定期的に比較診断を実行する2重化システムの最適方策

02602443 愛知工業大学大学院 *水谷聡志 MIZUTANI Satoshi
01400043 愛知工業大学 中川聰夫 NAKAGAWA Toshio
01012123 三菱重工業株式会社 伊藤弘道 ITO Kodo

1 はじめに

信頼性向上のため、2つのモジュールから構成され、最初に出力をしているモジュールAが故障したならば、他方のモジュールBに出力を切り替える冗長システムを考える。前回の発表では[1]、2重系のとき、全ての演算毎に、連続的に比較診断を実施し、片方のモジュールが故障し1重系となった後、定期的に自己診断するモデルを考えた。ここでは、システムが2重系として動作しているときも、1重系となった後の自己診断間隔と同一の間隔で比較診断を実行するシステムを考える。実際に、2重系として設計されているこのようなモデルの例として、ガスタービンエンジン制御装置であるFADECがある。

さらに、2つのモジュールが同期をとるため、唯一つのクロック装置により制御されるとし、これが故障するモデルについても考える。このようなモデルに対して、信頼性理論の点検方策を応用し、故障検出までの期待時間と費用を導出し、それを最小にする最適な診断間隔時間を議論する。

2 定期的に比較診断を実行するモデル

2.1 モデルと期待費用

最初にシステムは2重系で構成され、出力結果に対して定期的に比較診断を実行する。その後、システムは矛盾した比較診断結果を検知した時点で故障した系を摘出し、これを切り離す。その後、1重系システムとして動作し、定期的に故障検出のため自己診断を繰り返す。一般に自己診断は比較診断を実行するよりも性能劣化が大きいとする。

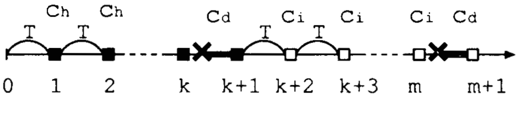

図 1: 定期的に比較診断を実行するモデル

このモデルに対して、以下の仮定をする。

1. 比較診断と自己診断間隔は一定時間間隔Tで実行する。
2. 比較診断を一回実行することによる制御性能の劣化による損失をc_hとし、自己診断による性能劣化の損失をc_iとする。
3. 比較診断によって必ず故障を検出し、故障した系を切り離す。ただし、故障した系の選出と故障系の切り離しに要する時間および性能劣化は無視する。
4. 各系の信頼度関数は、有限な平均$1/\lambda$をもつ同一の一般分布$\overline{F}(t)$に従い、$F(t)\equiv 1-\overline{F}(t)$とおく。
5. 出力系の故障発生から自己診断による故障発見までの時間にかかる損失は、単位時間当りc_dとする($c_d > c_e$)。
6. 2つの系が故障したとき、保全費用として、c_r ($c_r < \frac{1}{\lambda}c_d$)とする。

1サイクルを2重系の両方が故障し、これを検出するまでの時間と仮定する。両方の系が故障する前の取替や修理は考慮しない。モジュールAが故障する時刻をt_aとし、モジュールBが故障する時刻をt_bとする。単位時間当りの期待費用$C_1(T)$は、次式で与えられる。

$$C_1(T)=\frac{\left[\begin{array}{c} c_r+(c_h-c_i)\sum_{m=0}^{\infty}\overline{F}(mT)^2 \\ +c_i\sum_{m=0}^{\infty}[1-F(mT)^2] \\ +c_d\sum_{m=0}^{\infty}[1+F(mT)] \\ \times\int_{mT}^{(m+1)T}[F(t)-F(mT)]dt \end{array}\right]}{T\sum_{m=0}^{\infty}[1-F(mT)^2]}. \qquad (1)$$

2.2 最適方策

各モジュールの信頼度関数は、同一の指数分布$\overline{F}(t)=e^{-\lambda t}$に従うとする。このとき、単位時間当りの期待費用$C_1(T)$は、(1)式より、

$$C_1(T) = c_d + \frac{\left[\begin{array}{c} c_h + 2c_i e^{-\lambda T} + c_r(1 - e^{-2\lambda T}) \\ -c_d(1 + e^{-\lambda T} - 2e^{-2\lambda T})/\lambda \end{array}\right]}{T(1 + 2e^{-\lambda T})}. \quad (2)$$

期待費用 $C_1(T)$ を最小にする最適な診断間隔 T_1^* を求めるため、$C_1(T)$ を T で微分して 0 とおくと次式を得る。

$$\begin{aligned} &4c_h(1-e^{-\lambda T})+[4c_i+2c_r\lambda T e^{-\lambda T}](1-e^{-2\lambda T}) \\ &+\left[2(c_i-c_h)+\frac{c_d}{\lambda}(1+2e^{-\lambda T})^2\right][1-(1+\lambda T)e^{-\lambda T}] \\ &-c_r(1+2e^{-\lambda T})[1-(1+2\lambda T)e^{-2\lambda T}] = 6c_i+2c_h. \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式の左辺を $Q_1(T)$ おくと、$Q_1(0) = 0$、

$$Q_1(\infty) \equiv \lim_{t\to\infty} Q_1(T) = 6c_i + 2c_h + \frac{1}{\lambda}c_d - c_r. \quad (4)$$

よって、$\frac{1}{\lambda}c_d > c_h + c_r$ ならば、(3) 式を満たす有限な T_1^* $(0 < T_1^* < \infty)$ が必ず存在する。

3 クロック装置の故障を考慮したモデル

3.1 モデルと期待費用

比較診断を実行するためには、２つのモジュールが何らかの方法で、同期をとりながら動作する必要がある。ここでは、唯一つのクロック装置により同期をとることできると仮定し、クロック装置の故障を考慮したモデルを考える。前節のモデルの仮定に加えて、クロック装置が故障する時刻を t_c とし、クロック装置の信頼度関数を、有限な平均 $1/\gamma$ をもつ一般分布 $\overline{F}_c(t_c)$ とする。また、クロック装置が、他の２つの系の故障の検出よりも早く故障した場合、その時点で１サイクルの終了とし、取替費用と別に c_c がかかるものとする。

このようなモデルに対して、単位時間当りの期待費用を導出し、それを最小にする比較または自己診断の最適な実行間隔時間を求める。このとき、１サイクルの期待費用 $A(T)$ は、

$$\begin{aligned} &c_r + \sum_{m=1}^{\infty}\int_{mT}^{(m+1)T} dF(t_b)\Big[\sum_{k=0}^{m-1}\int_{kT}^{(k+1)T} dF(t_a)\Big\{2\Big[c_h\sum_{l=1}^{k+1}\overline{F}_c(lT) \\ &+ c_i\sum_{l=k+2}^{m+1}\overline{F}_c(lT) + c_d\int_{t_b}^{(m+1)T}\overline{F}_c(t_c)dt_c\Big] + c_d\int_{t_a}^{(k+1)T}\overline{F}_c(t_c)dt_c\Big\}\Big] \\ &+ \sum_{k=0}^{\infty}\int_{kT}^{(k+1)T} dF(t_b)\int_{kT}^{(k+1)T} dF(t_a)\Big[c_h\sum_{l=1}^{k+1}\overline{F}_c(lT) \\ &+ c_d\int_{t_a}^{(k+1)T}\overline{F}_c(t_c)dt_c\Big] + c_c\sum_{k=0}^{\infty}[1+F(kT)]\overline{F}(kT)\int_{kT}^{(k+1)T} dF_c(t_c). \end{aligned}$$

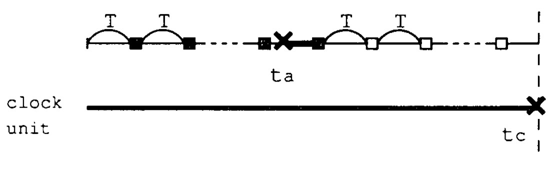

図 2: クロック装置が故障するモデル

１サイクルの期待時間 $B(T)$ は、

$$\sum_{m=0}^{\infty}\left[1 - F(mT)^2\right]\int_{mT}^{(m+1)T}\overline{F}_c(t_c)dt_c.$$

よって、単位時間あたりの期待費用 $C_2(T)$ は、

$$C_2(T) = \frac{A(T)}{B(T)}. \quad (5)$$

明らかに、クロック装置の故障を考慮しないとき、いわば、$\overline{F}_c(t_c) \equiv 1$ のとき、(5) 式は (1) 式に一致する。

3.2 最適方策

各モジュールの信頼度関数は、指数分布 $\overline{F}(t) = e^{-\lambda t}$ に従うとし、クロック装置の信頼度関数も指数分布 $\overline{F}_c(t) = e^{-\gamma t}$ に従うとする。このとき、単位時間当りの期待費用 $C_2(T)$ は (5) 式より、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_2(T) = c_d + \gamma\Bigg[&c_c - \frac{c_d(1 - e^{-(\lambda+\gamma)T})}{(\lambda+\gamma)(1-e^{-\gamma T})} \\ &+ \frac{c_h e^{-\gamma T}(1-e^{-(\lambda+\gamma)T}) + c_i e^{-(\lambda+2\gamma)T}(1-e^{-\lambda T})}{(1-e^{-\gamma T})(1+e^{-(\lambda+\gamma)T}-2e^{-(2\lambda+\gamma)T})}\Bigg] \quad (6) \end{aligned}$$

4 まとめ

ここでは信頼性向上のため、２重化されているシステムに対し、２重系として動作しているときは比較診断を実行し、１重系となった後では、自己診断を実行する点検方策を考え、解析を行った。比較診断と自己診断は、同一の診断間隔で実行されるとし、期待費用を最小にする最適な診断間隔を議論した。さらに、２つのモジュールの同期をとるため、クロック装置を備えたモデルを考え、同様の解析を行った。

参考文献

[1] 水谷聡志, 中川覃夫, 伊藤弘道: ２重化システムの連続比較点検方策. 日本ＯＲ学会春季研究発表会アブストラクト集, pp.68-69(2000).