

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14270

研究課題名(和文)無線センサネットワークにおける反射型遅延トモグラフィを用いた移動物体トラッキング

研究課題名(英文) Moving Object Tracking Using Reflective Delay Tomography in a Wireless Sensor Network

研究代表者

原 晋介 (HARA, SHINSUKE)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80228618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：無線センサネットワークにおいて、データ収集ノードが複数の異なるループ状のルートにパケットを送信し、それを受信するまでの遅延を観測すれば、障害リンクが同定でき(反射型遅延トモグラフィ)、さらに、圧縮センシングを応用すれば、観測ルート数を軽減できる。本研究では、反射型遅延トモグラフィにおいて、観測ルートの効率良い選択法と、過去の選択ルートと観測遅延から次の観測ルート選択する適応ルート選択法を提案し、その性能を計算機シミュレーションにより明らかにした。提案法は障害リンクの同定時間を大幅に短縮できるので、障害の原因が移動物体によるブロッキングであっても、その移動する障害リンクを効率良く同定できる。

研究成果の概要(英文)：In a wireless sensor network, when a data collection node transmits packets over different loopy routes and measures the delays for them, it can identify abnormal links (reflective delay tomography) in the network. Furthermore, by applying compressed sensing to the tomography, it can decrease the number of measurement routes. In this research, an efficient measurement routes selection method is proposed, and the idea is extended to an adaptive method where the next route is adaptively selected according to the previous routes and delay measurement results. Computer simulations show that the adaptive measurement routes selection method can identify abnormal links in a much shorter time period, so even when moving objects cause the link abnormalities, the proposed method can effectively identify and track them.

研究分野：通信・ネットワーク工学

キーワード：無線センサネットワーク 遅延トモグラフィ 圧縮センシング 反射型 適応型

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 農地等では害獣による被害が近年益々増えている。複数のカメラを設置し監視すれば害獣の頭数や位置は同定できるが、カメラの消費電力は大きく、また、画像データは大容量であるため高速の無線ネットワークを敷設する必要がある。一方、環境モニタリングを目的として無線センサネットワークが農地等に展開されている事例が多くなっている。設置される多数のセンサは間欠的に動作するので消費電力は小さく、そのデータは極小容量であるため、センサは低速回線でメッシュ状にネットワークされる。この無線センサネットワークで、本来の目的の他に、害獣の位置が同定できれば、高速カメラネットワークは必要なくなる。



図1 反射型遅延トモグラフィの原理。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究では、遅延トモグラフィの「エンド-エンド間の異なるルートで観測されるプローブパケットの伝送遅延だけから障害リンク位置が同定できる」という特徴を活かし、無線センサネットワークにおいて、センサデータ収集時間外に、データ収集ノードから複数の異なるルートにプローブパケットを送信・受信することにより、害獣による障害リンクの発生箇所つまり害獣の位置が同定できる方法を提案する(反射型遅延トモグラフィ)。障害リンクの位置を効率良く同定するために、圧縮センシングに基づいた適応ルート選択法を提案し、計算機シミュレーションによりその性能を明らかにする。図1に反射型遅延トモグラフィの原理を示す。

### 3. 研究の方法

(1) 反射型ルート候補集合の生成法: 単一のデータ収集ノード(TRX)と多数のセンサノード(S)から構成されるネットワークを仮定する。反射型遅延トモグラフィでは、TRX から出発し、いくつかのSを経由してTRXに帰ってくるようなすべての異なるルートをまず列挙し、それらからルート候補集合を生成する必要がある。大規模なネットワークの場合、反射型ルート候補集合の生成に莫大な時間がかかるので、ルート候補の効率良い生成法を提案する。提案法の性能の評価は、候補集合を生成するまでの時間により行なう。



図2 非適応・反射型遅延トモグラフィ。

(2) 非適応型観測ルート選択法: (1)で生成された反射型ルート候補集合から、障害リンクが同定できる複数の異なる観測ルートを次に選択する必要がある。ネットワークのトポロジーが与えられた場合に、過去に観測したルート遅延に基づかずに(非適応型)、観測ルートを前もって選択する方法をまず提案する。効率良い観測ルートは、(i) 障害リンクが同定でき、(ii) 観測ルート数(ルートファクタ: RF)が少なく、(iii) 観測ルート上のSの個数(エネルギーファクタ: EF)が少ないことから、提案する非適応型観測ルート選択法をこれらの観点から評価する。図2に非適応・反射型遅延トモグラフィを示す。

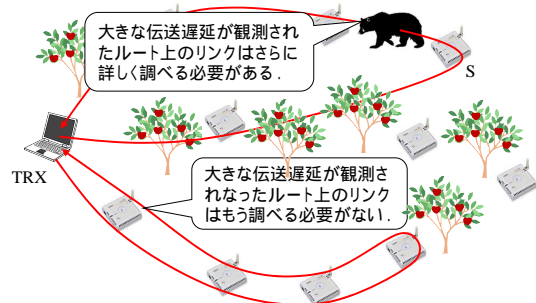


図3 適応・反射型遅延トモグラフィ。

(3) 適応型観測ルート選択法: 反射型遅延トモグラフィの大きな特徴は、以前に観測したルート遅延をTRX自身が知ることができるので、その結果に基づいて以降の観測ルートを決定できることである。例えば、大きな伝送遅延が観測されなかったルートには障害リンクが存在しないので、そのルート上のリンクはさらに探索する必要はなく、逆に、大きな伝送遅延が観測されたルート上のどこかには障害リンクが存在するので、そのルート上のリンクはさらに詳しく探索する必要がある。これにより、障害リンクを同定できるまでの時間が短縮できるので、例えば、障害リンクが移動する場合にも対処できる。非適応型観測ルート選択法と同様に、適応型観測ルート選択法も(i) 障害リンク同定可能性、(ii) ルートファクタ、(iii) エネルギーファクタの観点から評価する。図3に適応・反射型遅延トモグラフィを示す。

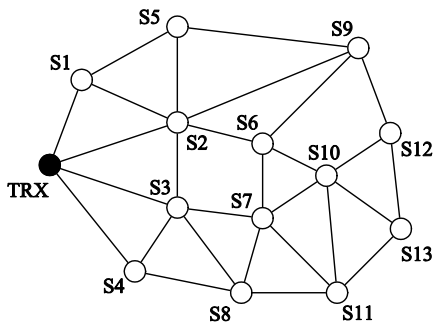


図4 ネットワーク(14 ノード, 28 リンク).

#### 4. 研究成果

(1) 反射型ルート候補集合の生成法: 図4に14ノードと28リンクから構成されるネットワークの例を示す. ネットワーク上で異なる2点を選択した場合に, その2点間のすべてのルートを列挙するアルゴリズムがいくつか提案されている. 図4のネットワークで, そのルート列挙アルゴリズムを用いて反射型ルート候補を列挙するには, TRX と  $S_k$  を選択しルート列挙アルゴリズムを用いてルートを列挙するという動作を  $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, 13$ ) に適用する必要がある. つまり,  $S$  の個数が  $N$  の場合, ルート列挙アルゴリズムを  $N-1$  回実行させる必要がある. これをシンプル法と呼ぶ.

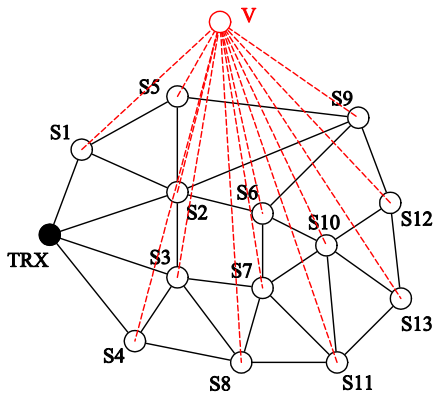


図5 提案反射型ルート候補集合生成法.

図5に提案する反射型ルート候補集合生成法を示す. この方法では, そのネットワークに1つのノード  $V$  を仮想的に加え,  $V$  とすべての  $S$  をリンクで接続する. そして, TRX と  $V$  を選択し, ルート列挙アルゴリズムを用いてルートを列挙すれば, TRX と  $S_k$  ( $k=1, 2, \dots, 13$ ) 間のすべての反射型ルートが一度に列挙できる. つまり,  $S$  の個数が  $N$  の場合, ノードの個数は  $N$  になるが, ルート列挙アルゴリズムは1回実行だけで反射型ルート候補集合が生成できる.

この提案法の性能を計算機シミュレーションにより評価した. ノード数を固定し, ランダムにネットワークを生成し, シンプル法

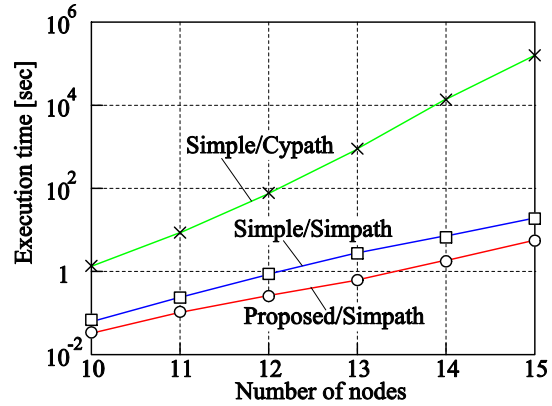


図6 反射型ルート候補集合生成法の性能.

と提案法の実行時間を評価した. さらに, ルート列挙アルゴリズムとして, Cypath法とSimpath法を採用した. 結果を図6に示す. Simpath法に基づいた提案法の実行時間が一番短く, Simpath法に基づいたシンプル法と比較して, 実行時間を約4分の1にできることを明らかにした.

(2) 非適応型観測ルート選択法: 「ネットワーク内での障害リンクの発生箇所は高々1ヶ所である」と仮定すると, 反射型遅延トモグラフィに圧縮センシングの理論を適用でき, リンクよりも少ない観測ルートで障害リンクが同定できる.

圧縮センシングに基づいた遅延トモグラフィでは, 観測ルート行列の相互コヒーレンス ( $\mu$ : 任意の列ベクトル間の正規化相互相関値の最大値) が1よりも小さければ, 単一の障害リンクが同定できることが理論的に明らかにされているので,  $\mu < 1$  を満たすように観測ルートを順次探索し選択すればよい. 従来の方は, リンクが多い, つまり長いルートから順番に探索していたが, 提案法は, なるべく全リンクを網羅し, かつ以前に選択したリンクの約半分が重複して選択されるようにルートを選択するという方略に基づいている.

この提案法の性能を計算機シミュレーションで評価した. 対象とするネットワークは図4のもので, 28のリンクからランダムに1つを選択し障害リンクとする. また, すべての反射型ルートを列挙できないが, 従来の反射型ルート候補集合生成法も比較対象とする. 以下では, 遅延トモグラフィの方法を, 反射型ルート候補集合生成法/観測ルート選択法と表記する.

結果を表1に示す. ここで, NRは列挙された反射型ルート候補の総数であり, また, PDRは完全検出率である. 従来と提案の反射型ルート候補集合生成法では, それぞれ93と28,368のルート候補が列挙される. 4つの方法はすべて単一の障害リンクを同定できるが, 提案反射型ルート候補集合生成法/提案観測ルート選択法の性能が一番優れ, ネットワーク内で, 6つ観測ルートで69回のプロ

表 1 非適応型観測ルート選択法の性能.

Scheme	NR	PDR	RF	EF
Conv/Conv	93	1.0	11	73
Conv/Prop	93	1.0	11	73
Prop/Conv	28,368	1.0	6	84
Prop/Prop	28,368	1.0	6	69

ープケットの送信で単一の障害リンクが同定できている.

提案反射型ルート候補集合生成法/提案観測ルート選択法によって選択された6つの観測ルートを図7に示す.

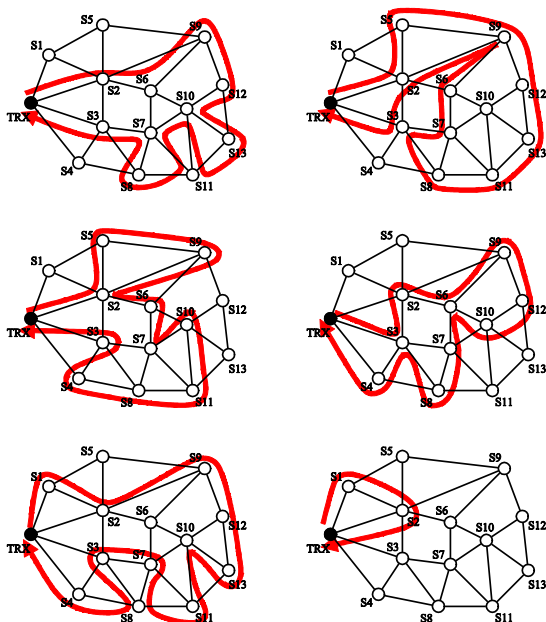


図7 提案法により選択された観測ルート.

(3) 適応型観測ルート選択法: 提案法は, ある観測ルートでルート遅延が小さければ, 非適応型と同じ方略でルート探索を進め, 逆に, ルート遅延が大きければ, そのルートに含まれないすべてのリンクの探索をそれ以降行なわない. これにより効率良く障害リンクが同定できる.

この提案法の性能を計算機シミュレーションで評価した. 結果を表2に示す. 提案反射型ルート候補集合生成法を用いると候補ルートが莫大となるため, 長いルートから探索する従来の観測ルート選択法ではアルゴリズムが終了しない. 提案反射型ルート候補集合生成法/提案観測ルート選択法の性能が一番優れ, 平均して5つ観測ルートで約54回のプローブパケットの送信で単一の障害リンクが同定できている. これは, 非適応の場合に比較してルートファクタRFを約17%, エネルギーファクタを約22%削減できていることを意味する.

(4) 本研究では, 反射型遅延トモグラフィに対して, 適応型観測ルート選択法を提案し, その優れた性能を計算機シミュレーションにより明らかにした.

表2 適応型観測ルート選択法の性能.

Scheme	PDR	RF	EF
Conv/Conv	1.0	10.4	75.5
Conv/Prop	1.0	9.0	60.4
Prop/Conv	NA	NA	NA
Prop/Prop	1.0	5.0	53.5

< 引用文献 >

R. C. Read and R. E. Tarjan, "Bounds on Backtrack Algorithms for Listing Cycles, Paths, and Spanning Trees," *Networks* 5, pp. 237-252, 1975.

D. E. Knuth, *The Art of Computer Programming, Volume 4, Bitwise Tricks & Techniques, Binary Decision Diagrams*, Addison-Wesley, 2009.

Y.C. Eldar and G. Kutyniok, *Compressed Sensing: Theory and Applications*. Cambridge, University Press, 2012.

K. Nakanishi, S. Hara, T. Matsuda, K. Takizawa, F. Ono, and R. Miura, "Reflective Network Tomography Based on Compressed Sensing," *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 186-193, June, 2015.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Teruhito Naka, Shinsuke Hara, "Route selection algorithms utilizing the property of the ZDD for compressed sensing-based transmissive network tomography," *Procedia Computer Science*, 査読あり, 109C, pp.127-131, 2017.

Azusa Danjo, Shinsuke Hara, "Optimal Formation of Unmanned Aerial Vehicles for Minimizing Localization Error -A Two-Dimensional Case-," *Proceedings of the IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC) 2017*, 査読あり, pp.1-4, 2017.

Kousuke Matsui, Shinsuke Hara, "An Accurate Clock Offset Estimation Method between Two Moving Objects Based on Maximum Likelihood Estimation," *Proceedings of the 23rd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 査読あり, pp.1-5, 2017.

[学会発表](計10件)

中 照仁, 原 晋介, 松田崇弘, 滝沢賢一, 小野文枝, 三浦 龍, "圧縮センシングを用いた反射型遅延トモグラフィにおける適応性の評価," 電子情報通信学会高



信頼制御通信研究会, 2016.

中 照仁, 原 晋介, 松田崇弘, 滝沢賢一, 小野文枝, 三浦 龍, “ 反射的遅延トモグラフィにおけるSIMPATH アルゴリズムを用いた候補パス列挙,” 2016年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2016.

原 晋介, 松田崇弘, 小野文枝, 滝沢賢一, 三浦 龍, “ ワイヤレスネットワークトモグラフィにおける圧縮センシングの利用,” 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2016.

中 照仁, 原 晋介, 松田崇弘, 滝沢賢一, 小野文枝, 三浦 龍, “ ネットワークトモグラフィにおけるZDD を利用した観測ルート選択,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2017.

Teruhito Naka, Shinsuke Hara, “ Route selection algorithms utilizing the property of the ZDD for compressed sensing-based transmissive network tomography,” The 8th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2017), 2017.

松井康祐, 原 晋介, “ 移動物体間の最尤推定を用いた時刻同期法,” 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017.

中 照仁, 原 晋介, 松田崇弘, “ 圧縮センシングに基づく反射型遅延ネットワークトモグラフィに対する 観測パス選択,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2018.

松井康祐, 原 晋介, “ 複数移動物体に対する最尤推定に基づく時刻同期法,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2018.

原 晋介, 村田篤紀, “ 大規模災害時のドローンを使ったメッセージ集配信システム,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2018.

西岡寛人, 原 晋介, 松田崇弘, 小野文枝, “ 無人航空機システムのための圧縮センシングを用いた受信信号強度分布の推定,” 2018年電子情報通信学会総合大会, 2018.

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

原 晋介 (HARA SHINSUKE)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：8 0 2 2 8 6 1 8