

1. Seleccion de Herramienta de Generacion Automatica

Analisis de Herramientas Evaluadas

Anteriormente, investigue tres herramientas para elaborar compiladores, para ello, considere las siguientes 3 herramientas:

Flex y Bison

Flex genera escaneres lexicos basados en automatas finitos deterministas, y Bison crea analizadores de sintaxis a partir de gramaticas libres de contexto

- Conocimiento de C para el codigo de acciones
- Compilacion separada de archivos intermedios
- Manejo de archivos `.l` y `.y` con sintaxis especifica
- Proceso de compilacion adicional con herramientas de C

Aunque son muy poderosas y eficientes, su integracion con Python (el lenguaje seleccionado para este proyecto) requeriria bindings adicionales o comunicacion entre procesos, lo cual añade complejidad innecesaria.

Flex y Bison

Flex y Bison son las herramientas mas para en el desarrollo de compiladores. Flex genera escaneres lexicos basados en automatas finitos deterministas, y Bison crea analizadores de sintaxis a partir de gramaticas libres de contexto.

Se requiere de conocimiento en C para el la definicion de las acciones de los puntos neuralgicos, compilacion separada de archivos intermedios, manejo de archivos con extension `.l` y `.y`, y un proceso de compilacion adicional utilizando herramientas de C.

Lrparsing

Lrparsing ofrece un enfoque mas moderno, us expresiones de Python para definir gramaticas. Esta herramienta proporciona un parser LR con tokenizador integrado, pre-compilacion de gramatica para optimizar el rendimiento, y mecanismos de recuperacion de errores que permiten continuar el parseo incluso cuando se detectan problemas.

PLY (Python Lex-Yacc)

PLY es una implementacion completamente desarrollada en Python sin dependencias externas, lo que facilita su instalacion y uso. Usa la sintaxis y filosofia de Lex/Yacc, usa parseo LALR (Look-Ahead LR), tiene validacion automatica de entrada con reportes de errores , y no requiere archivos de entrada especiales ni compilacion separada como Flex/Bison, implementa cache de tablas de parseo que solo regenera las tablas cuando detecta cambios en la gramatica, lo que optimiza el ciclo de desarrollo.

Decidi utilizar a PLY debido a que cuenta con bastante documentacion y cuenta con muchos ejemplos que facilitan la comprension de el proceso de elaboracion del parser.

Estructura del Compilador

lex.py - Analizador Lexico

Contiene la definicion de tokens y expresiones regulares para el lenguaje.

Dentro de lex se define a la lista de tokens y a las expresiones del lenguaje, donde para PLY, se definen primero a las palabras reservadas en formato de un diccionario, donde la llave es palabra escrita de la manera en la que sera reconocida en el codigo, y el valor sera nombre del token que esperaríamos. Luego creamos el arreglo de tokens que esperaremos, y le concatenamos a los valores de el diccionario de palabras reservadas, despues de esto procedemos a definir las expresiones regulares para cada token, donde primero definimos a las expresiones regulares de los caracteres individuales como variables, luego definimos a las expresiones regulares mas complicadas, como CNT_FLOAT, CNT_INT, ID, y CNT_STRING, espues inclui una regla gramaticar para ignorar espacios y tabs para que el programa no se detenga cuando detecte saltos de linea, lugo defini una regla que me de un conteo de lineas, y una regla para definir el manejo de errores del lexer, donde recibo e imprimo el error y luego salto al siguiente token.

yacc.py - Analizador Sintactico

Implementa las reglas gramaticales y construye el Arbol de Sintaxis Abstracta (AST).

Primero defino el simbolo de inicio, este sera la gramatica que empiece el programa, luego defino las producciones de la gramatica, esto lo logro mediante escribir a las gramaticas libres de contexto en forma de docstrings que yacc usa para la formacion de las tablas y definir a p[0] (indice del resultado) como el indice que representa al valor semantico que queremos que represente ese simbolo en el arbol de parseo. Luego agrego una regla para el manejo de errores.

Pruebas

Contiene casos de prueba exhaustivos para validar el funcionamiento del compilador, donde test_lexer.py contiene las pruebas del lexer y test_parse.py contiene las pruebas del parser, el cual emplea al lexer.

Definicion de Expresiones Regulares

Palabras Reservadas

Defini a las palabras reservadas mediante un diccionario que mapea el texto de la palabra a su tipo de token:

```
reserved_namespace = {
    'int'      : 'INT',
    'float'    : 'FLOAT',
    'var'      : 'VAR',
    'program'  : 'PROGRAM',
    'void'     : 'VOID',
    'if'       : 'IF',
    'else'     : 'ELSE',
    'while'    : 'WHILE',
    'do'       : 'DO',
    'print'    : 'PRINT',
    'main'     : 'MAIN',
    'end'      : 'END',
}
```

Tokens Simples

Los operadores y delimitadores se definen mediante expresiones regulares sencillas que se asignan a variables:

Token	Expresion Regular	Descripcion
COMMA	,	Coma
COLON	:	Dos puntos
SEMI_COLON	;	Punto y coma
L_CBRACKET	\{	Llave izquierda
R_CBRACKET	\}	Llave derecha

Token	Expresion Regular	Descripcion
L_SBRACKET	\[Corchete izquierdo
R_SBRACKET	\]	Corchete derecho
L_PARENTHESIS	\(Parentesis izquierdo
R_PARENTHESIS	\)	Parentesis derecho
EQUAL	=	Igual
PLUS	\+	Suma
MINUS	-	Resta
ASTERISK	*	Multiplicacion
FORWARD_SLASH	/	Division
NOT_EQUAL	!=	Diferente de
GREATER_THAN	>	Mayor que
LOWER_THAN	<	Menor que

Tokens Complejos

Los tokens con patrones complejos se definen mediante funciones:

CNT_FLOAT

```
def t_CNT_FLOAT(t):
    r'\d+\.\d+(e[+-]?\d+)?'
    t.value = float(t.value)
    return t
```

Patron: Uno o mas digitos, seguido de punto decimal, uno o mas digitos, opcionalmente seguido de notacion cientifica (e/E seguido de signo opcional y digitos).

Ejemplos validos: 3.14 , 2.5e10 , 1.0e-5

CNT_INT

```
def t_CNT_INT(t):
    r'\d+'
    t.value = int(t.value)
    return t
```

Patron: Uno o mas digitos.

Ejemplos validos: 0 , 42 , 1000

CNT_STRING

```
def t_CNT_STRING(t):  
    r'"([^"\\]|\\.)*"  
    t.value = t.value[1:-1] # Remover comillas  
    return t
```

Patron: Comillas dobles, seguidas de cualquier caracter excepto comillas o backslash (o secuencias de escape), terminando en comillas dobles.

Ejemplos validos: "hola", "valor: 10", "con \"escape\""

ID

```
def t_ID(t):  
    r'[a-zA-Z_]\w*'  
    t.type = reserved_namespace.get(t.value, 'ID')  
    return t
```

Patron: Letra o guion bajo, seguido de cero o mas caracteres alfanumericos o guiones bajos.

Ejemplos validos: x , variable1 , _temp , miVariable

Manejo de Espacios y Comentarios

```
# Ignorar espacios y tabs  
t_ignore = ' \t'  
  
# Contar lineas  
def t_newline(t):  
    r'\n+'  
    t.lexer.lineno += len(t.value)
```

Importante: PLY evalua las reglas revizando primero a las funciones definidas antes que otras funciones, luego a las expresiones regulares mas largas antes que a las cortas, y luego al orden de definicion en el codigo.

por eso, `t_CNT_FLOAT` debe definirse antes que `t_CNT_INT`, ya que 3.14 podría ser interpretado incorrectamente como 3, . , 14 y daría un error por el punto.

Reglas Gramaticales

Estructura del Programa

Primero se define a la gramática que empieza al programa, esta es `program`

Implementación

```
def p_program(p):
    """program : PROGRAM ID SEMI_COLON vars func_list MAIN body END
                | PROGRAM ID SEMI_COLON func_list MAIN body END
                | PROGRAM ID SEMI_COLON vars MAIN body END
                | PROGRAM ID SEMI_COLON MAIN body END"""

    if len(p) == 9:
        p[0] = ('program', p[2], p[4], p[5], p[7])
    elif len(p) == 8:
        if isinstance(p[4], tuple) and p[4][0] == 'vars':
            p[0] = ('program', p[2], p[4], [], p[6])
        elif isinstance(p[4], list):
            p[0] = ('program', p[2], None, p[4], p[6])
        else:
            p[0] = ('program', p[2], None, [], p[5])
    else:
        p[0] = ('program', p[2], None, [], p[5])
```

Variables

```
<VARS> → var <var_list>
<var_list> → <id_list> : <type> ; <var_list'>
<var_list'> → <var_list> | ε
<id_list> → id <id_list'>
<id_list'> → , <id_list> | ε
<type> → int | float
```

Permite declarar múltiples variables del mismo tipo y declaraciones consecutivas.

Expresiones Aritmeticas

$$\begin{aligned} \langle \text{EXP} \rangle &\rightarrow \langle \text{EXP} \rangle + \langle \text{TERMINO} \rangle \\ &| \langle \text{EXP} \rangle - \langle \text{TERMINO} \rangle \\ &| \langle \text{TERMINO} \rangle \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} \langle \text{TERMINO} \rangle &\rightarrow \langle \text{TERMINO} \rangle * \langle \text{FACTOR} \rangle \\ &| \langle \text{TERMINO} \rangle / \langle \text{FACTOR} \rangle \\ &| \langle \text{FACTOR} \rangle \end{aligned}$$
$$\begin{aligned} \langle \text{FACTOR} \rangle &\rightarrow (\langle \text{EXPRESION} \rangle) \\ &| + \text{id} \mid + \langle \text{CTE} \rangle \\ &| - \text{id} \mid - \langle \text{CTE} \rangle \\ &| \text{id} \\ &| \langle \text{CTE} \rangle \end{aligned}$$
$$\langle \text{CTE} \rangle \rightarrow \text{cte_int} \mid \text{cte_float}$$

Precedencia de operadores

1. $+$, $-$ (suma, resta)
2. $*$, $/$ (multiplicacion, division)
3. Operadores unarios $+$, $-$
4. Parentesis ()

Expresiones

$$\begin{aligned} \langle \text{EXPRESION} \rangle &\rightarrow \langle \text{EXP} \rangle \langle \text{EXPRESION}' \rangle \\ \langle \text{EXPRESION}' \rangle &\rightarrow > \langle \text{EXP} \rangle \\ &| < \langle \text{EXP} \rangle \\ &| != \langle \text{EXP} \rangle \\ &| \varepsilon \end{aligned}$$

Condiciones y ciclos

Condicional

$$\begin{aligned} \langle \text{CONDITION} \rangle &\rightarrow \text{if} (\langle \text{EXPRESION} \rangle) \langle \text{Body} \rangle ; \\ &| \text{if} (\langle \text{EXPRESION} \rangle) \langle \text{Body} \rangle \text{ else } \langle \text{Body} \rangle ; \end{aligned}$$

Ciclo

<CYCLE> → while (<EXPRESION>) do <Body> ;

Funciones

<FUNCS> → void id (<param_list>) [[<VAR>] <Body>] ; <func_list'>

<func_list'> → <FUNCS> | ε

<param_list> → id : <type> <param_list'>

<param_list'> → , <param_list> | ε

Se permiten definiciones de variables locales

Statements

<Body> → { <statement_list> }
| { }

<statement_list> → <statement> <statement_list'>

<statement_list'> → <statement_list> | ε

<statement> → <assign>
| <condition>
| <cycle>
| <f_call>
| <print_stmt>

<assign> → id = <EXPRESION> ;

<f_call> → id ([<expression_list>]) ;

<print_stmt> → print (<print_expression_list>) ;

<print_expression_list> → (<expression> | cte_string) <print_list'>

<print_list'> → , <print_expression_list> | ε

Plan de Pruebas y Casos de Prueba

Analisis Lexivo

Se creo un archivo de python donde se incluyo un string y un print que arroja a los tokens detectados, la linea donde se encontro y su valor, corrio de manera exitosa y sin errores, todos los tokens fueron

detectadis correctamente.

Casos de Prueba del Analisis Sintactico

Test 1: Programa Minimo

Se debe de verificar la estructura basica de un programa.

Entrada:

```
program test1;  
main {  
}  
end
```

AST Esperado:

```
('program', 'test1', None, [], ('body', []))
```

Test 2: Programa con Variables

Se debe de validar declaracion de variables globales.

Entrada:

```
program test2;  
var  
    x : int;  
    y, z : float;  
main {  
}  
end
```

AST Esperado:

```
('program', 'test2',  
  ('vars', [  
    ('var_declaration', ['x'], 'int'),  
    ('var_declaration', ['y', 'z'], 'float')  
  ]),  
  [],  
  ('body', []))  
)
```

Test 3: Expresiones Aritmeticas

Se debe de verificar precedencia y asociatividad de operadores.

Entrada:

```
program test3;
var
    x, y, z : int;
main {
    x = 5 + 3;
    y = x * 2;
    z = (x + y) / 2;
}
end
```

AST Esperado (fragmento de **z**):

```
('assign', 'z',
  ('/', ('+', 'x', 'y'), 2)
)
```

Test 4: Condicional If Simple

Se debe de validar estructura if sin else.

Entrada:

```
program test4;
var
    x : int;
main {
    x = 10;
    if (x > 5) {
        x = x + 1;
    };
}
end
```

AST Esperado:

```
('if',
  ('>', 'x', 5),          # condicion
```

```
    ('body', [                                # then
      ('assign', 'x', ('+', 'x', 1))
    ]),
    None                                     # sin else
  )
```

Test 5: Condicional If-Else

Se debe de validar estructura if-else completa.

Entrada:

```
program test5;
var
    x : int;
main {
    x = 3;
    if (x > 5) {
        x = 10;
    } else {
        x = 0;
    };
}
end
```

Test 6: Ciclo While

Se debe de verificar estructura de ciclos.

Entrada:

```
program test6;
var
    x : int;
main {
    x = 0;
    while (x < 10) do {
        x = x + 1;
    };
}
end
```

AST Esperado:

```

('while',
  ('<', 'x', 10),          # condicion
  ('body', [               # cuerpo del ciclo
    ('assign', 'x', ('+', 'x', 1))
  ])
)

```

Test 7: Function Print

Se debe de validar impresion de expresiones y strings.

Entrada:

```

program test7;
var
    x : int;
main {
    x = 42;
    print(x);
    print("El valor es:", x);
}
end

```

AST Esperado:

```

('print', ['x'])
('print', ['El valor es:', 'x'])

```

Test 8: Declaracion de Funciones

Se debe de verificar sintaxis de funciones con parametros y variables locales.

Entrada:

```

program test8;
void myFunc(a : int, b : int) [
    var
        result : int;
    {
        result = a + b;
    }
];

```

```
main {  
}  
end
```

AST Esperado:

```
('func', 'myFunc',  
  [('a', 'int'), ('b', 'int')], # parametros  
  ('vars', [  
    ('var_declaration', ['result'], 'int')  
  ]),  
  ('body', [  
    ('assign', 'result', ('+', 'a', 'b'))  
  ])  
)
```

Test 9: Programa Completo

Se debe de validar integracion de todas las características del lenguaje.

Entrada:

```
program completo;  
var  
    x, y : int;  
    z : float;  
  
void calcular(a : int, b : int) [  
    var  
        resultado : int;  
    {  
        resultado = a + b;  
    }  
];  
  
main {  
    x = 10;  
    y = 20;  
    z = 3.14;  
  
    if (x < y) {  
        print("x es menor que y");  
    } else {
```

```
        print("x es mayor o igual que y");
    };

    while (x < 100) do {
        x = x + 1;
    };

    calcular(x, y);
}
end
```

Casos de Prueba de Errores Sintacticos

Error 1: Falta Punto y Coma

Entrada:

```
program test1
var
    x : int;
main {
}
end
```

Salida:

Syntax error at token VAR ('var') on line 2

Error 2: Falta Dos Puntos en Declaracion

Entrada:

```
program test2;
var
    x int;
main {
}
end
```

Salida:

Syntax error at token INT ('int') on line 3

Error 3: Falta Punto y Coma en Asignacion

Entrada:

```
program test3;  
var  
    x : int;  
main {  
    x = 5  
}  
end
```

Salida:

Syntax error at token R_CBRACKET (}') on line 6

Error 4: Parentesis Sin Cerrar**Entrada:**

```
program test4;  
var  
    x : int;  
main {  
    if (x > 5 {  
        x = 10;  
    };  
}  
end
```

Salida:

Syntax error at token L_CBRACKET ('{') on line 5

Error 5: Falta Palabra Clave 'end'**Entrada:**

```
program test5;  
main {  
    x = 5;  
}
```

Salida:

Syntax error: Unexpected end of file (EOF)

Analisis semantico

semantic_cube.py - Cubo semantico

El cubo semantico es una estructura de datos que define las reglas de compatibilidad de tipos para todas las operaciones del lenguaje. Proporciona validacion de operaciones binarias mediante consultas de tipos.

En mi caso lo implemente con un diccionario de tres niveles donde se consulta mediante la estructura `cubo[operador][tipo_izquierdo][tipo_derecho]` para obtener el tipo resultante, los tipos soportados son `int` y `float`, y el resultado puede ser uno de estos tipos o `None` si la operacion es invalida.

Operadores y Reglas de Tipo

Los operadores se organizan en cuatro categorias: aritmeticos (suma, resta, multiplicacion), division especial, relacionales, y asignacion.

Para operadores aritmeticos de suma, resta y multiplicacion, las reglas son que `int` operado con `int` produce `int`, `int` con `float` produce `float`, `float` con `int` produce `float`, y `float` con `float` produce `float`. Esto nos permite realizar operaciones entre `ints` y `floats`, y realizar conversiones de `int` a `float` de ser necesario, para la division, todas las combinaciones producen `float`, los operadores relacionales `mayor que`, `menor que` y `diferente a`, todas las combinaciones de operandos producen `int` que representa un valor booleano (0 u 1), la asignacion, valida compatibilidad permitiendo asignacion de `int` a `float` con promocion implicita, pero `int` no puede recibir `float` directamente.

Metodos Principales

El cubo semantico proporciona dos metodos principales:

- El metodo `get_result_type` recibe un operador y dos tipos de operandos, y arroja el tipo resultante o `None` si la operacion es invalida
- El metodo `is_valid_operation` verifica si una operacion es valida sin la necesidad de consultar el tipo especifico

Analizador semantico

El analizador semantico usa al cubo semantico con las estructuras de datos para realizar validacion semantica del programa durante el parseo. Contiene referencias al directorio de funciones, la funcion actual siendo analizada, y una lista con los errores encontrados.

Puntos Neuralgicos - Inicializacion y Funciones

El punto neuralgico np_start_program corre cuando se reconoce la declaracion del programa (program ID;) e inicializa el analisis estableciendo el nombre del programa.

El punto neuralgico np_start_function corre cuando comienza la declaracion de una funcion verificando que no este doblemente declarada, creandola en el directorio, y estableciendo que todos los elementos siguientes pertenecen a esa funcion hasta que termine.

El punto neuralgico np_end_function corre cuando finaliza la declaracion de una funcion y arroja el ambito al global.

El punto neuralgico np_add_parameter se ejecuta para cada parametro en la lista de parametros validando que no este doblemente declarado y agregandolo como variable local de la funcion.

Puntos Neuralgicos - Variables

El punto neuralgico np_declare_variable se ejecuta al reconocer una declaracion de variable (ID : type;). Valida que la variable no este doblemente declarada en el ambito actual y la agrega a la tabla global si es variable global, o a la tabla local de la funcion actual si es local.

El punto neuralgico np_check_variable se ejecuta cuando se usa una variable en una expresion, busca la variable en el scope actual implementando la regla que las variables locales ocultan las globales, luego arroja al tipo de la variable si existe.

Puntos Neuralgicos - Operaciones

El punto neuralgico np_check_operation corre cuando se completa una operacion binaria, consulta el cubo semantico para obtener el tipo resultante y registra un error si la operacion no es valida, el tipo resultante se almacena para su uso.

El punto neuralgico np_check_assignment corre cuando se completa una asignacion (ID = expression;), este verifica que la variable exista, obtiene su tipo, consulta el cubo semantico con el operador = para validar que el tipo de la expresion sea compatible con el tipo de la variable, y registra error si no lo es.

Puntos Neuralgicos - Llamadas a Funcion

El punto neuralgico np_start_function_call corre cuando comienza una llamada a funcion verificando que la funcion este declarada y obteniendo su informacion.

El punto neuralgico np_check_function_call corre al completar una llamada a funcion, valida que el numero de argumentos sea correcto, que cada tipo de argumento sea compatible con el tipo del parametro correspondiente, y registra errores especificos indicando cual argumento es incompatible.

Helpers

El metodo `get_literal_type` determina si un valor es entero o flotante basandose en el tipo de Python, el metodo `print_symbol_tables` imprime todas las tablas de simbolos tanto globales como de cada funcion para debugging, por ultimo, el metodo `reset` reinicia el analizador para evitar interferencias con programas anteriores.

Estructuras de Datos para Analisis semantico

FunctionDirectory

Lo implemente usando un diccionario ya que permite acceso rapido a las funciones por nombre y acceso directo a la tabla global, el diccionario se compone de funciones mapeadas por nombre, una referencia a la funcion siendo analizada, y una tabla de variables globales.

Las operaciones principales son `add_function` para agregar una funcion verificando no este duplicada, `get_function` para obtener una funcion por nombre, `function_exists` para verificacion rapida, `set_current_function` para cambiar el ambito actual, `add_global_variable` y `add_local_variable` para declarar variables en el ambito apropiado, y `lookup_variable` para buscar variables implementando por scope, verificando primero a las locales y luego a las globales.

VariableTable

La implemente con un diccionario debio a que permite busquedas or nombre rapidas, insercion rapida e iteracion eficiente, este diccionario mapea nombres de variables a objetos Variable.

Las operaciones principales son `add_variable` que agrega una variable verificando no exista dos veces, `get_variable` que busca una variable por nombre, `variable_exists` para verificacion rapida, y `get_all_variables` para obtener la lista completa cuando se necesita.

Variable

Contiene el nombre de la variable, su tipo, y el scope donde fue declarada

Function

Contiene el nombre de la funcion, su tipo de retorno , una lista de parametros con sus tipos, una tabla de variables para las variables locales, y un campo `start_address` para generacion de codigo.

Las funciones principales son `add_parameter` que agrega un parametro como variable local, `add_local_variable` para agregar variables locales, `get_variable` para busqueda de variables locales, y `get_parameter_types` para obtener la lista de tipos de parametros en orden.

Integracion de Analisis semantico

El analisis semantico se integra en el parser yacc.py donde cada regla gramatical invoca los puntos neuralgicos del analizador semantico, cuando el parser reconoce un token o completa una regla, ejecuta el punto neuralgico correspondiente que valida la semantica y actualiza las estructuras de datos, por ejemplo, cuando se parsea una declaracion de variable, yacc.py llama a np_declare_variable para validar y registrar la variable.

El analizador junta todos los errores encontrados sin parar el parseo, lo que permite mostrar multiples errores en una sola ejecucion, lo que facilita el debugging.

Las tablas de simbolos se construyen durante el analisis, cuando se termina el parseo completo, se puede consultar el directorio de funciones para obtener informacion sobre todas las funciones y variables del programa, asi como la lista de errores encontrados.