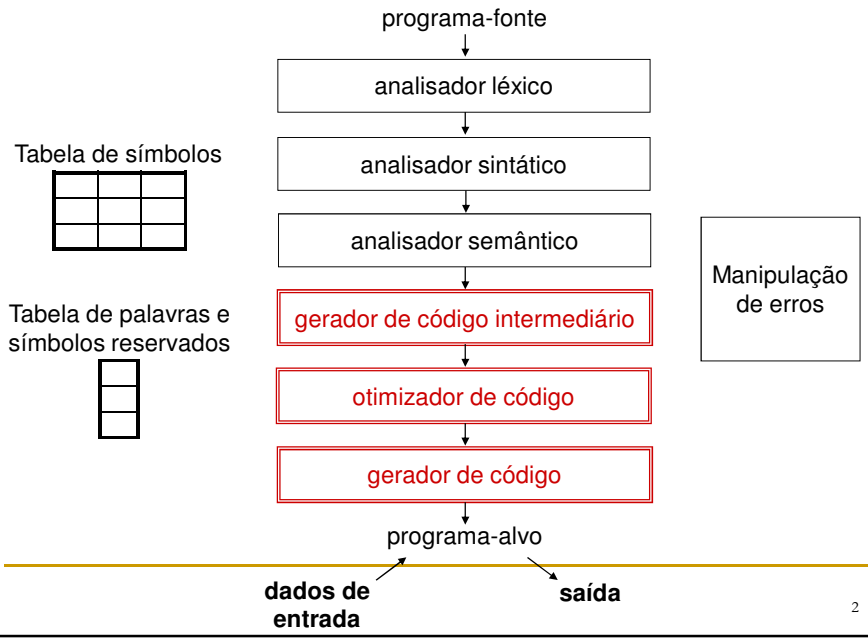
Geração e Otimização de Código

Representação de código intermediária
Código de três endereços, P-código
Técnicas para geração de código
Otimização de código

Prof. Thiago A. S. Pardo

1

Estrutura geral de um compilador



2

Geração de código

- A geração de código é uma das tarefas mais complexas do compilador
  - Depende da linguagem-fonte, da máquina-alvo e seu ambiente de execução e sistema operacional
- Portanto, é conveniente dividir esta etapa em etapas menores
  - Geração de código intermediário, geração de código objeto, otimização
    - Compilação de várias passagens

3

Geração de código intermediário

- Até o momento, temos utilizado a árvore sintática (mesmo que implícita) como representação interna por excelência, juntamente com as informações da tabela de símbolos
- Entretanto, ela não corresponde em nada com o código-objeto que queremos gerar, além de poder ser muito complexa
- Pode ser interessante gerar um código mais próximo do objeto antes de fazer a tradução final
  - Código intermediário

4

Geração de código intermediário

- Características
  - Pode assumir muitas formas
  - Em geral, é alguma forma de linearização da árvore sintática
  - Pode ser muito abstrato (como a árvore sintática) ou mais próximo do código-objeto
  - Pode ou não usar informações sobre a máquina-alvo e o ambiente de execução (como disponibilidade de registradores, tamanho dos tipos, etc.)
  - Pode ou não incorporar informações da tabela de símbolos (como escopo, níveis de aninhamento, etc.), dispensando ou não a tabela na geração de código-objeto

5

Geração de código intermediário

- Vantagens
  - Bom para quando se quer produzir código-objeto extremamente eficiente
  - Se for genérico o suficiente, pode ser a base para geração de código para várias máquinas
    - Aumenta a portabilidade (o tradutor do código intermediário para o objeto ainda é necessário)

6

Geração de código intermediário

- Veremos aqui as características gerais de 2 formas populares de código intermediário
  - Código de três endereços
  - P-código
    - Também possuem diversas formas distintas na literatura e na prática de compiladores

7

Código de três endereços

8

Código de três endereços

- Instrução mais básica: x = y op z
  - O operador op é aplicado a y e z e o resultado é armazenado em x
- Origem do nome desse código: três endereços de memória envolvidos no cômputo
  - y e z (mas não x) podem ser constantes ou literais, na realidade
- Exemplo

2*a+(b-3) ⟹

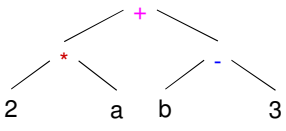
```
t1 = 2 * a
t2 = b - 3
t3 = t1 + t2
```


Código de três endereços

- Atenção
  - É necessário que se gerem variáveis temporárias (t1, t2 e t3 no exemplo) com nomes diferentes dos possíveis identificadores no programa
  - As variáveis podem ser mantidas na memória ou em registradores
  - As variáveis temporárias correspondem aos nós internos da árvore sintática subjacente à expressão

2*a+(b-3) ⟹

```
t1 = 2 * a
t2 = b - 3
t3 = t1 + t2
```

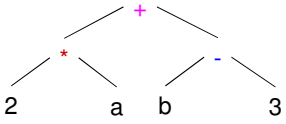


Código de três endereços

- No exemplo, o código intermediário corresponde à linearização da árvore quando ela é percorrida em pós-ordem
  - Qualquer alternativa é possível, dependendo somente da semântica da linguagem
    - Dependendo da alternativa, o código intermediário pode mudar (por exemplo, faz-se primeiro a subtração e depois a soma)

2*a+(b-3) ⟹

t1 = 2 * a
t2 = b - 3
t3 = t1 + t2



11

Código de três endereços

- Para acomodar todas as possibilidades de uma linguagem de programação, o código precisa ser mais flexível
  - Nem sempre se têm três elementos
    - Essa é uma das razões da diversidade de formas de código intermediário encontradas
  - Por exemplo, para operadores unários, pode-se ter o código t2 = -t1
    - Outras possibilidades: cópia, salto incondicional e condicional, índices, endereços

12

Código de três endereços

- Um exemplo de uma linguagem fictícia e seu possível código intermediário

```
{  Programa exemplo
   -- computa o fatorial
}
read x; { inteiro de entrada }
if 0 < x then { não computa se x <= 0 }
   fact := 1;
   repeat
      fact := fact * x;
      x := x - 1
   until x = 0;
   write fact { fatorial de x como saída }
end
```

```
read x
t1 = x > 0
if_false t1 goto L1
fact = 1
label L2
t2 = fact * x
fact = t2
t3 = x - 1
x = t3
t4 = x == 0
if_false t4 goto L2
write fact
label L1
halt
```

13

Código de três endereços

- Estrutura de dados
  - Nem sempre os códigos são armazenados textualmente como no exemplo
  - Listas encadeadas e arranjos podem ser usadas
  - Em vez de armazenar nomes de identificadores, pode ser interessante guardar ponteiros para os identificadores na tabela de símbolos (caso ela esteja sendo usada)
  - Muitas vezes, a noção de tuplas é utilizada (implementadas via registros, por exemplo)
    - Haverá, no máximo, quádruplas, sendo que algumas posições podem ficar vazias

14

Código de três endereços

- Exemplo de representação em tuplas

```
read x
t1 = x > 0
if_false t1 goto L1
fact = 1
label L2
t2 = fact * x
fact = t2
t3 = x - 1
x = t3
t4 = x == 0
if_false t4 goto L2
write fact
label L1
halt
```

```
(rd,x,_,_)
(gt,x,0,t1)
(if_f,t1,L1,_)
(asn,1,fact,_)
(lab,L2,_,_)
(mul,fact,x,t2)
(asn,t2,fact,_)
(sub,x,1,t3)
(asn,t3,x,_)
(eq,x,0,t4)
(if_f,t4,L2,_)
(wri,fact,_,_)
(lab,L1,_,_)
(halt,_,_,_)
```

15

P-código

16

P-código

- Um pouco da história
  - Criado como código-alvo de montagem padrão para os compiladores de PASCAL dos anos 70 e 80
  - Criado como código para uma máquina hipotética chamada P-máquina, sendo que diversos montadores para máquinas reais foram disponibilizados
    - Aumento da portabilidade
  - Foi redescoberto como um bom código intermediário

17

P-código

- Assume que
  - O ambiente de execução é baseado em pilhas
  - Dados do ambiente de execução são conhecidos (como tamanho de tipos)
- Exemplo de P-código para 2*a+(b-3)

```
ldc 2     ; carrega constante 2
lod a     ; carrega valor da variável a
mpi       ; multiplicação de inteiros
lod b     ; carrega valor da variável b
ldc 3     ; carrega constante 3
sbi       ; subtração de inteiros
adi       ; adição de inteiros
```

18

P-código

- Outro exemplo: x:=y+1

```
lda x     ; carrega endereço de x
lod y     ; carrega valor de y
ldc 1     ; carrega constante 1
adi       ; adição
sto       ; armazena topo no endereço
          ; abaixo do topo & retira os dois
```

19

P-código

- Exemplo para o programa fictício completo

```
{ Programa exemplo
  -- computa o fatorial
}
read x; { inteiro de entrada }
if 0 < x then { não computa se x <= 0 }
  fact := 1;
  repeat
    fact := fact * x;
    x := x - 1
  until x = 0;
  write fact { fatorial de x como saída }
end
```

20

P-código

- Exemplo para o programa fictício completo

```
{  Programa exemplo
   -- computa o fatorial
}
read x; { inteiro de entrada }
if 0 < x then { não computa se x
   fact := 1;
   repeat
      fact := fact * x;
      x := x - 1
   until x = 0;
   write fact { fatorial de x co
end
```

```
lda x       ; carrega endereço de x
rdi         ; lê um inteiro, armazena no
            ; endereço no topo da pilha (& o retira)
lod x       ; carrega o valor de x
ldc 0       ; carrega a constante 0
grt         ; retira da pilha e compara os dois valores do topo
            ; coloca na pilha o resultado booleano
fjp L1      ; retira o valor booleano, salta para L1 se falso
lda fact    ; carrega endereço de fact
ldc 1       ; carrega constante 1
sto         ; retira dois valores, armazena primeiro
            ; em endereço representado pelo segundo
lab L2      ; definição do rótulo L2
lda fact    ; carrega endereço de fact
lod fact    ; carrega valor de fact
lod x       ; carrega valor de x
mpi         ; multiplica
sto         ; armazena topo em endereço do segundo & retira
lda x       ; carrega endereço de x
lod x       ; carrega valor de x
ldc 1       ; carrega constante 1
sbi         ; subtrai
sto         ; armazena (como no caso anterior)
lod x       ; carrega valor de x
ldc 0       ; carrega constante de 0
equ         ; teste de igualdade
fjp L2      ; salta para L2 se falso
lod fact    ; carrega valor de fact
wri         ; escreve topo da pilha & retira
lab L1      ; definição do rótulo L1
stp
```

P-código

- Em relação ao código de três endereços
  - Mais próximo do código de máquina
  - Exigem menos endereços (quase todas as instruções vistas até agora tinham 1 ou nenhum endereço)
  - Menos compacto (isto é, tem mais instruções)
  - Não é "auto-suficiente", pois assume a existência de uma pilha
  - Pode ser representado e implementado da mesma forma que o código de três endereços

22

Gerando código

Geração de código

- Como se gera o código (intermediário ou final) para um programa?

1. Gramática de atributos

2. Procedimentos/funções de geração
   - Baseados na gramática de atributos definida
   - Ou *ad hoc*

Gramática de atributos

- Exemplo de gramática de atributos para geração do P-código (atributo pcod)

exp → id = exp | aexp
aexp → aexp + fator | fator
fator → (exp) | num | id

Valor da cadeia

Concatena e não pula linha

Concatena e pula linha

Regra Gramatical	Regras Semânticas
$exp_1 \rightarrow$ `id` = exp_2	exp_1 .pcod = "`lda`" || `id`.strval ++ exp_2.pcod ++ "`stn`"
$exp \rightarrow aexp$	exp .pcod = $aexp$ .pcod
$aexp_1 \rightarrow aexp_2$ + $fator$	$aexp_1$ .pcod = $aexp_2$ .pcod ++ $fator$ .pcod ++ "`adi`"
$aexp \rightarrow fator$	$aexp$ .pcod = $fator$ .pcod
$fator \rightarrow$ (exp)	$fator$ .pcod = exp .pcod
$fator \rightarrow$ `num`	$fator$ .pcod = "`ldc`" || `num`.strval
$fator \rightarrow$ `id`	$fator$ .pcod = "`lod`" || `id`.strval

Gramática de atributos

- Exercício: analise a cadeia (x=x+3)+4

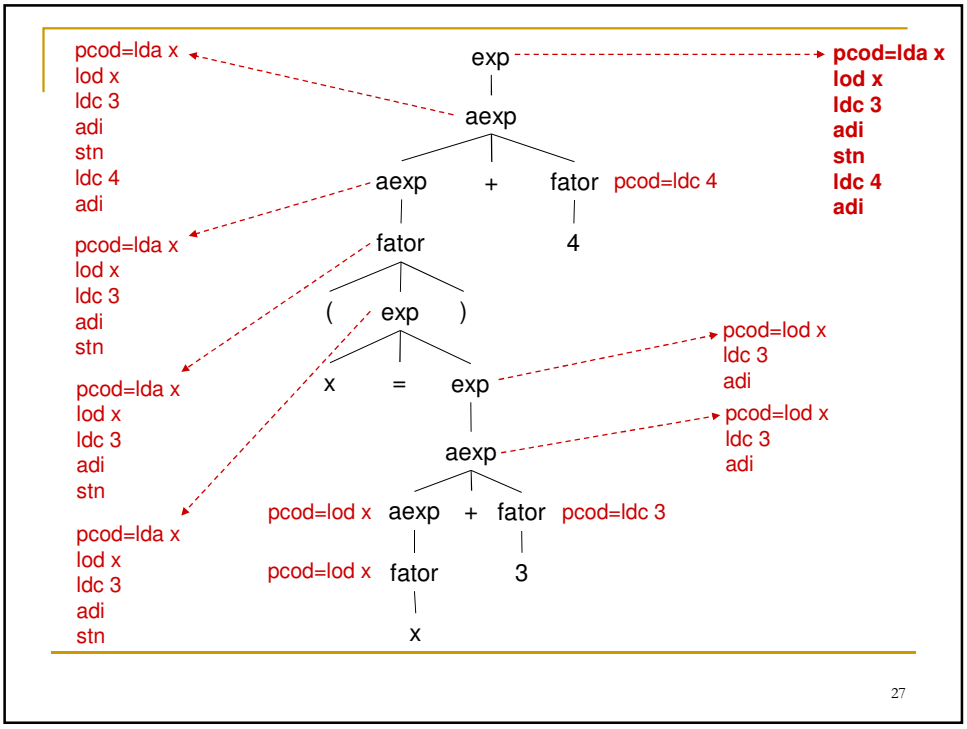
exp → id = exp | aexp
aexp → aexp + fator | fator
fator → (exp) | num | id

Valor da cadeia

Concatena e não pula linha

Concatena e pula linha

Regra Gramatical	Regras Semânticas
$exp_1 \rightarrow$ `id` = exp_2	exp_1 .pcod = "`lda`" || `id`.strval ++ exp_2.pcod ++ "`stn`"
$exp \rightarrow aexp$	exp .pcod = $aexp$ .pcod
$aexp_1 \rightarrow aexp_2$ + $fator$	$aexp_1$ .pcod = $aexp_2$ .pcod ++ $fator$ .pcod ++ "`adi`"
$aexp \rightarrow fator$	$aexp$ .pcod = $fator$ .pcod
$fator \rightarrow$ (exp)	$fator$ .pcod = exp .pcod
$fator \rightarrow$ `num`	$fator$ .pcod = "`ldc`" || `num`.strval
$fator \rightarrow$ `id`	$fator$ .pcod = "`lod`" || `id`.strval



Gramática de atributos

- Exemplo de gramática de atributos para geração do código de 3 endereços (atributo tacode)

exp → id = exp | aexp
aexp → aexp + fator | fator
fator → (exp) | num | id

Regra Gramatical	Regras Semânticas
$exp_1 \rightarrow$ `id` = exp_2	exp_1 .name = exp_2 .name exp_1.tacode = exp_2 .tacode ++ `id`.strval || "=" || exp_2 .name
$exp \rightarrow aexp$	exp .name = aexp .name exp .tacode = aexp .tacode
$aexp_1 \rightarrow aexp_2$ + fator	$aexp_1$ .name = newtemp( ) $aexp_1$ .tacode = $aexp_2$ .tacode ++ fator .tacode ++ $aexp_1$ .name || "=" || $aexp_2$ .name || "+" || fator .name
$aexp \rightarrow fator$	aexp .name = fator .name aexp .tacode = fator .tacode
$fator \rightarrow$ (exp)	fator .name = exp .name fator .tacode = exp .tacode
$fator \rightarrow$ `num`	fator .name = `num`.strval fator .tacode = ""
$fator \rightarrow$ `id`	fator .name = `id`.strval fator .tacode = ""

Gera novo nome temporário, que é guardado no atributo "nome"

Cadeia vazia

Gramática de atributos

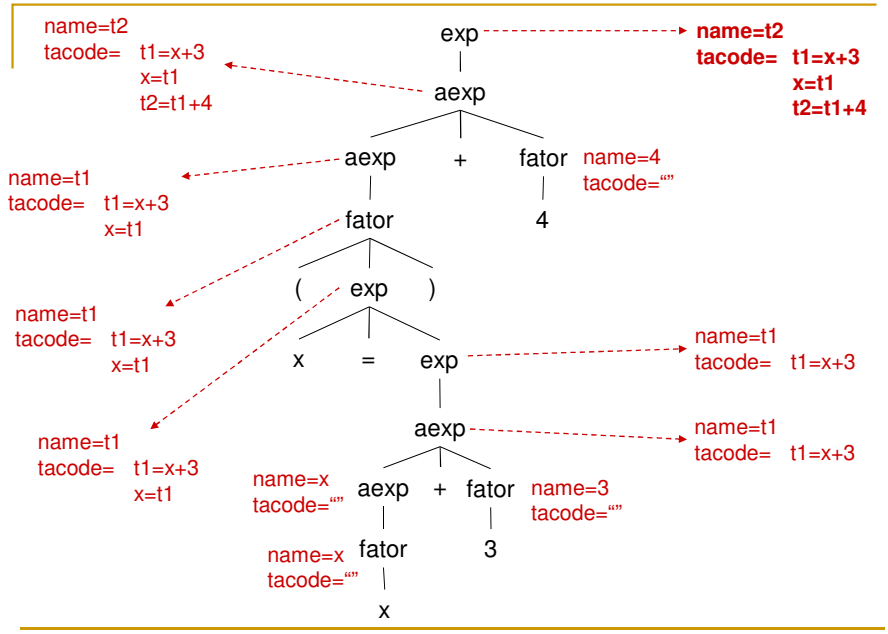
- Exercício em duplas para entregar: analise a cadeia (x=x+3)+4

exp → id = exp | aexp
aexp → aexp + fator | fator
fator → (exp) | num | id

Regra Gramatical	Regras Semânticas
$exp_1 \rightarrow \texttt{id} = exp_2$	exp_1 .name = exp_2 .name exp_1.tacode = exp_2 .tacode ++ id.strval || "=" || exp_2 .name
$exp \rightarrow aexp$	exp .name = aexp .name exp .tacode = aexp .tacode
$aexp_1 \rightarrow aexp_2 + fator$	$aexp_1$ .name = newtemp( ) $aexp_1$ .tacode = $aexp_2$ .tacode ++ fator .tacode ++ $aexp_1$ .name || "=" || $aexp_2$ .name || "+" || fator .name
$aexp \rightarrow fator$	aexp .name = fator .name aexp .tacode = fator .tacode
$fator \rightarrow \texttt{(}\ exp\ \texttt{)}$	fator .name = exp .name fator .tacode = exp .tacode
$fator \rightarrow \texttt{num}$	fator .name = num.strval fator .tacode = ""
$fator \rightarrow \texttt{id}$	fator .name = id.strval fator .tacode = ""

Gera novo nome temporário, que é guardado no atributo "nome"

Cadeia vazia



30

Geração de código

- Gramática de atributos
  - Útil para apresentar com clareza as relações entre as seqüências de código de diferentes partes da árvore sintática e para comparar diferentes métodos de geração de código...
  - mas não é prática, pois
    - Grande quantidade de cópia de cadeias e desperdício de memória
    - É desejável que se gerem pequenos trechos de código a medida que se analisa a cadeia e que se gravem esses trechos em um arquivo ou em outra estrutura de dados
    - A gramática de atributos pode ficar muito complicada

31

Procedimentos/funções para geração de código

- Com base na gramática de atributos e na árvore sintática
  - Similar à forma que se fazia a análise semântica
  - Aparência geral de um procedimento nessa linha (que deve ser instanciado de acordo com a geração de código pretendida)

```
procedure genCod(T: nó-árvore);
begin
    if T não é nulo then
            gere código de preparação para T;
            genCod(filho à esquerda de T);
            gere código de preparação para T;
            genCod(filho à direita de T);
            gere código para implementação de T;
end;
```

32

Procedimentos/funções para geração de código

- Com base na gramática de atributos e na árvore sintática
  - Similar à forma que se fazia a análise semântica
  - Exemplo instanciado básico para a gramática anterior

```
procedure genCod(T: nó-árvore);
begin
    if T não é nulo then
        if (‘+’) then
                genCode(t->leftchild);
                genCode(t->rightchild);
                write(“adi”);
        else if (‘=‘) then
                write(“lda”+id.strval);
                genCode(t->leftchild);
                write(“stn”);
        else if (‘num’) then write(“ldc”+num.strval);
        else if (‘id’) then write(“lod”+id.strval);
end;
```

Procedimentos/funções para geração de código

- Solução *ad hoc*
  - Geração de código amarrada aos procedimentos sintáticos

```
função fator(Seg): string;
Início
    declare cod: string;
    se (simbolo=‘(’) então   inicio
                             obtem_simbolo(cadeia,simbolo);
                             cod=exp(Seg+{‘)’});
                             se (simbolo=‘)’)
                                     então obtem_simbolo(cadeia,simbolo);
                                     senão ERRO(Seg);
                             fim
    senão se (simbolo=‘num’) então     inicio
                                       cod=“ldc ”+cadeia;
                                       obtem_simbolo(cadeia,simbolo);
                                       fim
    senão se (simbolo=‘id’) então      inicio
                                       cod=“lod ”+cadeia;
                                       obtem_simbolo(cadeia,simbolo);
                                       fim
    senão ERRO(Seg);
    retorne cod;
fim
```

Procedimentos/funções para geração de código

- Solução *ad hoc*
  - Geração de código amarrada nos procedimentos sintáticos
    - Alternativamente, podem-se chamar outras funções e procedimentos (com ou sem parâmetros que indiquem que código gerar) que gerem o código, em vez de embutir a geração diretamente no próprio procedimento sintático

35

Geração de código

- Ponto importante
  - O código-alvo (objeto) desejado pode ser similar ao P-código ou outra linguagem de montagem qualquer (caso da LALG)
    - Nesse caso, um montador também é necessário

36

Geração de código

- Geração de código-alvo a partir do código intermediário
  - Passo necessário se código intermediário é utilizado e é diferente do código-alvo desejado
  - Pode ser um processo complicado se o código intermediário não contém informações da máquina-alvo e de seu ambiente de execução

Geração de código

- Geração de código-alvo a partir do código intermediário
  - Em geral, dependendo do código com que se está lidando, se requer uma ou ambas destas técnicas: expansão de macros e simulação estática
    - **Expansão de macros**: encara cada linha de código como uma macro e a substitui por uma porção de código correspondente do código-alvo
      - Pode gerar código ineficiente ou redundante
    - **Simulação estática**: requer uma simulação direta dos efeitos do código intermediário e a geração do código-alvo correspondente a estes efeitos
      - Pode ser muito simples ou muito sofisticada

Geração de código

- Exemplo de expansão de macro
  - Supondo que temos código de três endereços como código intermediário e queremos o P-código como código-alvo
    - A expressão a=b+c pode ser substituída pela seqüência abaixo

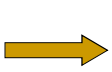
```
lda a
lod b (ou ldc b, se b é constante)
lod c (ou ldc c, se c é constante)
adi
sto
```

39

Geração de código

- Exemplo de expansão de macro
  - Supondo que temos código de três endereços como código intermediário e queremos o P-código como código-alvo

```
t1 = x + 3
x = t1
t2 = t1 + 4
```



```
lda t1
lod x
ldc 3
adi
sto
lda x
lod t1
sto
lda t2
lod t1
ldc 4
adi
sto
```

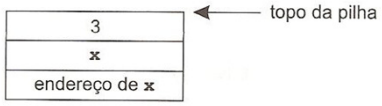
40

Geração de código

- Exemplo de simulação estática
  - Supondo que temos P-código como código intermediário e queremos o código de três endereços como código-alvo
    - Precisamos gerar os temporários e, por isso, é necessário que se simule a pilha e seu funcionamento

```
lda x
lod x
ldc 3
adi
stn
ldc 4
adi
```

Processando as 3 primeiras instruções



41

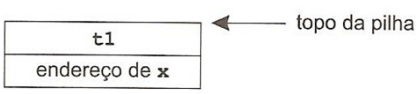
Geração de código

- Exemplo de simulação estática
  - Supondo que temos P-código como código intermediário e queremos o código de três endereços como código-alvo
    - Precisamos gerar os temporários e, por isso, é necessário que se simule a pilha e seu funcionamento

```
lda x
lod x
ldc 3
adi
stn
ldc 4
adi
```

Processando adi

Código de três endereços:
t1 = x + 3



42

Geração de código

- Exemplo de simulação estática
  - Supondo que temos P-código como código intermediário e queremos o código de três endereços como código-alvo
    - Precisamos gerar os temporários e, por isso, é necessário que se simule a pilha e seu funcionamento

```
lda x
lod x
ldc 3
adi
stn
ldc 4
adi
```

Processando stn

Código de três endereços:
t1 = x + 3
x = t1

43

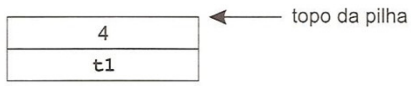
Geração de código

- Exemplo de simulação estática
  - Supondo que temos P-código como código intermediário e queremos o código de três endereços como código-alvo
    - Precisamos gerar os temporários e, por isso, é necessário que se simule a pilha e seu funcionamento

```
lda x
lod x
ldc 3
adi
stn
ldc 4
adi
```

Processando ldc 4

Código de três endereços:
t1 = x + 3
x = t1



44

Geração de código

- Exemplo de simulação estática
  - Supondo que temos P-código como código intermediário e queremos o código de três endereços como código-alvo
    - Precisamos gerar os temporários e, por isso, é necessário que se simule a pilha e seu funcionamento

```
lda x
lod x
ldc 3
adi
stn
ldc 4
adi
```

Processando adi

Código de três endereços:
t1 = x + 3
x = t1
t2 = t1 + 4

45

Otimizando código

46

Otimização

- Definição: processo de se melhorar a qualidade do código gerado pelo compilador
  - Nome enganoso, pois é raro se gerar o código ótimo
- Qualidade de código pode ser medida por vários ângulos
  - Quais?

Otimização

- Definição: processo de se melhorar a qualidade do código gerado pelo compilador
  - Nome enganoso, pois é raro se gerar o código ótimo
- Qualidade de código pode ser medida por vários ângulos
  - Velocidade
  - Tamanho do código
  - Memória utilizada para temporários

Otimização

- Análise do código e de sua execução permitem determinar o que otimizar
  - Algumas técnicas de otimização são simples e impactantes
  - Algumas são caras (em termos de tempo), complexas e com pouco ganho
    - Há muitas técnicas de otimização, algumas boas para algumas linguagens, outras não
      - O projetista do compilador deve fazer esse julgamento!

Otimização

- Principais fontes de otimização de código
  - Alocação de registradores: quanto mais e melhor usados, maior a velocidade
  - Operações desnecessárias
    - Expressões de valores invariáveis, mas avaliadas várias vezes no programa
    - Código inatingível ou morto (por exemplo, if com condição falsa sempre ou procedimento nunca ativado)
    - Saltos para outros saltos (poderia ir direto)

Otimização

- Principais fontes de otimização de código
  - Operações caras
    - Redução de força: trocam-se expressões caras por mais baratas (por exemplo, multiplicação por 2 pode ser implementada como uma transposição)
    - Empacotamento e propagação de constantes: reconhecimento e troca de expressões constantes pelo valor calculado (por exemplo, troca-se 2+5 por 7)
    - Procedimentos: pode-se melhorar fazendo-se alinhamento de procedimentos (inserção de seus códigos no corpo do programa), identificação e remoção de recursão de cauda
    - Uso de dialetos de máquina: instruções mais baratas oferecidas por máquinas específicas
  - Previsão do comportamento do programa
    - Conhecimento do comportamento do programa para otimizar saltos, laços e procedimentos ativados mais freqüentemente

51

Otimização

- Tipos de otimização
  - Quanto ao instante em que são realizadas
  - Quanto à área do programa em que se aplicam
- Quanto ao instante
  - Empacotamento de constantes pode ser feito durante análise sintática
  - Otimização de saltos poderia ser feita após a geração do código-alvo
    - Otimizações de "buraco de fechadura" (veem-se apenas pequenas porções de código)

52

Otimização

- Quanto ao instante
  - A maioria das otimizações é feita sobre o código intermediário ou durante a geração do código-alvo
    - Otimizações de nível de fonte: depende do programa (por exemplo, quantas vezes as variáveis são acessadas determina quais variáveis ficarão em registradores)
    - Otimizações de nível de alvo: depende da máquina-alvo e do ambiente de execução (por exemplo, número de registradores disponíveis)

Otimização

- Quanto ao instante
  - Análise do efeito de uma otimização sobre outras
    - Faz sentido propagar constantes antes de tratar código inatingível (pode ser mais fácil identificá-los)

```
x=1;                          x=1;                          x=1;
...                           ...                           ...
y=0;      Propagação          y=0;      Remoção de          y=0;
...       de constantes       ...       código inatingível  ...
if (y) x=0;   ------>         if (0) x=0;   ------>
...                           ...
```

Otimização

- Quanto à área do programa
  - Otimizações locais: que se aplicam a segmentos de código de linha reta, ou seja, que não contêm saltos para dentro ou fora da seqüência; seqüência maximal de código de linha reta é chamada “bloco básico”
    - Relativamente fáceis de efetuar
  - Otimizações globais: que se estendem para além dos blocos básicos, mas que sejam confinadas a um procedimento individual
    - Exigem análise de fluxo de dados
  - Otimizações interprocedimentos: que se estendem para além dos limites dos procedimentos, podendo atingir o programa todo
    - As mais complexas, exigindo diversos tipos de informações e rastreamentos do programa

55

Exercício para entregar

- Em duplas
  - Pesquisar sobre bytecode, o código intermediário de java
    - Fazer/responder
      - Como é o código? Características do código, que estilo segue (P-código ou 3 endereços)?
      - Exemplos
      - É independente ou assume a existência de alguma organização de memória (pilha)?

56