



RRPB89030556

(3.P)

行政院國家科學委員會專題研究計畫

改進動態分支預測準確度之探討

Research on Improving Dynamic Branch Prediction Accuracy

計畫編號：NSC 89-2213-E-032-002

執行期限：88年8月1日至89年7月31日

主持人：莊博任 淡江大學電機系

計畫參與人員：廖育德、陳世元、姚立強 淡江大學電機系

一、中文摘要

本研究之主要目的在改進雙層次調適分支預測器之預測準確度，並因此提出下列改善方法。首先，我們利用動態觀測樣式軌跡表(PHT)的資料來預測分支，可以相當程度地節省預測所需的時間及硬體成本。同時我們也在資料分類的架構上做一些調整，進一步強化上述(及其他)分支預測方法的成效。此外，我們亦嘗試將自己的方法與既有的PPM演算法結合，期望獲得降低成本及提昇預測準確度的雙重效益。本研究所提出及所涉及的相關方法，皆經模擬評估，其結果顯示，我們的方法在預測準確度、時間成本及硬體成本方面，改進程度相當可觀。

關鍵詞：動態分支預測、雙層次調適分支預測器、二位元計數器、馬奇夫預測器、PPM演算法、預測準確度、效能評估

Abstract

To improve the branch prediction accuracy for the two-level adaptive branch predictor, two schemes which involve the prediction part and the dispatch part of branch prediction are proposed in this research. The proposed prediction scheme is able to achieve desirable prediction accuracy by variably cross-referring traces in the pattern history table to make predictions, with reasonably low time complexity and hardware cost. Some modification has been incorporated into the dispatch structure to assist the proposed prediction scheme, as well as other related schemes, in securing more

enhanced performance. A combination of the proposed prediction scheme with the established optimal PPM algorithm is also considered in the hope of attaining desirable prediction accuracy at reduced cost. Extensive simulation runs have been conducted to evaluate the performance of our proposed schemes and some other related schemes and the results indicate favorable performance gain for our proposed schemes in terms of prediction accuracy, time complexity and hardware cost.

Keywords: Dynamic branch prediction, two-level adaptive branch predictor, two-bit counter, Markov predictor, PPM algorithm, prediction accuracy, performance evaluation

二、計劃緣由與目的

近年來雙層次動態分支預測器[1,2]在分支預測上的表現優越，使這方面的研究探討日益熱絡。如何從預測方法及預測器的架構上著手，以求改進預測準確度，降低時間及硬體成本，進而提升處理器的運算效能，已成為此一領域的重要研究課題。

雙層次調適分支預測器的架構於1991年完成之後，學者專家即不斷針對預測方法及資料分類架構兩方面尋求改進。在資料分類架構方面，新的設計從早期的GAs[2]、gshare[3]到晚近的PAg[4]、agree predictor[5]、path history[6]等，可謂成果豐碩，而預測方法上的改進則以1996

年之後所提出的 PPM 演算法[7,8]最為顯著代表。

本研究有鑒於分支預測的重要性，故嘗試在資料分類架構及預測方法上分別作改變並觀其成效。由於目前使用頗廣的二位元計數器及馬哥夫預測器[2, 9]，其準確度尚有改善空間，我們因此決定採用可觀察分支中重複性質的預測器替換之，並在資料分類架構上作一番調整，找出一個更能適合我們使用的預測器架構，使預測成本得以降低，預測準確度得以提昇改進。為了更進一步強化預測準確度及節省成本，我們並將自己所得的方法與最精進的 PPM 演算法結合，利用各自的長處及功能，達到發揮分支預測最佳成效的目的。

三、結果與討論

為改善分支預測準確度，我們設計了一個簡單有效的預測法，稱之為動態交叉比對法。首先，我們將樣式資料表中的資料平分為二部分，比較這兩部份內的資料是否相同，若相同則表示具迴圈性質或其他可預測之形態，我們因此預測下一個軌跡即為前半個樣式資料表中的第一個位元。倘若兩部分的樣式資料表其資料比對不符合，我們將後半個資料表縮短一位元，並與前半表中同位元數之資料相比對，其步驟同上，直到比對成功為止。如果兩部份表中之資料比對到剩下一位元仍不符合，則將預測工作交由第零階馬哥夫預測器或二位元計數器，直到達成預測目的。即若 PHT 中的序列為 $R_{c-k} R_{c-k+1} \dots R_{c-1}$ ，如果共有偶數個位元 (k 為偶數)，則取 $R_{c-k} \quad R_{c-k+1} \quad \dots \quad R_{c-k/2+1}$ 和 $R_{c-k/2+2} \quad R_{c-k/2+3} \quad \dots \quad R_{c-1}$ 比對，若 $R_{c-k} = R_{c-k/2+2}$ and $R_{c-k+1} = R_{c-k/2+3}$ and ... and $R_{c-k/2+1} = R_{c-1}$ 則預測 $R_c = R_{c-k}$ (在此同時不另行呼叫暫存器或額

外硬體)。倘若不成立，則若 $R_{c-k+2} = R_{c-k/2+3}$ and $R_{c-k+3} = R_{c-k/2+4}$ and ... and $R_{c-k/2+1} = R_{c-1}$ 則預測 $R_c = R_{c-k+2}$ 。倘若不成立，則重復上述步驟，若直到一位元比對亦不符合，則將預測工作交由第零階 Markov 預測器或二位元計數器，直到預測成功為止。若 PHT 中的序列為 $R_{c-k} R_{c-k+1} \dots R_{c-1}$ ，且如果共有奇數個位元 (k 為奇數)，則取 $R_{c-k+1} \quad R_{c-k+2} \quad \dots \quad R_{c-(k+1)/2}$ 和 $R_{c-(k-1)/2} \quad R_{c-(k-3)/2} \quad \dots \quad R_{c-1}$ 比對，若 $R_{c-k+1} = R_{c-(k-1)/2}$ and $R_{c-k+2} = R_{c-(k-3)/2}$ and ... and $R_{c-(k+1)/2} = R_{c-1}$ ，則預測 $R_c = R_{c-k+1}$ 。倘若不成立，則 $R_{c-k+3} = R_{c-(k-3)/2}$ and $R_{c-k+4} = R_{c-(k-5)/2}$ and ... and $R_{c-(k-1)/2} = R_{c-1}$ ，則預測 $R_{c-(k-1)/2} = R_{c-1}$ 。倘若不成立，則重復上述步驟，若直到一位元比對亦不符合，則將預測工作交由第零階 Markov 預測器或二位元計數器，直到預測成功為止。此一動態交叉比對方法不僅容易實現並且可以在極低成本下，為高成效處理器達到令人滿意的預測準確度。

此外，我們在傳統的雙層次分支預測器由分支軌跡表(BHT)索引到 PHT 的過程中，增加一級索引，亦即增加一級 BHT，成為一個中間級索引表，隨著每一次分支結果的出現，動態更新資料，使資料的分類更具差異性，有助提高分支準確度。此一疊代分發法之參考方法如下：若某一 BHT 內的位元為 $R_{c-k} R_{c-k+1} \dots R_{c-1}$ ，在 BHT 索引至其對應的 PHT 內加入一級暫存索引功能表，相當於 PHT 內資料的前處理功能，假設每個中間級索引表有 m 個位元，則可索引至 2^m 個次 PHT 中，藉由中間級(tag)的位元，索引至其所對應的次 PHT，索引的方法如同傳統的 BHT 對應 PHT 的關係，可知新的方法用

到了 2^{m+k} 條 PHT；而中間級索引表的資料也跟 BHT 和 PHT 一樣，在預測做出後，即更新資料，使此中間級索引表，兼具有動態更新的功能，而預測的工作就為參考次 PHT 內的位元來決定。

上述兩種方法及一些相關的分支預測法（如二位元計數器及 PPM 演算法）的效能經模擬後，其結果也受到評估及比較。概括而言，在預測準確度方面，我們提出的動態交叉比對法由於能夠動態交叉比對 PHT 中的軌跡而表現得比二位元計數器優越。在某些情況下，簡便低成本的動態交叉比對法在準確度上的表現甚至超越複雜但效能極佳的 PPM 演算法。也正由於如此，促使我們將自己的動態交叉比對法與 PPM 演算法結合，擷其長處，達到既能提昇分支預測準確度又能降低成本的最大成效。模擬結果同時也顯示，我們所提的疊代分發法不僅有助於提昇動態交叉比對法的準確度，也能有助於其他方法，如二位元計數器及 PPM 演算法，更準確地預測分支結果。

四、計畫成果自評

本研究計畫所預計達成的目標都能如期圓滿的完成，成效相當不錯。此一研究成果並已整理成篇，投付 *IEEE Transactions on Computers* 審理當中。我們在分支預測領域的研究並不會隨此一研究計畫的結束而中止，我們已有更進一步探討的方向，將延續既有成果，繼續努力。

五、參考文獻

[1] T.-Y. Yeh and Y. N. Patt, "Two-Level Adaptive Branch Prediction," *Proc. 24th Annual Int'l Symp. on Microarchitecture*, Nov. 1991, pp. 51-61.

[2] T.-Y. Yeh and Y. N. Patt, "Alternative Implementations of Two-Level Adaptive Branch Prediction," *Proc. 19th Annual Int'l Symp. on Computer Architecture*, May 1992, pp. 124-134.

[3] S. McFarling, "Combining Branch predictors," *Technical Report TN-36*, Digital Western Research Laboratory, June 1993.

[4] S. Sechrest, C.-C. Lee and T. Mudge, "The Role of Adaptive in Two-Level Adaptive Branch Prediction," *Proc. 28th Annual Int'l Symp. on Microarchitecture*, Nov. 1995, pp. 264-269.

[5] E. Sprangle, R. S. Chappel, M. Alsup, and Y. N. Patt, "The Agree Predictor: A Mechanism for Reducing Negative Branch History," *Proc. 24th Annual Int'l Symp. on Computer Architecture*, May 1997, pp. 284-291.

[6] S. Reches and S. Weiss, "Implementation and Analysis of Path History in Dynamic Branch Prediction Schemes," *IEEE Trans. on Computers*, Vol. 47, No. 8, pp. 907-912, Aug. 1998.

[7] I.-C. K. Chen, J. T. Coffey, and T. N. Mudge, "Analysis of Branch Prediction via Data Compression," *Proc. 7th Int'l Conf. on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Oct. 1996, pp. 128-136.

[8] E. Federovsky, M. Feder, and S. Weiss, "Branch Prediction Based on Universal Data Compression Algorithms," *Proc. 25th Annual Int'l Symp. on Computer Architecture*, May 1998, pp. 62-72.

[9] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, London, United Kingdom: Academic Press, 1985.