

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	いまいずみ みつひろ		
学位の種類	今 泉 充 啓 ¹		
学位記番号	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	博 乙 第 9 号		
学位授与の要件	平成 13 年 2 月 27 日		
論文題目	学位規程第 3 条第 4 項該当		
	マイクロプロセッサシステムの信頼性解析に関する研究		
論文審査委員	(主査) 教授	安井一民 ²	教授 中川覃夫 ²
	教授	野村重信 ²	教授 黒川富夫 ²
	教授	秦野和郎 ³	

論文内容の要旨

マイクロプロセッサシステムの信頼性解析に関する研究

近年、半導体集積回路技術の著しい進展と共に、マイクロプロセッサ (microprocessor: μP) の利用が広範な分野で促進され、その高信頼化への要求が高まっている。例えば、自動車のようにシステム故障が人命に係わるようなシステムにも μP が数多く使用されるようになり、危険を回避し、さらに安全性を向上させるためにもその高信頼化は不可欠な要素となってきた。

しかしながら、 μP は使用環境の悪化や雑音などの影響等によって、ある頻度で異常状態になる

ことがある。このため、高信頼性が要求される μP システムには、これらの異常を確実に検出する機能が必要であり、従来から多くの研究や提案が行われている。

一般にシステムの信頼性を向上させるためには、二つの方法がある。一つは、システムの構成要素の信頼性を可能な限り高めようとする方法であり、“フォールトアボイダンス (fault avoidance)” と呼ばれる。もう一つは、冗長性の導入により故障の影響をできるだけ軽減する方法であり、“フォールトトレランス (fault tolerance)” と呼ばれる。本論文では、フォールトトレランスの立場から、 μP システムの高信頼化の問題をいくつかの確率モデルを設定して研究する。

本論文は 9 章より構成されており、フォールトトレラント機能をもつ μP システムの種々の高信頼化方策について考察する。各々の方策について、システムが動作障害に至るまでの平均時間等の評価尺度を求め、さらに経済的視点から期待費用を

1 愛知学泉大学 経営学部 (豊田市)

2 愛知工業大学 経営情報科学部 (豊田市)

3 愛知工業大学 電子工学科 (豊田市)

導出し, それを最小にする最適方策を解析的に議論する. 各章末において, 結果を説明するための数値例を与え, 考察と評価を行う.

第 1 章は, 研究の背景と目的, μP システムにおけるフォールトトレラント技術, 及び μP の機能等について述べる.

第 2 章は, WDT (WatchDog Timer) をもつ μP システムの信頼性が適切な保全方策によって, どの程度向上するのかを考察する. ここで, WDT は μP の異常を検出したとき, リセットによって μP を初期状態へ復帰させる. すなわち, N 回のリセットが発生した場合の予防保全の実施, 一定時間間隔 T による予防点検, さらにシステムが暴走状態へ至った場合の事後保全の実施を行うとき, システムの定常アベイラビリティを解析的に導出し, それを最大にする最適なリセット回数や点検時間間隔について議論する.

第 3 章は, N 個の WDP (WatchDog Processor) をもつシステムの確率モデルを構築し, 信頼性の問題を考察する. WDP は対象とする主プロセッサの動作状態を, 処理プロセスにおける特徴情報のオンライン監視によって, システムレベルの誤り検出を行う簡単かつ小規模な副プロセッサである. ここでは, システムの実行系 (メインプロセッサ Main Processor: MPu) が単一で, その障害処理系 (WDP) が多重化されたシステム構成を考え, 実行系を含むシステム全体の信頼性の向上を主目的として, その評価尺度を解析的に導出する. ここで, 単一の WDP が MPu の異常状態を検出できない場合, MPu は結果として暴走状態に陥ると考えられ, それを防止するための多重化の個数を, 経済性と信頼性の両面から議論する.

第 4 章は, μP と WDP を一対とした μP ユニットの N 個の待機冗長方式をとるシステムの信頼性について考察する. すなわち, μP ユニットの動作を開始した後, 時刻 T までに K 回以上の

異常が発生した場合, μP は故障状態にあると仮定した信頼性モデルを設定する. そのとき, システムが動作障害に至るまでの期待費用を最小にする最適な μP ユニットの個数等について議論する.

第 5 章は, システムのリアルタイム性を考慮に入れた N 個の μP ユニットの持つシステムの信頼性モデルを考察する. すなわち, μP が処理完了時限 T までに 1 単位以上の処理を実行できない場合, μP は故障状態にあると仮定したモデルを設定する. そのとき, システムが動作障害に至るまでのコスト有効性を最大にする最適な μP ユニットの個数等を議論する.

第 6 章は, μP ユニットの多数決機能を持つ TMR (Triple Modular Redundancy) を構成し, それが N 個の待機冗長方式をとるシステムの信頼性の問題を考察する. 一般に, ユニット数の増加に伴って, ハードウェアが増大し, その信頼度は低下することが知られている. ここでは, このようなユニット数の増大に伴う信頼度の低下要因を複雑性としてとらえ, システムに複雑性の尺度を導入し, システム故障に至るまでの期待費用を最小にする最適問題を種々議論する.

第 7 章は, ネットワーク処理を伴う μP システムの高信頼化の問題を考察する. システムには, その動作過程において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実行するものとする. 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期待費用を最小にする最適問題を議論する.

第 8 章は, μP におけるジョブの処理高速化の視点から, シグネチャ (Signature) の比較により処理過程の誤り検出を行うシステムの信頼性の問題を考察する. すなわち, DMR (Double Modular

Redundancy) をもつ μP システムにおいて、ジョブを適当なタスクに分割して実行することにより、処理時間を短縮するモデルを設定し、最適なジョブ分割数等について議論する。

第9章は、第2章から第8章までのまとめと、今後の課題について述べる。

以上のように、本論文は、安全性が強調される分野にも μP が幅広く使用されるようになり、その高信頼化が不可欠になってきている現状に鑑み、諸種の視点から、 μP を含むシステム全体の信頼性を評価するためのモデル化を行い、その信頼性を解析し考察したものである。

論文審査結果の要旨

今泉充啓君提出の論文「Studies on Reliability Analysis for Microprocessor Systems (マイクロプロセッサシステムの信頼性解析に関する研究)」は、近年の半導体集積回路技術の著しい進展によって、マイクロプロセッサの利用が広範な分野で促進され、その高信頼化が不可欠になっている現状に鑑み、マイクロプロセッサを含むシステムの機能を各種の観点からモデル化し、マルコフ再生過程の理論を応用して、その信頼性を解析し考察したものである。

マイクロプロセッサにウォッチドッグ機能を付加し、さらに冗長性を導入して、マイクロプロセッサを中核としたフォールトトレラントシステムの確率モデルを構築し、(i) リセットによる初期化と処理の再実行、(ii) 多重化による予備への自動切替え、(iii) 多数決機能のリアルタイム性を考慮した処理時限の設定、(iv) シグネチャを用いた処理結果比較と再試行など、諸種の視点からシステムの評価尺度を設定し、その信頼性を解析している。

本論文は9章より構成されており、フォールトトレラント機能をもつ μP システムの種々の高信頼化方策について考察している。各章末において、結果を説明するための数値例を与え、考察と評価を行っている。

第1章は、研究の背景と目的、 μP システムにおけるフォールトトレラント技術、及び μP の機能等について述べている。

第2章は、WDT (WatchDog Timer) をもつ μP システムの信頼性が適切な保全方策によって、どの程度向上するのかを考察している。ここで、WDT は μP の異常を検出したとき、リセットによって μP を初期状態へ復帰させる。すなわち、 N 回のリセットが発生した場合の予防保全の実施、一定時間間隔 T による予防点検、さらにシステムが暴走状態へ至った場合の事後保全の実施を行うとき、システムの定常アベイラビリティを解析的に導出し、それを最大にする最適リセット回数や点検時間間隔について議論している。

第3章は、 N 個の WDP (WatchDog Processor) をもつシステムの確率モデルを構築し、信頼性の問題を考察している。WDP は対象とする主プロセッサの動作状態を、処理プロセスにおける特徴情報のオンライン監視によって、システムレベルの誤り検出を行う簡単かつ小規模な副プロセッサである。ここでは、メインプロセッサ (MPu) に対し、WDP が多重化されたシステム構成を考え、MPu を含むシステム全体の信頼性の向上を主目的として、その評価尺度を解析的に導出している。いわば、WDP が MPu の異常状態を検出できない場合、MPu は結果として暴走状態に陥ると考えられ、それを防止するための WDP の多重化の個数を、経済性と信頼性の両面から議論している。

第4章は、 μP と WDP を一対とした μP ユニットが N 個の待機冗長方式をとるシステムの信頼性について考察している。すなわち、 μP ユ

ユニットが動作を開始した後, 時刻 T までに K 回以上の異常が発生した場合, μP は故障状態であると仮定した信頼性モデルを設定し, システムが動作障害に至るまでの期待費用を最小にする最適な μP ユニットの個数等について議論している.

第 5 章は, システムのリアルタイム性を考慮に入れた N 個の μP ユニットのシステム信頼性モデルを考察している. すなわち, μP が処理完了時限 T までに 1 単位以上の処理を実行できない場合, μP は故障状態であると仮定したモデルを設定し, システムが動作障害に至るまでのコスト有効性を最大にする最適な μP ユニットの個数等を議論している.

第 6 章は, μP ユニットの多数決機能をもつ TMR (Triple Modular Redundancy) を構成し, それが N 個の待機冗長方式をとるシステムの信頼性の問題を考察している. 一般に, ユニット数の増加に伴って, ハードウェアが増大し, その信頼度は低下することが知られており, ここでは, このようなユニット数の増大に伴う信頼度の低下要因を複雑性としてとらえ, システムに複雑性の尺度を導入し, システム故障に至るまでの期待費用を最小にする最適問題を種々議論している.

第 7 章は, ネットワーク処理を伴う μP システムの高信頼化の問題を考察している. システムには, その動作過程において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実行する. 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し, ネットワーク処理が成功するまでの期待費用を最小にする最適問題を議論している.

第 8 章は, μP におけるジョブの処理高速化の視点から, シグネチャ (Signature) の比較により

処理過程の誤り検出を行うシステムの信頼性の問題を考察している. すなわち, DMR (Double Modular Redundancy) をもつ μP システムにおいて, ジョブを適当なタスクに分割して実行することにより, 処理時間を短縮するモデルを設定し, 最適なジョブ分割数等について議論している.

第 9 章は, 第 2 章から第 8 章までのまとめと, 今後の課題について述べている.

マイクロプロセッサは, 今後, 動作環境のよきびしい分野にもその使用範囲が拡大されていくであろう. そのとき, 本論文で扱っているマイクロプロセッサシステムの高信頼化に対する考察や議論は, 実際的なシステムの運用方策や保全方策の設定, さらに経済性を目指したシステムのモデル化等に際し非常に有益となるであろう.

以上より, 本論文提出者今泉充啓君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格を有するものと判定した.

(受理 平成12年 6 月12日)