Konstrukcija kompilatora

— Semantička analiza: Određivanje tipova —

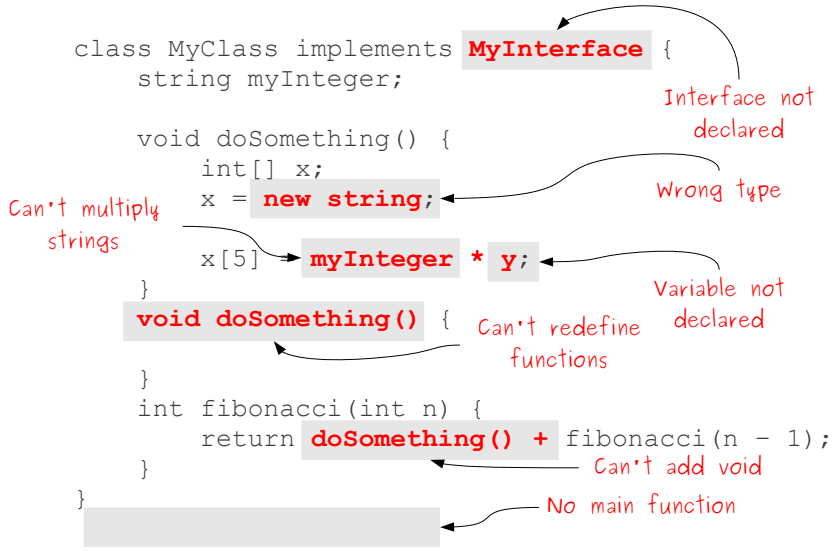
Milena Vujošević Janičić

Matematički fakultet, Univerzitet u Beogradu

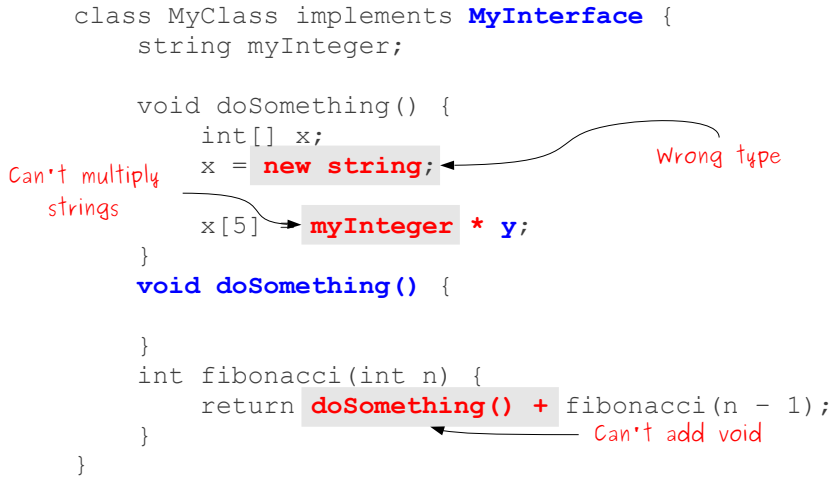
Sadržaj

Na slajdovima obavezno pogledati animacije koje su ovde izostavljene!

Review from Last Time



Review from Last Time



1 Određivanje tipova u izrazima

1.1 Sistem tipova

Tipovi

- Notacija tipova zavisi od programskog jezika ali uključuje:
  - Skup vrednosti
  - Skup operacija nad tim vrednostima
- Greška u radu sa tipovima se javlja onda kada se primenjuje operacija nad vrednostima koje ne podržavaju tu operaciju

Vrste provere tipova

- Statička provera tipova
  - Analiziraj program u fazi kompilacije kako bi pokazao da nema grešaka u tipovima
  - Nikada ne dozvoli da se nešto loše desi u fazi izvršavanja
- Dinamička provera tipova:
  - Proveri operacije u fazi izvršavanja, neposredno pre konkretnog izvršavanja
  - Preciznije od statičkog određivanja tipova, ali manje efikasno
- Bez analize tipova
- Dinamičko određivanje tipova omogućava lakše pisanje prototipova, ali statičko određivanje tipova ima manje grešaka

Sistem tipova

- Pravila koja definišu šta je dozvoljena operacija nad tipovima formiraju sistem tipova.
- U jako tipiziranim jezici svi tipovi moraju da se poklapaju
- U slabo tipiziranim jezicima mogu se desiti greške u tipovima u fazi izvršavanja
- Jako tipizirani jezici su robusni, ali slabo tipizirani jezici su obično brži

1.2 Pravila zaključivanja

Zaključivanje tipova

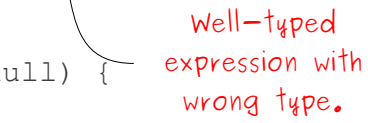
- Dva osnovna koraka statičkog zaključivanja tipova:
  - Zaključivanje tipa za svaki izraz na osnovu tipova komponenti izraza
  - Potvrđivanje da tipovi izraza u određenom kontekstu se poklapaju sa očekivanim
- Ovi koraci se često kombinuju u jednom prolazu

An Example

```
while (numBitsSet(x + 5) <= 10) {

    if (1.0 + 4.0) {
        /* … */
    }

    while (5 == null) {
        /* … */
    }

}
```

An Example

```
while (numBitsSet(x + 5) <= 10) {

    if (1.0 + 4.0) {
        /* … */
    }

    while (5 == null) {
        /* … */
    }

}
```



An Example

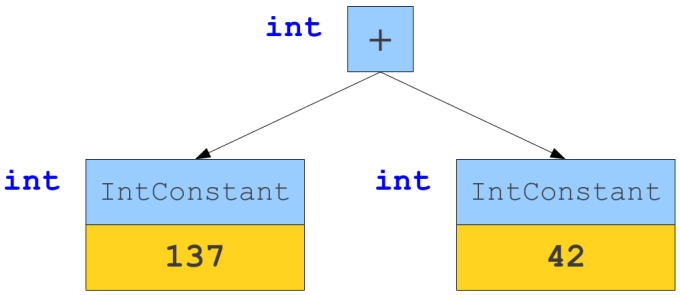
```
while (numBitsSet(x + 5) <= 10) {

    if (1.0 + 4.0) {
        /* … */
    }

    while (5 == null) {
        /* … */
    }

}
```

Expression with type error

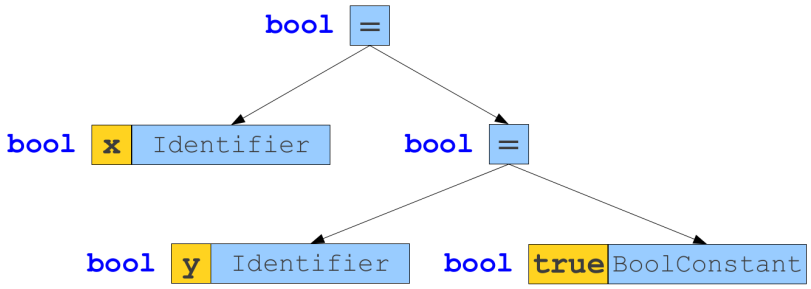
Zaključivanje tipova

- Kako odrediti tip izraza?
- Ovaj proces odgovara logičkom zaključivanju: počinjemo od skupa aksioma i onda primenjujemo pravila zaključivanja da bi odredili tip izraza.
- Mnogi sistemi tipova se mogu posmatrati kao sistemi za dokazivanje

Primer 1



Primer 2



Jednostavna pravila zaključivanja

- Ako je `x` promenljiva koja ima tip `t`, izraz `x` ima tip `t`.
- Ako je `e` celobrojna konstanta, onda e ima tip int.
- Ako operandi `e1` i `e2` izraza `e1+e2` imaju tip `int` i `int`, onda i izraz `e1+e2` ima tip `int`
- Ovakav zapis treba da se formalizuje i skrati

Formalan zapis

- Aksiome i pravila zaključivanja mogu se zapisati na sledeći način:

$$\frac{Preduslov}{Postuslov}$$

  Ako je preduslov tačan, možemo da zaključimo postuslov.

- Pišemo $\vdash e : T$ kada možemo da zaključimo da izraz e ima tip T
- Simbol $\vdash$ čitamo **možemo da zaključimo**

Our Starting Axioms

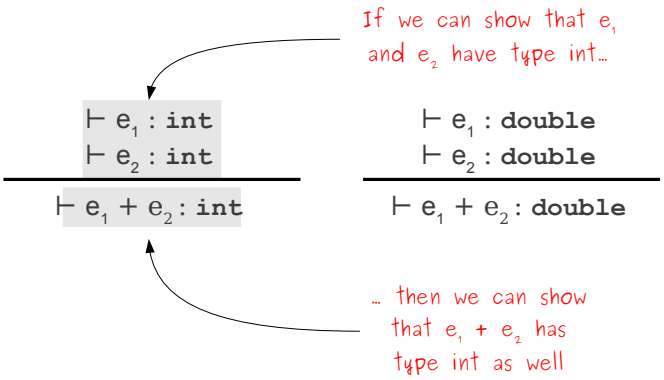
$$\frac{}{\vdash \texttt{true} : \texttt{bool}} \qquad \frac{}{\vdash \texttt{false} : \texttt{bool}}$$

Some Simple Inference Rules

$$\frac{i \text{ is an integer constant}}{\vdash i : \texttt{int}} \qquad \frac{s \text{ is a string constant}}{\vdash s : \texttt{string}}$$

$$\frac{d \text{ is a double constant}}{\vdash d : \texttt{double}}$$

More Complex Inference Rules



Even More Complex Inference Rules

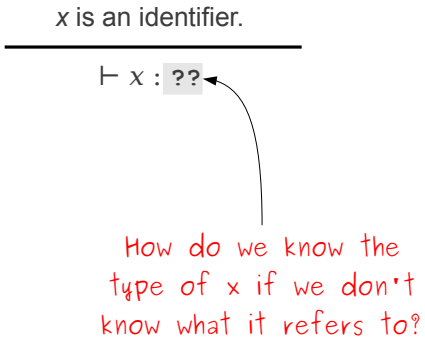
$$\frac{\vdash e_1 : T \quad \vdash e_2 : T \quad T \text{ is a primitive type}}{\vdash e_1 \texttt{ == } e_2 : \texttt{bool}} \qquad \frac{\vdash e_1 : T \quad \vdash e_2 : T \quad T \text{ is a primitive type}}{\vdash e_1 \texttt{ != } e_2 : \texttt{bool}}$$

Zašto zadavati tipove na ovaj način?

- Ovakve definicije su precizne i ne zavise od bilo koje konkretne implementacije

- Daju maksimalnu fleksibilnost za implementaciju: provera tipova se može implementirati bilo kako sve dok prati zadata pravila
- Ovako zadata pravila omogućavaju formalno dokazivanje svojstva ispravnosti programa

A Problem



An Incorrect Solution

$$\frac{x \text{ is an identifier.} \quad x \text{ is in scope with type T.}}{\vdash x : \mathsf{T}} \qquad \frac{\vdash e_1 : \mathsf{T} \quad \vdash e_2 : \mathsf{T} \quad \mathsf{T} \text{ is a primitive type}}{\vdash e_1 == e_2 : \texttt{bool}}$$

```
int MyFunction(int x) {
    {
        double x;
    }

    if (x == 1.5) {
        /* … */
    }
}
```

Facts
$\vdash x$: double
$\vdash x$: int
$\vdash$ 1.5 : double
$\vdash x == 1.5$: bool

1.3 Dodavanje dosega

Dodavanje dosega u zaključivanje

- Potrebno je da ojačamo naša pravila zaključivanja sa kontekstom tako da se pamti u kojim situacijama su rezultati validni
- Dodavanje dosega:

$$S \vdash e : T$$

U dosegu S**, izraz** e **ima tip** T.

- Tipove sada dokazujemo relativno za doseg u kojem se nalazimo

Old Rules Revisited

$$\frac{}{S \vdash \texttt{true} : \texttt{bool}} \qquad \frac{}{S \vdash \texttt{false} : \texttt{bool}}$$

$$\frac{i \text{ is an integer constant}}{S \vdash i : \texttt{int}} \qquad \frac{s \text{ is a string constant}}{S \vdash s : \texttt{string}}$$

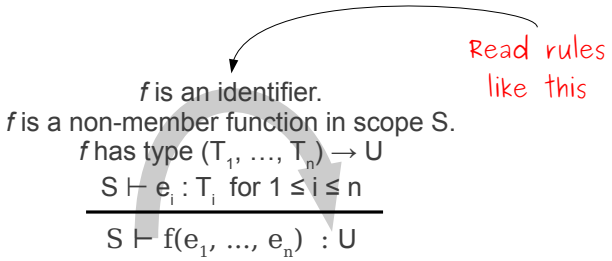
$$\frac{d \text{ is a double constant}}{S \vdash d : \texttt{double}}$$

$$\frac{S \vdash e_1 : \texttt{double} \quad S \vdash e_2 : \texttt{double}}{S \vdash e_1 + e_2 : \texttt{double}} \qquad \frac{S \vdash e_1 : \texttt{int} \quad S \vdash e_2 : \texttt{int}}{S \vdash e_1 + e_2 : \texttt{int}}$$

A Correct Rule

$$\frac{x \text{ is an identifier.} \quad \textbf{x is a variable in scope S with type T.}}{S \vdash x : T}$$

Rules for Functions



Rules for Arrays

$$\frac{S \vdash e_1 : T\texttt{[]} \qquad S \vdash e_2 : \texttt{int}}{S \vdash e_1[e_2] : T}$$

1.4 Tipovi i nasleđivanje

Rule for Assignment

$$\frac{S \vdash e_1 : T \qquad S \vdash e_2 : T}{S \vdash e_1 = e_2 : T}$$

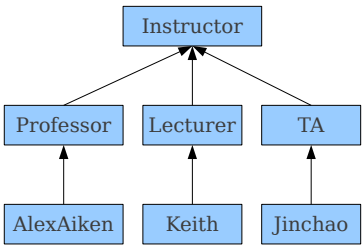
If **`Derived`** extends **`Base`**, will this rule work for this code?

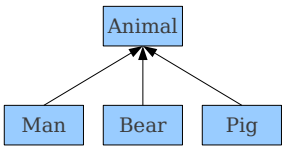
```
Base    myBase;
Derived myDerived;

myBase = myDerived;
```

Tipovi i nasleđivanje

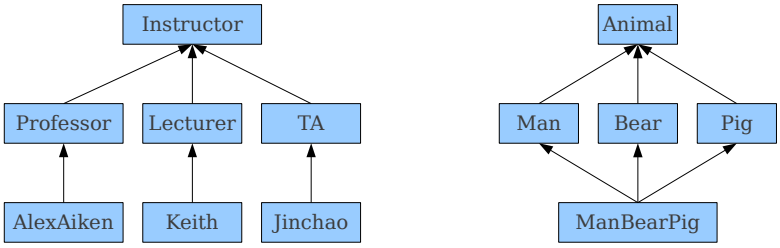
- Potrebno je ubaciti nasleđivanje u sistem tipova
- Važno je uzeti u obzir oblik hijerarhije klasa

Single Inheritance





Multiple Inheritance



Osobine nasleđivanja

Refleksivnost Svaki tip nasleđuje samog sebe

Tranzitivnost Ako A nasleđuje B i ako B nasleđuje C, onda i A nasleđuje C. Primer: mačka, sisar, životinja (mačka posredno nasleđuje životinju)

Antisimetričnost Ako A nasleđuje B i ako B nasleđuje A, onda su A i B istog tipa.

Dakle, nasleđivanje ima osobine **parcijalnog uređenja na tipovima**.

Osobine pretvaranja (konvertovanja)

- Ako A nasleđuje B, onda se objekat klase A može **pretvoriti** (konvertovati) u objekat klase B
- Pretvaranje (konvertovanje) je malo širi pojam i ne mora da obuhvata samo klasno nasleđivanje

  Refleksivnost Svaki tip se može pretvoriti (konvertovati) u samog sebe.

  Tranzitivnost Ako se A može pretvoriti u B i ako se B može pretvoriti u C, onda se i A može pretvoriti u C.

  Antisimetričnost Ako se A može pretvoriti u B i ako se B može pretvoriti u A, onda su A i B istog tipa.

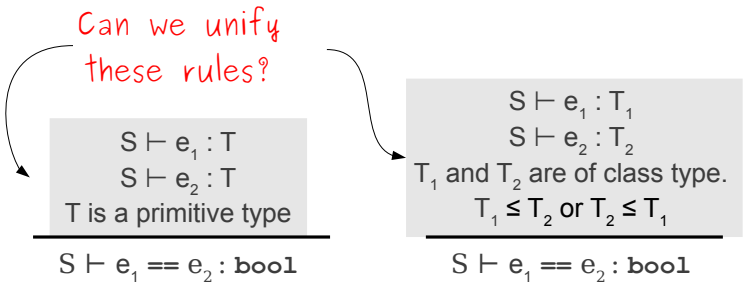
Tipovi i parcijalna uređenja

- Kažemo da je $A \leq B$ ako se A može pretvoriti (konvertovati) u B. Važi:
  - $A \leq A$
  - $A \leq B$ i $B \leq C$ povlači $A \leq C$
  - $A \leq B$ i $B \leq A$ povlači $A = B$

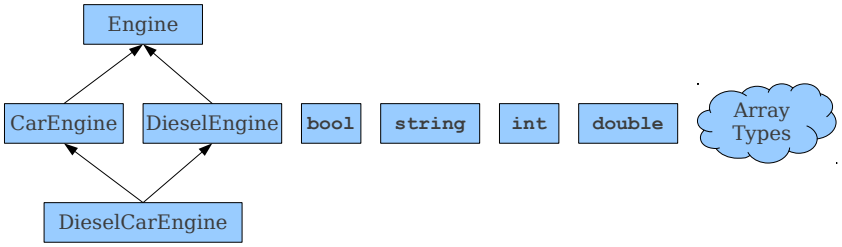
Updated Rule for Assignment

$$\frac{\begin{array}{c} S \vdash e_1 : T_1 \\ S \vdash e_2 : T_2 \\ T_2 \leq T_1 \end{array}}{S \vdash e_1 = e_2 : T_1}$$

Updated Rule for Comparisons



The Shape of Types



Proširivanje pretvaranja (konvertovanja)

- Ako je A osnovni tip ili niz, A se može pretvoriti samo u samog sebe
- Odnosno, ako su A i B neki tipovi, i A je osnovni tip ili niz, onda važi:

– $A \leq B$ povlači $A = B$
– $B \leq A$ povlači $A = B$

Updated Rule for Comparisons

$$\frac{S \vdash e_1 : T \quad S \vdash e_2 : T \quad T \text{ is a primitive type}}{S \vdash e_1 == e_2 : \texttt{bool}} \qquad \frac{S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T_1 \text{ and } T_2 \text{ are of class type.} \quad T_1 \leq T_2 \text{ or } T_2 \leq T_1}{S \vdash e_1 == e_2 : \texttt{bool}}$$

$$\frac{S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T_1 \leq T_2 \text{ or } T_2 \leq T_1}{S \vdash e_1 == e_2 : \texttt{bool}}$$

Updated Rule for Function Calls

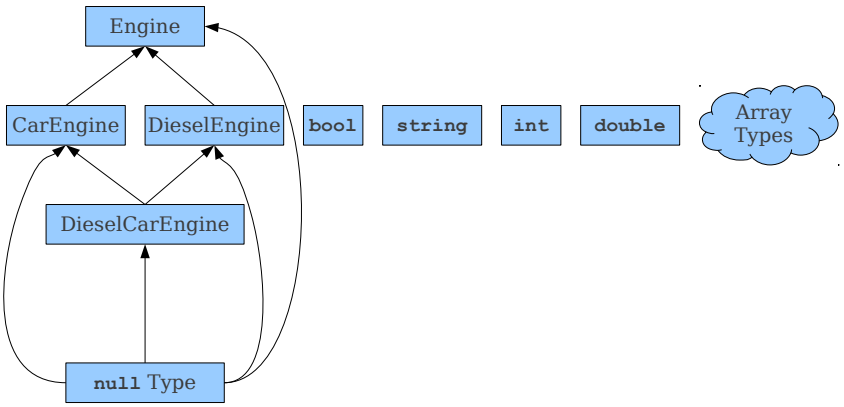
$$\frac{f \text{ is an identifier.} \quad f \text{ is a non-member function in scope S.} \quad f \text{ has type } (T_1, \ldots, T_n) \rightarrow U \quad S \vdash e_i : R_i \text{ for } 1 \leq i \leq n \quad R_i \leq T_i \text{ for } 1 \leq i \leq n}{S \vdash f(e_1, \ldots, e_n) : U}$$

1.5 Tip null

A Tricky Case

$$\frac{}{S \vdash \texttt{null} : ??}$$

Back to the Drawing Board



Tip null

- Definišemo novi tip koji odgovara literalu null i zovemo ga **null tip**
- Definišemo da važi da je null tip $\leq A$ za svaki klasni tip A
- Ovaj tip obično nije dostupan programerima, već se koristi samo interno u okviru sistema tipova
- Mnogi programski jezici imaju ovakav tip u svom sistemu tipova

A Tricky Case

$$\frac{}{S \vdash \texttt{null} : \texttt{null type}}$$

Šta nedostaje?

- Za vežbu možete da pokušate da definišete proveru tipova za naredne jezičke konstrukte:
  - Funkcije članice klase
  - Pristup polju klase
  - Različite operatore

1.6 Ternarni operator

Određivanje tipova za ternarni operator

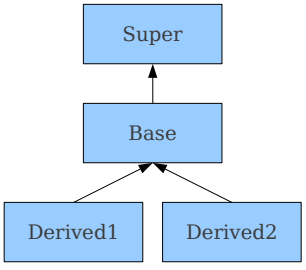
- Ternarni uslovni operator ? : izračunava izraz i vraća jednu od dve vrednosti
- Može se koristiti sa osnovnim tipovima `int x = random() ? 137 : 42;`
- Može se koristiti sa nasleđivanjem `Base b = isB ? new Base : new Derived;`
- Kako bi izgledalo određivanje tipa za ovaj izraz?

A Proposed Rule

$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T_1 \le T_2 \text{ or } T_2 \le T_1}{S \vdash cond \texttt{ ? } e_1 \texttt{ : } e_2 : ??}$$

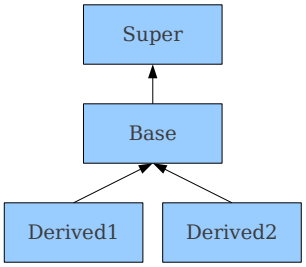
A Proposed Rule

$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T_1 \le T_2 \text{ or } T_2 \le T_1}{S \vdash cond \texttt{ ? } e_1 \texttt{ : } e_2 : \max(T_1, T_2)}$$



Is this really what we want?

A Small Problem



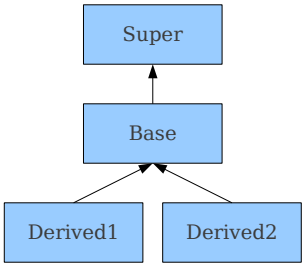
$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T_1 \leq T_2 \text{ or } T_2 \leq T_1}{S \vdash cond\ ?\ e_1 : e_2 : \max(T_1, T_2)}$$

```
Base = random()?
          new Derived1 : new Derived2;
```

Najmanja gornja granica

- **Gornja granica** za dva tipa A i B je tip C takav da važi $A \leq C$ i $B \leq C$
- **Najmanja gornja granica** za tipove A i B je tip C takav da važi:
  - C je gornja granica za A i B
  - Ako je C' gornja granica za A i B, onda je $C \leq C'$
- Kada postoji najmanja gornja granica za A i B, to označavamo sa $A \vee B$
- U kojim situacijama može da ne postoji najmanja gornja granica za A i B?

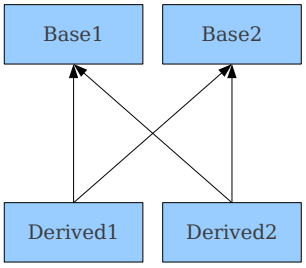
A Better Rule



$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T = T_1 \vee T_2}{S \vdash cond\ ?\ e_1 : e_2 : T}$$

```
Base = random()?
          new Derived1 : new Derived2;
```

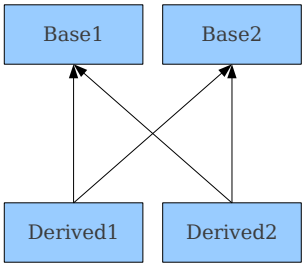
… that still has problems



$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T = T_1 \vee T_2}{S \vdash cond\ ?\ e_1 : e_2 : T}$$

```
Base = random()?
          new Derived1 : new Derived2;
```

... that still has problems



$$\frac{S \vdash cond : \texttt{bool} \quad S \vdash e_1 : T_1 \quad S \vdash e_2 : T_2 \quad T = T_1 \vee T_2}{S \vdash cond\ ?\ e_1 : e_2 : T}$$

```
Base = random()?
          new Derived1 : new Derived2;
```

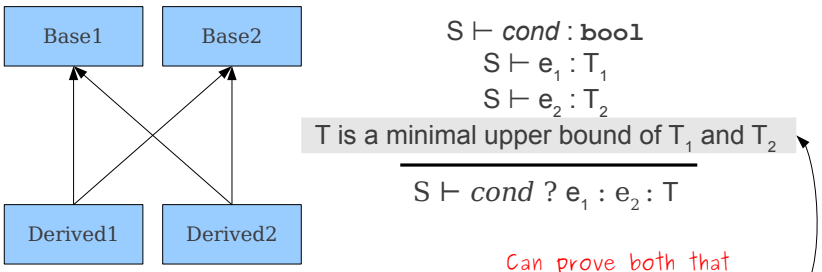
Višestruko nasleđivanje

- Hijerarhija tipova u višestrukom nasleđivanju više nema drvoliku strukturu
- Dve klase mogu da nemaju najmanje gornje ograničenje
- To se dešava u C++-u jer imamo višestruko nasleđivanje, ali i u Javi zbog interfejsa

Minimalno gornje ograničenje

- Gornje ograničenje tipova A i B je tip C ako važi da je $A \leq C$ i $B \leq C$
- Minimalno gornje ograničenje tipova A i B je tip C takav da važi
  - C je gornje ograničenje za A i B
  - Ako je C' gornje ograničenje od A i B, onda ne važi da je $C' < C$ (dakle, C' ako je uporedivo, ne sme da bude manje, ali ne mora da bude uporedivo sa C!)
- Minimalno gornje ograničenje ne mora da bude jedinstveno
- Najmanje gornje ograničenje mora da bude minimalno gornje ograničenje, ali ne važi obratno

A Correct Rule




```
Base1 = random()?
            new Derived1 : new Derived2;
```

Zaključak

- Određivanje tipova može da bude veoma nezgodno
- Na određivanje tipova veoma utiče izbor operatora koji se koriste u jeziku
- Na određivanje tipova veoma utiču i dozvoljene konverzije između tipova

2 Provera tipova u okviru naredbi

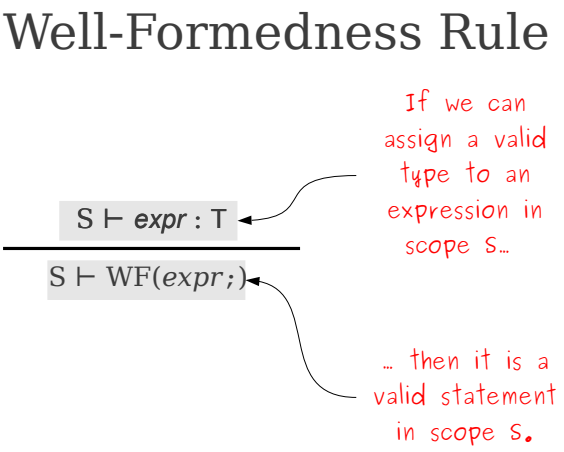
Provera tipova u okviru naredbi

- Da li su tipovi izraza u okviru naredbi ispravni?
  - Da li `if` naredba ima dobro formiran uslov?
  - Da li `return` naredba vraća adekvatan tip?
  - ...
- Kako se to praktično implementira?
- Kako se proveravaju preopterećene funkcije (isto ime, različiti potpisi, engl. *overloading*)?
- Šta je dozvoljeno za predefinisane funkcije (u okviru nasleđivanja, engl. *overriding*)

2.1 Ispravnost naredbi

Ispravnost naredbi

- Ideja: proširiti sistem izvođenja zaključaka tako da modeluje naredbe
- Kažemo da je
$$S \vdash WF(stmt)$$
ako je naredba *stmt* dobro formirana (engl. *well formed*) u dosegu S.
- Sistem tipova je zadovoljen ako za svaku funkciju `f` sa telom B koji je u dosegu S, možemo da pokažemo da važi
$$S \vdash WF(B)$$



A More Complex Rule

$$\frac{S \vdash \text{WF}(stmt_1) \quad S \vdash \text{WF}(stmt_2)}{S \vdash \text{WF}(stmt_1\ stmt_2)}$$

Rules for **`break`**

$$\frac{S \text{ is in a } \texttt{for} \text{ or } \texttt{while} \text{ loop.}}{S \vdash \text{WF}(\texttt{break;})}$$

A Rule for Loops

$$\frac{\begin{array}{c}S \vdash \textit{expr} : \texttt{bool} \\ S' \text{ is the scope inside the loop.} \\ S' \vdash \text{WF}(\textit{stmt})\end{array}}{S \vdash \text{WF}(\texttt{while (}\textit{expr}\texttt{)}\ \textit{stmt})}$$

Rules for Block Statements

$$\frac{\begin{array}{c}S' \text{ is the scope formed by adding } \textit{decls} \text{ to } S \\ S' \vdash \text{WF}(\textit{stmt})\end{array}}{S \vdash \text{WF}(\texttt{\{}\ \textit{decls}\ \textit{stmt}\ \texttt{\}})}$$

Rules for **`return`**

$$\frac{\text{S is in a function returning T} \quad \text{S} \vdash \textit{expr} : \text{T}' \quad \text{T}' \leq \text{T}}{\text{S} \vdash \text{WF}(\texttt{return}\ \textit{expr};)} \qquad \frac{\text{S is in a function returning } \texttt{void}}{\text{S} \vdash \text{WF}(\texttt{return};)}$$

2.2 Praktični problemi

Kako proveriti da li je program ispravno formiran?

- Proći rekurzivno kroz AST stablo, za svaku naredbu proveri tip svakog podizraza koji sadrži:
  - Prijavi grešku ako ne može tip da se dodeli izrazu
  - Prijavi grešku ako je pogrešan tip dodeljen izrazu

Something is Very Wrong Here

```
int x, y, z;
if (((x == y) > 5 && x + y < z) || x == z) {
    /* … */
}
```

$$\frac{S \vdash e_1 : \texttt{bool} \quad S \vdash e_2 : \texttt{bool}}{S \vdash e_1 \texttt{ || } e_2 : \texttt{bool}}$$

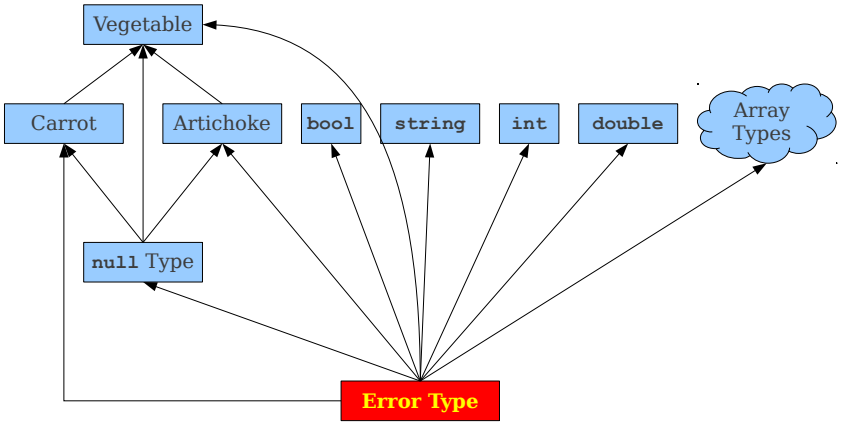
```
> Error: Cannot compare int and bool
  Error: Cannot compare ??? and bool
  Error: Cannot compare ??? and bool
```

Facts
$S \vdash \texttt{x : int}$
$S \vdash \texttt{y : int}$
$S \vdash \texttt{z : int}$
$S \vdash \texttt{x == y : bool}$
$S \vdash \texttt{5 : int}$
$S \vdash \texttt{x + y : int}$
$S \vdash \texttt{x + y < z : bool}$
$S \vdash \texttt{x == z : bool}$

Propagiranje grešeke

- Prethodni primer je demonstrirao propagaciju greške
- Statička greška tipova se dešava kada ne možemo da dokažemo da izraz ima odgovarajući tip
- Greške u tipovima se lako propagiraju: na primer, ako ne možemo da dokažemo tip od e_1 onda ne možemo da dokažemo ni tip za $e_1 + e_2$, ni tip za $(e_1 + e_2) + e_3$ i tako redom.
- Kako to prevazići?

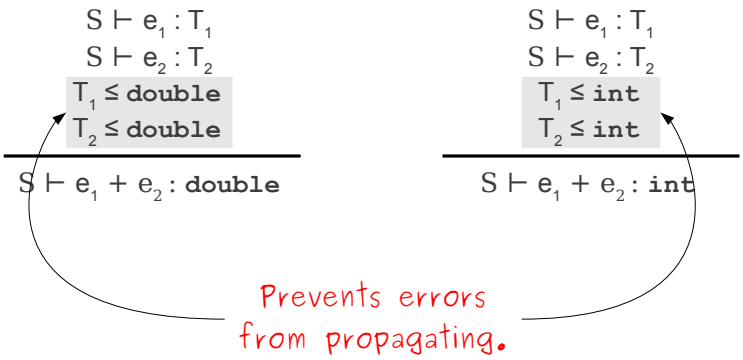
The Shape of Types



Tip `Error`

- U sistem tipova uvodimo novi tip koji predstavlja grešku
- Ovaj tip je manji od svih drugih tipova i označava se sa $\bot$
- Nekada se zove i *bottom* tip
- Po definiciji, važi $\bot \leq A$, za svako A
- Kada otkriješ tip `Error`, pretvaraj se kao da je dokazan izraz tipa $\bot$
- Potrebno je samo unaprediti pravila zaključivanja tako da sadrže $\bot$

Updated Rules for Addition



Oporavljanje od grešaka

- U semantičkom analizatoru neophodno je da postoji neka vrsta oporavka od greške, kako bi mogla da se nastavi dalje analiza
- Jedan vid oporavljanja od grešaka je tip `Error` koji smo uveli, ali postoje i drugi slučajevi koje treba rešiti, na primer:
  - Poziv nepostojeće funkcije
  - Deklaracija promenljive nekog neispravnog tipa
  - Tretiranje promenljive koja nije niz kao da jeste niz
  - ...
- Ne postoje ispravni i pogrešni odgovori na ova pitanja, već samo bolji i lošiji izbori

2.3 Preopterećivanje funkcija

Preopterećivanje funkcija (engl. *overloading*)

- Preopterećivanje funkcija: više funkcija sa istim imenom ali različitim argumentima `int saberi(int a, int b)` i `int saberi(int a, int b, int c)`
- Preopterećivanje funkcija povećava čitljivost koda
- Kod preopterećivanja imamo pozive funkcija koje se razlikuju po broju argumenata ili po tipovima argumenata ili po oba

- Nije dozvoljena razlika samo u povratnom tipu funkcije, na primer, ovako nešto nije dozvoljeno: `int saberi(int a, int b)` i `long saberi(int a, int b)`
- Naziva se i statički polimorfizam (ili *compile time* polimorfizam)

Preopterećivanje funkcija (engl. *overloading*)

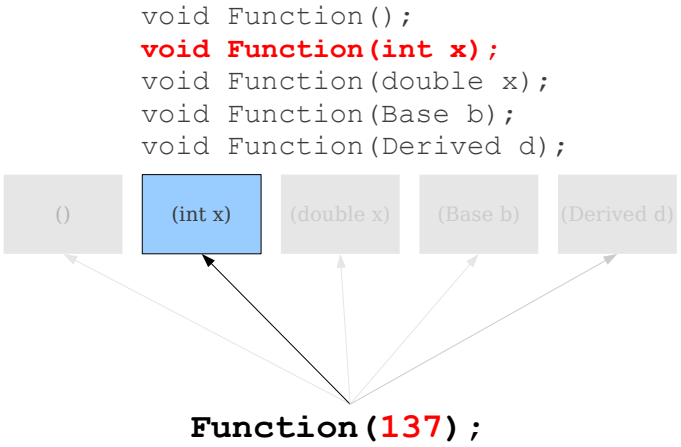
- U fazi kompilacije, analizom tipova argumenata, potrebno je odrediti koju funkciju treba pozvati
- U slučaju da ne može da se odredi funkcija koja se najbolje uklapa, treba prijaviti grešku

Overloading Example

```
void Function();
void Function(int x);
void Function(double x);
void Function(Base b);
void Function(Derived d);
```

```
Function();
Function(137);
Function(42.0);
Function(new Base);
Function(new Derived);
```

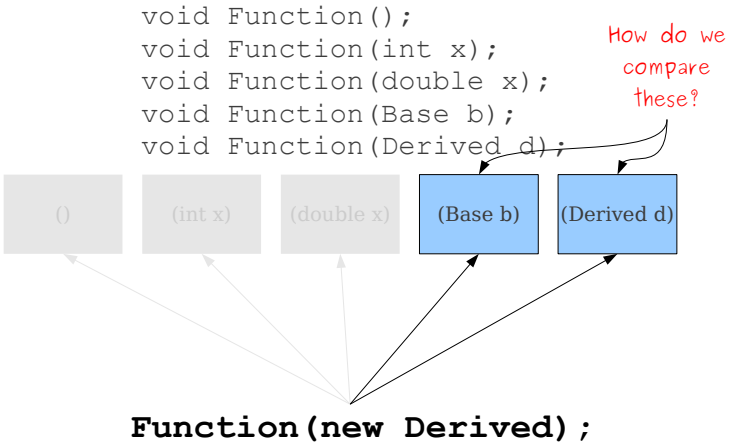
Implementing Overloading



Jednostavno preopterećivanje

- Počinjemo od skupa preopterećenih funkcija
- Najpre isfiltriramo funkcije koje se ne poklapaju i tako dobijamo skup kandidata (C++ terminologija) ili skup potencijalno primenljivih metoda (Java terminologija)
- Ako je skup prazan, prijavi grešku
- Ako skup sadrži samo jednu funkciju, izaberi nju
- Ako skup sadrži više funkcija... (izaberi *najbolju*)

Overloading with Inheritance

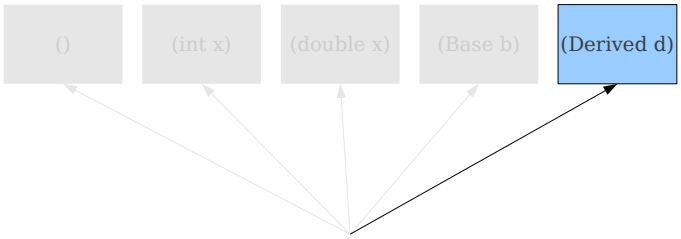


Kako odrediti najbolje poklapanje

- Ako postoji više od jednog izbora, izaberi funkciju koja najspecifičnije odgovara datom pozivu
- Ako imamo dve funkcije koje su kandidati, A i B, sa argumentima $A_1, A_2, ..., A_n$ i $B_1, B_2, ..., B_n$, kažemo da je $A <: B$ ako važi $A_i \leq B_i$ za svako $i \in \{1, 2, ..., n\}$
- Relacija $<:$ je parcijalno uređenje
- **Funkcija A je najbolji izbor ako za svaku drugu funkciju B koja je kandidat za izbor važi $A <: B$ (tj, ona je bar onoliko dobra koliko i svaki drugi izbor)**
- Ako postoji najbolji izbor (ili najbolje poklapanje), onda se bira ta funkcija
- U suprotnom, poziv je višesmislen i to mora nekako da se razreši

Overloading with Inheritance

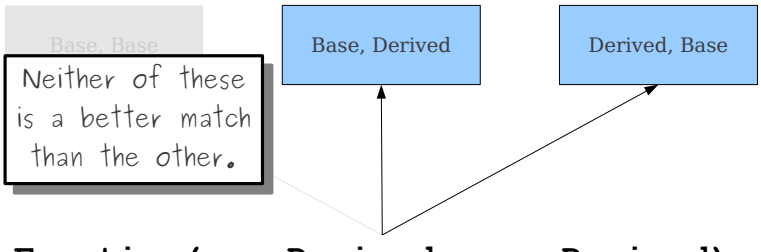
```
void Function();
void Function(int x);
void Function(double x);
void Function(Base b);
void Function(Derived d);
```




```
Function(new Derived);
```

Ambiguous Calls

```
void Function(Base b1, Base b2);
void Function(Derived d1, Base b2);
void Function(Base b1, Derived d2);
```



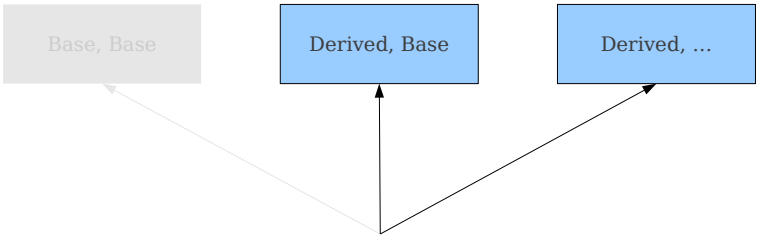

```
Function(new Derived, new Derived);
```

Preopterećivanje - u realnosti

- Preopterećivanje je obično značajno kompleksnije
- Na primer, neki jezici (npr C, C++, Java) dozvoljavaju funkcije sa promenljivim brojem argumenata (engl. *variadic functions*)

Overloading with Variadic Functions

```
void Function(Base b1, Base b2);
void Function(Derived d1, Base b2);
void Function(Derived d1, ...);
```



`Function(new Derived, new Derived);`

Preopterećivanje u kontekstu variadic funkcija

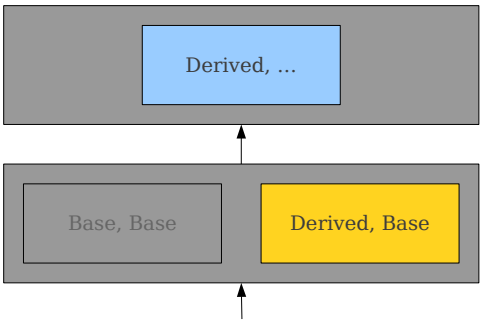
- Prva opcija: smatraj poziv višesmislenim
- Druga opcija: smatraj boljom funkciju koja nije variadic: funkcija koja je specifično dizajnirana da podrži neki konkretan skup argumenata je verovatno bolji izbor od one koja je dizajnirana da može da podrži proizvoljno mnogo parametara
- Druga opcija se koristi u C++-u i (sa malim modifikacijama) u Javi

Hijerarhijsko preopterećivanje funkcija

- Ideja: Napraviti hijerarhiju funkcija kandidata
- Konceptualno to je vrlo slično dosezima
  - Počni sa najnižim nivoom hijerarhije, i traži u okviru njega poklapanje
  - Ako pronađeš jedinstveno poklapanje, izaberi ga
  - Ako pronađeš višestruka poklapanja, prijavi višesmislenost
  - Ako ne pronađeš poklapanje, idi na naredni nivo u hijerarhiji
- Slične tehnike se koriste i u drugim situacijama, npr
  - Šablonske/generičke funkcije
  - Implicitne konverzije

Overloading with Variadic Functions

```
void Function(Base b1, Base b2);
void Function(Derived d1, Base b2);
void Function(Derived d1, ...);
```

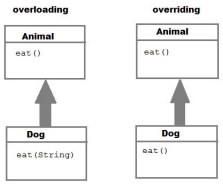



```
Function(new Derived, new Derived);
```

2.4 Kompletnosti i saglasnost sistema tipova

Predefinisanje (engl. *overriding*) funkcija

Preopterećivanje može da bude u okviru iste klase ili između klasa koje su odnosu nasleđivanja. Predefinisanje se odnosi samo na funkcije koje su u okviru klasa koje su u odnosu nasleđivanja.



Najjednostavnija odluka: kod predefinisanja, svi tipovi moraju da se u potpunosti poklapaju. Međutim, to uvodi previše ograničenja i potrebno je biti fleksibilniji.

Različite varijante funkcija

- Kako izbor odluka vezanih za predefinisanje (engl. *overriding*) utiče na sistem tipova i na krakteristike programskih jezika?
- Primer: Neka klasa *Mačka* nasleđuje klasu *Sisar* i neka klasa *Sisar* nasleđuje klasu *Životinja*. Neka je funkcija f definisana u klasi *Životinja* i predefinisana u klasama *Sisar* i *Mačka*.
- Kovarijante i kontravarijante

Različite varijante funkcija

Kovarijanta po povratnom tipu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao povratni tip svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f povratni tip može da bude *Mačka* umesto *Sisar*?

Na primer, ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `Sisar f()` da li u klasi *Mačka* funkcija f može da bude predefinisana sa `Mačka f()`?

Različite varijante funkcija

Kovarijanta po argumentu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f argument funkcije može da bude *Mačka* umesto *Sisar*?

Ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `void f(Sisar s)` da li u klasi Mačka funkcija f može da bude predefinisana sa `void f(Mačka m)`?

Različite varijante funkcija

Kontravarijanta po argumentu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument tip superklase umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f argument funkcije može da bude *Životinja* umesto *Sisar*?

Ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `void f(Sisar s)` da li u klasi Mačka funkcija f može da bude predefinisana sa `void f(Životinja m)`?

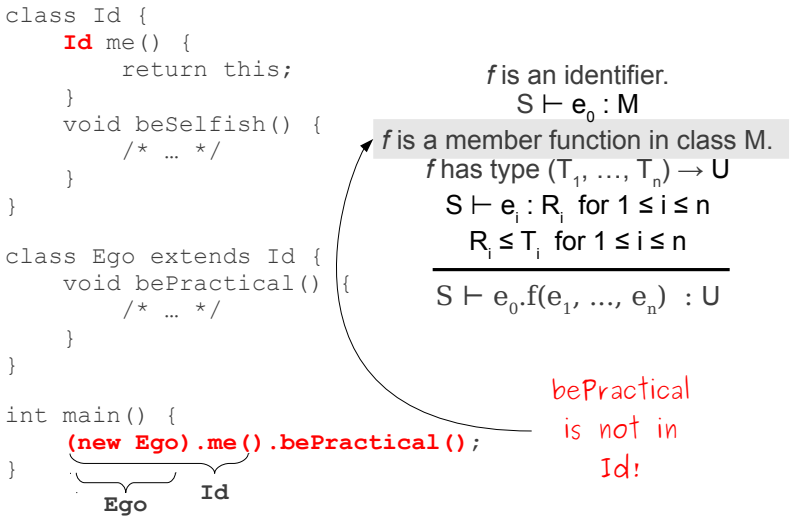
A Rule for Member Functions

$$\frac{\begin{array}{c} f \text{ is an identifier.} \\ S \vdash e_0 : M \\ f \text{ is a member function in class M.} \\ f \text{ has type } (T_1, \ldots, T_n) \to U \\ S \vdash e_i : R_i \text{ for } 1 \le i \le n \\ R_i \le T_i \text{ for } 1 \le i \le n \end{array}}{S \vdash e_0.f(e_1, \ldots, e_n) : U}$$

Izazovi sistema tipova

- Da li je prethodno definisano pravilo ispravno?
  - Da li sa tako definisanim pravilom imamo garanciju da nam neće promaći ni jedna greška u tipovima u fazu izvršavanja, tj, da li je pravilo bezbedno (engl. *safe*)?
  - Da li se sa tako definisanim pravilom može desiti da neki program, iako validan u fazi izvršavanja može da bude odbijen u fazi prevođenja, tj, da li je pravilo legalno (engl. *legal*)?

Legality and Safety



Statički i dinamički tipovi

- Na osnovu definisanog pravila, prethodni program bi, iako se može ispravno izvršiti, bio odbijen: statički sistemi tipova su često nepotpuni (nekompletni, engl. *incomplete*)
- To se dešava zato što postoji razlika između statičkih i dinamičkih tipova:
  - Statički tip je deklarisan u izvornom kodu
  - Dinamički tip je pravi tip objekta u fazi izvršavanja

Kompletnost (potpunost) i saglasnost

- Idealan sistem tipova: kompletan (potpun) i saglasan
  - **Kompletnost (potpunost)**: ako se program može ispravno izvršiti — sistem tipova kaže da je on ispravan u smislu tipova
  - **Saglasnost**: ako sistem tipova kaže da je program ispravan — onda važi da se program može ispravno izvršiti
- Nažalost, za većinu programskih jezika, **nemoguće je ostvariti i potpunost i saglasnost** (rešavanje problema provere tipova svodi se na rešavanje halting problema, koji je neodlučiv)

Dobar sistem tipova

- Teško je napraviti dobar sistem tipova, tj, lako je napraviti pravila koja su nesaglasna, a često je nemoguće prihvatiti sve ispravne programe.

- Da bi se izgradio dobar statički sistem za proveru tipova obično je **cilj da se napravi jezik koji je što "kompletniji" (tj da ima što manje situacija u kojima ne važi uslov kompletnosti) a da pritom ima saglasan sistem pravila** za proveru tipova.
- Saglasnost se može obezbediti dokazivanjem narednog svojstva za svaki izraz E:
$$DynamicType(E) \leq StaticType(E)$$
- Kao što je već pomenuto, statički sistemi tipova mogu nekada da odbiju program koji bi se mogao ispravno izvršiti (zato što nisu u mogućnosti da dokažu odsustvo greške u tipovima). Takav sistem tipova naziva se nekompletan (nepotpun).

Različite varijante funkcija

Kovarijanta po povratnom tipu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao povratni tip svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f povratni tip može da bude *Mačka* umesto *Sisar*?

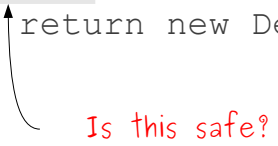
Na primer, ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `Sisar f()` da li u klasi *Mačka* funkcija f može da bude predefinisana sa `Mačka f()`?

Kovarijanta po povratnom tipu

- Neka funkcija A predefiniše funkciju B, ali neka se ove funkcije razlikuju po povratnom tipu: funkcije A i B su kovarijante po povratnom tipu ukoliko se tipovi argumenata poklapaju, a povratni tip funkcije A se može pretvoriti (konvertovati) u povratni tip funkcije B.
- Da li je bezbedno dozvoliti kovarijante po povratnom tipu?

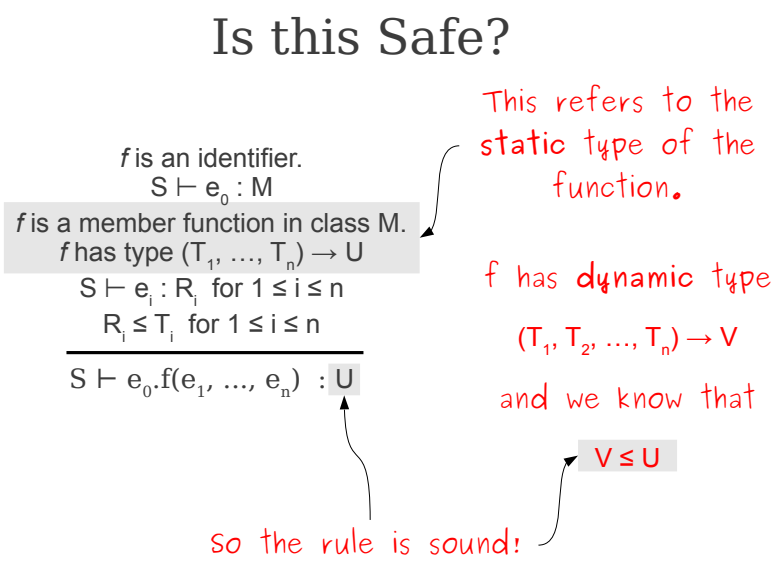
Relaxing our Restrictions

```
class Base {
    Base clone() {
        return new Base;
    }
}

class Derived extends Base {
    Derived clone() {
        return new Derived;
    }
}
```



The Intuition

```
Base b = new Base;
Derived d = new Derived;

Base b2 = b.clone();
Base b3 = d.clone();
Derived d2 = b.clone();
Derived d3 = d.clone();

Base reallyD = new Derived;
Base b4 = reallyD.clone();
Derived d4 = reallyD.clone();
```



Kovarijanta povratnog tipa

- Šta se dešava ako dozvolimo kovarijante povratnog tipa, tj ako dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao povratni tip svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?
- Kovarijante povratnog tipa su bezbedne, tj pravilo koje definiše tipove je i dalje saglasno jer je sa kovarijantom povratnog tipa obezbeđeno važenje uslova $DynamicType(E) \leq StaticType(E)$
- Mnogi programski jezici obezbeđuju kovarijante povratnog tipa, na primer C++ i Java

Različite varijante funkcija

Kovarijanta po argumentu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f argument funkcije može da bude *Mačka* umesto *Sisar*?

Ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `void f(Sisar s)` da li u klasi Mačka funkcija f može da bude predefinisana sa `void f(Mačka m)`?

Kovarijanta po argumentu

- Neka funkcija A predefiniše funkciju B, ali neka se ove funkcije razlikuju po bar jednom argumentu: Funkcija A je *kovarijanta po argumentu* funkciji B ukoliko se argumenti funkcija poklapaju ili se neki argumenti funkcije A mogu pretvoriti (konvertovati) u odgovarajuće argumente funkcije B.

- Da li je bezbedno dozvoliti kovarijante po argumentu?

Relaxing our Restrictions (Again)

```
class Base {
    bool equalTo(Base B) {
        /* … */
    }
}

class Derived extends Base {
    bool equalTo(Derived D) {
        /* … */
    }
}
```

Is this safe?

Is this Safe?

This refers to the static type of the function.

f is an identifier.
$S \vdash e_0 : M$
f is a member function in class M.
f has type $(T_1, \ldots, T_n) \to U$
$S \vdash e_i : R_i$ for $1 \le i \le n$
$R_i \le T_i$ for $1 \le i \le n$

$S \vdash e_0.f(e_1, \ldots, e_n) : U$

f has dynamic type $(V_1, V_2, \ldots, V_n) \to U$ and we know that $V_i \le T_i$ for $1 \le i \le n$

$R_i \le T_i$ for $1 \le i \le n$
$V_i \le T_i$ for $1 \le i \le n$

Kovarijante po argumentu su nebezbedne!

- Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument svoj klasni tip umesto nadklasnog tipa?
- Dozvoliti potklasi da napravi restrikciju tipa svog parametra funkcije je **suštinski nebezbedno**!
- Pozivi kroz baznu klasu mogu da pošalju objekat pogrešnog tipa
- Zbog toga, Javin metod Object.equals uzima kao argument drugi Object
- U nekim jezicima ovo nije dobro urađeno: na primer, Eiffel dozvoljava kovarijante po argumentima i posledica toga je da na taj način neispravni programi mogu da promaknu sistemu tipova i da zato dođe do greške u fazi izvršavanja
- Sledi konkretan primer kako kovarijante po argumentu mogu da naprave problem u fazi izvršavanja

A Concrete Example

```
class Fine {
    void nothingFancy(Fine f) {
        /* … do nothing … */
    }
}

class Borken extends Fine {
    int missingFn() {
        return 137;
    }
    void nothingFancy(Borken b) {
        Print(b.missingFn());
    }
}

int main() {
    Fine f = new Borken;
    f.nothingFancy(new Fine);
}
```

(That calls this one)

Različite varijante funkcija

Kontravarijanta po argumentu Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument tip superklase umesto nadklasnog tipa?

Primer Da li za predefinisanu funkciju f argument funkcije može da bude *Životinja* umesto *Sisar*?

Ako je f u klasi *Sisar* definisana sa `void f(Sisar s)` da li u klasi Mačka funkcija f može da bude predefinisana sa `void f(Životinja m)`?

Kontravarijanta po argumentu

- Neka važi $C_a \leq C_b \leq C_c$, tj neka je C_c bazna klasa za klasu C_b, a C_b bazna klasa za klasu C_a. Neka funkcija A (klase C_a) predefiniše funkciju B (klase C_b), ali neka se razlikuju tipovi arugmenata, tj: funkcija A je kontravarijanta po argumentu funkciji B ukoliko A ima za argument tip superklase C_c umesto tip C_b.
- Da li je bezbedno dozvoliti kontravarijante po argumentu?

Contravariant Arguments

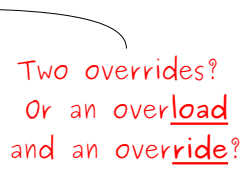
```
class Super {}
class Base extends Super {
    bool equalTo(Base B) {
        /* … */
    }
}

class Derived extends Base {
    bool equalTo(Super B) {
        /* … */
    }
}
```

Kontravarijante po argumentima su bezbedne

- Da li u okviru klasa možemo da dozvolimo da predefinisana funkcija ima kao argument tip superklase umesto nadklasnog tipa?
- **Kontravarijante po argumentima su bezbedne**: intuitivno, kada zovemo tu funkciju kroz baznu klasu, funkcija će prihvatiti bilo šta što bi bazna klasa već prihvatila
- Ipak, većina jezika ne podržava kontravarjnate po argumentima
  - Povećavaju kompleksnost kompajlera i specifikacije jezika
  - Povećavaju kompleksnost proveravanja predefinisanih metoda

Contravariant Overrides

```
class Super {}
class Duper extends Super {}
class Base extends Super {
    bool equalTo(Base B) {
        /* … */
    }
}

class Derived extends Base {
    bool equalTo(Super B) {
        /* … */
    }
    bool equalTo(Duper B) {
        /* … */
    }
}
```



Zaključak

- Potrebno je biti jako pažljiv u dizajnu programskih jezika i u uvođenju novih karakteristika u statički tipizirane jezike
- Lako je dizajnirati karakteristike jezika ali je teško dizajnirati karakteristike jezika koje omogućavaju da se kreiraju bezbedni sistemi tipova
- Sistem tipova nam može pomoći da detektujemo greške u dizajnu jezika

Zaključak

- Proširili smo sistem tipova da može da uključi i provere da li su naredbe dobro formirane
- Tip greške se može pretvoritu u sve druge tipove i on nam služi za sprečavanje širenja grešaka
- Preopterećivanje se razrešava u fazi kompilacije i određuje koja od različitih funkcija će biti pozvana
- Zbog preopterećivanja je potrebno rangirati funkcije kako bi se odredio najbolji izbor
- Bezbedno je da funkcije budu kovarijantne po povratnom tipu ili kontravarijantne po tipu argumenta

3 Literatura

Literatura

- (The Dragon Book) Compilers: Principles, Techniques, and Tools Alfred V. Aho,Monica S. Lam, Ravi Sethi, and Jeffrey D. Ullman
- Kompajleri Stanford https://web.stanford.edu/class/archive/cs/cs143/cs143.1128/