

C-007

多値1色符号に基づく非同期通信方式とそのネットワークオンチップへの応用
Asynchronous Communication Scheme based on Multiple-valued 1-color Encoding
and Its Application toward Network-on-Chip

松本 敦, 鬼沢 直哉, 羽生 貴弘†

Atsushi Matsumoto, Naoya Onizawa and Takahiro Hanyu

1. はじめに

ルータと転送回路からなる簡易ネットワークでコア間転送を実現するネットワークオンチップ(NoC)方式が提案され、広く研究が進められている[1-3]。その中でもコア間通信に非同期式通信方式を用いた、GALS (Global-Asynchronous Locally-Synchronous)-NoC方式が提案されており、既にいくつかの研究グループにおいてチップの実装が行なわれている。

非同期通信方式は、要求信号と応答信号からなる局所的なハンドシェイクプロトコルにより動作協調を実現する手法であり、特にQDI(Quasi-Delay Insensitive)仮定に基づく符号化方式を用いることにより、遅延変動に対する大幅な信頼性を得ることができる。我々が提案してきた2色2線符号を用いた多値電流モード双方向非同期転送方式[6,7]も、この符号化方式に基づく手法である。

符号化方式を大別すると、1色符号を用いる方式[4]と2色符号を用いる方式[5]に分けることができる。一般には有効データを示す符号語群とそれらを分割するためのスペーサ信号を交互に送信する1色符号に基づく方式と比較して、2種類のデータ符号語群を交互に使用する2色符号に基づく方式がデータ転送速度の面において勝る。

一方で、演算回路の実現においてはその2色符号に基づく設計の難しさから、1色符号で実装されているものが多い。そのため、我々が提案してきた2色符号を用いた転送回路と1色符号を用いた演算回路を組み合わせる場合、ルータ、転送回路間でプロトコルの変換[8]を行なう必要があり、これはネットワークオンチップ全体の性能を劣化させる原因となり得る。

本稿では、1色符号に基づく多値電流モード双方向非同期転送方式の提案を行う。これにより、通信オーバーヘッドの少ない転送が実現可能となる。また、提案手法の拡張として、転送情報を多ビット化することによって配線効率、及び転送速度を高めた手法についても提案する。以降では提案する多値電流モード双方向非同期転送回路の符号語の定義を行い、また、従来の非同期転送手法との比較したときの提案手法の有用性について議論する。

2. 提案する1色2線符号

2.1 双方向非同期転送モデル

提案する双方向非同期式転送方式で想定する転送モデルを図1に示す。この転送モデルでは、全ての符号語は2線で表現されるものとし、その値は配線上で重畳、すなわち加算可能とする。図1では、モジュールPからは要求信号 $A(x_p, x_p')$ が、モジュールSからは要求信号 $B(x_s, x_s')$ が並列に送信されるため、その両信号が配線上で重畳され $C(x, x') = A+B$ となり、この合計値 $(x+x')$ を双方のモジュール

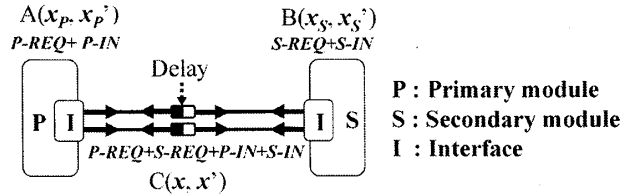


図1: 双方向転送モデル

表1: 1ビット転送用1色2線符号

	Primary		Transmission lines			Secondary		
	P-REQ	P-IN	$A(x_p, x_p')$	$C(x, x')$	$x+x'$	$B(x_s, x_s')$	S-IN	S-REQ
Data	"0"		(0,1)	(0,2)	2	(0,1)		"0"
	"0"		(0,1)	(1,1)		(1,0)		"1"
	"1"		(1,0)	(1,1)		(0,1)		"0"
	"1"		(1,0)	(2,0)		(1,0)		"1"
Spacer	-		(0,0)	(0,0)	0	(0,0)	-	-

表2: 2ビット転送用1色2線符号

	Primary		Transmission lines			Secondary		
	P-REQ	P-IN	$A(x_p, x_p')$	$C(x, x')$	$x+x'$	$B(x_s, x_s')$	S-IN	S-REQ
Data	"0"		(0,3)	(0,6)	6	(0,3)		"0"
	"0"		(0,3)	(1,5)		(1,2)		"1"
	"0"		(0,3)	(2,4)		(2,1)		"2"
	"0"		(0,3)	(3,3)		(3,0)		"3"
	"1"		(1,2)	(1,5)		(0,3)		"0"
	"1"		(1,2)	(2,4)		(1,2)		"1"
	"1"		(1,2)	(3,3)		(2,1)		"2"
	"1"		(1,2)	(4,2)		(3,0)		"3"
	"2"		(2,1)	(2,4)		(0,3)		"0"
	"2"		(2,1)	(3,3)		(1,2)		"1"
	"2"		(2,1)	(4,2)		(2,1)		"2"
	"2"		(2,1)	(5,1)		(3,0)		"3"
	"3"		(3,0)	(3,3)		(0,3)		"0"
	"3"		(3,0)	(4,2)		(1,2)		"1"
	"3"		(3,0)	(5,1)		(2,1)		"2"
	"3"		(3,0)	(6,0)		(3,0)		"3"
Spacer	-		(0,0)	(0,0)	0	(0,0)	-	-

ルにおいて、しきい値演算を用いて双方から送信されたデータの符号語の色の一致を検出することで、モジュール間の双方向データ転送を実現している。

2.2 提案する符号語構成

1ビット転送用多値1色2線符号の符号語構成を表1に示す。本手法においての符号語は2本のデータ線に対して論理値"0"を符号語 $(x, x') = (0, 1)$ 、論理値"1"を符号語 $(x, x') = (1, 0)$ で表現する。この符号語を両モジュールで互いに送りあうことで双方の合計値は必ず「2」となる。これを検出し、自分自身が送信した符号語を差し引いた値が、他方のモジュールが送信した符号語として認識される。

† 東北大学電気通信研究所, RIEC, Tohoku University.

両方のモジュールにおいて符号語が検出された後に、双方から並列にスペーサ信号 $(x,x')=(0,0)$ が送信される。双方からスペーサ信号が送信されると、符号語の合計は「0」になる。この状態を双方のモジュールが検出することにより、転送サイクルが終了し、次の転送動作に移行する。

さらに、提案手法は多値符号に基づく方式であるため、転送時の論理値数を増加させることにより、配線数を増やすことなく多ビット通信を実現することができる。表2に2ビット、すなわち一度に論理値“0”から“3”までを転送することが可能な符号語の構成を示す。この手法では $(x,x')=(0,3), (1,2), (2,1), (3,0)$ で論理値“0”から“3”を表現している。そのため、符号語の合計値“6”と“0”を検出することにより、それぞれデータとスペーサが双方のモジュールから送信されていることが検出可能である。

3. 評価

本節では提案する1色符号に基づく転送回路と、従来手法に基づく転送回路の、配線数、信頼性、転送遅延と消費電力について議論する。

比較対象として、1色符号、2色符号それぞれを用いた電圧モードによる転送回路、および従来我々が提案してきた2色符号に基づく電流モード転送回路をとる。評価環境は、図2に示すルータ間転送回路として、各手法にて12ビット双方向転送回路を実現したときの配線数、ばらつき耐性、スループットおよび消費電力について行った。ただし、演算回路であるルータについては1色符号による実装を想定しているため、電圧モード、電流モードそれぞれにおいて、2色符号転送回路を用いる際には、転送回路とルータ間に1色符号と2色符号を変換するコンバータを挿入するものとする。なお、各回路は0.13 μm CMOSテクノロジーを用いた設計時の評価であり、ルータ間の配線長は1mmを想定している。

表3にHSPICEシミュレーションにて得られた評価結果を示す。

配線数においては電流モードによる転送回路が、電圧モードによる転送回路と比較して半分以下となる。これは、図1に示すように、電流モード転送では配線上での信号重畳が可能のため、同一配線を用いた双方向転送が実現可能である点と、双方向で同時に符号語の検出が可能であるため、電圧モードにてデータ線とは別に用意する必要のある応答信号用の配線が不要であることが理由である。

信頼性については、配線上で完全な振幅を行う電圧モードの方が、多値信号を送る電流モードと比較して高いが、提案する1色符号に基づく1ビット転送回路は、必要とする多値レベルが3レベル程度であるため、ある程度の信頼性を維持することが可能である。

配線当たりのスループットについては、電流モードによる実現が電圧モードによる実現を大幅に上回る。転送単体でのスループットは2色符号に基づく電流モード実現がもっとも高性能であるが、今回の評価ではルータとの間に符号語変換回路が必要となるために、提案する電流モード1色1ビット符号実現と同等、2ビット符号実現より低い性能にとどまっている。また、ビット当たりの消費電力についても、2色符号を用いた際の符号語変換部分のオーバーヘッドが大きいため、提案する2つの転送回路、特に電流モード1色1ビット符号実現がもっとも低い電力となっている。



図2: 評価環境

表2: 評価結果

	電圧1色	電圧2色	電流2色	電流1色 1bit(提案)	電流1色 2bit(提案)
配線数(双方向 12ビット転送)	50	50	24	24	12
信頼性	High	High	Low	High	Low
スループット (Gbps/wire)	0.17	0.15	0.35	0.35	0.45
消費電力 (uW/bits)	773	1571	1959	347	973

4. まとめ

本稿では、1色符号で実装された非同期演算回路との通信親和性を考慮した1色符号に基づく双方向転送方式とその電流モード実現について述べた。評価結果より、本手法が小配線数でありながら、高速、低消費電力な通信回路を実現することが実証された。

今後の課題としては、各種トポロジに基づくネットワークオンチップに、提案転送回路を組み込んだときの評価を行うことがあげられる。ただし、ある程度の規模の回路評価はHSPICEなどのトランジスタレベルシミュレータで行うには時間的なコストが大きいため、提案回路を上位レベルで評価するための適切なモデル化が必要と考える。

謝辞

本研究は、科学技術振興事業団「JST」の戦略的基礎研究推進事業「CREST」における研究領域「ディペンダブルVLSIシステムの基盤技術」の研究課題「ディペンダブルネットワークオンチッププラットフォームの構築」の支援により行われたものであり、また、東京大学大規模集積システム設計教育研究センターを通しシノプシス株式会社の協力で行われたものである。

参考文献

- [1] L. Benini et al., "networks on chips: A new SoC paradigm," IEEE Trans. Comput., vol. 35, no. 1, pp. 70-78, January 2002.
- [2] D. Lattard et al., "Reconfigurable Baseband Platform Based on an Asynchronous Network-on-Chip," IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 43, No. 1, pp. 223-235, January 2008.
- [3] Vangal, S. et al., "An 80-Tile 1.28TFLOPS Network-on-Chip in 65nm CMOS," IEEE Int. Solid-State Circuits Conf. (ISSCC) Dig. Tech. Papers, pp.98-99, February 2007.
- [4] J. Sparso, et al., "Principles of Asynchronous Circuit Design," Kluwer Academic Publisher, pp. 9-28, 2001
- [5] M. Dean, et al., "Efficient Self-Timed Level-Encoded 2-Phase Dual-Rail (LEDR)," Adv. Res. in VLSI, pp. 55-70, 1991.
- [6] T. Hanyu, et al., "Bidirectional data transfer based asynchronous VLSI system using multiple-valued current-mode logic," Proc. 33rd IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic, pp.99-104, May 2003.
- [7] T. Takahashi, "Asynchronous duplex communication based on wire-shared current-mode signal multiplexing," Supplemental Volume of the 2004 IEEE International Conference on Dependable Systems and Networks, pp.190-192, June 2004.
- [8] A. Mirata, et al., "Efficient Asynchronous Protocol Converters for Two-Phase Delay-Insensitive Global Communication," Proc. 13th IEEE International Symposium on Asynchronous Circuit and Systems, pp.186-195, March 2007.