I-016

フレーム展開による画像の不確定性符号化に関する検討
A Study on Uncertainty Image Coding by Frame Expansion

石川 孝明 † 渡辺 裕 ‡
Takaaki ISHIKAWA Hiroshi WATANABE

1. まえがき

インターネットを利用した映像配信が普及し，ユーザが様々なコンテンツを自由に視聴できる環境が整いつつある．今後も映像配信サービスを利用するユーザは増加し，ユーザの要求が多様化することで，サービスを提供するサーバの負荷が増大すると予想される．これに対して，これまでサーバが提供してきた機能をクライアント間のキャッシュ交換により実現できれば，サーバへの要求を分散することが可能となる．

本研究は，クライアントが保存するキャッシュ情報を利用したコンテンツの高画質化により，ユーザがサーバに対して行う一度視聴したコンテンツの高画質化の要求を，他のクライアントに対する要求で代替することで，サーバの負荷を分散することを目標とする．

これを実現するために，我々は不確定性符号化を提案している [1]．本検討では，不確定性符号化の概念をフレーム展開を用いて数学的に表現することを目的としている．

2. 不確定性符号化とキャッシュ交換

まず不確定性符号化の定義について述べ，次に同符号化方式を利用したクライアント間キャッシュ交換によるコンテンツの高画質化について述べる．

2.1 不確定性符号化の定義

本研究では，同じビットレートかつ同じ品質にもかかわらず構造の異なる複数のビットストリームを生成する符号化方式を不確定性符号化と呼ぶ．従来の符号化方式を用いると，同一ビットレートかつ同一品質のビットストリームが確定的に生成され，クライアント間での差は存在しない．これに対し，不確定性符号化では，各クライアントが異なる構造を持つビットストリームをキャッシュする可能性がある．これは，サーバが構造の異なるビットストリームをクライアントに対してランダムに伝送することで実現される．文献 [1] では，JPEG 2000 符号化方式による実験的な検証を行っており，コードブロックごとにレートの異なるビットストリームをランダムに生成し，ユーザの持つキャッシュを交換することにより画質向上が実現されることを示している．しかし，同検証では数学的な解析が行われていない．

2.2 クライアント間キャッシュ交換による高画質化

図 1 にクライアント間キャッシュ交換による高画質化の仕組みを示す．

まず入力信号 x を複数に区分する．図 1 では $x_i(\{i \in 0,1,2,3\})$ の 4 つに区分している．この分割は，各ブロックがほぼ均等な情報量を持ち，同等に画質に寄与すると仮定する．次に，符号化器が変換 T と S を用いて各ブロックの信号を変換する．あるブロックについてどちらの変換を用いるかを確率的に決定し，各ブロックにはどの変換を用いたかのフラグを付ける．各ブロックを量子化した後エントロピー符号化することで，構造の異なるビットストリームが複数生成される．これらをサーバに接続したクライアントへランダムに伝送する．

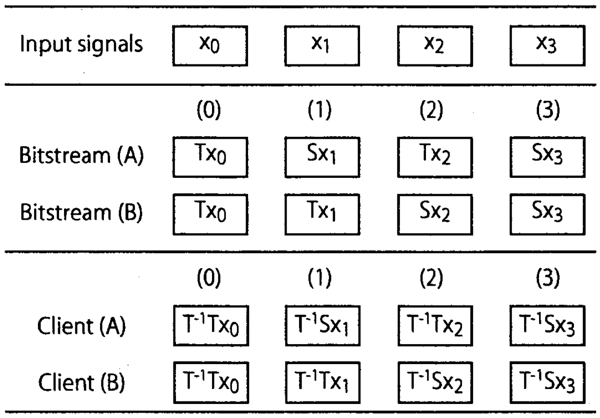

図 1: キャッシュ交換による高画質化

クライアントでは，全てのブロックに対して逆変換 T^{-1} を用いて信号を再構成する．図 1 の例では，クライアント A，B のブロック 1 および 2 において，それぞれ異なる再構成信号が得られている．元信号と再構成信号の MSE が，式 (1) の関係にあるならば，クライアント間で該当ブロックの係数群を交換することで，再構成信号の品質を向上させることが可能となる．

$$\frac{1}{2}E||x_i - T^{-1}Sx_i||^2 > \frac{1}{2}E||x_i - T^{-1}Tx_i||^2 \quad (1)$$

ただし，$i \in \mathbb{N}$

具体的には，クライアント A は，クライアント B からブロック 1 の係数群を受信し，逆にクライアント B は，クライアント A からブロック 2 の係数群を受信すればよい．受信すべき係数群は，各ブロックのフラグを参照することにより一意に定まる．

3. フレームと一般逆行列による変換表現

本検討では，前章で述べた変換 T および S を記述するために，$m \times n$ $(m > n)$ の行列 F で表されるフレームとその疑似逆行列，および疑似逆行列から求められる右逆行列を利用する．フレームは，基底と同様に信号を多項式展開するための数学的ツールであり，ノイズ除去や新しい符号化方式に応用されている [2]．以下に，変換 T をフレーム F で表すと，その逆変換がフレームの

†早稲田大学国際情報通信研究センター, GITI
‡早稲田大学大学院国際情報通信研究科, GITS

疑似逆行列 F^+ で与えられ，また変換 S が，F の疑似逆行列 F^+ に対する1つの右逆行列として表されることを示す．ただし，変換 T はフレームに限定されるわけではない．本研究では，伝送時に生じるパケットロスへの耐性を高めるためにフレームを応用しているため，本検討では変換 T および S をフレームに限定する．

3.1 フレームとフレーム展開

フレームは次のように定義される．ヒルベルト空間 $\mathcal{H}$ における関数の族 $\{\phi_j\}_{j\in J}$ について，定数 A, B が $0 < A \leq B < \infty$ を満たし，任意の関数 $f \in \mathcal{H}$ について式 (2) が成立するとき，関数の族 $\{\phi_j\}_{j\in J}$ はフレームをなすという [3].

$$A||f||^2 \leq \sum_{j\in J} |\langle f, \phi_j\rangle|^2 \leq B||f||^2 \tag{2}$$

式 (2) の定数 A と B はフレーム限界と呼ばれ，f が安定に再構成可能であるための制限である．

m 行 n 列（$m > n$）で表される行列 F において，F の行ベクトル $\{\phi_j\}$ が $\mathbb{C}^N$ に対するフレームをなすとすると，フレームは，R^n から R^m への写像と考えられる．このとき，$\{\phi_j\}$ の双対フレーム $\{\tilde{\phi_j}\}$ を用いると，

$$f = \sum_{j\in J}\langle f, \phi_j\rangle\tilde{\phi_j} = \sum_{j\in J}\langle f, \tilde{\phi_j}\rangle\phi_j \tag{3}$$

と展開される．双対フレーム $\{\tilde{\phi_j}\}$ を列ベクトルとする F^+ は F の疑似逆行列であり，

$$F^+ = (F^*F)^{-1}F^* \tag{4}$$

と表される．F^* は F の随伴行列でありフレームでは $F^+F = I$ が成り立つ．前章の図1における変換 T を F とするならば，逆変換 T^{-1} は，この F^+ にあたる．

3.2 フレームによる変換表現

次に，変換 S と F との関係を示す．F に対応する疑似逆行列 F^+ が一意に定まるのは，式 (5) ～式 (8) をすべて満たす場合に限られる．

$$FF^-F = F \tag{5}$$

$$F^-FF^- = F^- \tag{6}$$

$$(F^-F)^* = F^-F \tag{7}$$

$$(FF^-)^* = FF^- \tag{8}$$

式 (5) ～式 (8) をすべて満たすとき，F^+ は最小二乗ノルム解を与える．ここで，F^+ の右逆行列として最小二乗ノルム解とはならないフレームを $F_i (i \in \mathbb{N})$ とおく．条件から F_i は，係数の二乗ノルムを最小化する変換ではないが，疑似逆行列 F^+ により信号を再構成することが可能である．このようなフレームの族は，疑似逆行列 F^+ の右逆行列を式 (5) ～式 (7) から導出することで得られるが，一意には定まらず複数存在する．従って，前章の図1における変換 S は，F_i の一つである．このように F, F^+, F_i を利用することで不確定性符号化は表現できる．

変換係数群を，$F\boldsymbol{x} = a$ および $F_0\boldsymbol{x} = c$ とおき，$c = a + b, a \perp b$ とすると，$||c||^2 = ||a||^2 + ||b||^2$ が成り立つ．従って，両変換の係数は式 (9) を満たし，これは式 (1) と対応する．

$$\begin{aligned} ||F_0\boldsymbol{x}||^2 &= ||c||^2 = ||a||^2 + ||b||^2 \\ &= ||F\boldsymbol{x}||^2 + ||b||^2 > ||F\boldsymbol{x}||^2 \end{aligned} \tag{9}$$

3.3 フレーム展開の具体例

以下に，F, F^+, F_0 の具体例を示す．

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad F^+ = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \end{bmatrix}$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1 & -4 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

式 (10) において，$F^+F = I$ かつ $F^+F_0 = I$ を確認できる．符号化器において，F のみを利用して各ブロックを変換する場合は，各クライアントが受信するビットストリームは一意であり，F^+ にて再構成される．これは従来の符号化方式と同じ考え方である．符号化器において，ランダムに $F, F_i (i \in \mathbb{N})$ を切り替えながら各ブロックを変換する場合，各クライアントが受信するビットストリームは複数の可能性がある．クライアント間のキャッシュから，より二乗ノルムが小さい係数群を受信し，ローカルキャッシュとの組み合わせることで高画質化を実現する．

4. まとめ

本稿では，フレーム展開による不確定性符号化の数学的表現を行った．符号化器ではランダムにフレームを選択することで構成の異なるビットストリームを生成し，復号器ではフレームの疑似逆行列を利用した信号の再構成が行われることを示した．また，クライアントのキャッシュから適切な係数群を受信することで高画質化が実現されることを示した．今後は，レート制御を含めた量子化手法について検討を行う．

参考文献

[1] 石川孝明，渡辺裕，“画像の不確定性符号化について，” 画像符号化シンポジウム資料，vol.21, no.P-3.02, pp.77-78, Nov. 2006.

[2] J. Kovacevic, and A. Chebira, “Life Beyond Bases: The Advent of Frames (Part I),” IEEE Signal Processing Mag., vol.24, no.4, pp.86-104, July 2007.

[3] I. Daubechies, Ten Lectures On Wavelets, I. Daubechies, ed., Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992.