

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：12605
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22500041
 研究課題名（和文） ケイリーグラフにおける耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムの開発
 研究課題名（英文） Development of Cluster-Fault-Tolerant Routing Algorithms in Cayley Graphs
 研究代表者
 金子 敬一（KANEKO KEIICHI）
 東京農工大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：20194904

研究成果の概要（和文）：焦げたパンケーキグラフにおいて、2ノード間の耐故障経路選択アルゴリズムを開発し、これを拡張することで2ノード間の耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムを開発した。この成果を種々のケイリーグラフに適応する準備として、完全階層型ハイパキューブ相互結合網および階層型キューブ網において、1対多の互いに素な経路選択アルゴリズムを開発した。また、部分列反転グラフにおいて、2ノード間に、内素な経路選択するアルゴリズムを開発した。さらに、完全階層型ハイパキューブ相互結合網において、多対多の互いに素な経路選択アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要（英文）：In pancake graphs, we have developed a fault-tolerant routing algorithm and a cluster-fault-tolerant routing algorithm for one-to-one communication. As a preliminary step for applying this approach to various Cayley graphs, we have developed in perfect hierarchical hypercubes and hierarchical cubic networks disjoint-path routing algorithms for one-to-many communication. In addition, we have developed an internally disjoint paths routing algorithm in substring reversal graphs. We have also developed a disjoint paths routing algorithm for many-to-many communication in perfect hierarchical hypercubes.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：情報工学

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：ディペンダブルコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

プロセッサ性能は、1980年以降、約3年ごとに倍々となってきている。しかしながら、今後も無制限の性能向上を望むことはできない。これに対して、解くべき問題の規模は留まるところを知らず、これを解決する手法

として、並列計算に対する期待が高まっている。並列計算機は、プロセッサや交換器などの市販品を組合せることで、比較的安価で高性能のシステムを構築することができる。しかし、唯一、市販の製品で構成できないのが相互結合網である。結果として大規模並列計

算機の構成において、相互結合網の位相は、コスト性能比を大きく左右する。相互結合網の設計における重要な要素は、低い次数、小さな直径、および小さな平均距離である。このような因子を指標として、並列計算機のために、ケイリーグラフなどに基づいて、ローテータ R_n 、 (n, k) -ローテータ $R_{n,k}$ 、スター S_n 、パンケーキ P_n 、焦げたパンケーキ BP_n 、一般化パンケーキ $GP_{n,k}$ 、バブルソート BS_n 、部分列反転 SR_n 、完全階層型ハイパキューブ HHC_{2^m+m} 、階層型キューブ HCN_n 、デュアルキューブ DC_n 、メタキューブ $MC_{n,k}$ など、数多くの相互結合網が提案されている。しかしながら、近年では、大規模であるが故に、並列計算機中に故障要素が存在する可能性が高く、そのため、上記の指標に加えて、耐故障性を考慮した効率の良い経路選択アルゴリズムが必須となっている。

このような耐故障性を考慮した経路選択アルゴリズムは、(1) 適応的な経路選択アルゴリズム、(2) 出発ノードと目的ノード間で、途中のノードを共有しない経路をできるだけ多く構成する素な経路選択アルゴリズム、(3) 故障ノードを想定してハミルトン閉路やハミルトン経路といった特定の経路を求めるアルゴリズム、などに分類することができる。このうち、(1)については、研究活動は広く分布している。一方、米国では、Sudboroughを中心とするグループが、(2)に関して活発な研究を行っている。また、台湾では、(3)について Hsu らによる研究グループの活動が盛んである。これに対して、日本では、申請者の研究室や Peng らの研究グループが、(3)について活発に成果を報告している。

これらの研究のほとんどが、故障モデルとしてランダムに発生する多重故障を想定している。しかしながら、現実には、物理的あるいは論理的に隣接した複数の要素（プロセッサやリンク）に同時に障害が発生するクラスタ故障が起きる可能性が高い。それぞれのクラスタは、連結した比較的小さな部分グラフであるため、うまく処理することで、あたかも1つの故障要素だけが存在するかのように対処することができる場合も多い。そのため、従来の研究では、クラスタ故障が起きた場合に、システムが、大幅に性能を低下させてしまう可能性が高いのに対して、本研究では、クラスタ故障を想定してアルゴリズムを構築することで、より大規模な故障に対しても、システムが性能を大きく低下させず処理を継続できるような耐故障性を実現するという利点がある。

2. 研究の目的

本研究では、ケイリーグラフに基づいて提案された種々の並列計算機用位相に対して、複数の隣接した故障からなるクラスタ故障

をあたかも1つの故障であるかのように回避する経路選択（1対1の経路選択、1対1の内素な経路選択、1対多の互いに素な経路選択、多対多の互いに素な経路選択など）を行う統一的なアルゴリズムの開発を目指す。具体的には、まず、焦げたパンケーキグラフに対する耐クラスタ故障経路選択アルゴリズムを開発する。次に、この手法をスターグラフ、ローテータグラフなど、他のケイリーグラフに対して拡張できるように、各種ケイリーグラフにおける経路選択手法を開発する。

3. 研究の方法

まず、焦げたパンケーキグラフを対象に、耐クラスタ故障の経路選択アルゴリズムを開発する。ケイリーグラフに共通な性質として、短いサイクルがないこと、あるグラフが同じ性質を持つ複数の部分グラフに分解可能であることがある。この性質により、複数の短い経路による経路選択を実現することで、直径に制限を設けたクラスタでは、1つのクラスタが同時に複数の経路にまたがることなく、故障のない経路を構築することができる。このアイデアに基づき、ケイリーグラフ一般に適用可能な方法論の確立を目指すため、各種ケイリーグラフにおける耐故障経路選択手法を開発する。開発したアルゴリズムについては、必ず実現して、計算機実験を行ってデータを取得、平均性能および最悪性能を算出する。研究成果については、全国大会や研究会、および並列分散処理に関する国際会議、学会論文誌を通じて積極的に発信する。

4. 研究成果

研究成果を要約すると以下のようになる。

(1) $(n - 1)$ 個の故障ノードを持つ焦げたパンケーキグラフ BP_n において、任意の2つの非故障ノード間に長さ高々 $(2n + 4)$ の非故障経路を時間計算量 $O(n^2)$ で構成する耐故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した。

(2) $(2^m + m)$ -次元完全階層型ハイパキューブ相互結合網 HHC_{2^m+m} において、1つの出発ノードと $k (\leq m + 1)$ 個の目的ノードの間に、長さ高々 $O(2^m)$ の互いに素な経路を時間計算量 $O(km2^m)$ で構成するアルゴリズムを開発した。従来のアルゴリズムでは、得られる経路の長さが高々 $O(m2^m)$ であったのに対して、提案アルゴリズムでは、これを大幅に短くすることに成功した。

(3) n -部分列反転グラフ SR_n において、2つのノード間に、 $n(n - 1)/2$ 本の長さ高々 $(3n - 6)$ の内素な経路を時間計算量 $O(n^4)$ で構成するアルゴリズムを開発した。従来のアルゴリズム

ムでは, 得られる経路の長さの総和が $O(n^4)$, 時間計算量が $O(n^6)$ であったのに対して, 提案アルゴリズムでは, これらを大幅に低減することに成功した.

(4) $(2^m + m)$ -次元完全階層型ハイパキューブ相互結合網 HHC_{2^m+m} において, $(m+1)$ 個の出発ノードと $(m+1)$ 個の目的ノードの間に, 長さ高々 $(m+1)(2^m + m + 2) + 3$ の互いに素な経路を時間計算量 $O(m^2 2^{2m})$ で構成するアルゴリズムを世界で初めて開発した.

(5) 階層型キューブ網 HCN_n において, 1つの出発ノードと k ($k \leq n+1$)個の目的ノードの間に, 長さ高々 $2n+k+3$ の互いに素な経路を時間計算量 $O(kn \log k)$ で構成するアルゴリズムを世界で初めて開発した.

(6) 直径 3 の故障クラスタを $(n-1)$ 個持つ焦げたパンケーキグラフ BP_n において, 任意の2つの非故障ノード間に長さ高々 $(2n+10)$ の非故障経路を時間計算量 $O(n^2)$ で構成する耐故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発した.

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 5 件)

- ① Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Node-to-set Disjoint-path Routing in Hierarchical Cubic Networks," The Computer Journal, 査読有, Vol. 55, No. 12, pp. 1440-1446, 2012. doi: 10.1093/comjnl/bxr137
- ② Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "The Set-to-set Disjoint-path Problem in Perfect Hierarchical Hypercubes," The Computer Journal, 査読有, Vol. 55, No. 6, pp. 769-775, 2012. doi: 10.1093/comjnl/bxr135
- ③ 金子敬一: "部分列反転グラフにおける内素な経路," 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol. J95-D, No. 1, pp. 47-53, 2012.
- ④ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "A New Node-to-set Disjoint-path Algorithm in Perfect Hierarchical Hypercubes," The Computer Journal, 査読有, Vol. 54, No. 8, pp. 1372-1381, 2011. doi: 10.1093/comjnl/bxr047
- ⑤ Iwasaki, Tatsuya, and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing in Burnt Pancake Graphs," Information Processing Letters, 査読有, Vol. 110, No. 14-15, pp. 535-538, 2010. doi: 10.1016/j.ipl.2010.04.023

[学会発表] (計 16 件)

- ① Nishiyama, Yo, Yuki Hirai, and Keiichi

Kaneko: "Fault-tolerant Routing Based on Directed Safety Levels in a Hyper-Star Graph," Proceedings of the International Conference on Advanced Computer Science, Applications and Technologies, Kuala Lumpur, Malaysia, Nov. 26-28, 2012.

- ② Nishiyama, Yo, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing Based on Safety Levels in a Hyper-star Graph," Proceedings of the IADIS International Conference on Applied Computing 2012, Madrid, Spain, Oct. 19-21, 2012.
- ③ Myojin, Manabu, and Keiichi Kaneko: "A Fault-tolerant Routing Algorithm using Directed Probabilities in Hypercube Networks," Proceedings of the 2012 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, Nevada, USA, July 16-19, 2012.
- ④ Dinh Thuy Duong and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing Algorithms based on Approximate Directed Routable Probabilities for Hypercubes," Proceedings of the 11th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, Melbourne, Australia, Oct. 24-26, 2011.
- ⑤ Iwasaki, Tatsuya, and Keiichi Kaneko: "A Routing Algorithm of Pairwise Disjoint Paths in a Burnt Pancake Graph," Proceedings of the 2nd International Symposium on Information and Communication Technology, Hanoi, Vietnam, Oct. 13-14, 2011.
- ⑥ Dinh Thuy Duong and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing Algorithms based on Approximate Routable Probabilities for Hypercube Networks," Proceedings of the 2011 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, Nevada, USA, July 18-21, 2011.
- ⑦ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Node-to-set Disjoint-path Routing in Perfect Hierarchical Hypercubes," Proceedings of the International Conference on Computational Science, Singapore, June 1-3, 2011.
- ⑧ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Set-to-set Disjoint-path Routing in Perfect Hierarchical Hypercubes," Proceedings of the Fourth International C* Conference on Computer Science & Software Engineering, Montreal, Quebec, Canada, May 16-18, 2011.
- ⑨ Jung, Sinyu, and Keiichi Kaneko: "An Algorithm for Node-to-set Disjoint Paths Problem in a Substring Reversal Graph," Proceedings of the 8th Joint Conference on Computer Science and Software Engineering, Nakhon Pathom, Thailand, May 11-13, 2011.

- ⑩ Iwasawa, Nagateru, Antoine Bossard, and Keiichi Kaneko: "Set-to-set Disjoint Path Routing Algorithm in Burnt Pancake Graphs," Proceedings of the ISCA 26th International Conference on Computers and their Applications, New Orleans, Louisiana, USA, Mar. 23-25, 2011.
- ⑪ Peng, Shietung, and Keiichi Kaneko: "Set-to-set Disjoint-path Routing in Metacube," Proceedings of the Eleventh International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, Wuhan, China, Dec. 8-11, 2010.
- ⑫ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Node-to-set Disjoint Paths Routing in Metacube," Proceedings of the IASTED International Conference on Parallel and Distributed Computing and Systems, Marina del Rey, California, USA, Nov. 8-10, 2010.
- ⑬ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "A Node-to-set Disjoint-path Routing Algorithm in Perfect Hierarchical Hypercubes," Proceedings of the First International Conference on Advanced Computing and Communications, Orlando, Florida, USA, Sept. 15-17, 2010.
- ⑭ Jung, Sinyu, and Keiichi Kaneko: "A Feedback Vertex Set on Pancake Graphs," Proceedings of the 2010 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Las Vegas, Nevada, USA, July 12-15, 2010.
- ⑮ Iwasawa, Nagateru, Tatsuro Watanabe, Tatsuya Iwasaki, Keiichi Kaneko: "Cluster-fault-tolerant Routing in Burnt Pancake Graphs," Proceedings of the 2010 International Symposium on Frontiers of Parallel and Distributed Computing, Busan, Korea, May 21-23, 2010.
- ⑯ Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Fault-tolerant Node-to-set Disjoint-path Routing in Hypercubes," Proceedings of the 10th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, Busan, Korea, May 21-23, 2010.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

金子 敬一 (KANEKO KEIICHI)
東京農工大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：20194904

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者