

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	Kenichiro Naruse 成瀬 健一郎
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博 甲 第 27 号
学位授与	平成20年 2月 28 日
学位授与条件	学位規程第3条第3項該当
論文題目	コンピュータシステムにおけるチェックポイントの最適化についての研究 (Studies on Optimal Checkpoint Intervals for Computer Systems)
論文審査委員	(主査) 教授 中川 覃夫 ¹ 教授 安井 一民 ¹ 教授 石井 直宏 ¹ 教授 小田 哲久 ¹

論文内容の要旨

コンピュータシステムにおけるチェックポイントの最適化についての研究
(Studies on Optimal Checkpoint Intervals for Computer Systems)

近年、コンピュータは製品の生産や販売などに使用されているだけでなく、日常生活においても不可欠である。ほとんどの製品は、コンピュータを内蔵しており、コンピュータの指示によって稼動している。とくに、コンピュータシステムは、近代社会における情報通信の手段として、非常に重要な役割を担っている。もし、コンピュータシステムに障害が発生すると、多額の損害や社会的不安を招き、人間の生命にまで影響を及ぼしかねない。安心して安全な高度情報社会を構築するためにも、コンピュータに十分な信頼性を確保する必要がある。

コンピュータシステムは、ノイズ、人為的ミス、プログラムミス、ハード障害、コンピュータウイルスなどによって、しばしばエラーが発生する。これらのエラーによって、システム全体に障害が発生し、大事件を引き起こされる可能性がある。このようなことを防

ため、従来からフォールト御するトレラント技術が考案され、実際のシステムに幅広く応用されている。その中の障害回復技術として、冗長システムの構築とチェックポイントの技法がある。チェックポイント(CP)とは、障害が発生したとき、システムを正常な状態に容易に復帰させる方法である。この論文では、信頼性理論の手法を使って、コンピュータシステム自身の信頼性を高めるために、いかに効率の良い冗長システムを構築すべきか、チェックポイントをどのように生成すべきかなどを理論的に解析する。さらに、数値例を示し、どのように応用すべきかを種々議論する。

本論文は、8章で構成されており、従来のチェックポイントモデルを中心としたいくつかの障害回復技術の興味ある拡張モデルを考える。各々のモデルに対して確率過程の理論を使って期待費用又は平均実行時間を導出する。さらに、それらを最小にするチェックポイントの間隔時間などの最適方策や最適多数決診断システムについて理論的に求める。各章において、得られた結果を判り易く理解するため、各モデル毎に具体的な数値例を与え、種々議論する。

第1章は、コンピュータシステムの高信頼性化の必要性を述べる。さらに、高信頼化技術として、ハード

¹ 愛知工業大学大学院 工学研究科博士後期課程 (豊田市)

ウェアとソフトウェア、情報と時間の冗長などによるシステムの冗長化と障害発見と回復方法などの障害回復技術、論文の概要について、簡単にまとめて説明する。

第2章は、あるユニットの障害が発見されたとき、その前のチェック時間まで戻る修正点検モデルを考える。定期点検と、逐次点検方策を採用したとき、故障発見までの期待費用を導出する。信頼性理論の手法を使って、それらの期待費用を最小にする最適点検方策について議論する。さらに、ユニットの稼働時間が有限のとき、最適点検時間が連立方程式を解く事によって求められることを示す。

第3章は、障害回復技術として、すべての障害が回復可能なハードチェックポイント（ハードCP）とその間に、一部分の障害回復可能なソフトチェックポイント（ソフトCP）という2種類のCPを作成する。あるプロセスの実行時間が与えられたとき、マルコフ再生過程の技法を使って、その時間の総平均オーバーヘッドを求め、それを最小にするソフトCPの最適数について考察する。さらに、その時間内に、いくつかのハードCPを設置すべきかについても数値計算によって求める。

第4章は、障害のエラーマスキング技術として、多数のモジュールから構成されるシステムを考え、プロセスの実行時間を与える。2個のモジュールシステムから成るシステムに対して、障害を回復するためのオーバーヘッドを導入したとき、平均実行時間を導出し、それを最小にする最適チェックポイント間隔を得る。さらに拡張モデルとして、いくつかのモジュールから成る多数決システムを考え、平均実行時間を最小にする最適モジュール数を数値計算によって求める。

第5章は、チェックポイント数と時間とともに、エラー率が上昇する2つの逐次チェックポイントモデルを考える。あるプロセスを実行するための総平均実行時間を導出し、それを最小にする最適チェックポイント間隔を連立方程式を解くことによって求める。さらに、近似式を提案し、最適解と数値的に比較し、最適解に対して非常に近い近似をしていることを数値的に示す。

第6章は、あるプロセスが終了するごとにチェックポイントを生成するランダムチェックポイントモデルを考える。2種類のチェックポイントを生成するとき、2モジュールシステムに対して、3つのスキームを考案する。そのとき、総平均実行時間を最小にするためには、どのスキームが最適かを議論する。

第7章は、第6章のランダムチェックポイントモデ

ルにおいて、チェックポイント回数とともに、エラー率が増加する拡張モデルを考える。各スキームに対して平均実行時間を導出し、それを最小にする最適方策を求める。さらに、多数決システムに対して、平均実行時間を最小にする最適モジュール数についても数値的に議論する。

第8章は、第2章から第7章までのまとめと、今後解決すべき問題について簡単に紹介する。

論文審査結果の要旨

成瀬 健一郎君提出の論文「Studies on Optimal Checkpoint Intervals for Computer Systems (コンピュータシステムにおけるチェックポイントの最適化についての研究)」は、近年のコンピュータ技術の著しい発展に伴って、コンピュータシステムの利用が、広範囲で促進し、その高信頼化が必要不可欠となっている。このような現状に鑑み、信頼性理論における点検モデルを補正・拡張し、フォールトトレラント技術の障害回復の一つであるチェックポイント方式や、冗長システム方式に関するいくつかの確率モデルの構築と数学的な解析の研究を行ったものである。

コンピュータシステムの障害に対する回復手段であるチェックポイント方式に関して、従来から様々な方策が考察され、実際にも応用されている。しかし、経済性と信頼性を考慮したチェックポイントモデルに対する最適方策の理論的研究は多くない。このような、確率過程の理論に基づく確率モデルの構築と応用は、障害などの複雑な現象を概括的にとらえる事によって、理論的に解析でき、数学的に検討することが出来ることを示している。

本論文は、8章で構成されており、従来のチェックポイントモデルを中心としたいくつかの障害回復技術の興味ある拡張モデルを考えている。各々のモデルに対して確率過程の理論を使って期待費用又は平均実行時間を導出している。さらに、それらを最小にするチェックポイントの間隔時間などの最適方策や最適多数決診断システムについて理論的に求めている。各章において、得られた結果を判り易く理解するため、各モデル毎に具体的な数値例を与え、種々議論している。第1章は、コンピュータシステムの高信頼化の必要性を述べている。さらに、高信頼化技術として、ハードウェアとソフトウェア、情報と時間の冗長などによるシステムの冗長化と障害発見と回復方法などの障害回復技術、論文の概要について、簡単にまとめて説明している。

第2章は、あるユニットの障害が発見されたとき、その前のチェック時間まで戻る修正点検モデルを考えている。定期点検と、逐次点検方策を採用したとき、故障発見までの期待費用を導出している。信頼性理論の手法を使って、それらの期待費用を最小にする最適点検方策について議論している。さらに、ユニットの稼働時間が有限のとき、最適点検時間が連立方程式を解く事によって求められることを示している。

第3章は、障害回復技術として、すべての障害が回復可能なハードチェックポイント（ハードCP）とその間に、一部分の障害回復可能なソフトチェックポイント（ソフトCP）という2種類のCPを考え、あるプロセスの実行時間が与えられたとき、マルコフ再生過程の技法を使って、その時間の総平均オーバーヘッドを求め、それを最小にするソフトCPの最適数について考察している。さらに、その時間内に、いくつかのハードCPを設置すべきかについても数値計算によって求めている。

第4章は、障害のエラーマスキング技術として、多数のモジュールから構成されるシステムを考えている。プロセスの実行時間を与え、2個のモジュールシステムから成るシステムに対して、障害を回復するためのオーバーヘッドを導入したとき、平均実行時間を導出し、それを最小にする最適チェックポイント間隔を得ている。さらに拡張モデルとして、いくつかのモジュールから成る多数決システムを考え、平均実行時間を最小にする最適モジュール数を数値計算によって求めている。

第5章は、チェックポイント数と時間とともに、エラー率が上昇する2つの逐次チェックポイントモデルを考えている。あるプロセスを実行するための総平均実行時間を導出し、それを最小にする最適チェックポイント間隔を連立方程式を解くことによって求めている。さらに、近似式を提案し、最適解と数値的に比較し、最適解に対して非常に近い近似をしていることを数値的に示している。

第6章は、あるプロセスが終了するごとにチェックポイントを生成するランダムチェックポイントモデルを考えている。2種類のチェックポイントを生成するとき、2モジュールシステムに対して、3つのスキームを考案している。そのとき、総平均実行時間を最小にするためには、どのスキームが最適かを議論している。

第7章は、第6章のランダムチェックポイントモデルにおいて、チェックポイント回数とともに、エラー率が増加する拡張モデルを考えている。各スキームに対して平均実行時間を導出し、それを最小にする最適方策を求めている。さらに、多数決システムに対して、平均実行時間を最小にする最適モジュール数についても数値的に議論している。

第8章は、第2章から第7章までのまとめと、今後解決すべき問題について簡単に紹介している。以上のように、本論文は、信頼性理論における点検モデルを補正・拡張し、フォールトトレランス技術であるいくつかのチェックポイントモデルや冗長システムモデルに応用し、数学的に解析し、最適解を求める多くの数値例を与えている。したがって、これらの結果は、コンピュータシステムにおいて、学術上のみならず、応用面上においても価値があり、寄与するところが大きい。よって、本論文提出者成瀬健一郎君は、博士（工学）の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。

（受理 平成20年3月19日）