

トリアージネットワークにおける双方向探索を利用したロバストな経路構築手法の提案

田村 寛 樹^{†1} 戸口 裕 人^{†1}
斎藤 卓 也^{†1} 重野 寛^{†2,†3}

トリアージは、災害時に傷病者の重症度に応じて治療の優先度を決定する救急救命方式である。このトリアージで使用す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、傷病者情報を収集・監視するトリアージネットワークの研究が活発となっている。トリアージネットワークではノードの参加・離脱が頻繁に発生し、これによるトポロジの変化によって経路切断が頻繁に発生する。よって、経路切断の可能性が低いロバストな経路構築が必要となる。また、各傷病者は治療優先度に応じてネットワークへの参加時間が異なるため、各傷病者に要求されるライフタイムの達成が必要となる。さらに、治療優先度が高い傷病者のデータ到着率向上が必要となる。本稿では、各ノードのライフタイムと治療優先度を考慮し、双方向探索を利用したロバストな経路構築手法 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。

Proposal of Robust Route Search in Triage Network

HIROKI TAMURA,^{†1} YUTO TOGUCHI,^{†1} TAKUYA SAITO^{†1}
and HIROSHI SHIGENO^{†2,†3}

Triage is an emergency lifesaving system to decide priority of curing and save patients' lives in disasters. In Triage, Researches of sensor networks collecting patients' data with computerized triage tags, called "Triage network", are developed. In Triage Network, because participation and secession of nodes occur and the topology changes frequently, link or route losses occur frequently. Therefore, it is necessary to search robust routes where route losses don't occur easily. Moreover, it is necessary to achieve lifetime which each node is demanded and improve arrival rate of patients' data with high priority of curing. In this paper, we propose R2S(Robust Route Search in Triage Network). R2S is a routing method to consider each node's lifetime and priority of curing, and use two-way search. We evaluate our proposal using computer simulations and show its effectiveness.

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究が活発に行われている²⁾³⁾。本稿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。またデータ収集場所として、トリアージポストと呼ばれる、各傷病者が順次搬入されトリアージされる場所でのデータ収集、及び各傷病者がトリアージポストから順次搬出される各色ごとのテントでのデータ収集の2つの場所を想定している。そしてトリアージネットワークでのデータ収集は、これらの環境下において、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・搬出に伴い、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、傷病者の間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する必要がある。

^{†1} 慶應義塾大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Keio University

^{†2} 慶應義塾大学理工学部

Faculty of Science and Technology, Keio University

^{†3} JST, CREST

本稿では、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、双方向探索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、ノードの経路はノードからシンク、シンクからノードの双方向探索により構築する。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探索を行うことで、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。また、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と比較して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、本稿では 2 章でトリアージについて、3 章でトリアージネットワークおよびその特性を説明し、4 章で関連研究について述べ、5 章で提案手法 R2S について述べる。そして、6 章でシミュレーションによる評価を行い、最後に 7 章で結論を述べる。

2. トリアージ

トリアージとは、事故や災害現場での医療対応の基本である 3T(Triage, Treatment, Transportation) の一つで、大事故・大規模災害など多数の傷病者が突発的に発生した際に、傷病者の脈拍や自発呼吸、血中酸素ノードの状況から重症度を 4 グループに分類し、それぞれのグループを赤、黄、緑、黒と色で区別することで、できるだけ多数の人命を救助する救急救命方式である。阪神淡路大震災の教訓から総務省消防庁でトリアージの手順が定められ、災害現場で「トリアージタグ」(図 1) と呼ばれるタグを傷病者につけることになった。日本において、トリアージは JR 福知山線の列車時期の際に初めて適用され、500 人を超す傷病者の中から救命できる人を短時間で見分けて優先順位を付け、搬送する順番を決定する判



図 1 トリアージタグ
Fig. 1 Triage Tag

断基準として活用された。

色ごとに示す傷病者の状態は以下の通りである。

- 黒 (カテゴリー 0) 死亡もしくは救命不可能
- 赤 (カテゴリー I) 生命に関わる重篤な状態であり、迅速な搬送を要する
- 黄 (カテゴリー II) 生命に関わる重篤な状態ではないが、搬送を要する
- 緑 (カテゴリー III) 救急での搬送の必要がない

図 2 にトリアージの流れを示す。まず、各傷病者は災害現場からトリアージポストと呼ばれる場所に搬入される。そして、トリアージポスト内でトリアージされ、重症度を明示化される。ここまでの流れを一次トリアージと呼ぶ。次に、各傷病者は各色のテントへ搬出され、そこで治療を受ける。これを 2 次トリアージと呼ぶ。本稿は、1 次トリアージと 2 次トリアージにおけるデータ収集を想定している。

トリアージは医師・看護師・救急救命士などが行い、START(Simple triage and rapid treatment) 法⁴⁾ と呼ばれる判定基準に基づき一人 30 秒以内に判定をする。基本は歩ければ「緑」を、歩けない状態で気道確保なしで呼吸できる場合は「黄」、気道確保がなければ呼吸できなければ「赤」、2 回の人工呼吸をしても呼吸しない場合は「黒」との基準がある。また、ショックの兆候があれば呼吸をしても「赤」などの基準がある。

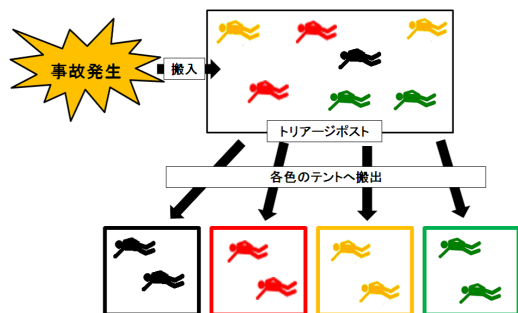


図2 トリアージの流れ
Fig.2 Flow of Triage

3. 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など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。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3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など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。

3.1 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つが挙げられる。

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。一般的なセンサネットワークでは、ノードは一斉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、トリアージネットワークでは、

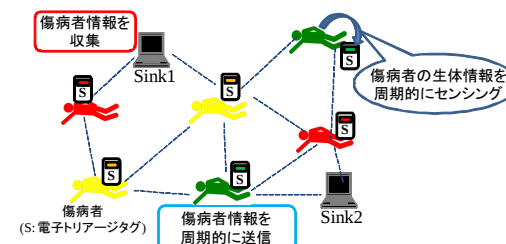


図3 トリアージネットワーク
Fig.3 Triage Network

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、トリアージネットワークでは、脈拍や呼吸数などの生体情報となる。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、トリアージネットワークでは、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一つである。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程、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）。

3.2 要 求 条 件

トリアージネットワークには、大きくわけて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%である事が理想だが、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ジ実験⁵⁾から、2時間が一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4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。

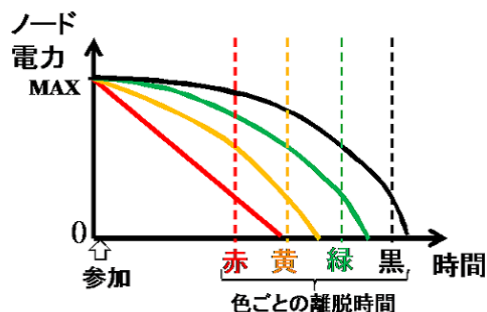


図 4 各色で要求されるライフタイム
Fig. 4 Required Lifetime for Each Color

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。

4. 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⁾が挙げられる。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、トリアージ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、トリアージ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。トリアージ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、トリアージ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、データ集約も挙げられる。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⁾はこの手法に代表される。しかし、トリアージネットワークへの適応には問題

がある。これは、トリアージ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⁾はこの手法に代表される。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、想定するトリアージ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 数から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時に適している。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、この時使用される電力は無駄な電力となる。

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⁽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伴う経路再構築の抑制を考慮していない。よって、本稿では主に、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。

5. R2S

本稿では、各ノードの離脱時刻と治療優先度を考慮し、双方向探索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。

5.1 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。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、シンクはノードからデータを受信した際、全ノードをデータの収集優先度順にソートしたリストを作成・更新する。そして、周期的にアップデートメッセージを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。図5に動作クラスの種類と特性を示す。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の順にほど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。

図6はクラス更新前の経路とクラス更新後の経路を示している。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

ノード	α	S	A	B	C
クラス					
(特徴)	離脱確定	離脱時間			
		早い			遅い
中継数	0	多			少

図5 動作クラスの種類と特性

Fig. 5 Kinds and Characteristics of Operation Classes

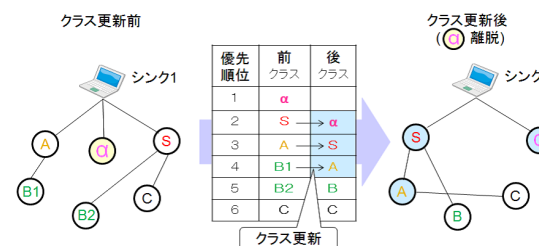


図6 経路構築の例

Fig. 6 Route Search

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。シンク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、動作クラスの所属を決定する。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へと変換し、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。

5.2 双方向探索

本提案では、ノードからシンク、シンクからノードの双方向の探索を行う。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探索により、定期的に更新可能であり、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

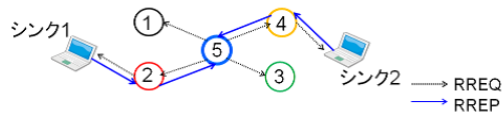


図 7 双方向経路探索 (ノードからシンク)
Fig. 7 Two-way Search (node→sink)

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宛先シンクとする．

図 7 はノード 5 からの RREQ を利用した経路構築の様子を示している．ノード 5 が送信した RREQ を周辺ノードは受信する．各ノードは自身の動作クラスに応じた中継動作を行う．図 7 においてノード 5 は、シンク 1 に対してはノード 2 を経由した経路を、シンク 2 に対してはノード 4 を経由した経路を構築する．

シンクからノードへの経路探索は、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．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．離脱確定ノード情報は、シンクがメッセージ配信を行う時刻から一定時刻 T 後までの間に離脱する予定のノードに関する情報である．クラス更新情報は、ネットワーク全体の動作クラスに所属するノード数の割合に変化があり、動作クラスを変更する必要があるノードの情報である．シンクから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．クラス更新指示があったノードは、自身のクラスを更新し、更新後の動作クラスの中継動作を行う．ノードは複数シンクのうち、先に受信したメッセージの送信シンクをデータの宛先シンクとして決定する．

図 8 はシンクからのアップデートメッセージを利用した経路構築の様子を示している．各シンクはアップデートメッセージを送信する．ノード 1, 2 がシンク 1 からのメッセージを受信し、動作クラスに応じた中継を行う．そして、ノード 2 から先に中継され、メッセージを受信したノード 5 は更にメッセージを中継したとする．各ノードはアップデートメッセージの通ってきた経路に経路更新する．シンク 2 から同様の流れで各ノードの経路を更新する．

5.3 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 ,

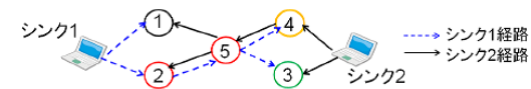


図 8 双方向経路探索 (シンクからノード)
Fig. 8 Two-way Search (sink→node)

データ	赤	黄	緑	黒
優先度	高	←	→	低
対象シンク(数)	全シンク	1	1	1

図 9 データの収集優先度と使用経路数の関係

Fig. 9 Relations between Priority of Collecting Data And The Number of Routes

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．

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

$Delay$ は付加遅延量、 $maxdelay$ は最大遅延量、 n は離脱未確定クラス数 (本稿においては、 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に値を取る．ランダム値を取るのは、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．

5.4 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．図 9 にデータ収集優先度と使用経路の関係を示す．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収集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．

表 1 シミュレーションパラメータ
Table 1 Simulation Parameters

シミュレータ	QualNet version 5.0 ¹³⁾
シミュレーションエリア	100m × 100m
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
ノードの平均参加間隔	ポアソン分布 (1 時間で全ノードが参加)
ノードの離脱開始時間	2 時間後
ノードの平均離脱間隔	最大ノード数/1 時間
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	750mAh
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

6. 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。

6.1 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。また本シミュレーションでは、図 10, 11 に示すように、1 次トリアージと 2 次トリアージの両方のモデルでシミュレーションを行う。図 10 は 100m×100m のエリアに各色の傷病者がランダムに配置されているモデルである。一方、図 11 は 100m×100m のエリアを 50m×50m に 4 分割し、各エリアには同じ色の傷病者のみが存在するモデルとなっている。配置するシンクの数に 2 台としており、どちらかのシンクにデータが到着すれば送信成功とする。また、クラス S への変更タイミングは 180 秒である。これは、横浜市消防局 HP¹⁴⁾ より、救急車の平均到着時間は 6 分であり、救急車到着時間の誤差を考慮し

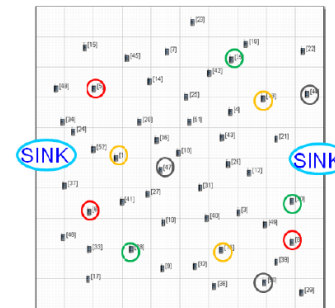


図 10 1 次トリアージのシミュレーションモデル
Fig. 10 Simulation model of The First Triage



図 11 2 次トリアージのシミュレーションモデル
Fig. 11 Simulation Model of The Second Triage

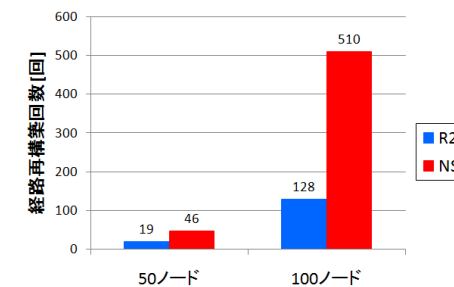


図 12 経路再構築回数 (1 次トリアージモデル)
Fig. 12 The Number of Route Re-search (The First Triage)

一定時刻 $T = \frac{\text{救急車平均到着時間}}{2}$ とした。

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。

6.2 経路再構築回数

図 12, 13 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。図 12 と 13

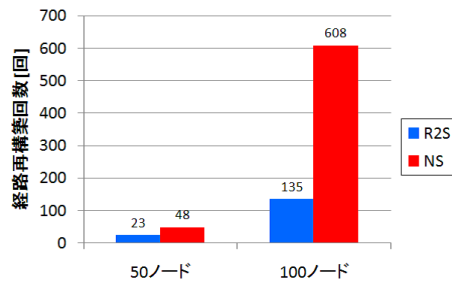


図 13 経路再構築回数 (2 次トリアージモデル)

Fig. 13 The Number of Route Re-search (The Second Triage)

のそれぞれを見ると、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わかる。また、図 12 と 13 を比較すると、各色の傷病者の配置に偏りがある図 13 のほうが経路再構築回数が多いが、提案手法 R2S は既存方式 NS と比較して経路再構築回数を抑制できている。これらは、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。また、パケットを中継させる割合をクラス S, A, B, C の順に大きくしていることも要因の一つとして挙げられる。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と考えられる。

6.3 離脱時におけるノードの電力残量

図 14, 15 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。図 14 における 100 ノードの場合の黒や図 15 における 100 ノードの場合の全ての色において、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おり、2 次トリアージモデルでは経路再構築回数が多いため、全ての色において電力切れノードが発生していると考えられる。それに対し、R2S はノードの電力切れが起きていないことが確認できる。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。

6.4 パケット到着率

図 16, 17 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

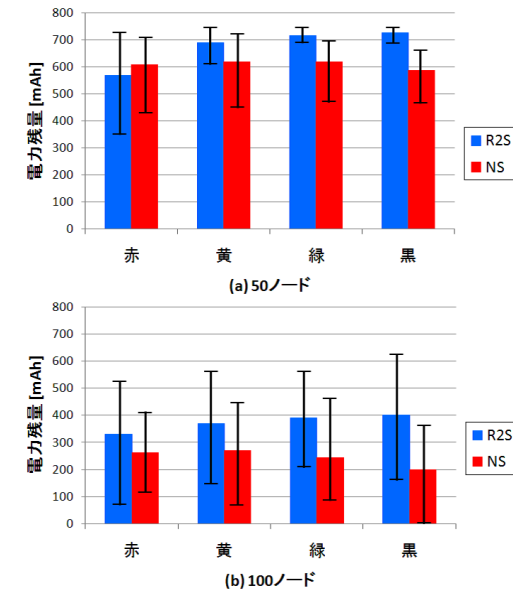


図 14 離脱時におけるノードの電力残量 (1 次トリアージモデル)

Fig. 14 The Electricity Residual Quantity of Each Node when Seceding (The First Triage)

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 では常に約 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。

7. 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、双方向探索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、ノードからシンクと、シンクからノードへの双方向探索により経路構築をする。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

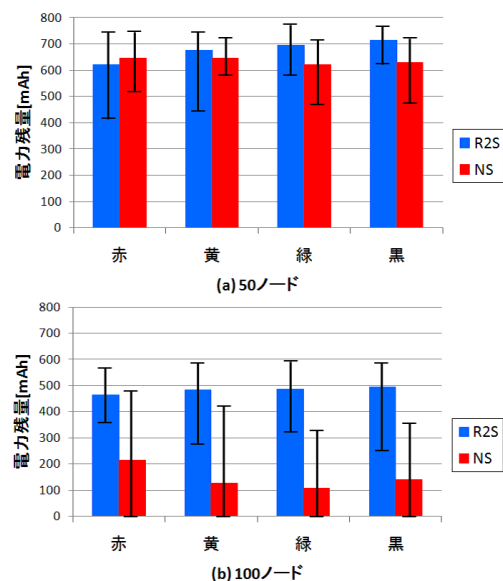


図 15 離脱時におけるノードの電力残量 (2 次トリージモデル)

Fig. 15 The Electricity Residual Quantity of Each Node when Seceding (The Second Triage)

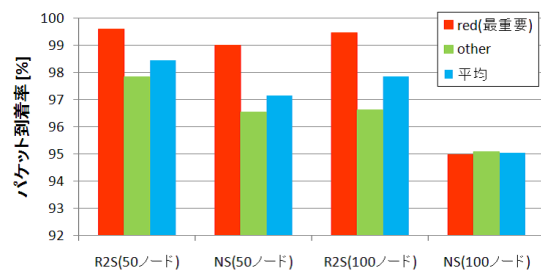


図 16 パケット到着率 (1 次トリージモデル)

Fig. 16 Packet Arrival Rate (The First Triage)

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、

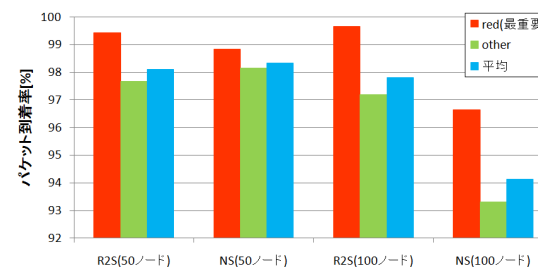


図 17 パケット到着率 (2 次トリージモデル)

Fig. 17 Packet Arrival Rate (The Second Triage)

データの到着率を差別化する。計算機を用い、1 次トリージと 2 次トリージを想定したシミュレーションモデルにおける評価を行った結果、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できた。よって、提案手法 R2S はトリ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。

参 考 文 献

- 1) West Japan Railway Company. *JR-West's Business Report*, 2007. FILE NO. 82-34777.
- 2) S.Minamimoto, S.Fujii, H.Yamaguchi, and T.Higashino. Local map generation using position and communication history of mobile nodes. In *Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, 2010 IEEE International Conference on, 29 2010.
- 3) Amitabh Basu, Jie Gao, Joseph S.B. Mitchell, and Girishkumar Sabhnani. Distributed localization using noisy distance and angle information. In *Proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing, MobiHoc '06*, pages 262–273, New York, NY, USA, 2006. ACM.
- 4) 高橋 章子. 救急救急看護師・救急救命士のためのトリージ. メディカ出版, 2008.
- 5) G-net. URL: <http://members.jcom.home.ne.jp/mikedo/>.
- 6) Chunping Wang and Wei Wu. A load-balance routing algorithm for multi-sink wireless sensor networks. In *Communication Software and Networks, 2009. ICCSN*

- '09. *International Conference on*, pages 380 –384, 2009.
- 7) Yunyue Lin and Qishi Wu. Energy-conserving dynamic routing in multi-sink heterogeneous sensor networks. In *Communications and Mobile Computing (CMC), 2010 International Conference on*, volume 3, pages 269 –273, 2010.
 - 8) A.N. Eghbali, N.T. Javan, A.Dareshoorzadeh, and M.Dehghan. An energy efficient load-balanced multi-sink routing protocol for wireless sensor networks. In *Telecommunications, 2009. ConTEL 2009. 10th International Conference on*, pages 229 –234, 2009.
 - 9) W.Heinzelman, A.Chandrakasan, and H.Balakrishnan. An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 1(4):660–670, 2002.
 - 10) K.Liu, L.Chen, Y.Liu, and M.Li. Robust and Efficient Aggregate Query Processing in Wireless Sensor Networks. *Mobile Networks and Applications*, 13:217–227, 2008.
 - 11) E.Felemnban, Chang-Gun Lee, and E.Ekici. Mmspeed: multipath multi-speed protocol for qos guarantee of reliability and. timeliness in wireless sensor networks. *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, 5(6):738 – 754, 2006.
 - 12) 小林ひかる, 田村寛樹, 友澤弘充, and 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*, pages 165–174, Jan 2011.
 - 13) Qualnet usermanual Qualnet. <http://www.scalable-networks.com>.
 - 14) 横浜市消防局. <http://www.city.yokohama.jp/me/shobo/>.