

処理時間制約のあるフォールトトレラントソフトウェアシステムの 性能評価モデルに関する考察

02101865 鳥取大学 *木村光宏 KIMURA Mitsuhiro
01702425 鳥取大学 山田茂 YAMADA Shigeru

1 まえがき

本研究では従来より盛んに議論されている代表的なフォールトトレラントソフトウェアシステムである、Nバージョンプログラミング(N-version programming, 以下ではNVPと略記する)とリカバリブロック(recovery block, 以下ではRBと略記する)を取り上げ、それらの動作規則に新たにリアルタイム性[1]を付加した場合の、システムの性能評価モデルの構築といくつかの性能評価尺度を導出し、両手法の比較を行う。すなわち、これらのシステムに入力がなされてから出力が得られるまでの時間(処理時間)に制限を設けることにより、システムのリスポンスネス[2]などを評価するモデルについて考察する[3, 4, 5, 6]。

2 動作規則の定義と評価モデルの記述

以下の議論において、NVPおよびRBを構成するソフトウェアモジュールの数は3とし、それぞれ $M_i(i=1, 2, 3)$ で表す。

次の諸量を定義する。

T_i = M_i が入力を受け取り処理を終了するまでの時間を表す互いに独立な確率変数($i=1, 2, 3$)

T_r = 出力制限時間

$F_i(t) = \Pr\{T_i \leq t\}$ ($i=1, 2, 3$)

$f_i(t) = dF_i(t)/dt$ ($i=1, 2, 3$)

s = 正しい出力

\bar{s} = 誤った出力

undecided = “結果が得られない”という出力

O_i = M_i の出力であり2値をとる確率変数($i=1, 2, 3$)。

ここで、標本空間 Ω は $\Omega = \{s, \bar{s}\}$ であり、 $\Pr\{O_i = s\} = p_i$, $\Pr\{O_i = \bar{s}\} = q_i = 1 - p_i$ とする。

p_i = M_i の信頼度

O_{sys} = Vの出力であり確率変数とする。ここで、標本空間 Ω は $\Omega = \{s, \bar{s}, undecided\}$ である。

2.1 NVPの場合

本稿で議論するNVPシステムは、入力データを並列かつ独立に処理する三つのモジュール $M_i(i=1, 2, 3)$ と、 $M_i(i=1, 2, 3)$ の出力結果に基づいて多数決決定を行うソフトウェアモジュールVからなる。

以下にNVPの動作に関するいくつかの仮定と動作規則を列挙する。

- 各モジュール $M_i(i=1, 2, 3)$ は時刻 $t=0$ で入力 I を受け取り、時間 $T_i(i=1, 2, 3)$ 後にそれぞれ出力 $O_i(i=1, 2, 3)$ をVに渡す。

- $O_i(i=1, 2, 3)$ は、確率 p_i で正しい出力 s であり、確率 q_i で正しくない出力 \bar{s} である。
- 各モジュールの正しい出力 s は必ず一致するが、 \bar{s} は一致しない。すなわち、正しくない出力どうしは一致しない。
- Vは遅くとも $t=T_r$ の時点で出力 O_{sys} を返し、ソフトウェア故障は引き起こさない。また、Vの処理時間は $M_i(i=1, 2, 3)$ の処理に要する時間比べて無視できるほど小さいとする。
- Vは T_i の小さい順に O_i を受け取り($i=1, 2, 3$)、多数決が成立するかあるいは $t=T_r$ の時点で出力 O_{sys} を返す。すなわち、Vは入力 $O_i(i=1, 2, 3)$ の一致性を調べ、多数決論理により O_{sys} を返す。以下にVの動作規則を示す。

Case 1: $T_i \leq T_j \leq T_k \leq T_r$ ($i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k$)の場合

O_i, O_j, O_k のうちの少なくとも2つが s で一致した時点でVは $O_{sys} = s$ を返す。

それ以外は $t=T_k$ で $O_{sys} = undecided$ を返す。

Case 2: $T_i \leq T_j \leq T_r \leq T_k$ ($i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k$)の場合

$O_i = s$ かつ $O_j = s$ が成立した時点でVは $O_{sys} = s$ を返す。

それ以外は $t=T_r$ で $O_{sys} = undecided$ を返す。

Case 3: $T_i \leq T_r, T_j > T_r, T_k > T_r$

($i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k$)の場合

$t=T_r$ で $O_{sys} = O_i$ を返す。

Case 4: $T_r < T_i, T_r < T_j, T_r < T_k$

($i, j, k=1, 2, 3; i \neq j \neq k$)の場合

$t=T_r$ で $O_{sys} = undecided$ を返す。

2.2 RBの場合

本稿では、RBは処理を M_1, M_2, M_3 の順に逐次的に行う待機冗長構成となっており、受け入れテストを行うモジュールAにより $O_i(i=1, 2, 3)$ が適合するか否かを判定するものとする。Aは確率1で正しく動作し、受け入れ判定に要する処理時間はモジュールの処理時間に比べて無視できるほど小さいと仮定する。図1に動作の概略を図示する。

3 性能評価尺度の導出

前節の定義と仮定により、出力制限時間 T_r が与えられたとき、NVPおよびRBシステムが正しい出力 $O_{sys} = s$ を返す確率を求めることができる。ここでは、この確率をリスポンスネス

(responsiveness[2]) と捉え、それぞれ $R_{NVP}(T_r)$ および $R_{RB}(T_r)$ と表す。本研究の目的の1つは、出力制限時間 T_r を設けることによるレスポンスの振舞いを調べることにある。また、入力 I が与えられてから、出力 O_{sys} が得られるまでの時間、すなわち平均処理時間についても考察する。

3.1 レスポンス

前章で述べた仮定と動作規則に従って $R_{NVP}(T_r)$ および $R_{RB}(T_r)$ を求めることができる。ここでは最も簡単な場合の結果のみを示す。すなわち、各モジュール $M_i (i = 1, 2, 3)$ の処理時間の分布が同一で $F(t)$ であるとし、モジュールの信頼度も $p_i = p (i = 1, 2, 3)$ とする。このとき、 $R_{NVP}(T_r)$ は

$$R_{NVP}(T_r) = (1 - qF(T_r))^3 - (1 - F(T_r))^3 + 3qp^2F(T_r)^3, \quad (1)$$

となり、 $R_{RB}(T_r)$ は

$$R_{RB}(T_r) = p(F(T_r) + q(F^{(2)}(T_r) + qF^{(3)}(T_r))), \quad (2)$$

となる。ここで、 $F^{(n)}(x)$ は $F(x)$ の n 重たみこみを表す。また、 $T_r \rightarrow \infty$ とすれば、処理時間制約の無い場合の信頼度を与える。式 (1) および (2) に適用すれば

$$R_{NVP}(\infty) = 3p^2 - 2p^3, \quad (3)$$

$$R_{RB}(\infty) = 1 - (1 - p)^3, \quad (4)$$

となる。

3.2 平均処理時間

2で述べた動作規則により、システムに入力 I が与えられてから出力 O_{sys} が得られるまでの平均時間を求めることができる。ここでも、前節と同様に各モジュール $M_i (i = 1, 2, 3)$ の処理時間の分布が同一で $F(t)$ であるとし、モジュールの信頼度も $p_i = p (i = 1, 2, 3)$ とする。さらに、 $T_r \rightarrow \infty$ とした場合のシステムの平均処理時間 $Ez_{NVP}(\infty)$ および $Ez_{RB}(\infty)$ は、それぞれ

$$Ez_{NVP}(\infty) = \sum_{\substack{i,j,k=1,2,3 \\ i \neq j \neq k}} p^2 E[T_j | T_i \leq T_j \leq T_k] + (1 - p^2) E[T_k | T_i \leq T_j \leq T_k], \quad (5)$$

$$Ez_{RB}(\infty) = pE[T_1] + p(1 - p)E[T_1 + T_2] + (1 - p)^2 E[T_1 + T_2 + T_3], \quad (6)$$

となる。

4 数値例と考察

本章では、数値例により、前節で導出した評価尺度の振舞いについて考察する。モジュールの処理時間分布関数 $F_i(t)$ に指数分布を用いて、以下のようにパラメータを設定する。

$$\left. \begin{aligned} F_i(t) &= 1 - e^{-10t} \\ p_i &= 0.9 \end{aligned} \right\} (i = 1, 2, 3). \quad (7)$$

図2に式 (1) および (2) の振舞いを示す。図2より、処理制限時間 T_r が比較的小さい場合は、 $R_{NVP} > R_{RB}$ であるが、 T_r が大きくなるとこれらの大小関係が逆転することが判る。すなわち、並列冗長構成である NVP の方が待機冗長構成の RB よりも、厳しい処理時間制限がある場合にはレスポンスは高いが、処理

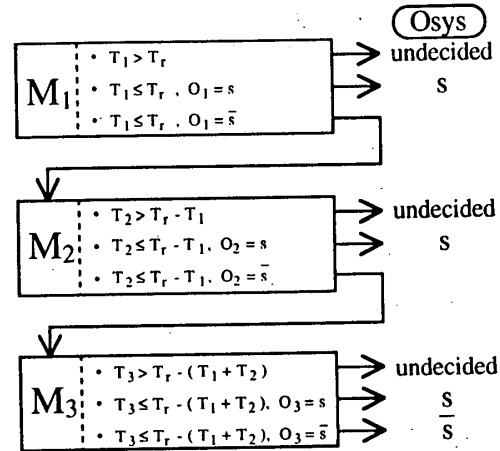


図1: RBの動作

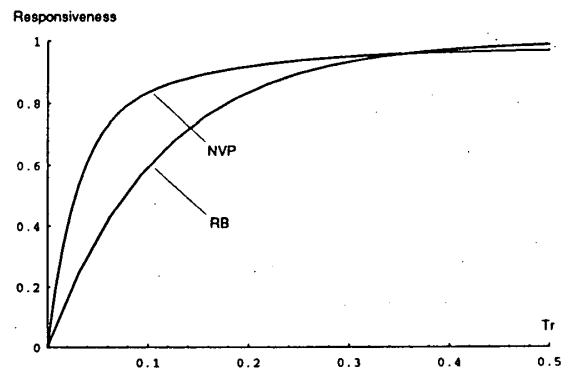


図2: レスポンスの比較

時間制限を緩めればRBのそれの方が高くなることを意味する。RBは三つのモジュールが逐次的に処理を行うため、並列処理を行うNVPに比べて不利であることになる。

さらに、本研究では三つのモジュールの処理時間分布や信頼度のパラメータを変化させた場合の各評価尺度の振舞いについて考察しているが、紙面の制約上ここでは割愛し、当日発表させて頂く。

参考文献

- [1] Muppala J. K., Woollet S. P. and Trivedi K.: "Real-Time-Systems Performance in the Presence of Failures", IEEE Computer Magazine, 24, 5, pp. 37-47 (May 1991).
- [2] 角田良明, 菊野亨: "レスポンスシステム:リアルタイムシステムとフォールトトレラントシステムの統合", 情報処理学会誌, 35, 1, pp. 48-54 (Jan. 1994).
- [3] Avizienis A.: "The N-Version Approach to Fault-Tolerant Software", IEEE Trans. Software Eng., SE-11,12, pp. 1491-1501 (Dec. 1985).
- [4] Tai A. T., Meyer J. F. and Avizienis A.: "Performability Enhancement of Fault-Tolerant Software", IEEE Trans. Reliab., 42, 2, pp. 227-237 (June 1993).
- [5] Vouk M. A., Paradkar A. M. and McAllister D. F.: "Modeling Execution Time of Multi-Stage N-Version Fault-Tolerant Software", in Fault-Tolerant Software Systems: Techniques and Applications, H. Pham ed., IEEE Computer Society Press, pp. 55-61, Los Alamitos (1992).
- [6] 木村光宏, 山田茂: "リアルタイム性をもつ冗長ソフトウェアシステムの性能評価に関する考察", 電子情報通信学会論文誌, J78-D-I, 8, pp.708-715 (Aug. 1995).