

ネットワークに連繋するマイクロプロセッサシステムの最適リセット回数

今 泉 充 啓[†] 安 井 一 民^{††} 中 川 覃 夫^{††}

ネットワーク通信技術の著しい進展とともに、その構成要素としてのワークステーションやパーソナルコンピュータの信頼性の問題が注目されている。ここでは、ネットワーク処理をともなうマイクロプロセッサ (μP) システムの高信頼化の問題を考察する。システムには、その動作過程でランダムに動作障害が発生するものと仮定し、その回復を μP のリセットによって行うものとする。このとき、 μP が動作開始後断続して N 回のリセットが発生した場合、処理を中断し一定時間後に初期状態からやり直すモデルを設定する。そのとき、ネットワーク処理が成功するまでの平均時間等を解析的に導出し、さらに、期待費用を最小にする最適問題を種々議論する。

Optimal Reset Number of a Microprocessor System Connected with Communication Networks

MITSUHIRO IMAIZUMI,[†] KAZUMI YASUI^{††} and TOSHIO NAKAGAWA^{††}

This paper considers the problem for improving the reliability of a microprocessor (μP) system with network processing. After the system has made stand-alone processing, it executes network communication procedure successively. When either μP failures or application software errors have occurred, a μP is reset and restarts again. We derive the reliability measures such as mean time. An optimal reset number which minimizes the expected cost until network processing is successful, is discussed analytically. Finally, numerical examples are given.

1. はじめに

近年、ネットワーク通信技術の著しい進展とともに、その構成要素としてのワークステーションやパーソナルコンピュータの信頼性の問題が注目されている。

実際、ネットワーク端末としてのマイクロプロセッサ (microprocessor: μP) は、使用環境やノイズの影響、プログラムバグ等によってある確率で異常が発生する。一般に、システムの運用段階における信頼性を考察する場合、 μP の異常の原因を、ハードウェアの故障としてでなく、メモリアクセスミス等のソフトウェア的なとらえ方が重要である。すなわち、 μP の異常が発生した場合、その異常発生の原因を同定する

のではなく、 μP を初期状態へリセットすることにより、システムを再生し復旧させることが有効な手段となっている¹⁾。

ここでは、ネットワーク処理をともなう μP の高信頼化の問題を考察する。 μP システムは、システム固有のローカル処理を実行した後、ネットワーク処理を行う。また、システムには、その動作過程でランダムに動作障害 (アプリケーションソフトウェアの動作障害等) が発生するものと仮定し、その回復を μP のリセットによって行うものとする。このようなシステムに対して、ここでは、 μP が動作開始後断続して N 回のリセットが発生した場合、処理を中断し、一定時間後に初期状態からやり直す場合を考える。そのとき、ネットワーク処理が成功するまでの平均時間や平均処理中断回数等を解析的に導出する。さらに、リセットや処理中断にともなうシステムリソースの増大と、処理中断後におけるシステム再実行のための保全等の損失を、コストとしてとらえて期待費用を導入し、それを最小にする最適問題を種々議論する。

[†] 愛知学泉大学経営学部

School of Business Management, Aichi Gakusen University

^{††} 愛知工業大学経営工学科

Department of Industrial Engineering, Aichi Institute of Technology

2. モデルの設定と解析

ネットワークに接続されたある端末(ワークステーションやパーソナルコンピュータ)に注目し,その動作開始時点からネットワーク処理成功時点までの過程を考慮した確率モデルを設定する.

仮定として,端末の μP システムは,指数分布 $F(t)$ (平均 $1/\lambda$) に従って異常が発生するものとする. 異常が発生した場合, μP のリセットを行い, μP を初期状態から再スタートさせる. また, リセットに要する時間は無視できるものとする.

- (1) 端末は動作開始後ただちにイニシャル処理を実行し, ローカル処理に移行する. その実行時間は, 一般分布 $V(t)$ (平均 $1/v$) に従う.
- (2) ローカル処理は, 指数分布 $A(t)$ (平均 $1/\alpha$) に従って行われる.
- (3) ローカル処理終了後, ネットワーク接続処理を開始する.
 - (a) 接続処理は一般分布 $B(t)$ (平均 $1/\beta$) に従って行われる. このとき, 接続処理に失敗する確率を γ とする.
 - (b) もし接続処理に失敗したならば, 一定時間待ち再び接続処理を行う. この待ち時間は, 一定時間分布 $W(t)$ (平均 w) に従う.
- (4) 接続処理に成功した場合, ネットワーク処理に移る.
 - (c) ネットワーク処理は, 一般分布 $U(t)$ (平均 $1/u$) に従って行われ, 異常処理とならない限り確率 1 で成功する.
- (5) μP システムが動作開始後, 断続して N 回のリセットが発生した場合, 処理を中断し, システムの障害要因の除去等, 適切な措置を実施した後, 初期状態からやり直す. この時間は, 一定時間分布 $G(t)$ (平均 μ) に従う.

以上の仮定のもとで, システムの状態を次のように定義する.

- 状態 0: イニシャル処理開始(動作開始, 再開始).
 状態 1: ローカル処理開始.
 状態 2: ローカル処理が完了し, 接続処理開始.
 状態 3: 接続処理が成功し, ネットワーク処理開始.
 状態 F: 処理中断.
 状態 S: ネットワーク処理成功.

上のように定義された各状態は, 状態 S を吸収状態にもつマルコフ再生過程²⁾を形成し, 各状態間の推移は図 1 のように表される.

マルコフ再生過程における各状態間の 1 ステップ推移

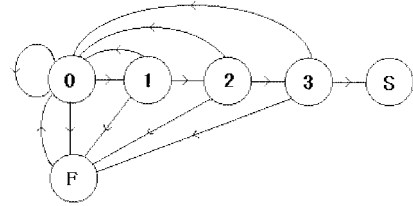


図 1 システムの状態推移図

Fig. 1 Transition diagram between system states.

確率時間分布を $Q_{i,j}(t)$ ($i = 0, 1, 2, 3; j = 0, 1, 2, 3, S$) とし, 一般に $\overline{F}(t) \equiv 1 - F(t)$ とおくと, 次式を得る.

$$Q_{0,0}(t) = \int_0^t \overline{V}(t) dF(t), \quad (1)$$

$$Q_{0,1}(t) = \int_0^t \overline{F}(t) dV(t), \quad (2)$$

$$Q_{1,0}(t) = \int_0^t \overline{A}(t) dF(t), \quad (3)$$

$$Q_{1,2}(t) = \int_0^t \overline{F}(t) dA(t), \quad (4)$$

$$Q_{2,0}(t) = \sum_{j=1}^{\infty} X^{(j-1)}(t) * \int_0^t [\overline{B}(t) + \gamma B(t) * \overline{W}(t)] dF(t), \quad (5)$$

$$Q_{2,3}(t) = \sum_{j=1}^{\infty} X^{(j-1)}(t) * \left[(1 - \gamma) \int_0^t \overline{F}(t) dB(t) \right], \quad (6)$$

$$Q_{3,0}(t) = \int_0^t \overline{U}(t) dF(t), \quad (7)$$

$$Q_{3,S}(t) = \int_0^t \overline{F}(t) dU(t). \quad (8)$$

ここで,

$$X(t) \equiv \gamma \int_0^t \overline{F}(t) dB(t) * \int_0^t \overline{F}(t) dW(t). \quad (9)$$

また, $*$ は分布関数のたたみこみを表し, 一般に $a^{(i)}(t)$ は分布 $a(t)$ の i 重たたみこみを表す. すなわち, $a^{(i)}(t) \equiv a^{(i-1)}(t) * a(t)$, $a(t) * b(t) \equiv \int_0^t b(t-u) da(u)$ である.

最初に, システムが動作を開始してからネットワーク処理成功に至るまでの平均時間 ℓ_S を求めよう. システムが時刻 0 で状態 0 から出発したとき, N 回のリセット未済で状態 S に至る経過時間分布 $H_{0,S}(t)$ は次式で与えられる.

$$H_{0,S}(t) = \sum_{j=1}^N D^{(j-1)}(t) * Z(t). \quad (10)$$

ここで,

$$D(t) \equiv Q_{0,0}(t) + Q_{0,1}(t) * Q_{1,0}(t) + Q_{0,1}(t) * Q_{1,2}(t) * Q_{2,0}(t) + Q_{0,1}(t) * Q_{1,2}(t) * Q_{2,3}(t) * Q_{3,0}(t), \quad (11)$$

$$Z(t) \equiv Q_{0,1}(t) * Q_{1,2}(t) * Q_{2,3}(t) * Q_{3,S}(t), \quad (12)$$

であり, $D(t)$ は μP が動作障害によってリセットさ

れる確率分布を、 $Z(t)$ はシステムが状態 0 から状態 S へリセットされることなく直接到達する確率分布を表す。また、システムが動作を開始してから、 N 回目のリセットによって処理中断の状態 F に至る経過時間分布 $H_{0,F}(t)$ は、

$$H_{0,F}(t) \equiv D^{(N)}(t), \quad (13)$$

となる。

このとき、ネットワーク処理成功までの経過時間分布 $L_S(t)$ は次のような再生形方程式で与えられる。

$$L_S(t) = H_{0,S}(t) + H_{0,F}(t) * G(t) * L_S(t). \quad (14)$$

一般に $\Phi(t)$ のラプラス・スチルチェス (LS) 変換を $\phi(s) \equiv \int_0^\infty e^{-st} d\Phi(t)$ と定義する。式 (14) を LS 変換し、方程式を解くことによって、

$$l_S(s) = \frac{h_{0,S}(s)}{1 - h_{0,F}(s)g(s)}, \quad (15)$$

を得る。よって、平均時間 ℓ_S を次のように求めることができる。

$$\begin{aligned} \ell_S &\equiv \lim_{s \rightarrow 0} \left\{ -\frac{dl_S(s)}{ds} \right\} \\ &= -\frac{z'(0) + d'(0)}{1 - d(0)} + \frac{\mu d(0)^N}{1 - d(0)^N}. \end{aligned} \quad (16)$$

ここで、一般に $\phi(s)$ の導関数を $\phi'(s)$ とおく。式 (16) より、 ℓ_S は N の単調減少関数となり、 $N = \infty$ のとき最小となる。

次に、 μP システムが動作開始またはリセットによって再開してから、ネットワーク処理が成功するまでの平均リセット回数 M_R を求めよう。時間間隔 $(0, t]$ における成功までのリセット回数を $M_R(t)$ とすると、

$$M_R(t) = \sum_{j=1}^{N-1} j D^{(j)}(t) * Z(t). \quad (17)$$

よって、平均リセット回数は、

$$\begin{aligned} M_R &\equiv \lim_{t \rightarrow \infty} M_R(t) = \lim_{s \rightarrow 0} \sum_{j=1}^{N-1} j [d(s)]^j z(s) \\ &= \frac{d(0)}{1 - d(0)} [1 - Nd(0)^{N-1} + (N-1)d(0)^N], \end{aligned} \quad (18)$$

として求められる。ここで、 $z(0) = 1 - d(0)$ であることに注意する。

さらに、 μP が動作を開始してからネットワーク処理が成功するまでの処理中断回数の分布を $M_F(t)$ とすると、

$$M_F(t) = H_{0,F}(t) * [1 + G(t) * M_F(t)], \quad (19)$$

であるから、前と同様にして、成功するまでの平均処理中断回数 M_F は、

$$M_F = \frac{d(0)^N}{1 - d(0)^N}, \quad (20)$$

となる。

3. 最適リセット回数

ここでは、システムリセット回数 N を評価尺度とし、ネットワーク処理成功までの平均時間を考慮した単位時間あたりの期待費用 $C(N)$ を最小にする最適リセット回数を解析的に導出する。

リセットにともなう損失費用を 1 回あたり c_1 、処理中断にともなう損失費用を 1 回あたり c_2 とする。そのとき、ネットワーク処理が成功するまでの総期待費用 $C(N)$ を次のように定義する。

$$\begin{aligned} C(N) &\equiv \frac{c_1 M_R + c_2 M_F}{\ell_S} \\ &= \frac{c_1 \sum_{j=1}^{N-1} j D^{(j)}(1-D) - \frac{A}{\mu} c_2}{A + \frac{\mu D^N}{1-D^N}} + \frac{c_2}{\mu} \\ &(N = 1, 2, \dots). \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $D \equiv d(0)$ であり、 μP がリセットされる確率を表す。また、

$$A \equiv -\frac{z'(0) + d'(0)}{1-D} > 0, \quad (22)$$

とおく。期待費用 $C(N)$ を最小にする N^* を求めるため、不等式 $C(N+1) - C(N) \geq 0$ とおくと、

$$\begin{aligned} N(1-D^N)(1-D^{N+1}) + \frac{\mu}{A} \left[ND^N(1-D^{N+1}) \right. \\ \left. + (1-D) \sum_{j=1}^{N-1} j D^{(j)} \right] \geq \frac{c_2}{c_1}, \end{aligned} \quad (23)$$

を得る。式 (23) の左辺を $L(N)$ とおくと、

$$\begin{aligned} L(N) - L(N-1) &= N(1-D^N)(1-D^{N+1}) \\ &\quad - (N-1)(1-D^{N-1})(1-D^N) \\ &\quad + \frac{\mu}{A} D^N [1 - D^{N+1} \\ &\quad + (N-1)D^{N-1}(1-D^2)] > 0, \end{aligned} \quad (24)$$

$$L(1) = (1-D^2) \left(1 - D + \frac{\mu}{A} D \right), \quad (25)$$

$$L(\infty) = \infty, \quad (26)$$

であるから、 $L(N)$ は $L(1)$ から ∞ までの N の単調増加関数となる。

以上により、次のような結論を得ることができる。

- (i) もし、 $L(1) < c_2/c_1$ ならば、式 (23) を満たす有限で唯一の整数 $N^* (> 1)$ が存在する。
- (ii) もし、 $L(1) \geq c_2/c_1$ ならば、 $N^* = 1$ である。

4. 数値例による考察と評価

3章で求めた期待費用 $C(N)$ を最小にする N^* について、具体的な数値を求める。

ここでは、評価尺度の相対的な傾向や動向を考察するため、 μP の平均イニシャル処理時間 $1/v$ をシステムの単位時間とおき、 μP の平均異常発生間隔を $(1/\lambda)/(1/v) = 30 \sim 60$ (可変) とおく。また平均口一

表 1 期待費用 $C(N)$ を最小にする最適リセット回数 N^*
 Table 1 Optimal reset number N^* to minimize $C(N)$.

$(1/\lambda)/(1/v)$	wv	γ	$(1/\alpha)/(1/v) = 5$					$(1/\alpha)/(1/v) = 10$					$(1/\alpha)/(1/v) = 20$					
			c_2/c_1					c_2/c_1					c_2/c_1					
			1	1.5	2	2.5	3	1	1.5	2	2.5	3	1	1.5	2	2.5	3	
30	1	0.1	2	2	3	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	
		0.2	2	2	3	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	
		0.4	2	2	3	3	4	2	3	3	4	4	2	3	3	4	4	
	2	0.1	2	2	3	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	
		0.2	2	2	3	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	
		0.4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	3	3	3	4	4	
	4	0.1	2	2	3	3	4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	
		0.2	2	2	3	3	4	2	3	3	4	4	2	3	3	4	4	
		0.4	2	3	3	3	4	2	3	3	4	4	3	3	4	4	4	
	60	1	0.1	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4
			0.2	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4
			0.4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4
2		0.1	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	
		0.2	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	
		0.4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	
4		0.1	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	
		0.2	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	
		0.4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	2	2	3	3	4	

カル処理時間を $(1/\alpha)/(1/v) = 5 \sim 20$ (可変), 平均接続処理時間を $(1/\beta)/(1/v) = 1$, 接続処理失敗時の平均待ち時間を $w/(1/v) = 1 \sim 4$ (可変), 平均ネットワーク処理時間を $(1/u)/(1/v) = 10$, 処理中断後の平均保全時間を $(1/\mu)/(1/v) = 10$ とし, 接続処理失敗確率を $\gamma = 0.1 \sim 0.4$ (可変) とする. 期待費用を求めめるため, リセット 1 回あたりの費用 c_1 を単位費用とし, 処理中断にともなう費用を $c_2/c_1 = 1 \sim 3$ (可変) と仮定する.

以上の仮定のもとで, 期待費用 $C(N)$ を最小にする N^* の数値例を表 1 に示す.

表 1 によれば, 最適リセット回数 N^* は, $(1/\lambda)/(1/v)$ の増大にともない, 減少する. また, $wv, \gamma, (1/\alpha)/(1/v), c_2/c_1$ が大きくなるに従って増加する. ここで, c_2/c_1 が大きくなるに従って N^* が増加するのは, 処理中断にともなう損失が大きいときは, なるべく処理中断に至らないようにリセットによって処理を継続すべきであると解釈することができる. 表 1 の結果から, $(1/\lambda)/(1/v)$ が小さい場合, すなわち, μP システムの障害が比較的頻繁に発生するとき, リセット回数 N^* は各パラメータに依存して変化する. しかし, $(1/\lambda)/(1/v) \geq 60$ では, N^* は wv や γ および $(1/\alpha)/(1/v)$ にほとんど依存せず, c_2/c_1 の値の

みによって, 大略決定されることがわかる.

5. おわりに

ネットワーク処理をともなうマイクロプロセッサシステムにおいて, システムの障害発生への対応が, 断続的なリセットによって行われるモデルを考察した. μP の平均異常発生間隔等を考慮することによって, システムが動作を開始してから, ネットワーク処理成功に至るまでの平均時間と処理中断回数等を求めた. また単位時間あたりの期待費用を最小にする最適なりセット回数をそれぞれ解析的に導出し議論した.

このような, μP システムの信頼性評価の問題は, 情報通信分野におけるネットワーク処理の利用拡大とともに今後ますます重要な課題になるものと考えられ, この方面に対する多くの研究が期待される.

参考文献

- 1) 南谷 崇: フォールトトレラントコンピュータ, オーム社 (1991).
- 2) Osaki, S.: *Applied stochastic system modeling*, Springer-Verlag, Berlin (1992).

(平成 11 年 10 月 30 日受付)

(平成 12 年 3 月 2 日採録)