

氏 名 NGUYEN Phi Le

学位(専攻分野) 博士
(情報学)

学位記番号 総研大甲第 2080 号

学位授与の日付 平成 31年 3 月 22日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Load Balanced and Constant Stretch Hole Bypassing
Protocol for Wireless Sensor Networks

論文審査委員 主 査 教授 計 宇生
准教授 鯉渕 道紘
准教授 福田 健介
准教授 金子 めぐみ
准教授 阿部 俊二
准教授 鄭 顕志 早稲田大学理工学術院

(Form 3)

Summary of Doctoral Thesis

Name in full: NGUYEN Phi Le

Title: Load Balanced and Constant Stretch Hole Bypassing Protocol for Wireless Sensor Networks

Recent years have witnessed the emergence of wireless sensor networks (WSNs) which consist of tiny sensor nodes deployed over a region of interest to monitor and control the physical environment. Wireless sensor networks have been widely used in various domains such as military target tracking and surveillance, natural disaster relief, agricultural and environmental monitoring, biomedical health monitoring, etc. In this dissertation, we focus on large-scale WSNs which are based on the cooperation of a large number of sensor nodes. Typically, large-scale WSNs are used in monitoring applications such as agricultural monitoring, climate monitoring, forest monitoring, weather monitoring, etc.

Due to the short-range communication nature of sensor nodes, data transfer in WSNs is usually performed in the multi-hop communication paradigm. Hence, routing becomes one of the most important issues which has received intensive research attention. As sensor nodes are equipped with only limited and non-rechargeable batteries, conserving energy consumption is an important factor in designing routing protocol. Energy conservation can be achieved by shortening the routing path and reducing the overhead caused by control packets. In many applications, the network can't achieve its objective if all the nodes can't sense or report the sensed data, thus the death of even only one node may cause the network to operate un-functionally. Accordingly, balancing traffic over the network to extend the network lifetime is another important designing factor of routing protocol in WSNs.

Geographic routing has been widely used in wireless sensor networks because of its simplicity and efficiency resulted from its local and stateless nature. However, when subjected to routing holes (i.e., regions without sensor nodes that have communication capability), geographic routing suffers from the so-called local minimum phenomenon, where packets are stopped at the hole boundaries. The traditional scheme (named as perimeter routing) is forwarding packets along the hole perimeters. However, this scheme satisfies neither of the requirements described above. Specifically, perimeter routing suffers from two serious problems: routing path enlargement and data concentration around the hole boundaries. Recently, several approaches have been proposed to address these two problems, wherein a common idea is to form a forbidden area around each hole from which packets are kept to stay away. Several proposals attempt to use simple forbidden areas which have certain selected shapes such as a circle,

an ellipse, a hexagon, a quadrilateral, etc. Although the simplicity of these forbidden areas can help to reduce the control overhead, a significant enlargement on the routing path may occur due to the possibly significant difference between the forbidden area and the hole. To deal with the routing path enlargement problem, a recent proposal describes the forbidden area as the exact polygon whose vertices are the nodes on the hole boundary. However, this approach may incur with a significant control overhead since the information needed to represent the forbidden area may be very large when holes become complicated. Moreover, due to the static nature of the forbidden areas and routing paths, all of the existing protocols cannot solve the load imbalance problem thoroughly.

In this dissertation, we propose a novel protocol for bypassing multiple holes in wireless sensor networks which can balance the traffic over the network while ensuring the constant stretch property of routing paths. The key ideas behind our approach are to use elastic forbidden areas and dynamic routing paths. Specifically, to deal with the routing path enlargement problem we define the forbidden area of each hole as an equiangular polygon circumscribing the hole whose number of the vertices is determined on the basis of the required stretch upper bound. Moreover, to improve the load balance, we propose to use dynamic routing paths that vary for every packet, even for the packets of the same source-destination pair. The length of every routing path is controlled to guarantee the stretch upper bound. The theoretical analysis proves that the routing path stretch of the proposed protocol can be controlled to be as small as $1 + \varepsilon$ (for any predefined $\varepsilon > 0$). The extensive experimental results show that our protocol strongly outperforms state-of-the-art protocols in term of load balancing.

The main contributions of the dissertation can be summarized as follows.

1. We analyze the geometrical characteristics of the forbidden area theoretically and figure out the relationship between the forbidden area and the routing path stretch. Based on the analysis results, we then propose an algorithm to construct the forbidden area which can guarantee the upper bound of routing paths. Moreover, the information needed to represent the forbidden area is a constant which does not depend on the hole complexity.
2. Based on the proposed forbidden area, we propose a load balanced hole bypassing routing protocol (named BSMH) whose stretch is upper bounded by a predefined threshold $1 + \varepsilon$, where ε is an arbitrary positive number.
3. We perform a theoretical analysis of the computational complexity of BSMH as well as the impact of parameter ε on the performance of BSMH.
4. We prove the constant stretch property of BSMH theoretically.
5. Finally, we conduct extensive experiments to evaluate the performance of BSMH and compare it with the state-of-the-art benchmarks.

To the best of our knowledge, BSMH is the first hole bypassing routing protocol addressing at the same time the three important designing factors described above, i.e., minimizing the routing path length, minimizing the control overhead and maximizing the load balance. Moreover, through both the theoretical analysis and practical experiments, the superiority of BSMH has been proved.

博士論文審査結果

氏名 NGUYEN Phi Le

論文題目 Load Balanced and Constant Stretch Hole Bypassing Protocol for Wireless Sensor Networks

本論文は、大規模無線センサネットワークにおいて、障害物や機器の障害などによってできるルーティング不可能となるホールが存在する場合に、自律的にホールを検出し、情報伝達の経路を決めるルーティングアルゴリズムに関して行った出願者の研究内容をまとめたものである。エネルギーと計算資源が限られているセンサノードから構成される大規模無線センサネットワークでは、ネットワーク全体が正常に動作する時間、すなわち、ネットワーク寿命をできるだけ長くすることを考慮してデータの転送を行うことが必要である。一方、ネットワークにホールが存在する場合、ホールの迂回によってホール周囲に負荷が集中し、局所的なエネルギーの消耗が起こるため、ネットワーク寿命が短くなる。また、ホールの形状によっては迂回経路が見つからないような問題が生じる。これらの問題を解決できるルーティングアルゴリズムを見出すことが本研究の目的である。

論文は6つの章から構成される。第1章では研究の背景と目的、第2章では無線センサネットワークのルーティングプロトコル設計のための要求条件とホールを有する場合のルーティングプロトコルに関する既存研究について述べている。

続いて、第3章では、本論文で提案する、ホールを有する無線センサネットワークにおける負荷のバランスと経路の伸長を考慮したルーティングプロトコルの詳細について述べている。提案プロトコルでは、まずネットワークにおけるルーティングホールの存在を検出し、通過禁止区域を定義する。そして、検出されたホールの情報を局所的に、ホールを覆う通過禁止区域の情報をネットワーク内に散布し、それらを利用してデータの転送を行う。研究では、通過禁止区域を等角多角形とすることで、ネットワーク内に散布する制御情報の量を抑えながら、ホールの迂回によって生じる経路の伸長が決められた上限内で可能になることを理論的に証明した。また、可変の通過禁止区域を設定して経路をダイナミックに選択することによって、ネットワークにおける負荷のバランスに考慮したルーティングアルゴリズムの設計を行った。さらに、ホールの形状により発信元と送信先が通過禁止区域の多角形内にある場合や、複数のホールが存在する場合にも対応した。

第4章では、提案アルゴリズムの理論的複雑度を解析し、経路の伸長と負荷のバランスの2つの指標を制御するパラメータ ϵ の大きさがそれぞれの指標に与える影響について理論解析により示した。さらに、第5章では、提案システムの各種性能をシミュレーションによる数値結果を示した。シミュレーションでは、アマゾン川近くの実際の地形を利用して大規模センサネットワークを構成し、経路の伸長、転送遅延、制御オーバーヘッド、エネルギー消費、負荷のバランス、およびネットワーク寿命について評価し、提案アルゴリズムが既存研究よりも、パラメータ ϵ の調節によって優れた特性が得られることを示した。

最後に、第6章では結論と研究結果の考察についてまとめ、今後の研究課題と展望を提示した。

なお、研究成果として、出願者は主著で査読付きジャーナル論文1篇、査読付き国際会議論文4篇その他の発表を行っており、国際会議の優秀学生論文賞も受賞している。

以上を要するに、本論文はIoT時代ですますます応用されていく無線センサネットワークのルーティングに関する課題として、ホールを有する場合の負荷のバランスと経路の伸長を考慮したアルゴリズムとプロトコルを提案し、その有効性を示したものである。その学術レベルと実用的な意義が十分に高いと認められる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。