

# Optimierungen in Übersetzern: Verfahren

Marco Ammon (my04mivo)

11. August 2020

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kontrollflussanalyse</b>	<b>2</b>
1.1	Kontrollflussgraph . . . . .	2
1.2	Dominanz . . . . .	2
1.2.1	Berechnung der Dominatoren $D(n)$ eines Knoten $n$ . . . . .	2
1.2.2	Dominanzgrenze . . . . .	3
1.3	Schleifenerkennung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Datenflussanalyse</b>	<b>4</b>
2.1	Berechnung von Datenflusswissen . . . . .	4
2.2	Typische Datenflussprobleme . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Wertnummerierung in Grundblock</b>	<b>6</b>
<b>4</b>	<b>Static Single Assignment (SSA)</b>	<b>7</b>
4.1	Konstruktion der SSA-Form . . . . .	7
4.1.1	Iteratives Dominanzgrenzenverfahren nach Cytron ( $\mathcal{O}(N^2)$ ) . . . . .	7
4.1.2	Wertnummerierungsverfahren nach Click . . . . .	7
4.2	Optimierungen auf SSA-Form . . . . .	7
4.3	Rücktransformation aus SSA-Form . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Aliasanalyse</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Induktionsvarianten und schleifeninvarianter Code</b>	<b>8</b>
<b>7</b>	<b>Schleifen und Arrays</b>	<b>8</b>
<b>8</b>	<b>Schleifentransformationen</b>	<b>8</b>
<b>9</b>	<b>Schleifenrestrukturierungen</b>	<b>8</b>

# 1 Kontrollflussanalyse

## 1.1 Kontrollflussgraph

- Gerichteter Graph
- Knoten: Grundblöcke (meist maximal)
- Kante zwischen zwei Blöcken  $A$  und  $B$  wenn  $B$  direkt nach  $A$  ausgeführt werden kann (etwa [un-]bedingter Sprung oder Fallthrough)
- Synthetische Ergänzung um Entry- und Exit-Knoten, die mit Kante verbunden sind
- Kontrollflussabhängigkeit: Bei Verzweigungsknoten  $v$  mit direkten Nachfolgern  $a$  und  $b$ :  $y$  kontrollflussabhängig von  $v \Leftrightarrow$  mindestens ein Pad von  $a$  zum Exit-Knoten ohne  $y$  und jeder Pfad von  $b$  zum Exit-Knoten über  $y$

## 1.2 Dominanz

- Knoten  $x$  dominiert  $y$  ( $x \geq y$ ), wenn jeder Pfad von Wurzel zu  $y$  durch  $x$  laufen muss
- Strikte Dominanz  $x \gg y$ , falls zusätzlich  $x \neq y$  gilt
- $\text{ImmDom}[y]$  ist strikter Dominator von  $y$ , der  $y$  am Nächsten ist
- Dominatorbaum enthält jeden Knoten als Kind seines  $\text{ImmDomms}$   $\rightarrow$  Pfad zwischen  $x$  und  $z$  in Dominatorbaum  $\Leftrightarrow x \gg z$

### 1.2.1 Berechnung der Dominatoren $D(n)$ eines Knoten $n$

#### Iterativer Fixpunkt-Algorithmus (Lengauer)

- mit  $\mathcal{O}(|E||N|^2)$
- Zunächst Überapproximation der Dominatorenmenge
- Initialisierung aller  $D(n) \in N$  mit  $N$  außer Startknoten  $S$  mit  $D(S) = S$
- Bis Fixpunkt erreicht ist: alle  $D(n)$  zu  $D'(n) = \{n\} \cup \bigcap_{(p,n) \in E} D(p)$
- $n$  am besten in Tiefensuchereihenfolge durchlaufen

#### Verfahren mit Spannendem Tiefenbaum $T$

- Besuch des KFG in Tiefensuchereihenfolge mit zugehöriger Nummerierung:
  - „Spannende“ Kanten gehen zu frisch nummerierten Knoten
  - Rückschreitende Kanten gehen zu Vorgänger (kleinere DFS-Nummer) in  $T$
  - Fortschreitende Kanten gehen zu Nachfolger (größere DFS-Nummer) in  $T$
  - Kreuzkanten führen in früher besuchten Ast in  $T$
- Dominatoren  $D(n)$  liegen auf jeden Fall „über“  $n$  in  $T$
- Berechnung der Semidominatoren  $\text{SemDom}[w]$  in Reihenfolge fallender DFS-Nummern:
  - Direkte Vorgänger auf  $T$  sind Kandidaten
  - $\min_{u \in \text{Pred}(w)} \text{SemDom}[u]$  ist Kandidat
  - Minimum der Kandidaten ist  $\text{SemDom}[w]$

- Berechnung von  $\text{ImmDom}[w]$  durch Durchlaufen in Tiefenordnung von  $\text{SemDom}[w]$  nach  $w$ :

- Jeweils alle Vorgänger  $u$  untersuchen und  $u$  mit kleinstem  $\text{SemDom}[u]$  finden

–

$$\text{ImmDom}[w] = \begin{cases} \text{SemDom}[u] & \text{falls } \text{SemDom}[w] = \text{SemDom}[u] \\ \text{ImmDom}[u] & \text{sonst} \end{cases}$$

### 1.2.2 Dominanzgrenze

- Dominanzgrenze  $DG[x]$  enthält Knoten  $y$ , die einen von  $x$  dominierten Vorgänger besitzen, aber nicht von  $x$  streng dominiert werden
- Berechnung der  $DG[x]$ :

$$DG[x] = DG_{\text{local}}[x] \cup \bigcup_{z \in N, \text{ImmDom}[z]=x} DG_{\text{up}}[x, z]$$

$$DG_{\text{local}}[x] = \{y \in \text{Succ}(x) \mid \text{ImmDom}[y] \neq x\}$$

$$DG_{\text{up}}[x, z] = \{y \in DG[z] \mid \text{ImmDom}[y] \neq x\}$$

- Invertierung der Dominanzgrenzen liefert Kontrollflussabhängigkeiten

### 1.3 Schleifenerkennung

- Region:
    - Untergraph mit einem „Header“  $d$ , der (potentiell mehrere) Eingangskante von außerhalb besitzt
    - Wichtige Region: maximale Region mit  $d$  dominiert alle Knoten der Region
    - Hierarchischer Flussbaum: Baum der Regionen
  - Rückwärtskante: Kante  $(n, d)$  mit  $d \geq n$
  - Natürliche Schleife:
    - Rückwärtskante  $(n, d)$  sowie alle Knoten  $k$  mit  $d \geq k$  und es gibt einen Pfad von  $k$  nach  $n$  ohne  $d$
    - Bestimmung mit Worklist-Algorithmus, der bei  $n$  beginnt und rekursiv die Vorgänger bis  $d$  durchläuft und in Menge aufnimmt
  - Suche nach Rückwärtskanten und natürlichen Schleifen in wichtigen Regionen ausreichend
  - „Unsaubere“ Regionen:
    - ein Knoten dominiert nachgeordneten Zyklus
    - Erkennung durch Prüfung der Reduzierbarkeit des Graphs:
      - \* Entfernung der Rückwärtskanten aus KFG  $\rightarrow$  azyklischer Graph, in dem jeder Knoten von der Wurzel erreicht werden kann  $\Leftrightarrow$  KFG frei von unnatürlichen Schleifen
      - \* Alternative mit Transformationen: Am Ende Graph aus einem einzigen Knoten  $\Leftrightarrow$  KFG reduzierbar (ohne Zyklen)
- T1-Transformation** Selbstschleifen aus Graph löschen
- T2-Transformation** Knoten mit eindeutigem Vorgänger mit diesem zusammenfassen

## 2 Datenflussanalyse

- Datenabhängigkeiten:
  - Schreiben vor Lesen:
  - Schreiben vor Schreiben: Ausgabeabhängigkeit
  - Lesen vor Schreiben: Anti-Abhängigkeit
- Starke Variablendefinition: sichere Zuweisung zu einer Variablen
- Schwache Variablendefinition: mögliche Zuweisung zu einer Variablen (etwa über Zeiger oder Referenz, die möglicherweise auf Variable zeigen)

### 2.1 Berechnung von Datenflusswissen

- Funktion pro Grundblock:
  - Eingabe: bei Vorwärtsproblem (Rückwärtsproblem) Datenflusswissen der Vorgängerknoten (Nachfolgerknoten)
  - Vorverarbeitung: logische Operationen oder Mengenoperationen
    - \* sicher (must): Eigenschaft muss auf allen Eingangskanten erfüllt sein
    - \* möglich (may): Eigenschaft muss auf mindestens einer Eingangskante erfüllt sein
  - Ausgabe: auf Eingabe und in Grundblock enthaltenen Befehlen basierendes, aktualisiertes Datenflusswissen
- Iterativer Fixpunkt-Algorithmus für Vorwärtsproblem: optimaler Besuch in Reihenfolge des spannenden Tiefenbaums

```
in(Entry) ← Init
for all  $n \in N \setminus \{\text{Entry}\}$  do
  in( $n$ ) ←  $\perp$ 
end for
WL ←  $N \setminus \{\text{Entry}\}$ 
while WL  $\neq \emptyset$  do
   $B \leftarrow \text{pop}(\text{WL})$ 
  out ←  $f_B(\text{in}(B))$ 
  for all  $B' \in \text{Succ}(B)$  do
    in( $B'$ ) ← in( $B'$ )  $\sqcup$  out
    if out  $\neq$  out( $B$ ) then
      WL ← WL  $\cup \{B'\}$ 
      out( $B$ ) ← out
    end if
  end for
end while
```
- Probleme bei Verwendung von Bitvektoren:
  - Transformation erfordert komplettes Neuberechnen
  - Bitvektoren oft zu groß für jeweilige Nutzungsstelle
- Alternative Datenstrukturen:
  - Definitions-Nutzungs-Graph für erreichbare Nutzungen
  - Nutzungs-Definitions-Graph für erreichenden Definitionen
  - Variablen-Netz als Vereinigung aller sich schneidenden DU-Graphen

- Single Static-Assignment (SSA)

## 2.2 Typische Datenflussprobleme

- Erreichende Definitionen:
  - mindestens ein Pfad, auf dem Variable nicht erneut schwach definiert wird
  - Optimierungen:
    - \* Keine erreichende Definition  $\rightarrow$  Variable nicht initialisiert
    - \* Genau eine oder gleiche Definition  $\rightarrow$  Konstantenweitergabe oder Kopienfortschreibung möglich
    - \* Alle Variablen nur außerhalb einer Schleife definiert  $\rightarrow$  Ausdruck schleifeninvariant
  - Umsetzung:
    - \* Eine Bitposition pro Variablendefinition
    - \* Setzen bei Definition der Variable
    - \* Zurücksetzen bei mindestens schwacher Definition
    - \* Anfangsbelegung: false
    - \* Vorverarbeitung: oder
- Konstantenweitergabe:
  - Eine Bitposition plus Wert pro Variable
  - Setzen von Bit und Wert bei konstanter Definition
  - Zurücksetzen von Bit bei mindestens schwacher oder nicht konstanter Definition
  - Anfangsbelegung: false, ?
  - Vorverarbeitung: und sowie Wertgleichheit
- Kopienfortschreibung:
  - Eine Bitposition pro aus Kopieren entstandener Wertgleichheitsbeziehung
  - Setzen bei Kopieroperation
  - Zurücksetzen wenn Original oder Kopie mindestens schwach definiert wird
  - Anfangsbelegung: false
  - Vorverarbeitung: und
- Verfügbare Ausdrücke:
  - auf allen Pfaden von Entry-Knoten aus wird Ausdruck bestimmt und verwendete Variablen anschließend nicht mehr schwach definiert
  - Optimierungen:
    - \* Elimination gleicher Teilausdrücke
    - \* Wiederverwendung statt Neuberechnung
  - Umsetzung:
    - \* Eine Bitposition pro wertnummeriertem (Teil-)Ausdruck
    - \* Setzen wenn Ausdruck ausgewertet wird
    - \* Zurücksetzen wenn vorkommende Variable mindestens schwach definiert wird

- \* Anfangsbelegung: false
- \* Vorverarbeitung: und sowie Ausdruck muss auf allen Pfaden verfügbar sein
- Lebendige Variablen:
  - lebendig in Knoten  $D$ , wenn es einen Pfad von  $D$  zum Exit-Knoten gibt, auf der die Variable ohne vorherige Redefinition schwach benutzt wird; sonst tot
  - Optimierungen:
    - \* Tote Variablen müssen nicht ausgerechnet werden
    - \* Weniger Registerdruck
    - \* Elimination redundanter Schleifenlaufvariablen nach der Schleife
  - Umsetzung:
    - \* Eine Bitposition pro Variable
    - \* Setzen bei Verwendung der Variable
    - \* Zurücksetzen bei starker Redefinition
    - \* Anfangsbelegung: false
    - \* Vorverarbeitung: oder
- Erreichbare Nutzungen:
  - Alle Nutzungen einer Variable durch Bestimmen der Pfade, auf denen Variable ohne vorherige Redefinition verwendet wird
  - Zweck: Hilfreich für Lebendigkeitsspannen und Registerallokation
- Vorhersehbare Ausdrücke:
  - auf allen Pfaden zum Exit-Knoten wird Ausdruck bestimmt und verwendete Variablen werden nicht vorher schwach redefiniert
  - Optimierungen:
    - \* Vorziehen der Ausdrucksberechnung zur Verkleinerung der Code-Größe
    - \* Geringerer Registerdruck in folgenden Zweigen
  - Umsetzung:
    - \* Eine Bitposition pro (Teil-)Ausdruck
    - \* Setzen bei Auswertung des Audrucks
    - \* Zurücksetzen bei mindestens schwacher Redefinition einer der verwendeten Variablen
    - \* Anfangsbelegung: false
    - \* Vorverarbeitung: und

### 3 Wertnummerierung in Grundblock

- Post-Order-Traversierung des Ausdrucksbaums
- Jede referenzierte Variable bekommt eindeutige Id
- Kombination aus Operator und beiden Argumenten bekommt entweder frische Id oder bei Duplikat (auch kommutativ) bereits verwendete
- Gleiche Ids  $\Leftrightarrow$  gleicher Ausdruck

## 4 Static Single Assignment (SSA)

- Jede Variable hat exakt eine starke und keine schwache Definition
- erfordert Verwendung von  $\phi$ -Funktionen, die verschiedene Variablen zusammenführt

### 4.1 Konstruktion der SSA-Form

- In isoliertem Grundblock trivial: Erzeugung einer neuen Variable  $x_i$  bei jeder Definition
- $\phi$ -Funktionen sollten möglichst sparsam nur wenn notwendig eingefügt werden

#### 4.1.1 Iteratives Dominanzgrenzenverfahren nach Cytron ( $\mathcal{O}(N^2)$ )

- Dominanzgrenzenkriterium: Aus Definition von  $v$  in Grundblock  $X$  folgt eine  $\phi$ -Funktion für  $v$  in jedem Grundblock der Dominanzgrenze von  $X$
- Eingefügte  $\phi$ -Funktionen werden Variablen zugewiesen, für die das Dominanzgrenzenkriterium erneut angewendet werden muss

#### 4.1.2 Wertnummerierungsverfahren nach Click

- Wertnummerierung für jeden Grundblock  $Z$  durchführen:
  - $\text{wn}_Z(\text{const}) = \text{const}$
  - Wenn  $Z$  Entry-Knoten, alle Wertnummern der Tupel in  $Z$  auf ungültig setzen
  - Bei zwei Vorgängern  $X, Y$  von  $Z$ , welche beide bereits besucht sind:
    - \* Wenn  $\text{wn}_X(t) \neq \text{wn}_Y(t)$ , dann neue Wertnummer  $x$  für  $\text{wn}_Z(t)$  einführen und  $\text{wn}_Z(t) = \phi(\text{wn}_X(t), \text{wn}_Y(t))$  generieren
    - \* Ansonsten:  $\text{wn}_Z(t) = \text{wn}_X(t)$
  - Bei einem Vorgänger  $X$  mit undefiniertem  $\text{wn}_X(t)$  diesen rekursiv initialisieren
  - Bei zwei Vorgängern  $X, Y$  von  $Z$ , wobei nur  $X$  noch unbesucht ist:
    - \* Neue Wertnummer für  $\text{wn}_Z(t)$  einführen
    - \* Neue besondere Wertnummer für  $\text{wn}_X(t)$  einführen
    - \* Vorläufige  $\phi'$ -Funktion  $\text{wn}_Z(t) = \phi'(\text{wn}_X(t), \text{wn}_Y(t))$  generieren
- Wertnummerierung für alle Tupel  $t$  in  $Z$  durchführen
- Nach Durchführung für alle Blöcke,  $\phi'$ -Funktionen korrigieren:
  - Besondere Wertnummern in  $X$  durch letzte in  $X$  gültige Wertnummer ersetzen
  - Offene  $\phi'$ -Funktionen durch abgeschlossene  $\phi$ -Funktion mit ersetzten Werten ersetzen
  - Falls  $t$  in unbesuchten Blöcken nicht geändert wurde,  $\text{wn}_Z(t) = \phi'(\text{wn}_X(t), \text{wn}_Y(t))$  löschen und alle Verwendungen von  $\text{wn}_Z(t)$  durch  $\text{wn}_X(t)$  ersetzen

### 4.2 Optimierungen auf SSA-Form

- Konstantenweitergabe:
  - Aus  $v_i = c$  können alle Verwendungen von  $v_i$  durch die Konstante  $c$  ersetzt werden
  - Aus  $v_i = \phi(c_1, c_2, \dots)$  kann  $v_i$  durch  $c_1$  ersetzt werden, wenn alle  $c_i$  gleich sind
  - Datenflussanalyse muss nach Ersetzung nicht wiederholt werden, Worklist-Algorithmus reicht aus

- Kopienfortschreibung: Aus  $v_i = y_j$  kann jede Verwendung von  $v_i$  durch  $y_j$  ersetzt werden
- Lebendigkeit einer Variable lässt sich direkt aus weiterem lesenden Zugriff erkennen
- Gemeinsame Teilausdrücke, verfügbare Ausdrücke und vorhersehbare Ausdrücke lassen sich durch Wertnummerierung in gesamter Prozedur leicht erkennen
- Elimination toten Codes:
  - alles, was nicht als lebendig markiert ist, ist tot
  - Markierung von Anweisungen als lebendig, falls sie
    - \* Seiteneffekte wie I/O, Funktionsaufrufe oder die Rückgabe von Werten hat
    - \* eine später von einer lebendigen Anweisung benutzte Variable schreibt
    - \* eine Verzweigung ist, von der eine lebendige Anweisung kontrollflussabhängig ist

### 4.3 Rücktransformation aus SSA-Form

- $\phi$ -Funktion nicht in Hardware abbildbar, Umwandlung notwendig
- Aus  $v_3 = \phi(v_1, v_2)$  wird
  - $v_3 = v_i$  in Vorgängerblock  $i$  falls sich Lebensspannen der  $v_i$  nicht paarweise überlappen (konventionelle SSA-Form)
  - $v_3 = t$  ( $t$  frische Temporärvariable) in Block mit  $\phi$ -Funktion sowie  $t = v_i$  in Vorgängerblock  $i$
- Sequentialisierung paralleler Kopieroperationen (TODO VL-06)
- Variablen können auch nur schwach definiert sein, etwa durch Zeiger auf Variablen oder Seiteneffekte von Prozeduren auf globale Variablen  $\rightarrow$  Hilfsfunktion  $\text{isAlias}(p, v)$ 
  - $$\text{isAlias}(p, v) = \begin{cases} *p & \text{falls } p = \&v \\ v & \text{sonst} \end{cases}$$
  - Für jede Zuweisung  $*p = \dots$  für jede Variable  $v_i$ , auf die  $p$  zeigen könnte, neue Zuweisung  $v_{i+1} = \text{isAlias}(p, v_i)$  einfügen

## 5 Aliasanalyse

## 6 Induktionsvarianten und schleifeninvarianter Code

## 7 Schleifen und Arrays

## 8 Schleifentransformationen

## 9 Schleifenrestrukturierungen