

オンライントランザクション処理における Dynamic Voltage and Frequency Scaling を用いたアプリケーション指向省電力手法の実験的考察

早水 悠登[†] 合田 和生[†] 中野美由紀[†] 喜連川 優[†]

[†] 東京大学

あらまし 昨今、データセンターにおけるサーバの消費電力増加が著しい。これらサーバのなかでも、データセンターの中でもメジャーなアプリケーションであるオンライントランザクション処理 (OLTP) の省電力化が重要である。OLTP システムはサービスレベル契約 (SLA) を満たすことが求められるため省電力化が難しく、これまでのところ有効な省電力手法はほとんど提案されていない。本論文では、OLTP におけるアプリケーション指向省電力を提案する。我々の手法では、OLTP アプリケーション性能の測定にもとづきプロセッサの動作周波数を動的に調整する。これにより、SLA を満たしつつ OLTP システムの消費電力を削減できる。TPC-C と実サーバの負荷データを利用した実験では、最大でサーバ全体の消費電力における 11% の消費電力削減効果があることが確認された。

キーワード オンライントランザクション処理, 省電力, DVFS

An Experimental Study on Application-aware Power Saving Method for Online Transaction Processing using Dynamic Voltage and Frequency Scaling

Yuto HAYAMIZU[†], Kazuo GODA[†], Miyuki NAKANO[†], and Masaru KITSUREGAWA[†]

[†] The University of Tokyo

Abstract Power consumption of servers in data centers has been growing rapidly recent years. Among these servers, power saving of an online transaction processing (OLTP) systems, which are major applications in data centers, is important. Because they have to meet service level agreements (SLA), its power saving is a difficult problem. Few power saving technologies have been proposed so far. In this paper, we proposed an application-aware power saving method for OLTP systems. The method dynamically scales the operating frequency of processors based on application performance observation. This enables OLTP systems to reduce power consumption while complying SLAs. In our experiments using TPC-C and real workload, 7.6% of power saving was achieved in total.

Key words on-line transaction processing, energy saving, DVFS

1. Introduction

データセンターの消費電力は、近年になり著しく増加している。アメリカ合衆国環境保護庁の報告によると、合衆国内のデータセンターによる消費電力は 2000 年から 2006 年にかけて約 2 倍になり、2011 年までには更に 2 倍に増加すると予測されている [1]。データセンターの消費電力増加は電力コストを増大させるだけでなく、電力供給不足にもつながるため、その省電力化は急務である。

EMERSON の報告 [2] によると、一般的なデータセンターにおいてはサーバが消費電力全体の 44% を占め、冷却設備がそれに次いで 38% を占めており、データセンターの省電力化のためにはサーバの省電力化が必要不可欠である。サーバの省電力

化は配電設備や交直変換器、UPS などの設備削減につながり、それにより冷却設備も削減することができる。つまり、サーバの省電力化はデータセンター全体の省電力化へとつながる。

データセンターにおいて、大量の情報を処理し、管理するための中心的役割を果たしているのはデータベースサーバである。データベースサーバにおける主要なアプリケーションのひとつとして、オンライントランザクション処理 (OLTP) がある。OLTP アプリケーションはしばしば高スループット・低遅延を達成することが要求される。そのため、OLTP データベースサーバには潤沢な計算・記憶資源が投入され、大量の電力を消費する。それに加えて OLTP データベースサーバの停止はビジネスの機会損失に直結するため、これらのサーバを停止させることはできず、常に電力を消費する。このように消費電力

の大きい OLTP データベースサーバの省電力化は、データセンターの省電力化において避けて通ることができない課題である。しかし、いまだ有効な OLTP の省電力手法は提案されていない。

本論文では OLTP のアプリケーション指向省電力手法を提案し、評価実験を行った。我々の提案するアプリケーション指向省電力手法とは、OLTP アプリケーションの性能をリアルタイムに観測し、その値に基づいて動的にプロセッサの動作周波数の調整を行い、消費電力を削減するものである。一般に、OLTP アプリケーションはスループットや応答時間などの要求性能を定めるサービスレベル契約 (SLA) を順守することが求められる。提案手法ではこれらの性能を監視することで、SLA を順守しながら消費電力を削減することを可能とする。評価実験においては OLTP の業界標準ベンチマーク TPC-C[3] を用いて、スループットをもとに動作周波数制御を行った場合と、応答時間をもとに制御を行った場合について実際に稼動するシステムで測定を行い、省電力効果を評価した。その結果、最大でシステム全体の 11% に相当する 20W の消費電力削減を達成することが確認された。

本論文の構成は次のとおりである。2 節では OLTP とアプリケーション指向省電力の基本的な考え方について述べる。3 節ではアプリケーション指向省電力の詳細な説明を行う。4 節では実験環境を説明し、5 節では提案手法の評価実験について説明する。6 節では関連研究について触れ、最後に 7 節で結論を述べる。

2. オンライントランザクション処理とアプリケーション指向省電力

オンライントランザクション処理 (OLTP) とは、同時に多数のトランザクションを扱うことが求められるデータベース処理であり、銀行取引、電子商取引、電子証券取引などの基盤技術として社会に深く浸透している。業務システムにおいては、スループットや応答時間などのアプリケーション性能に関するサービスレベル契約 (SLA) が結ばれている場合が多く、OLTP システムを構築する上で最も重要視される点である。

一般に省電力化による消費電力の削減量とシステム性能はトレードオフの関係にあり、省電力化の際に何を重視するかによってとるべき手法は異なる。OLTP のようにスループットや応答時間に厳守すべき制約が設けられている場合には、アプリケーションレベルでの性能を指標として消費電力の削減を図るアプリケーション指向省電力手法が自然なアプローチであると考えられる。省電力のアプローチとしてはハードウェアやオペレーティングシステム、ミドルウェアのレベルで性能を監視し省電力化を行う方法も考えられるが、これらの方法ではアプリケーション性能を直接捉えることができず、SLA が重要な業務システムにそのまま適用することは難しい。我々の知る限りにおいて、OLTP におけるアプリケーション指向省電力技術はこれまで取り込まれてきていない課題である。本論文では、実際に稼動するシステム上で業界標準ベンチマーク TPC-C をアプリケーションとして利用し、OLTP におけるアプリケーション

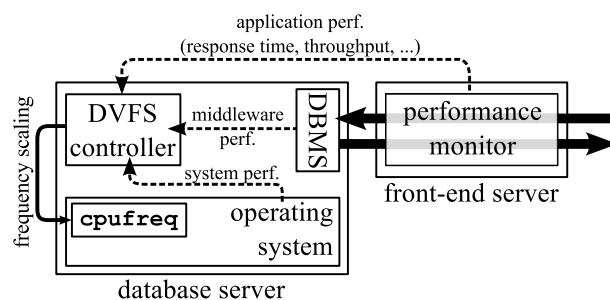


図 1 アプリケーション指向 DVFS 制御アーキテクチャ

指向省電力手法の有効性を評価した。さらに、スループットと応答時間それぞれを指標とした場合の性能・消費電力を測定し、利用する指標と省電力効果の関係について考察した。

3. Dynamic Voltage and Frequency Scaling を用いた OLTP におけるアプリケーション指向省電力

3.1 Dynamic Voltage and Frequency Scaling による省電力

現在流通しているプロセッサの多くは実行時に動作周波数・電圧を調整できる Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) 機能が搭載されている。一例としては、ボリュームサーバで広く用いられている Intel Xeon プロセッサには DVFS 機能として Intel SpeedStep Technology が搭載されており、特殊なレジスタの値の書き換えで動作周波数を指定することができる。今回実験に用いた Linux では、cpu freq というカーネルモジュールを用いることでプロセッサの DVFS 機能にアクセスできる。

DVFS を用いると、いくつかの場面においては実行時性能を大きく損なうことなくプロセッサの消費電力を削減することができる。例えば、プロセッサ使用率が低ければ動作周波数を下げることによってスループットへの影響を抑えつつ消費電力を削減することができる。ただしスループットに影響はないものの、動作周波数を下げると個々のタスクを完了するまでの時間、つまり応答時間は長くなってしまふ。このような DVFS による省電力化とそれにより生じる性能低下のバランスをとるためには、SLA にもとづいてアプリケーション指向な DVFS 制御を行う必要がある。

3.2 OLTP におけるアプリケーション指向 Dynamic Voltage and Frequency Scaling 制御による省電力化

我々の提案するアプリケーション指向な DVFS 制御アーキテクチャを図 1 に示した。OLTP アプリケーション性能は、データベースサーバのフロントエンドに性能モニタを配置して一定の時間間隔で測定される。測定されたアプリケーション性能は随時データベースサーバの DVFS コントローラへと送信される。DVFS コントローラはこの性能情報を利用して動作周波数を決定し、OS を介してプロセッサの動作周波数を設定する。また DVFS コントローラはアプリケーション性能情報だけではなく、必要に応じてデータベース管理システムなどミドルウェア

```

1  $R_{th}$  // response time constraint
2  $R_{up\_ratio}$  // threshold for raising frequency
3  $R_{down\_ratio}$  // threshold for dropping frequency
4
5 function RT_based_policy() {
6   response_time = get_response_time();
7   if (response_time >  $R_{th} * R_{up\_ratio}$ ) {
8     raise_frequency();
9   } else if (response_time <  $R_{th} * R_{down\_ratio}$ ) {
10    drop_frequency();
11  }
12 }

```

図 2 応答時間指向 DVFS 制御ポリシーの疑似コード

アの性能情報や、OS のシステム情報も利用することが可能である。

DVFS コントローラにおける動作周波数決定の方法は様々なものが考えられる。本論文では、典型的なアプリケーション性能の制約として以下の二つを考え、それぞれの制約を満たすような DVFS 制御ポリシーを構築した。

- 9 割以上のトランザクションに対して応答時間が R_{th} 以下であること
- トランザクション到着率が T_{th} 以下である場合には、それに対応するスループットを達成できること

以降では、前者の応答時間における制約をもとに動作周波数を制御するポリシーを応答時間指向ポリシー、後者のスループットをもとに制御するポリシーをスループット指向ポリシーとよぶ。

以降では、これら二つの制約に対応する DVFS 制御ポリシーを説明する。

3.2.1 応答時間指向 Dynamic Voltage and Frequency Scaling 制御ポリシー

応答時間指向 DVFS 制御ポリシーでは、全体の 9 割以上のトランザクションに対して規定された応答時間 R_{th} 以内に応答を返すことが性能の制約である。この制約を満たしつつ、できるだけ動作周波数を低くして消費電力を削減するようにポリシー設計を行った。

このポリシーでは、アプリケーション性能情報として応答時間を利用し、応答時間の測定値が得られるたびに図 2 の疑似コード中の *RT_based_policy* 関数に相当する処理を実行しプロセッサの動作周波数を制御する。この関数の中では、応答時間の測定値が $R_{th} \times R_{up_ratio}$ よりも大きければ動作周波数を上げ、 $R_{th} \times R_{down_ratio}$ よりも小さければ動作周波数を下げるという処理を行う。ここで $R_{th} \times R_{up_ratio}$, $R_{th} \times R_{down_ratio}$ を条件判定に用いるのは、応答時間が実際に R_{th} を上回ってから動作周波数を制御しては遅いためである。 R_{up_ratio} , R_{down_ratio} を 1 より小さい数値に設定することで、幾分か余裕をもって応答時間を R_{th} 以下に抑えることができる。また、 R_{up_ratio} , R_{down_ratio} の 2 つの値に間隔をあけておくことで、頻りに動作周波数が切り替わり、応答時間が振動することを抑制できる。

R_{up_ratio} , R_{down_ratio} の値は予備実験の結果から

```

1  $T_{th}$  // throughput constraint
2 overspeed_ratio // threshold for detecting overspeed
3 cpu_busy // CPU usage threshold
4
5 function TP_based_policy() {
6   throughput = get_throughput();
7   arrival_rate = get_arrival_rate();
8   cpu_usage = get_cpu_usage();
9
10  if (throughput >  $T_{th} * \textit{overspeed\_ratio}$ ) {
11    drop_frequency(); // (A)
12  } else if (throughput >  $T_{th}$ ) {
13    if (cpu_usage < cpu_busy) {
14      drop_frequency(); // (B)
15    }
16  } else {
17    if (arrival_rate <  $T_{th}$ ) {
18      if (cpu_usage < cpu_busy) {
19        drop_frequency(); // (C)
20      } else if (cpu_usage > cpu_busy) {
21        raise_frequency(); // (D)
22      }
23    } else {
24      raise_frequency(); // (E)
25    }
26  }
27 }

```

図 3 スループット指向 DVFS 制御ポリシーの疑似コード

$R_{up_ratio}=0.6$, $R_{down_ratio}=0.8$ と設定すれば性能の制約を満たすのに十分であった。

3.2.2 スループット指向 Dynamic Voltage and Frequency Scaling 制御ポリシー

スループット指向 DVFS 制御ポリシーでは、トランザクション到着率が T_{th} 以下の場合にはそれに対応したスループットを達成することが性能の制約である。その制約もとで、できるだけ動作周波数を低くして消費電力が削減できるようにこのポリシーを設計した。

このポリシーの動作周波数制御を図 3 に疑似コードで示した。このポリシーでは、測定値としてトランザクション到着率とスループット、またデータベースサーバの負荷状況を知るために CPU 使用率を利用する。一定の時間間隔で測定を行うたびに *TP_based_policy* 関数に相当する処理が行われ、動作周波数が必要に応じて変更される。

スループット指向 DVFS では、動作周波数を下げることができるのは下記の 3 つの場合である。

- (A): スループットが T_{th} よりも十分大きい ($T_{th} \times \textit{overspeed_ratio}$ より大きい)
- (B): スループットは T_{th} に比べてやや高い程度であるが、CPU 使用率がそれほど高くない (*cpu_busy* より小さい)
- (C): トランザクション到着率が T_{th} よりも低く、CPU 使用率がそれほど高くない (*cpu_busy* より小さい)

(A), (B), (C) はそれぞれ図 3 の疑似コード中に示した位置に相当する。ここで、*cpu_busy* はシステムが高負荷状態か否かを判断する CPU 使用率の基準値であり、*overspeed_ratio* はスループットが必要以上に高いことを判断するための基準値で

ある。

(A) の場合は必要以上にスループットが高い状態であり、動作周波数を下げてスループットを抑えることで消費電力を削減することができる。(B) の場合、スループットの制約 T_{th} よりもやや高いスループットが出ている状況では、CPU 使用率がそれほど高くなければ動作周波数を下げてもスループットに影響が小さいと判断することができる。(C) の場合、トランザクション到着率が T_{th} よりも低いので、そもそもスループットは T_{th} を超えることがない。このときも、CPU 使用率が `cpu.busy` よりも低ければ動作周波数を下げてもスループットに影響が小さいと判断することができる。

動作周波数を上げる必要があるのは以下の 2 つの場合である。

- (D): スループットが T_{th} よりも小さく、トランザクション到着率が T_{th} よりも高い場合

- (E): スループットとトランザクション到着率がともに T_{th} よりも小さく、CPU 使用率が `cpu.busy` より高い場合

(D) の場合にはそもそも性能の制約を満たせていないために、動作周波数を上げる必要がある。(E) の場合は、CPU 使用率が高くシステムが高負荷な場合にはトランザクション到着率に対応したスループットを出せない可能性があるため、性能に余裕をもたせるために動作周波数を上げるという判断をする。

`overspeed_ratio`, `cpu.busy` の値は予備実験から `overspeed_ratio= 1.1`, `cpu.busy= 0.8` とすることでスループットの性能制約を満たしつつ消費電力を削減するのに十分であることが確認された。

4. 実験環境

全ての実験において、データベースサーバには Dell PowerEdge R510 を用いた。プロセッサは Intel Xeon X5550 2.67GHz を 2 ソケット、メモリは 48GB(DDR3 8GB RDIMM × 6) 搭載している。Intel Xeon X5550 は、動作周波数を 1.60GHz から 2.66GHz まで 9 段階変化させることができる。データベースサーバの消費電力は、電源ケーブルを加工しクランプ電流計を取り付けて測定した。電流値はデータロガー (Hioki 2332-20 Power Meter Module) によって 1 秒間隔で記録した。TPC-C のターミナルとしては Dell PowerEdge R900 を用いた。プロセッサは Intel Xeon X7460 2.66GHz を 4 ソケット、メモリは 128GB(DDR2 4GB FB-DIMM × 32) 搭載している。

データベース管理システムとして MySQL 5.1.41、ストレージエンジンとして InnoDB を利用し、Linux カーネル 2.6.18 上で実行した。本論文ではメモリインテンシブなシステムを対象としているため、InnoDB のデータファイルは全てメモリファイルシステム (`tmpfs`) 上に配置し、更にデータベースが全て収まるようバッファプールを割り当てた。Linux カーネル 2.6.18 にはプロセッサの DVFS 機能を扱うためのカーネルモジュール `cpufreq` が組込まれており、実験ではこれを用いてプロセッサの動作周波数制御を行った。

オンライントランザクション処理のアプリケーションとしては、業界標準ベンチマークである TPC-C[3] を用いた。特に

説明しない場合、TPC-C の各パラメータは現時点での最新仕様である version 5.11 に準拠するように設定した。TPC-C のデータサイズの尺度である warehouse 数は 100 とした。また性能解析が行いやすいようターミナル数は warehouse 数と同数の 100 とし、データベースにおける論理的な衝突を避けるようにした。

また、実験中で用いるアプリケーション性能の制約である T_{th} , R_{th} は、システムの最大性能の値を参考に $T_{th} = 40000[\text{tpmC}]$, $R_{th} = 20[\text{msec}]$ とした。

5. アプリケーション指向省電力手法の評価実験

5.1 アプリケーション指向省電力手法の基本的な効果測定

この実験では、我々の提案する DVFS によるアプリケーション指向省電力手法の動作や省電力効果について基本的な性質を把握するための測定を行った。測定に用いた DVFS 制御ポリシーは、1. 動作周波数を最大で固定、2. 応答時間指向ポリシー、3. スループット指向ポリシーの 3 つである。動作周波数を固定した場合の性能がその時々でのシステムの最大性能を表し、評価の基準となる。実験では、これら 3 つのポリシーを用いた場合について、図 4(a) に示すようにトランザクション到着率が 5000tpmC から 55000tpmC へと毎分 5000tpmC ずつ増加し、その後 55000tpmC から 5000tpmC へと毎分 5000tpmC ずつ減少するという負荷パターンを用いて性能・消費電力を測定した。

実験結果を図 4 にまとめた。図中の Fixed frequency は動作周波数を固定した場合、RT-based policy は応答時間指向ポリシー、TP-based policy はスループット指向ポリシーを表している。まず図 4(a) のスループットに注目すると、スループット指向ポリシーはトランザクション到着率が低い場合には、それに対応したスループットを達成していることが確認された。トランザクション到着率が T_{th} より高い場合には、 T_{th} よりもやや高いスループットを維持しており、不必要にスループットが高くなるといったことは観測されなかった。このことから、スループット指向ポリシーが期待した性能を達成できたことがわかる。応答時間指向ポリシーは測定を通して動作周波数固定とほぼ同じスループットであった。

図 4(b) の応答時間についてみる。図中に示す R_{up} , R_{down} はそれぞれ $R_{up} = R_{th} \times R_{up_ratio}$, $R_{down} = R_{th} \times R_{down_ratio}$ である。応答時間指向ポリシーの振舞に着目すると、トランザクション到着率が低く応答時間が R_{th} より十分短いときには動作周波数を最低まで下げており、動作周波数固定の場合に比べて応答時間がやや長かった。トランザクション到着率が高くなり応答時間が R_{up} を超えるようになると徐々に動作周波数を上げ、動作周波数が最大となるまで応答時間はおおむね R_{down} と R_{up} の中間を推移する形となった。トランザクション到着率が 50000tpmC を超えた際にはスループットが 50000tpmC 付近で飽和していることからわかるように、トランザクション到着率がシステムの最大性能を超えた状態となり、応答時間は R_{up} を超えて R_{th} に達した。この状況下では応答時間の制約を満たすことができていないが、システ

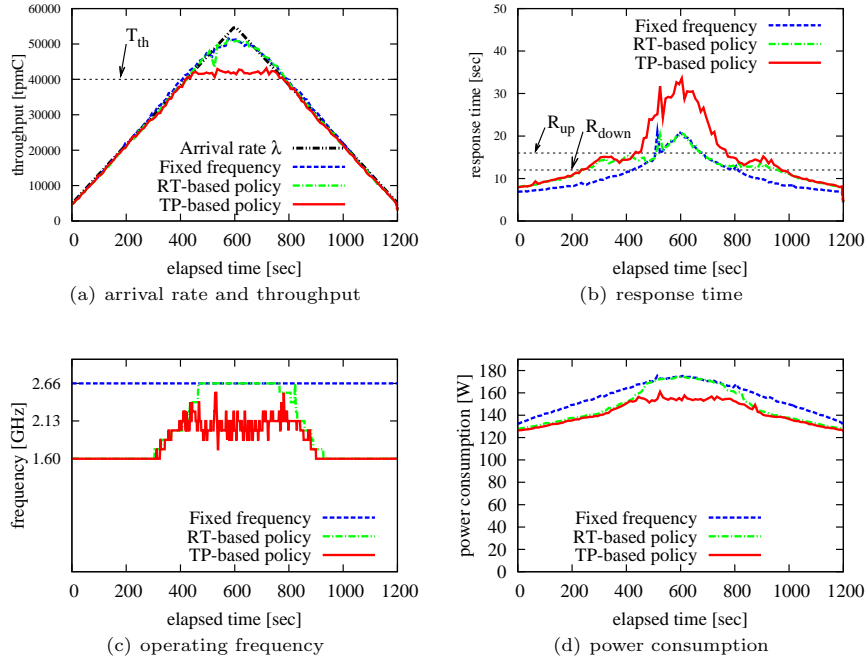


図 4 アプリケーション指向省電力手法の基本的な効果測定の結果

ムの最大性能自体が不足していることに起因する制約違反であり、制御ポリシーの動作には問題はない。これらの結果から、応答時間指向ポリシーについても測定を通して期待した動作を行っていることが確認できた。スループット指向ポリシーについてみると、トランザクション到着率が低い領域では応答時間指向ポリシーとほぼ同じ応答時間であるが、到着率が T_{th} を超えている領域では他に比べて大幅に応答時間が長くなった。

図 4(c) の動作周波数の変動からは、各ポリシーの性質の違いを読み取ることができる。一般にトランザクション到着率が高くなるほどトランザクションの処理待ち時間は長くなるため、応答時間指向ポリシーでは到着率の増加にあわせて動作周波数を上げる必要がある。そのため、図 4(c) に示すようにトランザクション到着率が高い領域において動作周波数が最大値に貼り付くような振舞いとなった。一方スループット指向ポリシーの場合、スループット T_{th} を達成するのに必要な動作周波数はトランザクション到着率にほとんど影響されない。そのため、トランザクション到着率がいくら高くなっても動作周波数は 2.13GHz 前後で推移した。

この動作周波数の振舞いの違いは、消費電力へと直接影響する。図 4(d) に示す消費電力のグラフでは、トランザクション到着率が低い領域においては応答時間指向ポリシーとスループット指向ポリシーのどちらの場合もほぼ同じ消費電力であり、動作周波数固定の場合に比べて消費電力が削減されていることがわかる。トランザクション到着率が高くなり、両者の動作周波数の振舞いが見られるのはほぼ同時刻には消費電力にも差が付きはじめる。トランザクション到着率が最大となる時点で両者の消費電力の差は最大となり、その差は約 20W であった。

以上の結果より、我々の提案するアプリケーション指向省電力手法の応答時間指向ポリシーとスループット指向ポリシーは、どちらも性能の制約を満たしつつ消費電力を削減できることが

確認された。また応答時間とスループットという 2 つの指標どちらを用いるかによって、トランザクション到着率の高い高負荷時におけるシステム性能および消費電力に違いが生じることが確認された。

6. 関連研究

アーキテクチャレベルでの DVFS による省電力技術は、様々な制約条件・目的の下で提案が行われてきた。特にここ数年はマルチコアにおける DVFS の研究が主流である。Herbert らは [4] において動作周波数・電圧の制御単位である VFI(voltage/frequency island) の粒度選択のトレードオフについて検証した。また DVFS 関連の研究では SPEC2000 などのベンチマークが用いられることがほとんどであったが、[5, 4] では Apache や TPC-C、TPC-H などを評価に用いて実際のサーバのワークロードでの効果を測定した。

データベースシステムの省電力技術に関する研究では、データベース分野研究の方針を決める上で重要な役割を果たしている The Claremont Report on Database Research の 2005 年版 [6] にて、データベースエンジンの見直すべき項目として省電力技術が指摘された。その他にもデータベースシステムの省電力技術を指摘する文献は多い。Graefe は、データベースシステムのクエリ最適化の新たな指標としてエネルギー効率を導入すべきであると指摘した [7]。また同著においては、クエリオプティマイザやスケジューラなどの各モジュールが解決すべき課題が提示されている。Harizopoulos らはデータベースシステムの消費電力削減はハードウェアの省電力技術だけでは不十分であり、データベースエンジンの改良が不可欠であることを指摘した [8]。

データベースシステムの中でも、オンライン分析処理 (OLAP) に関しては比較的省電力技術への取り組みが多く見られる。

Henkel らは OLAP で用いられるような構成のシステムにおいて、各コンポーネントの詳細な消費電力の測定を行い、最適なハードウェア構成を調べた [9]。Poess らは業界標準ベンチマークの TPC-H のトップシステムの消費電力を見積り、電力効率の時系列変化を分析した [10]。また彼らは様々なハードウェア構成における消費電力と性能の関係を分析した [11]。Dmitris らはハッシュ結合、ソートマージ結合などのデータベースシステムにおける基本的な操作の消費電力の分析や、エネルギー効率を最も高めるようなシステム設計の指針を提案した [12]。Lang らはプロセッサの省電力モードを活用する手法とクエリスケジューラを改善することで消費電力を削減する手法を提案した [13]。Xu らは消費電力を電力モデル化してクエリ最適化に利用し、データベースシステムの消費電力を削減する手法を提案した [14]。

オンライントランザクション処理に関する省電力化の取り組みとして、Poess らは TPC-C の歴代トップシステムの消費電力を見積り、消費電力あたりの性能の増加率が十分ではなく、現在の性能向上率が維持すると消費電力の絶対量は増え続けると予測した [15]。それに加え、彼らは今後の消費電力削減において鍵となる技術について紹介した。Xu らは [14] において TPC-H を主なターゲットとしているが、彼らの power-aware なクエリオプティマイザの評価実験において TPC-C における省電力効果を検証した。

また、サーバにおけるアプリケーション指向な省電力技術の取り組みとしては、Chen らは DVFS が multitier application の性能に与える影響について評価を行った [16]。この論文では Web サービスのようなアプリケーションを想定しており、性能にシビアな制約のある OLTP とは状況が異なる。また Lee らは [17] において DVFS の動的制御により動画再生の消費電力を削減する手法を提案した。また Lee らは DVFS を加味したタスクのスケジューリングによる省電力技術についても [16] において提案をしている。

7. おわりに

本論文では、オンライントランザクション処理におけるアプリケーション指向省電力手法を提案した。またプロセッサの DVFS 機能を利用したアプリケーション指向省電力の手法として、応答時間指向ポリシーとスループット指向ポリシーを設計・実装し、その性質や省電力効果について評価実験を行った。その結果、ふたつのポリシー共に性能の制約を満たしつつ消費電力を削減できることが確認された。またトランザクション到着率が比較的高い場合にのみ、これら二つのポリシーの振舞いに差がみられた。到着率が比較的高い場合、応答時間は到着率に大きく影響されるため応答時間指向ポリシーは動作周波数をできるだけ上げようとするのに対し、スループットは到着率にほとんど影響されないためスループット指向ポリシーはおおよそ一定の動作周波数を維持する。結果として、トランザクション到着率が高くなるほどスループット指向ポリシーの省電力効果は相対的に大きくなり、最大で 20W、システム全体の消費電力の 11%の省電力効果が得られた。

文 献

- [1] EPA. Epa report to congress on server and data center energy efficiency. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency, 2007.
- [2] EMERSON Network Power. Energy logic: Reducing data center energy consumption by creating savings that cascade across systems. White paper, Emerson Electric Co., 2009.
- [3] Kim Shanley. Tpc releases new benchmark: Tpc-c. *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 20(2):8–9, 1992.
- [4] Sebastian Herbert and Diana Marculescu. Analysis of dynamic voltage/frequency scaling in chip-multiprocessors. In *ISLPED '07: Proceedings of the 2007 international symposium on Low power electronics and design*, pages 38–43, New York, NY, USA, 2007. ACM.
- [5] S. Herbert and D. Marculescu. Variation-aware dynamic voltage/frequency scaling. In *High Performance Computer Architecture, 2009. HPCA 2009. IEEE 15th International Symposium on*, pages 301–312, Feb. 2009.
- [6] Rakesh Agrawal, Anastasia Ailamaki, Philip A. Bernstein, Eric A. Brewer, Michael J. Carey, Surajit Chaudhuri, AnHai Doan, Daniela Florescu, Michael J. Franklin, Hector Garcia-Molina, Johannes Gehrke, Le Gruenwald, Laura M. Haas, Alon Y. Halevy, Joseph M. Hellerstein, Yannis E. Ioannidis, Hank F. Korth, Donald Kossmann, Samuel Madden, Roger Magoulas, Beng Chin Ooi, Tim O'Reilly, Raghu Ramakrishnan, Sunita Sarawagi, Michael Stonebraker, Alexander S. Szalay, and Gerhard Weikum. The claremont report on database research. *SIGMOD Rec.*, 37(3):9–19, 2008.
- [7] Goetz Graefe. Database servers tailored to improve energy efficiency. In *Proceedings of EDBT'08 Workshop on Software Engineering for Tailor-made Data Management*, pages 24–28, 2008.
- [8] Stavros Harizopoulos, Mehul A. Shah, Justin Meza, and Parthasarathy Ranganathan. Energy efficiency: The new holy grail of data management systems research. In *CIDR 2009, Fourth Biennial Conference on Innovative Data Systems Research*, 2009.
- [9] Justin Meza, Mehul A. Shah, Parthasarathy Ranganathan, Mike Fitzner, and Judson Veazey. Tracking the power in an enterprise decision support system. In *Proceedings of the 2009 International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pages 261–266, 2009.
- [10] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. A power consumption analysis of decision support systems. In *WOSP/SIPEW '10: Proceedings of the first joint WOSP/SIPEW international conference on Performance engineering*, pages 147–152, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [11] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. Tuning servers, storage and database for energy efficient data warehouses. In *Proceedings of the 26th International Conference on Data Engineering, ICDE 2010*, pages 1006–1017, 2010.
- [12] Dmitris Tsirogiannis, Stavros Harizopoulos, and Mehui A. Shar. Analyzing the energy efficiency of a database server. In *SIGMOD '10: Proceedings of the 36th SIGMOD international conference on Management of data*, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [13] Willis Lang and Jignesh M. Patel. Towards eco-friendly database management systems. In *CIDR 2009, Fourth Biennial Conference on Innovative Data Systems Research*, 2009.
- [14] Zichen Xu, Yi-Cheng Tu, and Xiaorui Wang. Exploring power-performance tradeoffs in database systems. In *Proceedings of the 26th International Conference on Data Engineering, ICDE 2010*, pages 485–496, 2010.
- [15] Meikel Poess and Raghunath Othayoth Nambiar. Energy cost, the key challenge of today's data centers: a power consumption analysis of tpc-c results. *Proc. VLDB Endow.*, 1(2):1229–1240, 2008.
- [16] Shuyi Chen, Kaustubh R. Joshi, Matti A. Hiltunen, Richard D. Schlichting, and William H. Sanders. Blackbox prediction of the impact of dvfs on end-to-end performance of multitier systems. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.*, 37(4):59–63, 2010.
- [17] Wan Yeon Lee. Energy-saving dvfs scheduling of multiple periodic real-time tasks on multi-core processors. In *DS-RT '09: Proceedings of the 2009 13th IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications*, pages 216–223, Washington, DC, USA, 2009. IEEE Computer Society.