

学位論文の要旨

氏名

Yogi Anggun Saloko Yudo

学位論文題目

無線センサネットワークの稼働時間延長のためのモバイルリレーに関する研究

本論文は、無線センサネットワーク（WSN: Wireless Sensor Network）の稼働時間延長のために、移動型ノードを、観測ノードからデータ集積ノードまでのセンシングデータの中継に活用するモバイルリレーの改善法について検討したものである。モバイルリレーでは、中継ノードの列が初期ルートとして与えられると、ノードは移動と通信のトータルの消費電力が最小となるよう移動しデータの中継を行うことで、バッテリーで稼働するノードの稼働時間の延長を可能とする。達成可能な省電力化は初期ルートに依存し、最適な初期ルートの決定には、ネットワーク全体の大域的な情報が必要となるため、効果的な初期ルートの決定法が一つ課題となっている。また、これまでに提案されている手法では、一般に偏りのあるバッテリー残量を考慮していないため、必ずしも稼働時間が最大とならない問題がある。これに対し、本論文では、初期ルートの構築法において、稼働時間延長のため、バッテリー残量を考慮した手法、および、複数のソースがある場合にノードの負荷の集中を低減する手法を提案する。そして更に、大規模ネットワークへの適用を可能とするために、初期ルートの分散アルゴリズムについて検討し、ルート構築のための通信量を削減しつつ得られる初期ルートの質をほとんど犠牲にしない手法を提案する。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章は、序論であり、WSNの応用に関する社会的背景、モバイルリレーを含む移動型ノードの活用についての関連研究、および、モバイルリレーにおける課題を示し、本研究の目的と概要について述べる。

第2章は、移動型ノードを有するWSNのモデル、モバイルリレーの枠組み、移動型ノードの位置決定アルゴリズム、初期ルート構築アルゴリズムの従来法について述べる。

第3章は、観測ノードが単一の場合について、ネットワーク稼働時間の最大化を目標としたバッテリー残量を考慮した初期ルート構築アルゴリズムについて述べる。本章では、分散実行が容易な貪欲法に基づいたアルゴリズム、および、与えられた評価関数について最適なルートを求められるダイクストラ法に基づいたアルゴリズムの2種類を提案している。数値実験では、バッテリー残量を考慮していない従来法、バッテリー残量を考慮した貪欲法に基づく手法（BAIR: Battery-Aware Initial Route construction）、および、バッテリー残量を考慮したダイクストラ法に基づく手法（BAIR-D: Battery-Aware Initial Route construction based on Dijkstra' algorithm）を、ネットワーク稼働時間および初期構築の成功率について評価している。BAIR および BAIR-Dは、従来法に比べ、稼働時間を改善できることを示

す。さらに、BAIR-Dでは劇的な稼働時間の改善が可能であるとともに初期構築の成功率は100%であることを示す。

第4章は、観測ノードが複数の場合について、ネットワークの稼働時間を改善する手法について述べる。複数の観測ノードがある場合、初期ルート構築を観測ノードごとに独立に行うと、複数の初期ルートが重複する。重複するパス上の中継ノードは消費電力が大きくなり、これはネットワークの稼働時間短縮の要因となる。このことから、本章では、パスの重複を可能な限り避ける初期ルート構築アルゴリズム (BMRC-POA: Battery-aware Multiple Route Construction with Path-Overlap Avoidance) を提案する。数値実験では、複数の観測ノードの初期ルート構築の順番について効果的な順番を示すとともに、BMRC-POAがパスの重複を考慮しないBAIR-Dと比べ最大で約25%の稼働時間の改善が可能であることを示す。

第5章は、初期ルート構築の分散アルゴリズムについて述べる。大規模なWSNにおいては、いかに初期ルート構築アルゴリズムを実装するかが問題となる。最適な初期ルート構築を行うためには、ネットワーク全体の大域的な情報が必要であり、その実装においてはルート構築のために多量の通信が必要となる。本章では、まず初めに、ルート構築で情報が必要となるノードの範囲を縮小するために、ダイクストラ法の代わりにA*アルゴリズムを用いた手法 (BAIR-A*: Battery-Aware Initial Route construction based on A* algorithm) を提案する。BAIR-A*においては、A*アルゴリズムにおいて必要となるコストを近似的に見積もるヒューリスティック関数として、1ホップ当たりの平均の通信距離および平均のバッテリー残量に基づいた関数を用いる。そして更に、本章では、A*アルゴリズムに基づく初期ルート構築法の分散アルゴリズムを示す。数値実験では、BAIR-A*はBAIR-Dと同じ初期ルートの構築が可能であり、初期構築に必要な通信量も大幅に削減可能であることを示す。

第6章は、WSNの稼働時間延長のために本論文で考案された手法の有用性および今後の課題について述べ、本論文を総括する。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Improvement of Mobile Relay for Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Network

Name: Yogi Anggun Saloko Yudo

Energy is one of the most crucial issues in WSN, because sensor nodes are usually small in size and powered by limited power batteries. In recent years, it has been extensively studied to utilize mobile nodes, which are sensor nodes with mobility, in order to save the energy consumption on WSN. Mobile relay is one of these approaches. In mobile relay, given the relaying sequence of mobile nodes as an initial route, the mobile relay algorithm determines the optimal positions of the relaying nodes in terms of the total energy consumption of wireless transmission and locomotion. The mobile relay framework is very attractive because mobile relay can always reduce the energy consumption on WSN compared with conventional WSNs and the mobile nodes enable observation in a wide area or a dangerous area that cannot be directly accessed by humans.

For mobile relay, it has been shown that the achievable energy efficiency greatly depends on the used initial route. Therefore, the past works have investigated effective topologies for initial route and proposed an optimal algorithm in terms of total energy consumption. However, the following issues are still open questions and they are key issues for further improving the performance and the feasibility of mobile relay.

- 1) What is the initial route for maximizing the network lifetime?
- 2) Can an optimal initial route construction algorithm be implemented as a distributed algorithm?

Concerning the issue 1), in order to maximize the network lifetime, nodes battery levels should be considered in the route construction. When the battery levels are not uniform for all nodes, selecting a node with low battery level will shorten the network lifetime. In the past works, this issue has not been considered.

Concerning the issue 2), it is desirable that the initial route is optimal. On the other hand, it is desirable that the initial route construction algorithm is implemented as a distributed algorithm, because the implementation of a centralized algorithm is difficult for a large scale network, which requires to collect the information of all the nodes on the network. However, it is hard to be successful at both optimality and distributed implementation. It has been shown that the implementation of an optimal algorithm sacrifices its optimality.

In this dissertation, in order to present solutions for issues 1) and 2), effective initial route construction algorithms will be investigated. Concerning the issue 1), in order to maximize the network lifetime of WSN, all the presented algorithms take into account nodes' battery levels. First, initial route construction methods based on greedy algorithms are presented. However, any greedy algorithm cannot always achieve an optimal route. Second, to overcome the drawback of greedy approach, an initial route construction method based on Dijkstra's algorithm is presented. The method can construct the optimal path in terms of a given cost function. However, when applying it to a case of multiple sources, the constructed paths are necessarily overlapped with a high probability. This situation increases the energy consumption of the nodes on the overlapped paths. Third, in order to overcome this problem, an initial route construction algorithm with path-overlap avoidance

is presented.

Concerning the issue 2), a distributed algorithm of initial route construction, which can achieve an optimal route for most cases, is presented. For distributed algorithms, it is important to use less global information on the network. In order to achieve it, A-Star algorithm is introduced and an effective heuristic cost function, which is used for estimating the actual cost, is proposed for initial route construction.

This dissertation is organized as follows:

Chapter 1 describes the background of WSN, its applications, and open problems of mobile relay. Then, the chapter describes the purpose and the outline of this research.

Chapter 2 describes the mobile WSN model, which consists of movable nodes, the mobile relay framework, algorithms for determining the positions of relaying nodes, and a conventional initial route construction algorithm, as the preliminary of this dissertation.

Chapter 3 describes initial route construction methods for the case of single source node. In order to prolong the network lifetime of WSN, all the proposed methods take into account nodes' battery levels of the nodes. In this chapter, two types of initial route construction methods are presented. The first type, BAIR (Battery-Aware Initial Route construction), is based on a greedy approach, which is suitable for distributed implementation. The second type is BAIR-D (Battery-Aware Initial Route construction based on Dijkstra's Algorithm), which can always find an optimal route in terms of a given cost function. The numerical simulation results evaluate some conventional battery-unaware methods, BAIR and BAIR-D in terms of the network lifetime and the successful rate of route construction. The results show that BAIR and BAIR-D outperform the conventional methods in terms of the network lifetime. In particular, BAIR-D improves dramatically the lifetime of the network and achieves a 100% successful rate in route construction.

Chapter 4 describes an effective initial route construction method for the case of multiple sources. In a case of multiple sources, if initial route construction is performed independently for each source, then the constructed paths are necessarily overlapped. This increases the energy consumption of the nodes on the overlapped paths, which will dramatically shorten the network lifetime. As a solution to this, this chapter presents BMRC-POA (Battery-aware Multiple Route Construction with Path-Overlap Avoidance), which avoids the path overlap whenever possible. The numerical simulations show the effective routing order of the multiple sources and demonstrate that BMRC-POA achieves approximately 25% improvement of the network lifetime against BAIRD.

Chapter 5 describes a distributed algorithm of initial route construction. Obtaining an optimal initial route requires the global information on the entire network. This, however, involves a large number of communications in initial route construction. In this chapter, at first, in order to reduce the number of communications required for initial route construction, BAIR-A* (Battery-Aware Initial Route construction based on A-Star algorithm) is presented. The proposed heuristic function used in BAIR-A* effectively estimates the actual cost by using the expectation of the communication distance per-hop and the remaining battery levels. Further, this chapter presents a distributed algorithm of BAIR-A*. The numerical simulations show that BAIR-A* can construct the same initial routes as BAIR-D for most cases and BAIR-A* can significantly reduce the number of communications required for initial route construction.

Chapter 6 is the conclusion of this dissertation. The usefulness of the proposed methods and future challenges related to this research are described.