

トリアージネットワークにおけるロバストな経路探索手法

田村 寛樹^{1,a)} 小林 ひかる¹ 戸口 裕人¹ 重野 寛^{2,3}

受付日 2011年3月30日, 採録日 2011年10月3日

概要: 災害時に、傷病者の治療優先度を決定し、人命を救助するトリアージと呼ばれる救急救命方式が導入されてきている。ここで使用されるタグを電子センサにし、災害現場でセンサネットワークを構築することで傷病者の病状変化を監視・収集するトリアージネットワークの研究が活発に行われている。トリアージネットワークではノードの参加・離脱が頻繁に発生するため、経路切断の可能性が低いロバストな経路を構築する必要がある。また、各ノードが自身に要求される参加から離脱までのライフタイムを達成することと、治療優先度が高い傷病者データのデータ到着率を向上させることが必要である。本論文では、各ノードの離脱時刻と治療優先度を考慮し、各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新を利用した経路探索手法 R2S (Robust Route Search in Triage Network) を提案する。計算機を用いたシミュレーションにより、本提案の有効性を示す。

キーワード: トリアージ, センサネットワーク, ロバスト経路探索, マルチシンク

Robust Route Search in Triage Network

HIROKI TAMURA^{1,a)} HIKARU KOBAYASHI¹ YUTO TOGUCHI¹ HIROSHI SHIGENO^{2,3}

Received: March 30, 2011, Accepted: October 3, 2011

Abstract: An emergency lifesaving system called “Triage” to decide priority of cure and save lives in disasters has been introduced. Researches of sensor networks collecting patients’ data with computerized triage tags, called Triage network, are developed. In Triage network, it is necessary to discover robust routes where route losses don’t occur easily because participation and the secession of nodes occur frequently. Moreover, it is necessary to achieve lifetime which each node is demanded and improve arrival rate of patients’ data with high priority of cure. In this paper, we propose R2S (Robust Route Search in Triage Network), which is a routing method to consider each node’s secession time and priority of cure, and use both route search by each node and route update by a sink. We evaluate our proposal using computer simulations and show its effectiveness.

Keywords: triage, sensor network, robust route search, multi-sink

1. はじめに

列車事故等の大事故や、ハリケーン・台風等の災害に

よって多数の傷病者が発生した際に、傷病者の脈拍や自発呼吸の状況から治療優先度を決定し、できるだけ多数の人命を救助するトリアージと呼ばれる救急救命方式が導入されてきている。トリアージでは、傷病者を重症度に応じて4グループに分類し、それぞれのグループを赤、黄、緑、黒と色で区別している。トリアージは、国内ではJR福知山線列車事故 [1] の際に初めて適用され、多数の傷病者の救命に貢献した。現在は傷病者の色分けに紙製のトリアージタグが使用されているが、トリアージタグを電子化し、災害現場でセンサネットワークを構築することで、傷病者の病状変化を監視・収集するトリアージネットワークの研

¹ 慶應義塾大学大学院理工学研究科
Graduate School of Science and Technology, Keio University,
Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan

² 慶應義塾大学理工学部
Faculty of Science and Technology, Keio University,
Yokohama, Kanagawa 223–8522, Japan

³ 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST, Chiyoda,
Tokyo 102–0075, Japan

a) tamura@mos.ics.keio.ac.jp

究が活発に行われている [2], [3]. 本論文におけるトリアージネットワークは, 災害現場において, 傷病者データを収集するサーバであるシンクが複数存在する環境を想定している. そして, これらのシンクにより, 存在する全傷病者データを継続的に収集することを目的としている.

トリアージネットワークでは, 傷病者の搬入・搬出にともない, ノードの参加・離脱が頻繁に発生するため, トポロジが変化しやすい. 特に他ノードのデータを中継しているノードが離脱した場合, シンクへの経路の切断が発生する. そのため, 経路切断の可能性が低いロバストな経路を各ノードからシンクまで構築する必要がある. また, トリアージネットワークでは, 各ノードが自身に要求される参加から離脱までのライフタイムを達成することが必要である. さらに, 傷病者の中で治療の優先順位がつけられるため, 治療優先順位により傷病者から発せられるデータの収集優先度は異なる. 治療優先度が高い傷病者のデータほど収集優先度は高くなり, 治療優先度が低い傷病者の収集優先度は低くなる. よって, 治療優先度が高い傷病者データのシンクへの到着率を向上させる必要がある.

本論文では, トリアージネットワークにおいて各ノードの離脱時刻と治療優先度を考慮し, 各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新を利用した経路探索手法 R2S (Robust Route Search in Triage Network) を提案する. R2S では, 各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新により, 経路を維持する. ノードからシンクへの RREQ による経路探索だけでなく, シンクからのブロードキャストメッセージを利用した経路更新を行うことで, 定期的に最新の経路に更新可能であり, 同一ノードへの中継の偏りを回避することができる. また R2S では各ノードを, 離脱時刻を考慮して α , S, A, B, C の 5 つの動作クラスに分類する. ここで, クラス α は離脱時刻が確定しているノードが属するクラスである. また, クラス S, A, B, C は離脱未確定のノードが属するクラスである. これらのクラスに属するノードは, 自身に要求されるライフタイムを達成するように電力消費を制御する必要がある. クラス S は離脱が早いと予測されるノードが属し, クラス C は離脱が遅いと予測されるノードが属する. クラス α は離脱時刻が確定しており, 中継ノードとして使用すると経路切れの原因となるため, データの中継は行わない. これにより, 経路のロバスト性を向上させる. そして, クラス S は離脱が早く, 電力を積極的に使用できるため, 他ノードのデータを多く中継でき, クラス C は離脱が遅く, 電力を温存する必要があるため, 他ノードのデータ中継は少なくなるようなルーティングを行う. このように, 要求されるライフタイムが短いノードの電力を積極的に使用し, 要求されるライフタイムが長いノードをなるべく中継ノードとして使用しない経路を構築することによって, 全ノードが各自に要求されるライフタイムを達成する. さらに, 各ノードが送信

するデータの収集優先度を考慮して, 宛先シンク数を変化させることによって, 収集優先度の高いデータの到着率を他のデータと差別化する. 計算機を用いたシミュレーションにより, 提案手法が既存手法より, つねにロバストな経路を構築でき, 各ノードが要求されるライフタイムを達成できることを示す.

以下, 本論文では 2 章で背景であるトリアージネットワークを説明し, 3 章で関連研究について述べ, 4 章で提案手法について述べる. そして, 5 章でシミュレーションによる評価を行い, 最後に 6 章で結論を述べる.

2. トリアージネットワーク

トリアージネットワークは, 傷病者に取り付けた電子トリアージタグをノードとし, 自動的に脈拍や呼吸数等の傷病者データを収集するための, 災害現場で構築されるセンサネットワークである. 各傷病者の治療優先度は start 法 [4] に従って, 医療従事者により決定される. 電子トリアージタグは傷病者の病状を周期的にセンシングし, データ収集サーバであるシンクへ送信する. ここで, シンクは複数存在する可能性がある. このトリアージネットワークの目的は, 全傷病者の病状変化をシンクで継続的に収集・把握することである. 図 1 はトリアージネットワークのイメージである. トリアージにより医師等が傷病者に取り付けた電子トリアージタグをノードとしてセンサネットワークを構築する. この取り付けられた電子トリアージタグでセンシングした情報をもとに, 治療優先度は高い順に赤, 黄, 緑, 黒の 4 色に色分けする. 傷病者の病状変化を把握するために, 各ノードは周期的に自身のデータをシンクへ送信する. 自身の送信範囲内にシンクが存在しない場合, 他ノードの中継によりデータをシンクへ送信する.

2.1 特性

トリアージネットワークが一般的なセンサネットワークと大きく異なる特性として, 参加・離脱特性とデータ特性の 2 つがあげられる.

まず, 参加・離脱特性について述べる. トリアージネットワークでは, 傷病者に電子トリアージタグをつけることがネットワークへの参加を意味し, 傷病者が病院へ搬送されることがネットワークからの離脱を意味する. 一般的な

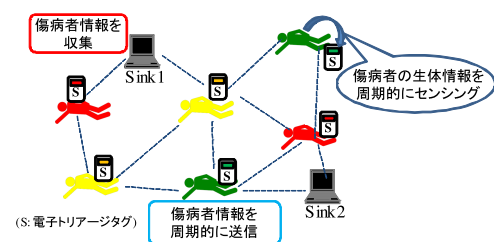


図 1 トリアージネットワーク
Fig. 1 Triage network.

センサネットワークでは、ノードはいっせいに散布されて同時に稼働し始めることが想定されるのに対し、トリアーゼネットワークでは、ノードの参加・離脱がネットワークの状況とは独立に発生することが大きな特徴である。

次にデータ特性について述べる。一般的なセンサネットワークでは、収集するデータは統計値が多いのに対し、トリアーゼネットワークでは、脈拍や呼吸数等の生体情報となる。このことから、データパケット1つの重要性が一般的なセンサネットワークよりも大きいという特性がある。さらに、トリアーゼネットワークでは、傷病者の治療優先度に応じて送信されるデータの収集優先度が異なるというのも特性の1つである。データの収集優先度とは、生体情報を医療従事者に提示する必要性の高さのことである。治療優先度が高い傷病者のデータほど、収集優先度は高くなる（赤データ > 黄データ > 緑データ > 黒データ）。

2.2 要求条件

トリアーゼネットワークには、大きく分けて3つの要件条件がある。

1つ目は、傷病者の周期的な測定データの収集である。データ収集における信頼性の要求は、人命救助の場であるため、データ到着率が100%であることが理想だが、分散型のデータ収集手法で100%の到着率を保証するのは非常に困難である。そこで、到着率の観点では、治療優先度の高い傷病者のデータを治療優先度の低い傷病者データよりも積極的に集め、さらに全体的な到着率をできるだけ向上させることが求められる。

2つ目は、各ノードの電力維持である。ネットワークへの参加から離脱まで、全ノードの電力切れをおこさないことが要求される。福岡市消防局によるトリアーゼ実験 [5] から、2時間が1つの目安とされているが、現場状況によって所要時間は異なる。また、ノードごとに参加・離脱時刻が異なるため、各ノードによって要求されるライフタイムは異なる。図2に治療の優先度に応じたノードに要求されるライフタイムの差を示す。優先度の高いノードの要求ライフタイムは短く、優先度の低いノードの要求されるライフタイムは長い。

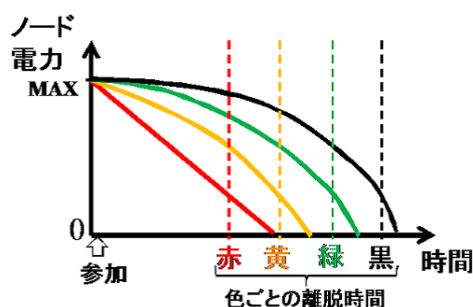


図2 各色で要求されるライフタイム
Fig. 2 Required lifetime for each color.

3つ目は、収集優先度の高いデータの到着率向上である。収集優先度が高いデータを、より確実に伝送し、医療従事者が傷病者の状態を監視しやすくする必要がある。

3. 関連研究

センサネットワークではライフタイムを延長させることは継続的にデータを収集するために重要であり、広く研究されている。ライフタイム延長を目的としたデータ収集手法の1つとして、マルチシンクによるデータ収集手法 [6], [7], [8] があげられる。マルチシンクによるデータ収集手法では、ネットワークに複数シンクを配置し、データ収集を複数シンクで分担することで、省電力を実現する。シンクが複数存在するため、ネットワーク全体のデータ中継量を減少させることができる。しかし、マルチシンクを用いた手法ではネットワーク全体の省電力を実現可能ではあるが、トリアーゼネットワークで個々のノード求められる異なる時間のライフタイムに対応できない。また、トリアーゼネットワークのような強制的に発生する離脱へ対応できない。トリアーゼネットワークは複数シンクを配置することが想定されるため、この2点を解決することで、トリアーゼネットワークに適したデータ収集が可能となる。

また、ライフタイム延長を目的としたデータ収集手法として、マルチシンクによる手法のほかに、クラスタリング、データ集約もあげられる。クラスタリングを用いた手法は、配置されたセンサ群の中でグループを構築し、その中からリーダーであるクラスタヘッドを決定する。このクラスタヘッドが代表してパケットを中継することにより、クラスタ内のノードの中継先を近くし、電力消費を抑える。LEACH (Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [9] はこの手法を代表する。しかし、トリアーゼネットワークへの適応には問題がある。これは、トリアーゼネットワークではノードの離脱が頻繁に発生するためである。クラスタ内のノードのデータ中継を行うクラスタヘッドが離脱すると、そのクラスタ内のノードは通信ができなくなるため適さない。データ集約を用いた手法では、送信するデータの統計量を中継するたび計算し、合計送信回数を抑制する。送信回数の抑制によって干渉や衝突を避けるといった効果が得られる。PCM (Probabilistic Compensation Model) [10] はこの手法を代表する。しかし、データ集約を用いる際、収集するデータの統計値に意味がある場合に有効であるのに対し、想定するトリアーゼネットワークでは各傷病者のデータが重要であるため適さない。よってマルチシンクを用いた手法に焦点を当てる。

マルチシンクを用いた代表的なデータ収集手法にNS (Nearest Sink) がある。NSは、hop数に基づいて最も近いシンクを判断し、そのシンクへのみデータを送信する手法であり、全ノードのデータ発生量が同一のときに適している。各ノードはシンクから周期的に送信されるデータ要

求メッセージを受信すると最少 hop 数で届くシンクへのみデータを送信する。NS はノードの平均ライフタイムを延長させることでネットワーク全体での省電力の達成を目指しており、各ノードに求められるライフタイムを考慮していない。そのため、ネットワークに長く残るノードの電力が切れる可能性がある一方で、早期にネットワークから離脱するノードの余剰電力が多くなる。よって、トリアージネットワークに要求される各ノードが自身に要求されるライフタイムを達成できない可能性がある。また、一般的なデータ収集手法には、経路障害が発生した際に経路を再構築する機能がある。トリアージネットワークでは、ノードの離脱により強制的に経路が切断される。ノードの離脱時刻が予測できるため、この経路切断は予測が可能である。しかし、既存のデータ収集手法では、予測できる経路切断も検知してから修復・再構築する。よって、このとき使用される電力は無駄な電力となる。

また、トリアージネットワークには、収集優先度が高いデータの高パケット到着率の維持が要求される。データの収集優先度を考慮した既存手法に MMSPEED [11] がある。SPEED はデッドラインまでの残り時間をベースに送信パケットの収集優先度を決定するプロトコルである。デッドラインベースのプロトコルは、デッドラインまでの時間が同じ場合、パケットの収集優先度が同じとなる。よって傷病者の治療優先度に応じてデータの収集優先度が異なるようなトリアージネットワークには適していない。

トリアージネットワークにおいてデータの収集優先度を考慮したデータ収集手法に、VPMR (Variable Path Multiplicit Routing) [12] がある。VPMR は、マルチパスを用いた手法であり、各色データの収集優先度に応じて、データ収集の差別化を図る手法である。VPMR では、各ノードの離脱時刻や離脱にともなう経路再構築の抑制を考慮していない。よって、本論文では主に、経路切断の可能性が低いロバストな経路を構築することに焦点を当てる。

4. R2S

本論文では、各ノードの離脱時刻と治療優先度を考慮し、各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新を利用した経路探索手法 R2S (Robust Route Search in Triage Network) を提案する。本手法では、経路切断の可能性が低いロバストな経路を各ノードからシンクまで構築すること、各ノードが自身に要求される参加から離脱までのライフタイムを達成すること、治療優先度が高い傷病者情報の到着率を向上させることの3つを目的とする。これにより、ネットワーク中の全傷病者のデータを継続的に収集するというトリアージネットワークの目的を達成する。

4.1 提案概要

提案手法では、ノードを動作クラスに分け、経路探索に

用いられる RREQ や経路更新に用いられるアップデートメッセージの中継動作を差別化することで、ロバストな経路を構築し、各ノードの離脱時刻を考慮して電力消費を制御する。

R2S は、経路構築や経路維持に関して既存のルーティング手法の1つである AODV [13] に準ずる動作をする。経路構築の際は RREQ, RREP と呼ばれる経路制御パケットを使用する。経路を探索する際、各ノードは RREQ を周辺ノードへブロードキャストする。RREQ を受け取ったノードは、自身が目的地でない場合、同様にその RREQ をブロードキャストする。目的地であるノードは RREQ が通ってきた経路に対し、RREP を返送する。この RREP を送信元ノードが受信することで経路が構築される。また、各ノードは経路表を保持しており、目的地までの経路の次ホップノードの情報を保持している。なお、本提案では目的地までの経路が複数ある場合は、複数の経路を経路表に保持するものとしている。以上のように、RREQ, RREP を使用し、経路表を保持するという点で、本提案は AODV に準ずる動作をする。

ノードはネットワークに参加し、まず RREQ をシンクに向け送信する。この RREQ を受信したノードは、自身の動作クラスに応じた動作でシンクへ中継する。ここで動作クラスとは、ノードの離脱時刻を考慮して分類する、メッセージ中継動作制御のためのクラスである。ノードは、RREQ に対してシンクが返信した RREP を受信すると、経路を構築する。この構築した経路を使用し、ノードは周期的に自身のデータをシンクへと送信する。また、シンクは周期的にアップデートメッセージをネットワーク内のノードへブロードキャストする。このメッセージを受信したノードは、経路・動作クラスを更新し、他ノードへのメッセージ中継を自身の動作クラスに応じて決定・実行する。

次に、動作クラスについて述べる。動作クラスは α , S, A, B, C の5つのクラスが存在する。クラス α は離脱が確定しているノードが属するクラスで、経路切れの直接的な原因となるノードであるため、メッセージの中継は行わない。クラス S, A, B, C は離脱未確定のノードが属するクラスで、自身に要求されるライフタイムを達成するような電力消費を行うべきノードが属するクラスである。クラス S, A, B, C の順に離脱が早いと予測されるノードが属する。よって、クラス S は電力を積極的に使用できるため、他ノードのデータを多く中継する。また、クラス C は電力を温存する必要があるため、他ノードのデータ中継は少ない。クラス S~C に所属するノード数の割合は一定とする。ネットワークへの参加時は、ノードは自身の治療優先度に応じて初期配属クラスを決定する。赤ノードがクラス S, 黄ノードがクラス A, 緑ノードがクラス B, 黒ノードがクラス C に初期配属される。また、実際の災害現場にトリアージネットワークを適用した際に、医療従事者が

ネットワークに参加している傷病者の離脱を決定することを、本提案ではクラス S からクラス α への変更とする。クラス S~C におけるクラス変更の際は、最初に治療優先度を考慮し、治療優先度の高い傷病者を優先的にクラス変更する。これは、実際の災害現場では治療優先度の高い傷病者から順に搬送されていくことに基づいている。また、同じ治療優先度のノードからいずれかのノードのクラス変更をする必要がある場合、電力残量が多いノードを優先的にクラス変更させる。これは、電力残量の多いノードを積極的に中継ノードと使用するためである。

治療優先度や動作クラスが変更したノードの動作について述べる。各ノードは、各シンクからのアップデートメッセージの受信でクラス変更を知り、アップデートメッセージがたどった経路の履歴から各シンクまでの経路を知ることができる。よって、治療優先度が赤に変更されたノードはこれらの経路を用い、すべてのシンクへ自身のデータを送信する。クラス S に変更されたノードは、治療優先度が赤でなければ 1 つのシンクへしかデータを送信せず、それまでと同様にクラス S を中継ノードとして積極的に使用する経路を選択する。クラス A, B に変更された場合も同様である。このとき、シンクまでの経路のうち、クラス S のノードを中継とする経路がない場合、離脱が早いと予測されるクラス A, B の順にノードを選択する。さらに、クラス α のノードしか経路がない場合は、そのノードを中継ノードとして選択する。

図 3 はクラス更新前の経路とクラス更新後の経路の例を示している。クラス更新前は、クラス α のノードは他ノードの経路に含まれない。クラス S, A は電力を積極的に使用してよいため、他ノードの経路に多く含まれる。シンクは全ノードを優先度順にリストとして保持している。クラス α のノードを除いた全ノードで、一定の割合になるようにクラスは決定される。ノードが離脱していき、新たに離脱確定ノードが決定し、クラスの所属ノード数割合に変化がおきる。動作クラスの所属は、ネットワーク全体のクラスの所属ノード数割合が一定になるように決定される。

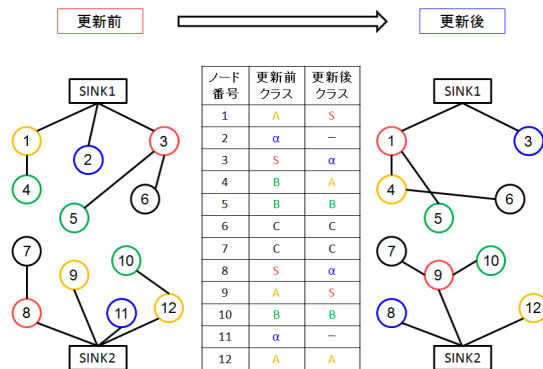


図 3 経路構築の例
Fig. 3 Route search.

S だったノードが離脱確定ノード α へと変化したことで、A だったノードが S へ、B だったノードが A へと変化する。全体の所属ノード数割合が一定に保たれるようになる。以上のように、クラス更新のための情報をブロードキャストすることで、ノードはクラスを更新し、新たな経路を構築する。

4.2 各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新

本提案では、各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新により、経路を維持する。ノードからシンクへの RREQ による経路探索だけでなく、シンクからのブロードキャストメッセージを利用した経路更新により、定期的な経路の更新が可能であり、中継ノードの偏りを回避できる。

ノードからシンクへの経路探索は、ノードのネットワーク参加時と経路切断による経路修復時に行う。送信元ノードは RREQ をブロードキャストする。他ノードからの RREQ を受信したノードは、RREQ 中継動作を自身の動作クラスに応じて決定・実行する。シンクは最初に届いた RREQ の経路に対して RREP を返送する。送信元ノードは RREP を受信すると経路を構築する。先に受信した RREP を返送したシンクを送信対象シンクとする。

シンクによる経路更新は、シンクが定期的に配信するアップデートメッセージを利用する。各シンクはネットワーク内のノードに対し、アップデートメッセージを定期的にブロードキャストする。アップデートメッセージには離脱確定ノード情報とクラス更新情報が含まれている。ここで、各シンクは災害現場において救助活動を統括しているトリアージ本部とつながっており、このトリアージ本部がアップデートメッセージに含まれる離脱確定ノード情報とクラス更新情報を作成・更新する。そのため、各シンクは各ノードがどのクラスに所属しているかをすべて正確に把握しており、同じアップデートメッセージをブロードキャストする。また、シンク間はバケット送信を同期できるほどの厳密な同期はされていないが、定期的なブロードキャスト間隔に比べて十分に小さい誤差でゆるく同期されている。このアップデートメッセージを受信したノードは、自身の動作クラスに応じてそのメッセージ中継動作を決定・実行する。このとき同時に、アップデートメッセージがたどってきた経路の履歴に基づき、経路表の経路を追加・更新する。このようにして、シンクへの経路を追加・更新する。ここで、各ノードは複数のシンクからアップデートメッセージを受け取るため、どのシンクへデータを送信するかを決定する必要がある。まず、あるノードが新しいアップデートメッセージを受信した際、そのノードはアップデートメッセージを送信したシンクに対し、そのアップデートメッセージがたどってきた経路を通し、データを送信する。送信対象シンクはシンクまでのホップ数が少ない経路を選択する。そして、異なる複数のシンクから

同じアップデートメッセージを受信した際、ホップ数が少ない方のシンクへ自身のデータを送信する。また、ホップ数が同じ場合は、先に受信したアップデートメッセージの送信シンクをデータの送信対象シンクとして決定する。このようにして、送信対象シンクを決定する。

4.3 動作クラスに応じた RREQ とアップデートメッセージの中継動作

動作クラスに応じた RREQ とアップデートメッセージの中継動作について説明する。離脱が確定しているクラス α のノードは RREQ を受信すると、RREQ を中継しない。これにより、クラス α が中継ノードに含まれる経路の構築を防ぎ、ノード離脱による経路の切断を回避できる。個々のライフタイム達成に向けた電力消費が必要なノードの属するクラス S, A, B, C は、RREQ を受信すると、動作クラスに応じて異なる遅延を付加して RREQ を中継する。各クラスの付加遅延量は、以下の式により算出する。

$$Delay = rand() \times \left(maxdelay \times \frac{classRank}{n} \right) \quad (1)$$

rand() は 0~1 のランダム値、Delay は付加遅延量、maxdelay は最大遅延量、n は離脱未確定クラス数 (本論文においては、S, A, B, C の 4 つ)、classRank は離脱未確定クラスにつけた順位 (S=1, A=2, B=3, C=4) を表している。各クラスの最大遅延量を算出し、0 からクラスの最大遅延量までの間でランダムな値をとる。ランダム値をとるのは、クラス S や A ばかりに中継が偏り、電力切れが起きるのを防ぐためである。

4.4 最高優先度データ送信の差別化

本提案では、ノードの送信するデータの優先度に応じて送信対象シンク数を決定する。対象シンク数を差別化することで、高優先データの packets 到着率を他のデータと差別化する。ノードは自身の優先度に応じて送信するシンク数を決定する。赤ノードの送信するデータは優先度が最も高いため、存在する全シンクへデータ送信を行う。それ以外の色のノードのデータは経路構築時に決定した宛先シンクへのみ送信する。収集優先度の高いデータのみ複数経路に送信することで、他データと差別化し、高 packets 到着率を達成する。

5. 評価

提案手法 R2S の有効性を示すため、シミュレーションにより評価する。

5.1 シミュレーションモデル

表 1 にシミュレーションパラメータを示す。本シミュレーションでは、列車事故のようなある特定の範囲に数十人~百人規模の傷病者が発生し、その事故現場において構築するトリアージネットワークを想定している。これは 100m×100m のエリアに 50, 100 ノードが存在するモデルである。また、配置するシンクの数 は 2 台としており、どちらかにデータが到着すれば送信成功とする。本シミュレーションでは、クラス S から α への変更タイミングは実際のノード離脱の T 秒前とモデル化している。実際の災害現場にトリアージネットワークを適用した際に、医療従事者が傷病者の離脱を決定することを、本提案ではクラス S からクラス α への変更としているが、災害現場

表 1 シミュレーションパラメータ

Table 1 Simulation parameters.

	QualNet version 5.0 [14]
シミュレータ	QualNet version 5.0 [14]
シミュレーションエリア	100 m × 100 m
シミュレーション時間	3 時間
ノードの参加開始時間	0 秒
ノードの参加モデル	1 時間で全ノードが参加 (ポアソン分布)
ノードの離脱開始時間	2 時間後
ノードの離脱モデル	1 時間で全ノードが離脱 (ポアソン分布)
ノードのデータ生成間隔	10 秒
シンクのデータ生成間隔	180 秒
ノード初期電力	750 mAh
MAC 層	802.15.4
パケットサイズ	64 byte
無線データレート	250 Kbps
無線通信距離	30 m
最大ノード数	50, 100
ノード配置	ランダム
ノードの色割合	赤:黄:緑:黒 = 1:1:1:1
クラス α への変更タイミング	離脱時刻の 180 秒前 (T=180)
最大遅延量 (maxdelay)	0.05 秒

では離脱を決定されてから実際に離脱するまでの時間が不明である。そのため T は可変であるが、横浜市消防局 HP [15] における救急車平均到着時間 6 分を参考にし、救急車の到着が早い場合でも本提案の有意性を示せるよう、 $T = \frac{\text{救急車平均到着時間}}{2} = 180$ 秒と、一定にした。

評価項目は、経路再構築回数、動作クラスごとのパケット中継割合、離脱時におけるノードの電力残量、パケット到着率である。シミュレーション開始時刻から 1 時間で全ノードがネットワークに参加し、開始時刻から 2 時間後に離脱を開始し、1 時間で全ノードが離脱する。これを 1 回の試行とし、試行回数は 5 回として、評価値はその平均値とする。

5.2 経路再構築回数

図 4 に 50・100 ノードそれぞれの離脱開始後の経路再構築回数を示す。50・100 ノードともに、R2S は NS と比較して、経路再構築回数を抑制できていることが分かる。これは、離脱が確定したクラス α のノードを含まない経路を構築したため、離脱による経路切断を回避できているためである。この経路再構築回数の抑制はノードの電力消費抑制にも効果を与えようと考えられる。

5.3 動作クラスごとのパケット中継割合

図 5 に 50・100 ノードそれぞれの動作クラスごとのパケット中継割合を示す。ここで、動作クラスごとのパケッ

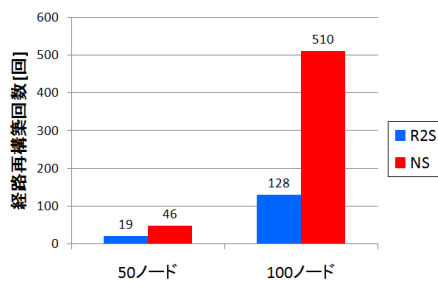


図 4 経路再構築回数
Fig. 4 The number of route re-search.

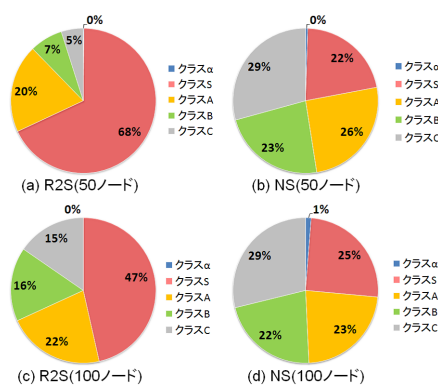


図 5 動作クラスごとのパケット中継割合
Fig. 5 Packet relay rate of each operation class.

ト中継割合は、全クラスのノードが中継したパケットの合計のうち、各クラスのノードが中継したパケットの数である。NS は動作クラスの中継割合が、ノード数が少ない α 以外のクラスでは 20% 台と一定であるのに対し、R2S は S, A, B, C の順に割合が大きくなっている。つまり、早期離脱が予測されているノードを積極的に中継とし、電力を利用できている。これは、R2S では動作クラスごとに最大遅延量を算出し、0 から最大遅延量の間でとったランダム値を遅延にすることによる効果である。動作クラス S に多く中継を担わせることで、早期離脱するノードの電力を積極的に使用し、ネットワークに長く残るノードの電力を温存できる。また、R2S の 50 ノードと 100 ノードを比較すると、100 ノードのほうがクラス S の中継割合が小さい。これは、ノードの平均離脱間隔が、最大ノード数/1 時間となっており、100 ノードの場合のほうが離脱間隔が短く、かつシンクからのアップデートメッセージの間隔が 50 と 100 ノードの場合で同じ 180 秒にしているため、経路更新が間に合わず、クラス S へ優先的に中継をさせることが難しくなっているためと考えられる。しかし、R2S の 100 ノードの場合でも、他クラスと比較したところ、クラス S は中継割合が大きい。

5.4 離脱時におけるノードの電力残量

図 6 にネットワーク離脱時のノード電力残量をノードの色別に示す。トリアージネットワークの要求項目の 1 つは、ノードの電力を離脱まで維持することである。100 ノードの場合の黒を見ると、NS は最小電力残量が 0 となっている。これは電力切れのノードが発生したことを示している。それに対し、R2S はノードの電力切れが起きていない

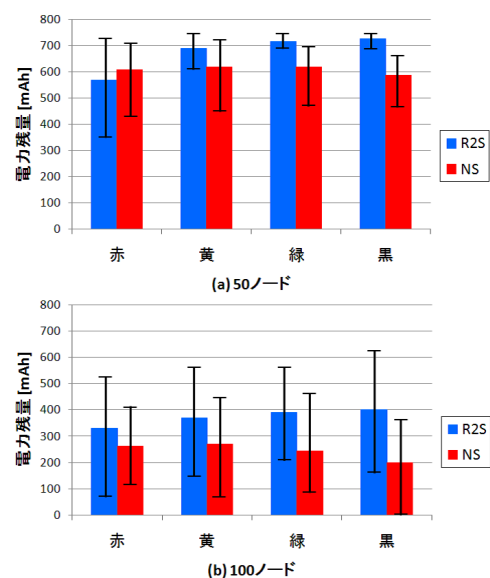


図 6 離脱時におけるノードの電力残量
Fig. 6 The electricity residual quantity of each node when seceding.

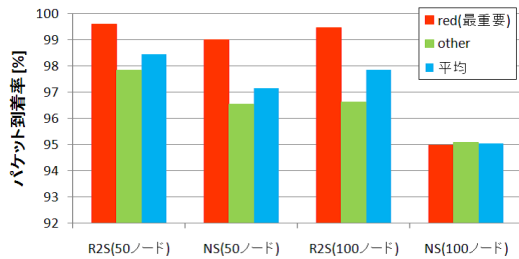


図 7 パケット到着率
Fig. 7 Packet arrival rate.

ことが確認できる。これにより、R2Sでは各ノードに要求されるライフタイムを達成できるといえる。また、R2SはNSと比較して、全体的に電力残量を多く残すことができていることが確認できる。これは、R2Sでは経路再構築回数を抑えることができ、パケットの送受信回数が減ったためであると考えられる。

5.5 パケット到着率

図 7 にパケット到着率を示す。ここでは、収集優先度の高い赤データ、その他のデータ、全データの平均を示す。赤ノードの送信したデータに着目すると、R2Sではつねに約 99%と高到着率を維持できていることが確認できる。これは、赤データの送信のみ複数シンクに送信することで、他データとの差別化できたためである。また、平均パケット到着率を見ると、R2SはNSよりも高いことが確認できる。これは、経路再構築回数を抑えられることにより、RREQのブロードキャストが減り、パケット衝突が減ったためであると考えられる。

5.6 考察

本節ではR2Sと同様のトリアーゼネットワークの想定をしているルーティング手法VPMRとの定性的な比較結果について考察する。まず、R2SとVPMRのそれぞれの提案をまとめたいのでこれらを定性的に比較し、経路再構築回数、電力消費量、トラフィック量、パケット到着率、End-to-end遅延について考察する。

R2SとVPMRのそれぞれの提案についてまとめる。R2Sは、離脱が確定しているノードを使用しないという特徴から経路再構築回数の抑制をしており、また離脱が早いと予測されるノードを中継として積極的に使用するという特徴から電力消費量の抑制をしている。そして、治療優先度の高い赤ノードのデータのみマルチパスでシンクへ送信することで、収集優先度の高いデータのパケット到着率を向上させている。一方VPMRは、各治療優先度を災害現場の状況に応じて3つのクラスに分類し、マルチパスとして使用する経路の本数を各クラスで変えている。これにより、全体的なデータ到着率を向上させるだけでなく、クラスごとのデータ到着率を差別化することができる。さらに、最短

経路にもデータを送信するといった特徴から、End-to-end遅延を低減させている。以上がR2SとVPMRのそれぞれの提案である。

次に、R2SとVPMRを定性的に比較し、考察する。R2SとVPMRを定性的に比較すると、R2SはVPMRよりも経路再構築回数、電力消費量、トラフィック量の点で優れていると考えられる。またR2Sは、遅延とパケット到着率の点においてVPMRより劣っているが、各傷病者の生体情報は30秒に1回程度確認できれば良いといわれており、それに対し遅延も十分小さく、パケット到着率も十分に高いため、トリアーゼネットワークでの実用性には問題ないと考えられる。以下では、各比較項目について詳しく考察する。

まず、経路再構築回数ではR2Sのほうが優れていると考えられる。R2Sでは経路再構築回数を減らし、ロバストな経路を構築することが提案の中心である。一方、VPMRは経路破損やリンク切れが起こった際でも部分的な経路修復を行いながら、確実にデータを収集することができるようマルチパスを用いている。よって、R2SとVPMRを比較した場合、経路再構築回数ではR2Sのほうが抑制することができる。次に、電力消費量ではR2Sのほうが優れていると考えられる。R2Sでは各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新を行っているため、データ送受信による電力消費量が多くなるように思えるが、経路再構築回数を大幅に削減しているため、経路制御パケットの送受信回数の削減により、電力消費量を抑制することができる。一方、VPMRは電力消費量を考慮しておらず、複数の経路にデータを送信している。よって、R2SとVPMRを比較した場合、R2Sのほうが電力消費量を抑制することができる。トラフィック量の点では、R2Sのほうが優れている。R2Sは経路再構築回数を抑制しており、またクラスSに属するノードのみが全シンクへデータを送信する。一方VPMRは、重要データを扱うノードはシンクまでの複数の経路にデータを送信している。よって、経路再構築の際の経路制御パケットや、通常のデータ送信の際のデータ数を考えると、R2Sのほうがトラフィック量を抑制できていると考えられる。パケット到着率では、VPMRのほうが優れていると考えられる。R2SではクラスSに属するノード以外は、データの送信は1つの経路で行っている。一方、VPMRは重要データを扱うノードは複数の経路にデータを送信するマルチパスを利用している。よって、パケット到着率ではVPMRのほうが高くなると考えられる。また、VPMRは各治療優先度のデータの到着率を差別化できるという点も特徴の1つである。End-to-end遅延においてもVPMRのほうが優れていると考えられる。R2Sでは経路再構築が起きにくいロバストな経路を構築しているため、経路再探索による遅延は低減させることができるが、シンクまでの最短経路を用いるといったアプローチはない。一方、VPMR

はシンクまでのデータ送信を、複数経路を用いて行っているため、ある経路が経路再探索を行っていても他の経路でデータ送信ができ、遅延の低減ができています。また重要度が高いデータは、シンクまでの最短経路を用いたデータ送信を行っているため、さらに遅延を低減することができています。よって、VPMRのほうが遅延を低減できる。

以上のようにR2SとVPMRを比較した場合、R2SはVPMRよりも経路再構築回数、電力消費量、トラフィック量の点で優れていると考えられる。またR2Sは、遅延とパケット到着率の点においてVPMRより劣っているが、上記に述べたように各傷病者の生体情報は30秒に1回程度確認できれば良いといわれているため、遅延とパケット到着率の点においても、トリアージネットワークでの実用性には問題ないと考えられる。

6. おわりに

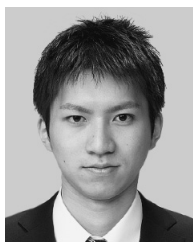
本論文では、トリアージネットワークにおいて各ノードの離脱時刻と治療優先度を考慮し、各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新を利用した経路探索手法R2S (Robust Route Search in Triage Network) を提案した。R2Sでは、各ノードによる経路探索とシンクによる経路更新により経路を維持する。また各ノードを、離脱時刻を考慮して5つの動作クラスに分類する。これにより、経路のロバスト性を向上させる。そして、全ノードが各自に要求されるライフタイムを達成する。さらに、データの収集優先度を考慮し、宛先シンク数を決定することによって、データの到着率を差別化する。計算機を用いて評価を行った結果、関連研究NS (Nearest Sink) と比較して、R2Sはノードの離脱による経路の再構築回数を抑制でき、また早期離脱ノードの電力を積極的に使用する経路の構築ができた。そして、離脱の遅いノードの電力を温存することで、電力切れノードの発生を回避できるだけでなく、電力消費を全体的に抑制することができた。さらに、高優先データのみ複数シンクへ送信することで、収集優先度が高いデータの到着率を維持でき、平均パケット到着率も向上させることができた。よって、提案手法R2Sはトリアージネットワークにおいてロバストな経路を構築可能な手法であるといえる。

今後の課題として、離脱モデルと、中継として積極的に使用するクラスとの関係性があげられる。本提案では、初期配属クラスを赤がS、黄がA、緑がB、黒がCとし、クラスSに所属するノードを積極的に中継として使用するようにした。しかし、ネットワーク構造の安定化と電力消費の観点において、どのクラスを積極的に使用すると最も効率が良いかという点は離脱モデルに依存していると考えられる。特に、離脱が早いモデルでは、他クラスを積極的に使用したほうが良い結果が得られる可能性がある。よって、離脱モデルを様々なバリエーションでシミュレーショ

ンする必要があるため、今後の課題とした。

参考文献

- [1] West Japan Railway Company: JR-West's Business Report (2007). FILE NO.82-34777.
- [2] Minamimoto, S., Fujii, S., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: Local map generation using position and communication history of mobile nodes, *2010 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pp.2–10 (online), DOI: 10.1109/PERCOM.2010.5466999 (2010).
- [3] Basu, A., Gao, J., Mitchell, J.S.B. and Sabhnani, G.: Distributed localization using noisy distance and angle information, *Proc. 7th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing, MobiHoc'06*, New York, NY, USA, ACM, pp.262–273 (online), DOI: <http://doi.acm.org/10.1145/1132905.1132934> (2006).
- [4] 高橋章子: 救急救急看護師・救急救命士のためのトリアージ, メディカ出版 (2008).
- [5] G-net, available from (<http://members.jcom.home.ne.jp/mikedo/>).
- [6] Wang, C. and Wu, W.: A Load-Balance Routing Algorithm for Multi-Sink Wireless Sensor Networks, *International Conference on Communication Software and Networks, 2009, ICCSN'09*, pp.380–384 (online), DOI: 10.1109/ICCSN.2009.148 (2009).
- [7] Lin, Y. and Wu, Q.: Energy-Conserving Dynamic Routing in Multi-sink Heterogeneous Sensor Networks, *International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC) 2010*, Vol.3, pp.269–273 (online), DOI: 10.1109/CMC.2010.299 (2010).
- [8] Eghbali, A., Javan, N., Dareshoorzadeh, A. and Dehghan, M.: An energy efficient load-balanced multi-sink routing protocol for wireless sensor networks, *10th International Conference on ConTEL 2009, Telecommunications 2009*, pp.229–234 (2009).
- [9] Heinzelman, W., Chandrakasan, A. and Balakrishnan, H.: An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks, *IEEE Trans. Wireless Communications*, Vol.1, No.4, pp.660–670 (2002).
- [10] Liu, K., Chen, L., Liu, Y. and Li, M.: Robust and Efficient Aggregate Query Processing in Wireless Sensor Networks, *Mobile Networks and Applications*, Vol.13, pp.217–227 (2008).
- [11] Felemban, E., Lee, C.-G. and Ekici, E.: MMSPEED: Multipath Multi-SPEED protocol for QoS guarantee of reliability and Timeliness in wireless sensor networks, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.5, No.6, pp.738–754 (online), DOI: 10.1109/TMC.2006.79 (2006).
- [12] 小林ひかる, 田村寛樹, 友澤弘充, 重野 寛: パケット重要性に応じたパス多重度可変ルーティング, *情報処理学会論文誌*, Vol.52, No.1, pp.165–174 (2011).
- [13] Perkins, C.E. and Royer, E.M.: Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing, *Proc. 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp.90–100 (Feb. 1999).
- [14] QualNet, available from (<http://www.scalable-networks.com>).
- [15] 横浜市消防局, 入手先 (<http://www.city.yokohama.jp/me/shobo/>).



田村 寛樹 (学生会員)

2010年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。現在、同大学大学院理工学研究科修士課程に在籍。



小林 ひかる (学生会員)

2009年慶應義塾大学工学部情報工学科卒業。2011年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年エヌ・ティ・ティ・コミュニケーションズ株式会社入社。



戸口 裕人 (学生会員)

2010年専修大学ネットワーク情報学科卒業。現在、慶應義塾大学大学院理工学研究科修士課程に在籍。



重野 寛 (正会員)

1990年慶應義塾大学工学部計測工学科卒業。1997年同大学大学院理工学研究科博士課程修了。1998年同大学工学部情報工学科助手(有期)。現在、同大学工学部情報工学科准教授。博士(工学)。計算機ネットワーク・プロトコル、モバイル・コンピューティング、ネットワーク・セキュリティ、マルチメディア・アプリケーション等の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、ACM各会員。