

## 倒立振り子ロボットのFPGAを用いた超高速制御

植竹 大地<sup>†</sup> 大川 猛<sup>†</sup> 横田 隆史<sup>†</sup> 大津 金光<sup>†</sup> 馬場 敬信<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>宇都宮大学工学部情報工学科

### 1 はじめに

現在多くの組込みシステムやロボット制御システムがマイコンを用いて開発されている。こうしたシステムには、厳しいリアルタイム性が要求されることがある。例えば、電気自動車においてはモータ制御に50マイクロ秒から100マイクロ秒の短い周期が求められる[1]。これは従来のガソリンエンジン自動車に比べると10倍から100倍の高速化に相当する。このような高速化が要求される場合に、マイコンのソフトウェアによる逐次実行ではなく、FPGAを用いて処理をハードウェアとして並列実行することで処理の高速化が実現できる。しかし、FPGAを扱うには一般的にハードウェア記述言語による設計を必要とするため、マイコン開発者にとっては導入の障壁が高いという問題がある。そのため本研究は、高速な制御が求められる制御システムに従来のマイコンに代わりFPGAを導入する開発手法の提案を目標としている。

本稿では、マイコンで制御している倒立振り子ロボットをFPGAで制御することによって処理速度と安定性を向上させることを目標とする。この際ロボット制御システムへのFPGA導入の障壁を下げるために、制御処理をJava言語で記述し、ハードウェアとして実行する開発手法を用いる。

### 2 現状の倒立振り子ロボット

現状の倒立振り子ロボットと本研究で開発するFPGA倒立振り子ロボットとの比較を表1に示す。本稿で用いた倒立振り子ロボットはH8/36064Gのマイコンを使用したヴイストーン株式会社製のBeauto Balancerである。センサ基板には、角速度を測定するジャイロセンサと、回転角度を測定するフォトインタラプタの2つのセンサを搭載している。ジャイロセンサは本体が倒れるときの回転する速さから角速度を取得する。マイコンは角速度を元に積分を行なうことで制御に必要な本体角度を求める。フォトインタラプタからはA相とB相の2つの信号線から出力され、マイコンは2つの信号からタイヤの回転方向と回転角度を測定する。

本稿では倒立振り子ロボットの制御周期の目標値を5マイクロ秒以下と定めた。これは電気自動車のモータ制御の制御周期は50マイクロ秒であるので、十分な余裕をみてその1/10を目標値とした。

マイコン版の倒立振り子の制御の流れと処理時間の分析結果を図1に示す。倒立振り子ロボットは、センサか

表 1: 各システムの比較

比較対象	現状の倒立振り子ロボット	本稿で用いるFPGA倒立振り子ロボット
動作環境	マイコン(H8/36064G)	FPGA(Xilinx社Spartan6 LX16)
動作クロック	14.5674MHz	50MHz
制御周期	8.3m秒	5μ秒(目標値)

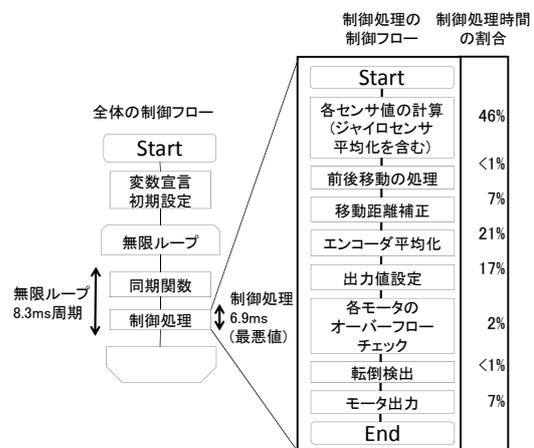


図 1: マイコン版倒立振り子ロボットの処理時間分析結果

らの2つの値を取得し、取得したセンサの値を用いてモータ出力値を計算し、出力値を用いてモータの出力を決定し、モータがタイヤを回転させることで倒立振り子ロボットを倒れないように制御している。制御周期は120Hzと設定している。すなわち1周期の時間は8.3ミリ秒となる。図1の全体の制御フローにおける無限ループは同期関数と制御処理で構成されている。同期関数は無限ループの周期が8.3ミリ秒になるように同期を行なっている。倒立振り子ロボットの制御を行ないながら処理時間を測定した結果、制御処理にかかる時間の最悪値は6.9ミリ秒であった。制御処理のうちで大部分を占めるのは、各センサ値の計算であり、46%の時間がかかっている。その原因は各センサ値を過去10回分平均化するための浮動小数点演算部分に処理時間が集中しているためであることが分析の結果分かった。マイコンには浮動小数点演算器(FPU)が搭載されていないため、浮動小数点演算をソフトウェアで行なうために時間がかかっている。そのためFPGAによる処理のハードウェア化においては浮動小数点の演算時間を削減する必要があることがわかる。

Ultra High Speed Control of Inverted Pendulum Robot by Using FPGA.

<sup>†</sup>Daichi Uetake, Takeshi Ohkawa, Takashi Yokota, Kanemitsu Ootsu and Takanobu Baba

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University (†)

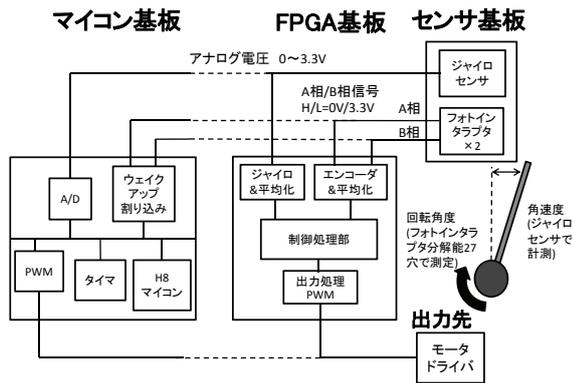


図 2: 各システムの全体像

### 3 FPGA 倒立振り子ロボット設計方針

#### 3.1 システムの全体像

図 2 に各システムの全体像を示す。現状の倒立振り子ロボットはマイコン基板とセンサ基板から構成される。このマイコン基板を FPGA 基板に変更することで、超高速制御を行なう。この際、同条件での性能比較を行なうためにセンサ基板は同じものを使用する。本研究では Xilinx 社の Spartan-6 XC6SLX16 を搭載した FPGA 基板である株式会社 e-trees.Japan の exStick を使用する。マイコンには一定の周期実行をするためにタイマ回路が備わっているが、FPGA ではマイコンのタイマ回路同様のハードウェアを作成して、使用する。その他のマイコン付属の回路も同様に FPGA 上に実現する。

#### 3.2 ハードウェア開発方法

ロボット開発技術者の多くはマイコンでロボット制御システムの開発を行なっている。マイコンは C 言語のプログラム言語でプログラムを記述することができるが、FPGA はハードウェア記述言語を用いて開発しなければならないためロボット開発技術者に障壁が高い。またハードウェア記述言語に比べて C 言語や Java などで記述したプログラムを高位合成する方が、開発にかかる時間を短縮することができる [2]。そのため本研究では高位合成ツールである JavaRock [3] を使用する。JavaRock は Java からハードウェア記述言語を生成することができる。Java は本来ソフトウェア開発用の言語なのでコンパイルの時間が短い。よってプログラムを書き換えてからテストするまでの時間がハードウェアを作成と比較すると短い。本稿では JavaRock を用いて、倒立振り子ロボットの制御処理を固定小数点演算で記述し HDL を合成し FPGA 上で動かす開発手法を用いた。

### 4 評価

マイコン版倒立振り子ロボットの分析の結果処理時間の多くを占めるセンサ値平均化処理に着目した。そのための基礎検討として、本稿では FPGA による制御

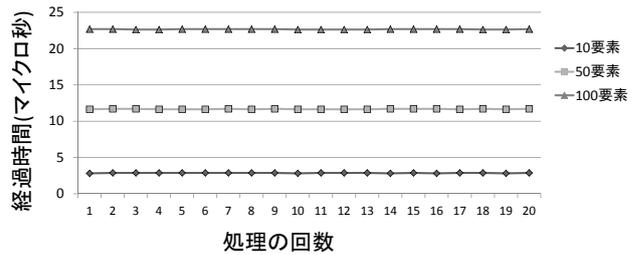


図 3: センサ入力値平均化処理時間測定結果 (FPGA)

処理の性能を評価するために、for ループを使用して変数を任意の回数加算するプログラムを作成して評価を行なった。加算要素数が 10, 50, 100 要素の三種類のプログラムを用意してそれぞれを 20 回動作させたときの実行時間のグラフを図 3 に示す。

各要素を全て加算した時の最悪値は、要素数 10 個の時 2.88 マイクロ秒、要素数 50 個の時 11.7 マイクロ秒、要素数 100 個の時 22.68 マイクロ秒となった。すなわち要素数に応じて処理時間が長くなることがわかった。本来 FPGA は並列で複数の値を加算することができるが、今回の測定に使用したプログラムは配列要素を逐次加算する記述となっているため要素数に応じて処理時間が長くなっている。FPGA で並列演算する場合には、Java のプログラムで処理を並列に記述し JavaRock で合成する必要がある、今後はさらなる高速化に取り組む。

### 5 おわりに

本稿では、倒立振り子ロボットを FPGA を用いて制御するための設計方法やハードウェア開発方法について検討した。今後は FPGA 版の倒立振り子ロボットの完成に向けた開発を進める。完成したシステムにおいては、マイコン版の処理の固定小数点化および FPGA の動作クロックの周波数をマイコンと同じにして性能を比較し、導入の効果を評価する予定である。

謝辞

本研究は、一部日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究 (C)24500055, 同 (C)24500054) の援助による。

#### 参考文献

- [1] 公益社団法人自動車技術会, “最新の ECU インタフェース技術と HEV/EV 制御システム向け計測・適合ソリューション【イータス】,” [http://guide.jsae.or.jp/first\\_column/438/](http://guide.jsae.or.jp/first_column/438/), 2010.
- [2] 大川猛ほか: “ソフトウェアから FPGA を容易に扱うための分散オブジェクトプラットフォーム,” 情報処理学会第 54 回プログラミング・シンポジウム, 2013.(発表予定)
- [3] 三好健文, 船田悟史: “JavaRock を用いた HW/SW 協調設計の検討,” 電子情報通信学会技術研究報告:リコンフィギュラブルシステム, Vol.112, No.SIG 70, pp.119-124, 2012.