

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06791

研究課題名(和文) レートレス符号を用いる大規模無線センサネットワークにおけるデータ収集の効率化

研究課題名(英文) High Efficient Data Gathering with Rateless Code for Large Scale Wireless Sensor Networks

研究代表者

張 裕淵 (Chang, Yuyuan)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：00725616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はレートレス符号(LT符号)を用いる大規模な無線センサネットワーク(WSN)におけるデータ伝送の効率化を目指す。従来方式において、ノード間のリンクを構築するため、各ノードの必要な送信回数が多くなるという問題点がある。本研究ではシンクノード(SN)のないWSNにおいて、TDMAに基づく自律分散送信タイミングスケジューリング法を提案し、その有効性を明らかにした。また、通信路におけるパケット受信誤り(PER)を考慮し、従来のLT符号化と復号方式について修正を行った。理論解析および計算機シミュレーションによって、PERなどパラメータと提案方式の総送信回数の関係を定量的に明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this work, LT code is employed to improve the efficiency of the data gathering for large scale wireless sensor networks (WSN). Conventionally, CSMA/CA is employed for the multiplexing of the transmission between sensor nodes; however, the number of transmissions increases for the linking between the sensor nodes. We have proposed a novel TDMA based autonomous transmission timing scheduling method for WSN without sink node to avoid the collision in the data encoding and distribution phases. The validation of the proposed method is proved by the computer simulations. We also evaluated WSN using LT codes with the considering of the probabilities of transmission failure. The theoretical analysis was conducted for the modified WSN protocol in the evaluation. The relationships between the number of transmissions and the system parameters, like the packet error rate (PER) in each transmission, are clarified by the theoretical analysis as well as the computer simulations.

研究分野：無線通信

キーワード：無線センサネットワーク レートレス符号 LT符号 データ収集 モバイルコレクタ 送信回数

## 1. 研究開始当初の背景

道路、橋など都市インフラの構造モニタリングや森林、農地など広い土地の環境モニタリングを行うため、大規模な無線センサネットワーク (WSN) の活用が盛んに検討されている[1-3]。一方、無線センサネットワークの規格として ZigBee[4]などが策定されている。ネットワーク内の各センサノード (sensor node) の測定データを収集するため、センサノードにおいては測定データを中継する機能があり、中継を繰り返すことで、各センサノードのデータをシンクノード (sink node; SN) に伝わるのが可能である。シンクノードでは、収集した各センサノードのデータをインターネットなどの有線通信基盤網に転送するため、センサノードより多い計算機資源が要り、固定電源などに接続することが必要である。ただし、固定電源を確保できない場所や有線通信基盤網につながりにくい場所にはシンクノードの設置が困難と考えられる。

この問題を解決するため、LT 符号を用いる無線センサネットワークが提案されている[5]。LT 符号は消失通信路 (erasure channel) に有効なレートレス (rate-less) 符号として知られている[6]。LT 符号によって各センサノードのデータが分散され、よりネットワーク中に持続できる。さらに、無人機やトロンなどのモバイルコレクタ (mobile collector) を用い、LT 符号化されたデータを収集することによって、シンクノードの設置が必要なくなる。モバイルコレクタの移動経路最適化に関する検討[7]が行われているが、LT 符号を用いる無線センサネットワークにおける信号伝送および中継と、モバイルコレクタのデータ収集に使う具体的な通信プロトコルに関する検討はまだ欠けている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的はレートレス符号を用いる大規模な無線センサネットワークにおける信号伝送および中継、モバイルコレクタのデータ収集に使う通信プロトコルとモバイルコレクタのレートレス復号器の開発であり、大規模な無線センサネットワークシステムにおけるデータ伝送の高効率化を目指す。大規模な無線センサネットワークにおけるセンサノード数は数百以上にもものぼるので、設置コストとシステム保守の観点から、センサノードの低コストと低消費電力などの特徴が要求される。また、センサノードは無造作に設置されるので、各ノードにおける自律分散制御が必要となる。センサノードの制御を含めて通信プロトコルの設計によって、毎回のデータ伝送における各ノードの送信回数を最小にすることと信号処理にかかる演算量を削減することによって、低コストと低消費電力を図る。そして、モバイルコレクタにおけるレートレス符号の復号器の設計によって、データ収集の効率を向上する。

## 3. 研究の方法

研究の方法としては主に計算機シミュレーションによる通信プロトコルなどの方式検討であった。トータルセンサノード数は1000個まで、チャンネル変動とセンサノード間の干渉を含めて計算機シミュレーション検討を行った。センサノードの初期化段階から、データの分散、モバイルコレクタのデータ収集段階までの通信プロトコルを検討した。初期化段階では CSMA/CA を使用するが、隣接センサノード間の位置関係と送信順番を決める。データの分散段階では自律分散制御で多重化する方式を考案した。また、データ収集段階では自律分散制御ではなく、モバイルコレクタの集中制御方法が考えられる。

## 4. 研究成果

### (1) 自律分散送信タイミング・スケジューリング

本研究では SN のない WSN において、時分割多元接続 (TDMA) に基づく自律分散送信タイミングスケジューリング法を提案した。

送信時間をタイムスロット (TS) に分割し、TS の番号を  $t$  として、 $t = 1, 2, \dots, T$  と周期  $T$  で繰り返す。ここで、各ノードは同期しているものと仮定する。初期化段階では、イニシエータ (initiator) と呼ばれるノードをランダムに  $N_{\text{init}} (\geq 1)$  個選び、送信 TS もランダムに決める。他のノードの送信 TS はイニシエータによって決定される。

TS が決定されていないノードをディセラ (ditherer) と呼ぶ。まず、イニシエータが合図信号をブロードキャストする。ディセラは常にその合図を傍聴し、合図があれば、ランダムに送信 TS を決め、イニシエータに返信する。ただし、合図以外の信号の場合、その TS がすでに使われたと判断し、使用可能な TS から排除する。イニシエータは送信 TS 以外の時間ではディセラの返信を待つ。返信が有れば、次回送信 TS において、TS の決定結果をブロードキャストで知らせる。ノード間干渉などによって返信が確認できない場合、イニシエータからの知らせがないとディセラが再び TS をランダムに決め、イニシエータに返信する。

TS が決定されるとディセラはフォロア (follower) になり、イニシエータと同じ働きで周辺にいるディセラの送信 TS を決定する。ディセラの返信がないと判断するとスケジューリングを終了し、自分を呼びかけたフォロアまたはイニシエータに終了を知らせる。

表1に示す条件で計算機シミュレーションを行った。図1に、提案手法による TS 決定後ノード間リンクの SIR (Signal to Interference Ratio) の CCDF (Complementary Cumulative Distribution Function) を示す。ただし、SNR (Signal to Noise Ratio) が 5 dB 以上になるリンクのみを対象とした。比較のため、完全にランダムに送信 TS を決めた場合の結果も示す。SIR が 5 dB 以上の CCDF で比較すると、完全ランダムは 86% 以下となるが、

提案法は 90%以上となり、改善量は 5%程度になることが分かった。

表1 計算機シミュレーション諸元 I

センサノード数	1000
検討エリア	1000 m×1000 m
イニシエータ数、 $N_{init}$	10
タイムスロット周期、 $T$	50
各ノードの送信電力	-30 dBm
距離減衰係数	3
チャンネルモデル	i. i. d. レイリ フェージング
雑音レベル	-90 dBm

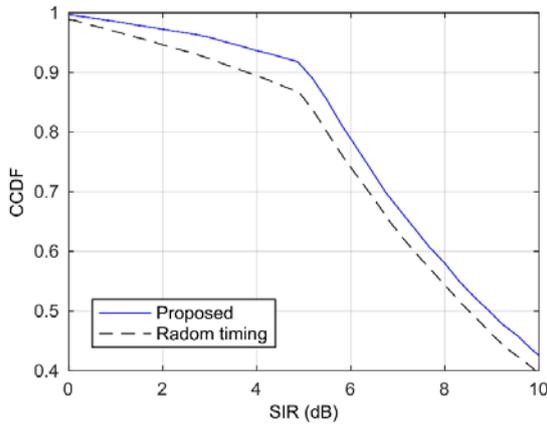


図1 SIRのCCDF特性

## (2) 総送信回数に関する検討

本研究では LT 符号を用いる WSN の総送信回数について理論解析を行い、パケット誤り率 (PER) と総送信回数との関係を明らかにした。センサノード数を  $N$ 、1 ノードあたり発生する LT パケット数を  $b$ 、収集パケット数を  $N'$  とする。パケットの構成は [5] と同様とし、ミキシングタイムを  $\tau$ 、次数を  $d$ 、次数の確率分布を  $\Omega(d)$  とする。従来方式 [5] に対して次の修正または仮定をする。1) フェージング等によってパケット誤りが起こり、巡回冗長検査 (CRC) 等による誤り検出ができると仮定する。伝送誤りの LT パケットは再送しないものとする (これを以下消失と呼ぶことにする)。2) モバイルコレクタが LT パケットを収集する際、通信を行うノードのデータも収集できる。3) 最大次数  $d_{max}$  ( $< N$ ) を設定する。また次数に関して、以下の確率分布を検討する。

1) Ideal Soliton 分布 :

$$\Omega_s(d) = \begin{cases} 1/d_{max}, & d = 1, \\ 1/[d(d-1)], & d = 2, \dots, d_{max} \end{cases}$$

2) Robust Soliton 分布 :

$$\Omega_{RS}(d) = [\Omega_s(d) + \mu(d)]/\beta$$

ただし

$$\beta = \sum_{i=1}^{d_{max}} \Omega_s(i) + \mu(i),$$

$$\mu(i) = \begin{cases} 1/(iM), & i = 1, \dots, (M-1), \\ \ln(R/\delta)/M, & i = M, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$M \in \{1, 2, \dots, d_{max}\}$ 、 $d_{max} = d_{max}/M$ 、 $\delta$  は復号誤り率である。検討する確率分布を図 2 に示

す。PER により LT パケットの残存率 (消失しない確率) は

$$P_{succ} = \sum_{d=1}^{d_{max}} \Omega(d)(1 - P_e)^{d\tau},$$

WSN に残存するパケット数は  $N_s = P_{succ}bN$  である。

ここで  $P_e$  は PER の値である。各次数に対して、LT パケットの平均遷移回数は次式で表せられる。

$$f(d) = P_e \sum_{i=1}^{d-1} i(1 - P_e)^{i-1} + d\tau(1 - P_e)^{d\tau}.$$

各 LT パケットの平均遷移回数は  $N_t = \sum_{d=1}^{d_{max}} \Omega(d)f(d)$  となり、LT 符号化時における、ノードの総送信回数は  $N_T = N_t bN$  である。また、モバイルコレクタが LT パケットを  $N'$  個収集するためのノード送信回数を考慮すると、WSN 内の総送信回数は

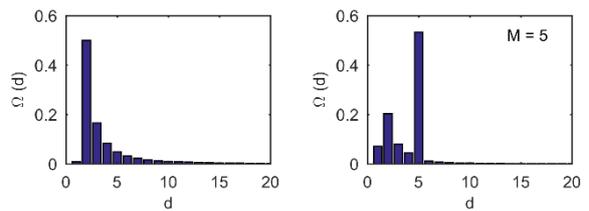
$$N_{total} = N_T + N'/P_m$$

ただし  $P_m$  はモバイルコレクタがパケットを収集する際、誤り無く伝送できる確率である。検討した WSN の諸元を表 2 に示し、理論解析結果を図 3 に示す。 $P_e$  の劣化によって総送信回数 ( $N_{total}$ ) が減少するが、WSN に消失しない LT パケット数 ( $N_s$ ) も減少する。また、 $M$  が増えると  $N_{total}$  が増加し、 $N_s$  が減少する。

$M = 5$  の時、Robust Soliton 分布は Ideal Soliton と同等な特性を得られ、 $M < 5$  の時、Robust Soliton 分布の  $N_{total}$  がより少なく、残存率がより高くなる。 $M$  は少ない方が望ましいが、平均次数が小さくなり、復号するための収集 LT パケット数が増加する問題がある [5]。また理論解析の結果と計算機シミュレーションの結果がよく一致することも分かった。 $M$  の設定については、さらなる計算機シミュレーションによる検討が必要である。図 4 では復号されたデータパケットの平均パケット誤り率と平均収集 LT パケット数を示す。提案方式の有効性を示した。

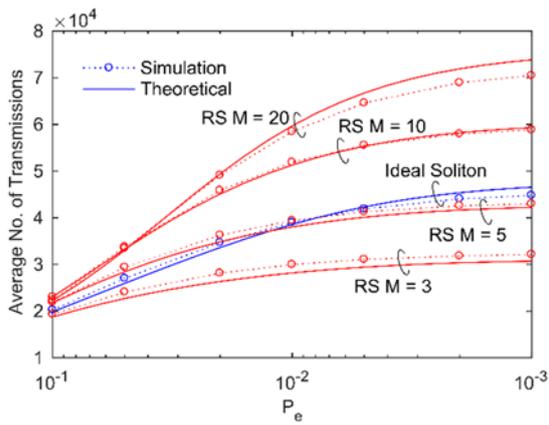
表2 計算機シミュレーション諸元 II

センサノード数、 $N$	1000
伝送距離、 $r$	0.05
収集 LT パケット数、 $N'$	1200
ノードあたりの LT パケット発生数、 $b$	3
ミキシングタイム、 $\tau$	2, 3, 6
最大次数、 $d_{max}$	100
LT 復号誤り率、 $\delta$	0.01
Robust Soliton 分布の $M$	3, 5, 10, 20
パケット誤り率、 $P_e$	0.001 - 0.1
パケット収集成功率、 $P_m$	$1 - P_e$

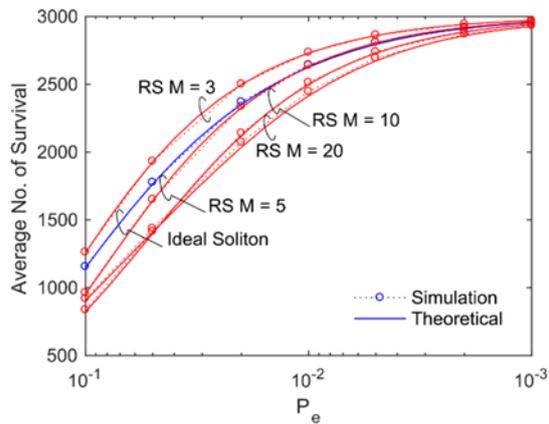


(a) Idea Soliton (b) Robust Soliton

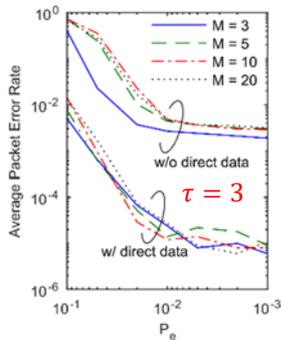
図2 検討した次数の確率分布関数



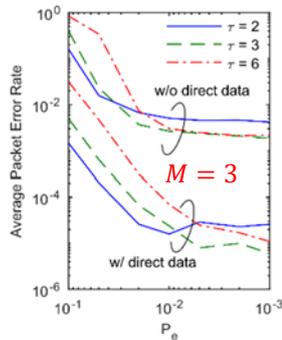
(a) 平均総送信回数、 $\tau = 3$



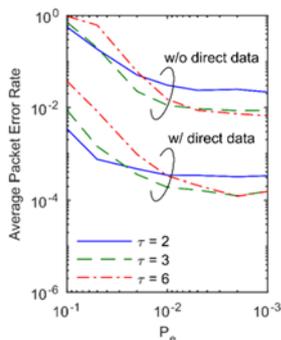
(b) LT 符号パケットの残存率、 $\tau = 3$   
図3 理論解析結果



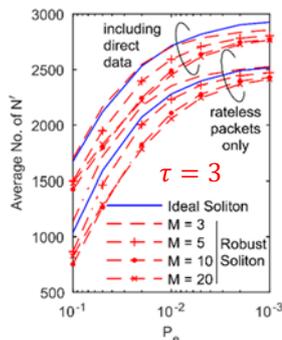
(a) Robust Soliton



(b) Robust Soliton



(c) Idea Soliton



(d) 平均収集パケット数

図4 復号されたデータパケットの平均パケット誤り率と平均収集LTパケット数

<引用文献>

[1] N. Harris, A. Cranny, M. Rivers, K. Smettem, and E. G. Barrett-Lennard, "Application of distributed wireless chloride sensors to environmental monitoring: initial results," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol.65, no.4, pp.736-743, April 2016.

[2] Y. Gao, W. Dong, C. Chen, J. Bu, and X. Liu, "Towards reconstruction routing paths in large scale sensor networks," *IEEE Trans. Comput.*, vol.65, no.1, pp.281-293, Jan. 2016.

[3] S. Bapat, V. Kulathumani, and A. Arora, "Analyzing the yield of Ex-Scal, a large-scale wireless sensor network experiment," *Proc. ICNP'05*, pp.1-10, Nov. 2005.

[4] <http://www.zigbee.org>, accessed April 2016.

[5] D. Vukobratović, Č. Stefanović, V. Crnojević, F. Chiti, and R. Fantacci, "Rateless packet approach for data gathering in wireless sensor networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol.28, no.7, pp.1169-1179, Sept. 2010.

[6] M. Luby, "LT codes," *Proc. of FOCS'02*, pp.271-280, Nov. 2002.

[7] C. H. Lee, J. Kwak, and D. Y. Eun, "Towards distributed optimal movement strategy for data gathering in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol.27, no.2, Feb. 2016.

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)

[学会発表] (計3件)

- ① Yuyuan Chang, Kazuhiko Fukawa, "Evaluation for Wireless Sensor Networks with LT Codes Considering Probabilities of Transmission Failure," RWW2018, 査読有, pp.1-4, Jan. 2018.
- ② 張裕淵, 府川和彦, "LT 符号を用いる無線センサネットワークの総送信回数に関する理論検討," 信学ソ大会, 2017年9月.
- ③ 張裕淵, 府川和彦, "シンクノードを用いない無線センサネットワークにおける自律分散送信タイミングスケジューリング法," 信学総合大会, 2017年3月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

張 裕淵 (CHANG, Yuyuan)  
東京工業大学・工学院・助教  
研究者番号: 00725616