

平成22年3月31日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19700043  
 研究課題名 (和文) リコンフィギャラブルシステムに適した  
 プログラミングフレームワークの確立  
 研究課題名 (英文) Establishment of Efficient Programming Frameworks for  
 Reconfigurable Systems  
 研究代表者  
 柴田 裕一郎 (SHIBATA YUICHIRO)  
 長崎大学・工学部・准教授  
 研究者番号：10336183

研究成果の概要 (和文)：リコンフィギャラブルシステムは、ハードウェア構成を自由に変更できるコンピュータであり、柔軟性と高性能性を低コストに両立できる。反面、効率的なプログラミングが難しいという問題があった。そこで本研究では、並列化の容易なプログラミングモデルを提案するとともに、データ転送の無駄を省く処理や、類似性の高い演算をまとめる処理を自動化する方法を提案し、これらを用いたプログラミング環境を構築してその有効性を示した。

研究成果の概要 (英文)：Reconfigurable systems are a promising approach to achieve high-performance and flexible computing at a reasonable cost, since their hardware structure can be freely changed. However, making efficient programs on such systems was a difficult task for programmers. In this project, a novel programming model for efficient parallel descriptions and various automatic tuning techniques such as overhead hiding of data transfer and arithmetic sharing based on the similarity were proposed and implemented as a programming environment to prove their effectiveness.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,100,000	0	1,100,000
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	600,000	3,700,000

研究分野：計算機アーキテクチャ、リコンフィギャラブルコンピューティング

科研費の分科・細目：情報学 計算機システム・ネットワーク

キーワード：リコンフィギャラブルシステム、並列処理、FPGA

## 1. 研究開始当初の背景

(1) リコンフィギャラブルシステムは、構成を動的に変更できるプログラマブルデバイスを用いて、アルゴリズムを直接ハードウェア化して高速に実行するシステムであり、バ

イオインフォマティクスなどの科学技術シミュレーションから組込み機器でのマルチメディア信号処理までの広い分野での実用化が進み、期待を集めていた。

(2) 一方、リコンフィギャラブルシステムにおいてアプリケーションの実行性能を十分に引き出すためには、プログラミングおよび性能チューニングにおいて大きな工夫と労力が必要であった。これはハードウェアアーキテクチャの専門的知識を持たない一般のユーザにとっては敷居が高く、リコンフィギャラブルシステム普及の大きな障害となっていた。

## 2. 研究の目的

(1) これらの問題を解決しリコンフィギャラブルシステムを普及するためには、プログラミングの枠組みに関する体系的な研究が必要である。そこでまず、様々な分野におけるアプリケーションの実装経験を蓄積し、システムの性能を十分に引き出すための共通的なプログラミング手法の枠組みを確立することを一義的な目的とした。

(2) 次にアプリケーション開発者の性能チューニングの負担を軽減するため、これらを自動化する手法を開発し、設計ツールやライブラリとして実装することでその効果を定量的に明らかにすることを第2の目的とした。

(3) さらに副次的な目的として、実行性能をプログラミング環境による影響とアーキテクチャによる影響を分離して考察する評価環境を整備することや、プログラミング環境の観点からアーキテクチャの備えるべき特性を明らかにすることを設定した。

## 3. 研究の方法

(1) 様々なアプリケーションの実装を通じて共通的なプログラミング手法を抽出するために、以下のリコンフィギャラブルシステムにおける種々のアプリケーションの実行効率を実験的に解析した。

- ① 動的リコンフィギャラブルプロセッサ DRP-1
- ② リコンフィギャラブルマシン SRC-6
- ③ FPGA ベース生化学シミュレータ ReCSiP

(2) また、以下のリコンフィギャラブルマシン用言語を用いてアプリケーションを記述し、他の並列アーキテクチャ用言語との比較を行った。

- ① Cyber-C
- ② Bach-C
- ③ Carte-C

(3) これらの検討の結果、プログラミングフレームワークのフロントエンドとしてマルチスレッドプログラミングモデルに着目し、コンパイラインフラストラクチャであるCOINSを用いてその処理系を実装し、その評価を行った。また、種々の自動チューニングアルゴリズムを開発し、これらをツールとして実装することで、その効果を実験的に明らかにした。

## 4. 研究成果

(1) 新しいリコンフィギャラブルデバイスとして注目されている動的リコンフィギャラブルプロセッサでは、プログラムの流れを制御するためのステートマシンが専用機構で実現される。このため、複雑な制御を要する並列処理を実現させようとすると、ステートマシンの状態数が制約を超え、処理を実現できなくなるという問題点があった。

そこで、単純な制御構造を保ちつつ高い並列効果をあげるために「同一関数の集約化」という最適化手法を提案した。これはプログラム中において同一の関数を連続して複数呼び出す構造に着目しソフトウェアパイプライン的に処理することで状態数の増加を抑制する手法である。

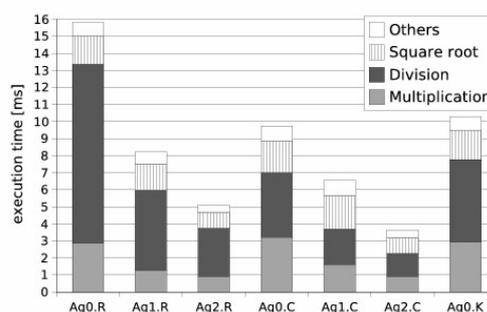


図1 関数集約化の効果

実験の結果、図1に示すように、本手法を適切に用いることにより、アプリケーションの実行性能を最大3倍程度改善できることが明らかになった。本成果は英文論文誌 Systems and Computers in Japan 誌などで発表した。

(2) 前述の「関数集約化」は単純な制御構造でなるべく高い並列処理効果を得ることを目的としたチューニング手法であり、その考え方はリコンフィギャラブルシステム一般に適用可能である。また、同一の関数の複数呼び出しを並列化するという観点では、近年注目を集めているGPU (Graphic Processing Unit)で利用されているプログラミングモデルである Single Instruction Multi Thread

(SIMT)の考え方と類似点が多い。

そこで SIMT モデルに基づく GPU 開発環境 CUDA の記述法を参考にしたリコンフィギャラブルシステム用プログラミング環境を構築した。具体的には、ユーザがマルチスレッドモデルで記述したコードを入力とし、SRC社の商用マシンで実行可能なトランスレータをコンパイラインフラストラクチャ COINS を用いて実装した。

```

1 void f(uchar in[N], uchar out[N]){
2     int data;
3     data = 5*in[tid];
4     if(tid/512 > 0) data -= in[tid-512];
5     if(tid/512 < 511) data += in[tid+512];
6     if(tid%512 > 0) data -= in[tid-1];
7     if(tid%512 < 511) data += in[tid+1];
8     if(data < 0) data = 0;
9     else if(data > 255) data = 255;
10    out[tid] = data;
11 }
12
13 int main() {
14     uchar in[N], out[N];
15     f<<<N>>>(in, out);
16     return 0;
17 }

```

図 2 マルチスレッドプログラム記述例

本環境を用いていくつかのアプリケーションをコンパイルし実行した結果、図2のようにユーザに性能チューニングに関する記述をほとんど要求せずに、手作業によるチューニングを行った場合とほぼ同等のプログラムを作成可能であることが分かった。また、このようにプログラミングモデルに一定の制約を設けることで、種々の最適化処理の自動化が容易に実現できることを実験的に示した。本成果は国際学会 HEART に論文が採択された。

(4) 多くのリコンフィギャラブルシステムでは、ホストおよびアクセラレータ間のデータ転送に要する時間が性能を制約することがアプリケーション実装の分析から明らかになった。このデータ転送には通常 Direct Memory Access (DMA) が用いられるが、データ転送と演算をオーバーラップさせるなどのプログラミング上のチューニングを行わない場合には、かえって性能が低下することも実験的に示された。また、アクセラレータに接続された複数のメモリバンクに単純にデータをインターリーブする手法では、資源制約上の問題を生じやすいことも判明した。

そこで、メモリへの不規則なデータアクセスはホストプロセッサの方が有利である点に着目し、あらかじめホストプロセッサ側でデータ配列を並び替えてからストリームの DMA を行う新たな手法「Twisted streaming

DMA」を提案し、その効果とオーバーヘッドの

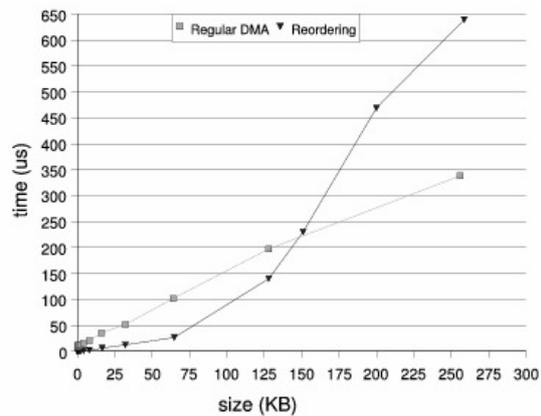


図 3 提案 DMA 手法のトレードオフ解析

トレードオフを実験的に分析した。

この結果、図3に示すように 150KB 程度の転送粒度を保つことで、本手法が有効になることが分かった。本成果は電子情報通信学会論文誌、国際学会 FPL など で発表した。

(5) 次に前述の Twisted Streaming DMA 手法をプログラマが意識することなく、ツールが自動的に有効化する環境の構築を試みた。このためには、アクセラレータに接続された複数のメモリバンクへのデータの自動配置も最適に行う必要がある。

そこでデータ配置の最適化手法に DMA 転送時間の隠蔽化手法を組み入れたものを整数計画法として定式化し、この自動最適化アルゴリズムを備えたプログラミング環境を COINS を使って実装した。

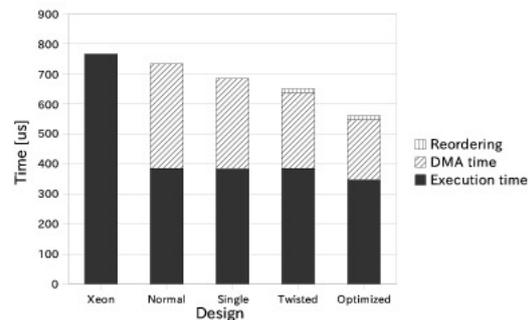


図 4 整数計画法による最適化効果

実アプリケーションのコンパイルおよび実行によって本プログラミング環境の性能評価を行った結果(図4)、本手法によりソフトウェア実行に対して最大 1.46 倍の性能を達成でき、ホストプロセッサによる前処理のオ

オーバーヘッドは約2%であることを明らかにした。本成果については、電子情報通信学会論文誌、国際学会 FPL などでも発表した。

(6) リコンフィギャラブルシステムにおけるプログラミング環境のバックエンドとしては、デバイスの資源制約を考慮しつつ高いスループットを持つ演算パイプラインの構築が重要である。そこで、演算パイプラインへのデータ入力のパンド幅の制約とハードウェアコストの削減を考慮した新しい演算パイプラインスケジューリング手法を提案した。

これらの手法を FPGA ベースの生化学シミュレーションに応用した結果、演算割当てやデータの入力の優先度計算に工夫を行うことによって、レイテンシを維持したままハードウェアコストを 20%程度削減できることが示された。本成果は国際学会 ARC などでも発表した。

(7) さらにハードウェア利用効率を向上させるため、アプリケーションに含まれるデータパスから共通部分を自動的に抽出し、これを結合することで面積効率の良いパイプラインを自動合成する手法を提案した。また、データパス共有化が招く性能低下を抑制するためにデータパスの類似度情報を利用する手法を開発し、その処理系を実装した。

本手法を FPGA を用いた生化学シミュレーションシステムに応用し実際の生化学モデルを用いた評価実験をした結果 (図5)、適切な反応速度式の分類を行えば、本手法を使わない場合に比べて約 66%のハードウェアコストで同等のシミュレーションを実行できることが分かった。また、その際の性能上のオーバーヘッドは約 20%であることも明らかにした。

本成果は、国際学会 FPL などでも発表したほか、情報処理学会英文論文誌 T-SLDM に論文

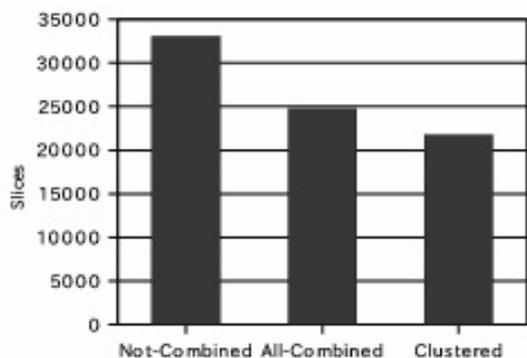


図5 提案手法のハードウェア削減効果

が掲載されることが決定している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 22 件)

- ① H. Yamada, Y. Ogawa, T. Ooya, T. Ishimori, Y. Osana, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Amano, Y. Shibata, K. Oguri, "Automatic Pipeline Construction Focused on Similarity of Rate Law Functions for an FPGA-based Biochemical Simulator," IPSJ Transactions on System LSI Design Methodology, 査読有, Vol. 3, 2010 (掲載決定済)
- ② K. Dohi, Y. Shibata, T. Hamada, T. Masada, K. Oguri, D. A. Buell, "Implementation of a Programming Environment with a Multithread Model for Reconfigurable Systems," Proc. International Workshop on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies, 査読有, 2010 (掲載決定済)
- ③ H. Yamada, Y. Osana, T. Ishimori, T. Ooya, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Amano, Y. Shibata, K. Oguri, "A Modular Approach to Heterogeneous Biochemical Model Simulation on an FPGA," Proc. International Conference on ReConFigurable Computing and FPGAs, 査読有, 2009, pp.125-130
- ④ 志田さや香, 土肥慶亮, 柴田裕一郎, 濱田剛, 正田備也, 小栗清, "リコンフィギャラブルマシンにおける DMA 転送とデータ配置の自動最適化手法の検討" 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J92-D, No. 12, 2009, pp.2127-2136
- ⑤ 山田英樹, 石森智也, 大屋知範, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 小栗清, "FPGAに基づく生化学シミュレータにおける反応速度式の類似性に着目したパイプライン自動構築" 情報科学技術フォーラム論文集, 査読有, 第1分冊, 2009, pp.197-204
- ⑥ T. Ooya, H. Yamada, T. Ishimori, Y. Osana, Y. Shibata, K. Oguri, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Amano, "Configuring Area and Performance: An Empirical Evaluation on an FPGA-based Biochemical Simulator," 査読有, Proc. International Conference on Field Programmable Logic and Applications,

- 2009, pp.679-682
- ⑦ T. Ishimori, H. Yamada, Y. Shibata, Y. Osana, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, H. Amano, A. Funahashi, N. Hiroi, K. Oguri, "Pipeline Scheduling with Input Port Constraints for an FPGA-based Biochemical Simulator, Proc. International Conference on Applied Reconfigurable Computing, 査読有, 2009, pp.368-373
- ⑧ 岩岡洋, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 小嶋利紀, 舟橋啓, 広井賀子, 柴田裕一郎, 岩永直樹, 北野宏明, 天野英晴, "FPGA上でのシミュレーションに向けた生化学モデルコンパイラの実装", 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J91-D, No. 9, 2008, pp.2205-2216
- ⑨ S. Shida, Y. Shibata, K. Oguri, D. A. Buell, "An Optimization Method of DMA Transfer for a General Purpose Reconfigurable Machine," Proc. International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, 査読有, 2008, pp.647-650
- ⑩ M. Miyata, Y. Shibata, K. Oguri, "An Optimization Method Focusing on Fixed-Point Arithmetic in Applications for Dynamically Reconfigurable Processor," Systems and Computers in Japan, 査読有, Vol.38, No.14, 2007, pp.20-28
- ⑪ H. Yamada, N. Iwanaga, Y. Shibata, Y. Osana, M. Yoshimi, Y. Iwaoka, Y. Nishikawa, T. Kojima, H. Amano, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Kitano, K. Oguri, "A Combining Technique of Rate Law Functions for a Cost-effective Reconfigurable Biological Simulator," Proc. International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, 査読有, 2007, pp.808-811
- ⑫ S. Shida, Y. Shibata, K. Oguri, D. A. Buell, "Implementation of a Barotropic Operator for Ocean Model Simulation Using a Reconfigurable Machine," Proc. International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, 査読有, 2007, pp.589-592
- [学会発表] (計 18 件)
- ① H. Yamada, Y. Osana, T. Ishimori, T. Ooya, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Amano, Y. Shibata, K. Oguri, "A Modular Approach to Heterogeneous Biochemical Model Simulation on an FPGA," International Conference on ReConfigurable Computing and FPGAs, 2009年12月10日, メキシコ・カンクン
- ② 山田英樹, 石森智也, 大屋智徳, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 小栗清, "FPGAに基づく生化学シミュレータにおける反応速度式の類似性に着目したパイプライン自動構築", 情報科学技術フォーラム, 2009年9月4日, 仙台市
- ③ T. Ooya, H. Yamada, T. Ishimori, Y. Osana, Y. Shibata, K. Oguri, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Amano, "Configuring Area and Performance: Empirical Evaluation on an FPGA-based Biochemical Simulator," International Conference on Field Programmable Logic and Applications, 2009年9月2日, チェコ・プラハ
- ④ 土肥慶亮, 志田さや香, 柴田裕一郎, 濱田剛, 正田備也, 小栗清, "リコンフィギャラブルシステムにおけるマルチスレッドプログラミングモデルを用いたメモリアクセス最適化手法の一検討", 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会, 2009年5月15日, 福井市
- ⑤ 大屋智徳, 山田英樹, 石森智也, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 小栗清, "FPGAを用いた汎用生化学シミュレータにおけるハードウェアモジュール自動生成アルゴリズムの実機評価", 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会, 2009年5月14日, 福井市
- ⑥ T. Ishimori, H. Yamada, Y. Shibata, Y. Osana, M. Yoshimi, Y. Nishikawa, H. Amano, A. Funahashi, N. Hiroi, K. Oguri, "Pipeline Scheduling with Input Port Constraints for an FPGA-based Biochemical Simulator," International Workshop on Applied Reconfigurable Computing, 2009年3月18日, ドイツ・カールスルーエ
- ⑦ 土肥慶亮, 志田さや香, 柴田裕一郎, 濱田剛, 正田備也, 小栗清, "リコンフィギャラブルシステムにおけるマルチスレッドプログラミングモデルを用いた開発環境の構築", 電子情報通信学会機能集積情報システム研究会, 2009年3月6日, 長崎市
- ⑧ 吉見真聡, 西川由理, 長名保範, 舟橋

- 啓, 広井賀子, 柴田裕一郎, 山田英樹, 北野宏明, 天野英晴, 情報処理学会計算機アーキテクチャ研究会, 2008年10月21日, 筑紫野市
- ⑨ 山田英樹, 石森智也, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 小栗清, “FPGAを用いた生化学シミュレータにおける反応速度式の類似性に着目した演算パイプライン自動結合アルゴリズム”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2008年9月25日, 岡山市
- ⑩ S. Shida, Y. Shibata, K. Oguri, D. A. Buell, “An Optimization Method of DMA Transfer for a General Purpose Reconfigurable Machine,” International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, 2008年9月10日, ハイデルベルグ
- ⑪ Y. Shibata, T. Hamada, T. Masada, K. Oguri, “Hardware Implementation of Separability Filter for Eye Detection,” Joint Symposium of Cheju National University and Nagasaki University on Science and Technology, 2008年6月5日, 韓国・済州市
- ⑫ 石森智也, 山田英樹, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 西川由理, 小嶋利紀, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 小栗清, “FPGAを用いた生化学シミュレータにおける入力ポート制約を考慮した演算パイプラインスケジューリング”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2008年5月23日, 会津若松市
- ⑬ 文栄光, 土屋英之, 柴田裕一郎, 原澤隆一, 小栗清, “FPGAにおける標数5の楕円曲線演算の高位合成を用いた実装”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2008年5月22日, 会津若松市
- ⑭ 志田さや香, 柴田裕一郎, 小栗清, “リコンフィギャブルマシン SRC-6 における DMA 転送の最適化手法”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2008年1月16日, 横浜市
- ⑮ H. Yamada, N. Iwanaga, Y. Shibata, Y. Osana, M. Yoshimi, Y. Iwaoka, Y. Nishikawa, T. Kojima, H. Amano, A. Funahashi, N. Hiroi, H. Kitano, K. Oguri, “A Combining Technique of Rate Law Functions for a Cost-effective Reconfigurable Biological Simulator,” International Conference on Field-Programmable

- Logic and Applications, 2007年8月28日, オランダ・アムステルダム
- ⑯ S. Shida, Y. Shibata, K. Oguri, D. A. Buell, “Implementation of a Barotropic Operator for Ocean Model Simulation Using a Reconfigurable Machine”, International Conference on Field-Programmable Logic and Applications, 2007年8月27日, オランダ・アムステルダム
- ⑰ 山田英樹, 岩永直樹, 柴田裕一郎, 長名保範, 吉見真聡, 岩岡洋, 西川由理, 小嶋利紀, 天野英晴, 舟橋啓, 広井賀子, 北野宏明, 小栗清, “生化学シミュレータ ReCSiP における反応速度式共有化”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2007年5月17日, 金沢市
- ⑱ 志田さや香, 柴田裕一郎, 小栗清, “リコンフィギャブルマシン SRC-6 を用いた海洋モデルシミュレーションの実装検討”, 電子情報通信学会リコンフィギャブルシステム研究会, 2007年5月17日, 金沢市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

柴田 裕一郎 (SHIBATA YUICHIRO)  
長崎大学・工学部・准教授  
研究者番号：10336183

### (2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：