

誘導結合通信リンクを用いた3次元直線状ネットワークの予備評価

野村明生† 松谷宏紀† 天野英晴†
† 慶應義塾大学大学院理工学研究科

1 はじめに

近年注目されている3次元積層は小サイズで高密度実装が可能のため、小型モバイル機器に適していると言える。3次元積層チップを構成するためには各積層チップ間で通信を行う必要があり、これには大きく分けて有線方式と無線方式の2種類が挙げられる。有線方式の中ではThrough Silicon Via (TSV)[1]が代表的であるが、TSVは特殊な製造プロセスが必要となるために製造コストが大きくなる。それに対しインダクタの誘導結合を用いたThruChip Interface (TCI)[2]によるワイヤレス通信では、チップ製造後に低コストで比較的容易にチップを積層することが可能である。

本論文では、TCIをチップ間通信に用いて開発したビルディングブロック型計算システムCUBE-SOTBで利用する、3次元直線状ネットワークの予備評価について述べる。

2 ThruChip Interface

TCIは、積層されるチップ上に置かれたコイル間で生じる誘導結合によって、チップ間でワイヤレスにパケット転送を行う。送信用TCIと受信用TCIを各チップに搭載し、あるチップの送信用TCIが他のチップの受信用TCIに重なるようにチップを積層することで、ワイヤレス通信インタフェースが形成される。

TCIの特徴として、通常のCMOSを利用できるため低コストで製造可能なこと、TSVと同様にチップの上下方向に通信を行うことが可能なことなどが挙げられる。また、 0.14pJ/bit 、 $\text{BER} < 10^{-12}$ という低エネルギー消費・低ビットエラー率で最大8Gbpsの通信性能を達成した例もあり[3]、性能も十分である。

3 Cube-1

Cube-1は、TCIを用いたビルディングブロック型計算システムの最初のプロトタイプであり、ネットワークは図1に示す単方向のリング構成となっている。リングネットワークにおいて、チップの個数や内部ネットワークの形状、仮想チャンネルの数に影響されずにデッドロックフリーのネットワークを構成するためにバブルフロー制御[4]を採用し、パケット間に隙間を確保することでデッドロックを防いでいる。

この方法の欠点として、パケットの到着順序の逆転が生じる可能性があること、仮想チャンネルを持たないことにより転送パケットの種類に応じた仮想チャンネルの割り振りができないこと、1つ隣のチップにデータを送るために長距離に渡ってパケットを転送する必要があることなどが挙げられる。

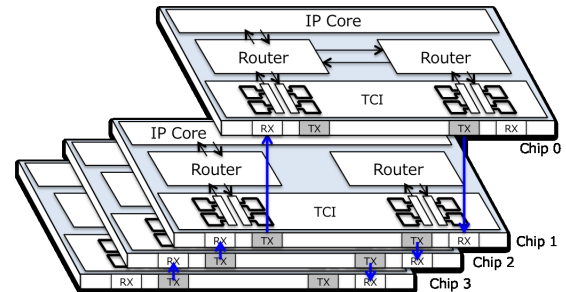


図1: Cube-1のリングネットワーク

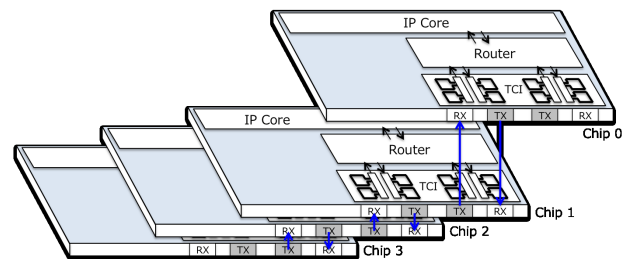


図2: 3次元直線状ネットワーク

4 TCIを用いた3次元直線状ネットワーク

CUBE-SOTBでは、図2に示す直線状ネットワークを利用することにした。各チップは送信用・受信用TCIのペアを2つずつ持ち、1組は上方向、もう1組は下方向のチップとデータの送受信を行う。そのため、隣接するチップ間でTCIの双方向リンクが形成される。これらの送受信用TCIとチップ上のコアを、3入出力のルータを用いて接続している。

TCIを用いる場合、1リンク当たりのチップ占有面積が大きくなるため、TCIリンクの複数搭載を極力避け、1つのTCIリンクで必要な信号のやりとりを行うべきである。直線状ネットワークでは、クレジットベースフロー制御のためのACK信号ピギーバック制御で逆方向リンクを使用して転送する方式を採用している。本ネットワークのルータはパケットのメッセージタイプに応じてVC番号を振り分けるための8つの仮想チャンネルを持ち、1つの仮想チャンネルバッファの容量は24フリットである。ここで、1フリットに入るデータ量は32ビットであるため、1つのフリット内に8つ全ての仮想チャンネルのステータスを格納することはできない。ゆえに、VC番号0~3およびVC番号4~7のバッファの情報を格納する2種類のACK伝達フリットを定義し、パケットのフォーマットは図3とした。なお、データ有効ビットおよび使用する仮想チャンネル番号については、パケット内に格納している。

このようにACK信号をピギーバック方式で転送する場合、リンクを通常のパケットと共有するため、ACK信号がネットワーク性能のオーバーヘッドとなる可能性がある。この問題を検証するため、5章で直線状ネットワークの性能評価について述べる。

A Preliminary Evaluation of 3-D Linear Network Using Inductive Coupling Links

†Akio Nomura †Hiroki Matsutani †Hideharu Amano

†Graduate School of Science and Technology, Keio University

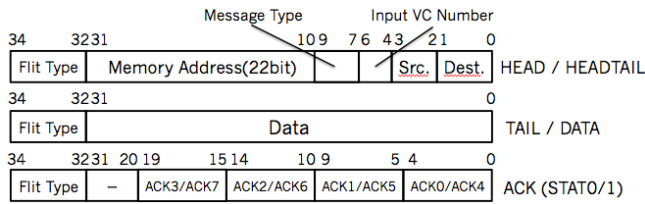


図 3: パケットフォーマット

5 評価

本章では、チップを4枚積層した場合の直線状ネットワークの性能評価について述べる。

比較対象として、逆方向リンクによるビギーバック制御をせずに専用の信号線でACK信号を伝達する同じ構成のネットワークを用意し、両者のネットワークの性能比較を行った。Cadance NC-Verilogを用い、ソースノードから240パケットを送信してそれぞれ指定したデスティネーションノードで受信させるRTLシミュレーションを実行し、パケット転送にかかる平均遅延を集計した。Hotspotトラフィックでは、最上層チップのノードがHotspotとなり、他のノードと比較して4.5倍のパケットが転送されるようになっている。本評価におけるその他のパラメータについては表1に示す。

表 1: 評価パラメータ

スイッチング	Virtual Cut Through
仮想チャネル数	8
仮想チャネルバッファサイズ	24 flit
フリットサイズ	35bit
Single write/read パケットサイズ	2
最大パケットサイズ	17
スイッチングレイテンシ	3 cycle

5.1 評価結果

結果より、パケット転送の負荷が軽い場合においては、いずれのトラフィックにおいてもほとんど性能に差がないことがわかる。Zero-load レイテンシの増加は最大でも Bit reverse の約 3.2%にとどめられており、低負荷時においては、ビギーバック方式でのACKフリットの逆方向リンク使用による性能のオーバーヘッドはごく僅かなものであると言える。

また、Hotspotトラフィックでは転送負荷が高くなるとビギーバック方式の転送遅延がより大きくなっているが、Uniform、Transposeトラフィックでは、高負荷時でも低負荷時と同様に性能には差があまり見られないことがわかる。

6 おわりに

本論文では、直線状ネットワークの性能評価を行い、ACKフリットのビギーバック転送がネットワークの通信性能に与える影響についての検討を行った。

評価結果として、パケット転送の負荷が小さい場合においては、ACK信号のリンク中への埋め込みによる性能への影響はごくわずかなものであり、Zero-load レイテンシの増加は最大約 3.2%にとどまる結果となった。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費 (S) ビルディングブロック型計算システムに関する研究の助成を受けたもので

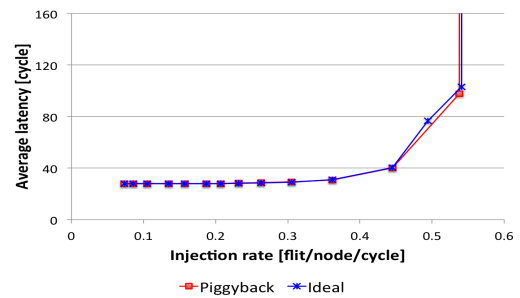


図 4: 平均遅延比較 (Uniform traffic)

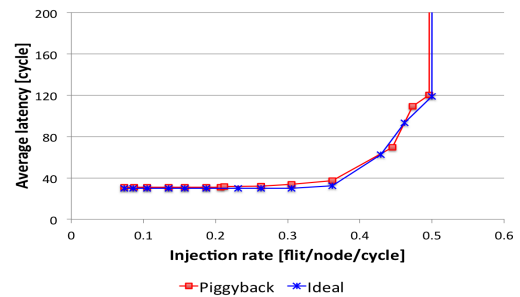


図 5: 平均遅延比較 (Bit reverse traffic)

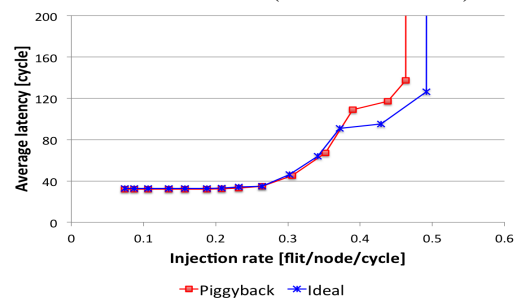


図 6: 平均遅延比較 (Hotspot traffic)

ある。

参考文献

- [1] J. Burns, L. McIlrath, C. Keast, C. Lewis, A. Loomis, K. Warner, and P. Wyatt. Three-Dimensional Integrated Circuits for Low-Power High-Bandwidth Systems on a Chip. In *Proceedings of the International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'01)*, pp. 268–269, February 2001.
- [2] T. Kuroda. ThruChip Interface (TCI) for 3D Networks on Chip. In *IEEE/IFIP 19th International VLSI and System-on-Chip Conference (VLSI-SoC)*, pp. 238–241, Oct 2011.
- [3] Noriyuki Miura, Hiroki Ishikuro, Takayasu Sakurai, and Tadahiro Kuroda. A 0.14pJ/b Inductive-Coupling Inter-Chip Data Transceiver with Digitally-Controlled Precise Pulse Shaping. In *Proceedings of the International Solid-State Circuits Conference (ISSCC'07)*, pp. 358–359, February 2007.
- [4] H. Matsutani, Y. Take, D. Sasaki, M. Kimura, Y. Ono, Y. Nishiyama, M. Koibuchi, T. Kuroda and H. Amano. A Vertical Bubble Flow Network using Inductive-Coupling for 3-D CMPs. In *Networks on Chip (NoCS)*, pp. 49–56, May 2011.