

HDD キャッシュアルゴリズム検討のためのアクセスパターン解析手法 Analysis Method of HDD Access Pattern for Cache Algorithm Design

加賀 洋渡† 石川 誠† 細木 浩二†

Hiroto Kaga † Makoto Ishikawa † Koji Hosogi †

1. はじめに

HDD(Hard Disk Drive)のI/O性能は、ディスクアクセスの頻度によって左右される。HDDはディスクアクセスを削減するために、アクセスしたデータをメモリに保持するキャッシュ機能を備えている。一方、一般的なPCの使用用途はHDDに対して、リード/ライト、シーケンシャル/ランダムな割合が動的に変化し、多様なアクセスパターンを発生させる。これらの異なる特徴を持つアクセスパターンに対し、キャッシュの利用効率を向上させるためには、特徴に合わせたアルゴリズムを設計する必要がある。本報告では、HDDキャッシュアルゴリズム検討のために、必要な評価項目を定義し、それらを用いたアクセスパターン解析手法について述べる。評価対象は代表的なHDDベンチマークであるPCMark7[1]とした。

2. HDD構成とキャッシュメモリ

HDD構成の概略を、図1に示す。以降にリードを例に処理の流れを説明する。HDDは、コントローラの一部であるインターフェース制御部で、ホストからのリード命令を受け取り、ディスク制御部がヘッドに対してシークを指示し、ディスクにアクセスしてデータを読み込む。ヘッド到達時間(シーク時間+回転待ち時間)は、HDDのI/O性能に対して、支配的である。このためHDDは、アクセスしたデータをメモリ上に保持することで、後に発生する同一データへのディスクアクセスを削減する、キャッシュ機能を備えている。また、シーケンシャルアクセスに対して、コマンドが指定するアドレス範囲を超えてデータを読み込み、キャッシュヒットする可能性の高いデータを、あらかじめ読み込むプリフェッチ機能がある。キャッシュは性能に対して有効性が高いが、HDDに搭載されるメモリサイズは非常に小さく、キャッシュに利用できる容量は限られる。このため、アルゴリズムの検討には、キャッシュ容量を考慮する必要がある。本報告では、プリフェッチの調整とキャッシュの利用効率に注目し、アルゴリズム考案のために必要な評価項目を定義する。また、評価項目を用いた解析手法を述べ、評価を行う。

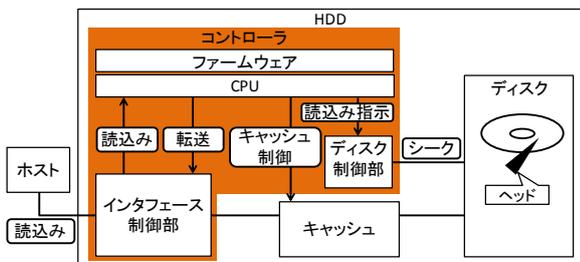


図1 HDD構成の概略

3. アクセスパターン解析

3.1 チャンク分割による定量化

アクセスパタンの特徴を把握するために、後述する評価項目に沿って定量化する。リード/ライト、シーケンシャル/ランダムな割合が動的に変化するアクセスパターンに対して、コマンド単位における定量化では粒度が細かいため、全体を把握することに適さない。また、動的な変化を定量化するためには、前後のコマンドとの関係を考慮する必要がある。以上のことから、チャンクという概念を導入した。これは、複数のコマンドを1つのチャンクとし、平均値などの統計値をチャンクごとに定量化することで、動的な変化の比較を可能とする。

3.2 評価項目

3.2.1 プリフェッチ調整のための局所性による分類

プリフェッチは、シーケンシャルアクセスに対してキャッシュヒット率を向上させる一方で、ランダムアクセスに対しては、先読みした分のデータがキャッシュヒットする可能性が低いいため、ディスクアクセスを削減する観点から、止めることが望ましい。ディスクアクセスを減らしつつ、キャッシュヒット率を向上させるためには、プリフェッチサイズを、次のドライブアクセスによるヘッドの移動時まで読み込めるサイズに延長する箇所と、0にする箇所を時系列上で判断できる必要がある。そこで、アクセスパタンのシーケンシャル/ランダム成分を定量化するために、局所性による分類を行った。局所性とは、データ位置の偏りを示し、複数コマンドのアドレスが、連続的または、近い位置に存在する場合に、局所性が高いと定義できる。ここでは、チャンク内で連続、または近い位置に存在しているコマンドを連結し、連結後のコマンドサイズが大きいものほど局所性が高いと定義する。この分類により、局所性の動的な変化が顕在化する。

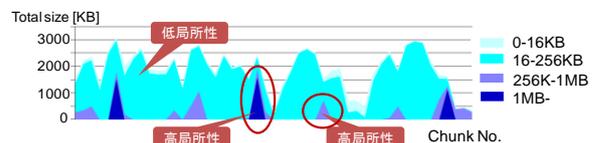


図2 チャンク番号毎の局所性遷移

例として、あるアクセスパタンのリードを対象とした、局所性の遷移を図2に示す。縦軸をチャンクの合計コマンドサイズとし、横軸を時間順のチャンク番号とした。チャンク内で連結したコマンドの合計サイズを、0KBから1MBまでに分類し、表示している。全般にわたり16-256kの割合が50%以上のチャンクが見られ、局所性の低いアクセスパターンに見える。その中で、間欠的に256KB以上のサイズを含む、局所性の高いチャンクが見られる。このことから、全体

的にプリフェッチを伸ばすべきでないアクセスパターンと判断でき、間欠的に局所性の高いチャンクにおいて、プリフェッチを伸ばすことで、キャッシュヒット向上を図ることができる。

3.2.2. 再利用性による分類

HDD はコストの観点から、搭載されるキャッシュ容量が非常に小さい。このため、後にキャッシュヒットするデータであっても、他のデータが容量を超えてキャッシュされたとき、破棄(ページ)される。一般的なキャッシュの管理アルゴリズムである、Least Recently Used (LRU)が用いられる場合には、最も使用頻度の少ないものがページされる。キャッシュヒットするデータを効率良くキャッシュ上に残すためには、アクセスするデータの再利用性を考慮する必要がある。再利用性の高いデータは、ページの際にデータが残るようプライオリティを上げ、低いデータはプライオリティを下げる。

そこで、データの再利用性を定量化するために、対象コマンドの指定アドレス範囲が、それ以前のコマンドの指定アドレス範囲と重なっているかどうかによる分類を行った。各分類を表 1 に示す。ここでは、リードに注目し、かつ、ライトデータをキャッシュとして利用できないものとして、RAR (Read After Read)の抽出を行った。チャンク内に RAR が含まれる割合で、再利用性を定義する。

表 1 アクセスの分類

項目	内容
RAR (Read after Read)	リードしたデータを後にリードする
RAW (Read after Write)	ライトしたデータを後にリードする
Rd w/o Conf (Read without Conflict)	重なるアクセスのないリード
WAR (Write after Read)	リードしたデータを後にライトする
WAW (Write after Write)	ライトしたデータを後にライトする
Wr w/o Conf (Write without Conflict)	重なるアクセスのないライト

例として、あるリードのアクセスパターンを対象として、再利用性の遷移を図 3 に示す。縦軸を各分類が占める割合を示し、横軸を時間順のチャンク番号とした。主に Rd w/o Conf と、RAR が全体を占めている。①にて RAR のないチャンクがあり、このチャンク内でキャッシュしたデータはプライオリティを下げる。②、③にて RAR が 100%に達するチャンクが続くため、キャッシュしたデータはプライオリティを上げる方針が適している。全体を通して、前半に再利用性が無い箇所と高い箇所が交互に入れ替わり、後半は再利用性の高いチャンクが続くアクセスパターンと判断できる。

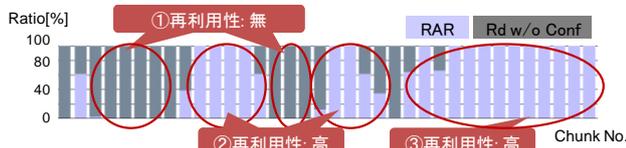


図 3 チャンク番号毎の再利用性遷移

3.3 キャッシュアルゴリズム設計方針の検討

これまでの解析から、キャッシュアルゴリズムの設計方針を検討する。各評価項目による、方針の分類を表 2 にまとめる。局所性と再利用性から、プリフェッチの調整とキャッシュの管理方式を決定する。また、アクセスパターン内においても、チャンクごとに局所性、再利用性が異なるため、解析によって得られた知見から、プリフェ

ッチするデータサイズと、キャッシュに残すデータのプライオリティをきめ細かく調整することで、アクセスパターンに対して適応的なキャッシュアルゴリズムを実現できる。

表 2 局所性と再利用性別アルゴリズム設計方針

		局所性		
		シーケンシャル	ランダム	
再利用性	高い	プリフェッチサイズ データプライオリティ	延長する 上げる	止める(0) 上げる
	低い	プリフェッチサイズ データプライオリティ	延長する 下げる	止める(0) 下げる

4. 評価

評価対象として、HDD ベンチマークである PCMark7 を選択した。7 つのサブテストの各スループットからスコアが算出される。各サブテストはリード/ライト、シーケンシャル/ランダムの割合が異なり、多様なアクセスパターンを発生させる。前述の評価項目に従って、局所性、再利用性を定量化し、各サブテストの評価結果を表 3 に示す。局所性は、256KB までのコマンドが 50%以上を占めるチャンクをランダム、50%未満のチャンクをシーケンシャルと定義し、アクセスパターンにおけるシーケンシャルとランダムの割合を示す。再利用性は RAR の発生しているチャンクの割合で定義する。

表 3 評価結果

No.	サブテスト名	局所性		再利用性 RAR
		シーケンシャル (> 256KB)	ランダム (< 256KB)	
1	Windows Defender	0%	100%	2%
2	Importing Picture	16%	84%	50%
3	Video Editing	93%	7%	80%
4	Media Center	80%	20%	50%
5	Adding Music	0%	100%	10%
6	Starting Application	92%	8%	70%
7	Gaming	26%	74%	8%

結果より、局所性が高いサブテストは、No.3, 4, 6 と判断できる。また、再利用性が高いサブテストは No.3, 6 と判断できる。No.3, 6 については、局所性、再利用性共に高いため、プリフェッチを延長し、かつ、キャッシュしたデータのプライオリティを上げる方針が適していると決定できる。このように、アクセスパターン毎にキャッシュアルゴリズムの方針を決定することができる。尚、局所性について、PCMark7 のホワイトペーパー[1]に記述されている、各サブテストの特徴と、本手法の分類による特徴は一致する。本手法は、チャンク分割を調整することで、アクセスパタンの詳細解析を可能とし、プリフェッチやページするデータをきめ細かく調整する、適応的キャッシュアルゴリズム設計において有効である。

5. おわりに

本手法では、効率的なキャッシュアルゴリズムの検討のために、局所性と再利用性を定義した。また、チャンク分割による部分的統計により、時系列での性能比較が可能となり、アクセスパタンの解析を容易化した。評価結果から、対象ベンチマークのキャッシュアルゴリズム設計方針を決定した。アクセスパターンに対して適応的なアルゴリズム設計において、有効な一手法となる見通しを得た。

参考文献

[1] FutureMark, <http://www.futuremark.com/products/pcmark7/>