

Hybrid Memory Cube を用いたランダムメモリネットワークにおけるエネルギー評価

藤木 大地[†] 松谷 宏紀[†] 鯉渕 道紘[‡] 天野 英晴[†]

慶應義塾大学[†] 国立情報学研究所[‡]

1. はじめに

メモリ I/O および DRAM におけるバンド幅制限はシステム全体の性能を律速する問題として重要であり、メモリ容量および消費エネルギーの問題とともに現在のコンピュータシステムの大きなボトルネックとなっている。そこで、近年提案されている3次元積層メモリは、高バンド幅かつ高エネルギー効率のメモリ性能を持つ次世代のメモリデバイスとして注目を集めている。

Hybrid Memory Cube (HMC) [1]は、最下層の論理ダイにルーティング機能を搭載する3次元積層メモリデバイスである。近年、HMC をルータと見なし、メモリ同士の相互結合ネットワークを構成するという新しいパラダイムが提案されている [2], [3]。メモリネットワークは、高バンド幅のチャンネルリンクを使用することでメモリアクセスのボトルネックを打開できると考えられているが、一方で1ホップあたりのレイテンシおよびコストが高くなる。そのため、メモリネットワークの大規模化を模索するに当たり、現在考えられている規則トポロジではスケラビリティに限界がある。

そこで、我々はスモールワールド性に基づいたランダムトポロジをメモリネットワークに導入することで、スケラブルで低遅延な大規模メモリネットワークの構成方法を提案している [4]。この提案では、リンク使用率の増大によるエネルギー増加が懸念されるが、本報告では経常的なリンク電源の遮断を行うことで性能に影響を及ぼすことなく余分なエネルギーを削減でき、ランダムメモリネットワークがエネルギー効率の面でも優れたトポロジであることを示す。

2. メモリネットワークとトポロジランダム化

HMC [1] は TSV を使用した3次元積層メモリである。プロセッサとの接続にはハイスピードリンクを使用し、パケット化された高レベルメッセージを HMC 側のメモリコントローラが処理することを利用して通信を行う。メモリコントローラを内蔵した HMC の論理ダイはスイッチに

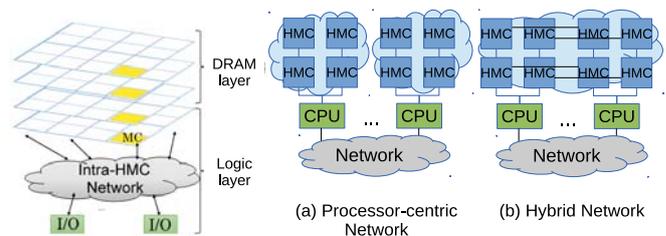


図 1 HMC のブロック図及びシステムデザイン

よるルーティング機構を擁することから、図 1 (b) のようにメモリ同士を相互結合することが可能となり、バンド幅割当ての柔軟化やスループットの増大等を目的としたメモリネットワークが提案されている [2]。

しかし、メモリネットワークでは SerDes 等のホップ経由コストの面からスケラビリティへの問題が考えられる。そこで、我々はトポロジ面からのアプローチとしてランダムネットワークの利用を提案している [4]。ランダムトポロジは少ない次元数に対しても理想的なムーアグラフに匹敵するほどネットワーク直径及び平均最短経路長を低減することが知られており、HPC やデータセンタでの応用が研究されている [5]。我々の先行研究 [4], [6] では、トラフィックパターンとノード間関係に着目したランダムトポロジ設計方法とデッドロックフリー最短経路ルーティングの構成法、および効率的なパケット分配のためのページサイズ粒度メモリマッピングを提案し、規則トポロジである Mesh 及び Dragonfly, ロングレンジリンクを多く含む De Bruijn に対してもランダムトポロジが優位性を持ち、メモリアクセスの局所最適化を行わないグローバルなトラフィックパターンを想定しても、性能及びスケラビリティの面で有効であることをネットワークシミュレーション及びフルシステムシミュレーションの結果から示した。

3. エネルギー評価

先行研究 [2] により、メモリネットワークにおけるネットワークエネルギーモデルが定義され

Energy Evaluation on Random Memory Networks

[†] Daichi Fujiki, Hiroki Matsutani, Hideharu Amano (Keio U)

[‡] Michihiro Koibuchi (NII)

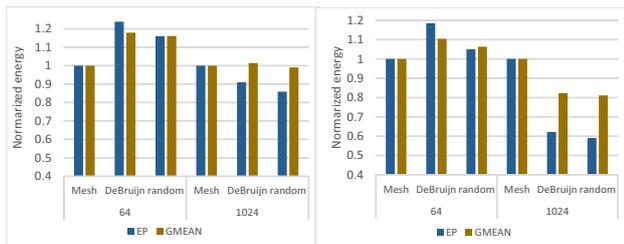


図 2 power-gating による消費エネルギーの変化 (左:無効, 右:有効)

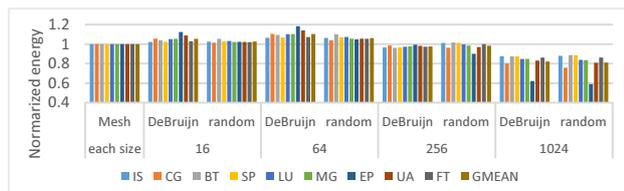


図 4 アプリケーション別のエネルギー消費

ている。ハイスピードリンクは通信が発生しない場合でも idle パケットの送受信を要するため (通常パケット 2.0pJ/bit に対し 1.5pJ/bit), チャネル使用率の高い De Bruijn やランダムトポロジではエネルギーオーバーヘッドの発生が考えられる。しかし、メモリネットワークにおいてランダムトポロジは [4] より決定型ルーティングを使用可能なため、不使用リンクは [2] のとおり経常的に遮断することができる。我々は、ルーティングテーブルを基に不使用リンクを探索し、パワーゲーティングの有効/無効を切り替えたときのワークロード(NPB3.3)に対する消費エネルギーを比較した (図 2)。

ネットワーク規模が小さいときは idle リンクによるエネルギー消費が random 及び De Bruijn のエネルギー性能を悪化させる要因になっているが、パワーゲーティングの導入 (図 2 右) により Mesh と同等となっていることが分かる。興味深いことに、ネットワーク規模が大きいときはさらに顕著であり、重要な有効リンクが効果的に選択されていることが示されている。図 3 は全リンク数に対する有効リンクの割合であり、random は小規模ネットワークでは割合が Mesh とほぼ同等であるが、ネットワーク規模が拡大しても Mesh ほどに割合が大きくなっていない。しかし、[4] で示されているとおり性能向上が見られる点から前記のことが裏付けられる。図 4 はアプリケーション別の正規化されたエネルギー消費量である。random が Mesh より優位である要因として、1)有効リンク割合が小さい、2)性能向上によるサイクル数の減少 [4] の 2 点が考えられる。De Bruijn と random の差の要因もほぼ同様だが、小規模ネットワークでは前者が、大規模ネットワークでは後者が比較的主要である。

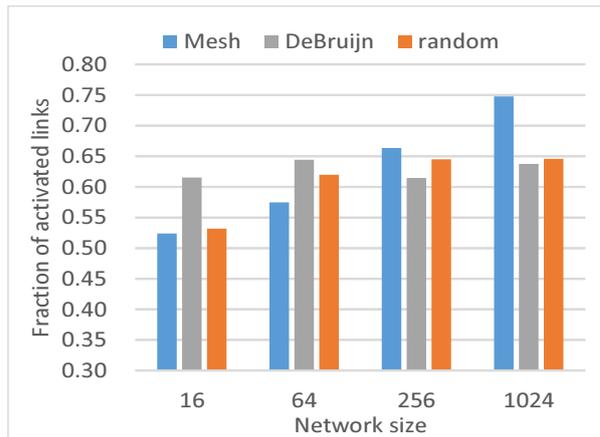


図 3 有効リンクの割合

結果的に、1024 ノード random ネットワークでは、消費エネルギーが最大 40.9% (EP), 平均 18.9% (GMEAN) 減少した。

4. 結論

ランダムメモリネットワークをシンプルなパワーゲーティング手法と用いることにより、性能面のアドバンテージを削ぐことなく、エネルギー効率面でも規則トポロジと比較し優位性をもつことを示した。

文献

- [1] J. Pawlowski, "Hybrid memory cube (HMC)," *Hotchips*, pp. 1–24, 2011.
- [2] G. Kim, J. Kim, J. H. Ahn, and J. Kim, "Memory-centric system interconnect design with Hybrid Memory Cubes," in *Parallel Architectures and Compilation Techniques (PACT), 2013 22nd International Conference on*, 2013, pp. 145–155.
- [3] G. Kim, M. Lee, J. Jeong, and J. Kim, "Multi-GPU System Design with Memory Networks," in *Microarchitecture (MICRO), 2014 47th Annual IEEE/ACM International Symposium on*, 2014, pp. 484–495.
- [4] 藤木大地, 松谷宏紀, 鯉淵道紘, and 天野英晴, "Hybrid Memory Cube を用いたランダムメモリネットワーク," *IEICE Tech. Rep.*, vol. 115, no. 174, pp. 65–70, 2015.
- [5] M. Koibuchi, H. Matsutani, H. Amano, D. F. Hsu, and H. Casanova, "A case for random shortcut topologies for HPC interconnects," in *2012 39th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, 2012, pp. 177–188.
- [6] D. Fujiki, H. Matsutani, M. Koibuchi, and H. Amano, "Randomizing Packet Memory Networks for Low-latency Processor-memory Communication," *Parallel, Distrib. Network-Based Process. (PDP), 2016 24th Euromicro Int. Conf.*, 2016.