

GA を用いた LDPC 符号構成法における GA パラメータチューニング

野里裕高^{†1} 高橋栄一^{†2}
村川正宏^{†2} 樋口哲也^{†2}

LDPC (Low-Density Parity-Check) 符号は理論限界に近い性能を実現可能な誤り訂正符号として現在注目を集めているが、短い符号長における高性能な LDPC 符号の構成方法が確立されていないため、実用化は始まっているもののまだまだ発展の余地がある。そこで我々は遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms, GAs) を用いた LDPC 符号構成法を提案した。提案方法は、従来方法により構成した符号を初期個体とし、GA を使うことで、より優れた性能を示す符号を探索する点が独創的である。本稿では、提案方法における GA パラメータ調整を行うことで、効率良く高性能な解を構成可能な交叉方法、交叉率、及び突然変異率の検討を行った。

LDPC code construction method employing Genetic Algorithms

HIROTAKA NOSATO,^{†1} EIICHI TAKAHASHI,^{†2}
MASAHIRO MURAKAWA^{†2} and TETSUYA HIGUCHI^{†2}

LDPC (Low-Density Parity-Check) code, which is a class of error correcting codes, is attracting attention due to the considerable potential for error correction that approaches the theoretical limits. Although LDPC codes starts coming into practical use, they should be improved in terms of code construction, because there are no established construction methods for codes of relatively short length. We proposed an LDPC code construction method employing genetic algorithms (GAs). The originality of the method is that using codes constructed with conventional methods as initial individuals GA finds codes of better performance compared to the initial ones. In this paper, we examine some GA parameters that are more suitable for the method and able to be efficiently-found a new LDPC code.

1. はじめに

情報通信における誤り訂正技術¹⁾の向上は、高速かつ高品質な通信や記憶装置の大容量化を行うために非常に重要である。近年、高い誤り訂正性能を持つ符号として、低密度パリティ検査 (Low-Density Parity-Check, LDPC) 符号²⁾が注目されている。LDPC 符号は、Shannon 限界³⁾と呼ばれる誤り訂正符号の持つ性能の理論的な限界に非常に近い性能を有することが示されたこと⁴⁾⁵⁾、たちまち注目を集めるようになった。こうした特長を活かして、現在までに LDPC 符号は、無線通信の規格である WiMAX⁶⁾ やデジタル衛星放送に使用される DVB-S2⁷⁾、10G Ethernet の規格である IEEE 802.3an⁸⁾などに採用されており、今後更なる発展が期待されている。

LDPC 符号は高い誤り訂正能力を有することで注目されている誤り訂正符号であるが、比較的短い符号長における LDPC 符号の構成方法に関する問題点が発展の障害になっていると考えられる。これまでのところ性能仕様を満たす LDPC 符号を構成する方法は確立されておらず、現状ではランダムに生成した多数の LDPC 符号や代数的アルゴリズムを用いて構成した LDPC 符号、及びそのバリエーションの中から比較的性能の良いものを選択して使用している⁹⁾。

こうした問題点を解決するために、我々は確率的探索手法を導入した新しい LDPC 符号構成法を提案した¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾。具体的には、確率的探索手法として遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, GA)¹³⁾を用い、各符号の誤り訂正能力を評価値として、目標仕様を満たすような性能を持つ符号を探索する手法である。提案する方法は、従来手法で構成した LDPC 符号や性能の良い既知の LDPC 符号を GA の初期個体とすることで現在までに構成されていない高性能な LDPC 符号を新たに構成可能である。このように本手法は従来手法を代替するものではなく、従来手法を補完し、従来手法と組み合わせることで、より良い性能を持つ符号や目標仕様を満たすような符号を自動的に構成する工学的手法である。

本稿では提案方法の GA パラメータ調整により効率良く性能の良い LDPC 符号を構成可能な GA パラメータを検討し、その結果を報告する。

以下、2 で GA を用いた LDPC 符号構成法について説明し、3 で GA パラメータ調整に

^{†1} 筑波大学大学院

University of Tsukuba, Graduate School of Systems and Information Engineering

^{†2} 産業技術総合研究所

Advanced Industrial Science and Technology

よる検討について述べる．4にて検討結果を考察し，最後に5で結論をまとめる．

2. GA を用いた LDPC 符号構成法

本章では，我々が提案した GA を用いた LDPC 符号構成法について説明する．以下でまず，LDPC 符号について概説し，次に提案方法について述べる．

2.1 LDPC 符号

LDPC 符号は 1963 年に Robert G. Gallager の博士論文²⁾にて発表され，1996 年に David J.C. Mackay らにより再評価¹⁴⁾されたことで注目を集めるようになった誤り訂正符号である．2001 年に Richardson らにより，通信性能の理論上の限界値である Shannon 限界に極めて近い性能を引き出すことが可能であることが示されており⁴⁾⁵⁾，それ以降現在までに様々な通信規格に採用されている．

LDPC 符号はブロック符号と呼ばれる誤り訂正符号の一種である．ブロック符号は検査行列と呼ばれる行列により定義されるが，LDPC 符号の検査行列は一般に二値の疎行列を成す．疎な行列とは，各行及び列の重み（‘1’の要素数）が 0 ではないが非常に少ない行列を指す．

LDPC 符号は疎行列であれば自由に構成することが可能であるが，実用的である比較的短い符号長に対応する LDPC 符号は構成により実現可能な通信性能が大きく異なる．現状では高性能な LDPC 符号の構成方法は確立されておらず，ランダムに構成した多数の LDPC 符号や代数的アルゴリズムを用いて構成した LDPC 符号，及びそのバリエーションの中から比較的性能の良いものを選択している．そのため従来方法により性能の良い LDPC 符号構成法が提案できれば，実用化拡大に寄与することができる．

2.2 提案方法概要

ランダムを使用した新しい LDPC 符号の構成法として，遺伝的アルゴリズム (GA)¹³⁾ による LDPC 符号構成法を提案する．提案方法を用いることでユーザが必要とする誤り訂正性能を満たす LDPC 符号の効率良い入手を可能にする．提案方法における染色体コーディング方法を図 1 に示す．

染色体は LDPC 符号における行を降順に横に並べることにより LDPC 符号を一行の固定長のビット列に変換したもので定義する．なお，データを保持する際には，ビット列において ‘1’ のある場所の序数を取り出した可変長のデータとして扱うことで，提案方法を用いた構成を行う際のリソース消費量を最大で 0.16 倍に抑えることが可能になる．

図 2 に提案方法の処理フローを示す．まず，従来の LDPC 符号構成法や既知の性能の良い

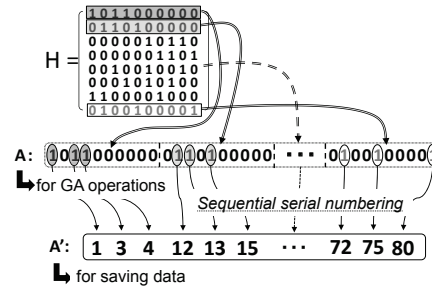


図 1 LDPC 符号から染色体への変換方法
Fig.1 Transform method from LDPC code to chromosome using GA

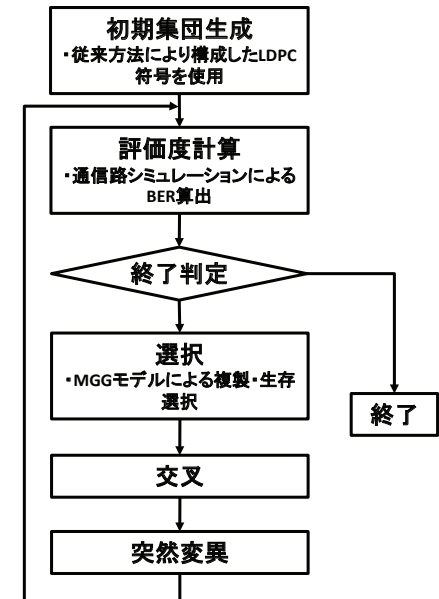


図 2 提案方法における処理の流れ
Fig.2 Proposal method overview

い LDPC 符号を使って初期個体を生成する．性能の良い LDPC 符号を初期個体に持たせることで，探索序盤にかかる手間を省くことが可能になり，提案方法による性能の良い LDPC 符号構成にかかる時間を短縮することができる．次に，評価値計算として通信路シミュレーションを行い LDPC 符号の誤り訂正性能を算出する．通信路シミュレーションでは LDPC 符号を使用した符号化及び復号処理を行い，復号後のビット誤り率 (Bit Error Rate, BER) を計算する．そして，集団に対して MGG モデルによる選択を行う．MGG モデルは初期収束を回避し，探索後半至るまで多様性を保つことで進化の停滞を抑制する方法である．具体的には，複製選択に使用する親は母集団から 2 個体をランダムに非復元抽出することにより決定する．生存選択では，親 2 個体と，親から生成した子 2 個体の計 4 個体において，最良の性能を持つ 1 個体とルーレット選択により残りの 3 つから 1 個体を選びだし，親 2

個体と入れ替える．終了判定は世代数によって行う．

3. GA パラメータ調整

提案方法を用いて効率良く高性能な LDPC 符号が構成可能になる GA パラメータを比較検討する．本稿における検討では，世代交代に MGG モデル¹⁵⁾，評価値に通信路シミュレーションによって算出される BER を使用した提案方法に対して，交叉方法，交叉率，及び突然変異率の順に検討を行う．通信路シミュレーションにおける信号対雑音比 (Signal to Noise Ratio, SNR) は 2.0 とした．

3 つの GA パラメータを検討するにあたり，対象とする LDPC 符号のサイズは 528×1056 ，GA の個体数は 100，世代数は 20000，試行回数は 10 回とした．初期個体には，列重みが 3 ないし 4 で行重みが 2 以上になるように制約を設けてランダムに構成した LDPC 符号を使用した．

比較検討では以下の実行環境により行った．

- CPU: Intel(R) Core(TM) 2 CPU X6800 2.93GHz
- Memory: 8GB
- OS: RedHatEnterpriseLinux
- C compiler: GCC version 3.4.6

(1) 交叉方法

交叉方法の検討として，一点，二点，一樣交叉をそれぞれ使用した提案方法にて LDPC 符号を構成し，最良の LDPC 符号が示す性能を比較した．それぞれの交叉方法において，交叉率を 0.1, 0.5, 0.9 として実験を行い，最良の試行について比較を行った．

図 3, 図 4, 図 5 はそれぞれ，交叉率を 0.1, 0.5, 0.9 とした時の各交叉方法を使用した提案方法における最良の試行結果である．横軸は GA の世代数，縦軸は各世代における最良の LDPC 符号の性能である．全ての比較結果において，一樣交叉を使用した試行が優位な性能を示した．

(2) 交叉率

一樣交叉を使用した提案方法において，0.1 から 1.0 までの交叉率をそれぞれ適用して LDPC 符号構成を行い，最良の LDPC 符号が示す性能を比較した．図 6 は交叉率別の提案方法における最良の試行の結果である．横軸は世代数，縦軸は各世代にて得られる最良の LDPC 符号が示す性能を表している．図 6 より 20000 世代終了時に 0.9 の交叉率を適用した試行が最も良い結果となった．

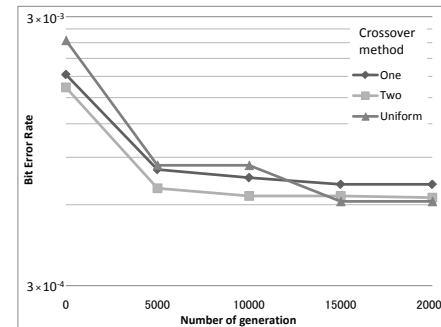


図 3 交叉率 0.1 における交叉方法の比較
 Fig. 3 Crossover rate:0.1

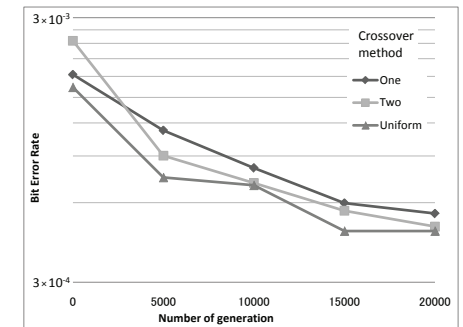


図 4 交叉率 0.5 における交叉方法の比較
 Fig. 4 Crossover rate:0.5

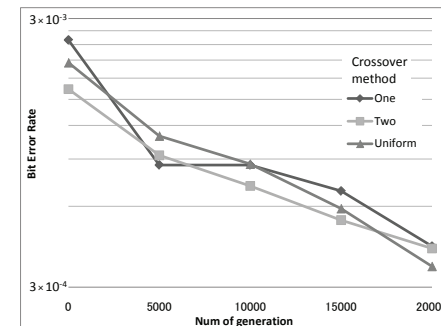


図 5 交叉率 0.9 における交叉方法の比較
 Fig. 5 Crossover rate:0.9

(3) 突然変異率

交叉率を 0.9 として一樣交叉を使用した提案方法において，最適な突然変異率を比較により決定した．0 から 1.0×10^{-7} までの突然変異率を用いた試行をそれぞれを行い，最も良い試行結果を比較した．図 6 は交叉率 0.9，一樣交叉を使用した提案方法において異なる突然変異率による GA で得られる最適解の推移を示している．横軸は GA 世代数，縦軸は各世代数における最良個体の BER である．20000 世代終了時の最適解を比較すると突然変異率が 1.0×10^{-6} の時が最も良い解となった．

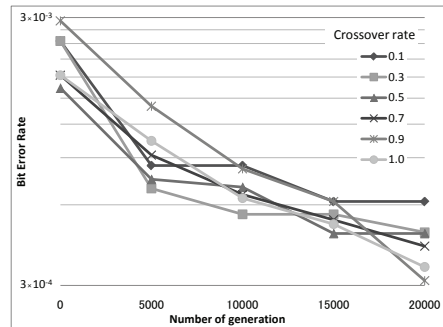


図 6 交叉率の違いによる提案方法の比較
Fig.6 Comparison of crossover rate

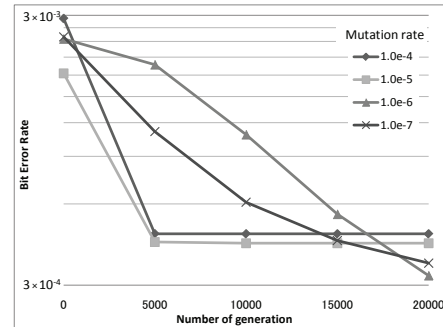


図 7 突然変異率の違いによる提案方法の比較
Fig.7 comparison of mutation rate

4. 考 察

本稿では、交叉方法、交叉率、突然変異率の順に検討を行った結果、世代交代に MGG モデル、性能評価に SNR が 2.0 の通信路シミュレーションによって得られる BER を使った提案方法には、交叉方法に一樣交叉を使用し、交叉率を 0.9、突然変異率を 1.0×10^{-6} とすることでより効率良く探索できることが分かった。しかしながら、それぞれの検討結果において 20000 世代目における各最良試行の差はわずかであったため、世代数を増やして評価を行う必要がある。

5. おわりに

本稿では、LDPC 符号の新たな構成方法として提案した遺伝的アルゴリズムを用いた LDPC 符号構成法について効率良く性能の良い LDPC 符号を構成可能な GA パラメータを検討した。評価値を SNR=2.0 の雑音を仮定した通信路シミュレーションを行った際に得られる BER とし、世代交代モデルに MGG モデルを使用して、交叉方法、交叉率、突然変異率の順に検討を行いパラメータを決定した。検討の結果、本稿における比較では、交叉方法に一樣交叉を使用し、交叉率を 0.9、突然変異率を 1.0×10^{-6} とすることで最も効率良く高性能な LDPC 符号を構成することができた。

今後は、GA の世代数や個体数といった他のパラメータについても検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) Lin., S. and J.Costello, D.: *Error control coding second edition*, PEARSON Prentice Hall (2004).
- 2) Gallager, R.: *Low-density parity-check codes*, M.I.T.Press,Cambridge,MA (1963).
- 3) Shannon, C. and Weaver, W.: *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press (1963).
- 4) Richardson, T. J., Shokrollahi, M. A. and Urbanke, R. L.: Design of Capacity-Approaching Irregular Low-Density Parity-Check Codes, *IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY*, VOL. 47, NO. 2 (2001).
- 5) Chung, S.-Y., Forney, G., J.Richardson and Urbanke, R.: On the Design of Low-Density Parity-Check Codes within 0.0045dB of the Shannon Limit, *IEEE COMMUNICATIONS LETTERS*, VOL 5, NO 2 (2001).
- 6) *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems* (2009).
- 7) Morello, A. and Mignone, V.: DVB-S2: The Second Generation Standard for Satellite Broad-Band Services, *Proceedings of the IEEE*, Volume94, Issue:1 (2006).
- 8) *IEEE Standard for Information technology, Telecommunications and information exchange between systems, Local and metropolitan area network, Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection(CSMA/CD) access method and Physical Layer specifications* (2008).
- 9) 和田山正: 低密度パリティ検査符号とその復号法, トリケップス (2002).
- 10) 石田由香里, 野里裕高, 飯島洋祐, 村川正宏, 梶谷勇, 高橋栄一, 古谷立美, 樋口哲也: 可変長染色体 GA を用いた LDPC 符号の最適化設計システムの提案, 情処学 MPS 研報, MPS-68 (2008).
- 11) 野里裕高, 石田由香里, 村川正宏, 梶谷勇, 高橋栄一, 古谷立美, 樋口哲也: LDPC 符号高速生成システムの提案と評価, 情処学 MPS 研報, MPS-73 (2009).
- 12) 石田由香里, 野里裕高, 村川正宏, 梶谷勇, 高橋栄一, 古谷立美, 樋口哲也: 可変長染色体 GA を用いた LDPC 符号の最適化設計システムの改良, 信学技報, Vol.108, No.82, pp.43-48 (2008).
- 13) Goldberg, D.: *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning.*, ADDISON WESLEY (1989).
- 14) Mackay, D. and Neal, R.: Near shannon limit performance of low density parity check codes., *Electron Lett*32(18) (1996).
- 15) 佐藤 浩, 小野 功, 小林重信: A New Generation Alternation Model of Genetic Algorithms and Its Assesment, *人工知能学会誌*, Vol.12, No.5, pp.734-744 (1997).