

## Stateful TMRの性能評価

松本 勝慶<sup>†1</sup> 上原 稔<sup>†1</sup> 森 秀樹<sup>†1</sup>

高信頼なシステムを構築する方法としてしばしば多重化が用いられている。多重化による信頼性の向上方法として、TMRが古くから用いられている。しかしながら、TMRでは、モジュールが2つ故障すると多数決の結果が保証されない。そこで、以前我々がSWCNN向けにTMRのモジュール毎に状態評価を行い、状態を評価したStateful TMRを提案した。Stateful TMRを用いることでTMRより高い信頼性が得られた。本論文では、Stateful TMRの停止故障、一時故障における信頼性の評価を行う。

## Evaluation of Stateful TMR

MATSUMOTO KATSUYOSHI,<sup>†1</sup> MINORU UEHARA<sup>†1</sup>  
and HIDEKI MORI<sup>†1</sup>

In a reliability system, high reliable system used that the popular method for TMR (Triple Modular Redundancy). TMR uses majority voting for three modules. However, TMR does not decide correct result when two of three modules fail. We have proposed Stateful TMR for SWCNNs. The Stateful TMR features state evaluation for failure state for each module. The Stateful TMR gets higher reliability than TMR for SWCNN applications. In this paper, we evaluate reliability of Stateful TMR in stop and transient failures.

### 1. はじめに

近年のシステムは著しく複雑化している。また、そのシステムが担う役割も拡大し、重要性を増している。このようなシステムの場合、システムに障害が発生すると多大な被害を及ぼす可能性がある。このような危険性を回避するためには、システムの信頼性を高める必要がある。

高信頼なシステムを構築する方法として多重化が古くから用いられている。多重化による信頼性の向上方法として、多数決を用いたTMR (Triple Modular Redundancy) が古くから用いられている。しかしながらTMRでは、モジュールが2つ故障すると多数決結果が保証されない。また、我々が以前提案したSmall-World Cellular Neural Networks (SWCNN)におけるTMRを用いた耐故障化でもあまりよい結果とはならなかった。そこで、TMRのモジュール毎に状態評価を行い、状態を評価することで高い信頼性を持たせたStateful TMRを提案し、評価を行った。SWCNNでは、Stateful TMRを用いることでTMRより耐故障性が向上した<sup>4)-6)</sup>。本論文では、Stateful TMRの停止故障、一時故障における信頼性の評価、考察を行う。

本論文の構成は第2章で多重化について述べる。第3章で提案手法についてのべ、第4章で実験方法、評価について述べる。

### 2. 多重化

ここでは、多重化冗長方式<sup>1)-3)</sup>について述べる。多重化冗長方式では、アクティブな方法とパッシブな方法に分けることができる。また、それらをあわせたハイブリッド方式がある。パッシブな方法では、故障を隠し、エラー結果から故障を防ぐことをコンセプトとしている。また、この方法ではシステムの復旧なしでの耐故障性を向上させるために設計される。パッシブな方法での代表的な例として、NMR (N-Modular Redundancy) がある。N個のモジュールを並べ、その結果を多数決により出力を決定する。アクティブな方法は、動的な方法でシステム中の故障を検出し、隔離させることで耐故障性の向上をはかっている。ハイブリッド方式では、パッシブな方法とアクティブな方法の両方の特徴を備えた方式である。故障のマスキングは、エラーを防ぐために利用され、故障の検出、故障の特定、故障からの回復は、故障モジュールの隔離そして、スペアへのリプレースすることで耐故障性の向上を図る。

ここではパッシブな方法の代表的な例としてTMR (Triple Modular Redundancy)<sup>1)-3)</sup>

<sup>†1</sup> 東洋大学工学研究科情報システム専攻

Dept. of Open Information Systems, Graduate School of Engineering, Toyo University

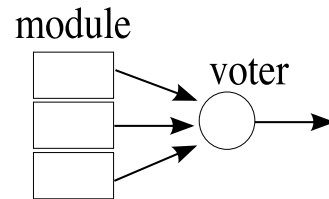


図 1 TMR の概念図  
Fig.1 TMR

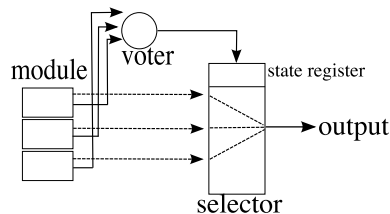


図 2 Stateful TMR の概念図  
Fig.2 Stateful TMR

について説明する。TMR は、古くからあるエラーマスキング方法の一つである。3つの同じモジュールを並列化し、多数決をとることで出力を決定する。TMR では、もし1つのモジュールの出力が異なっても、他の2つのモジュールの出力が一致しているならば、多数決結果により出力が決定される。図 1 にこの方法の概要を示す。しかし、TMR ではモジュールに2つ以上の故障が発生した場合、故障を隠すことが不可能となる。

### 3. Stateful TMR

ここでは、Stateful TMR<sup>4)-6)</sup>について述べる。Stateful TMR は、TMR に状態評価モジュールを追加することで TMR の信頼性向上させる。Stateful TMR での信頼評価は多数決を用いて評価する。図 2 に Stateful TMR の概念図を示す。Stateful TMR では、TMR の多数決結果よりセレクトが出力を決定する。セレクトはモジュール毎の状態評価を行う。状態評価により出力が決定する。

出力について述べる。故障と評価されているモジュールが存在しない場合では、出力は多数派となった結果を出力する。故障と評価されているモジュールが存在する場合は、つぎの手順で出力を決定する。少数派のモジュールの状態でも出力を決定する。少数派が故障と評価されているならば、出力は多数派の結果を出力する。少数派が正常と評価されているならば、多数派が故障評価モジュールを含むかどうかで出力が決定される。多数派が故障と評価されているモジュールを含んでいる場合、出力は少数派を出力とする。多数派が故障と評価されているモジュールを含んでいない場合では、出力は多数派となる。

次に故障状態の評価について述べる。状態評価の決定手順は以下に示す。

- (1) 故障モジュールが存在するかどうかを見る
- (2) 故障が無い場合では多数決結果により状態を決定する
- (3) 故障が存在する場合は故障個数により決定する。以下の手順となる。
- (4) 故障個数が1個の場合では、多数派が故障を含まない場合では多数派を信頼し少数派のモジュールを故障とする。多数派が、故障を含む場合では少数派を信頼し、多数派を故障とする
- (5) 故障個数が2個の場合では、少数派が故障を含むとき多数派の故障モジュールを正常に変更し少数派を故障とする。少数派が故障を含まないとき多数派を故障とする。
- (6) 3つすべてのモジュールの出力が一致した場合は、例外的に故障個数が1個のときそのモジュールを正常へ変更する。

故障と評価されているモジュールが無い場合では、多数決により少数派となったモジュールは、故障と評価される。故障モジュールがある場合では、つぎの手順で故障状態の評価を行う。1つの場合では、故障モジュールが多数派である場合では、多数派となったもう一つのモジュールを故障と評価する。また、少数派となった場合では、評価は変わらない。2つであるときは、故障と評価されているモジュールが多数派と少数派に別れている場合、多数派の故障モジュールの評価を正常と評価する。このとき少数派のモジュールは、故障と評価されたままにする。故障と評価されているモジュールが2つとも多数派となった場合では、故障と評価されたままにする。また、すべてのモジュールの出力が一致した場合は、故障と評価されているモジュールが1つの場合、そのモジュールの評価を正常と評価する。図 3、図 4 に Stateful TMR の出力の決定手順と状態の決定手順をそれぞれ示す。

### 4. 評 価

ここでは、評価について述べる。4.1 では、評価方法について述べ、4.2、4.3 では、実験

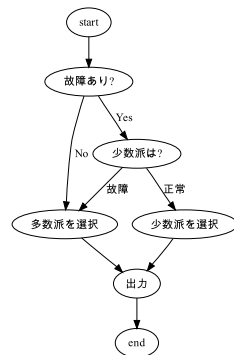


図 3 Stateful TMR の出力決定手順  
Fig. 3 Selection of output

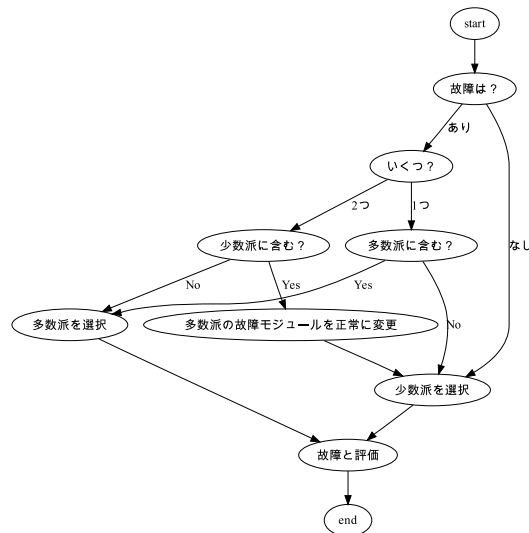


図 4 Stateful TMR の故障評価決定手順  
Fig. 4 Evaluate of failure state

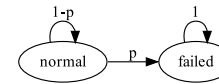


図 5 停止故障における故障状態の状態遷移  
Fig. 5 Stop failure

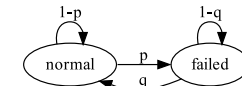


図 6 一時故障における故障状態の状態遷移  
Fig. 6 Transient failure

結果について述べ、4.4 に考察を述べる。

#### 4.1 評価方法

ここでは、評価方法について述べる。本研究では、停止故障と一時故障について評価する。まず、故障確率 ( $p$ ) と復旧確率 ( $q$ ) について述べる。故障確率は、正常状態のモジュールが単位時間あたり故障する確率を故障確率とする。復旧確率は、故障状態のモジュールが単位時間あたり復旧し、正常状態に戻る確率を復旧確率とする。停止故障は、復旧確率が 0 である故障を停止故障とする。一時故障は、復旧確率が 0 以上である故障を一時故障とする。停止故障と一時故障の状態遷移図を図 5、図 6 にそれぞれ示す。

#### 4.2 停止故障

停止故障のシミュレーション結果を図 7 から図 9 に示す。図 7 に故障確率 0.001 の場合のシミュレーション結果を示す。TMR は一時的には単一モジュールの場合より信頼性が高くなる。しかし、時間が経過すると信頼性が単一モジュールの場合より低くなる。Stateful TMR を用いることで、信頼性が向上する。Stateful TMR は単一モジュール、TMR と比較して信頼性が大きく向上した。

図 8 に故障確率 0.005 時のシミュレーション結果を示す。TMR は故障確率 0.001 時と同様に一時的にわずかであるが単一モジュールのみの場合より信頼性は向上する。しかし、時間が経過するとともに単一モジュールのみの場合より信頼性が低下する。また、Stateful TMR を用いることで、単一モジュール、TMR よりも信頼性が大きく向上する。

図 9 に故障確率 0.01 時のシミュレーション結果を示す。故障確率 0.01 では、TMR は一時的に単一モジュールの場合より信頼性が高くなる。しかし、時間の経過とともに信頼性は単一モジュールの場合より低くなる。Stateful TMR は、単一モジュール、TMR と比較して信頼性が大きく向上した。

停止故障のシミュレーションの結果では、故障確率に関わらず TMR は一時的には効果があるが、時間が経過すると単一モジュールの場合より信頼性が低下することがわかった。また、故障確率が高くなると単一モジュールと比較しても信頼性が低くなる結果となった。

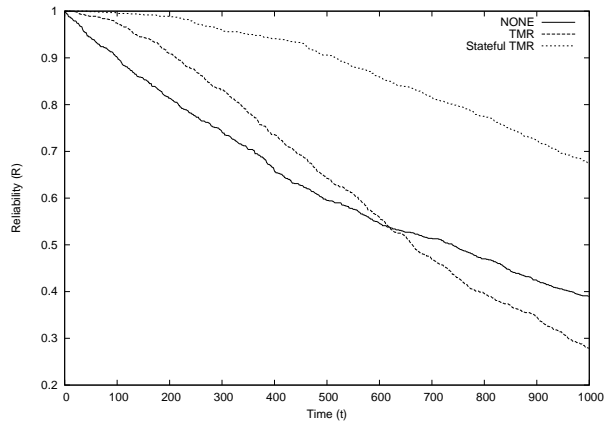


図 7 故障確率:0.001  
Fig. 7 Failure Rate:0.001

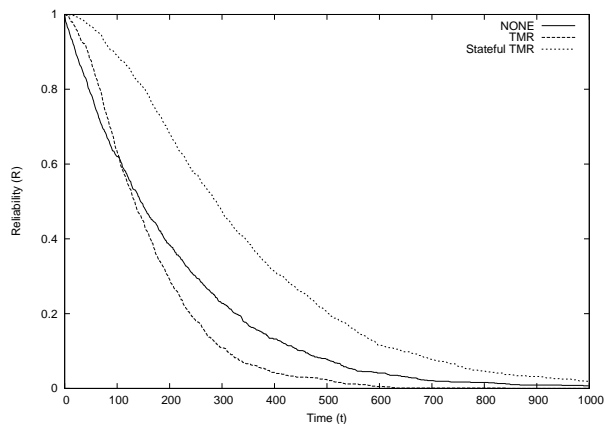


図 8 故障確率:0.005  
Fig. 8 Failure Rate:0.005

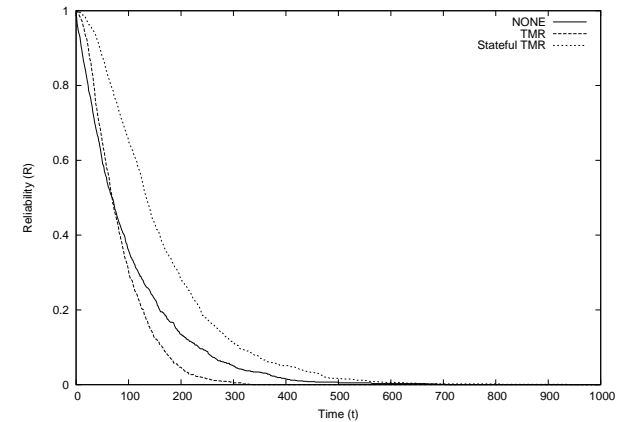


図 9 故障確率:0.01  
Fig. 9 Failure Rate:0.01

Stateful TMR は、停止故障において単一モジュール、TMR の場合と比較して故障確率に関わらず信頼性が大きく向上する結果となった。

#### 4.3 一時故障

次に一時故障のシミュレーション結果を図 10 から図 12 に示す。このシミュレーションでは、故障確率を 0.01 に固定し、復旧確率 0.001, 0.01, 0.1 と変化させて評価を行った。

図 10 は、復旧確率 0.001 時のシミュレーション結果を示す。TMR は停止故障時と同様に一時的には、単一モジュールよりも信頼性が高くなる。しかし、時間の経過とともに単一モジュールのみの場合より、信頼性が低くなる。Stateful TMR は、一時的に停止故障と同様に信頼性が高くなる。しかし、時間が経過すると信頼性が低くなり、単一モジュールのみの場合よりも信頼性が低くなるが TMR よりは信頼性が高くなった。

図 11 は、復旧確率 0.01 時のシミュレーション結果を示す。TMR は、単一モジュールのみの場合よりわずかであるが信頼性が高くなる。Stateful TMR は、単一モジュール、TMR と比較し信頼性は大きく向上した。この復旧確率では、最終的に信頼度が 0.5 程度で収束し、3つの方法がほぼ変わらない信頼度となった。

図 12 は、復旧確率 0.1 時のシミュレーション結果を示す。復旧確率が高い場合では、TMR、Stateful TMR とともに単一モジュールの場合より高い信頼性が得られた。TMR、Stateful TMR では、信頼性の違いがほとんど見られなかったがわずかであるが Stateful TMR の信

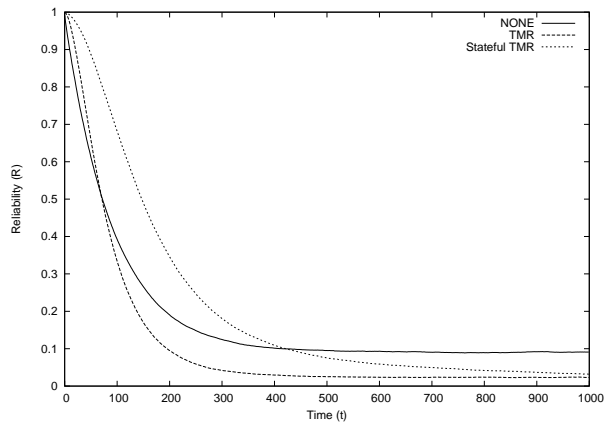


図 10 故障確率:0.01, 復旧確率:0.001  
Fig.10 Failure Rate:0.01, Recovery Rate:0.001

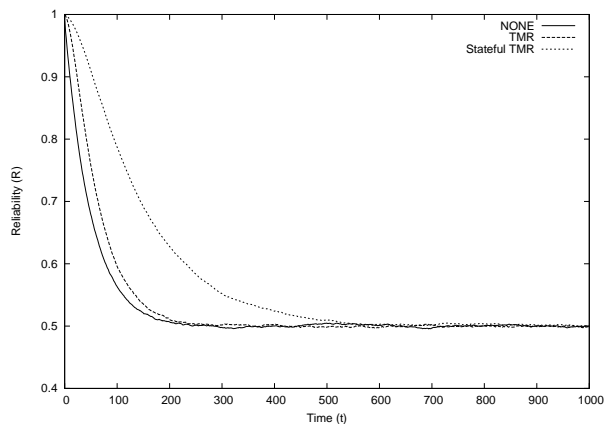


図 11 故障確率:0.01, 復旧確率:0.01  
Fig.11 Failure Rate:0.01, Recovery Rate:0.01

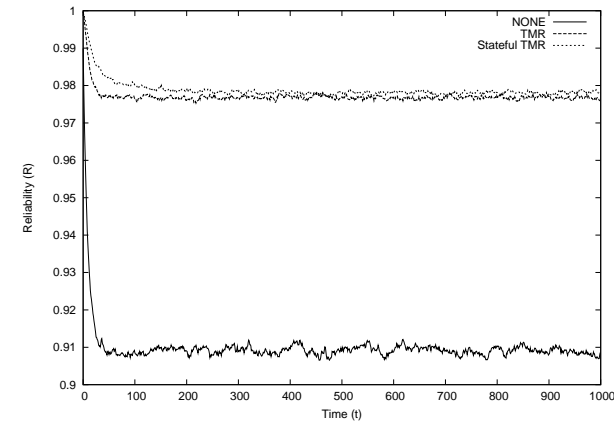


図 12 故障確率:0.01, 復旧確率:0.1  
Fig.12 Failure Rate:0.01, Recovery Rate:0.1

信頼性が高くなった。

一時故障では、故障確率を 0.1 として固定し、復旧確率を 0.001 から 0.1 まで変化させて評価した。復旧確率が低い場合、TMR は単一モジュールのみの場合と比較して、固定故障と同様に信頼性が低下した。また、Stateful TMR も時間が経過すると単一モジュールのみの場合よりも信頼性が低くなることがわかった。復旧確率が 0.01 の場合は、TMR と単一モジュールのみの場合では、信頼性がわずかに高い結果となった。Stateful TMR は、高い信頼性が得られた。また、この復旧確率では最終的に信頼度が 0.5 程度で収束する結果となった。復旧確率が高い場合では、TMR、Stateful TMR とともに単一モジュールと比較し高信頼な結果となった。TMR と Stateful TMR では、わずかに Stateful TMR が高い信頼性が得られた。

#### 4.4 評価

表 1 では、TMR、Stateful TMR のシミュレーション結果を単一モジュールと比較した結果を示す。

TMR は、停止故障の場合、故障確率が高いと信頼性が単一モジュールよりも低くなる。故障確率が低い場合では、一時的に信頼性が高くなるが時間が経過すると単一モジュールよりも信頼性が低くなる。また、一時故障では復旧確率が低い場合、停止故障と同様に信頼性が単一モジュールよりも低くなる。復旧確率が高い場合では、Stateful TMR 同程度の高い

表 1 故障モデル毎の評価  
Table 1 Evaluation of Failure Models

	停止故障		一時故障	
	故障確率低	故障確率高	復旧確率低	復旧確率高
TMR	△	×	×	○
Stateful TMR	○	○	△	○

信頼性となり、単一モジュールと比較すると高い信頼性が得られた。

Stateful TMR は、停止故障では故障率が高い場合、低い場合でも単一モジュール、TMR と比較しても高い信頼性が得られた。一時故障では、復旧確率が低い場合は信頼性が TMR よりは高くなる結果が得られた。しかし、単一モジュールに対しては、一時的に信頼性が高くなるが、時間が経過するとともに単一モジュールよりも信頼性が低くなる結果となった。また、復旧確率が高い場合では、単一モジュール、TMR と比較して高信頼性な結果が得られた。

TMR は停止故障、一時故障に関わらずあまりよい信頼性が得られなかった。Stateful TMR は、停止故障、一時故障どちらの故障に対しても高い信頼性が得られた。

## 5. ま と め

本研究では、TMR と以前提案した Stateful TMR の停止故障と一時故障における評価を行った。停止故障では、TMR は一時的に信頼性が高くなるが、時間が経過するとともに信頼性が低下し、単一モジュールより信頼性が低くなる。Stateful TMR は、高い信頼性が得られた。一時故障では、Stateful TMR は高い信頼性が得られた。しかし、低い復旧確率の場合 Stateful TMR は、時間の経過とともに単一モジュールより信頼性が低くなる。TMR は、復旧確率が高い場合では、高い信頼性が得られるが、復旧確率が低い場合では、単一モジュールの信頼性と変わらない信頼性しか得られない。

Stateful TMR は、TMR より高い信頼性が得られた。一時故障では、復旧確率が高い場合では、TMR とともに高い信頼性が得られた。停止故障、復旧確率が低い一時故障においては高い信頼性が得られることがわかった。

## 参 考 文 献

1) D. K. Pradhan : *Fault-Tolerant Computer System Design*, Prentice Hall, New Jersey (1996).

2) M. Abd-El-Barr : *Design and Analysis of Reliable and Fault-Tolerant Computer Systems*, Imperial College Press, London(2007).  
3) 向殿 政男 : フォールト・トレラント・コンピューティング, 丸善 (1989)  
4) 松本 勝慶, 上原 稔, 森 秀樹: Small-World Cellular Neural Networks の故障特性, 信学技報 FIIS-08-242, (2008)  
5) K. Matsumoto, M. Uehara, and H. Mori : *Proposal of Statefull Reliability Counter Small-World Cellular Nueral Networks*, In Proc. of the 3rd International Conference on Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS2009), pp.154-161, (2009)  
6) K. Matsumoto, M. Uehara, and H. Mori : *Evaluation of Stateful Reliabilit Counter in Small-World Cellular Neural Networks*, In Proc. of 2009 Intrenational Conference on Network-Based Information Systems (NBIS2009), pp.417-423, (2009)