

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K11217

研究課題名(和文) 通信機能縮退型のNoCルータを用いた非対称ルーティング法の確立

研究課題名(英文) Asymmetric fault-tolerant routing methods for NoCs with communication-function degradable routers

研究代表者

福士 将 (Masaru, Fukushi)

山口大学・大学院創成科学研究科・准教授

研究者番号：50345659

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：高並列・高性能なプロセッサシステムを実現するには、システム内に含まれる故障要素を迂回しながらパケット通信を行う耐故障ルーティングが不可欠となる。本研究では、通信機能の縮退を可能にするルータの構成方式を解明し、通信機能が非対称なルーティングの実現方法を確立することを目的に研究を遂行した。その結果、各ルータの通信機能が非対称な新たな3つのアプローチに基づく耐故障ルーティング法を開発し、通信遅延や通信容量を大きく改善可能なことを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、通信機能が非対称な耐故障ルーティングの実現方法と必要なルータの構成を解明したことである。従来の耐故障ルーティングの研究では、故障要素を迂回することが常識であったが、本研究では、通信機能の縮退を許可することで、通信機能単位の故障の考慮や故障要素の通過を可能にしている。これは、耐故障ルーティング法の設計において、迂回とは異なる新たな選択肢を提示するものである。また、本成果により、従来の通信性能を大きく上回るルーティングの実現可能性が示され、並列プロセッサシステムの高性能化・大規模化に貢献するものと期待される。

研究成果の概要(英文)：Toward the realization of highly parallel and high-performance integrated processing systems, it is indispensable to develop an efficient fault-tolerant routing technique that can route packets avoiding faulty elements in the systems. This research project aims at exploring router architecture that enables the degradation of communication functions and new fault-tolerant routing based on asymmetric communication functions with the routers. We have developed three routing approaches based on the asymmetric communication functions and revealed that they can significantly improve the communication latency and throughput compared with the traditional approach.

研究分野：ディペンダブル並列システム

キーワード：ネットワーク・オン・チップ 耐故障ルーティング

1. 研究開始当初の背景

現代の汎用コンピュータに搭載されるマルチコアやメニーコア CPU に見られるように、単一の集積回路チップに複数のプロセッサ回路(コア)を集積し、並列処理で高速化を図る並列プロセッサシステムが一般的になりつつある。このような並列システムにおいては、コア間の通信性能がシステム全体の処理性能を左右する重要な要因になるため、コア間の接続方式として、ネットワークオンチップ(NoC)が注目されている。NoCでは、演算装置であるコアと通信装置であるルータで構成されるノードをネットワークで接続し、ネットワーク上でパケット転送を行うことで、コア間のデータ通信を行う。そのため、NoCには、現在の主流であるシステムバスによる接続方式と比較して、配線遅延が少なく、通信帯域の広いシステムを構築できるという利点がある。

多数のノードが集積される大規模な NoC では、製造時や稼働時に発生する欠陥や故障により、ネットワークが不規則化し、パケット転送が妨害され、ディペンダビリティ(信頼性)が低下する問題がある。このため、故障が存在するネットワークにおいても正常なパケット転送を保証する耐故障ルーティングが盛んに研究されている。しかしながら、従来の耐故障ルーティング法には、故障ノード数が増加すると、それらを迂回するために通信経路が長くなり、また、迂回経路上で混雑も発生しやすくなるため、通信性能が大幅に低下するという問題がある。

2. 研究の目的

本研究では、従来の耐故障ルーティング法が抱える上記の問題を解決するために、各ルータの通信機能に対して機能縮退という考え方を導入する。本研究では、通信機能の縮退を可能にする NoC ルータの構成方式を解明し、通信機能が非対称な耐故障ルーティングの実現方法を確立することを目的としている。

3. 研究の方法

研究目的の達成に向けて、以下の方法で研究を推進した。

- (1) 集積回路実装向けの 2 次元メッシュ NoC を対象に、通信機能が非対称な状況を想定した耐故障ルーティング法を開発する。計算機シミュレーションにより、提案手法と従来手法の性能比較を行い、提案手法の有効性を検証する。
- (2) 上記(1)の提案手法の実行を可能にする機能縮退が可能な NoC ルータを開発する。回路設計ソフトウェアを用いて、ルータの回路設計を行い、動作確認および性能評価を行う。
- (3) 上記(1)の提案手法をもとに、より通信性能が高い 2 次元トラス/3 次元メッシュ NoC 向けの手法へと拡張する。(1)と同様に、計算機シミュレーションにより性能比較を行い、提案手法の有効性を検証する。
- (4) 実アプリケーションを用いて、提案手法の並列計算への適用効果を検証する。

4. 研究成果

本研究で得られた成果を以下にまとめる。なお、各項目の番号は、上記の「3. 研究の方法」に記載した番号と対応している。

(1) 通信機能が非対称な耐故障ルーティング法

ルータの内部の構成に着目して、通信機能の縮退を想定した以下の 3 つのアプローチに基づく非対称な耐故障ルーティング法を開発した。

ルータの入出力機能が非対称な耐故障ルーティング法

ルータの各構成要素(入力/出力バッファ、バッファ間の接続スイッチ、制御回路など)や隣接ノードとのリンクが個別に故障する細粒度な故障モデルを考案し、特定方向の隣接ノードとの入力または出力機能のみが故障するという想定の下で、耐故障ルーティング法を開発した。この場合、あるノードにおいては、例えば、西側の隣接ノードから見ると故障であるが、北側から見ると正常であるという状況が発生し、ルーティング法の設計が極端に複雑化する。本手法では、特定の進行方向のパケットのみに対して故障ノードの迂回を指示する迂回ラベルという概念を導入することで、問題の解決を図った。

計算機シミュレーションによる性能評価を行い、通信遅延(目的ノードに到着するまでの遅延時間)とスループット(単位時間あたりの到着パケット数)の性能指標について、従来手法との性能比較を行った。その結果、図 1 に示す通り、最も性能のよい従来手法(Jojima's method)と比較して、通信遅延を約 85%、スループットを約 23%改善可能であることを明らかにした。

ルータの入出力容量が非対称な耐故障ルーティング法

入出力バッファを再構成することで故障バッファの切り離しが可能なルータを考案し、これに基づく耐故障ルーティング法を開発した。本手法は、一部のバッファに故障が発生した場合、従来手法のように、ルータ全体を故障とするのではなく、入出力容量が部分的に縮退した正常なルータとして扱うことを可能にするものである。性能評価により、従来手法と比較して、故障・不使用ルータ数を最大で 84%、通信遅延を最大で 87%削減可能であることを明らかにした。

ルータの基本通信機能が非対称な耐故障ルーティング法

周辺のネットワークを拡張することで、故障ノードの通過を可能にするルータを考案し、これに基づく耐故障ルーティング法を提案した。本手法は、故障ノードは迂回するものという従来の耐故障ルーティングの常識を覆すものであり、故障ノードに対して、通過するという新たな選択肢を与えるものである。この概念に基づいて、通信経路が一意に定まる決定的な耐故障ルーティング法として、Y 軸方向の移動において通過を可能にする手法 (Passage-Y)、X と Y 軸の両方向の移動において通過を可能にする手法 (Passage-XY)、さらには、通信経路を柔軟に変更可能な適応的な耐故障ルーティング法として、Passage-XY を拡張した手法 (Passage-WLEL) を開発した。

図 2 に示すように、Passage-XY は、同じ条件の従来手法 (Fcube4) と比較して、通信遅延を約 97%改善し、スループットを約 2.1 倍向上できることを明らかにした。また、適応的な Passage-WLEL は、特定のノードの周辺に混雑が発生する場合に、Passage-XY よりもスループットが高くなることも明らかにした。

(2) 機能縮退が可能な NoC ルータの開発

(1) の手法は従来と同じ構成のルータで実行可能であるため、この手法に対する NoC ルータの開発を行った。それぞれ、従来のルータに対して少量のスイッチとリンクを追加する簡単な構成により、入出力バッファの縮退と故障ノードの通過を可能にする。回路設計ソフトウェアのシミュレーション機能により、想定される正常な動作を行うことを確認した。特に、Passage-Y に対するルータについては、回路の追加が必要であるにもかかわらず、故障ノードの通過によりルーティングルールを簡略化できることから、従来手法と比較して、ルータ全体の回路量を約 64%削減可能であることを明らかにした。

(3) 2次元トーラス/3次元メッシュ NoC 向けへの拡張

故障ノードの通過の機能を応用し、より通信性能が高い 2次元トーラス/3次元メッシュ NoC 向けの手法として拡張を行った。2次元トーラス NoC に対しては、(1) のルータをさらに拡張し、故障ノード上でパケットの進行方向の変更を可能にする構成を考案した。本手法は、非耐故障なルーティング法を耐故障ルーティング法として用いることを可能にするものである。従来手法との性能比較により、通信遅延を約 79%、スループットを約 21%改善可能であることを明らかにした。3次元メッシュ NoC に対しては、Passage-Y を拡張した手法を開発した。パケットの循環待ち(デッドロック)のない高信頼なルーティングを保証するには、直方体の故障領域を生成する必要があり、ノードの利用効率が低下するという結果を得ている。これに関しては、今後さらに深く研究を行い、改善する予定である。

(4) 実アプリケーションを用いた適用効果の検証

NAS 並列ベンチマークを用いて、通信方法の違いによるアプリケーションの実行時間の違いを検証した。並列ソート (IS) のベンチマークにおいては、故障ノードの通過に基づく手法は、従来手法と比較して、実行時間を約 20~50%削減可能であることを明らかにし、本提案手法が実際の並列アプリケーションの高速化に有用であることを確認した。

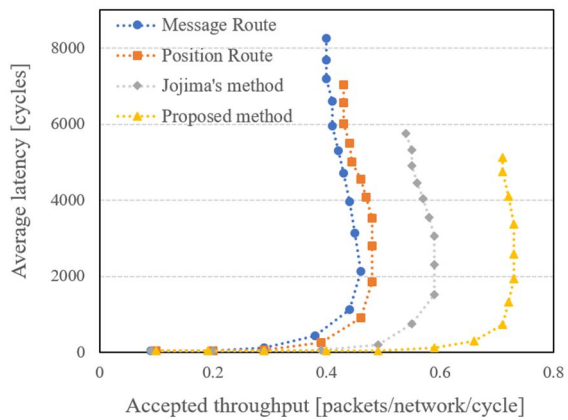


図 1 スループットに対する通信遅延
(ノード数: 10×10, ノード故障率: 10%)

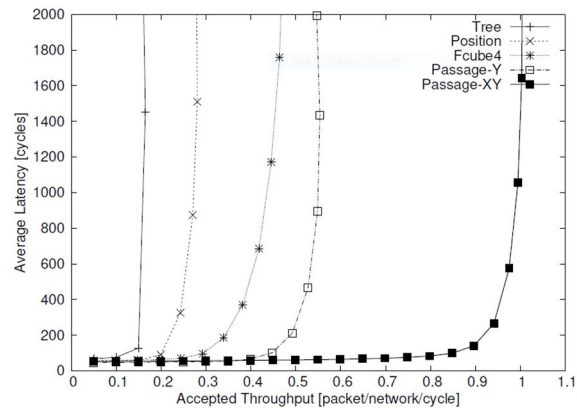


図 2 スループットに対する通信遅延
(ノード数: 10×10, ノード故障率: 10%)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Itsuo Takanami, Masaru Fukushi, and Takahiro Watanabe	4. 巻 12620
2. 論文標題 Self-restructuring of Mesh-Connected Processor Arrays with Spares Assigned on Rotated Orthogonal Side	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions on Computational Science XXXVIII, Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 1-18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-662-63170-6_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 黒川陽太, 福士将	4. 巻 J104-D
2. 論文標題 2次元メッシュNoC における故障ノードの通過に基づく決定的・適応的耐故障ルーティング法	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Effect of Virtual Channels for a Fault-Tolerant XY Routing Method with the Passage of Faulty Nodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 8th International Conference on Information and Education Technology	6. 最初と最後の頁 267-272
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3395245.3396419	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Akari Kawazoe, Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fault-Tolerant Adaptive Routing Method Based on the Passage of Faulty Nodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan	6. 最初と最後の頁 1-2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCE-Taiwan49838.2020.9258164	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 An Adaptive Fault-tolerant Routing Method for 2D Mesh NoCs Based on the Passage of Faulty Nodes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The Twenty-sixth International Symposium on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 560-565
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaru Fukushi, Kazuya Kouda, and Yota Kurokawa	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fault-tolerant Routing Method for Network-on-Chips Based on Communication Function Fault	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 9th International Conference on Information and Education Technology	6. 最初と最後の頁 405-409
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itsuo Takanami and Masaru Fukushi	4. 巻 11820
2. 論文標題 A Built-in Circuit for Self-Reconfiguring Mesh-Connected Processor Arrays with Spares on Diagonal	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transactions on Computational Science XXXIV. Lecture Notes in Computer Science	6. 最初と最後の頁 109-135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-662-59958-7_7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 E102-A
2. 論文標題 Passage of Faulty Nodes: A Novel Approach for Fault-Tolerant Routing on NoCs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 1702-1710
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.E102.A.1702	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaru Fukushi, Toshihiro Katsuta, and Yota Kurokawa	4. 巻 25
2. 論文標題 A degradable NoC router for the improvement of fault-tolerant routing performance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 301-307
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10015-019-00579-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Performance Improvement of Region-Based Fault-Tolerant Routing Methods Based on the Passage of Fault Blocks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan	6. 最初と最後の頁 413-414
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Takayama, Masaru Fukushi, and Toru Abe	4. 巻 -
2. 論文標題 A memory efficient parallel method for voxel-based multiview stereo with arbitrary viewpoints	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of The Twenty-fifth International Symposium on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 585-590
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 3
2. 論文標題 Design of An Extended 2D Mesh Network-on-Chip and Development of A Fault-tolerant Routing Method	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IET Computers & Digital Techniques	6. 最初と最後の頁 224-232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1049/iet-cdt.2018.5032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fault-Tolerant Routing Method for 2D-Mesh Network-on-Chips Based on the Passage of Fault Blocks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan	6. 最初と最後の頁 111-112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa and Masaru Fukushi,	4. 巻 -
2. 論文標題 XY Based Fault-Tolerant Routing with The Passage of Faulty Nodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Sixth International Symposium on Computing and Networking	6. 最初と最後の頁 99-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itsuo Takanami and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Degradable Restructuring of Mesh-connected Processor Arrays with Spares on Orthogonal Sides	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE 23rd Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing	6. 最初と最後の頁 11-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Itsuo Takanami and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Restructuring mesh-connected processor arrays with spares on four sides by orthogonal side rotation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE 23rd Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing	6. 最初と最後の頁 181-182
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yota Kurokawa, Toshihiro Katsuta, and Masaru Fukushi	4. 巻 -
2. 論文標題 A Degradable Network-on-Chips Router for the Improvement of Fault-Tolerant Routing Performance	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of The Twenty-fourth International Symposium on Artificial Life and Robotics	6. 最初と最後の頁 719-723
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 2次元メッシュNoCにおける耐故障ルーティング法の性能評価
3. 学会等名 第72回 機能集積情報システム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 NoCにおける耐故障・決定的ルーティング法に対する仮想チャンネルの適用効果
3. 学会等名 第33回 回路とシステムワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 川副 明佳梨, 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 適応的な経路選択を可能にした故障ノードの通過に基づく耐故障ルーティング法
3. 学会等名 第22回 IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 富田 大喜, 梶本 大輝, 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 ターン回数の制限による適応的ルーティングの通信性能評価
3. 学会等名 第22回 IEEE広島支部学生シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 幸田 和也, 福士 将
2. 発表標題 2次元メッシュNoCに対する通信チャンネルに着目した耐故障ルーティング法
3. 学会等名 第69回機能集積情報システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 故障ノードの通過に基づく耐故障XYルーティング法に対する仮想チャンネルの適用効果
3. 学会等名 第70回機能集積情報システム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 黒川 陽太, 福士 将
2. 発表標題 2次元メッシュNoCに対する故障領域の通過に基づく耐故障ルーティング法
3. 学会等名 第68回機能集積情報システム研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Masaru Fukushi and Yota Kurokawa	4. 発行年 2020年
2. 出版社 IntechOpen	5. 総ページ数 -
3. 書名 A Novel Approach for the Design of Fault-Tolerant Routing Algorithms in NoCs: Passage of Faulty Nodes, Not Always Detour	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	三浦 康之 (Miura Yasuyuki) (40440292)	湘南工科大学・工学部・教授 (32706)	
連携研究者	阿部 亨 (Abe Toru) (80222652)	東北大学・サイバーサイエンスセンター・准教授 (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------