

Korrekte Software: Grundlagen und Methoden
Vorlesung 14 vom 08.07.19
Rückblick & Ausblick

Serge Autexier, Christoph Lüth

Universität Bremen

Sommersemester 2019

Fahrplan

- ▶ Einführung
- ▶ Operationale Semantik
- ▶ Denotationale Semantik
- ▶ Äquivalenz der Operationalen und Denotationalen Semantik
- ▶ Der Floyd-Hoare-Kalkül
- ▶ Invarianten und die Korrektheit des Floyd-Hoare-Kalküls
- ▶ Strukturierte Datentypen
- ▶ Verifikationsbedingungen
- ▶ Vorwärts mit Floyd und Hoare
- ▶ Modellierung
- ▶ Spezifikation von Funktionen
- ▶ Referenzen und Speichermodelle
- ▶ Funktionsaufrufe und das Framing-Problem
- ▶ Ausblick und Rückblick

Was gibt's heute?

- ▶ Rückblick
- ▶ Ausblick
- ▶ Feedback

Rückblick

Semantik

- ▶ Operational — Auswertungsrelation $\langle c, \sigma \rangle \rightarrow \sigma'$
- ▶ Denotational — Partielle Funktion $\llbracket c \rrbracket : \Sigma \rightarrow \Sigma$
- ▶ Axiomatisch — Floyd-Hoare-Logik
- ▶ Welche Semantik wofür?
- ▶ Beweis: Äquivalenz von operationaler und denotationaler Semantik

Floyd-Hoare-Logik

- ▶ Floyd-Hoare-Logik: partiell und total
- ▶ $\vdash \{P\} c \{Q\}$ vs. $\models \{P\} c \{Q\}$: Vollständigkeit, Korrektheit
- ▶ Die sechs Basisregeln
- ▶ Zuweisungsregel: vorwärts (Floyd) vs. rückwärts (Hoare)
- ▶ VCG: Schwächste Vorbedingung und stärkste Nachbedingung
- ▶ Beweis: Korrektheit und Vollständigkeit der Floyd-Hoare-Logik

Erweiterungen der Programmiersprache

- ▶ Für jede Erweiterung:
 - ▶ Wie modellieren wir semantisch?
 - ▶ Wie ändern sich die Regeln der Logik?

1. Erweiterung der Programmiersprache

- ▶ Strukturen und Felder
 - ▶ Lokationen: strukturierte Werte **Lexp**
 - ▶ Erweiterte Substitution in Zuweisungsregel
 - ▶ Sonstige Regeln bleiben

2. Erweiterung der Programmiersprache

- ▶ Prozeduren und Funktionen
 - ▶ Modellierung von **return**: Erweiterung zu $\Sigma \rightarrow \Sigma + \Sigma \times \mathbf{V}_U$
 - ▶ Spezifikation von Funktionen durch Vor-/Nachbedingungen
 - ▶ Spezifikation der Funktionen muss im Kontext stehen
 - ▶ Unterscheidung zwischen zwei Nachbedingungen
 - ▶ Regeln für den Funktionsaufruf

3. Erweiterung der Programmiersprache

- ▶ Referenzen
 - ▶ Konversion zwischen **Lexp** und **Aexp**
 - ▶ Lokationen nicht mehr symbolisch (Variablennamen), sondern abstrakt
 $\Sigma = \mathbf{Loc} \rightarrow \mathbf{V}, \mathbf{V} = \mathbb{Z} + \mathbf{Loc}$
 - ▶ Zustand als **abstrakter Datentyp** mit Operationen *read* und *upd*
 - ▶ Zuweisung nicht mehr mit Substitution, sondern explizit durch *upd*
 - ▶ Spezifikationen sind **explizite Zustandsprädikate**, Konversion $(-)^{\dagger}, (-)^{\#}$

Ausblick

Was geht noch?

- ▶ Die Sprache C
- ▶ Andere Programmiersprachen
- ▶ Logik und Spezifikation
- ▶ Success Stories

Die Sprache C: Was haben wir ausgelassen?

Semantik:

- ▶ Nichtdeterministische Semantik: Seiteneffekte, Sequence Points
→ Umständlich zu modellieren, Effekt zweitrangig
- ▶ Implementationsabhängiges, unspezifiziertes und undefiniertes Verhalten
→ Genauere Unterscheidung in der Semantik

Kontrollstrukturen:

- ▶ **switch** → Ist im allgemeinen Fall ein **goto**
- ▶ **goto**, `setjmp/longjmp`
→ Allgemeinfall: tiefe Änderung der Semantik (*continuations*)

Die Sprache C: Was haben wir ausgelassen?

Typen:

- ▶ Funktionszeiger → Für “saubere” Benutzung gut zu modellieren
- ▶ Weitere Typen: **short/long int**, **double/float**, `wchar_t`, und Typkonversionen → Fleißarbeit
- ▶ Fließkommazahlen → Spezifikation nicht einfach
- ▶ **union** → Kompliziert das Speichermodell
- ▶ **volatile** → Bricht read/update-Gleichungen
- ▶ **typedef** → Ärgernis für Lexer/Parser, sonst harmlos

Die Sprache C: Was haben wir ausgelassen?

Für **realistische C-Programme**:

- ▶ Compiler-Erweiterungen (gcc, clang)
- ▶ Büchereien (Standardbücherei, Posix, ...)
- ▶ Nebenläufigkeit

Andere Sprachen: Wie modelliert man Java?

- ▶ Die **Kernsprache** ist ähnlich zu C0.
- ▶ Java hat erschwerend:
 - ▶ dynamische Bindung,
 - ▶ Klassen mit gekapseltem Zustand und Invarianten,
 - ▶ Nebenläufigkeit, und
 - ▶ Reflektion.
- ▶ Java hat dafür aber
 - ▶ ein einfacheres Speichermodell, und
 - ▶ eine wohldefinierte Ausführungsumgebung (die JVM).

Andere Sprachen: Wie modelliert man C++?

- ▶ Sehr **vorsichtig** (konservativ)
- ▶ Viele Features, fehlende formale Semantik, ...
- ▶ Mehrfachvererbung theoretisch anspruchsvoll
- ▶ Es gibt **keine** Formalismen/Werkzeuge, die C++ voll unterstützen
- ▶ Ansätze: Übersetzung nach C/LLVM, Behandlung dort

Andere Sprachen: Wie modelliert man PHP?

Gar nicht.

Logik und Spezifikation

- ▶ Wir **generieren** Verifikationsbedingungen, wie kann man sie **beweisen**?
- ▶ **Automatische Beweiser:**
 - ▶ **SAT-Checker** lösen Erfüllbarkeitsproblem der Aussagenlogik (MiniSAT, Chaff)
 - ▶ **SMT-Beweiser** beweisen Aussagen der Prädikatenlogik mit linearer Arithmetik, Funktionen und Induktion (Z3, Yices, CVC)
- ▶ **Interaktive Beweiser:**
 - ▶ Beweisführung durch Benutzer, **Überprüfung** durch Beweiser
 - ▶ Sehr **mächtige** Logiken, aber nicht vollautomatisch (Isabelle, Coq)

Beispiel: Z3

- ▶ SMT-Beweiser versuchen Gegenbeweis zu konstruieren
- ▶ Daher: um ϕ zu beweisen, versuchen wir $\neg\phi$ zu widerlegen

Beweis einer VC:

$$x \geq 0 \wedge y > 0 \implies x = 0 * y + x$$

Unerfüllbare VC:

$$x \geq 0 \wedge y > 0 \implies x \geq y$$

Input Z3:

```
(declare-const x Int)
(declare-const y Int)
(assert
  (not (=> (and (>= x 0) (> y 0))
          (= x (+ (* 0 y) x))))
)
(check-sat)
```

Antwort:

unsat

Input Z3:

```
(declare-const x Int)
(declare-const y Int)
(assert
  (not (=> (and (>= x 0) (> y 0))
          (>= x y)))
)
(check-sat)
```

Antwort:

sat

Beispiel: Isabelle

The screenshot shows the Isabelle2017 IDE with the following content:

```
Isabelle.thy (~:/src/Isabelle)
File Edit Search Markers Folding View Utilities Macros Plugins Help
[Icons]
Isabelle.thy (~:/src/Isabelle)
"exp2 (Suc n) = (Suc n) * (exp2 n)"
theorem exp2_correct: "x > 0 ==> exp2 x = x * exp2 (x-1)"
  apply (cases x)
  apply (simp+)
  done
fun div2 :: "nat => nat" where
"div2 0 = 0" |
"div2 (Suc 0) = 0" |
"div2 (Suc (Suc n)) = Suc (div2 n)"
theorem div2_corr: "div2 n = n div 2"
  apply (induct_tac n rule: div2.induct)
  apply (simp+)
  done
lemma [simp]: "(div2 n) < (Suc n)"
  apply (induct_tac n rule: div2.induct, simp+)
  done
fun f :: "nat => nat" where
"f 0 = 1" |
"f (Suc n) = f (div2 n)"
theorem exp2_correct: 0 < ?x ==> exp2 ?x = ?x * exp2 (?x - 1)
```

On the right, a file browser shows the project structure:

- Examples
 - src/HOL/lex/Sig.thy
 - src/HOL/lex/ML.thy
 - src/HOL/Univ/Univ.thy
 - src/HOL/lex_Examples/Dirlexer.thy
 - src/Tools/SML/Examples.thy
- Release notes
 - ANNOUNCE
 - README
 - NEWS
 - COPYRIGHT
 - CONTRIBUTORS
 - contrib/README
 - src/Tools/Ed/src/README
- Tutorials
 - prog-prec: Programming and Proving
 - locales: Tutorial on Locales
 - classes: Tutorial on Type Classes
 - datatypes: Tutorial on (Co)datatype De...
 - functions: Tutorial on Function Defini...
 - corec: Tutorial on Nonprimitively Corec...
 - codegen: Tutorial on Code Generation
 - nitpick: User's Guide to Nitpick
 - sledgehammer: User's Guide to Sledgeh...
 - web2doc: The Emacs User Manual
 - sledge: LaTeX Sugar for Isabelle docum...
- Reference Manuals
 - main: What's in Main
 - isar-ref: The Isabelle/Isar Reference Ma...
 - implementation: The Isabelle/Isar Impl...
 - system: The Isabelle System Manual
 - edit: Isabelle/Edit
- Old Manuals
- Original/Ed Documentation

At the bottom, a status bar shows: 18.1 (295/1957) and (isabelle.isabelle.LIT-8 Isabelle) Home UG 370/147MB 00:30

Korrekte Software in der Industrie

- ▶ Meist in speziellen Anwendungsgebieten: Luft-/Raumfahrt, Automotive, sicherheitskritische Systeme, Betriebssysteme
- ▶ Ansätze:
 - ① Vollautomatisch: **statische Analyse** (Abstrakte Interpretation) für spezielle Aspekte: Freiheit von Ausnahmen und Unter/Überläufen, Programmsicherheit, Laufzeitverhalten (WCET) (nicht immer korrekt, meist vollständig)
 - ▶ Werkzeuge: absint
 - ② Halbautomatisch: **Korrektheitsannotationen**, Überprüfung automatisch
 - ▶ Werkzeuge: Spark (ADA), Frama-C (C), JML (ESC/Java, Krakatao; Java), Boogie und Why (generisches VCG), VCC (C)
 - ③ Interaktiv: Einbettung der Sprache in interaktiven Theorembeweiser (Isabelle, Coq)
 - ▶ Beispiele: L4.verified, CompCert, SAMS

Feedback

Deine Meinung zählt

- ▶ Was war gut, was nicht?
- ▶ Arbeitsaufwand?
- ▶ Mehr **Theorie** oder mehr **Praxis**?
- ▶ Programmieraufgaben?
- ▶ Leichtgewichtiger Übungsbetrieb — mehr oder weniger?
- ▶ Bitte auch die **Evaluation** auf stud.ip beantworten!

Tschüß!

