

アプリケーションの挙動に影響を及ぼしている要因の測定方法に関する考察 A consideration of a way to measure elements that affect the behavior of applications

井上 哲哉
Tetsuya Inoue

1. はじめに

近年、インターネット技術の発達と普及により、交通機関や金融機関などのネットサービスをはじめ、さまざまな情報通信サービスが利用できるようになってきた。情報化社会におけるこれらのサービスは、我々の日常生活に欠かせない社会基盤となり、システムの安定稼働が不可欠となっている。システムの安定稼働を実現するにあたって、ハードウェアの信頼性の確保はもとより、耐故障性を備えたシステムの構築や、監視・保守作業によるシステムの可用性の向上を図ることは重要である。それに加えて、利用者へサービスを提供しているアプリケーションソフトウェア（以下、アプリケーション）の高い品質や信頼性への関心が高まっている。

アプリケーションの品質を高めるために、さまざまなケースを想定したテストを実施し、プログラム内の欠陥や誤りを除去する作業が不可欠である。しかしながら、アプリケーションの不具合を完全に除去することは現実的に難しく、実際には、アプリケーションの潜在的な不具合や動作不良は運用段階で露呈することが多い。その要因の一つとして、テスト環境と運用環境の差異が挙げられる。例えば、筆者の経験では、ネットワーク障害や通信相手先の動作不良などの状態において、APIの戻り値の確認が不十分のため通信元プログラムが予期しない動作をしたり、ストレージのデータ量増加に比例してプログラムが使用するシステム資源の消費量も増加し、プログラムの実行が滞るなど、システムの負荷や稼働状態などがアプリケーションの潜在的な不具合を顕在化し、アプリケーションの品質の度合いに影響していると考えられる。

そこで、アプリケーションの挙動に影響を及ぼしている要因を定量的に測定し、アプリケーションの品質を客観的に予測して、アプリケーションの設計や仕様へ反映させるような品質改善に向けた取り組みが必要と考える。

本稿では、ネットワーク通信を行うアプリケーションの品質を評価するにあたって、システムの構成要素から抽出した要因を定量的に測定する方法について考察する。

2. システムの基本動作とモデル化

仮想メモリを使用するコンピュータでクライアントからTCP接続の要求を受付けるサーバプログラムを想定する。ユーザがサーバプログラムの実行を要求したとき、プログラムデータがメモリ上にロードされると、そのプログラムはCPUによって実行され、特定のTCPポートで受信待ちする。これらの一連の動作では、メモリ、ディスクなどのデバイスへのI/Oが発生する。このようなシステムの基本動作から、少なくとも、ネットワーク、CPU、メモリ、I/Oなどのシステム資源が実行プログラムの挙動に影響を及ぼす要因として考えられる。

これらの要因を測定するにあたって、本稿では、システムの性能評価で用いられる待ち行列モデルを利用し、ネッ

トワーク、CPU、メモリ、I/Oの各システム資源をノードとして捉え、文献[1]を参考に、これらのノードを定量的に測定する方法を考える。

2.1 ネットワーク (M/M/1)

ネットワークの packets は「ネットワーク」ノードにランダムに到着し、単位時間あたりの平均 packets 数を λ_{nm} で表す。ノードの利用度を ρ_{nw} 、ノード内の平均 packets 数を Q_{nw} 、packets の平均滞在時間を W_{nw} とし、

$$\rho_{nw} = \frac{\lambda_{nm}}{\mu_{nw}}, \quad Q_{nw} = \frac{\rho_{nm}}{1 - \rho_{nw}}$$

$$W_{nw} = \frac{1}{\lambda_{nw}} Q_{nw} = \frac{1}{\mu_{nw} - \lambda_{nw}}$$

と表す。

2.2 CPU/メモリ (M/M/c)

仮想メモリを使用するコンピュータでは、ユーザがプログラムの実行を要求したとき、その実行プロセスはカーネルによって生成され、仮想アドレス空間を形成する。プロセスの仮想アドレス空間は仮想ページという単位に分割され、通常、このページ数は物理メモリがもつページ（ページフレーム）数よりも多い。これは、プロセスが要求するアドレスを物理メモリに割り当て（ページイン）、不要な物理メモリのページを仮想アドレス空間に戻す（ページアウト）ことで、プロセスは実際の物理メモリよりも多くのメモリを仮想的に使うことができる。

このようなページング方式を実装するコンピュータにおいて、「CPU/メモリ」ノードでは、CPU/メモリのボトルネックの状態を想定し、プロセスの実行待ちの状態を考える。この動作を容易に理解するために、図1では、プロセスAとBが物理メモリにすでに割り当てられ、100MBのメモリ要求量をもつプロセスCを物理メモリに割り当てようとするが、物理メモリの空き領域が50MBしかないため、プロセスCが待ちの状態である様子を示す。この状態は、一般的には、プロセスのCPU占有やメモリアリクなどの原因が考えられるが、プロセスAまたはプロセスBの実行が終了するか、スワップアウトなどで退避しない限り、

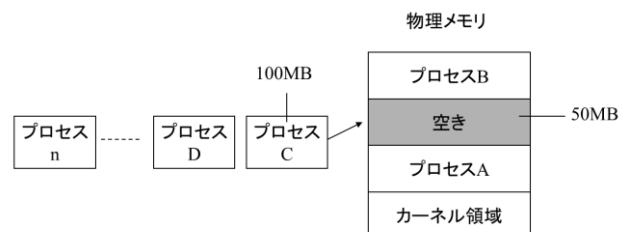


図1 プロセスの待ちとメモリ割り当て

プロセス C は実行待ちの状態が続くことになる。

2.2.1 プロセス数が K_+ 個となる確率

ここで、物理メモリに割り当てられるプロセス数が K_+ 個入れる確率を求める[2]。あるプロセスが退去（消滅）した直後の状態を考え、CPU の処理待ちになっているプロセスを含め全体で N_+ 個のプロセスがコンピュータ内に存在しているものとする。なお、CPU はプロセスの到着順に処理することにする。このとき、物理メモリの全体のページ数を c とし、 N_+ 個のプロセスのうち、先頭からプロセスが物理メモリに要求するページ数を足していき、ちょうど c を越えてしまう直前のプロセスまでが K_+ 個入れると考える。ここで、各プロセスが要求するページ数を確率変数 X_1, X_2, \dots とすると、 K_+ 個のプロセスのページ数の和 U_k は

$$U_k = X_1 + X_1 + \dots + X_k$$

と表される。次に、プロセスが要求するページ数 X_i の分布を仮定するための分布関数を $F(x) = P(X_i \leq x)$ とすると、 U_k が c 以下の値をとる確率 $H_k(c)$ は

$$H_k(c) = P(U_k \leq c)$$

となる。そして、コンピュータ内のプロセス数が j 個のとき、物理メモリに入れるプロセス数がちょうど k_+ 個となる確率 $P(K_+ = k / N_+ = j)$ は

$$P(K_+ = k | N_+ = j) \approx P(U_k \leq c < U_{k+1} | N_+ = j)$$

と表される。また、プロセス数が K_+ 個となる確率の平均 $u_j(c)$ は

$$\begin{aligned} u_j(c) &= E(K_+ = k | N = j) \\ &= \sum_{k=1}^{j-1} kP(K_+(c) = k) + jH_j(c) \\ &= \sum_{k=1}^j H_k(c) \end{aligned}$$

となる。

2.2.2 定常確率

図2のようなプロセスの待ち状態を考える。単位時間あ

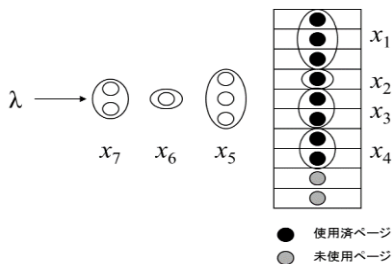


図2 プロセスの待ち状態

たりに1つのプロセスが生成される率を λ 、単位時間あたりにシステム内で実行される平均プロセス数をサービス率とし μ で表す。ここでは、システム内のプロセス数の定常確率 P_n は

$$P_n = \begin{cases} \frac{p^n}{\prod_{j=1}^n u_j(c)} P_0 & (n = 1, 2, \dots, m-1) \\ \frac{p^n}{u_{n-m} \prod_{j=1}^n u_j(c)} P_0 & (n = m, m+1, \dots) \end{cases}$$

となる。次に、システム内の平均プロセス数 \bar{Q} は、

$$\bar{Q} = \sum_{n=1}^{m-1} \frac{np^n}{\prod_{j=1}^n u_j(c)} P_0 + \sum_{n=m}^{\infty} \frac{np^n}{u_{n-m} \prod_{j=1}^n u_j(c)} P_0$$

となり、システム内プロセスの平均滞在時間は \bar{W} は、

$$\bar{W} = \frac{1}{\lambda} \bar{Q}$$

となる。

2.3 I/O (M/M/1)

入出力要求が「I/O」ノードにランダムに到着し、単位時間あたりの平均 I/O 数を λ_{io} で表す。ノードの利用度を ρ_{io} 、ノード内の平均 I/O 数を Q_{io} 、I/O の平均滞在時間を W_{io} とし、

$$\rho_{io} = \frac{\lambda_{io}}{\mu_{io}}, \quad Q_{nw} = \frac{\rho_{io}}{1 - \rho_{io}}$$

$$W_{io} = \frac{1}{\lambda_{io}} Q_{io} = \frac{1}{\mu_{io} - \lambda_{io}}$$

と表す。

3. おわりに

本稿では、ネットワーク通信を行うアプリケーションの挙動に影響を及ぼす要因として、ネットワーク、CPU、メモリ、I/O のシステム資源を扱い、待ち行列モデルを使って、各ノードの測定方法を考察した。実装しているシステムの構成要素に基づいた場合、実際には、より細かいモデルが考えられるが、本モデルでは、プロセスのメモリ割り当てに着目し、これにより CPU とメモリの処理を同じノードで表現することで簡易になっているのが特徴である。

アプリケーションの品質改善の取り組みを行うにあたって、今後は、数値的実験を行って測定方法を精査し、より実用的なモデルを構築していきたい。

参考文献

[1] 荻原春夫, 中川健治, “情報通信理論1”, 森北出版 (1997)
 [2] Issei Kino, “Group-Arrival Group-Departure Queueig System”, TELETRAFFIC AND DATATRAFFIC (1991)