

Resumen: Paradigmas de Lenguajes de Programación

Zamboni, Gianfranco

1 de febrero de 2018

Índice

1. Introducción	1
1.1. Aspectos del lenguaje	1
1.1.1. Semántica	1
1.2. Paradigmas	1
1.2.1. Paradigma Imperativo	1
1.2.2. Paradigma Funcional	2
1.2.3. Paradigma Lógico	2
1.2.4. Paradigma Orientado a Objetos	2
2. Paradigma Funcional	3
2.1. Tipos	3
2.1.1. Notación	3
2.1.2. Propiedades deseables de un lenguaje funcional	3
2.2. Tipo Función	4
2.2.1. Evaluación	4
2.3. Inducción/Recursion	5
2.3.1. Inducción estructural	5
2.3.2. Funciones recursivas	5
2.3.3. Principio de inducción	5
2.4. Parametrización	5
2.5. Tipos algebraicos	5
2.5.1. Definición de tipos	5
2.5.2. Tipos algebraicos en Haskell	6
2.5.3. Pattern Matching	6
2.5.4. Tipos especiales	6
2.5.5. Expresividad	6
2.5.6. Clases de tipos algebraicos	7
2.6. Tipos algebraicos recursivos	7
2.7. Esquemas de recursión	7
2.7.1. La función fold y como definirla	9
3. Programación funcional en Haskell - Práctica	10

1. Introducción

Paradigma Marco filosófico y teórico de una escuela científica o disciplina en la que se formulan teorías, leyes y generalizaciones y se llevan a cabo experimentos que les dan sustento.

Lenguaje de programación Es un lenguaje usado para comunicar instrucciones a una computadora. Estas instrucciones describen cálculos que llevará a cabo la computadora.

Un lenguaje de programación es computacionalmente completo si puede expresar todas las funciones computables.

Paradigma de lenguaje de programación Marco filosófico y teórico en el que se formulan soluciones a problemas de naturaleza algorítmica. Lo entendemos como un estilo de programación en el que se escriben soluciones a problemas en términos de algoritmos.

Su ingrediente básico es el modelo de cómputo que es la visión que tiene el usuario de cómo se ejecutan sus programas.

1.1. Aspectos del lenguaje

Sintaxis Descripción del conjunto de secuencias de símbolos considerados como programas válidos.

1.1.1. Semántica

Descripción del significado de instrucciones y expresiones puede ser informal (e.g. Castellano) o formal (basado en técnicas matemáticas).

Semántica operacional Un programa es un mecanismo que dado un elemento del conjunto de partida, sigue una sucesión de pasos para calcular el elemento correspondiente del conjunto de llegada.

Semántica axiomática Interpreta a un programa como un conjunto de propiedades verdaderas que indican los estados que puede llegar a tomar.

Semántica denotacional Un programa es un valor matemático (función) que relaciona cada elemento de un conjunto de partida (expresiones que lo componen) con un único elemento de otro conjunto de llegada (significado de las expresiones).

Sistema de tipo Es una herramienta que nos permite analizar código para prevenir errores comunes en tiempo de ejecución (e.g. evitar sumar booleanos, aplicar función a número incorrecto de argumentos, etc). En general, requiere anotaciones de tipo en el código fuente.

Además sirve para que la especificación de un programa sea más clara.

Hay dos tipos de análisis de tipos:

- **Estático:** Análisis de tipos en tiempo de compilación.
- **Dinámico:** Análisis de tipos en tiempo de ejecución.

1.2. Paradigmas

1.2.1. Paradigma Imperativo

Estado global Se usan variables que representan celdas de memoria en distintos momentos del tiempo. En ellas vamos almacenando resultados intermedios del problema.

Asignación Es la acción que modifica las celdas de memoria

Control de flujo Es la forma que tenemos de controlar el orden y la cantidad de veces que se repite un cómputo dentro del programa. En este paradigma, la repetición de cálculos se basa en la iteración.

Por lo general, los lenguajes de este paradigma son eficientes ya que el modelo de ejecución usado y la arquitectura de las computadoras (a nivel procesador) son parecidos. Sin embargo, el bajo nivel de abstracción que nos proveen hacen que, por lo general, la implementación de un problema sea difícil de entender.

1.2.2. Paradigma Funcional

No tiene un estado global. Un cómputo se expresa a través de la aplicación y composición de funciones y los resultados intermedios (salida de las funciones) son pasados directamente a otras funciones como argumentos. Todas las expresiones de este paradigma son tipadas y usa la recursión para repetir cálculos.

Ofrece un alto nivel de abstracción, es declarativo, usa una matemática elegante y se puede usar razonamiento algebraico para demostrar correctitud de programas.

1.2.3. Paradigma Lógico

Los programas son predicados de la lógica proposicional y la computación está expresada a través de proof search. No existe un estado global y los resultados intermedios son pasados por unificación. La repetición se basa en la recursión.

Ofrece un alto nivel de abstracción, es muy declarativo y, al ser predicados, tiene fundamentos lógicos robustos pero su ejecución es muy lenta.

1.2.4. Paradigma Orientado a Objetos

La computación se realiza a través del intercambio de mensajes entre objetos. Tiene dos enfoques: basados en clases o basados en prototipos.

Ofrece alto nivel de abstracción y arquitecturas extensibles pero usa una matemática de programas compleja.

2. Paradigma Funcional

Los dos aspectos fundamentales de la programación son:

- Transformación de la información.
- Interacción con el medio (cargar datos, interfaces gráficas, etc).

La programación funcional se concentra en el primer aspecto.

Valor Entidad matemática abstracta con ciertas propiedades.

Expresión Secuencia de símbolos utilizada para denotar un valor. Hay dos tipos de expresiones:

- **Atómicas ó formas formales:** Son las expresiones más simples y denotan un valor.
- **Compuestas:** Expresiones que se construyen combinando otras expresiones.

Puede haber expresiones incorrectas (mal formadas) debido a errores sintácticos (expresiones mal escritas) o a errores de tipo (expresiones que denotan operaciones sobre tipos incorrectos).

En funcional, computar significa tomar una expresión y reducirla hasta que sea atómica.

Transparencia referencial El valor que denota una expresión solo depende de los símbolos que la constituyen. Esto nos permite indicar. Esto nos permite hacer uso de un programa sin considerar la necesidad de considerar los detalles de su ejecución y nos permite demostrar propiedades usando las propiedades de las subexpresiones y métodos de deducción lógica.

2.1. Tipos

Son una forma de particionar el universo de valores de acuerdo a ciertas propiedades. Hay:

- **Tipos básicos** (Int, Bool, Float) ó primitivos que son los que ya vienen definidos en el lenguaje por literales y representan valores
- **Tipos compuestos** (pares, listas) que son aquellos que se definen a partir de otros tipos.

Cada tipo de dato tiene asociado operaciones que no tienen significado para otros tipos.

A toda expresión bien formada se le puede asignar un tipo que sólo depende los componentes de la expresión (strong-typing). Dada una expresión, se puede deducir su tipo a partir de su constitución.

2.1.1. Notación

$e :: A$

se lee “la expresión e tiene tipo A ” y significa que el valor denotado por e pertenece al conjunto de valores denotado por A .

2.1.2. Propiedades deseables de un lenguaje funcional

Se busca que un lenguaje le asigne un tipo de manera automática al mayor número posible de expresiones con sentido y que no le asigne ningún tipo al mayor número posible de expresiones mal formadas. Además, se busca que el tipo de la expresión se mantenga si es reducida.

Otra cosa a tener en cuenta, es que los tipos ofrecidos por el lenguaje deben ser descriptivos y razonablemente sencillos de leer.

Inferencia de tipos Dada una expresión e determinar si tiene tipo o no y, si lo tiene, cuál es ese tipo según las reglas.

Chequeo de tipos Dada una expresión e y un tipo A , determinar si $e :: A$ o no.

2.2. Tipo Función

Un programa en el paradigma funcional es una función descrita por un conjunto de ecuaciones (expresiones) que definen uno o más valores. Estas ecuaciones son evaluadas (reducidas) hasta llegar a una expresión atómica que nos indique el valor de las mismas.

Funciones Las funciones son valores especiales que representan transformación de datos. En haskell el tipo de una función se escribe: \rightarrow . Las funciones se aplican a elementos de un conjunto de entrada definido por el tipo de entrada de la función y devuelve un elemento del tipo de salida.

Al ser valores, las funciones pueden ser argumentos y resultados de otras funciones, pueden almacenarse y pueden ser estructuras de datos.

Funciones de alto orden Son funciones que manipulan otras funciones.

Lenguaje Funcional Puro Lenguaje de expresiones con transparencia referencial y funciones como valores, cuyo modelo de cómputo es la reducción realizada mediante el reemplazo de iguales por iguales.

Polimorfismo paramétrico Cuando una función tiene un parámetro que puede ser instanciado de diferentes maneras en diferentes usos. Esta propiedad se da dentro de los sistemas de tipos.

Dada una expresión que puede ser tipada de infinitas maneras, el sistema puede asignarle un tipo que sea más general que todos ellos, y tal que en cada uso pueda transformarse en uno particular.

Hay funciones que a pesar de poseer polimorfismo paramétrico, no aceptan cualquier clase de tipo, sino que requieren que los tipos con las que son llamadas tengan ciertas propiedades. Por ejemplo, que tengan relaciones de igualdad (Eq), relación de orden (Ord), que se comporten como números (Num) o que puedan ser mostrados en pantalla (Show)

2.2.1. Evaluación

Por lo general, dependiendo del orden de evaluación del lenguaje, el tipo de evaluación se clasifica en:

Evaluación Estricta Si una parte de una expresión se indefine, entonces la expresión se indefine. La evaluación eager, en la que un lenguaje computa una expresión apenas es definida, es de este tipo.

Evaluación no Estricta Puede pasar que una expresión esté definida a pesar de que alguna de sus partes se haya indefinido. La evaluación lazy, en la que un lenguaje solo computa una expresión cuando de esta depende el valor de otra expresión, es de este tipo.

Haskell usa evaluación lazy de izquierda a derecha, resolviendo primero las partes más externas de la expresión y luego, si es necesario, sus partes.

Currificación Correspondencia entre cada función de múltiples parámetros y una de alto orden que retorna una función intermedia que completa el trabajo. Por cada f definida como:

```
f :: (a,b) -> c
f (x,y) = e
```

existe un función f' tal que se puede escribir:

```
f' :: a -> (b -> c)
(f' x) y = e
```

La currificación nos da mayor expresividad y la posibilidad de realizar evaluación parcial. Además, nos permite tratar el código de manera más modular al momento de inferir tipos y transformar programas.

Evaluación parcial Se evalúan las funciones parcialmente, lo que nos permite llamarlas con menos parámetros de los que necesitan. Esto nos devuelve una función con las expresiones asociadas a los valores pasados como parámetros y que toma como parámetros los parámetros faltantes de la función original.

2.3. Inducción/Recursion

La inducción es un mecanismo que nos permite definir conjuntos infinitos, probar propiedades sobre sus elementos y definir funciones recursivas sobre ellos con garantía de terminación.

Principio de extensionalidad: Dadas dos expresiones A y B , si A y B denotan el mismo valor, entonces A puede ser remplazada por B y B por A sin que esto afecte al resultado de una ecuación.

2.3.1. Inducción estructural

Una definición inductiva de un conjunto \mathcal{R} consiste en dar condiciones de dos tipos:

- reglas base ($z \in \mathcal{R}$) que afirman que algún elemento simple x pertenece a \mathcal{R}
- reglas inductivas ($y_1 \in \mathcal{R}, \dots, y_n \in \mathcal{R} \Rightarrow y \in \mathcal{R}$) que afirman que un elemento compuesto y pertenece a \mathcal{R} siempre que sus partes y_1, \dots, y_n pertenezcan a \mathcal{R} (e y no satisface otra regla de las dadas)

y pedir que \mathcal{R} sea el menor conjunto (en sentido de la inclusión) que satisfaga todas las reglas dadas.

2.3.2. Funciones recursivas

Sea S un conjunto inductivo, y T uno cualquiera. Una definición recursiva estructural de una función $f :: S \rightarrow T$ es una definición de la siguiente forma:

- Por cada elemento base z , el valor de $(f\ z)$ se da directamente usando valores previamente definidos
- Por cada elemento inductivo y , con partes inductivas y_1, \dots, y_n , el valor de $(f\ y)$ se da usando valores previamente definidos y los valores $(f\ y_1), \dots, (f\ y_n)$.

2.3.3. Principio de inducción

Sea S un conjunto inductivo, y sea P una propiedad sobre los elementos de S . Si se cumple que:

- para cada elemento $z \in S$ tal que z cumple con una regla base, $P(z)$ es verdadero, y
- para cada elemento $y \in S$ construido en una regla inductiva utilizando los elementos y_1, \dots, y_n , si $P(y_1), \dots, P(y_n)$ son verdaderos entonces $P(y)$ lo es

entonces $P(x)$ se cumple para todos los $x \in S$.

2.4. Parametrización

Dado un conjunto de funciones que se comportan de la misma manera buscamos encontrar alguna forma de crear una función que las genere automáticamente.

Esquema de funciones Dado un conjunto de funciones "parecidas", el esquema de estas funciones son los que no permiten parametrizar correctamente alguno de los parámetros.

La parametrización nos permitirá crear definiciones más concisas y modulares, reutilizar código y demostrar propiedades generales de manera más fácil.

2.5. Tipos algebraicos

2.5.1. Definición de tipos

Hay dos formas de definir un tipo de dato:

- **De manera algebraica:** Establecemos qué *forma* tendrá cada *elemento* y damos un mecanismo único para inspeccionar cada elemento.
- **De manera abstracta:** Determinamos cuales serán las *operaciones* que manipularán los elementos, **SIN** decir cuál será la forma exacta del tipo ni de las operaciones que definimos.

2.5.2. Tipos algebraicos en Haskell

Los definimos mediante **constantes** llamadas *constructores* cuyos nombres comienzan con mayúscula. Los constructores no tienen asociada una regla de reducción y pueden tener argumentos.

Para implementarlos en Haskell, usamos la cláusula **data** que introduce un nuevo tipo algebraico, los nombres de los constructores y sus argumentos.

Ejemplos:

```
data Sensacion = Frio | Calor
data Shape = Circle Float | Rect Float Float
```

Los tipos algebraicos pueden tener argumentos. Esto nos permite definir tipos que contienen al conjunto de elementos de otro tipo más los elementos del tipo que se están definiendo.

Ejemplo:

```
data Maybe = Nothing | Just a
```

Maybe tiene todos los elementos del tipo *a* con **Just** adelante más el elemento *Nothing*

Son considerados tipos algebraicos porque:

- toda combinación válida de constructores y valores es elemento del tipo algebraico (y solo ellas lo son)
- y porque dos elementos de un tipo algebraico son iguales si y solo si están contruidos utilizando los mismos constructores aplicados a los mismos valores.

Al principio de esta sección, dijimos que además de establecer la forma que tiene el tipo, debemos dar un mecanismo único de inspección. En Haskell, este mecanismo es el **Pattern Matching**.

2.5.3. Pattern Matching

El pattern matching es la búsqueda de patrones especiales (en nuestro caso, los constructores de nuestro tipo) dentro de una expresión en el lado izquierdo de una ecuación que, si tiene éxito, nos permita inspeccionar el valor de la misma.

Si el pattern matching resulta exitoso, entonces ligas las variables del patrón.

2.5.4. Tipos especiales

Tupla Este tipo es un tipo algebraico con sintaxis especial. Una tupla es una estructura que posee varios elementos de distintos tipos. Por ejemplo: `(Float,Int)` es una tupla cuyo primer elemento es un `Float` y tiene como segundo elemento a un `Int`.

Maybe El tipo *Maybe*, definido en el último ejemplo, nos permite expresar la posibilidad de que el resultado sea erróneo, sin necesidad de usar casos especiales. De esta forma, logramos evitar el uso de \perp hasta que el programador lo decida, permitiendo controlar errores.

Either El *Either* representa la unión disjunta de dos conjuntos (los elementos de uno se identifican con `Left` y los del otro con `Right`). Sirve para mantener el tipado fuerte y poder devolver elementos de distintos tipos o para representar el origen de un valor.

```
data Either = Left a | Right b
```

2.5.5. Expresividad

Los tipos algebraicos no pueden representar cualquier cosa, por ejemplo, los números racionales son pares de enteros (numerador, denominador) cuya igualdad puede no depender de los valores con los que fueron contruidos o incluso pueden llegar a no ser validos. Esto es así porque no todo par de enteros es un número racional, por ejemplo el $(1,0)$.

Además recordemos que la igualdad de dos elementos de un tipo algebraico solo se da si estos fueron contruidos exactamente de la misma forma. Si seguimos con el ejemplo de los racionales, sabemos que hay racionales iguales con distinto numerador y denominador como el (4,2) y el (2,1), sin embargo estos dos pares no podrian serr nunca iguales si fuesen tomados como un tipo algebraico.

2.5.6. Clases de tipos algebraicos

Enumerativos Solo constructores sin argumentos.

Productos Un único constructor con varios argumentos.

Sumas Varios constructores con argumentos.

Recursivos Utilizan el tipo definido como argumento.

2.6. Tipos algebraicos recursivos

Un tipo algebraico recursivo tiene al menos uno de los constructores con el tipo que se define como argumetno y es la concreción, en Haskell, de un conjunto definido inductivamente.

Cada constructor define un caso de una definición inductiva de un conjunto. Si tiene al tipo definido como argumento, entonces es un caso inductivo, si no, es un caso base.

En estos caso, el pattern matching nos da una forma de realizar analizar los casos y de acceder a los elementos inductivos que forman a un elemento dado. Por esta razón, se pueden definir funciones recursivas.

A estos tipos, les damos un significado a través de funciones definidas recursivamente. Estas funciones, manipulan simbolicamente al tipo. Sin embargo, estas manipulaciones por si solas no tienen un significado, sino que el significado se lo dan las propiedades que dichas manipulaciones deben cumplir.

Enteros Notación unaria para expresar tipos enteros.

```
data N = Z | S N
```

Listas Definición equivalente a las listas de haskell

```
data List a = Nil | Cons a (List a)
```

Árboles Un árbol es un tipo algebraico tal que al menos un elemento compuesto tiene dos componentes inductivas.

```
data Arbol a = Hoja a | Nodo a (Arbol a) (Arbol a)
```

Algunas de sus operaciones son:

```
hojas :: Arbol a -> Int -- Indica la cantidad de hojas del árbol
altura :: Arbol a -> Int -- Indica la altura del árbol
inOrder :: Arbol a -> [a] -- Convierte el arbola a una lista
preOrder :: Arbol a -> [a] -- Convierte el arbola a una lista
posOrder :: Arbol a -> [a] -- Convierte el arbola a una lista
```

2.7. Esquemas de recursión

Cuando tenemos un conjunto de funciones que manipulan ciertas estructuras de manera similar, podemos abstraer este comportamiento en funciones de alto orden que nos facilitarán su escritura.

A continuación, veremos unos ejemplos de esquemas sobre listas:

Map Dada una lista l , aplica una función f a cada elemento de l .

```
map :: (a -> b) -> [a] -> [b]
map _ [] = []
map f (x:xs) = (f x) : (map f xs)
```

Ejemplo:

```
doble x = x + x
dobleL = map doble
```

dobleL calcula el doble de cada elemento de una lista.

Filter Dada una lista l y un predicado p , selecciona todos los elementos de l que cumplen p .

```
filter :: (a -> Bool) -> [a] -> [a]
filter _ [] = []
filter p (x:xs) | (p x)      = x : (filter p xs)
                 | otherwise = filter p xs
```

Ejemplo

```
masQueCero = filter (>0)
```

masQueCero se queda con todos los elementos mayores de una lista

Fold La función *foldr* es la función que expresa el patrón de recursión estructural sobre listas como función de alto orden. Dada una lista l y una función f que denota un valor que depende de todos los elementos de la lista l y un valor inicial z , aplica y combina las soluciones parciales obtenidas por f de manera "iterativa". Hay dos tipos de fold: *foldr* (acumula desde la derecha) y *foldl* (acumula desde la izquierda).

Podemos definir *map* y *filter* con esta función

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
foldr _ z [] = z
foldr f z (x:xs) = f x (foldr f z xs)
```

```
foldl :: (a -> b) -> b -> [a] -> b
foldl _ z [] = z
foldl f z (x:xs) = foldl
```

Ejemplos

```
map f = foldr (\x rec -> (f x): rec) []
filter p = foldr (\x rec -> if (p x) then x:rec else rec) []
```

Recursión primitiva Recordemos de Lógica y Computabilidad: una función h es recursiva primitiva si h es de la forma:

$$h(x_1, \dots, x_n, 0) = f(x_1, \dots, x_n)$$
$$h(x_1, \dots, x_n, t + 1) = g(h(x_1, \dots, x_n, t), x_1, \dots, x_n, t)$$

Es decir, el caso recursivo de h no solo depende de la descomposición de sus parámetros, sino que, además, depende de sus parámetros.

En Haskell, podemos definir una función que dada una lista l , un caso base z y un caso recursivo primitivo f , aplique la definición de z y f a la lista:

```
recr :: b -> (a -> [a] -> b -> b) -> [a] -> b
recr z _ [] = z
recr z f (x:xs) = f x xs (recr z f xs)
```

En listas, este tipo de esquemas es difícil de ver. Como ejemplo, escribimos la función `insertar` de una lista con recursión primitiva:

```
-- Insert con pattern matching
insert :: a -> [a] -> [a]
insert x [] = [x]
insert x (y:ys) = if x<y then (x:y:ys) else (y:insert x ys)

-- Insert con recursión primitiva
insert x = recr [x] (\y ys zs -> if x<y then (x:y:ys)
                                else (y:zs))
```

En el segundo caso, `insert` es una función que agrega el elemento `x` a una lista `xs` que se le pase como parámetro.

Otros esquemas de recursión Los esquemas de recursión que nombramos, no son los únicos que existen y además, pueden ser definidos para otros tipos recursivos, no solo para listas.

2.7.1. La función `fold` y como definirla

Todo tipo algebraico tiene asociado un patrón de inducción estructural. En particular, dado un tipo algebraico recursivo `T`, podemos definir la función `foldrT :: * -> a` donde `*` son los parámetros de la función. A continuación damos algunas propiedades que debe cumplir para asegurarnos de la definimos correctamente:

- Por cada constructor recursivo debe tomar una función que tome como parámetros a cada elemento del constructor que no sea del tipo `T` y un parámetro de tipo `a` por cada elemento del tipo `T` del constructor. Esta función devuelve un elemento del tipo `a` y es la que resolverá recursivamente el caso planteado usando la segunda clase de parámetros.
- Por cada constructor base de `T` debe tomar un parámetro de tipo `a` que será el elemento devuelto por la función si cae en alguno de dichos casos.
- Por último, si la función está bien implementada, si reemplazamos cada parámetro por el constructor correspondiente que tiene asignado, la función resultante debería ser la función identidad del tipo `T`.

Al momento de definir `fold` ayuda mucho plantear el esquema de recursión del tipo.

3. Programación funcional en Haskell - Práctica

Tipos elementales

```
1           -- Int           Enteros
'a'        -- Char          Carácteres
1.2        -- Float         Números de punto flotante
True       -- Bool          Booleanos
[1,2,3]    -- [Int]         Listas
(1, True)  -- (Int, Bool)   Tuplas, pares
length     -- [a] -> Int    Funciones
length [1,2,3] -- Int      Expresiones
\x -> x    -- a -> a        Funciones anónimas
```

Guardas

```
signo n | n >= 0    = True
        | otherwise = False
```

Pattern Matching

```
longitud [] = 0
longitud (x:xs) = 1 + (longitud xs)
```

Polimorfismo paramétrico

```
todosIguales :: Eq a => [a] -> Bool
todosIguales [] = True
todosIguales [x] = True
todosIguales (x:y:xs) = x == y && todosIguales(y:xs)
```

Clases de tipo

```
Eq a    -- Tipos con comparación de igualdad
Num a   -- Tipos que se comportan como los números
Ord a   -- Tipos orden
Show a  -- Tipos que pueden ser representados como strings
```

Definición de listas

```
[1,2,3,4,5]           -- Por extensión
[1 .. 4]              -- Secuencias aritméticas
[ x | x <- [1..], esPar x ] -- Por compresión

-- Las listas pueden ser infinitas, solo hay que tener cuidado cuando
-- ↪ las usamos. Ejemplo de lista infinita:

infinitosUnos = 1 : infinitosUnos
```

Funciones de alto orden

```
mejorSegun :: (a -> a -> Bool) -> [a] -> a
mejorSegun _ [x] = x
mejorSegun f (x : xs) | f x (mejorSegun f xs) = x
                      | otherwise = mejorSegun f xs
```