

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 9 日現在

機関番号：83602

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00147

研究課題名（和文）2次元反辞書を用いたセンサネットワークにおけるノードの配置支援

研究課題名（英文）An Efficient Node Arrangement for Wireless Sensor Networks Using Two-Dimensional Antidictionaries

研究代表者

太田 隆博（Ota, Takahiro）

長野県工科短期大学校・情報技術科・教授

研究者番号：60579001

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000円

研究成果の概要（和文）：ワイヤレスセンサネットワークにおいては、センサ間の電波干渉や減衰による通信不良を低減するために、センサ間の最小距離と最大距離に制約がある。これまでセンサの配置手法に関しては、総当たり探索による手法のみであり、計算量が非常に大きい問題があった。これらの背景に対して、本研究の主要な成果として、1つ目は、与えられた大きさの2次元平面に対して、センサ配置を高速に行える手法を考案し、その手法によるセンサ配置のパターン数を評価したことである。2つ目は、生成したパターンを保存するために、2次元パターンの無ひずみデータ圧縮手法を考案し、その手法の一般情報源に対する漸近的最良性を証明したことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究成果の学術的意義としては、制約のある2次元パターンの生成に関し、与えられたサイズに対して、これまでは指数時間かかる総当たり手法しかなかった一方で、提案手法は、すべてのパターンを生成できない場合もあるが、高速に線形時間で制約あるパターンを生成する手法を示した。また、提案手法で生成可能なパターン数の評価式を示した。また、2次元パターンの効率的な無ひずみデータ圧縮手法を考案し、提案手法が一般情報源上の2次元データに対して漸近的に裁量であることを示した。社会的意義としては、IoTの進展によりワイヤレスセンサネットワークが多く利用されている中で、研究成果は、その配置や保存の基盤技術の確立に貢献した。

研究成果の概要（英文）：As for wireless sensor networks, there are constraints for arrangements of wireless sensor nodes to achieve stable wireless communications. For example, the distance between two sensors may cause signal interference or decay. Conventional construction algorithms for arrangements of wireless sensor nodes need exponential computational complexity for the size of a two-dimensional (2D) block. We propose a fast algorithm of arrangements of wireless sensor nodes. Even though the proposed algorithm may not construct all arrangements for a given size of two-dimensional block, the algorithm can construct arrangements in linear time for the size. Moreover, we evaluate the number of arrangements constructed by the proposed algorithm for a given size. In addition, we propose a lossless data compression algorithm for 2D sources to store two-dimensional data such as pictures including the arrangements. We prove the proposed algorithm is asymptotic optimal for 2D general sources.

研究分野：情報理論，アルゴリズム，計算量，データ圧縮

 キーワード：ワイヤレスセンサネットワーク 2次元無ひずみデータ圧縮手法 2次元反辞書 線形計算量 漸近的
最良性 無ひずみデータ圧縮 2次元 センサ配置

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

Internet of Things (以下, IoT) の進展により, 様々な機器やセンサなどがネットワークの一部として, 相互通信するようになってきている. 特に, 小型センサが安価となってきたことから, センサを多数利用したワイヤレスセンサネットワーク(以下, WSN)を安価に構築できるようになってきている. これを屋外や屋内に WSN を配置して, 気象情報や人・動物・物体の検知・移動情報をエリアで測定し, 解析を行うことで新しい知見が得られている. また, クラウド技術の発展により, これまで繋がりのなかったデータ群との関連性を利用して, さらに新しい知見を得られるようになりつつあり, WSN の重要性がさらに高まりつつある. WSN においては, センサの配置が重要となる. センサの配置に関しての主な要求事項としては,

- (1) 対象エリアをすべてカバーできるようにセンサを配置すること.
- (2) 各センサ間において通信不良が発生しないこと.
- (3) 条件(1)と(2)を満たしたうえでセンサ数ができるだけ少ないこと.

がある. (1)と(2)に関しては, センサ間の距離が長すぎても短すぎてもいけない制約がある. センサ間の距離が長すぎると, 電波減衰による通信不良と送信電力の増大によるバッテリーの動作時間の減少が発生し, 一方, 距離を短すぎると, 電波干渉が発生して通信不良が発生する. (3)に関しては, コストを抑制の観点から経済的に重要な要求である.

一方で, センサの配置パターンの構築に関しての従来手法としては, 効率的な方法はなく, 逐次的にセンサを配置していく単純な手法のみである. 一方で, この手法は制約を満たさないパターンが構築時に出現した場合は, 制約を満たす状況のパターンから再構築を行うため, 最悪の場合には, 面積に対して, 指数関数的な計算時間がかかり, 面積が大きいと実用上使えない問題がある.

研究の背景としては, (1)~(3)の条件を満たすセンサの配置パターンを高速に与える手法および生成されたパターンの効率的な保存方法(データ圧縮手法)が求められる. 学術的な背景としては, データとしての 2 次元配列は, ネットワークに接続された多くのセンサやデバイスから構成される WSN の解析にも利用され, 計算機の性能向上により, それらの生成や解析は高速に行えるものとなっている. それに伴い, これらの性能評価を行うための理論的な評価や解析が必要となっている. 一方で, 2次元の場合には, 理論的な解析は, そのほとんどがアドホックな手法である. この理由は, 1次元の場合には, 情報源上の系列の解析には, 木表現やそれを拡張したグラフ構造を利用できるが, 2次元の場合には, 系列同士の連結関係が行・列の 2 方向になるため, 木表現やグラフ構造の一般的な表現が与えられていないことによる. よって, 2次元の場合にも, 配置パターンの効率的な生成やその保存方法(データ圧縮)の理論的な評価・解析が求められている.

2. 研究の目的

主に 2 つあり, 1 つ目は, 必要とする個数の制約を満たす配置パターンを高速に与える手法の開発, 2 つ目は, 配置パターンを効率的に保存するための 2 次元データのデータ圧縮手法の開発である.

1 つ目に関して, 高速とはセンサ配置を考えるフィールドの面積に比例した時間で配置パターンを与えられることをいう. また, 必要とする個数とする理由は, 一般的なセンサ間の制約を満たす配置パターン数は, 面積に対して, 指数関数的に増加するため, すべての配置パターンを列挙するような手法は, 実用的に使えない問題があるためである. (3)の条件は, 得られた配置パターンで最もセンサ数が少ないものを選ぶ方法を取る.

2 つ目に関して, 配置パターンを送信または, 生成した配置パターンを後で利用する場合には, 効率的な保存手法が必要である. 配置パターンに関しては, 2次元画像として扱うことができるため, 本研究の目的として, 画像(配置パターンを含む)などの一般的な 2次元データのデータ圧縮手法を構築する.

加えて, 本研究の目的を達成するうえで得られた知見を応用した手法の開発も行う.

3. 研究の方法

本研究では, 1 および 2 次元反辞書に関する従来研究の結果を拡張して, 配置パターンの構築と 2次元データのデータ圧縮手法を開発する. 反辞書とは, 極小禁止ブロック(以下, MFB)の集まりのことで, それ自身の出現は禁止されているが, 上端または下端の 1 行または左端または右端の 1 列を削った真の部分ブロックの出現が許されるものをいう.

(1) センサの配置パターンの高速な構築

1次元の場合には, 系列に対する反辞書が与えられた場合に, その反辞書から系列を復元するアルゴリズムが本研究代表者らにより提案されている[1]. (文中で用いる[1], [2]などはそれぞれ引用文献[1], [2]を示す. 以下では同様の表記を用いる) これを利用して, 1次元の場合には, 与えられた MFB の集まりから, それらを部分ブロックとして含まないようなブロック(許可ブロック(以下, ALB))を生成できる. さらにグラフ構造を用いて, MFB の集まりから, 許可系列を生成する手法がある[3].

また、与えられた 2 次元配列から、反辞書を生成するアルゴリズムについても、本研究代表者らによって提案されている[2].
本研究では、[2]を改良して、2 次元反辞書から ALB を生成する手法を開発する。併せて、1 次元の場合のグラフ構造を用いる手法を 2 次元に拡張する。

(2) 2 次元データの無ひずみデータ圧縮手法

与えられた 1 次元系列に関する従来手法である反辞書を利用した無ひずみデータ圧縮手法([2]:2 値, [3]:多値)について、圧縮率が理論的に最良であることを証明し、さらにその手法を 2 次元に拡張する。2 次元に拡張については、[3]の拡張が必要となるので、2 次元への拡張が可能となるように 1 次元手法の解析および改良を行い、そのうえで理論的な解析も可能な形で 2 次元への拡張を行う。

(3) その他の応用

上記の(1)と(2)を行ううえで得られた知見から得られる手法について開発を行う。

4. 研究成果

本研究成果については次のとおりである。

(1) センサの 2 次元配置パターン的高速な構築法 (学会発表(1, 3, 6))

(2) 反辞書を用いた無ひずみデータ圧縮手法

① 1 次元反辞書データ圧縮法の改良

雑誌論文(1, 3), 学会発表(4, 5, 7)

② 2 次元反辞書データ圧縮法の開発

雑誌論文(2), 学会発表(8)

(3) 反辞書を用いたデータ圧縮法の応用 (学会発表(2))

以下では、各項目について詳細を述べる。文中で用いる(論 1), (学 1)などは、それぞれ本研究の発表論文リストにおける、雑誌論文 1, 学会発表 2 を示す。

(1) 2 次元配置パターン的高速な構築法

本研究代表者らによって、(i) 1 次元系列から反辞書の構築手法、(ii) 反辞書から 1 次元系列の復元手法、(iii) 2 次元配列から反辞書の構築手法が示されている。(i)と(ii)の関係を用いて、(iii)から反辞書から 2 次元配列の復元手法を示した(学 6)。また、与えられた MFB の集まりから、ALB を生成する手法を示した(学 6)。これにより、制約を満たす 2 次元配置パターンの構築法を示した。

一方で、提案手法(学 6)は、ALB を全列挙する手法であるため、与えられた MFB の集まりに依存して、ALB の個数とその集まりのサイズに関して、指数関数的に増加する場合があった。この問題を解決するため、次の拡張を行った。従来手法として、1 次元の場合には、MFB の集まりに対して、固定の長さ k (k は極小禁止系列の最大長以上)の ALB をすべて生成し、De Bruijn graph を用いて、さらに長い ALB を高速にする手法がある。

本研究では、これを 2 次元に拡張するために、開発した手法(学 6)により、まず、与えられた MFB の集まりから、固定のサイズ $m \times n$ 以下(m と n は MFB のそれぞれ最大行数と最大列数以上)の ALB を生成し、その中で平坦トーラスとなるものを求める。平坦トーラスとは、上下と左右がそれぞれ一致するブロックとなる性質を持つ。提案手法では、得られた ALB である平坦トーラスの集まりを用いて、それらを連結して、より大きなサイズの ALB の高速な生成手法を考案した (学 1, 3)。さらに、与えられた平坦トーラスの集まりから生成される ALB の個数について評価式を求めた(学 1)

図 1 は、提案手法により生成された配置パターンを示す。黒と白がそれぞれセンサとセンサのない部分を表す。

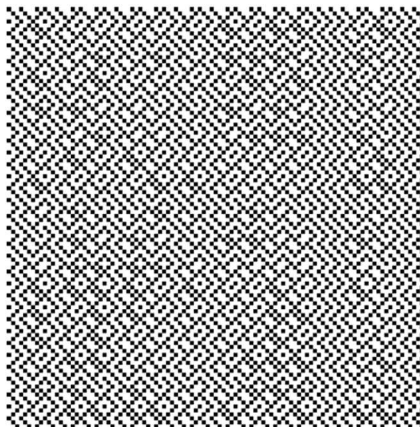


図 1 提案手法により生成された ALB(センサ(黒)間の距離(上下左右方向)が 1 以上 3 以下の制約を満たす)

(2) 反辞書を用いた無ひずみデータ圧縮手法

本研究代表者らによって、1次元の反辞書を用いたデータ圧縮手法と Dube と横尾らによる部分列数え上げ符号化法(CSE法)と符号器が同型であることを示し、さらにそれらのデータ圧縮手法が定常エルゴード情報源に対して、漸近的最良性(データ長が長くなるにつれて、圧縮率が達成限界であるエントロピーレートに近づくという性質)を証明した(論3)。1次元の場合には、符号器として入力系列の先頭と末尾をつなげた環状系列を符号器として用いている。本研究では、これを2次元に拡張するために、入力ブロックの上下と左右をつなげた平坦トーラスを符号器として用いたCSE法を考案した(論2, 学8)。

さらに、提案手法が一般情報源上の2次元ブロックに対して漸近的最良性であることを証明した(論2, 学8)。

また、岩田と有村らによる多値アルファベット版CSE法の符号化において使われる不等式を改良した手法(学7)を示し、さらに符号化する部分系列の順番をその出現回数でソーティングした手法を提案した(論1, 学4, 5)。

(3) 機械学習への応用

本研究代表者らにより、反辞書から作られる確率モデルを用いた心電図データの無ひずみ圧縮手法と心室性期外収縮の検出手法が示されている。不整脈検出用の検出器(正常洞調律の反辞書をベースとした確率モデル)の生成については、機械学習の一つである教師あり学習であるため、(2)で得られた結果を応用して、心房性不整脈検出のための確率モデルの構築方法を新しく考案した(学2)。

<引用文献>

- [1] 太田, 森田, 多値アルファベットに対する反辞書を用いたデータ圧縮, 信学技報, 106(184), pp. 37–42, 東京大学柏キャンパス(千葉県柏市), 2006年7月.
- [2] T. Ota and H. Morita, On a Two-Dimensional Antidictionary Construction Using Suffix Tries, Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, pp. 2974–2978, Hong Kong (China), June. 2015.
- [3] M. Crochemore, F. Mignosi, A. Restivo, Automata and Forbidden Words, Information Processing Letters, vol. 67, issue 3, pp. 111–117, Elsevier, Aug. 1998.
- [4] M. Crochemore, F. Mignosi, A. Restivo, and S. Salemi, Data Compression Using Antidictionaries, Proceedings of IEEE, pp. 1756–1758, Nov. 2000.
- [5] T. Ota and H. Morita, On a Universal Antidictionary Coding for Stationary Ergodic Sources with Finite Alphabet, Proc of International Symposium on Inform. Theory and its Applications, pp.294–298, Melbourne (Australia), Oct. 2014.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び研究協力者には下線)

[雑誌論文] (計3件) (うち査読付論文3件)

- (1) Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, Akiko Manada, Compression by Substring Enumeration Using Sorted Contingency Tables, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, vol. E103-A, no. 6, 829–835, June 2020. (DOI: 10.1587/transfun.2019EAP1063)
 - (2) Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, Akiko Manada, A Universal Two-Dimensional Source Coding by means of Subblock Enumeration, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, vol. E102.A, no. 2, 440–449, Feb. 2019. (DOI: 10.1587/transfun. E102.A.440)
 - (3) Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, A Compact Tree Representation of an Antidictionary, IEICE Trans. Fundamentals, 査読有, vol. E100.A, no. 9, 1973–1984, Sep. 2017. (DOI: 10.1587/transfun. E100.A.1973)
- [学会発表] (計8件) (うち査読付国際学会3件)
- (1) Takahiro Ota, Ryoji Nakamura, Akiko Manada, A Fast Node Arrangement Algorithm of Wireless Sensor Networks for Two-dimensional Constraints, Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, 査読有, 1512–1516, Jul. 2019. (DOI: 10.1109/ISIT.2019.8849534)
 - (2) 高松 聖, 太田 隆博, 森田 啓義, 野瀬 裕昭, 反辞書確率モデルによる不整脈検出手法を利用した機械学習教育用ツールの検討, 2018年度教育システム情報学会北信越支部学生研究発表会予稿集, 27–28, 2019年3月.
 - (3) 中村 凌士, 太田 隆博, 眞田 亜紀子, 平坦トーラスを用いた2次元(d, k)連長制約を満たすブロックの高速な構築手法, 第41回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 274–279, 2018年12月.
 - (4) Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, Akiko Manada, Compression by Substring Enumeration with a Finite Alphabet Using Sorting, Proceedings of International Symposium on Information Theory and its Applications, 査読有, 587–591, Oct. 2018. (DOI: 10.23919/ISITA.2018.8664360)
 - (5) 太田 隆博, 眞田 亜紀子, ソーティングを用いた部分列数え上げ符号化法, 信学技報,

117(487), 191 - 196, 2018 年 3 月.

- (6) 太田 隆博, 山浦 萌, 眞田 亜紀子, 木を用いた 2 次元許可ブロックの列挙アルゴリズム, 第 40 回情報理論とその応用シンポジウム予稿集, 265 - 270, 2017 年 11 月.
- (7) 太田 隆博, 森田 啓義, 多値アルファベットに対する部分列数え上げ符号化法の圧縮率の改良, 信学技報, 117(120), 103 - 108, 2017 年 7 月.
- (8) Takahiro Ota, Hiroyoshi Morita, Two-Dimensional Source Coding by Means of Subblock Enumeration, Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory, 査読有, 311-315, June 2017. (DOI: 10.1109/ISIT.2017.8006540)

[図書] (計 0 件)

なし

[産業財産権]

なし

[その他]

Web ページ https://researchmap.jp/ota_t

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 隆博 (OTA TAKAHIRO), 長野県工科短期大学校・情報技術科・教授, 研究者番号:60579001

(2) 研究分担者

眞田 亜紀子 (MANADA AKIKO), 湘南工科大学・工学部・講師, 研究者番号:20631138

(3) 連携研究者

森田 啓義 (MORITA HIROYOSHI), 電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授, 研究者番号:80166420

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takahiro OTA, Hiroyoshi MORITA, and Akiko MANADA	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Compression by Substring Enumeration Using Sorted Contingency Tables	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 829-835
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.2019EAP1063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takahiro OTA, Hiroyoshi MORITA, and Akiko MANADA	4. 巻 E102.A
2. 論文標題 A Universal Two-Dimensional Source Coding by Means of Subblock Enumeration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 440-449
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E102.A.440	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takahiro Ota and Hiroyoshi Morita	4. 巻 E100.A
2. 論文標題 A Compact Tree Representation of an Antidictionary	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1973-1984
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transfun.E100.A.1973	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 中村凌士, 太田隆博, 眞田亜紀子
2. 発表標題 平坦トーラスを用いた2次元(d, k)連長制約を満たすブロックの高速な構築手法
3. 学会等名 第41回情報理論とその応用シンポジウムシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高松 聖, 太田 隆博, 森田 啓義, 野瀬 裕昭
2. 発表標題 反辞書確率モデルによる不整脈検出手法を利用した機械学習教育用ツールの検討
3. 学会等名 2018年度教育システム情報学会北信越支部学生研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田隆博, 森田啓義
2. 発表標題 多値アルファベットに対する部分列数え上げ符号化法の圧縮率の改良
3. 学会等名 電子情報通信学会, 情報理論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 太田隆博, 山浦萌, 眞田亜紀子
2. 発表標題 木を用いた 2 次元許可ブロックの列挙アルゴリズム
3. 学会等名 電子情報通信学会, 第40回情報理論とその応用シンポジウムシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 太田隆博, 眞田亜紀子
2. 発表標題 ソーティングを用いた部分列数え上げ符号化法
3. 学会等名 電子情報通信学会, 情報理論・情報セキュリティ・ワイドバンドシステム合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Ota, Ryoji Nakamura, Akiko Manada
2. 発表標題 A Fast Node Arrangement Algorithm of Wireless Sensor Networks for Two-dimensional Constraints
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro OTA, Hiroyoshi MORITA, and Akiko MANADA
2. 発表標題 Compression by Substring Enumeration with a Finite Alphabet Using Sorting
3. 学会等名 International Symposium on Information Theory and its Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Ota and Hiroyoshi Morita
2. 発表標題 Two-dimensional Source Coding by means of Subblock Enumeration
3. 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	眞田 亜紀子 (Manada Akiko) (20631138)	湘南工科大学・工学部・講師 (32706)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	森田 啓義 (Morita Hiroyoshi) (80166420)	電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授 (12612)	