C-031

ダイナミックリコンフィギュレーションによる 高速パケット転送処理回路の小型化

A study of dynamic reconfiguration in high-speed packet processing

山田 博希 🕇	甲斐 英則十	片山 勝十
Hiroki Yamada	Hidenori Kai	Masaru Katayama

1. はじめに

高速パケット転送処理回路の小型化を狙いとし、マルチ コンテキスト型リコンフィギュアブルデバイスを用いて分 割したタスクの回路記述データを動的に切り替えるダイナ ミックリコンフィギュレーションについて述べている。リ アルタイム系のパケット処理においてダイナミックリコン フィギュレーションを行う際に課題となるスループット劣 化について検討し、軽減する方法を提案、評価する。

2.背景

IT 化が進む中、インターネットの普及によるトラヒック の急激な増大と同時にユーザ要求の多様化、高度化などか ら、ネットワークおよびネットワークに接続されたさまざ まな機器に対して、より高速なパケット処理機能と同時に 機能変更の柔軟性に対する要求が高まっている。

このような高速性と機能変更の柔軟性の要求を両立でき る技術としてリコンフィギュア技術のネットワーク機器へ の適用が検討されており、アイピーフレックス社の DAPDNA-2 など、数十ギガビットクラスの高速転送処理が可 能で且つ回路記述データを基に瞬時に回路変更できる高性 能なリコンフィギュアブルデバイスも登場している。

今後、高速性と機能変更の柔軟性が特に望まれるパケット処理機能の例としては、ファイアウォールや TCP, IPSec 処理等のオフロードなどが考えられる。これらの機能を持つパケット転送処理回路をリコンフィギュアブルデバイスで構成しようとした時、リコンフィギュアブルデバイスの機能集積規模はASICに比べて低くデバイスが複数個必要になる等からパケット転送処理回路の実装規模が大きくなるという問題がある。

一方、小型化の方法として、必要に応じて回路を動的に 変更するダイナミックリコンフィギュレーションが有効と 考えられる。例えば、パケット毎に異なる処理(ex.上り/ 下りパケット、IPv4/v6 パケット)に対応してリコンフィ ギュレーションすれば、回路規模の削減が可能である。

+(社)電子情報通信学会, IEICE

3. 高速パケット転送処理

本稿で論ずるパケット処理はルータやサーバの回線イン タフェースボードなどで行うパケット識別・転送処理やフ ァイアウォールなど高機能パケット処理である。これらの 機能を持つボードでは、複数のマルチコンテキスト型のリ コンフィギュアブルデバイス(以降、エレメントと記す) を搭載し、各エレメントの内部に備えた複数面のコンフィ ギュレーションメモリを切り替えることにより、瞬時に機 能を変更することが可能となる。リコンフィギュアブルデ バイスの高速性とパケット処理の柔軟性 (ヘッダの抽出位 置の変更、高位レイヤ情報の処理、など)を生かして、各 エレメント間は、パケットインタフェース(インライン 型)で多段シリアル接続され、データフロー型のパイプラ イン処理を行うことを前提とする(図1参照)。ここで、 本稿でのパケット転送処理回路の小型化では、ボードに搭 載されるエレメントの個数をダイナミックリコンフィギュ レーションにより削減することを狙っている。



図1 ルータの高速インタフェースボードの例

4. ダイナミックリコンフィギュレーション パケット転送処理回路の小型化のために行うダイナミッ クリコンフィギュレーションとしては、図2に示すように タスクの分割の仕方に応じてブランチタスク型とシリアル タスク型が考えられる。ブランチタスク型は、パケット毎 の分類結果などから所要のタスクに対応するコンフィギュ レーションデータを選択し回路を再構成することにより分 岐構造のタスク処理を構成する方法である。一方、シリア ルタスク型は、フィードバックループを用い再入力される 度に回路を再構成することにより連続したタスク処理を構 成する方法である。ブランチタスク型は、タスクの分割数、 シリアルタスク型は、ループ回数に対応して回路の共用に よる小型化が可能であり、例えば、図2において、Task A ~Task Dを計4つのエレメントで構成していたと仮定する と、ダイナミックリコンフィギュレーションを行うことに より、1つのエレメントで構成できることになる。



図2 タスク分割による回路の小型化

5.スループットの劣化

リコンフィギュレーションする際の回路の切り替え自体 については、1クロック(nsec オーダ)で可能なものが現 在入手できる。しかしながら、回路変更時にパケット紛 失・データ化けを起こさない(無瞬断)ためには、回路へ のパケットの入力を止めるとともに回路中の処理中パケッ トの出力を待ってリコンフィギュレーションを行う必要が ある。回路中のパケットが全て出力するまでの時間は、タ スクの処理遅延(レイテンシ)分必要であり、エレメント 規模にもよるが数百クロック以上が想定できる。従って、 リコンフィギュレーションによるスループットへの影響に ついては、リコンフィギュレーションの頻度とともにレイ テンシが重要なファクタである。また、フィードバックル ープを用いたシリアルタスク処理の場合、回路を時分割利 用しているためループの回数に比例してスループットの劣 化が発生する。

5.1 ブランチタスク型

(1) ブランチタスク型のスループット劣化

図3にブランチタスク型の実現例を示す。リコンフィギ ュアブル回路、切替判定回路及びコンフィギュレーション メモリで構成され、切替判定回路からの指示により、必要 に応じて入力パケット毎にコンフィギュレーションメモリ を選択し所要の回路にリコンフィギュレーションする。



図3 ブランチタスク型の実現例

リコンフィギュレーションを無瞬断で行うため参考文献 [1]で述べた方式(以降、シングルバッファ方式と記す) を図4に示す。無瞬断リコンフィギュレーションを行うた めに、バッファを用いて空きタイミング(=エレメントの レイテンシ)を生成する。ここで、シングルバッファ方式 におけるスループット劣化率 1は、平均パケット長をK (クロック)、エレメントのレイテンシをD(クロック)、 タスクの分岐数(=コンフィギュレーションメモリ面数) をMとした場合、(式1)で表すことができる。ここで、 タスク毎の分岐確率はタスクによらず全て等しいと仮定し ている。

$$1 = \frac{1}{M} + \frac{M-1}{M} \left(\frac{K}{K+D} \right) \cdots \left(\overrightarrow{x} \right)$$



図4 シングルバッファ方式

(2)マルチバッファ方式と改善効果

マルチバッファ方式を図5に示す。本方式は、タスクの 分岐数に対応したM面のバッファを並列に2面(A/B面) 設け、一定時間(フレーム)間隔毎に同一処理となるパケ ットを集めることによりリコンフィギュレーション回数を 削減する方式である。ここで、本方式におけるスループッ ト劣化率2は、フレームを×Dとした場合、同一フレ ーム内のリコンフィギュア回数は最大M-1回のため、 (式2)で表すことができる。



図5 マルチバッファ方式

図6にシングル方式及びマルチバッファ方式のスループ ット劣化率 1、2を示す。シングルバッファ方式は、M の増加によりスループットは急激に劣化する(M=4 で 0.25 に劣化)が、マルチバッファ方式は、劣化の影響を大きく 改善できる(M=4, =10 で 0.77、=20 で 0.87)。ここ で、マルチバッファ方式では、フレームやレイテンシに比 例して必要なバッファ量と遅延時間が増加するが、バッフ ァ容量は、エレメントの規模に比べると十分小さく(例え ば、M=4、=20、D=1000/Iny/かで 0.7Mbyte×2)、遅延時間 も 10Gbps 程度の高速回線では影響は小さい(=20 で 120µs 参考:ネットワーク遅延:QoS クラス 0=100ms)。



図6 ブランチタスク型のスループット劣化率()

5.2 シリアルタスク型

フィードバックループを用いたシリアルタスク型の実現 例として、ループドパイプラインリコンフィギュレーショ ン方式[2]を図7に示す。エレメント数をS、ループ回数 (=コンフィギュレーションメモリ数)がMで、タスク分 割数は、S×Mである。また、スループット劣化を補うた めに内部の転送処理速度を回線速度よりアップ可能な構成 としている。なお、1/Mがエレメント数の削減率となる。 ここで、複数回のループを経て一連のタスク処理が行われ るパケットの処理単位を ×D(クロック)とおくと、ス ループットの劣化率 3は、(式3)で表わされる。すな わち、回線速度と同一のスループットを保障するために必 要な内部転送速度のアップ率は1/ 3である。

3 = /M(+S) (式3)

ここで、リコンフィギュレーションをエレメントーつ分 のレイテンシに相当する空きを用いてパイプライン動作で 順次行う(パイプラインリコンフィギュレーション:図8 参照)とすると、挿入する空き時間を短縮できるためスル ープット劣化を改善できる。すなわち、(式3)において S = 1と等価となる。

図9に、スループット劣化特性を示す。図9より、 =15 でパイプラインリコンフィギュレーション時(S=1) の場合、スループット劣化率は、ほぼ1/Mの特性(ルー プを用いた時分割処理による劣化分)になることがわかる。

は、前述のブランチタスク処理における に相当してお り、値(=15)においても、バッファ量、遅延時間に与 える影響は少ない。



図7 ループドパイプラインリコンフィギュ レーション方式



図8 パイプラインリコンフィギュレーション



6. おわりに

ダイナミックリコンフィギュレーションを用いた高速パ ケット転送処理回路の小型化に関する検討を行った。タス クの分割の仕方に応じて、プランチタスク型とシリアルタ スク型に分類し、それぞれについてリコンフィギュレーシ ョンによるスループット劣化特性を明らかにするとともに 軽減法を提案し、その改善効果を示した。

<u>文献</u>

- [1]甲斐、山田: "パケット転送処理における無瞬断リコ ソフィギュレーション法の検討" 電子情報通信学会ソサエティ大会 B-6-150(2003)
- [2] H.Yamada, H.Kai and J.Yoshida, "Using reconfigurable technology in high-speed packet processing" ICN04, February 2004.