

ディスクアレイ構成における連続メディアデータに対する ディスクリトリアルゴリズムの評価

戸田誠二

toda@de.cs.titech.ac.jp

東京工業大学 工学部 電気電子工学科

横田治夫

yokota@cs.titech.ac.jp

東京工業大学 学術国際情報センター

1 はじめに

近年、ハードディスクの用途は多様化しつつある。従来のハードディスクは計算対象となるデータやプログラム等を主に格納していたが、容量の増大や転送速度の向上に伴いその用途を動画、音楽等の連続メディアデータの格納、再生にまで広げている。このような用途の変化に応じて、ハードディスク自体も連続メディアデータの用途を対象とした独自の機能が必要とされる。

これは計算対象のデータやプログラム等と連続メディアデータに求められる要求の違いによるものである。プログラムは1ビットでもデータが欠けていると誤動作を起こす可能性が高いが、動画や音声は長時間の再生におけるわずかなデータの欠落により全体の情報に問題を起こすことは殆んどない。しかし連続メディアデータはデータが連続的に供給されないと停止してしまい、品質に影響を及ぼす。データの読み込みの連続性はプログラム等の読み込みには要求されない。

従来、ディスクはデータの読み込みにおいて、データの信頼性を保証するため、エラーの発生を確認するとリトライ(同セクタの読み直し)を行う。しかしリトライは非常に大きな遅延の原因となる。連続メディアデータの読み込みには、その信頼性より連続性を優先させるためにエラーが発生してもリトライを行わず不完全なデータを送信して、次のデータを読み込む必要がでてくる場合がある。しかしエラーの発生頻度が高い場合は、リトライのスキップを行わずに再生されたメディアの内容が理解できなくなってしまう。これまで、単一ユーザに連続メディアデータを供給する場合のリトリアルゴリズムについて研究されてき

た[1, 2]。しかし、マルチユーザ環境での連続メディアデータのサーバを考えた場合、ディスクアレイ構成における連続メディアデータの読み込みについて考察する必要がある。その場合、RAID5のパリティを用いて必要とするデータを再現することと、ディスクリトライを組み合わせることも考えられる。

本研究では単一のディスクドライブからデータを読み出すだけでなく、複数のユーザがストレージシステムとして同時に複数のディスクドライブを使用する場合に着目してリトリアルゴリズムを検討する。特にマルチユーザ環境での連続メディアデータのサーバを対象に、ディスクアレイ構成における連続メディアデータの読み込みについて、ディスクリトライとRAID5のパリティを組み合わせ、必要とするデータを再現することを提案する。

提案手法の有効性を確認するため、リトリアルゴリズムと各種パラメータによるデータの信頼性と連続性の関係についてシミュレーションを行い評価する。

2 リトライ回数の決定手法

従来のディスクの場合、エラーが発生すると最大256~1024回程度のリトライを行っていた。しかし1つのセクタに対し繰り返しリトライを行うと、連続性を著しく欠きかねない。そこで連続メディアデータに適した少数固定リトリアルゴリズムと動的リトリアルゴリズムが提案された[1, 2]。

少数固定リトリアルゴリズム 従来のディスクのように256~1024回程度リトライを繰り返す方法

だけでなく、連続性を考慮したより少ない10回程度またはそれ以下のリトライを行うアルゴリズムについても検討する。

動的リトライアルゴリズム 固定リトライアルゴリズムの場合、リトライ回数を減らしても必ずしもデータの連続性を完全に保証できるとは限らない。そこで、保証ビットレートをユーザが指定し、それを下回らないようにリトライ回数を決定する方法を検討する。

実際には既に読み込んだデータ量と要求ビットレートを元に、リトライを行える最大の時間 deadline を求め、最大 deadline までリトライを行うことでこれを実現する。

ここでは、上記アルゴリズムとパリティ計算を組み合わせたリトライアルゴリズムを考える。故障セクタを読み込む場合や、エラーを起こす確率が高い場合、リトライを行うことだけで信頼性を上げることは難しい。そこで、信頼性を上げるためにリトライを行うだけでなく、RAID5のパリティを用いてリトライを行っても読み込めなかったデータを再現する方法を検討する。本研究では以下のリトライアルゴリズムを提案する。

SNP-n(Static No Parity retry):パリティ計算なし RAID 用少数固定リトライアルゴリズム 各クライアントに対しディスクアレイ構成の各ディスクが固定回数 (n) を上限にリトライを行う。

SAP-n/m(Static Always Parity retry):パリティ計算付き RAID 用少数固定リトライアルゴリズム 各クライアントに対しディスクアレイ構成の各ディスクが固定回数 (n) を上限にリトライを行い、リトライ回数が上限に達しても読み込みが正常に行われないディスクが発生した場合は、残りの各ディスクが固定回数 (m) を上限にパリティデータの読み込みを行いパリティ計算により必要とするデータを求める。リトライによる読み込みが失敗した場合、パリティデータの読み込みは時間的余裕の有無に関わらず行うものとする。

DNP(Dynamic No Parity retry):パリティ計算なし RAID 用動的リトライアルゴリズム 各クライアントに対しディスクアレイ構成の各ディスクが deadline までに可能な最大リトライ回数を計算し、これを上限にリトライを行う。

DCP-m(Dynamic Conditional Parity retry):パリティ計算付き RAID 用動的リトライアルゴリズム 各クライアントに対しディスクアレイ構成の各ディスクが、残りの各ディスクがパリティデータを固定回数 (m) を上限に読み出し、パリティ計算するのに必要な時間を推定する。deadline からこの時間を差し引いた時間を用いて可能な最大リトライ回数を計算し、これを上限にリトライを行う。ここにおいて、パリティ計算に必要な時間が deadline をこえる場合はリトライのみを行う。リトライが失敗した場合、残りの各ディスクがパリティデータを固定回数 (m) を上限に読み出し、計算する。

上記のアルゴリズムの動作を図1、2に示す。図1の上の図は各クライアントに対する timeslot の割り当てを示したものである。図から分かるように各クライアントは deadline までの時間を timeslot として割り当てられ、その時間内にデータの読み込みを行う。ここにてでくる timeslot については4節で説明する。

次に図1の下の図では各 timeslot におけるリトライアルゴリズム毎の RAID5 の動作を示している。この図は各アルゴリズムの特徴的な場合の動作のみを示している。SNP、SAP では必ずしも timeslot の時間内に読み込みを終了できるとは限らないために連続性を保証できない。これに対し DNP、DCP は連続性を保証するために timeslot 内で読み込みを行う。このため読み込みが正常に終了しない場合はエラーを返して読み込みを終了する。なお、シーク等の時間は read の中に含まれている。

図2ではさらに、各アルゴリズムの一回の読み込みに注目して考えられる全ての場合を列挙している。DNP、DCP での retry の上限回数は既に示したように timeslot の終了時刻をもとに算出されたものである。ここでもシーク等の時間は read に含めている。また、アルゴリズム名の下に表記した no error、retry-recovery、parity-recovery、no-recovery はそれぞれエラーが発生しなかったとき、リトライでエラーが解消されたとき、パリティ計算でエラーが解消されたとき、エラーが解消されなかったときを表している。

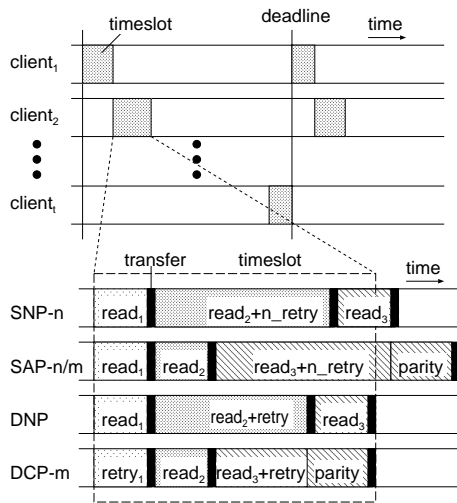


図 1: ディスクリトライアルゴリズムの動作 (1)

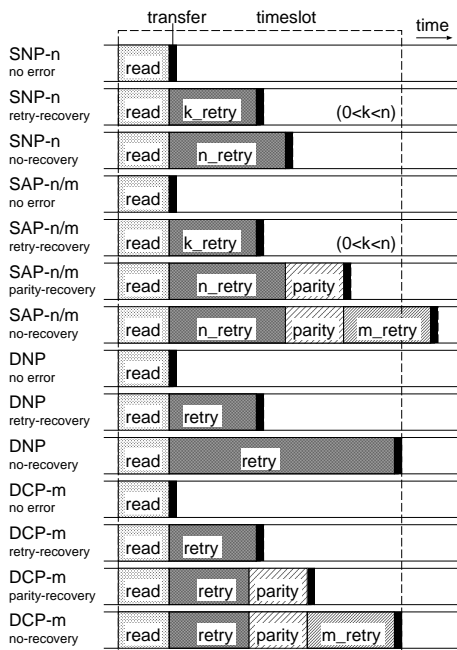


図 2: ディスクリトライアルゴリズムの動作 (2)

3 評価指標

[1, 2] では様々なパラメータによる結果を評価する評価指標として無破壊データ率、無遅延供給率、有効データ率を用いている。これらの指標はフレーム数を基準に評価しているが遅延の度合いをより詳しく表すため、これらの基準をデータ量、時間に変更した新たな指標を無破壊データ率、無遅延再生時間率、有効再生時間率として以下の式を示す。

無破壊データ率 ($P_{nocorrupt}$) 送信した全データ中の正常に届いたデータの割合を示す。

$$P_{nocorrupt} = \frac{\text{読み出したデータ総量} - \text{破壊されたデータ量}}{\text{読み出したデータ総量}}$$

無遅延再生時間率 ($P_{nodelay}$) 再生にかかった全時間中の、読み込みによる遅延を除いたデータ再生時間の割合を示す。

$$P_{nodelay} = \frac{\text{データ再生時間}}{\text{データ再生時間} + \text{読み込みによる遅延時間}}$$

有効再生時間率 (P_{effect}) データの信頼性、連続性を総合して評価する指標。再生にかかった全時間における無破壊なデータの再生時間の割合を示す。

$$P_{effect} = P_{nocorrupt} \cdot P_{nodelay}$$

4 シミュレーション

連続メディアデータの信頼性、連続性の高い再生を達成するディスクの制御方法を検討するためには、様々な条件下での評価が必要となる。ディスクのリトライアルゴリズムを変更して評価を行う等の理由により、実際に実験を行うことは困難である。このため、プログラム上で RAID5 構成のディスクレイから複数のクライアントに連続メディアデータを供給するようなシミュレーションを構築し、これにより評価を行った。シミュレーションにおけるディスクドライブのモデルは [3] に従った。

4.1 シミュレーションのモデル

シミュレーションのモデルは以下に示すものである (図 3)。

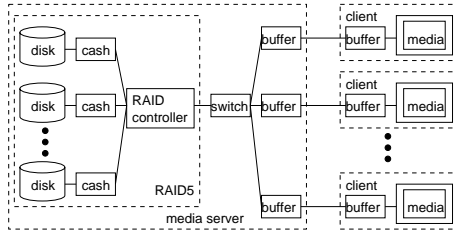


図 3: シミュレーションのモデル

まずモデルの構造を説明する。複数のディスクを接続し、RAID5によるディスクアレイ構成にする。ディスク装置から読み出されたデータはいずれか1つのバッファメモリに転送先を切り替えるスイッチにより目的のバッファメモリに一時蓄積される。そして通信回線を通じてクライアントである各端末に送られる。これは [4] で紹介されたアクセス方式に基づいている。

次にモデルの動作について説明する。要求ビットレートを V_{need} 、各バッファメモリに蓄積されたデータのうち最小のデータ量を D_{min} とすると $deadline(t_{dead})$ は

$$t_{dead} = \frac{D_{min}}{V_{need}}$$

で与えられる。この t_{dead} が一周期となり、これを各クライアントに対するバッファメモリのデータ量 (D_1, D_2, \dots) の逆数の比で分割する。

$$t_i = t_{dead} \times \frac{\frac{1}{D_i}}{\sum \frac{1}{D}}$$

各クライアントは SNP-n、SAP-n/m においては各データにつき n 回のリトライを行い、DNP、DCP-m においては t_i を deadline としてリトライ回数の上限を算出しリトライを行い、 t_i に達するまでデータを読み込む。このサイクルを繰り返して、連続メディアデータの読み込み、再生を行う。

4.2 シミュレーションの条件

ディスク回転数	15000	rpm
バッファ容量	4096	KB
キャッシュヒット率	0.5	
内部転送レート	320	Mbps
外部転送レート	1280	Mbps
要求ビットレート	20.5	Mbps
ストリームサイズ	100	KB
ディスク台数	5	
クライアント数	5	

シミュレーションは特に指定がなければ上表の条件の下、行われるものとする。これは通常の連続メディアデータサーバを想定して設定している。以下にその他、前提としている条件を述べる。

- 取り扱うデータは連続メディアデータであり、多少データが損失しても全体の情報に影響が及ぶことはない。
- 各クライアントは定期的に、連続したデータの供給を要求する。
- ディスクキャッシュのヒット率は、読み込むデータによらず等確率である。
- メディアデータを読み込んでいる間は、これ以外のデータの読み込み要求、書き込み要求は起こらない。
- データの転送中にエラーは起こらない。
- 計算に用いる読み込み開始からの時間、ディスクの回転数、最低保証ビットレート、読み込み完了したデータ量の値は、全てディスク内部で獲得することができる。
- データの読み込みの際に起きるエラーは検出可能なエラーのみであり、検出不可能なエラーは起こらない。
- メディアデータの圧縮については考慮しない。
- 連続するデータは各ディスクに分散して理想的に配置されている。

5 評価、考察

5.1 各リトリアルゴリズムの性能の評価

前節で示したシミュレーションモデルの下、各リトリアルゴリズムの評価を行う。

まず SNP、SAP、DCP の三手法について、その固定リトライ回数による性能の評価を行った。図 4、図 5、図 6 は有効再生時間率のみを示す。

また、各固定リトライの回数として図 4、図 5、図 6 で高い有効再生時間率を示したリトライ回数を採用して、各リトリアルゴリズムの無破壊データ率、無遅延再生時間率、有効再生時間率を比較したものを図 7、図 8、図 9 を示す。

図 4 の SNP について、SNP ではデータの連続性を特に重視してリトライ回数を 0~3 回程度におさえると、エラーレートの増加にともない徐々に有効再生時間率が低下しているのがわかる。これに対し、リトライ回数を 10 回、256 回と増やすとエラーレートが多少増加しても有効再生時間率に大きな影響はでないものの、エラーレートが 0.06~0.08 付近の値をこえると急激に低下している。

ここで、この RAID5 を用いた SNP と以前の研究 [1, 2] における単体ディスクを用いた少数固定リトリアルゴリズムとを比較してみる。紙面の関係でグラフは省略する。1 ストリームを読み込むためのリトライ回数が等しいため両者の無破壊データ率に変化はないが、SNP ではデータが各ディスクに分散されていることを前提としているため、データ読み込みの分散化により無遅延再生時間率は、単体ディスクを用いた少数固定リトリアルゴリズムに比べ向上している。

次に図 5 の SAP について、この場合もいずれかのリトライ回数が大きいアルゴリズムでは有効再生時間率はエラーレートが 0.06~0.07 付近の値をこえると急激に低下し、リトライ回数の少ない場合は徐々に低下している。しかしパリティ計算を行っているため、図 7、図 8 からわかるように SNP に比べ全体的に無破壊データ率は向上し、無遅延再生時間率は低下する傾向にある。このため SAP-3/3 でもある程度エラーレートまでは無破壊データ率を高く保つことができる。

DNP、DCP-m(m=0,3,10,256) は図 6、図 7、図 8 からわかるようにその性能に大差はない。これは DCP ではパリティ計算の時間が取れない場合にリトライのみ

を行うので、高いエラーレートにおいて、パリティ計算が適切に行われなかったためだと考えられる。また無遅延再生時間率は図 8 からわかるように DCP-256、DNP 共にほぼ 100%を保っている。

次に SNP-10、SAP-3/256 についてみる。SAP-3/256 はエラーレート 0.06 付近から無遅延再生時間率が急激に下がるが、無破壊データ率は全体を通して 100%に近い値である。SNP-10 の無遅延再生時間率はエラーレート 0.07 付近から急激に下がり、無破壊データ率は全体を通して SAP-3/256 を下回っているものの高い水準を保っている。

SAP を用いると最低限のリトライ回数を保証できるのに対し、DNP、DCP は連続性を優先するためにリトライをほとんど行えない場合があり、エラーレートの増加に伴い徐々に無破壊データ率が低下してしまう。しかし SAP は信頼性を優先するため、ある値以上のエラーレートにおいて無遅延再生時間率が急激に低下してしまう。このため、無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレート以下の場合に限り SAP-3/256 が最も高い有効再生時間率を示すが、それより高いエラーレートにおいては DNP、DCP が比較的高い有効再生時間率を示すものであると考察される。

5.2 各パラメータの変化による性能の評価

5.1 節で無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレート以下の場合、SAP-3/256 が最も高い有効再生時間率を示すことを示した。ここではそのエラーレートの値が種々のパラメータによりどのように変化するかを調べる。これを図 10、図 11、図 12、図 13、図 14、図 15 に示す。

図 10 ではクライアントの台数を、図 11 ではディスクの台数を、図 12 では要求ビットレートを、図 13 ではディスクの回転数を、図 14 では外部転送レートを、図 15 では内部転送レートをそれぞれ変化させて実験を行った。

なお、無破壊データ率や有効再生時間率については SAP-3/256 を使用していることで、無破壊データ率はほぼ 100%になっているため、有効再生時間率=無遅延再生時間率となることが予想されるので、この 2 つのデータについては省略した。

クライアントの台数が増加するとそれにほぼ反比例してクライアント 1 台がディスクアレイを使用できる

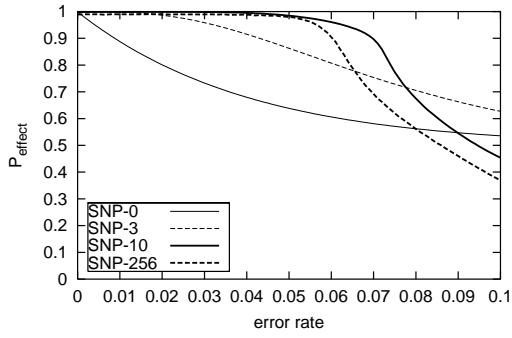


図 4: SNP の有効再生時間率

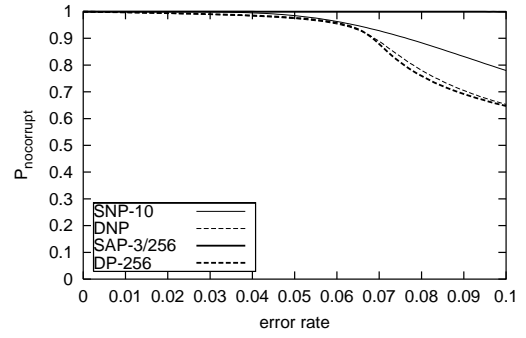


図 7: 各リトリアルゴリズムの無破壊データ率

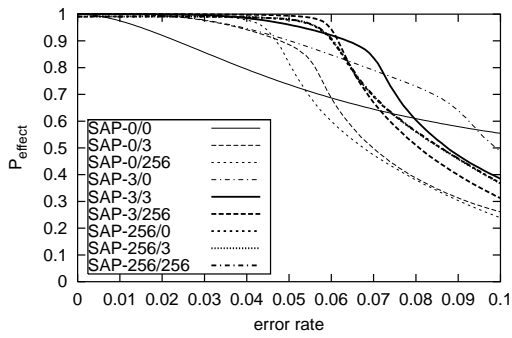


図 5: SAP の有効再生時間率

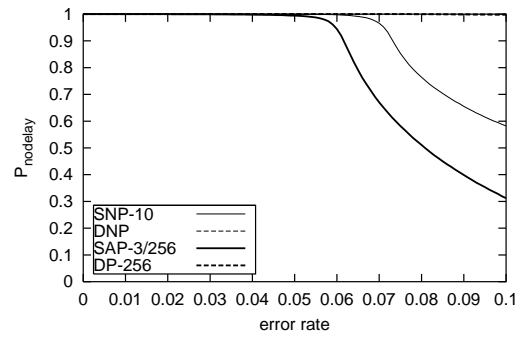


図 8: 各リトリアルゴリズムの無遅延再生時間率

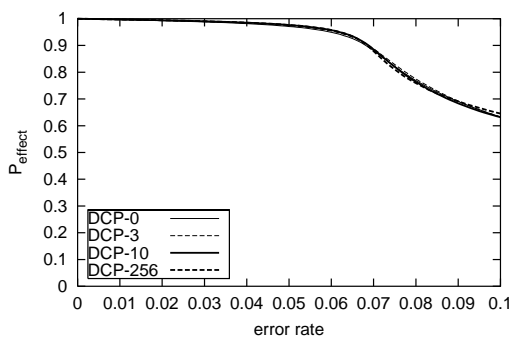


図 6: DCP の有効再生時間率

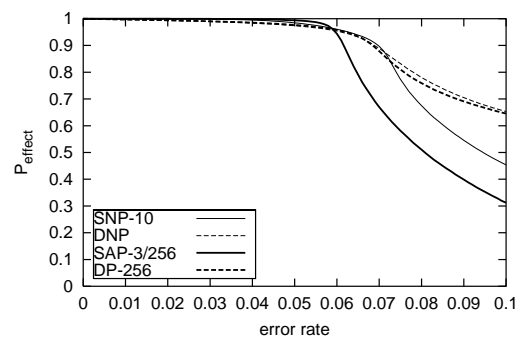


図 9: 各リトリアルゴリズムの有効再生時間率

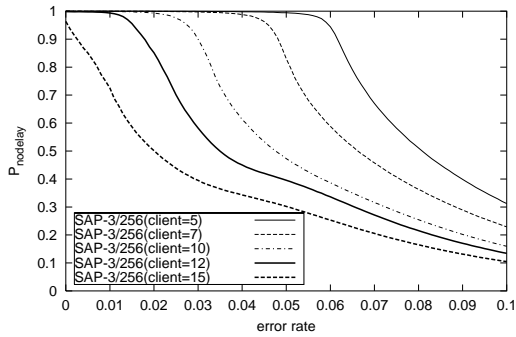


図 10: クライアント台数による SAP-3/256 の無遅延再生時間率

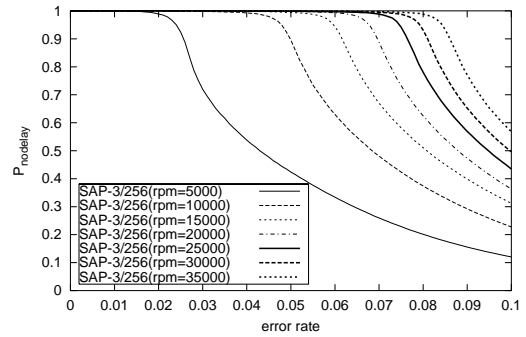


図 13: ディスクの回転数による SAP-3/256 の無遅延再生時間率

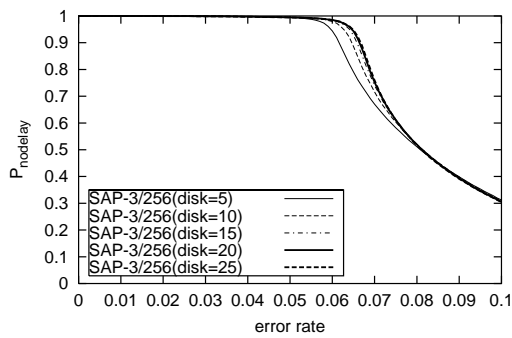


図 11: ディスク台数による SAP-3/256 の無遅延再生時間率

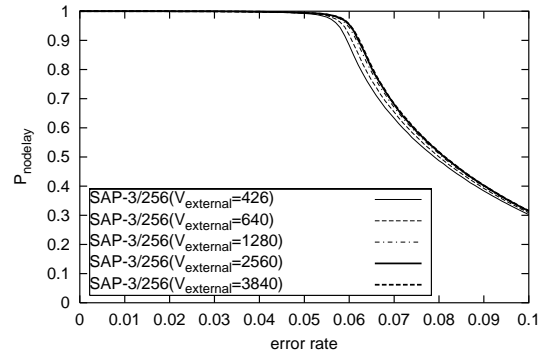


図 14: 外部転送レートによる SAP-3/256 の無遅延再生時間率

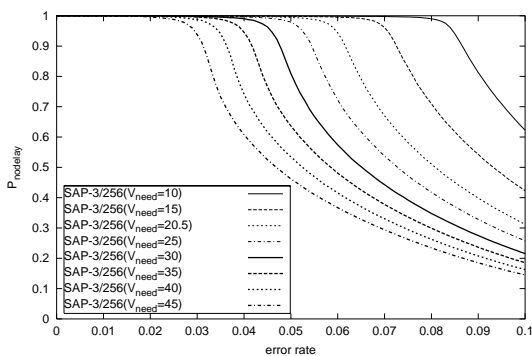


図 12: 要求ビットレートによる SAP-3/256 の無遅延再生時間率

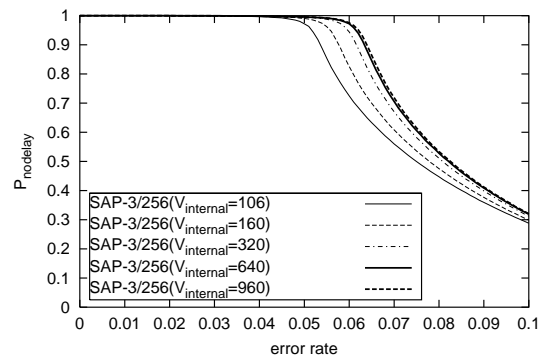


図 15: 内部転送レートによる SAP-3/256 の無遅延再生時間率

時間が減少する。これは図 10 のグラフで得られた結果と一致する。

図 11 ではディスクの台数が増加してもその性能は大きく変化していない。これは読み込み作業の並列化により性能の向上を見込めるものの、パリティデータの読み込みにおいてディスクの台数に関わらず全ディスクを使用するため、あまり大きく性能が変わらないためと思われる。無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレート以降では、リトライのみでデータを読み込める確率が低下しパリティの読み込みの起こる頻度が増加する。このため無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレートは大きく変化せず、またそれ以降エラーレートが高くなるにつれて性能の差は小さくなる。

要求ビットレートの増加に反比例して各クライアントに割り当てられる時間は減少する。このため要求ビットレートの増加に伴い性能は低下すると予想される。ここで図 12 を見ると $V_{need}=20.5$ では 0.058、 $V_{need}=25$ では 0.051、 $V_{need}=30$ では 0.044、 $V_{need}=35$ では 0.038、 $V_{need}=40$ では 0.033、 $V_{need}=45$ では 0.028 というように、無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレートはほぼ要求ビットレートに反比例して小さくなっている。 $V_{need}=10$ 、 $V_{need}=15$ のとき多少ずれているのは、性能の落ちるエラーレートが高くなり性能が上がりにくくなったためと考えられる。

ディスクの回転数の増加に反比例してリトライ 1 回に要する時間は減少する。しかし、目的とするデータがキャッシュに存在する場合はディスクの回転数により読み込み時間が短縮されることはない。また、ディスクの回転数の増加にともない無遅延再生時間率が急激に低下するエラーレートが大きくなり、そのためこのエラーレートの増加幅は小さくなる傾向にある。このため図 13 のようにディスクの回転数が増加するにつれて性能の向上は小さくなるものと思われる。

外部転送レート、内部転送レートが向上するとデータの転送時間が短縮され、性能の向上が見込める。しかし図 14、図 15 から分かるように、外部転送レート、内部転送レートの向上にともなう性能の向上は小さい。これはデータの転送時間がディスクのリトライ時間に比べて小さいために、大きな変化が起こらないものと思われる。

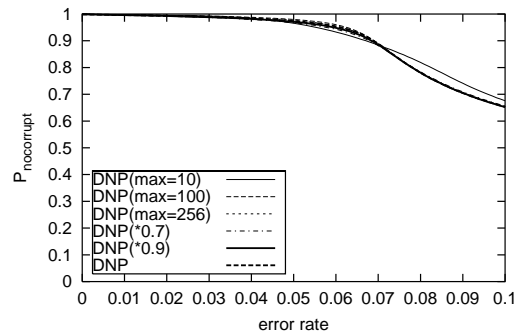


図 16: DNP に修正を加えた場合の無破壊データ率

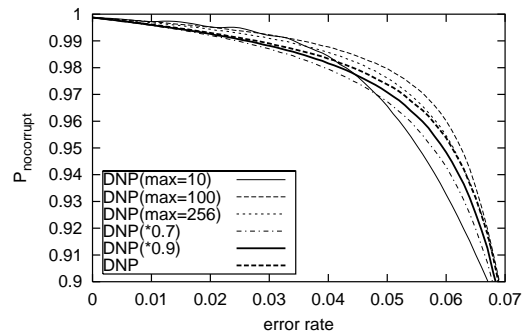


図 17: DNP に修正を加えた場合の無破壊データ率 (拡大)

5.3 DNP のリトライ回数についての考察

5.1 節の実験で DNP、DCP は時間の許す限りリトライを行うものとしているため、故障セクタに対しても時間の許す限りリトライを行ってしまう。これを回避するため最大リトライ回数を設ける、deadline から算出される上限の回数より少なくリトライを行う、といった方法を取ることで無破壊データ率の向上を見込み、実験を行った。

これを図 16 に示し、このグラフの無破壊データ率が 0.9 以上の部分を拡大したものを図 17 に示す。無遅延再生時間率や有効再生時間率については DNP を使用していることで、無遅延再生時間率はほぼ 100% になっているため、有効再生時間率=無破壊データ率となることが予想されるので、この 2 つのデータについては省略した。

図 16 から分かるように DNP の性能に劇的な向上はみられなかった。しかし図 17 から分かるように比較的

現実的といえる低いエラーレートにおいて、最大リトライ回数を 100 回、256 回とした場合確実に性能は向上している。これに対し最大リトライ回数を 10 回とした場合はエラーレートによって効果が安定せず、最大リトライ回数を 0.9 倍、0.7 倍としたものは逆に無破壊データ率が低下した。さらに DCP についても実験を行ったが、結果は同様のものだった。

5.4 DCP についての考察

5.1 節の実験でパリティ計算が適切に行われなかったために、DNP と DCP では性能がほとんど変わらないことがわかった。これは DCP ではパリティ計算を行う時間的余裕がないと判断された場合に、パリティ計算を行わずにリトライのみを行うためと思われる。

ここで新たに DCP-m を、パリティ計算を行う時間的余裕がないと判断された場合にも連続性を多少犠牲にしてパリティ計算を行うよう変更したアルゴリズム、DAP-m(Dynamic Always Parity retry) を導入する。これはデータの読み込みが失敗した場合に必ずパリティ計算を行うもので、これによりパリティ計算の効果が現れると思われる。

DAP を用いて実験を行った結果を図 18 に示し、このグラフの無破壊データ率が 0.9 以上の部分を拡大したものを図 19 に示す。DCP は DNP と性能がほとんど変わらなかったため DNP に対してのみ比較を行った。図 18 からわかるように高エラーレートでは DNP の方が高い性能を示しているが、図 19 を見ると低エラーレートでは DAP が高い性能を示すことがわかる。ここで DAP-256 が DAP-0、DAP-3、DAP-10 に対して性能が低いのは、パリティ計算の所要時間により無遅延再生時間率が低下したにも関わらず、最大リトライ回数が低下して高い無破壊データ率を保てなかったためと考えられる。

6 まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本研究ではディスクドライブの連続メディアデータの用途を対象としたディスク制御方法を検討し、データ読み込みアルゴリズムを提案した。具体的には過去の研究において提案されたアルゴリズムを元に、ディ

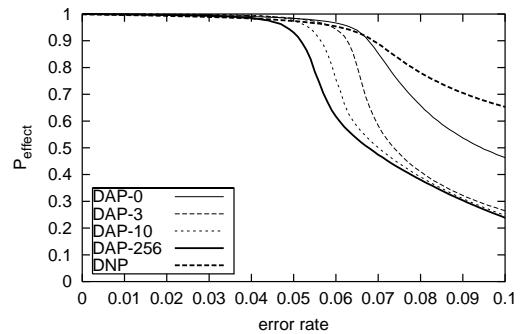


図 18: DAP の有効再生時間率

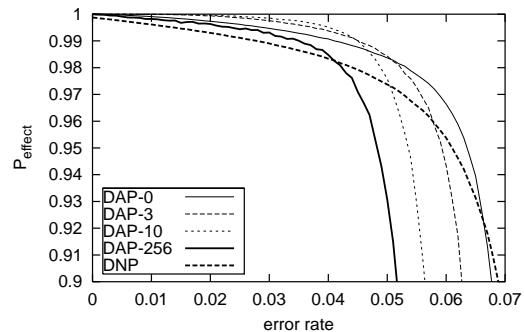


図 19: DAP の有効再生時間率 (拡大)

スクアレイ構成を想定したディスクリトライアルゴリズム SNP、SAP、DNP、DCP を提案し、これらをシミュレーションを用いて評価した。

この結果よりあるエラーレートから SNP、SAP では無遅延再生時間率が急激に低下し、DNP、DCP では徐々に無破壊データ率が低下することが分かった。また、それ以下のエラーレートにおいては SAP-3/256 が最も高い有効再生時間率を示した。例えば動画であれば、高画質な動画が必要ならば SAP を、スムーズな再生が要求されるのならば DCP を用いることで高い性能が見込めるといえる。また、パリティデータの利用により特に低エラーレートでは連続性を損なわずに信頼性を向上できることが分かった。

これより各パラメータの変化による SAP-3/256 の性能の変化をシミュレーションにより評価した。この結果、データの転送時間に影響する内部転送レート、外部転送レートによっては性能の変化が小さく、リトライ時間に影響するディスクの回転数、各クライアントの読み込み時間に影響するクライアント数、要求ピッ

トレートの変化に対しては性能の変化が著しかった。

動的リトライアルゴリズムに関して、パリティ計算を用いた DCP の性能が DNP と比較して大きく変化しなかった。これはアルゴリズムの構造上の特徴により、パリティ計算が行われる頻度が低いためと思われる。このため、動的リトライアルゴリズムにおいて連続性を多少犠牲にしてパリティ計算を行えるように変更を行ったアルゴリズム DAP を導入し、これを評価した。この結果、高エラーレートにおいて連続性が低下したものの、低エラーレートにおいては連続性を損なわずに信頼性を向上することができた。

6.2 今後の課題

各アルゴリズムの性能をより正確に評価するため、本研究では考慮していないユーザ毎に連続メディアデータを要求するタイミングや要求ビットレートが異なる場合についても考慮して評価する必要があると思われる。

また、この研究ではディスクリトライの回数を動的に変更するということを提案しているが、実際に適用するにあたりディスクドライブのリトライの制御を行わなければならない。これをどのように実現するかも今後の課題の一つである。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (12680333) および情報ストレージ研究推進機構 (SRC) の助成により行なわれた。

参考文献

- [1] 石田学, 横田治夫. 連続メディアデータに対するディスクリトライアルゴリズムの評価. In 第 12 回データ工学ワークショップ論文集, DEWS2001. 電子情報通信学会データ工学研究専門委員会, 2001.
- [2] 石田学. ディスクに格納された連続メディアデータの信頼できる再生に関する研究. 東京工業大学 学士論文, 2001.
- [3] Chris Ruemmler and John Wilkes. An introduction to disk drive modeling. *IEEE Computer*, Mar. 1994.
- [4] 阪本秀樹, 西村一敏, 中野博隆. ビデオ情報の大規模多重アクセス方式. 電子情報通信学会, J78-D-II(1), Jan. 1995.