

コンフィギュラブルLSIのためのソフトウェア志向のシステムレベル設計環境の初期検討

高瀬 英希^{1,a)} 玉野 浩二² 西山 高浩²

概要: 本研究では、プロセッサとFPGAに加えて、各種の専用回路を集積したコンフィギュラブルLSIの活用に注目する。このようなヘテロジニアス構成のデバイスにおいて、ソフトウェア向けの高級言語のみによるシステムレベルの設計環境を提案する。設計記述からアナログ回路の構成およびプロセッサとの通信機構を自動合成するフローを構築し、これをツールチェーンとして実装する。ロボットシステムの設計についての適用事例を示し、提案手法の有用性を議論する。

An Preliminary Study on a Software Oriented System-Level Design Environment for the Configurable LSI

HIDEKI TAKASE^{1,a)} KOJI TAMANO² TAKAHIRO NISHIYAMA²

Abstract: This paper targets on the configurable LSI that consists of the processor, FPGA and dedicated circuits. We propose a system-level design environments for the configurable LSIs only from high-level programming language. Our toolchain synthesizes the configuration of analog circuits and communication bus for the processor. We show case study on the robot system to discuss the usefulness of proposed toolchain.

1. はじめに

近年の組込みシステム設計においてますます高まる高機能化および大規模化の要求に応える方策のひとつとして、複数の計算資源が集積されたデバイスの活用が注目されている。本研究では、プロセッサ、FPGA および各種の専用回路が集積されたコンフィギュラブルLSIに着目する。ローム株式会社のフレキシブルプラットフォームLSIでは、D/AコンバータやA/Dコンバータ、オペアンプやコンパレータなどのアナログ回路や、各種タイマなどのデジタル回路がCortex-Mプロセッサおよび小規模FPGAと密結合されている。それぞれの専用回路は、入出力端子やサンプリング周波数、ゲイン値などの機能構成を変更できる。

このようなデバイスを活用することで、プロセッサの柔軟性とFPGAの高速応答性に加えて、外部環境との情報送受に適したアナログ回路の機能と利点を活用した高品質な組込みIoTシステムを構築できることが期待される。しかしながら、各計算資源の機能と利点を最大限に活用するには、ソフトウェア(SW)とハードウェア(HW)の双方に関する深い開発知識が必要とされる。また、それぞれの計算資源を接続する専用バスにおける通信インタフェース(IF)の開発知識も必要となる。このため、本デバイスを活用して資源制約を満たしつつ設計対象に要求される機能を設計することの難易度が高くなる。

本稿では、コンフィギュラブルLSIのためのソフトウェア志向の組込みシステム設計環境を提案する。一般的な高級プログラミング言語による設計記述のみから、各計算資

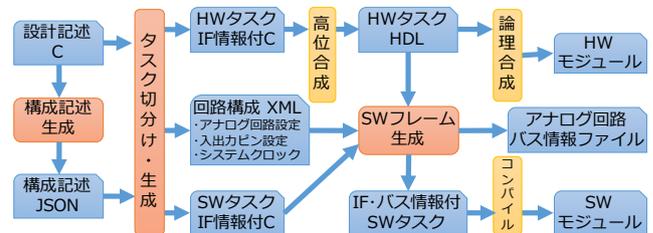


図1 提案する設計環境の合成フロー
源の実行可能モジュールを一括して自動合成できるようにする。設計者は、SWに関する開発知識のみで、高品質な組込みシステムを高い抽象度で設計できるようになる。

2. 設計環境の合成フロー

図1は、我々が検討しているフレキシブルプラットフォームLSIのためのシステムレベル設計環境の合成フローを示している。入力として、C言語による設計記述ファイルのみを与える。設計記述の詳細は次章で述べる。

合成フローでは、まず、設計記述ファイルを解析し、各種の回路や入出力ピンの機能構成に関するJSON形式の構成記述を生成する。そして、設計記述および構成記述から、タスク切分け・生成の処理を行う。本処理では、設計記述をHWタスクおよびSWタスクに切り分け、それぞれにプロセッサとFPGA間の通信IFに関する情報を付与する。合わせて、各種の回路の機能構成、入出力ピンの設定およびシステムクロックの設定がXML形式で詳細定義された回路構成情報が生成される。C言語のHWタスク記述は、高位合成および論理合成によってHWモジュールに合成される。SWフレーム生成部では、回路構成、IF情報付きSWタスクおよびHWタスクから、フレキシブルプラットフォームLSI上の各種回路とプロセッサ間のバス接続を表すアナログ回路バス情報を生成する。合わせて、プロセッサで実行可能なSWタスク記述を生成する。

¹ 京都大学 大学院情報学研究所
² ローム株式会社
^{a)} takase@i.kyoto-u.ac.jp

```

1 #include "swordslib.h"
2 void setup() {
3     /* システムクロックの設定 */
4     swords_system("HIGH", "1", "HIGH");
5     swords_systick("1ms");
6
7     /* 12bit逐次比較ADCの接続 */
8     NET1 = IO1A;
9     swords_saradc_0(NET1);
10    /* 8bit Ref. DACの設定と接続 */
11    NET2 = swords_refdac0("200");
12    /* 12bit R2R DACの設定と接続 */
13    NET3 = swords_r2rdac_0("LUT", "10", "SIN");
14    IO2B = NET3;
15    /* コンパレータの接続 */
16    IO3A = swords_comp_0(NET2, NET3);
17    /* DIO2AをGPIOとして使用する */
18    swords_enable_GPIOB(DIO2A, "OUT");
19 }
20 void start() {
21     /* DIO2AをHIGHにする */
22     DIO2A = true;
23     swords_delay(100);
24 }
25 int loop() {
26     /* IO1AからA/D変換したデータを取得 */
27     adcdata = IO1A;
28     /* REFDACのチャンネルにデータを設定 */
29     NET2 = adcdata >> 4;
30 }

```

図 2 提案手法における SW 志向設計記述の例

3. 設計記述のプログラミングモデル

提案する設計環境を採用する設計者は、部品関数、ピン変数およびネット変数と呼ぶ要素を用いて、システム全体を SW 志向の記述で設計していく。各種回路の機能を定義した部品関数では、引数によって出力端子の選択や最低限の構成を、返値を持つものは出力端子から得られるデータとそのピン接続を指定できる。ピン変数は、ボード上の入出力ピンまたはマイコンの GPIO を表現する。ネット変数は、部品間またはピン間の接続の中間表現である。これらの仕様はライブラリとして提示されており、対応する初期化や各種設定ルーチンの詳細を記述する必要は無い。

提案手法の SW 志向の設計記述には、Arduino 言語 [1] を参考として、図 2 に示す setup() および loop() からなるプログラミングモデルを採用する。これらに加えて、start() および end() を用意している。setup() 内には、使用したい回路の構成と接続関係を記述する。部品関数を用いて、入出力端子や最低限の構成設定を引数および返値で記述する。さらに、ピン変数およびネット変数を用いて、回路間やプロセッサとの接続を代入式で記述していく。setup() 内の記述は回路構成の生成のみに利用される。loop(), start() および end() 内では、プロセッサおよびアナログ回路の振る舞いを設計する。setup() 内で記述した代入式のピン変数およびネット変数を介して、アナログ回路の値の取得または設定を記述することができる。ただし、start() および end() の記述は省略可能である。SW フレーム生成時には、変数を介した値送受の記述がフレキシブルプラットフォーム LSI のライブラリ関数に自動変換される。生成される SW タスクとしては、まず start() の変換記述が一度実行され、その後 loop() の変換記述が繰り返し実行される。loop() の返り値が 0 以外である場合には、end() の変換記述が一度実行されてプロセッサ処理を終了する。

提案手法の利点として、まず、SW 志向の開発知識のみ

で、コンフィギュラブル LSI を活用するシステム全体の構成と振る舞いをそれぞれ段階的に設計できる点が挙げられる。システムレベル設計を進める際には、各種回路をどのような構成と接続として、何を実現したいかに注力できる。また、設計記述の軽微な修正のみで、様々な回路の構成や接続に対応するシステムを合成することができる。

4. ツールチェーンの開発状況と適用事例

現在、提案手法の設計フローを実現するツールチェーンの開発に取り組んでいる。図 1 における構成記述生成部およびタスク切分け・生成部は python および clang によって実装している。SW フレーム生成部およびコンパイル部は、ローム社の提供する開発環境である RapidMaker[®] および Keil 社の MDK-ARM を用いている。高位合成部は現時点で未対応であり、オープンソースの C ベース高位合成ツールの採用を検討中である。

提案手法の有用性を立証するための適用事例として、掃除機型自律走行ロボット Kobuki[2] および 2 種類のアナログセンサを用いたデモシステムを開発している。ローム社フレキシブルプラットフォーム LSI の搭載された評価ボードによって、バンパおよび各種センサの検知値に応じて Kobuki の動作を制御する。3 章で解説したプログラミングモデルによって本システムの構成と振る舞いを設計し、開発中のツールチェーンによって所望の制御プログラムとアナログ回路構成およびバス情報を合成できている。

デモシステムに使用した超音波センサは、フレキシブルプラットフォーム LSI 内の専用回路で生成した 40kHz 信号を送信側モジュール UT1612MPR から送信し、Kobuki の前方にある障害物で反射した超音波を受信側モジュール UR1612MPR で検知する。検知値は微弱なため、LSI 内の反転アンプで信号増幅している。赤外線センサ GP2Y0E02A は、左右の障害物との距離を測定してアナログ値で取得する。これらのアナログ値を LSI 内のコンパレータによって基準電圧値と比較し、障害物の有無を検知する。

5. おわりに

本研究では、プロセッサ、FPGA および専用回路が集積されたコンフィギュラブル LSI のための SW 志向のみシステムレベル設計環境の初期検討を実施した。提案手法は、高品質な組込みシステムを実現するための設計生産性の向上に寄与する。今後、開発中のツールチェーンに高位合成を導入し、HW モジュールの自動合成にも取り組む予定である。また、提案手法の有用性を定量的に評価する。

謝辞 本成果はローム株式会社との共同研究による。

参考文献

- [1] Arduino: Language Reference(online), www.arduino.cc/en/Reference/ (2017.06.30).
- [2] Yujin Robot Inc.: iClebo Kobuki(online), <http://kobuki.yujinrobot.com> (2017.06.30).