

消費電力の最小化を目指した リアルタイムスケジューリングアルゴリズムの効果

新保稔康[†] 渋谷雄[†] 辻野嘉宏[†]

携帯機器の普及にともない低消費電力技術が重要となってきた。これまで筆者らの研究グループでは、CPUの周波数を制御できる場合にCPUの消費電力を最小にするリアルタイムスケジューリング更新アルゴリズムの提案を行ってきた。本論文ではこれらのアルゴリズムを実際に応用した場合に消費電力に与える効果をシミュレーションにより評価し、アルゴリズムの効果を最大にするための指針を得た。全体として、固定周波数時に比べて各アルゴリズム使用時に大きな消費電力の減少が見られた。

Effect of Real-time Scheduling Algorithms to Minimize of Power Consumption

TOSHIYASU SHIMBO,[†] YU SHIBUYA[†] and YOSHIHIRO TSUJINO[†]

For the long use of portable information device, it is important to decrease the power consumption of the CPU. Until now, we have already proposed real-time scheduling algorithms with controlling CPU frequency which minimize the power consumption of CPU. In this paper, the usability of our algorithms are evaluated with the simulations in the various conditions. From the simulation, we found the conditions which maximize the effect of the algorithms. Furthermore our algorithms considerably decrease the power consumption comparing with general fixed frequency case.

1. はじめに

携帯機器の普及にともない、低消費電力技術が重要となっている。CPU自身の電力消費も顕著であり、低消費電力化の必要がある。これまで筆者らの研究グループではCPUの周波数が任意の値、あるいは離散値に制御できる場合にCPUによる消費電力を最小にするリアルタイムタスクスケジューリング更新アルゴリズムの提案を行っている^{1)~4)}。本論文では、すでに提案した各アルゴリズムが消費電力に与える影響をシミュレーションにより評価する。また従来の固定周波数の場合の消費電力と各アルゴリズム使用時の消費電力を比較する。

2. スケジューリングアルゴリズム

CMOS回路の特性から、CPUの消費電力は

$$P = f * p_t * C_L * V_{DD}^2 \quad (1)$$

で表される⁵⁾。ここで f はCPUの周波数、 p_t はスイッチング確率、 C_L は負荷容量、 V_{DD} は電源電圧である。周波数が低くなると電源電圧も下げることができ、式(1)は式(2)のように近似的に表せる。

$$P = C * f^\alpha \quad (2)$$

ここで $\alpha > 1$ である。さらに、本論文では周波数が時間とともに変更できるとするので消費電力量 E は式(3)のようになる。

$$E = C * \sum_i t_i f_i^\alpha \quad (3)$$

また、携帯機器の2次電池についても取り出す電流値が小さければ、取り出せる電流量の総量が大きくなるという性質があるが、この性質も式(3)でモデル化できる¹⁾。したがって、同一仕事量においては高い周波数よりも低い周波数、複数の異なる周波数よりも同一の周波数で実行した場合に消費電力が少ない。その結果、可能な限り低い同一の周波数でプログラムを実行したとき、2次電池のCPUによる消費量は最小に

[†] 京都工芸繊維大学
Kyoto Institute of Technology

なる^{1)~3)}。ここで仕事量とは周波数が一定であることを前提としない処理量の尺度であり、あるタスクの仕事量は、そのタスクを実行した CPU の周波数と実行時間の積 ($MHz * msec$) で定義される。

この性質を利用し、新たなタスクが到着したときにはそれを含めた既知のタスクに対して、リアルタイムタスクのデッドラインを守り CPU の消費電力を最小にするスケジューリング更新アルゴリズムを提案した^{1)~4)}。アルゴリズムに与える条件として、CPU のとりうる周波数の値と周波数を切り替えるタイミングがあげられる。

CPU のとりうる周波数の値は、任意の周波数 (連続周波数) と定数個の周波数の値 (離散周波数) という 2 つの場合がある。ここで離散周波数の場合において、とりうる周波数の値が $0, k, 2k, 3k, \dots, nk$ である場合に、基準となる値 k を離散周波数の刻み幅と定義する。次に周波数を切り替えることができるタイミングとして、タスク切替え時のみと任意時刻という 2 つの場合がある。まとめると以下ようになる。

- (i) 連続周波数/タスク切替え時のみ
- (ii) 連続周波数/任意時刻
- (iii) 離散周波数/タスク切替え時のみ
- (iv) 離散周波数/任意時刻

(i) の場合では、消費電力に関して最適なアルゴリズムを提案した^{1),3)}。(ii) の場合は、(i) のアルゴリズムで最適になる。(iii) の場合の問題は NP 完全であり、このため近似アルゴリズムを提案している²⁾。(iv) の場合は消費電力に関して最適なアルゴリズムを提案している²⁾。これらのアルゴリズムで設定されるタスクスケジュールと実行周波数は、すでに到着しているタスクについて最適であり、未到着タスクについては考慮されていない。

そこで、次章では (i) と (ii) の場合の消費電力を比較し周波数切替えのタイミングによる影響について検証する。次に (ii) と (iv) の場合の消費電力を比較し周波数のとりうる値による影響について検証する。

また、これらのアルゴリズムに対して実行順序制約⁴⁾のあるタスクの割合が消費電力に与える影響を評価する。ここで、実行順序制約があるとは、タスク a と b には処理上関連があり、タスク a の実行時には a の後に実行するタスク b のスケジューリングに必要な情報 (仕事量、デッドラインなど) が分かることをいう。このため未到着タスクに対して到着を仮定し、スケジューリングしておくことで実際にタスクが到着したときの周波数の急激な変化を避け、より少ない消費電力で実行が行える。また、実行順序制約によりスケ

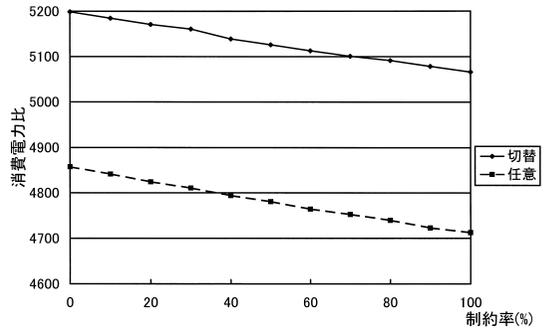


図 1 各制約率における消費電力比 (更新タイミングの比較)
Fig. 1 The power consumption ratio in each constraints rate (Comparison of an update timing).

ジューリングに必要な情報を知られているタスクがタスク群全体に占める割合を制約率と呼ぶ。

3. シミュレーション

シミュレーションの条件は以下のとおりである。

- タスクのデッドライン: 到着時 +1.5 ~ 8.5 [msec]: 一様分布
- タスクの仕事量: 2.0 ~ 20.0 [MHz · msec]: 一様分布
- タスク到着: 1.0 [msec] 間隔
- タスクの数: 100
- 離散周波数の刻み幅 k : 1, 2, \dots , 12 [MHz]

なおこれらの数値は現実のシステムでの値ではなく、シミュレーションの際に定めた値である。また、グラフに使用した値はシミュレーションを 100 回行った結果の平均を用いた。

図 1 は連続周波数時の周波数切替えタイミングについてのグラフで、縦軸は消費電力比 (1 MHz で 1 msec の間 CPU を稼働させたときの消費電力との比) であり、横軸は制約率である。また、消費電力比の計算には式 (3) を用いる。このとき実在する CPU の例から、このシミュレーションにおいて $\alpha = 1.6$ を採用した。図 1 より、周波数切替えのタイミングがタスク切替え時のみの場合に比べて任意時刻に周波数を切り替える場合に消費電力比が減少していることが分かる。これはタスク切替え時以外にも周波数を切り替えることで新たなタスク到着時の周波数の変化にすばやく対応しているためだと考えられる。

図 2 は離散周波数の刻み幅が 1 ~ 6 MHz の場合の各制約率における消費電力比であり、図 3 は離散周波数の刻み幅が 7 ~ 12 MHz の場合の各制約率における消費電力比である。図 2 では制約率が増えると消費電力が減少することが分かる。これは実行順序制約

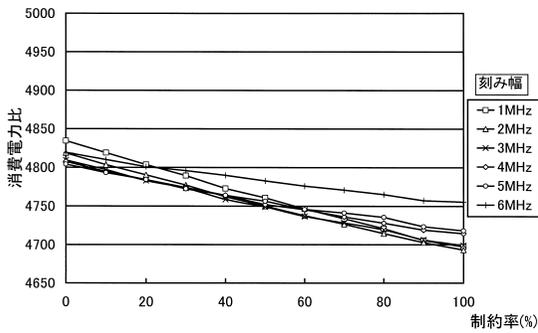


図2 各制約率における消費電力比 (刻み幅が小さい場合)

Fig. 2 The power consumption ratio in each constraints rate (When an interval of value of frequency is small).

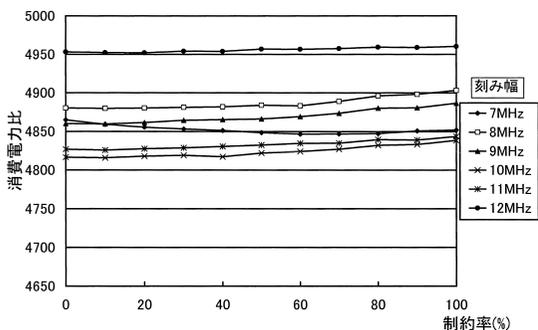


図3 各制約率における消費電力比 (刻み幅が大きい場合)

Fig. 3 The power consumption ratio in each constraints rate (When an interval of value of frequency is coarse).

を利用した結果、周波数の急激な変化が抑えられたと考えられる。しかし、図3より7MHz刻み以上は制約率にともなう消費電力比の減少がほとんどない。これは刻みが粗く必要以上に高い周波数で実行され、実行と停止を繰り返したためだと考えられる。図4は離散周波数の刻み幅と消費電力比のグラフである。この図から連続周波数に比べ離散周波数の刻み幅が2~4MHzの場合に消費電力が少ないことが分かる。また、12MHz以上では制約率に関係なく消費電力比は増加し続けた。

その理由は次のように考えられる。離散周波数の刻み幅が小さい場合、最適な周波数よりわずかに高い最小の周波数で実行する。このため、連続周波数で実行する場合に比べ、同じ時間で処理する仕事量が少し多い。結果として新たなタスク到着時の急激な仕事量の増加に対して周波数の急激な変化が起りにくく、消費電力が連続周波数に比べ小さくなると考えられる。また、刻み幅が大きい場合は最適な周波数に比べ高すぎる周波数で実行するため実行と停止を繰り返してしまうので消費電力は連続周波数に比べて多くなると考

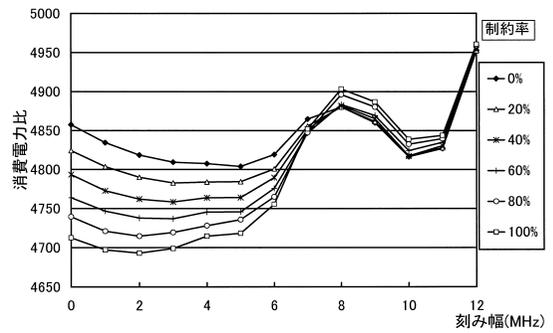


図4 各刻み幅における消費電力比

Fig. 4 The power consumption ratio in each interval of value of frequency.

えられる。

また、図4において8MHz付近において消費電力が極大となっている。これは刻み幅が8MHz付近の場合、最適な周波数が刻み幅よりわずかに高く、実行周波数と最適周波数の差が大きいためだと考えられる。このことはシミュレーションの際の条件に依存するが、条件を変更した場合には、ピークの周波数は条件に応じて変化するものの、同様の特性が見られたことから証明される。

そして、固定周波数(20MHz)で実行した場合の消費電力比(12550)に対して、各アルゴリズム使用時には消費電力が61%~63%減少した。ここで20MHzはシミュレーションの条件下で新たなタスクが到着する前に現在のタスクの処理が完了できることが確実な最小の周波数である。

4. まとめ

本論文では、各アルゴリズムのシミュレーションを行い、周波数切替えタイミングの違い、周波数の違い、制約率が消費電力に与える影響を検証した。結果として周波数を制御することが消費電力を低減することに有効であることが分かった。また、周波数の切替えを任意の時間で行うことは消費電力の減少に有効であった。周波数の刻み幅が粗すぎると実行順序制約の効果は現れず、消費電力の減少にも有効ではない。また、周波数の刻み幅が細かすぎても有効ではなかった。

今後の課題として、タスクの切替えや周波数変更、スケジューリングにともなうオーバーヘッドを考慮に入れる必要がある。また、より現実に近い条件でのシミュレーションや実際の変周CPUにおける評価を行う必要がある。

参 考 文 献

- 1) 中本, 辻野, 都倉: 携帯機器の2次電池の最長利用を目的とするリアルタイムスケジューリングアルゴリズム, 信学論, Vol.J83-D-I, No.1, pp.125-133 (2000).
- 2) 中本, 辻野, 都倉: 離散周波数制御を利用した2次電池の最長利用のためのタスクスケジューリングアルゴリズム, 信学論, Vol.J83-D-I, No.12, pp.1249-1259 (2000).
- 3) Nakamoto, Y., Tsujino, Y. and Tokura, N.: Real-Time Task Scheduling Algorithms for Maximum Utilization of Secondary Batteries in Portable Devices, *Proc. RTCSA 2000*, Cheju Island, South Korea, pp.347-354 (2000).
- 4) 岡本, 渋谷, 辻野, 中本: 2次電池の最長利用のための実行順序制約を用いたスケジューリングアルゴリズムについて, 情報処理学会研究報告, Vol.2001, No.7, 2001-AL-76-6, pp.35-42 (2001).
- 5) 黒田, 櫻井: マルチメディアのCMOS VLSIのための低電力回路設計技術, 信学論, Vol.J80-A, No.5, pp.746-753 (1997).

(平成14年2月25日受付)

(平成14年6月4日採録)



新保 稔康 (学生会員)

平成13年京都工芸繊維大学工学部卒業。現在京都工芸繊維大学大学院にてリアルタイムスケジューリングアルゴリズムの研究に従事。



渋谷 雄 (正会員)

平成2年大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士後期課程修了。工学博士。平成2年より京都工芸繊維大学工学部電子情報工学科助手, 同講師, 同助教授を経て, 平成12年同大学大学院工学科学研究科助教授(工学部兼務)。平成9~10年ドイツ, カッセル大学客員研究員。ヒューマンインタフェース, 人間情報技術の研究に従事。電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会, システム制御情報学会, 日本人間工学会, ACM等の会員。



辻野 嘉宏 (正会員)

昭和54年大阪大学基礎工学部情報工学科卒業。昭和59年大阪大学大学院博士課程修了。工学博士。同年大阪大学基礎工学部助手。同大学講師, 助教授を経て, 平成11年より京都工芸繊維大学大学院工学科学研究科教授(情報・生産科学専攻)。計算機言語, 並列処理記述, HCI, ソフトウェア工学に関する研究に従事。IEEE-CS, ACM, 電子情報通信学会, 日本ソフトウェア科学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。