

Grob: Programación funcional reactiva para robots con bajas capacidades de cómputo

Guillermo Pacheco

24 de mayo de 2015

Resumen

El proyecto consiste en la creación de un lenguaje de programación para robots, cuyas capacidades de cómputo son limitadas. Para esto se escogió el paradigma de Programación Funcional Reactiva (*FRP*) el cuál permite expresar naturalmente reacciones a valores que varían en función del tiempo.

El objetivo es utilizarlo con fines educativos, por lo tanto debe ser simple y fácil de usar por usuarios inexpertos y no familiarizados con la electrónica y la informática.

Para resolver el problema, se dividió en dos etapas.

La primera consiste en la implementación de un compilador que traduce el lenguaje cuyo nivel es alto a un lenguaje de bajo nivel (*Bytecode*) más simple e interpretable.

La segunda etapa consiste en implementar una máquina virtual, que sea capaz de interpretar el lenguaje de bajo nivel. Por cada plataforma objetivo, es posible realizar una implementación de la máquina, lo que permite ejecutar los mismos programas en alto nivel, en diferentes plataformas.

El lenguaje se implementará como un DSL embebido en Haskell.

El diseño de la máquina consiste de un núcleo común capaz de interpretar instrucciones, y módulos bien definidos de entrada/salida los cuáles varían de una plataforma a otra. Ésto permite mayor portabilidad y extensibilidad.

Debe ser posible ejecutar programas en dicho lenguaje dentro de plataformas de hardware reducido. Considerando ésto el lenguaje de programación elegido para la implementación de la máquina virtual es C/C++.

De ésta forma se implementación de un lenguaje reactivo con las características deseadas, y una implementación modelo de una máquina virtual que permite su ejecución en una arquitectura objetivo deseada. La misma es fácil de mantener, portable y cuenta con suficiente flexibilidad para ser extendida.

Índice general

Resumen	3
Índice general	5
Índice de figuras	7
Índice de tablas	9
1. Introducción	11
2. Programación Funcional Reactiva	13
2.1. Programación Funcional Reactiva	13
2.2. Ejemplo	14
3. Diseño	17
3.1. Lenguaje de alto nivel	17
3.1.1. Combinadores de FRP	17
3.1.2. Sintaxis	18
3.1.3. Ejemplo	19
3.2. Lenguaje de bajo nivel	20
3.2.1. Instrucciones	21
3.2.2. Traducción de alto nivel a bajo nivel	25
4. Implementación	27
4.1. Compilador	27
4.2. Máquina virtual	27
5. Casos de estudio	29
5.1. Problema	29
5.2. Solución	29
5.3. Conclusiones del caso	31

6. Conclusiones	33
6.1. Trabajo futuro	33
Bibliografía	35
Apéndices	37

Índice de figuras

5.1. Diagrama del caso de estudio	30
---------------------------------------------	----

Índice de cuadros

Capítulo 1

Introducción

Este documento desarrolla el proceso de construcción de herramientas que permitan programar robots utilizando el paradigma de programación funcional reactiva.

Para ello se define el lenguaje Grob de alto nivel, que permite expresar los comportamientos de un robot y sus interacciones. El lenguaje permite expresar los mismos en base a *Eventos* y relaciones entre ellos, que permiten capturar la naturaleza reactiva del dominio.

Éste lenguaje fue construido con fines académicos y de investigación, uno de los objetivos es que sea simple de utilizar e intuitivo.

Otro objetivo planteado es que debe ser posible programar con él sistemas robóticos embebidos en plataformas de hardware de baja capacidad de cómputo, y en lo posible bajo costo.

En los siguientes capítulos se introduce el concepto de programación funcional reactiva, junto con sus variantes y algunos ejemplos. Luego de decidir cuál de éstas variantes es más útil en nuestro dominio, se muestra la definición del lenguaje Grob y cuál es el proceso desde que se escribe un programa hasta que es ejecutado dentro de una plataforma.

Para cumplir con el objetivo de que la implementación sea portable, se separó la misma en dos fases. Los programas son compilados a código de menor abstracción, el cuál es ejecutado por una máquina virtual que definiremos. La misma puede ser portada a distintas plataformas.

Para finalizar se trata un caso de estudio completo, en el que se implementa un desafío robótico utilizado en la competencia SumoUY.

Capítulo 2

Programación Funcional Reactiva

2.1. Programación Funcional Reactiva

Tradicionalmente los programas son formados a partir de una secuencia de acciones imperativas. Los programas reactivos suelen formarse por eventos y código iterativo que se corre cuando un evento ocurre.

Dicho código iterativo suele hacer referencia y manipular variables compartidas con diferentes rutinas. Ésto lleva a que como un valor puede ser manipulado desde diferentes lugares, puedan producirse problemas de concurrencia y algunos valores pueden quedar en un estado inconsistente.

En el paradigma FRP no existen valores compartidos, sino que dichos valores dependientes del tiempo, tienen una representación llamada Comportamiento y la única forma de modificarlos, es a partir de como fueron definidos.

Definición 1. *Programa reactivo.*

Es aquel que interactúa con el ambiente, intercalando entradas y salidas dependientes del tiempo. Por ejemplo un reproductor de música, video juegos o controladores robóticos.

Difiere de los programas transformacionales los cuáles toman una entrada al inicio de la ejecución y producen una salida completa al final. Por ejemplo un compilador.

Definición 2. *Comportamientos (Behaviours).*

Un comportamiento es un valor continuo que depende del paso del tiempo. Los comportamientos se pueden definir, combinar, pasarlos como argumentos a funciones, retornarlos. Un comportamiento puede ser un valor constante,

el tiempo mismo (un reloj), o puede formarse combinando otros comportamientos, por ejemplo secuencialmente o paralelamente.

Definición 3. *Eventos (Streams).*

Son valores discretos dependientes del tiempo, que forman una secuencia finita o infinita de ocurrencias. Cada ocurrencia está formada por el valor y el instante de tiempo.

La principal diferencia entre Comportamientos y Eventos, es que los comportamientos son valores continuos y los eventos son discretos.

Los comportamientos representan cualquier valor en función del tiempo, por ejemplo:

- *entrada* sensor de distancia, temperatura, video
- *salida* velocidad, voltaje
- *valores* intermedios calculados

Las operaciones que se pueden realizar sobre los comportamientos incluyen:

- *Operaciones genéricas* Aritmética, integración, diferenciación
- *Operaciones específicas de un dominio* como escalar video, aplicar filtros, detección de patrones.

Los eventos pueden ser sensores específicos de un dominio, por ejemplo un botón, un click, una interrupción o mensaje asíncronico. También puede ser generado a partir de valores de un comportamiento, como ser *Temperatura alta*, *Batería baja*.

Las operaciones que se pueden realizar sobre los eventos incluyen:

- `fmap`, `filter`
- Modificar un *Comportamiento* reactivo

2.2. Ejemplo

Para entender un poco más las ideas de Comportamiento y Evento, se puede plantear el siguiente ejemplo.

En una cuenta de un banco, el saldo se puede definir como un comportamiento, el cuál solo se modifica cuando ocurre un movimiento. Un movimiento puede ser depositar dinero o extraer dinero de la cuenta. Un dato importante

a ver, es que no es posible asignar un valor sin que sea por medio de su propia definición, por lo que nadie podría realizar la asignación *saldo* = 1000000. La misma operación sería posible creando un movimiento, el cuál afectaría al saldo.

Usaremos la notación `<nombre>:: Event <tipo>` para definir fuentes de eventos. Asumo conocida la fuente de eventos *movimientos* que por cada movimiento emite su valor.

```
movimientos :: Event Number
```

Ahora puedo expresar el saldo a partir de los mismos, y construir un programa que muestre el saldo.

```
main = let saldos = (foldlE (+) SALDO_INICIAL movimientos) in
        mapE show saldos
```

En el ejemplo se ve que es imposible asignar un valor al saldo, éste se compone a partir del `SALDO_INICIAL` y la suma de los movimientos (positivos o negativos).

TODO: Mejorar esta sección explicando: Signal y SF (Signal Functions), Arrows, Behaviours y Event, Event, time leaks.

Leer y citar [1] y también este otro [2] y [3].

Capítulo 3

Diseño

En esta seccion se describe el diseño del lenguaje, su semántica, así como el diseño del lenguaje de bajo nivel, y cómo es interpretado.

3.1. Lenguaje de alto nivel

3.1.1. Combinadores de FRP

La función `lift` combina una función y un valor dependiente del tiempo, y crea un nuevo valor dependiente del tiempo, es decir, aplica una función que transforma una señal en otra:

$$\text{lift} :: (a \rightarrow b) \rightarrow \text{Signal } a \rightarrow \text{Signal } b$$

Para combinar señales, se utiliza la función `lift2` que recibe dos señales y produce una nueva aplicando una función.

$$\text{lift2} :: (a \rightarrow b \rightarrow c) \rightarrow \text{Signal } a \rightarrow \text{Signal } b \rightarrow \text{Signal } c$$

Utilizando `lift2` se pueden definir funciones `liftN` combinándola sucesivas veces, por ejemplo:

$$\begin{aligned} \text{lift3} &:: (a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d) \rightarrow \text{Signal } a \rightarrow \text{Signal } b \rightarrow \text{Signal } c \rightarrow \text{Signal } d \\ \text{lift3 } f \text{ } sa \text{ } sb \text{ } sc &= \text{lift2 } ((\text{lift2 } f \text{ } sa \text{ } sb) \text{ } sc) \end{aligned}$$

Para crear señales que no solo dependen de otra señal, sino que dependen de ella y además de su historia, se define otro combinador `foldE` que cuando recibe los valores de la señal, los combina y acumula. Éste combinador es

análogo a la operación `fold` sobre listas.

$$\text{foldE} :: (a \rightarrow b \rightarrow b) \rightarrow b \rightarrow \text{Signal } a \rightarrow \text{Signal } b$$

3.1.2. Sintaxis

La gramática del lenguaje es la siguiente:

```

bool := "True" | "False"
float := [-+]?[0-9]*\.[0-9]+
int := [-+]?[0-9]*\.[0-9]+

name := [a-z_A-Z]+

value := float | int | bool

binop := '+' | '-' | '/' | '*'
        | 'or' | 'and' | '==' | '<='
        | '>' | '<' | '<>' | '>=';

arg_list := name ',' arg_list | name;

expr := value
        | expr binop expr
        | "if" expr "then" expr "else" expr
        | "let" name "=" expr "in" expr
        | "\" arg_list "->" expr;

assign := name "<-" expr;

assign_list = assign assign_list | assign;

definitions := name "=" expr;

main_block := "do {" assign_list "}";

program := definitions main_block;
```

3.1.3. Ejemplo

En el siguiente ejemplo se muestra como haría para detener un robot cuando su sensor de distancia muestra un valor menor a un mínimo.

```

INPUT_DISTANCE = 1
OUTPUT_MOTOR = 1

MIN_DISTANCE = 30
FULL_SPEED = 100
STOP = 0

distanceToSpeed n = if (n < MIN_DISTANCE) then STOP else FULL_SPEED

do {
  distance <- read INPUT_DISTANCE,
  speed <- lift distanceToSpeed distance,
  output OUTPUT_MOTOR speed
}
```

Primero se definió una fuente de eventos llamada *distance*, de tipo *Event Number*.

```
distance <- read INPUT_DISTANCE
```

La misma emitirá un evento con la distancia en *cm* leída por un sensor en el robot.

Luego, se quiere que cuando la distancia sea menor al valor *MINIMO* dado, el robot se detenga completamente, ésto quiere decir, que la velocidad sea 0, en otro caso el mismo se mueve a velocidad 100, la cuál asumimos es una velocidad apropiada. Para ésto se crea una nueva fuente de eventos, definida a partir de *distance*, aplicandole la función **distanceToSpeed** a cada valor para obtener la velocidad.

```
speed <- lift distanceToSpeed distance
```

Ésta expresión, también es una fuente de eventos de tipo *Event Number*.

Finalmente, se aplica la función nativa **output** cuyo primer parámetro es el *id* de la salida, en éste caso es **OUTPUT_MOTOR** y su segundo parámetro es una fuente de eventos, en éste caso son velocidades.

3.2. Lenguaje de bajo nivel

Para presentar el lenguaje, primero defino las estructuras necesarias para explicar la semántica de cada instrucción.

(TODO: Revisar ésta seccion que cambié las estructuras)

1. *Inputs*

Los valores leídos en las entradas de hardware se mapean en esta lista. Por ejemplo si el hardware cuenta con un botón, y el identificador del botón es i , su valor se representará con la notación:

$Inputs_i$

A cada entrada se le asocia un conjunto de rutinas que deben invocarse cuando se tenga un valor disponible en la entrada. El mismo puede ser vacío si no hay rutinas esperando por su valor. Queda a criterio de quien implementa la máquina si éstos valores deben ser guardados o descartados. A éste conjunto de rutinas lo denotamos cómo:

$Callbacks_i$

2. *Nodes*

Es utilizado para almacenar todas las transformaciones de señales. Cada nodo, tiene una lista de otros nodos que dependen de él y la posición del argumento por el que esperan. Además el nodo almacena el último valor calculado, y una lista de argumentos que le serán pasados, si son nuevos o no.

Cada aplicación de `lift`, `lift2` o `folds` será mapeada en un nodo.

Cada nodo $Node_i$ tiene una lista de nodos adyacentes que dependen de él.

3. *Outputs*

Mapea señales en salidas de hardware, los valores son asignados con la operación `output`.

4. *Stack*

Es una pila global, se utiliza para ejecutar operaciones, realizar cálculos, es único y global, y los hilos de ejecución no pueden guardar valores persistentes en él.

Usaremos el símbolo TOS para referirnos al elemento en el tope de la pila y $Stack$ para referirnos a la pila.

5. *Ready*

Es una *cola* que contiene punteros a los nodos listos para ser ejecutados.

6. *Dispatcher*

El dispatcher, es quien implementa las acciones de la máquina. El mismo se encarga de recibir valores de los sensores, mapearlos a eventos en las entradas $Input_i$.

Éstos eventos, serán recibidos por los nodos *Nodes*, cada $Node_i$ que espera por eventos, entrará en estado activo cuando todos los nodos por los que espera le envíen un evento. A su vez, el nodo en estado activo calcula un resultado y notifica a todos sus nodos adyacentes.

El dispatcher, realizará implícitamente un orden topológico de los nodos, como *Nodes* es un grafo acíclico, éste proceso es posible y termina, y cada salida cuenta con un valor, que será mapeado a los actuadores.

3.2.1. Instrucciones

Las siguiente tabla muestra las instrucciones de bajo nivel junto con su semántica.

- `lift id source_id function_pointer`

Crea un nodo que recibe valores de la fuente de eventos $source_id$, les aplica la función $function_pointer$ y emite el resultado en la fuente de eventos id .

- `lift2 id source-id_1 source-id_2 function_pointer`

Crea un nodo que recibe valores de $source - id_1$ y $source - id_2$, les aplica la función $function_pointer$ y emite el resultado en la fuente de eventos id .

- `read id input-id`

Crea un nodo que recibe valores de una entrada, y emite el resultado en la fuente de eventos id .

- `halt`

Detiene el hilo de ejecución actual.

`ip = 0`

- `call function`

Invoca la función *function*.

```
stack.push(fp)
stack.push(ip)
fp = sp
goto function
```

- `ret`

Elimina el frame y coloca el resultado en el stack.

```
value = stack.pop()
stack.pop_frame();
ip = code[stack.pop()]
fp = stack.pop()
stack.pop_args()
stack.push(value)
```

- `load_param`

```
a = stack.get_arg(inm)
stack.push(a)
```

- `jump`

```
goto position
```

- `jump_false position`

```
a = stack.pop()
if not a: goto position
```

- `cmp_eq`

```
a = stack.pop()
b = stack.pop()
stack.push(a == b)
```

- `cmp_neq`

```
a = stack.pop()
b = stack.pop()
stack.push(a != b)
```

- `cmp_gt`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a > b)`
- `cmp_lt`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a < b)`
- `add`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a + b)`
- `sub`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a - b)`
- `div`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a / b)`
- `mul`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a * b)`
- `op_and`
 `a = stack.pop()`
 `b = stack.pop()`
 `stack.push(a and b)`

- `op_or`
a = `stack.pop()`
b = `stack.pop()`
`stack.push(a or b)`
- `op_not`
Coloca un valor constante en el stack.
`stack.push(word)`
- `push word`
Coloca un valor constante en el stack.
`stack.push(word)`
- `pop`
Elimina el tope del stack.
`stack.pop()`
- `dup`
Duplica el tope del stack.
`stack.push(stack.tos())`
- `store inm`
Guarda el tope del stack en la variable *inm*.
`var[inm] = stack.pop()`
- `load inm`
Carga la variable *inm* $\in 0,255$ en el stack.
`stack.push(var[inm])`
- `write inm`
Toma el último valor del stack y lo coloca en la salida número *inm* $\in 0,255$.
`output(inm, stack.pop())`

3.2.2. Traducción de alto nivel a bajo nivel

Dado el siguiente programa de ejemplo en alto nivel:

```
# Este programa de prueba muestra con un led si se esta frente a una casa.

#Inputs
sensor_distancia = 1
#Outputs
led = 1

hay_casa = \distancia -> (distancia < 100)

do {
  signal_distancia = read sensor_distancia,
  signal_viando = lift hay_casa sensor_distancia,
  write led signal_viando
}
```

El mismo se representaría en bajo nivel de la siguiente forma:

```
01: push 1
02: store 0 //sensor_distancia = 1
03: push 1
04: store 1 //led = 1
05: read 0 0 //signal_distancia = read 0
06: lift 1 0 hay_casa //signal_viando = lift hay_casa sensor_distancia
07: write 1 1 //write led signal_viando
08: halt
09: load_arg 0 //hay_casa:
10: push 100
11: cmp_le //distancia < 100
12: return
```


Capítulo 4

Implementación

En este capítulo se detalla la implementación de el compilador y la máquina virtual diseñadas para utilizar el lenguaje *grob* en la plataforma elegida. También se explica cuál sería el mecanismo para portar la implementación a otra plataforma.

4.1. Compilador

El lenguaje utilizado para desarrollar el compilador fue *Haskell*. El compilador se divide en dos fases, la primera implementa un parser que recibe como entrada el programa en lenguaje FROB y genera un árbol de sintaxis abstracta (*AST*). En Haskell se define el *AST* como un tipo de datos. Luego se recorre el *AST* y se genera como salida un archivo con las instrucciones en bajo nivel.

4.2. Máquina virtual

El lenguaje de programación para el desarrollo de la máquina virtual es *C++* ya que es posible compilarlo para casi cualquier plataforma objetivo. Existen dos limitaciones importantes a tener en cuenta, la primera es que el espacio de memoria varía en diferentes plataformas, por lo que se desea sea posible compilar la máquina aún con un espacio muy reducido. La segunda es que las plataformas varían en capacidades de *Entrada/Salida*, es importante que quien compila la máquina y arma un entorno tenga conocimiento de cómo disponer las mismas y qué limitaciones existen, por ejemplo: Cantidad de pines digitales o analógicos.

La implementación modelo, se hizo utilizando la plataforma *MBED LPC1768*, se puede encontrar documentación de la misma en [4] y en [5].

Capítulo 5

Casos de estudio

En esta sección veremos un caso de estudio usado para verificar la implementación. El problema fue tomado de la competencia SumoUY [6], el mismo fue el desafío planteado a escolares en el año 2013.

5.1. Problema

Se desea implementar un robot autónomo móvil que sea capaz de hacer la entrega de un pedido en una casa determinada. El mismo debe moverse por un escenario e identificar las casas. Para recorrer la ruta de entrega, podrá valerse de una línea negra que representará la calle de la ciudad.

Las casas estarán ubicadas a un lado de la calle. En el recorrido se encuentran varias casas, el robot deberá entregar un pedido en la quinta casa por la que pase.

El robot deberá pasar por alto las casas anteriores y al llegar a la casa objetivo debe detenerse totalmente.

Para probar la solución, se armará un escenario que consiste de un piso blanco con una línea negra que puede tener curvas.

Al lado derecho de la línea se ubicarán cajas a menos de 30 centímetros representando las casas.

5.2. Solución

Se armó un robot móvil que cuenta con 3 sensores:

- Sensor de grises izquierdo
- Sensor de grises derecho

- Sensor de distancia apuntando hacia la derecha

Y 2 actuadores:

- Motor izquierdo
- Motor derecho

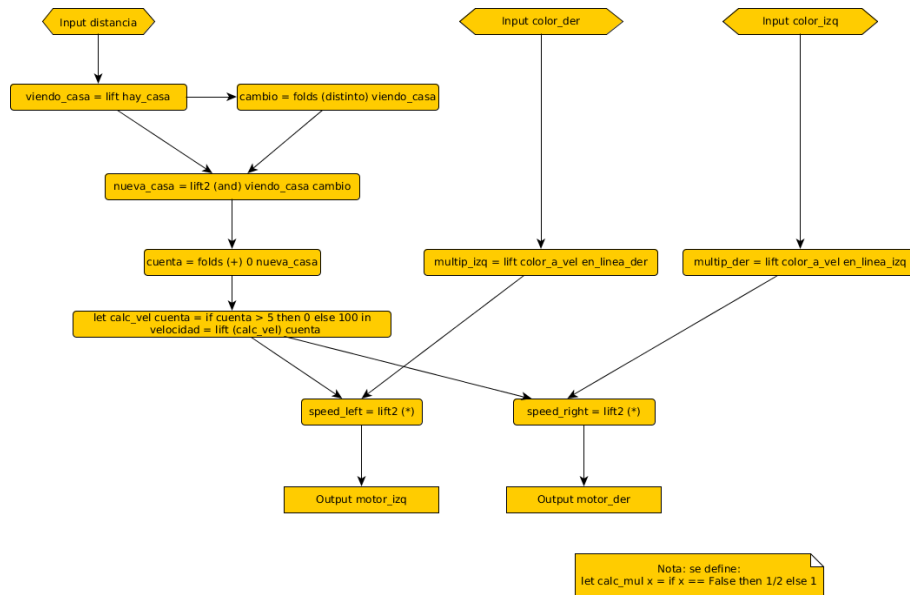
El robot utilizará los sensores de grises para mantenerse sobre la línea y el sensor de distancia para saber cuándo está frente a una casa.

Con los motores se moverá hacia adelante inicialmente, e irá corrigiendo su dirección desacelerando el motor del lado que se salga de la línea.

Durante el trayecto contará las casas, y se detendrá cuando la cuenta llegue al valor 5.

En el siguiente diagrama, se puede ver gráficamente de que forma se combinan los eventos, para lograr nuestro objetivo:

Figura 5.1: Diagrama del caso de estudio



Luego se llega a la implementación en el lenguaje Grob:

```

hay_casa = \d -> if (d < MIN) then 1 else 0
distinto = \a b -> if (a /= b) then 1 else 0
and = \a b -> if (a && b) then 1 else 0

```

```

velocidad_casa = \num -> if (num >= 5) then 0 else 100

suma = \a b -> (a + b)

es_linea = \gris -> gris > MIN_NEGRO
calc_mul = \linea -> if (linea) then 1 else 1/2

color_a_vel = \gris -> calc_mul (es_linea gris)

multiplicar = \a b -> (a * b)

do {
  distance <- read INPUT_DISTANCE,
  color_izq <- read INPUT_COLOR_LEFT,
  color_der <- read INPUT_COLOR_RIGHT,

  viendo_casa <- lift hay_casa distance,
  cambio <- folds distinto viendo_casa,
  nueva_casa <- lift2 and viendo_casa cambio,
  cuenta <- folds suma 0 nueva_casa,
  velocidad <- lift velocidad_casa cuenta,

  multip_izq <- lift color_a_vel color_izq,
  multip_der <- lift color_a_vel color_der,

  speed_left <- lift2 multiplicar velocidad multip_izq,
  speed_right <- lift2 multiplicar velocidad multip_der,

  output MOTOR_IZQ speed_left,
  output MOTOR_DER speed_right
}

```

5.3. Conclusiones del caso

Capítulo 6

Conclusiones

Intro que se hizo, puntos a favor, etc..

6.1. Trabajo futuro

El principal trabajo futuro sería ...

Sería muy útil contar con una funcionalidad de depuración, la cuál mostrara dependiendo del tiempo los valores de cada fuente de eventos.

Una opción es comunicar mediante el puerto serial el valor de cada señal al cambiar, y mostrarlo en una interfaz web como la que provee RXMarbles (ver [7]). El lenguaje Elm provee de una herramienta que permite viajar en el tiempo, modificar y mostrar la ejecución de un programa, en nuestro caso no sería posible modificar lo que el robot físico realiza, pero si sería útil ver en la línea de tiempo que valores tomaron sus señales. (ver [8])

Bibliografía

- [1] John Peterson, Paul Hudak, and Conal Elliott. Lambda in motion: Controlling robots with Haskell. In *Practical Aspects of Declarative Languages*, 1999.
- [2] Evan Czaplicki. Elm: Concurrent frp for functional guis. Master's thesis, Harvard University, mar 2012.
- [3] Sitio web de Yampa. url<https://wiki.haskell.org/Yampa>. Último acceso: 29/04/2015.
- [4] Sitio web de MBED-LPC1768. <http://developer.mbed.org/platforms/mbed-LPC1768>. Último acceso: 30/04/2015.
- [5] Sitio web de MBED. <https://mbed.org>. Último acceso: 30/04/2015.
- [6] Sitio web de SumoUY. <http://sumo.uy/>. Último acceso: 03/05/2015.
- [7] Sitio web de RXMarbles. url<http://rxmarbles.com>. Último acceso: 18/05/2015.
- [8] Sitio web del debugger de Elm. url<http://debug.elm-lang.org/>. Último acceso: 18/05/2015.

Apéndices

