

システムプログラミング 2

期末レポート

氏名: 重近 大智 (SHIGECHIKA, Daichi)
学生番号: 09501527

出題日: 2020 年 12 月 07 日

提出日: 2021 年 1 月 20 日

締切日: 2020 年 1 月 25 日

1 概要

本レポートでは, MIPS 言語と C 言語を用いて, 提示された 5 つの課題に取り組み, その解答を報告する. 実行結果は xspim 及び gcc により生成された 32bit バイナリによる結果である.

本レポートで報告するシステムプログラミング 2 の課題は次の 5 つである.

1. SPIM が提供するシステムコールを C 言語から実行できるようにしたい. A.6 節「手続き呼出し規約」に従って, 各種手続きをアセンブラで記述せよ [1]. ファイル名は, `syscalls.s` とすること. また, 記述した `syscalls.s` の関数を C 言語から呼び出すことで, ハノイの塔 (`hanoi.c` とする) を完成させよ.
2. `hanoi.s` を例に `spim-gcc` の引数保存に関するスタックの利用方法について, 説明せよ. そのことは, 規約上許されるスタックフレームの最小値 24 とどう関係しているか. このスタックフレームの最小値規約を守らないとどのような問題が生じるかについて解説せよ.
3. プログラム `report2-1.c` をコンパイルした結果をもとに, `auto` 変数と `static` 変数の違い, ポインタと配列の違いについてレポートせよ.
4. `printf` など, 一部の関数は, 任意の数の引数を取ることができる. これらの関数を可変引数関数と呼ぶ. MIPS の C コンパイラにおいて可変引数関数の実現方法について考察し, 解説せよ.
5. `printf` のサブセットを実装し, SPIM 上でその動作を確認する応用プログラム (自由なデモプログラム) を作成せよ. フルセットにどれだけ近いのか, あるいは, よく使う重要な仕様だけをうまく切り出して, 実用的なサブセットを実装しているかについて評価する. ただし, 浮動小数は対応しなくてもよい (SPIM 自体がうまく対応していない). 加えて, この `printf` を利用した応用プログラムの出来も評価の対象とする.

2 プログラムの説明

使用した MIPS アセンブリ及び C 言語のソースコードは, 6 章に示す.

2.1 課題 2-1

まず, 6.1 節に示す `syscalls.s` について説明する.

処理でスタックを確保する必要があるため, `.text` によりテキストセグメントにプログラムを配置する. 続いて `.align 2` により次の命令が配置されるメモリ上のアドレスを 4 バイト境界に整列する. 4 行目の `_print_int` ラベルから始まる一連の処理は, C 言語のソースコードから `print_int()` で呼び出せる処理に相当する. ま

ず `subu` 命令でスタックを 24 バイト確保し, `sw` 命令で `$ra` レジスタの値を `$sp + 20` のメモリ上のアドレスに退避する. `li` 命令で `$v0` レジスタに 1 を代入し, システム・コール・コード 1 である `print_int` を指定する. `syscall` により, システム・コールを行う. その後, `lw` 命令で `$ra` レジスタの値をスタックから復元し, `addu` 命令でスタックを開放する, `j $ra` により呼び出し元に処理を戻す.

他の `print_string`, `read_int`, `read_string` においては, システム・コール・コードがそれぞれ 4, 5, 8 となっていること以外は共通の処理を行っているため, ここでは触れない. なお, `print_int` は実行時の引数に `int`, `print_string` は `char *`, `read_string` は `char *`, `int` の値をそれぞれ渡す必要がある.

2.2 課題 2-5

続いて, 6.6 節に示すデモプログラムについて説明する. まずプログラムの動作を支える `void myprintf(char *fmt, ...)` 関数, `void myscanf(char *fmt, ...)` 関数とこれらの関数の動作を支える関数について説明する.

`void print_char(char c)` 関数は, 1 文字を表示する関数で, MIPS 言語のシステム・コールでは `print_string(char *)` の形を利用するため, 任意の 1 文字と終端文字をつなぎ合わせた長さ 2 の配列を作り, その先頭アドレスを `print_string(char *)` に渡す処理を行う.

`void print_big_str(char *s)` 関数は, 文字列に小文字の英字が含まれる場合, それをすべて大文字にして出力する関数である. 引数は `char *`型であり, これにオフセットを加えながら, バッファに 1 文字分の情報を読み出す. その後 ASCII コードが 97 以上 122 以下の場合, この値を -32 して, `print_char(char c)` 関数を呼び出す. `void print_small_str(char *s)` 関数は, 文字列に大文字の英字が含まれる場合, それをすべて小文字にして出力する関数である. ASCII コードが 65 以上 90 以下の場合, この値を $+32$ して, `print_char(char c)` 関数を呼び出す. いずれの関数も戻り値はない.

`char read_char(void)` 関数は, 1 文字入力を受ける関数である. オーバーフロー防止の為, 1024 文字分のバッファを設ける. `read_string(char *, int)` によりシステム・コールを実行する. その後, `c` に `buf[0]` の値を代入し, 戻り値とする.

`void myprintf(char *fmt, ...)` 関数は, 正規の `printf()` の呼び出し時に指定するサブセットに対応する分岐の処理を行う. `char *`型の変数 `fmt` で第一引数に対応する文字列の情報を読み取り, その情報の `%` をもとに変数 `i`, `c`, `s` に対応する第二引数以降の情報を代入し, `print_int(int)`, `print_string(char *)` 関数などを呼び出す. `%` とその 1 文字後のサブセットを指定する英字 1 文字以外は, `else` 文後の `print_char(char c)` 関数により, そのまま 1 文字として出力される. `int` 型の変数 `argc` が引数の数をカウントし, 第一引数が格納されているメモリのアドレスである `&fmt` に, `sizeof(void)` すなわち 4 バイト \times `argc` を加えることにより, 第二引数以降が格納されているメモリのアドレスを知ることができる. なお, `myprintf()` 関数で使用可能なサブセットは表 1 に示す.

`void myscanf(char *fmt, ...)` 関数は, 正規の `scanf()` の呼び出し時に指定するサブセットに対応する分岐の処理を行う. `char *`型の変数 `fmt` で第二引数に対応する変数の型の情報を読み取り, その情報をもとにポインタ変数 `*i`, `*c`, `*s` に対応する第二引数の情報を代入し, `read_int(int)`, `read_string(char *)` 関数などを呼び出す. 第一引数が格納されているメモリのアドレスである `&fmt` に, `sizeof(void)` すなわち 4 バイトを加えることにより, 第二引数が格納されているメモリのアドレスを知ることができる. なお, `myscanf()` 関数で使用可能なサブセットは表 2 に示す. また, この `myscanf()` 関数は可変引数関数ではなく, 第二引数までの制限がある.

デモ内容は, `int` 値のみ対応した簡易的な電卓プログラムとなっている. 電卓機能はすべて `int main(void)` 関数に記述されている. 使用可能なコマンドは表 3 に示す.

3 プログラムの使用法と実行結果

プログラムは、CentOS 7.6.1810 (Core) の xspim とターミナルで動作を確認している。まず、ターミナルに xspim & と打ち込んで、xspim を実行する。実行後に load の機能を使い、拡張子が .s のアセンブリファイルを読み込む。run の機能で読み込んだプログラムを走らせる。プログラムを走らせた後、もう一度プログラムを走らせる場合には clear でメモリとレジスタの値を初期化した後、再度ロードする必要がある。syscalls.s (6.1 節) を用いるプログラムの場合は、最後にこれを読み込ませる。なお、課題 2-5 のデモプログラムは 32bit バイナリを実行し、その実行結果を載せている。

3.1 課題 2-1

実行結果は次のとおりである。初めに円盤の枚数を尋ねられるので、円盤の枚数を指定する。

```
Enter number of disks> 4
Move disk 1 from peg 1 to peg 3.
Move disk 2 from peg 1 to peg 2.
Move disk 1 from peg 3 to peg 2.
Move disk 3 from peg 1 to peg 3.
Move disk 1 from peg 2 to peg 1.
Move disk 2 from peg 2 to peg 3.
Move disk 1 from peg 1 to peg 3.
Move disk 4 from peg 1 to peg 2.
Move disk 1 from peg 3 to peg 2.
Move disk 2 from peg 3 to peg 1.
Move disk 1 from peg 2 to peg 1.
Move disk 3 from peg 3 to peg 2.
Move disk 1 from peg 1 to peg 3.
Move disk 2 from peg 1 to peg 2.
Move disk 1 from peg 3 to peg 2.
```

よって、hanoi.c (6.2 節) をアセンブリした hanoi.s (6.3 節) が正しく動作していることが確認できた。

3.2 課題 2-5

以下の実行例は、プログラム実行中の動作例を模擬するため、任意の txt ファイルを標準入力のリダイレクションにより与えることで、実行する例を示している。通常の利用においては、キーボードから文字列を入力してもよい。

表 1 myprintf() 関数のサブセット

| サブセット指定 | 概要 |
|---------|--------------------|
| %d | int 値出力 |
| %c | 1 文字出力 |
| %s | 文字列出力 |
| %B | 文字列中の英小文字は大文字にして出力 |
| %b | 文字列中の英大文字は小文字にして出力 |

表 2 myscanf() 関数のサブセット

| サブセット指定 | 概要 |
|---------|---------|
| %d | int 値入力 |
| %c | 1 文字入力 |
| %s | 文字列入力 |

```
$ ./a.out < test.txt
```

以上のようにして、ファイルを標準入力のリダイレクションで与え、32bit バイナリを実行する。test.txt の中身は次のとおりである。

```
1      +
2      4
3      0
4      y
5      -
6      2
7      *
8      6
9      /
10     3
11     +
12     4
13     c
14     h
15     y
16     q
```

これをリダイレクションで与えて得られる出力は次のとおりである。

```
Starting calculator...
Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Please input the number.(int type ONLY)
Number? : Result : 4

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Do you want to reset calculation result? (y or N)
Reset calculation result.

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Please input the number.(int type ONLY)
Number? : Result : -2

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
```

表 3 電卓で使用可能なコマンド

| コマンド名 | 概要 |
|-------|-----------------|
| + | 加算 |
| - | 減算 |
| * | 乗算 |
| / | 除算 |
| 0 | 計算結果を 0 に初期化する |
| c | 現在の計算結果を表示する |
| h | 1 回前に行った演算を呼び出す |
| q | 正常終了する |

```

Mode? : Please input the number.(int type ONLY)
Number? : Result : -12

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Please input the number.(int type ONLY)
Number? : Result : -4

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Please input the number.(int type ONLY)
Number? : Result : 0

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Result : 0

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : Do you want to calc +4 again? (y or N)
Calculated +4 again.
Result : 4

Please select the calc mode. ("+" or "-" or "*" or "/" or "0" or "c" or "h" or "q")
Mode? : FINAL RESULT : 4
Quit.

```

電卓のすべての機能が正しく動作していることが確認できた。なお、xspim においても正常に実行可能であることを確認している。

4 考察

4.1 課題 2-2

spim-gcc を用いてコンパイルを行った場合の `hanoi.s` (6.3 節) のスタックの確保の一連の処理

```

subu    $sp,$sp,24
sw      $ra,20($sp)
sw      $fp,16($sp)
move    $fp,$sp
sw      $a0,24($fp)
sw      $a1,28($fp)
sw      $a2,32($fp)
sw      $a3,36($fp)

```

を見ると、まず `subu` 命令でスタックポインタの値を 24 減少させる。減少させた後、`sw` 命令で `$ra` レジスタの値を `20($sp)`、`fp` レジスタの値を `16($sp)` で示されるメモリ上のアドレスに保存する。これは更新前の `$sp` レジスタの値から見ると、それぞれ -4、-8 されたメモリ上のアドレスを指していることが分かる。同様に `$a0` ~ `$a3` レジスタの例について考えると、更新前の `$sp` レジスタから見た場合、それぞれ 0、4、8、12 されたメモリ上のアドレスを指している。つまり更新前の `$sp` レジスタより大きいメモリ上のアドレスを指しているため、呼出し側のスタック領域に格納されたことになる。

これを整理すると図 1 のようになり、各関数のスタック領域はその関数が呼び出されたときの `$fp` レジスタ及び `$ra` レジスタの値、そしてその関数が他の関数を呼び出したときの `$a0` ~ `$a3` レジスタの値で構成される。それぞれが 32bit の値であるから計 24 バイト必要となる。もし第 5 引数以上を要する場合は、4 バイト * (追加に必要な引数の個数) 分多くスタックを確保すれば新 `$sp` 基準で格納される。もし、24 バイトより少なく確保してしまうと、次のスタックを確保する際に確保済みのスタックの情報が上書きされ、正しくプログラムが動作しない恐れがある。

| | 旧\$spからのoffset | メモリに保存されている内容 | 概要 |
|--------|----------------|-------------------|---|
| 新\$sp→ | -24 | \$a0 | 被呼び出し関数が他の関数を呼び出す場合に使用される (被呼び出し関数のスタック) |
| | -20 | \$a1 | |
| | -16 | \$a2 | |
| | -12 | \$a3 | |
| | -8 | \$fp | 被呼び出し関数のスタック |
| | -4 | \$ra | |
| 旧\$sp→ | 0 | \$a0 | 呼び出し関数のスタック |
| | 4 | \$a1 | |
| | 8 | \$a2 | |
| | 12 | \$a3 | |
| | 16 | 第4引数以降がない場合, \$fp | |

図1 スタックの状態

4.2 課題 2-3

report2-1.s (6.5 節) をもとに auto 変数と static 変数について考察すると、64 行目からの main ラベルの処理

```

subu    $sp,$sp,64          # スタックの積立て (64 バイト)
sw      $ra,60($sp)         # $sp + 60 番地のアドレスに$ra の値をバックアップ
sw      $fp,56($sp)         # $sp + 56 番地のアドレスに$fp の値をバックアップ
move    $fp,$sp             # $sp の値で$fp を上書き
li      $v0,2               # 0x2
sw      $v0,_primes_stat    # _primes_stat に対応するラベルのメモリ上のアドレスに$v0 の値を保存
li      $v0,3               # 0x3
sw      $v0,16($fp)         # $fp($sp) + 16 番地のアドレスに$v0 の値をバックアップ

```

で 64 バイトのスタックを確保している。このスタック領域に値を保存しているのが auto 変数である。値は\$fp レジスタ、\$sp レジスタの値にオフセットを合わせて、lw 命令や sw 命令でアクセスするため、他の関数を呼び出し、新たにスタックを確保した後にアクセスすることは困難であり、スタックを開放するとアクセスすることは不可能となる。それに対し static 変数は、データセグメントにあらかじめ長さを決めて確保した領域に値を保存する。変数はラベルを用いてアクセスされるため、他の関数からのアクセスもラベルを使用することで容易にできる。これらの特徴から auto 変数はスタックを開放し関数が終了してしまうとアクセス不能になり、データセグメントに確保した static 変数はプログラムを終了するまでアクセス可能であることが分かる。

続いて report2-1.c の次の部分で、ポインタと配列について考える。

```

char * string_ptr = "ABCDEFGH";
char  string_ary[] = "ABCDEFGH";

```

これに対応する report2-1.s は、次のとおりである。

```

        .rdata                # 読み取り専用データセグメント
        .align                # バイト揃え
$LC0:
        .ascii                # 文字列情報
        .data                # データセグメント
        .align                # バイト揃え
        _string_ptr:         # ポインタ
        .word                $LC0    # アドレスを参照
        .align                # バイト揃え
        _string_ary:         # 配列
        .ascii                # 文字列情報

```

MIPS アセンブリにおいて確保されたポインタは、ここでは `_string_ptr` ラベルから始まる部分に格納されており、ここはデータセグメントである。ポインタであるため、直に文字列情報が格納されているわけではなく、ポインタが指すアドレスの変数の値が文字列の実体である。ここでは `$LC0` ラベルに対応する部分が該当する。なお、この `$LC0` ラベルの部分は読み取り専用データセグメントとなっており、例えば C 言語で `*ptr = 'a'` と値を上書きできないことが分かる。MIPS アセンブリにおいて確保された配列は、`_string_ary` ラベルの部分であり、ここに文字列情報を格納している。このラベルのアドレスを基準に文字列情報にアクセス可能で、`$LC0` とは異なりデータセグメントであるため、上書きも可能である。

4.3 課題 2-4

MIPS の C コンパイラによって生成されたアセンブリを実行した結果、24 バイトのスタックが確保された場合を考えると、図 1 の状態になっていることが分かる。スタックの確保と値の代入は 4.1 節で触れたため、ここでは触れない。新しい関数を呼び出した際に第一引数、すなわち `$a0` レジスタに対応する値が格納されるスタックの場所は、旧 `$sp` が指しているメモリ上のアドレスである。この旧 `$sp` からのオフセットを 4 ずつ増加させることで、第二引数以降の値に対応するスタックにアクセスできるため、第一引数が格納されているスタックのアドレスが分かれば第二引数以降の情報も読み取ることができるといえる。4.1 節でも触れたが、第 5 引数以上を要する場合は、4 バイト * (追加に必要な引数の個数) 分多くスタックを確保しておかないと、`$fp` レジスタや `$ra` レジスタに対応するスタックの値を壊してしまいかねないので、余裕を持って確保しておくことが望ましいといえる。C 言語においては、第一引数自体のアドレスを `&` を使って取り出し、それに先述したオフセットを加えることで第二引数以降を読み出すことが可能となる。逆にすべての引数を可変にしまうと、引数がいくつあるか知る方法がなくなるとともに、基準となる第一引数自体のアドレスも読めなくなってしまうため、これは不可能であるといえる。`myprintf()` 関数では、第一引数に対応した文字列の `'%'` の数を数えることで、第二引数以降の引数がいくつあるかを知ることが可能になっている。

5 感想

課題 2-5 において、`myscanf()` 関数を可変引数関数にしようとしたが、例えば `myscanf("%d,%s",a ,b);` として、`int` の値と文字列を `,` で区切って同時に入力可能な仕様にする場合、システム・コールは `print_string()` で行い、その文字列を分割するなどの複雑な処理が必要となるため、今回は実装できなかった。デモプログラムの電卓で例えば `+4` と入力して一気に計算処理ができるようになれば、もっと使いやすくなると思うので改善方法を模索してみたいものである。`myscanf()` 関数を自作したことにより、何故正規の `scanf()` 関数の第二引数以降の `int` の変数、`char` 型の変数で `&` をつけているのかを理解でき、興味深かった。

6 使用したプログラムのソースコード

使用したプログラムを以下に添付する。

6.1 syscalls.s

```
1      .text
2      .align 2
3
4  _print_int:
5      subu    $sp,    $sp,    24    # スタックの積立
6      sw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値をスタックに退避
7
8      li      $v0,    1            # syscall 用に print_int を指定
9      syscall                                # システムコールの実行
10
11     lw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値の復元
```

```

12     addu    $sp,    $sp,    24 # スタックを解放
13     j      $ra      # 呼び出し元に戻る
14
15 _print_string:
16     subu    $sp,    $sp,    24 # スタックの積立
17     sw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値をスタックに退避
18
19     li      $v0,    4          # syscall 用に print_string を指定
20     syscall                      # システムコールの実行
21
22     lw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値の復元
23     addu    $sp,    $sp,    24 # スタックを解放
24     j      $ra      # 呼び出し元に戻る
25
26 _read_int:
27     subu    $sp,    $sp,    24 # スタックの積立
28     sw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値をスタックに退避
29
30     li      $v0,    5          # syscall 用に read_int を指定
31     syscall                      # システムコールの実行
32
33     lw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値の復元
34     addu    $sp,    $sp,    24 # スタックを解放
35     j      $ra      # 呼び出し元に戻る
36
37 _read_string:
38     subu    $sp,    $sp,    24 # スタックの積立
39     sw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値をスタックに退避
40
41     li      $v0,    8          # syscall 用に read_string を指定
42     syscall                      # システムコールの実行
43
44     lw      $ra,    20($sp)    # $ra レジスタの値の復元
45     addu    $sp,    $sp,    24 # スタックを解放
46     j      $ra      # 呼び出し元に戻る

```

6.2 hanoi.c

xspim で実行する場合は、1 行目の#include "spim.h"は不要である。

```

1 // #include "spim.h"
2
3 void hanoi(int n, int start, int finish, int extra)
4 {
5     if (n != 0){
6         hanoi(n - 1, start, extra, finish);
7         print_string("Move disk ");
8         print_int(n);
9         print_string(" from peg ");
10        print_int(start);
11        print_string(" to peg ");
12        print_int(finish);
13        print_string(".\n");
14        hanoi(n - 1, extra, finish, start);
15    }
16 }
17
18 main()
19 {
20     int n;
21     print_string("Enter number of disks> ");
22     n = read_int();
23     hanoi(n, 1, 2, 3);
24 }

```


6.3 hanoi.s

spim-gcc により生成されたアセンブリコードである.

```
1      .file 1 "hanoi.c"
2
3      # -G value = 0, Arch = r2000, ISA = 1
4      # GNU C version 2.96 20000731 (Red Hat Linux 7.3 2.96-113.2)
nux) compiled by GNU C version 2.96 20000731 (Red Hat Linux 7.3 2.96-
5      # options passed: -mno-abicalls -mrnames -mmips-as
6      # -mno-check-zero-division -march=r2000 -O0 -fleading-unders
7      # -finhibit-size-directive -fverbose-asm
8      # options enabled: -fpeephole -ffunction-cse -fkeep-static-
9      # -fpcc-struct-return -fsched-interblock -fsched-spec -fbran
g
10     # -fnew-exceptions -fcommon -finhibit-size-directive -fverbo
11     # -fgnu-linker -fargument-alias -fleading-underscore -fident
no
12     # -mrnames -mno-check-zero-division -march=r2000
13
14
15     .rdata
16     .align 2
17 $LC0:
18     .asciiz "Move disk "
19     .align 2
20 $LC1:
21     .asciiz " from peg "
22     .align 2
23 $LC2:
24     .asciiz " to peg "
25     .align 2
26 $LC3:
27     .asciiz ".\n"
28     .text
29     .align 2
30 _hanoi:
31     subu    $sp,$sp,24
32     sw      $ra,20($sp)
33     sw      $fp,16($sp)
34     move    $fp,$sp
35     sw      $a0,24($fp)
36     sw      $a1,28($fp)
37     sw      $a2,32($fp)
38     sw      $a3,36($fp)
39     lw      $v0,24($fp)
40     beq     $v0,$zero,$L3
41     lw      $v0,24($fp)
42     addu    $v0,$v0,-1
43     move    $a0,$v0
44     lw      $a1,28($fp)
45     lw      $a2,36($fp)
46     lw      $a3,32($fp)
47     jal     _hanoi
48     la      $a0,$LC0
49     jal     _print_string
50     lw      $a0,24($fp)
51     jal     _print_int
52     la      $a0,$LC1
53     jal     _print_string
54     lw      $a0,28($fp)
55     jal     _print_int
56     la      $a0,$LC2
57     jal     _print_string
58     lw      $a0,32($fp)
59     jal     _print_int
60     la      $a0,$LC3
```

```

61      jal      _print_string
62      lw       $v0,24($fp)
63      addu     $v0,$v0,-1
64      move     $a0,$v0
65      lw       $a1,36($fp)
66      lw       $a2,32($fp)
67      lw       $a3,28($fp)
68      jal      _hanoi
69 $L3:
70      move     $sp,$fp
71      lw       $ra,20($sp)
72      lw       $fp,16($sp)
73      addu     $sp,$sp,24
74      j        $ra
75      .rdata
76      .align   2
77 $LC4:
78      .asciiz  "Enter number of disks> "
79      .text
80      .align   2
81 main:
82      subu     $sp,$sp,32
83      sw       $ra,28($sp)
84      sw       $fp,24($sp)
85      move     $fp,$sp
86      la       $a0,$LC4
87      jal      _print_string
88      jal      _read_int
89      sw       $v0,16($fp)
90      lw       $a0,16($fp)
91      li       $a1,1           # 0x1
92      li       $a2,2           # 0x2
93      li       $a3,3           # 0x3
94      jal      _hanoi
95      move     $sp,$fp
96      lw       $ra,28($sp)
97      lw       $fp,24($sp)
98      addu     $sp,$sp,32
99      j        $ra

```

6.4 report2-1.c

```

1      int primes_stat[10];
2
3      char * string_ptr  = "ABCDEFGG";
4      char  string_ary[] = "ABCDEFGG";
5
6      void print_var(char *name, int val)
7      {
8          print_string(name);
9          print_string(" = ");
10         print_int(val);
11         print_string("\n");
12     }
13
14     main()
15     {
16         int primes_auto[10];
17
18         primes_stat[0] = 2;
19         primes_auto[0] = 3;
20
21         print_var("primes_stat[0]", primes_stat[0]);
22         print_var("primes_auto[0]", primes_auto[0]);
23     }

```

6.5 report2-1.s

```

1          .file          1 "report2-1.c"
2
3          # -G value = 0, Arch = r2000, ISA = 1
4          # GNU C version 2.96 20000731 (Red Hat Linux 7.3 2.96-113.2) (mipsel-li
nux) compiled by GNU C version 2.96 20000731 (Red Hat Linux 7.3 2.96-113.2).
5          # options passed: -mno-abicalls -mrnames -mmips-as
6          # -mno-check-zero-division -march=r2000 -O0 -fleading-underscore
7          # -finhibit-size-directive -fverbose-asm
8          # options enabled: -fpeephole -ffunction-cse -fkeep-static-consts
9          # -fpcc-struct-return -fsched-interblock -fsched-spec -fbranch-count-re
g
10         # -fnew-exceptions -fcommon -finhibit-size-directive -fverbose-asm
11         # -fgnu-linker -fargument-alias -fleading-underscore -fident -fmath-err
no
12         # -mrnames -mno-check-zero-division -march=r2000
13
14
15         .rdata          # 読み取り専用データセグメント
16         .align          2          # バイト揃え
17         $LC0:
18         .asciiz          "ABCDEFGH"      # 文字列情報
19         .data            # データセグメント
20         .align          2          # バイト揃え
21         _string_ptr:    # ポインタ
22         .word            $LC0          # アドレスを参照
23         .align          2          # バイト揃え
24         _string_ary:    # 配列
25         .asciiz          "ABCDEFGH"      # 文字列情報
26         .rdata          # 読み取り専用データセグメント
27         .align          2          # バイト揃え
28         $LC1:
29         .asciiz          " = "          # 文字列情報
30         .align          2          # バイト揃え
31         $LC2:
32         .asciiz          "\n"          # 文字列情報
33         .text            # テキストセグメント
34         .align          2          # バイト揃え
35         _print_var:
36         subu             $sp,$sp,24      # スタックの積立 (24 バイト)
37         sw               $ra,20($sp)     # $sp + 20 番地のアドレスに
$ra の値をバックアップ
38         sw               $fp,16($sp)     # $sp + 16 番地のアドレスに
$fp の値をバックアップ
39         move             $fp,$sp        # $sp の値で$fp を上書き
40         sw               $a0,24($fp)     # $fp($sp) + 24 番地のアドレ
スに$a0 の値をバックアップ (境界跨ぎ)
41         sw               $a1,28($fp)     # $fp($sp) + 28 番地のアドレ
スに$a1 の値をバックアップ (境界跨ぎ)
42         lw               $a0,24($fp)     # 元$a0 の値のバックアッ
ブをスタックからロード (同時に print_string の引数に)
43         jal             _print_string   # print_string の呼び出し
44         la               $a0,$LC1       # "="を指すアドレスを$a0
にロード
45         jal             _print_string   # print_string の呼び出し
46         lw               $a0,28($fp)     # 元$a1 の値のバックアッ
ブをスタックからロード (同時に print_string の引数に)
47         jal             _print_int      # print_int の呼び出し
48         la               $a0,$LC2       # "\n"を指すアドレスを$a0 にロード
49         jal             _print_string   # print_string の呼び出し
50         move             $sp,$fp        # $fp の値で$sp を上書き
51         lw               $ra,20($sp)     # $sp + 20 番地のアドレスか
ら$a0 の値を復元
52         lw               $fp,16($sp)     # $sp + 16 番地のアドレスか
ら$fp の値を復元
53         addu             $sp,$sp,24      # スタックの解放

```

```

54          j          $ra          # 呼び出し元に戻る
55          .rdata          # 読み取り専用データセグメント
56          .align          2          # バイト揃え
57      $LC3:
58          .asciiz          "primes_stat[0]"          # 文字列情報
59          .align          2          # バイト揃え
60      $LC4:
61          .asciiz          "primes_auto[0]"          # 文字列情報
62          .text          # テキストセグメント
63          .align          2          # バイト揃え
64      main:
65          subu          $sp,$sp,64          # スタックの積立て (64 バイト)
66          sw          $ra,60($sp)          # $sp + 60 番地
のアドレスに$ra の値をバックアップ
67          sw          $fp,56($sp)          # $sp + 56 番地
のアドレスに$fp の値をバックアップ
68          move          $fp,$sp          # $sp の値で$fp を上書き
69          li          $v0,2          # 0x2
70          sw          $v0,_primes_stat          # _primes_stat に対応す
るラベルのメモリ上のアドレスに$v0 の値を保存
71          li          $v0,3          # 0x3
72          sw          $v0,16($fp)          # $fp($sp) + 16
番地のアドレスに$v0 の値をバックアップ
73          la          $a0,$LC3          # "primes_stat[0
]"を指すアドレスを$a0 にロード
74          lw          $a1,_primes_stat          # _primes_stat に対応す
るラベルのメモリ上のアドレスの値を$a1 にロード
75          jal          _print_var          # print_var の呼び出し
76          la          $a0,$LC4          # "primes_auto[0
]"を指すアドレスを$a0 にロード
77          lw          $a1,16($fp)          # 元$v0 の値の
バックアップをスタックから$a1 にロード (同時に print_string の引数に)
78          jal          _print_var          # print_var の呼び出し
79          move          $sp,$fp          # $fp の値で$sp を上書き
80          lw          $ra,60($sp)          # $sp + 60 番地
のアドレスから$ra の値を復元
81          lw          $fp,56($sp)          # $sp + 56 番地
のアドレスから$fp の値を復元
82          addu          $sp,$sp,64          # スタックの解放
83          j          $ra          # 呼び出し元に戻る
84
85          .comm          _primes_stat,40          # データセグメントに 40 バイト確保

```

6.6 課題 2-5 で用いたコード

xspim で実行する場合は、1 行目の#include "spim.h"は不要である。

```

1      #include "spim.h"
2
3      void print_char(char c)
4      {
5          char s[2]; // バッファ (2 文字目は終端文字)
6
7          s[0] = c;    // 1 文字目代入
8          s[1] = '\0'; // 終端文字代入
9
10         print_string(s); // 文字列表示
11     }
12
13     void print_big_str(char *s)
14     {
15         int i = 0; // オフセット指定用
16         char c;    // 1 文字バッファ
17
18         for (i = 0; *(s + i * sizeof(char)) != '\0'; i++)

```

```

19     {
20         c = *(s + i * sizeof(char)); // 次の文字情報を c に代入
21         if (c >= 97 && c <= 122)      // 小文字なら大文字へ
22             c -= 32;
23         print_char(c); // 1 文字表示
24     }
25 }
26
27 void print_small_str(char *s)
28 {
29     int i = 0; // オフセット指定用
30     char c;    // 1 文字バッファ
31
32     for (i = 0; *(s + i * sizeof(char)) != '\0'; i++)
33     {
34         c = *(s + i * sizeof(char)); // 次の文字情報を c に代入
35         if (c >= 65 && c <= 90)      // 大文字なら小文字へ
36             c += 32;
37         print_char(c); // 1 文字表示
38     }
39 }
40
41 char read_char() // 1 文字入力関数
42 {
43     char buf[1025]; // 入力文字数は最大 1024 文字
44     char c;         // 最初の 1 文字を格納
45
46     read_string(buf, 1025); // 入力受付
47     c = buf[0];             // 最初の 1 文字を c に代入
48     return c;
49 }
50
51 void myprintf(char *fmt, ...)
52 {
53     int i;          // 引数から受け取った int 値を代入
54     int argc = 0;   // 何番目の引数か
55     char c;         // 引数から受け取った ASCII コードを代入
56     char *s;        // 引数となる文字列の先頭アドレスを格納
57
58     while (*fmt)
59     {
60         if (*fmt == '%')
61         {
62             fmt++; // 検索対象文字列を 1 文字右へ
63             argc++; // 引数のカウント数を 1 増やす
64             switch (*fmt)
65             {
66                 case 'd': // 数値の表示
67                     i = *((int *)((char *)&fmt + argc * sizeof(void *)));
68                     print_int(i); // 数値表示
69                     break;
70                 case 's': // 文字列の表示
71                     s = *((char **)((char *)&fmt + argc * sizeof(void *)));
72                     print_string(s); // 文字列表示
73                     break;
74                 case 'c': // 1 文字表示
75                     c = *((char *)((char *)&fmt + argc * sizeof(void *)));
76                     print_char(c); // 1 文字表示
77                     break;
78                 case 'b': // すべて小文字で表示 *s は char *
79                     s = *((char **)((char *)&fmt + argc * sizeof(void *)));
80                     print_small_str(s);
81                     break;
82                 case 'B': // すべて大文字で表示 *s は char *
83                     s = *((char **)((char *)&fmt + argc * sizeof(void *)));
84                     print_big_str(s);
85                     break;
86             }

```

```

87         }
88     else
89     {
90         print_char(*fmt); // 1文字表示
91     }
92     fmt++; // 検索対象文字列を1文字右へ
93 }
94 }
95
96 void myscanf(char *fmt, ...) // 引数は1個まで
97 {
98     int *i; // 引数となる変数のアドレスを格納
99     char *c; // 引数となる変数のアドレスを格納
100    char *s; // 引数となる変数のアドレスを格納
101
102    while (*fmt)
103    {
104        if (*fmt == '%')
105        {
106            fmt++; // 検索対象文字列を1文字右へ
107            switch (*fmt)
108            {
109                case 'd': // 数値の入力
110                    i = *((int **)((char *)&fmt + sizeof(void *))); // 代
111                        入先情報
112                    *i = read_int();
113                    break;
114                case 's': // 文字列の入力
115                        入先情報
116                    s = *((char **)((char *)&fmt + sizeof(void *))); // 代
117                        入先情報
118                    read_string(s, 1025);
119                    break;
120                case 'c': // 1文字入力
121                        入先情報
122                    c = *((char **)((char *)&fmt + sizeof(void *))); // 代
123                    *c = read_char();
124                    break;
125            }
126            fmt++; // 検索対象文字列を1文字右へ
127        }
128    }
129
130    int main() // 整数専用の電卓
131    {
132        int out = 0; // 計算結果
133        int in; // 計算用の入力数値
134        char mode = 'f'; // mode 選択用
135        char flag; // y or n フラグ用
136        int checkflag = -1; // in の入力の是非 (-1: 初回時のみ)
137        char his_operand; // 履歴を1回分保存
138        int his_num = 0; // 履歴を1回分保存
139
140        myprintf("Starting %b...\n", "CALCULATOR");
141
142        while (1)
143        {
144            myprintf("Please select the calc mode. (\"+\" or \"-\" or \"*\" or \"/\" or \"0\" or \"c\" or \"h\" or \"q\")\nMode? : ", out);
145            myscanf("%c", &mode); // mode 選択
146            if (mode == 'q') // q を選択した場合
147                break; // while ループを抜ける
148
149            if (mode == '0') // '0' を選択した場合
150            {
151                myprintf("Do you want to reset calculation result? (y or N)\n");
152                myscanf("%c", &flag); // フラグ選択

```

```

150         if (flag == 'y')          // y を選択した場合
151         {
152             myprintf("Reset calculation result.\n\n");
153             out = 0; // 計算結果を 0 にリセット
154         }
155         else
156             myprintf("Operation cancelled.\n\n");
157
158         continue;
159     }
160
161     if (mode == 'c') // c を選択した場合
162     {
163         myprintf("Result : %d\n\n", out); // 確認用に結果を出力
164         continue;                        // ループ先頭に戻る
165     }
166
167     if (mode == 'h') // h を選択した場合
168     {
169         if (checkflag == -1)
170         {
171             myprintf("Cannot use history func before calculating onc
e.\n\n");
172             continue;
173         }
174
175         myprintf("Do you want to calc %c%d again? (y or N)\n", his_o
perand, his_num);
176         myscanf("%c", &flag); // フラグ選択
177         if (flag == 'y')      // y を選択した場合
178         {
179             myprintf("Calculated %c%d again.\n", his_operand, his_nu
m);
180             mode = his_operand;
181             in = his_num;
182             checkflag = 1; // in に値を代入したため
183         }
184         else
185         {
186             myprintf("Operation cancelled.\n\n");
187             continue;
188         }
189     }
190
191     if (mode != '+' && mode != '-' && mode != '*' && mode != '/') //
モードを正しく選択しなかった場合
192     {
193         myprintf("Please select the correct mode.\n\n");
194         continue;
195     }
196
197     if (checkflag <= 0)
198     {
199         myprintf("Please input the number.(int type ONLY)\nNumber? :
");
200         myscanf("%d", &in); // 整数の入力値受付
201     }
202
203     his_operand = mode; // history に入力モードを登録
204     his_num = in;      // history に入力数値を登録
205
206     if (mode == '+') // 加算モード
207         out = out + in;
208     if (mode == '-') // 減算モード
209         out = out - in;
210     if (mode == '*') // 乗算モード
211         out = out * in;
212     if (mode == '/') // 除算モード

```

```

213         if (in != 0) // 0 除算は禁止
214             out = out / in;
215         else
216             myprintf("Cannot divide by zero.\nOperarion denied.\n");
217
218         myprintf("Result : %d\n\n", out); // 演算後に結果出力
219         checkflag = 0;                    // in は未入力
220     }
221     myprintf("%B : %d", "final result", out); // 最終結果出力
222     myprintf("\nQuit.\n");
223     return 0;
224 }

```

参考文献

- [1] David A. Patterson, John L. Hennessy, コンピュータの構成と設計 第5版 [下] -ハードウェアとソフトウェア-, 日経 BP 社, 2014.