

슈퍼스칼라 프로세서에서 정적 및 동적 분류를 사용한 혼합형 결과 값 예측기

*김주익⁰ **박홍준 ***고광현 *조영일

⁰수원대학교 컴퓨터학과, **국동정보대학 전산정보처리과, ***국립 한국농업전문학교
mkby12@mail.suwon.ac.kr, hjpark@cs.kdc.ac.kr, kh@kn.ac.kr, yicho@mail.suwon.ac.kr

A Hybrid Value Predictor Using Static and Dynamic Classification in Superscalar Processors.

⁰Ju-Ick Kim ^{**}Hong-Jun Park ^{***}Kwang-Hyun Ko ^{*}Young-Il Cho

⁰Dept. of Computer Science, The University of Suwon, ^{**}Dept. of Computer Information Process, The College of Keukdong, ^{***}The College of Korea National Agricultural.

요 약

최근 여러 논문에서 실 데이터 종속을 제거하기 위하여 결과 값 예측 기법을 제안하였다. 결과 값 예측 기법 중 혼합형 결과 값 예측기는 다양한 패턴을 갖는 명령어를 모두 예측함으로써 높은 예측 정확도를 얻을 수 있지만 하나의 명령어가 여러 개의 예측기 테이블에 중복 저장되어 높은 하드웨어 비용을 요구한다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 프로파일링으로 얻어진 정적 분류 정보를 사용하여, 명령어를 예측 정확도가 높은 예측기에만 할당하여 예상 테이블 크기를 감소 시켰다. 또한 동적으로 적절한 예측기를 선택하도록 함으로써 예측 정확도를 더욱 향상 시켰다. 본 논문에서는 SPECint95 벤치마크 프로그램에 대해 SimpleScalar/PISA 3.0 플랫폼을 사용하여 실험하였다. 정적-동적 분류 정보를 모두 사용하였을 경우 87.9%, VHT 크기를 4K로 축소한 경우 87.5%로 비슷한 예상정확도를 얻으면서 예상 테이블의 크기는 50%로 감소하였다. 또한 실행 패턴의 유형 비율에 따라 각 예측기의 VHT를 구성한 경우 예상 테이블 크기를 25%로 줄일 수 있었다.

1. 서론

최근 명령어 수준 병렬성을 향상시키기 위해 실 데이터 종속에 의한 장애를 제거하는 결과 값 예측기 기법에 대한 연구가 진행되고 있다[1~6].

결과 값 예측 기법에는 최근 결과 값 예측기(LVP: Last Value Predictor), 스트라이드 결과 값 예측기(SVP: Stride Value Predictor)와 2단계 결과 값 예측기(TVP: Two Level Predictor)가 있다. 이들 예측기의 장점을 결합한 혼합형 결과 값 예측기(HVP: Hybrid Value Predictor)가 개발되었다. 기존의 HVP들은 예측 정확도는 높지만 하나의 명령어가 여러 개의 예측기에 중복 저장됨으로써 하드웨어 비용이 높다는 단점이 있다[3].

하드웨어 비용을 줄이기 위해서는 가장 적합한 예측기에만 명령어를 할당하기 위한 분류 방법이 필요하다. 분류 방법에는 정적분류와 동적 분류 방법이 있다. 본 논문에서는 기존 연구된 여러 개의 예측기들을 하나로 결합하고, 정적 및 동적으로 결과 값들의 실행 유형을 분류하여, 임의의 명령어에 가장 적합한 예측기로 예상하는 분류 능력을 갖는 HVP를 제안한다.

제안된 HVP는 정적 분류 정보를 사용하여 명령어 반입 시 명령어를 적절한 예측기에 할당하고, 예상이 어려운 명령어들은 실행 시 동적으로 분류하여 가장 적절한 예측기를 선택함으로써 기존의 다른 예측 방식보다도 예상 정확도를 더욱 향상시킬 수 있다. 또한 하드웨어 비용을 효율적으로 감소시킬 수 있다.

제 2 장 관련 연구

결과 값 예측 기법에는 바로 이전에 수행된 결과로 예상하는 LVP[1,2]가 있다. 적은 하드웨어를 사용하고 구현이 쉽다는 장점이 있으나, 예측 정확도가 낮다는 단점이 있다. 명령어의 결과 값이 일정한 값만큼 변한다는 사실을 이용하여 명령어의 다음 결과를 명령어의 다음 결과를 예상하는 SVP가 있다. TVP는 이전에 수행된 n 개의 결과 값 중 하나를 다음 값으로 예상하는 방법으로 높은 예상정확도를 가지나 하드웨어 비용이 높다는 단점이 있다. 이들 예측기의 장점을 결합한 HVP가 개발되었다. 기존의 HVP들은 다양한 패턴을 갖는 명령어를 모두 예측함으로써 좋은 결과를 가지지만 하나의 명령어가 여러 개의 예측기에 중복 저장됨으로써 하드웨어 비용이 높다는 단점이 있다[1,2].

분류의 목적은 예측기에서 명령어가 중복 저장되는 것을 최소화하여 하드웨어 비용을 줄이면서 예측 정확도를 유지하기 위한 것이다.

Rychlik 등이 제안한 혼합형 결과 값 예측기[3]는 최근 결과 값 예측기, 스트라이드 결과 값 예측기, FCM 결과 값 예측기를 혼합한 예측기이다. 분류 테이블을 이용하여 실행 시간동안 명령어들의 패턴을 분류함으로써 가장 잘 예상할 수 있는 예측기에 할당하는 동적 분류(Dynamic Classification) 방법을 사용하였다.

제 3 장 제안된 혼합형 결과 값 예측기

3.1 정적 분류와 동적 분류

본 논문에서는 정적 및 동적 분류방법을 사용하는

HVP를 제안한다.

정적 분류 방법은 프로파일링으로 얻어진 정적 분류 정보를 사용하여 명령어 반입 시 명령어에 적절한 예측기를 선택하도록 하였다. 정적 분류 정보는 명령어의 실행 패턴에 따라 "Not" 유형(한 번 수행 등으로 예상하지 않을 명령), "Last" 유형(최근 값 실행 패턴을 갖는 명령), "Stride" 유형(스트라이드 실행 패턴을 갖는 명령), "Unknown" 유형(혼합된 패턴을 갖는 명령)으로 분류하여 사용한다.

동적 분류 방법은 다양한 실행 패턴으로 예측이 어려운 명령어("Unknown" 유형)들에 대해서는 초기 3개의 결과 값이 나타나는 실행 패턴에 따라 재분류하여 보다 적절한 예측 방법을 선택하는 동적 분류 방법을 사용한다. 제안한 예측기는 별도의 분류 테이블을 사용하지 않고 TVP의 VHT 테이블 엔트리를 분류 테이블로 사용하여 동적 분류를 수행한다.

명령어가 반입되었을 경우 수행되는 동적 분류에 따른 예상과 갱신 및 예측기의 동작은 다음과 같다.

1) 반입된 명령어가 LVP에 엔트리를 갖고 있을 경우 명령어 반입 시 LVP 엔트리의 신뢰성 카운터 값이 임계치 이상이면 결과 값 필드에 있는 값으로 예상한다.

2) 반입된 명령어가 SVP에 엔트리를 갖고 있을 경우 명령어 반입 시 SVP 엔트리의 신뢰성 카운터의 값이 임계치 이상이면 결과 값 필드와 스트라이드 필드의 합으로 결과 값을 예상한다.

3) 반입된 명령어가 TVP에 엔트리를 갖고 있을 경우 본 논문에서 제안한 예측기에서 TVP는 결과를 예상하는 예측기의 역할은 물론 결과 값들의 실행 패턴을 조사하여 적합한 예측기를 선택하는 분류기의 역할로도 사용된다.

TVP 엔트리의 PI 필드가 초기에 0을 갖는 경우에는 분류기로 동작하게 된다. 최후에 저장된 3개의 실행 결과 값에 따라 명령어에 적절한 결과 값 예측 방법을 사용하도록 재분류하게 된다. 즉, 3개의 실행 결과 값이 같은 최근 결과 값 실행 패턴이 나타나면 PI 필드의 값을 1로 설정하고, 3개의 실행 결과 값의 차가 같은 스트라이드 결과 값 실행 패턴이 나타나면 PI 필드의 값을 2로 설정하며, 그 외의 경우에는 PI 필드의 값을 3으로 설정한다.

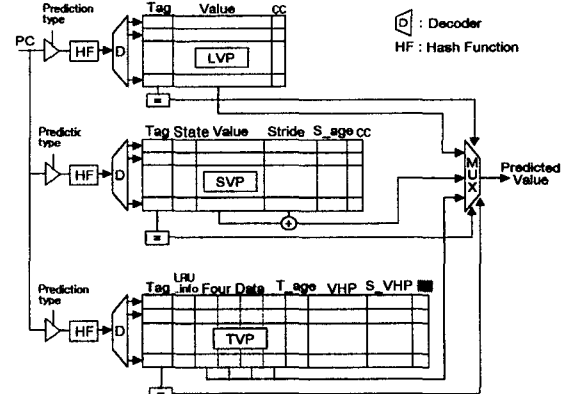
동적 재분류 과정이 끝나면 TVP는 예측기로 동작하게 된다. 예측기로서의 역할을 보면, PI 필드의 값에 따라 적절한 예측 방법을 사용하여 결과 값을 예상한다.

- (1) PI 필드의 값이 1인 경우
LVP 실행 유형으로 결과 값을 예상한다.
- (2) PI 필드의 값이 2인 경우
SVP 실행 유형으로 결과 값을 예상한다.
- (3) PI 필드의 값이 3인 경우
기존의 TVP와 동일한 방법으로 결과 값을 예상한다.

명령어 반입 시 TVP 엔트리의 VHP 필드를 사용하여 PHT 엔트리를 인덱스하고, PHT 엔트리에서 선택된 카운터 값이 임계치 이상이면 해당 카운터에 대응하는 결과 값 필드의 값으로 예상한다.

3.2 제안된 결과 값 예측기의 구조

제안된 HVP는 [그림1]과 같이 최근 결과 값을 예상하기 위한 LVP, 일정한 상수 값으로 증감하는 패턴을 갖는 명령어들의 값을 예측하기 위한 SVP, 일정한 값들이 반복되는 패턴을 갖는 명령어들의 값을 예측하기 위한 TVP를 결합하여 구성하였다.



[그림 1] 제안된 혼합형 결과 값 예측기의 구조

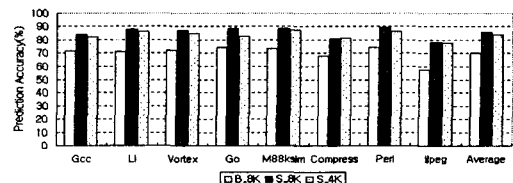
예상 값을 변경하기 전에 예상 값에 접근한 횟수를 기록하기 위해 SVP의 VHT 엔트리에는 S_age 카운터 필드를 두었으며, TVP의 VHT 엔트리에는 T_age 카운터 필드를 두었다. 두 개의 age 카운터의 초기 값은 '0'으로 설정하였으며, 명령어 반입 시 결과 값 예측기의 VHT를 조사(lookup)할 때 예상된 예측기의 age 카운터 값을 '1'씩 증가시키고 재기록 때 '1'씩 감소시킨다. 또한, 2-단계 결과 값 예측기의 VHT 엔트리에 6비트(2*3)의 S_VHP(Speculative VHP) 필드를 추가하여 모험적으로 예상 테이블을 갱신할 때 예상된 결과 값의 결과 값 필드 위치를 저장한다.

제 4 장 실험방법 및 결과

실험을 위해 SPECint95 벤치마크 프로그램에 대해 SimpleScalar/PISA 3.0 틀셋을 사용하여 실험되었다. 각 벤치마크 프로그램은 -O2 -g3의 최적화 옵션으로 컴파일되었으며, 실험은 수행된 명령어 수를 최대 100M까지 제한적으로 수행하였다.

4.1 정적 분류 정보 적용

[그림2]는 HVP에 정적 분류를 적용시켰을 경우의 예상 정확도를 보여주고 있다.



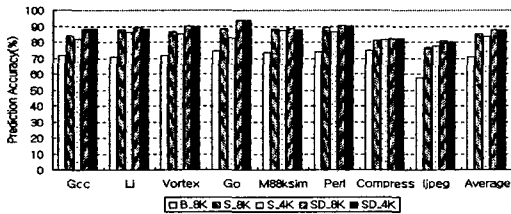
[그림 2] 정적분류 정보를 사용한 예상 정확도
HVP에 정적 분류 정보를 사용하는 S_8K(Static, 8K)

엔트리)의 예상 정확도가 분류를 사용하지 않는 기존의 HVP B_8K(분류방법을 사용하지 않음, 8K 엔트리)의 평균 70.8%에 비해 평균 86.3%로 크게 향상되었다. 또한 각 예측기의 VHT를 4K 엔트리로 크게 축소한 S_4K의 평균 84.1%로 비슷한 예상 정확도를 나타내고 있다.

이 결과는 정적 분류 정보를 사용하여 명령어 반입 시 한번의 수행 등으로 예상할 필요가 없는 명령어는 예상을 수행하지 않으며, 예상 가능한 명령어를 적절한 예측기에만 할당함으로써 중복된 할당을 피할 수 있고, 예상 테이블을 보다 효과적으로 이용함으로써 예상 정확도를 향상시켰음을 보여주는 것이다.

4.2 정적 및 동적 분류 정보 적용

[그림3]은 제안된 HVP 정적 및 동적 분류를 모두 적용시켰을 경우의 예상정확도를 보여주고 있다.



[그림 3] 정적 및 동적 분류 정보를 사용한 예상 정확도

HVP에 정적 및 동적 분류를 사용하는 SD_8K(Static+Dynamic, 8K 엔트리)의 예상 정확도가 분류를 사용하지 않는 기존의 B_8K의 평균 71.2%와 정적분류만을 사용하는 혼합형 예측기 S_8K의 85.3%에 비해 87.9%로 향상되었다. VHT 크기를 4K 엔트리로 축소한 SD_4K도 "Table miss"로 예상 정확도가 87.5%로 낮아지나 정적분류만을 사용하는 S_8K에 비해 예상 정확도가 높음을 보여주고 있다.

이 결과는 혼합된 실행 패턴을 가지고 있는 명령어들에 동적으로 실행 패턴을 분석하여 가장 적절한 예측 방법을 선택하여 예상을 수행함으로써 보다 향상된 성능을 얻을 수 있음을 보여주고 있다.

4.3 하드웨어의 비용효과

정적-동적 분류 정보를 사용하는 혼합형 예측기 SD_8K에 대해 각 예측기의 VHT 크기를 변화시키며 예상 정확도의 변화와 하드웨어의 비용 감소 효과를 살펴보고자 한다. 혼합형 예측기의 엔트리 크기(bit)로 실험 예측기의 하드웨어 크기를 [표 1]과 같이 비교하였다.

[표 1] 실험 예측기의 하드웨어 크기 비교

예측기	엔트리 구성			테이블 크기 (bit)
	LVP	SVP	TVP	
SD_8K	8192	8192	8192	4,751,360
SD_4K	4096	4096	4096	2,375,680
SD_42K	4096	2048	2048	1,366,016
SD_451	4096	512	1024	811,520
SD_422	4096	256	2048	1,192,192

SD_422 예측기는 SD_42K 예측기와 비교하여 전체 테

이블 크기를 50%로 축소할 수 있었다. 더욱이 SD_8K 예측기와 비교하면 전체 예측기 테이블의 크기를 25%로 축소하는 효과를 얻을 수 있다. 가장 많은 하드웨어 비용을 감소시킬 수 있도록 SVP의 VHT를 512 엔트리, TVP의 VHT를 1K 엔트리로 구성한 SD_451는 SD_4K 예측기에 비해 전체 테이블 크기를 36.1%로 축소할 수 있었다.

제 5 장 결론

본 논문에서는 정적 및 동적 분류를 사용하는 혼합형 결과 값 예측기를 제안하였다. 정적 분류 정보를 사용하여 하나의 적절한 예측기에만 할당되도록 함으로써 예상 정확도가 평균 85.2%로 향상되었고, 잘못된 예상 비율은 14.8%로 크게 감소하였다. 또한, 예상이 어려운 명령어 대해서도 동적으로 적절한 예측 방법을 선택하도록 하여 정적-동적 분류를 모두 사용함으로써 예상 정확도가 평균 87.9%로 향상되었다.

VHT의 크기를 4K 엔트리로 축소한 예측기에서도 87.5%로 비슷한 예상 정확도를 얻을 수 있었다. 특히 전체 명령어 실행 패턴의 유형 분포 비율에 따라 각 예측기의 VHT 크기를 구성하였을 경우 각 8K VHT 엔트리 예측기에 비해 전체 하드웨어 비용을 25% 크기로 축소하는 효과를 얻을 수 있었다.

향후 과제로 명령어에 적합한 예측기를 선택할 수 있는 컴파일러 기반 분류 알고리즘을 개발에 대한 연구가 필요하다. 또한, 예상이 어려운 혼합된 실행 패턴을 갖는 명령어들을 보다 정확히 분석할 수 있는 동적 분류방법에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

[1] F. Gabbay and A. Mendelson, "Can Program Profiling Support Value prediction?," MICRO-30, pp.270-280, December 1997.
 [2] K. Wang and M. Franklin, "Highly Accurate Data Value Prediction using Hybrid Predictors," MICRO-30, pp.281-290, December 1997.
 [3] B. Rychlik, J.W. Faistl, B.P. Krug, A.Y. Kurland, J.J. Sung, M.N. Velev, and J.P. Shen, "Efficient and Accurate Value Prediction Using Dynamic Classification", Technical Report of Microarchitecture Research Team in Dept. of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon Univ, 1998.
 [4] F. Gabbay, and A.mendelson, "The Effect of instruction Fetch Bandwidth On Value Prediction", ISCA-25, p.272-281, 1998.
 [5] B. Rychlik, J. W. Faistl, B. P. Krug, A. Y. Kurland, J. J. Sung, M. N. Velev, J. P. Shen, "Efficient and Accurate Value Prediction Using Dynamic Classification" Tech. rep, CMUART, 1998.
 [6] S. J. Lee, Y. Wang, and P. C. Decoupled Value Prediction On Trace Processors" IEEE 6th International Symposium On high performance computer architecture, 2000.