

コンピュータ科学実験レポート

坪井正太郎 (101830245)

2020 年 12 月 3 日

はじめに

この実験では、一部の命令が実装されていないプロセッサに、適切な命令を実装して、条件付きループ命令を含む動作を行えるようにする。

また、各実験では、シミュレータや論理合成のソフトウェアを使うために、以下の設定を行う。端末を終了した場合、再度 source コマンドを実行する。

ソースコード 1 設定の読み込み

```
1 $ ln -s /pub1/jikken/eda3/cadsetup.bash.altera ~/
2 $ source ~/cadsetup.bash.altera
```

HDL のコンパイルには Quartus Prime を、機能レベルシミュレーションには Model Sim を使用した。バイナリファイルの内容は、hexdump コマンドによる。一番左のカラムは、hexdump の行数である。

各実験

1 実験 5-1

1.1 実験の目的、概要

この実験では、実験 4-2 で作成したプロセッサで画面上に文字を表示する C プログラムを実行するその中で関数呼び出しを行い、動作を予想し、結果を確認する。

これによって、現在足りていない機能を確認することを目的とする。

1.2 実験方法

以下のプログラムを配置した。

ソースコード 2 my_print.c

```
1 #define EXTIO_PRINT_STROKE (*(volatile unsigned int *) 0x0300)
2 #define EXTIO_PRINT_ASCII (*(volatile unsigned int *) 0x0304)
3
4 void my_print();
5
```

```

6 main()
7 {
8     unsigned int string[64];
9
10    string[0] = 'H';
11    string[1] = 'E';
12    string[2] = 'L';
13    string[3] = 'L';
14    string[4] = '0';
15    string[5] = '!';
16    string[6] = '!';
17    string[7] = '\0';
18
19    my_print(string);
20
21    string[0] = 'B';
22    string[1] = '\0';
23 }
24
25 void my_print(str)
26     unsigned int *str;
27 {
28     while (*str != '\0') {
29         EXTIO_PRINT_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
30
31         if ((*str >= 'A') && (*str <= 'Z')) {
32             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - 'A' + 1;
33         } else if ((*str >= 'a') && (*str <= 'z')) {
34             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - 'a' + 1;
35         } else if ((*str >= '0') && (*str <= '9')) {
36             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - '0' + 48;
37         } else {
38             if (*str == '@') {
39                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)0;
40             } else if (*str == '[') {
41                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)27;
42             } else if (*str == ']') {
43                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)29;
44             } else if ((*str >= ' ' ) && (*str <= '/')) {
45                 EXTIO_PRINT_ASCII = *str - ' ' + 32;
46             } else if (*str == '?') {
47                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)58;
48             } else if (*str == '=') {
49                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)59;
50             } else if (*str == ';') {
51                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)60;

```

```

52     } else if (*str == ':') {
53         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)61;
54     } else if (*str == '\n') {
55         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)62;
56     } else {
57         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)0x00000000;
58     }
59 }
60
61     EXTIO_PRINT_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
62     str++;
63 }
64 }

```

1.2.1 クロスコンパイル、メモリイメージファイルの作成

以下の操作でクロスコンパイルし、メモリイメージファイルを作成した。

ソースコード 3 クロスコンパイル、メモリイメージファイルの作成

```

1 $ cross_compile.sh my_print.c
2 $ bin2v my_print.bin

```

1.2.2 命令列の確認、動作予想

生成された、rom8x1024.mif を確認して、以下の点について結果を予測した。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の PC の値

1.2.3 論理合成、ダウンロード

以下の操作で、論理合成し、FPGA にダウンロードした。

ソースコード 4 論理合成、ダウンロード

```

1 $ cp rom8x1024.mif ./mips_de10-lite/
2 $ cd ./mips_de10-lite/
3 $ quartus_sh --flow compile MIPS_Default
4 $ quartus_pgm MIPS_Default.cdf

```

クロックを手動モードで送り、70 個ほどの命令を実行、予想した点と、ディスプレイに表示されるはずの文字について確認した。

1.3 実験結果

1.3.1 命令列の確認、動作予想

メモリイメージファイルが生成された。

命令列を確認して、このような予想をたてた。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
 - REG[31]=0x0078
- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の PC の値
 - PC=0x00a0

1.3.2 FPGA での実行結果

予想した点について結果は、以下のようになった。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
 - REGWRITED=00000000, WEN=0 であり、レジスタへの書き込みは発生していない
- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の PC の値
 - PC=0x0078 であり、ジャンプはしていない

ディスプレイに文字は表示されなかった。

1.4 考察

このプロセッサには、jal 命令が実装されていないので、プログラムが正しく動作しなかった。jal 命令が正しく実装されている場合、31 番目のレジスタに次の戻り先プログラムカウンタの位置が退避されて、プログラムカウンタの位置が命令で指定された場所に更新されるはずである。

2 実験 5-2

2.1 実験の目的、概要

実験 4-2 で作成したプロセッサに jal 命令が足りないことが、実験 5-1 で確認できた。本実験では、プロセッサに jal 命令を追加実装し、動作を確認する。その際、実験 5-1 での予想と実際を比較する。

これによって、関数呼び出し時のプロセッサの動作、レジスタに保存されるデータなどを確認することを目指すとする。

2.2 実験方法

2.3 追加設計

main_ctrl.v に以下の変更を加え、jal 命令のオペコードと、実行されるとき制御信号を定義した。

ソースコード 5 main_ctrl.v の追加設計

- 1 オペコードの定義
- 2 'define JAL 6'b000011 // jump and link (J 形式)
- 3
- 4 jp_sel モジュールへの制御信号の記述
- 5 +=4の値ではなく、命令文中のアドレスを選択する

```

6 assign jp = ((op_code == 'J') || (op_code == 'JAL')) ? 1'b1 : 1'b0;
7
8 レジスタのwrite_enable 制御信号の追加
9 'JAL: reg_write_enable_tmp = 1'b1;
10
11 レジスタに流すデータのセレクト信号の追加
12 REG[31]に次のPC 値が保存されるようになる
13 'JAL: link_tmp = 1'b1;

```

2.3.1 論理合成、ダウンロード

以下の操作で、論理合成し、FPGA にダウンロードした。

ソースコード 6 論理合成、ダウンロード

```

1 $ quartus_sh --flow compile MIPS_Default
2 $ quartus_pgm MIPS_Default.cdf

```

実験 5-1 で予想した点と、ディスプレイに表示されるはずの文字について確認した。

2.4 実験結果

予想した点について結果は、以下のようになった。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
 - REGWRITED=00400078,index=0x1f(=31),write_enable=1 が読み取れた
 - 予想通り、次に実行する PC の値が、REG[31]
- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の PC の値
 - 予想通り PC=0x=0x00a0 であり、ジャンプしている

画面上には、"HELLO!!" という文字列が表示された。

2.5 考察

jal 命令を実装したことで、\$ra に PC の値が退避され、即値で指定した値にジャンプできるようになった。そのため、予想した点について正しい動作を確認することができた。これは、my_print 関数の呼び出しに成功しているということであると考えられる。実際に、画面上に文字列が表示されることが分かった。

この実験で、関数呼び出し時のプロセッサの動作、レジスタに保存されるデータを確認する事ができた。

3 実験 6-1

3.1 実験の目的、概要

実験 5-2 で jal 命令を追加したプロセッサ上で、キーボードからの入力を受け取る C プログラムを実行する。その中で関数からの復帰を行い、それらの動作を予想し、結果を確認する。

これによって、現在足りていない機能を確認することを目的とする。

3.2 実験方法

以下のプログラムを配置した。

ソースコード 7 my_scan.c

```
1 #define EXTIO_SCAN_ASCII (*(volatile unsigned int *)0x0310)
2 #define EXTIO_SCAN_REQ (*(volatile unsigned int *)0x030c)
3 #define EXTIO_SCAN_STROKE (*(volatile unsigned int *)0x0308)
4
5 #define SCAN_STRORING (unsigned int)0xffffffff
6
7 #define EXTIO_PRINT_STROKE (*(volatile unsigned int *)0x0300)
8 #define EXTIO_PRINT_ASCII (*(volatile unsigned int *)0x0304)
9
10 void my_print();
11 void my_scan();
12
13 main() {
14     unsigned int string1[32];
15     unsigned int string2[32];
16
17     string1[0] = 'H';
18     string1[1] = 'E';
19     string1[2] = 'L';
20     string1[3] = 'L';
21     string1[4] = '0';
22     string1[5] = '!';
23     string1[6] = '!';
24     string1[7] = '\n';
25     string1[8] = '\0';
26
27     my_print(string1);
28
29     while (1) {
30         string1[0] = 'S';
31         string1[1] = 'T';
32         string1[2] = 'R';
33         string1[3] = 'I';
34         string1[4] = 'N';
35         string1[5] = 'G';
36         string1[6] = '=';
37         string1[7] = '\0';
38
39         my_print(string1);
40
```

```

41     my_scan(string2);
42
43     string1[0] = 'E';
44     string1[1] = 'C';
45     string1[2] = 'H';
46     string1[3] = '0';
47     string1[4] = ' ';
48     string1[5] = '\0';
49
50     my_print(string1);
51
52     my_print(string2);
53
54     string1[0] = '\n';
55     string1[1] = '\0';
56
57     my_print(string1);
58 }
59 }
60
61 void my_scan(str) unsigned int *str;
62 {
63     EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
64     EXTIO_SCAN_REQ = (unsigned int)0x00000001;
65     EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
66
67     EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
68     EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
69     while (EXTIO_SCAN_ASCII == SCAN_STRORING) {
70         EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
71         EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
72     }
73
74     while ((*str = EXTIO_SCAN_ASCII) != (unsigned int)0x3e) { // 0x3e=RETURN
75         if ((*str >= 1) && (*str <= 26)) {
76             *str = 'A' + *str - 1;
77         } else if ((*str >= 48) && (*str <= 57)) {
78             *str = '0' + *str - 48;
79         } else {
80             if (*str == 0) {
81                 *str = '@';
82             } else if (*str == 27) {
83                 *str = '[';
84             } else if (*str == 29) {
85                 *str = ']';
86             } else if ((*str >= 32) && (*str <= 47)) {

```

```

87     *str = ' ' + *str - 32;
88 } else if (*str == 58) {
89     *str = '?';
90 } else if (*str == 59) {
91     *str = '=';
92 } else if (*str == 60) {
93     *str = ';';
94 } else if (*str == 61) {
95     *str = ':';
96 } else if (*str == 62) {
97     *str = '\n';
98 } else {
99     *str = '@';
100 }
101 }
102 EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
103 EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
104 str++;
105 }
106 *str = '\0';
107
108 EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
109 EXTIO_SCAN_REQ = (unsigned int)0x00000000;
110 EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
111
112 EXTIO_SCAN_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
113 }
114
115 void my_print(str) unsigned int *str;
116 {
117     while (*str != '\0') {
118         EXTIO_PRINT_STROKE = (unsigned int)0x00000000;
119
120         if ((*str >= 'A') && (*str <= 'Z')) {
121             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - 'A' + 1;
122         } else if ((*str >= 'a') && (*str <= 'z')) {
123             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - 'a' + 1;
124         } else if ((*str >= '0') && (*str <= '9')) {
125             EXTIO_PRINT_ASCII = *str - '0' + 48;
126         } else {
127             if (*str == '@') {
128                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)0;
129             } else if (*str == '[') {
130                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)27;
131             } else if (*str == ']') {
132                 EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)29;

```



```

133     } else if ((*str >= ' ') && (*str <= '/')) {
134         EXTIO_PRINT_ASCII = *str - ' ' + 32;
135     } else if (*str == '?') {
136         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)58;
137     } else if (*str == '=') {
138         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)59;
139     } else if (*str == ';') {
140         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)60;
141     } else if (*str == ':') {
142         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)61;
143     } else if (*str == '\\n') {
144         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)62;
145     } else {
146         EXTIO_PRINT_ASCII = (unsigned int)0x00000000;
147     }
148 }
149
150 EXTIO_PRINT_STROKE = (unsigned int)0x00000001;
151 str++;
152 }
153 }

```

3.2.1 クロスコンパイル、メモリイメージファイルの作成

以下の操作でクロスコンパイルし、メモリイメージファイルを作成した。

ソースコード 8 クロスコンパイル、メモリイメージファイルの作成

```

1 $ cross_compile.sh my_scan.c
2 $ bin2v my_scan.bin

```

3.2.2 命令列の確認、動作予想

生成された、rom8x1024.mif を確認して、以下の点について結果を予測した。

- 最初に PC=0x007c を実行したときの、REG[31] の値
- 最初に PC=0x0804 を実行した直後の、PC の値

3.2.3 キーボードの接続

今回実行するプログラムでは、キーボードからの入力を必要とするため、FPGA に変換回路を接続して、キーボードを接続した。

3.2.4 論理合成、ダウンロード

以下の操作で、論理合成し、FPGA にダウンロードした。

ソースコード 9 論理合成、ダウンロード

```
1 $ cp rom8x1024.mif ./mips_de10-lite/  
2 $ cd ./mips_de10-lite/  
3 $ quartus_sh --flow compile MIPS_Default  
4 $ quartus_pgm MIPS_Default.cdf
```

クロックを手動モードで送り、70 個ほどの命令を実行、予想した点と、ディスプレイに表示されるはずの文字について確認した。

3.3 実験結果

3.3.1 命令列の確認、動作予想

メモリイメージファイルが生成された。

生成された命令列を確認して、このような予想をたてた。

- 最初に PC=0x007c を実行したときの、REG[31] の値
 - PC=0x004004d8
- 最初に PC=0x0804 を実行した直後の、PC の値
 - PC=0x00400080

3.3.2 FPGA での実行結果

予想した点について結果は、以下ようになった。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
 - REGWRITED=0x00400080,IDX=0x1f,WEN=1 となり、REG[31] に PC の値が退避された
- 最初に PC=0x0804 を実行した直後の、PC の値
 - PC=0x00400808 となり、ジャンプしなかった

画面上には、”HELLO！！”のみ表示された。

3.4 考察

予想した点について、PC=0x0074 の命令は正しく動作しているが、PC=0x0804 の命令については正しく実行できていないということが分かる。これは、プロセッサに jr 命令が実装されていないためであると考えられる。

このプロセッサには、jal 命令は実装されているが、jr 命令が実装されていないので、関数に入ることはできても、関数から戻ることができない。そのため、プログラム中の my_print 関数の実行はできるが、戻ることができないため、次の手続きに進むことができないと考えられる。

4 実験 6-2

4.1 実験の目的、概要

実験 5-2 で作成したプロセッサに jr 命令が足りないことが、実験 6-1 で確認できた。本実験では、プロセッサに jr 命令を追加実装し、動作を確認する。その際、実験 6-1 での予想と実際を比較する。

これによって、関数からの復帰時のプロセッサの動作、レジスタから読み取れるデータなどを確認することを目的とする。

4.2 実験方法

4.3 追加設計

cpu.v に、以下の変更を加え、jpr_sel モジュールを追加した。

ソースコード 10 cpu.v の追加設計

```
1 jpr_sel の入出力ワイヤを定義
2 wire [31:0] jpr_sel_d0; // jpr 選択回路モジュール データ 1
3 wire [31:0] jpr_sel_d1; // jpr 選択回路モジュール データ 2
4 wire [31:0] jpr_sel_s; // jpr 選択回路モジュール セレクト信号
5 wire [31:0] jpr_sel_y; // jpr 選択回路モジュール 出力
6
7 32bit マルチプレクサモジュールを jpr_sel として宣言する
8 入出力はさっき定義したワイヤを使う
9 mux32_32_32 jpr_sel(jpr_sel_d0, jpr_sel_d1, jpr_sel_s, jpr_sel_y);
10
11 セレクトの出力をPC に接続する
12 assign pc_next = jpr_sel_y;
13 代わりに、割り当てられていたjp_sel_y をコメントアウトする
14 //assign pc_next = jp_sel_y;
15
16 セレクトの入力を割り当てる
17 assign jpr_sel_d0 = jp_sel_y;
18 assign jpr_sel_d1 = alu_ram_sel_y;
19 assign jpr_sel_s = jpr;
```

main_ctrl.v に以下の変更を加え、jr 命令が実行されるとき制御信号を定義した。

ソースコード 11 main_ctrl.v の追加設計

```
1 jpr 信号を出力する条件として、jr のファンクションコードを追加する。
2 || Rfunc == 6'b001000)) ? 1'b1 : 1'b0;
3
4 レジスタの書き込み制御信号の出力条件を追加
5 if (Rfunc == 6'b001000) begin
6     reg_write_enable_tmp = 1'b0;
```

```
7 end else begin
8   reg_write_enable_tmp = 1'b1;
9 end
```

以下の操作で、論理合成し、FPGA にダウンロードした。

ソースコード 12 論理合成、ダウンロード

```
1 $ quartus_sh --flow compile MIPS_Default
2 $ quartus_pgm MIPS_Default.cdf
```

実験 6-1 で予想した点と、キーボードからの入力に対する反応について確認した。

4.4 実験結果

予想した点について結果は、以下ようになった。

- 最初に PC=0x0074 を実行した直後の REG[31] の値
 - REGWRITED=0x00400080,IDX=0x1f,WEN=1 となり、REG[31] に PC の値が退避された
- 最初に PC=0x0804 を実行した直後の、PC の値
 - PC=0x00400080 と、予想通りの結果になった

画面上には、“HELLO!!”という文字列が表示された。キーボードとの入出力の結果、以下のように、キーボードで入力した文字列がそのまま出力された。(“STRING=”の後の文字列がキーボードから入力した文字列である。)

ソースコード 13 実行結果

```
1 HELLO!!
2 STRING=HELLO
3 ECHO HELLO
4 STRING=BYE
5 ECHO BYE
```

4.5 考察

予想した点の jr 命令は、最初の jal 命令で退避した PC の値を復元して、PC=0x00400080 にジャンプした。jr 命令を実装したことによって、関数から戻って手続きをすすめることができた。これにより、画面への出力と、キーボードからの入力を受け取る関数を正しく実行することができた。

この実験で、関数からの復帰時のプロセッサの動作を確認することができた。

5 実験 7

5.1 実験の目的、概要

本実験では、実験 6-2 で作成したプロセッサ上で、キーボード入力に応答を行うプログラムを動作させる。このプログラムは、プロセッサに実装されていない命令を使用するため、正常に動作しない。

本実験では、このプログラムを、正常に動作させることを目的とする。

5.2 実験方法

5.3 実験結果

5.4 考察

6 実験 8

6.1 実験の目的、概要

本実験では、プロセッサからステッピングモータを扱う。最終的に、キーボードからモータを制御するプログラムを作成、実行する。

これによって、このプロセッサで提供されている機能のを使用することで実現できるプログラムを作成することを目的とする。

6.2 実験方法

6.3 実験結果

6.4 考察