

リフレッシュピクチャの冗長符号化による低遅延動画像符号化の H.264 への適用性

山本 貴也[†] 近藤 利夫[†] 佐々木 敬泰[†] 大野 和彦[†]

[†] 三重大学院工学研究科 〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

E-mail: [†] {yoshiya, kondo, sasaki, ohno}@arch.info.mie-u.ac.jp

あらまし 近年の符号化技術の進歩により動画像の圧縮率が向上した反面、遅延時間は増大した。特に地上デジタル放送では地域によっては遅延が4秒ほど発生してしまい深刻な問題となっている。そこで筆者らはテレビ放送への適用を狙い、蓄積用途にも耐える低遅延動画像符号化方式として、Bピクチャ挿入時の遅延低減を可能とする Delayed GDR (DGDR) とランダムアクセスまで可能とする Delayed IDR (DIDR) を提案した。効果報告済みの MPEG-2 に対してイントラ予測、複数参照フレームなど特性に大きく影響する可能性のある改良が施されている H.264 への適用性を明らかにするため、提案手法を JM に実装し、符号化効率を評価した。その結果、従来の GDR に対し、M=3 では、冗長符号化相当の圧縮率低下を伴うのに対し、M=1 の DIDR では高々5%減程度と同等の圧縮効率が得られることが明らかになった。

キーワード H.264, 低遅延, GDR

Applicability of the low delay video coding with redundantly encoded refresh picture to H.264

Yoshiya YAMAMOTO[†] Toshio KONDO[†] Takahiro SASAKI[†] and Kazuhiko OHNO[†]

[†] Graduate School of Engineering, Mie University 1577 Kurimamachiya-cho, Tsu-shi, Mie, 514-8507 Japan

E-mail: [†] {yoshiya, kondo, sasaki, ohno}@arch.info.mie-u.ac.jp

Abstract Recently, the delay time of video coding tends to increase together with the improvement of coding efficiency. Especially, the delay time about four seconds becomes serious problem in digital terrestrial broadcasting. Then, we proposed a delayed IDR (DIDR) with random access capability and a delayed GDR (DGDR) that can provide low delay coding even in the condition of $M>1$. We implemented the DGDR and DIDR in JM reference software and evaluated the coding efficiency to clarify applicability to H.264 that has several improvements such as the intra prediction and the multiple reference frames to MPEG-2. The result shows that the DIDR of $M=1$ only has at most 5 percent loss of coding efficiency in comparison with the GDR.

Keyword H.264, Low delay, GDR

1. はじめに

近年、符号化効率向上を目指した研究が精力的に行われた結果、動画像の圧縮率は着実に向上してきた。標準化後10年以上を経た MPEG-2 符号化においても、処理最適化の努力により標準化当初に比べると倍近く圧縮率が向上している。しかし、遅延低減に関しては、方式的な進歩がほとんどない上に、処理最適化において画質改善の犠牲にさえなる傾向がある。その結果、遅延時間は大幅に増大してしまい、地上デジタル放送では、時報が正確な時刻に表示することが出来ない、掛け合い放送時の返答が遅れる等の深刻な問題を引き起こしている。

この地上デジタル放送における遅延増の要因とし

て最も大きいのはピクチャ間の符号発生量のばらつきを吸収するためのバッファ容量の増大である。符号発生量のばらつき自体は、従来の低遅延手法である漸次デコーダリフレッシュ方式 (Gradually Decoder Refresh:GDR) でも抑えられる[4]。この GDR は、通信エラー発生時の画像の乱れを抑えられる利点も有し、通信用には適しているものの、蓄積時のランダムアクセス・トリックプレイが困難なため、録画・再生を必然とする TV 放送に適用されるには至っていない。

これに対し、筆者等はランダムアクセス・トリックプレイに対応した遅延型瞬時デコーダリフレッシュ方式 (Delayed Instantaneous Decoder Refresh:DIDR) を提案した[1]。この手法ではリフレッシュが即時に行われ

る必要の無いことに着目し、遅延の許されない表示用に非リフレッシュ画像を先送りする一方、その非リフレッシュ画像の再イントラ符号化画像をリフレッシュ画像として後送りするようにしたものである。これによりリフレッシュは遅れるものの、ランダムアクセス・トリックプレイに対応しつつ、低遅延符号化時の画質劣化を抑えることが可能になった。しかし、2重符号化、再符号化等による画質劣化や、2重復号化によるデコーダの負担増大が問題となっていた。そこで筆者等はリフレッシュスライスを表示用の非リフレッシュスライスとリフレッシュ用スライスの両方で符号化する Delayed GDR (DGDR) を提案した[2]。この方式では DIDR のように再符号化の必要はなくなるものの、I ピクチャに頼るランダムアクセス・トリックプレイには対応できない。

両提案方式は、MPEG-2 のソフトウェアエンコーダ[3]に実装して評価し、低遅延の符号化条件において、その有効性を確認している[1,2]。しかし、近年、主流の座につきつつある H.264 では、イントラ予測・デブロッキングフィルタの付加、サブピクセル探索の増強、複数参照ピクチャのサポートなどの影響により、MPEG-2 と同様な効果が得られるとは限らない。

本報告では両提案方式の H.264 に対する有効性を確認するために参照ソフトウェアの JM に提案手法を実装した。そして、その基本特性である符号化効率を評価し、GDR, DIDR, DGDR の間の優劣が符号化条件によってどのようになるかを明らかにしている。

2. 従来の低遅延符号化方式とその問題点

2.1. 符号化・復号化における遅延の要因

遅延の要因には大きく分けて3つある。符号化・復号化の処理にかかる時間、画像の並び替えによる遅延、受信バッファによる遅延である。

符号化・復号化処理の遅延は画像を読み込み、符号化し、送信するまでの時間と、復号側が信号を受け取ってから画像を復元して表示するまでの時間である。

画像の並び替えによる遅延は未来の画像を用いて符号化される B ピクチャを用いるために発生する。B ピクチャは時間的に後の画像を参照して符号化を行うため、参照画像が先に符号化され、B ピクチャはその後に符号化される。また、復号化される際も B ピクチャに参照される画像を先に復号化するため、その待ち時間が遅延となる。

受信バッファによる遅延は、到着時刻の変動吸収のために符号化画像を一時的に受信バッファに蓄積することで発生する。現在、H.264 では I・P・B という3種類のピクチャを用いて符号化を行っており、これらは符号化の方式がそれぞれ異なるため符号量が互いに大きく異なる。特に I ピクチャの符号量が非常に大き

く全て受信側に届くには時間がかかる。受信側で再生を途切れさせないために I ピクチャの大部分を先に送ってバッファにためておく必要がある、その時間が遅延となる。実際、安全に再生を行うためには、シーンチェンジや符号量の偏りなどを考慮して受信バッファを大きめに設定しなければならない。そのため遅延の一番の要因は受信バッファによることになる。

2.2. バッファ増要因となる瞬時リフレッシュの必要性

受信バッファを大きくしなくてはならない理由は各ピクチャの符号量のばらつきであり、特に発生符号量が最も多い I ピクチャが主な原因となっている。

しかし I ピクチャは他のピクチャには無い機能として、ランダムアクセス・トリックプレイ（早送り・巻き戻し）の実現を容易にする能力を備えている。TV 放送は DVD や HD などに録画されてから視聴される場合が多く、I ピクチャにより実現される早送り・巻き戻し・頭出しの機能は必須となる。

もう一つの機能として画像のリフレッシュがある。これは伝送エラーによって生じる画像の乱れを定期的に修復する機能である。フレーム間予測を用いて符号化した場合、画像にエラーが含まれるとその画像を参照する画像にもエラーが伝播していく。従って、フレーム間予測符号化のみを用いて符号化を行うとエラーが延々伝播してしまうことになる。そこでフレーム内符号化されている I ピクチャを定期的に挿入することによりエラーの伝播を防いでいる。

2.3. 低遅延符号化方式 GDR とその原理

H.264 の低遅延符号化モード GDR (MPEG-2 ではイントラスライス) はフレーム内符号化のみのスライスを定期的に挿入し、数ピクチャかけてピクチャ全体をリフレッシュしていくものである。すなわち I ピクチャのように一度に画面全体をリフレッシュすると符号量が多くなってしまうので、画像の一部分だけリフレッシュを行うことで符号量のばらつきを抑えるようにしている。この手法では I ピクチャはもちろん一般的には B ピクチャも用いないため、ピクチャ間の符号化方式の違いによる符号量のばらつきが無くなる上、画像の並び替えの必要もなくなるため遅延時間を大幅に削減出来る。(図1)

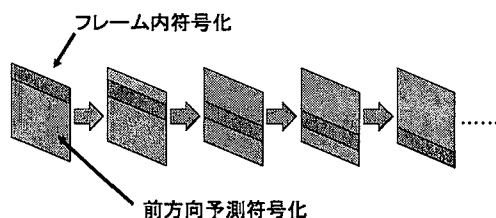


図1 GDRにおける漸次リフレッシュ

2.4. GDR の問題点

GDR は、双予測により高い圧縮率の得られる B ピクチャは用いないため、標準モードと比べ画質が低下する。また、フレーム内符号化されたスライスとフレーム間符号化されたスライスの違いの巡回が目立つリフレッシュノイズも起こりうる。さらに、GDR ではトリックプレイが行いにくい。これは本来トリックプレイの起点となる I ピクチャが無いためである。このため、早送りの実現には、デコード処理自体を速めることが必要となり、デコーダにかなりの負担がかかる。またランダムアクセスも同様に行いにくい。これは画面全体をリフレッシュするのに一定の枚数のピクチャを復号しなければならぬからである。また、再符号化や SP スライスを用いることにより無理にランダムアクセス、トリックプレイに対応させると画質の低下や蓄積容量の増加を招いてしまう。その上、GDR では、リフレッシュを保证するためにリフレッシュ済みブロックの符号化には未リフレッシュ領域を参照出来ないという制約がある。H.264 では、さらに、スライスの境界付近ではデブロッキングフィルタやサブピクセル動き補償を行えない等の画質劣化要因となる制約が加わっている。

3. 提案手法

GDR の問題点を解消あるいは緩和するために、筆者らは B ピクチャの挿入を許容し、ランダムアクセス・トリックプレイに対応可能とする低遅延動画像符号化方式である遅延型瞬時デコーダリフレッシュ方式 (Delayed Instantaneous Decoder Refresh: DIDR) を、さらに DIDR の圧縮率低下の問題の緩和を狙った遅延型漸次デコーダリフレッシュ方式 (Delayed GDR: DGDR) とを提案した [1,2]。

3.1. DIDR

DIDR 方式では従来 I ピクチャとして符号化されるフレームを P ピクチャ (P0 ピクチャ) として符号化する。そしてその P0 ピクチャのローカルデコード画像を再度イントラ符号化し、リフレッシュ用のピクチャ (R ピクチャ) を生成する。つまり従来の I ピクチャの位置に表示用の P0 ピクチャとリフレッシュ用の R ピクチャという 2 枚の画像を生成する。R ピクチャは、P0 ピクチャの後に続く P1 ピクチャの参照画像として用いる。デコーダ側には符号化してすぐに送るのではなく、オーバーフロー発生時に、その断片 (r) を、P, B ピクチャ専用とする従来の受信バッファとは別個に設ける R ピクチャ用バッファに向けて送出する。(図 2)

デコーダ側では P0 ピクチャを復号後、エンコーダ側と同様にフレーム内符号化する。表示用にはこのピクチャ R' を I ピクチャ相当の GOP の基準の参照画像

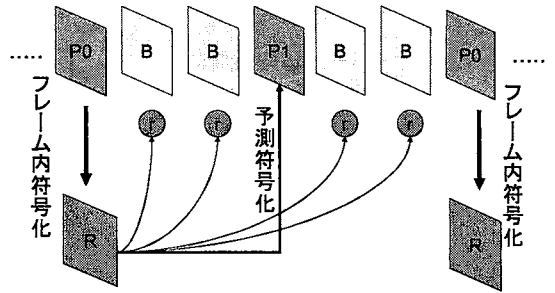


図 2 DIDR 方式におけるエンコードの概要

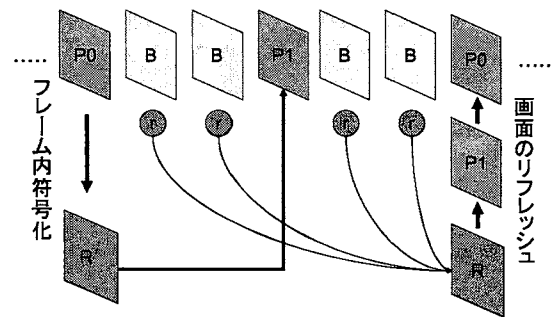


図 3 DIDR 方式におけるデコードの概要

として以降のピクチャのデコードを先行的に行う (図 3)。この表示用の先行デコードとは別に、断片 r の全てが届いた時点で、リフレッシュ用に R ピクチャをデコードし、そのデコード画像を GOP 内の基準の参照画像として P ピクチャのみデコードをやり直す (図 3 右側の下から上に向かうデコードのパス)。このリフレッシュ用の P ピクチャのデコードが表示用の P ピクチャのデコードに追いついた時点で、表示用の P ピクチャのデコードを取り止め、以降はリフレッシュ用の P ピクチャデコード画像を表示用にも用いるようにする。

受信バッファの動作については、P, B ピクチャ専用の従来受信バッファがオーバーフローした際、図 4 に示すように R ピクチャを送出するようにする。これによりオーバーフロー防止のために画質向上に無益な符号を割り当てる必要がなくなる。さらに、オーバーフロー防止のためにバッファを大きめに設定する必要がなくなるため、受信バッファ起因の遅延時間の低減も可能となる。

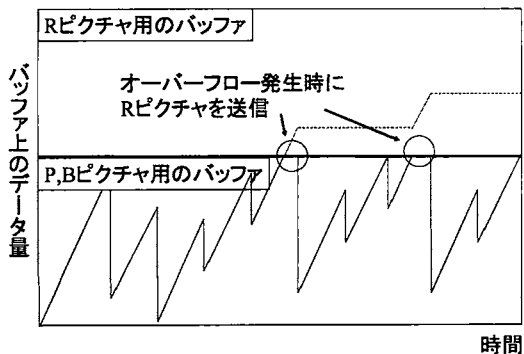


図4 DIDR におけるデコーダバッファの遷移

DIDR 方式の利点として、

- GDR 方式とは違い再イントラ符号化ピクチャを用いることでランダムアクセス・トリックプレイに対応できる。
- GOP の先頭のピクチャに関しては表示用の P0 ピクチャとリフレッシュ用の R ピクチャに冗長に符号化しているため、Iブロック起因のエラー耐性が向上する。
- GDR のようにリフレッシュ画像を空間的に分割しているわけではないので、巡回リフレッシュノイズが起これない。
- 表示用の画像とリフレッシュ用の画像を比較してエラーの無い事が確認された場合、デコーダ側のリフレッシュを省略できる
- 蓄積時には冗長再符号化画像の P0 ピクチャか R ピクチャのどちらか片方だけを蓄積すれば良いので蓄積容量を標準方式と同等かそれ以下まで削減できる。
- 受信バッファを P,B ピクチャ用と R ピクチャ用に分けることにより、遅延を GDR 以下にできる。

また、欠点としては

- 再符号化により画質が劣化してしまう。さらにデコーダにフレーム内符号化の機能が必要になるためハードウェア量が増加する。
- 冗長符号化によって圧縮率が下がる。
- 従来 GOP の先頭で行われていたリフレッシュが次の GOP の先頭で行われるため、リフレッシュが1周期分程度遅れてしまう。特に P ピクチャ周期 M が 1 (M=1) の場合では、リフレッシュ用に全ての画像をデコードしなければならないためリフレッシュ遅延が増大する。このリフレッシュ遅延の増加を抑えようとする場合、数倍以上のデコード速度が要求され、ハードウェアの負担が増大する。

- GDR のように P ブロック起因のエラー伝搬を阻止できない。

3.2. DGDR

DGDR, DIDR の欠点であるデコーダでの再符号化を排除することで画質改善を目指した低遅延符号化方式である。

DGDR も DIDR と同様リフレッシュ対象を表示用とリフレッシュ用の 2 つの圧縮画像を生成する。しかし、DGDR ではピクチャ全体を冗長符号化するのではなく、その断片のスライスを冗長に符号化する。表示用の P スライス先送りし、リフレッシュ用のスライス (R スライス) は分割して符号量の小さい B ピクチャとあわせて送出する (図 5)。

デコーダ側では P ピクチャを表示するときには先行して届く P スライスを用いる。R スライスは、いっしょに届く B ピクチャに続いてデコードしておく。そして、次の P ピクチャをデコードするときに参照する前の P ピクチャのリフレッシュ対象部分の P スライスを R スライスと入れ替えておく。それが終了した後にリフレッシュされる P ピクチャを参照画像として次の P ピクチャの復号を開始する (図 6)。

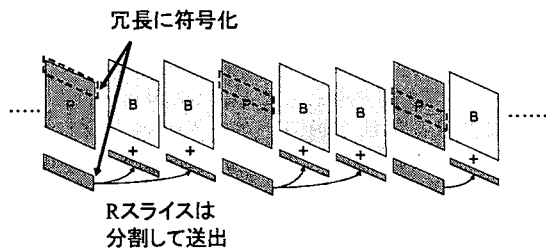


図5 DGDR 方式におけるエンコードの概要

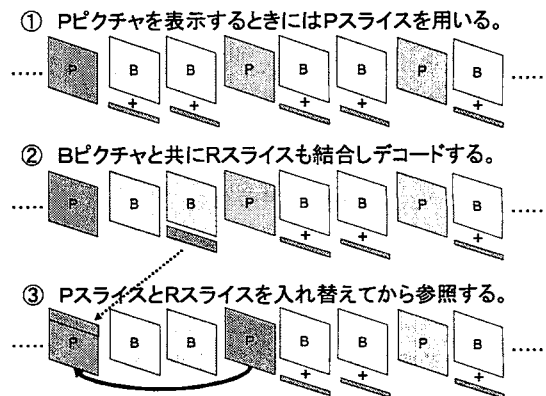


図6 DGDR 方式におけるデコードの概要

本方式の利点として

- ・ 再符号化の必要が無いため、DIDRより画質劣化を抑えられる。またデコーダにフレーム内符号化機能が必要なくなる。
- ・ GDR+スライスの冗長符号化によりIブロック起因のエラー耐性が向上する。
- ・ 蓄積時には冗長に符号化したスライスの片方だけを蓄積することによって、蓄積容量を削減できる。また、欠点として
- ・ Iピクチャに頼るランダムアクセス・トリックプレイに対応できない。また、再符号化やSPスライスを用いることによって無理にランダムアクセス、トリックプレイに対応させると画質の低下や蓄積容量の増加を招く。
- ・ GDRと比べてリフレッシュの遅延がM値分増加してしまう。

4. 実装, 評価

提案手法のH.264への適用性を確認するために、GDR, DIDR, DGDRをJM参照ソフトウェアに実装し比較実験を行った。用いた符号化条件を表1に示す。また、表2に示すようにM値、参照フレーム数、リフレッシュ周期Nを変更したNo.1からNo.4の4種類の実験パラメータで評価を行った。表2の各条件においてI, R, Pピクチャの量子化パラメータQPI, QPR, QPPを28, 32, 36, 40に、BピクチャのQPBを30, 34, 38, 42と設定した。この条件で評価した場合のGDRに対するDIDR, DGDRのBD-Bitrate, BD-PSNRを表2~5に示す。なお、実験パラメータのNo.4においてはDGDRの評価は行わなかった。これはM=1の場合、DGDRは単なる冗長スライスになるからである。

5. 考察

はじめにM=3の条件でDIDRとDGDRを比較する。DGDRは、DIDRの再符号化のロス解消を狙った方式

ながら、明らかに勝るのは表2のNo.1の条件のみで、それもわずかである。これは、H.264の場合、GDR同様にDGDRでリフレッシュスライス参照時にサブピクセル動き補償やデブロッキングフィルタが効かせられなくなり符号化効率が低下するためと考えられる。また、表2と表3を比較すると、参照フレーム数を増やした場合のBD-Bitrate, BD-PSNRの改善量でDGDRのほうがDIDRよりも低いことがわかる。これは、DGDRではリフレッシュ保証のための探索領域制限が、参照フレームが離れるほど広がるため、制限のないDIDRと比べ探索可能領域が減少してしまうからである。

表4のNo.3の条件でのBD-Bitrate, BD-PSNRは表2に比べ両方式とも減少している。これはNを2倍に設定すると冗長符号化する画像の割合が半分になるからである。ここでSusie, Tempeteの条件No.3におけるRD特性を図7, 8に示す。高ビットレート時にはGDRのほうが有利だが、低ビットレートではGDRとDIDRは同等、Tempeteに関してはDIDRのほうが有利である。従って、Nが大きく、ビットレートが低い場合にはGDRよりもDIDRのほうが符号化効率でも勝るといえる。

次に、より低遅延の動作が可能なM=1の場合について考察する。No.4の条件の表5に示されるようにDIDRのBD-Bitrateは、5%以下に収まっており、Susieにいたっては12.41%も減少している(図9)。このようにGDRと同等の符号化効率が得られているのに加え、低遅延符号化時にバッファオーバーフローへの配慮が不要になること、ランダムアクセスが可能となること、巡廻リフレッシュノイズから開放されることなどの利点も有している。従って、M=1の条件においてはDIDRの方が符号化性能でGDRより上回るといえる。

表1 符号化条件

項目	内容
入力画像	Football, Mobile&Calendar, Susie, Tempete
入力画像サイズ	720*480, 30fps
動き探索範囲	32
動き探索精度	1/4画素精度

表2 実験パラメータ

	M値	参照フレーム数	リフレッシュ周期N
No.1	3	1	15
No.2	3	5	15
No.3	3	1	30
No.4	1	1	15

表2 符号化効率比較 (M=3, 参照フレーム数=1, N=15)

Sequence	BD-Bitrate		BD-PSNR	
	DIDR	DGDR	DIDR	DGDR
Football	18.03	18.55	-0.79	-0.82
Mobile&Calendar	15.75	14.21	-0.66	-0.59
Susie	6.99	4.77	-0.22	-0.15
Tempete	16.19	11.02	-0.59	0.40

表3 符号化効率比較 (M=3, 参照フレーム数=5, N=15)

Sequence	BD-Bitrate		BD-PSNR	
	DIDR	DGDR	DIDR	DGDR
Football	11.69	18.21	-0.51	-0.80
Mobile&Calendar	11.91	9.81	-0.50	-0.42
Susie	4.21	5.52	-0.13	-0.17
Tempete	8.54	7.62	-0.31	-0.28

表 4 符号化効率比較 (M=3, 参照フレーム数=1, N=30)

Sequence	BD-Bitrate		BD-PSNR	
	DIDR	DGDR	DIDR	DGDR
Football	6.82	10.17	-0.30	-0.45
Mobile&Calendar	6.23	9.83	-0.24	-0.38
Susie	1.97	4.76	-0.07	-0.15
Tempete	2.71	8.55	-0.09	-0.29

表 5 符号化効率比較 (M=1, 参照フレーム数=1, N=15)

Sequence	BD-Bitrate		BD-PSNR	
	DIDR	DGDR	DIDR	DGDR
Football	4.98		-0.22	
Mobile&Calendar	1.75		-0.08	
Susie	-12.41		0.39	
Tempete	-0.52		0.02	

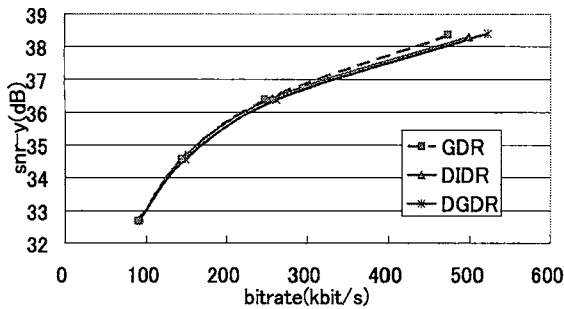


図 7 RD 特性 (条件 No.3 Susie)

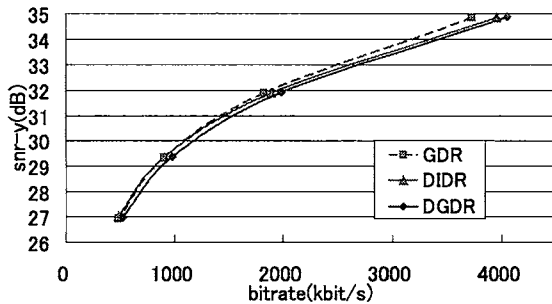


図 8 RD 特性 (条件 No.3 Tempete)

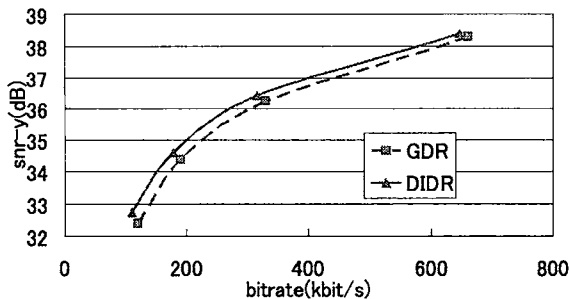


図 9 RD 特性 (条件 No4 Susie)

6. おわりに

本稿では低遅延動画画像符号化方式 DIDR, DGDR を提案した。本方式ではリフレッシュを行う画像を表示用の画像とリフレッシュ用の画像の 2 つに分け、リフレッシュ用の画像を分割して送出しリフレッシュ自体を遅延させることにより符号量の偏りの影響を緩和することで遅延時間の短縮をはかっている。評価を行った結果、①再符号化をなくす効果が H.264 における GDR の制約に打ち消されるため、DGDR は、M=3, 参照フレーム数 1 の条件でわずかに DIDR を上回るのみであること、②M 値が 1 の時やリフレッシュレートが高く、ビットレートが低い場合には、DIDR の方が GDR よりも符号化性能が高いことなどがわかった。

今後は、レートコントロールを提案手法用に改良し、遅延時間を制限する実用的な条件での評価を行う。また、画像の性質に応じて、DIDR と GDR の有利な方を選択して符号化する適応的な符号化方式について検討を進める。

なお、本研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究 C(2), No.15560326）によった。

文 献

- [1] 奥野剛, 近藤利夫, 佐々木敬泰, 大野和彦, “リフレッシュピクチャ分割送出による動画画像符号化の遅延低減に関する研究,” 2004 同大フォーラム, pp.371-372, Sept.2004.
- [2] 山本貴也, 近藤利夫, 佐々木敬泰, 大野和彦, “リフレッシュスライス送出後送りによる低遅延動画画像符号化 (その 2),” 電子情報通信学会全国大会, D-11-40, March.2007.
- [3] サンプルプログラム “mpeg2v12” University of California, Berkeley
<http://mm-ftp.cs.berkeley.edu/pub/multimedia/mpeg2/software/>
- [4] “Gradual Decoder Refresh Using Isolated Regions,” JVT-C074, Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG Meeting, May.2002.
- [5] “On Random Access,” JVT-D097, Joint Video Team (JVT) of ISO/IEC MPEG & ITU-T VCEG Meeting, July.2002.
- [6] Miska M. Hannuksela, Ye-Kui Wang, Moncef Gsbouj, “Isolated Regions in Video Coding,” IEEE TRANSACTION ON MULTIMEDIA, VOL.6, No.2, pp259-267. APRIL 2004.