

Proxy キャッシュサーバ用ディスクシステムの性能評価手法

田中淳裕 高橋雅彦 立川江介

NEC インターネットシステム研究所

概要. バスを共有するディスクシステムの性能評価手法を提案する。本手法の特徴は、1本のバスに1台のディスクをつないだ最小構成のディスクシステムにおける性能測定結果から、性能設計のために必要なパラメータを推定する方法と、BCMP型待ち行列網の解析結果とを利用することにより、複数台のディスクを1本のバスに接続し、かつ複数の入出力要求を同時発行するようなディスクシステムの全体性能が簡便に見積もれるということである。本手法は、アプリケーションサーバの一種である Proxy キャッシュサーバの設計段階において、ディスクシステムの性能設計を行うために実際に用いられた手法であり、一定の効果が確認されている。

Performance Modeling of Disk Subsystem and Its Application to Performance Design of Proxy Server

Atsuhiko Tanaka Masahiko Takahashi Kosuke Tatsukawa

Internet Systems Research Laboratories, NEC Corporation

Abstract. This article presents a performance evaluation method for disk subsystems with multiple disks on a shared I/O bus. The main feature of this method consists of two basic components. One is a parameter estimation method with measurements on a minimum size of disk subsystems containing one disk attached to one I/O bus. The other is a system performance prediction method based on BCMP queueing network theory which provides performance prediction result as the number of disks grows. The effectiveness of the proposed method has been validated through an actual design and development of a newly developed proxy cache server.

1 はじめに

最近のディスクドライブは、低価格であってもディスク内にキャッシュ(read ahead cache, write back cache, output buffer)や、コマンドキューイング機能、更にはリオーダーリング機能を持つなど性能向上の為のいくつかの機能を備えている。本稿では、そのようなディスクドライブを1本のI/Oバスに接続した際に得られる性能を簡便に見積もるための手法を述べる。本手法は、1本のバスに1台のディスクをつないだ最小構成のディスクシステムにおける性能測定結果から性能設計のために必要なパラメータを測定する方法と、複数台のディスクを1本のバスに接続し、かつ複数のI/O要求を同時発行するようなディスクシステムの全体性能を待ち行列理論を用いて解析的に予測する方法とから構成される。

本稿で提案する性能評価手法の基本方針は、小規模システムにおける性能測定方法と、システム規模が大きくなった時の振る舞いを解析的に見積もる手法との組み合わせである。このような手法としては、クライアントサーバシステムの性能評価を行うために提案されたシングルプロファイル法 (Single-Profile Method) [3, 4] や、あるいは、高並列計算機の性能面での挙動を知るために提案された手法 [2] などが知られている。

本稿では、過去に行われたこのような研究の成果を念頭においた上で、ディスクシステムの性能評価を行うための手法を提案する。本手法は、NECが新しく開

発した Proxy キャッシュサーバのディスクシステムの性能設計を行うために考案されたものである。Proxy キャッシュサーバのシステム性能は、ディスク入出力性能に大きく依存することが知られており [6, 7]、本手法を用いた性能設計を行うことで、非公式な社内評価ではあるが、WebPolygraph3 [12] ベンチマークを用いて 2000 objects/sec という高スループットを達成している。本稿で述べるディスクシステムの性能評価手法は、その成功の一つの要因となっている。

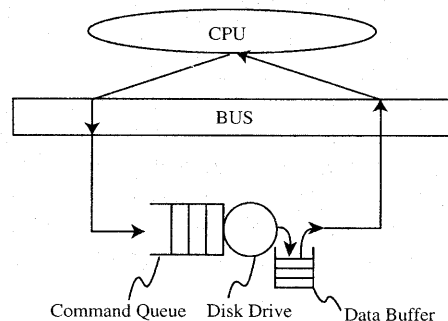


図1. 対象とするディスクシステム。

提案手法の概要

提案手法が対象とするディスクシステムは、一本のI/Oバスに複数のディスクが接続されたディスクシステムである。図1に対象とするディスクシステムのモデ

ルを示す。ディスク装置はバスを通じてホスト (CPU) と接続されており、ディスク装置内にはコマンドを格納するコマンドキューと、出力結果を格納するデータバッファとを備えている。単純化のために、ホストにおける CPU 時間を 0 とし、read 要求のみを考察の対象とする。このようなディスクシステムの性能は、read のデータサイズと、1 本のバスに接続されたディスク台数と、同時に発行する I/O コマンド数の 3 つをパラメータとして決定される。本稿で提案するのは、上記 3 つのパラメータによりディスクシステム全体のスループット性能がどのように変化するかを定量的に求めるための手法である。

以下、第 2 節において性能測定の結果からシステム性能全体に影響を与えるディスクパラメータを推定する方法を述べる。これは、ディスクの単体性能を決定付ける数多くのパラメータをボトムアップ的に考慮するのではなく、単純な測定とディスクの内部構造を利用した推定を行うことで、システム性能を決定づける数少ないパラメータを算出するような手法である。続く第 3 節では、コマンドキューイングが可能で出力バッファを持つディスクドライブを I/O バスに接続したディスクシステムが、BCMP 型待ち行列理論でモデル化されることを示し、性能予測結果を考察する。

なお、本稿では I/O バスとして SCSI バスを具体例として取り上げるが、I/O 要求コマンドを発行しバスの確保・解放を行いながら入出力を行うバスであれば SCSI バスに限定される必要はない。

ディスクシステムに関する他の研究

ディスクの単体性能を決定する要因は実に様々である [10]。シーク距離とシークタイムとの関係や、回転待ち時間 (Rotational Latency)、キャッシュの効果、あるいはディスクの外周の方が内周よりも多くのセクタを持つようにする Zoned Bit Recording 手法や、更には Fence パラメータの影響などを考察したモデル化を行い、基礎データとしてはカタログ値を用いるような性能評価手法がいくつか提案されている [1, 8, 9]。あるいは、文献 [11] においては、カタログ値を直接使うのではなく、SCSI ディスクドライブに対して多様な測定実験を行い、その結果を用いてディスク性能に大きな要因を与えるいくつかのパラメータであるシーク距離とシークタイムとの関係、ディスクヘッドの移動コスト、回転待ち時間、キャッシュの影響などを算出する手法が提案されている。

2 パラメータの推定方法と単体性能の見積もり

この節では、1 本の SCSI バスに 1 台のディスクドライブが接続されているという最小構成のディスクシ

ステムにおいて、先読みバッファを利用した一連の測定手順を踏むことで、サイズ x のデータを読み込むために必要な時間が、バスの使用時間 ρ_b とディスク内処理時間 ρ_d とで決定されることを述べる。更に得られた結果から、ディスクやバスの単体スループットを算出し、その値が既に実験的に知られている結果と精度良く一致していることを示す。

2.1 パラメータの測定方法

ディスクアクセスに要する時間がいくつかの要素に分割され、それらの和として全体の処理時間が表されると仮定する。すなわち、ディスク上からある大きさのブロックを新規に読み込む際には、下記のような一連の処理がシーケンシャルに行なわれることを想定する：

1. T_{s1} : SCSI バスの確保,
2. T_{s2} : 目的のディスクに対して SCSI コマンドの送出と SCSI バスの解放,
3. T_{seek} : ディスクアームの移動 (Seek),
4. T_{rot} : ディスクヘッドにて目的のセクタを読み込むための回転待ち時間 (Rotational Latency),
5. T_{media} : ディスク表面からバッファへのデータ読み出し (Media Access Time),
6. T_{s3} : SCSI バスの確保,
7. T_{bus} : SCSI バスを使つてのデータ転送,
8. T_{s4} : SCSI バスの解放.

実際には、5 の読み出しと 6-8 のデータ転送が並列に行われるような場合もある。しかしながらそれは、下記で述べるような連続した読み込みの場合であり、あるブロックを最初に読み込むための時間に影響を与えるものではない。

複数のブロックを連続して読み込む時には、いくつかの処理が完全にはシーケンシャルには行われない。特に、ディスク装置内の先読みキャッシュ (read ahead buffer) の影響により、あるブロック B の読み込みを行った時には、 B に続くいくつかのブロックも同時に先読みバッファに取り込まれる。この特徴を逆に利用すると、あるブロック B の読み込みを行い、 B に続くブロック B' の読み込みを引き続いて行うことで、3-5 の影響を排除した B' の読み込み時間の測定を行うことが可能となる。

その様子を図 2 に示す。なお、簡単のために、 $T_{s1} + T_{s2} + T_{s3} + T_{s4}$ の値をまとめて T_{ov} とし、図中では overhead と記述する。あるブロック B を最初にアクセスする時には、ディスクヘッドのシークや、目標とするセクタを読むための回転待ちや、ディスク面からバッファへのデータ転送などが必要となり、ブロック

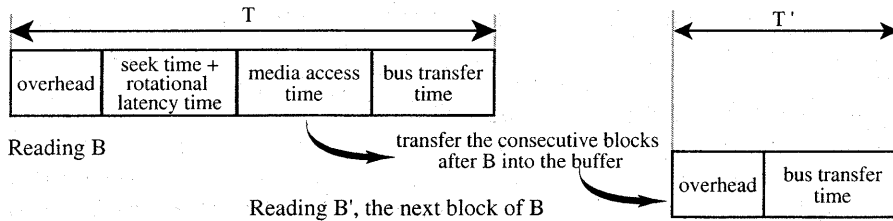


図 2. データ読み込み時の動作シーケンス. B' の読み込みにおいては, $T_{seek} + T_{rot} + T_{media}$ の時間が隠蔽される.

B を読み出すために必要となる時間 T は, $T := T_{ov} + T_{seek} + T_{rot} + T_{media} + T_{bus}$ のように書き表せる.

一方で, B の次に位置するブロック B' を読み出す時には, 既に先読みバッファ中に読み込まれているデータ B' を, バスを使って転送すれば良いだけである. すなわち, $T_{seek} = T_{rot} = T_{media} = 0$ という状況が生じている. 従って $T' := T_{ov} + T_{bus}$ と書き表すことができる. ただし, B の読み込み終了直後に B' の読み込みを行おうとしても, B' の全てが先読みバッファに取り込まれていない恐れがある点に注意する必要がある.

以上の議論より, バスの使用時間 ρ_b とディスク内処理時間 ρ_d とは, 測定値 T と T' とを用いて下記のように算出される.

$$\rho_b = T' \quad (1)$$

$$\rho_d = T - T' \quad (2)$$

表 1. 測定に用いたシステムの構成.

CPU	Pentium II 450MHz
PCI バス	32bit, 33MHz
最大データ転送速度	132MB/s
SCSI カード	Adaptec 29160N
バスタイプ	32bit, 33MHz
最大データ転送速度	160MB/s
ディスクドライブ	IBM Ultrastar 36LZX
回転速度	10,000 RPM
平均シーク/回転待ち時間	4.9 ms / 2.99ms
Sustained data rate	21.7-36.1 MB/s

2.2 実測結果

今までに述べた手法を用いて実システムの性能測定を行った. 対象としたシステムの構成を表 1 に示す. OS としては Vine 1.1 (Linux Kernel 2.2.14) を用いた. ただし, B の読み込みが終了してから B' の読み込み命令を発行させるまでに 6ms の間隔 (10,000 回転ディスクで 1 回転に要する時間間隔に相当) をおいている. また, ある測定における B の位置と, 次の測定における B の位置との差 (シーク距離の差) が 30MB になるようにしている.

T と T' の測定結果から, ディスク時間 ρ_d と, バス時間 ρ_b とを算出した結果を表 2 に, またグラフとして表示したものを図 3 に示す. なお表中の ρ_d/ρ_b は第 3 節で参照する値である. 横軸に read 時の読み込みサイズ x (KB) を, 縦軸に時間 (ms) を示し, 読み込みサイズとディスク時間 ρ_d やバス時間 ρ_b が, 線型の関係にあることが読み取れる. 最小二乗近似を用いることにより以下のような関係が得られる.

$$\rho_b = 0.0094x + 0.17 \quad (3)$$

$$\rho_d = 0.036x + 4.6 \quad (4)$$

表 2. シーク距離を 30MB とした時のディスク時間とバス時間

size (KB)	ρ_d (ms)	ρ_b (ms)	ρ_d/ρ_b
8	4.91	0.249	19.7
16	5.08	0.322	15.8
32	5.65	0.474	11.9
64	6.95	0.775	9.03
128	9.15	1.38	6.63

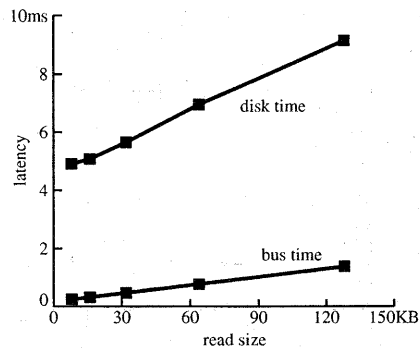


図 3. 読み込みサイズとディスク時間, バス時間との関係.

2.3 ディスクとバスの単体性能予測

前節で得られた読み込みサイズ x とディスク時間やバス時間 ρ との関係を表す一次式 $\rho = ax + b$ の利用

例として、ディスクやバスの単体でのスループット予測を取り上げる。

スループットは単位時間当たりの読み込みデータ量で定義される。読み込むブロックサイズを x とした時に、 $ax + b$ 時間必要なことから、スループット $\sigma(x)$ は、

$$\sigma(x) = \frac{1}{a} - \frac{b}{a} \cdot \frac{1}{ax + b} \quad (5)$$

と表すことができる。従って、ディスクやバスの最大スループット $\sigma(x)$ は、 $1/a$ に下から漸近する双曲線となることがわかる。

具体的にスループットを計算した結果をグラフ表示したものを図4に示す。読み込みサイズ x を増やすとともに、ディスク・バスのスループット性能がそれぞれ $1/0.036 \cong 28\text{MB/s}$ と $1/0.0094 \cong 106\text{MB/s}$ とに収束する様子がわかる。今回の測定実験では、表1に示すように最高性能 160MB/s の SCSI カードを用いているが、実際には 32bit , 33MHz の PCI バスの性能 (最高 132MB/s) がネックとなっており、約 100MB/s 程度のスループットで性能が飽和している。このことが、実験的に得られた式を用いた計算で確認できたことになる。これは 132MB/s の PCI バスの実行性能が約 100MB/s であるという報告 [13] とも一致している。また、ディスクドライブの最大スループットである 28MB/s は、表1に示される sustained data rate (連続読み出し速度) の範囲内に入っており、妥当な値が確認できたことになる。

このような結果は、ディスクシステムに対する高負荷試験を行わなくとも、ディスクパラメータを推定するように設計された単純な測定実験を行なうことで、バスやディスクの限界スループットを高精度で予測できるということを意味している。

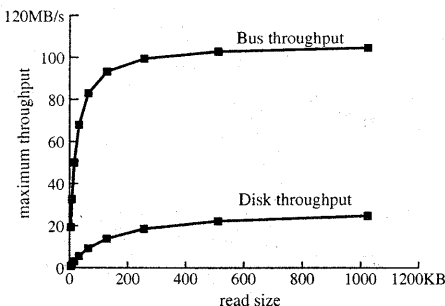


図4. ディスクとバスの単体スループット。

3 BCMP 型待ち行列網を用いたディスクシステム性能予測

この節では、1本のバスに複数のディスクドライブが接続されているディスクシステムに関して、BCMP

型待ち行列網の結果を用いることで、全体性能の予測を行う手法を述べ、性能予測結果の考察を行う。

3.1 性能予測モデル

一本のバスに複数のディスクドライブが接続されているようなディスクシステムのモデルを図5に示す。CPU (ホスト) が発行するディスク i への読み込み要求 (SCSI の read コマンド) は、直接ディスク i のコマンドキューに格納され、ディスク本体にて読み込み処理が実行される。ディスク上にて読み込み処理が終了すると、読み出されたデータがバスのキューに蓄えられ、その後バスを経由して CPU へと戻っていく。読み込まれたデータを受け取った CPU は、処理時間 0 でまた同じディスクに対して読み込み要求を発行し、以下同じことを繰り返す。このように CPU を出発し i 番目のディスクと共有資源であるバスを経由して再度 CPU に戻ってくるような流れを、以下では i 番目の連鎖と呼ぶ。

上記のようなモデルは BCMP 型待ち行列網として知られており、解析解が既に存在することや、各種性能評価指標の計算方法などが知られている [3, 5]。

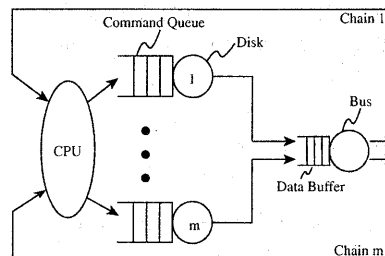


図5. 1本のバスに複数台のディスクが接続された場合のモデル

3.2 性能予測結果と考察

性能評価指標としてディスクシステム全体のスループットを取り上げる。スループットの計算には畳み込み法 (Convolution Method) [3, 5] を用いた。また、簡単のためにバス時間を $\rho_b = 1$ と固定し、ディスク内時間 ρ_d の値を変化させた。連鎖 i 上の要求数を x_i とし要求ベクトル $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_m)$ を変化させることで、同時に発行する SCSI コマンドの個数が性能に与える影響を考察することができる。ただし、今回は各連鎖の要求数が全て等しい場合を考え、 x_i を単に x と表記する。なお、説明の都合上、ディスク内処理時間 ρ_d と、ディスク台数 n と、各連鎖の要求数 x が与えられた場合のシステムスループットを $\tau(\rho_d, n, x)$ と表示する。今回のモデルでは、ディスクを通るチェーンが1本だけであるという特殊性を利用することで、畳み込みの演算量を削減することが出来るが、詳細は別の機会にゆずる。

表 3. スループットの算出結果 (相対値). $\rho_b = 1$ と固定し, ρ_d を変化させた. ディスク台数 $= 1$, $x = 1$ を基準スループット $\hat{\tau}$ とし, それに対する相対スループットを示す. 改善率は, 1 個の SCSI コマンドを発行した場合と, 同時に $\hat{x}$ 個の SCSI コマンドを発行した場合とのスループットの改善率を示す.

(a) $\rho_d = 5, \hat{\tau} = 1/6, \hat{x} = 8$

台数	$x = 1$	$x = \hat{x}$	改善率
1	1.00	1.20	20%
2	1.95	2.40	23%
4	3.61	4.80	33%
6	4.85	7.20	49%

(b) $\rho_d = 10, \hat{\tau} = 1/11, \hat{x} = 8$

台数	$x = 1$	$x = \hat{x}$	改善率
1	1.00	1.10	10%
2	1.98	2.20	11%
4	3.89	4.40	13%
6	5.67	6.60	16%

(c) $\rho_d = 15, \hat{\tau} = 1/16, \hat{x} = 4$

台数	$x = 1$	$x = \hat{x}$	改善率
1	1.00	1.07	7.0%
2	1.99	2.13	7.0%
4	3.95	4.27	8.1%
6	5.85	6.40	9.4%

(d) $\rho_d = 20, \hat{\tau} = 1/21, \hat{x} = 4$

台数	$x = 1$	$x = \hat{x}$	改善率
1	1.00	1.05	5.0%
2	2.00	2.10	5.0%
4	3.97	4.20	5.8%
6	5.92	6.30	6.4%

スループットの算出結果

表 3 にスループットの算出結果 (相対値) を示す. 表 2 の結果より, ρ_d/ρ_b は 5~20 の間を取ることで, それに従い ρ_d を 5~20 まで 5 刻みで変化させ, また, それぞれの場合にディスク台数と, 同時に発行する SCSI コマンドの数 x とを変化させ $\tau(\rho_d, n, x)$ の値を算出した. 各 ρ_d における基準スループット $\hat{\tau}$ を $\hat{\tau} := \tau(\rho_d, 1, 1)$ と定義し, 表の 2 列目と 3 列目には, 相対スループット $\tau(\rho_d, n, x)/\hat{\tau}$ を示した. なお, 基準スループットは $\hat{\tau} = \tau(\rho_d, 1, 1) = 1/(1 + \rho_d)$ と計算できる. 3 列目の $\hat{x}$ は, その値以上 x を大きくしてもスループットの向上が見られないような x の値である. すなわち, 同時に発行する SCSI コマンドの意味のある上限値と考えられる. また 4 列目の改善率とは, ディスク台数を同じとした場合の $x = 1$ のスループットに対する $x = \hat{x}$ 時のスループットの改善率, すなわち $(\tau(\rho_d, n, x) - \hat{\tau})/\hat{\tau}$ を示している.

考察

$\hat{x}$ の値に関して: 数値計算の結果, ρ_d が 5~20 の範囲では高々 4~8 個程度の SCSI コマンドを同時に発行するだけで, スループットがほぼ飽和するという結果が得られた. 従って, ソフトウェア的にはむやみに多くの SCSI コマンドを同時に発行する必要がないこ

とがわかる. また, ρ_d の値が大きいほど $\hat{x}$ の値は小さくなる.

ディスク台数 n に関して: 同時発行する SCSI コマンド数が 1 の場合, すなわち $x = 1$ の時には, ディスク台数を増やしても, あまり性能向上が得られていない. ところが, $x = \hat{x}$ とすると $\tau(\rho_d, n, \hat{x})/\tau(\rho_d, 1, \hat{x}) \cong n$ という関係式が, おおむね全てのパラメータの範囲で成立しており, 十分な台数効果が得られていると言える. また, $\tau(\rho_d, n, \hat{x})/\hat{\tau} > n$ という関係が成り立っており, $\hat{\tau}$ を基準とすると, ディスク台数以上の性能向上が達成されていることがわかる.

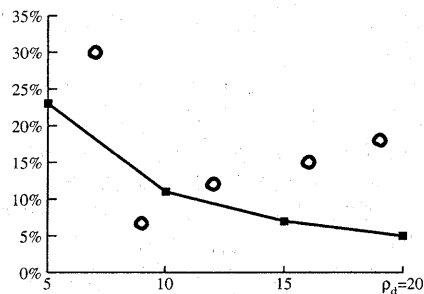
ρ_d の効果に関して: この値が小さいほど改善率は大きくなり, 大きいほど改善率が小さくなっていることがわかる. ρ_d が大きいということは, ディスクに比べてバスが十分に速く動作することであり, このような時には SCSI コマンドを同時発行する必要性はあまりない. 逆に, バスの動作速度がディスクに比べてそれほど大きくない時ほど, ソフトウェア的な工夫を行い SCSI コマンドを同時発行するような最適化を行う必要があることがわかる.

実測との比較

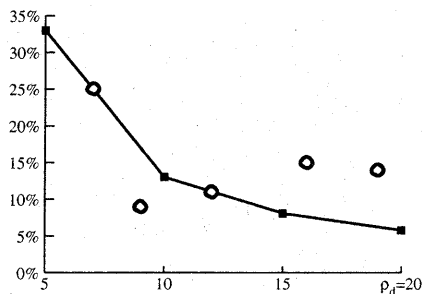
ディスク台数が 2 台と 4 台の場合に関して, 図 6 に実測結果とモデルに基づく予測結果との比較を示す. スループットを直接比較するのではなく, グラフの縦軸を改善率とした比較を行った. ○印が実測結果であり, read サイズを 8KB から 128KB までの 2 のべき乗の値で変化させ測定を行った. また直線が予測結果であり, これは表 3 の結果をグラフとして表示したものである. 横軸が ρ_d の値であり, その範囲は表 2 で得られているように 5~20 とした.

グラフを見て分かる通り, モデルによる予測結果が十分に合っているとは言えない結果が得られている. 特に ρ_d の値が大きな場合, すなわち読み込みサイズが小さい時ほど, 予測結果と実測結果とのずれが大きくなっている. この原因としては, ブロックサイズが小さい時には, ハードウェアレベルにおいて別の最適化方法が効いている可能性が考えられる. 今回の測定実験においては, SCSI コマンドを連続して発行したために, 一回のバス確保・解放で, 同時に複数の SCSI コマンドを送出したり, 逆に複数の結果が返ってきたのではないかと予想できる. それにともない, 要求一つ当たりのオーバーヘッド T_{ov} が小さくなり, 結果として予測結果よりも良い実測が得られたのではないだろうか.

ただし, モデルから算出された改善率が悪いような領域において, 実際には良い性能が得られているので, モデルの予測結果はそれほど危険であるとは言えない. また, 今回開発した Proxy キャッシュサーバにおいては, 読み込みサイズを 32~64KB 程度で行うことを別



(a) ディスク 2 台での比較



(b) ディスク 4 台での比較

図 6. 実測結果 (○印) とモデルに基づく予測結果 (直線) との比較. $\rho_b = 1$ と固定し, 横軸が ρ_d である. 縦軸は, SCSI コマンドを複数個発行した場合のスループット改善率を示す.

途設計していた. これは ρ_d が 9~12 という条件に相当し, そのような領域においては予測結果と実測結果とが比較的良く一致している. そのため, 製品開発の上流工程における性能設計作業に用いるためのモデルとしては, ある程度実用にたえられるものと判断した.

4 まとめ

本稿で提案したディスクシステムの性能評価手法は, 高性能 Proxy キャッシュサーバの開発において比較的上流工程の性能設計段階で用いたものである. その基本精神は, 最小構成システムにおける性能測定結果から性能に影響を与えるパラメータを推定する手法と, システム全体をモデル化し, システム規模が大きくなった時の性能を予測する解析的な手法とを組み合わせることにある.

パラメータ推定においては, 連続したブロックを逐次的にアクセスし, 最初のアクセスに要する時間と, その後のアクセスに要する時間との差を考えることで, バスの使用時間とディスク内処理時間とが算出できることを示した. また, その結果を用いたディスクやバス単体での性能見積りの結果を例示した.

性能予測においては, BCMP 型待ち行列網の結果を利用することで, 1 本のバスに複数台のディスクが接続された時の性能が計算可能であることを述べ, スループット性能を具体的に算出した.

予測結果の精度には, 残念ながらまだまだ不十分な点が残されていることは確かである. しかしながら, 製品設計の上流段階において, ディスクシステムの性能が各種のパラメータを変化させることによりどのように変化するかという問題を, 事前により良く理解し, 更にシステムの詳細設計へとつなげるための手段としては, 十分に役に立つものであると信じる.

参考文献

- [1] R. Barve, et al. : Modeling and Optimizing I/O Throughput of Multiple Disks on a Bus, *SIGMETRICS'99*, pp.83-92.
- [2] 古市, 永松, 出口 : 高並列計算機の性能評価のための挙動予測モデル, 情報処理学会論文誌, Vol. 38, No. 9, Sept. 1997, pp.1736-1744.
- [3] 亀田, 紀, 李 : 性能評価の基礎と応用, 情報数学講座 15, 共立出版, 1998.
- [4] I. Kino, et al. : Open System Performance Evaluation with Single-Profile Method, *35th IEEE Conf. on Decision and Control*, Dec. 1996, Vol.3, pp.2381-2382.
- [5] K. Kant: *Introduction to Computer System Performance Evaluation*, McGraw-Hill, 1992.
- [6] C. Maltzahn, and K. J. Richardson: Reducing the Disk I/O of Web Proxy Server Caches, *1999 USENIX Technical Conference*.
- [7] E. P. Markatos, et al. : Secondary Storage Management for Web Proxies, *2nd USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems*, 1999, pp.93-104.
- [8] A. L. N. Reddy, and P. Banerjee: An Evaluation of Multiple-Disk I/O systems, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 38, No. 12, December 1989, pp.1680-1690.
- [9] C. Ruemmler, and J. Wilkes: An Introduction to Disk Drive Modeling, *Computer*, Vol. 27, No. 3, March 1994, pp.17-28.
- [10] T. M. Ruwart: Disk Subsystem Performance Evaluation: From Disk Drives to Storage Area Networks, *17th IEEE Symposium on Mass Storage Systems*, 2000, pp.1-24.
- [11] B. L. Worthington, et al. : On-Line Extraction of SCSI Disk Drive Parameters, *SIGMETRICS'95*, pp.146-156.
- [12] <http://www.web-polygraph.org/>
- [13] バイトレポート「160M バイト/秒で転送可能な Ultra 160 対応 SCSI カードが登場」, 日経バイト, Feb. 2000, p.20.