



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

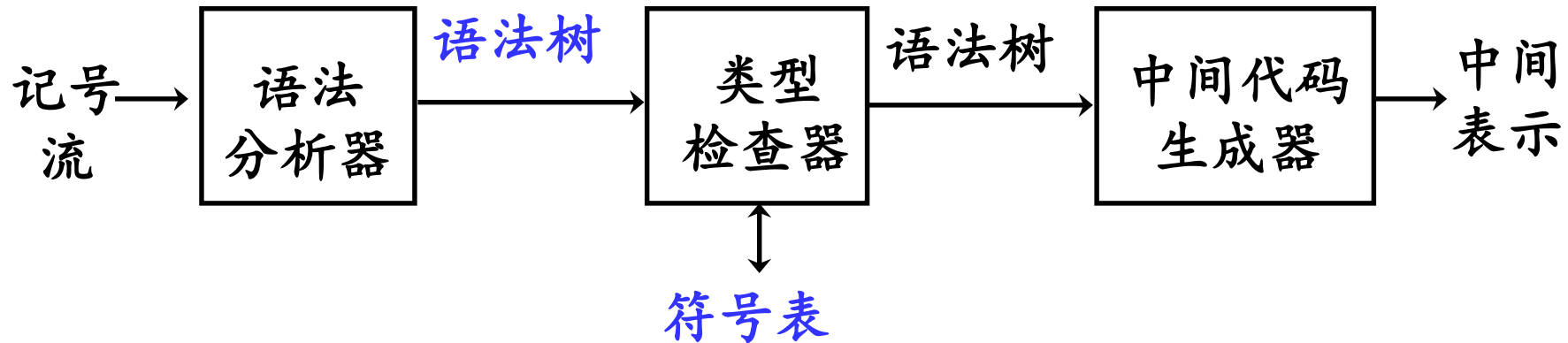
类型检查 I

《编译原理和技术(H)》、《编译原理(H)》

张昱

0551-63603804, yuzhang@ustc.edu.cn

中国科学技术大学
计算机科学与技术学院



□ 语义检查中最典型的部分——类型检查

- 类型系统、类型检查、符号表的作用
- 多态函数、重载

□ 其他的静态检查（不详细介绍）

- 控制流检查、唯一性检查、关联名字检查



5.1 类型在编程语言中的作用

- 类型化语言与类型系统
- 执行错误与安全语言
- 不安全性及其检查
- 类型化语言的优点



类型：可限定变量在程序执行期间的**取值范围**和能参与的**操作**

□ 类型化的语言 (typed language)

■ 变量都被给定类型，运算都被定义了运算对象和运算结果所允许的类型

例如，C语言中int类型的变量x的值是4字节的整数，可以进行算术运算等

■ **静态类型语言**：如C/C++、Ada、ML、Java、Go、Rust

对变量、表达式的类型指派是在**编译时**进行

■ **动态类型语言**：如Lisp、Perl、PHP、Python、JavaScript、Ruby

在**运行时**确定表达式类型，变量不绑定到特定类型

□ 未类型化的语言 (untyped language)：如汇编语言、纯λ演算

■ 没有显式的类型系统（缺少静态类型），或者说**仅有一个泛类型**

□ 允许运算作用于任意对象，其结果可能是有意义的值、错误、异常、未定义的结果



□ 语言的一部分，由一组定型规则 (typing rule)，用来给各种程序构造指派类型

例如，如果 M 和 N 都是整型表达式，那么 $M + N$ 也是整型表达式

- 显式类型化语言：程序员必须在定义变量或函数时明确地声明类型，如C/C++、Java
- 隐式类型化语言：允许程序员在代码中忽略部分类型信息，如ML

□ 设计目的

- 用类型检查的方式来保证合法程序在运行时的良行为

```
fun length (lptr) =  
  if null (lptr) then 0  
  else length (tl (lptr)) + 1;
```

□ 类型检查：根据定型规则来确定程序中各语法构造的类型

通常是静态类型检查；对于静态无法检查的，可由编译器生成动态检查代码

□ 类型推断：在缺少显式类型声明时，根据上下文推断出变量或表达式的类型

`fun add x y = x + y;` // ML 语言编译器会根据对变量 x 和 y 做加法，推断 x 和 y 是数值类型



5.1 类型在编程语言中的作用

- 类型化语言与类型系统
- 执行错误与安全语言
- 不安全性及其检查
- 类型化语言的优点



□ 可捕获的错误 (trapped error)

- 例：非法指令错误、非法内存访问、除数为零
- 捕获到错误，会使计算立即停止

divzero.c

```
#include <stdio.h>
int main(){
    printf("%d", 10/0);
}
```

gcc编译

```
$ gcc divzero.c -o divzero
divzero.c: In function 'main':
divzero.c:3:17: warning: division by zero
[-Wdiv-by-zero]
    printf("%d", 10/0);
                    ^
```

除数为零

出现core dumped时可调试

```
$ ulimit -c 1024 设置存储core的大小
$ ./a.out 执行会引起异常的可执行程序
$ gdb --core=core 调试core
注意：源文件编译时加上 -g 选项以生成调试信息
```

生成可执行文件divzero

```
$ ./divzero
浮点数例外 (核心已转储)
```

执行到除零运算，立即停止

Floating point exception(core dumped)



程序运行时的执行错误

□ 可捕获的错误 (trapped error)

- 例：非法指令错误、非法内存访问、除数为零
- 引起计算立即停止

□ 不可捕获的错误(untrapped error)

- 例：下标变量的访问越过了数组的末端；
跳到一个错误的地址，该地址开始的内存正好代表一个指令序列
- 错误可能会有一段时间未引起注意

希望可执行的程序不存在不可捕获的错误



□ 良行为的(well-behaved)程序

- 没有统一的定义
- 如: 良行为的程序定义为没有任何不可捕获的错误

□ 安全语言(safe language)

- 定义: 安全语言的**任何合法程序**都是**良行为的**
- 设计**类型系统**, 通过静态类型检查**拒绝不可捕获的错误**
- 设计正好只拒绝不会被捕获错误的类型系统是困难的

□ 实际往往是拒绝**禁止错误**(*forbidden error*)

- 不会被捕获错误集合 + 会被捕获错误的一个子集



□ 良类型的程序(well-typed program)

- 良类型的程序是**没有类型错误**的程序
- 在语言定义中，除语法外，若所有上下文有关的限制都由类型系统表达，则良类型的程序即是**合法程序**

□ 类型可靠 (type sound) 的语言

- 所有**良类型程序 (合法程序)** 都是**良行为**的
- 类型可靠的语言一定是安全的语言

语法的和静态的概念

类型化语言
良类型程序

动态的概念

安全语言
良行为程序



5.1 类型在编程语言中的作用

- 执行错误与安全语言
- 类型化语言与类型系统
- 不安全性及其检查
- 类型化语言的优点



禁止错误集合没有囊括所有不可捕获的错误

例 C语言的共用体

```
int main() {  
    union U { int u1; int *u2;} u;  
    int *p;  
    u.u1 = 10;  
    p = u.u2;  
    *p = 0;  
}
```

Segmentation Fault
段错误 (核心已转储)

原因：地址为10的内存单元不是用户态能访问存储单元



□ C语言

- 有很多不安全但被广泛使用的特征，如：

指针算术运算、类型强制、参数个数可变

- 在语言设计的历史上，安全性考虑不足是因为当时强调代码的执行效率

□ 在现代语言设计上，安全性的位置越来越重要

- C的一些问题已经在C++中得以缓解
- 更多一些问题在Java中已得到解决



□ 静态类型 vs. 动态类型 vs. 无类型(唯一的泛类型)

- 静态类型：一般都是静态检查，也需要一些运行时的检查，如数组访问越界类型检查也可以放在运行时完成，但影响效率
- 动态类型或无类型：可通过运行时的 **类型推断和检查** 来排除禁止错误

□ 安全性：语言设计中，性能的追求会伴随着不安全性的引入

□ 现代程序语言进展

- 动态类型语言的静态类型推断：如Google面向Python的PyPi
- 引入 **渐进类型** (2006 [Jeremy Siek](#)) : [What is Gradual Typing](#)
- 安全性日趋重要

```
def f(x, y : int):  
    return x+y  
  
result = f(2, 4)  
print(result)
```

Kotlin、TypeScript、Rust 在2018年GitHub贡献者数增速分别为 2.6、1.9、1.7 倍



□ 对语言的性能评估

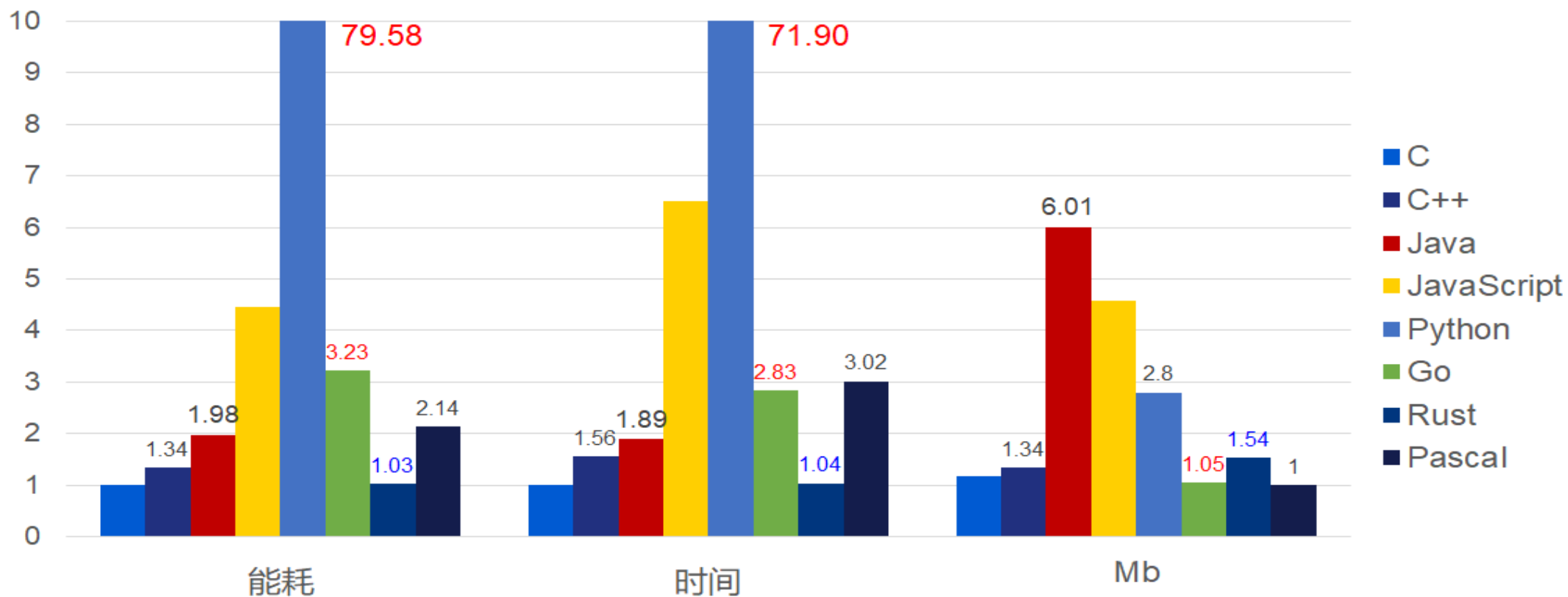
■ Which programming language is fastest?

source	<u>secs</u>	<u>mem</u>	<u>gz</u>
<u>Intel C</u>	23.34	11,052	427
<u>C gcc #2</u>	25.22	11,112	406
<u>C gcc</u>	26.27	11,112	427
<u>Go #2</u>	26.53	11,112	494
<u>Go</u>	27.22	11,112	462
<u>Java</u>	29.53	41,244	439
<u>C# .NET</u>	47.52	30,452	465
<u>PHP #2</u>	143.01	12,992	391
<u>PHP #3</u>	163.38	13,004	412
<u>PHP</u>	204.22	12,976	384
<u>Ruby #2</u>	19 min	25,596	307
<u>Ruby</u>	20 min	25,492	335
<u>Python 3 #3</u>	23 min	11,064	384
<u>Python 3 #2</u>	30 min	11,192	330
<u>Python 3</u>	1h 03 min	11,032	373

<https://benchmarksgame-team.pages.debian.net/benchmarksgame/index.html>



□ 编程语言的能效对比



[CLBG](#) :The Computer Language Benchmarks Game

[\[SLE2017\]](#) Energy Efficiency across Programming Languages: How Do Energy, Time, and Memory Relate?



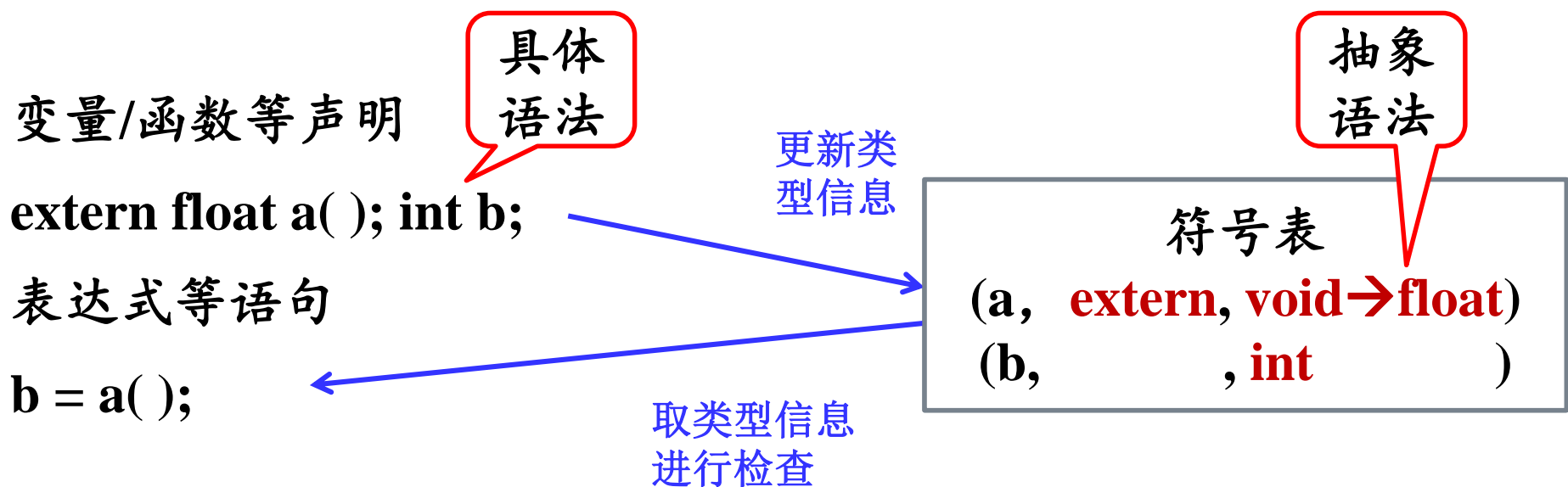
5.1 类型在编程语言中的作用

- 执行错误与安全语言
- 类型化语言与类型系统
- 不安全性及其检查
- 类型化语言的优点



□ 从工程的观点看

- **开发的实惠**: 较早发现错误、类型信息具有文档作用
- **编译的实惠**: 程序模块可以相互独立地编译
- **运行的实惠**: 可得到更有效的空间安排和访问方式





5.2 类型系统的描述语言

- 类型系统的形式化
 - 断言、推理规则
- 类型检查和类型推断



□ 类型系统是一种逻辑系统

有关自然数的逻辑系统

- 自然数表达式（需要定义它的语法）

$a+b, 3$

- 良形公式（逻辑断言，需要定义它的语法）

$a+b=3, (d=3)\wedge(c<10)$

- 推理规则

$$\frac{a < b, \quad b < c}{a < c}$$

前提

结论



□ 类型系统是一种逻辑系统

有关自然数的逻辑系统

- 自然数表达式

$a+b, 3$

- 良形公式

$a+b=3, (d=3) \wedge (c < 10)$

- 推理规则

$$\frac{a < b, \quad b < c}{a < c}$$

$$\frac{\Gamma \vdash M : \text{int}, \Gamma \vdash N : \text{int}}{\Gamma \vdash M + N : \text{int}}$$

静态定型环境
(即符号表)

类型系统

- 类型表达式

$\text{int}, \text{int} \rightarrow \text{int}$

- 定型断言 (typing assertion)

$x:\text{int} \vdash x+3 : \text{int}$

- 定型规则 (typing rules)



□ 断言的形式

$\Gamma \vdash S$ S 的所有自由变量都声明在 Γ 中

其中

- Γ 是一个静态定型环境（在编译器实现中，为符号表）

如 $x_1:T_1, \dots, x_n:T_n$

- S 的形式随断言形式的不同而不同
- 断言有三种具体形式



□ 定型环境的断言

$\Gamma \vdash \diamond$ 该断言表示 Γ 是良形的定型环境

- 将用推理规则来定义环境的语法(而不是用文法)

□ 类型表达式的语法断言

$\Gamma \vdash \text{nat}$ 在定型环境 Γ 下, nat 是类型表达式

- 将用推理规则来定义类型表达式的语法

□ 语法项的定型断言

$\Gamma \vdash M : T$ 在定型环境 Γ 下, 语法项 M 具有类型 T

例: $\emptyset \vdash \text{true} : \text{boolean}$ $x : \text{nat} \vdash x+1 : \text{nat}$

- 将用推理规则来确定程序构造实例的类型



□ 断言的有效性

- 合法的断言 (valid assertion)

$\Gamma \vdash \text{true} : \text{boolean}$

- 不合法的断言 (invalid assertion)

$\Gamma \vdash \text{true} : \text{nat}$

□ 推理规则 (inference rules)

$$\frac{\Gamma_1 \vdash S_1, \dots, \Gamma_n \vdash S_n}{\Gamma \vdash S}$$

- 前提 (premise)、结论 (conclusion)
- 公理 (axiom) (前提为空)、推理规则



推理规则

(规则名)	(注释)	推理规则	(注释)
□ 环境规则	(Env \emptyset)	$\frac{}{\emptyset \vdash \diamond}$	空环境是良形的环境
□ 语法规则	(Type Bool)	$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \text{boolean}}$	boolean是类型表达式
□ 定型规则	(Val +)	$\frac{\Gamma \vdash M : \text{int}, \Gamma \vdash N : \text{int}}{\Gamma \vdash M + N : \text{int}}$	在环境 Γ 下, $M + N$ 是int类型



□ 类型检查(type checking)

- 用语法制导的方式，根据上下文有关的**定型规则**来判定**程序构造是否为良类型的程序构造**的过程

可以边解析边检查，也可以在访问AST时进行检查

□ 类型推断(type inference)

在类型信息不完整的情况下的定型判定问题

例如： $f(x:t) = E$ 和 $f(x) = E$ 的区别



5.3 简单类型检查器的说明

- 一个简单的语言
及其类型系统
- 类型检查



$P \rightarrow D ; S$

$D \rightarrow D ; D \mid \text{id} : T$

$T \rightarrow \text{boolean} \mid \text{integer} \mid \text{array} [\text{num}] \text{ of } T \mid *T \mid T \text{ '}\rightarrow\text{' } T$

$S \rightarrow \text{id} := E \mid \text{if } E \text{ then } S \mid \text{while } E \text{ do } S \mid S ; S$

$E \rightarrow \text{truth} \mid \text{num} \mid \text{id} \mid E \text{ mod } E \mid E [E] \mid *E \mid E (E)$

例

$\text{i} : \text{integer};$

$\text{j} : \text{integer};$

$\text{j} := \text{i mod } 2000$



□ 环境规则

(Env \emptyset)

$$\frac{}{\emptyset \vdash \diamond}$$

id不在 Γ 的
定义域中

(Decl Var)

$$\frac{\Gamma \vdash T, \text{id} \notin \text{dom}(\Gamma)}{\Gamma, \text{id} : T \vdash \diamond}$$

其中 $\text{id} : T$ 是该简单语言的一个声明语句

遇到一个变量声明语句，若该变量在此之前未被声明过
(即 $\text{id} \notin \text{dom}(\Gamma)$)，则向定型环境(符号表)中增加一个符号定型，
即 $\text{id} : T$



□ 语法规则：哪些是合法的类型表达式

(Type Bool)

$$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \textit{boolean}}$$

(Type Int)

$$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \textit{integer}}$$

(Type Void)

void 用于表示语句类型

$$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \textit{void}}$$

→ 编程语言和定型断言的类型表达式并非完全一致

基本类型是合法的类型表达式
如 *boolean*、*integer*、*void*



□ 语法规则：哪些是合法的类型表达式

(Type Ref) ($T \neq void$)

具体语法： $*T$

$$\frac{\Gamma \vdash T}{\Gamma \vdash \mathit{pointer}(T)}$$

如果 T 是类型，则 $\mathit{pointer}(T)$ 是类型

(Type Array) ($T \neq void$)

具体语法： $\mathit{array}[N]$ of T

$$\frac{\Gamma \vdash T, \Gamma \vdash N : \mathit{integer}}{\Gamma \vdash \mathit{array}(N, T)} \quad (N > 0)$$

(Type Function) ($T_1, T_2 \neq void$)

T_1 和 T_2 分别是函数的参数类型和返回类型

$$\frac{\Gamma \vdash T_1, \Gamma \vdash T_2}{\Gamma \vdash T_1 \rightarrow T_2}$$

定型断言中的类型表达式用的是抽象语法

将类型构造算子作用于类型表达式可以构造新的类型表达式
如 $\mathit{pointer}$ 、 array 、 \rightarrow 是类型构造算子



□ 定型规则——表达式

(Exp Truth)

$$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \mathbf{truth} : \mathit{boolean}}$$

(Exp Num)

$$\frac{\Gamma \vdash \diamond}{\Gamma \vdash \mathbf{num} : \mathit{integer}}$$

(Exp Id)

$$\frac{\Gamma_1, \mathbf{id} : T, \Gamma_2 \vdash \diamond}{\Gamma_1, \mathbf{id} : T, \Gamma_2 \vdash \mathbf{id} : T}$$



□ 定型规则——表达式

$$\text{(Exp Mod)} \quad \frac{\Gamma \vdash E_1 : \text{integer}, \Gamma \vdash E_2 : \text{integer}}{\Gamma \vdash E_1 \text{ mod } E_2 : \text{integer}}$$

$$\text{(Exp Index)} \quad \frac{\Gamma \vdash E_1 : \text{array}(N, T), \Gamma \vdash E_2 : \text{integer}}{\Gamma \vdash E_1[E_2] : T} \quad (0 \leq E_2.\text{val} \leq N-1)$$

$$\text{(Exp Deref)} \quad \frac{\Gamma \vdash E : \text{pointer}(T)}{\Gamma \vdash *E : T}$$

$$\text{(Exp FunCall)} \quad \frac{\Gamma \vdash E_1 : T_1 \rightarrow T_2, \quad \Gamma \vdash E_2 : T_1}{\Gamma \vdash E_1(E_2) : T_2}$$



□ 定型规则——语句

(Stmt Assign) ($T=boolean$ or
 $T=integer$)

$$\frac{\Gamma \vdash id : T, \Gamma \vdash E : T}{\Gamma \vdash id := E : void}$$

(Stmt If)

$$\frac{\Gamma \vdash E : boolean, \Gamma \vdash S : void}{\Gamma \vdash \text{if } E \text{ then } S : void}$$

(Stmt While)

$$\frac{\Gamma \vdash E : boolean, \Gamma \vdash S : void}{\Gamma \vdash \text{while } E \text{ do } S : void}$$

(Stmt Seq)

$$\frac{\Gamma \vdash S_1 : void, \Gamma \vdash S_2 : void}{\Gamma \vdash S_1 ; S_2 : void}$$



□ 更多的类型构造算子

■ 积类型构造算子 $\times: T_1 \times T_2$

可用于表示实际编程语言中的列表和元组, T_1 、 T_2 为成员类型

如果成员有名字, 如 $f_1:T_1 \times f_2:T_2$

则用于表示结构体类型、记录类型

■ 和类型构造算子 $+: T_1 + T_2$

可用于表示实际编程语言中的共用体



5.3 简单类型检查器的说明

- 一个简单的语言
及其类型系统
- 类型检查



□ 设计语法制导的类型检查器

- 设计依据：前面定义的类型系统
- 定型环境 Γ 的信息存入编译器的符号表
 - $addtype(id, type)$: 将 id 的类型 $type$ 存入符号表，若出现重复定义则报错
 - $lookup(id.entry)$: 从符号表中查找 id 的类型，若未找到则报错
- 考虑到报错的需要，增加了 **类型错误** $type_error$
- 对类型表达式采用抽象语法

具体：

数组类型 $array [N] \text{ of } T$ 抽象： $array (N, T)$

指针类型 $*T$ $pointer (T)$



类型检查——声明语句

□ 方法1: 用语法制导的翻译方案实现类型检查, 边解析边检查

$D \rightarrow D; D$ //D1

$D \rightarrow id : T$ { *addtype* (*id.entry*, *T.type*); } //D2

addtype: 把符号id的类型信息*T.type*填入符号表

实现类型系统中的**环境规则**

(Decl Var)
$$\frac{\Gamma \vdash T, \text{id} \notin \text{dom}(\Gamma)}{\Gamma, \text{id} : T \vdash \diamond}$$



□ 主流过程: [ParseTree] → AST → 类型检查

□ 类型检查器的实现

■ 一般是对语法树进行类型检查

设计实现的关键:

■ 符号表的设计: 如何表示不同的类型

■ 语法树的Visitor设计

回顾: ANTLR会生成与标签
对应的语法结构的
enter和exit方法

■ 可以带标签(#标签名, 后跟空格或换行)

```
e: e '*' e # Mult | e '+' e # Add | INT # Int ;
```

ANTLR为每个标签产生规则上下文类 `XXXParser.MultContext`

□ 有何用处?

ANTLR会生成与该标签对应的语法结构的enter和exit方法

```
public interface XXXListener extends ParseTreeListener {  
    void enterMult(XXXParser.MultContext ctx);  
    void exitMult(XXXParser.MultContext ctx);  
    .....  
}
```



□ 方法1：用语法制导的翻译方案实现类型检查

$D \rightarrow D; D$ //D1

$D \rightarrow id : T \quad \{addtype (id.entry, T.type); \}$ //D2

addtype: 把符号id的类型信息*T.type*填入符号表

□ 方法2：在遍历AST时进行类型检查

可以在 *exitD2* 中增加对*addtype*的调用

如何表达多个声明*D1*呢?

将多个声明组织成 *list* (可以用表示线性表的容器类)

如何处理多个声明*D1*呢?

对*list* 中元素的迭代访问 (可以用现成的Iterator类)

```
visitD1(D1):  
  foreach (child: D1.list)  
    visitD2(child);  
exitD2(D2):  
  addtype (id.entry, T.type);
```




类型检查——声明语句

语法制导的翻译方案

$D \rightarrow D; D$

$D \rightarrow \text{id} : T \quad \{ \text{addtype}(\text{id.entry}, T.type); \}$

$T \rightarrow \text{boolean} \quad \{ T.type = \text{boolean}; \}$

$T \rightarrow \text{integer} \quad \{ T.type = \text{integer}; \}$

$T \rightarrow *T_1 \quad \{ T.type = \text{pointer}(T_1.type); \}$

$T \rightarrow \text{array}[\text{num}] \text{ of } T_1$
 $\{ T.type = \text{array}(\text{num.val}, T_1.type); \}$

$T \rightarrow T_1 \text{ '}' T_2 \quad \{ T.type = T_1.type \rightarrow T_2.type; \}$

(Type Function)

$(T_1, T_2 \neq \text{void})$

实现类型系统中的语法规则

$\Gamma \vdash T_1, \Gamma \vdash T_2$

$\Gamma \vdash T_1 \rightarrow T_2$



类型检查——声明语句

语法制导的翻译方案

$D \rightarrow D; D$

$D \rightarrow id : T \quad \{addtype (id.entry, T.type) ; \}$

$T \rightarrow boolean \quad \{T.type = boolean; \}$

$T \rightarrow integer \quad \{T.type = integer; \}$

$T \rightarrow *T_1 \quad \{T.type = pointer(T_1.type) ; \}$

$T \rightarrow array [num] of T_1$
 $\quad \quad \quad \{T.type = array(num.val, T_1.type) ; \}$

$T \rightarrow T_1 ' \rightarrow ' T_2 \quad \{T.type = T_1.type \rightarrow T_2.type; \}$

- (Bool,--)
- (Int, --)
- (Pointer,T1)
- (Array,T1,num)
- (Fun,T1, T2)



如何实现对各种类型的表示?

用记录类型: (类型的类别kind, 该类别的类型的其他信息)



类型检查——表达式

语法制导的翻译方案

$E \rightarrow \text{truth}$ $\{E.type = \text{boolean}; \}$

$E \rightarrow \text{num}$ $\{E.type = \text{integer}; \}$

$E \rightarrow \text{id}$ $\{E.type = \text{lookup}(\text{id.entry}); \}$

查符号表，获取 id 的类型

实现类型系统中的定型规则

(Exp Id)

$$\frac{\Gamma_1, \text{id} : T, \Gamma_2 \vdash \diamond}{\Gamma_1, \text{id} : T, \Gamma_2 \vdash \text{id} : T}$$



类型检查——表达式

语法制导的翻译方案

$E \rightarrow \text{truth}$ $\{E.type = \text{boolean}; \}$

$E \rightarrow \text{num}$ $\{E.type = \text{integer}; \}$

$E \rightarrow \text{id}$ $\{E.type = \text{lookup}(\text{id.entry}); \}$

$E \rightarrow E_1 \text{ mod } E_2$ $\{ \text{if } (E_1.type == \text{integer} \ \&\& \ E_2.type == \text{integer})$
 $E.type = \text{integer};$

$\text{else } E.type = \text{type_error}; \}$

$E \rightarrow E_1 [E_2]$ $\{ \text{if } (E_2.type == \text{integer} \ \&\& \ E_1.type == \text{array}(s, t))$

$E.type = t;$

$\text{else } E.type = \text{type_error}; \}$

(Exp Mod)	$\frac{\Gamma \vdash E_1 : \text{integer}, \Gamma \vdash E_2 : \text{integer}}{\Gamma \vdash E_1 \text{ mod } E_2 : \text{integer}}$
(Exp Index)	$\frac{\Gamma \vdash E_1 : \text{array}(N, T), \Gamma \vdash E_2 : \text{integer}}{\Gamma \vdash E_1[E_2] : T}$ $(0 \leq E_2 \leq N-1)$



语法制导的翻译方案

$$E \rightarrow *E_1 \{ \text{if } (E_1.type == \text{pointer}(t)) E.type = t ; \\ \text{else } E.type = \text{type_error} ; \}$$
$$E \rightarrow E_1 (E_2) \{ \text{if } (E_2.type == s \ \&\& \ E_1.type == s \rightarrow t) \\ E.type = t ; \\ \text{else } E.type = \text{type_error} ; \}$$

(Exp Deref)	$\frac{\Gamma \vdash E : \text{pointer}(T)}{\Gamma \vdash *E : T}$
(Exp FunCall)	$\frac{\Gamma \vdash E_1 : T_1 \rightarrow T_2, \quad \Gamma \vdash E_2 : T_1}{\Gamma \vdash E_1 (E_2) : T_2}$



语法制导的翻译方案

$E \rightarrow E_1 \text{ op } E_2$

{if ($E_1.type == integer \ \&\& \ E_2.type == integer$)

$E.type = integer$;

else if ($E_1.type == integer \ \&\& \ E_2.type == real$)

$E.type = real$;

else if ($E_1.type == real \ \&\& \ E_2.type == integer$)

$E.type = real$;

else if ($E_1.type == real \ \&\& \ E_2.type == real$)

$E.type = real$;

else $E.type = type_error$; }


$$\begin{aligned} S \rightarrow id := E \{ & \text{if } (id.type == E.type \ \&\& \\ & E.type \in \{boolean, integer\}) S.type = void; \\ & \text{else } S.type = type_error; \} \\ S \rightarrow \text{if } E \text{ then } S_1 \{ & \text{if } (E.type == boolean) S.type = S_1.type; \\ & \text{else } S.type = type_error; \} \\ S \rightarrow \text{while } E \text{ do } S_1 \{ & \text{if } (E.type == boolean) S.type = S_1.type; \\ & \text{else } S.type = type_error; \} \\ S \rightarrow S_1; S_2 \{ & \text{if } (S_1.type == void \ \&\& S_2.type == void) \\ & S.type = void; \\ & \text{else } S.type = type_error; \} \end{aligned}$$



语法制导的翻译方案

$$P \rightarrow D; S \quad \{ \text{if } (S.type == \text{void}) P.type = \text{void}; \\ \text{else } P.type = \text{type_error}; \}$$



例题 1

编译时的**控制流**检查的例子

```
main() {  
    printf("\n%d\n",gcd(4,12));  
    continue;  
}
```

编译时的报错如下:

continue.c: In function ‘main’:

continue.c:3: continue statement not within a loop



例题 2

编译时的**唯一性**检查的例子

```
main() {  
int i;  
    switch(i){  
        case 10: printf(“%d\n”, 10); break;  
        case 20: printf(“%d\n”, 20); break;  
        case 10: printf(“%d\n”, 10); break;  
    }  
}
```

编译时的报错如下：

switch.c: In function ‘main’:

switch.c:6: duplicate case value

switch.c:4: this is the first entry for that value



例题 3

C语言

- 称`&`为地址运算符，`&a`为变量`a`的地址
- 数组名代表数组第一个元素的地址

问题：

如果`a`是一个数组名，那么表达式`a`和`&a`的值都是数组`a`第一个元素的地址，它们的使用是否有区别？

用四个C文件的编译报错或运行结果来提示



例题 3

```
typedef int A[10][20];
```

```
A a;
```

```
A *fun() {  
    return(a);  
}
```

该函数在Linux上用gcc编译，报告的错误如下：

第5行： **warning: return from incompatible pointer type**



例题 3

```
typedef int A[10][20];
```

```
A a;
```

```
A *fun() {  
    return(&a);  
}
```

该函数在Linux上用gcc编译时，没有错误



例题 3

```
typedef int A[10][20];
```

```
typedef int B[20];
```

```
A a;
```

```
B *fun() {
```

```
    return(a);
```

```
}
```

该函数在Linux上用gcc编译时，没有错误



例题 3

```
typedef int A[10][20];
```

```
A a;
```

```
fun() { printf(“%d,%d,%d\n”, a, a+1, &a+1);}
```

```
main() { fun(); }
```

该程序的运行结果是：

134518112, 134518192, 134518912



例题 3

结论

对于一个 t 类型的数组 $a[i_1][i_2]\dots[i_n]$ 来说,
表达式 a 的类型是:

`pointer(array(0.. i_2-1 , ... array(0.. i_n-1 , t)...))`

表达式 $\&a$ 的类型是:

`pointer(array(0.. i_1-1 , ... array(0.. i_n-1 , t)...))`