Freie Universität Berlin

MMIX - Crashkurs

TI-II

Rechnerarchitektur

MMIX

Freie Universität Berlin

Einführung

- Aussprache: „em-micks“
- MMIX ist ein virtueller Prozessor, mit eigener Assemblersprache
- Um MMIX-Programme assemblieren und ausführen zu können, benötigt man:
  - Den Assembler mmixal, der eine Folge von Assemblerbefehlen in eine Folge von Maschinenbefehlen konvertiert (.mms-Datei -> .mmo-Datei)
  - Den Emulator mmix, der die Ausführung eines Maschinenprogramms (.mmo-Datei) auf MMIX emuliert, d.h. sich so verhält als ob das Programm auf MMIX ausgeführt würde.
- mmixal und mmix gibt es für alle gängigen Betriebssysteme

Ressourcen

- MMIX-Homepage

  http://www-cs-faculty.stanford.edu/~knuth/mmix.html
- MMIX-Seite zur Vorlesung

  http://cst.mi.fu-berlin.de/teaching/SS08/19503-V-TI-II/MMIX/MMIX.html

MMIX - Speicher

Freie Universität Berlin

Register

- 256 Register à 64 Bit für allgemeine Aufgaben: $0, ..., $255
- 32 reservierte Register für spezielle Aufgaben: rA,...,rZ,rBB,rTT,rWW,rXX,rYY,rZZ (Divisionsrest, Überläufe, Operanden, Steuerungsbits, ...)

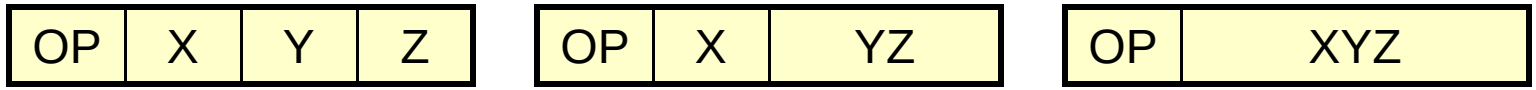
Virtueller Speicher

- 2^{64} Byte adressierbar durch M[0], ..., M[2^{64}-1]
- Zugriff mit größerer Wortlänge:
  - Wydes (16 Bit): $M_2[0]=M_2[1]$, $M_2[2]=M_2[3]$, ..., $M_2[2^{64}-2]=M_2[2^{64}-1]$
  - Tetras (32 Bit): $M_4[0]=M_4[1]=M_4[2]=M_4[3]$, ..., $M_4[2^{64}-4]=M_4[2^{64}-3]=M_4[2^{64}-2]=M_4[2^{64}-1]$
  - Octas (64 Bit): $M_8[0]=...=M_8[7]$, ..., $M_8[2^{64}-8]=...=M_8[2^{64}-1]$
- Kann Daten und Befehle enthalten

MMIX - Maschinenbefehle

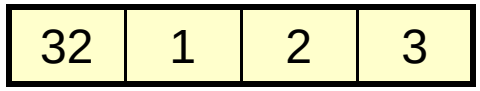
Freie Universität Berlin

Jeder Maschinenbefehl umfasst 4 Bytes

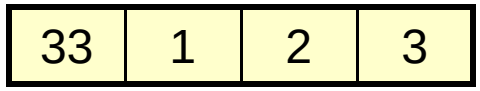


- OP: Operator
- X, Y, Z, YZ, XYZ: Operanden

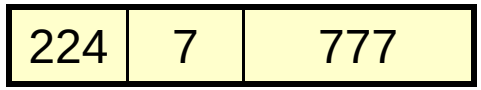
Beispiele



Addiert die Inhalte von Register 2 und 3 und legt das Ergebnis im Register 1 ab (ADD $1,$2,$3)



Addiert 3 zum Inhalt von Register 2 und legt das Ergebnis in Register 1 ab (ADD $1,$2,3)



Setzt die höchstwertigen 16 Bit des Registers 7 auf 777 (SETH $7,777)

MMIX - Assembler

Freie Universität Berlin

Aufgabe

Konvertierung eines Assemblerprogramms in ein Maschinenprogramm

Assemblerprogramm

- besteht aus einer Folge von Zeilen, die jeweils eine Anweisung enthalten
- Eine Anweisung besteht aus

  [Bezeichner] Operator [Operanden] (Bezeichner und evtl. auch Operanden sind optional)

  getrennt durch ein oder mehrere Leerzeichen.
- Bezeichner: alle Zeichen bis zum ersten Leerzeichen
- Operator: erstes Nicht-Leerzeichen nach Bezeichner bis zum nächsten Leerzeichen
- Operanden: erstes Nicht-Leerzeichen nach Operator bis zum nächsten Leerzeichen
- alles Weitere einer Zeile wird ignoriert

Freie Universität Berlin

Beispiel eines einfachen Assemblerprogramms

```
        LOC     #100        Das Folgende ab Position #100 im Speicher ablegen
X1      BYTE    4           Ein Byte im Speicher mit 4 beschreiben
X2      WYDE    2           Nächstes Wyde mit 2 beschreiben
X3      OCTA    40          Nächstes Octa mit 40
List    BYTE    1,2,3       Die 3 folgenden Bytes mit den Werten 1,2,3 füllen
Y       IS      $2          Y als Synonym für $2 definieren

Main    LDB     $1,X1       Wert von X1 aus Speicher in Register $1
        LDW     Y,X2        usw.
        LDO     $3,X3
        MUL     $3,Y,$3     $3 := $2*$3
        ADD     $3,$3,$1    $3 := $3+$1
        SUB     Y,$1,Y      $2 := $1-$2
        DIV     $3,$3,Y     $3 := $3/$2
        TRAP    0,Halt,0    Programm beenden
```

Das Programm enthält

- Pseudo-Operatoren
- Bezeichner (Label)
- Assemblerbefehle
- Operanden und Kommentare

Freie Universität Berlin

Konstanten

- Folgen von Dezimalziffern: 0,1,...,9
- Folgen von Hexadezimalziffern angeführt von einem #, z.B. #1, #C, #FF, #ABCDEF
- Zeichen in einfachen Anführungszeichen: 'a', 'b', 'C', '1', '"', ...
- Zeichenketten: z.B. "Hello" entspricht der Folge 'H', 'e', 'l', 'l', 'o'

Pseudo-Operatoren

entsprechen keinen Maschinenbefehlen, beeinflussen aber das Assemblieren

- *Label* IS *Ausdruck*
  - bindet den Bezeichner *Label* an *Ausdruck*, d.h. *Label* wird ein Synonym für *Ausdruck*
  - *Ausdruck* kann entweder eine Konstante oder eine Registerbezeichnung sein
- [*Label*] LOC *Ausdruck*
  - bindet den Bezeichner *Label* an die aktuelle Position im Speicher
  - die aktuelle Speicherposition wird auf *Ausdruck* verschoben
  - *Ausdruck* muss eine Konstante sein

MMIX - Assembler

- [*Label*] BYTE *Ausdruck*$_1$,*Ausdruck*$_2$,...,*Ausdruck*$_n$
  - bindet den Bezeichner *Label* an die aktuelle Speicherposition
  - füllt die folgenden Bytes mit den Werten von Ausdruck$_1$ bis Ausdruck$_n$
  - erhöht die aktuelle Position um *n*
- WYDE, TETRA, OCTA:
  - aktuelle Speicherposition wird auf ein Vielfaches von 2, 4 bzw. 8 gesetzt
  - analoges Vorgehen zu BYTE mit größeren Werten

Beispiel: Anlegen eines 255 Byte großen Puffers

```
           LOC  #100              Das Folgende ab Position #100 im Speicher ablegen
BufSize    IS   255               Puffergröße auf 255 setzen
Buffer     BYTE 0                 Anfang des Puffers
           LOC  Buffer+BufSize    255 Bytes überspringen
Var        WYDE 7                 Weitere Variable anlegen
           ...
Main       LDA  $1,Buffer         Programmstart
           ...
```

Die Programmausführung beginnt beim Bezeichner **`Main`**.

Freie Universität Berlin

Operationen auf Registern

- GET $X,rx:

  Der Inhalt des Spezialregisters rx wird in Register $X kopiert

- GETA $X,marke (Get Address):

  Die Speicheradresse von „marke“ wird in $X abgelegt

- PUT rx,$X:

  Der Inhalt des Registers $X wird in das Spezialregister rx kopiert

- SET $X,$Y:

  Der Inhalt von $Y wird nach $X kopiert

- SET $X,Y:

  Der Inhalt des Registers $X wird auf Y gesetzt

$X,Y,Z \in \{0,1,...,255\}$

$x \in \{A,B,...,Z,BB,TT,WW,XX,YY,ZZ\}$

MMIX - Befehlssatz

Freie Universität Berlin

Laden: Speicher -> Register

- LDB $X,$Y,$Z bzw. LDB $X,$Y,Z (Load Byte):
  Lädt den Inhalt von M[$Y+$Z] bzw. M[$Y+Z] als vorzeichenbehaftete 8-Bit-Zahl nach $X.
- LDBU (Load Byte Unsigned):
  analog, jedoch vorzeichenlos, d.h. als Zahl zwischen 0 und 255
- LDW[U],LDT[U],LDO[U] (Load Wyde, Load Tetra, Load Octa):
  analog für M_2[$Y+$Z], M_4[$Y+$Z] und M_8[$Y+$Z]

Speichern: Register -> Speicher

- STB $X,$Y,$Z|Z (Store Byte):
  Das niederwertigste Byte des Registers $X wird in M[$Y+$Z] bzw. M[$Y+Z] gespeichert.
  Ein Integer-Overflow wird signalisiert, falls $X $\notin$ [-128,127]
- STBU (Store Byte Unsigned):
  analog, ohne Test auf Overflow
- STW[U],STT[U],STO[U] (Store Wyde, Store Tetra, Store Octa):
  analog für Wyde, Tetra und Octa
- STCO X,$Y,$Z|Z (Store Constant Octabyte):
  Das Byte X wird in M_8[$Y+$Z] bzw. M_8[$Y+Z] gespeichert.

Freie Universität Berlin

Addieren und Subtrahieren

- ADD $X,$Y,$Z|Z:

  berechnet $Y+$Z ($Y+Z) unter Verwendung der 2-er Komplement-Arithmetik und legt das Ergebnis in $X ab (erzeugt einen Integer-Overflow, falls die Summe $\notin [-2^{63},2^{63}-1]$)

- ADDU:

  berechnet ($Y+$Z) mod 2^{64} (($Y+Z) mod 2^{64}) und legt das Ergebnis in $X ab

- SUB $X,$Y,$Z|Z:

  berechnet $Y-$Z ($Y-Z) unter Verwendung vorzeichenbehafteter 2-er Komplement-Arithmetik und legt das Ergebnis in $X ab (erzeugt einen Integer-Overflow, falls die Differenz $\notin [-2^{63},2^{63}-1]$)

- SUBU $X,$Y,$Z|Z:

  berechnet ($Y-$Z) mod 2^{64} (($Y-Z) mod 2^{64}) und legt das Ergebnis in $X ab

- NEG $X,Y,$Z|Z:

  analog zu SUB wird Y-$Z (Y-Z) berechnet und in $X abgelegt

- NEGU $X,Y,$Z|Z:

  analog zu SUBU wird (Y-$Z) mod 2^{64} ((Y-Z) mod 2^{64}) berechnet und in $X abgelegt

Freie Universität Berlin

Multiplizieren und Dividieren

- MUL $X,$Y,$Z|Z:

  Vorzeichenbehaftetes Produkt von $Y und $Z (Z) wird in $X abgelegt
  (erzeugt einen Integer-Overflow, falls die Summe $\notin [-2^{63}, 2^{63}-1]$)

- MULU $X,$Y,$Z|Z:

  Die niederwertigen 64 Bits des vorzeichenlosen Produktes von $Y und $Z (Z) werden in $X und die höherwertigen 64 Bits im Spezialregister rH abgelegt.

- DIV $X,$Y,$Z|Z:

  Der vorzeichenbehaftete Quotient von $Y und $Z (Z) wird in $X und der vorzeichenbehaftete Rest im Spezielregister rR abgelegt.
  Behandlung von Spezialfällen (z.B. $Z=0): siehe Manual

- DIVU $X,$Y,$Z|Z:

  Die vorzeichenlose 128-Bit-Zahl bestehend aus dem Spezialregister rD und $Y wird durch $Z (Z) dividiert und der Quotient in $X und der Divisionsrest in rR abgelegt.

Freie Universität Berlin

Bitweise Operationen: Logik

- AND $X,$Y,$Z|Z: (analog OR, XOR)

  $X ergibt sich durch bitweise Und-Verknüpfung der Bits von $Y und $Z (Z):
  $x_i = $y_i ∧ $z_i ($x_i = $y_i ∧ z_i) für Bits i = 0,...,63 der Operanden

- ANDN $X,$Y,$Z|Z: (analog ORN)

  analog mit $x_i = $y_i ∧ ¬$z_i

- NAND $X,$Y,$Z|Z:

  $x_i = ¬ ($y_i ∧ $z_i)

- MUX $X,$Y,$Z|Z:

  In Abhängigkeit des Spezialregisters rM werden die Bits von $X auf $Y oder $Z (Z) gesetzt:
  $x_i = ($y_i ∧ rM_i) ∨ ($z_i ∧ ¬ rM_i)

- Weitere, exotische Befehle (siehe Manual):
  - BDIF, WDIF, TDIF, ODIF
  - SADD, MOR, MXOR

Freie Universität Berlin

Shift-Operationen

- SL $X,$Y,$Z|Z (Shift Left):

  Links-Shift: $X := $Y·$2^{\$Z}$ ($X := $Y·$2^{Z}$) [$Y ist vorzeichenbehaftet, $Z (Z) vorzeichenlos]
  Integer-Overflow, falls das Ergebnis $\notin [-2^{63},2^{63}-1]$
- SLU (Shift Left Unsigned): analog, wobei auch $Y als vorzeichenlos interpretiert wird
- SR, SRU (Shift Right): analog für Rechts-Shift

Setzen von 16-Bit-Werten

- SETH $X,YZ (Set to High Wyde):

  Setzt die höchstwertigen 16 Bit von $X auf YZ: $X := 2^{48}·YZ
- SETMH, SETML, SETL (Set to Medium High, Medium Low, Low):

  analog mit $X := 2^{32} ·YZ, $X := 2^{16} ·YZ und $X := 2^{0} ·YZ
- INCH $X,YZ (INCMH, INCML, INCL) (Increase by High Wyde, Medium High, ...):

  Die 16-Bit-Zahl YZ wird nach links geshiftet und zu $X addiert (Überläufe werden ignoriert):
  $X := $X + 2^{48} ·YZ ($X := $X + 2^{32} ·YZ, $X := $X + 2^{16} ·YZ, $X := $X + 2^{0} ·YZ)
- ORH $X, YZ: (ORMH, ORML, ORCL , ANDNH , ANDNMH, ANDNML, ANDNL)

  Bitweise Oder-/NANDN-Verknüpfung mit der um 48,32,16,0 Bit nach links geshifteten Zahl YZ

MMIX - Befehlssatz

Freie Universität Berlin

Vergleiche

- CMP $X,$Y,$Z|Z (Compare):

$$\$X = \begin{cases} -1 & \text{falls } \$Y<\$Z \\ 0 & \text{falls } \$Y=\$Z \\ 1 & \text{falls } \$Y>\$Z \end{cases}$$

unter Verwendung vorzeichenbehafteter Arithmetik

- CMPU: analog mit vorzeichenloser Arithmetik

Bedingte Anweisungen

- CSN $X,$Y,$Z|Z: (conditionally set if negative)

  Wenn $Y negativ ist, wird $X:=$Z ($X:=Z) ausgeführt, andernfalls nichts

- CSZ, CSP, CSOD, CSNN, CSNZ, CSNP, CSEV:

  analog für „if zero“, „if positive“, „if odd“, „if nonnegative“, „if nonzero“, „if nonpositive“, „if even“

- ZSN $X,$Y,$Z|Z: (zero or set if negative)

  Wenn $Y negativ ist, wird $X:=$Z ($X:=Z) ausgeführt, andernfalls $X:=0

- ZSZ, ZSP, ZSOD, ZSNN, ZSNZ, ZSNP, ZSEV:

  analog

MMIX - Befehlssatz

Freie Universität Berlin

Programm-Verzweigung

Normalerweise wird nach dem Befehl in $M_4[\lambda]$ der Befehl in $M_4[\lambda+4]$ ausgeführt.

- BN $X,marke: (branch if negative)

  Wenn $X negativ ist, springe zu „marke“
- BZ, BP, BOD, BNN, BNZ, BNP, BEV:

  analog (vgl. CS...)

Beispiel:

- BP $7,@+8: wenn $7>0, wird der nächste Befehl übersprungen
  (@ beschreibt die Position des aktuellen Befehls)

- JMP marke:

  Springe zu „marke“
- GO $X,$Y,$Z|Z:

  Springe zu $Y+$Z ($Y+Z) und setze $X:= λ+4

Unterprogramm-Aufrufe (siehe Manual)

- PUSHJ, PUSHGO
- POP

Freie Universität Berlin

Operationen mit Gleitkommazahlen (IEEE-754):

- FADD $X,$Y,$Z (Floating Add):

  Ergebnis der Addition der Gleitkommazahlen $Y und $Z wird in $X abgelegt.
  Diverse Spezialfälle möglich: siehe Manual

- FSUB, FMUL, FDIV:

  analog für Subtraktion, Multiplikation und Division

- FREM $X,$Y,$Z (Floating Remainder):

  berechnet den Rest der Division $Y/$Z
  (=$Y – n*$Z, wobei n die ganze Zahl ist, die am nächsten an $Y/$Z liegt)

- FSQRT $X,$Z (Floating Square Root):

  berechnet die Quadratwurzel von $Z und legt das Ergebnis in $X ab
  (optional kann durch Y angegeben werden, wie gerundet werden soll)

- FINT $X,$Z (Floating Integer):

  $Z wird auf eine ganze Zahl gerundet und das Ergebnis in $X abgelegt

- Vergleichsoperatoren FCMP, FEQL, FUN, FCMPE, FEQLE, FUNE:

  siehe Manual

Konvertierung Gleitkommazahl <-> Ganzzahl

- FIX $X,$Z: (Convert Floating to Fixed)

  Analog zu FINT wird eine Gleitkommazahl in eine Ganzzahl konvertiert. Mit FIX können jedoch Ausnahmesituation abgefangen werden.

- FIXU $X,$Z:

  Analog zu FIX ohne dass Ausnahmesituationen auftreten.

- FLOT $X,$Z|Z: (Convert Fixed to Floating)

  In $X wird diejenige Gleitkommazahl abgelegt, die $Z (Z) am nächsten ist. Falls Rundungen (gemäß Y) auftreten, wird eine „floating inexact exception“ ausgelöst.

- FLOTU $X,$Z|Z:

  Analog zu FLOT, jedoch wird $Z als vorzeichenlose Ganzzahl interpretiert

Rundungsparameter Y

- Mögliche Werte:
  - ROUND_OFF: Nachkommastellen abschneiden
  - ROUND_UP: In Richtung +∞ runden
  - ROUND_DOWN: In Richtung -∞ runden
  - ROUND_NEAR: Zur nächsten ganzen Zahl runden

MMIX - Befehlssatz

Freie Universität Berlin

Vordefinierte Systemaufrufe

- TRAP 0,Halt,0:

  Programmende

- TRAP 0,Fputs,StdOut:

  Ausgabe einer Zeichenkette auf der Standardausgabe

  $255 muss die Adresse der Zeichenkette enthalten

- TRAP 0,Fgets,StdIn:

  Liest eine Zeile von der Standardeingabe

  $255 enthält Adresse und Größe des Eingabepuffers

- Weitere Systemaufrufe:
  - Fopen: Öffnet eine Datei
  - Fclose: Schließt eine Datei
  - Fread: Liest aus einer Datei
  - Fwrite: Schreibt in eine Datei

```
Greeting  BYTE  "Hello World",0
          GETA  $255,Greeting
          TRAP  0,Fputs,StdOut
```

```
InSize    IS    100
InBuffer  BYTE  0
          LOC   InBuffer+InSize
InArgs    OCTA  InBuffer,InSize
          LDA   $255,InArgs
          TRAP  0,Fgets,StdIn
```