

部分的仮想チャネル方式による 耐故障2次元メッシュNoCの性能評価

中川原啓太[†] 福土将[‡] 亀山充隆[†]

[†] 東北大学大学院情報科学研究科

[‡] 山口大学大学院理工学研究科

1 はじめに

ネットワークオンチップ (Network on Chip: NoC) は、回路コア間をルータを介したネットワークで接続し、パケット転送によりデータ交換を行う方式である。NoCの耐故障化手法として、故障ルータを迂回する耐故障ルーティングや、内部要素に冗長性を持たせた耐故障化ルータなどが提案されている。この両者において、ルータ内部に使用されない余剰バッファが存在していることに着目し、余剰バッファを活用して特定チャネルのみに仮想チャネルを導入する部分的仮想チャネル方式を提案する。本手法により、領域ベース耐故障ルーティング手法 [1], [2] において、故障領域周辺に発生する輻輳を軽減できることを示す。

2 従来のNoC向け耐故障手法とその問題点

システムが大規模になるほど故障が発生する可能性が大きくなっており、NoCにおいてルータが故障した場合には、正常なパケット転送が阻害される。このため、多数のノード（回路コアとルータのペア）からなる大規模なNoCほど、耐故障ルーティングをサポートすることが不可欠となる。中でも、ハードウェア量を少なく抑えられる領域ベースの耐故障ルーティング手法 [1], [2] が注目されている。この手法では、故障ノードを含む矩形領域を故障領域として無効化し、その周辺にフォールトリング (Fault Ring: FR) と呼ばれる迂回経路を形成する。FR上でパケットのターン方向を制限することで、仮想チャネルを用いずに耐故障性とデッドロックフリー性を実現している。しかし、送受信ノードのペアに対してパケットの転送経路が一意に決定されるため、FR上に輻輳が発生しやすいという問題がある。

一方、ルータ自身の耐故障性を向上させる耐故障ルータでは、図1に示すように、内部に予備バッファなど

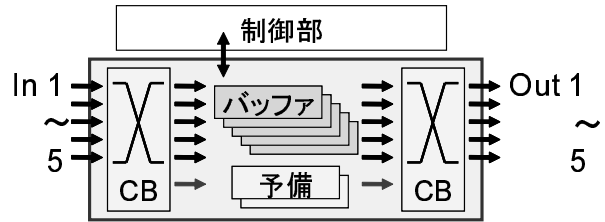


図1: 対象とするルータのアーキテクチャ

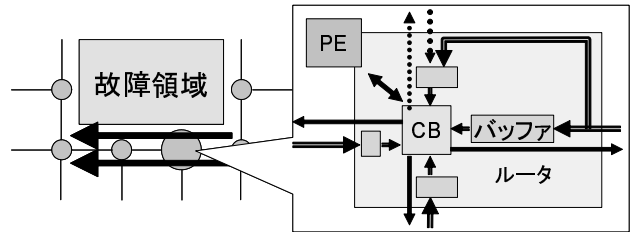


図2: 部分的仮想チャネルの概略

の冗長要素を導入する。本来のバッファが故障した際に、クロスバ (CB) により入出力ポートとの接続を切り替えることで予備バッファを使用し、ルータ全体が故障となることを回避する。

3 部分的仮想チャネル方式による輻輳軽減

3.1 部分的仮想チャネルによる余剰バッファの活用

従来の領域ベースの手法 [1], [2] では、ルータが故障領域に接する場合には、その方向用のバッファは使用されない。また、予備バッファを用いる耐故障化ルータでは、故障バッファの代替が行われなければ、予備バッファは使用されない。図1のルータでは、CBの機能により、ある1つの入力ポートに対して、本来の受信バッファに加え、それらの余剰バッファを対応させることが可能である。これにより、特定のポートだけに仮想チャネルの機能を付加する部分的仮想チャネル方式を提案する。図2に本方式の例を示す。この例では、故障領域に接する北方向のバッファを利用し、東方向からの入力を北方向のバッファに入力するように切り替えることで、東方向の入力ポートに仮想チャネルを実現する。

Performance Evaluation of Fault-tolerant 2D-Mesh NoC Based on Partial Virtual Channel

Keita NAKAGAWARA[†], Masaru FUKUSHI[‡], Michitaka KAMEYAMA[†]

[†]Graduate School of Information Sciences, Tohoku University

[‡]Graduate School of Science and Engineering, Yamaguchi University

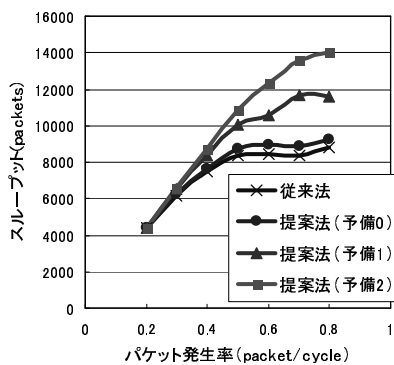


図 4: クラスタ状故障の場合

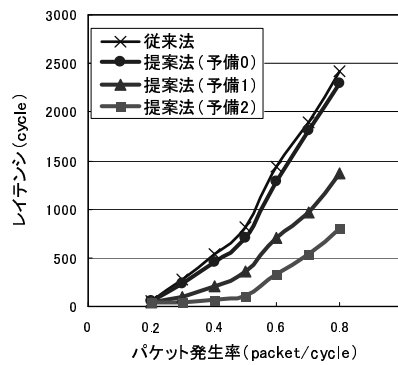


図 5: レイテンシの削減

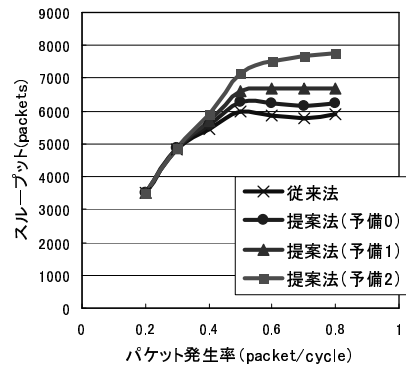


図 6: ランダム故障の場合

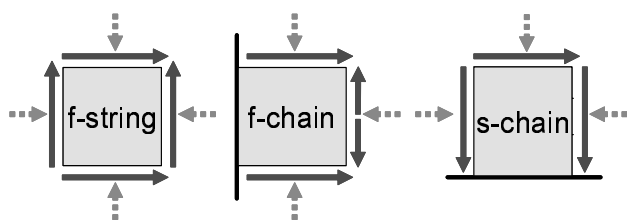


図 3: FR の種類ごとの部分的仮想チャネルの設定方向

3.2 輻輳軽減のための部分的仮想チャネルの設定方向の選択

FR 上のルータにおいて、パケットの入力が多くなる方向にあわせて部分的仮想チャネルを設定することで、輻輳による通信性能の低下を緩和する。PositionRoute 法 [2] ではパケットの転送方向が対称でないため、FR の種類と位置に応じて特定の方向に転送の偏りが生じる。その偏りに従い、図 3 の実線で示すように部分的仮想チャネルを設定する。ここで、f-chain, s-chain はそれぞれ NoC の西端もしくは南端に接する FR、南端のみに接する FR を表し、f-string はそれ以外の FR を表す。f-chain の東辺ではネットワーク内におけるノードの位置によって南北を使い分ける。余剰バッファが 2 個ある場合には、加えて図 3 の実線とは逆の方向にも仮想チャネルを設定し、3 個以上ある場合には、さらに破線のように FR 外からの入力方向にも設定する。

4 性能評価

提案手法による通信性能の改善効果を検証するため、シミュレータによって性能評価を行った。10 × 10 の二次元メッシュ NoC を想定し、故障分布、ルータの予備バッファの数、パケット発生率およびパケットの発生パターンを変えながら 20000 サイクルあたりのスループット（到着パケット数）と平均レイテンシ（パケット発生から到着までのサイクル数の平均）を測定した。故障は、あるルータ f 内のあるバッファを故障させた時に、そのルータ f を中心としてクラスタ状に発生させた。ルータ f の周囲にあるルータ i のバッファ j の故障

確率 $P(f, i, j)$ は、(1) 式に従った。ここで、 $dist(f, i)$ 、 R はそれぞれルータ f と i のノード間距離、ルータ f を中心とした故障判定を行うクラスタの最大半径を表す。 k は故障分布調整のための定数である。今回は $R = 3$ 、 $k = 0.3$ とし、NoC 全体で 20 個のバッファが故障するとしてシミュレーションを行った。

$$P(f, i, j) = (1 - (\frac{dist(f, i)}{R})^2) * k \quad (1)$$

提案手法による効果はパケット発生率が高いほど大きく、予備バッファを用いず、FR 上のルータの余剰バッファの活用のみでも、従来法に比べ 5 % 程のスループットの向上と、10 ~ 20 % のレイテンシの削減効果が得られた。予備バッファを 2 個用いた場合には最大で約 60 % のスループットの向上、80 % のレイテンシ削減効果が得られた。

同等の故障をランダムな分布で発生させた場合（図 6）に比べ、クラスタ状の場合（図 4）の方が提案手法による通信性能の向上が大きくなった。このようなクラスタ状の分布は、製造不良による欠陥などが知られ、提案手法は歩留まりの向上に貢献するものと期待される。

5 まとめ

余剰バッファを利用して部分的に仮想チャネルを導入する手法を提案し、耐故障 NoC の性能向上に有用であることを示した。今後の課題は提案方式を用いたルータを設計し、ハードウェアオーバーヘッドを評価することである。また、受信バッファ以外の故障の代替や負荷分散ルーティングなどと組み合わせることにより、さらなる性能向上の可能性もある。

参考文献

- [1] R.Holsmark, S.Kumar, "Corrections to Chen and Chiu's Fault Tolerant Routing Algorithm", JOURNAL OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING 23, 1649-1662 (2007)
- [2] Y.Fukushima, M.Fukushi, I.E.Yairi, and T.Hattori "A Hardware-Oriented Fault-Tolerant Routing Algorithm for Irregular 2D-Mesh Network-on-Chip without Virtual Channels", Proc. of DFT, pp. 52-59(2010)