

Prof. L. Thiele

Technische Informatik 1 - HS 2011

Lösungsvorschläge für Übung 7

Datum: 24.11.2011

1 Pipelining

In dieser Übung soll mit Hilfe des Simulators WinMIPS64 die Programmausführung in einer RISC-Pipeline untersucht werden. WinMIPS64 simuliert die 64-Bit Erweiterung der in der Vorlesung behandelten MIPS-Architektur.

Für diese Übung wird der 64-Bit MIPS Instruktionssatz verwendet. Im Vergleich zu dem aus der Vorlesung bekannten 32-Bit Instruktionssatz sind folgende Unterschiede relevant.

- Die 32 Register ($r_0 - r_{31}$) sind 64 Bit breit. r_0 ist fest mit 0 verdrahtet ($r_0 \equiv 0$).
- DADDI, $\$t, \s, imm : Doubleword Add Immediate (64-Bit Variante von ADDI).
- LD $\$t, offset(\$s)$: Load Doubleword (64-Bit Variante von LW).
- SD $\$t, offset(\$s)$: Store Doubleword (64-Bit Variante von SW).

Das Tool WinMIPS64 ist unter folgender Adresse verfügbar:

http://www.tik.ee.ethz.ch/tik/education/lectures/II1/materials/exercise_07.zip

WinMIPS64 ist eine Windows Anwendung. Falls Sie ein Windows Notebook dabei haben, empfiehlt es sich WinMIPS64 darauf auszuführen. Starten Sie dazu `winmips64.exe` aus dem oben genannten zip Archiv (es ist keine Installation notwendig).

Geben sie folgende Befehle ein, um WinMIPS64 unter den Tardis Maschinen auf Linux auszuführen (dazu wird die `wine` Laufzeitumgebung verwendet):

1. Entpacken des Archivs ins Home Verzeichnis: `unzip exercise_07.zip -d ~`
2. Wechseln in das neu erstellte Verzeichnis: `cd ~/exercise_07`
3. Setzen von Ausführungsrechten für das Setup-Skript: `chmod 755 setup.sh`
4. WinMIPS64 installieren und ausführen: `./setup.sh`
(WinMIPS64 wird dabei ins Verzeichnis `~/wine/drive_c/winmips64` installiert.)
5. WinMIPS64 startet automatisch. Wenn nicht, folgenden Befehl ausführen:
`wine c:\\winmips64\\winmips64.exe`

Die Anwendung des WinMIPS64 Simulators ist dank der graphischen Benutzeroberfläche intuitiv und bedarf keiner besonderen Vorkenntnisse. Bei Unklarheiten empfiehlt sich folgendes Tutorial zu lesen:

http://www.tik.ee.ethz.ch/tik/education/lectures/II1/materials/...exercise_07_winmips64tut.pdf

Gegeben sei folgendes Programm für den MIPS64-Prozessor, welches die 4 Elemente des Arrays DATA um 1 inkrementiert. Die Elemente des Arrays sind 64 Bit breit.

```
.data
DATA: .word 12,13,14,15

.code
main:
    daddi    r17,r0,DATA    #save address of array DATA to register r17
    daddi    r8,r0,4
loop:
    ld      r9,0(r17)
    daddi    r9,r9,1
    sd      r9,0(r17)
    daddi    r17,r17,8
    daddi    r8,r8,-1
    bnez    r8,loop
    halt                    #stop execution
```

1.1 Kurze Verständnisfragen

- Welche Funktion hat das Register r8? Welchen Wert muss es vor dem Schleifendurchlauf erhalten, falls das Array 30 Elemente enthält?
- Warum wird beim Schreiben der Arraywerte in den Speicher der Offset in 8er-Schritten erhöht?
- Übersetzen Sie das obige Programm sinngemäss nach C.

Lösung:

- Das Register r8 dient als Zählvariable für die Schleife durch alle Elemente des Arrays. Falls das Array 30 Elemente enthält, muss r8 mit dem Wert 30 initialisiert werden.
- Die Register enthalten 64-Bit (= 8 Byte) Werte, der Speicherzugriff erfolgt aber Byte-weise. Siehe Folie 8 in Kapitel 2 der Vorlesungsunterlagen.
- ```
long data[4]; // 64-bit Integer Werte entsprechen Datentyp long
int i = 0; // obwohl die Variablen i und j nur 32-bit integer Werte sind,
int j = 4; // werden sie einem 64-bit Register zugewiesen
do {
 data[i] = data[i] + 1;
 i = i + 1;
 j = j - 1;
} while (j != 0);
```

### 1.2 Pipelining mit und ohne Forwarding

WinMIPS64 stellt Stalls abhängig von ihrer Ursache in zwei Varianten dar (siehe Tabelle 1): (1) muss auf Daten von einer vorhergehenden Instruktion gewartet werden (Daten Hazard), wird die Stufe solange wiederholt bis die korrekten Werte am Eingang der Stufe vorliegen. Die Wiederholung der Stufe wird dabei

|               |    |    |    |     |     |    |     |     |    |
|---------------|----|----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|
| daddi r1,r0,1 | IF | ID | EX | MEM | WB  |    |     |     |    |
| sd r1,0(r2)   |    | IF | ID | raw | raw | EX | MEM | WB  |    |
| daddi r3,r3,4 |    |    | IF |     |     | ID | EX  | MEM | WB |

Tabelle 1: Darstellung von Stalls in WinMIPS64.

mit raw gekennzeichnet. (2) Muss eine Instruktion durch einen Stall einer vorhergehenden Instruktion blockiert werden, wird die Wiederholung der Stufe mit einem leeren Feld gekennzeichnet.

In der Vorlesung sowie der Musterlösung wird folgende vereinfachte Darstellung verwendet (Tabelle 2). Dabei wird die Pipeline Stufe eines Befehls erst dann ausgeführt wenn das korrekte Eingangssignal vorliegt.

|               |    |    |    |     |    |    |     |     |    |
|---------------|----|----|----|-----|----|----|-----|-----|----|
| daddi r1,r0,1 | IF | ID | EX | MEM | WB |    |     |     |    |
| sd r1,0(r2)   |    | IF | -  | -   | ID | EX | MEM | WB  |    |
| daddi r3,r3,4 |    |    |    |     | IF | ID | EX  | MEM | WB |

Tabelle 2: Vereinfachte Darstellung von Stalls.

Gehen Sie folgendermassen vor, um das Programm in WinMIPS64 zu laden:

1. Laden des Programmes: Im WinMIPS64 Menü File → Open. Öffnen sie die Datei `~/ .wine/drive_c/winmips64/ex7_mips64.s`.
  2. Ausführen des Programmes: Benutzen Sie dazu das WinMIPS64 Menü Execute.
- (a) Simulieren Sie das Pipelineverhalten **ohne Data Forwarding** für die ersten zwei Iterationen der Schleife. *Enable forwarding, Enable Branch Target Buffer* sowie *Enable Delay Slot* unter *Configuration* müssen ausgeschaltet sein.
- I. Geben Sie das Pipelining-Diagramm in der vorbereiteten Tabelle 3 an.
  - II. Welchen Anweisungen führen zu Wartezyklen? Erklären Sie deren Zustandekommen. Geben sie ausserdem an, ob es sich um Strukturelle, Daten oder Ablauf Hazards handelt.
  - III. Wie viele Taktzyklen werden für die Ausführung des kompletten Programms insgesamt benötigt? Wie viele Instruktionen werden dabei abgearbeitet? Wie gross ist der CPI (cycles per instruction)?
  - IV. In der WB Stufe werden die Resultate ins Register zurück geschrieben, während die ID Stufe die für die Instruktion benötigten Werte aus dem Register liest. Wieso kann bei der Ausführung der `addi r9,r9,1` Instruktion die ID Stufe gleichzeitig zur WB Stufe der vorhergehenden Instruktion `ld r9,0(r17)` geschehen (beide Instruktionen greifen auf das Register r9 zu)?

### Lösung:

- I. Pipelining Diagramm: siehe Tabelle 3
- II. Wartezyklen:
  - `ld r9,0(r17)`: Daten Hazard r17 (Nur im ersten Schlaufendurchlauf)
  - `daddi r9,r9,1`: Daten Hazard r9
  - `sd r9,0(r17)`: Daten Hazard r9
  - `bnez r8,loop`: Daten Hazard r8
  - `halt`: Ablauf Hazard (die Instruktion `halt` wird unnötigerweise in die Pipeline geladen).
- III. Das Programm benötigt 59 Zyklen für die Ausführung. Es werden 27 Instruktionen abgearbeitet. Der CPI ist  $59/27 = 2.18$ .

- IV. Die ID sowie die WB Stufen greifen beide auf das Registerfeld zu. Um Inkonsistenz zu verhindern wird innerhalb eines Cycles zuerst ins Register geschrieben und danach erst gelesen (es gibt quasi zwei Subcycles). Wird also ein neues Datum geschrieben, kann es gleichzeitig (also nicht erst nach dem nächsten Taktsignal) gelesen werden (siehe Vorlesungsfolie 9-13).
- (b) Simulieren Sie das Pipelineverhalten **mit Data Forwarding** für die ersten zwei Iterationen der Schleife. *Enable Branch Target Buffer* sowie *Enable Delay Slot* sollen weiterhin ausgeschaltet sein. Hinweis: In WinMIPS64 sind die Register welche für das Forwarding potentiell zur Verfügung stehen farbig markiert. Die Farbe entspricht der Pipeline Stufe (des vorhergehenden Zyklus) welche den Wert des Registers zur Verfügung stellt.
- I. Geben Sie das Pipelining-Diagramm in der vorbereiteten Tabelle 4 an. Zeichnen Sie mittels Pfeilen im Diagramm ein, wo der Data-Forwarding-Mechanismus eingesetzt wird.
  - II. Wie viele Taktzyklen werden für die Ausführung des Programms insgesamt benötigt? Wie viele Instruktionen werden dabei abgearbeitet? Wie gross ist der CPI (cycles per instruction)?
  - III. Wieso gibt es bei der Instruktion `bnez r8,loop` trotz forwarding einen Stall?

**Lösung:**

- I. Pipelining Diagramm: siehe Tabelle 4
- II. Das Programm benötigt 42 Zyklen für die Ausführung. Es werden 27 Instruktionen abgearbeitet. Der CPI ist  $42/27 = 1.56$ .
- III. Um die Pipeline bei Sprüngen zu beschleunigen, wird die Ausführung des Vergleichs in die Decode Phase vorverlegt (siehe Folie 48 in Kapitel 9 der Vorlesungsunterlagen). Die Dekodierung der Instruktion `bnez r8,loop` kann also erst geschehen, nachdem der neue Wert von `r8` bekannt ist.

### 1.3 Pipelining mit Forwarding und Delay Slot

Die Pipeline realisiere zusätzlich einen Branch Delay mit einem Delay Slot und implementiere Data Forwarding wie im Skript beschrieben.

- (a) Optimieren Sie die angegebene Programmschleife mittels Umordnen der Instruktionen so, dass unter Ausnützung des Delay Slots die Ausführungszeit weiter reduziert werden kann.
- (b) Benutzen Sie WinMIPS64 um die Lösung zu verifizieren. Die Funktion *Enable Delay Slot* muss dabei aktiviert werden. Insbesondere soll darauf geachtet werden, dass am Ende des Programmes das korrekte Resultat im Array steht (siehe Programmfenster Data welches die Werte im Speicher hexidezimal darstellt). Wie viele Zyklen dauert die Ausführung des Programmes? Wieviele Stalls treten dabei auf?

**Lösung:**

Eine mögliche Lösung ist im Folgenden angegeben. Diese Lösung versucht möglichst die abhängigen Instruktionen weit voneinander entfernt auszuführen. Im Delay Slot, also der Instruktion nach der Branch Instruktion, kann eine Instruktion der normalen Schleife ausgeführt werden, da diese Instruktion in jedem Fall, also unabhängig vom Resultat der Branch Instruktion, ausgeführt wird.

Der neue Programmcode benötigt nur noch 31 Zyklen für die 27 Instruktionen und erreicht somit das theoretische Maximum. Der CPI beträgt  $31/27 = 1.148$ .

```
.data
DATA: .word 12,13,14,15

.code
main:
daddi r17,r0,DATA #save address of array DATA to register r17
daddi r8,r0,4
loop:
ld r9,0(r17)
daddi r17,r17,8
daddi r8,r8,-1
daddi r9,r9,1
bnez r8,loop
sd r9,-8(r17)
halt #stop execution
```

|                   | 1  | 2  | 3  | 4   | 5   | 6  | 7   | 8  | 9  | 10  | 11 | 12 | 13  | 14  | 15  | 16 |
|-------------------|----|----|----|-----|-----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|
| daddi r17,r0,DATA | IF | ID | EX | MEM | WB  |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| daddi r8,r0,4     |    | IF | ID | EX  | MEM | WB |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| ld r9,0(r17)      |    |    | IF | -   | ID  | EX | MEM | WB |    |     |    |    |     |     |     |    |
| daddi r9,r9,1     |    |    |    |     | IF  | -  | -   | ID | EX | MEM | WB |    |     |     |     |    |
| sd r9,0(r17)      |    |    |    |     |     |    |     | IF | -  | -   | ID | EX | MEM | WB  |     |    |
| daddi r17,r17,8   |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     | IF | ID | EX  | MEM | WB  |    |
| daddi r8,r8,-1    |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    | IF | ID  | EX  | MEM | WB |
| bnez r8,loop      |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    | IF  | -   | -   | ID |
| halt              |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     | IF |
| ld r9,0(r17)      |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| daddi r9,r9,1     |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| sd r9,0(r17)      |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| daddi r17,r17,8   |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| daddi r8,r8,-1    |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| bnez r8,loop      |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |
| halt              |    |    |    |     |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |

9

|                   | 17 | 18  | 19 | 20  | 21 | 22 | 23  | 24 | 25 | 26  | 27  | 28  | 29 | 30 | 31  | 32 |
|-------------------|----|-----|----|-----|----|----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|
| daddi r17,r0,DATA |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| daddi r8,r0,4     |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| ld r9,0(r17)      |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| daddi r9,r9,1     |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| sd r9,0(r17)      |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| daddi r17,r17,8   |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| daddi r8,r8,-1    |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| bnez r8,loop      | EX | MEM | WB |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| halt              |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| ld r9,0(r17)      | IF | ID  | EX | MEM | WB |    |     |    |    |     |     |     |    |    |     |    |
| daddi r9,r9,1     |    | IF  | -  | -   | ID | EX | MEM | WB |    |     |     |     |    |    |     |    |
| sd r9,0(r17)      |    |     |    |     | IF | -  | -   | ID | EX | MEM | WB  |     |    |    |     |    |
| daddi r17,r17,8   |    |     |    |     |    |    |     | IF | ID | EX  | MEM | WB  |    |    |     |    |
| daddi r8,r8,-1    |    |     |    |     |    |    |     |    | IF | ID  | EX  | MEM | WB |    |     |    |
| bnez r8,loop      |    |     |    |     |    |    |     |    |    | IF  | -   | -   | ID | EX | MEM | WB |
| halt              |    |     |    |     |    |    |     |    |    |     |     |     | IF |    |     |    |

Tabelle 3: Pipelining Diagramm für Ausführung ohne Data Forwarding

|                   | 1  | 2  | 3  | 4    | 5   | 6    | 7   | 8    | 9    | 10  | 11  | 12 | 13  | 14 | 15   | 16  |
|-------------------|----|----|----|------|-----|------|-----|------|------|-----|-----|----|-----|----|------|-----|
| daddi r17,r0,DATA | IF | ID | EX | MEM↓ | WB  |      |     |      |      |     |     |    |     |    |      |     |
| daddi r8,r0,4     |    | IF | ID | EX   | MEM | WB   |     |      |      |     |     |    |     |    |      |     |
| ld r9,0(r17)      |    |    | IF | ID   | ↑EX | MEM↓ | WB  |      |      |     |     |    |     |    |      |     |
| daddi r9,r9,1     |    |    |    | IF   | ID  | -    | ↑EX | MEM↓ | WB   |     |     |    |     |    |      |     |
| sd r9,0(r17)      |    |    |    |      | IF  | -    | ID  | EX   | ↑MEM | WB  |     |    |     |    |      |     |
| daddi r17,r17,8   |    |    |    |      |     |      | IF  | ID   | EX   | MEM | WB  |    |     |    |      |     |
| daddi r8,r8,-1    |    |    |    |      |     |      |     | IF   | ID   | EX↓ | MEM | WB |     |    |      |     |
| bnez r8,loop      |    |    |    |      |     |      |     |      | IF   | -   | ↑ID | EX | MEM | WB |      |     |
| halt              |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     | IF  |    |     |    |      |     |
| ld r9,0(r17)      |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     | IF | ID  | EX | MEM↓ | WB  |
| daddi r9,r9,1     |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    | IF  | ID | -    | ↑EX |
| sd r9,0(r17)      |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    |     | IF | -    | ID  |
| daddi r17,r17,8   |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    |     |    |      | IF  |
| daddi r8,r8,-1    |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    |     |    |      |     |
| bnez r8,loop      |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    |     |    |      |     |
| halt              |    |    |    |      |     |      |     |      |      |     |     |    |     |    |      |     |

7

|                   | 17   | 18   | 19  | 20  | 21 | 22  | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 |
|-------------------|------|------|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| daddi r17,r0,DATA |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r8,r0,4     |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| ld r9,0(r17)      |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r9,r9,1     |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| sd r9,0(r17)      |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r17,r17,8   |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r8,r8,-1    |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| bnez r8,loop      |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| halt              |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| ld r9,0(r17)      |      |      |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r9,r9,1     | MEM↓ | WB   |     |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| sd r9,0(r17)      | EX   | ↑MEM | WB  |     |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r17,r17,8   | ID   | EX   | MEM | WB  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| daddi r8,r8,-1    | IF   | ID   | EX↓ | MEM | WB |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| bnez r8,loop      |      | IF   | -   | ↑ID | EX | MEM | WB |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
| halt              |      |      |     | IF  |    |     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Tabelle 4: Pipelining Diagramm für Ausführung mit Data Forwarding. Pipelinestufen welche potentiell Daten fürs Forwarding bereitstellen sind schattiert. Forwarding wird mit Pfeilen dargestellt (↓ markiert die Forwarding Stufe, ↑ die Empfänger Stufe).