

FPGAの部分再構成の今とこれから

～部分再構成の利点と応用へのヒント

堀 洋平, 川合浩之, 山口佳樹

FPGA (field programmable gate array) には「部分再構成」の機能を持ったものがあります。この部分再構成には、より高機能で、省電力で、信頼性の高いシステムを構築できる可能性が秘められています。 (筆者)

最近のFPGAは高集積化・高性能化が進み、民生機器、ネットワーク機器、自動車など、さまざまな分野で利用されるようになりました。初期コストが不要でユーザが自由に書き換えられるFPGAは、多品種少量生産、さらには変種変量生産(生産品目や生産量が頻繁に変わるような生産方式)へと移りつつある市場にも柔軟に対応できます。

このように、「書き換え可能」であるという特徴は、現状では市場への即応性と関連して語られることが多いようです。しかし、これだけではまだFPGAの実力を十分に発揮できていない、というのが筆者らの主張です。

1. FPGAの部分再構成とは

現在市販されている一部のFPGAは、チップ全体ではなく、特定の領域だけを書き換えることができます。このような書き換えを、部分再構成 (partial reconfiguration) と呼びます。動作中のほかの回路を停止しない場合は特に、動的部分再構成 (dynamic partial reconfiguration, run-time reconfiguration など) と呼びます。この機能を利用することで、従来のシステムにはなかった、さまざまなメリットがもたらされると考えられています。

少し前までは開発ツールが整備されていなかったため、実際に部分再構成を行うのは極めて困難でした。ごく最近になって、部分再構成回路の設計を支援する強力な開発ツールが登場し、今では簡単に部分再構成システムを作ることができるようになりました。今後、ますます応用研究が進むと期待されます。

では、FPGAの部分再構成を利用すると、どのようなメリットがあるのでしょうか。以下で順を追って見ていきましょう。

2. 部分再構成のメリット

● 多機能・高性能かつ小型・省電力な機器を実現可能

最近では携帯端末を使って、インターネットやゲーム、音楽、テレビなどを楽しむのがあたりまえになってきました。今後、その用途はもっと広がるかもしれません。しかし、実装面積や消費電力の制約が厳しい携帯端末に、新しい機能を追加するのは大変です。

そこで、一つの領域に複数の回路を切り替えて実装することが考えられます。回路を多重化すれば、実装面積と消費電力を抑えながら、用途に合わせたさまざまな機能を柔軟に提供でき、しかもハードウェアによる高い演算性能はそのまま保てます。

また、部分再構成を利用して通信モジュールだけを変更すれば、地上波放送、衛星放送、無線LANなどのさまざまな通信方式に対応した「ソフトウェア無線」(本誌2005年

KeyWord

動的部分再構成, 部分再構成, Early Access Partial Reconfiguration, PlanAhead, Spartan シリーズ, Virtex シリーズ, Partially Reconfigurable Module, RECONF 研究会

2月号, pp.27-104の特集1「ソフトウェア無線をFPGAで実現する」を参照)が実現できると期待されます。

● 柔軟な専用ハードウェアでアルゴリズムを変更

例えば、携帯型の音楽・動画プレーヤでは、再生できるファイル形式は、機器に搭載されているハードウェア・デコーダによって限られてしまうのが現状です。そこで、コンテンツと一緒にデコーダ回路をダウンロードする方法が考えられます。こうすれば、さまざまなエンコード方式に対応できますし、コンテンツ提供側も最新の圧縮技術をいち早く導入できます。このほかにも、暗号方式に合わせて演算回路を書き換えたり、場面に応じて画像処理のフィルタを変えたりするような使い方が研究されています。

● 出荷後のアップデートで不具合やぜい弱性を修正可能

最近のシステムは高度に複雑化しているので、出荷後に不具合が見つかるケースがどうしても発生してしまいます。また、通信端末やネットワーク機器などは絶えず攻撃にさらされており、攻撃手法も日々進化しています。もし製品に不具合やぜい弱性が発見され、それがハードウェアを交換しなければ修正できないものとしたら、製品を回収しなければなりません。

そこで、ハードウェアとしてFPGAを使用することで、これらの不具合や新しい攻撃手法に柔軟に対応し、回路をアップデートすることが考えられます。動的な部分再構成を使えば、システムを停止することなく、変更が必要な回路だけをアップデートできます。

● 故障個所の書き換えで信頼性を向上

設計や実装時のミスが原因で生じるハードウェアの不具合は、先ほど述べたように、FPGA内の回路を書き換えることで対応できるものもあります。しかし、熱や衝撃、放射線など、出荷後の外的要因によるハードウェアの不具合は、従来の書き換え手法では修理をすることが困難でした。これは外的要因による不具合は、故障個所を予知できないだけでなく、デバイスそのものが物理的に破壊されてしまうことがあるからです。

近年、このような外的要因による故障に、FPGAの部分再構成を利用して対処する自動修復LSIについての研究が行われ始めています。これについては、後述します。

● セキュア・システムへの応用が可能

再構成した部分回路が端末側の回路と正しく結合されなければ、当然システムは正常に動作しません。これを逆に利用し、回路のインターフェースを認証に使うことができます。端末ごとに入出力ポートの位置を変えれば、それと正しく結合する回路を持っている人でなければ端末を利用することができません。論理的な認証だけでなく、回路の物理的なインターフェースも認証に使うのです。これを利用したコンテンツ保護システムを、筆者らが実際に開発しましたので、後ほど詳しく説明します。

3. 部分再構成システムの現状と課題

部分再構成の機能を利用するメリットは早くから指摘されていたため、FPGAの登場と共にさまざまな研究が行われてきました。しかし冒頭でも述べたように、実際にシステムが開発され始めたのは比較的最近です。今後、部分再構成を利用したシステムが次々と作られ、国内外の学会などで発表されると思います。

実際にネットワーク経由での部分再構成を行うようになると、ハードウェアに対する攻撃方法が出現することが考えられます。ダウンロードする回路の設計ミスによって、ハードウェアが壊れてしまう可能性もあるでしょう。今後、部分再構成システムのセキュリティや保護機能について検討が必要です。また、現状では回路の書き換えにms(ミリ秒)オーダーの時間がかかってしまいます。より高速な書き換えのできるデバイスが開発されると、部分再構成の応用範囲はもっと広がるでしょう。

以下では、部分再構成の応用例として、筆者らが実際に研究を行っているシステムを紹介します。

4. 故障の修復と信頼性の向上

システムの故障原因には、設計、実装、製造の各工程における誤りや、熱や衝撃などの外的要因があります。製造工程におけるエラーについては、FPGAを書き換えることにより解決を図る研究がこれまでも行われてきました。これは問題発覚時点で回路を書き換えることで対応できるからです。しかし、従来の方法では、出荷後の外的要因による故障に対応することは非常に難しいことが知られています。なぜなら、外的要因(熱、衝撃、放射線など)によ