IA039: Architektura superpočítačů a náročné výpočty

Překladače

Luděk Matyska

Fakulta informatiky MU

Jaro 2014

Opakování – RICS procesory

- limitovaný počet instrukcí, jednotná délka
- jednoduché adresní módy, load/store, hodně registrů
- delay branches, brach prediction, out-of-order execution
- superskalární (MIPS – 2xFPU, 2xALU, adresace)
- superpipeline (ANDES)
- vyrovnávací paměti

Optimalizující překladač

- překlad do mezijazyka
- optimalizace
  - meziprocedurální analýza
  - optimalizace cyklů
  - globální optimalizace
- generování kódu
  - využití všech jednotek

Mezijazyk

- Čtveřice (obecně **n**-tice)
  - Instrukce: operátor, dva operandy, výsledek
  - Příklad
    - Přiřazení: `X := Y op Z`
  - Paměť: přes dočasné proměnné `t`**n**
  - Skoky: podmínka počítána samostatně
  - Skoky: na absolutní adresy

Základní překlad

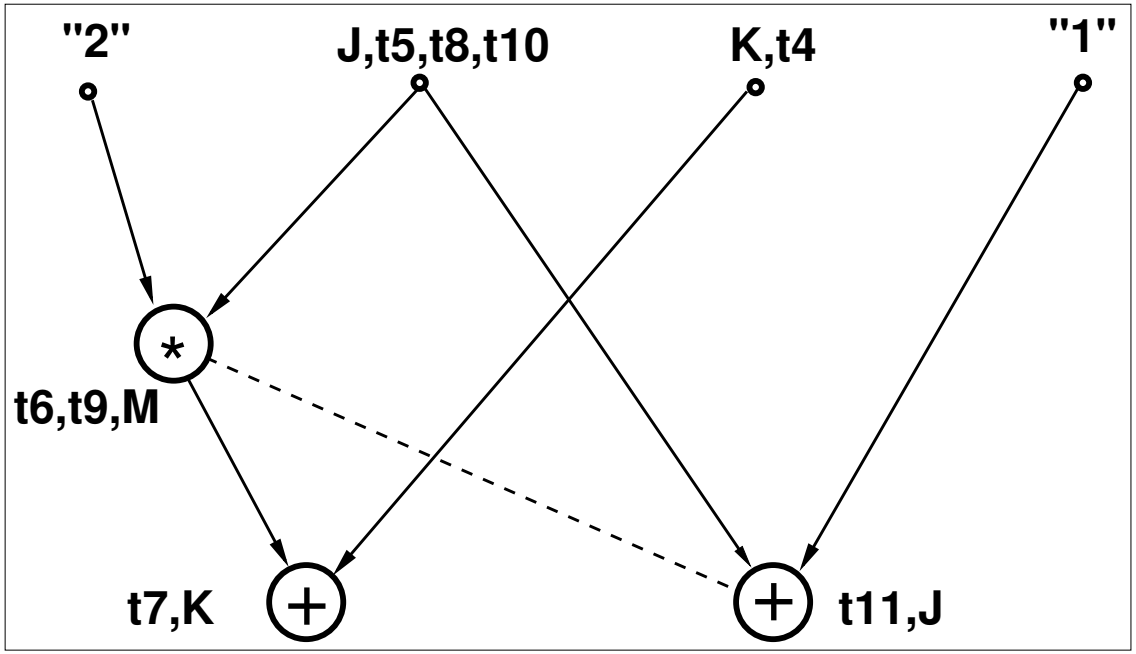
```
while ( j < n ) {
          k = k + j*2
          m = j*2
          j++
 }
A::   t1 := j
      t2 := n
      t3 := t1 < t2
      jmp (B) t3
      jmp (C) TRUE
B::   t4 := k
      t5 := j
      t6 := t5*2
      t7 := t4+t6
      k  := t7
      t8 := j
      t9 := t8*2
      m  := t9
      t10 := j
      t11 := t10+1
      j  := t11
      jmp (A) TRUE
C::
```

Základní bloky

- Program je pak reprezentován *grafem toku* (flow graph)
- Blok –část programu bez skoků
  - Jeden vstupní a jeden výstupní bod
  - Blok jako DAG (Directed Acyclic Graph)
- Optimalizace uvnitř bloků
  - Odstranění opakovaných (pod)výrazů
  - Odstranění přebytečných proměnných

Directed Acyclic Graph

```
B::   t4  := k
      t5  := j
      t6  := t5*2
      t7  := t4+t6
      k   := t7
      t8  := j
      t9  := t8*2
      m   := t9
      t10 := j
      t11 := t10+1
      j   := t11
      jmp (A) TRUE
```



Modifikovaný překlad

```
B::   t4  := k
      t5  := j
      t6  := t5*2
      t7  := t4+t6
      k   := t7
      t8  := j
      t9  := t8*2
      m   := t9
      t10 := j
      t11 := t10+1
      j   := t11
      jmp (A) TRUE
```

```
B::   t4  := k
      t5  := j
      t6  := t5*2
      m   := t6
      t7  := t6+t4
      k   := t7
      t11 := t5+1
      j   := t11
      jmp (A) TRUE
```

Další pojmy

- *Proměnné*
  - Definice a místa použití
- *Cykly*
- Proces *generování cílového kódu*
  - Součástí tzv. peephole optimalizace

Optimalizovaný překlad

```
A::   t1  := j
      t2  := n
      t3  := t1 < t2
      jmp (B) t3
      jmp (C) TRUE
B::   t4  := k
      t5  := j
      t6  := t5*2
      t7  := t4+t6
      k   := t7
      t8  := j
      t9  := t8*2
      m   := t9
      t10 := j
      t11 := t10+1
      j   := t11
      jmp (A) TRUE
C::
```

```
A::   t1  := j
      t2  := n
      t4  := k
      t9  := m
      t12 := t1+t1
      t3  := t1 >= t2
      jmp (B1) t3
B::   t4  := t4+t12
      t9  := t12
      t1  := t1+1
      t12 := t12+2
      t3  := t1 < t2
      jmp (B) t3
B1::  k   := t4
      m   := t9
C::
```

Klasické optimalizace

- Propagace kopírováním
  - Příklad:

```
X = Y                    X = Y
Z = 1. + X      ⟹       Z = 1. + Y
```

- Zpracování konstant
  - propagace konstant
- Odstranění mrtvého kódu
  - nedosažitelný kód
  - šetření cache pro instrukce

Klasické optimalizace II

- Strength reduction
  - Příklad: `K**2` $\Longrightarrow$ `K*K`
- Přejmenování proměnných
  - Příklad

```
x = y*z;                    x0 = y*z;
q = r+x+x;          ⟹      q  = r+x0+x0;
x = a+b                     x  = a+b
```

- Odstraňování společných podvýrazů (podstatné zejména pro výpočet adres prvků polí)

Klasické optimalizace III

- Přesun invariantního kódu z cyklů
- Zjednodušení indukčních proměnných (výrazů s)
  - `A(I)` je většinou počítáno jako:

    ```
    address = base_address(A) +
    (I-1)*sizeof_datatype(A)
    ```

    což lze snadno v lineárním cyklu převést na

    mimo cyklus:

    ```
    address = base_address(A) - sizeof_datatype(A)
    ```

    v cyklu:

    ```
    address = address + sizeof_datatype(A)
    ```

- Přiřazení registrů proměnným

Odstraňování smetí

- Podprogramy, makra
  - Inlining
- Podmíněné výrazy
  - Reorganizace složitých výrazů
  - Nadbytečné testy (`if` versus `case`)
- Podmíněné výrazy uprostřed cyklů
  - Nezávislé na cyklu
  - Závislé na cyklu
    - Nezávislé na iteraci
    - Závislé mezi iteracemi

Podmíněné výrazy – příklad

```
DO I=1,K
 IF (N .EQ 0) THEN
    A(I)=A(I)+B(I)*C
 ELSE
    A(I)=0
 ENDIF
```

$\Longrightarrow$

```
IF (N .EQ 0) THEN
  DO I=1,K
    A(I)=A(I)+B(I)*C
  CONTINUE
ELSE
  DO I=1,K
    A(I)=0
  CONTINUE
ENDIF
```

Odstraňování smetí II

- Redukce
  - min (nebo max):

```
for(i=0;i<n;i++)
    z=(a[i] > z) ?  a[i] :  z;
```

  - jak obejít rekurzivní závislost:

```
for(i=0;i<n-1;i+=2) {
    z0=(a[i] > z0) ?  a[i] :  z0;
    z1=(a[i+1] > z1) ?  a[i+1] :  z1;
}
z=(z0 < z1) ?  z1 :  z0;
```

Redukce – Asociativní transformace

- Numerická nepřesnost:
  4 platná desetinná místa

```
(X + Y) + Z = (.00005 + .00005) + 1.0000
                .00010 +          + 1.0000 = 1.0001
ale
X + (Y + Z) = .00005 + (.00005 + 1.0000) =
              .00005           + 1.0000 = 1.0000
```

- Redukce

```
DO I=1,N
   SUM=SUM+A(I)*B(I)
```

  Redukce s rekurzivní závislostí – můžeme použít stejný trik jako u `min` redukce?

Odstraňování smetí III

- Skoky
- Konverze typů

```
REAL*8 A(1000)
REAL*4 B(1000)
DO I 1=1,1000
  A(I)=A(I)*B(I)
```

- Ruční optimalizace
  - Společné podvýrazy
  - Přesun kódu
  - Zpracování polí (inteligentní překladač, C a ukazatele)

Optimalizace cyklů

- Cíle:
  - Redukce režie
  - Zlepšení přístupu k paměti (cache)
  - Zvýšení paralelismu

Datové závislosti I

- **Flow Dependencies** (backward dependencies)
  - Příklad:

```
DO I=2,N
  A(I)=A(I-1)+B(I)
```

$\Longrightarrow$

```
DO I=2,N,2
  A(I)=A(I-1)+B(I)
  A(I+1)=A(I-1)+B(I)+B(I+1)
```

- **Anti-Dependencies**
  - Standardně přejmenování proměnných
  - Příklad

```
DO I=1:N
  A(I) = B(I) * E
  B(I) = A(I+2) * C
```

$\Longrightarrow$

```
DO I=1:N
  A'(I)= B(I) * E
DO I=1:N
  B(I) = A(I+2) * C
DO I=1:N
  A(I) = A'(I)
```

Datové závislosti II

- **Output Dependencies**
  - Příklad:

```
A(I)   = C(I) * 2
A(I+2) = D(I) + E
```

  - V cyklu je vypočteno několik hodnot konkrétní proměnné, zapsat však lze pouze tu „poslední“
  - Může být problém zjistit, která je ta „poslední“

Rozvoj cyklů (loop unrolling) I

- Tělo cyklu se několikrát zkopíruje:

```
DO I=1,N
  A(I)=A(I)+B(I)*C
```

⇓

```
DO I=1,N,4
  A(I)=A(I)+B(I)*C
  A(I+1)=A(I+1)+B(I+1)*C
  A(I+2)=A(I+2)+B(I+2)*C
  A(I+3)=A(I+3)+B(I+3)*C
```

Rozvoj cyklů (loop unrolling) II

- Hlavní smysl
  - Snížení režie
    - Snížení počtu průchodů cyklem
  - Zvýšení paralelizace (i v rámci jednoho procesoru)
    - Software pipelining
- Pre- a postconditioning loops
  - Adaptace na skutečný počet průchodů

Rozvoj cyklů (loop unrolling) III

- Nevhodné cykly
  - Malý počet iterací $\longrightarrow$ úplný rozvoj cyklů
  - „Tlusté“ (=velké) cykly: samy obsahují dostatek příležitostí k paralelizaci
  - Cykly s voláním procedur: souvislost s rozvojem procedur (inlining)
  - Cykly s podmíněnými výrazy: spíše starší typy procesorů
  - „Rekurzivní“ cykly: cykly s vnitřními závislostmi (`a[i]=a[i]+a[i-1]*b`)

Problémy s rozvojem cyklů

- Rozvoj špatným počtem iterací
- Zahlcení registrů
- Výpadky vyrovnávací paměti instrukcí (příliš velký cyklus)
- Hardwarové problémy
  - Především na multiprocesorech se sdílenou pamětí (cache koherence, přetížení sběrnice)
- Speciální případy: rozvoj vnějších cyklů, spojování cyklů

Spojování cyklů

- opakované použití dat
- větší tělo cyklu
- kompilátor zvládne sám, pokud mezi cykly není jiný kód

```
for(i=0;i<n;i++)
   a[i]=b[i]+1
for(i=0;i<n;i++)
   c[i]=a[i]/2
for(i=0;i<n;i++)
   d[i]=1/c[i+1]
```

$\Longrightarrow$

```
a[0]=b[0]+1
c[0]=a[0]/2
for(i=1;i<n;i++) {
   a[i]=b[i]+1
   c[i]=a[i]/2
   d[i-1]=1/c[i]
}
d[n]=1/c[n+1]
```

Rozvoj vnějších cyklů

- Příklad

```
DO I=1,N
   DO J=1,N
     A(I)=A(I)+B(I,J)*C(J)
```

- A(I) je v vnitřním cyklu konstanta, C(J) se prochází správně
- B(I,J) se ve Fortranu prochází opačně!

```
DO I=1,N,4
   DO J=1,N
     A(I+0)=A(I+0)+B(I+0,J)*C(J)
     A(I+1)=A(I+1)+B(I+1,J)*C(J)
     A(I+2)=A(I+2)+B(I+2,J)*C(J)
     A(I+3)=A(I+3)+B(I+3,J)*C(J)
```

Optimalizace přístupů k paměti

- Optimální: nejmenší krok (práce s cache)
- Práce s maticemi – C vs. Fortran
  - C: ukládá po řádcích, nejrychleji se mění pravý index
  - Fortran: ukládá po sloupcích, nejrychleji se mění levý index
- Obrácení indexu
  - Příklad:

```
DO I=1,N                          DO J=1,N
  DO 10 J=1,N          ⟹           DO 10 I=1,N
    A(I,J)=B(I,J)+C(I)*D              A(I,J)=B(I,J)+C(J)*D
```

Optimalizace přístupů k paměti II

- Skládání do bloků
  - Příklad:

```
DO I=1,N
  DO 10 J=1,N
    A(J,I)=A(J,I)+B(I,J)
```

⇓

```
DO I=1,N,2
  DO 10 J=1,N,2
    A(J,I)=A(J,I)+B(I,J)
    A(J+1,I)=A(J+1,I)+B(I,J+1)
    A(J,I+1)=A(J,I+1)+B(I+1,J)
    A(J+1,I+1)=A(J+1,I+1)+B(I+1,J+1)
```

Optimalizace přístupů k paměti III

- Nepřímá adresace
  - Příklad:

    `b[i]=a[i+k]*c`, hodnota `k` neznáma při překladu
    `a[k[i]] += b[i]*c`
- Použití ukazatelů
- Nedostatečná kapacita paměti
  - „Ruční“ zpracování
  - Virtuální paměť