遠隔保守を伴うコンピュータ・システムの最適点検方策†

安 井 一 民†† 中 川 寛 夫††† 沢 嘉 也†††

最近，コンピュータ・システムにおける省力・省資源化の問題が注目を集めている．たとえば，ハードウェアにおける高密度実装技術の採用によって，各機器の小型化，省スペース化，省電力化などが計画され，さらに，システム監視制御装置等によるシステム運転の自動化・省力化が実施されようとしている．一方，コンピュータ・システムの保全性の問題は非常に重要な問題であり，このようなシステム運転の自動化・省力化の進展に伴い，事後保全技術としての遠隔保守に関心が向けられている．ここでは，遠隔保守を伴うコンピュータ・システムの点検方策を考える．すなわち，ある確率分布に従って異常状態が発生するユーザシステムが，保守サービスセンタによって遠隔保守されているとき，そのユーザシステムを，一定間隔で点検する信頼性モデルを設定する．そのとき，マルコフ再生過程の理論を応用して，システムの定常アベイラビリティと，さらに，点検・修理費用を導入して，システムの単位時間当りの期待費用を求め，コスト/アベイラビリティ比を最小とする最適点検方策を議論し，最後に数値例を示す．

1. まえがき

最近，コンピュータ・システムにおける省力・省資源化の問題が注目を集めている．たとえば，ハードウェアにおける高密度実装技術の採用によって，各機器の小型化，省スペース化，省電力化などが計画され，さらに，システム監視制御装置等によるシステム運転の自動化・省力化が実施されようとしている．

一方，コンピュータ・システムの保全性の問題は非常に重要な問題であり，このようなシステム運転の自動化・省力化の進展に伴い，事後保全技術としての遠隔保守に関心が向けられている．遠隔保守とは，保守サービスセンタとユーザシステムとを通信回線を通して接続し，サービスセンタから修復機能を運用して，保守サービスを行うような保守技術である[1]．いわば，保守サービスセンタは，ユーザシステムに対して，遠隔コンソール (remote console)[1] 機能や，遠隔プログラム (remote program)[1] 機能等をもち，ユーザシステムのコンソール操作をサービスセンタから行うことができる．さらに，ソフトウェア修復に関するテストプログラムを保守サービスセンタから制御し，その結果を得て，ユーザシステムの保守員へ保守情報を送致することもできる．このようなコンピュータ・システムの例としては，UNIVAC 1100/60 シリーズ等があるが，最近では，保守サービスセンタに遠隔監視機能や遠隔診断機能等を設置して，ユーザシステムの運転自動化や省力化も指向されてきている．

さて，点検方策は Barlow and Proschan[2] によって紹介され，コンピュータ・システムの点検は安井ら[3] で議論されている．最近では，監視保全を伴うシステム[4] の保全方策についても考察されている．ここでは，遠隔保守を伴うコンピュータ・システムの点検方策を考える．すなわち，ある確率分布に従って異常状態が発生するユーザシステムが，保守サービスセンタによって遠隔保守されているとき，そのユーザシステムを，一定間隔で点検する信頼性モデルを設定する．そのとき，マルコフ再生過程の理論[5] を応用して，システムの定常アベイラビリティと，さらに，点検・修理費用を導入して，システムの単位時間当りの期待費用を求め，コスト/アベイラビリティ比を最小とする最適点検方策を議論し，最後に数値例を示す．

2. モデルの設定と定常アベイラビリティ

あるユーザシステムが，保守サービスセンタから遠隔保守されているとする．ユーザシステムは，確率分布 $F(t)$ (平均 $1/\lambda$) で異常状態が発生するが，その障害状況は，サービスセンタで遠隔監視されているものとする．もし，ユーザシステムに異常状態が発生したならば，保守サービスセンタは，確率分布 $L(t)$ (平均 l) にてユーザシステムを遠隔保守する．すなわち，保守サービスセンタは，異常発生から平均 l 時間後に，遠隔診断機能や遠隔プログラム機能等によってユーザシステムの異常状態の識別と保守方策の判定を行うことができる．ユーザシステムの再始動は，確率 p_0 で可能であり，そのとき，保守サービスセンタの

† An Optimum Inspection Policy for a Computer System with Remote Maintenance by KAZUMI YASUI (Division of Information Systems, Chubu Electric Power Inc.), TOSHIO NAKAGAWA and YOSHIYA SAWA (Department of Mathematics, Faculty of Science and Engineering, Meijo University).
†† 中部電力(株)情報システム部
††† 名城大学理工学部数学科

遠隔コンソール機能によって再始動を試みる．その再始動は確率 p_1 で成功して，ユーザシステムは再生され，正常な状態に戻るものとする．一方，確率 $1-p_0$ で再始動が不可能，または，確率 $1-p_1$ で再始動が失敗した場合には，確率分布 $G_1(t)$ (平均 $1/\mu_1$) で修理が実施され，ユーザシステムは再生されて動き始めるものとする．

このようなシステムに対して，一定時間間隔 T で予防点検を実施し，点検に要する時間は確率分布 $G_2(t)$ (平均 $1/\mu_2$) とする．また，点検によってユーザシステムの機能は完全に回復するものとする．なお，モデルを簡潔にするため，ユーザシステムと保守サービスセンタとの間の通信回線や，保守サービスセンタのコンピュータ・システム等は，故障しないものと仮定する．

以上の仮定のもとで，システムの挙動を表す各状態 i ($i=0, 1, 2, 3$) を次のように定義する．

状態0：システムの始動開始

状態1：ユーザシステムに異常状態が発生し，遠隔保守開始

状態2：遠隔保守の結果，再始動が不可能のため修理開始，または，再始動が失敗して修理開始

状態3：時刻 T で予防点検開始（ユーザシステム停止）

システムの各状態を上のように定義すると，マルコフ再生過程を形成し，再始動の成功，修理，点検によって，システムが再生すると仮定しているため，状態0，2，3が再生点となる．

マルコフ再生過程の各状態間の1ステップ推移確率時間分布を $Q_{03}(t)$, $Q_{20}(t)$, $Q_{30}(t)$，また，システムが時刻 $t=0$ で状態0から出発し，時刻 t までに状態1を経由して，次の状態 j へ推移する確率時間分布を $Q_{0j}^{(1)}(t)$ ($j=0, 2, 3$) とし，それぞれのラプラス・スティルチェス (LS) 変換を $q_{03}(s)$, $q_{20}(s)$, $q_{30}(s)$, $q_{0j}^{(1)}(s)$ とする．また，$F(t)$ の密度関数 $f(t)$ が存在するものとし，$\bar{F}(t)\equiv 1-F(t)$，故障率を $\gamma(t)\equiv f(t)/\bar{F}(t)$ とおく．さらに，システム異常状態が発生してから，一定時間後に，その異常状態の識別と保守方策の判定ができるものとして，$L(t)$ を次のように定義する．

$$L(t)\equiv\begin{cases}0: t<l\\ 1: t\geqq l\end{cases} \tag{1}$$

点検時間間隔が $T>l$ のとき，

$$q_{00}^{(1)}(s)=p_0p_1\int_0^{T-l}e^{-s(u+l)}dF(u) \tag{2}$$

$$q_{02}^{(1)}(s)=(1-p_0p_1)\int_0^{T-l}e^{-s(u+l)}dF(u) \tag{3}$$

$$q_{03}^{(1)}(s)=e^{-sT}[F(T)-F(T-l)] \tag{4}$$

$$q_{03}(s)=e^{-sT}\bar{F}(T) \tag{5}$$

$$q_{0i}(s)=g_{i-1}(s)\quad (i=2,\ 3) \tag{6}$$

を得る．ここで，$g_i(s)\equiv\int_0^\infty e^{-st}dG_i(t)$ とおく．たとえば，$q_{00}^{(1)}(s)$ は，

$$Q_{00}^{(1)}(t)=p_0p_1\int_0^t\int_0^v dF(u)\bar{B}(v)dL(v-u)$$

の LS 変換形を示す．ここで，$\bar{B}(v)=1: v<T$, $=0: v\geqq T$ である．これは，時間間隔 $(0, T]$ において，ユーザシステムの異常が時刻 u で発生し，保守サービスセンタによる遠隔保守の結果，点検時間がくるまでに，$v-u$ 時間後に再始動が実施され，その再始動が成功し，システムが動き始める場合の確率分布を表す．

さて，(2)～(6)式を用いて定常アベイラビリティを求めよう．システムが，時刻 $t=0$ で状態0から出発して，時刻 t で状態 j にある確率を $P_{0j}(t)$ ($j=2$, 3) とし，その LS 変換を $p_{0j}(s)$ とすると，

$$p_{02}(s)=q_{02}^{(1)}(s)[1-q_{20}(s)]/[1-h_{00}(s)] \tag{7}$$

$$p_{03}(s)=[q_{03}(s)+q_{03}^{(1)}(s)]\cdot[1-q_{30}(s)]/[1-h_{00}(s)] \tag{8}$$

を得る．ここに，

$$h_{00}(s)=q_{00}^{(1)}(s)+q_{02}^{(1)}(s)q_{20}(s)+[q_{03}(s)+q_{03}^{(1)}(s)]q_{30}(s) \tag{9}$$

であり，状態0から初めて状態0に戻る再帰時間分布の LS 変換形を示している．

システムが，定常状態において故障状態にある確率，すなわち，アンアベイラビリティ $P_F(T)$ は，

$$P_F(T)\equiv\lim_{t\to\infty}\{P_{02}(t)+P_{03}(t)\}=\left\{\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)F(T-l)+\frac{1}{\mu_2}\bar{F}(T-l)\right\}\Big/l_{00} \tag{10}$$

となる．ここで，

$$l_{00}\equiv l+\int_0^{T-l}\bar{F}(u)du+\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)F(T-l)+\frac{1}{\mu_2}\bar{F}(T-l) \tag{11}$$

で与えられ，状態0に戻る平均再帰時間を表している．明らかに，定常アベイラビリティは $1-P_F(T)$ となる．

次に，同様な方法によって，定常状態において単位時間当りにシステムが各状態 j を訪問する平均回数

M_j $(j=2, 3)$ は，次式で与えられる．

$$M_2=(1-p_0p_1)F(T-l)/l_{00} \tag{12}$$

$$M_3=\bar{F}(T-l)/l_{00} \tag{13}$$

ここに，M_2 は単位時間当りの平均故障回数，M_3 は単位時間当りの平均点検回数を表している．

3. 最適点検方策

点検費用，修理費用を導入して，ユーザシステムの最適点検方策を考察しよう．

単位時間当りの修理費用を c_1，定期点検による単位時間当りの点検費用を c_2 とすると，システムの単位時間当りの期待費用 $C(T)$ は，

$$\begin{aligned}C(T)&=c_1M_2+c_2M_3\\&=\{c_1(1-p_0p_1)F(T-l)+c_2\bar{F}(T-l)\}/l_{00}\end{aligned} \tag{14}$$

で与えられる．コスト/アベイラビリティ比は，(10) 式と(14)式から，

$$\begin{aligned}A(T)&\equiv C(T)/[1-P_F(T)]\\&=\{c_1(1-p_0p_1)F(T-l)+c_2\bar{F}(T-l)\}\\&\quad\Big/\left\{l+\int_0^{T-l}\bar{F}(u)du\right\}\end{aligned} \tag{15}$$

となる．したがって，$A(T)$ を最小にする問題は，本質的にアンアベイラビリティ $P_F(T)$ を最小にする問題と同じであることがわかる．

さて，$T\geqq l$ のとき，$A(T)$ を最小にする T^* を求めよう．最初に，$c_1(1-p_0p_1)>c_2$ とする．そのとき，故障率 $\gamma(t)$ が t の単調増加関数で，$0<p_0p_1<1$ と仮定する．(15)式の $A(T)$ を T で微分して，$dA(T)/dT=0$ とおくことによって，

$$\begin{aligned}&\gamma(T-l)\left\{l+\int_0^{T-l}\bar{F}(u)du\right\}-F(T-l)\\&\quad=c_2/\{c_1(1-p_0p_1)-c_2\}\end{aligned} \tag{16}$$

を得る．(16)式の左辺を $h(T)$ とおくと，明らかに，

$$h'(T)>0 \tag{17}$$

$$h(l)=l\gamma(0) \tag{18}$$

$$h(\infty)=\gamma(\infty)\{l+1/\lambda\}-1 \tag{19}$$

となる．したがって，次のような最適点検方策を得る．

（1） もし，$h(\infty)>c_2/\{c_1(1-p_0p_1)-c_2\}>h(0)$，すなわち，$\gamma(\infty)\{l+1/\lambda\}>c_1(1-p_0p_1)/\{c_1(1-p_0p_1)-c_2\}$，$\gamma(0)<c_2/\{l[c_1(1-p_0p_1)-c_2]\}$ ならば，$l<T^*<\infty$ となる唯一つの T^* が存在し，コスト/アベイラビリティ比は，

$$A(T^*)=\gamma(T^*-l)\{c_1(1-p_0p_1)-c_2\} \tag{20}$$

（2） もし，$h(\infty)\leqq c_2/\{c_1(1-p_0p_1)-c_2\}$ ならば，$T^*=\infty$，すなわち，点検しないほうがよく，

$$A(\infty)=c_1(1-p_0p_1)/\{l+1/\lambda\} \tag{21}$$

（3） もし，$\gamma(0)\geqq c_2/\{l[c_1(1-p_0p_1)-c_2]\}$ ならば，$T^*=l$，すなわち，できるだけ多く点検するほうがよく，

$$A(l)=c_2/l \tag{22}$$

さらに，$c_1(1-p_0p_1)\leqq c_2$ とする．そのとき，$A(T)$ は T の減少関数であることが示され，$T^*=\infty$ のとき $A(T)$ は最小となる．同様にして，$p_0p_1=1$ のときも，$T^*=\infty$ であることが示される．

ところで，いままでは，保守サービスセンタは一定時間 l 後に異常状態の識別をし，どのような保守方策を採用したらよいかの判定ができると仮定したが，判定に要する時間が一般分布 $L(t)$ に従うとする．そのとき，前と同様な方法で，アンアベイラビリティは，

$$\begin{aligned}P_F(T)=&\left\{\frac{1}{\mu_2}+\left[\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)-\frac{1}{\mu_2}\right]\right.\\&\left.\cdot\int_0^T L(T-u)dF(u)\right\}\Big/\left\{\frac{1}{\mu_2}+\int_0^T\bar{F}(t)dt\right.\\&+\left[\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)-\frac{1}{\mu_2}\right]\int_0^T L(T-u)dF(u)\\&\left.+\int_0^T\int_u^T\bar{L}(t-u)dtdF(u)\right\}\end{aligned} \tag{23}$$

で与えられ，コスト/アベイラビリティ比は，

$$\begin{aligned}A(T)=&\left\{c_2+[c_1(1-p_0p_1)-c_2]\right.\\&\left.\cdot\int_0^T L(T-u)dF(u)\right\}\Big/\left\{\int_0^T\bar{F}(t)dt\right.\\&\left.+\int_0^T\int_u^T\bar{L}(t-u)dtdF(u)\right\}\end{aligned} \tag{24}$$

となる．とくに，$L(t)=1-e^{-\theta t}$ のとき，すなわち，判定に要する時間がランダムで，平均 $1/\theta$ をもつ指数分布に従うと仮定すると，

$$\begin{aligned}P_F(T)=&\left\{\frac{1}{\mu_2}+\left[\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)-\frac{1}{\mu_2}\right]\right.\\&\left.\cdot\int_0^T(1-e^{-\theta(T-u)})dF(u)\right\}\Big/\left\{\frac{1}{\mu_2}+\int_0^T\bar{F}(t)dt\right.\\&+\left[\frac{1}{\mu_1}(1-p_0p_1)+\frac{1}{\theta}-\frac{1}{\mu_2}\right]\\&\left.\cdot\int_0^T(1-e^{-\theta(T-u)})dF(u)\right\}\end{aligned} \tag{25}$$

コスト/アベイラビリティ比は，

$$\begin{aligned}A(T)=&\left\{c_2+[c_1(1-p_0p_1)-c_2]\right.\\&\left.\cdot\int_0^T(1-e^{-\theta(T-u)})dF(u)\right\}\Big/\left\{\int_0^T\bar{F}(t)dt\right.\end{aligned}$$

$$+\frac{1}{\theta}\int_0^T(1-e^{-\theta(T-u)})dF(u)\Big\} \tag{26}$$

となる．一般に，このような仮定のもとで最適方策を理論的に議論することはむつかしいが，数値計算で具体的に計算し，比較することによって，最適点検時間を求めることは可能であろう．

4. 数 値 例

ユーザシステムにおけるシステム異常状態発生時間分布 $F(t)$ には，種々の分布が考えられるが，ここでは，ワイブル分布：$F(t)\equiv 1-e^{-\alpha t^\beta}$ $(\beta>1)$ を仮定し，$\beta=2.0$, $1/\alpha=720$ (時間) とおく．**表1**に，修理費用と点検費用の比が $c_1/c_2=15$, 20 の場合において，再始動可能確率 p_0 と再始動成功確率 p_1 の積 p_0p_1 を可変 (50, 70, 90(%)) とし，さらに，遠隔保守経過時間 l を可変 (10, 30, 60, 90(分)) としたとき，最適点検時間 T^* および対応する定常アベイラビリティ $1-P_F(T^*)$ の数値例を示す．このとき，T^* は，(16) 式の唯一の解として求められる．

この表によれば，p_0p_1 の増大に伴って T^* は大きくなり，同一の p_0p_1 のもとで，修理費用と点検費用の比 c_1/c_2 が大きくなるに従って T^* は小さくなる．この結果は(16)式の右辺より容易に確かめられる．また，遠隔保守に要する時間 l の変化に対して，T^* がほとんど一定の値をとることは興味深い．たとえば，$c_1/c_2=20$ が既知の場合，$p_0p_1=70(\%)$ では，遠隔保守時間 l に無関係に大略2回/日の点検政策が最適となり，また，$p_0p_1=90(\%)$ の場合には，大略1回/日の点検政策が最適となることがわかる．なお，この場合の定常アベイラビリティは，それぞれ，およそ 86(%)，93(%) である．

表1 コスト／アベイラビリティ比を最小にする点検時刻 T の数値例

Table 1 Numerical values of inspection time T to minimize the cost efficiency (=expected cost/availability).

p_0p_1 (%)	l (分)	$c_1/c_2=15$		$c_1/c_2=20$	
		T^* 時間	$1-P_F(T^*)$	T^* 時間	$1-P_F(T^*)$
50	10	10.7	0.84021	9.1	0.81744
	30	10.7	0.84448	9.1	0.82474
	60	10.7	0.85096	9.1	0.83160
	90	10.7	0.85755	9.1	0.83857
70	10	14.7	0.87620	12.2	0.85680
	30	14.7	0.87869	12.2	0.86022
	60	14.6	0.88322	12.1	0.86538
	90	14.6	0.88626	12.1	0.86957
90	10	45.2	0.94114	29.3	0.92513
	30	44.9	0.94192	29.1	0.92640
	60	44.5	0.94303	29.0	0.92784
	90	44.1	0.94414	28.8	0.92951

5. む す び

ある確率分布に従って異常状態となるユーザシステムが，保守サービスセンタによって遠隔保守されているとき，そのシステムを一定時間間隔で予防点検するモデルを設定した．はじめに，マルコフ再生過程を使用して，システムの定常アベイラビリティを求め，さらに，修理費用と点検費用を導入して，システムの単位時間当りの期待費用を求めた．また，コスト/アベイラビリティ比を最小とする最適点検方策について考察し，最後に数値例を示した．

従来，コンピュータ・システムの保全は，ハードウェアとソフトウェアの修復機能を用いて行われているが，それらの機能を遠隔操作することによって，保守サービスを行うようなシステムが運用されてきている．このような遠隔保守を伴うコンピュータ・システムは，保守業務の効率化のために今後幅広く用いられるであろう．最近では，ユーザシステムの運転自動化や省力化なども指向されてきており，システム監視制御装置の採用などのシステム運用面の要求によって，コンピュータ・システムの保全方策の多様化も促進されてきている．ここで述べた保全方策に対する考察や議論は，このような観点からも，コンピュータ・システムの高信頼化に有益となるであろう．

参 考 文 献

1) 情報処理学会編：新版情報処理ハンドブック，p. 1166，オーム社，東京 (1982)．
2) Barlow, R. E. and Proschan, F.: *Mathematical Theory of Reliability*, Wiley, New York (1965).
3) 安井，本告，中川，沢：点検政策の信頼度解析とコンピュータ・システムへの応用，*J. Oper. Res. Soc, Jpn.*, Vol. 23, No. 3, pp. 273-285 (1980)．
4) 安井，中川，沢：監視保全を伴うコンピュータ・システムの信頼性，信学論 (A)，Vol. J 66-A, No. 12, pp. 1214-1219 (1983)．
5) Nakagawa, T. and Osaki, S.: Stochastic Behavior of A Two-Unit Standby Redundant System, *INFOR*, Vol. 12, No. 1, pp. 66-70 (1974).

(昭和59年1月5日受付)
(昭和59年5月15日採録)