

# Abstraktsete domeenide omaduspõhine testimine

## Bakalaureusetöö

Simmo Saan

Tartu Ülikool, arvutiteaduse instituut

Juuni, 2018

- 1 Sissejuhatus
- 2 Teoreetiline taust
- 3 Goblint analüsaator
- 4 Testimise tulemused
- 5 Kokkuvõte

- Staatileine analüüs — programme ei käivitata
  - Vigade otsimine
  - Vigade puudumise tõestamine
- Abstraktne interpretatsioon
  - Ligikaudsed seisundid
  - Teooria garanteerib korrektsuse (ingl. *sound*)
- Analüsaatorites esineb vigu
  - Analüüs ja selle korrektsus rikutud

- Staatileine analüüs — programme ei käivitata
  - Vigade otsimine
  - Vigade puudumise tõestamine
- Abstraktne interpretatsioon
  - Ligikaudsed seisundid
  - Teooria garanteerib korrektsuse (ingl. *sound*)
- Analüsaatorites esineb vigu
  - Analüüs ja selle korrektsus rikutud

## Eesmärk

### Goblint analüsaatori

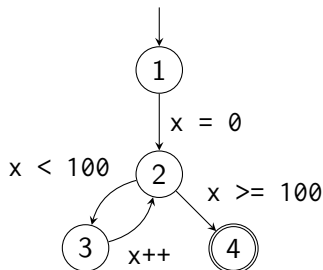
- Domeenide omaduspõhine testimine
- Vigade tuvastamine

- Täisarvude staatiliseks analüüsiks saab kasutada **intervalle**
  - Näiteks  $[0, 3]$ ,  $[-1, 5]$ ,  $[2, 2]$ ,  $[1, +\infty]$ ,  $[-\infty, +\infty]$
- Aritmeetilised tehted intervallidel
  - Näiteks liitmine  $[0, 3] + [-1, 5] = [-1, 8]$

- Täisarvude staatiliseks analüüsiks saab kasutada **intervalle**
  - Näiteks  $[0, 3]$ ,  $[-1, 5]$ ,  $[2, 2]$ ,  $[1, +\infty]$ ,  $[-\infty, +\infty]$
- Aritmeetilised tehted intervallidel
  - Näiteks liitmine  $[0, 3] + [-1, 5] = [-1, 8]$
- Osalise järjestuse seos sisalduvuse kaudu
  - Näiteks  $[2, 2] \subseteq [0, 3] \subseteq [-1, 5] \subseteq [-\infty, +\infty]$
  - Kokkuleppeliselt väiksem tähendab täpsemat
- Ühendamise tehe ühendi kaudu
  - Näiteks  $[0, 3] \sqcup [5, 7] = [0, 7]$
- Suurim intervall
  - $\top = [-\infty, +\infty]$

# Näidisanalüüs intervallidega

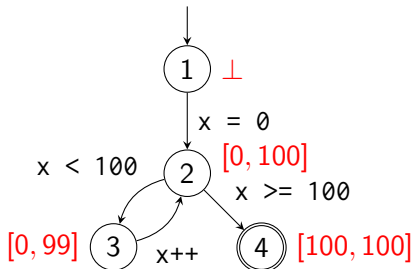
```
int x = 0;  
while (x < 100)  
    x++;
```



# Näidisanalüüs intervallidega

```
int x = 0;  
while (x < 100)  
    x++;
```

Muutuja x väärtus





Domeen peab moodustama **täieliku võre**:

- Elementide hulk  $\mathbb{D}$
- Osalise järjestuse seos  $\sqsubseteq$
- Ülemise raja tehe  $\sqcup$
- Alumise raja tehe  $\sqcap$
- Suurim element  $\top$
- Vähim element  $\perp$

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

- $a \sqsubseteq a$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqsubseteq c$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq a$ , siis  $a = b$

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

- $a \sqsubseteq a$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqsubseteq c$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq a$ , siis  $a = b$
- $a \sqsubseteq a \sqcup b$  ja  $b \sqsubseteq a \sqcup b$
- $a \sqcap b \sqsubseteq a$  ja  $a \sqcap b \sqsubseteq b$
- kui  $a \sqsubseteq c$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqcup b \sqsubseteq c$
- kui  $c \sqsubseteq a$  ja  $c \sqsubseteq b$ , siis  $c \sqsubseteq a \sqcap b$

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

- $a \sqsubseteq a$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqsubseteq c$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq a$ , siis  $a = b$
- $a \sqsubseteq a \sqcup b$  ja  $b \sqsubseteq a \sqcup b$
- $a \sqcap b \sqsubseteq a$  ja  $a \sqcap b \sqsubseteq b$
- kui  $a \sqsubseteq c$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqcup b \sqsubseteq c$
- kui  $c \sqsubseteq a$  ja  $c \sqsubseteq b$ , siis  $c \sqsubseteq a \sqcap b$
- $(a \sqcup b) \sqcup c = a \sqcup (b \sqcup c)$
- $a \sqcup b = b \sqcup a$
- $a \sqcup a = a$
- $a \sqcup (a \sqcap b) = a$
- $(a \sqcap b) \sqcap c = a \sqcap (b \sqcap c)$
- $a \sqcap b = b \sqcap a$
- $a \sqcap a = a$
- $a \sqcap (a \sqcup b) = a$

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

- $a \sqsubseteq a$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqsubseteq c$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq a$ , siis  $a = b$
- $a \sqsubseteq a \sqcup b$  ja  $b \sqsubseteq a \sqcup b$
- $a \sqcap b \sqsubseteq a$  ja  $a \sqcap b \sqsubseteq b$
- kui  $a \sqsubseteq c$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqcup b \sqsubseteq c$
- kui  $c \sqsubseteq a$  ja  $c \sqsubseteq b$ , siis  $c \sqsubseteq a \sqcap b$
- $(a \sqcup b) \sqcup c = a \sqcup (b \sqcup c)$
- $a \sqcup b = b \sqcup a$
- $a \sqcup a = a$
- $a \sqcup (a \sqcap b) = a$
- $\perp \sqsubseteq a$
- $a \sqsubseteq \top$
- $a \sqcup \perp = a$
- $a \sqcap \top = a$
- $(a \sqcap b) \sqcap c = a \sqcap (b \sqcap c)$
- $a \sqcap b = b \sqcap a$
- $a \sqcap a = a$
- $a \sqcap (a \sqcup b) = a$

# Domeenide omadused

Olgu  $\mathbb{D}$  täielik võre, siis iga  $a, b, c \in \mathbb{D}$  korral:

- $a \sqsubseteq a$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqsubseteq c$
- kui  $a \sqsubseteq b$  ja  $b \sqsubseteq a$ , siis  $a = b$
- $a \sqsubseteq a \sqcup b$  ja  $b \sqsubseteq a \sqcup b$
- $a \sqcap b \sqsubseteq a$  ja  $a \sqcap b \sqsubseteq b$
- kui  $a \sqsubseteq c$  ja  $b \sqsubseteq c$ , siis  $a \sqcup b \sqsubseteq c$
- kui  $c \sqsubseteq a$  ja  $c \sqsubseteq b$ , siis  $c \sqsubseteq a \sqcap b$
- $(a \sqcup b) \sqcup c = a \sqcup (b \sqcup c)$
- $a \sqcup b = b \sqcup a$
- $a \sqcup a = a$
- $a \sqcup (a \sqcap b) = a$

- $\perp \sqsubseteq a$
- $a \sqsubseteq \top$
- $a \sqcup \perp = a$
- $a \sqcap \top = a$

Samaväärsed:

- 1  $a \sqsubseteq b$
  - 2  $a \sqcup b = b$
  - 3  $a \sqcap b = a$
- $(a \sqcap b) \sqcap c = a \sqcap (b \sqcap c)$
  - $a \sqcap b = b \sqcap a$
  - $a \sqcap a = a$
  - $a \sqcap (a \sqcup b) = a$

## Omaduspõhine testimine:

- QuickCheck
- Hea matemaatiliste tingimuste kontrollimiseks
- Omadused — predikaadid
- Generaatorid — juhuslikud



## Omaduspõhine testimine:

- QuickCheck
- Hea matemaatiliste tingimuste kontrollimiseks
- Omadused — predikaadid
- Generaatorid — juhuslikud

## Goblint analüsaator:

- Mitmelõimelised C programmid
- Kirjutatud OCaml-is

# Goblinti domeeni signatuur

```
module type S =  
sig  
  type t (* domeeni elementide tüüp *)  
  val equal: t -> t -> bool (* seos = *)  
  val leq: t -> t -> bool (* seos  $\sqsubseteq$  *)  
  val join: t -> t -> t (* tehe  $\sqcup$  *)  
  val meet: t -> t -> t (* tehe  $\sqcap$  *)  
  val bot: unit -> t (* element  $\perp$  *)  
  val is_bot: t -> bool  
  val top: unit -> t (* element  $\top$  *)  
  val is_top: t -> bool  
  val widen: t -> t -> t (* tehe  $\sqcup$  *)  
  val narrow: t -> t -> t (* tehe  $\sqcap$  *)  
end
```

- Domeenidesse generaatorid:

```
val arbitrary: unit -> t QCheck.arbitrary
```

- Kõik omadused omaduspõhiste testidena

- Näiteks ülemraja kommutatiivsus ( $a \sqcup b = b \sqcup a$ ):

```
let join_comm = make ~name:"join comm" (pair arb arb)  
  (fun (a, b) -> D.equal (D.join a b) (D.join b a))
```

- D testitav domeen
- arb selle generaator

	generated	error	fail	pass / total	time	test name
...						
[✓]	300	0	0	10 / 100	0.0s	trier: leq trans
[✓]	300	0	0	1 / 100	0.0s	trier: leq antisym
[✓]	100	0	0	100 / 100	0.0s	trier: join leq
[✗]	2	0	1	1 / 100	0.0s	trier: join assoc
[✓]	100	0	0	100 / 100	0.0s	trier: join comm
[✓]	100	0	0	100 / 100	0.0s	trier: join idem
[✓]	100	0	0	100 / 100	0.0s	trier: join abs
...						

--- Failure -----

Test trier: join assoc failed (91 shrink steps):

(0, 1, Not {3}([-63,63]))

# Ülevaatlikud tulemused

Lähenemine	Võrdlemine	Testide arv		
		Kokku	Erindi teke	Mittekehtivad
Alt üles	equal	468	~35	~75
	leq	468	~35	~69
Ülalt alla	equal	27	0	~12
	leq	27	0	~12

# Ülevaatlikud tulemused

Lähenemine	Võrdlemine	Testide arv		
		Kokku	Erindi teke	Mittekehtivad
Alt üles	equal	468	~35	~75
	leq	468	~35	~69
Ülalt alla	equal	27	0	~12
	leq	27	0	~12

Erindi tekkimise ja mittekehtimisel põhjuseid:

- 1 Viga domeeni implementeerimisel
- 2 Mittekehtimine teoreetilisel tasandil
- 3 Teadlik ja dokumenteeritud mittekehtimine
- 4 Sõltumine teistest probleemsetest omadustest/domeenidest

- Goblintis vaikimisi kasutusel
- Elemendid:
  - Üksikud täisarvud
  - Välistatud täisarvude hulgad (ingl. *exclusion set*)

- Goblintis vaikimisi kasutusel
- Elemendid:
  - Üksikud täisarvud
  - Välistatud täisarvude hulgad (ingl. *exclusion set*)
- Mittekehtiv ülemraja assotsiatiivsus

$$(a \sqcup b) \sqcup c = a \sqcup (b \sqcup c)$$

näiteks argumentidel

$$a = 0, \quad b = 1, \quad c = \text{Not } \{3\}([-63, 63])$$

- Viga domeeni disainis



Tehtud:

- Domeenide omaduste komplekt
- Goblinti täiendused: omadused ja generaatorid
- Goblinti domeenide testimine
- Tulemuste esmane analüüs

Tehtud:

- Domeenide omaduste komplekt
- Goblinti täiendused: omadused ja generaatorid
- Goblinti domeenide testimine
- Tulemuste esmane analüüs

## Järeldus

Omaduspõhist testimist on võimalik efektiivselt rakendada abstraktsetest domeenidest vigade leidmiseks.

# Aitäh!

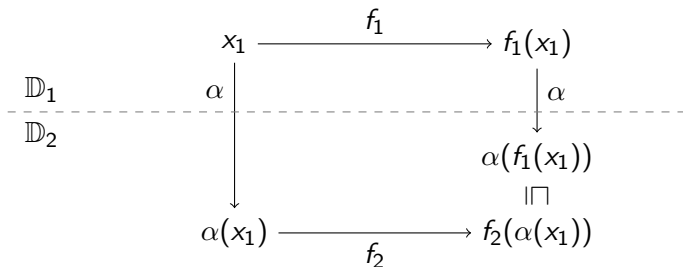
# Domeenide omadused (2)

## Programmianalüüs:

- Laiendamise tehe  $\sqcup$ 
  - $a \sqcup b \sqsubseteq a \sqcup b$
- Kitsendamise tehe  $\sqcap$ 
  - $a \sqcap b \sqsubseteq a \sqcap b \sqsubseteq a$

## Abstraktsiooni korrektsus:

- Abstraktsioonifunktsioon  $\alpha : \mathbb{D}_1 \rightarrow \mathbb{D}_2$
- kui  $a \sqsubseteq b$ , siis  $\alpha(a) \sqsubseteq \alpha(b)$
- $\alpha(f_1(x_1)) \sqsubseteq f_2(\alpha(x_1))$ 
  - $f_1, f_2$  vastavad monotoonsed tehted



# Testitud täisarvude domeenid Goblintis

