

行政院國家科學委員會專題研究計劃成果報告

平行式程式設計、實作與效能分析—在 Stochastic Timed Petri Nets 上的實例探討

Parallel programming design, implementation and performance analysis –
An application on Stochastic Timed Petri Nets

計劃編號：NSC 87-2213-E-032-003

執行期限：86 年 8 月 1 日至 87 年 7 月 31 日

主持人：陳伯榮 私立淡江大學資訊工程系

一、中文摘要

Foster[1]提出了一個平行式程式設計的方法論，它包括分割、通訊、聚合和映射四個步驟，本計劃的主要目的即研究此設計方法並應用在平行式虛擬機器 (Parallel Virtual Machine, 簡稱為 PVM) 上實作隨機過程派翠網路 (Stochastic Timed Petri Nets, 簡稱為 STPN) 中三個重要分析的演算法：找尋永不變特性、解決可到達性問題及解相對的連續馬可夫模式。

已知的平行式獲得 P-永不變特性演算法[2]仍無法突破一主要循序瓶頸。而我們克服了看似無法平行化的循序部分，且設計完成後的平行式運算模式符合擴散式計算模式 (diffusing computation)，因此可依據[3]所提出的演算法來作結束測知 (termination detection)，是極好的平行式程式設計的實例。

Lipton[4]提到了可到達性問題所需要的狀態空間是呈指數成長的。我們採用以層級為主的深度擴展方式 (DFS) 來減少工作單元的數目及減少通訊的成本。亦即每一個工作單元負責展 N 層，展到第 N 層就將此層級的狀態透過通訊方式傳給另一個工作單元去進行另一個 N 層級的狀態擴展。如此很快地每個工作單元都在並行

的進行狀態之擴展，故很快地各工作單元都有事情做而達到負載平衡。

另外，當我們利用隨機過程時間派翠網路的馬可夫模式來求算分析解時，最容易碰到記憶體資源不足而引起分頁錯誤的問題，經由比較我們認為廣度搜尋的方式較為有利，也讓我們解決了記憶體資源不足的問題。

關鍵詞：平行式程式設計，隨機過程派翠網路，擴散式計算模式，

Abstract

Foster[1] presents a four-step parallel program design methodology, namely partition, communication, agglomeration, and mapping. The main goal of this project is to study this design approach and apply it to build three important algorithms in Stochastic Timed Petri Nets (STPN) on the Parallel Virtual Machine (PVM). The three algorithms in STPN are obtaining the invariants, solving the reachability problem, and finding a solution for the relative continuous Markov Chain.

The speedup of the best known parallel

algorithm for obtaining invariants [2] is limited by a sequential component. We overcome the sequential component in the algorithm and find that the resulting parallel algorithm is conformed to diffusing computation as [3] defined. Hence, the termination detection algorithm in [3] can be applied.

In solving the reachability problem [4], we adopt depth-first expansion (DFS) approach to reduce task numbers and communication costs, i.e. each task expands states into N_{th} level, then transfer those states to the next task to proceed another N_{th} level expansion. In doing so, each task proceeds its own state expansion separately, and soon all the tasks execute their jobs, then load balancing is achieved.

On the other hand, in finding the analytical solution for STPN, we solve its corresponding Markov model. The page fault problem due to insufficient computing resources usually raised. We find out that the matrix generated by BFS can be solved with much less memory space.

Keywords: parallel program design methodology, Stochastic Timed Petri Nets, diffusing computation

二、緣由與目的

應用軟體的成長、電腦架構的改變、以及網路的興起，再在的顯示出平行化的想法已逐漸在大型電腦、工作站及個人電腦中生根茁壯。可預見的，平行式程式會越來越多被應用在多處理器 (Multi-processors) 電腦，甚至普遍用再由區域網

路連結的電腦上。因此，以平行式觀點來寫作程式是迫切需要的。

派翠網路是經常被用來驗證和分析反應式系統 (reactive systems) 的模式。因反應式系統多為高複雜度的系統，其相對應的派翠網路也擁有極高的複雜度，也因此透過派翠網路分析反應式系統的特性時，迫切需要善用所有系統資源才能有效率的得到驗證與分析的結果。

在派翠網路中常利用 P-永不變特性來驗證安全性 (safety) 及存活性 (liveness) 等行為特性 (behavior property)。有關獲得 P-永不變特性的相關研究，Martinez[5] 是已知循序演算法中執行最快的。另外 Dan [2] 則在 Hypercube 上以平行處理的方法加速 P-永不變特性的獲得，其主要依據 [5] 所提出的演算法加以平行化，但對於其中主要的循序瓶頸部分並未突破。

可到達性問題是由一已知的初始狀態去擴展 (expand) 與搜尋 (search) 其目標狀態是否可到達，所建構的樹叫做狀態空間樹 (State Space Tree)，其所需記憶體的容量是相當龐大的，並且很容易造成狀態空間爆炸的問題 (state space explosion problem)。

當我們想要去瞭解一個系統時，通常是利用一個有效的工具去來幫我們作分析，尤其是在系統的規模非常龐大或是在做分析時所要處理的事已經超出一般人所能做到的範圍。派翠網路 (Petri Nets)[6] 對於有並行行為的系統是一個很好的模組化與分析的工具。STPN 轉換至相對連續馬可夫模式 (continuous-time Markov Chain) 之後，可依其得到之分析解做非行為特性的分析[7][8]。求算馬可夫模式矩陣的過程是非常的耗時的，尤其在系統非常龐大時越是明顯。

Ian Foster 提出了以平行式程式設計

的方法，它把設計的過程分成分割、通訊、聚合以及映射四個階段。我們將以此方法論為本計劃的重心，利用 PVM 的計算環境來幫助我們加速完成 STPN 中三個重要的分析方法。

三、研究方法及成果

我們分別將 STPN 中三個重要分析的平行演算法說明如下：

首先為找尋派翠網路最小 P-永不變特性及的平行式演算法的步驟[9]：

假設 N 是一個派翠網路，有 n 個位置及 m 個轉移動作； $A_{n \times m}$ 為 N 的接連矩陣。

步驟 1、初始化 [T|P] 矩陣； $P = I_n$ (單位矩陣)， $T = A$ (接連矩陣)。

步驟 2、產生列運算單元群及一個開始/結束運算。

步驟 3、這些列運算單元群讀入個別需要的列。並與開始/結尾運算單元作同步通訊後開始工作。

步驟 4、算單元群中的每一列運算單元對自己有的 S+ 及 S- 作配對運算產生新列，在做完消除多餘的新列算後，以其第一個非零數所在的行號送給對應的運算單元或是開始/結尾運算單元。

步驟 5、列運算單元群中的每一列算單元開始收取新進的 S- 列或者是 S+ 列，並把自己所有的每個相對的 S+ 列或 S- 作配對算，並把產生的新列在做完消除多餘的新列運算後，以其第一個非零數所在行號送給對應的列算單元群或是開始/結尾運算單元。

步驟 6、由開始/結尾運算單元啟動結束測知 (termination detection)，得知運算結束後，則把自己收到的 P-永不變特性，進一步刪除以得到最後的最小支持 P-永不變特性集。

接下來我們說明可到達問題的平行式演算法：經由分割階段及通訊階段後，我們發覺其工作單元個數非常多及通訊成本非常的大，因而採用以層級為主的擴展方式來避免因不同的觸發順序而到達同一層級的狀態重複。在聚合階段中工作單元考量的分割階段[10]。先由 Task1 以 DFS 的擴展技巧負責擴展 N 層的狀態，當到了第 N 層就將此層的狀態送往相鄰的 Task2 之信息佇列中，而本身需做回溯的動作，去堆疊中隨機拿一個尚未擴展進行狀態擴展，而 Task2 也是負責擴展 N 層的狀態，當到了它的第 N 層就將此層的狀態往相鄰的 Task3 傳，如此很快地每個工作單元都在並行的進行狀態之擴展，故很快地各工作單元都有事情做而達到負載平衡。

最後，我們討論解 STPN 相對的連續馬可夫模式[7][8]。整個過程中最重要的就是產生隱藏馬可夫模式之聯立方程式組並求此聯立方程式組的解，在這裡是利用狀態與狀態之間的轉換關係配合機率來產生聯立方程式組。在求解的過程中我們可以將聯立方程式組的係數利用一增廣矩陣來儲存並對它作運算，而此矩陣在這裡便稱為馬可夫模式之係數矩陣。不同的到達圖便有不同的聯立方程式組，而到達圖的取得方式亦決定了整個到達圖的樣式。

我們也發現利用廣度搜尋出來的係數矩陣其上三角矩陣的非零元素個數會小於以深度搜尋出來的狀態矩陣其上三角矩陣的非零個數，這對於高斯消去法來說是很好的，因為所使用儲存體將會變少。因為我們從隨機過程時間派翠網路所得到的到達圖幾乎都是由一個狀態然後到下一個狀態，甚少有由位於到達圖下方的狀態回去與到達圖上方已出現過的狀態有關係。所以才呈現下三角矩陣的非零元素比上三角矩陣的非零元素還多[11]。

四、結果與討論

我們應用 Foster 的平行式程式設計方法在 PVM 上來設計實作獲得 P-永不變特性的演算法，在平行化的程度上，打破了似乎無法平行化的循序部分而且設計完成後的平行計算模式符合擴散式計算模式，我們可以根據 Dijkstra 於 1980 年所發表的分散式計算結束測知演算法來加以應用。

在平行化的狀態擴展中，為考量各工作單元的負載平衡，故採取以 DFS 來進行狀態的擴展及搜尋其目標狀態到達與否，由於採取 DFS，很快就將尚待擴展的狀態傳給相鄰的工作單元，如此很快每一個工作單元就有工作，使系統閒置時間減少，故可加快執行的速度。

在平行化 STPN 分析解的求算過程中所常用到的數值方法，我們利用廣度搜尋的方式所取得的矩陣，來幫助我們將每個演算法平行化，使能快速有效的解出問題。

五、參考文獻

- [1] Ian T. Foster. "Designing and Building Parallel Programs. Concepts and Tools for Parallel Software Engineering". Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- [2] Dan C Marinescu, Mike Beaven, Ryan Stansifer. "A Parallel Algorithm for Computing Invariants of Petri Net Models", in proc.4th International Workshop On Petri Nets and Performance Models, pp. 137-143, 1991.
- [3] E.W. Dijkstra and C.S. scholten. "Termination detection for diffusing computations", Information Processing Letters, 11(1): 1-4, 1980.
- [4] R.J Lipton, "The reachability problem requires exponential space" New Haven, CT, Yale University, Department of Computer Science, Res.Rep.62, Jan. 1976.
- [5] J. Martinez and M. Silva. "A Simple and Fast Algorithm To Obtain All Invariants of a Generalized Petri Nets", Informatik-Fachberichte 52, Claude Girault and Wolfgang Reisig Ed, pp. 301-310, Springer-Verlag, 1981.
- [6] Petri, C. A. "Communication with Automata", Final Report, Volume 1, Supplement 1, RADC TR-65-377-vol-1-suppl 1, Applied Data Research, Princeton, NJ, Contract AF 20(602)-3324, [English Translation], Jan. 1966.
- [7] Ajmone Marsan, M., Conte, G and Balbo, G. "A Class of Generalized Stochastic Petri Nets for the Performance Evaluation of Multiprocessor Systems", ACM Transactions on Computer Systems, Vol. 2, No. 2, pp. 93-122, May 1984.
- [8] 陳伯榮、李文禮、薛美惠、靳傑中，"平行式/分散式系統規格與時間派翠網路模式的整合"，第一屆電腦與通信技術研討會，國立雲林技術學院，pp. 89-94 Oct. 1995.
- [9] 陳伯榮、靳傑中、王萬福、李永裕，"平行式程式設計、實作與效能分析—找尋派翠網路上的永不變特性為實例"，1997 分散式系統技術及應用研討會，pp. 513-521, May 1997
- [10] 王萬福，"平行式程式設計、實作與效能分析—以探討派翠網路上的可到達性問題為實例"，私立淡江大學資訊工程研究所碩士論文，1997, 6.
- [11] 李永裕，"平行式程式設計、實作與效能分析—以探討一般隨機過程派翠網路的分析解為實例"，私立淡江大學資訊工程研究所碩士論文，1997, 6.