

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870228

研究課題名(和文) 無線生体データネットワークに適した低コスト最適符号化への離散数学的アプローチ

研究課題名(英文) Discrete Mathematical Approach for Power Saving Coding Scheme of Wireless Body Area Networks

研究代表者

眞田 亜紀子(MANADA, AKIKO)

電気通信大学・その他の研究科・助教

研究者番号：20631138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：Wireless Body Area Network (以下WBAN)は人間とその周りに設置したデバイスを用いて、生体に関するデータなどを送受信する近距離無線通信ネットワークであり(例：無線心電計)主に医療の現場に応用されている。

WBANでは、使用するデバイスの小型化に伴う省電力性と情報伝達の正確性が重視されるため、計算量を抑えつつ誤り耐性の高い符号化が必要となる。本研究では、離散数学の観点からWBANに適した符号を理論的に解析し、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：Wireless Body Area Network (WBAN) is a network which is designed to wirelessly transmit physiological data (e.g., wireless ECG). Such a network is mainly intended for the use of medical field.

In WBAN, power saving due to miniaturized devices and data accuracy are main concerns, and therefore, a coding with low complexity and high robustness against errors is strongly desired. In this research, we theoretically analyzed suitable codes for WBAN using discrete mathematics and showed their efficiency.

研究分野：情報学基礎

キーワード：無線生体データネットワーク 離散数学 グラフ理論 排他的論理和 パケット損失 LDPC符号 確率
伝搬法

1. 研究開始当初の背景

Wireless Body Area Network (以下 WBAN) は、人体やその近傍にデバイスを設置し、生体に関する情報を伝達する近距離無線通信ネットワークであり(例:無線心電計, 脳波計), 主に医療やスポーツ科学の分野で活用されている。

WBAN では、デバイスの小型化に伴う省電力性、および情報伝達の正確性が重要な課題となる。そのためには、誤り訂正符号を用いることが有効であるが、2012年に発表された WBAN の規約(IEEE Std. 802.15.6)においては、誤り訂正符号の一種である BCH 符号の使用に関する記載はあるものの、計算量や誤り訂正性能の観点からどのような符号が適しているか、符号理論の観点から述べている研究は少ない。そこで、符号を用いた際の有効性を詳細に解析し適切な符号を新たに提案することで、WBAN の更なる通信性能向上に貢献することを目指した。

2. 研究の目的

WBAN に適した省電力かつ誤り耐性の高い符号を提案すべく、符号理論の観点から BCH 符号よりも省電力で誤り訂正能力の高い符号を理論的に提示し、その有効性を示すことを目標とする。即ち、送りたいデータ(パケット)を有限体上のベクトルと考え、符号化の際には有限体上での加算のみを使うことで、計算量を抑えつつどれだけ誤りに強い符号を生成できるかについて考察する。

3. 研究の方法

上記の目的を達成すべく、主として離散数学、特にグラフ理論を研究の核として、以下の研究課題に取り組んだ。

(1) XOR 符号の消費電力検証、および BCH 符号との連結符号化の性能評価:

まず、最大2つのパケットの2元有限体上の加算(排他的論理和: XOR)のみ許す符号化を考え(以下、XOR 符号)、その符号化の消費電力を定量的に評価する。また、XOR 符号は、パケット損失誤りには有効だが(例:パケット p_1 が損失しても、 p_1+p_2 と p_2 が受信されれば、 p_1 が求められる)、ビット反転誤りに対応できない。そこで、XOR 符号と BCH 符号を連結させ、ビット反転誤りにも対応可能にした符号の性能を評価する。

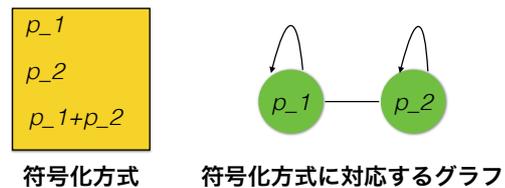
(2) パケット損失に強い符号化方式を導くためのグラフ理論的解析の確立:

XOR 符号は、2つのパケットを $GF(2)$ 上のベクトルと考え、各要素ごとに加算をすることと同値である。そこで、パケットを一般の体 $GF(q)$ 上でのベクトル、また XOR を $GF(q)$ 上の加算と考えることで議論を一般化し、パケットをそのまま送信、もしくは2つのパ

ケットの加算のみを利用することで、パケット損失耐性をどこまで高められるかが重要な問題となる。そこで、与えられた符号化方式(どのようにパケットを加算して送るかをもとめられたリスト)に対し、

- 頂点は、送信したいパケット全体とする。
- p_i+p_j を送信する場合には p_i と p_j の間に辺を引く。
- p_i そのものを送信する場合には p_i にループをつける。

として生成されるグラフを対応させ(図1参照)そのグラフをもとに、符号化方式がパケット損失に対してどのくらいの耐性を持つか解析する。



符号化方式 符号化方式に対応するグラフ

図1: 符号化方式と対応するグラフの例

また、符号理論で近年注目されている低密度パリティ検査符号(Low Density Parity Check code; 以下 LDPC 符号)について当該研究中に本格的に学び始め、その誤り訂正能力に非常に興味をもった。よって、上記の課題の拡張として、新たに以下の課題にも取り組んだ。

(3) LDPC 符号、特に Irregular Repeat Accumulate (以下 IRA) 符号の符号化・復号からの性能向上:

線形符号 C は、パリティ検査行列 H を用いて $C=Ker(H)$ と表すことができる。2元 LDPC 符号は、 H における1の数が非常に少ない線形符号である。LDPC 符号は、パリティ検査行列 H を変数ノード(H の列に対応)とチェックノード(H の行に対応)からなる二部グラフ(タナーグラフ)で表現できる(図2参照)。

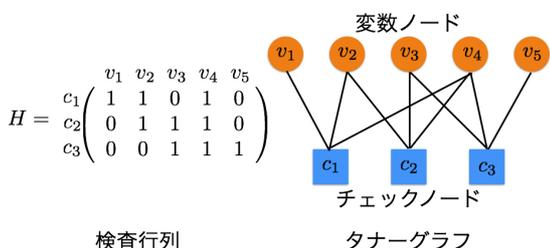


図2: 検査行列と対応するタナーグラフの例(下記学会発表①の Tech. Report より引用)

また「すべての変数ノードとチェックノードが、送信された符号語に関する情報の受け渡しを行う」ことを1反復とし、反復を繰り返すことで符号語を推定する確率伝搬法(Belief Propagation Decoding, 以下 BP

復号法)を用いることで、シャノン限界に近い誤り訂正能力をもつことが知られている。特に IRA 符号は、LDPC 符号の一種でタナーグラフにジグザグ構造を持ち(図3参照)、タナーグラフのみを用いて符号化や復号ができるだけでなく、符号化における計算量も抑えることができる。XOR 符号よりは符号化が複雑となるが、IRA 符号は一般の LDPC 符号と同様、もしくはそれ以上の誤り訂正能力をもつことが知られているため、より正確な伝達に重きをおく場合には、WBAN に適した符号化として提案できる。そこで、符号化と復号の観点から IRA 符号の性能をさらに向上させることを目指す。

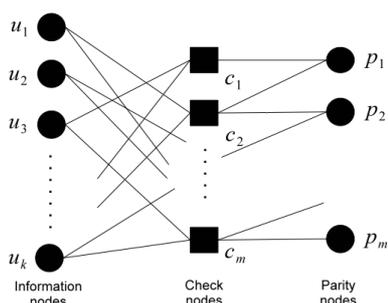


図3 : IRA 符号のタナーグラフの例
(下記学会発表②の Tech. Report より引用)

4. 研究成果

(1) XOR 符号の消費電力検証, および BCH 符号との連結符号化の性能評価:

WBAN で使用が推奨されている BCH(63, 51) 符号を比較対象とし、BCH 符号と XOR 符号の消費電力を、集積回路の一種である FPGA を用いて計測した。その結果、XOR 符号は、BCH 符号に比べて約 94% 電力を削減することを確認した。よって、XOR (一般に有限体上の加算) のみを使用する符号化は消費電力を効率的に抑えることができるため、省電力符号化として WBAN への応用が大いに期待できる。

また、XOR 符号と BCH 符号を接続させた符号をパケット損失とビット反転が発生する通信路に通し、接続符号の誤り訂正能力を検証した。その結果、XOR 符号の後に BCH 符号を接続させた符号 (XOR-BCH 符号) は、BCH 符号のみを用いた時よりも誤り確率が最大約 40% 減少した。また、BCH 符号の後に XOR 符号を接続させる符号 (BCH-XOR 符号) は、ビット反転誤り確率が低いところでは XOR-BCH 符号と同等の性能を示し、かつ省電力であることがわかった。

これらの結果は、BODYNETS 2013 にて発表した。

(2) パケット損失に強い符号化方式を導くためのグラフ理論的解析の確立:

受信側ですべてのパケットが復元できるための必要十分条件は、グラフ理論の観点か

ら与えることができる。これまで、この必要十分条件をもとに、パケット数と送信パケット数の冗長度 (もともと送りたいパケット数と、符号化して実際に送信するパケット数の比) が与えられた条件下で、最大いくつのパケット損失までなら常に受信側で復元可能か、さらに、復号可能確率 (すべてのパケットが復元できる確率) などについて解析してきた。当該研究期間中は、これまでに得た結果を更に一般化し、完全な証明を与えた。またグラフ同士の復号可能確率の再帰関係も明確に示した。

次に、高いパケット損失耐性をもつ符号化方式を生成するアルゴリズムについて得ていた見識を更に深めた。具体的には、そのアルゴリズムを用いて作成した符号化方式は、これまで得られた理論的結果の最適値を満たすことを確認した。更に、提案アルゴリズムを用いて作成した符号化方式の復号可能確率を求めたところ、符号化方式を用いず送信する場合の復号可能確率と比較して ($GF(q)$ の q が偶数、奇数の場合ともに、大幅に値を増加させることがわかった (例として使用した符号では、最大 50% 強の上昇がみられた)。よって、消費電力を極力抑えつつパケット損失に強い符号化方式を必要とする場合には、提案アルゴリズムで作成された符号化方式を適切な符号化として提唱できると考える。

現在、これらの結果をまとめて論文として投稿中である。また、当初目標としていた最適な符号化方式を提案することについては、今後も引き続き取り組んでいく。

(3) LDPC 符号, 特に IRA 符号の符号化・復号からの性能向上:

符号の性能に大きく関わるパリティ検査行列 H の行重みや列重み (行や列における 1 の数) は、タナーグラフにおけるチェックノードや変数ノードの次数 (付随する辺の数) に等しい。また、所望の重み条件を満たす検査行列を求めることは、重みに対応する次数条件を満たすタナーグラフを生成することと同値である。そこで、グラフ理論における **最大流問題** (各辺に容量が決められている仮定のもと、始点から終点までどれだけフローを流せるかを考える問題) を基礎とし、各辺の容量と次数を対応づけることで、任意の次数条件を満たすタナーグラフの生成法を提案した。これまでは変数ノードの次数のみ条件を満たし、チェックノードの次数はほぼ均等になるような生成方法が主流であり、たとえ変数ノードとチェックノードの次数条件を満たせるとしても、多重辺を防ぐための例外処理を組み込む必要があった。一方、提案手法では、変数ノードとチェックノードの次数条件を満たしつつ、多重辺を作ることなく構成できる点で優れている。また、与えられた次数条件を満たすタナーグラフが実際に

存在するか明確に判定できるという特徴も兼ね備えており、タナーグラフの新たな生成法として非常に有効である。

次に、復号の観点から、既存の BP 復号法を拡張した **Group Shuffled BP 復号法** (以下 GSBP 復号法) に着目し、さらなる改善を目指した。GSBP 復号法とは、変数ノードを r 個のグループに分割し、グループ内では並列処理 (並列での情報の受け渡し)、グループ間では逐次処理を行うことで、より信頼性の高い結果を同じ反復内で利用できるようにした復号法である ($r=1$ のときは BP 復号法と一致する)。元々の GSBP 復号法では、変数ノードの添字の昇順にグループ分けをしていたが、タナーグラフは木構造 (閉路がないグラフ) に近いほど符号としての性能が良いとされているため、新たに各変数ノードの次数、および変数ノードの **局所的内径** (その変数ノードが含まれる最短閉路の長さ) をもとにグループ分けをすることを提案した。提案のグループ分けを用いた GSBP 復号法を IRA 符号に適用させたところ、既存の GSBP 復号法に比べて誤り確率を改善させるだけでなく、符号語に収束するまでの反復回数も減少することがわかった。その効果は顕著にはあらわれなかったが、グループ分けは一度のみ行えばよく、局所的内径も、既存の最短経路を求めるプログラムを応用することで容易に求められる。よって GSBP 復号法の性能を高める即応用可能なグループ分けといえる。

これらの結果は BODYNETS 2014, および情報理論研究会で発表した。今後、さらなる実験や考察を加えて、論文として投稿・発信していく。また、与えられた次数でタナーグラフを作成する際に木構造に近づける手順を踏むことで、より符号の性能を上げることを新たな目標とする。

まとめ: WBAN に適した省電力かつ誤り耐性の高い符号化の提示という目標に向け、離散数学を用いて符号化の誤り耐性や構成法を理論的に考察し、シミュレーションなども行った。実際の環境下での実験までは行えなかったが、今後は、これまで解析してきた符号の実環境での有効性を示したい。

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 2 件): すべて査読有

- ① Ryuichi Tatsukawa, Akiko Manada and Hiroyoshi Morita, “*Irregular Repeat Accumulate Codes Based on Max-Flow Algorithm for Energy-Saving Networks*,” Proc. 9th International Conference on Body Area Networks (BODYNETS2014), pp. 326-330, Oct. 2014. DOI:10.4108/icst.bodynets.2014.256920

- ② Keigo Yokota, Akiko Manada and Hiroyoshi Morita, “*An XOR Encoding for Wireless Body Area Networks*,” Proc. 8th International Conference on Body Area Networks (BODYNETS2013), pp. 240-243, Oct. 2013. DOI:10.4108/icst.bodynets.2013.253570

[学会発表] (計 2 件)

- ① 吉田恭平, 森田啓義, 眞田亜紀子, 立川隆一, “*Group Shuffled BP 復号法の Local Girth を考慮したグループ分割手法の提案*,” 情報理論研究会, 2016 年 1 月 19 日, 関西学院大学 大阪梅田キャンパス (IEICE Tech. Report, IT2015-79, pp. 173-177, 査読なし)。
- ② Ryuichi Tatsukawa, Akiko Manada and Hiroyoshi Morita, “*Performance evaluation of Irregular Repeat Accumulate codes characterized by Tanner graphs with various degrees*,” 情報理論研究会, 2015 年 7 月 13 日, 東京工業大学 大岡山キャンパス (IEICE Tech. Report, IT2015-18, pp. 7-12, 査読なし)。

[その他]

Dr. Eimear Byrne (University College Dublin, アイルランド) を招聘した際に、電通大にて講演会を開催: 2014 年 12 月

6. 研究組織

(1) 研究代表者

眞田 亜紀子 (MANADA, Akiko)
電気通信大学・情報システム学研究所・助教
研究者番号: 20631138

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

BYRNE Eimear
Lecturer, University College Dublin

横田 啓吾 (YOKOTA, Keigo)
電気通信大学博士前期課程学生, 2014 年 3 月修了

立川 隆一 (TATSUKAWA, Ryuichi)
電気通信大学博士前期課程学生, 2015 年 3 月修了

吉田 恭平 (YOSHIDA, Kyohei)
電気通信大学博士前期課程学生, 2016 年 3 月修了