

# Derivación de Programas Funcionales

Programación Avanzada

UNRC

Pablo Castro

# Derivación de Programas

La derivación de programas nos permite obtener programas correctos a partir de su especificación.

Técnicas:

- Inducción,
- Modularización,
- Cambiar constantes por variables,
- Tupling,
- Generalización

# Usando Inducción

La técnica de inducción se basa en las siguientes ideas:

- Para los casos bases reemplazamos en la especificación los parámetros con los valores de casos bases.
- Para el caso inductivo, trabajamos con la especificación utilizando como hipótesis que la función a definir funciona correctamente para los valores anteriores al actual.

# Cambiar Constantes por Variables

Consideramos que queremos calcular es siguiente número:

$$\langle \sum i : 0 \leq i \leq N : X^i \rangle$$

En vez de calcular el número directamente, podemos considerar la siguiente función:

$$\langle \forall n :: f.n = \langle \sum i : 0 \leq i < n : X^i \rangle \rangle$$

N una constante es cambiada por una variable,

# Derivando por Inducción

Vamos a derivar una función utilizando la especificación:

Caso Base:

$$f.0$$

$$= [\text{definición}]$$

$$\langle \sum i : 0 \leq i < 0 : X^i \rangle$$

$$= [\text{Rango vacío}]$$

$$0$$

Caso Inductivo:

$$f.(n + 1)$$

$$= [\text{definición}]$$

$$\langle \sum i : 0 \leq i < (n + 1) : X^i \rangle$$

$$= [\text{Aritmetica}]$$

$$\langle \sum i : 0 \leq i < n \vee n \leq i < n + 1 : X^i \rangle$$

$$= [\text{Aritmetica}]$$

$$\langle \sum i : 0 \leq i < n \vee i = n : X^i \rangle$$

$$= [\text{Partición de rango y rango único}]$$

$$\langle \sum i : 0 \leq i < n : X^i \rangle + X^n$$

$$= [\text{Inducción}]$$

$$f.n + X^n$$

# Modularizando

La función anterior queda:

$$f : \text{Num} \rightarrow \text{Num}$$
$$f.0 \doteq 0$$
$$f.(n + 1) \doteq f.n + X^n$$

Para calcular  $X^n$  podemos agregar una función local:

$$f : \text{Num} \rightarrow \text{Num}$$

$$f.0 = 0$$

$$f.(n + 1) = g.n + f.n$$

$$\llbracket g.i = X^i \rrbracket$$

Ejercicio: Derivar g

# Otra Derivación

Podemos derivar la función de otra forma:

$$\begin{aligned} & f.(n+1) \\ &= [\text{definición}] \\ & \langle \sum i : 0 \leq i < (n+1) : X^i \rangle \\ &= [\text{Aritmetica}] \\ & \langle \sum i : 0 \leq i < 1 \vee 1 \leq i < n+1 : X^i \rangle \\ &= [\text{Partición de rango y Rango único}] \\ & X^0 + \langle \sum i : 1 \leq i < (n+1) : X^i \rangle \\ &= [\text{Reemplazando i por j+1}] \\ & X^0 + \langle \sum j : 1 \leq j+1 < (n+1) : X^{j+1} \rangle \\ &= [\text{Aritmética}] \\ & X^0 + \langle \sum j : 1 \leq j+1 < (n+1) : X^j * X \rangle \\ &= [\text{Prop. Cuantificadores}] \\ & X^0 + X * \langle \sum j : 1 \leq j+1 < (n+1) : X^j \rangle \\ &= [\text{Aritmética}] \\ & X^0 + X * \langle \sum j : 0 \leq j < n : X^j \rangle \\ &= [\text{Inducción}] \\ & X^0 + X * f.n \end{aligned}$$

Hace menos  
multiplicaciones que  
antes

# Tupling

Muchas veces podemos usar tuplas para hacer más eficientes los programas:

$fib : Num \rightarrow Num$

$fib.0 = 0$

$fib.1 = 1$

$fib.(n + 2) = fib.(n + 1) + fib.n$



Función fibonacci

Esta definición de fibonacci toma tiempo exponencial.

# Mejorando la Eficiencia

Podemos calcular la siguiente función:

$$\begin{aligned} g &: \text{Num} \rightarrow (\text{Num}, \text{Num}) \\ g.n &= (\text{fib}.n, \text{fib}.(n + 1)) \end{aligned}$$

Para el caso base:

$$\begin{aligned} g.0 & \\ &= [\text{Def}.g] \\ &\quad (\text{fib}.0, \text{fib}.1) \\ &= [\text{Def}.fib] \\ &\quad (0, 1) \end{aligned}$$

# Usando Tuplas

Veamos el caso inductivo:

Se recalcula  $\text{fib.}(n+1)$

$$\begin{aligned} &g.(n+1) \\ &= \text{Def. } g \\ &(\text{fib.}(n+1), \text{fib.}(n+2)) \\ &= \text{Def. fib} \\ &(\text{fib.}(n+1), \text{fib.}n + \text{fib.}(n+1)) \\ &= [\text{intro. de } a \text{ y } b] \\ &(\text{fib.}(n+1), \text{fib.}n + \text{fib.}(n+1)) \\ &\llbracket a = \text{fib.}n \\ &\quad b = \text{fib.}(n+1) \rrbracket \\ &= [\text{igualdad de pares}] \\ &(\text{fib.}(n+1), \text{fib.}n + \text{fib.}(n+1)) \\ &\llbracket (a, b) = (\text{fib.}n, \text{fib.}(n+1)) \rrbracket \\ &= [\text{reemplazo}] \\ &(b, a + b) \\ &\llbracket (a, b) = (\text{fib.}n, \text{fib.}(n+1)) \rrbracket \\ &= [\text{Inducción}] \\ &(b, a + b) \\ &\llbracket (a, b) = g.n \rrbracket \end{aligned}$$

# Usando Tuplas

La función queda:

$$f : \text{Num} \rightarrow \text{Num}$$

$$g.0 = (0, 1)$$

$$g.(n + 1) = (b, a + b)$$

$$\llbracket (a, b) = g.n \rrbracket$$

Definimos:

$$fib.n = (g.n).0$$

Esta función es lineal  
en cuanto a n

# Generalización

Cuando no se puede aplicar la hipótesis inductiva se puede cambiar la especificación:

$$\begin{aligned} [] \uparrow n &= [] \\ xs \uparrow 0 &= [] \\ (x \triangleright xs) \uparrow (n + 1) &= x \triangleright (xs \uparrow n) \end{aligned}$$

$$P: [Num] \rightarrow Num$$

$$P.xs = \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#xs : sum.(xs \uparrow i) \geq 0 \rangle$$

Tratar de derivar la especificación para el caso inductivo no es factible:

$$\begin{aligned} &P.(x \triangleright xs) \\ &= [def.P] \\ &\langle \forall i : 0 \leq i \leq \#x \triangleright xs : sum.((x \triangleright xs) \uparrow i) \geq 0 \rangle \\ &= [def.\#] \\ &\langle \forall i : 0 \leq i \leq 1 + xs : sum.((x \triangleright xs) \uparrow i) \geq 0 \rangle \\ &= [Part. de rango y logica] \\ &True \wedge \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#xs : x + sum.(xs \uparrow i) \geq 0 \rangle \end{aligned}$$

En este punto no se puede aplicar la hipótesis inductiva

# Generalización

Podemos generalizar la **especificación**:

$$Q : Num \rightarrow [Num] \rightarrow Bool$$
$$Q.n.xs = \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#xs : n + sum.(xs \uparrow i) \geq 0 \rangle$$

Esta función es más general que la original:

$$P.xs = Q.0.xs$$

Trataremos de derivar esta función.

# Generalización

Derivemos Q:

$$\begin{aligned} & Q.(x \triangleright xs) \\ &= [\text{Def. } Q] \\ & \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#(x \triangleright xs) : n + (\text{sum}.((x \triangleright xs) \uparrow (i + 1))) \geq 0 \rangle \\ &= [\text{Def. } \# \text{ y Def. } \uparrow] \\ & \langle \forall i : 0 \leq i \leq 1 + \#xs : n + (\text{sum}.(x \triangleright (xs \uparrow i))) \geq 0 \rangle \\ &= [\text{separacion de un termino, y def. sum}] \\ & n + x \geq 0 \wedge \langle \forall i : 0 \leq i \leq \#xs : n + x + (\text{sum}.((xs \uparrow i))) \geq 0 \rangle \\ &= [H.I] \\ & n + x \geq 0 \wedge Q.n + x.xs \end{aligned}$$

Es decir:

$$\begin{aligned} Q.n.[] &= n \geq 0 \\ Q.n.(x \triangleright xs) &= n \geq 0 \wedge Q.(n + x).xs \end{aligned}$$

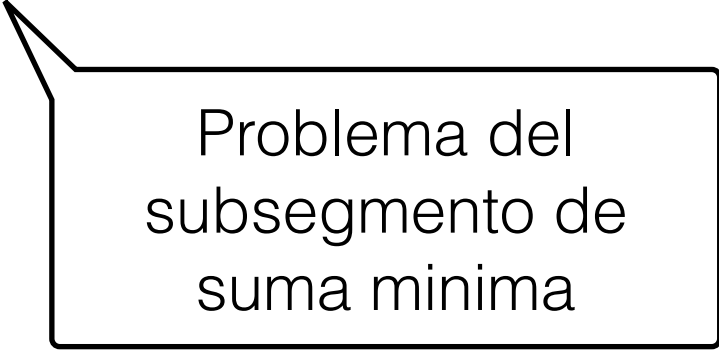
Entonces:  $P.xs = Q.0.xs$

# Ejemplos con Subsegmentos

Veamos un ejemplo con subsegmentos.

$$f : [Num] \mapsto Num$$

$$f.xs = \langle \text{Min } as, bs, cs : xs = as ++ bs ++ cs : sum.bs \rangle$$



Problema del  
subsegmento de  
suma minima

El caso base queda como ejercicio, y obtenemos:

$$f.[] = 0$$

# Problemas con Segmentos

Caso inductivo:

$$f.(x \triangleright xs)$$

Podemos introducir  
una función nueva  
para calcular esto

= [Partición con  $as = [] \vee as \neq []$  y prop. de listas]

$$\langle \text{Min } bs, cs : x \triangleright xs = bs ++ cs : \text{sum.bs} \rangle$$

$$\langle \text{Min } as, bs, cs : xs = as ++ bs ++ cs : \text{sum.bs} \rangle$$

Hipótesis inductiva

Introducimos:

$$g.xs = \langle \text{Min } bs, cs : xs = bs ++ cs : \text{sum.bs} \rangle$$

Calcula el la suma del subsegmento inicial con suma mínima

# Derivando g

$$\begin{aligned}
 &g.(x \triangleright xs) \\
 &= [\text{Partiendo rango } as = [] \vee as \neq [] \text{ y prop. listas}] \\
 &0 \min \langle \text{Min } bs, cs : xs = bs ++ cs : \text{sum.}(x \triangleright bs) \rangle \\
 &= [\text{dist. } + \text{ y Min}] \\
 &0 \min (x + \langle \text{Min } bs, cs : xs = bs ++ cs : \text{sum.bs} \rangle) \\
 &= [\text{Inducción}] \\
 &0 \min (x + g.xs)
 \end{aligned}$$

Es decir nos queda:

$$\begin{aligned}
 g : [Num] &\mapsto Num \\
 g.[] &\doteq 0 \\
 g.(x \triangleright xs) &\doteq 0 \min (x + g.xs)
 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}
 f : [Num] &\mapsto Num \\
 f.[] &\doteq 0 \\
 f.(x \triangleright xs) &\doteq (x + g.xs) \min f.xs
 \end{aligned}$$

# Mejorando la Solución

Podemos usar tupling para mejorar la solución:

$$h.xs = (f.xs, g.xs)$$

Caso base:

$$\begin{aligned} & h.[] \\ &= \{ \text{especificación de } h \} \\ & \quad (f.[], g.[]) \\ &= \{ \text{definición de } f \text{ y } g \} \\ & \quad (0,0) \end{aligned}$$

# Mejorando la Solución

Veamos el caso inductivo:

$$\begin{aligned} & h.(x \triangleright xs) \\ = & \{ \text{especificación de } h \} \\ & (f.(x \triangleright xs), g.(x \triangleright xs)) \\ = & \{ \text{definición de } f \text{ y } g \} \\ & ((x + g.xs) \min f.xs, 0 \min (x + g.xs)) \\ = & \{ \text{introducimos } a, b \} \\ & ((x + b) \min a, 0 \min (x + b)) \\ & \quad \llbracket (a, b) = (f.xs, g.xs) \rrbracket \\ = & \{ \text{hipótesis inductiva} \} \\ & ((x + b) \min a, 0 \min (x + b)) \\ & \quad \llbracket (a, b) = h.xs \rrbracket \end{aligned}$$

Nos queda:

$$\begin{aligned} h : [Num] &\mapsto (Num, Num) \\ h.[ ] &\doteq (0, 0) \\ h.(x \triangleright xs) &\doteq ((x + b) \min a, 0 \min (x + b)) \\ &\quad \llbracket (a, b) = h.xs \rrbracket \end{aligned}$$

Esta solución es lineal