

저전력 멀티미디어 통신을 위한 전력 의식 움직임 추정 기법

정회원 이 성 수*

Power-Aware Motion Estimation for Low-Power Multimedia Communication

Seong-Soo Lee* Regular Member

요 약

본 논문에서는 저전력 멀티미디어 통신을 위한 새로운 전력 의식 움직임 추정 기법을 제안한다. 동영상 압축 기법에서 가장 많은 전력을 소모하는 것은 움직임 추정 기법인데, 일반적으로 성능이 우수한 기법일수록 전력 소모도 높다. 제안하는 움직임 추정 기법에서는 서로 다른 전력 소모와 성능을 가지는 여러 개의 움직임 추정 기법 중에서 연산량과 전력 소모의 절충을 고려하여 최적의 움직임 추정 기법을 실행 중에 적응적으로 선택한다. 제안하는 움직임 추정 기법은 현재 사용되는 대부분의 움직임 추정 기법에 쉽게 적용될 수 있으며, 추가되는 연산량이나 하드웨어 부담도 거의 없다. 모의 실험 결과에 따르면 제안하는 움직임 추정 기법은 기존의 움직임 추정 기법에 비교하였을 때 동일한 성능에서 전력 소모를 1/15.7~1/5.6으로 줄일 수 있었다.

Key Words : Motion Estimation, Low-Power, Power-Aware, Dynamic Voltage Scaling

ABSTRACT

In this paper, novel power-aware motion estimation is proposed for low-power multimedia communication. In the video compression, motion estimation dominates the total power consumption, where better performance usually requires more power consumption. Among several motion estimation algorithms with different performance and power, the proposed motion estimation adaptively selects the optimal algorithm during run-time, considering the trade-off between performance and power. The proposed motion estimation can be easily applied to various motion estimation algorithms with negligible computation or hardware overhead. According to simulation results, the proposed motion estimation reduces the power consumption to 1/15.7~1/5.6 without performance degradation, when compared to the conventional algorithms.

I. 서 론

최근 동영상 휴대 전화(mobile videophone), 입는 컴퓨터(wearable computer), 휴대용 웹 단말기(mobile web terminal) 등 멀티미디어 통신(mobile communication)의 중요성은 날로 증가하고 있다. 이러한 멀티미디어 통신을 VLSI로 구현할 때 중요

한 설계 목표의 하나가 전력 소모인데, 휴대 단말기에서 한 번 배터리를 충전했을 때 얼마나 오랫동안 사용할 수 있는지를 나타내는 연속 동작 가능 시간은 상업적인 성공을 결정하는 중요한 요소 중의 하나이기 때문이다^[1]. 그림 1(a)에서 보듯이 동영상 휴대 전화에서 멀티미디어 신호 처리의 연산량은 기존의 휴대 전화(cellular phone)에 비해 15배 이상

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 (sslee@e.ssu.ac.kr)

논문번호 : 030319-0801 접수일자 : 2003년 8월 1일

※본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌습니다.

증가한다. 이러한 연산량 증가는 즉각적으로 전력 소모의 증가를 초래하지만, 그림 1(b)에서 보듯이 전력 소모는 지속적으로 증가하는 반면에 배터리의 전력 용량은 산술적인 증가에 그치고 있어서^[1] 배터리 자체의 개량보다는 VLSI 시스템의 전력 소모를 줄이는 저소비전력 기술(low-power technology)이 집중적으로 연구되고 있다. 멀티미디어 VLSI 시스템에 있어서 칩 내부의 발열(heat dissipation)도 심각한 문제 중 하나이다^[1]. 연산량의 증가는 곧바로 전력 소모의 증가로 이어지는데, 발열량이 어느 수준을 넘으면 칩의 수명을 단축시키고, 성능 저하나 기능 이상, 심지어는 고장을 일으키기도 하기 때문이다. 그림 1 (c)에 따르면 적절한 저소비전력 기술이 개발되지 않는다면 2010년에는 단일 칩의 전력 소모가 200W를 넘게 될 전망이다므로, 그림 1 (d)와 같이 멀티미디어 VLSI 시스템의 전력 소모를 줄이기 위한 저전력 멀티미디어 신호 처리(low-power multimedia signal processing)가 절실히 요구되고 있다. 일반적으로 멀티미디어 통신에서 가장 전력 소모가 많은 것은 영상 부호화(video encoding)에 사용되는 움직임 추정(motion estimation)으로 알려져 있다. 그림 2는 동영상 휴대 전화에서의 전력 소모를 분석한 것인데, 동영상 휴대 전화의 멀티미디어 신호 처리에 필요한 전력 소모의 약 2/3가 움직임 추정에 사용되는 것을 볼 수 있다. 따라서 멀티미디어 통신이 실용화되기 위해서는 저전력 움직임 추정 기법의 개발이 필수적이다. 본 논문에서는 저전력 멀티미디어 통신을 위한 전력 의식 움직임 추정 기법(power-aware motion estimation)을 제안한다. 일반적으로 움직임 추정에는 서로 다른 연산량, 전력 소모 및 성능을 가진 여러 개의 알고리즘이 있는데, 제안하는 움직임 추정 기법에서는 전력 소모와 성능을 모두 고려하여 이들 알고리즘 중에서 최적의 알고리즘을 동적으로(dynamically) 선택하여 수행한다. 즉, 움직임 추정 기법 알고리즘이 멀티미디어 신호 처리가 실행되는 중에 일정 간격으로 전력 소모 및 성능 면에서 최적인 알고리즘으로 교체된다. 본 논문에서는 II장에서 공급 전압(supply voltage)을 동적으로 제어하는 저전력 기술, 즉 동적 전압 제어(dynamic voltage scaling)에 대해 설명하고, III장에서 동적 전압 제어에 기반한 전력 의식 움직임 추정 기법에 대해 제안한다. IV장에서 제안하는 전력 의식 움직임 추정 기법의 모의 실험 결과를 소개하고 V장에서 결론을 맺는다.

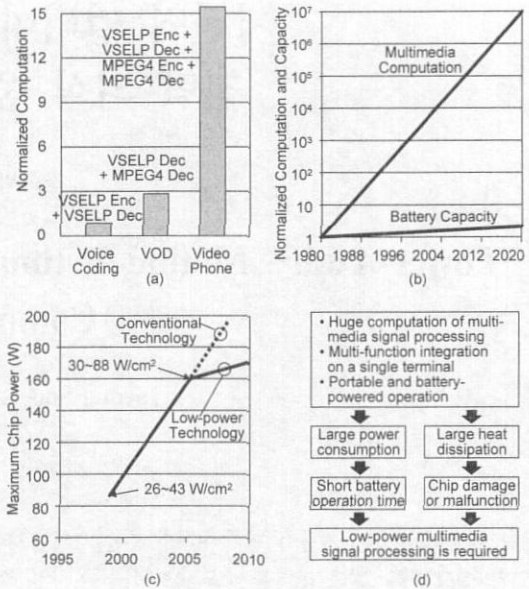


그림 1. 저전력 멀티미디어 신호 처리의 필요성. (a) 멀티미디어 신호 처리의 연산량. (b) 연산량과 배터리 전력 용량. (c) 칩의 전력 소모와 전력 밀도. (d) 저전력 멀티미디어 신호 처리의 필요성.

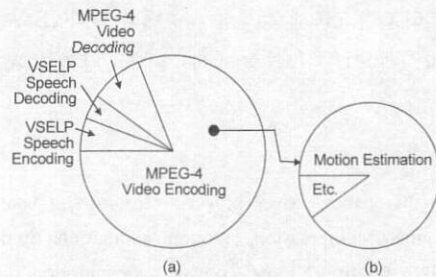


그림 2. 멀티미디어 신호 처리에서의 전력 소모. (a) 동영상 휴대 전화. (b) MPEG-4 영상 부호화.

II. 동적 전압 제어

일반적인 VLSI 시스템에서 CMOS 회로의 전력 소모 E 는 $E \propto A \times C_L \times N_{CYCLE} \times V_{DD}^2$ 로 주어지는데^[2], 이때 A 는 CMOS 회로의 평균 스위칭률(average switching activity factor), C_L 은 부하 커패시턴스(load capacitance), N_{CYCLE} 은 주어진 태스크를 수행하는데 필요한 사이클 수, V_{DD} 는 공급 전압을 나타낸다. 전력 소모가 공급 전압의 제곱에 비례하기 때문에 그림 3(a)에서 보듯이 공급 전압을 낮추는 것은 전력 소모를 줄이는 데 매우 효과적이지만, 공급 전압이 낮아짐에 따라 CMOS 회로의 지연 시간(delay)이 증가하기 때문에 무조건 공급 전압을 낮추기는 곤란하다. CMOS 회로의 지연 시간 T_D 는

$T_D \propto V_{DD}/(V_{DD}-V_T)^a$ ($a \sim 1.3$)로 주어지기 때문에^[3] 그림 3(a)에서 보듯이 공급 전압을 감소시키면 지연 시간이 증가하고, 이에 따라 클록 주파수가 감소하여 결과적으로 시스템의 처리 능력(throughput)이 떨어지게 된다. 여기서 V_{DD} 는 공급 전압, V_T 는 CMOS 트랜지스터의 문턱 전압(threshold voltage), a 는 속도 포화 계수(velocity saturation index)를 나타낸다.

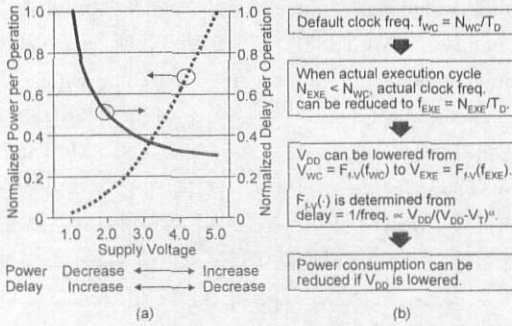


그림 3. 가변 공급 전압을 이용한 전력 소모 감소 (a) 공급 전압에 따른 전력 소모 및 지연 시간. (b) 공급 전압 감소에 따른 전력 소모 감소

실시간 시스템에서는 모든 태스크가 주어진 마감 시간(deadline) 이내에 끝나야 하며, 이를 위해서는 주어진 VLSI 시스템이 모든 태스크를 마감 시간에 맞춰 끝낼 수 있는 주파수보다 빠르게 동작할 수 있어야 한다. 즉, 태스크의 마감 시간을 T_D , 태스크를 수행하는데 필요한 최대 사이클 수인 최악 수행 사이클 수(worst-case execution cycle)를 N_{WC} 라고 하면 실시간 동작을 보장하는데 필요한 클록 주파수인 최악 수행 클록 주파수(worst-case clock frequency) f_{WC} 는 $f_{WC} = N_{WC}/T_D$ 가 되며, VLSI 시스템을 설계할 때는 f_{WC} 보다 빠른 클록 주파수로 동작할 수 있도록 설계하여야 한다. 주어진 VLSI 시스템이 어떠한 경우에도 실시간 동작을 만족하려면 클록 주파수가 f_{WC} 이상이 되도록 설계하여야 하지만, 이렇게 설계된 VLSI 시스템에서도 태스크의 수행 상태에 따라서는 대부분 실시간 동작을 유지하면서도 클록 주파수를 f_{WC} 보다 낮출 수 있다. 태스크를 수행하면서 실제 소요되는 사이클 수 N_{EXE} 는 N_{WC} 보다 작거나 같으며 대부분의 경우 N_{WC} 에 크게 못미친다. 따라서 태스크가 시작하기 전에 N_{EXE} 를 알 수 있다면 이론상으로는 클록 주파수를 $f_{EXE} = N_{EXE}/T_D$ 까지 낮출 수 있다. 실제로는 태스크를 시작하기 전에 N_{EXE} 를 아는 것이 불가능하지만, 태스크

의 수행 상태를 조심스럽게 살펴가며 클록 주파수를 제어한다면 태스크의 마감 시간을 넘기지 않으면서 클록 주파수를 평균적으로 f_{EXE} 에 가깝게 낮출 수 있다. 클록 주파수를 낮추면 이에 따라 공급 전압도 함께 낮출 수 있으며, 이러한 점을 이용하면 그림 3(b)와 같이 전력 소모를 줄일 수 있다. 이것이 동적 전압 제어^[4]의 기본 원리이다.

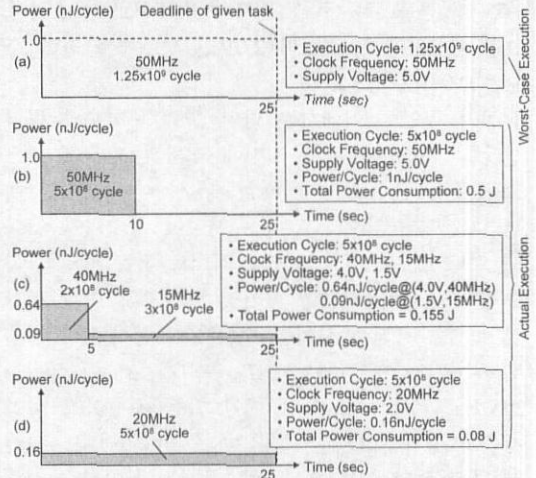


그림 4. 동적 전압 제어. (a) 1.25×10^9 사이클이 소요되는 최악 실행. (b)-(d) 5×10^8 사이클이 소요되는 실제 실행.

그림 4는 실제 예를 가지고 동적 전압 제어를 자세히 설명한 것이다. 그림 4에서처럼 어떤 태스크의 최악 수행 사이클 수가 $N_{WC} = 1.25 \times 10^9$ 사이클이고 마감 시간이 $T_D = 25$ 초라고 가정하자. 이때 이 태스크를 실시간으로 수행할 수 있는 VLSI 시스템의 클록 주파수는 $f_{WC} = 50\text{MHz}$ 가 된다. 이 VLSI 시스템의 공급 전압 V_{DD} 는 클록 주파수에 따라 달라지지만 하드웨어 구조 및 제조 공정에 크게 영향을 받는데, 여기에서는 클록 주파수가 50MHz, 40MHz, 20MHz, 15MHz일 때 각각 5.0V, 4.0V, 2.0V, 1.5V라고 가정하자. 전력 소모는 공급 전압의 제곱에 비례하므로, 이 태스크가 수행될 VLSI 시스템이 5.0V의 공급 전압에서 매 사이클 당 1.0nJ의 전력을 소모한다고 가정하면 공급 전압이 4.0V, 2.0V, 1.5V일 때 매 사이클 당 각각 0.64nJ, 0.16nJ, 0.09nJ의 전력을 소모한다. 이 태스크는 최악의 경우에 1.25×10^9 사이클만큼 수행되지만 대부분의 경우 이보다 훨씬 작은 사이클만큼 수행된다. 이 태스크가 실제로는 5×10^8 사이클만큼

수행된다고 가정하자. 클럭 주파수와 공급 전압이 50MHz와 5.0V로 고정되어 있는 경우, 이 VLSI 시스템은 그림 4(b)처럼 주어진 태스크를 10초에 끝낸 다음에 마감 시간까지 남은 15초 동안 동작을 정지하며, 이때의 전력 소모는 $1nJ/\text{사이클} \times 5 \times 10^8$ 사이클 = 0.5J이 된다. 이에 비해서 그림 4(c)처럼 클럭 주파수와 공급 전압이 처음 5초 동안에는 40MHz와 4.0V, 나머지 20초 동안에는 15MHz와 1.5V인 경우에는 전력 소모가 0.155J로 감소하며, 그림 4(d)처럼 20MHz와 2.0V인 경우에는 전력 소모가 0.08J로 감소한다.

동적 전압 제어에서는 단일 클럭 주파수와 공급 전압을 사용하여 마감 시간에 정확히 맞추어 태스크 수행을 끝내도록 할 때, 즉 $f_{OPT} = N_{EXE}/T_D$ 일 때 전력 소모가 최소가 된다는 사실이 증명되어 있다^[5]. 이때 f_{OPT} 는 전력 소모를 최소로 하는 단일 클럭 주파수, T_D 및 N_{EXE} 는 주어진 태스크의 마감 시간 및 실제 수행되는 사이클 수이다. 그림 4(d)의 경우 $N_{EXE} = 5 \times 10^8$ 사이클, $T_D = 25$ 초에서 $f_{OPT} = 20$ MHz, $V_{DD} = 2.0$ V의 단일 값을 사용하여 마감 시간에 정확히 맞추어 태스크 수행이 끝나므로 가장 큰 전력 감소를 보여준다. 문제는 동일한 태스크가 여러 번 수행되더라도 입력 데이터와 실행 경로가 달라지면 N_{EXE} 가 달라지기 때문에, 주어진 태스크의 실행이 끝나기 전에는 f_{OPT} 를 알기 어렵다는 점이다. 최근들어 태스크의 수행 상태를 조심스럽게 살펴서 클럭 주파수를 f_{OPT} 에 가깝게 낮추는 방법에 대해 여러 가지 연구^{[6]-[9]}가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 실행중 전압 도약 기법(run-time voltage hopping: RVH)^[9]을 기반으로 한 전력 의식 움직임 추정 기법을 제안한다. RVH는 태스크를 여러 개의 시간 슬롯(timeslot)으로 나누고, 시간 슬롯을 차례로 실행시켜가며 이전 시간 슬롯의 수행 시간을 참조하여 현재 시간 슬롯의 클럭 주파수와 공급 전압을 결정하는 방법이다. 움직임 추정은 대부분 매크로블록(macroblock) 별로 수행되기 때문에 몇 개의 매크로블록을 묶어서 하나의 시간 슬롯에 할당하면 손쉽게 RVH를 움직임 추정에 적용할 수 있다.

III. 전력 의식 움직임 추정 기법

1. 전력 소모와 화질의 절충

대부분의 VLSI 시스템에서는 성능을 높일수록

더 많은 연산량이 요구되기 때문에, 성능과 연산량 사이에는 일종의 절충(trade-off) 관계가 성립한다. 멀티미디어 신호처리에서는 서로 대체가 가능한(alternative) 여러 개의 알고리즘이 있는 경우가 많고, 이들 알고리즘의 성능과 연산량이 서로 다르기 때문에, 실행중에 알고리즘을 수시로 전환(switch)해 가면서 성능과 연산량을 최적화할 수 있다. 예를 들어 MPEG-4 영상 부호화^[10]에서는 3단계 탐색 기법(three-step search: TSS)^[11], 2후보 3단계 탐색 기법(multi-candidate three-step search with 2 candidates: MCTSS2)^[12], 3후보 3단계 탐색 기법(multi-candidate three-step search with 3 candidates: MCTSS3)^[12] 등 여러 개의 움직임 추정 알고리즘을 사용할 수 있는데, TSS, MCTSS2, MCTSS3 순서로 연산량이 커지고 성능도 좋아진다. 따라서 MPEG-4 영상 부호화의 연산량이 증가하면 움직임 추정 알고리즘을 TSS로 전환하여 전체 연산량을 줄일 수 있고, 화질이 나빠지면 MCTSS2나 MCTSS3로 전환하여 화질을 개선할 수 있다. 일반적으로 연산량이 커지면 전력 소모도 커지기 때문에, 이 방법을 성능과 연산량 대신에 성능과 전력 소모에도 적용할 수 있다. 위에서 설명한 MPEG-4 영상 부호화에서도 연산량이 커지면 전력 소모를 줄이기 위해서 TSS로 전환하고, 연산량이 작아지면 성능을 높이기 위해서 MCTSS2나 MCTSS3로 전환할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 전력 소모와 화질의 절충을 기반으로 하는 저전력 움직임 추정 기법인 전력 의식 움직임 추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 다양한 목적에 사용될 수 있도록 세 가지 동작 모드, 즉 전력-화질 절충 모드, 최소 전력 모드, 최대 화질 모드를 가진다. 전력-화질 절충 모드에서는 주어진 전력 예산(power budget)보다 전력 소모가 적은 범위 내에서 가장 화질이 좋은 움직임 추정 알고리즘을 적응적으로(adaptively) 선택하며, 전력 예산을 조절함에 따라 원하는 전력 소모 및 화질 수준을 얻을 수 있다. 최소 전력 모드에서는 가장 전력 소모가 적은 알고리즘을, 최대 화질 모드에서는 가장 화질이 좋은 알고리즘을 선택한다. 어떤 움직임 추정 알고리즘을 선택하느냐 하는 것은 사용 목적에도 큰 영향을 받는다. 이를테면 무의촌에서 원격 의료 시스템을 사용할 때라면 전력 소모가 아무리 크더라도 화질이 가장 좋은 MCTSS3를 선택할 것이고, 지리산에서 반달곰을 추적하기 위해 수백 개의 영상 센서 네트워크를 설치했다면 배터리

교체의 어려움 때문에 전력 소모가 가장 작은 TSS를 선택할 것이다. 그렇다면 일상생활에 널리 사용될 동영상 휴대 전화에서는 어떠한 움직임 추정 알고리즘을 선택할 것인가 하는 문제에 부착한다. 이 경우, 상식적으로 전력 소모와 화질을 모두 고려하여 적당한 화질 (또는 전력 소모) 기준을 정하고, 화질이 그 기준 이상이 되도록 (또는 전력 소모가 그 기준 이하가 되도록) 조절할 것이다. 본 논문에서는 복잡하고 많은 계산이 필요한 화질 대신에 수행 사이클 수와 공급 전압으로부터 간단하게 계산할 수 있는 전력 소모를 기준으로 사용하였다.

2. 최적 알고리즘 선택

실시간 멀티미디어 VLSI 시스템에서 움직임 추정을 수행하는 태스크에 대해 다음과 같이 가정한다.

- (1) 최대 클럭 주파수 f_{CLK} 와 이에 따른 최대 공급 전압 V_{DD} 에서 태스크가 최악 수행 사이클 수로 수행 될 때의 수행 시간과 전력 소모를 각각 최악 수행 시간(worst-case execution time: WCET) 및 최악 전력 소모(worst-case power consumption: WCPC)로 정의한다.
- (2) 서로 1:1 전환이 가능한 M 개의 움직임 추정 알고리즘 $ALG_i(i=1..M)$ 이 존재하며, i 가 증가하는 순서대로 연산량, 전력 소모 및 화질이 증가한다. ALG_M 을 사용할 때 태스크 전체의 WCET는 가장 높은 연산량으로 가장 오랜 시간동안 연산을 수행하는 경우를 의미하며 T_{WC} 로 표기하고, 이때의 전력 소모는 P_{WC} 로 표기한다.
- (3) 태스크는 동일한 개수의 매크로블록을 처리하는 N 개의 시간 슬롯(timeslot) $SL_k(k=1..N)$ 으로 나뉘며, k 가 증가하는 순서대로 수행된다. ALG_i 를 사용할 때 SL_k 의 WCET와 WCPC는 k 에 관계없이 일정한 값 T_{WCI} 와 P_{WCI} 를 가지며, 특히 ALG_M 을 사용할 때 SL_k 의 WCET는 $T_{WCM} = T_{WCI}/N = T_{SL}$ 로 정의한다.
- (4) ALG_i 를 사용할 때의 WCET인 T_{WCI} 를 ALG_M 에 대해 정규화한 값, 즉 $\lambda_{ALGI} = T_{WCI}/T_{WCM} = T_{WCI}/T_{SL}$ ($0 < \lambda_{ALGI} \leq 1$, $\lambda_{ALGM} = 1$)을 ALG_i 의 정규화된 연산 복잡도(normalized computational complexity)로 정의한다.
- (5) 태스크의 마감 시간(deadline) T_D , 수행 주기(period) T_P 는 최악 수행 시간 T_{WC} 와 같다.

가정 (1)-(4)는 대부분의 실시간 멀티미디어 VLSI 시스템에서 큰 문제없이 성립한다. 가정 (5)는 특별한 경우에만 성립하지만, 임의의 T_D , T_P , T_{WC} 를 갖는 태스크를 동일한 T_D , T_P , T_{WC} 를 갖는 태스크로 손쉽게 변환할 수 있다는 것이 알려져 있다^[13].

제안하는 전력 의식 움직임 추정 기법에서는 $T_{CON} = T_D = T_{WC}$ 로 주어지는 시간 제약 조건(time constraint)과 $P_{BGT} = \rho \times P_{WC}$ ($0 < \rho \leq 1$)로 설정된 전력 예산(power budget)을 함께 사용한다. 즉, 태스크의 수행 시간과 전력 소모는 각각 T_{CON} 와 P_{BGT} 를 초과하지 못하며, 하나의 시간 슬롯에는 각각 $T_{SL} = T_{CON}/N = T_{WC}/N$, $P_{SL} = P_{CON}/N = \rho \times P_{WC}/N$ 만큼의 수행 시간과 전력 소모가 할당된다. 여기에서 목표 전력 소모(P_{BGT})를 이론상의 최대 전력 소모(P_{WC})에 대해 정규화한 값, 즉 $\rho = P_{BGT}/P_{WC}$ 을 정규화된 전력 예산(normalized power budget)으로 정의한다. 시간 제약 조건은 실시간 시스템의 파라미터로부터 주어지기 때문에 변점이 불가능한 값이고, 전력 예산만이 사용자가 임의로 조절이 가능하다. 제안하는 전력 의식 움직임 추정 기법의 핵심은 시간 제약 조건과 전력 예산을 지키면서 가장 높은 화질을 내는 최적 알고리즘 ALG_{OPT} 를 수행중에 매 시간 슬롯마다 적응적으로 결정하는 방법이며, 다음과 같은 3단계로 나뉘어진다. 단계 (1)은 프로그래밍 및 컴파일 시에 이루어지며, 단계 (2)-(3)은 수행중에 이루어진다. 최소 전력 모드와 최대 화질 모드는 단계 (1)-(2)를 사용하고, 전력-화질 절충 모드는 단계 (1)-(3)을 사용한다. 그림 5는 단계 (1)-(3)을 자세히 설명한 것이다.

- (1) 초기화: 정규화된 전력 예산 ρ 값을 응용 목적에 맞추어 결정한다. 이를테면 동영상 휴대 전화를 사용할 때 사적인 통화를 한다면 전력 소모 감소를 위해 ρ 값을 낮게 하고, 중요한 거래처와 상담을 한다면 화질 향상을 위해 ρ 값을 높게 한다. 프로그래밍 및 컴파일 시에 태스크를 N 개의 시간 슬롯으로 나누고, T_{SL} , P_{SL} , λ_{ALGI} 를 계산하여 프로그램 코드 안에 그 값을 내장한다. 이들 값은 소스 코드로부터 정적 분석(static analysis)^[14]을 수행하거나 파일럿 프로그램을 수행하고 이를 실측함으로써 쉽게 얻을 수 있다.
- (2) 시간 제약 조건에 의한 후보 알고리즘 결정: 그림 5에서 보듯이 k 번째 시간 슬롯 SL_k 을 수행하는데 걸리는 시간은 이 시간 슬롯의 목표 수행 시간(target execution time) T_{TAR}

$= k \times T_{SL} - T_{ACCK-1}$ 을 초과해서는 안된다(①). 이때 T_{ACCK-1} 은 태스크 시작 때부터 $(k-1)$ 번째 시간 슬롯 SL_{k-1} 을 끝낼 때까지의 누적 실행 시간(accumulated execution time)을 말한다. 이것은 ALG_i 가 주어진 시간 제약 조건을 만족시키면서 SL_k 에 적용될 수 있으려면 ALG_i 가 수행될 때의 최악 수행 시간인 $T_{WCi} = T_{SL} \times \lambda_{ALGi}$ 가 T_{TARK} 를 초과해서는 안된다는 것을 의미한다(②). 그림 5의 예에서는 $T_{WC1}, T_{WC2}, T_{WC3} \leq T_{TARK}$ 이기 때문에, 시간 제약 조건을 만족하는 후보 알고리즘은 ALG_1, ALG_2, ALG_3 가 된다(③). 이때, 최소 전력 모드와 최대 화질 모드에서는 전력 예산을 고려하지 않고 그림 5의 예와 같이 시간 제약 조건을 만족하는 후보 알고리즘 중에서 전력 소모가 가장 최소가 되는 ALG_1 과 화질이 가장 우수한 ALG_3 를 최적 알고리즘 ALG_{OPT} 로 결정한다(④). ALG_i 를 수행하는데 적용되는 클럭 주파수 f_{ALGi} 는 ALG_i 의 최악 수행 사이클 수인 $f_{CLK} \times T_{WCi}$ 사이클을 T_{TARK} 시간 내에 끝마쳐야 하므로 $f_{ALGi} = f_{CLK} \times (T_{WCi} / T_{TARK})$ 가 되며, ALG_i 를 수행하는데 적용되는 공급 전압 V_{ALGi} 는 $1/f_{ALGi} = T_D \propto V_{ALGi} / (V_{ALGi} - V_T)^a$ [3] ($a \sim 1.3$) 식으로부터 $V_{ALGi} = F_{FV}(f_{ALGi})$ 의 $F_{FV}(\cdot)$ 식을 구할 수 있다(⑤).

- (3) 전력 예산에 의한 최적 알고리즘 결정: 전력-화질 절충 모드에서는 전력 예산을 함께 적용하여 ALG_{OPT} 를 결정해야 한다. 이때, 그림 5에서 보듯이 단계 (2)와 마찬가지로 k 번째 시간 슬롯 SL_k 을 수행하는데 소모되는 전력은 이 시간 슬롯의 목표 전력 소모 (target power consumption) $P_{TARK} = k \times P_{SL} - P_{ACCK-1}$ 을 초과해서는 안된다(⑥). 이때, P_{ACCK-1} 은 태스크 시작 때부터 $(k-1)$ 번째 시간 슬롯 SL_{k-1} 을 끝낼 때까지의 누적 전력 소모 (accumulated power consumption)를 말한다. 이것은 ALG_i 가 주어진 전력 예산을 만족시키면서 SL_k 에 적용될 수 있으려면 ALG_i 가 수행될 때의 최악 전력 소모인 $P_{WCi} = P_{SL} \times \lambda_{ALGi} \times (V_{ALGi} / V_{DD})^2$ 가 P_{TARK} 를 초과해서는 안된다는 것을 의미한다(⑦). P_{WCi} 의 계산은 (f_{ALGi}, V_{ALGi}) 로 수행시킬 때의 전력 소모 P_{WCi} 와 (f_{CLK}, V_{DD}) 로 수행시킬 때의 전력 소모 P_{SL} 의 비로부터 $P_{WCi} / P_{SL} = (V_{ALGi}^2 \times T_{ALGi}) / (V_{DD}^2 \times T_{SL}) = \lambda_{ALGi} \times (V_{ALGi} / V_{DD})^2$ 로부터 얻어진다.

그림 5의 예에서는 $P_{WC1}, P_{WC2} \leq P_{TARK}$ 이기 때문에 전력 예산을 만족하는 후보 알고리즘 중에서 화질이 가장 좋은 ALG_2 를 최적 알고리즘 ALG_{OPT} 로 결정한다(⑧).

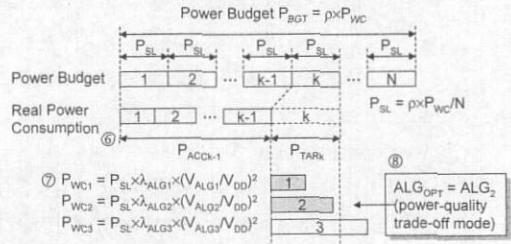
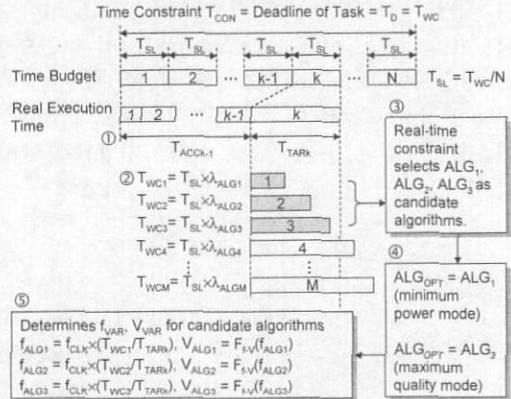


그림 5. 전력 의식 움직임 추정 기법.

IV. 모의 실험 결과

본 논문에서는 MPEG-4 SP@L2 영상 부호화에 전력 의식 움직임 추정 기법을 적용하여 모의 실험을 수행하였으며, 모의 실험 조건은 표 1과 같다. 사용된 알고리즘은 3단계 탐색 기법(three-step search: TSS)^[11], 2후보 3단계 탐색 기법(multi-candidate three-step search with 2 candidates: MCTSS2)^[12], 3후보 3단계 탐색 기법(multi-candidate three-step search with 3 candidates: MCTSS3)^[12]이며, MCTSS3에서 TSS로 전환하면 전력 소모는 약 1/5로 줄어드는 대신에 화질이 나빠지며, TSS에서 MCTSS3로 전환할 때에는 화질이 0.36dB만큼 개선되는 대신에 전력 소모가 증가한다. 최적 알고리즘을 선택하고 클럭 속도 및 공급 전압을 계산하는 부분은 영상 부호화 프로그램 내에 내장되었으며, 추가로 들어가는 연산량을

Intel VTune Performance Analyzer를 사용하여 측정해본 결과, 전체 연산량의 0.01%이하로서 무시할 만한 수준임을 알 수 있었다.

표 1. 모의 실험 조건

움직임 추정 알고리즘	(ALG1)	(ALG2)	(ALG3)
사용 알고리즘	TSS	MCTSS2	MTCSS3
PSNR 화질	31.51dB	31.79dB	31.87dB
정규화된 연산 복잡도 (λ_{ALGI})	0.59	0.79	1.00
정규화된 전력 소모 ($\lambda_{ALGI} \times V_{ALGI}^2 \times V_{DD}^2$)	0.20	0.46	1.00
영상 부호화			
영상 부호화 방식	MPEG-4 SP@L2		
영상 부호화 모델	MPEG-4 VM8		
영상 형식	CIF		
비트열 전송 속도	128Kbit/s		
사용 영상	Foreman, Carphone		
프로세서 파라미터			
클럭 속도(f_{CLK})	500MHz		
공급 전압(V_{DD})	2.5V		
문턱 전압(V_T)	0.5V		
속도 포화 계수(α)	1.3		
시간 슬롯			
시간 슬롯 수(N)	99		
시간 슬롯 내의 매크로블록 수	4		
시간 슬롯의 최대 수행 시간(T_{SL})	673 μ s		
시간 슬롯의 최대 전력 소모(P_{SL})	5.4 μ J		

그림 6은 전력 의식 움직임 추정 기법의 전력 소모와 PSNR 화질을 나타낸 것이다. P_{FIX} 는 클럭 주파수와 공급 전압이 $f_{CLK} = 500MHz$ 와 $V_{DD} = 2.5V$ 로 고정된 상태에서 MCTSS3를 적용한 기준 전력 소모이고 P_{PROP} 는 전력 의식 움직임 추정 기법에서 클럭 주파수와 공급 전압을 제어할 때의 전력 소모이다. 그림 6에서 보듯이 제안하는 기법의 전력 소모는 동일한 PSNR 화질에서 기존에 비해 "Foreman" 동영상을 처리할 때 1/14.4~1/5.6, "Carphone" 동영상을 처리할 때 1/15.7~1/5.9에 불과하며, ρ 를 조절함에 따라서 전력 소모와 성능을 원하는 수준으로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 정규화된 전력 예산 ρ 가 일정값보다 작으면 전력-화

질 절충 모드임에도 불구하고 전력 소모가 제일 작은 알고리즘밖에 선택할 수가 없으므로 최소 전력 모드로 동작하게 된다. 마찬가지로 ρ 가 일정값보다 크면 전력 소모가 제일 큰 알고리즘도 아무런 제약을 받지 않고 선택할 수 있으므로 최대 화질 모드로 동작하게 된다.

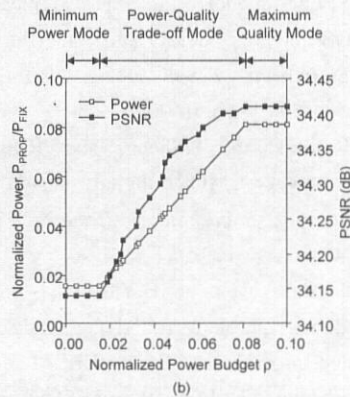
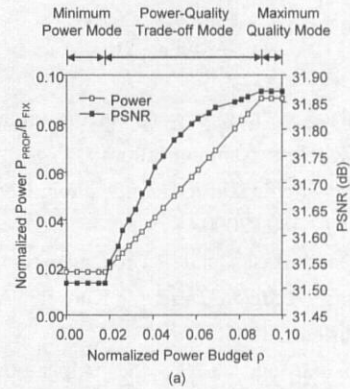


그림 6. 전력 의식 움직임 추정 기법의 전력 소모와 PSNR 화질. (a) "Foreman" 동영상. (b) "Carphone" 동영상.

V. 결론

본 논문에서는 전력 소모와 화질의 절충을 이용한 새로운 저전력 움직임 추정 기법인 전력 의식 움직임 추정 기법을 제안한다. 제안하는 기법에서는 서로 다른 전력 소모와 화질을 가지는 여러 가지의 움직임 추정 알고리즘 중에서 최적의 알고리즘을 실행 중에 적응적으로 선택해주며, 전력 예산 값을 조절함에 따라서 전력 소모 및 화질을 원하는 수준으로 제어할 수 있다. 제안하는 기법은 다양한 목적에 사용될 수 있도록 전력-화질 절충 모드, 최소 전력 모드, 최대 화질 모드를 가지며, 전력-화질 절충 모드에서는 주어진 전력 예산보다 전력 소모가 적

은 범위 내에서 가장 화질이 좋은 움직임 추정 알고리즘을, 최소 전력 모드에서는 가장 전력 소모가 적은 알고리즘을, 최대 화질 모드에서는 가장 화질이 좋은 알고리즘을 선택한다. 제안하는 기법을 MPEG-4 영상 부호화에 적용한 모의 실험에서는 동일한 PSNR 화질에서 전력 소모를 1/15.7 ~ 1/5.6으로 줄일 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] J.Rabaey, "Low-power silicon architectures for wireless communications," *Proc. Asia and South Pacific Design Automation Conference*, pp. 379-380, 2000.

[2] A.Chandrakasan and R.Brodersen, *Low Power Digital CMOS Design*, Kluwer Academic Publishers, 1995.

[3] T.Sakurai and A.Newton, "Alpha-power law MOSFET model and its application to CMOS inverter delay and other formulas," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 25(2), pp. 584-594, Apr. 1990.

[4] A.Chandrakasan, S.Sheng, and R.Brodersen, "Low-power CMOS digital design," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, 27(4) pp. 473-484, Apr. 1992.

[5] T.Ishihara and H.Yasuura, "Voltage scheduling problem for dynamically variable voltage processors," *Proc. IEEE International Symposium on Low Power Electronics and Design*, pp. 197-202, 1998.

[6] F.Yao, A.Demers, and S.Shenker, "A scheduling model for reduced CPU energy," *Proc. IEEE Annual Foundations of Computer Science*, pp. 374-382, 1995.

[7] I.Hong, D.Kirovski, G.Qu, M.Potkonjak, and M.Srivastava, "Power optimization of variable-voltage core-based systems," *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Curciuts and Systems*, 18(12) pp. 1702-1714, Dec. 1999.

[8] Y.Shin and K.Choi, "Power conscious fixed priority scheduling for hard real-time systems," *Proc. Design Automation Conference*, pp. 134-139, 1999.

[9] S.Lee and T.Sakurai, "Run-time voltage hopping for low-power real-time systems," *Proc. Design Automation Conference*, pp. 806-809, 2000.

[10] ISO/IEC JTC1/SC29/WG11 14496-2, "Coding of audio-visual objects: Visual," Oct. 1998.

[11] T.Koga, K.Ilnuma, K.Hirano, Y.Iijima, and T.Ishiguro, "Motion compensated interframe coding for video conferencing," *Proc. National Telecommunication Conference*, pp. G.5.3.1-5.3.5, 1981.

[12] H.Jong, L.Chen, and T.Chiueh, "Accuracy improvement and cost reduction of 3-step search block matching algorithm for video coding," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 4(1) pp. 88-90, Jan. 1994.

[13] C.Liu and J.Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard real-time environment," *Journal of ACM*, 20(1) pp. 46-61, Jan. 1973.

[14] S.Lim, Y.Bae, G.Jang, B.Rhee, S.Min, C.Park, H.Shin, K.Park, and C.Kim, "An accurate worst case timing analysis for RISC processors," *Proc. IEEE Real-time Systems Symposium*, pp. 97-108, 1994.

이 성 수(Seong-Soo Lee)

정회원



1991년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사
 1993년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사
 1998년 8월 : 서울대학교 전기공학부 박사

1998년 11월~2000년 3월 : Research Associate, University of Tokyo
 2000년 4월~2002년 8월 : 이화여자대학교 정보통신학과 연구전임강사
 2002년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 전임강사

<주관심분야> 저전력 및 멀티미디어 SoC 설계, 저전력 및 멀티미디어 알고리즘 등