

모바일 초음파 영상신호처리를 위한 매니코어 프로세서 디자인 공간 탐색

최병국, 김종면
울산대학교 전기공학부
e-mail:jongmyon.kim@gmail.com

Design Space Exploration of Many-Core Processors for Mobile Ultrasound Image Signal Processing

Byong-Kook Choi, Jong-Myon Kim
Electrical Engineering, Ulsan University

요 약

본 논문에서는 모바일 초음파(mobile ultrasound) 영상신호의 빔포밍 알고리즘에서 요구되는 고성능 및 저전력을 만족시키는 매니코어 프로세서에 대한 디자인 공간 탐색 방법을 소개한다. 매니코어 프로세서의 디자인 공간 탐색을 위해 매니코어의 각 프로세싱 엘리먼트(Processing Element, PE)당 초음파 영상신호 데이터의 수를 변화시키는 실험을 통해 실행시간, 에너지 효율 및 시스템 면적 효율을 측정하고, 측정된 결과를 바탕으로 최적의 매니코어 프로세서 구조를 선택하였다.

1. 서론

초음파를 이용하여 인체의 단면 영상을 얻는 초음파 영상진단장치는 인체에 해가 없을 뿐만 아니라 실시간 영상이 가능한 장점으로 오래 전부터 많은 연구가 진행되어 왔다. 이와 같은 초음파 영상진단장치의 장점을 극대화한 것이 모바일 초음파(handheld ultrasound)이다[1]. 특히, 초음파 영상의 질을 결정하는 가장 중요한 요소 중 하나인 측방향 해상도를 향상시키는 연구가 많이 진행되었다. 측방향 해상도는 초음파 빔의 포커싱(Focusing)에 의해 결정되기 때문에 많은 포커싱 방법들이 등장하였다. 초음파 신호는 서로 다른 매질의 경계면에 반사되어 되돌아오는 과정에서 지연시간이 발생해 동일 시점의 신호들이 서로 다른 시간에 도달한다. 따라서 반사된 신호는 포커싱 과정을 통해 정렬할 필요성이 있는데 이러한 정렬 과정을 빔포밍(Beamforming)이라 한다[1]. 하지만 포커싱을 위한 빔포밍 기법은 상당한 양의 연산과 입출력 처리를 요구한다. 또한 모바일 초음파의 경우, 고성능뿐만 아니라 저전력에 대한 요구도 만족시켜야 한다.

주문형반도체(Application-Specific Integrated Circuit, ASIC)는 이러한 모바일 멀티미디어에서 요구되는 고성능, 저전력을 충족시킬 수 있지만 다양한 애플리케이션에서 요구되는 Programmability와 Flexibility를 만족시키지 못한다. 반면 범용 프로세서(General-Purpose Processor, GPP)나 디지털 신호처리기(Digital Signal Processor, DSP)는 다양한 애플리케이션에 대해 충분한 프로그램 능력과 유연성을 제공한다. 하지만, 멀티미디어 애플리케이션에서 요구하는 높은 레벨의 성능을 만족시키지 못하는

데, 이는 GPP나 DSP 구조 특성상 멀티미디어 애플리케이션에 내재한 고도의 병렬성(Massive Parallelism)을 활용하지 못하기 때문이다.

초음파 빔포밍 알고리즘을 포함한 멀티미디어 애플리케이션에서 요구되는 고성능 및 저전력을 충족시킬 수 있는 프로세서 모델 중에서 SIMD 기반 매니코어 프로세서 아키텍처가 대안으로 부각되고 있다[2][3]. Instruction-Level이나 Thread-Level 프로세서들은 실리콘 면적을 Multiported register file, Cache, Deep pipelined 기능 유닛 등으로 사용하는 반면, SIMD 기반 매니코어 프로세서는 수백 개의 저비용 프로세싱 엘리먼트(Processing Element, PE)를 이용하여 고성능을 추구하고 동시에 저장장소와 데이터 통신 요구를 최소화하기 위해 PE와 데이터 입·출력을 동일위치에 배치함으로써 저전력을 만족시킨다. 특히, SIMD기반 매니코어 프로세서는 Locality나 Regularity가 있는 2차원 패턴의 이미지나 비디오 픽셀 처리에 있어서 최적의 프로세서 구조이다.

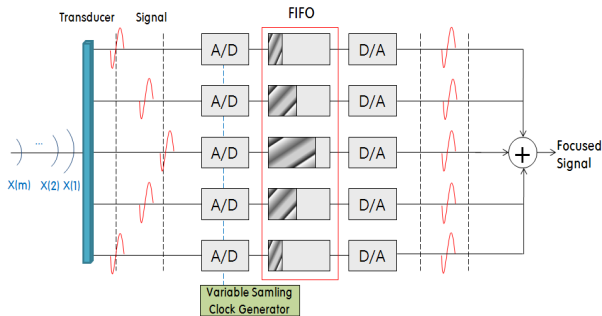
프로세서는 더 이상 동작 주파수를 높이는 방법이 아닌 다수의 프로세서를 집적하는 매니코어 프로세서로 기술 발전이 이루어지고 있다. 최근 2, 4, 8개의 프로세서 코어를 넘어 64, 128개 이상의 프로세서를 집적한 대규모 데이터 처리 및 과학 연산용 고성능 프로세서들이 개발되고 있다. 그러나 매니코어 프로세서에 대한 디자인 공간 탐색 방법론에 대한 연구는 희박하다.

본 논문에서는 매니코어 프로세서의 디자인 공간 탐색을 위해 매니코어의 각 프로세싱 엘리먼트당 초음파 영상신호 데이터의 수를 변화시키는 실험을 통해 실행시간, 에

너지 효율 및 시스템 면적 효율을 측정하고, 측정된 결과를 바탕으로 최적의 매니코어 프로세서 구조를 선택하였다. 동일한 130nm 테크놀로지와 130MHz 클럭 주파수를 사용하여 일곱 가지의 PE 구조(PEs=4, 16, 64, 256, 1024, 4096, 16384)에 대해 모의 실험한 결과, 에너지 효율은 PE 수가 4096개, 시스템 면적 효율은 PE 수가 1024개일 때 가장 높은 효율을 보였다. 또한 PE 개수가 4096인 매니코어 아키텍처는 초음파 영상장치에서 가장 많이 사용되는 TI DSP C6416와 비교하여 에너지 효율에서 46배, 시스템 면적 효율에서 10배의 향상을 보였다.

2. 초음파 신호의 빔포밍 기법

초음파 영상진단 시스템에서 반사된 초음파 신호는 내장된 신호처리 프로세서를 이용하여 포커싱(Focusing)을 위한 빔포밍 기법을 수행한다. 트랜스듀서에서 같은 시간에 전달된 초음파 신호가 인체를 통과하면서 서로 다른 매질로 이루어진 경계면에 반사되어 다시 트랜스듀서로 되돌아온다. 반사되어 돌아오는 과정에서 지연시간이 발생해 서로 다른 시간에 되돌아오게 된다. 같은 시점에 반사된 초음파 신호가 서로 다른 지연시간을 가지므로 그 지연시간만큼 보상해주는 기법을 빔포밍이라 한다. (그림 1)은 빔포밍 기법 중 각 채널(Channel)의 샘플링 클럭(Sampling clock)에 각각 적당한 시간지연을 가한 후, FIFO (First-In First-Out)와 덧셈기(Adder)를 통해 포커싱이 수행되는 PSDF(Pipelined Sampling Delay Focusing)기법의 블록 다이어그램을 보여준다.



(그림 1) PSDF 기법의 블록 다이어그램

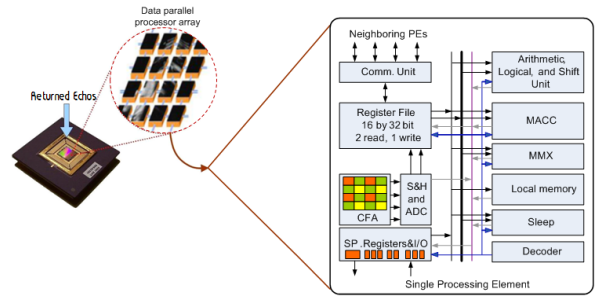
3. 빔포밍 기법을 위한 매니코어 프로세서 구조

본 논문에서 사용한 SIMD 기반 매니코어 프로세서의 블록도는 (그림 2)와 같다. SIMD 기반 매니코어 프로세서는 여러 개의 PE와 이를 제어하는 ACU로 구성된다. 데이터가 각 PE에 일정하게 분배되면 PE들은 메쉬 배열 구조에서 명령어들을 동시에 수행하며, 각 PE는 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 32비트 폭의 16개 3포트 범용 레지스터,
- 기본적인 산술/논리 연산을 수행하는 ALU,
- 64비트 곱셈 및 누산기(Multiply accumulator),
- 멀티 비트 산술/논리 시프트 연산을 수행하는 배럴 시

프트(Barrel shifter),

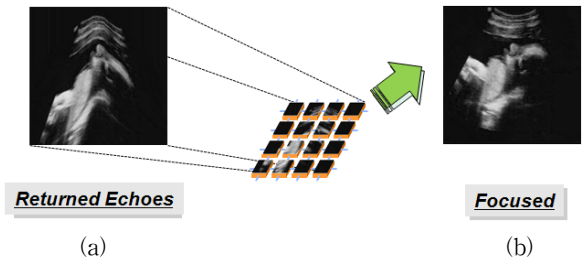
- 지역 정보를 이용해 각 PE의 활성화/비활성을 위한 SLEEP 유닛,
- 이웃하는 PE간 데이터 통신을 위한 NEWS (North-East-West-South) 네트워크 및 직렬 I/O유닛.



(그림 2) SIMD 기반 매니코어 프로세서와 프로세싱 엘리먼트

4. 매니코어 프로세서를 이용한 빔포밍 기법 결과 영상

(그림 3)은 SIMD기반 매니코어 프로세서가 반사된 초음파 영상 신호를 입력받아 빔포밍 알고리즘을 수행한 결과 이미지를 보여 준다. 그림 3(a)는 반사된 초음파 영상 신호가 지연시간으로 인해 영상이 휘어진 형태로 나타나며, 그림 3(b)는 매니코어 프로세서를 이용하여 PSDF 기법을 수행 후 포커싱된 결과 이미지를 보여준다.



(그림 3) SIMD 기반 매니코어 프로세서를 이용한 빔포밍 기법의 결과: (a) 반사된 이미지, (b) 포커싱된 결과 이미지

5. 다양한 형태의 매니코어 프로세서에 대한 파라미터 및 성능 분석 지표

<표 1>은 모바일 초음파 영상신호의 빔포밍 기법을 위한 최적의 매니코어 아키텍처를 찾기 위해 모델링된 일곱 가지 PE 아키텍처의 파라미터를 보여준다, 성능분석을 위해 SIMD기반 매니코어 프로세서용 정밀 사이클(Cycle-accurate) 시뮬레이터를 사용하였다. 초음파 신호의 빔포밍 알고리즘을 수행하기 위해 다수의 프로세싱 엘리먼트를 메쉬 구조로 구성하였으며, 각각의 프로세싱 엘리먼트는 자신에게 균일하게 분배된 초음파 영상 신호를 동시에 처리한다. 모델링된 모든 PE 아키텍처는 동일한 130nm 테크놀로지와 130MHz 클럭 주파수를 사용하여 시뮬레이션 하였다.

<표 1> 모델링된 매니코어 프로세서의 파라미터

Parameter	Value						
Number of PEs	4	16	64	256	1024	4096	16384
Pixels/PE	16384	4096	1024	256	64	16	4
Memory/PE [32-bit Word]	16384	4096	1024	256	64	16	4
VLSI Technology	130nm						
Clock Frequency	130MHz						
Interconnection Network	Mesh						
IntALU/intMUL/BarreShift/intVACC/Corrm	1/1/1/1/1						

<표 2>는 모델링한 매니코어 아키텍처의 성능을 평가하기 위한 세 가지 성능평가 지표를 보여준다[4]. 실행 시간 (Execution time)은 빔포밍 알고리즘이 수행되는 시간을 나타내며, 에너지 효율(Energy efficiency)은 소비된 에너지당 처리량을, 시스템 면적 효율(Area efficiency)은 단위 면적당 처리량을 나타낸다.

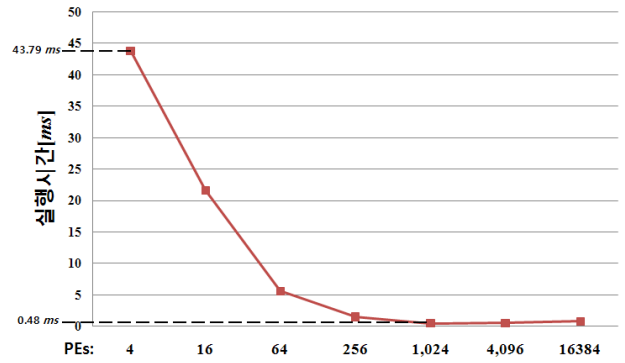
<표 2> 모델링된 매니코어 프로세서의 성능평가 지표

실행시간	$t_{exec} = C/f_{clk}$
에너지 효율	$\eta_E = \frac{1}{t_{exec} \cdot Energy} \left[\frac{1}{s \cdot Joules} \right]$
시스템 면적 효율	$\eta_A = \frac{1}{t_{exec} \cdot Area} \left[\frac{1}{s \cdot mm^2} \right]$

여기서 C는 사이클 수, fclk는 클럭 주파수, Area는 시스템의 단위 면적(mm²), Energy는 130nm 공장에서 소비된 에너지(Joules)를 나타낸다.

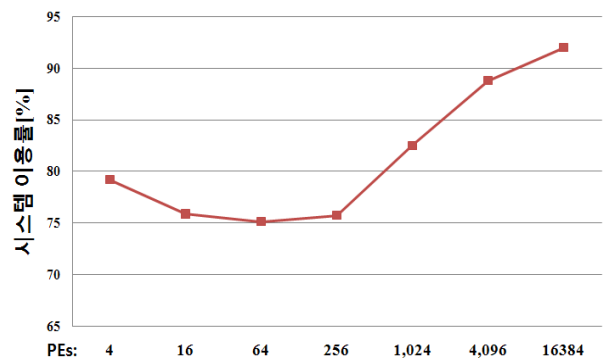
6. 성능 분석

(그림 4)는 서로 다른 PE 구성에 따른 실행 시간을 보인다. 예상한 바와 같이, PE의 수가 증가할수록 실행 시간이 감소함을 알 수 있다. PE 수가 256개 이하에서는 PE의 수가 4배로 증가할 때 실행 시간이 큰 폭으로 줄어들고 있으나, 256개 이상에서는 실행 시간의 감소가 줄어든다. 이는 PE의 수가 늘어날수록 PE간의 데이터 전송 명령어와 PE를 비활성 시키는 SLEEP 명령어가 증가하기 때문이다.



(그림 4) 서로 다른 PE 구성에 따른 실행 시간

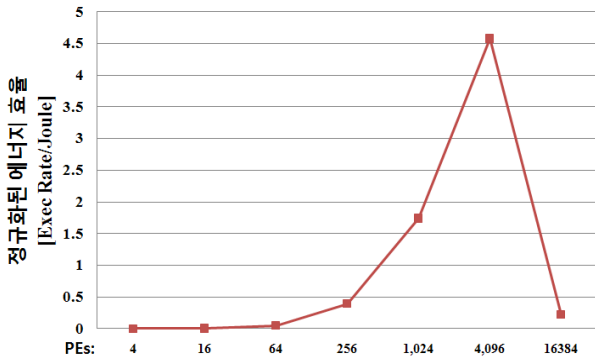
(그림 5)는 서로 다른 PE 구성에 따른 PE 이용률 (Utilization)을 보여준다. PE 개수가 64개 이하일 때 시스템 이용률은 계속적으로 감소하고, 64개 이상에서는 시스템 이용률이 증가함을 알 수 있다. 이는 초음파 영상을 점유하는 각 PE내의 픽셀 메모리 영역이 다르기 때문에 발생한다. PE 개수가 64개 이하인 경우에는 초음파 영상의 중앙 데이터가 포커싱 과정이 끝났을 때 아직 양쪽 모서리 부분의 데이터는 포커싱이 완료되지 않았다. 따라서 전체 포커싱이 진행되는 동안 중앙 PE를 비활성화 시킨 후 연산이 수행된다. 이로 인해 PE 개수가 64개 이하일 때는 활성화된 PE의 비율이 낮기 때문에 이용률이 감소하게 된다. PE의 개수가 64개 이상일 경우 비활성된 PE보다 활성화된 PE의 비율이 높기 때문에 PE들의 이용률이 증가하게 된다.



(그림 5) 서로 다른 PE 구성에 따른 PE 이용률

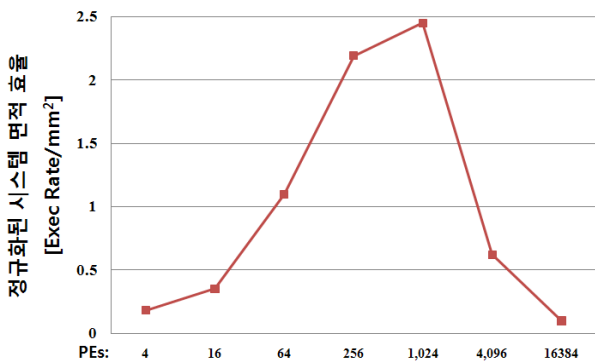
에너지 효율은 소비된 단위 에너지당 처리량이며, (그림 6)은 서로 다른 PE 구성에 따른 에너지 효율을 보여준다. 여기서 세로축은 에너지 효율의 평균값으로 정규화한 값이므로 의미가 없으며, 따라서 그래프가 나타내는 모양이 중요하다. 에너지 효율은 PE 개수가 4096개일 때 가장 좋은 효율을 보인다. PE 개수가 4096개 이하에서는 PE의 개수가 4배 증가 할 때 마다 실행 시간이 감소한 반면 거의 동일한 에너지를 소비하여 에너지 효율이 증가한다. 그러나 PE 개수가 4096개 이상일 때는 포커싱 과정을 수행하는 빔포밍 기법의 연산보다는 각 PE간의 데이터 전송 명령어와 분기 명령의 연산수가 증가한다. 따라서 실제 빔

포밍 기법을 위한 명령어 보다 제어를 위한 명령어들의 증가로 인해 그에 따른 에너지 소비가 증가하여 에너지 효율이 감소된다.



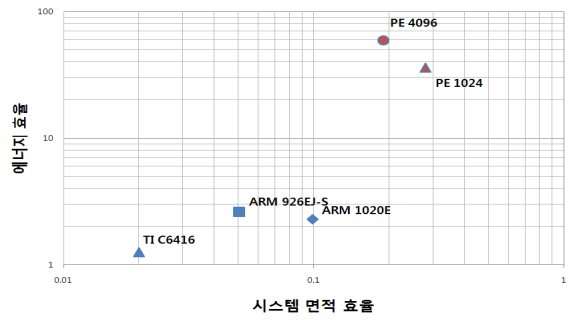
(그림 6) 서로 다른 PE 구성에 따른 정규화된 에너지 효율

시스템 면적 효율은 단위 면적당 처리량이며, (그림 7)은 서로 다른 PE 구성에 따른 시스템 면적 효율을 보여준다. PE 수가 1024개일 때 최대의 시스템 면적 효율을 가진다. PE 수가 256개 이하일 때는 실행시간이 큰 폭으로 감소하여 시스템 면적 효율 또한 큰 폭으로 증가한다. 그러나 PE 개수가 1024개 이상에서는 시스템 면적 효율이 큰 폭으로 줄어든다. 이는 PE의 개수가 늘어날수록 빔포밍 기법 연산의 명령어 보다 제어 명령어의 증가로 인해 실행시간에 영향을 주게 되고, 동시에 시스템 면적 효율에도 영향을 주게 된다.



(그림 7) 서로 다른 PE 구성에 따른 정규화된 시스템 면적 효율

(그림 8)은 최적의 매니코어 프로세서와 상용 프로세서 (TI DSP C6416, ARM 926EJ-S, ARM 1020E)와의 시스템 면적 및 에너지 효율을 비교하여 보여준다. 상용 프로세서와의 정확한 비교는 적당하지 않지만 본 절의 목적은 상용 프로세서와의 비교를 통해 선택한 최적의 매니코어 프로세서의 효율이 어느 정도인지를 살펴보기 위한 것이다. 최적의 매니코어 프로세서(PE=4096)는 모바일 초음파 영상장치에서 많이 사용되는 TI DSP C6414보다 에너지 효율에서 46배, 시스템 면적 효율에서 10배의 향상을 보였다.



(그림 8) 최적의 매니코어 프로세서와 상용 프로세서와의 효율 비교

7. 결론

본 논문에서는 모바일 초음파 영상신호의 빔포밍 기법을 위한 매니코어 프로세서의 디자인 공간 탐색법을 소개하였다. 매니코어 프로세서의 디자인 공간 탐색을 위해 매니코어의 각 프로세싱 엘리먼트당 초음파 영상신호 데이터의 수를 변화시키는 실험을 통해 실행시간, 에너지 효율 및 시스템 면적 효율을 측정하고, 측정된 결과를 바탕으로 최적의 매니코어 프로세서 구조를 선택하였다. 동일한 130nm 테크놀로지와 130MHz 클럭 주파수로 모의 실험한 결과, 에너지 효율은 PE 수가 4096개일 때, 시스템 면적 효율은 PE 수가 1024개일 때 최적의 효율을 보였다. 또한 모바일 초음파 영상장치에서 많이 사용되는 TI DSP C6416보다 에너지 효율에서 46배, 시스템 면적 효율에서 10배의 향상을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0010863). 또한, 본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No.000406420110)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] Seong-Ho Jang, "Ultrasound image diagnosis devices", Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 48, no. 8, pp. 11-21, Aug. 1998.
- [2] A. D. Blas et. al, "The UCSC Kestrel Parallel Processor," IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, vol. 16, no. 1, pp. 80-92, Jan. 2005.
- [3] A. Gentile and D. S. Wills, "Portable video supercomputing," IEEE Trans. on Computers, vol. 53, no. 8, pp. 960-973, Aug. 2004.
- [4] A. Gentile, S. Sander, L. Wills, and D. S. Wills, "The Impact of Grain Size of the Efficiency of Embedded SIMD Image Processing Architectures," Journal of Parallel Distributed Computing, Vol. 64, pp. 1318-1327, Nov. 2004.