

パケット重要性に応じたパス多重度可変ルーティング

小林 ひかる^{†1} 田村 寛樹^{†1} 友澤 弘充^{†1}
重野 寛^{†2,†3} 岡田 謙一^{†2,†3}

災害発生時に、傷病者の状態から救命の順序を決定する「トリアージ」と呼ばれる救急救命方式の導入が進んでいる。救命順決定に使用されるタグを電子化してセンサネットワークを構築し、傷病者の情報を監視・収集する救急救命支援システムの研究が活発となっている。センサネットワークを介して傷病者の病状データを収集する際、データの重要性と経路破損やリンク切れに対応した重要データ収集のロバスト性を考慮する必要がある。本論文では、データの重要性とネットワーク全体での被害状況に応じて送信元ノードごとに利用できる経路の本数、種類を決定することにより、経路破損やリンク切れに対する伝送のロバスト性を向上させる手法 VPMR (Variable Path Multiplicit Routing) 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。

Variant Path Multiplicit Routing Algorithm Adapted to Packet Priority

HIKARU KOBAYASHI,^{†1} HIROKI TAMURA,^{†1}
HIROMITSU TOMOZAWA,^{†1} HIROSHI SHIGENO^{†2,†3}
and KENICHI OKADA^{†2,†3}

Triage, a process of prioritizing patients based on the severity of their condition, has been introduced in recent years. Researches of aid supporting system collecting patients' data among sensor network, with computerized triage tags, are developed. When collecting patients data among sensor network, data priority and the data transmission's robustness are required to be concerned. In this paper, we propose a method to increase robustness for each sender node by deciding path diversity for each node using data priority and condition of other patients. We evaluate our proposal using simulations and show effectiveness.

1. はじめに

列車事故等の大事故や、ハリケーン・台風等の大規模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救命の順序（重要性）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。傷病者をその病状に応じて赤、黄、緑、黒の4グループに分類し、それぞれのグループを色で区別している。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。医師等がトリアージタグに傷病者の生体情報を記入し、色を決定する。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。これに対し、傷病者の色分けに使用するトリアージタグを電子化して（以降、電子トリアージタグと呼ぶ）、傷病者の位置や病状変化を監視・収集する救急救命支援システムの研究が活発になっている²⁾⁻⁴⁾。電子トリアージタグをセンサとしてネットワークを構築することで傷病者の情報を自動的に収集する。このような、多数の傷病者が発生した現場において自動的に傷病者情報を収集するネットワークをトリアージネットワークと呼ぶ。

本論文において想定しているトリアージネットワークは、多数の傷病者が発生した現場において、自動的に全傷病者情報を周期的に収集するネットワークである。トリアージされた傷病者の間で治療の優先順位がつけられ、その優先順位により傷病者から発せられるデータの重要性が異なる。ネットワークに存在する他の傷病者と比較して、危険度が高い傷病者に関する病状データほど重要性が高くなり、危険度が低い傷病者に関するの病状データは重要性が低くなる。全体的な傷病者の状態を考慮するのは、救える命をより多く救うというトリアージの目的からきている。また、データを送信する際は、他ノードが中継する。重要性が高いデータほど、伝送のロバスト性を高くして伝送する必要がある。本論文では、経路破損やリンク切れに対する高い信頼性の通信の提供を、伝送のロバスト性と呼ぶこととする。重要なデータほど、経路破損やリンク切れが発生した際でも確実にSinkでデータを収集することが必要とされる。本論文ではロバスト性の向上を、パケット到着率の向上で評価する。伝送のロバスト性が高いことで、マルチホップしている途中でのロスに対して強く

^{†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} 独立行政法人科学技術振興機構, CREST
Japan Science and Technology Agency, CREST

なり、データを一カ所で集め、多くの傷病者に関する集計が可能になる。上記のことから、トリアージネットワークにおいてデータの重要性を考慮し、伝送のロバスト性を高く伝送する必要がある。しかし、既存のロバスト性の高いデータ伝送手法では、送信元ノードごとの優先度やデータの重要性等に応じた伝送はできず、重要なデータも通常のデータと同様にロスする確率を引き継ぐ。さらに、伝送遅延が発生し、特定ノードに負荷が集中して効率が低下するという問題がある。

本論文では、送信元ノードごとに使用できる経路の本数、種類（最短経路、独立性の高い経路：他経路の packets をオーバーヒアしない経路等）を決定することにより、伝送のロバスト性を向上させる手法を提案する。データの重要性を基にデータを送信する経路の種類と本数を決定するため、重要性の高いデータほど伝送のロバスト性を向上させ、確実に送ることができる。そうすることで、重要性の低いデータの送出手法を止めずに重要性の高いデータの伝送ロバスト性を向上させて送信することを実現する。また、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重要性の高いデータの伝送のロバスト性を得られていることを示す。

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。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

本章では、想定するトリアージネットワークについて述べる。トリアージネットワークは、多数の傷病者が発生した現場において、傷病者に取り付けた電子トリアージタグをノードとし、自動的に傷病者情報を収集するネットワークである。電子トリアージタグに医師が病状を入力することで、傷病者の色分けが自動的に行われる。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、Sink へ送信する。トリアージネットワークの目的は、全傷病者の病状変化と病状急変を Sink で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図である。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によりセンシングした病状をもとに赤、黄、緑、黒の 4 色に色分けし、治療優先度が決定される。治療優先度による色の重要性順位は赤 > 黄 > 緑 > 黒である。送信されるデータは、各傷病者の生体情報であるため、病状変化を把握するために周期的なデータ収集が必要となる。色の重要性が高い傷病者のデータほど、データの重要性

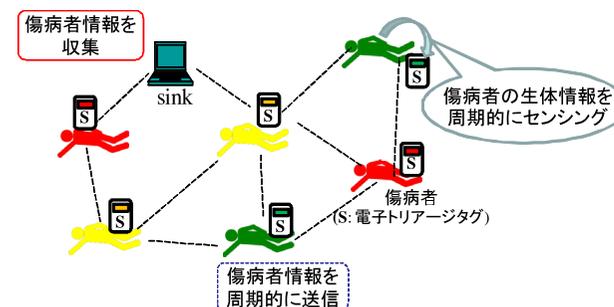


図 1 トリアージネットワークイメージ図
Fig. 1 Image of triage network.

は高くなる（赤データ > 黄データ > 緑データ > 黒データ）。データの重要性とは、データ送信時点での医療従事者に提示する必要性の高さのことである。また、同一傷病者において、病状急変により治療優先度の色が変化した場合に送信する急変データは、周期的に送信しているデータよりも重要なデータとなる。急変データは全傷病者が周期的に送信しているデータの中で最重要データとなり、迅速に通知する必要がある。さらに、傷病者の搬送によるネットワーク中のノードの色割合変化によって、徐々に重要データとして扱われるデータの色が変化する。重要性の高い色の傷病者が少なければ、重要性の低い色の傷病者データでも、データの重要性が高いと判断される。一方、重要性の高い色の傷病者が多いほど、重要性の低い色の傷病者データは重要性が低いままデータ送信を続ける。

2.1 ネットワークモデル

本論文では、中規模災害現場を想定しており、傷病者の人数は 100 人～200 人程度、医療従事者（医者・トリアージを行う人）は数組の環境を想定している。データを集める本部が一カ所（Sink）ある。各傷病者につけられる電子トリアージタグからのデータは医療従事者ならびに本部へと送信する。現場で ZigBee⁵⁾ 等を利用して構築されたネットワークに、ノード（傷病者）が徐々に参加していき、全ノードがある一定周期でパケット送信を行う。中継に使われていたノードが搬送された場合、そのノードを中継に使っていた経路は利用できなくなる。ある経路が利用できなくなっても伝送のロバスト性を高め、他の手段で Sink において復元できればデータは到達したことになる。伝送のロバスト性を向上させることにより、医療従事者が各傷病者の情報を収集する本部で監視することができる。本部で各傷病者の状態を監視する際には、リアルタイムのように更新頻度が高すぎる必要はなく、一定時

間ごとに表示されればよい。ただし、症状が急変した傷病者の情報に関しては迅速に表示されることが望まれる。

2.2 要求条件

トリアージネットワークでは、傷病者データの周期的な測定にともない、全ノードからの周期的なデータ収集が要求される。データ収集における信頼性の要求は、人命救助の場のため、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%の到着率を保证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ることが求められる。遅延の要求条件は、データ送信間隔内に届くことである。トリアージネットワークで扱う傷病者の生体情報は、周期的にリアルタイムデータを送信する。したがって、次のデータが届く前にデータをSinkに届ける必要がある。ただし、急変データに限っては迅速にSinkに届ける必要がある。稼働時間の要求条件は、トリアージ開始(傷病者搬入によるネットワークへの参加)からトリアージ終了(傷病者搬送によるネットワークからの離脱)まで、電力が切れないことである。福岡市消防局によるトリアージ実験⁶⁾から、2時間が1つの目安とされているが、現場状況によってトリアージの所要時間は異なる。そのため、電力消費を少しでも抑え、ノードの稼働時間を延長させることは努力項目とされている。

3. 関連研究

3.1 ロバスト性の高いデータ伝送手法

センサネットワークではロバスト性を向上させて信頼性を向上させることは重要であり、広く研究されている。ロバスト性の高いデータ伝送手法の1つにマルチパスを用いた伝送手法がある。マルチパスを用いた手法⁷⁾⁻¹⁰⁾では、1つの送信元ノードから発せられたパケットを複製し、多様な経路を利用してデータをSinkに届ける。複数送信されたパケットの中で、どれか1つでもSinkにたどり着けば通信が完了したことになるため、信頼性が高く、ロバスト性を向上させることができる。ここで、2つの問題点がある。1つ目は、経路が構築されると、その経路に継ぎ足して新たな経路が生成されるため、利用経路に偏りが起こるといえる点である。2つ目は、重要性が高くないパケットも複製され送信されるため、帯域が圧迫されるという点である。データの重要性を考慮した既存手法にSPEED¹¹⁾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、パケットの重要性が同じになってしまう。よって、各色によって傷病者の治療の優先度が異なる

り、また状況によってデータの重要性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。よって、マルチパスを用いた手法においても、これらの2つの問題点を解決する必要がある。

また、ロバスト性のあるデータ伝送手法としてマルチパスを用いた手法のほかに、クラスタリング、データ集約、ネットワークコーディングもあげられる。クラスタリングを用いた手法¹²⁾は、クラスタ内のクラスタヘッドが代表してパケットを中継するため、ノードの中継先が近傍となりロバスト性が向上する。しかし、傷病者の離脱が頻繁に起こるようなトリアージネットワークでは、中継を行うクラスタヘッドが損失しやすくクラスタの再構築を頻繁に行わなければならないため適さない。データ集約を用いた手法¹³⁾では、受け取ったデータを集計し、それを中継する。送信するデータの統計量の中継するため、累計送信量を削減することができ、電波の干渉や衝突を軽減することができるため、ロバスト性が向上する。しかし、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。ネットワークコーディングを用いた手法¹⁴⁾は、データを分割・符号化することで冗長性を高める。収集サーバにおいて一定量のデータが到達すれば復元できるため、ロバスト性を向上させることができる。しかし、トポロジの全情報が必要で複雑であり、復元のために収集サーバで計算しなければならない点や複数パケットの到達が必須であるといった問題点がある。よって、マルチパスを用いた手法に焦点を当てる。

3.2 関連研究 AOMDV

上記の理由からマルチパスを利用した手法に着目する。AOMDV (Ad hoc on-demand multipath distance vector routing)¹⁵⁾はその代表例である。AOMDVは、コストが低い順に経路を確立させ、中継ノードが重複しないように他経路を選択していく。AOMDVの問題点として、無線での利用を考えているためパケット伝送の際に同一パケットを伝送する経路どうして電波が干渉する可能性が高くなる、伝送途中での経路破損やリンク切れに対応できないという点があげられる。また、トリアージネットワークに適用する際の問題点としては、データの重要性に応じた伝送ができないという点があげられる。

4. 提案手法 VPMR

送信元ノードごとに利用できる経路の本数、種類を決定することにより、重要性の高いデータの伝送のロバスト性を向上させる手法VPMR (Variable Path Multiplicit Routing)を提案する。VPMRを用いることで、重要性が高いデータを継続してSinkにおいて監視することが可能になる。

4.1 目的

ある特定の経路のみを利用するだけでは経路利用に偏りが生じ、さらに複数経路に同一パケットを送出するために帯域圧迫を引き起こす。既存研究には送信元ノードの種類に応じた経路の種類を変更するようなものは存在していない。そこで、トリアージネットワークの特徴であるデータの重要性を考慮した経路決定を実現する。データの重要性とは、そのデータを Sink で収集すべき必要性の高低のことである。傷病者の病状に応じて付けられた色の重要性により、データの重要性は赤データ > 黄データ > 緑データ > 黒データの順位がある。傷病者の病状急変を知らせる急変データは、傷病者の病状悪化によるタグの色変化を意味しており、全データ中最重要として扱う。

4.2 提案概要

提案手法では、マルチパスと重要性の高いデータの伝送のロバスト性を向上させる。

提案手法では、各ノードが複数経路を利用し、自データの重要性をもとに周期的に Sink へデータ送信を行う。ネットワークへ参加した各ノードが、Sink への伝送に使用する経路候補を複数探索、確立する。データ送信にあたっては、各ノードがネットワーク内における自身のデータの重要性を判断し、経路を選択して送信する。また、他ノードデータを中継する際は、同一パケットの衝突を防ぐために意図的に遅延を発生させ、パケットに含まれる経路に従い中継する。経路破損等で確立した経路が使用できなくなると、代替経路を見つけ代用する。

各ノードの動作は以下の 4 フェーズからなる。図 2 に 4 フェーズと遷移を示す。

- 探索フェーズ：送信元ノードが利用できる経路を探索する。
- 選択フェーズ：いくつか探索された経路の中から自ノードがどれを利用するのかを選ぶ。
- 送信フェーズ：実際にその経路に沿って送信する。
- 経路変更フェーズ：経路途中等において不具合が判明した場合に行う。

4.2.1 探索フェーズ

探索フェーズでは、ネットワークに新規に参加したノードまたはそれまで利用していた経路が使えなくなったノードは、図 3 に示すような最短経路 (shortest path) と n 本の独立経路 (disjoint paths) を探索する。最短経路とは、送信元ノードが経路探索を行った際に、最初に確立される経路である。独立経路とは、送信元ノードから Sink までの最短経路を除いた複数の探索された経路のうち、互いに RREP をオーバーヒアしない独立性の高い経路のことである。ただし、送信元ノードと Sink それぞれの 1 hop 圏内は、干渉が避けられないため、RREP のオーバーヒアは許容する。

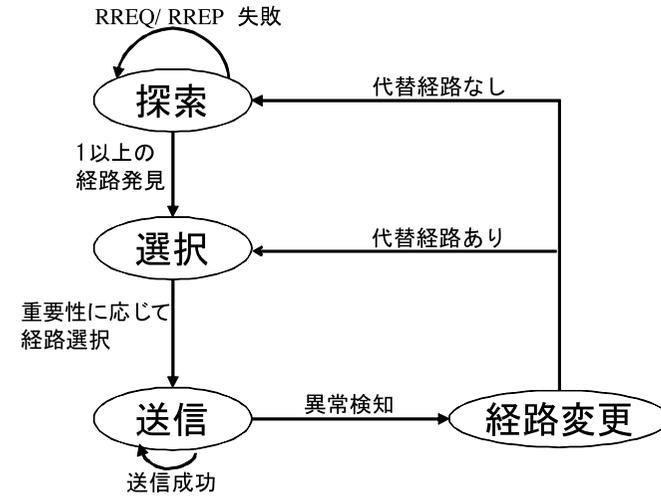


図 2 提案手法の 4 フェーズ遷移
Fig. 2 4 phases of proposal.

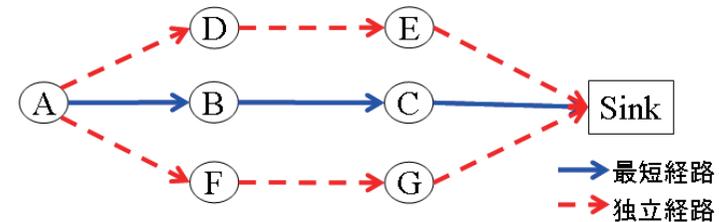


図 3 最短経路と独立経路の例
Fig. 3 Shortest and disjoint paths.

図 4 に、あるノードが経路探索を行う際に RREQ を Sink に向かって送信した後の、各ノードの動作アルゴリズムを示す。まず、経路を探索するため、ノードが RREQ を Sink に向かって送信する。RREQ を受信したノードは、以前に同一 RREQ を受信していれば破棄し、受信していなければ、RREQ に自身のノード ID を記載してフラディングする。Sink は RREQ を受信すると、RREP を生成し、送信元ノードに対するパス番号を付与し、RREQ に記載されている経路に返送する。RREP を受信したノードは、自身が中継ノード

```

if(RREQ受信){
    /* RREQを受信 */
    if(Sink){
        /* SinkがRREQを受信 */
        RREP生成;
        RREPに送信元に対するパス番号を付与;
        パス番号++;
        RREP返送;
    }
    else{
        /* 中継ノードがRREQを受信 */
        if(以前に受信したRREQと同一ノードかつホップ数>経路表に記入されたホップ数){
            RREQ破棄;
        }
        RREQに中継ノード情報を追記;
        RREQ転送;
    }
}
if(RREP受信){
    /* RREPを受信 */
    if(送信元){
        /* 送信元ノードがRREPを受信 */
        経路表にNext Hop, パス番号,
        オーバヒアパス番号, 経路分類, ホップ数を格納;
    }
    else{
        /* 中継ノードがRREPを受信 */
        送信元に対するNext Hop, パス番号を
        経路表に格納;
        オーバヒアした経路をRREPに記録;
        RREPを転送;
    }
}
if(RREPオーバヒア){
    /* RREPをオーバヒア */
    オーバヒアしたRREPのパス番号を記録;
}

```

図 4 ノードの経路探索動作アルゴリズム
Fig. 4 Algorithm for VPMR.

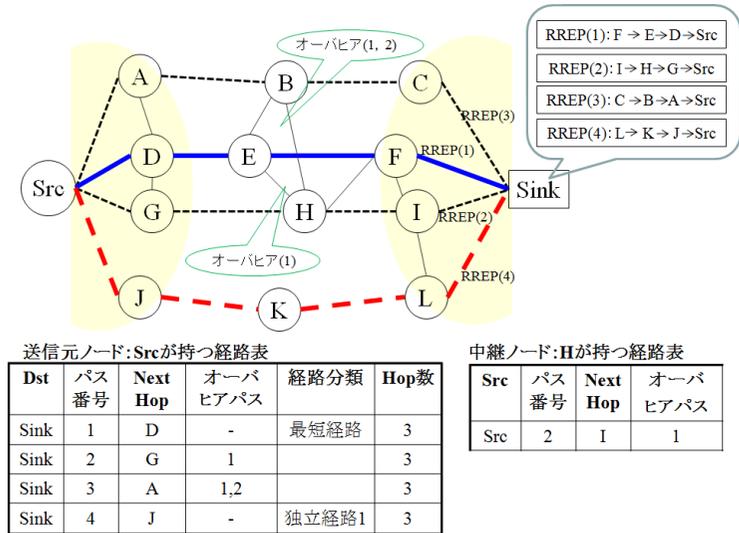


図 5 経路確立の例
Fig. 5 Discovery of paths.

であるかを判断し、中継ノードでない場合は、他経路情報をオーバヒアということ、そのパス番号を記録する。ただし、送信元ノードと Sink からそれぞれ 1 hop 圏内のノードどうしにオーバヒアがあった場合は、干渉がさげられないケースということで許容する。中継ノードであった場合は、自身の経路表にパス番号と Next Hop を格納し、これまでにオーバヒアした同一送信元ノードへのパス番号を RREP に記録し転送する。Sink が返送した RREP を受信した送信元ノードは、RREP のパス番号、Next Hop、オーバヒアパス番号、Hop 数を経路表に格納する。

送信元ノードは最初に受信した RREP の経路を最短経路として確立する。そして、受信した RREP の中から、最短経路を除いた他経路の RREP をオーバヒアしていない経路を独立経路として確立する。オーバヒアした経路は他経路と干渉が生じる可能性があるため、独立経路とはせず送信元ノードの経路表に記録を保持する。こうして、マルチパス間で独立した経路を複数探索、確立し、経路破損やリンク切れに対する伝送のロバスト性を向上させる。

経路確立の例を図 5 に示す。送信元ノード (Src) から RREQ が送信され、Sink が RREP を返信し、経路探索が終了した際のノードが保持する情報が示されている。Sink は最初に

受信した RREQ に記載されている経路に、パス番号 (1) を付与した RREP を返信する。図では F, E, D を経由し、Src で受信される。Sink はその後も RREQ を受信すると、その RREQ に記載されている経路に、順にパス番号を付与し返信する。ノードは RREP を受信した際、自身が中継ノードであるかを RREP に記載されている経路をもとに判断する。中継ノードでなかった場合は、干渉が生じる可能性のある経路として、オーバヒアした RREP のパス番号を記録し、破棄する。図中では、H が RREP(1) を、B が RREP(1) と (2) をオーバヒアしており、その情報を記録している。中継ノードであった場合は、RREP に付与された Src に対するパス番号と、そのパスを用いて Sink へ送信する際の Next Hop をテーブルに保持し、中継する。中継の際、それまでにオーバヒアしたパス番号を中継する RREP に記載し、送信する。図中では、B, H はオーバヒアパス情報を保持しているため、中継する RREP にその情報を記載し送信する。Src は RREP を受信すると、RREP のパス番号、Sink への Next Hop、オーバヒアパス番号、Sink までの hop 数を経路表に書き込む。Src は経路表を見て、最初に RREP が帰ってきたパス番号 (1) の経路を最短経路として確立する。次に、最短経路を除いた経路のオーバヒアパス情報を比較し、他経路と干渉が

表 1 データの重要性に対応したサービスクラス
Table 1 Classification of path using for each classes of importance.

サービスクラス	利用経路	効果
クラス S	最短経路（遅延なし）と独立経路（遅延あり）	最重要データを扱うため、最短経路で迅速に送信し、独立経路にも送信してより確実に送信
クラス A	独立経路（遅延あり）	重要データを扱うため、複製して独立経路に送信し、重要データ収集のロバスト性を向上
クラス B	最短経路（遅延あり）	低重要データであるため、複製せず最短経路のみに送信しネットワーク負荷を回避すると同時に他パケットの邪魔をしない

ない経路を独立経路として確立する．図では、パス (2) と (3) が干渉しているため、この 2 つの経路は独立経路とはせず、どの RREP もオーバヒアしていないパス (4) を独立経路として確立する．伝送の際にどのパスを実際に利用するかは 4.2.2 項で説明する選択フェーズにて決める．

4.2.2 選択フェーズ

選択フェーズでは、パケット送信の際に利用する経路の本数・種類を決める．これは傷病者の優先度とデータの重要性から決まる．送信元ノードが Sink から RREP を 1 つ以上受信してから実際に利用する経路を決定する．送信元ノードでは、ネットワーク中の他傷病者の状態に応じて自身が発するデータの重要性を決定し、そのデータの重要性に応じて 3 つのサービスクラスに分類する．本提案では提供ロバスト性の異なる複数のサービスクラスを提供する．表 1 にデータの重要性に対応したサービスクラスとその利用経路を示す．

Sink は RREP に全体の被害状況評価値 $Eval_{avg}$ を付加する． $Eval_{avg}$ は、ネットワーク内に存在する傷病者の状況を平均化して、どの程度の重症度の傷病者がいるかを判断する指標として用いることができる．赤タグ傷病者の評価値を $eval_r$ 、黄タグ傷病者を $eval_y$ 、緑タグ傷病者を $eval_g$ 、黒タグ傷病者を $eval_b$ とし、平均 $Eval_{avg}$ を算出する．この各タグの評価値は、電子トリアージタグを用いて決定される色の重要性にそった重要性順位を意味している．重要性順位は赤タグ > 黄タグ > 緑タグ > 黒タグの順であり、順位が高いほど、評価値は大きい値を設定する．算出した $Eval_{avg}$ を用いて選択フェーズで重要性に応じたパス多重度可変を実現する．把握できている傷病者数全体を n 、赤タグの傷病者数を n_{red} 、黄タグの傷病者数を n_{yellow} 、緑タグの傷病者数を n_{green} 、黒タグの傷病者数を n_{black} とすると算出式は次のようになる．

$$Eval_{avg} = \frac{n_{red} \times eval_r + n_{yellow} \times eval_y + n_{green} \times eval_g + n_{black} \times eval_b}{n} \quad (1)$$

ノードは自身の色タグ評価値 $eval_{self}$ と算出した被害状況平均値 $Eval_{avg}$ を比較する． $eval_{self} > Eval_{avg}$ の場合、自身の送信するパケットは周囲のノードの送信するパケットと比較してデータの重要性が高いと判断できる．このような重要性が高いデータはクラス A に分類され、確実に伝送するために独立経路に複製して送る．

一方、 $eval_{self} \leq Eval_{avg}$ の場合、収集されている情報に比べ、自身の送信するパケットの方が重要性が低いと判断できる．このような重要性の低いデータはクラス B に分類され、ネットワークに負荷をかけないように複製をせずに最短経路を用いて伝送する．

クラス S に分類されるデータは最重要データである急変を知らせるデータ（急変データ）である．クラス S に関しては、サービスクラスの分類を行う際、色タグ評価値 $eval_{self}$ と被害状況平均値 $Eval_{avg}$ は使用しない．傷病者の病状急変を知らせる最重要データであるので、最短経路と独立経路すべてへ複製を送り、迅速かつ確実に伝送する．

もし探索フェーズの段階で経路が構築されていなかった場合には、改めて RREQ を送信して探索フェーズを始め経路を発見する．経路発見後、選択フェーズの動作を行う．

4.2.3 送信フェーズ

送信フェーズでは、選択フェーズで選択された経路にパケットを送出する．パケット伝送時に各ノードがランダム遅延 $delay$ を発生させて送信することで、他経路を流れる複製した同一パケットの衝突を防ぐ．また、最大遅延時間を制限することで、送信周期内にデータを Sink まで伝送することが可能となる．

各ノードは中継時にランダム遅延を発生させる．送信元ノードが保持するパスの送信元ノードから Sink までの hop 数をもとに、送信周期内にデータが Sink に届くように遅延時間を算出する．遅延時間は式 (2) により計算できる．

$$delay = \frac{T}{Hops} \times \beta (0 \leq \beta < 1) \quad (2)$$

ここで、送信周期を T (sec/packet)、送信元ノードから Sink までの hop 数を $Hops$ 、 β を乱数とする．各中継ノードが一ノードで許容できる最大遅延量 $\frac{T}{Hops}$ に乱数 β をかけ合わせて遅延時間を決定することで、送信周期内に Sink までデータを伝送することができ、次のパケットが生成する前に各ホップを送りぬけることができる．ただし、クラス S の急変データを伝送する最短経路は迅速に届ける必要があるため、遅延は発生させない．

4.2.4 経路変更フェーズ

経路変更フェーズでは、経路途中での必要に応じた経路切替えを実現する．経路破損やリンク切れが発生し、次ホップとの通信を行うのに障害があると判明した際、探索フェーズ

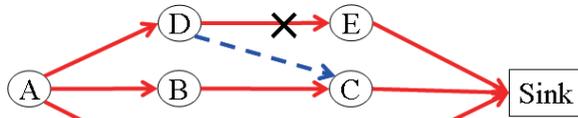


図 6 経路変更フェーズの例
Fig.6 Switch phase.

に戻って経路再構築を最初から行うのではなく、すでに発見されている経路で代替する。たとえば、図 6 のノード A のように経路をたどっていく際、リンク切れを検知したノード D は、自身がそのとき伝送しているデータの伝送を周辺ノードにブロードキャストし、代わりに Sink へ送信してもらおう。全ノードは Sink への経路を保持しているため、ブロードキャストを受け取ったノードは、同一送信元ノードのからの経路を保持していない場合でも、自身の保持する Sink への経路を利用したデータの代替伝送が可能となる。周辺ノードへ代替伝送依頼を行った中継ノードは切替え通知 (Nos) を送信元ノードへ送信し、経路が使用不能になったことを送信元ノードに通知する。こうすることで、以降のパケット送信の際に使用する経路の調整ができるようになる。

また、リンクの輻輳や通信エラーで届かなくなった場合の対処もこのフェーズで行う。複製生成を中断し、探索フェーズで見つけた経路それぞれに対し、1 つのパスに送っていく。複製の生成をしないことにより、ネットワーク全体でのパケット量を制限する。

5. 評価

提案手法 VPMR の有効性を示すため、シミュレータを用いて評価する。

5.1 シミュレーションモデル

表 2 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、列車事故のような特定の範囲に数百人規模の傷病者が発生し、その事故現場においてトリアージを行う状況を想定している。200 m × 200 m の範囲で、ネットワークに存在できる最大ノード数は 100 から 200 まで変化させ、10 回ずつシミュレーションを行った。ノードはランダム配置でネットワークに参加し、色の重要性が高いノード順 (赤, 黄, 緑, 黒) にネットワークから離脱する。ノードの色割合はそれぞれ全体の 1/4 とする。重要性順位を示す評価値 $eval_r, eval_y, eval_g, eval_b$ は 4, 3, 2, 1 を使用した。本シミュレーションではデータ種

表 2 シミュレーションパラメータ
Table 2 Simulation Parameters.

シミュレータ	QualNet version 4.5.1 ¹⁶⁾
シミュレーション時間	3 時間
シミュレーションエリア	200 m × 200 m
ノード参加開始時間	0 秒
ノード参加率	2 ノード/分
ノード離脱開始時間	1 時間 20 分後
ノード離脱率	0.2 ノード/分
データ生成レート	0.1 回/秒
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	100 ~ 200
試行回数	10
ノード色割合 (赤:黄:緑:黒)	1:1:1:1
$eval_r, eval_y, eval_g, eval_b$	4, 3, 2, 1
急変率	10%

類ごとの 1 パケットに関して評価することが目的があるため、実環境において全体の 10% の傷病者が急変することはないと考えられるが、急変データは全ノードのうち 10% が発生させることとする。本シミュレーションにおいて、データ送信周期は 10 秒とした。

評価項目としては、傷病者の優先度 (色の重要性) の違いにおけるパケット到着率、遅延許容量と到着率、オーバーヘッド量、帯域利用量を計る。

5.2 パケット到着率

図 7 に関連研究 AOMDV を、図 8 に提案手法 VPMR を利用した際の 1 パケットのパケット到着率の結果を示す。AOMDV ではデータ重要性による色ごとのパケット到着率の差別化はできない。一方で、VPMR ではデータ重要性による色ごとのパケット到着率の差別化ができており、治療優先度の高い色順 (データの重要性が高い順) にパケット到着率が高くなっている。また、急変・赤に関してはノード数の増加によりネットワーク負荷が大きくなった環境でも、パケット到着率は他の色に比べて高到着率を維持していることが確認できる。これは、送信元ノードが優先的に処理を行えるようにしたことで、その成果が得られている。VPMR では重要性の高いデータパケットの到着率を向上しており、重要データの伝送のロバスト性を向上させて送信できた。

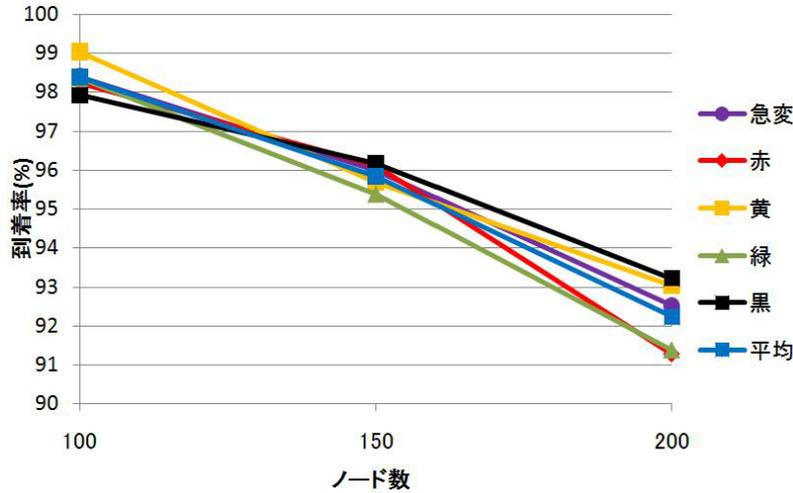


図 7 AOMDV 利用時のパケット到着率
Fig. 7 Arrival rates when AOMDV.

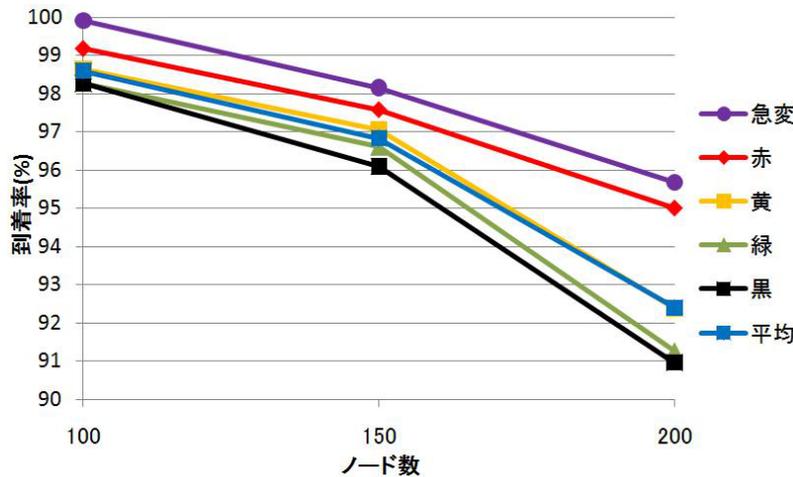


図 8 VPMR 利用時のパケット到着率
Fig. 8 Arrival rates when VPMR.

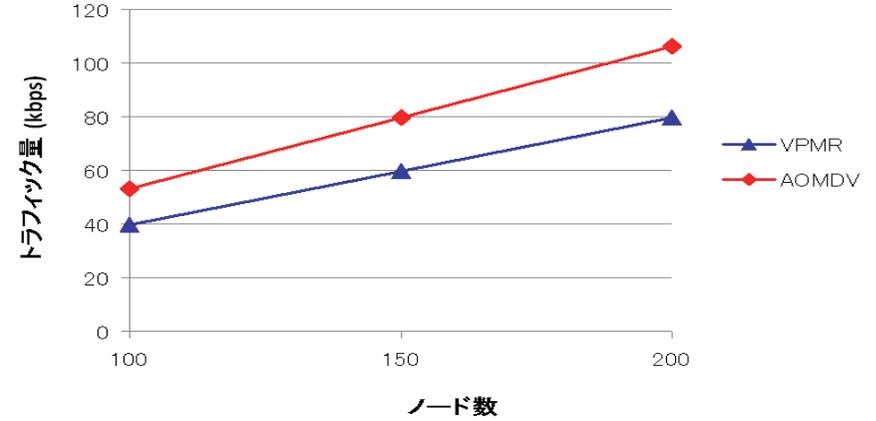


図 9 帯域利用量
Fig. 9 Amount of traffic.

5.3 帯域利用量

帯域利用量を図 9 に示す。帯域利用量は、AOMDV に対して VPMR は 75%程度となった。これは、AOMDV は利用する複数経路がノードが重複していないだけであるのに対し、VPMR では利用する複数経路を限定的にしているためである。通信量を抑えることは、電力消費量の削減への効果もある。

5.4 End-to-end 遅延

図 10 に End-to-end 遅延の結果を示す。AOMDV は全パケットが 3 秒程度になっているが、これはパケットの重要性に関係なく伝送が行われているためである。クラス S の遅延が非常に小さいのは、最短経路に送信した分が遅延なく送られるため、このような結果になる。また、クラス A、クラス B の結果では、送信周期の 10 秒以内に伝送ができており、表示間隔は保っている。クラス A の方がクラス B よりも小さい遅延を得られたのは、クラス A では複製してから独立経路に送っており、短時間で届くものもあるのに対し、クラス B では最短経路のみであるため、乱数で得られる各中継ノードで発生させる遅延に差がでるためである。トリアーゼネットワークで要求される、最重要データを扱うクラス S の迅速な伝送、そして重要データ、低重要データを扱うクラス A、B の送信周期内伝送が確認できた。

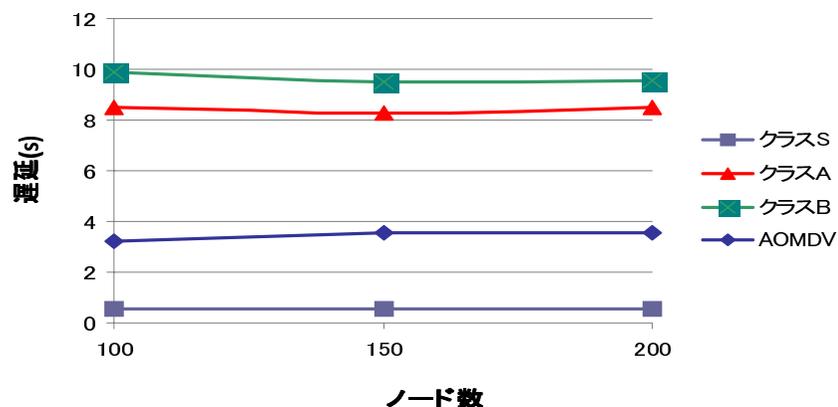


図 10 End-to-end 遅延
Fig. 10 End-to-end delay.

6. おわりに

本論文では、送信元ノードごとに利用できる経路の本数、種類を決定することにより、経路破損やリンク切れに対する重要性の高いデータの伝送のロバスト性を向上させる手法 VPMR (Variable Path Multiplicity Routing) を提案した。提案手法では、データの重要性和ネットワーク全体の状況の違いに着目し、送信元ノードごとに経路の本数、種類を決定し、重要データの伝送のロバスト性を向上させる。そうすることで、重要性の低いパケットの送出を止めずに重要データの伝送のロバスト性を向上させることを実現する。また、計算機を用いたシミュレーションにより、治療優先度の高い色順（データの重要性が高い順）にパケット到着率が高くなり、急変・赤に関してはノード数の増加によりネットワーク負荷が大きくなった環境でも、パケット到着率は他の色に比べて高到着率を維持していることから伝送のロバスト性を向上させることができた。帯域利用量は 75%程度に抑えられ、End-to-end 遅延の評価で、定期的な監視を行うパケットと迅速な通知が必要なパケットとに分類し送信周期内伝送が確認できた。

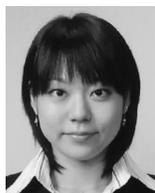
参 考 文 献

1) West Japan Railway Company. *JR-West's Business Report*, FILE NO.82-34777 (2007).

- 2) Gao, T. and White, D.: A Next Generation Electronic Triage to Aid Mass Casualty Emergency Medical Response, *Proc. 28th IEEE EMBS Annual International Conference* (Aug. 2006).
- 3) Fujii, S., Uchiyama, A., Umedu, T., Yamaguchi, H. and Higashino, T.: An off-line algorithm to estimate trajectories of mobile nodes using ad-hoc communication, *Proc. 6th Annual IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2008)*, pp.117–124 (2008).
- 4) 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)*, pp.262–273 (2006).
- 5) Zigbee alliance: Zigbee specification v1.0. www.zigbee.org (2005).
- 6) G-net. <http://members.jcom.home.ne.jp/mikedo/>
- 7) Adibi, S. and Erfani, S.: A Multipath Routing Survey for Mobile Ad-Hoc Networks, *IEEE CCNC 2006*, Vol.2, pp.984–988 (2006).
- 8) Wang, L., Zhang, L., Shu, Y. and Dong, M.: Multipath Source Routing in Wireless Ad Hoc Networks, *CCECE 2000*, pp.984–988 (2000).
- 9) Ducatelle, F., Caro, G.D. and Gambardella, L.M.: Ant Agents for Hybrid Multipath Routing in Mobile Ad Hoc Networks, *Wireless On-demand Network Systems and Services 2005*, pp.44–53 (2005).
- 10) Bohacek, S., Hespanha, J.P., Lim, C. and Obraczka, K.: Hierarchical Max-Flow Routing, *IEEE GLOBECOM 2005*, Vol.1, pp.545–550 (2005).
- 11) He, T., Stankovic, J.A., Lu, C. and Abdelzaher, T.: SPEED: A Stateless Protocol for Real-Time Communication in Sensor Networks, *IEEE ICDCS 2003*, pp.46–55 (2003).
- 12) 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).
- 13) 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).
- 14) Gkantsidis, C., Hu, W., Key, P., Radunovic, B., Rodriguez, P. and Gheorghiu, S.: Multipath Code Casting for Wireless Mesh Networks, *Proc. 2007 ACM CoNEXT*, No.10 (2007).
- 15) Marina, M.K. and Das, S.R.: Ad hoc on-demand multipath distance vector routing, *Wireless Communications and Mobile Computing*, Vol.6, pp.969–988 (2006).
- 16) QualNet: QualNet user manual. <http://www.scalable-networks.com>

(平成 22 年 3 月 30 日受付)

(平成 22 年 10 月 4 日採録)



小林ひかる（学生会員）

2009年慶應義塾大学理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。



田村 寛樹（学生会員）

2010年慶應義塾大学理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。



友澤 弘充（学生会員）

2008年慶應義塾大学理工学部情報工学科卒業。2010年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年みずほ情報総研株式会社入社。



重野 寛（正会員）

1990年慶應義塾大学理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年同大学理工学部情報工学科助手（有期）。現在、同大学理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。



岡田 謙一（フェロー）

慶應義塾大学理工学部情報工学科教授、工学博士。専門は、CSCW、グループウェア、ヒューマン・コンピュータ・インタラクション。『ヒューマンコンピュータインタラクション』（オーム社）、『コラボレーションとコミュニケーション』（共立出版）をはじめ著書多数。情報処理学会誌編集主査、論文誌編集主査、GW研究会主査等を歴任。現在、情報処理学会 MBL 研究会運営委員、BCC 研究グループ主査、日本 VR 学会理事、CS 研究会委員長。情報処理学会論文賞（1996年、2001年）、情報処理学会 40 周年記念論文賞、日本 VR 学会 サイバースペース研究賞、IEEE SAINT'04 最優秀論文賞を受賞。情報処理学会フェロー、IEEE、ACM、電子情報通信学会、人工知能学会各会員。