

トリアージ支援ネットワークにおけるノードの搬送優先度を 考慮した連結支配集合決定アルゴリズムの検討

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

大規模事故や災害発生時により多くの人命を救うために行われるトリアージにセンサネットワークを適用した救命救急支援システムの研究が活発に行われている。トリアージの現場において、医療従事者は頻繁に移動し、傷病者は順次医療機関へ搬送される。そのため、傷病者の生体情報を収集する際、医療従事者のモビリティと傷病者に取り付けられた電子タグのネットワークからの離脱を考慮して経路制御を行わなければならない。そこで本稿では医療従事者のモビリティに対応するために搬送優先度を考慮した連結支配集合決定アルゴリズムを提案する。搬送優先度を考慮して連結支配集合を選択することで電子タグがネットワークから離脱した際に連結支配集合の再選択回数とそれに伴うメッセージ交換回数を低減させることができる。これを計算機を用いてシミュレーション評価を行い、提案手法の有効性を検討する。

Examination of Connected Dominating Set Determination Algorithm Considering Transportation Priority in Triage Support Network

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

Currently it is actively researched that lifesaving emergency support system that applies sensor network to triage executed to save a lot of lives. Doctors move frequently on the site of triage and patients are transported to medical institution. Therefore, it is necessary to control the route while considering doctor's mobility and the departure of electronic tag in the network. So in this paper, we propose CDS(Connected Dominating Set) determination algorithm that considers the transportation priority. When electronic tags secede from the network, the re-selection frequency of CDS and the message switching frequency can be decreased in consideration of the transportation priority. We evaluate our proposal by simulation and entertain this effectiveness.

1. はじめに

阪神淡路大震災の教訓から、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、より多くの人命を救うためにトリアージ¹⁾と呼ばれる救命救急方式が導入されてきている。トリアージでは生体情報である脈拍数、自発呼吸数、血中酸素濃度から傷病者を赤、黄、緑、黒の4カテゴリーに分類し、搬送優先度を決定する。現在、傷病者の色分けには紙製のトリアージタグが使用されており、医療従事者がこのトリアージタグに傷病者の生体情報を記入することでタグの色を決定する。このトリアージは、JR 福知山線列車脱線事故の際に初めて適用され、多数の人命救助に貢献した²⁾。これに対し、トリアージタグを電子化して(以降、電子タグと呼ぶ)傷病者の位置や病状変化を監視・収集する救命救急システムの研究が活発に行われている³⁾⁴⁾。このシステムではタグを無線端末として用いてネットワークを構築し、傷病者の生体情報を自動的に収集することができる。これにより、医療従事者は的確に急変患者や傷病者へ手当を施すことができるようになる。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の生体情報を収集するネットワークを本稿ではトリアージ支援ネットワークと呼ぶ。

医療従事者はトリアージ支援ネットワークを介して生体情報を収集し、その情報を基に傷病者の監視を行い、更に傷病者が急変した場合直ちに処置を施す。そのため、医療従事者は各傷病者の生体情報をリアルタイムに把握する必要がある。しかし、現場にいる医療従事者はトリアージや処置のために移動し、生体情報が送信される経路が頻繁に変更されてしまう。これにより、経路破損が生じて生体情報を損失する可能性が高くなる。そのため生体情報を収集する際、医療従事者のモビリティを考慮して経路制御を行う必要がある。このような場合、連結支配集合を用いて物理的なネットワークの上に仮想インフラを構築し、特定の無線端末のみで経路探索を行うことが有効である⁶⁾⁷⁾⁸⁾。仮想インフラとは経路制御を行うために使用される仮想的な基幹ネットワークのことである。この仮想インフラを利用することで、経路探索を行う際に発生するメッセージの衝突や重複を抑えることができ、経路の構築

^{†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
JST CREST

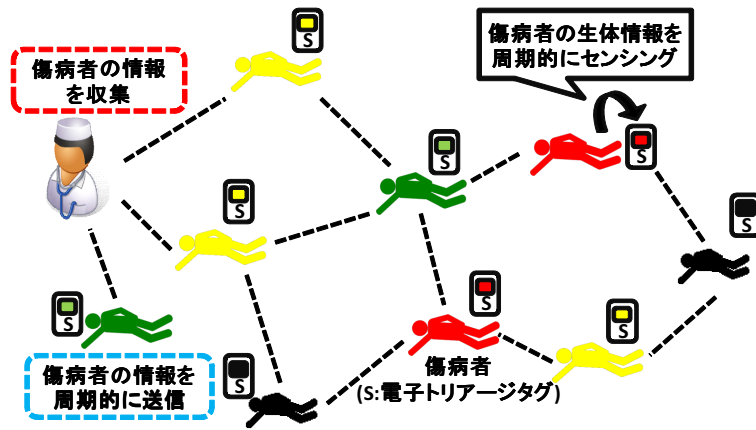


図 1 トリアージ支援ネットワークのイメージ図
Fig. 1 Image of triage support network

が行いやすくなる。しかし、トリアージ支援ネットワークでは順次傷病者が医療機関へ搬送されていくため、電子タグがネットワークから離脱していく。この時、仮想インフラに選択されている電子タグが離脱すると仮想インフラを利用する電子タグが医療従事者へ生体情報を送信できなくなる。

そのため、仮想インフラに選択されているタグはネットワーク内に長期間存在することが望ましい。そこで本稿では、仮想インフラを構築するために傷病者の搬送優先度を考慮した連結支配集合決定アルゴリズム CTP-CDS(Considering Transportation Priority-Connected Dominating Set) を提案する。本提案は搬送優先度が低い傷病者の電子タグを積極的に CDS に選択し、仮想インフラの分断を回避する。また、これにより CDS の再構築回数とそれに伴うメッセージ交換回数を低減させることができる。提案手法と異なるパターンの CDS 決定アルゴリズムを計算機を用いたシミュレーションにより比較し、本提案により CDS の離脱率とメッセージ交換回数の抑制を示す。

2. トリアージ支援ネットワーク

トリアージ支援ネットワークと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トリアージタグから生体情報を自動的に医療従事者へ送信するためのネットワークである。図 1 にトリアージ支援ネットワークのイメージ図を示す。ここで使用されるトリアー

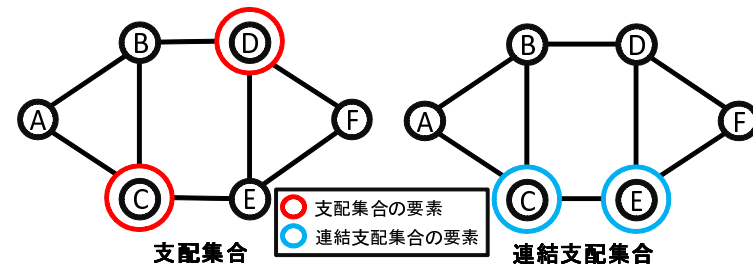


図 2 支配集合と連結支配集合

Fig. 2 Dominating Set and Connected Dominating Set

ジタグは電子化されており、医療従事者が病状を入力することで傷病者の色分けが行われ、搬送優先度が決定される。また、傷病者の生体情報を周期的にセンシングし、それを医療従事者に送信する。搬送優先度は赤、黄、緑、黒の順に設定されており、搬送優先度が最も高い赤色の傷病者から順次、医療機関へ搬送されていく。またこの電子タグには ZigBee⁵⁾ に準拠した無線チップが組み込まれており、これを用いてアドホックネットワークを構築することができる。これによりリアルタイムに生体情報を収集することが可能になる。

トリアージが実際に行われる現場では、医療従事者はトリアージや処置のために頻繁に移動し、傷病者から医療従事者までの送信経路が破損してしまう。これにより、医療従事者が傷病者の状態をリアルタイムに把握できなくなる。そのため、仮想インフラを構築し、医療従事者のモビリティに対応する必要がある。本稿では、傷病者をノード、医療従事者をモバイルシンクと呼ぶこととする。

3. 関連研究

本節では、本提案で仮想インフラを構築するために必要となる CDS について説明し、分散型の CDS 選択手法である Wu and Li's アルゴリズム¹⁰⁾ について述べる。

3.1 連結支配集合

連結支配集合 (Connected Dominating Set: CDS) とは、無向グラフ $G = \{V, E\}$ が与えられた時に $S (\subseteq V)$ が支配集合 (Dominating Set: DS) を形成し、かつ S が連結している頂点集合のことである。連結しているとは、任意の 2 頂点間に辺がある状態のことである。

DS とは G の頂点集合 $V' (\subseteq V)$ が V' に属さないすべての頂点 v について、 v の隣接頂点のいずれか一つの V' に属するような集合のことである。DS, CDS を図 2 を用いて説明

する。DS は DS の要素が $\{C, D\}$ であるような頂点集合である。このグラフでは DS 以外の頂点である $\{A, B, E, F\}$ の隣接に少なくとも 1 つ、DS の要素である $\{C, D\}$ が存在するため、 $\{C, D\}$ は DS であるといえる。

また、CDS とは CDS の要素である $\{C, E\}$ が DS であり、かつ $\{C, E\}$ が連結しているような頂点集合のことである。このグラフでは CDS 以外の頂点である $\{A, B, D, F\}$ の隣接に少なくとも 1 つ、CDS の要素である $\{C, E\}$ が存在するため、 $\{C, E\}$ は DS であるといえる。更に、 $\{C, E\}$ は連結しているため、 $\{C, E\}$ は CDS であるといえる。

CDS は NP 困難問題と呼ばれており、最適解を多項式時間で解くことができない。最適解とは CDS の要素数の最小数である。そのため、集中型や分散型の CDS 決定アルゴリズムが数多く考えられている⁹⁾。

3.2 関連研究 Wu and Li's アルゴリズム

Wu and Li's アルゴリズム¹⁰⁾ は分散型の CDS 決定アルゴリズムである。このアルゴリズムは 2hop-Neighbor の周辺ノードの情報とユニークな ID を用いて CDS の要素を選択する。ここでは、無向グラフ $G = \{V, E\}$ が与えられているものとする。まずはじめに、2hop-Neighbor の情報を取得するために、各ノードは自身の隣接ノードを把握してから隣接ノードの情報 $N(v) = \{u \in V - \{v\} \mid \{v, u\} \in E\}$ を自身の隣接ノードと交換する。そして、自身の任意の 2 つの隣接ノードの中に連結していない組み合わせがある場合、自身が CDS の要素になる。次に各ノードは自身に割り振られたユニークな ID である $id(v \in V)$ と $N[v] = N(v) \cup \{v\}$ を用いて CDS を縮小させる。ノード v の隣接ノードの中に $N[v] \subseteq N[u]$ かつ $id(v) < id(u)$ が成り立つ組み合わせが存在する場合、ノード v は CDS から離脱する。さらに、 $u, w \in N(v)$ の組み合わせの中に $N(v) \subseteq N(u) \cup N(w)$ かつ $id(v) = \min(id(v), id(u), id(w))$ が成り立つ場合もノード v は CDS から離脱する。これにより、CDS の要素を決定することができる。

しかし、このアルゴリズムはグラフが完全グラフの場合 CDS を選択することができない。これは自身の任意の 2 つの隣接ノードの中に連結していない組み合わせがないためノードが CDS に選択されないからである。またこのアルゴリズムをトリアージ支援ネットワークの仮想インフラ構築のために用いた場合、傷病者の搬送によって頻りに CDS の再構築が発生してしまう。このアルゴリズムは CDS を選択する際にユニークな ID と 2hop-Neighbor の情報を基に CDS を選択する。そのため、ID の割り振り方によって搬送優先度が高いノードがネットワークから離脱する可能性が高まり、CDS の再構築が頻りに生じてしまう。こ

のノードの離脱によって仮想インフラが分断し、各ノードがモバイルシンクへデータを送信できなくなる。またそれに伴い、再構築のために発生するメッセージ交換回数も増加する。よって、仮想インフラを構築する場合、ネットワークからのノードの離脱順番を考慮して CDS を選択し仮想インフラの分断回数を抑える必要がある。

4. 提案手法 CTP-CDS

本節では、トリアージ支援ネットワークにおけるノードの搬送優先度を考慮した連結支配集合決定アルゴリズム CTP-CDS(Considering Transportation Priority-Connected Dominating Set) を提案する。

4.1 提案概要

本提案は、医療従事者へ傷病者の生体情報を送信するために利用される仮想インフラの分断回避と再構築に伴うメッセージ交換回数の低減を目的としている。

トリアージ支援ネットワークのようなシンクが移動する環境では仮想インフラを構築し、その上で経路探索を行うことが有効である。仮想インフラを構築することで経路探索を行う際に発生するメッセージの衝突や重複を抑えることができ、モバイルシンクまでの経路構築が行いやすくなる。しかし、トリアージ支援ネットワークのようなノードがネットワークから頻りに離脱していく環境では、仮想インフラに選択されているノードが離脱することで経路が破損し、生体情報を医療従事者へ送信できなくなる。そのため、仮想インフラに選択されたノードはネットワーク内に長期間存在することが望ましい。そこで、本提案ではノードの搬送優先度を考慮して CDS を選択し、これを仮想インフラに使用する。ノードの搬送優先度を考慮することで、仮想インフラに選択されたノードの離脱する確率を低くすることができる。また仮想インフラの再構築のために発生するメッセージ交換回数も低減させることができる。本提案では無向グラフ $G = \{V, E\}$ が与えられているものとする。また隣接ノードの集合 $N(v) = \{u \in V - \{v\} \mid \{v, u\} \in E\}$ を Open Neighbor Set、ノード v の隣接ノードの集合と自ノードの和集合 $N[v] = N(v) \cup \{v\}$ を Closed Neighbor Set と呼ぶ。また、CDS に選択されたノードを CDS ノードと呼ぶこととする。

本提案は以下の 4 つのフェーズで構成されており、以下に各フェーズの概要を示す。

- 初期化フェーズ：以後のフェーズに備え 2hop-Neighbor の情報収集し、自身をあらかじめ CDS ノードに選択する。
- 第一 CDS 縮小フェーズ：自ノードと隣接ノードの Closed Neighbor Set を比較し、CDS ノードの数を減らす。

- 第二 CDS 縮小フェーズ: 自ノードと任意の 2 つの隣接 CDS ノードの Open Neighbor Set を比較し, CDS ノードの数を減らす.
- 再構築フェーズ: CDS ノードの離脱を検出し, CDS を部分的に再構築する.

4.2 初期化フェーズ

初期化フェーズでは, 第一, 二フェーズのために 2hop-Neighbor の情報の収集と自ノードをあらかじめ CDS の要素とする. 自ノードをあらかじめ CDS の要素とするのはグラフが完全グラフであった場合にすべてのノードが CDS に選択されないことを防ぐためである. 2hop-Neighbor の情報を収集するために各ノードは自ノードが存在することをブロードキャストで隣接ノードへ通知する. 更に, この隣接情報 $N(v) = \{u, w \in V - \{v\} \mid \{v, u\}, \{v, w\} \in E\}$ を隣接ノードへ通知し, 各ノードが 2hop-Neighbor の情報 $N\{v\} = \{N(u), N(w)\}$ を保持する. 各ノードは $N\{v\}$ を基に, 第一, 第二 CDS 縮小フェーズで CDS の要素を減らしていく.

4.3 第一 CDS 縮小フェーズ

第一 CDS 縮小フェーズでは, 離脱優先度 (Departure priority: Dp) と自ノード v の Closed Neighbor Set と隣接ノード u の Closed Neighbor Set を比較し, CDS の要素数を減らす. Dp とはノードの搬送優先度, degree 数, 電力残量, アドレスを用いて決定される. Dp が高いノードは CDS の要素数を減らす際に CDS から離脱しやすく, 低いノードは離脱しにくくなる. 図 3 に Dp の決定方法についてのフローチャートを示す. Dp は自ノード v と隣接ノード u のノードの搬送優先度, degree 数, 電力残量, アドレスを順番に比較し, フローチャートの条件分岐で true になった時点で自ノード v の $Dp(v)$ が隣接ノード u の $Dp(u)$ よりも高いと判定される. Dp を用いることで, 搬送順番が遅く, degree 数が多く, 電力残量が多いノードが CDS として選択される. 搬送順番が遅いことで仮想インフラの分断を回避できる. また, degree 数が多いことで仮想インフラに選択されるノード数を少なくできる. これにより, ノードがモバイルシンクまでの経路探索を行う範囲を狭めることができ, 経路構築が行いやすくなる. 更に, 電力残量が多いことで長期間, 仮想インフラとして駆動することができる. そのため Dp を用いることで仮想インフラに適したノードを選択することができる.

CDS の要素数を減らすためには, 自ノード v が CDS から離脱した際に自ノード v 以外のノードによって CDS が保たれていることが保証できなくてはならない. これを保証するためには自ノード v と隣接ノード u を比較した際に, $N[v] \subseteq N[u]$ が成立していることが必要になる. もし, これが成立しているならば自ノード v が CDS から離脱しても, $N(v)$

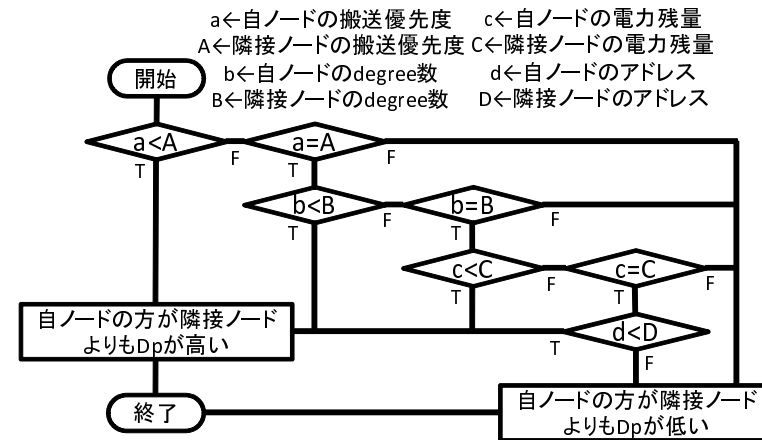


図 3 離脱優先度決定方法
Fig. 3 Decision method of departure priority

が隣接ノード u に隣接しているので自ノード v が離脱してもそれ以外のノードで CDS が保たれることが保証できる. しかし, $N[v] \subseteq N[u]$ が成立しているかどうかは, 各ノードが分散的に判断するため離脱するためのユニークな優先順位をノード間で決めなければならない. この優先順位が決定されない状態で, CDS の要素数を減らした場合, 自ノード v 以外の隣接ノードで CDS を保てなくなる. そこで本提案では, この優先順位に Dp を用いる. これにより, 分散的に各ノードが CDS からの離脱の有無を判断できるようになる. そのため, 第一 CDS 縮小フェーズでは, 自ノード v と隣接ノード u を比較した際に $N[v] \subseteq N[u]$ かつ $Dp(v) > Dp(u)$ が成立した場合に自ノード v が CDS から離脱することができる.

4.4 第二 CDS 縮小フェーズ

第二縮小フェーズでは, 離脱優先度 Dp と自ノード v の Open Neighbor Set と任意の 2 つの CDS ノードである隣接ノード u, w の Open Neighbor Set の和集合を比較し, CDS の要素数を減らす. ここで用いられる Dp は, 第一 CDS 縮小フェーズと同じ手順で決定される. 第一 CDS 縮小フェーズでは比較対象が一つの隣接ノードであったが, 第二 CDS 縮小フェーズでは 2 つの隣接ノードを比較対象とする. 第二 CDS 縮小フェーズでも同様に CDS の要素数を減らすために, 自ノード v が CDS から離脱した際に自ノード v 以外のノードによって CDS が保たれていることが保証できなくてはならない. これを保証するためには,

自ノード v と隣接ノード u, w を比較した際に, $N(v) \subseteq N(u) \cup N(w)$ が成立していることが必要になる. もし, これが成立しているならば, 隣接ノード u, w が連結していることになり, 自ノード v は CDS から離脱することができる. 更に, 自ノード v が CDS から離脱しても, $N(v)$ が隣接ノード u, w に隣接しているので自ノード v が離脱してもそれ以外のノードで CDS が保たれることが保証できる. 第二 CDS 縮小フェーズでも第一縮小フェーズと同様に優先順位に Dp を用いて, 分散的に各ノードが CDS からの離脱の有無を判断できるようにする. そのため, 第二 CDS 縮小フェーズでは, 自ノード v と隣接ノード u, w を比較した際に $N(v) \subseteq N(u) \cup N(w)$ かつ $Dp(v) = \max(Dp(u), Dp(w))$ が成立した場合に自ノード v が CDS から離脱することができる. 第二 CDS 縮小フェーズによって, CDS の要素数を更に減らすことができる.

4.5 再構築フェーズ

再構築フェーズでは, CDS ノードがネットワークからの離脱した際に離脱したノードの 2hop-Neighbor のノードによって CDS の再選択を行う. トリアージ支援ネットワークのような傷病者が搬送されていく環境では, 搬送によってノードがネットワークから離脱してしまい, 仮想インフラが分断してしまう. 本提案では, 離脱優先度 Dp を用いて CDS を選択し, 仮想インフラを構築しているがノードの離脱によって仮想インフラが分断する可能性がある. そのため, ノードが離脱した際の CDS の再選択手順を決める必要がある.

まずはじめに, 各ノードは自身の存在と自身の隣接ノードの情報を定期的に隣接ノードへ通知する. これは, CDS ノードが離脱したことを隣接ノードに認識させることと隣接ノードの情報をを用いて部分的に CDS を再選択するためである. CDS ノードの離脱を認識した隣接ノードは, 離脱したことを更に, 自身の隣接ノードに通知する. これにより, 離脱した CDS ノードの 2hop-Neighbor のノードが CDS ノードの離脱を認識することができる. 次に CDS ノードの離脱を認識した 2hop-Neighbor のノードは「初期化フェーズ」, 「第一 CDS 縮小フェーズ」, 「第二 CDS 縮小フェーズ」のフェーズを順に行い, CDS ノードを選択する. これを行うことで部分的に CDS ノードを選択することができる.

4.6 CDS ノードの選択例

図 4 に CDS の選択例を示す. まず「初期化フェーズ」において各ノードは自身が存在することを隣接ノードへ通知し, 更に自身の隣接情報を隣接ノードへ通知する. ノード B に着目すると, B は $\{A, C, E, F\}$ から B の隣接ノードであると通知され, B の隣接ノードの情報 $N(B) = \{A, C, E, F\}$ を把握する. 更に, B は $\{A, C, E, F\}$ から各ノードの隣接情報が通知されるため, B の 2hop-Neighbor の情報 $N\{B\} = \{N(A), N(C), N(E), N(F)\}$ を

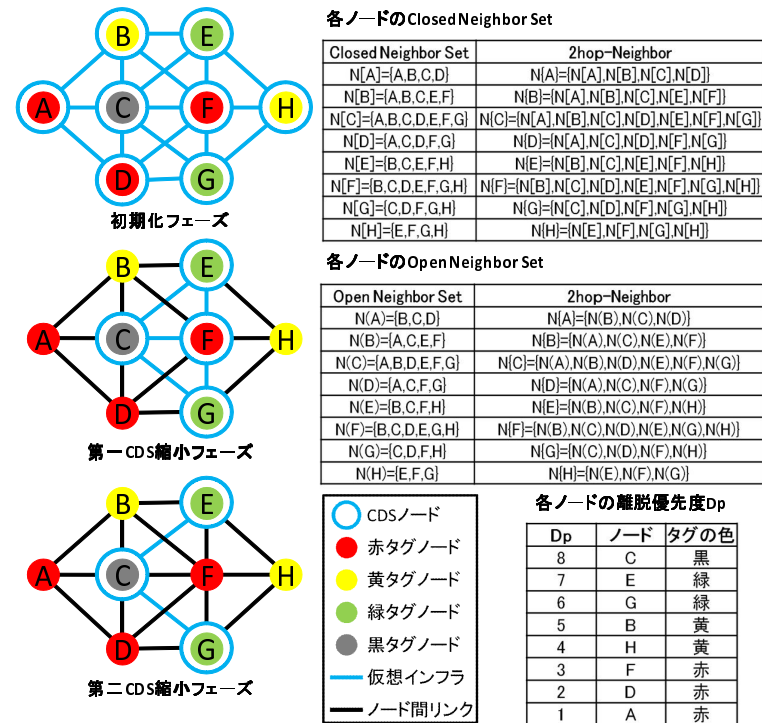


図 4 離脱優先度を用いた CDS ノードの選択例
Fig. 4 The example of selection CDS nodes using departure priority

把握する. そして, 自身を CDS ノードとする.

次に「第一 CDS 縮小フェーズ」において取得した Closed Neighbor Set の 2hop-Neighbor の情報を基に自身が CDS から離脱できるかを判断する. まず, B は自身の搬送優先度, degree 数, 電力残量, アドレスを用いて離脱優先度 Dp を決定する. B は自身と $\{A, C, E, F\}$ の搬送優先度を比較し, 自身よりも高い Dp があるかを判定する. この場合, B よりも搬送優先度が高い $\{C, E\}$ の方が Dp が高くなる. 次に, B は自身と $\{C, E\}$ の隣接ノードの情報を用いて, $N[B] \subseteq N[C]$ もしくは $N[B] \subseteq N[E]$ が成立しているかを判定する. $N[B]$ の要素は $\{A, C, E, F\}$ であり, $N[C]$ の要素は $\{A, B, D, E, F, G\}$ であるため, $N[B] \subseteq N[C]$ が成立し, B は CDS から離脱することができる. この判定を各ノードが分散的に行うこと

表 1 シミュレーション条件

プログラム言語	Java
バージョン	1.6.0
シミュレーションエリア	100m × 100m
シミュレーション終了条件	グラフの連結度が 1-connected 未満
無線到達距離	30m
ノード数	30,40,50
搬入頻度	0 ノード/分 (初期配置のみ)
搬送頻度	1 ノード/分
試行回数	500 回

で図 4 の第一 CDS 縮小フェーズのように CDS の要素数を減らすことができる。

最後に「第二 CDS 縮小フェーズ」で現在 CDS に選択されている要素 $\{C, E, F, G\}$ を更に減らす。ノード F に着目すると、Open Neighbor Set の 2hop-Neighbor の情報を用いて CDS から離脱できるかを判断する。 F の隣接ノードのうち、CDS ノードであるのは $\{C, E, G\}$ である。更に、 $\{C, E, G\}$ の D_p は F よりも高いため、 $N(F) \subseteq N(C) \cup N(E)$ 、 $N(F) \subseteq N(C) \cup N(G)$ 、 $N(F) \subseteq N(E) \cup N(G)$ のいずれか一つが成立していれば、 F は CDS から離脱することができる。 $N(F)$ の要素は $\{B, C, D, E, G, H\}$ であり、 $N(C) \cup N(E)$ の要素は $\{A, B, C, D, E, F, G, H\}$ であるため、 $N(F) \subseteq N(C) \cup N(E)$ が成立し、 F は CDS から離脱することができる。この判定を各ノードが分散的に行うことで図 4 の第二 CDS 縮小フェーズのように CDS の要素数を減らすことができる。

このように離脱優先度 D_p を考慮して CDS ノードを選択することで搬送優先度が低いノードを仮想インフラに選択することができる。これにより、傷病者の搬送による仮想インフラの分断回避と再構築に伴うメッセージ交換回数を抑えることができる。

5. シミュレーション評価

本節では、提案手法の CTP-CDS と異なるパターンの CDS 決定アルゴリズムを比較し、評価を行う。Java を用いて提案手法 CTP-CDS と他の CDS 決定アルゴリズムを実装した。

5.1 シミュレーション条件

表 1 にシミュレーション条件を示す。本シミュレーションでは、交通事故のようなある特定の地理的範囲に数十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環境を想定する。100m × 100m の範囲で、ネットワーク中の最大ノード数は 30 から 50 ま

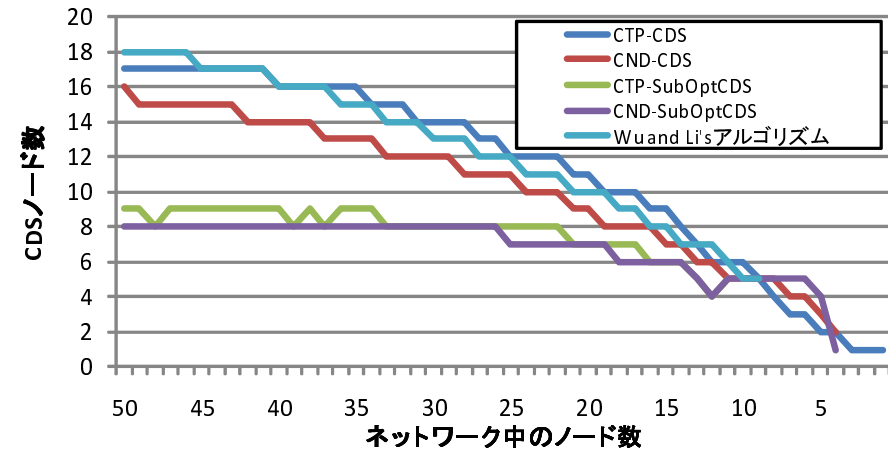


図 5 再構築による CDS ノード数の変化
Fig. 5 Change in number of CDS nodes by reconstruction

で変化させ、500 回ずつシミュレーションを行った。各ノードの電力残量は初期配置時にランダムに設定し、各ノードの搬送優先度はランダムでかつ比率もシミュレーションごとランダムに設定した。また、ネットワークからの離脱は各ノードの搬送優先度が高い順に順次行われるものとした。無線到達距離は無線 PAN の規格である ZigBee を用いた通信を想定し、30m とした。シミュレーションの終了条件は、グラフの連結を維持できなかった場合とする。本提案の CTP-CDS に加え、ノードの degree 数を考慮した CND-CDS (Considering Node Degree-Connected Dominating Set)、搬送優先度を考慮した準最適な CDS (CTP-SubOptCDS) とノードの degree 数を考慮した準最適な CDS (CND-SubOptCDS)、また Wu and Li's アルゴリズムとを比較した。ここで用いる準最適な CDS とは提案手法を用いて選択した CDS から、全探索により更に CDS の要素数を減らしたものとする。準最適な CDS はこのシミュレーション条件において、最適解の約 1.05 倍程度の大きさの CDS である。最適解とは、CDS の要素数が最も少ない解のことである。

評価項目は、CDS の再構築による時系列の CDS ノード数の変化および傷病者の搬送によって生じるネットワークからの CDS ノードの離脱率とそれに伴う CDS の再選択にかかるメッセージ交換回数である。

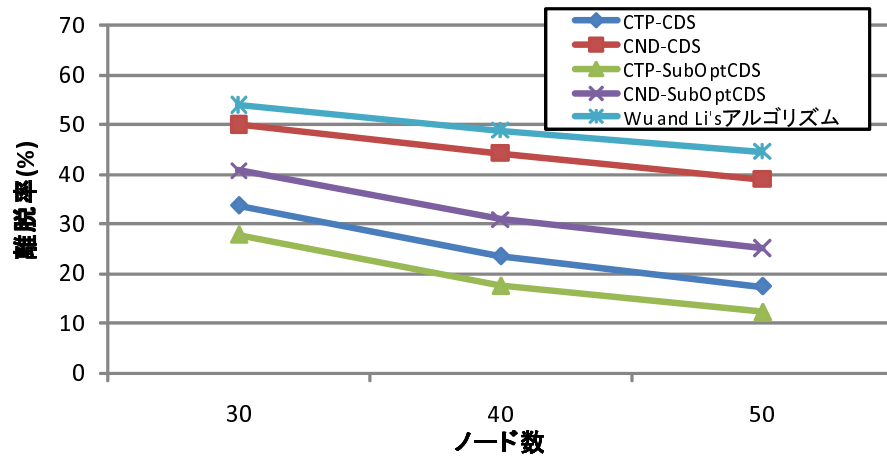


図 6 CDS ノードの離脱率
Fig. 6 Departure rate of CDS nodes

5.2 再構築による CDS ノード数の変化

図 5 にネットワーク中のノード数が 50 の場合における再構築による CDS ノード数の変化を示す。図 5 は縦軸に CDS ノード数、横軸にネットワーク中のノード数を示している。提案手法の CTP-CDS により決定された CDS ノード数は CTP-SubOptCDS, CND-SubOptCDS と比較すると 2 倍程度、多くなることが確認できる。また、提案手法と Wu and Li's アルゴリズムを比較した際、CDS ノード数が同程度であることも確認できる。このことから、搬送優先度を用いて CDS ノードを決定する場合、搬送優先度が CDS ノードの数を低減させる要因ではないことがわかる。しかし、CND-CDS を Wu and Li's アルゴリズムと比較すると 1 割程度、CDS ノード数を低減させることができています。そのため、CDS ノードの数を減少させるためにはノードの degree を考慮することが有効である。

5.3 CDS ノードの離脱率

図 6 に CDS ノードの離脱率を示す。図 6 は縦軸に CDS ノードの離脱率、横軸にノード数を示している。

提案手法の CTP-CDS は CND-CDS, CND-SubOptCDS, Wu and Li's アルゴリズムよりも離脱率を抑えていることが確認できる。提案手法は初期の段階で CND-SubOptCDS にくらべ 2 倍程度、CDS の要素数が多いが離脱率を抑えることができています。これは提案手法

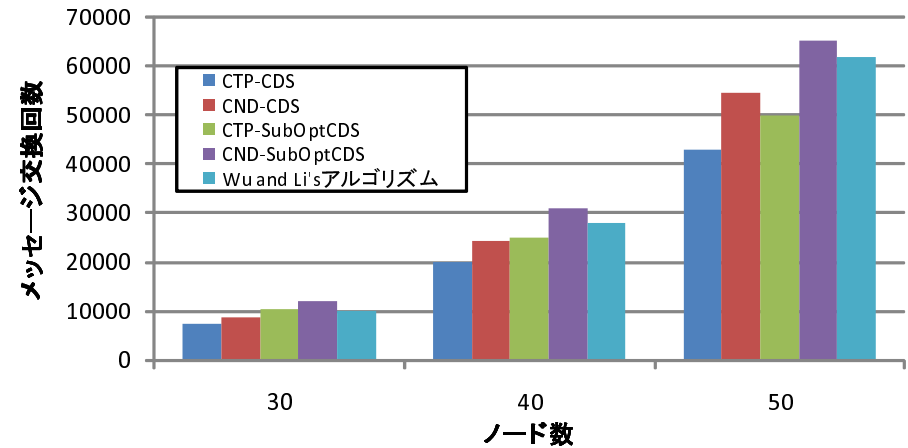


図 7 メッセージ交換回数
Fig. 7 Message exchange frequency

が搬送優先度を考慮しているため、CDS ノードが搬送されにくいからであると考えられる。また、CND-CDS と提案手法を比較すると CDS ノードの離脱率に大きな差が生じた。さらに、提案手法は Wu and Li's アルゴリズムと比べて選択される CDS の要素数にそれほど大きな差はないが、搬送優先度を考慮しているため離脱率に大きな差が生じた。これらのことから、搬送優先度が CDS ノードの離脱率に大きな影響を与えることが確認できた。このようにトリアージ支援ネットワークのようなノードの離脱順番をあらかじめ予測できるような環境では、離脱順番を考慮することで準最適なものを選択するよりも CDS ノードの離脱率を抑えることが確認できた。しかし、CTP-SubOptCDS は提案手法よりも離脱率を抑えている。これは、提案手法よりも CDS の要素数が少なく、更に CDS の要素が搬送の順番が遅いノードによって構成されているからであると考えられる。だが、CTP-SubOptCDS は CDS の要素数を提案手法によって分散的に最適解の 2 倍程度まで絞り、そこから集中的に探索を行っているため、計算量の点で問題がある。

5.4 メッセージ交換回数

図 7 に CDS の再構築に伴うメッセージ交換回数を示す。図 7 は縦軸にメッセージ交換回数、横軸にノード数を示している。

メッセージ交換回数は他の手法と比較して提案手法が最も低いことが確認できる。これは

第一に CDS ノードの離脱率を他の手法よりも抑えているためだと考えられる。離脱率が低いことで CDS ノードの再構築が生じにくくなり、それに伴うメッセージの交換を行う必要がなくなる。第二に提案手法は一回の再構築に要するメッセージの交換回数が少ないため全体で要するメッセージ交換回数を低減できる。しかし、CTP-SubOptCDS は提案手法より CDS ノードの離脱率を抑えているが、メッセージの交換回数が多い。これは CTP-SubOptCDS が CDS ノードを選択する際に分散的かつ集中的に求めているからである。集中的に CDS ノードを求めるためにモバイルノードが各ノードの接続関係を把握しなければならない。そのためメッセージの交換回数が増加してしまう。これらのことから、更にメッセージの交換回数を抑えるためには CDS ノードの離脱を抑えかつ分散的に CDS ノードを選択することが有効であるといえる。

6. おわりに

トリアージ支援ネットワークにおいて、医療従事者はトリアージや傷病者、急変患者の処置のために頻繁に移動してしまう。そのため、傷病者の生体情報が送信される経路が頻繁に変更されてしまい、それにより経路破損が生じて生体情報を損失してしまう可能性が高くなる。この問題に対して本稿では、CDS を用いて仮想インフラの構築を行うためにノードの搬送優先度を考慮した連結支配集合決定アルゴリズム CTP-CDS(Considering Transportation Priority-Connected Dominating Set) を提案した。提案手法は、ノードのネットワークからの離脱順番に着目して離脱優先度 D_p を決定し、仮想インフラである CDS ノードの離脱率とそれに伴うメッセージ交換回数を抑える。

計算機によるシミュレーションを用いて評価を行った結果、提案手法は CTP-SubOptCDS 以外のすべての手法と比較して CDS ノードの離脱率を抑えることができた。また、メッセージ交換回数に関して提案手法が最も交換回数を抑えることが確認できた。

参 考 文 献

- 1) 高橋 章子 救急看護師・救急救命士のためのトリアージ, 2008.
- 2) 兵庫県 JR 福知山線列車事故検証委員会. JR 福知山線列車事故検証報告書, 2006.
- 3) T. Gao and D. White. A Next Generation Electronic Triage to Aid Mass Casualty Emergency Medical Response. In *Proc. of the 28th IEEE EMBS Annual International Conference*, August 2006.
- 4) S.Fujii, A.Uchiyama, T.Umedu, H.Yamaguchi, and T.Higashino. An off-line algorithm to estimate trajectories of mobile nodes using ad-hoc communication. *Proc. of 6th Annual IEEE Int. Conf. on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2008)*, pp. 117–124, 2008.
- 5) 阪田史郎, 田中成興, 西室洋介, 川崎光博, 福井潔, コビキタスネットワークフォーラムセンサネットワーク部会. ZigBee センサネットワーク通信基盤とアプリケーション. 株式会社廣済堂, 2005.
- 6) Jia-Liang Lu and Valois, F. On the Data Dissemination in WSNs *Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications, 2007. WiMOB 2007. Third IEEE International Conference on*, pp. 58–67, 2008.
- 7) Hamida, E.B. and Chelius, G. Strategies for data dissemination to mobile sinks in wireless sensor networks *Wireless Communications, IEEE*, pp. 31–37, 2008.
- 8) Feng Wang and Thai, M.T. and Ding-Zhu Du On the construction of 2-connected virtual backbone in wireless networks *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, pp. 1230–1237, 2009.
- 9) Jeremy Blum, MinDing, Andrew Thaeler, Xiuzhen Cheng. Connected Dominating Set in Sensor Networks and MANETs. *Kluwer Academic Publishers*, pp. 329–369, 2004.
- 10) Wu, Jie and Li, Hailan. On calculating connected dominating set for efficient routing in ad hoc wireless networks. *DIALM '99: Proceedings of the 3rd international workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications*, pp. 7–14, 1999.