

基于合作博弈的移动无线传感器网络分簇路由协议

罗 仑¹
LUO Lun

摘 要

节点部署区域较广的移动无线传感器网络(mobile wireless sensor network, MWSN), 具有节点分布范围广、监测范围广等优势, 可适用于较大范围地区的监测和数据传输。针对较大规模部署网络, 文章提出了基于合作博弈的多跳路由协议(cooperative game-based multi-hop routing protocol, CGMR)。协议以合作博弈的方式分析簇头节点的通信路由选择, 通过综合考虑节点所处位置、剩余能量、移动速率等要素, 设计得到通信可达、整体能耗最优的路由通路。在对比实验中表明, CGMR 协议可以在较大范围网络中显著降低节点平均能耗。

关键词

移动无线传感器网络; 能耗均衡; 分簇路由协议; 合作博弈

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.007

0 引言

无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)由一组空间上离散的传感器节点组成, 且传感器节点群通过无线通信的方式相互连接, 节点被用于监测周围环境因素, 如湿度、压力、温度和振动^[1]。随着 WSN 技术的发展与应用的普及, WSN 在面对如动态环境需求、网络覆盖扩展、应对不可预测性的特定应用场景时面临着技术升级与挑战, 而移动传感器技术的研究填补了这一空缺^[2]。MWSN 是一种具有移动节点的无线传感器网络^[3]。MWSN 的节点拥有更高的灵活性和可移动性, 能够在变化的环境中快速适应并收集传感器数据。许多应用, 如智能交通系统、栖息地监测和水下监测, 更需要采用 MWSN^[4]。

大多数 MWSN 研究中, 受限于传感器传输距离的限制, 节点部署范围常局限于边长 100 m 的矩形区域内^[5-9]。而节点部署区域边长超过 1 000 m 的 MWSN, 可适用于较大范围地区的监测和数据传输, 同样具有较高研究价值^[10]。相较于传统的传感器通信网络, MWSN 在广范围中面临着如能耗加剧、信号衰减等诸多挑战^[11]。同时, 由于覆盖范围的扩展, 若采用传统单跳通信方式, 在大范围网络通信中将面临由信号衰减所导致的数据传输质量下降等风险; 若采用多跳路由, 通过多个中继节点传输数据以减小单个节点到目标节点的通信距离, 可以降低信号衰减的影响, 但同时将引入更为复杂的多跳路由网络拓扑结构设计。因此, 较广范围部署 MWSN 需要采用更加高效的数据传输和路由协议, 在网络构建中基于节点剩余能量、距离等的综合评估方法最优化节点的路由选择。

1 基于合作博弈的移动无线传感器网络分簇路由协议

1.1 无线电模型

多跳路由的无线电模型, 涉及多个中继节点间的信号接收与发射。如经典的无线电信号模型^[12], 节点内含信号接收器、信号发射器、信号放大器三部分, 信号的传输过程包含信号的接收, 以及发射、放大。如图 1 无线电模型示意图所示。

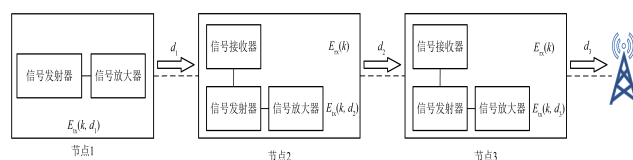


图 1 无线电模型示意图

假设存在 1 个信号发送节点与 2 个中继节点, 将 k bit 的数据包发送至基站。节点 1 到节点 2 距离为 d_1 , 则经过信号发射器与放大器发送 k bit 数据包至节点 2 的能耗 E_{tx} 是 k 和 d_1 的函数, 表示为 $E_{tx}(k, d_1)$; 节点 2 通过信号接收器以 $E_{rx}(k)$ 的能耗接收信号后, 再以 $E_{tx}(k, d_2)$ 的能耗发射并放大信号至节点 3; 节点 3 再以 $[E_{rx}(k)+E_{tx}(k, d_3)]$ 的能耗将数据包上传至基站。能耗计算公式为:

$$E_{tx}(k, d) = \begin{cases} E_{tran} \cdot k + E_{fs} \cdot k \cdot d^2, & d \leq d_0 \\ E_{tran} \cdot k + E_{amp} \cdot k \cdot d^4, & d > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{rx}(k) = (E_{rec} + E_{cpx}) \cdot k \quad (2)$$

式中: E_{tran} 代表信号发射器进行发射信号的能耗; E_{fs} 代表自由空间传播模型中的信号放大能耗; E_{amp} 代表多径衰减传播模型中的信号放大能耗; E_{rec} 代表信号接收器接收信号的能耗; E_{cpx} 代表传感器进行数据压缩的能耗^[13]; d_0 代表信号传输放大模型选取的距离阈值。

1. 汕头职业技术学院 广东汕头 515078

1.2 分簇路由模型

在 MWSN 中遍布移动传感器节点, 节点分布随机且移动方向随机。节点的地理位置精确定位现有 GPS、北斗导航等技术^[14]的定位算法可实现, 节点的数据处理、存储^[15]等亦可根据现有技术实现。如图 2 所示, 网络内无线传感器节点为可移动节点, 具有相同初始能量。在矩形部署区域划定多个网络分簇, 每个分簇中有 1 个簇头 (cluster head, CH) 节点。基站位于部署区域的中心区域, 作为网络模型的中枢, 收集传感器节点采集的信息; CH 收集普通节点上报的数据并压缩汇总数据传至基站处; 普通节点负责收集传感数据并上报。对于多跳路由通信方式, CH 间可采取中继 CH 节点转发的方式上报数据。

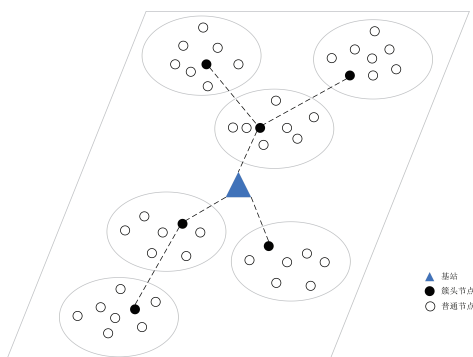


图 2 分簇路由模型示意图

1.3 基于合作博弈的移动无线传感器网络路由协议

协议主要流程包括网络构建与稳定通信两个阶段。网络构建阶段将初始化传感器节点信息, 筛选出适宜的 CH 候选节点 (candidate cluster head, CCH), 对节点用集中式路由协议进行网络分簇与 CH 选择, 并为 CH 数据上传选择高效的多跳路由。在稳定通信阶段主要进行数据的收集、整合、上传, 并通过离簇管理机制管理移动离簇节点重新入簇。协议的流程如图 3 所示。

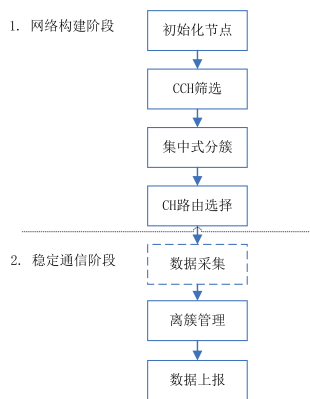


图 3 CGMR 协议流程图

(1) 节点初始化及 CCH 筛选。在构建网络分簇前, 需要筛选出满足一定条件的 CCH 节点, 以提高后续 CH 选择

步骤的执行效率。由于 CH 节点能耗、稳定性等要求较普通节点高, 则 CCH 筛选应倾向于选择当前剩余能量大、节点的度高、移动速度慢等特征的节点。首先设定能量阈值 E_0 , 节点能量若低于能量阈值则不参与 CCH 筛选。由节点初始化阶段中每个节点维护的一定范围内节点信息表, 每个节点可以各自根据附近节点信息判断节点自身是否适合成为 CCH 节点。设节点 A 的节点信息表中的 n 个节点构成 S 集合, 先分别求出 S 集合的平均剩余能量 $\overline{E_n}$ 、节点度均值 $\overline{dr_n}$ 与平均移动速度 $\overline{R_n}$ 。若节点 A 满足剩余能量 $E_A \geq \overline{E_n}$, 或节点度 $dr_A \geq \overline{dr_n}$, 或移动速度 $v_i \leq \overline{R_n}$, 则节点 A 通过 CCH 筛选, 下一步将进入 CH 选择步骤。若节点 A 不满足 CCH 筛选条件, 则将作为普通传感器节点仅参与环境数据收集与上报。因此, 在 CCH 节点筛选阶段可以筛选出能量高于阈值且一定条件下适合成为 CH 的节点。

(2) 集中式分簇与 CH 选择。在确定参与 CH 选择的 CCH 节点后, 需要对网络进行分簇管理并选出 CH 节点。对于广范围节点部署的 MWSN, 考虑采用集中式网络分簇方式, 因为以节点分布聚合的方式更能适应大范围节点分布场景。如在广范围场景下, 节点到基站距离超过通信距离时, 只能通过多跳路由方式转发上传数据包, 而集中式网络分簇方式可以更灵活地桥接多跳路由路径。同时, 基于节点分布密度聚合形成的集中式分簇能根据节点分布情况以及部署区域大小动态变化, 对比网格式分簇方式更能适应广范围节点部署的 MWSN 场景。为构建网络的集中式分簇, 本文采用邻域搜索算法。由于在初始化阶段各节点已将初始化信息上报至基站, 则基站已掌握部署区域内传感器节点分布情况, 可通过自身计算实现网络分簇。设定每个网络分簇只有唯一 CH, 则分簇数量即为 CH 数 n_{CH} ; 设 k 为邻域搜索次数并初始化 $k=0$, 设定 k 不超过循环最大次数 N_{cir} , 即 $k \leq N_{cir}$; 设定邻域搜索范围参数为 λ , 恒小于邻域范围阈值 d_{neib} ; 将确定为 CCH 的节点以集合 S_{pre} 来表示; 设 S_{CH} 为所求 CH 节点集合; 设 S_{neib} 为邻域探索节点集合。如果 $|S_{pre}| \leq n_{CH}$, 即 CCH 节点数量小于等于拟定的 CH 数量要求, 则令 $S_{CH} = S_{pre}$ 并向域内节点广播消息, 告知 CH 选择结果。如果 $|S_{pre}| > n_{CH}$, 则将开始邻域搜索流程。令 $k=k+1$, 随机选择 S_{pre} 内节点至 S_{neib} 与使 $|S_{neib}| = |S_{pre}|$; 任取 S_{pre} 且坐标为 (x_{p_i}, y_{p_i}) , 取随机数 λ 令 $\lambda \in (-d_{neib}, d_{neib})$, 令邻域搜索范围为 $(x_{p_i}+\lambda, y_{p_i}+\lambda)$, 寻找节点 S_{p_i} 的邻域范围内的节点 S_{p_i-neib} , 将搜索到的邻域节点 S_{p_i-neib} 替换集合 S_{neib} 中的原节点 S_{p_i} , 记录 S_{p_i} 到 S_{p_i-neib} 距离 d_{p_i-neib} ; 使 S_{pre} 内所有节点重复邻域搜索并记录邻域距离的步骤, 并分别求出 S_{pre} 与 S_{neib} 各节点到其他邻域节点内的距离最小值, 分别记录至集合 D_{min} 与 $D_{min-neib}$; 则第 k 轮的邻域搜索循环中得到 S_{pre} 的邻域集合 S_{neib} , 以及各自的邻域距离

最小值集合 $D_{\min}$ 与 $D_{\min_neib}$ ；分别对 $D_{\min}$ 与 $D_{\min_neib}$ 加和运算，若 $D_{\min_neib} < D_{\min}$ 与，则说明邻域集合 S_{neib} 距离其邻域内其他节点更靠近，则令 $S_{pre} = S_{neib}$ ，完成第 k 轮的邻域探索。当 $k < N_{cir}$ 时持续循环进行邻域搜索；当 $k = N_{cir}$ ，邻域搜索完成，令 $S_{CH} = S_{neib}$ ，则得到与各邻域节点距离最优的集合 S_{CH} ，集合内节点即为选出的 CH 节点。基站因此计算得到 CH 列表。接着，基站将向全体节点广播“CH 列表”消息。每个节点收到消息后可根据自身节点位置选择距离最近的 CH 节点，并向对应 CH 发送“申请入簇”消息。各个 CH 在接收到普通节点的消息后为节点分配时分多址（time division multiple access, TDMA）时隙，将根据网络的通信需求和时隙数量，把时隙分配给分簇内的节点，以确保其在适当的时间进行数据传输或接收。各个 CH 将回复“入簇成功”消息给申请节点，内容包括了节点分得的时隙信息。

(3) 合作博弈与 CH 路由。当已知各 CH 与基站间的位置关系，根据 CH 与基站关系可将 CH 分为远端 CH 与近端 CH。远端 CH 主要负责收集普通节点数据汇总上报，可通过近端 CH 路由转发上报数据或在通信范围内直接上报数据；而近端 CH 除此之外，还需要接收一个或多个远端 CH 消息并做汇总转发，产生额外能耗，但可提高整体网络通信效率。因此，可以将 CH 路由选择近似看作 CH 节点间进行合作博弈。CH 节点合作博弈模型可以表示为：

$$G = \{N, K, U\} \quad (3)$$

式中： N 代表参与博弈的 CH 节点； K 代表博弈参与者的策略集，博弈中每个节点可以选择与其他节点结成合作联盟或选择不合作，即 $\{CO, NCO\}$ ； $\{u_i\}$ 是每个博弈参与者 S_i 的效用方程。参与联盟合作的中继节点会有额外个体能耗 c ，但因对整体网络能耗节约贡献而获益 r_i ， r_i 与节点自身剩余能量、移动情况、与节点或基站距离等条件相关。对于任意 S_i 的效用方程，满足公式：

$$u_i = \begin{cases} r_i - c, & S_i \text{ 是中继节点且 } d_{i_s} \leq d_m \text{ 且 } S_i \text{ 需要转发消息} \\ rd_i, & S_i \text{ 是边缘节点且 } S_i \text{ 是中继节点, 或 } d_{i_s} \leq d_m \text{ 且 } S_i \text{ 非中继节点} \\ 0, & d_{i_s} > d_m, \text{ 且无 } S_i \text{ 是中继节点} \end{cases} \quad (4)$$

式中： S_i 表示博弈参与节点中除 S_i 外的其他节点； d_m 表示 CH 到基站的有效通信距离阈值。此外， $r_i - c$ 、 rd_i 均恒大于 0。

考虑获益 r_i 的影响因素。如式 (5) 所示，节点 S_i 是否适合作为合作联盟的中继节点，与节点到基站距离 d_{i_s} 、自身剩余能量 E_i 、移动速度 v_i 、中继节点度数 dr_i 等有关。当 d_{i_s} 、 v_i 较小，即节点 S_i 到基站距离短、移动较慢；而剩余能量 E_i 、中继节点度数 dr_i 较大，即能量较充足、作为多个节点的中继节点有利于压缩数据传递时，节点 S_i 作为中继节点有较大益处，应提供较大获益 r_i 使节点倾向于合作以提高整体网

络传递效率。

$$r_i = \alpha \cdot \left(1 - \frac{d_{i_s}}{d_{i_s_max}}\right) + \beta \cdot \frac{E_i}{E_{init}} + \gamma \cdot \left(1 - \frac{v_i}{v_{i_max}}\right) + \delta \cdot \frac{dr_i}{N_s - 1} + \tau \quad (5)$$

式中： $d_{i_s_max}$ 是部署区域边界到基站距离； E_{init} 是初始能量大小； v_{i_max} 是节点最大移动速度； N_s 是所有部署传感器节点，中继节点度数 dr_i 最大值为连接其他所有节点的个数，即 $N_s - 1$ ；设置 $\tau > c$ ，保证 $r_i - c > 0$ 。

考虑获益 rd_i 的影响因素。如式 (6) 所示，当节点 S_i 是部署区域的边缘节点，则是否参与合作联盟主要取决于 d_{i_s} 与 d_m 的关系。若 $d_{i_s} > d_m$ ，因 $rd_i > 0$ ，则 S_i 倾向于加入合作联盟。当节点 $d_{i_s} \leq d_m$ 且存在中继节点 S_i 进行合作转发时，获益 rd_i 主要与到基站距离 d_{i_s} 有关。若 S_i 距离基站较远，则应提供较大获益 rd_i 使节点倾向于合作以提高整体网络效率。

$$rd_i = \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{d_{i_s}}{d_{i_s_max}}\right) + \varphi \quad (6)$$

式中： $\varphi > \varepsilon$ ，以保证 $rd_i > 0$ 。

博弈参与者整体效用 U 由各参与者效用 $\{u_i\}$ 叠加得到。

$$U = \sum_{i=1}^n u_i \quad (7)$$

假设三节点合作博弈情形，如图 4 所示， S_A 、 S_B 、 S_C 三个 CH 节点，距离基站由近及远，其中节点 S_C 到基站距离超出通信距离阈值。

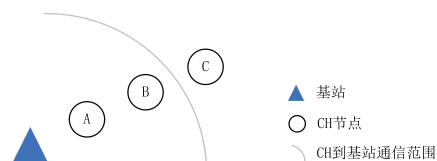


图 4 三节点合作博弈图示

当 S_A 、 S_B 、 S_C 的策略选择是 (NCO, NCO, NCO)，即为无节点成为中继节点的非合作形式，则节点 S_C 消息无法传至基站，此时各节点效用分别为 rd_A 、 rd_B 、0，总效用为 $(rd_A + rd_B)$ 。

当 S_A 、 S_B 、 S_C 的策略选择是 (CO, CO, NCO)，即节点 S_A 、 S_B 结成合作联盟而节点 S_C 选择不合作，则 S_A 作为联盟中继节点而节点 S_C 消息无法传至基站，此时各节点效用分别为 $r_A - c$ 、 r_B 、0，总效用为 $r_A + r_B - c$ 。

当 S_A 、 S_B 、 S_C 的策略选择是 (NCO, CO, CO)，即节点 S_B 、 S_C 结成合作联盟而节点 S_A 选择不合作，则 S_B 作为联盟中继节点， S_A 消息单独传至基站，此时各节点效用分别为 rd_A 、 $r_B - c$ 、 rd_C ，总效用为 $(rd_A + r_B + rd_C - c)$ 。

当 S_A 、 S_B 、 S_C 的策略选择是 (CO, CO, CO)，即节点 S_A 、 S_B 、 S_C 共同结成合作联盟，其中 S_A 、 S_B 作为联盟中继节点，此时各节点效用分别为 $r_A - c$ 、 $r_B - c$ 、 rd_C ，总效用为 $(r_A + r_B + rd_C - 2c)$ 。

合作博弈收益情况如表 1 所示，其中 (S_A , S_B) 代表节点

S_A 与节点 S_B 结成合作联盟。

表 1 三节点合作博弈收益情况

CH 联盟	S_A, S_B, S_C	$(S_A, S_B), S_C$	$S_A, (S_B, S_C)$	(S_A, S_B, S_C)
收益值	rd_A+rd_B	r_A+r_B-c	$rd_A+r_B+rd_C-c$	$r_A+r_B+rd_C-2c$

将博弈收益值代入式 (5) (6) 的获益计算公式, 由式 (7) 选择总效用最大的节点合作方式作为 CH 节点路由方式, 将实现整体网络效益最大化。

以上合作博弈分析可拓展至多节点参与的情形, 即通过总体获益计算以及收益情况分析, 找到每个参与博弈的 CH 节点的消息发送路径即最优化路由, 实现 CH 节点多条路由选择的确定。

(4) 离簇节点管理。由于 MWSN 网络中节点的移动特性, 存在普通节点移动离开与 CH 通信范围的情况, 即节点离开原网络分簇。假如节点 S_i 离簇, 则从节点 S_i 发送至其 CH 节点 S_{CH} 的数据包都将丢失。为保证通信网络稳定性, 需对离簇节点进行管理, 为离簇节点重新选择合适的 CH 节点。

当 CH 节点 S_{CH} 两次以上未能在分配给节点 S_i 的 TDMA 时隙收到 S_i 上报的消息, 则视为节点 S_i 离开该分簇。 S_{CH} 将节点 S_i 离簇消息上报基站, 由基站向节点 S_i 发送“CH 列表”消息。节点 S_i 收到后根据自身所在位置与 CH 距离、CH 剩余能量及速度等条件, 重新选择 CH 节点。对相关条件设置条件计算比较可得节点 S_i 最适合重新加入的网络分簇的 CH 节点, 相关计算公式为:

$$g_{i_CHx} = \mu_1 \cdot \left(1 - \frac{d_{i_CHx}}{d_{i_CH_max}} \right) + \mu_2 \cdot \frac{E_{CHx}}{E_{init}} + \mu_3 \cdot \left(1 - \gamma \cdot \frac{v_{CHx}}{v_{CH_max}} \right) \quad (8)$$

$$g_{i_CH_opt} = \max_{x \in CH} g_{i_CHx} \quad (9)$$

式中: d_{i_CHx} 表示节点 S_i 到某一 CH 节点 S_{CHx} 的距离; $d_{i_CH_max}$ 表示与 S_i 距离最远的 CH 节点距离; E_{CHx} 、 v_{CHx} 分别表示 S_{CHx} 的剩余能量、移动速度。

节点 S_i 倾向于选择距离较近、能量较充足, 而移动速度偏慢的 CH 节点重新入簇。根据基站提供的 CH 信息, 节点 S_i 选择 $g_{i_CH_opt}$ 对应的 CH 节点 S_{CH_opt} , 向 S_{CH_opt} 发送“申请入簇”消息; CH 节点 S_{CH_opt} 收到节点 S_i 的入簇申请后为节点 S_i 分配 TDMA 时隙, 并将对应时隙分配通过“入簇成功”消息通知节点 S_i 。

2 实验分析

本文使用 MATLAB 搭建环境进行仿真实验, 并与 CEECR 协议^[7]与 LEACH-Mobile 协议^[8]进行分析比较。初始仿真实验环境设置为矩形区域, 基站位于矩形中心位置。实验生成 250 个传感器节点, 能量初始化为 1 J, 随机分布于矩形区域内; 设置网络区域大小为 500 m×500 m, 最大通信距离为 150 m^[16]。实验的结束条件为所有节点能量耗尽。具

体实验参数设置如表 2 所示。

表 2 实验参数表

参数名称	参数值
节点数量	250
网络区域大小	500 m×500 m ~ 1 500 m×1 500 m
节点初始能量 E_{init}	10 J
数据包大小 k	500 bytes
信号发射能耗 E_{tran}	50e-6 J
信号接收能耗 E_{rec}	50e-6 J
信号放大能耗 E_{amp}	0.0013e-12 J
信号自由空间放大能耗 E_{fs}	10e-12 J
传输距离阈值 d_0	87 m
最大通信距离阈值 d_m	150 m, 250 m
节点移动速度 v	5 m/s
簇头节点数量 n_{CH}	16
邻域搜索循环次数 N_{cir}	1 000
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \mu_1, \mu_2, \mu_3$	0.5, 0.2, 0.1, 0.1, 0.5, 0.7, 0.2, 0.1

实验设置两个场景分析协议能耗情况, 场景一中的节点间最大通信距离为 150 m, 场景二中的最大通信距离设置为 250 m, 通过考察节点在不同网络区域大小下的平均传输能耗 (average energy dissipation, AED) 指标, 测试了 3 种协议在广范围节点部署环境下的 MWSN 网络能量消耗情况。

从图 5 中可以看出, 本文所提的 CGMR 协议在 500 m×500 m 范围内能耗略低于 CEECR 与 LEACH-MOBILE 协议, 而在 500 m×500 m~1 500 m×1 500 m 范围内能耗加剧幅度明显低于两个协议。CEECR 与 LEACH-MOBILE 在网络实现上采用单跳路由方式, CH 节点距离基站平均距离较远, 采用单跳路由加剧了 CH 上报数据的能耗。CGMR 协议采用多跳路由方式并以建立远端 CH 到近端 CH 间最适路由的方式, 使大范围的网路中边缘区域 CH 可以以中继节点合并转发方式传递消息, 降低能耗; 同时采用了合作博弈作为路由分析工具使路由选择兼顾节点间距离、中继节点能量、移动情况等, 使建立的 CH 数据上报路由更适合全链路节点能耗的降低。

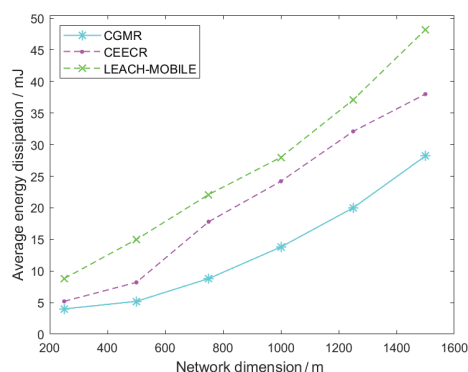


图 5 场景一中节点 AED 对比图

从图6中可以看出,随着最大通信距离限制的扩大,消息传递能耗加剧明显,尤其在750 m×750 m的网络部署大小以上的能耗加速增加。但本文提出的CGMR协议在更大网络范围的能耗上升幅度依旧小于其他协议的能耗增加速度,可以证明CGMR协议更能在广范围MWSN中降低网络能耗。

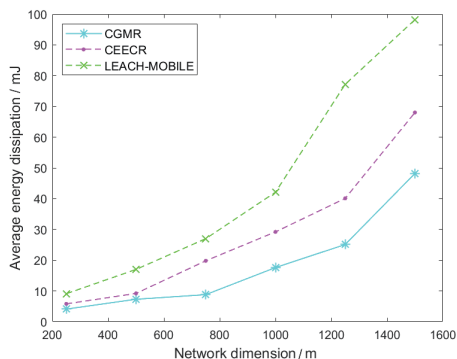


图6 场景二中节点AED对比图

比较三种协议的节点存活率 (node survival rate, NSR) 随时间即轮次变化的情况。从图7中可以看出,CGMR协议中节点存活率下降的时间明显晚于其他两个协议;同时发现CGMR协议的曲线在NSR快速下降后更近似垂直,大多数节点大约在相近的轮次中即150~200轮次间死亡。

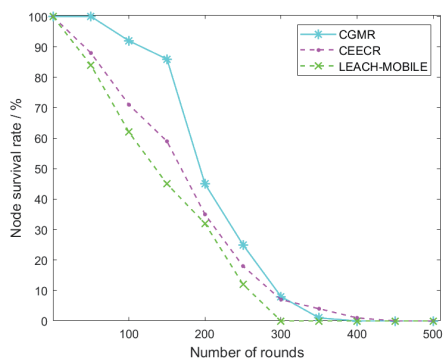


图7 节点存活率随实验轮次变化图

CGMR协议与CEECR协议节点存活情况好于LEACH-MOBILE协议,由于前两者采用集中式分簇即非均匀分簇的模式,在广范围节点部署的MWSN场景下可以更有效平衡CH节点能量,同时本文所提的CGMR协议通过CH多跳路由的方式避免了CH能量快速耗尽,得以延后节点死亡最早出现时间。在节点能量管理机制方面,LEACH-MOBILE采用传统的网格化形式分簇与随机选择CH的方式在广范围场景下较难平衡CH节点能耗,则曲线下降低速率均衡即节点以相近速率死亡,难以达到较优的能量平衡效果;CGMR协议采用合作博弈方式协调CH节点间的转发通信路由,降低了单一节点的通信能耗,因此在前100轮次可以保持90%以上节点存活率;同时由于CGMR协议平衡了整体网络能耗,网络中各节点能耗相近,则当网络有

节点死亡时其他节点也会快速死亡,从图7中可以看出在150~300轮次间节点快速死亡。因此在广范围节点部署的网络环境下,CGMR协议可以更好地进行能量管理,平衡整体网络能耗。

3 结语

相较于传统的短距离通信网络,广范围节点部署的MWSN面临着如能耗加剧、信号衰减等诸多挑战,对于设计出适用于该场景的有效数据传输和路由协议的需求日益迫切。本文提出的基于合作博弈的多跳路由协议(CGMR协议),采用邻域搜索算法构建集中式网络分簇,并以联盟合作博弈的方式综合分析节点所处位置、剩余能量、移动速率等要素并计算得到簇头节点间的多跳路由,构建出能均衡网络能耗的多跳路由网络。最后,在通过与CEECR、LEACH-MOBILE协议的比较中证明了,CGMR协议可以在不同网络规模等场景下,实现网络能耗的降低以及数据传输效率的提高。

参考文献:

- [1] 陈昆仪,高宏.无线传感器网络中数据收集算法研究综述[J].智能计算机与应用,2023,13(1):1-4.
- [2] TEMENE N, SERGIOU C, GEORGIOU C, et al. A survey on mobility in wireless sensor networks[J]. Ad hoc networks, 2022, 125: 102726.
- [3] SUMATHI J, LEELA VELUSAMY R. A review on distributed cluster based routing approaches in mobile wireless sensor networks[J]. Journal of ambient intelligence and humanized computing, 2021, 12: 835-849.
- [4] KANDRIS D, NAKAS C, VOMVAS D, et al. Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey[J]. Applied system innovation, 2020, 3(1): 14.
- [5] 陈琪,陈宏滨.无线传感器网络中移动节点辅助的数据采集效率优化研究[J].计算机应用研究,2020,37(11):3467-3471.
- [6] 姚玉坤,李小勇,徐栋梁,等.基于加权分簇的移动无线传感器网络拓扑维护算法[J].微电子学与计算机,2018,35(8): 55-59.
- [7] ZHANG J X, YAN R Q. Centralized energy-efficient clustering routing protocol for mobile nodes in wireless sensor networks[J]. IEEE communications letters, 2019, 23(7): 1215-1218.
- [8] KIM D S, CHUNG Y J. Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network[C]//First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06). Piscataway:IEEE, 2006: 622-626.

基于区间二型模糊的手写文字识别不确定性研究

尚建华¹ 杨盛毅^{2*} 杨 雯¹ 吴 亮¹
SHANG Jianhua YANG Shengyi YANG Wen WU Liang

摘 要

随着人工智能技术的不断发展, 手写文字的检测与识别技术在各类实际场景中发挥着不可或缺的关键作用。传统的文本识别系统依赖固定的置信度阈值评判识别结果的可靠性, 但在处理模糊、不规范、相似的手写文字时存在识别错误的问题, 根本原因是无法精准量化预测结果的不确定性。针对这一问题, 文章提出了融合区间二型模糊系统 (IT2FS) 的手写文字不确定性的评估的校正框架。该框架基于 PaddleOCR 获取初始的识别结果和置信度。将置信度作为 IT2FS 的输入进行模糊推理, 量化每个识别结果的不确定性, 并构建人机协同校正机制, 引导用户优先处理不确定性较高的文字区域。实验表明, 该框架能有效识别 OCR 引擎原始结果中的潜在错误 (即便在总体置信度较高时), 并通过有针对性的人工校正干预, 将输入手写文字图像的平均准确率从 68.7% 提升至 90%, 能有效减少传统的识别结果的复核时间。

关键词

手写文字识别; 区间二型模糊系统; 不确定性量化; 人工校正

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.01.008

0 引言

在数字时代快速发展背景下, 文本检测与识别技术作为连接物理世界与数字信息的关键桥梁, 已成为计算机视觉和模式识别领域的重要研究方向。该技术旨在从自然场景图像

或视频中精准定位文字区域并转换为可编辑文本, 不仅为后续处理提供基础, 更在自动驾驶、智能文档处理、工业自动化和多模态人机交互等实际场景中发挥出不可替代的作用。与通用目标检测任务不同, 文本检测面临独特挑战: 自然场景中的文本呈现出极大多样性, 包括字体、颜色、尺度、长宽比和语言的多变; 文本朝向的任意性 (水平、倾斜、弯曲); 以及复杂背景、光照变化、遮挡和模糊等因素的干扰。而手写文字识别更具特殊性, 需应对书写风格的多样性、字符形态变化和背景复杂性等挑战^[1]。

1. 贵州民族大学数据科学与信息工程学院 贵州贵阳 550000
 2. 贵州民族大学物理与机电工程学院 贵州贵阳 550000
- [基金项目] 贵州省数据科学与计算智能科技创新人才团队项目 (黔科合平台人才 - CXTD [2025] 038)

- [9] CAI L R, LUO L, LI Z J, et al. Game-based dynamic clustering routing strategy for mobile wireless sensor networks[J]. IEEE internet of things journal, 2024, 11(5): 26481-26491.
- [10] 李建忠, 李慧超, 高生虎. 基于无线传感器网络的远程监测与控制系统设计与实现 [J]. 集成电路应用, 2024, 41(2): 280-281.
- [11] 陈小健, 宋承继. 基于能耗优化算法的移动无线传感器网络问题研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2019(1): 123-126.
- [12] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE transactions on wireless communications, 2002, 1(4): 660-670.
- [13] SABET M, NAJI H R. A decentralized energy efficient hierarchical cluster-based routing algorithm for wireless sensor

- networks[J]. AEU-international journal of electronics and communications, 2015, 69(5): 790-799.
- [14] 张丹, 刘雅喆, 董雷刚, 等. 无线传感器网络定位算法在环境监测中的应用研究 [J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(2): 253-255.
- [15] 梁修荣. 基于同态加密的无线传感器网络数据安全存储方法 [J]. 自动化与仪器仪表, 2023(12): 76-80.
- [16] KHASTEH S H, ROKHSATI H. On transmission range of sensors in sparse wireless sensor networks[J]. Results in engineering, 2023, 18: 101108.

【作者简介】

罗仑 (1994—), 男, 广东汕头人, 硕士, 研究方向: 网络与信息安全、计算机应用、大数据应用。

(收稿日期: 2025-05-27 修回日期: 2025-12-29)