从100个节点变化到500个节点,图4给出在不同网络规模下2种算法的总能耗比较。

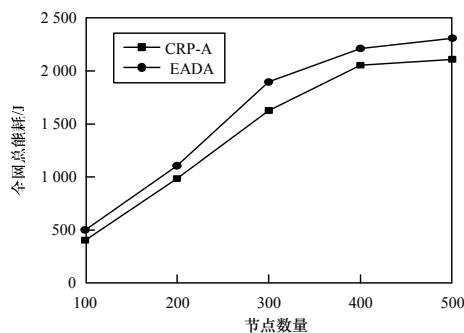


图4 网络总能耗相对于节点数量的改变

编辑 张帆

(上接第56页)

情况下,基于捕获/重现的微分单元测试比传统的系统测试有更高的故障覆盖率。

表3 故障检测数据

版本	St-select 检测到故障的用例个数	相关 Ct-select 检测到故障的比例/(%)	St-select 通过测试的用例个数	相关 Ct-select 通过测试的比例/(%)
v0.91 fault1	67	97	91	100
v0.91 fault2	88	100	70	100
v0.91 fault3	87	100	71	100
v0.95	55	93	103	100
v0.96	72	100	86	88

实验表明,基于捕获/重现技术的微分单元测试在测试成本上保持了单元测试的优势,无论在测试执行时间还是占用系统空间上都优于系统测试,并且在大部分情况下基于捕获/重现技术的微分单元测试能够保证系统测试时的故障检测覆盖率。

5 结束语

本文结合单元测试和系统测试,提出一种基于捕获/重现技术的微分单元测试方法,经过初步实验,表明该方法可以在较少的测试成本开销下检测出软件不同版本间的故障,并能够保证较高的故障测试覆盖率。当然该方法中还存在许多问题,可以作为日后研究的方向:(1)选择不同类型的待测系

统进行测试,比较该方法与传统单元测试的故障检测的有效性,并交叉验证与系统测试的故障覆盖率情况。(2)进一步扩展程序的适应性,使其能够保证捕获效率的同时,提高重现单元测试时的故障检测能力。

5 结束语

为满足无线传感器网络中数据时新性的要求,本文综合节点传送数据和移动设备辅助传送数据2种方式的优点,提出了运载路由算法,模拟结果表明,该算法在保证数据时新性的前提下减少网络的能量消耗。但这一领域仍有很多亟待研究的课题,比如:如何提高模型的实用性和扩展性,如何在具体的环境中根据实际的网络情况设置移动设备的运输路线。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Su Weilian. A Survey on Sensor Networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114.
- [2] Somasundara A A, Ramamoorthy A, Srivastava M B. Mobile Element Scheduling for Efficient Data Collection in Wireless Sensor Networks with Dynamic Deadlines[C]//Proceedings of the 25th IEEE International Real-time Systems Symposium. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 296-305.
- [3] Xing Guoliang, Wang Tian, Xie Zhihui, et al. Rendezvous Planning in Wireless Sensor Networks with Mobile Elements[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(12): 1430-1443.
- [4] 郑瑾, 苏广毅, 贾维嘉, 等. 能量有效的无线传感器网络数据收集协议[J]. 计算机工程, 2010, 36(8): 102-104.
- [5] Wang Nengchung, Huang Yungfa, Chen Jongshin, et al. Energy-aware Data Aggregation for Grid-based Wireless Sensor Networks with a Mobile Sink[J]. Wireless Personal Communications, 2007, 43(4): 1539-1551.

参考文献

- [1] Bach J. Useful Features of a Test Automation System (Part III)[M]. [S. l.]: Testing Techniques Newsletter, 1996.
- [2] ElbaUm S. Carving and Replaying Differential Unit Test Cases from System Test Cases[J]. IEEE Trans. on Software Engineering, 2009, 35(1): 29-45.
- [3] Onoma A K. Regression Testing in an Industrial Environment[J]. Communications of the ACM, 1998, 41(5): 81-86.
- [4] Rountev A. Efficient Checkpointing of Java Software Using Context Sensitive Capture and Replay[C]//Proc. of ACM Int'l Symp. on Foundations of Software Engineering. New York, USA: [s. n.], 2007.
- [5] Orso A. Selective Capture and Replay of Program Executions[C]//Proc. of IEEE Workshop on Dynamic Analysis. Missouri, USA: [s. n.], 2005.

编辑 陈文

