

C-017 自己同期型パイプラインシステムのマクロフローモデルの提案 A Proposal of Macro-Flow Model for Self-Timed Pipeline Systems

三宮 秀次[†]
Shuji Sannomiya

大森 洋一[†]
Yoichi Omori

岩田 誠[†]
Makoto Iwata

1. はじめに

集積度の向上とクロックの高速化に伴い、チップ全体で同期をとることが難しくなると予想されている。

ステージ間の局所同期により動作する自己同期型パイプライン (Self-Timed Pipeline, 以下 STP) は、本質的に、低消費電力、回路の遅延耐性といった特長を備えており、高機能な System-on-Chip 実現への応用が期待されている。しかし、STP は自律的な挙動を示し、その全てを模擬する手法では事前の性能評価が困難である。

本研究では、パケット充足率とパケットの間隔の関係に注目し、仮想的なパケット平均速度を導入することで、設計段階における STP システムの性能評価を行なうマクロフローモデルを提案し、実チップと比較する。

2. STP 向け性能評価モデルの要件

2.1 STP の理論的なモデル

図 1 に STP の理論的な構成を示す。STP 中のパケットは、各データラッチを管理する連続した C 素子間のハンドシェイクにより、ステージ間を転送される。パケットが存在するステージの C 素子は、先行の C 素子に転送を要求する send 信号を出す。先行のステージが空であれば、転送を許可する ack 信号を受けとり、パケットはそのステージを通過する。先行するステージが空でない場合、パケットはラッチされ ack 信号を待つ。

ここで send 信号の遅延および ack 信号の遅延を、それぞれ T_f および T_r とし、パケット間の間隔を P_{dist} とすると、パケットは、 $P_{dist} \geq T_f + T_r$ となる場合、 T_f のみで転送される。逆に、 $P_{dist} < T_f + T_r$ まで詰められると、ack 信号を待ち停滞する。これを衝突と呼ぶ。

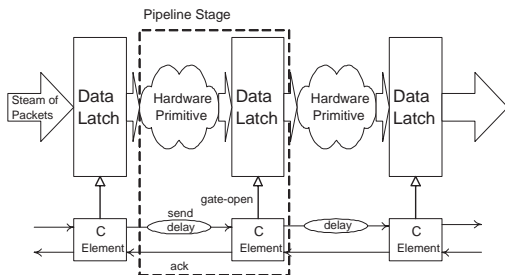


図 1: STP の基本構成

2.2 STP の性能評価

STP システムでは、コンテキストスイッチのオーバーヘッドがないため、複数のパイプラインのソフトウェアによる接続が容易である。このような不定長のパイプ

ラインを実現するために、パイプラインを重畳したリング型 STP 構成が一般的に用いられる。本研究ではメディアプロセッサ DDMP[1] を評価に使用する。DDMP は図 2 のように、リング型 STP による複数のプロセッサエレメントが多段バケットルータを介して接続されたチップマルチプロセッサ構成になっている。各 STP はいくつかの異なる命令セットを備えており、各パケットは、対象となる処理に応じて任意の STP に転送され、全ての処理が終わったパケットは出力される。

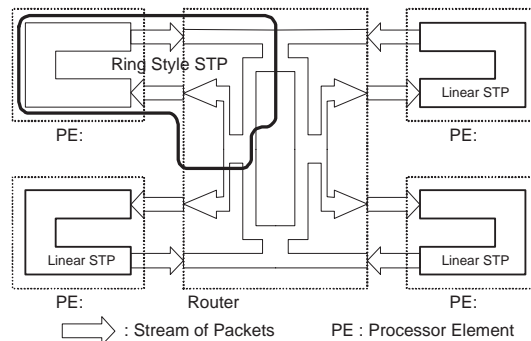


図 2: DDMP のリング状 STP システム

STP システムでは先行するステージの状態により、命令の実行タイミングが変化する。既に提案されている確率的なモデル [3] およびマルコフ連鎖を用いたモデル [4] 等では、実アプリケーションにおける動的な負荷の偏りを考慮した見積りができず、実システムの設計への適用は困難である。そのため、事前の性能評価を高速かつ簡単に行える、ステージ毎の状態の管理を省略するマクロフローモデルを新しく提案する。

3. マクロフローモデル

STP において、パケットの停滞は、連続した C 素子に伝播しシステム性能全体に影響する。逆に、短期間の停滞は STP の緩衝機能により自然に解消される。本研究では、パケットの平均速度 V_p [ステージ/サイクル] を仮定し、パケット充足率と仮想的なパケットの間隔により、パケットの停滞の影響を分類した。

3.1 Phase 1

全ステージの T_f の総和、全ステージの T_r の総和、最長ステージ長、およびパイプライン段数を、それぞれ、 $\sum T_f$, $\sum T_r$, $\max(T_f + T_r)$, pl とする。

パケット充足率が十分に低い場合、最長ステージを通過したパケットの間隔は、 $\max(T_f + T_r)$ 以上を保ち続ける。全てのパケットが $\max(T_f + T_r)$ 以上の間隔で配されている場合、各ステージの通過時間において、 T_r は

[†]高知工科大学, Kochi University of Technology

隠蔽され、1つのパケットが1周する時間は、 $\sum T_f$ となる。このことから、 V_p を最大に保つためには、パケット数を P_{total} とした場合、 P_{total} は、

$$\sum T_f \geq \max(T_f + T_r) \times P_{total} \quad (1)$$

を満たす必要がある。

Phase 1 では、 V_p は $\sum T_f$ に依存し、

$$V_p = \frac{pl}{\sum T_f} = (\text{一定}) \quad (2)$$

となる。

3.2 Phase 2

P_{total} の増加により式 1 が満たされなくなった場合、最長ステージへ到達したパケットは衝突し、影響は先行する連続したステージに波及する。最長ステージを通過したパケット群の間隔は $\max(T_f + T_r)$ を維持するため、パケット群は緩衝能力を保有しており、衝突の影響するステージ数は、衝突パケット数に比例する (図 3)。

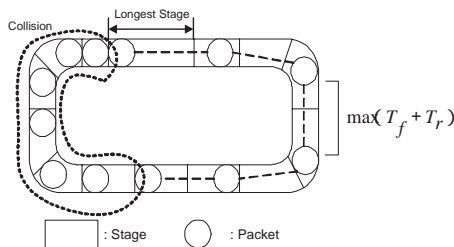


図 3: 模式図 (Phase 2)

即ち、パイプライン中のバブルの総数 B_{total} に対し、

$$\sum T_r < \max(T_f + T_r) \times B_{total} \quad (3)$$

の間は、式 1 を超過したパケット数 P_{over} に比例して堆積し、遅延時間は、堆積するステージ数に比例する [5]。従って、 V_p は、

$$V_p = V_c \times C_p \times P_{over} \quad (4)$$

と求められる。 V_c は、Phase 1 における V_p である。ここで、 C_p は、最長ステージ長に依存する定数である。

3.3 Phase 3

パケット数の増加により、式 1 および 3 とともに満足できなくなった場合は、衝突の堆積が 1 周してしまい、最長ステージでの衝突の待ち時間が増加する。

この状態では、パケットの衝突は全ての後続パケットに伝播し、衝突回数はパケット数に比例し、衝突でこの待ち時間は衝突回数に比例するため [2]、式 3 を超過するパケット数を P_{over2} とおくと、パケット速度は、 P_{over2} に関する 2 次式で近似される。

4. 評価

4.1 実験条件

pl 、Phase 1 の P_{total} 、Phase 2 の B_{total} 、および V_c は、定常的に負荷を与えるプログラムにより、実チップで推定した。

4.2 評価結果

評価に用いた現行の DDMP は、40~65 ステージの STP から成る。ステージ数および命令セットの異なる 3 種類の STP、PE、PE、および PE について、パケット充足率を変化させた場合のスループットを測定した結果を、図 4 に示す。図中では、パケット充足率を横軸にとり、縦軸に定常時の性能を 1 としたスループットを示す。スループットは、 V_p に比例する。

結果より、ステージ数によらず、実システムの性能は概観できた。誤差は、量子化の影響により、ステージ数の減少に応じて増加する傾向にあるが、高集積化に伴い、パイプラインステージ数は増える方向にあるため、実用上の問題は小さいと考えられる。

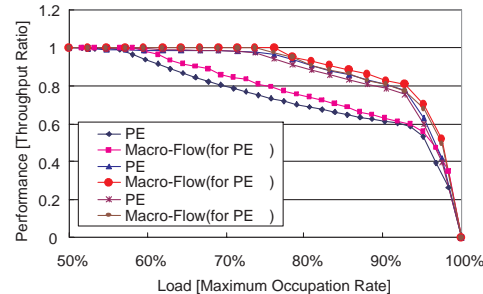


図 4: 実機のスループットとの比較

5. まとめ

本研究では、パケットの充足率と間隔から、パケットの仮想的な平均速度を決定し、STP を巨視的に観測するモデルを提案した。また、本マクロフローモデルは、実機の観測を通して、STP システムの性能を概観可能であることが確認できた。

今後の課題としては、ルータ部における干渉のモデル化が残されている。

参考文献

- [1] H. Terada, S. Miyata, and M. Iwata, "DDMP's: Self-timed Super-pipelined Data-driven Multimedia Processors," Proc. of the IEEE, 87(2), pp. 282-296, 1999.
- [2] S. Sannomiya, Y. Omori, and M. Iwata, "A Macroscopic Behavior Model for Self-Timed Pipeline Systems," in Proc. of Parallel and Distributed Simulation Conf., pp. 133-140, 2003.
- [3] S. Chakraborty and R. Angrish, "Probabilistic Timing Analysis of Asynchronous Systems with Moments of Delays," in Proc. of Int. Symp. on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems, pp.99-108, 2002.
- [4] A. Xie and P. A. Beerel, "Accelerating Markovian Analysis of Asynchronous Systems using String-based State Compression," in Proc. of Int. Symp. on Advanced Research in Asynchronous Circuits and Systems, pp. 247-260, 1998.
- [5] 三宮, 大森, 岩田, "自己同期型パイプラインシステム向けマクロフローモデル", SWoPP2003:Summer United Workshops on Parallel Distributed and Cooperative Processing, 2003.(to be published)