An Implementation of Type Inference for Featherweight Generic Java

Timpe Hörig

Chair of Programming Languages, University of Freiburg

October 12, 2023

Syntax

$$T := X \mid N$$

$$N := C\text{<}\overline{T}\text{>}$$

$$L := \text{class } C\text{<}\overline{X} \lhd \overline{N}\text{>} \ \lhd \ D\{\ \overline{T}\ \bar{f}\ [K]\ \overline{M}\ \}$$

$$K := C(\overline{T}\ \bar{f})\{\text{super}(\bar{f});\ \text{this}.\bar{f} = \bar{f};\}$$

$$M := \text{<}\overline{X} \lhd \overline{N}\text{>}T\ m(\overline{T}\ \bar{x})\ \{\text{return } e\}$$

$$e := x \mid e.f \mid e.\text{<}\overline{T}\text{>}m(\bar{e}) \mid \text{new } C(\bar{e}) \mid (C)e$$

AST

```python
@dataclass
class ClassDef:
    name: str,
    superclass: Type,
    typed_fields: FieldEnv,
    methods: list[MethodDef]
```

Parser

```
# grammar rules

identifier: ...

variable: identifier

[...]

# function for shaping

def variable(tuple_of_elements_of_variable_rule):
    (name, ) = tuple_of_elements_of_variable_rule
    return Variable(name)
```

extended Syntax

$\mathsf{T} := \mathsf{a} \mid \mathsf{X} \mid \mathsf{N}$	type variable, type parameter, non type variable
$\mathsf{N} := \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{T}}{>}$	class type (with type variables)
$\mathsf{sc} := \mathsf{T} < \mathsf{U} \mid \mathsf{T} = \mathsf{U}$	simple constraint: subtype or equality
$\mathsf{oc} := \{\{\overline{\mathsf{sc}}_1\},\ \ldots, \{\overline{\mathsf{sc}}_n\}\}$	or-constraint
$\mathsf{c} := \mathsf{sc} \mid \mathsf{oc}$	constraint
$C := \{\overline{\mathsf{c}}\}$	constraint set
$\lambda := \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \triangleleft \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} : {<}\overline{\mathsf{Y}} \triangleleft \overline{\mathsf{P}}{>}\overline{\mathsf{T}} \to \mathsf{T}$	method type assumption
$\eta := \mathsf{x} : \mathsf{T}$	parameter assumption
$\Pi := \Pi \cup \overline{\lambda}$	method type environment
$\Theta := (\Pi; \overline{\eta})$	

Type Inference

$$
\begin{aligned}
&\mathsf{FJTypeInference}(\Pi,\ \mathsf{class}\ \mathsf{C}\texttt{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}\texttt{>} \lhd \mathsf{N}\{\ldots\}) = \\
&\quad \mathsf{let}\ (\overline{\lambda},\ C) \qquad\quad = \mathsf{FJType}(\Pi, \mathsf{class}\ \mathsf{C}\texttt{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}\texttt{>} \lhd \mathsf{N}\{\ldots\}) \\
&\qquad (\sigma, \texttt{<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}\texttt{>}) = \mathsf{Unify}(C, \{\overline{\mathsf{X}} <: \overline{\mathsf{N}}\} \cup \{\texttt{<}\overline{\mathsf{Z}} \lhd \overline{\mathsf{Q}}\texttt{>} \mid \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\mathsf{C}\texttt{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}\texttt{>}.\mathsf{m} : \texttt{<}\overline{\mathsf{Z}} \lhd \overline{\mathsf{Q}}\texttt{>}\overline{T} \to T) \in \overline{\lambda}\}) \\
&\quad \mathsf{in}\ \Pi \cup\ \{(\mathsf{C}\texttt{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}\texttt{>}.\mathsf{m}\ :\ \texttt{<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}\texttt{>}\ \overline{\sigma(a)} \to \sigma(a)) \mid \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\mathsf{C}\texttt{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}\texttt{>}.\mathsf{m} : \overline{a} \to a) \in \overline{\lambda}\}
\end{aligned}
$$

FJType

$$
\begin{aligned}
&\mathsf{FJType}(\Pi, \text{class } \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>} \lhd \mathsf{N}\{\overline{\mathsf{T}}\ \bar{\mathsf{f}};\ \overline{\mathsf{M}}\}) = \\
&\qquad \text{let } \bar{a}_m \text{ be fresh type variables for each } \mathsf{m} \in \overline{\mathsf{M}} \\
&\qquad\quad \overline{\lambda}_0 = \{\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} :\ {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}\overline{\mathsf{T}} \to a_m \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad \mid \mathsf{m} \in \overline{\mathsf{M}},\ \mathsf{mtype}(\mathsf{m},\ \mathsf{N},\ \Pi) = {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}\overline{\mathsf{T}} \to \mathsf{T}\} \\
&\qquad\quad C_0 = \{a_m < \mathsf{T} \mid \mathsf{m} \in \overline{\mathsf{M}},\ \mathsf{mtype}(\mathsf{m},\ \mathsf{N},\ \Pi) = {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}\overline{T} \to T\} \\
&\qquad\quad \overline{\lambda}' = \{(\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} :\ \bar{a} \to a_m) \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad \mid \mathsf{m} \in \overline{\mathsf{M}},\ \mathsf{mtype}(\mathsf{m},\ \mathsf{N},\ \Pi) \text{ not defined},\ \bar{a} \text{ fresh}\} \\
&\qquad\quad C_m = \{\{a_m < \mathsf{Object}, \bar{a} < \overline{\mathsf{Object}}\} \mid (\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} :\ \bar{a}\ \to a_m) \in \overline{\lambda}'\} \\
&\qquad\quad \Pi = \Pi \cup \overline{\lambda}' \cup \overline{\lambda}_0 \\
&\qquad \text{in } (\Pi, C_0 \cup C_m \cup \bigcup_{\mathsf{m} \in \overline{\mathsf{M}}} \mathsf{TYPEMethod}(\Pi, C{<}\overline{\mathsf{X}}{>}, \mathsf{m}))
\end{aligned}
$$

TYPEMethod

$$
\begin{aligned}
&\mathsf{TYPEMethod}(\Pi,\ \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}}{>},\ \mathsf{m}(\overline{\mathsf{x}})\{\ \mathsf{return}\ \mathsf{e};\}) = \\
&\qquad\qquad \mathsf{let}\ {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}\overline{\mathsf{T}} \to \mathsf{T} = \Pi(\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m}) \\
&\qquad\qquad\quad (\mathsf{R}, C) = \mathsf{TYPEExpr}((\Pi; \{\mathsf{this} : \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}}{>}\} \cup \{\overline{\mathsf{x}} : \overline{\mathsf{T}}\}), \mathsf{e}) \\
&\qquad\qquad \mathsf{in}\ \ C \cup \{\mathsf{R} < \mathsf{T}\}
\end{aligned}
$$

TYPEExpr | Variable

$$\mathsf{TYPEExpr}((\Pi;\overline{\eta}),\mathsf{x}) = (\overline{\eta}(\mathsf{x}),\emptyset)$$

TYPEExpr | Field Lookup

$$
\begin{aligned}
\mathsf{TYPEExpr}((\Pi; \overline{\eta}), e.f) = \quad & \\
& \mathsf{let}\ (\mathsf{R}, C_R) = \mathsf{TYPEExpr}((\Pi; \overline{\eta}), e) \\
& \quad a \text{ fresh} \\
& \quad \mathsf{c} = \mathsf{oc}\{\{\mathsf{R} < \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{a}}{>}, \mathsf{a} = [\overline{\mathsf{a}}/\overline{\mathsf{X}}]\mathsf{T}, \overline{\mathsf{a}} < [\overline{\mathsf{a}}/\overline{\mathsf{X}}]\overline{\mathsf{N}} \mid \overline{\mathsf{a}} \text{ fresh}\} \\
& \qquad\qquad \mid \mathsf{T}\ \mathsf{f} \in \mathsf{class}\ \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X} \lhd \mathsf{N}}{>} \lhd \mathsf{N}\ \{\ \overline{\mathsf{X}}\ \overline{\mathsf{N}};\ \ [\mathsf{K}]\ \overline{\mathsf{M}}\ \}\} \\
& \mathsf{in}\ \ (\mathsf{a}, (C_R \cup \{\mathsf{c}\}))
\end{aligned}
$$

Solved Form

1. $\mathsf{a} < \mathsf{b}$
2. $\mathsf{a} = \mathsf{b}$
3. $\mathsf{a} < \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{T}}{>}$
4. $\mathsf{a} = \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{T}}{>}$ with $\mathsf{a} \notin \overline{\mathsf{T}}$

No variable is allowed to occur twice on the left side of rules 3 and 4.

Step 1

$$\frac{C \cup \{\mathrm{a} < \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>},\ \mathrm{a} < \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{V}}{>}\}}{C \cup \{a < \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>},\ \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{V}}{>}\}} \quad \Delta \vdash \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{X}}{>} <: \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{N}}{>} \qquad \text{match}$$

$$\frac{C \cup \{\mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{a},\ \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{V}}{>} < \mathrm{a}\}}{C \cup \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{V}}{>},\ \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{V}}{>} < \mathrm{a}} \quad \Delta \vdash \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{X}}{>} <: \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{N}}{>} \qquad \text{match reverse}$$

$$\frac{C \cup \{\mathrm{a} < \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>},\ \mathrm{b} <^* \mathrm{a}, \mathrm{b} < \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{U}}{>}\}}{C \cup \{\mathrm{a} < \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>},\ \mathrm{b} <^* \mathrm{a},\ \mathrm{b} < \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{U}}{>},\ \mathrm{b} < \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>}\}} \qquad \text{adopt}$$

$$\frac{C \cup \{\mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{a},\ \mathrm{a} <^* \mathrm{b}, \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{U}}{>} < \mathrm{b}\}}{C \cup \{\mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{a},\ \mathrm{a} <^* \mathrm{b},\ \mathrm{D}{<}\overline{\mathrm{U}}{>} < \mathrm{b},\ \mathrm{C}{<}\overline{\mathrm{T}}{>} < \mathrm{b}\}} \qquad \text{reverse adopt}$$

Step 2

1. $\mathrm{C}\texttt{<}\overline{\mathrm{T}}\texttt{>} < \mathrm{D}\texttt{<}\overline{\mathrm{U}}\texttt{>}$ where C cannot be a subtype of D.
2. $a < \mathrm{C}\texttt{<}\overline{\mathrm{T}}\texttt{>},\ a < \mathrm{D}\texttt{<}\overline{\mathrm{U}}\texttt{>}$ where C cannot be a subtype of D and vice versa.
3. $\mathrm{C}\texttt{<}\overline{\mathrm{T}}\texttt{>} < a$

expandLB

$$\text{expandLB}(\text{C<}\overline{\text{T}}\text{>} < a,\ a < \text{D<}\overline{\text{U}}\text{>}) = \{\{a = [\overline{\text{T}}/\overline{\text{X}}]\text{N}\} \\ \mid \Delta \vdash \text{C<}\overline{\text{X}}\text{>} < \text{N},\ \Delta \vdash \text{N} < \text{D<}\overline{\text{P}}\text{>}\} \\ \text{where } \overline{\text{P}} \text{ is determined by } \Delta \vdash \text{C<}\overline{\text{X}}\text{>} < \text{D<}\overline{\text{P}}\text{>} \text{ and } [\overline{\text{T}}/\overline{\text{X}}]\overline{\text{P}} = \overline{\text{U}}$$

Step 3

$$\frac{C \cup \{\mathsf{a} = \mathsf{T}\}}{[\mathsf{T}/\mathsf{a}]\mathsf{C} \cup \{\mathsf{a} = \mathsf{T}\}} \quad \text{where a occurs in C but not in T}$$

Step 4

If C” has changed, then start again from Step 1.

Step 5

$$\frac{C \cup \{\mathsf{C} \cup \mathsf{a} < \mathsf{b}\}}{[\mathsf{a}/\mathsf{b}]\mathsf{C} \cup \{\mathsf{b} = \mathsf{a}\}} \quad \text{sub elim}$$

$$\frac{C \cup \{\mathsf{a} = \mathsf{a}\}}{C} \quad \text{erase}$$

Step 6

$$\sigma = \{\mathsf{b} \rightarrow [\overline{\mathsf{Y}}/\overline{\mathsf{a}}]\mathsf{T} \mid (\mathsf{b} = \mathsf{T}) \in C_{=}\} \cup \{\overline{\mathsf{a}} \rightarrow \overline{\mathsf{Y}}\} \cup \{\mathsf{b} \rightarrow \mathsf{X} \mid (\mathsf{b} < \mathsf{X}) \in C_{<}\}$$

$$\gamma = \{\mathsf{Y} \lhd [\overline{\mathsf{Y}}/\overline{\mathsf{a}}]\mathsf{N} \mid (\mathsf{a} < \mathsf{N}) \in C_{<}\}$$

Type Infernece

$$
\begin{aligned}
&\mathsf{FJTypeInference}(\Pi,\ \mathsf{class}\ \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>} \lhd \mathsf{N}\{\ldots\}) = \\
&\quad \mathsf{let}\ (\overline{\lambda},\ C) \qquad\quad = \mathsf{FJType}(\Pi, \mathsf{class}\ \mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>} \lhd \mathsf{N}\{\ldots\}) \\
&\qquad (\sigma, {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}) = \mathsf{Unify}(C, \{\overline{\mathsf{X}} <: \overline{\mathsf{N}}\} \cup \{{<}\overline{\mathsf{Z}} \lhd \overline{\mathsf{Q}}{>} \mid \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} : {<}\overline{\mathsf{Z}} \lhd \overline{\mathsf{Q}}{>}\overline{T} \to T) \in \overline{\lambda}\}) \\
&\quad \mathsf{in}\ \Pi \cup\ \{(\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m}\ :\ {<}\overline{\mathsf{Y}} \lhd \overline{\mathsf{P}}{>}\ \overline{\sigma(a)} \to \sigma(a)) \mid \\
&\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad (\mathsf{C}{<}\overline{\mathsf{X}} \lhd \overline{\mathsf{N}}{>}.\mathsf{m} : \overline{a} \to a) \in \overline{\lambda}\}
\end{aligned}
$$

Example

```
class Pair<X extends Object<>,
           Y extends Object<>> extends Object<>{
  X fst;
  Y snd;

  setfst(newfst) {
    return new Pair(newfst, this.snd);
  }
}
```

Example

$$\lambda = \{(\mathsf{Pair{<}X \lhd Object{>}.setfst}) : \ [\mathsf{a}_1] \to \mathsf{a}_0\}$$
$$C = \{\mathsf{a}_0 < \mathsf{Object},\ \mathsf{a}_1 < \mathsf{Object}\}$$

$$\begin{aligned} C = \{&\mathsf{a}_0 < \mathsf{Object},\ \mathsf{a}_1 < \mathsf{Object},\\ &\mathsf{a}_1 < \mathsf{a}_5,\ \mathsf{a}_5 < \mathsf{Object},\ \mathsf{a}_2 < \mathsf{a}_6,\ \mathsf{a}_6 < \mathsf{Object},\\ &\{\{\mathsf{Pair{<}X,\ Y{>}} < \mathsf{Pair{<}a_3, a_4{>}},\ \mathsf{a}_2 = \mathsf{a}_4,\ \mathsf{a}_3 < \mathsf{Object},\ \mathsf{a}_4 < \mathsf{Object}\}\}\\ &\} \end{aligned}$$

Example

$$
\begin{aligned}
\lambda &= \{(\mathsf{Pair{<}X} \lhd \mathsf{Object{>}.setfst}) : \; [a_1] \to a_0\} \\
C &= \{a_0 < \mathsf{Object},\; a_1 < \mathsf{Object}, \\
&\qquad a_1 < a_5,\; a_5 < \mathsf{Object},\; a_2 < a_6,\; a_6 < \mathsf{Object}, \\
&\qquad \{\{\mathsf{Pair{<}X, Y{>}} < \mathsf{Pair}{<}a_3, a_4{>},\; a_2 = a_4,\; a_3 < \mathsf{Object},\; a_4 < \mathsf{Object}\}\}, \\
&\qquad \mathsf{Pair}{<}a_5, a_6{>} < a_0 \\
&\qquad \}
\end{aligned}
$$

Example

$$\frac{C \cup \{\text{Pair<X<>, Y<>>} < \text{Pair<}a_3, a_4\text{>}\}}{C \cup \{\text{Pair<X<>, Y<>>} = \text{Pair<}a_3, a_4\text{>}\}} \quad \text{adapt}$$

$$\frac{C \cup \{\text{Pair<X<>, Y<>>} = \text{Pair<}a_3, a_4\text{>}\}}{C \cup \{\text{X<>} = a_3,\ \text{Y<>} = a_4\}} \quad \text{reduce}$$

$$\frac{C \cup \{\text{X<>} = a_3\}}{C \cup \{a_3 = \text{X<>}\}} \quad \text{and} \quad \frac{C \cup \{\text{Y<>} = a_3\}}{C \cup \{a_3 = \text{Y<>}\}} \quad \text{swap}$$

Example

$$
\begin{aligned}
C = \{&\text{Y<>} < a_6,\ a_1 < a_5,\ a_6 < \text{Object<>},\ a_1 < \text{Object<>},\\
&\text{X<>} < \text{Object<>},\ a_4 = \text{Y<>},\ \text{Y<>} < \text{Object<>},\\
&a_0 = \text{Pair<}a_5,\ a_6\text{>},\ a_3 = \text{X<>}, a_2 = \text{Y<>},\ a_5 < \text{Object<>}\\
&\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
C_= &= \{a_0 = \text{Pair<}a_1,\ \text{Y>},\ a_6 = \text{Y},\ a_5 = a_1,\ a_4 = \text{Y},\ a_3 = \text{X},\ a_2 = \text{Y}\}\\
C_< &= \{a_1 < \text{Object<>}\}
\end{aligned}
$$

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!