

## オンライントランザクション処理における スループットを考慮したプロセッサ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†  
† 東京大学生産技術研究所

### 1 はじめに

近年、情報技術分野においても低炭素化が求められ、なかでも消費電力増加が著しいデータセンタの省電力化は急務である。電子商取引などの重要な社会インフラを支えるオンライントランザクション処理 (OLTP) はデータセンタの主たるアプリケーションであり、OLTP が稼動するサーバの省電力化は重要な課題である。しかし、OLTP はシステムの可用性や性能への要求が厳しいために省電力化が難しく、これまで有効な省電力手法はほとんど提案されてこなかった。

OLTP の省電力化に関して、著者らは [1] においてプロセッサの Dynamic Voltage and Frequency Scaling (DVFS) 機能を用いたアプリケーション指向省電力手法を提案した。この手法では DVFS を利用することでシステムを停止することなく省電力化が可能である。またアプリケーションの実行時性能情報を用いて DVFS を制御を行うため、性能目標を達成しつつ省電力化を行うことができる。

本論文では、前述のアプリケーション指向省電力化手法について、スループットを考慮した DVFS 制御を行った場合の性能と省電力効果の関係について実験的に考察を行った。評価実験においては、OLTP アプリケーションとして業界標準ベンチマーク TPC-C[2] を利用し、実際のサーバにおける負荷トレースを用いて性能および省電力効果の測定を行った。

### 2 OLTP における DVFS を用いたアプリケーション指向省電力化

著者らが [1] において提案したアプリケーション指向省電力化手法では、一定時間ごとにアプリケーションの実行時性能情報が収集され、DVFS ポリシーと呼ばれる判断基準に従って動作周波数が制御される。[1] においては応答時間を指標として用いる応答時間指向 DVFS ポリシーが提案され、性能目標を達成しつつ省電力化できることが確認された。

本論文においては、スループットを指標として用いるスループット指向 DVFS ポリシーの省電力効果に関して検討を行う。この DVFS ポリシーは、システムの最大スループット性能が目標値  $T_{th}$  を上回りながら、可能なかぎり動作周波数を下げて省電力化を行うよう設計されている。今回の実験では、性能目標値  $T_{th}$  の値を変化させた場合の性能と省電力効果の関係を実験によって分析した。

図 1 にスループット指向 DVFS ポリシーの疑似コードを示した。DVFS 制御においては、一定時間間隔ごとにスループット、トランザクション到着率、CPU 使用率の情報が収集され、それらを引数として *TP\_based\_policy* 関数が呼び出されて動作周波数の増減 (*raise\_frequency* / *drop\_frequency*) が決定される。この DVFS ポリシーでは、目標値  $T_{th}$  より十分高いスループットがでている、あるいは CPU 使用率が低くシステムのスループット性能に余裕がある (図 1(A), (B), (D)) 場合には動作周波数を 1 段階下げるよう判断される。一方スループットが目標値  $T_{th}$  に達していない場合や CPU 使用率

```

1  Tth           // throughput constraint
2  overspeed_ratio // threshold for detecting overspeed
3  cpu_busy0    // < 1
4  cpu_busy1    // < cpu_busy2 < 1
5  cpu_busy2    // < 1
6  function TP_based_policy(throughput, arrival_rate,
7                             cpu_usage){
8      if (throughput > Tth * overspeed_ratio)
9          drop_frequency(); // (A)
10     else if (throughput > Tth)
11         if (cpu_usage < cpu_busy0)
12             drop_frequency(); // (B)
13     else
14         if (arrival_rate > Tth)
15             raise_frequency(); // (C)
16         else
17             if (cpu_usage < cpu_busy1)
18                 drop_frequency(); // (D)
19             else if (cpu_usage > cpu_busy2)
20                 raise_frequency(); // (E)
21 }

```

図 1: スループット指向 DVFS ポリシーの疑似コード

が高くシステムのスループット性能に余裕が無い (図 1(C)(E)) 場合には動作周波数を 1 段階上げるよう判断される。図 1 中の *overspeed\_ratio*、*cpu\_busy<sub>0</sub>*、*cpu\_busy<sub>1</sub>*、*cpu\_busy<sub>2</sub>* は前述の判断を下す際に用いられる基準値であり、今回の実験では *overspeed\_ratio* = 1.1、*cpu\_busy<sub>0</sub>* = 0.75、*cpu\_busy<sub>1</sub>* = 0.7、*cpu\_busy<sub>2</sub>* = 0.8 とした。

### 3 実験環境

データベースサーバには Dell PowerEdge R510(Intel Xeon X5550 2.67GHz×2、DDR3 8GB RDIMM×6) を用いた。データベースサーバの消費電力はデータロガー (Hioki 2332-20 Power Meter Module) とクランプ電流計を用いて 1 秒間隔で測定した。

データベース管理システムには MySQL 5.1.41、ストレージエンジンとして InnoDB を利用した。DVFS の効果を確かめるために、InnoDB のデータファイルは全て主記憶ファイルシステム上に配置し、バッファプールは 20GB とした。DVFS の制御には、Linux カーネルのモジュール *cpufreq* を用いた。

OLTP アプリケーションとして、業界標準ベンチマーク TPC-C[2] を用いた。TPC-C のデータサイズの尺度である warehouse 数は 100 (初期化直後のデータサイズは約 10GB) とした。また TPC-C のターミナル数は 100 とし、各 warehouse に一つずつターミナルを割り当てた。TPC-C のその他のパラメータは version 5.11 に準拠するよう設定を行った。

### 4 スループット指向 DVFS ポリシーの評価実験

この実験ではスループット指向 DVFS ポリシーの性能目標値  $T_{th}$  を変化させた場合の性能および消費電力を測定した。負荷パターンとして WorldCup98 データセット [3] を参考に TPC-C のトランザクション到着率を変動させて測定を

An Experimental Study on Throughput-aware Power Saving for Online Transaction Processing

Yuto HAYAMIZU† Kazuo GODA† Miyuki NAKANO† Masaru KIT-SUREGAWA†

†Institute of Industrial Science

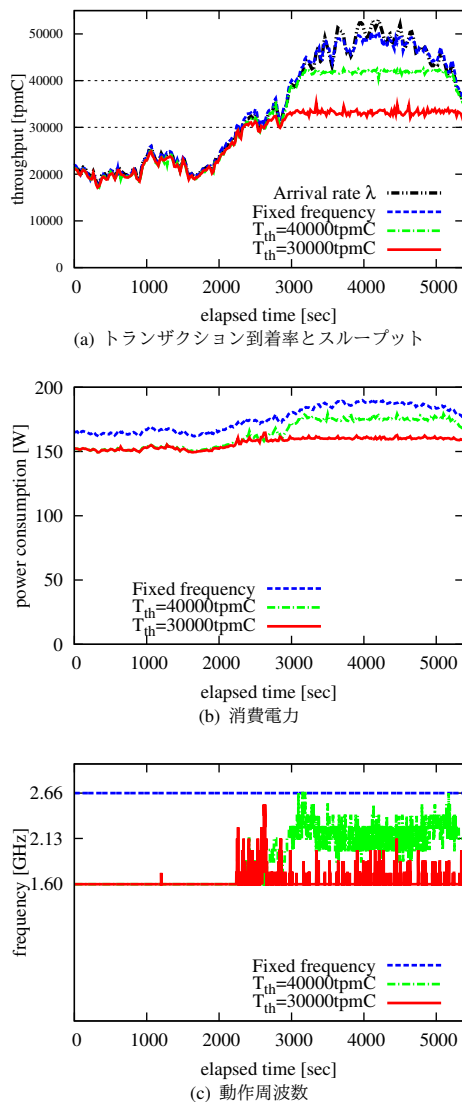


図2: スループット指向 DVFS ポリシーの実験結果

行った。測定を行ったのは、1. 動作周波数を最大で固定、2.  $T_{th} = 40000$ [tpmC]、3.  $T_{th} = 30000$ [tpmC] の3つの場合である。TPC-C 実行開始直後の測定値は安定しないため、それぞれの場合について TPC-C の実行開始 30 秒後から測定を開始した。

実験結果を図2に示す。凡例の Fixed frequency は動作周波数最大固定の場合を表している。

図2(a)はトランザクション到着率およびスループットの経時変化を表したグラフである。動作周波数を最大に固定した場合、全実行時間にわたってスループットは到着率とほぼ一致した。スループット指向 DVFS ポリシーを  $T_{th} = 40000$ [tpmC] で用いた場合、3000 秒以前においてスループットと到着率はほぼ同じ値をとったが、到着率が 3000 秒以降においてはスループットは 42000tpmC 前後を維持した。 $T_{th} = 30000$ [tpmC] の場合、到着率が 30000tpmC よりも低い 2200 秒以前においてはスループットと到着率はほぼ同じ値をとり、到着率が 30000tpmC よりも高くなるとスループットは 33000tpmC 前後を維持した。以上の結果より、スループット DVFS 指向ポリシーを用いた場合、到着率が性能目標  $T_{th}$  よりも低い場合

には到着率とほぼ同じ値のスループットを達成できること、また到着率が  $T_{th}$  よりも高い場合には  $T_{th}$  の 105~110% 程度のスループットの値を維持するよう DVFS 制御がなされることが確認された。すなわち、スループット指向 DVFS ポリシーを用いた場合に性能目標が達成されているということである。

図2(b)は消費電力の経時変化を示したグラフである。図2(a)と比較することでわかるように、スループットの増減と消費電力の増減はほぼ連動しているといえる。

0 秒から 2200 秒までの区間に注目すると、測定を行った3つの場合いずれもほぼ同じスループットの値をとっており、動作周波数最大の場合よりも常に 13W 程度低い消費電力となった。この消費電力の差は、図2(c)からわかるようにスループット指向 DVFS ポリシーを用いた場合は動作周波数が常に最低をとることに起因する。2200 秒以降においては、測定を行った3つの場合それぞれが異なるスループット値をとり、消費電力の挙動もまた異なるものとなった。動作周波数最大固定の場合には、到着率の増減にあわせて消費電力が増減し、到着率が最大となる 4000 秒付近では消費電力はおよそ 188W であった。 $T_{th} = 40000$ [tpmC] の場合には 3100 秒まで消費電力は増加し、それ以降は 175W 前後を維持した。 $T_{th} = 30000$ [tpmC] の場合には 2500 秒まで消費電力は増加し、以降 160W 前後を維持した。実行時間全体を通した消費電力の平均値は、動作周波数最大固定の場合には 175W、スループット指向 DVFS ポリシーで  $T_{th} = 40000$ [tpmC] の場合には 164W、 $T_{th} = 30000$ [tpmC] の場合には 157W であった。

以上の結果より、スループット指向 DVFS ポリシーを用いた場合、到着率が性能目標  $T_{th}$  より低いときには到着率と同じ値のスループットを達成しつつ、動作周波数最大固定の場合と比べて消費電力を 13W 程度削減することができることがわかった。また到着率が  $T_{th}$  よりも高い場合には  $T_{th}$  の値によってスループットの上限値が決定される。当該環境においてスループットと消費電力の増減はほぼ連動しているため、スループットの上限値が  $T_{th}$  の値によって決定されるため、消費電力の上限値もまた  $T_{th}$  によって決定されるということがわかる。

## 5 まとめ

本論文では OLTP における DVFS を用いたアプリケーション指向省電力手法について、スループットを指標とする DVFS ポリシーの性能と省電力効果の関係について実験的に考察を行った。その結果から、動作周波数を最大に固定した場合を基準としたときに、トランザクション到着率が性能目標  $T_{th}$  よりも低い場合にはスループット性能を低下させることなく 13W 程度の省電力効果が確認された。またスループット指向 DVFS ポリシーを用いるとスループットの上限値は性能目標  $T_{th}$  の 105~110% に抑えられ、それに連動して消費電力の上限値も決定されることがわかった。当該環境において  $T_{th} = 40000$ [tpmC] の場合には消費電力の上限は約 175W、 $T_{th} = 30000$ [tpmC] の場合には約 160W であった。

## References

- [1] Yuto Hayamizu, Kazuo Goda, Miyuki Nakano, and Masaru Kitsuregawa. Application-aware power saving for online transaction processing using dynamic voltage and frequency scaling in a multicore environment. In *Architecture of Computing Systems - ARCS 2011*, Lecture Notes in Computer Science, pp. 50–61. Springer, 02 2011. (to appear).
- [2] Kim Shanley. Tpc releases new benchmark: Tpc-c. *SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, Vol. 20, No. 2, pp. 8–9, 1992.
- [3] Martin Arlitt and Tai Jin. Workload characterization of the 1998 world cup web site. Technical report, Hewlett Packard Laboratories Palo Alto, September 1999.