

FPGA を用いた相関計測装置の開発

電気通信大学 森永研究室
福田 冬傑

1.研究の背景・目的

検査装置や制御装置、計測装置は一般的にセンサーなどからの入力信号に対して演算処理を行い、その結果に基づいて動作をする。このような装置の多くはマイクロコンピュータを内蔵していて何らかのソフトウェア処理を行っている。だが、CPU によるソフトウェア処理は瞬時に結果が必要だったりする場合などは処理が追いつかず、性能や速度が不足することも少なくない。

FPGA(Field Programmable Gate Array) ボードは回路構造の書き換えができる集積回路である。さらに FPGA ボードで信号処理を行えば、信号処理部分にパソコンのような大きさを必要とせず、装置の小型化を図ることができる。

本研究の目的は、FPGA と PC の組み合わせで高速かつ高度な処理を行える光子相関計測システムを構築することである。

2.準備

以下に本研究で用いる主な装置、用語、ソフトについて説明する。

MPPC モジュール

MPPC を内蔵した微弱光検出が可能な光計測モジュール。光子の計数計測も可能。

TC7660

チャージポンプ電圧変換器で、1.5V~10V 入力を-1.5V~-10V に変換する。

NJM360D

応答時間が最大 20ns の電圧比較器。2 つの入力端子の電圧を比較して High ,Low を出力する。

FPGA ボード Papilio Pro

本研究で用いた FPGA ボード。ラインアップを表 2.1 に示す。

表 2.1 FPGA ボード Papilio のラインアップ

	Papilio One 250K	Papilio One 500K	Papilio Pro	Papilio Duo
FPGA	Spartan-3E XC3S250E	Spartan-3E XC3S500E	Spartan-6 XC6SLX9	Spartan-6 XC6SLX9
ロジック・セル数	5508	10476	9152	9152
BRAM [bit]	216K	360K	576K	576K
I/O 数	48	48	48	未定
外部 RAM [bit]	なし	なし	SDRAM 64M	SDRAM 64M
SPI フラッシュ・メモリ [bit]	4M	4M	64M	64M
電源	DC 入力ジャック, または USB		USB (外部電源も可)	
備考				AVR マイコン搭載。 リリース準備中

LogicStart MegaWing

FPGA の拡張ボードで、ジョイスティックスイッチや 7 セグメント LED が搭載されている。

ISE Design Suite

Papilio は ZAP IDE を使わずに、サイリンクスの FPGA 開発環境 ISE を使っても回路を書き込める。

Papilio Loader

FPGA 書き込みソフトウェア。図 2.5 に例を示す。Papilio は独自の書き込み回路(JTAG 回路)が搭載されており、Papilio Loader を使って JTAG 経由で FPGA フラッシュメモリに BIT ファイルを書き込める。

3. 相関計測装置

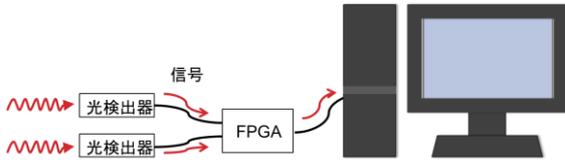


図 3.1 相関計測装置のしくみ

装置は上図のようなしくみになっている。まず、2つある光検出器が光子を感知する。そしてその信号を FPGA に送り、FPGA 内で光子の発生時刻を記録していく。最後にその記録したデータを PC 上に送り、どのような時間差で来たのかなど、相関を計算する。

光検出器の製作にあたり、作成した回路を以下に示す。図 4.1 は負電源を供給するための接続を示している。

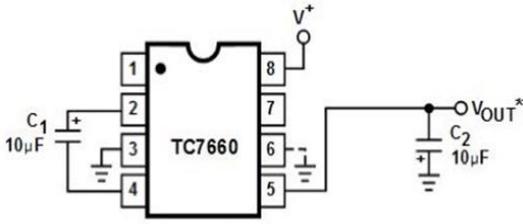


図 4.1 負電源変換回路

-5V の負電源が必要な理由は、光計測をする MPPC モジュールが $\pm 5V$ の電圧を供給しないと動作しないためである。次に電圧変換器の回路を図 4.2 に示す。

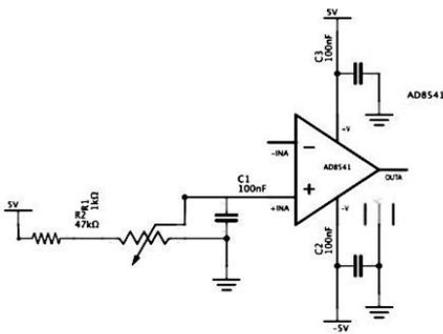


図 4.2 電圧変換器の回路

光検出器が光子を感知した時の波形はアナログの波形であり、このままだと FPGA に送ることができない。そのため、この電圧比較器を用いて High と Low の二つの状態しかない 2 進数の波形に変換してやる必要がある。

次の図 4.3 は光検出器全体の動作を簡略化したものである。

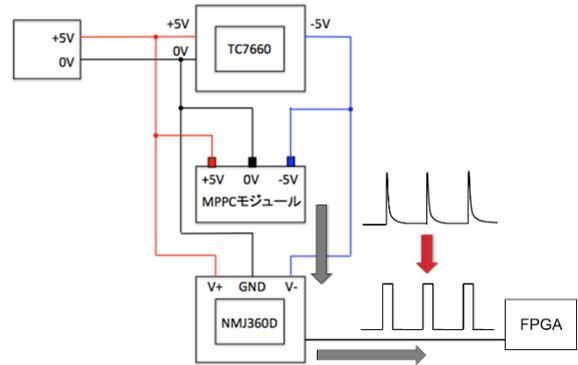


図 4.3 光検出器の動作環境

まず、+5V の電源を 3 つの装置につなぎ、TC7660 で -5V の負電源を作り、それを MPPC モジュールと NJM360D につなげる。MPPC モジュールが光を感知したときの波形を一度電圧変換器で波形を 2 進数のものに変換し、それを FPGA に送っている。

また図 4.4 は実際に作製した光検出器である。

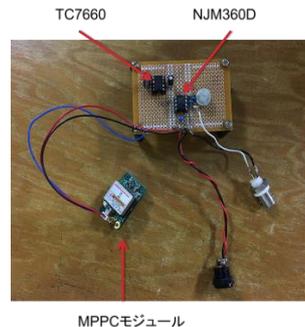


図 4.4 光検出器

5.制御装置の制作

制御装置を作るにあたって、FPGA と回路書き換えソフトなどの使い方を知るために、ストップウォッチを作製した。

5.1 ストップウォッチの作成

ストップウォッチの仕様は以下のようにした。

- ・計測停止中に SW_0 が押されると計測開始
- ・計測中に SW_0 が押されると計測停止
- ・計測停止中に SW_1 が押されたら 0 秒に戻す
- ・SW_2 が押されたら 0 に戻し、計測も停止する（リセット）
- ・7セグメント LED に 10ms で計測時間を表示する

制作に関する作業内容を図 5.1 に示す。

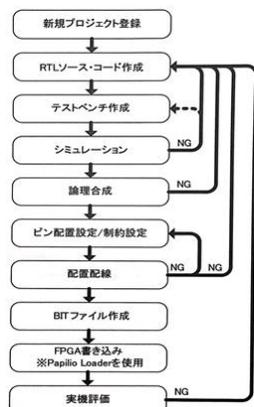


図 5.1 作業フロー

ソースコードの作成から BIT ファイル作成までの作業はすべて ISE Design Suite 上で行った。BIT ファイルは設定したデータを格納したバイナリファイルである。BIT ファイルを FPGA に書き込むには Papilio Loader を用いた。また、今回用いた言語は HDL(Hardware Description Language)で、Verilog HDL と

VHDL どちらも使用した。

図 5.2 にストップウォッチの回路を示す

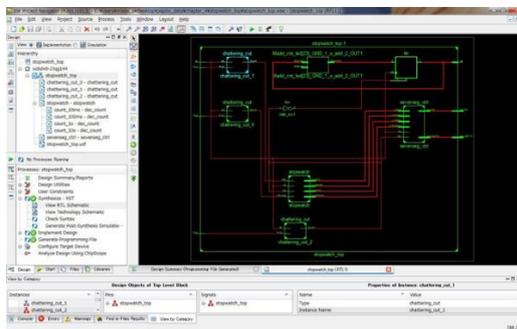


図 5.2 ストップウォッチの回路

5.2 PC 上にデータを表示

FPGA で記録したデータを PC に送り、画面に表示させた。そのときの様子を図 5.3 に示す。



図 5.3 PC 画面に表示した様子

ストップウォッチのカウンタの最小単位を 10ms に設定したため、この場合は 6.08 秒となる。図の右側は PC のシリアルポートにその値を表示させている様子である。

5.3 カウンタの値の変更

作成したストップウォッチは最小単位が 10ms だが、見たい相関時間はずっと短いためカウンタの周期をもっと小さくしなければならない。使用した FPGA のクロック周波数が 32MHz であるので、これをそのままカウントすればよい。つまり 31.25ns が最小となるので、そのままこの周波数を利用した。

6 まとめ・展望

残念ながら、装置はまだ完成しておらず、課題がいくつか残っているの状態である。現状は、光検出器の作製、FPGA の記録したデータを PC に送信し表示させるプログラムの作成まではできている。残りの課題としては、光検出器と制御装置を分けて作業を行ったため、この 2 つをつなぐことが必要である。また、ストップウォッチは手動でスイッチを押して計測開始していたが、相関計測装置は光検出器からの信号に反応して自動的に記録しなければならない。そのため、そういう動作をするプログラムを組まなければならない。

今考えているのは、光子を感知する周期はかなり小さく、信号を FPGA に送って処理を行っている間に次の光子の信号が来ると、取りこぼすことになるため、それを防がなければならない。そのために、一旦データを収納するスペースを作ってやれば、光子を感知した信号をとりこぼすことはなくなるのではないかと考えている。その略図を以下の図 6.1 に示す。また、32MHz の外部クロックを直接用いるのではなく PLL を使用し、更にデシリアライザを併用することによって 1ns 程度の時間分解能を実現したい。

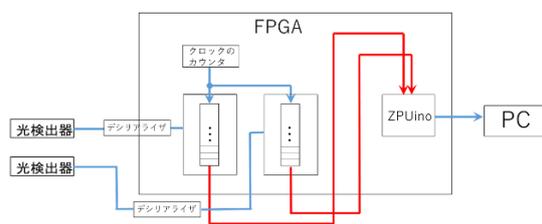


図 6.1 処理構造の略図

FPGA 内部の真ん中に位置している 2 つのブロックがその収納スペースで、これに FIFO メモリを使用する予定である。

FIFO とは First In First Out の略で、最初に入ったデータを最初に取り出すというものである。

7.参考文献

FPGA 版 Arduino!! Papilio でつくるデジタル・ガジェット」、著者:横溝 憲治/岩田 利王/土井 滋貴/平 一平、CQ 出版 (2014)

Papilio Pro ハードウェアガイド

<http://Papilio.cc/index.php?n=Papilio.PapilioPro>

ZPUino ユーザ・マニュアル

<http://www.alvie.com/zpuino/downloads/zpuino-1.0.pdf>

Arduino リファレンス・サイト

<http://www.musashinodenpa.com/arduino/ref/>

<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21465C.pdf>

http://www.njr.co.jp/products/semicon/PDF/NJM360_J.pdf

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/4163.html>