Operační systémy

Instrukční sady dalších procesorů a proces překladu

Petr Krajča

Katedra informatiky
Univerzita Palackého v Olomouci

SPARC (1/2)

- rodina procesorů (některé dostupné pod GPL)
- každá instrukce zabírá v paměti 4B
- snaha eliminovat množství instrukcí
- jednoduché instrukce
- potenciálně rychlejší zpracování
- operace běžně se třemi operandy
- velké množství registrů (řádově stovky), běžně dostupných 32 registrů
- globální registry g0 – g7 (g0 je vždy nula)
- registrové okno – 24 registrů
  - i0 – i7 – argumenty předané funkci
  - l0 – l7 – lokální proměnné
  - o0 – o7 – argumenty předávané další funkci
- speciální využití některých registrů
  - fp – frame pointer (i6)
  - sp – stack pointer (o6)
  - návratová adresa – i7/o7

SPARC (2/2)

- příklady operací

```
add   %i0, 1, %l1       # l1 := i0 + 1
subcc %i1, %i2, %i3     # i3 := i1 - i2
subcc %i1, %i2, %g0     # g0 := i1 - i2   (cmp)
or    %g0, 123, %l1     # l1 := g0 | 123  (mov)
```

- malá velikost instrukce
  - operace neumožňují adresovat paměť $\Longrightarrow$ specializované operace `ld`, `st`
  - $\Longrightarrow$ load/store architektura
  - interně se pracuje s celými registry
  - jako konstanty jde běžně používat pouze hodnoty -4096 – 4095
  - přiřazení velkých čísel ve dvou krocích

```
sethi 0x226AF3, %l1   # nastavi horni bity
or    %l1,0x1EF, %l1  # nastavi dolni bity
```

Procesory ARM

- rodina 32- a 64bitových procesorů typicky využívaná v embedded a přenosných zařízeních
- optimalizace na nízkou spotřebu el. energie a paměti
- není jeden výrobce, licence dalším výrobcům
- základní jádro je licencováno výrobcům k výrobě SoC (Qualcomm Snapdragon, nVidia Tegra, Apple A4-A17, M1-3, Samsung Exynos, . . .)
- několik variant instrukční sady—v současné době používané ještě ARMv5, ARMv6, ale především ARMv7 (32 bitů) a ARMv8 (64 bitů)
- děleny ješte podle určení A (aplikační), R (real-time), M (mikrokontrolery)
- architektura *big.LITTLE* – kombinace pomalejších a úspornějších jader (LITTLE) s výkonými (big), která jsou využívána podle aktuálního zatížení systému

ARMv7

- podpora několika různých typů instrukčních sad (+ rozšíření dle modelu, např. specializované instrukce pro kryptografii)
- přímá podpora až 16 koprocesorů
- load/store architektura

Registry

- 32 obecně použitelných registrů
- z toho jen 16 je v daný okamžik použitelných (R0 – R15)
- R13 (SP) – Stack Pointer, R14 (LR) – Link Register, R15 (PC) – Program Counter
- registry R13 a R14 přepínány podle aktuálního režimu procesoru (jaderný režim, obsluha přerušení, atp.), v případě rychlých přerušení přepnuty R8 až R14
- stavový registr APSR pro případné uložení příznaků proběhlé operace

Instrukční sada ARM procesorů ARMv7

- všechny instrukce o velikosti 32 bitů
- obvykle 2-3 operandy, příznaky nastavují jen programátorem určené instrukce
- možnost podmíněného vykonávání instrukcí

```
CMP   R0, 0      ; porovnej R0 s 0
RSBLT R0, R0, 0 ; pokud R0 < 0, pak R0 := 0 - R0
```

- barrel shifter umístěný před ALU a druhý argument
- umožňuje kombinovat operaci s operací bitových posunů a rotací
- v případě přímých hodnot se používá kombinace 8 bitů pro konstantu a 4 bity pro operaci ROR
- 32bitové konstanty přiřazovány ve dvou operacích (horních/dolních šestnáct bitů)
- operace load/store umožňují měnit registr s indexem
- při volání je návrátová adresa uložena do registru R14 (LR)
- argumenty jsou předávány přes registry (první čtyři) a zásobník

Příklad instrukce v sadě ARM

Operace typu ADD Rd, Rn, imm

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
cond				00		1	OpCode				S	Rn				Rd				rotate				imm8							

- cond – podmínka (AL, EQ, NE, LT, GT, . . .)
- 00 – typ instrukce
- 1 – použije se konstanta
- OpCode – použitá operace ADD, SUB, RSB, MOV, CMP, . . .
- Rn, Rd – registry
- imm8 – přímá hodnota
- rotate – aplikuje ROR(imm8, 2 × rotate)

Operace typu ADD Rd, Rn, Rm

31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	00
cond				00		0	OpCode				S	Rn				Rd				shift								Rm			

- shift – dále zakódováno posunutí Rm o pevný počet bitů nebo o hodnotu danou registrem
- podporovány logické i aritmetické posuny, rotace vpravo

Faktoriál

```
00000000 <fact>:
0:    e3500000        cmp     r0, #0
4:    0a000005        beq     20 <fact+0x20>
8:    e92d4010        push    {r4, lr}
c:    e1a04000        mov     r4, r0
10:   e2400001        sub     r0, r0, #1
14:   ebffffe         bl      0 <fact>
18:   e0000094        mul     r0, r4, r0
1c:   e8bd8010        pop     {r4, pc}
20:   e3a00001        mov     r0, #1
24:   e12fff1e        bx      lr
```

Další instrukční sady procesorů ARMv7

Kódování Thumb

- alternativní způsob kódování instrukcí
- zahuštění kódu (použití hlavně v mikrokontrolerech)
- velikost instrukce 16 bitů nebo 32 bitů
- 16 bitová varianta
  - menší počet operandů (podobná ISA x86)
  - možnost přistupovat pouze k části registrů
  - bez možnosti podmíněného provádění instrukcí jednotlivých instrukcí
  - instrukce IT (if-then) supluje předchozí omezení
- 32 bitové instrukce umožňují přístup k dalším vlastnostem ISA
- přepínání mezi kódováním Thumb a ARM přes instrukce (`bx`, `blx`)

Další instrukční sady

- Jazelle – spouštění Java bytecode

ARMv8 (AArch64)

- 64bitový nástupce architektury ARMv7
- instrukce velikosti 32 bitů
- módy pro zpětnou kompatibilitu
- 31 64bitových registrů (X0 až X30), jde použít i pouze spodní 32bitové poloviny (W0 až W30)
- registr X31/W31 zero registr (podobně jako u SPARC)
- X30 odpovídá LR, samostatné registry SP a PC, PSTATE (stavový registr)
- v 64bitovém režimu některé vlastnosti zrušeny (podmíněné provádění instrukcí) nebo upraveny (bitové posuny u konstant)
- argumenty předávány přes registry (X0 až X7) a další přes zásobník

Shrnutí koncepcí (1/2)

RISC: Reduced Instruction Set Computer

- zjednodušený návrh a implementace CPU
- rychlejší běh, určitá omezení

CISC: Complete (Complex) Instruction Set Computer

- poskytují operace velice blízké vyšším progr. jazykům
- snadné pro ruční programování
- náročné na implementaci CPU (+ již nepoužívané instrukce v ISA)

Reálně...

- procesory typu CISC provádí rozklad operací na mikrooperace $\Longrightarrow$ vnitřně RISC
- další úroveň abstrakce
- vnitřně dochází ještě k dalším úpravám kódu, např. přejmenovávání registrů
- out-of-order execution $\Longrightarrow$ rozdělení (mikro)operací jednotlivým jednotkám $\Longrightarrow$ paralelismus

Shrnutí koncepcí (2/2)

- plánování OoO komplikuje návrh CPU

VLIW: very large instruction word

- snaha využít několik funkčních jednotek
- jedna instrukce může obsahovat několik operací
- $\Longrightarrow$ souběžné zpracování
- spolupráce s překladačem $\Longrightarrow$ „CPU nemusí hádat, jak poběží program"
- složitější návrh dekódovací jednotky
- Intel Itanium, Digital Signal Processors (DSP)
- v případě AMD64 rozšíření FMA (fused multiply-add)

Překlad programu

1. preprocessor – expanduje makra, odstraní nepotřebný kód, načte požadované hlavičkové soubory (např. `math.h`) – deklarace struktur, deklarace prototypů, atd.
2. překladač – generuje kód v assembleru
3. assembler – vygeneruje objektový kód (`foo.c` $\Longrightarrow$ `foo.obj`/`foo.o`)
4. linker – sloučí několik souborů s objektovým kód + knihovny do spustitelného formátu

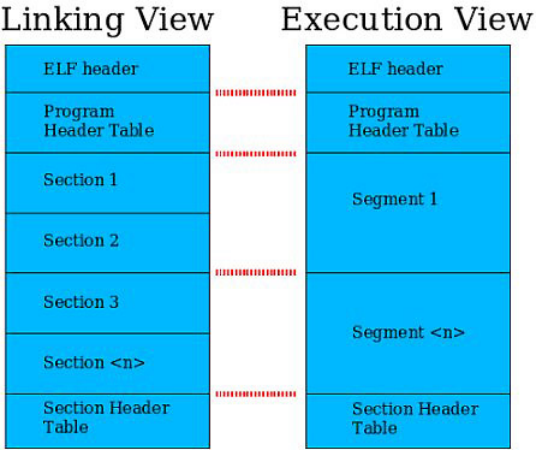
Poznámky

- některé kroky mohou být sloučeny nebo vypuštěny
- některé vyšší programovací jazyky jsou překládany do nižšího jazyka (např. C)
- oddělený překlad do objektových souborů a jejich spojení $\Longrightarrow$
  - možnost kombinovat různé programovací jazyky (různé jazyky, ale stejné objektové soubory)
  - komplikuje interprocedurální optimalizace (není možné optimalizovat napříč zdrojovými soubory)

Objektový soubor

- formát specifický pro každý OS
- obecně obsahuje
  - hlavička – informace o souboru
  - objektový kód – strojový kód + data
  - exportované symboly – seznam poskytovaných symbolů (např. funkce nedeklarované jako `static`)
  - importované symboly – seznam symbolů použitých v tomto souboru
  - informace pro přemístění – seznam míst, které je potřeba upravit v případě přesunutí kódu
  - debugovací informace
- rozdělení na sekce
  - kód
  - data jen pro čtení (konstanty, `const`)
  - inicializovaná data (globální proměnné, statické proměnné)
- navíc obsahuje informace o neinicializovaných datech, apod.
- možnost sdílet jednotlivé části mezi instancemi programu
- formát často sdílený i binárními soubory

Různé pohledy na objektový kód



Linkování (1/2)

- spojí jednotlivé objektové soubory do spustitelného formátu (sloučí jednotlivé sekce)
- postará se o správné umístění kódu a vyřešení odkazů na chybějící funkce a proměnné
- připojení knihoven (hlavičkové soubory většinou neobsahují žádný kód!)

Staticky linkované knihovny

- archiv objektových souborů (+ informace o symbolech)
- výhody: jednoduchá implementace, nulová režie při běhu aplikace, žádné závislosti
- nevýhody: velikost výsledného binárního souboru, aktualizace knihovny $\Longrightarrow$ nutnost rekompilace

Dynamicky linkované knihovny

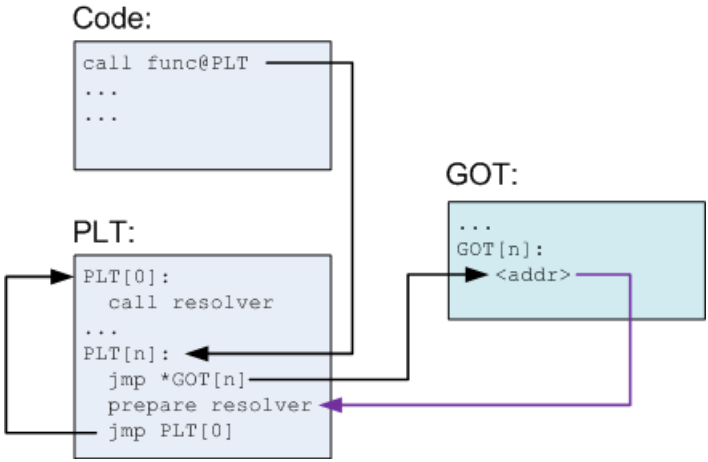
- knihovna je načtena až při spuštění programu
- sdílení kódu mezi programy
- nutnost provázat adresy v kódu s knihovnou
- nutná spolupráce OS

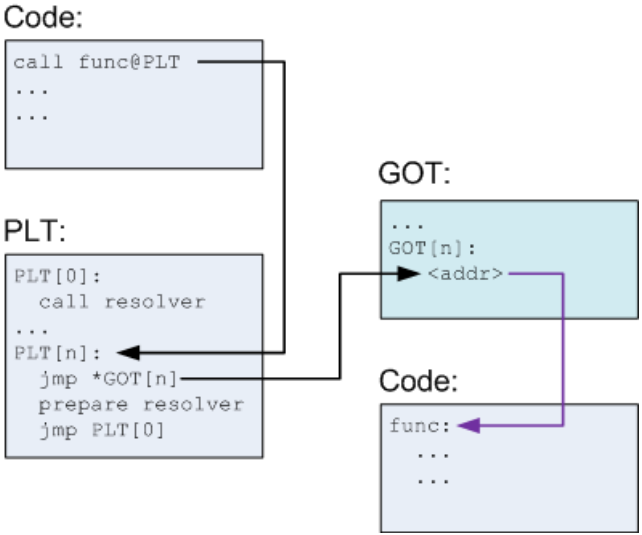
Dynamicky linkované knihovny (1/2)

- problém: umístění knihovny v paměti

Řešení v Unixu

- sdílené knihovny (shared objects, `foo.so`)
- $\Longrightarrow$ position independent code (PIC) – kód, který lze spustit bez ohledu na adresu v paměti
- x86 používá často relativní adresování (i tak PIC pomalejší než běžný kód)
- při spuštění dynamický linker (`ld.so`) provede přenastavení všech odkazů na vnější knihovny
- Global Offset Table (GOT) – tabulka sloužící k výpočtu absolutních adres (nepřímá adresace)
- Procedure Linkage Table (PLT) – tabulka absolutních adres funkcí
  - na začátku PLT obsahuje volání linkeru
  - při volání funkce se provede skok do PLT
  - nastaví se informace o funkci pro linker a ten se zavolá
  - linker najde adresu funkce, nastaví záznam v PLT
  - linker zavolá funkci
  - další volání se provádí bez účasti linkeru $\Longrightarrow$ adresa v PLT


Code:
call func@PLT
...
...
GOT:
...
GOT[n]:
<addr>
PLT:
PLT[0]:
call resolver
...
PLT[n]:
jmp *GOT[n]
prepare resolver
jmp PLT[0]


Code:
call func@PLT
...
...
PLT:
PLT[0]:
call resolver
...
PLT[n]:
jmp *GOT[n]
prepare resolver
jmp PLT[0]
GOT:
...
GOT[n]:
<addr>
Code:
func:
...
...

Dynamicky linkované knihovny (2/2)

Řešení ve Windows

- Dynamic-link library (DLL)
- Windows nepoužívá PIC $\Longrightarrow$ každá knihovna má svou adresu v paměti
- v případě kolize nutnost přesunu + přepočet absolutních adres
- každý program obsahuje *import address table (IAT)* – tabulka adres volaných funkcí (nepřímá adresace)
- inicializace při spuštění
- volání přes `call [adresa]` nebo *thunk table*

```
...kód...
00401002 CALL 00401D82
...thunk table...
00401D82 JMP DWORD PTR DS:[40204C]
...adresy funkcí...
40204C > FC 3D 57 7C   ; adresa
```

- vyhledávání funkcí podle čísla nebo jména (binární vyhledávání)

Dynamicky nahrávané knihovny

- možnost explicitně nahrát knihovnu za běhu
- implementace pluginu
- mechanismus podobný dynamickému linkování
- Unix: dlopen, dlsym (vyhledá funkci podle jména)
- Windows: LoadLibrary, GetProcAddr
- kombinace: zpožděné načítání knihoven

Virtuální stroje

- virtualizace systému vs. virtualizace procesu
- program se nepřekládá do strojového kódu cílového procesoru
- bytecode: instrukční sada virtuálního procesoru (virtuálního stroje, VM)
- bytecode $\Longrightarrow$ interpretace jednotlivých instrukcí nebo překlad do instrukční sady cílového procesoru běhovým prostředím
- přenositelný kód nezávislý na konkrétním procesoru
- možnost lépe kontrolovat běh kódu (oprávnění, přístupy)
- režie interpretace/překladu
- VM může řešit i komplexnější úlohy než běžný CPU (správa paměti, výjimky, atd.)
- příklady: Java Virtual Machine (& Java Byte Code), Common Language Runtime (& Common Intermediate Language), UCSD Pascal (p-code), LLVM, atd.

JIT překlad

- běhové prostředí generuje kód dané architektury za běhu (von Neumannova architektura!)
- možnost optimalizace pro konkrétní typ CPU
- optimalizace podle aktuálně prováděného kódu (profilování)

Zásobníkové virtuální stroje

- jednoduchá instrukční sada $\Longrightarrow$ snadná implementace
- potřeba více instrukcí, nicméně kratší kód
- JVM, CLR

Registrové virtuální stroje

- efektivní překlad do instrukční sady (pipelined) procesorů
- odolnější proti chybám
- LLVM – optimalizace přes Single Static Assignment; Parrot – Raku (Perl 6); Dalvik – dříve Android, minimální spotřeba paměti

Java Virtual Machine a Java Bytecode (1/2)

- 1995: SUN prog. jazyk Java 1.0
- překlad Java $\Longrightarrow$ Java Bytecode (JBC)
- JBC vykonáván pomocí Java Virtual Machine (JVM)
- implementace JVM není definovaná (pouze specifikuje chování), JBC lze
  - interpretovat
  - přeložit do strojového kódu daného stroje (JIT i AOT)
  - provést pomocí konkrétního CPU
- JVM – virtuální zásobníkový procesor
- malý počet instrukcí (< 256)
- zásobník obsahuje rámce (rámec je vytvořen při zavolání funkce)
  - lokální proměnné, mezivýpočty
  - *operand stack* – slouží k provádění výpočtů
- heap s automatickou správou paměti

Java Virtual Machine a Java Bytecode (2/2)

- jednoduché i velmi komplexní operace (volání funkcí, výjimky)
- základní aritmetika s primitivními datovými typy (hodnoty menší než int převedeny na int)
- speciální operace pro práci s prvními argumenty, lokálními prostředími, jedničkou, nulou
- pouze relativní skoky

Příklad

```
public static void foo(int a, int b) {
    System.out.println(a + b);
}
```

```
  Code:
  0: getstatic       #21; //Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
  3: iload_0
  4: iload_1
  5: iadd
  6: invokevirtual   #27; //Method java/io/PrintStream.println:(I)V
  9: return
```

Common Langauge Runtime

- Microsoft .NET implementuje obdobný přístup
- Common Langauge Runtime (CLR) + Common Intermediate Langauge (CIL) – běhové prostředí + bytecode
- koncepčně velice podobné JVM a JBC
- od začátku navržen s podporou více jazyků
- při prvním zavolání metody $\Longrightarrow$ překlad do strojového kódu CPU

Opuštění běhového prostředí

- Java: Java Native Interface – rozhraní pro spolupráci s C++
- .NET: Platform Invocation Services (P/Invoke) – umožňuje spoustět kód z DLL