

4K/8K 映像配信に適した MMT 誤り訂正符号の提案 A MMT Forward Error Correction Code for 4K/8K Video Distribution

外村 喜秀[†] 白井 大介[†] 仲地 孝之[†] 山口 高弘[†] 藤井 竜也[†]
Yoshihide Tonomura Daisuke Shirai Takayuki Nakachi Takahiro Yamaguchi Tatsuya Fujii

1. はじめに

現在, ISO/IEC Moving Picture Experts Group (MPEG) では MPEG-H としてヘテロジニアス環境に対応する高効率符号化方式 (High Efficiency Video Coding : HEVC[1]) とトランスポート方式 (MPEG Meia Transport : MMT[2]) の標準化を進めている. 新しい動画圧縮規格の HEVC は, 現行規格の MPEG-4 AVC/H.264[3] のおよそ 2 倍の符号化効率を達成し, 4K/8K などの高品質な動画圧縮に用いられることが期待されている.

一方, 新しいトランスポート方式の MMT は, 現行規格の MPEG-2 TS[4] では困難であった通信・放送が連携した伝送を可能とし, アプリケーションレイヤー誤り訂正 (AL-FEC) の機能をもサポートしているため, HEVC と併せて高品質な次世代放送システムの候補として注目されている. 本稿では, 筆者らが提案している大容量映像配信に適した MMT 誤り訂正符号の方式を述べるとともに, その高速な実装について議論する.

2.MMT の概要 [5][6]

図 1 に MMT の基本構成を示す. MMT では, 近年のデジタルコンテンツに関する多様化に対応するため, (1) メディア情報のカプセル化形式, (2) 制御メッセージ情報形式, (3) 配信形式, の 3 つの構成要素を統合的に扱うことで, MPEG-2 TS では難しかったサービスの高度化を可能にしている.

MMT のメディア情報のカプセル化形式では, Media Fragment Unit (MFU) や Media Processing Unit (MPU) と呼ばれるデータユニットが規定されており, MFU や MPU はアプリケーション要求により使用/不使用含めて柔軟に作成することができる. MPU は ISO Base Media File Format (ISOBMFF)[7] の拡張形式であり, 映像/音声などの単一メディアから構成され, ランダムアクセスポイントとなるアクセスユニットを先頭を持っている. 通常, MFU は MPU より小さいデータユニットで, 1 つないし複数の MFU を内包する形で MPU にラッピングされる.

MMT の制御メッセージ情報形式では, コンテンツに関する制御情報と配信に関する制御情報が規定されている. コンテンツに関する制御情報は, 例えば MPU の取得先の情報や MPU の表示時刻/表示位置に関する情報などである. 配信に関する制御情報は, 例えば, AL-FEC の情報やネットワークコンディション情報などである.

MMT の配信形式では, アプリケーションレイヤのトランスポートプロトコルとなる MMT プロトコルを定めており, MMT パケット形式や MMT ペイロード形式

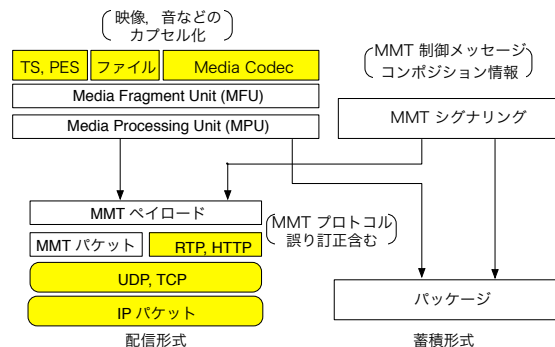


図 1: MMT の基本構成

が規定されている. MMT プロトコルは IETF の Real-time Transport Protocol (RTP) などと同層のプロトコルであり, MMT プロトコルに適したバッファモデルや AL-FEC フレームワークが規定されている.

以上で述べたように, MMT では 3 つの構成要素を統合的に扱うことで, 異なる伝送路を横断的に利用したサービス (e.g. 通信と放送) や, 任意のコンポーネントを差し替えたり追加するなどのスケラブルサービスや, マルチディスプレイを利用するサービスなどを可能にしている.

3.MMT LDGM 符号

現在, MPEG では MPEG-H Part1 の MMT では AL-FEC フレームワークのみを定め, 個別の FEC 技術については MPEG-H Part 10[8] での標準化を進めている. 本章では筆者らが提案している MMT LDGM 符号について述べる.

3.1.MMT LDGM 符号の概要

MMT LDGM 符号は, IETF の LDPC-staircase 符号 [9] と同様にパリティ検査行列 H 中に階段行列構成を持つ線形符号である. IETF の LDPC 符号と異なり, MMT LDGM 符号の行列は少ない演算で効率的に誤りを訂正するメッセージパッシングアルゴリズム (MPA) と呼ばれる方法に準最適化された行列を使用し, パケットを複数シンボルに分割することで復号性能を向上させている [10]. また, MPA および最尤復号 (MLD) の双方で優れた復号性能を引き出すことができるイレギュラー行列を用いることができ, 本稿により提案される“繰り返し MLD 法”を用いることでより少ない演算量で MLD を実行することもできる. さらに, 階層符号化データを効率的に保護する Layer-Aware FEC に対応した MMT LA-LDGM 符号を用いることもできる.

[†] 日本電信電話株式会社 NTT 未来ねっと研究所
NTT Network Innovation Laboratories, NTT Corporation

3.2.MMT LDGM 符号

(1) MMT LDGM 符号の符号化および復号処理

MMT LDGM 符号は XOR ベースの 2 元線形符号であり、その符号 C はパリティ検査行列 H の null space として次式で定義される。

$$C = \{ \mathbf{w} \in \mathbb{F}_2^n : H\mathbf{w}^t = 0 \} \quad (1)$$

ここで、添え字 n はブロック中のシンボル総数であり、 $\mathbf{w}$ は k 個のソースシンボル s と m 個のパリティシンボル r から次式で構成される。

$$\begin{aligned} \mathbf{w} &= [s \mid r] \\ &= [s_0 \ s_1 \ \dots \ s_{k-1} \mid r_0 \ \dots \ r_{m-1}] \end{aligned} \quad (2)$$

また、パリティ検査行列 H は階段行列 T と疎行列 G から次式で構成される。

$$\begin{aligned} H &= [G_{m,k} \mid T_{m,m}] \\ &= \left[\begin{array}{ccc|ccc} & & & 1 & & \\ 1 & & & & 1 & \\ & & & & & 1 \\ \dots & \dots & \dots & & \ddots & \ddots \\ & & & & & 1 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、添え字 m, k はそれぞれ行数と列数であり、パリティシンボル数、ソースシンボル数に対応する。

【符号化処理】

MMT LDGM 符号の符号化処理は式 (2) 式 (3) を式 (1) に代入することで次式で行われる。

$$\begin{aligned} 0 &= [H_{m,n}] \mathbf{w}^t \\ &= [G_{m,k}] \mathbf{s}^t + [T_{m,m}] \mathbf{r}^t \\ \therefore \mathbf{r}^t &= [T^{-1}] [G] \mathbf{s}^t \end{aligned} \quad (4)$$

上式より、MMT LDGM 符号の符号化処理は疎行列とアキュムレータから構成することができ、一般的な LDPC 符号等よりも演算量が少ない特徴がある。

【復号処理】

MMT LDGM 符号の復号処理は式 (4) を満たすことで行われる。今、 ε を消失したシンボルに対応するインデックス集合とし、それに対応するパリティ検査行列および消失シンボルを $H_\varepsilon, \mathbf{w}_\varepsilon$ とすると、式 (4) より次式を得る。

$$H_\varepsilon \mathbf{w}_\varepsilon^t = H_\varepsilon \mathbf{w}_\varepsilon^t \quad (6)$$

ただし、 ε は受信したシンボルに対応するインデックス集合であり $\varepsilon = [n] \setminus \varepsilon$ である。消失通信路の場合、疎行列 H_ε のランク数が消失シンボル数 $|\varepsilon|$ より大きければ消失はすべて回復することができる。つまり、問題はいかに小さい演算コストで消失シンボルを回復するかである。そこで、以下では“繰り返し MLD 法”と呼ぶ方法を提案する。

線形方程式を満たす方法は MPA による方法と MLD となるガウスの消去法 (GE) による方法がある。一般

に、MPA は演算コストが小さいが復号性能は高くなく、GE は演算コストが大きいが復号性能が高いという特徴がある。そのため、“繰り返し MLD 法”のポイントは、できるだけ演算コストの小さい MPA での復号回数を多く行い、演算コストの高い GE での復号回数を少なく抑えることにある。

まず MPA に先だって、効率的に“繰り返し MLD 法”を実行するために式 (6) を次式に変換する。

$$\mathbf{c}_1^t + H_\varepsilon \mathbf{w}_\varepsilon^t = E \mathbf{c}_2^t + H_\varepsilon \mathbf{w}_\varepsilon^t \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2$ は $\mathbf{r}$ と同サイズのキャッシュであり E は単位行列である。以下、“繰り返し MLD 法”の処理について述べる。

【繰り返し MLD 法】

Step 1 では MPA の処理を始める。式 (7) の左辺の疎行列 H_ε において行重みが 1 の行 l を見つける。見つければ Step 2 へ進み、GE 処理を一度も実行していなければ Step 5 に進み、それ以外は Step 7 へと進む。

Step 2 では対応する l 行目の $H_\varepsilon \mathbf{w}_\varepsilon^t$ を計算し l 番目のキャッシュ $\mathbf{c}_1$ に保存し、 H_ε の l 行目を全て 0 にする。また、左辺の l 行目に対応する消失シンボルを、同じく l 番目の $\mathbf{c}_1$ および $\mathbf{c}_2$ の和として回復する。

Step 3 では左辺において回復した消失シンボルに対応する列の非ゼロ要素行を抽出し、抽出した行に対応するキャッシュ $\mathbf{c}_1$ に回復した消失シンボルを足し合わせる。次に、回復したシンボルと同じく対応する列を 0 とし、 $\mathbf{w}_\varepsilon, H_\varepsilon$ としてそれぞれ更新する。

Step 4 では、消失シンボル $\mathbf{w}_\varepsilon$ が全て回復していれば終了とし、そうでなければ Step 1 へと進む。

Step 5 では GE の掃き出し処理に先立ち、式 (7) 中の H_ε の並び替え処理をおこなった行列を H'_ε として用意する。並び替えでは、掃き出し処理をする順番に列重みが小さい順に並び替える方法や、最小次数順序に基づく MD 法 [12] と呼ばれる並び替えが有効となる。

Step 6 では、Step 7 で作成した H'_ε に対して掃き出しにて三角化を実施し、また対応する処理を右辺の単位行列に実施し E' とする。掃き出しの結果、もしランク落ちが発生していたらそこで復号は終了とする。

Step 7 では、三角化した H'_ε および E' を用いて、後退代入により 1 つの消失シンボルを回復する。その際、Step 2 および Step 3 と同様の処理を行い、Step 1 へと進む。

上記の処理により、“繰り返し MLD 法”は、MPA にて復号が行われる際は疎行列 H_ε と単位行列 E を用いて復号し、GE にて復号を行う際は式 (7) 中の疎行列 H_ε は三角行列の H'_ε に、また、単位行列 E は密行列 E' にそれぞれ置き換えられて復号することになる。この処理の際、「GE にて 1 つの復号を行った後にまた MPA に

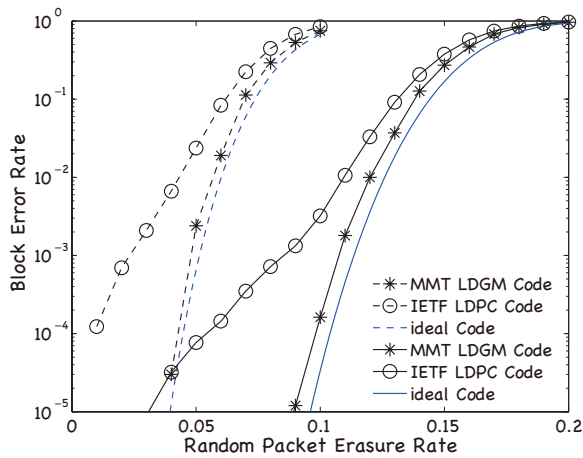


図 2: MMT LDGM 符号の符号化効率評価 (5M[bps])

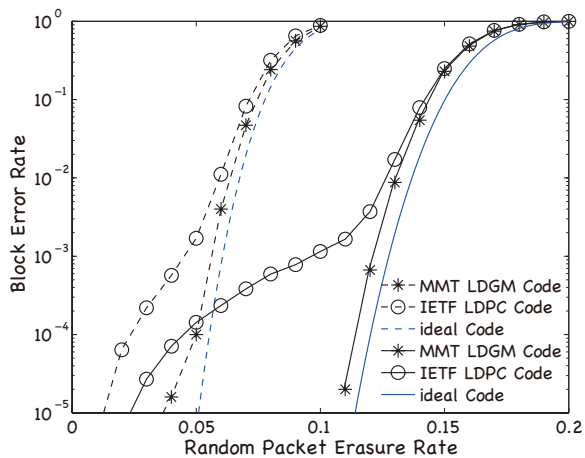


図 3: MMT LDGM 符号の符号化効率評価 (10M[bps])

戻る」ことで、演算コストの高い GE にて回復が行われるシンボル数を減らしているために高速な MLD での復号を可能にしている。

(2) MMT LDGM 符号のパラメータ

MMT LDGM 符号のパラメータについて述べる。一般に、1 シンボルは消失する単位 (e.g. 1IP パケット) に設定されるが、ブロック中のシンボル総数が少ない場合 ($n < 1000$) は符号化効率が悪くなることから MMT LDGM 符号ではパケットを複数シンボルに分割する方法がとられる。MMT LDGM 符号では分割数 D を 256 分割まで任意に設定することができる。

また、MMT LDGM 符号では疎行列 G は 2 つの任意の列重み $N1, N2$ を使用でき、2 つの列重みの比率もパラメータ R を用いて $r/255$ として任意に変更することができる。疎行列の生成には Progressive-Edge-Growth (PEG) アルゴリズムを用いる [11]。しかし、PEG アルゴリズムにより毎回行列を生成することは行列作成の演算コストが問題になる場合がある。そのため、MMT LDGM 符号では探索範囲 L を指定して高速化をはかるとともに、バンクチャータ処理によるレート可変に対応しており、1 つの行列を様々なレートに適用することが可能となっている。表 1 に MMT LDGM 符号のパラメータと推奨値をまとめる[‡]。なお、行列パラメータの推奨値の導出方法については、付録に Density Evolution 法による設計方法を記す。

4. 実験

MMT LDGM 符号の性能を評価する。実験条件として、1 パケットサイズを 1024[byte]、ソース情報のビットレートを 5M[bps]、10M[bps]、40M[bps] とし、FEC 処理の遅延時間は 0.5[秒] とした。パリティ量はソース情報に対して 10[%] および 20[%] 付加し、MMT LDGM 符号のパラメータはデフォルト値を用い、比較の IETF の LDPC-staircase 符号 [9] の方法では $N1$ パラメータを 4 とした。これは、疎行列の密度の観点から MMT

表 1: MMT LDGM 符号パラメータ

パラメータ	選択範囲 (推奨値)
分割数 D	1 ~ 256 (4000 < k)
列重み $N1, N2$	3 ~ 6, 4 ~ 19 (3, 7)
列重み比率 R	0 ~ 255 (48)
PEG 探索範囲 L	0 ~ 3 (3)
親行列サイズ K, M	0 ~ 2^{16} (1.2k, 1.2m)
レート可変モード M	0, 1 (0)
行列読み込みモード U	0, 1 (0)

LDGM 符号とほぼ等しいものとして選択した。また、復号方法は、MMT LDGM 符号の方は“繰り返し MLD 法”を用い、IETF の LDPC-staircase 符号ではハイブリッド復号法 [13] を用いた。結果を図 2, 3, 4 にそれぞれ示す。結果より、MMT LDGM 符号は最大距離分離符号に迫る性能を出せることがわかる。また、演算量として消失シンボルを回復する XOR の回数を、同じく MMT LDGM 符号と IETF の LDPC-staircase 符号と比較した。実験条件として、10M[bps] の場合と 40M[bps] における 20[%] のパリティ付加の場合を比較した。結果を図 5 に示す。結果より、“繰り返し MLD 法”により 40M[bps] の場合にエラーレートが高くなり、ガウスの消去法が多く用いられる場合に大きく演算量を削減できることがわかる。

5. まとめ

本稿では、4K/8K 映像配信に適した MMT 誤り訂正符号を提案した。まず、MMT の概要を述べ、MMT LDGM 符号の信号処理について述べた。また、MMT LDGM 符号の最尤復号を少ない演算量で実行できる“繰り返し MLD 法”を提案した。実験により、MMT LDGM 符号はブロックエラー評価において理論限界となる最大距離分離符号に迫る性能を有することが示された。また、演算量の評価では、提案された“繰り返し MLD 法”は高パケットエラーレート時において特に効果的に演算量を削減できることが示された。

[‡]本パラメータは CD(Committee Draft) の段階のものである。

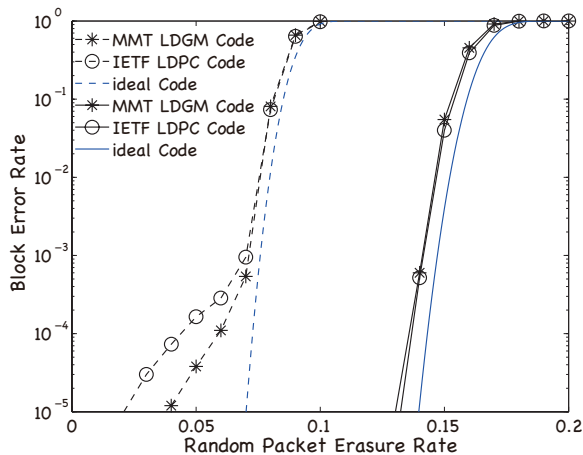


図4: MMT LDGM 符号の符号化効率評価 (40Mbps)

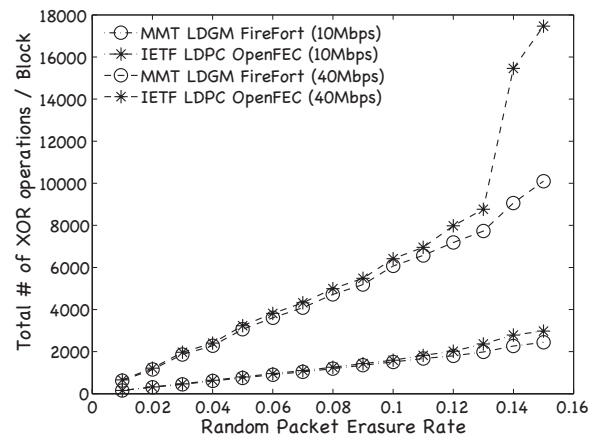


図5: 繰り返し MLD 法の演算量評価

参考文献

- [1] ISO/IEC 23008-2, Information technology – High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments – Part 2: High Efficiency Video Coding.
- [2] ISO/IEC 23008-1 DIS, Information technology – High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments – Part 1: MPEG media transport.
- [3] ISO/IEC 14496-10, Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 10: Advanced Video Coding.
- [4] ISO/IEC 13818-1, Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems
- [5] 青木 秀一 “MMT - 新たなメディアトランスポート技術が実現する放送と通信の連携” 画像電子学会 Advanced Image Seminar April 2013.
- [6] 仲地 孝之 “次世代映像プラットフォームと MMT 標準化動向” 第26回 情報伝送と信号処理ワークショップ CSWS, Nov. 2013.
- [7] ISO/IEC 14496-12, Information technology – Coding of audio-visual objects – Part 12: ISO base media file format
- [8] ISO/IEC 23008-10 CD, Information technology – High efficiency coding and media delivery in heterogeneous environments – Part 10: MMT FEC Codes
- [9] V. Roca, et al. “Low Density Parity Check (LDPC) Staircase and Triangle Forward Error Correction (FEC) Schemes,” IETF RFC 5170, June 2008
- [10] 外村 喜秀, 他, “動画配信のための下位互換性を考慮したパケットレベル LDGM 符号の構成と理論解析,” 信学会 A, Vol J93-A No. 3 pp.212-215.
- [11] Xiao-Yu Hu, et al. “Progressive edge-growth Tanner graphs,” IEEE Global Telecommunications Conference, '01. GLOBECOM 2001.
- [12] T. A. Davis, et al. “A column approximate minimum degree ordering algorithm,” ACM Transactions on Mathematical Software, vol 30, no. 3, Sept. 2004, pp. 353-376.
- [13] Mathieu Cunche, et al. “Cunche, M. and V. Roca, “Optimizing the Error Recovery Capabilities of LDPC-Staircase Codes Featuring a Gaussian Elimination Decoding Scheme,” 10th IEEE International Workshop on Signal Processing for Space Communications (SPSC '08), October 2008.

A.Density Evolution 法による行列設計

LDGM 符号中の疎行列 G において, あるエッジが次数 i のメッセージノードに接続している割合を λ_i , チェックノードに接続している割合を ρ_i と定義すると, 疎行列は以下の $\lambda(x)$ と $\rho(x)$ で決定づけられる.

$$\lambda(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_i \lambda_i x^{i-1} \quad (8)$$

$$\rho(x) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_i \rho_i x^{i-1} \quad (9)$$

今, 通信路でのパケット消失確率を p とし, 符号長無限およびループ無しを仮定すると, 次式を $x = (0, 1]$ の範囲で満たす時に復号は成功する.

$$x - p\lambda \left[1 - \left[\frac{1-p}{1-pR(1-x)} \right]^2 \rho(1-x) \right] > 0, \forall x \neq 0$$

$$\text{where } R(x) = \frac{\int_0^x \rho(t) dt}{\int_0^1 \rho(t) dt} \quad (10)$$

MMT LDGM 符号の推奨パラメータでは, 符号化率 85[%]($k/n=0.85$) の場合に 13[%] までの消失を理想的には回復可能となり, これは理論限界値と 2[%] のギャップとなる.

また, $N1, N2$ をデフォルト値とすると MMT LDGM 符号ではパラメータ R を変更することで平均列重みを 3 から 7 の範囲で可変にすることができる. 復号性能は復号法に MLD を用いる場合は平均列重みに応じて向上させることができ, 平均重みが 7 になると理想特性にほぼ張り付く結果となる. ただし, この場合は復号に関する演算量は大きく増加する. そのため, MMT LDGM 符号では, MPA と MLD の双方で優れた性能を発揮することができるパラメータを推奨値としている.