

ハードウェア特殊化技術の制振制御への応用

指導教員：市川 周一

学籍番号：063724 手塚 康瑛

1 はじめに

運動体への操作入力に対して、振動を抑制させるための制御は制振制御と呼ばれる。これらの制御をハードウェアに実装する場合には、回路の小型化・高速化は実用上極めて重要である。

一般に論理回路の入力を（一部でも）固定すれば、定数伝播により論理が簡素化され、回路規模が削減される。また、簡素化により回路動作の高速化も期待できる。こうした技術を**ハードウェア特殊化**と呼ぶ。ハードウェア特殊化はFPGA等の再構成可能デバイスに最適な実装方法であるため、これを利用したいくつかの応用が検討されている [1]

本研究では、制振制御を目的としたデジタルフィルタと制振モデルの実装に、ハードウェア特殊化を適用し評価した。フィルタの例としてはローパスフィルタを取り上げた。更に応用例として運動体の制振制御を検討し、ハイブリッド整形法とローパスフィルタ付き Preshaping の実装評価を行った。これらの制御回路のハードウェア特殊化においては、パラメータの固定だけでなく、入力波形の固定についても効果を検討した。

2 評価方法と環境

制御分野の研究では、計算機を利用したモデルベース設計が広く利用されている。本研究でも、モデルの構成とシミュレーション、解析には Mathworks MATLAB/Simulink を用いた。更にアドインソフトウェア Simulink HDL Coder を利用し、モデルをハードウェア記述言語 (HDL, 本研究では VHDL) に変換した。

連続系で設計されたモデルは、サンプリング周波数 512 Hz の離散系へ変換し実装した。また、離散系でのデータタイプは固定小数点数とした。論理合成には Altera Quartus II 9.1 を利用し、ターゲットデバイスは Altera Cyclone III FPGA EP3C120F780 とした。この時、CAD の最適化設定は標準とした。また、確認のため Altera Cyclone III Starter Kit (EP3C25F324 搭載) で動作検証を行った。

3 デジタルフィルタの実装と評価

評価対象にはカットオフ 3 Hz の 3 次の Butterworth 特性 Infinite Impulse Response (IIR) フィルタを選んだ。IIR デジタルフィルタには複数の実装形式が存在するが、代表的な以下の 4 種に対して評価を行った。

DF1 直接形 I (Direct Form I)

DF2 直接形 II (Direct Form II)

Cascade 2 次縦続形 (Biquad Cascade Form)

Parallel 2 次並列形 (Biquad Parallel Form)

評価では 4 種に対し、係数の特殊化を行うモデル (Specialized) と行わないモデル (Generic) を作成、合成して比較を行った。4 種の実装の論理規模を図 1 に示す。縦軸の単位は、Cyclone III FPGA の論理構成単位 (ロジックエレメント; LE) であり、値は配置配線を行った後のものである。また、Generic に対する Specialized の論理規模 (割合) も図中に示した。

いずれの実装についても、Specialized の論理規模は Generic のおおよそ半分になった。また、いずれもレジスタの削減効果は無く、論理規模の減少は組合せ論理の削減に起因するものである。同様に、動作周波数についても比較を行ったところ 23%~39% の向上がみられた。

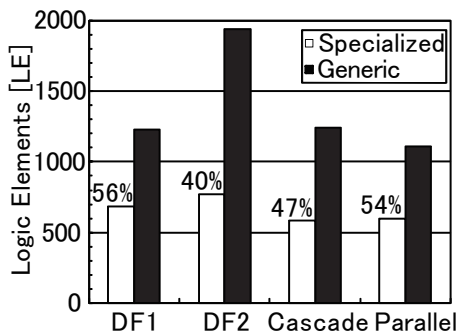


図 1: フィルタ係数特殊化の有無による論理規模

4 制振制御の実装と評価

制振制御への応用では、ノッチフィルタにより制振を行うハイブリッド整形法 [2] と、固有振動の逆位相入力を与えて制振を行うローパスフィルタ (LPF) 付き Preshaping [3] を対象とした。フィルタの実装には 3 節の評価結果から Cascade を用いている。ハードウェア特殊化については、以下の 4 つの方法に対して評価を行った。

Unfixed: 入力、パラメータを未知としたもの。

Fixed Parameter: パラメータを固定し、入力を未知としたもの。

Fixed Input: 入力固定し、パラメータを未知としたもの。

All Fixed: 3 つ全てを既知としたもの。

パラメータはハイブリッド整形法ではフィルタ係数、LPF 付き Preshaping ではフィルタ係数と Preshaping パラメータとなる。また、入力として与える信号は振幅 1, 周期 10 秒, デューティ比 50% の方形波パターンである。All Fixed は本来、事前に計算してメモリに出力系列を記憶すれば十分である。All Fixed の評価は他の 3 つと比較するために行った。

ハイブリッド整形法に対する評価結果を表 1 に示す。表中の数値は Cyclone III での資源使用量と動作速度である。Fixed Parameter では 3 節と同様の論理規模縮小効果がみられた。また、動作周波数も 40% 以上向上することが確認された。しかし、Fixed Input では規模縮小効果がない。

LPF 付き Preshaping に対する評価結果を表 2 に示す。Unfixed と比較して、Fixed Parameter, Fixed Input 共に大きく論理規模が削減された。Unfixed では Preshaping 部分の論理規模が全体の 98.6% を占めており、いずれの場合も Preshaping 部分が大きく削減されていることがわかった。また、異なる入力パターンに対しても評価を行ったところ Preshaping 部分に対する Fixed Input の削減効果は入力パターン中の変化する bit 数に線形に比例することが分かった。

表 1: ハイブリッド整形法に対する特殊化の効果

	Unfixed	Fixed Parameter	Fixed Input	All Fixed
Total LEs	1232	587	1277	617
Combinational Logics	1232	587	1277	617
Registers	32	32	65	65
Frequency [MHz](85°C)	26.0	37.3	26.1	37.2

表 2: LPF 付き Preshaping に対する特殊化の効果

	Unfixed	Fixed Parameter	Fixed Input	All Fixed
Total LEs	86271	9114	8305	1071
Combinational Logics	49707	922	7282	815
Registers	65568	8256	2144	353
Frequency [MHz](85°C)	17.42*	26.44	19.27	29.55

PC のメモリ制限によりタイミング解析が失敗したため参考値としている。

5 おわりに

本研究ではフィルタと制振制御をハードウェアに実装し、ハードウェア特殊化の効果を評価した。その結果、いずれの実装でも効果が得られることを確認した。これらの結果を安直に一般化することはできないが、Preshaping における入力波形固定のように極めて大きな効果が見られる場合もあることから、制御回路の FPGA 実装に対する最適化技法として更に検討を進める必要がある。

参考文献

- [1] K. Compton and S. Hauck, "Reconfigurable computing: a survey of systems and software," ACM Computing Surveys, vol.34, no.2, pp.171–210, Section 4.5 and 5.2, 2002.
- [2] K. Yano, T. Toda, and K. Terashima, "Slashing suppression control of automatic pouring robot by hybrid shape approach," Proc. IEEE Conf. Decision and Control 2001, vol.2, pp.1328–1333, 2001.
- [3] N.C. Singer and W.P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol.112, pp.76–82, 1990.