

정적 분류를 이용한 혼합형 결과값 예측기

박홍준⁰, 고광현, 조영일
극동정보대학 전산정보처리과, 국립 한국농업전문학교, 수원대학교 컴퓨터과학과
hjpark@cs.kdc.ac.kr, kh@kn.ac.kr, yicho@mail.suwon.ac.kr

A Hybrid Value Predictor Using Static Classification

Hong-Jun Park⁰, Kwang Hyun Ko, Young-Il Cho
Dept. of Computer Information Process, KNAC, Dept. of Computer Science Univ. of Suwon

요약

데이터 종속성을 제거하기 위해서 명령어의 결과값을 예상하는 여러 결과값 예측기의 장점을 이용하여 높은 성능을 얻을 수 있는 새로운 혼합형 예측 메커니즘을 제안한다. 제안된 혼합형 결과값 예측기는 예상 테이블을 모험적으로 갱신할 수 있기 때문에 부적절한(stale) 데이터로 인해 잘못 예상되는 명령어의 수를 효과적으로 감소시킨다. 또한 정적 분류 정보를 사용하여 명령어의 반입시 적절한 예측기에 할당함으로써 예상 정확도를 더욱 향상시키며, 하드웨어 비용을 효율적으로 감소시키도록 하였다. 5개의 SPECint95 벤치마크 프로그램에 대해 SimpleScalar/PISA 3.0 플랫폼을 사용하여 실험하였다. 16-이슈 폭에서 모험적 갱신을 사용한 평균 예상 정확도는 73%의 실험 결과가 나왔으며, 정적 분류 정보를 사용하였을 경우 예상 정확도가 88%로 증가된 결과를 얻었다.

1. 서론

고성능 슈퍼스칼라 프로세서에서 성능을 향상시키기 위해서는 높은 명령어 이슈율과 명령어 수준 병렬성(ILP: Instruction Level Parallelism)을 최대한 이용하는 것이 중요하다[2]. 그러나 명령어간의 종속관계는 ILP를 저해시키는 주요 장애요소가 되며, 선행 명령어의 결과값을 후행 명령어가 입력으로 사용하는 데이터 종속관계의 명령어는 선행 명령어의 결과가 구해질 때까지 지연되어야 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 선행 명령어의 결과를 미리 예측하여 모험적으로 실행(speculative execution)하는 결과값 예상기법(data value prediction)을 개발되고 있다.[1-7].

결과값 예상기법으로는 명령어의 결과를 바로 이전에 수행된 결과로 예상하는 최근 결과값 예측기(Last Value Predictor)[1,2], 명령어의 결과가 마지막으로 수행된 결과값에 일정하게 변한다는 사실을 이용하여 다음 결과를 예상하는 스트라이드 결과값 예측기(Stride Value Predictor)[6,7], 이전에 실행된 n개의 결과값 중에 하나를 다음 값으로 예상하는 2-단계 결과값 예측기(Two-level Value Predictor)[5], 여러 예측기를 혼합해서 사용하는 혼합형 결과값 예측기(Hybrid Value Predictor)[6] 등이 제안되었다.

고성능 프로세서에서는 성능향상을 위해 명령어의 반입폭과 이슈폭이 계속해서 증가하고 있다. 이로 인해 명령어가 예상된 후 실제 결과값으로 예상 테이블을 수정하기 전에 다시 그 명령어를 예상하는 경우에는 부적절한 데이터의 사용이 증가하게 된다. 부적절한 데이터 사용은 올바르게 못한 예상을 발생시키게 되며, 프로세서의 성능을 저하시킨다. 특히 스트라이드 결과값 예측기와 2-단계 결과값 예측기에서는 이러한 예상 실패로 인해 성능에 미치는 영향이 심각하다.

본 논문에서는 명령어의 결과값 예상 시 부적절한 데이터를 사용함으로써 발생하는 예상 실패를 최소화하기 위해 명령어의 결과값을 예상하는 동시에 예상 테이블을 모험적으로 갱신하는 혼합형 결과값 예측기를 제안한다. 부적절한 데이터로 인해 잘못 예상되는 명령어의 수와 잘못 예상 시의 페널티를 감소시켜 프로세서의 성능을 향상시킨다. 또한 제안한 혼합형 결과값 예측기는 프로파일링으로 얻어진 명령어의 실행 형태에 따른 정적 분류(static classification) 정보를 사용함으로써 명령어 반입 시 명령어를 적절한 예측기에 할당함으로써 예상 정확도를 더욱 향상시킬 수 있고, 하드웨어 비용을 효율적으로 감소시키도록 구성하였다.

2. 관련 연구

최근 결과값 예측기는 명령어의 최근 수행된 결과값을 예상 테이블(VHT: Value History Table)에 저장하고 다음에 동일 명령어를 반입할 때, 저장된 결과값을 예상값으로 사용하는 방법이다[1,2]. 최근 결과값 예측기는 마지막 수행 결과값 하나만을 저장하기 때문에 적은 하드웨어 비용을 요구하지만 상수 값을 생성하는 명령어들만 예상할 수 있어서 예상 정확도가 낮다는 단점을 갖는다.

스트라이드 결과값 예측기[6]는 명령어의 마지막 수행된 결과값과 마지막 두 번의 수행된 결과값의 차이값을 VHT에 저장하여 동일 명령어의 반입 시 마지막 수행 결과값과 차이값의 합으로 예상한다. 스트라이드 결과값 예측기는 일정하게 증감하는 패턴을 예상할 수 있어서 최근 결과값 예측기보다 좋은 성능을 가진다.

2-단계 결과값 예측기[5]는 명령어가 수행한 마지막 네 개의 결과값을 VHT에 저장하여 결과값을 예상하는 방법이다. 2-단계 결과값 예측기는 높은 예상 정확도를 갖지만 네 개의 결과값을 저장하기 때문에 많은 하드웨어

어 비용을 요구하는 단점을 갖는다.

Wang 등의 혼합형 결과값 예측기[6]는 스트라이드 결과값 예측기와 2-단계 결과값 예측기를 결합한 형태의 예측기이다. Wang의 혼합형 결과값 예측기는 높은 예상 정확도를 얻을 수 있으나, 많은 하드웨어 비용을 요구하고 다른 엔트리에 중복 저장된다는 단점을 갖는다.

3. 제안된 혼합형 결과값 예측기

3.1 모험적 갱신의 필요성

표1은 8-이슈폭과 16-이슈폭을 갖는 프로세서에서 모험적으로 테이블을 갱신하지 않는 2-단계 결과값 예측기를 사용하여 전체 예상 명령어 중 부적절한 데이터로 예상하는 비율을 나타낸다.

표1. 2-단계 예측기에서 부적절 데이터 사용 비율

Bench	8-issue			16-issue		
	age=1	age=2	age≥3	age=1	age=2	age≥3
gcc	8.8	3.2	7.3	13.7	6.7	10.6
li	10.1	3.3	3.5	14.4	4.9	4.7
vortex	4.4	2.0	5.0	9.8	4.3	7.7
go	9.6	2.9	2.5	14.5	5.8	6.2
m88ksim	13.7	3.7	9.0	14.2	7.1	11.1
average	9.32	3.02	5.46	13.32	5.76	8.06

"age"는 명령어가 예상된 후 결과가 구해지기 전에 그 명령어를 다시 예상하는 횟수를 나타낸다. 전체 예상 명령어 중 부적절한 데이터로 예상되는 비율이 8-이슈폭에서 평균 18%, 16-이슈폭에서 평균 27%로, 이슈폭이 증가함에 따라 부적절한 데이터 사용 비율이 증가함을 알 수 있다.

3.2 명령어의 분류

그림1은 벤치마크 프로그램에서 프로파일링을 수행하여 최근 결과값과 스트라이드 결과값을 사용하는 명령어들의 실행 패턴 분포를 분석한 결과이다. 전체 실행 결과값 중 최근 결과값(last) 또는 스트라이드(st)의 실행 패턴이 나타나는 비율을 x축에 나타내었고, y축은 전체 실행 명령어 중 각 실행 패턴으로 실행되는 명령어의 비율을 나타낸다.

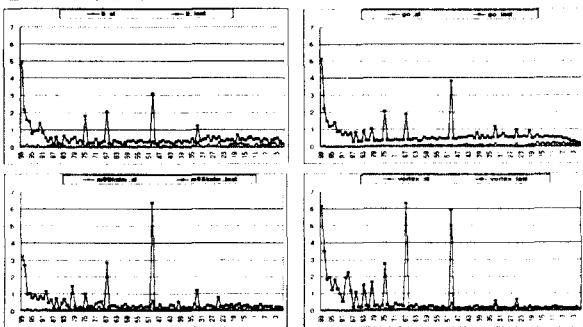


그림1. 명령어 실행 패턴의 분포

최근 결과값 실행 패턴을 사용하는 명령어는 전체 명령어 중 평균 57.9%, 스트라이드 결과값 실행 패턴을 사용하는 명령어는 평균 7.7%, 실행 패턴 유형을 판단할 수 없는 명령어들이 평균 34.4%를 차지한다. 실행 패턴 유형을 판단할 수 없는 명령어들 중에는 한 번 수행 등으로 예상할 필요가 없는 명령어가 평균 20% 포함되어 있다.

3.3 예측기 구조

본 논문에서는 부적절한 데이터에 의한 예상 정확도의 감소를 줄이기 위해 명령어 반입 시 결과값을 예상하는 동시에 예상 테이블을 모험적으로 갱신하는 혼합형 결과값 예측기를 제안한다. 제안된 혼합형 결과값 예측기는 그림2와 같이 최근 결과값 예측기, 스트라이드 결과값 예측기, 2-단계 결과값 예측기로 구성된 혼합형 예측기로, 프로파일링을 통한 정적 분류 정보를 사용하여 명령어 반입시 적절한 예측기에만 명령어를 할당하도록 하였다. 또한, 명령어 반입시 모험적 갱신을 수행하도록 스트라이드 결과값 예측기의 VHT 엔트리에는 S_age 필드를 추가하였으며, 2-단계 결과값 예측기의 VHT 엔트리에는 T_age 필드와 6비트의 S_VHP (Speculative VHP) 필드를 추가하였다.

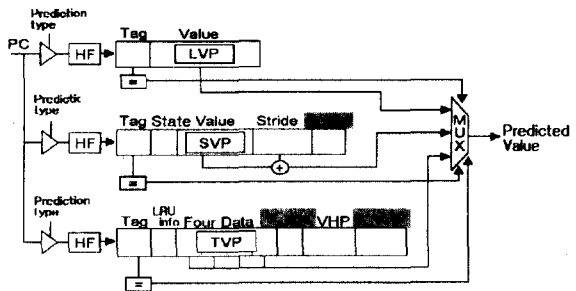


그림2. 제안된 혼합형 결과값 예측기의 구조

3.4 예측기의 예상 메커니즘

제안된 예측기는 명령어 반입시 적절한 예측기를 선택하기 위해 표2와 같이 명령어의 실행 패턴에 따라 분류한 정적 분류 정보를 사용하였다.

표2. 명령어의 실행 패턴 정보와 선택 예측기

실행유형	할당 명령어	예측기
Last	최근값 실행 패턴을 갖는 명령어	LVP
Stride	스트라이드 실행 패턴을 갖는 명령어	SVP
Unknown	혼합된 패턴을 갖는 명령어	TVP
Not	한 번 수행으로 예상하지 않을 명령어	-

반입된 명령어가 2단계 결과값 예측기를 조사할 때 T_age가 '1' 이상이라면 부적절한 결과값을 사용하게 되는 경우이다. 그림3과 같이 T_age의 값에 따라 올바른 VHP를 사용하여 PHT를 인덱스하면 부적절한 결과값의

사용을 방지할 수 있다. 명령어 수행이 완료되면 재기록 사이클 동안 T_age는 '1'을 감소하고, 나머지 필드는 기존의 2-단계 결과값 예측기와 같은 방법으로 갱신한다.

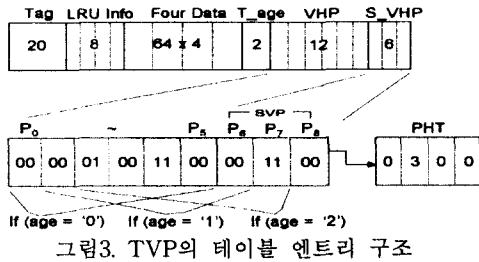


그림3. TVP의 테이블 엔트리 구조

반입된 명령어가 스트라이드 결과값 예측기를 조사할 때는 S_age를 '1' 증가시키고 "value+(S_age*stride)"로 예상한다. 또한 명령어 수행이 완료되면 재기록 시킬 동안 S_age는 '1' 감소시키고, 나머지 필드는 기존의 스트라이드 결과값 예측기에서와 같은 방법으로 갱신한다.

4. 실험 및 평가

본 논문의 실험을 위해 SPECint95 벤치마크 중 5개를 실험하였으며 시뮬레이터는 실행 구동 시뮬레이터인 SimpleScalar/PISA 3.0 툴셋[8]을 사용하였다.

그림4는 16-이슈폭 8K 엔트리 VHT를 갖는 경우에 대해 모험적 갱신과 정적 분류 정보를 사용한 예측기에 대한 예상 정확도를 보여 주고 있다. "Correct Prediction"와 "Incorrect Prediction"은 예상을 수행한 명령어 중에서 정확하게 예상된 비율과 예상이 틀린 비율이다.

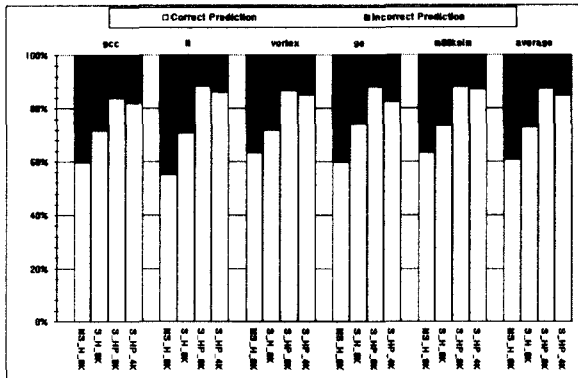


그림4. 16-이슈폭에서의 예상 정확도

기존의 혼합형 예측기(NS_H_8K)에 모험적 갱신을 사용(S_H_8K)함으로써 예상 정확도가 평균 61%에서 평균 73%로 향상되었으며, 모험적 갱신을 수행하는 혼합형 예측기에 정적 분류 정보를 사용(S_HP_8K)함으로써 예상 정확도가 평균 88%로 크게 향상되었다. 또한 VHT를 4K 엔트리로 하드웨어 비용을 축소(S_HP_4K)하여도 평균 85%로 비슷한 예상 정확도를 나타내고 있다. 이 실험 결과는 정적 분류 정보를 사용하여 각 명령어

를 적절한 예측기에만 할당함으로써 중복 할당을 피할 수 있고, 보다 많은 명령어를 예측기에 할당할 수 있어 예상 정확도를 향상시켰음을 보여주는 것이다.

5. 결론

제안한 혼합형 결과값 예측기는 명령어 반입 시 예상과 예측기의 갱신을 동시에 수행함으로써 부적절한 데이터 사용을 줄여 예상 정확도를 향상시킬 수 있었다. 또한, 프로파일링으로 얻어진 정적 분류 정보를 사용함으로써 명령어 반입시 명령어를 적절한 예측기에만 할당하여 예상 정확도를 더욱 향상시킬 수 있었다.

실험 결과 SPECint95 벤치마크 프로그램에서 명령어를 예상 후 결과값이 구해지기 전에 그 명령어를 다시 예상하는 비율이 8-이슈폭에서 평균 18%, 16-이슈폭에서는 평균 27%로 측정되었으며, 이는 제안된 예측기를 사용하면 예상 정확도가 향상될 것을 증명해 주었다. 모험적 갱신을 수행하면 모험적 갱신을 하지 않는 혼합형 예측기보다 예상 정확도가 16-이슈폭에 대해 평균 61%에서 73%로 증가하였다. 모험적 갱신과 정적 분류 정보를 사용함으로써 예상 정확도가 평균 88%로 향상되었고, VHT 엔트리 수를 절반 크기로 축소하여도 평균 85%의 예상 정확도를 얻었다.

향후 과제로 명령어에 적합한 예측기를 선택할 수 있는 컴파일러 기반 분류 알고리즘을 개발하여 분류 정보를 명령어에 적용하여 명령어 수행시 예측기에 전달하는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참고 문헌

[1] M. H. Lipasti, C. B. Wilderson, J. P. Shen, "Value Locality and Load Vaule Prediction," ASPLOS-VII, pp.138-147, October 1996.
 [2] M. H. Lipasti and J. P. Shen, "Exceeding the Dataflow limit via Value Prediction," MICRO-29, pp.226-237, December 1996.
 [3] Y. Sazeides and J. E. Smith, "The Predictability of Data Values," MICRO-29, pp.226-237, December 1996.
 [4] F. Gabbay and A. Mendelson, "Can Program Profiling Support Value prediction?," MICRO-30, pp.270-280, December 1997.
 [5] T-Y Yeh and Y. N. Patt, "Alternative Implementations of Two-Level Adaptive Branch Prediction," ISCA-19, pp.124-134, 1992.
 [6] K. Wang and M. Franklin, "Highly Accurate Data Value Prediction using Hybrid Predictors," MICRO-30, pp.281-290, December 1997.
 [7] J. Gonzalez and A. Gonzalez, "The potential of data value speculation to boost ilp," ICS-12, 1998
 [8] D.C. Burger and T.M. Austin, "The simplescalar tool set, version 2.0" Technical Report CS-TR-97-1342, University of wisconsin, Madison, June 1997.