

P2P ビデオストリーミングの2ホップ配信における LNCの効果について

庄司 拓矢[†]
広島大学 工学部

藤田 聡[‡]
広島大学 大学院工学研究院

1. はじめに

ソースピア s と n 台のピアからなるピア・ツー・ピア(P2P)システムを考える. ソースピアを含む $n+1$ 台のピアは完全結合されており, 各ピアのアップロード帯域を用いて任意のピア間で双方向の直接通信が可能であるとする. ソースピアは α 個のストライプに分割されたストリームを配信し, そのストリームを $r(\leq n)$ 台のピアが視聴する. 各ストライプ中のチャンクは単位時間あたり1個ずつ生成され, 各リンクは単位時間あたり1個のチャンクを運ぶことができる. 本稿では, 上記のような単純化されたP2Pモデル上でソースピアから2ホップ以内という制限のもとで, r 台の視聴ピアで α 個のストライプをすべて受信できるための必要十分条件が, ストライプに対する線形ネットワーク符号化(LNC)の適用の有無によってどのように変化するかを明らかにする.

2. 関連研究

Zhaoら[1]は連続モデル上の2ホップone-viewMPVCにおいて, 与えられたビデオレートでの視聴が任意の視聴状況で保証可能な最大ビデオレートを導出した. また安藤ら[2]はZhaoらの結果を分散モデルに拡張し, ソースを含む各ピアのアップロード帯域が b であるような均一なP2Pネットワークにおいて, n 台のピアが α 個のストライプをソースピアから2ホップ以内で受信可能とするためのアップロード帯域のタイトな下限を導出した. 具体的には, 安藤らが得た結果は, $a \leq b \leq n$ ならば, $b \geq \frac{n}{|b/a|} - 1$ を満たすときかつそのときに限り2ホップ配信可能であるというものである. 本稿では上述の安藤らの結果を線形ネットワーク符号化(LNC)が適用された系へと拡張する. 具体的には, $\alpha \leq b \leq n$ のとき, 各視聴ピアがソースピアから2ホップ以内で全ストライプを受信するためのアップロード帯域のタイトな下限が, LNCの適用によって真に下がることを示す.

3. 線形ネットワーク符号化

ネットワーク符号化[3]は, ネットワーク内部で演算処理を行う符号化技術である. この技術を用いることで, 例えば受信した複数のパケットを単一のパケットに符号化して転送することなどが可能となり, 転送効率の向上が期待される. 本稿では, 線形演算によって符号化を行う線形ネットワーク符号化(LNC)[4]に着目する. また簡単のため, 符号化はソースピアにおいてのみ適用し, それ以外のピアは他ピアから受信した符号化ストライプをそのまま転送するものとする.

符号化前のストライプを $x_i(i=1, 2, \dots, \alpha)$ とする. このとき符号化されたストライプ y は, 符号化係数 $s_i(i=1, 2, \dots, \alpha)$ を用いて $y = \sum_{i=1}^{\alpha} s_i x_i$ のように生成される. この演算では, ストライプと符号化係数をそれぞれガロア体の要素とみなし, 符号化係数を重みとしてストライプの線形結合を行なっている. 生成された符号化ストライプはP2Pシステム上のピア間で送受信されるが, それらの符号化ストライプから α 個の元ストリームへの復号は以下のように行われる. 復号には, 符号化係数が互いに線形独立であるような α 個の符号化ストライプを用いる. 具体的には, それらの符号化ストライプとその符号化係数から α 元連立方程式をたて, それを解くことにより復号できる. 以下では簡単のため, ソースピアから送出される符号化ストライプの符号化係数は, 互いに線形独立であると仮定して議論を進める.

4. LNC適用時のタイトな下限

LNCの効果の説明するため, 2個のストライプからなるストリームを5台の視聴ピアに向けて配信する状況を考えよう. 図1に転送の様子を示す. LNCによって得られた3個の符号化ストライプを図のような経路で配信することで, 各ピアのアップロード帯域が3のとき, 各視聴ピアは2個の異なる符号化ストライプをソースから2ホップ以内で受信し元ストライプを復号することができる. 安藤らの結果[2]より, LNCを使わないときのアップロード帯域のタイトな下限は4であるから, LNCにより下限は確かに下がっている.

Effect of linear network coding in 2-hop delivery of the P2P video streaming

[†] Takuya SHOJI, Hiroshima University

[‡] Satoshi FUJITA, Hiroshima University

本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)16H02807の補助を受けています.

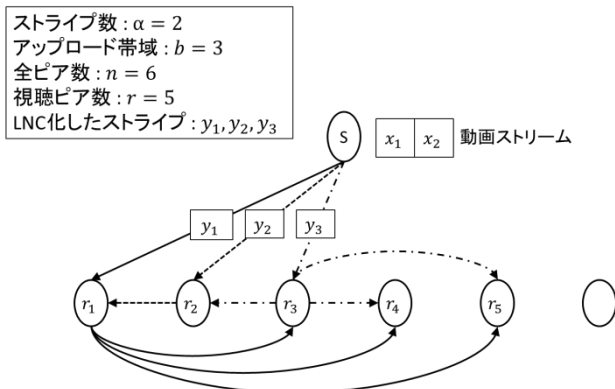


図1. ソースピアから2ホップ以内で受信可能となる例

より詳細な議論は以下の通りである。ソースピアからストライプを直接受信した任意の視聴ピアが受け取ったストライプを残りの $r - 1$ 台の視聴ピアに直接転送できる時、つまり $r - 1 \leq b \leq n$ のとき、LNC の適用なしにすべての視聴ピアで全ストライプを受信できる。よって以下では $b < r - 1$ を仮定する。また以下では一般性を失うことなく、ソースピアが直接ストライプを送信するのは視聴ピアに対してのみであるとする。

$b < r - 1$ のとき、ソースピアは各視聴ピアに対して高々 1 個の符号化ストライプを送信できるから、視聴ピアの集合は、ソースピアから直接ストライプを受信する b 台の集合 A と、それ以外の $r - b$ 台の集合 B に分割される。

集合 B 中の各視聴ピアは、集合 A 中の視聴ピアから (ソースピアから直接受信した) 符号化ストライプを合計 α 個受信すれば元のストライプを正しく復元できる。A 中のピアが B 中のピアたちへの転送に使用するアップロード帯域を $\beta (\leq b)$ とする。B 中の各ピアが α 個の符号化ストライプを受信するためには、A 中のピアから転送される符号化ストライプの総数が $(r - b) \times \alpha$ 以上である必要がある。つまり β が $\beta \geq \frac{\alpha}{b} r - \alpha$ を満たすときかつそのときに限り、集合 B 中の $r - b$ 台の視聴ピアは α 個の元のストライプを復号できる。

一方、集合 A 中の b 台の視聴ピアは、ソースピアから直接受信した 1 個の符号化ストライプに加えて、自分以外の $b - 1$ 台のピアから合計 $b - \beta$ 個の異なる符号化ストライプを受信することができる ($b - \beta$ 個の辺素なハミルトンサイクルを構成し、それらに沿ってストライプを 1 ホップだけ転送すれば良い)。したがって A 中の各視聴ピアはそれぞれ $1 + b - \beta$ 個の異なる LNC 化したストライプを受信できる。これらの各視聴ピアが元のストライプを復号するためには、受信したストライプ数が α 個以上である必要がある。その結果、 $\alpha \leq$

$b < r - 1$ のとき、 $b \geq \left\lceil \frac{\alpha}{b} r \right\rceil - 1$ を満たすときかつそのときに限り、 r 個のすべての視聴ピアは元ストライプを正しく復元できることがわかる。

図 2 には、 $r = n$ となる状況で $b = 20$ に設定したとき、視聴ピア数の増加に伴って配信可能なストライプ数のタイトな上限がどのように変化するかを、LNC を適用した場合としない場合についてまとめている。図より、特に視聴ピア数が比較的少ないとき、LNC の効果が顕著になることが確認される。

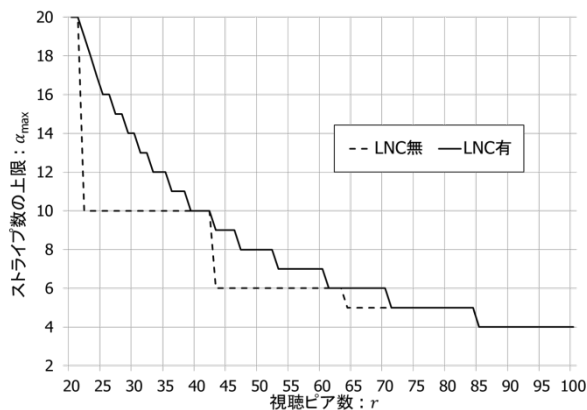


図2. $b = 20$ のときの視聴ピア数 r に伴う α の上限の推移

5. おわりに

本稿では、ソースを含む各ピアのアップロード帯域が均一な場合において、LNC を適用したときに 2 ホップ以内で受信可能とするための視聴ピア数とストライプ数の関係に対する必要十分条件を導出した。今後の課題としては、 $\alpha > n$ のときの議論、符号化したストライプにおいて、パケット中に占める符号化係数等のガロア体のサイズの考慮、符号化したストライプの種類の制限によるコストの低減などがあげられる。

参考文献

- [1] Y. Zhao, Y. Liu, C. Chen and J. Zhang, "Enabling P2P One-View Multiparty Video Conferencing," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., 25(1):73-82, Jan. 2014.
- [2] 安藤啓紀, 藤田聡, "離散的なアップロード帯域をもつ分散ネットワーク上の MPVC 問題," 情報処理学会第 78 回全国大会, Mar. 2016.
- [3] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li and R. Yeung, "Network Information Flow," IEEE Trans. Inf. Theory, 46(4): 1204-1216, July 2000.
- [4] S.-Y. Li, R. W. Yeung and N. Cai, "Linear Network Coding," IEEE Trans. Inf. Theory, 29(2): 371-378, Feb. 2003.