

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 3 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330079

研究課題名(和文) ケイリーグラフにおける確率的耐故障経路選択手法の開発

研究課題名(英文) Development of Stochastic Fault-tolerant Routing Methods in Cayley Graphs

研究代表者

金子 敬一 (Kaneko, Keiichi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20194904

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：まず、ケイリーグラフの性質を調査するため、メビウスキューブ、ハイパーキューブ、階層型ハイパーキューブ、ハイパースターグラフにおいて、種々の素な経路問題を多項式時間で解くアルゴリズムを開発した。次に、この成果を利用して、焦げたパンケーキグラフ、デュアルキューブ、パンケーキグラフ、 $(n,k)$ -スターグラフ、ハイパースターグラフにおいて、制限された大域情報を用いた耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。最後に、ハイパーキューブとハイパースターグラフにおいて確率的耐故障経路選択アルゴリズムを開発し、これを耐リンク故障に拡張した。

研究成果の概要(英文)：First, to investigate the properties of Cayley graphs, this project developed the algorithms that solves various problems related to disjoint paths in a Mobius cube, a hypercube, a hierarchical hypercube, and a hyper-star graph. Next, the project developed the fault-tolerant routing algorithms based on restricted global information in a burnt pancake graph, a dual cube, a pancake graph, an  $(n,k)$ -star graph, a hyper-star graph. Finally, this project developed the stochastic fault-tolerant routing algorithms in a hypercube and a hyper-star graph, and it extended them to be link-fault-tolerant.

研究分野：情報工学

キーワード：高信頼システム、ディペンダブルコンピューティング、ハイパーキューブ、焦げたパンケーキグラフ、メビウスキューブ、デュアルキューブ、耐故障経路選択、アルゴリズム

### 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た。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。

### 2. 研究の目的

非常に多くのノード(プロセッサ)を結合する超並列計算機では、ノードをリンクで結合する相互結合網が性能を大きく左右し、故障ノードの存在を前提に経路選択手法を設計することが必須である。しかし、各非故障ノードが、全故障ノードの情報を保持する手法は、時間的、空間的に実用的でない。そこで、本研究では、ケイリーグラフに基づいて、超並列計算機の相互結合網用に提案された位相を対象とし、その規則性を利用して、非故障ノードが、故障ノードに関する制限された情報を保持することで、確率に基づく効率的な耐故障経路選択手法を開発する。さらに、ケイリーグラフに基づく全位相に適用可能な確率的経路選択手法を確立することを目的とする。

### 3. 研究の方法

ケイリーグラフの性質を調査するため、まず、ケイリーグラフに基づく種々のグラフについて、素な経路探索アルゴリズムや耐故障経路選択アルゴリズムを構築する。また、ケイリーグラフに共通な性質として、短いサイクルをもたないこと、あるグラフが同じ性質をもつ複数のグラフに分解可能であることなども確認する。これらの性質により、直前のノードへの迂回を禁止し、構造に関する指標に基づいた制限された大域情報を用いる

ことで、効率のよい確率的な耐故障経路選択アルゴリズム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確率的耐故障経路選択アルゴリズムを開発するための方法論を確立する。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し、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、学会論文誌を通して積極的に発信する。

### 4. 研究成果

- (1) メビウスキューブにおいて、ノード間の素な経路選択およびノードからノード集合への素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (2) 新しい位相として、トーラス結合をしたサイクルを提案し、この位相において、ノード間の素な経路選択、ノードからノード集合への素な経路選択、ノード集合間の素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (3) ハイパーキューブにおいて、ビット制約を持つノード間の素な経路選択、およびビット制約を持つ耐故障経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (4) メタキューブにおいて、ノードからノード集合への素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (5) 階層型キューブ網において、ノード集合間の素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (6) 完全階層型ハイパーキューブにおいて、 $k$ 対のノード間の素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。
- (7) デュアルキューブにおいて、高性能な耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。
- (8) パンケーキグラフにおいて、高性能な耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。
- (9) 焦げたパンケーキグラフにおいて、高性能な耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。
- (10)  $(n, k)$ -スターグラフにおいて、高性能な耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。
- (11) ハイパー-スターグラフにおいて、ノード集合間の素な経路選択を多項式時間で行うアルゴリズムを開発した。また、高性能な耐故障経路選択アルゴリズムを開発した。さらに、確率的な耐故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発し、これを耐リンク故障に拡張した。
- (12) ハイパーキューブにおいて、時間最適なノードからノード集合への素な経路選択を行うアルゴリズムを世界で初めて開発した。さらに、有向経路選択確率に基づく耐ノード故障経路選択アルゴリズムを世界で初めて開発し、これを耐リンク故障に拡張した。

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10件)

Kocik, David, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Node-to-Set Disjoint Paths Problem in a Mobius Cube," IEICE Transactions on Information and Systems, 査読有, Vol. E99-D, No. 3, pp. 708-713, Mar. 2016.  
doi: 10.1587/transinf.2015EDP7331

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Torus-Connected Cycles: A Simple and Scalable Topology for Interconnection Networks," 査読有, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol. 25, No. 4, pp. 723-735, Dec. 2015.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "A Routing Algorithm Solving the Container Problem in a Hypercube with Bit Constraint," International Journal of Networked and Distributed Computing, 査読有, Vol. 3, No. 4, pp. 202-213, Nov. 2015.

Bossard, Antoine, Keiichi Kaneko, and Shietung Peng: "Node-to-Set Disjoint Paths Routing in a Metacube," submitted to International Journal of High Performance Computing and Networking, 査読有, Vol. 8, No. 4, pp. 315-323, Nov. 2015.  
doi: 10.1504/IJHPCN.2015.072778

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Hypercube Fault Tolerant Routing with Bit Constraint," International Journal of Networking and Computing, 査読有, Vol. 5, No. 2, pp. 272-289, July 2015.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "A Node-to-Set Disjoint Paths Routing Algorithm in Torus-Connected Cycles," ISCA International Journal of Computers and their Applications, 査読有, Vol. 22, No. 1, pp. 22-30, Jan. 2015.

Dinh, Thuy Duong, and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing based on Approximate Directed Routable Probabilities for Hypercubes," Future Generation Computer Systems, 査読有, Vol. 37, pp. 88-96, July 2014.  
doi:10.1016/j.future.2013.12.003

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Time Optimal Node-to-Set Disjoint Paths Routing in Hypercubes," Journal of Information Science and Engineering, 査読有, Vol. 30, No. 4, pp. 1087-1093, July 2014.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Set-to-Set Disjoint Paths Routing in Hierarchical Cubic Networks," The Computer Journal, 査読有, Vol. 57, No. 2, pp. 332-337, Feb. 2014.  
doi:10.1093/comjnl/bxs17

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "k-pairwise Disjoint Paths Routing in Perfect Hierarchical Hypercubes," Journal of

Supercomputing, 査読有, Vol. 67, No. 2, pp. 485-495, Feb. 2014.  
doi:10.1007/s11227-013-1013-9

[学会発表](計20件)

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "A Set-to-Set Disjoint Paths Routing Algorithm in a Torus-Connected Cycles Network," Proceedings of the 31st International Conference on Computers and Their Applications, Las Vegas, Nevada, USA, Apr. 4-6, 2016.

Park, Junsuk, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing in Dual-cubes based on Routing Probabilities," Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Information Technology, pp. 66-75, Bangkok, Thailand, Nov. 22--25, 2015.

Kocik, David, Yuki Hirai and Keiichi Kaneko: "An Algorithm for Node-to-Node Disjoint Paths Problem in a Mobius Cube," Proceedings of the 2015 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, pp. 149--155, Las Vegas, Nevada, USA, July 27-30, 2015.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "On Solving the Container Problem in a Hypercube with Bit Constraint," Proceedings of the 16th IEEE/ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, pp. 77-92, Takamatsu, Kagawa, Japan, June 1-3, 2015.

Akimoto, Yosuke, Yuki Hirai and Keiichi Kaneko: "Software Watermarking based on Register Allocation by using Priority," Proceedings of the 2015 4th International Student Project Conference, Tokyo, Japan, May 23-24, 2015.

Kocik, David, Yuki Hirai and Keiichi Kaneko: "An Algorithm for Node-to-Set Disjoint Paths Problem in a Mobius Cube," Proceedings of the 2015 4th International Student Project Conference, Tokyo, Japan, May 23-24, 2015.

Wakayama, Keita, Yuki Hirai and Keiichi Kaneko: "A Fault-tolerant Routing Algorithm based on Safety Levels in a Burnt Pancake Graph," Proceedings of the 2015 4th International Student Project Conference, Tokyo, Japan, May 23-24, 2015.

Lam Boi Ngoc, Bui Thi Thuan, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Stochastic Link-Fault-Tolerant Routing in Hypercubes," Proceedings of the 2015 7th International Conference on Computer Research and Development, pp. 21-27, Ho Chi Minh City, Vietnam, Feb. 6-7, 2015.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "On Hypercube Routing and Fault Tolerance with Bit Constraint," Proceedings of the Second International Symposium on Computing and Networking, pp. 40-49, Shizuoka, Japan, Dec.

10-12, 2014.

Nishiyama, Yo, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Fault-Tolerant Routing based on Improved Safety Levels in Pancake Graphs," Proceedings of the 15th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, pp. 113-118, Hong Kong, China, Dec. 9-11, 2014.

Ito, Takara, Manabu Myojin, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Fault-tolerant Routing in ( $n$ ,  $k$ )-Star Graphs," Proceedings of the 15th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, pp. 76-81, Hong Kong, China, Dec. 9-11, 2014.

Bui, Thi Thuan, Yuki Hirai, Huynh Thi Thanh Binh, and Keiichi Kaneko: "Stochastic Link-fault-tolerant Routing in a Hyper-star Graph," Proceedings of the IADIS International Conference on Applied Computing 2014, pp. 45-52, Porto, Portugal, Oct. 25-27, 2014.

Kaneko, Keiichi: "A Fault-tolerant Routing Algorithm based on Safety Levels in a Pancake Graph," Proceedings of the Twenty-Seventh International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering, pp. 141-146, New Orleans, Louisiana, USA, Oct. 13-15, 2014.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Node-to-Set Disjoint Paths Routing in a Torus-Connected Cycles Network," Proceedings of the 27th ISCA International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering, pp. 135-140, New Orleans, Louisiana, USA, Oct. 13-15, 2014.

Sasaki, Yuko, Yuki Hirai, Hironori Nakajo, and Keiichi Kaneko: "A Fault-tolerant Routing Algorithm based on Safety Levels in a Hyper-Star Graph," Proceedings of the 2014 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Vol. 2, pp. 77-83, Las Vegas, Nevada, USA, July 21-24, 2014.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "The Container Problem in a Torus-connected Cycles Network," Proceedings of the International Conference on Computational Science, pp. 2182-2191, Cairns, Australia, June 10-12, 2014.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Torus-connected Cycles: An Implementation-friendly Topology for Interconnection Networks of Massively Parallel Systems," Proceedings of the 13th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing, pp. 11-21, Vietri sul Mare, Italy, Dec. 18-21, 2013.

Sekino, Takumi, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "Software Watermarking based on Register Allocation with Rotation," Proceedings of the IADIS International Conference on Applied Computing 2013, pp. 99-106, Fort Worth,

Texas, USA, Oct. 23-25, 2013.

Bossard, Antoine, and Keiichi Kaneko: "Set-to-set Disjoint Paths Routing in Hyper-star Graphs," Proceedings of ISCA 3rd International Conference on Advanced Computing and Communications, pp. 47-52, Los Angeles, California, USA, Sept. 25--27, 2013.

Nishiyama, Yo, Yuki Hirai, and Keiichi Kaneko: "A Stochastic Fault-tolerant Routing Algorithm in Hyper-Star Graphs," Proceedings of the 2013 International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Vol. 2, pp. 382-388, Las Vegas, Nevada, USA, July 22-25, 2013.

## 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

なし