

平成21年 3月31日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19500037  
 研究課題名（和文） 超大規模並列システムを指向した相互結合網の大域的最適化基盤技術の確立  
 研究課題名（英文） Establishment of Fundamental Technology for Global Optimization of Interconnection Networks for Huge-Scale Parallel Systems  
 研究代表者  
 横田 隆史（YOKOTA TAKASHI）  
 宇都宮大学・工学研究科・准教授  
 研究者番号：90334078

## 研究成果の概要：

100万ノード規模の超並列計算機の構築を目指し、鍵となる相互結合網の基盤技術を確立した。具体的には、(1) 動作挙動を相互結合網とプロセッサの2つの観点から解明した。(2) 後者についてはエントロピー概念を基にした指標を、前者については数値的に表現するための手法と指標をそれぞれ導出した。(3) 相互結合網を大域的最適化の概念により効率的に制御するための新たなルーティング手法を創出し有効性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 総合領域  
 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： 並列計算機，相互結合網，輻輳制御，耐故障性，大域的最適化

## 1. 研究開始当初の背景

100万ノード規模の超並列計算機の構築が現実味を帯びつつある。並列計算機はノード間での通信なしには成立しないうえ、多くのアプリケーションでは通信性能が全体の処理性能を決定付ける要因となっているため、相互結合網は鍵技術となっている。

比較的小規模なシステムであれば、全体の動作を見通すことも比較的容易であり、集中的な管理機構により全体を適切な状態に保

つように制御することも可能である。しかし、超大規模システムにおいては、コストや実現性の問題から集中的な制御は不可能である。このため、中・大規模以上のシステムの相互結合網は、独立して動作する比較的小規模のスイッチ素子を多数相互に接続することで実現される。その点に起因して、性能的にも（輻輳の制御）耐故障の観点からも（信頼性の制御）、全体として最適な状態で稼動制御することが難しい問題がある。そしてこの問題は、規模が大きくなるほど深刻化する。

## 2. 研究の目的

本研究の計画当初、大規模化を進めたときの相互結合網の挙動が、小規模網での単純な延長線上にないことがわかりつつあった。このため、できる限り科学的な手法に則って、挙動の把握のレベルから進めることとする。具体的には大きく以下の3項目である。

- (1) 超大規模化した場合の挙動を明らかにする。
- (2) 制御のための指標を明確にする。
- (3) 工学的な応用として相互結合網方式を確立する。

## 3. 研究の方法

「挙動」については、アプリケーションプログラムの実行母体となるプロセッサ自身と、それらの間の通信路たる相互結合網とを分離し、それぞれの挙動の観測対象について検討する。いずれもシミュレータを目的に応じて変更することで実験的に解明してゆく手法をとる。

プロセッサ自身の挙動については、既存のソフトウェアシミュレータである **Simple Scalar** ツールセットを改変使用する。評価アプリケーションとしては **SPEC CPU2000** ベンチマークを用いることで一般性を主張する。

相互結合網の挙動に関しては、通常のシミュレーションに加え、セルオートマトンモデルによる簡略化モデルを併用する。前者は実際の結合網に近い動作を模擬するために動作速度およびメモリ使用量の点で問題がある。このため後者により簡略化することで概略的な挙動把握を行う。

相互結合網シミュレータは、通常シミュレータ、簡略化シミュレータともに、**MPI** により並列拡張する。本課題では均質な構成の結合網を主体に検討するため、シミュレータの並列度は高く、並列化によるシミュレーション時間短縮の効果が高い。並列シミュレータは、本課題の予算により導入した並列サーバ上で実行する。

挙動は、できる限り既存の（確立した理論基盤を持つ）手法による表現を検討する。情報エントロピーの考え方を中心として、検討を進める。

上記表現の基盤理論を背景とした、相互結合網の制御手法（考え方）を創出する。上記で並列化したシミュレータ上に制御手法をプロトタイプ実装し、それらの効果を確認してゆく。

## 4. 研究成果

- (1) 情報エントロピーの概念をプロセッサ内の分岐予測器やキャッシュメモリに導入し、分岐予測性能（キャッシュのヒット率）の上界を表す指標として提案した。

これらの性能の上界は、分岐予測器においては一定の構成を仮定した上で予測成功率を計測することで推測していたが、情報エントロピーが本質的に、事象の発生確からしさを表すものであることから、理論的な上界を示すことになる。またこの指標が（平均的な）挙動表現に適する。また、エントロピー指標の時系列変化は、プログラム実行の変化、すなわち「挙動」を表している。

- (2) 相互結合網の挙動表現に関する検討過程から、Ramp Load Method (RLM) と呼ぶ新しい評価手法を提案した。

既存手法では、パラメータを離散的に変え何度もシミュレーションを行うことで評価をしていたが、本手法ではパラメータを連続変化させるために1度で済む。

- (3) 上記手法をもとに、相互結合網の性能指標を2つ提案した。

1つは臨界転送負荷(critical load ratio)であり、従来曖昧な定義で議論されていたものを、RLMにより得られる性能曲線をもとに厳密に定義した。もうひとつは網性能指標(NPM: network performance measure)であり、スループットとレイテンシを同時に表す。

- (4) 制御手法に関しては、非最短経路でのルーティング手法を提案したほか、輻輳制御手法に対して上述のRLMと2つの性能指標を用いた包括的な検討の手法を示した。

## 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21件)

- (1) Yuanming Zhang, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, Takanobu Baba, "Clustered Decoupled Software Pipelining on Commercial CMP," Proc. 14th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS'08), pp. 681-688, 2008年, 査

- 読有
- (2) Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Takanobu Baba, "Are Uniform Networks Scalable?" Proc. 9th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT 2008), pp.137-140, 2008年, 査読有
  - (3) 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, "プログラムループの実行頻度分布に関する一考察", 電子情報通信学会論文誌 A, Vol. J91-A, No. 12, pp.1213-1218, 2008年, 査読有
  - (4) Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, Takanobu Baba, "Run-time Binary Code Patching and Its Application," Proc. 12th IASTED International Conference on Software Engineering and Applications (SEA 2008), pp.106-111, 2008年, 査読有
  - (5) Takanobu Baba, Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Junichi Yoneda, Kazufumi Sato, Hiroyoshi Jutori, Hideto Yanome, "Two-Path Limited Speculative Multithreading Processor," Proc. 20th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2008), pp.348-355, 2008年, 査読有
  - (6) Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Takanobu Baba, "Adaptation Level and Injection Control in a Quasi-Globally Adaptive Routing," Proc. 20th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2008), pp.112-117, 2008年, 査読有
  - (7) Yuanming Zhang, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, Takanobu Baba, "Thread Pipelining with Clustered Data Communication on Commodity CMPs," Proc. 20th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2008), pp.342-347, 2008年, 査読有
  - (8) 小川大仁, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, "ループ構造を考慮したバスベーススレッド分割手法の検討", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 108, No. 303, pp.1-6, 2008年, 査読無
  - (9) 森裕貴, 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, "広域情報を用いた迂回ルーティング手法の検討", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 108, No. 303, pp.13-18, 2008年, 査読無
  - (10) 矢野目秀人, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, "ループバスに基づいたプログラムの挙動解析", 電子情報通信学会技術報告, Vol.108, No.303, pp.7-12, 2008年, 査読無
  - (11) 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, "相互結合網のスケール効果に関する初期評価", 情報処理学会研究報告, Vol. 2008, No. 75, pp.91-96, 2008年, 査読無
  - (12) Takanobu Baba, Hideto Yanome, Kanemitsu Ootsu, Takashi Yokota, "A Hardware Hot Loop Path Detector for Dynamic Parallelization and Optimization," Proc. 4th IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2008), pp.270-279, 2008年, 査読有
  - (13) Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Takanobu Baba, "Entropy Representation of Memory Access Characteristics and Cache Performance," Proc. 4th IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2008), pp.280-285, 2008 査読有
  - (14) Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Takanobu Baba, "Potentials of Branch Predictors: from Entropy Viewpoints," Proc. International Conference on Architecture of Computing Systems (ARCS 2008), pp.273-285, 2008年, 査読有
  - (15) 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, "プログラムの実行挙動と分岐予測性能を表現するエントロピーの提案", 情報処理学会論文誌: コンピューティングシステム, Vol.48, No. SIG 18 (ACS 20), pp.12-31, 2007年, 査読有
  - (16) 矢野目秀人, 増保智久, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, "ループに限定したハードウェアホットパス検出機構", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 107, No.175, pp.89-94, 2007年, 査読無
  - (17) 芝崎諒, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, "複雑なループ制御に対応したバイナリレベル自動並列化処理の実装", 電子情報通信学会技術報告, Vol. 107, No.175, pp.101-106, 2007年, 査読無
  - (18) 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, "エントロピーによるメモリアクセス特性の表現とキャッシュ性能", 情報処理学会研究報告, Vol. 2007, No. 79, pp.19-24, 2007年, 査読無
  - (19) Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, Takanobu Baba, "Introducing

Entropies for Representing Program Behavior and Branch Predictor Performance,” Proc. 2007 Workshop on Experimental Computer Science (ExpCS 2007), 2007年, 査読有

- (20) Takanobu Baba, Tomohisa Masuho, Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu, “Design of a Two-Level Hot Path Detector for Path-Based Loop Optimizations,” Proc. IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2007), pp.23-28, Apr. 2-4, 2007年, 査読有
- (21) Kanemitsu Ootsu, Takahiko Kobayashi, Hirohito Ogawa, Takashi Yokota, Takanobu Baba, “A Hot Path Based Thread Partitioning Technique for Thread Pipelining Model,” Proc. IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2007), pp.293-298, 2007年, 査読有

[学会発表] (計26件)

- (1) 篠原啓志, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “次世代マルチコアプロセッサ開発のためのPS3クラスタシステムの構築”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (2) 福田明宏, 十鳥弘泰, 佐藤和史, 米田淳一, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “2パス限定投機システムの提案 —スレッドコード生成処理系—”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (3) 十鳥弘泰, 福田明宏, 佐藤和史, 米田淳一, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “2パス限定投機システムの提案 —メモリアクセス機構—”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (4) 佐藤和史, 福田明宏, 十鳥弘泰, 米田淳一, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “2パス限定投機システムの提案 —マルチスレッド制御機構—”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (5) 米田淳一, 福田明宏, 十鳥弘泰, 佐藤和史, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “2パス限定投機システムの提案 —スレッド実行機構—”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (6) 中島伸吾, 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, “動的最適化のためのハードウェアホットパス検出機構”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月12日
- (7) 津田翼, 矢野目秀人, 大津金光, 横田隆

史, 馬場敬信, “ホットループパス検出機構における動的最適化に向けたパラメータの検討”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日

- (8) 白戸卓志, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “バイナリレベル変数解析に基づいた自動並列化システムの開発”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日
- (9) 伊里拓也, 小川大仁, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “パスベーススレッド分割手法に基づいた自動並列化システムの実装”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日
- (10) 阿部武志, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “グラフ理論に基づくスレッド分割手法におけるループ展開の適用検討”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日
- (11) 水沼光, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “ループ並列化における命令移動によるデータ依存同期待ち削減法の検討”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日
- (12) 佐藤裕輔, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “拡張容易なCMPシミュレータの電力評価環境構築”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月11日
- (13) 安西由行, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “CMPにおけるキャッシュメモリ階層構成の違いによる電力性能評価”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月10日
- (14) 石井浩登, 月川 淳, 古川文人, 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, “PISA based VLIW Processor 向けクロス環境の構築”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月10日.
- (15) 五井孝典, 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, “PISA based VLIW Processor への割込み/例外制御機能の実装”, 情報処理学会 第71回全国大会, 2009年3月10日.
- (16) 矢野目秀人, 須貝佳彦, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “パスに含まれる命令数を考慮したハードウェアホットループパス検出機構”, 情報処理学会 第70回全国大会, 2008年3月15日
- (17) 中島伸吾, 横田隆史, 大津金光, 馬場敬信, “ループに限定したハードウェアホットパス検出機構”, 情報処理学会 第70回全国大会, 2008年3月14日
- (18) 山口武美, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “Cell Broadband Engine におけるSPEC CFP2000の並列化”, 情報処理学会 第70回全国大会, 2008年3月14日
- (19) 阿部武志, 大津金光, 横田隆史, 馬場敬信, “グラフ理論に基づくスレッド分割

- 手法の適用検討”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月14日
- (20)伊里拓也，小川大仁，大津金光，横田隆史，馬場敬信，“ループ分割により関数境界を越えたバスベーススレッド分割手法の検討”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月14日
- (21)小川大仁，伊里拓也，大津金光，横田隆史，馬場敬信，“ループ細分を適用したバスベーススレッド分割手法の初期評価”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月14日
- (22)南波孝輔，伊藤聡志，山田芳文，大津金光，横田隆史，馬場敬信，“Pthreadを用いたMRI画像再構成アプリケーションの高速化”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月14日
- (23)森裕貴，横田隆史，大津金光，馬場敬信，“広域情報を用いたルーティングアルゴリズムの汎用シミュレータへの実装”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月13日
- (24)杉森帝政，小川雅昭，横田隆史，大津金光，馬場敬信，“実通信パターンを用いた相互結合網の過渡応答の評価”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月13日
- (25)張元鳴，大津金光，横田隆史，馬場敬信，“A Compiler Framework for Feedback-Directed Parallelizing Programs on CMP,” 情報処理学会第70回全国大会，2008年3月13日
- (26)大津金光，横田隆史，馬場敬信，“動的バイナリ変換処理のためのユーザーレベルホットスポット検出システム”，情報処理学会第70回全国大会，2008年3月13日

[その他]

- 20th IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems (PDCS 2008)にて Best Paper Award を受賞

6. 研究組織

(1)研究代表者

横田 隆史 (YOKOTA TAKASHI)

宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90334078

(2)研究分担者

(3)連携研究者

馬場 敬信 (BABA TAKANOBU)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70092616

大津 金光 (OOTSU KANEMITSU)

宇都宮大学・大学院工学研究科・助教