

無線ネットワークの耐障害性向上のための 無線機設置場所の助言システムについて

栗山有哉¹⁾ アサノデービッド²⁾ 鈴木彦文³⁾ 不破泰³⁾

1) 信州大学院理工学系研究科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

2) 信州大学工学部情報工学科 〒380-8553 長野市若里 4-17-1

3) 信州大学総合情報センター 〒390-8621 長野県松本市旭 3-1-1

E-mail: 1-3) {14tm509a, david, h-suzuki, fuwa}@shinshu-u.ac.jp

あらまし 我々は、2008年から長野県塩尻市において Ad-Hoc ネットワークを用いたセンサーネットワークシステムを運用している。このシステムでは、センサー端末同士で互いにパケットを交換する方式ではなく、市内に固定設置した太陽光パネルで稼働する中継機網により、端末からのパケットデータをサーバに届けるシステム構成である。また、安価で容易に構築できるインフラを採用しており、自治体が保有するカーブミラー等に中継機を設置している。そのため、十分な高さを確保できず大型トラック等の影響を受け通信路の遮断が頻繁に起こっている。その対策として、動的に経路を変更する Ad-Hoc ネットワークを採用しているが、通信路に冗長性がない場合には有効に働かない。本稿ではこの問題を考慮し、常に冗長性のあるネットワークを構築するために、グラフ理論によりネットワークの構造を解析し、有効な中継機の設置場所を助言するシステムを開発し評価した。

キーワード センサーネットワーク, Ad-hoc ネットワーク, 通信路遮断, 冗長性

A transponder location advisory system for improving fault tolerance of wireless networks

Yuya Kuriyama¹⁾ David ASANO²⁾ and Hikofumi SUZUKI³⁾ and Yasushi FUWA³⁾

1) Graduate School, Division of Science and Technology, Shinshu University, 4-17-1 Wakasato, Nagano-City, Nagano 380-8553, Japan

2) Dept. of Computer Science and Engineering, Shinshu University 4-17-1 Wakasato, Nagano-City, Nagano 380-8553, Japan

3) Integrated Intelligence Center, Shinshu University, 3-1-1 Asahi, Matsumoto-City, Nagano 390-8621, Japan

Abstract Since 2008, we have been operating an ad-hoc sensor network system in Shiojiri City, Nagano, Japan. This system sends sensor data to a data collection server by way of solar powered transponders which are in fixed locations around the city. To reduce implementation costs, the transponders are attached to city street mirrors, so the transponders are positioned at relatively low heights above the ground. Therefore, transmission is often blocked by trucks stopped in front the mirrors. To ensure that data is not lost, routing of data packets is changed dynamically, but alternate routes to the server must exist for routing changes to be effective. In this paper, we use graph theory to analyze the network topology to find transponders with no alternate routes. Based on this analysis, we develop and evaluate a system to suggest places where transponders should be added so that all transponders have alternate routes to the server.

Keywords Sensor network, Ad-hoc network, Transmission blocking, Redundancy

1. 序論

1.1. 背景

近年、無線ネットワーク技術を活用して、様々なセンシングデータを収集し、安全・安心な街作りに活かす ICT を活用したスマートシティへの取り組みが注目されている。

その中で筆者らは、地域における山中での土砂崩れの事前察知や、児童の登下校における安全確保を目的

として、山の土中水分量データや登下校中の児童の位置データをセンシングデータとして収集し、無線通信を用いてサーバまで届けるセンサーネットワークシステムを開発し、2008年度より長野県塩尻市において運用を開始している[1][2]。

本システムは、センサー端末、中継機、親機、サーバから構成され、端末-中継器-親機間は無線通信を用いている(図1)。このシステムは、次のような特徴を持つ。

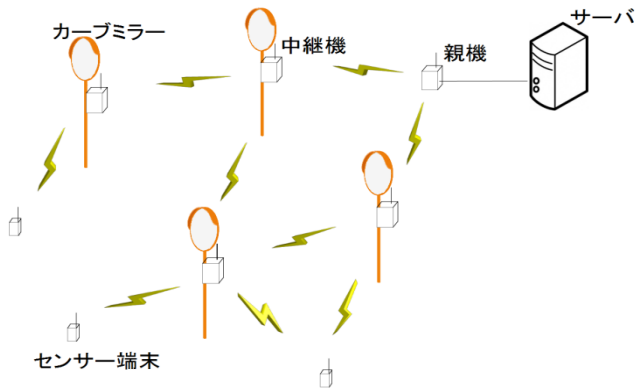


図1 センサーネットワークシステムの概要図

(特徴 1) センサー端末の電池寿命を長くするため、センサー端末間での通信は行わず、市内各地に設置した中継機がサーバまでのデータ中継を行う。

センサーネットワークシステムでは、センサー端末同士で互いにパケットを中継する方式を採用する事が多い。その場合、センサー端末が常に他の端末からのパケットを受信・中継する必要があり、端末の消費電力が大きくなり、センサー端末の電池寿命が短くなる。

そこで、市内に固定設置した太陽光パネルで稼働する中継機網により、端末からのパケットデータをサーバに届けるシステム構成を採用した。

(特徴 2) 中継機の設置を容易にするため、既存施設の低所に設置する。

通常、無線中継機は鉄塔等を建設し、高所に中継機を設置することで安定した通信を確保する。しかし、このような建設は非常に手間がかかり経費も高くなる。そのため、既存の設備を用いて容易に安価で中継網を構築できる方法として、自治体が所有するカーブミラーや街路灯等の高さ 2m 程の低所に中継機を設置することにした。

ただし、中継機を低所に設置するため、大型トラック等がその側に停車した場合に、一時的な通信遮断が頻繁に発生している。この事は 2008 年から 7 年間の運用実績においても、中継機の故障により通信が遮断されることは殆どないが、一時的な通信の遮断が頻繁に確認されている。

そこで、本システムでは各中継機が自律的にサーバまでの経路を決定するアドホックネットワーク方式を採用し、サーバまでの経路が遮断された場合にサーバまでのルートを動的に代替ルートに変更することで対応している。実際、運用状況履歴からも常に経路が動的に変更され、その結果中継機網におけるパケット損失率は常に 0.5% 以下と低く抑えられている [3]。

1.2. システムにおける問題点的

アドホックネットワークによる経路の動的な変更は、各中継機がサーバまで常に複数のルートを有していることを前提としている。しかし、中継機が市の全域に設置され、その台数が 600 台を超える塩尻市の場合、複数ルートを有していない中継機があり、それに対応してどの辺りに新たな中継機を増設すれば最も効率が良いかを人手で考えることは困難である。

1.3. 本稿の目的

本稿では、無線アドホックネットワークの各中継機において、親機まで到達できる有効な代替ルートが存在しない状況を回避するために、常に有効なルートを複数確保できるような中継機設置場所を提案するシステムの開発・評価を目的とする。

開発するシステムは次の機能を有するものとする。

(機能 1) ネットワーク内で親機まで到達できる代替ルートが少ない箇所を検出

(機能 2) 多くの中継機が複数の代替ルートを確保できるような中継機設置位置を出力

2. 耐障害性向上のための提案システム

2.1. 提案システムの概要

1.3 で述べたシステムの機能を実現するために、以下のプロセスを経て目的を達成する。

(手順 1) システム上で無線ネットワークを表現する

(手順 2) グラフ理論を用いてネットワークの構造を解析し、親機までの有効な代替ルートが少ない箇所を検出する

(手順 3) 手順 2 で求めた代替ルートが少ない箇所を基に、それらを効率的に補える新たなルートを検出する

(手順 4) 手順 3 で求めた新たなルートを確保するための中継機を増設位置を決定し出力する

2.2. 手順 1 システム上での無線ネットワークの表現

図 2 にシステム上での無線ネットワーク表現方法を示す。

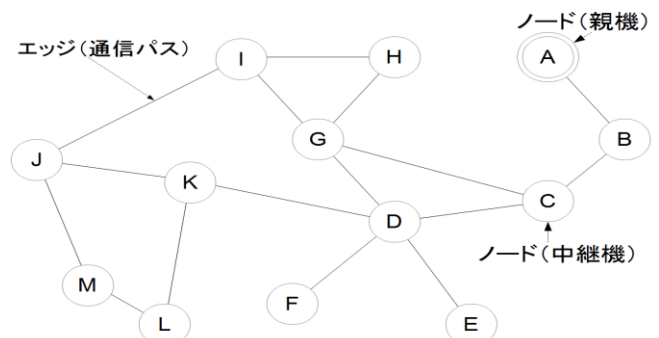


図2 システム上での無線ネットワークの表現

ネットワーク内の各中継機をノードとし、中継機同士が通信できる場合はエッジで結ぶ。図 2 のように表現することによって、無線ネットワークにグラフ理論を適用することができる。

2.3. 手順 2 代替ルートが少ない箇所の検出

提案システムでは、代替ルートが少ない箇所の検出にあたり、関節ノードと呼ばれる概念を定義した。関節ノードの定義は、そのノードが削除されることによってグラフが非連結になるようなノードを意味し、図 3 の*マークがついた B*,C*,D*のノードが該当する。

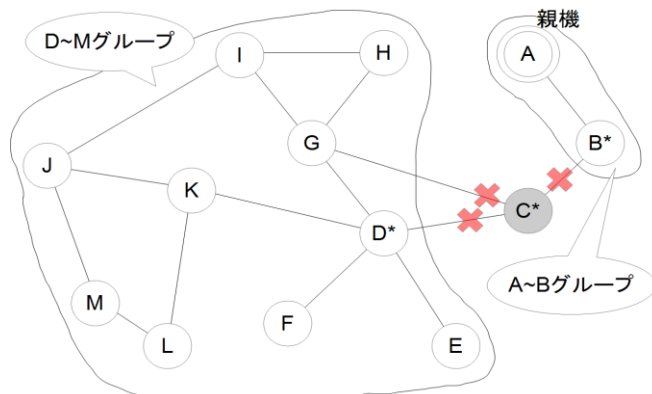


図 3 代替ルートが少ない箇所を検出するための関節ノード

例えば、図 3 において C*を削除した場合、A~B と D~M のグループに分かれるためグラフが非連結になる。ここで親機を A とした場合、D~M は親機 A まで通信できなくなる。そして、D*, I, J, L の各ノードはそれぞれ代替ルートが 3 通り以上あるにも関わらず、どれも親機まで到達できるルートが存在せず、有効な代替ルートがない状態である。この状態において D~M が A に辿りつくには D~M のノードから A~B のノードへの C*をまたいだエッジが必要となる。

このように、関節ノードを境として親機側に属さない中継機のグループは、有効な代替ルートを失いやすく、有効な代替ルートが少ない箇所と判断できる。

ただし、運用中のシステムから判明したように、中継機（ノード）自体が壊れることはなく、エッジ（通信パス）の遮断が殆どである。それでも、我々はノードの削除を考慮したアプローチで良いと考える。なぜならば、関節ノード自体が削除される事と、関節ノードからのエッジが全てなくなる事は、グラフの連結性を見る上では同義であり、関節ノードから出るエッジが何本か遮断された場合、グラフが非連結になる可能性が高くなるからである。

また、ネットワークグラフから関節ノードを検出するには、深さ優先探索 (DFS) を応用することで検出することができる [4]。

2.4. 手順 3 関節ノードを考慮した新たな通信ルート

まず、関節ノードを補いグラフが非連結になる可能性を低くするためには、関節ノードを境とした中継機グループ同士をエッジで結ぶ必要がある。そして、できる限り多くの中継機に冗長性を持たせるためにも、冗長性が確保される中継機台数を評価の対象とする。また、1 つのエッジを足すことで複数の関節ノードが補完できる場合には、それらの和を評価値とする。関節ノードを効率的に補う方法を以下に示し、その手順におけるネットワークグラフ変化を図 4~7 に示す。

(手順 1) 関節ノードが削除された時に、関節ノードの隣接ノードから親機まで、到達できるルートが確保されているか否かを把握するために、ネットワークグラフの親機を始点として、深さ優先探索の応用を手順 [4] を踏み、DFS 木を生成する。

図 4 の DFS 木では関節ノード 3 が削除された時、ノード 3 より上に配置されている中継機が親機まで到達可能で、下に配置されている中継機が親機まで到達不可能である。

(手順 2) 関節ノードを補完した場合に、冗長性を確保できる中継機数を求めるために、各関節ノードが削除された際に親機まで到達できない孤立グループを求める。例えば、関節ノード 5 の下にノード 6, 7 の 2 つのノードからなる孤立グループ C がある。また、孤立グループを線で囲み、孤立する原因である関節ノード番号と、グループ内のノード総数を保持する。

(手順 3) 各ノードがどの関節ノードの孤立グループに所属するか分かるように、孤立グループの関節ノード番号をラベリングする。また、孤立グループのノード数もラベリングしておく。例えば、ノード 6 は孤立グループ B, C に所属するため、3*:::3, 5*:::2 の 2 つのラベルがつけられる。

このラベリングのノード数の意味は、ラベル付きのノードからの関節ノードの親ノード側にエッジが加わった時に、冗長性が確保されるノード数を表している。

(手順 4) 孤立グループに所属するノードから、そのノードにラベリングされている関節ノードの親機側への新たなエッジを試す。そして、エッジ元とエッジ先のラベルの関節ノード情報を比較する。

共通でない関節ノード情報がある場合、そのラベルに記載された関節ノードを補完できたということになり、ラベルのノード数がシステムの評価値となる。共通でないラベルが複数ある場合は、複数のノード数の和が評価値となる。共通の関節ノード情報がある場合は、互いにその関節ノードの孤立グループに所属していることを意味し、それらのノード間のエッジは、関節ノードの親機側へのエッジではない。そのため、共通の関節

ノードは補完できなかったノードということになる。

例えば、ノード 6-2 のエッジを考えた場合、ノード 6 は関節ノード 3,5 の孤立グループに属していることになる。関節ノード 3,5 より上にある 2 へのエッジを加えた時、2 つの関節ノードを同時に補完することができるため、それぞれの関節ノードの孤立グループ B,C のノード数を足した値 5 が評価値となる。

(手順 5) 手順 4 を孤立ノードに属する全てのノードに対して行い、それぞれのパターンの評価値を基に降順に並べ、リストを作成する。リスト上で 1 番上に来る新たな通信ルートがシステムにおける第一候補となる。

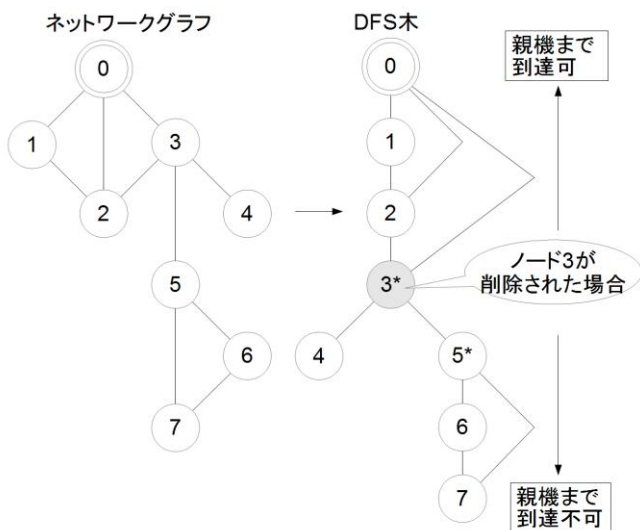


図 4 手順 1 ネットワークグラフから DFS 木を生成

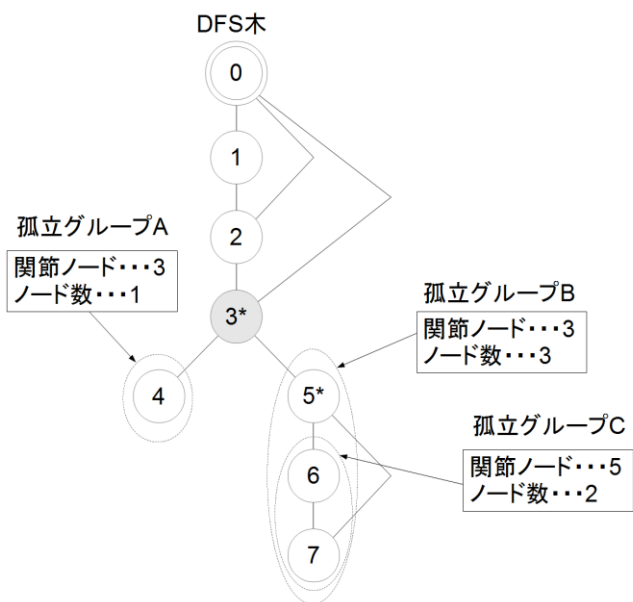


図 5 手順 2 関節ノードを境として親機から孤立する可能性のあるノード

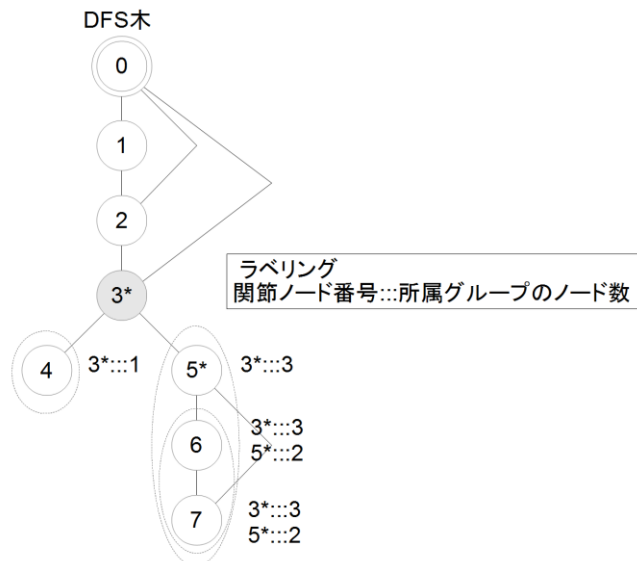


図 6 手順 3 孤立グループに所属するノードに対するラベリング

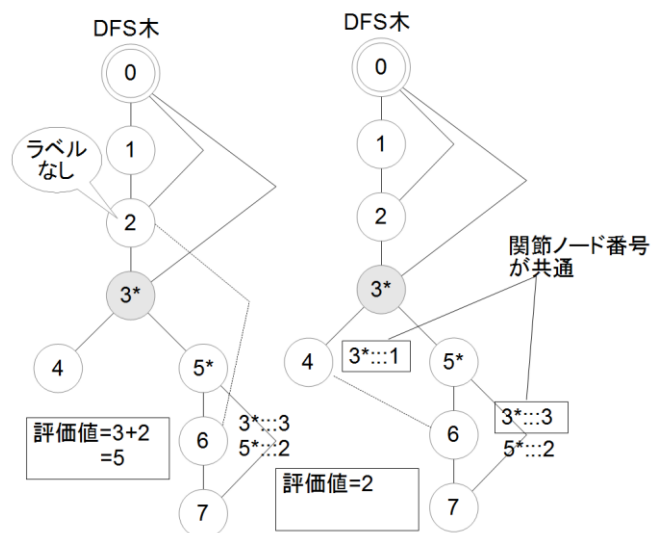


図 7 手順 4 ノード 6-2 のエッジ(左)、ノード 6-4 のエッジ(右)を新たに加えた場合の評価値

2.5. 手順 4 新たなルートを確保するための中継機の増設位置

まず、手順 3 で出力した新たな通信ルートの候補リストは、中継機間の通信距離を考慮していないため、手順 4 では通信距離を考慮したリストの作成を行う。そのために、システムを使用するユーザは、中継機の無線の特性を考慮して中継機の通信距離を設定する。

図 8 に中継機間の通信距離により、リストから削除されるパターンと削除されないパターンを示す。また、図 8 の無線ネットワークにおいて、システムの手順 3 で出力した通信ルート候補を A-H と A-E とする。まず、各ノード A,E,H を中心として、ユーザが設定した通信距

離を半径とする円を描く.図 8 では,A,H の円は互いに重なりあっているため,重なっている部分に中継機を設置することで,A-H の通信は確保される.しかし,A,E の円は互いに重なり合っていないため,中継機をどこに配置しても A-E の通信は確保されない.そのため,新たなルート候補である A,E をリストから削除する.また,A-H の通信を確保したい場合は,円が重なった範囲の中でユーザが自由に決めるものとする.これは,システムが地形情報を考慮していないためである.

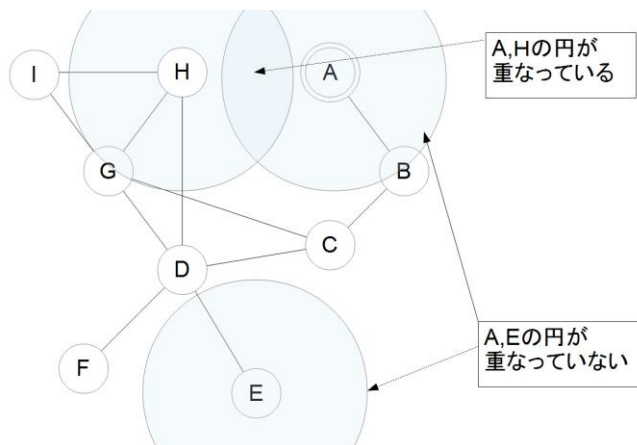


図 8 中継機の通信距離を考慮した新たな通信ルートの候補

3. 実験

本章では,提案システムにより出力された場所に中継機を増設した(新たな通信ルート加えた)場合における,ネットワークの耐障害性を確かめる実験を行う.実験エリアは桔梗ヶ原,両小野,宗賀の 3ヶ所とした.それぞれのエリア情報を表 1 に示す

表 1 実験エリア情報

エリア	トポロジー	中継機台数	エリア内の通信パス数	関節ノード数
桔梗ヶ原	メッシュ	36	63	5
両小野	直線上	21	41	6
宗賀	メッシュ	18	42	3

実験方法は「対象となるエリアに対して,システムが出力した通信ルートを新たに加えた」場合 1 と,「中継機を配置することで通信可能な距離にある中継機間の新たな通信パス加えた」場合 2 の複数パターンにおいて,耐障害性を比較した.

上記の場合 2 においての耐障害性を調べるために,それぞれのネットワークから特定の本数の通信パスを削除し,その際に通信できなくなる中継機数を求めた.また,ネットワーク内の通信パスの削除は,エリア内の通信パスから特定の本数削除する時の組み合わせパタ

ーン全てを試すものとする.そして,その全てのパターンにおいて,通信できなくなる中継機数の総和 sum を求め,耐久性の評価を行った.本実験では,削除本数を 1~4 の範囲で変動させた.

そして,場合 2 の複数のパターンを sum 値を基に昇順で並べ,リストの上位にシステムが出力した新たな加えるべき通信パスのパターンがあればシステムの有効性を示すことができる.

4. 評価

実験の結果を表 2 に示す.表 2 の列は左から実験したエリア,システムが出力した最適な補完パスの両端の中継機 ID,耐久力を評価する上での通信パスの削除本数である.結果の表記方法は○位/○中であり,分母は 3 章で示した通信可能な距離にある中継機間の通信パスのパターン数である.分子はそれらのパターンを sum 値を基に昇順に並べたときに,提案システムが上から何番目であったかを表しており,1 番であった場合はシステムの出力が最適であったとする.また,1 に近い程システムの出力が有効であったと言える.3ヶ所のエリアを比較すると,削除本数が 3 本を超えたあたりから評価値が安定し始めている.また,その評価値が安定している部分において提案システムの出力した結果が上位 2 割以内に入っている点で,システムは有効であったと言える.

表 2 実験結果

エリア	補完パス(ID-ID)	1本削除	2本削除	3本削除	4本削除
桔梗ヶ原	8353-8385	6位 /44中	14位 /44中	9位 /44中	8位 /44中
両小野	8636-8678	3位 /11中	3位 /11中	3位 /11中	3位 /11中
宗賀	8139-8615	1位 /17中	1位 /17中	1位 /17中	1位 /17中

システムの出力結果が全て最適とならない理由については,図 9 を用いて説明する.図 9 のようなネットワークの場合,提案システムは C*の親機から反対側にある 38 台からなる中継機群 X を最重要視し,X 群から C*の親ノード側へのエッジを提案する.C*からのエッジが何本か削除され C*を境にグラフが分裂してしまった場合はこの出力結果は有効に働くが,通信パスの削除本数が 2 本以下であった場合,C*から出るエッジをどのようなパターンで削除しても C*を境にグラフが分裂することはない.しかし,システムが最重要としなかった関節ノード E*ではグラフの分裂が起こってしまうため,C*を補完するエッジが無効となり,E*を補完するようなエッジが有効となる.よってシステムの出力結果とは異なったエッジが最適となる.

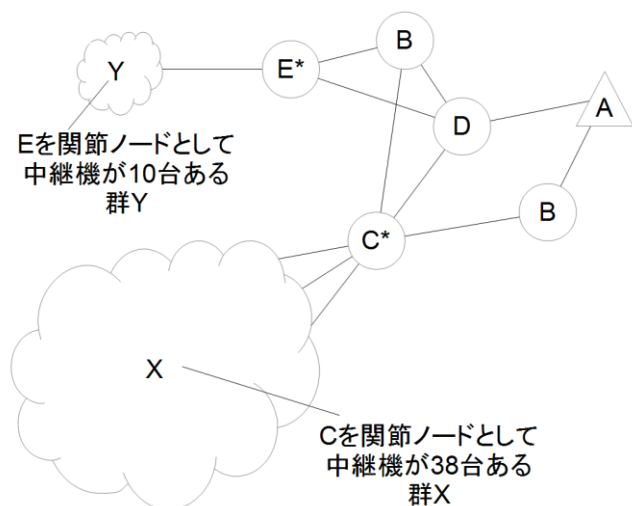


図9 システムの出力結果と最適ルートの相違

5. まとめ・今後の課題

現在、長野県塩尻市でセンサーネットワークシステムを運用している。安価で容易に構築できるインフラを採用しているため、中継機の設置位置に十分な高さを確保できていない。そのため、大型トラック等の影響を受けやすく、通信路の遮断が頻繁に起こっている。その対策として、動的に経路を変更するアドホックネットワークを採用しているが、親機まで通信が可能な中継機への代替ルートがない場合、有効には働かない。本稿ではこの問題を考慮し、常に親機まで通信が可能な中継機への代替ルートが複数存在するような冗長性のあるネットワーク構築のために、有効な中継機の設置位置を助言するシステムを開発し、評価した。システムではグラフ理論を用いて、関節ノードに着目しネットワークを解析した。システムが出力した中継機設置位置に中継機を置くことにより結ばれる通信パスを再現し、そのネットワークから任意の本数の通信パスを削除することにより、ネットワークの冗長性について評価を行った。評価の結果、実験した3つのエリアに関して最適な提案にはならなかったものの、評価値が安定する3本以上の通信パスの削除本数においては、評価対象の中で上位2割に入る結果となった。

今後の課題としては関節ノードだけを考慮するのではなく、その関節ノードからDFS木における子ノード側に延びるエッジの本数を考慮することにより、システムの評価値も最適に近づくと思われる。

謝 辞

本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発推進制度「災害状況を遠隔地から把握するセンサーネットワークのための災害に柔軟に対応する通信インフラシステムの研究開発(142304006)」(H26～H28)の助成を受けて行われた。本研究を行うにあたり、ご協力い

ただいた塩尻市役所金子春雄氏、長野日本無線株式会社本山栄樹氏に感謝する。

文 献

- [1] 唐沢真一, アサノデービッド, 鈴木彦文, 不破泰: 地域児童見守りシステムにおける経路決定方法の提案と実環境での評価; 知的環境とセンサーネットワーク研究会信学技報 Vol.113, No.399, pp.59-64, ASN2013-128, Jan.2014.
- [2] 黒柳大治, アサノデービッド, 鈴木彦文, 不破泰: 土砂災害予測センサーネットワークにおける隠れ端末間の衝突回避プロトコルの検討; 第2回安全・安心な生活のための情報通信システム研究会講演論文集, ICSSSL2012-01, Nov.2012.
- [3] 野瀬裕昭, 不破泰, 新村正明, 國宗永佳, 本山栄樹, 金子春雄: 無線 Ad-Hoc ネットワークによる地域見守りシステムの開発; 電子情報通信学会論文誌 B Volume J95-B, No.1, pp.30-47, Jan. 2012.
- [4] AIZU ONLINE JUDGE, :Connected Components - Articulation-Points; http://judge.u-aizu.ac.jp/onlinejudge/commentary.jsp?id=GRL_3_A, 参照 November.25,2015.