

## 動画配信における QoS 制御のフレームレート評価について

福田 和真<sup>†</sup> 下間 芳樹<sup>††</sup>  
鷹取 功人<sup>†</sup> 水野 忠則<sup>†††</sup>

本論文では、動画配信において経路上の通信状態に応じて転送レートを動的に変更させるとき、フレームを間引くことで適応させる場合に間引く必要のある最低フレーム数を考えることで、利用可能な帯域幅に応じたフレームレートの上界を求める式について述べる。なお、動画の符号化方式は各フレーム間に依存関係のある方式についてのものである。

### A Frame Rate Evaluation for QoS Control on Video Distribution

KAZUMA FUKUDA,<sup>†</sup> YOSHIKI SHIMOTSUMA,<sup>††</sup> NORIHITO TAKATORI<sup>†</sup>  
and TADANORI MIZUNO<sup>†††</sup>

In this paper, we show an expression for calculating upper bound of frame rate adapted to available bandwidth along end-to-end path, in the case that sender changes sending rate by cutting down some frames according to end-to-end network condition. Those video codecs are something like the system which has a dependency between each frame.

#### 1. はじめに

インターネット上におけるパケット通信は、使用する帯域幅や遅延時間などが基本的に保証されない“ベストエフォート”型である。しかし、インターネット上で音声や動画などの連続メディア情報を扱うとき、帯域幅や遅延時間などの制約に従う必要があるため多くの課題が存在し、それらについてさまざまな研究が行われている。

動画においては、動画のフレームレートを制御する方法<sup>1)</sup>やコンテンツの符号化レートを変更する方法、それらの組合せの方法<sup>2)</sup>が考えられている。最初の方法では少なくとも転送レートを上回らないように符号化を行えばよいが、2つめの場合(特に可変長符号化されている場合)では単純に符号化レートと転送レートの差に比例して間引くだけでは十分ではなく、より多くのフレームを間引く必要がある。

一方、動画再生時の品質における客観的な評価方法は、一部の要因について評価する方法は提案されているが、単独で総合的な再生品質を適切に表現しているとは限らない。それらの組合せもあるが現在までに十分な方法は見つかっておらず、複数の観察者による主観的な評価が行われている。

本論文では、経路上の通信状態に適応してフレームを間引くとき、間引く最低フレーム数を考えることで一般的にフレームレートの上界を求める方法について述べる。

#### 2. 動画フレームについて

動画の符号化方式にはさまざまなものがある。JPEG 動画などのように個々のフレーム間で依存関係を持たないものや、MPEG などのようにフレーム間の依存関係を持つものがある。一般に、転送レートに応じてフレームを間引く処理を考えると、前者は任意のフレームを間引くことができるが、後者は間引くフレームを選ぶ必要がある。本論文では、後者である MPEG (MPEG-4<sup>4)</sup>) を取り上げる。

<sup>†</sup> 三菱電機株式会社情報技術総合研究所  
Mitsubishi Electric Corporation Information Technology R&D Center

<sup>††</sup> 三菱電機インフォメーションシステムズ株式会社  
Mitsubishi Electric Information Systems Corporation

<sup>†††</sup> 静岡大学情報学部  
Faculty of Information, Shizuoka University

たとえば、PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio) など。  
たとえば、MOS (Mean Opinion Score)<sup>3)</sup>

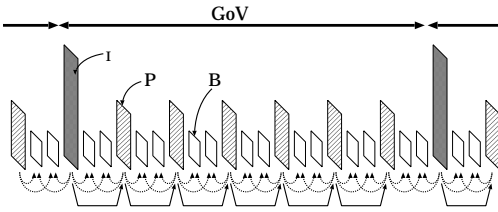


図 1 MPEG におけるフレームの構成と依存関係  
Fig. 1 Frame components and their dependency in MPEG.

MPEG における動画の各フレームは、I、P、B の 3 種類で構成される。I フレームは他のフレームを参照せず独立して復号可能である。一方、P、B フレームにおいては前後のフレームを参照して復号する必要があり、それらのフレーム間には図 1 のような依存関係がある。つまり、依存するフレームが欠損した場合、再生品質が悪化することになる。

送信側が転送レートに応じてフレームを間引くとき、まず B フレームを間引き、それでも十分ではない場合には P フレームを、さらに十分でない場合には I フレームを間引く。このとき、B フレームは任意のフレームを間引くことができるが、P フレームは次の I フレームの直前の P フレームから間引く必要がある。

なお、1 つ以上の I フレームと 0 個以上の P、B フレームから構成されるフレームの集合は Group of Visual (GoV) と呼ばれる。

### 3. 負荷に応じた最大フレームレート

輻輳状態であるとき、音声の符号化レートを変更することなく音声パケットが欠損しないためには動画で利用する帯域幅を減らす必要がある。このとき、送出するフレーム数を減らすことで対応する場面を考える。

#### 3.1 準備

動画は I、P、B フレームから構成され、コンテンツの符号化レートは固定であり、フレーム各々の平均データサイズは  $\overline{S_I}$ 、 $\overline{S_P}$ 、 $\overline{S_B}$  bit、1 GoV は  $t$  秒、1 GoV 内の各々のフレーム数は 1、 $f_P$ 、 $f_B$  であるとする。これらから、単位時間あたりのフレームレート  $F$  fps とコンテンツのレート  $r_{media}$  bps は次となる。

$$F = \frac{1 + f_P + f_B}{t}$$

$$r_{media} = \frac{1 \cdot \overline{S_I} + f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B}}{t}$$

なお、過負荷となる帯域幅は  $r_{load}$  bps (ただし、 $r_{load} < r_{media}$ ) である。また、この負荷が一定とし

て考える。

#### 3.2 P、B フレームの必要な最小間引き数

まず、1 GoV 内における P、B フレームについて間引く最低フレーム数から考える。

##### 3.2.1 B フレームの場合

B フレームは必要に応じて任意のフレームを間引くことができる。このとき、1 GoV あたりの総負荷量 ( $r_{load} \cdot t$  bit) が 1 GoV 内の B フレームサイズの和 ( $f_B \cdot \overline{S_B}$ ) より大きいかどうかにより間引く量は次のように求められる。

- $f_B \cdot \overline{S_B} \geq r_{load} \cdot t$  のとき

$$\left\lceil \frac{r_{load} \cdot t}{\overline{S_B}} \right\rceil \tag{1}$$

- $f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  のとき、 $f_B$

##### 3.2.2 P フレームの場合

B フレームを間引くだけでは十分ではない場合に、P フレームも間引く。同様に負荷量に応じて 1 GoV 内での P フレームを間引く量を考える。

- $f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B} \geq r_{load} \cdot t$

(および  $f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$ ) のとき

$$\left\lceil \frac{r_{load} \cdot t - f_B \cdot \overline{S_B}}{\overline{S_P}} \right\rceil \tag{2}$$

- $f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  のとき、 $f_P$

#### 3.3 I フレームを間引くときのフレームレート

すべての P、B フレームを間引いてもまだ負荷が大きい場合、I フレームを間引く。この場合には、間引く量ではなく 1 GoV あたりのフレームレートを考える。

このときの負荷量と平均 I フレームサイズの関係は  $(r_{media} - r_{load}) \cdot t < \overline{S_I}$  となり、1 つの I フレームを送出するためには複数の GoV が対象となる。その GoV の個数を  $k$  とすると次の関係が成り立つ。

$$(r_{media} - r_{load}) \cdot t \cdot k \geq \overline{S_I} \tag{3}$$

一方、1 GoV あたりのフレームレート  $F_I$  は、 $k \cdot t$  の時間の中に 1 フレームを送出するため次となる。

$$F_I = \frac{1}{k} \tag{4}$$

ここで、 $k$  の値を求める。 $k$  GoV に 1 つのフレームを送出することから (メディアの表示時刻の同期制御も考慮すると) 式 (3) は次となる。

$$k = \left\lceil \frac{\overline{S_I}}{(r_{media} - r_{load}) \cdot t} \right\rceil$$

実際には、できる限りスムーズな動きとするために、連続した B フレームを間引くのは避けるほうがよい。

P フレームは直前の I、P フレームの差分情報であるため、GoV 内の最後の P フレームから順に間引く必要がある。ただし、間引くフレーム数を考えるときには順序自体は考慮しなくてもよい。

人間の知覚品質として、動画の品質悪化よりも音声の品質悪化に対して敏感であるため、そのような制御を考える。

これと式(4)からIフレームを間引くときの1GoVあたりのフレームレートが求められる。

$$F_I = \frac{1}{\left\lceil \frac{\overline{S_I}}{(r_{media} - r_{load}) \cdot t} \right\rceil} \quad (5)$$

3.4 間引きによる最大フレームレートの計算式  
以上から、負荷量に応じたフレームレート  $F_{now}$  は次となる。

- $f_B \cdot \overline{S_B} \geq r_{load} \cdot t$  のとき

$$F_{now} = F - \frac{\Delta_B}{t} \quad (6)$$

$$= F - \frac{1}{t} \cdot \left\lceil \frac{r_{load} \cdot t}{\overline{S_B}} \right\rceil$$

- $f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B} \geq r_{load} \cdot t$   
かつ  $f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  のとき

$$F_{now} = F - \frac{\Delta_P + f_B}{t}$$

$$= F - \frac{1}{t} \cdot \left( \left\lceil \frac{r_{load} \cdot t - f_B \cdot \overline{S_B}}{\overline{S_P}} \right\rceil + f_B \right)$$

- $f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  のとき

$$F_{now} = \frac{F_I}{t} = \frac{1}{\left\lceil \frac{\overline{S_I}}{(r_{media} - r_{load}) \cdot t} \right\rceil} \cdot \frac{1}{t}$$

次にこれらをまとめて表記するため、次の性質を持つ関数  $\mathcal{G}(x)$  を利用することを考える。

$$\mathcal{G}(x) = \begin{cases} x & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$$

これは  $x$  が 0 以下の場合には 0 の値、それ以外は  $x$  の値をとる関数である。

まず、Bフレームのみに注目する。このとき間引く量は  $f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  の場合には  $f_B$  以上になり、そうでなければ  $f_B$  より小さい。そのため、式(1)を  $\Delta_B$  で表して、1GoV内のBフレームの間引き数を負荷量による場合分けをしないで表記すると次になる。

$$f_B - \mathcal{G}(f_B - \Delta_B)$$

同様にPフレームについては、式(2)を  $\Delta_P$  で表して、次となる。

$$f_P - \mathcal{G}(f_P - \Delta_P)$$

結果として、1GoV内で間引くP、Bフレーム数  $\Delta_f$  は次で求められる。

$$\Delta_f = f_P - \mathcal{G}(f_P - \Delta_P) + f_B - \mathcal{G}(f_B - \Delta_B)$$

なお、1GoV内で間引かない場合のP、Bフレームの総数は  $(F \cdot t - 1)$  なので、間引かれたときに送出され

るP、Bフレームの総数  $f_{P,B}$  は(式(6)の関係から)次となる。

$$f_{P,B} = (F \cdot t - 1) - \Delta_f$$

$$= \mathcal{G}(f_P - \Delta_P) + \mathcal{G}(f_B - \Delta_B)$$

ところで、1GoVあたりのIフレームのフレームレート  $F_I$  は、 $f_P \cdot \overline{S_P} + f_B \cdot \overline{S_B} < r_{load} \cdot t$  のとき1より小さく、そうでなければ1となる。

したがって、負荷量による場合分けをせずに表記するフレームレート  $F_{now}$  は次になる。

$$F_{now} = \frac{F_I + f_{P,B}}{t}$$

$$= \frac{1}{t} \left\{ F_I + \mathcal{G}(f_P - \Delta_P) + \mathcal{G}(f_B - \Delta_B) \right\} \quad (7)$$

なお、式(7)はBフレームを使用しないならば  $f_B = 0$  とすることで対応できる。Pフレームについても同様である。

#### 4. 一般化

前節では、I、P、Bフレームと構成された場合に負荷量について場合分けすることなくフレームレートを算出する式を求めた。次に、より多くのフレームの型が存在する場合の一般的な表記について考える。

##### 4.1 準備

フレームの型が  $0, \dots, n-1$  の  $n$  種類あるとする。ここで型0のフレームが最重要なフレーム(たとえばIフレーム)であり、型の番号が大きくなるにつれ重要度が減少する関係にあるとする。また、型  $i$  のフレームの平均サイズと1GoV内( $t$  秒間)のフレーム数をそれぞれ  $\overline{S}_i$ 、 $f_i$  で表す(ただし、 $\overline{S}_n = 0$ 、 $f_n = 0$ )。これらから、コンテンツの符号化レート  $r_{media}$  とフレームレート  $F$  の間には次の式が成り立つ。

$$r_{media} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f_i \cdot \overline{S}_i}{t}$$

$$F = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{f_i}{t}$$

なお、ここでも過負荷となる帯域幅は  $r_{load}$  bps(ただし、 $r_{load} < r_{media}$ )であり、この負荷が一定として考える。

##### 4.2 型0のフレームについて

型0のフレームは、前章までにおけるIフレームに対応する。そのため、型0以外のフレームを間引くことで対応できる場合には1GoVでの型0のフレーム数は1であり、そうでなければ複数のGoVで1フレーム送出する。後者の場合は、 $\sum_{i=1}^{n-1} f_i \cdot \overline{S}_i < r_{load} \cdot t$

である。

したがって、型 0 だけに注目したとき（前章での議論と同様に）1 GoV あたりのフレーム数  $\Delta_0$  は次で与えることができる。

$$\Delta_0 = \frac{1}{\left\lceil \frac{S_0}{(r_{media} - r_{load}) \cdot t} \right\rceil}$$

#### 4.3 型 $i$ ( $i > 0$ ) のフレームについて

型 0 以外のフレームは前章までの P, B フレームに対応する。ある型  $i$  において、負荷量に応じて間引く  $1$  GoV 内のフレーム数は次となる。

$$\begin{aligned} & \bullet \sum_{k=i}^{n-1} f_k \cdot \bar{S}_k < r_{load} \cdot t \text{ のとき, } f_k \\ & \bullet \sum_{k=i+1}^{n-1} f_k \cdot \bar{S}_k \geq r_{load} \cdot t \text{ のとき} \\ & \left\lceil \frac{r_{load} \cdot t - \sum_{k=i+1}^{n-1} f_k \cdot \bar{S}_k}{\bar{S}_i} \right\rceil \end{aligned} \quad (8)$$

型  $i$  において、場合分けをすることなく間引くフレーム数を表記するためには、前章で説明した関数  $\mathcal{G}(x)$  も使用して式 (8) を  $\Delta_i$  とすると、次になる。

$$f_i - \mathcal{G}(f_i - \Delta_i)$$

型  $i$  における  $1$  GoV 内で間引くフレーム数が分かったので、 $1 \leq i \leq n-1$  における間引きフレーム数  $\Delta_{all}$  は次で求められる。

$$\begin{aligned} \Delta_{all} &= \sum_{i=1}^{n-1} (f_i - \mathcal{G}(f_i - \Delta_i)) \\ &= F \cdot t - 1 - \sum_{i=1}^{n-1} \mathcal{G}(f_i - \Delta_i) \end{aligned}$$

#### 4.4 一般化した計算式

以上から、 $1$  GoV あたりに送出されるフレーム数  $f_{all}$  を求める。

$$\begin{aligned} f_{all} &= \Delta_0 + (F \cdot t - 1) - \Delta_{all} \\ &= \Delta_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \mathcal{G}(f_i - \Delta_i) \end{aligned}$$

したがって、負荷量による場合分けをせずに表記するフレームレート  $F_{now}$  を一般化したものは次になる。

$$\begin{aligned} F_{now} &= \frac{f_{all}}{t} \\ &= \frac{1}{t} \left( \Delta_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \mathcal{G}(f_i - \Delta_i) \right) \end{aligned} \quad (9)$$

なお、動画コンテンツの配信において負荷  $r_{load}$  の異なる期間が複数存在する場合には、それぞれの期間に

おいて計算を行うことで対応できる。

ただし、それぞれのフレームのサイズを固定したものと仮定した計算式であるため、サイズが可変長となる実際のコンテンツに適用する場合には理想的な上界として考えることになる。なお、そのような場合について、著者らにより構築した動画配信システムで測定した結果をすでに報告<sup>5)</sup>しており、理想的な上界値として示すことができることが分かる。

## 5. まとめ

本論文では、経路上の通信状態に動的に適応するとき、フレームを間引くことで適応させる場合の一般的なフレームレートの上界を求める方法について述べた。

求めた計算式は、その計算値を上界として利用することで、通信経路の状態に応じてフレーム間引く方式の評価も考えられる。そのため、QoS 制御方式の評価という観点からも本論文の結果を活用していくことを検討する。

また、対象としたコンテンツは固定レートで符号化されたものであった。そのため、今後可変レートにも対応した方法を考える必要がある。

## 参考文献

- 1) Gringeri, S., Shuaib, K., Egorov, R., Lewis, A., Khasnabish, B. and Basch, B.: Traffic Shaping, Bandwidth Allocation, and Quality Assessment for MPEG Video Distribution over Broadband Network, *IEEE Network*, pp.94–107 (1998).
- 2) 宮地悟史, 松本修一: 超低ビットレート動画像符号化方式 — 空間的, 時間的, 統計的情報量制御による高品質符号化, 情報処理学会 AVM 研究会研究報告 1997-AVM-16, Vol.97, No.121, pp.7–12 (1997).
- 3) 稲積泰宏, 磯谷泰知, 吉田俊之, 酒井善則, 堀田裕弘: 低ビットレート動画像通信における最適フレームレートの画像依存性, 情報処理学会 AVM 研究会研究報告 2000-AVM-20, Vol.2000, pp.19–24 (2000).
- 4) 14496-1, I.: ISO/IEC 14496-1 Information Technology — Coding of audio-visual objects, Part2: Visual (1999).
- 5) 下間芳樹, 福田和真, 奥村誠司, 鷹取功人, 大野次彦, 水野忠則: RTP を利用した動画配信システムにおける QoS 制御方式, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.8, pp.2697–2706 (2002).

(平成 14 年 12 月 17 日受付)

(平成 15 年 3 月 4 日採録)