

反転分布モデルによる符号化ビットストリームの解析

大関和夫 島村定春

芝浦工業大学 大学院 工学研究科 電気工学専攻

〒330-8570 埼玉県さいたま市深作溜井原 307 番地

TEL 048-687-5069 FAX 048-687-5117

E-mail: {ohzeki, m100171}@sic.shibaura-it.ac.jp

キーワード MPEG-2, 符号化, 解析, ビットストリーム, エントロピー, 反転分布モデル

筆者らは MPEG-2 を主体として符号化系列の冗長度解析を行うことによって、符号化性能の評価を行って来た。符号化ビットストリームのエントロピー、サンプルエントロピー等を調べ、長いビット数ごとに区切ったビットパターンという統計量では 1 ビットあたりのエントロピーが 20-30%低下し、再圧縮の可能性ある事を示してきた。一方、この統計量はビット長が 1 ビット増加する毎にデータ量が 2 倍となり、対象としている圧縮ファイルのデータ量をどの程度確保すればよいか不明であった。データ量とともに符号化対象の映像や符号化パラメータの種類に関してもどの程度の数を用意すればよいか不明であった。本論文では、ビットストリーム解析の手法の検証を行い、計測結果の普遍的な信頼性を確保するために必要なビットストリームの長さ、種類の数を確認する。ビットストリームの長さについては、事象の種類の数倍が必要である事が分かった。また、種類に関しては、計測対象である確率事象をモデル化し、その分布の様態を調べた。あるサンプルに対する反転分布を考えると、そのサンプルと反転分布の和事象はエントロピーが 1 となる。モデルの分布の広がりにはほぼ均一である。MPEG 圧縮ファイルのサンプルの分布は特定領域に集積していることが、サンプルの和事象のエントロピーを計測することで示された。このサンプルによる検証は事象の数に連動して多く行う必要が無く、少数のサンプルで十分な結果を得ることが出来る。これらの検証手法を元に 20 ビットの長さのエントロピー計測を行い、対応するハフマン符号を作成し、再符号化を行い、再符号化システムの有効性を示すことができた。

Analysis of Coded Bitstream by Inverted Distribution Model

Kazuo Ohzeki and Sadaharu Shimamura

Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology

307, Fukasaku, Saitama 330-8570 Japan

TEL +81-48-687-5069 FAX +81-48-687-5117

e-mail: {ohzeki, m100171}@sic.shibaura-it.ac.jp

The authors have been evaluating coding efficiency by analyzing redundancy of MPEG-2 coded bitstream. Entropy and sampled entropy of coded bitstream for n-tuple of bit pattern has taken as statistics. The entropy values decrease 20-30%, which implies re-encoding possibility. The data amount of this statistics increases twice as the length of bit pattern increases for a single bit. It is not known how much the data should be needed for accurate evaluation. Also, it is not known how many kinds of original source images and coding parameters should be needed.

In this paper, necessary length of coded bitstream and necessary number of kinds of source images and coding parameters will be clarified. The length coded bitstream is needed at least several times of the number of bit patterns. For determining the number of kinds of original source images and coding parameter, inverse distribution for bit pattern is analyzed. Isentropic space is uniformly distributed, while MPEG-2 coded bitstreams are accumulated at a specific region. This sample test method is free from the increase of n-tuple of bit patterns. Based on the accuracy criterion, entropy for 20-bit-tuple evaluated. The corresponding Huffman codes are generated and coded bitstream is re-encoded. The results show that the proposed re-encoding system is effective and reliable.

key words MPEG-2, Coding, Analysis, Bitstream, Entropy, Inverted Distribution Model

1. はじめに

筆者らは MPEG-2 を主体として符号化系列の冗長度解析が 20-30%低下し、再圧縮の可能性ある事を示してきた。解析を行うことによって、1 ビットあたりのエントロピー 一方、この統計量はデータ量と符号化対象の映像や符号

化パラメータの種類に関して、どの程度の数を用意すればよいか不明であった。本論文では、ビットストリーム解析の手法の検証を行い、計測結果の普遍的な信頼性を確保するために必要なビットストリームの長さ、種類数を明確化する。種類に関しては、計測対象である確率事象をモデル化し、その分布の様態を調べた。あるサンプルに対する反転分布を考えることにより、MPEG 圧縮ファイルのサンプルの分布は特定領域に集積していることが示された。このサンプルによる検証は事象の数に連動して多く行う必要が無く、少数のサンプルで十分な結果を得ることが出来る。これらの検証手法を元に 20 ビットの長さのエントロピー計測を行い、対応するハフマン符号を作成し、再符号化を行い、再符号化システムの有効性を示すことができた。

2. ビットストリーム解析

図 1 に示すように乱数仮定の定式化を行った [5,6]。エントロピー計測と精度評価に関しては、統計データの種類の総数の数倍の量のデータを用意すれば良いことが分った [4]。

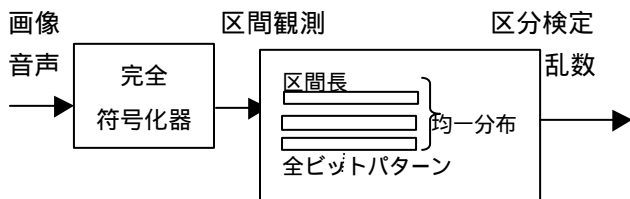


図 1 完全符号化器の入出力
Fig.1 Input and Output of Ideal Encoder

3. 反転分布モデル

MPEG などの符号化ファイルを解析するため、ある長さごとに区切られたビットパターンの出現頻度を要素とする集合を考える。この出現頻度を総数で割った数値は確率となり、その確率は非負で総和は 1 である。ビットパターンは 2 進表示などで順序付けができるが、確率はこのパターンに対して 1 : 1 に定義できるので、出現頻度の集合であるとともに確率の集合とみなすこともできる。確率も順序をつけて並べられた物となっている。

反転モデルとは、エントロピーが同一の 2 つの集合 P_1, P_2 で、その確率要素が下記のような相補的關係にあるとき、互いに反転分布であると呼ぶ。

$$P = \{p_i | i=1, \dots, N\}, \quad Q = \{q_i | i=1, \dots, N\} \text{ の時,}$$

$$p_i + q_i = 1 \quad \text{for } i=1, \dots, N$$

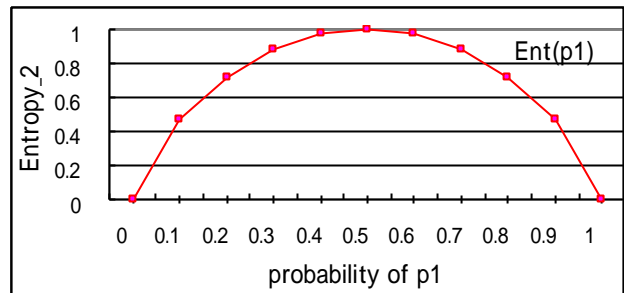
となっている。

N=2 の場合：

$P = \{p_1, p_2\}$ に対し、エントロピーは

$$Ent = -\sum_1 \{p_1 \log_2 p_1 + (1-p_1) \log_2 (1-p_1)\}$$

となり、第一の確率 p_1 と Ent の関係は図 4.3.1 のようになっている。



2 事象のエントロピー

Fig.2 Entropy for two Occurrence

$p_1 \neq 0.5$ の場合の $P = \{p_1, p_2\}$ と異なる反転分布が存在し、それを Q とすると、

$$Q = \{q_1, q_2\} = \{1-p_1, 1-p_2\}, \quad p_i + q_i = 1 \quad \text{for } i=1, 2$$

となっている。二つの頻度集合の対応する要素ごとの和をとった和集合を考える。この和集合の頻度の総数は 2 倍となるが、確率で見ると、次のようになっている。

$$R = \left\{ \frac{p_1 + q_1}{2}, \frac{p_2 + q_2}{2} \right\} = \{0.5, 0.5\}$$

したがって、そのエントロピーは $Ent(R)=1.0$ となる。

N=3 の場合：

同様に N=3 の場合に頻度の集合を次のように定める。

$$P^1 = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1\}, \quad p_1, p_2, p_3 \geq 0, \quad p_1^1 + p_2^1 + p_3^1 = 1$$

$P^1 = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1\}$ に対し、1 ビット当たりのエントロピーは

$$Ent = -\{p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + p_3 \log_2 p_3\} / \log_2 3$$

となっているが、第一の確率 p_1 と第二の確率 p_2 が決まれば、第三の確率 p_3 は一つの値に決まる。Ent の関係は p_1, p_2 の 2 次元平面上に図 4.3.2 のように描くことができる。

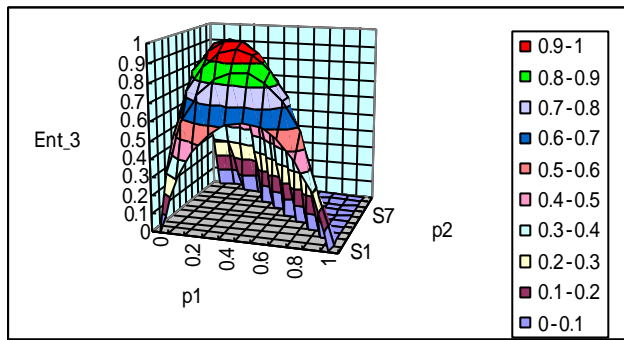


図3 三事象のエントロピー

Fig.3 Entropy for three Occurrence

2つの頻度集合に対応する確率の集合

$P^1 = \{p_1^1, p_2^1, p_3^1\}$ $P^2 = \{p_1^2, p_2^2, p_3^2\}$ が反転分布の時、要素ごとの和集合の確率の集合は、

$$R = \left\{ \frac{p_1^1 + p_1^2}{2}, \frac{p_2^1 + p_2^2}{2}, \frac{p_3^1 + p_3^2}{2} \right\} = \{0.5, 0.5, 0.5\}$$

したがって、その1ビット当たりのエントロピーは

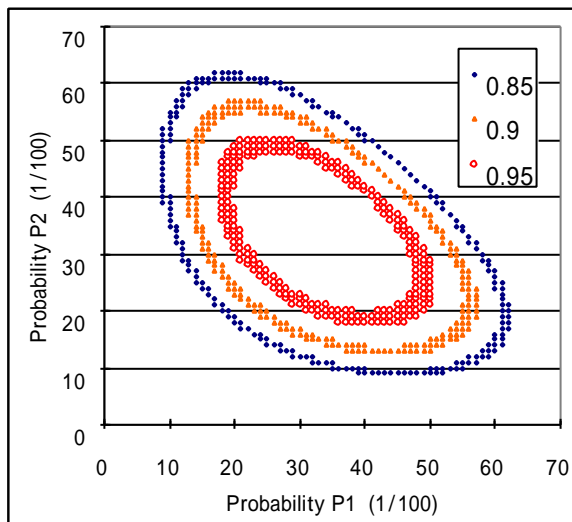


図4 等エントロピー曲線

Fig.4 Isentropic Curve.

は $Ent(R)=1.0$ となる。

$0 < Ent_3 < 1$ なるエントロピー値を与える確率分布は図3において縦軸の Ent_3 の値で切り出した集合上にある。

p_1, p_2, p_3 の関係は、 $p_3 = 1 - p_1 - p_2$ より、
 $-Ent_3 * \log_2 3 = p_1 \log_2 p_1 + p_2 \log_2 p_2 + (1 - p_1 - p_2) \log_2 (1 - p_1 - p_2)$ となって

おり、変数 (p_1, p_2) に関し対称で、連続である。
 (p_1, p_2) 平面上に $Ent_3=0.85, 0.9, 0.95$ の場合について描いたものを図4に示す。これは歪んだ楕円状の形をしており、この線上の2点の midpoint は内部の点になり、そのエントロピーは増加している。
 特に反転分布との midpoint は等確率で、中心付近のエントロピー最大の点になる。以下同様に N を増加させた場合も高次元の同様の分布となり、反転分布の midpoint はエントロピー最大の点になる。また、同一エントロ

ピーの線上の任意の2点に対し、その midpoint のエントロピーは増加するが、上記歪んだ楕円状の領域の中で、約半数は中心の反対側にあり、したがって確率がほぼ $1/2$ でその midpoint のエントロピーは最大に近い値になる。この様子を高次元の場合で数値計算により調べた結果を図5に示す。所定のエントロピー、たとえば 0.9 ± 0.01 になる、あらゆるパターンからなる分布を用意し、そのエントロピー分布を初期分布として示してある。また、次に各点と残りの他の点との平均分布を

つくりそのエントロピー分布を平均分布として示してある。明らかに $1/2$ 以上の点が始めのエントロピー 0.9 ± 0.01 の最大値 0.9 を超え、 0.9 から 1.0 の範囲に分散している。エントロピーと対応つけられた確率分布に対し以下のような、性質があることがわかる。

「同一のエントロピーを有する確率分布から無作為に任意の2個の分布を選び、その合成分布を作成すると、その合成分布のエントロピーは約確率 $1/2$ で 1 に十分近くなる。」

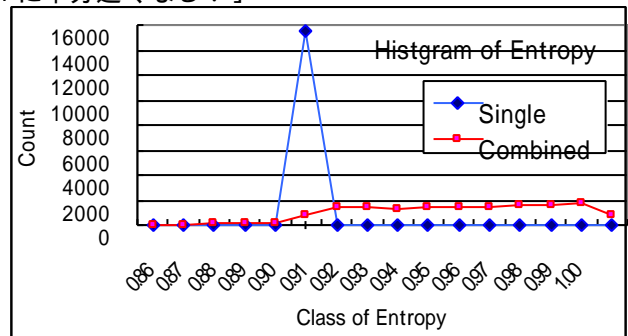


図5 単独分布と結合分布のエントロピーのヒストグラム

Fig.5 Histogram of Entropy for single and compound Distribution.

4. 再符号化実験と考察

次に反転分布モデルに基づいたサンプル計測を行う。このサンプル計測においては、符号化データファイルとして無作為に何個かの異なるデータを取り出す必要がある単独ファイルでのエントロピーと2個のファイルを結合したファイルのエントロピーの変化を図6に示す。上昇率の最大値は2%である。この結果はこれらの符号化データファイルはエントロピー空間のある領域に局在して、満遍なく分散してはいないことを示している。一般的な等エントロピーの符号化データの集合の中には、互いに反転分布となる組み合わせが無く、従って等エントロピー空間全体の中でその数分の一部の空間に符号化データが局在していることが推測される。等エントロピー空間は高次元の歪楕円状をしており、約半分は反転分布の側にあり残り半分はそれ自身と同じ側にある。あるサンプルに対し、もう一つのサンプルが

反転分布に在る確率を $1/2$ とすると、 n 個のサンプルが全て同一分布になる確率は、 $(1/2)^n$ であり、 n の増加と対するエントロピーの変化を見れば n が 5 から 10 でも反転分布が含まれていないことが十分示されることになる。この過程を見ると、ビットストリームを 20 ビット程度の長さで区切ってエントロピー計測をおこなう時、その長さに伴って 2 の冪乗で増加する状態数とは独立して調べることができる検証法であることがわかる。

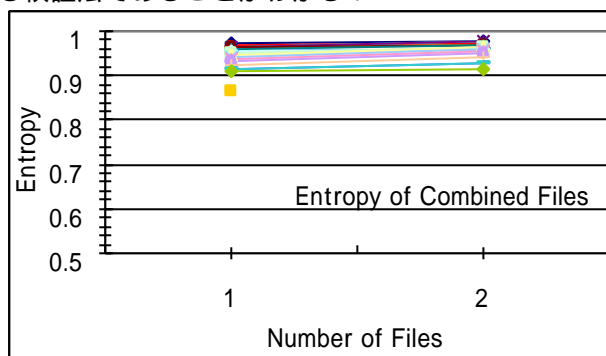


図 6 単独ファイルと結合ファイルのエントロピー
Fig.6 Entropy of a Single and Combined Files

エントロピー計測結果に基づき n ビットに区切って形成される事象ごとにハフマン符号を作成した。ハフマン符号は、符号化データの分布を元に作成したものと、他の符号化データの分布を元に作成したものを使用し、再圧縮する実験を行った。結果は図 7、表 1 のとおり、19 ビットにおいて、エントロピーの計測値に接近した圧縮率が得られ gzip よりも高圧縮が達成されている。

表 1 画像の再圧縮結果 (CB=カラー-, CL=チャリダ)

画像	MPEG-2	MPEG-2+gzip	MPEG-2+Huffman
CL, 50mbps	12.5MB	11.8MB (.944)	11.7MB (.933)

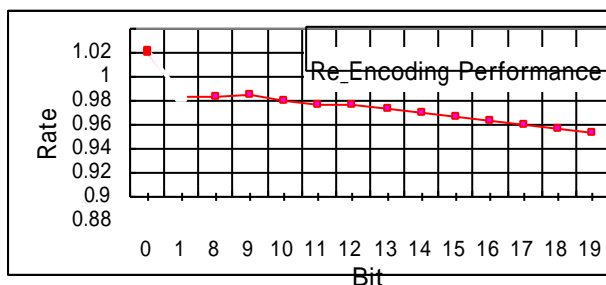


図 7 再符号化結果

Fig.7 Re-Encoding Results

5. 結論

符号化器が出力したビットストリームを解析することにより MPEG 符号化性能の限界を評価した。解析するビット区間長 n が大きくなるにつれ、状態数が膨大となる。対象となるデータ量をどの程度用意

すれば十分か調べた。乱数仮定により、状態数の数倍以上採れば十分であることが示された。

また、符号化対象である画像の種類や符号化パラメータによる符号の種類が異なってくる可能性があるため、符号の分布を調べた。反転分布モデルを考えることにより、等エントロピー空間が確率変数に対して対称で、均一に分布しているとみなせることがわかった。これから、符号化データを無作為に数種取り出し、その結合データのエントロピーを再び計測すれば、元の集合が一般的であったか、等エントロピー空間内のある領域に局在しているかが判定できる。この判定法により、MPEG-2 符号化データは等エントロピー空間内のある領域に局在している事がわかり、従って、入力種類に関しては、十分少ない種類で全体を推定することができることがわかった。

gzip による再圧縮は、静止画についてはエントロピー計測において高い冗長度が確認されたことと同様に、高い再圧縮が実現している。動画においては従来の gzip により 6% の再圧縮が実現していたが、20 ビット長のハフマン符号化により、10% の再圧縮効果が得られた。今後は、30 ビット長程度の計測を目指し、計算方式の工夫と計算機パワーの増強を行っていく。

6. 謝辞

本研究のエントロピー計測では、統計数理研究所のスーパーコンピュータを使用させていただきましたことを感謝します。

参考文献

- [1] 島村, 遠藤, 大関 “圧縮ビットストリームの解析による符号化性能限界の評価” 信学総大 D-11-163, 2000.3
- [2] 島村, 大関 “圧縮ビットストリームの解析におけるサンプル推定計算方式” 信学会ソサエティ大会 D-11-23, 2000.10
- [3] 島村, 大関 “圧縮ビットストリームの解析におけるサンプル推定計算方式と評価” PCSJ2000.P-P1.12, 2000, 11.
- [4] K.Ohzeki, S.Shimamura, “Analysis of Coded Bitstream To Find Out Statistical Correlations for Longer Interval” Proc.WOSPA2000, 1-16. Dec. 2000
- [5] K.Ohzeki, S.Shimamura, “Analysis of Coded Bitstream of Picture-Effects of Calculating Accuracy” PCS-2001, FP-1-18, April.2001.
- [6] 島村, 大関 “MPEG 符号化ビットストリームの解析と再符号化” 電子情報通信学会, 技術報告, CQ2001-35, pp.21-26, 2001.7.