

パッケージQNAP

—Queueing Network Analysis Package—

高橋 豊・長谷川 利治

1. はじめに

QNAP は、フランス、パリ近郊のベルサイユに立地する国立情報科学および自動制御研究所 INRIA (Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique) において D. Potier 博士を中心とするグループにより開発された、システムのモデル化と性能評価のためのソフトウェア・パッケージである。現在ではさらに改良が加えられ、QNAP 2 と版を改めている。筆者らの 1 人は、昭和 59 年 4 月まで 1 年間同研究所に滞在する機会を得、若干ではあるが QNAP 2 の使用経験があり、以下にその概略を紹介させていただく。残念ながら、他の性能評価ツール (たとえば、QM-X, QNA, RESQ 等) に関して多くを知らないので、本稿では比較検討を行わないことをあらかじめお断わりしておく。

2. QNAP 開発目的

計算機システム、通信網、フレキシブル・マニファクチャリング・システム等におけるトランザクション、パケット、メッセージ、部品のような物の流れを、待ち時間、待ち行列、スループット、利用率等の観点から定量的に評価する際には、これらのシステムの数学的モデルとして待ち行列網がしばしば用いられ、その理論的成果をふ

たかはし ゆたか、はせがわ としはる
京都大学工学部

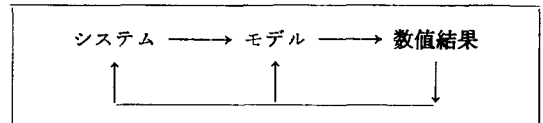


図 1 モデル化過程

まえた成功例がこれまでに数多く報告されている。しかし待ち行列網は、一般に解析がむずかしく、多くの場合、近似解法あるいはシミュレーションで満足せざるをえない。また厳密な解法および近似解法は、モデルと求めたい評価量に応じて個々に最良の選択をする必要があり、さらに数値結果を得るためには、通常かなりのステップ数のプログラムを作成する必要がある。一方、シミュレーションによる方法は、上記 2 つのアプローチ以上に問題に依存しており、プログラムの必要なステップ数、計算時間、加えてプログラムの妥当性の検証に関して多くの問題点を含む。

以上のことを考慮に入れ、QNAP 2 は、図 1 に示すようにまず利用者が直面する問題を計算機上で待ち行列網としてモデル化する手助けをし、問題の難易度、使いうる計算時間、解の希望する精度を勘案し、上記 3 つのアプローチのいずれかの最良と判断する方法を用い、数値結果を出力する。このとき利用者は、得られた数値結果をもとに、必要ならばシステムの変更、あるいはシステムが十分にモデル化されていないと判断されるときは、モデル化の修正を行なう必要がある。このように QNAP 2 は、性能評価手法、特に待ち行

列網理論を習熟した利用者のみならず、あまり多くを知らない利用者にとってもその手段となり得ることを目的としている。しかし出力結果は待ち行列網における評価量であり、それが個々の実際のシステムでもつ意味の解釈は、利用者にゆだねられている。ユーザー・インターフェイスとして高級オブジェクト指向言語を装備しており、いわゆるユーザー・フレンドリーな利用環境を形成しており、会話型あるいはバッチ両モードで利用可能である。また、より広範な利用者の供に付するため、パッケージ本体はFORTRAN 77により記述されており、32ビットミニコンピュータ以上であれば利用可能である。現在のところ、計算機システムに依存しない点では、商業ベースにのっている唯一のツールだと思われる。

3. QNAP 2 モデル

QNAP 2により構築される待ち行列モデルは次のものから構成されている。

(1) STATIONS

待合室とサーバ（複数をも許す）とからなっており、具体的には、プロセッサ、I/O装置、交換局等を表わす。

(2) CUSTOMERS

客 (CUSTOMERS) は、予め与えられた確率にしたがいネットワーク内の経路選択を行ない、経路上の各 STATION で利用者が定義した確率分布にしたがり処理要求 (WORK DEMAND) を発する。客としては、たとえばジョブ、トランザクション、パケット、メッセージ、部品等があげられる。

さらにシステムをモデル化するうえで、利用者が使いうる他の主な機能は、次のものである。

(3) 処理規範 (SERVICE DISCIPLINES)

サービス順序を決定する処理規範としては、先着順 (FCFS)、後着順 (LCFS)、割り込み (PRE-EMPTIVE) あるいは非割り込み (NONPRE-EMPTIVE) 優先権つき (PRIORITY)、プロセ

ッサ・シェア等を使用可能である。

(4) 処理時間分布

各 STATION において客を処理するに要する時間の分布として、一定分布、指数分布、アーラン分布、超指数分布、COXIAN分布等があげられる。

(5) 状態依存型処理率

サーバの処理率を各ステーションに滞在する客数に依存させることも可能である。

(6) ブロッキング条件

STATION での許容できる最大待ち行列長、あるいはシステムのある部分に滞在する最大客数を一定値に制限しうる。この場合ブロッキングが生起するが、これは解析をむずかしくする。

(7) 状態依存型経路選択確率

サービス完了後移動する際にしたがう経路選択確率をシステムの状態に応じて変化させうる。これにより動的な経路選択をモデル化できる。

(8) 同期処理

並列計算、分散処理等において出現する複数の客 (プロセス、トランザクション) の同期も可能である。

(9) 客のクラス

経路選択、要求する処理の差等にもとづいて客を複数のクラスに分けることも可能である。

4. 解法

QNAP 2 は、待ち行列網としてモデル化された問題に対して次の4つのアプローチのいずれかにより数値結果を出力する。

(a) BCMP 解析

一般に待ち行列網を解くのはむずかしい。あるいは悪くすると厳密には解けないが、ある種の条件を満たす場合には解を求められる。QNAP 2 では次の3つの解法が準備されている。

i) CONVOL (Convolution Algorithm)

基本的に BCMP 定理 [1] を組み込んでおり、開放型あるいは閉鎖型待ち行列網でいわゆる積形式の解をもつものを対象とし、厳密な解が得られ

る。このような条件を満たす STATION としては、次のものが考えられる。

—先着順処理規範なら、処理時間は指数分布にしたがう。処理率は客数に依存してもよい。

—後着順、プロセッサ・シェア、無限サーバの場合は、処理時間は COXIAN 分布にしたがってもよく、また、クラスごとに異なってもよい。ただしこの際確率の正規化定数を計算するのに Convolution Algorithm [4, 7] を用いている。

ii) MVA (Mean Value Analysis) [8]

CONVOL において必要な、時間のかかる正規化定数の計算を避けることにより、CONVOL の適用可能範囲で、無限サーバあるいはシステムの状態に依存しない単一サーバのみからなる待ち行列網に対して計算時間の点および丸めの誤差等による数値計算上の不安定さを避けうる点で有効となる。しかしこの他の処理規範を含む待ち行列網では計算手間がいちじるしく増大し、他の解法を選ぶ必要がある。

iii) MVANCA (Mean Value Analysis and Normalized Convolution Algorithms)

Mean Value Analysis と Normalized Convolution Algorithm [9] を混合した方法であり、CONVOL が扱える待ち行列網のうちで単一クラスの客および状態依存型の処理率を有する閉鎖型待ち行列網に対し有効である。

(b) マルコフ解析

BCMP 解析により扱えない、状態数が有限な閉鎖型待ち行列網は、QNAP 2 がシステムを 1 次のマルコフ・モデルで記述し、マルコフ解析により数値解を出力する。たとえば次の場合がある。

—優先権を認める場合

—処理率あるいは経路選択確率がシステムの状態に依存する場合

—複数の客の同期をとまなう場合

ただし、この解法はシステムの状態間の遷移速度を表わす行列を収容するために確保できる記憶領域と定常状態確率を計算するのに使いうる計算機時間により、非常に制約を受ける。したがって実際的には、規模の小さな待ち行列網しかこの方法では扱えない。現在のところ状態数が数千程度までなら適用できる。

(c) 近似解法

BCMP 解析およびマルコフ解析では、とり扱えない問題のある種のものに対しては次の近似解法が用意されている。

—ITERATIV (Iterative Algorithm) : 等価フロー反復法 [3] により、先着順処理で処理時間が非指数分布にしたがい、単一クラスの客のみを含む閉鎖型待ち行列網に対し使いうる。

—HEURSNC (Heuristic Algorithm) : 多数の客を含む閉鎖型待ち行列網に関して開発された直観的方法 [5] である。

—PRIORPR (Algorithm for Preemptive Priority Scheduling) : 割り込み優先権があり、複数のクラスの客を含む場合 [12] に適用できる。

—DIFFU (Diffusion Algorithm) : 先着順、非指数サーバと複数クラスの客を含む開放型待ち行列網には、拡散近似が使われる。[2]

(d) シミュレーション

有効な解法のない待ち行列網は、シミュレーションによりとり扱われる。GPSS, SIMULA, SIMSCRIPT 等のプログラミング言語に匹敵する機能をもつ離散シミュレータによるシミュレーション結果が出力される。システムの過渡現象の評価もこれによりとり扱われる。また信頼区間の点でも種々の工夫が凝らされている。

これらの解法の関係は、図 2 のようになる。利用者は、待ち行列網として記述された問題の複雑性、解の望ましい質と精度さらに使用可能な計算時間をもとに、QNAP 2 が提供するこれらの解法からいずれかを指定すればよい。

		厳密	近似
計算時間	短	BCMP 解析	近似解法
	長	マルコフ解析	シミュレーション

図 2 QNAP 2 解法

5. 出力

QNAP 2 により求まる性能評価量の主なものは次である。

- 利用率
- 平均待ち時間
- 平均待ち行列長
- スループット

上記の他に、用いる解法によれば利用者が新たに定義する評価量をも求められる。

6. QNAP 適用例 [11]

QNAP という名前自体が示すように対象とするシステムは、待ち行列網として記述しうるかぎり、どのようなものでもよく、たとえばメモリー・バス共有にともなう種々の競合、CPU/IO バランス、ネットワーク通信プロトコル、生産ライン等を記述するモデルがある。たとえば図 3 のようなセントラル・プロセッサ (CPU) と 2 台のディスク装置からなる、いわゆるセントラル・サーバ・モデルの性能を評価することを考える。3 つのクラス (X, Y, Z) のジョブがあり、各クラスのジョブは、CPU からクラス X のジョブは D1 へ、クラス Y は D2 へ、クラス Z は各々確率 1/2 で D1 および D2 へ移動する。各クラスのジョブの CPU, D1, D2 での平均処理時間は図 4 で与えられるとする。さらにクラス X, Y, Z のジョブが待ち行列内に各々 2, 4, 1 個あり、各処理時間が指数分布にしたがい、CPU では割り込み後着順処理を行なうものとする。この待ち行列モデ

	CPU	D 1	D 2
X	10ms	30ms	/
Y	15ms	/	35ms
Z	20ms	30ms	35ms

図 4 平均処理時間

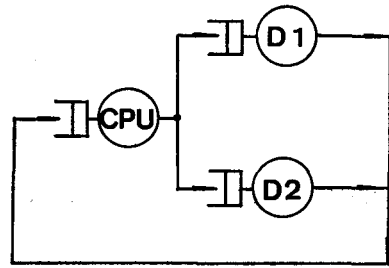


図 3 セントラル・サーバ・モデル

ルは、積形式の解をもち、BCMP 解析により数値解を求めることができる。そのプログラム例が図 5 である。これにより求まる数値結果の標準的な出力が図 6 である。一方、図 7 は同じモデルのマルコフ解析による出力結果を、図 8 はシミュレーションによる出力結果を各々示している。これらの数値結果は [11] から引用させていただいた。

7. おわりに

以上 QNAP 2 の概略を紹介したが、これまではコンピュータ・システム、通信システムをはじめとする複雑なシステムのモデル化と性能評価に関しては、ある程度待ち行列網理論の基礎知識なくしては、厳密な解析はもちろん近似解析、シミュレーションによっても多大な困難をとまらるかあるいは不可能であった。しかしこのような性能評価ツールが種々開発されることにより、この種のシステムのとり扱いが実際面において少しは容易になると思われる。したがってシステムの机上設計段階での構成の決定から運営時の効率的方策の決定まで幅広い利用が考えられる。またこのことが契機となり、待ち行列網理論体系の整理・見直しが促され、あわせて今後の研究課題への指針が得られるものと期待される。

最後に筆者の 1 人に QNAP 2 を実際に使用する機会と、数多くの資料を与えていただきました INRIA の D. Potier 博士に感謝いたします。

参考文献

- [1] Baskett, F., Chandy, K. M., Muntz, R. R. and Palacios, F. G., "Open, Closed and Mixed Networks of Queues with Different Classes of

```

& SIMPLE MULTI-CLASS CENTRAL SERVER MODEL ...

/DECLARE/ QUEUE CPU,DK1,DK2;      & STATIONS
          CLASS X,Y,Z;            & JOB CLASSES
          INTEGER NX,NY,NZ;      & NUMBER OF JOBS

& STATION DESCRIPTION .....

/STATION/ NAME=CPU;
          SERVICE(X)=EXP(10); TRANSIT(X)=DK1;
          SERVICE(Y)=EXP(15); TRANSIT(Y)=DK2;
          SERVICE(Z)=EXP(20); TRANSIT(Z)=DK1,1,DK2,1;
          SCHEDULING=FILO,PREEMPT; & QUEUEING DISCIPLINE
          INIT(X)=NX; INIT(Y)=NY; INIT(Z)=NZ; & INITIAL NUMBER OF JOBS

/STATION/ NAME=DK1;
          SERVICE=EXP(30); TRANSIT=CPU;

/STATION/ NAME=DK2;
          SERVICE=EXP(35); TRANSIT=CPU;

& ANALYSIS .....
/PARAM/ CLASS=CPU;          & CLASS STATISTICS ARE REQUESTED FOR CPU

/EXEC/ BEGIN
      NX:=2; NY:=4; NZ:=1; & PARAMETER INITIALIZATION
      ANALYTIC;           & ACTIVATION OF THE RESOLUTION METHOD
      END;

```

図 5 QNAP プログラム例

thm for Queueing Networks of Computing Systems", ACM Sigmetrics, Vol. 10, pp. 59-79 (1981)

- [6] Potier, D., "New Users' Introduction to QNAP2", Rappports Techniques, No. 40, 1984
- [7] Reiser, M. and Kobayashi, H., "Recursive Algorithms for General Queueing Networks", IBM J. of Res. and Dev., Vol. 19, pp. 283-

Customers", J. ACM, Vol. 22, pp. 248-260(1975)

294 (1975)

- [2] Gelenbe, E. and Pujolle, G., "A Diffusion Model for Multiple Class Queueing Networks", IRIA-LABORIA, Rapport de Recherche, No. 142, 1977

- [8] Reiser, M. and Lavenberg, S., "Mean-Value Analysis of Closed Multichain Queueing Networks", J. ACM, Vol. 27, pp. 313-322 (1980).

- [3] Marie, R., "Methodes Iteratives de Resolution de Modeles Mathematiques de [Systemes Informatiques", RAIRO Revue Bleue, Vol. 2, 1978

- [9] Reiser, M., "Mean-Value Analysis and

**** ANALYTIC RESOLUTION ****

```

****SUBCHAIN 1 TOTAL NUMBER OF CUSTOMERS= 2
****SUBCHAIN 2 TOTAL NUMBER OF CUSTOMERS= 4
****SUBCHAIN 3 TOTAL NUMBER OF CUSTOMERS= 1
*****
* NAME * SERVICE * BUSY PCT * CUST NB * RESPONSE * THRUPUT *
*****
* CPU * 13.32 * .7389 * 2.018 * 36.38 * .5548E-01*
* (X ) *10.000 * .2499 * .6468 * 25.88 * .2499E-01*
* (Y ) * 15.00 * .3625 * 1.039 * 42.97 * .2417E-01*
* (Z ) * 20.00 * .1265 * .3330 * 52.66 * .6323E-02*
* * * * *
* DK1 * 30.00 * .8445 * 1.579 * 56.07 * .2815E-01*
* * * * *
* DK2 * 35.00 * .9566 * 3.403 * 124.5 * .2733E-01*
* * * * *
*****
SPACE USED : 4/100
**** END OF ANALYTIC RESOLUTION ****

```

- [4] Merie, D., Potier, D. and Veran, M., "A Tool for Computer Performance Analysis", Performance of Computer Installations, North-Holland, 1978

- [5] Neuse, D. and Chandry, K. M., "SCAT: An Heuristic Algori-

図 6 QNAP出力例 (BCMP解析)

オペレーションズ・リサーチ

Convolution Method
for Queue Dependent
Servers in Closed Queuing Networks", Performance Evaluation Review, Vol. 1, pp. 9-15 (1981)

```
& SAME RESOLUTION WITH MARKOVIAN ANALYSIS ...
/EXEC/ MARKOV;
```

[10] 高橋 豊, 宮原秀夫, 長谷川利治「待ち行列網理論」, システムと制御, 22巻, 731-737頁 (1978)

[11] Veran, M. and Potier, D., "QNAP-A Modeling Tool for Computer Performance Evaluation", Working Paper, 1983

[12] Veran, M., "Exact Analysis of a Priority Queue with Finite Source", Modelling and Performance Evaluation Methodology, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 60, 1984

*** MARKOV CHAIN ANALYSER ***

TOTAL NUMBER OF STATES = 495
NUMBER OF NON-ZERO ELEMENTS IN ARRAY A = 1579

```
*****
* NAME * SERVICE * BUSY PCT * CUST NB * RESPONSE * THRUPUT *
*****
* CPU * 13.32 * .7389 * 2.018 * 36.38 * .5548E-01*
* (X ) * 10.00 * .2499 * .6468 * 25.88 * .2499E-01*
* (Y ) * 15.00 * .3625 * 1.039 * 42.97 * .2417E-01*
* (Z ) * 20.00 * .1265 * .3330 * 52.65 * .6324E-02*
* * * * *
* DK1 * 30.00 * .8445 * 1.579 * 56.07 * .2815E-01*
* * * * *
* DK2 * 35.00 * .9566 * 3.403 * 124.5 * .2733E-01*
* * * * *
*****
SPACE USED : 38/100
NUMBER OF PREMULTS : 72
```

図 7 QNAP出力例 (マルコフ解析)

[13] Veran, M. and Potier, D., "QNAP2: A Portable Environment for Queuing Systems Modelling", Rappports de Recherche, No. 314, 1984

```
& SAME RESOLUTION WITH SIMULATION ...
/PARAM/ TMAX=300000; ACCURACY=*;
/EXEC/ SIMUL;
```

```
*** SIMULATION BEGINS ... ***
***TIME = 300000.00 , NB SAMPLES = 100 , CONF. LEVEL = 0.95
*****
* NAME * SERVICE*BUSY PCT* CUST NB*RESPONSE* THRUPUT* BLOCKED* SERV NB*
*****
* CPU * 13.361* .744* 2.043* 36.702* .056* .000* 16695*
* +/- * .237* .012* .085* 1.539* .001* .000* *
*(X ) * 10.124* .250* .647* 26.172* .025* .000* 7420*
*(Y ) * 14.897* .366* 1.059* 43.147* .025* .000* 7360*
*(Z ) * 20.002* .128* .337* 52.734* .006* .000* 1915*
* * * * *
* DK1 * 30.228* .848* 1.599* 56.986* .028* .000* 8416*
* +/- * .631* .011* .035* 1.634* .001* .000* *
* * * * *
* DK2 * 34.634* .955* 3.359* 121.672* .028* .000* 8274*
* +/- * .732* .007* .068* 3.891* .001* .000* *
* * * * *
*****
SPACE USED : 4/100
*** END OF SIMULATION : TIME = 300000.00
```

図 8 QNAP出力例 (シミュレーション)