Energy-Efficient Algorithms

1. 研究分野

可逆コンピューティング
ー可逆アルゴリズム
ー半可逆

2. 目的

コンピュータのエネルギー効率を改善するために，アルゴリズムのエネルギー効率を考える必要がある．この論文では，アルゴリズムのエネルギー使用量を見積もるための方法を考え，いくつかの基本的なアルゴリズム(非可逆・可逆・半可逆)について，そのエネルギー使用量を見積もる．.

3. 背景

コンピュータのエネルギー効率は，コンピュータにおいて重要な要素である．エネルギー効率の良いコンピュータでは，備えるバッテリーの容量を抑え，軽量化することが可能である．また，CPUの計算による発熱にも関わる．可逆計算を用いたコンピュータは，計算による熱の発生を防ぐことができる．可逆的な要素を組み込んだプロセッサは実用化されており，実際にエネルギー効率の改善が認められている．
コンピュータのエネルギー効率を改善する上で，アルゴリズムのエネルギー使用量(非可逆・可逆問わず)を考える必要がある．非可逆なアルゴリズムは計算の過程でエネルギーを消費するが，その量は分かっていない．可逆アルゴリズムにおいても，extra space(ゴミ)を出力することは，熱を発生させるタイミングを先送りしていることに他ならない(下限にすることが求められる).

4. アプローチ

アルゴリズムのエネルギー使用量を見積もるために，計算モデルを用いた．最下層のアルゴリズム(機械語レベル)ではCircuit Modelを拡張したEnergy Circuit Modelを，上位層ではword RAM Modelを拡張したEnergy word RAM Model，Transdichotomous RAM Modelを拡張したEnergy Transdichotomous RAM Modelを使用した．各モデルで，どのような操作よってエネルギー使用量が増加するのか定義した．アルゴリズムの表現には，Cライクな疑似コードを用いた．この疑似コードでは非可逆な操作と可逆な操作を実装できる.

5. 結果

この論文の結果の表を引用する.

Primitive	Time (ops)	Space in Log (bits)	Energy (bits)	Thm.
Control Logic				
Paired Jump	$\Theta(1)$	1	0	3.1
Variable Jump	$\Theta(1)$	$1+w$	0	3.1
Protected If	$\Theta(1)$	0	0	3.2
General If	$\Theta(1)$	1	0	3.2
Simple For loop	$\Theta(l)$	0	0	3.3
Protected For loop	$\Theta(l)$	0	0	3.4
General For loop	$\Theta(l)$	$\lg l$	0	3.5
Function call	$\Theta(1)$	0	0	3.6
Memory Management				
Free lists	$\Theta(N)$	$\Theta(wN)$	0	3.7
Reference Counting	$\Theta(N)$	$\Theta(wN)$	0	3.8
Mark & Sweep	$\Theta(N)$	$\Theta(wN)$	0	3.9

Algorithm	Time	Space (words)	Energy (bits)	Thm.
Sorting Algorithms				
Comparison Sort	$\Theta(n \lg n)$	$\Theta(n)$	$\Theta(n \lg n)$	6.2
Reversible Comparison Sort	$\Theta(n \lg n)$	$\Theta(n)$	0	6.3, 6.4
Reversible Insertion Sort	$\Theta(n^2)$	$\Theta(n)$	0	6.5
Counting Sort	$\Theta(n+k)$	$\Theta(n+k)$	$\Theta(n+k)$	6.6
Reversible Counting Sort	$\Theta(n+k)$	$\Theta(n+k)$	0	6.8
Graph Algorithms				
Breadth-first Search	$\Theta(V+E)$	$\Theta(V+E)$	$\Theta(wV+E)$	6.9
Reversible BFS[10]	$\Theta(V+E)$	$\Theta(V+E)$	0	6.10
Bellman-Ford	$\Theta(VE)$	$\Theta(V)$	$\Theta(VEw)$	6.12
Reversible Bellman-Ford	$\Theta(VE)$	$\Theta(VE)$	0	6.13
Floyd-Warshall	$\Theta(V^3)$	$\Theta(V^2)$	$\Theta(V^3 w)$	6.14
Reversible Floyd-Warshall [10]	$\Theta(V^3)$	$\Theta(V^3)$	0	6.15
Matrix APSP	$\Theta(V^3 \lg V)$	$\Theta(V^2)$	$\Theta(wV^3 \lg V)$	6.17
Reversible Matrix APSP [10]	$\Theta(V^3 \lg V)$	$\Theta(V^2 \lg V)$	0	6.16
Semi-reversible Matrix APSP	$\Theta(V^3 \lg V)$	$\Theta(V^2)$	$wV^2 \lg V$	6.16
Data Structures				
Standard AVL Trees (build)	$O(n \lg n)$	$O(n)$	$O(w \cdot n \lg n)$	
(search)	$O(\lg n)$	$O(1)$	$O(\lg n)$	5.4
(insert)	$O(\lg n)$	$O(1)$	$O(w \lg n)$	5.5
(k deletes)	$O(k \lg n)$	$O(1)$	$O(w \lg n)$	5.6
Reversible AVL Trees (build)	$O(n \lg n)$	$O(n)$	0	
(search)	$O(\lg n)$	$O(1)$	0	5.7
(insert)	$O(\lg n)$	$O(1)$	0	5.8
(k deletes)	$O(k \lg n)$	$O(k)$	0	5.9
Standard Binary Heap (insert)	$O(\lg n)$	$O(1)$	$O(\lg n)$	5.10
(delete max)	$O(\lg n)$	$O(\lg n)$	$O(w \lg n)$	5.11
Reversible Binary Heap (insert)	$O(\lg n)$	$O(1)$	0	5.10
(delete max)	$O(\lg n)$	$O(\lg n)$	0	5.12
Dynamic Array (build)	$O(n)$	$O(n)$	0	
(query)	$O(1)$	$O(1)$	0	5.3
(add)	$O(1)$	$O(1)$	0	5.3
(delete)	$O(1)$	$O(1)$	0	5.3

6. 有用性

この論文で与えられたアルゴリズムのエネルキー使用量を見積もる方法と各アルゴリズムのエネルギー使用量は，今後アルゴリズムのエネルギー効率を考える上での重要な指標となる
.

7. 限界・短所

・現在完全に効率化できていない・下限が分かっていない可逆アルゴリズム
ー最短経路アルゴリズム：古い値の書き換えを頻繁に行うため，可逆化が難しい
ー機械学習のアルゴリズム
ー利用頻度の高いアルゴリズム(ハッシュ・Predecessorデータ構造(van Emde Boas Tree)・最大フローー最小カット・高速フーリエ変換・動的計画法など)
ー幾何学アルゴリズム(凸包・Line Intersection・ドロネーー三角形分割など)

・可逆コンピューティングの能力
ー可逆性を持ったOSやデータベース実現における課題・その解決方法
・半可逆コンピューティングの可能性

8. 次に何を読めばいいか？

・可逆シミュレーション一般解法

ーC. H. Bennett. Time/space trade-offs for reversible computation. SIAM Journal on Computing, 18(4):766–776, Aug.1989.
ーK.-J. Lange, P. Mckenzie, and A. Tapp. Reversible space equals deterministic space. In Proceedings of the 12th Annual IEEE Conference on Computational Complexity, pages 45–50, 1997.
ーR.Williams.Space-efficientreversiblesimulations.Technical report, DIMACS REU report, 2000. http://web.stanford.edu/ ~rrwill/spacesim9_22.pdf.

・可逆コンピューティング研究の意義の証拠

ーJ. G. Koomey. Growth in data center electricity use 2005 to 2010. Analytics Press, Aug. 2011.
ーG. Kissin. Upper and lower bounds on switching energy in vlsi. J. ACM, 38(1):222–254, Jan. 1991.
ーeMarketer. Smartphone users worldwide will total 1.75 billion in 2014. http://www.emarketer.com/Article/ Smartphone-Users-Worldwide-Will-Total-175-Billion-2014/ 1010536, Jan. 2014.

・可逆コンピューティング実用例

ーCyclos Semiconductor. Cyclos Semiconductor announces first commercial implementation of resonant clock mesh technology. http://www.cyclos- semi.com/news/first_ commercial_implementation.html, Feb. 2012.
ーC. Velazco. AMD’s new FX processor reaches world record clock speed. http://techcrunch.com/2011/09/13/ amds-new-fx-processor-reaches-world-record-clock-speed/, Sept. 2011.