



UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE COMPUTACIÓN

Hot-control. Una técnica para la generación y actualización automática de controladores discretos

Tesis presentada para optar al título de
Licenciado en Ciencias de la Computación

Leandro Ezequiel Nahabedian

Director: Nicolás Roque D'Ippolito

Buenos Aires, Argentina 2014

HOT-CONTROL: UNA TÉCNICA PARA LA GENERACIÓN Y ACTUALIZACIÓN AUTOMÁTICA DE CONTROLADORES DISCRETOS

Es esperado que muchos sistemas corran continuamente mientras el ambiente cambia y los requerimientos evolucionan, por lo tanto las implementaciones de dichos sistemas deben ser actualizados dinámicamente para satisfacer los cambios de requerimientos, respetando los cambios del ambiente. Lo complejo de este paso, es poder determinar en que puntos de la ejecución previa es seguro hacer la actualización, y si es seguro, como deberá seguir ejecutando el nuevo sistema. Tanto la máquina, como el ambiente y los requerimientos, pueden ser interpretados por modelos de comportamiento que son estructuras formales que definen acciones que pueden suceder. Mediante la síntesis de controladores podremos obtener modelos de forma correcta debido a que son obtenidos mediante construcciones.

El enfoque de esta tesis es definir y plantear formalmente mediante síntesis de controladores el problema de la actualización dinámica, detallando un conjunto de inputs necesarios para la solución del mismo. A su vez, desarrollaremos varios casos de test utilizando la herramienta MTSA (Modal Transition System Analyser) dejando constancia de que los inputs definidos son suficientes para obtener el controlador buscado.

Palabras claves: *Ingeniería de requerimientos; Síntesis de controladores; Actualización dinámica; Especificación basada en eventos; MTSA framework; Concurrencia, LTS; Fluent; LTL.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero aprovechar este espacio para agradecer

A mi familia con todo mi amor.

Índice general

1..	Introducción	1
1.1.	Motivación	1
1.2.	Resumen de la contribución	2
1.3.	Esquema de tesis	3
2..	Fundamentos teóricos	5
2.1.	El Mundo y la Máquina	5
2.2.	Sistema de Transición Etiquetados (Labelled Transition System)	7
2.3.	Lógica Lineal Temporal de Flujos (Fluent Linear Temporal Logic)	8
2.4.	Problemas de síntesis de controladores	9
2.5.	Juegos de dos jugadores	11
2.6.	Resolviendo el problema de control LTS SGR(1)	12
2.6.1.	Control LTS SGR(1) a juegos GR(1)	13
2.6.2.	Traduciendo la estrategia a un Controlador LTS	14
2.6.3.	Algoritmo	15
2.7.	Procesos de estados Finitos (Finite State Process)	18
3..	MTSA como herramienta de modelado y síntesis	21
3.1.	Construcción	21
3.2.	Análisis	22
3.3.	Modelando objetivos para controladores actualizables	22
4..	Problema de actualización de controladores dinámicamente	25
4.1.	Especificación	25
4.2.	La actualización dinámica de controladores como un problema de síntesis de controladores	26
4.2.1.	El objetivo del problema de control	27
4.2.2.	Modelo del ambiente del problema de control	28

4.2.3. El problema de control de la actualización de controladores dinámi- camente	31
4.3. Resolviendo el problema de actualización dinámica de controladores	33
5.. Validación	35
5.1. Casos de Estudio	37
5.1.1. Planta de energía nuclear	37
5.1.2. RailCab	38
5.1.3. Buscador UAV de vida salvaje	38
5.1.4. Production Cell	38
5.1.5. ARDrone	39
5.2. Resultados	40
5.2.1. Planta de energía nuclear	40
5.2.2. RailCab	41
5.2.3. Buscador UAV de vida salvaje	41
5.2.4. Production Cell	41
5.2.5. ARDrone	41
6.. Conclusiones y trabajos futuros	43
6.1. Trabajo futuro	43
6.2. Conclusiones	44

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La operación continua, sistemas donde cada una de sus componentes se mantienen operativos, es un requerimiento común en muchas aplicaciones. Por lo tanto, es necesario desarrollar técnicas ingenieriles que puedan actualizar un sistema tanto su ambiente como sus requerimientos, sin la necesidad de frenar o interrumpir sus operaciones. Este trabajo ha sido estudiado de diversas maneras, empezando por la actualización dinámica de software [KM90] y más recientemente con el diseño de software adaptable. [SEA14]

La pregunta central que intenta solucionar este problema es ¿cuándo es seguro cambiar un componente de software en un sistema que esta corriendo? Una respuesta conservadora a esta pregunta es “cuando los componentes no están involucrados en alguna interacción”; esto fue formalizado introduciendo la noción de **quietud** (*quiescence*) [KM90] y luego **tranquilidad** (*tranquility*) [VEBD07]. Muchas otras técnicas han sido desarrolladas (como en [AR09] y [GJB96]) aunque estas nunca explican los requerimientos de actualización [BG10], ni indican cuando es correcto realizar el cambio a la nueva especificación. Para tal fin Ghezzi et al. [GGM12, PLMGGB13] estudió el problema de actualizar un controlador que esta monitoreando un ambiente de sistema reactivo mientras controla actuadores. La pregunta que persiguen contestar los autores es ¿cuándo es seguro reemplazar el controlador actual con uno nuevo donde se cumple la nueva especificación?

Un problema en común que los trabajos existentes en actualización dinámica poseen, es que dichas técnicas necesitan asumir que el sistema que esta siendo ejecutado va a eventualmente alcanzar un estado seguro donde hacer la actualización. Estos estados son designados como *actualizables* y su identificación depende de cada técnica. Dichas técnicas, suelen tener un operador o una pieza de software especial designado a identificar dichos estados. Esta asunción, es algo que no depende del software, sino que depende del ambiente, el cual sabemos que no puede ser manipulado. A su vez, los trabajos existentes, tampoco dan una técnica para guiar al sistema hacia un estado actualizable.

Por ejemplo, en [KM90], la expectativa sería que los componentes en un sistema distribuido deben ser diseñados, para que den información del momento en que dicho componente entró en estado de *quiescence*. A su vez, están diseñados para aceptar mensajes *pasivate* que, al deshabilitar componentes para inicializar nuevas transacciones, intentan, pero no garantizan que alcance *quiescence*. Similarmente, en [GGM12] requiere asumir que el controlador a ser actualizado va a volver, eventualmente, a su estado inicial (o asumir que la nueva especificación vale desde el último estado inicial). Estados actualizables son aquellos en los que el comportamiento del sistema desde el ultimo estado inicial puede controlarse para satisfacer la nueva especificación. Por otra parte, en [PLMGGB13], el mismo autor relaja las condiciones necesarias para realizar una actualización, permitiendo más estados actualizables, al costo de violar la nueva especificación, y sin contemplar que podrían suceder con estos.

1.2. Resumen de la contribución

En esta tesis, como en [GGM12, PLMGGB13] consideramos el problema de controladores actualizables en un sistema reactivo. Por otro lado, proponemos una técnica para actualización dinámica que *fuera* al sistema a alcanzar un estado actualizable en vez de asumir que el sistema va a llegar a dicho estado. Por lo tanto, nuestro enfoque no solo garantiza que la nueva especificación va a valer *si* la actualización se produce, sino que también garantiza que la actualización *va a suceder*. Además, generalizamos la noción de estados actualizables en [GGM12, PLMGGB13] mientras mantenemos correctitud que es mejor que requerir que la nueva especificación empiece a valer desde el estado inicial (o co-inicial [PLMGGB13]) del controlador actual. Proveemos también una especificación declarativa y general para señala desde que punto los nuevos objetivos valen y designar propiedades que deben valer en el momento que el sistema esta transicionando.

Una clase de sistemas que se amoldan al trabajo presentado son los sistemas adaptables. Dichos sistemas están diseñados para que, mientras el proceso esta corriendo, pueda soportar cambios en cuanto a la disponibilidad de recursos o necesidades del usuario y también soportar condiciones inesperadas del ambiente y fallas [SEA14].

Nuestro enfoque de actualización de controladores dinámicos forma parte junto con

otros trabajos de la misma área para síntesis de controladores discretos (ej. [RW89], [PPS06],[DBPU13]). Síntesis de controladores automáticamente construye una estrategia operacional (en la forma de máquinas de estado) que es capaz de garantizar un objetivo bajo asunciones del ambiente.

El problema de controladores dinámicos actualizables puede ser expresado como un problema de síntesis de controladores en el cual el nuevo controlador cumple que:

- I) es una estructura equivalente al controlador actual hasta que recibe un mensaje (no controlable) llamado *beginUpdate*,
- II) satisface la especificación actual hasta que el evento (controlable) *stopOldSpec* sucede,
- III) garantiza a la nueva especificación desde que ocurre la acción (controlada) *startNewSpec*,
- IV) proporciona que el comportamiento entre *beginUpdate*, *stopOldSpec* y *startNewSpec* satisface cualquier requerimiento de transición y
- V) garantiza que los eventos *startNewSpec* y *stopOldSpec* van a suceder eventualmente.

1.3. Esquema de tesis

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. El Mundo y la Máquina

Los primeros conceptos que detallaré estarán involucrados con la ingeniería de los requerimientos. Los puntos de vista mas relevantes son los de Zave y Jackson ([ZJ97, Jac95a, Jac95b]) por un lado, y los de Letier y Van Lamsweerde ([VLL00, VL01]) por el otro. Ambos puntos de vista distinguen a los problemas del *Mundo* y las soluciones de la *Máquina* como fundamentales para reconocer si las operaciones de la máquina solucionan los problemas planteados en el mundo. De hecho, el efecto de la máquina en el mundo y las suposiciones que hacemos acerca de este mundo son fundamentales para el proceso de toma de requerimientos. En el lado del mundo definimos una serie de problemas que existen en el mundo real que serán solucionados al construir una máquina. Fácilmente podremos notar que existen componentes en la máquina que interactúan directamente con el mundo siguiendo normas y procesos conocidos. Estas, forman parte de la intersección entre el mundo y la máquina. Por ejemplo un taladro, un brazo robótico o las reglas de procesamiento para cada elemento que entra en una linea de producción (véase la Fig. 2.1).

Así mismo, es esperado que la máquina proponga una solución al problema. Por ejem-

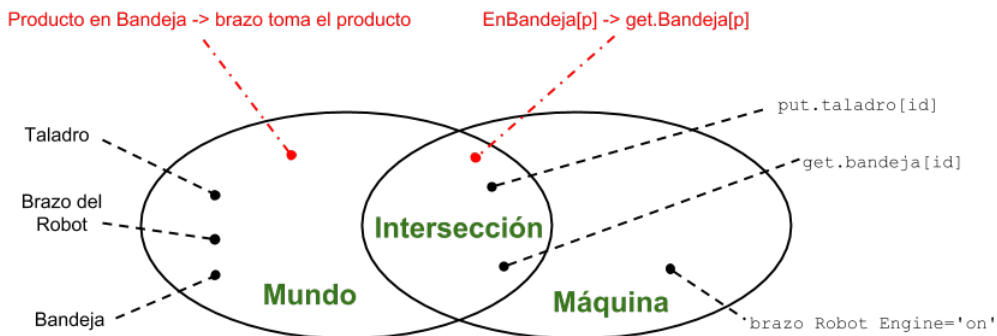


Fig. 2.1: El Mundo y la Máquina

plo, en la Fig. 2.1 podemos ver que la célula de producción debe procesar cada producto, solo si están disponible en la bandeja de entrada en ese momento. Con la sentencia $EnBandeja[p] \rightarrow get.Bandeja[p]$ nuestro que se espera que el brazo del robot solo podrá tomar los productos de la bandeja cuando estén listos. Finalizando, los fenómenos compartidos entre el mundo y máquina, es decir, los que se encuentran en la intersección, representa a la *interfaz*, donde la máquina interactúa con el mundo. También, podemos definir a los fenómenos del mundo como el *modelo del entorno* ya que el conjunto de estos describen los eventos que suceden en el mundo real.

Las sentencias que detallan los distintos fenómenos, tanto en el mundo como en la máquina pueden variar en *alcance* y en *forma* [PM95, Jac95a]. Además, estas pueden estar en modo *indicativo* u *optativo*. En otros trabajos, como en [vL09], las sentencias utilizadas son *descriptivas* y *prescriptivas*.

- ★ Sentencias descriptivas: representan propiedades que son independientes de cómo se comporta el sistema. Se usan en modo *indicativo*. No pueden ser cambiadas ni removidas.
- ★ Sentencia prescriptivas: afirman propiedades deseables que pueden estar presentes o no. Deben estar aplicadas por los componentes del sistema. Normalmente, pueden cambiar fortaleciéndose o debilitándose, o incluso pueden ser eliminadas.

Anteriormente, fue mencionado que los estados pueden variar en su alcance. Ambos tipos de sentencias pueden referirse a características de la máquina que no son compartidas por el mundo. En otras ocasiones, sentencias pueden referirse a fenómenos compartidos por el mundo y la máquina. Más precisamente, una *propiedad de dominio* es una sentencia descriptiva sobre el mundo. Durante todo este trabajo, vamos a llamar *modelo ambiente*, al conjunto de propiedades del dominio de un problema particular.

Por otro lado, un *supuesto de ambiente* es una sentencia que podría no suceder y debe ser satisfecha por el ambiente. Un requisito de software, o *requisito* de forma abreviada, es una sentencia prescriptiva que la máquina deberá satisfacer independientemente de cómo se comporta el problema detallado en el mundo y deben ser elaboradas en términos de fenómenos compartidos entre el mundo y la máquina.

Para finalizar y siguiendo lo publicado en [VL01, VLL00] podremos determinar a una

acción como supervisada / controlable si dicha acción es supervisada / controlable por la máquina. En este trabajo, llamaremos a las acciones supervisadas como acciones no controlables, ya que están controladas por el ambiente.

2.2. Sistema de Transición Etiquetados (Labelled Transition System)

En esta sección vamos a dar una notación para los sistemas de transiciones etiquetados o Labelled Transition System (LTS), la cual usaremos durante este trabajo. Dichos sistemas, son muy usados actualmente para modelar y analizar comportamiento en sistemas concurrentes y distribuidos. Un LTS es un sistema de transiciones de estados donde cada una de ellas esta etiquetada con una acción. El conjunto de todas las acciones que posee un LTS es llamado alfabeto.

Definición 2.2.1. (*Sistema de Transición Etiquetado*) [Kel76] Sea *States* un conjunto universal de estados, *Act* un conjunto universal de etiquetas. Un Sistema de Transición Etiquetado (LTS) es una tupla $E = (S_E, A_E, \Delta_E, s_{E_0})$, donde $S_E \subseteq \text{States}$ es un conjunto finito de estados, $A_E \subseteq \text{Act}$ es un alfabeto finito, $\Delta_E \subseteq (S_E \times A_E \times S_E)$ es una relación, y $s_0 \in S_E$ es el estado inicial.

Si $(s, \ell, s') \in \Delta_E$ diremos que ℓ está activo desde s en E . Diremos también que un LTS E es *determinístico* si $\forall_{(s, \ell, s'), (s, \ell, s'') \in \Delta_E}$ implica $s' = s''$. Para un estado s definiremos $\Delta_E(s) = \{\ell \mid (s, \ell, s') \in \Delta_E\}$. Dado un LTS E , vamos a referirnos a su alfabeto como αE .

Definición 2.2.2. (*Composición en Paralelo*) Sean $M = (S_M, A_M, \Delta_M, s_{M_0})$ y $E = (S_E, A_E, \Delta_E, s_{E_0})$ LTSs. Una Composición en Paralelo ($||$) es un operador simétrico tal que $E||M$ es el LTS definido de la siguiente manera $E||M = (S_E \times S_M, A_E \cup A_M, \Delta, (s_{E_0}, s_{M_0}))$, donde Δ es la relación mas pequeña que satisface las siguientes reglas, donde $\ell \in A_E \cup A_M$:

$$\frac{(s, \ell, s') \in \Delta_E}{((s, t), \ell, (s', t)) \in \Delta} \ell \in A_E \setminus A_M \qquad \frac{(t, \ell, t') \in \Delta_M}{((s, t), \ell, (s, t')) \in \Delta} \ell \in A_M \setminus A_E$$

$$\frac{(s, \ell, s') \in \Delta_E, (t, \ell, t') \in \Delta_M}{((s, t), \ell, (s', t')) \in \Delta} \ell \in A_E \cap A_M$$

Definición 2.2.3. (*LTS Legal*) Dado $E = (S_E, A_E, \Delta_E, s_{E_0})$, $M = (S_M, A_M, \Delta_M, s_{M_0})$ LTSs, y $A_{E_u} \in A_E$. Decimos que M es un LTS Legal para E con respecto a A_{E_u} si para todos $(s_E, s_M) \in E \parallel M$ sucede lo siguiente: $\Delta_{E \parallel M}((s_E, s_M)) \cap A_{E_u} = \Delta_E(s_E) \cap A_{E_u}$.

Intuitivamente, un LTS M es un LTS Legal para el LTS E con respecto a A_{E_u} , si para todos los estados en la composición $(s_E, s_M) \in S_{S \parallel M}$ se cumple que, una acción $\ell \in A_{E_u}$ es deshabilitada en (s_E, s_M) si y solo si también esta deshabilitada en $s_E \in E$. En otras palabras, M no restringe a E con respecto a A_{E_u} .

Definición 2.2.4. (*Tranzas*) Sea un LTS $E = (S, A, \Delta, s_0)$. Una secuencia $\pi = \ell_0, \ell_1, \dots$ es una traza en E si existe una secuencia $s_0, \ell_0, s_1, \ell_1, \dots$ donde para todo i tenemos $(s_i, \ell_i, s_{i+1}) \in \Delta$.

Definición 2.2.5. (*Estados Alcanzables*) Sea un LTS $E = (S_E, A_E, \Delta_E, s_0)$. Un estado $s \in S_E$ es alcanzable (desde el estado inicial) en E si existe una secuencia $s_0, \ell_0, s_1, \ell_1, \dots$ donde para cada i tenemos $(s_i, \ell_i, s_{i+1}) \in \Delta$ y $s = s_{i+1}$. Nos referimos a el conjunto de todos los estados alcanzables en E como $Reach(E)$.

En el transcurso de esta tesis, vamos a estudiar solo aquellos LTSs E donde todos sus estados $s \in S_E$ son alcanzables.

2.3. Lógica Lineal Temporal de Flujos (Fluent Linear Temporal Logic)

La Lógica Lineal Temporal (LTL) esta siendo ampliamente usada en la ingeniería de los requerimientos [KPR04, GM03, VLL00, LvL02]. La motivación para escoger a las LTL de flujos es que estas proveen un framework uniforme para especificar propiedades basados en estados sobre modelos basados en eventos [GM03]. Fluent Linear Temporal Logic (FLTL) [GM03] es una lógica de tiempo lineal, temporal, para razonar acerca de flujos. Un *flujo* Fl es definido por un par de conjuntos y un valor booleano: $Fl = \langle I_{Fl}, T_{Fl}, Init_{Fl} \rangle$, donde $I_{Fl} \subseteq Act$ es el conjunto de acciones iniciadoras, $T_{Fl} \subseteq Act$ es el conjunto de acciones finalizadoras y $I_{Fl} \cap T_{Fl} = \emptyset$. Un flujo puede ser inicializado con valor true o false indicado por $Init_{Fl}$. Toda acción $\ell \in Act$ induce un flujo, que notaremos $\ell = \langle \ell, Act \setminus \{\ell\}, false \rangle$. Por último, el alfabeto de un flujo es el que se obtiene mediante la unión del conjunto de

acciones iniciadoras y el conjunto de acciones finalizadoras.

Sea \mathcal{F} el conjunto de todas las posibles flujos sobre Act . Una formula FLTL esta se define inductivamente utilizando los conectores booleanos estandar y operadores temporales como el **X** (próximo), **U** (antes fuerte) de la siguiente manera:

$$\varphi ::= Fl \mid \neg\varphi \mid \varphi \vee \psi \mid \mathbf{X}\varphi \mid \varphi \mathbf{U} \psi \quad (2.1)$$

donde $Fl \in \mathcal{F}$. Para comodidad sintáctica, vamos a introducir las operaciones de \wedge , \diamond (eventualmente) y \square (siempre). Sea Π el conjunto de trazas infinitas sobre Act , diremos que la traza $\pi = \ell_0, \ell_1, \dots$ satisface un flujo Fl en la posición i , notado $\pi, i \models Fl$, si y solo si una de las siguientes condiciones es válida:

$$\star \text{ Init}_{Fl} \wedge (\forall j \in \mathbb{N} : 0 \leq j \leq i \rightarrow \ell_j \notin T_{Fl})$$

$$\star \exists j \in \mathbb{N} : (j \leq i \wedge \ell_j \in I_{Fl}) \wedge (\forall k \in \mathbb{N} : j < k \leq i \rightarrow \ell_k \notin T_{Fl})$$

Dada una traza infinita π , la fórmula que satisface φ en la posición i , denotada como $\pi, i \models \varphi$, es definida a continuación como se muestra en la semántica para el operador de satisfacción:

$$\begin{aligned} \pi, i \models Fl &\triangleq \pi, i \models Fl \\ \pi, i \models \neg\varphi &\triangleq \neg(\pi, i \models \varphi) \\ \pi, i \models \varphi \vee \psi &\triangleq (\pi, i \models \varphi) \vee (\pi, i \models \psi) \\ \pi, i \models \mathbf{X}\varphi &\triangleq \pi, 1 \models \varphi \\ \pi, i \models \varphi \mathbf{U} \psi &\triangleq \exists j \geq i : \pi, j \models \psi \wedge \forall i \leq k < j : \pi, k \models \varphi \end{aligned}$$

Diremos que φ se cumple en π , denotado como $\pi \models \varphi$, si $\pi, 0 \models \varphi$. Una fórmula $\varphi \in \text{FLTL}$ es cierta si un LTS E (denotado como $E \models \varphi$) si éste es cierto en toda traza infinita producida por E .

2.4. Problemas de síntesis de controladores

Los problemas de síntesis de controladores son aquellos que producen una máquina, la cual, restringe las ocurrencias de los eventos controlables, basado en las observaciones,

de los eventos no controlables que han ocurrido. Dicha máquina, al ser desplegada con un ambiente adecuando logramos satisfacer el conjunto de objetivos del sistema. Cabe destacar, que estos objetivos se cumplirán si se satisfacen las asunciones que se hacen sobre el ambiente. Resumiendo, tendremos una especificación del ambiente, asunciones, objetivos, y un conjunto de acciones controlables. Resolver el *problema de síntesis de control* es hallar una máquina, que al trabajar concurrentemente con el ambiente, que satisface las asunciones del dominio, satisfacemos el conjunto de objetivos del sistema.

Hecha esta introducción definiremos el problema de síntesis de control para modelos basados en eventos de la siguiente manera. Dada una LTS que detalla el comportamiento del ambiente, un conjunto de eventos controlables, un conjunto de formulas FLTL que describen los objetivos del sistema, el problema de control LTS consiste en encontrar una LTS que restringe solamente la ocurrencia de acciones controlables y garantiza que la composición paralela del ambiente con la LTS recién descrita estará libre de deadlocks y que, si las presunciones del ambiente valen, satisfacerá también los objetivos del sistema.

Definición 2.4.1. (*Control LTS*) Dada una especificación de un entorno en forma de una LTS E , un conjunto de acciones controlables $A_c \in Act$ y un conjunto H de pares (A_{s_i}, G_i) donde A_{s_i} y G_i son fórmulas FLTL especificando presunciones y objetivos del sistema respectivamente, la solución al problema de control LTS $\mathcal{E} = \langle E, H, A_c \rangle$ consiste en encontrar una LTS M de forma que M es legal a E sobre el conjunto de acciones no controlables $A_U = \overline{A_c}$, $E || M$ se encuentra libre de deadlocks, y para cada par $(A_{s_i}, G_i) \in H$ y para cada traza π en $E || M$ se cumple que si $\pi \models A_{s_i}$ entonces $\pi \models G_i$.

Ahora pasaremos a definir un subconjunto de problemas de control LTS que esta determinado por aquellos problemas de control que son computables en tiempo polinómico. Identificaremos estos problemas como problemas de control LTS SGR(1) (Safe Generalised Reactivity(1)). Estos se construyen a partir de GR(1) y problemas de seguridad pero en modelos basados en eventos. Dichos problemas, constan de un modelo del ambiente E que será un LTS determinístico para asegurar que el controlador tenga una visión completa de los estados del ambiente. Requerimos que H sea $\{(\emptyset, I), (A_s, G)\}$, donde I es un invariante de seguridad de la pinta $\Box \rho$, las asunciones A_s son una conjunción de sub-fórmulas FLTL de la pinta $\Box \Diamond \phi$, y el objetivo G una conjunción de sub-fórmulas FLTL de la pinta $\Box \Diamond \gamma$ donde ρ, ϕ y γ son combinación booleana de flujos.

Definición 2.4.2. (*Control LTS SGR(1)*) un problema de control LTS $\mathcal{E} = \langle E, H, A_C \rangle$ es SGR(1) si E es determinístico, y $H = \{(\emptyset, I), (A_s, G)\}$, donde $I = \square \rho$, $A_s = \bigwedge_{i=1}^n \square \diamond \phi_i$, $G = \bigwedge_{j=1}^m \square \diamond \gamma_j$, y ϕ_i, ρ y γ_j son combinación booleana de flujos.

2.5. Juegos de dos jugadores

Llamaremos juegos de dos jugadores a aquellos que consisten en dos jugadores, jugador 1 y jugador 2, donde el objetivo del jugador 1 es satisfacer una especificación independientemente de las acciones que el jugador 2 ejecute. Intuitivamente, el jugador 1 puede deshabilitar las acciones que él controla aunque no podrá deshabilitarlas todas ya que esto transformaría dicho estado a un estado de deadlock.

Durante el transcurso de esta tesis llevaremos los juegos de dos jugadores al marco de síntesis de controladores, donde el jugador 1 (el controlador) elige, del conjunto de acciones controlables, cual habilitar y el jugador 2 (el ambiente) elige que acciones tomar libremente. Formalmente podemos definir lo siguiente.

Definición 2.5.1. (*Juego de dos jugadores*) Un juego de dos jugadores es $G = (S, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi)$, donde S es un conjunto finito de estados, $\Gamma^-, \Gamma^+ \subseteq S \times S$ son conjuntos de transiciones no controlables y controlables respectivamente, $s_{g_0} \in S$ es el estado inicial, y $\varphi \subseteq S^\omega$ es la condición de ganada. Definimos $\Gamma^-(s) = \{s' \mid (s, s') \in \Gamma^-\}$ y análogamente para Γ^+ . Un estado s es no controlable si $\Gamma^-(s) \neq \emptyset$ y controlable en el resto de los casos. Una jugada en G es una secuencia $p = s_{g_0}, s_{g_1}, \dots$. Una jugada p terminada en s_{g_n} es extendida por el controlador eligiendo un subconjunto $\gamma \subseteq \Gamma^+(s_{g_n})$. Luego el ambiente elige un estado $s_{g_{n+1}} \in \gamma \cup \Gamma^-(s_{g_n})$ y agrega $s_{g_{n+1}}$ a p .

Un detalle importante es que si para un estado controlable γ el conjunto de opciones del controlador es vacía, esto puede llevar a un deadlock. Esto será considerado como prohibido mas adelante ya que el controlador definirá este estado como un estado perdedor. Para un estado no controlable el controlador puede decidir deshabilitar todas las acciones controlables. Las elecciones del controlador son formalizadas como estrategias y estas reglas son las que el controlador aplicará. Por lo general, las estrategias son elegidas dependiendo de la historia. Esto puede verse en la estrategia utilizando un valor de memoria Ω y

actualizando este valor de acuerdo a la evolución del juego.

Es importante destacar, que este tipo de juegos, con memoria, es diferente al definido en [PPS06]. Piterman et al. define un juego en el cual el ambiente elige su movimiento y recién luego de este, el controlador podrá elegir cual será el siguiente paso.

Definición 2.5.2. (*Estrategia con memoria*) Una estrategia con memoria Ω para el controlador es un par de funciones (σ, u) , donde Ω es una memoria que tiene designado como valor inicial ω_0 , $\sigma : \Omega \times S \rightarrow 2^S$ tal que $\sigma(\omega, s) \subseteq \Gamma^+(s)$ y $u : \Omega \times S \rightarrow \Omega$.

Intuitivamente, σ le informa al controlador cuales estados debe habilitar como posibles sucesores y u define como actualizar la memoria en cada paso. Si Ω es finita, diremos que la estrategia usa memoria finita.

Definición 2.5.3. (*Consistencia y estrategia ganadora*) una jugada finita o infinita $p = s_0, s_1, \dots$ es consistente con (ω, u) si para cada n tenemos que $s_{n+1} \in \sigma(\omega_n, s_n)$ donde $\omega_{i+1} = u(\omega_i, s_{i+1})$ para toda $i \geq 0$. Una estrategia (σ, u) para el controlador desde el estado s es ganadora si cada jugada maximal empezando de s y consistente con (σ, u) es infinita y en φ . Diremos que el controlador gana el juego G si tiene una estrategia ganadora desde el estado inicial.

Diremos que chequear si un controlador gana un juego G es resolver el juego G . Una vez definido un juego de dos jugadores, pasaremos a traducir un problema de síntesis de controladores a este tipo de juegos. La transformación se basa en generar una estrategia ganadora para el controlador. Si dicha estrategia existe, diremos que el problema de control es realizable [MPS95, RW89]. Resultados estudiados anteriormente [PR89], demuestran que si un controlador gana el juego G y φ es ω -regular, el juego puede ganarse utilizando una estrategia con memoria finita.

2.6. Resolviendo el problema de control LTS SGR(1)

En esta sección explicaremos como una solución para un problema de control SGR(1) puede ser obtenida por construcción utilizando técnicas existentes de síntesis de controladores (basados en estados), llamados GR(1). [PPS06]

La construcción de la máquina para un problema de control LTS SGR(1) esta dividido en dos pasos. Primero, se crea un juego GR(1) G en representación del ambiente E , las asunciones A_s , los objetivos O y el conjunto de acciones controlables A_C . Como segundo paso, se elabora una solución (σ, u) al juego GR(1) para construir una máquina M (i.e un controlador LTS) para \mathcal{E} . Esta solución al problema de control LTS SGR(1) \mathcal{E} existe, si y solo si, existe una solución al juego GR(1) G . Luego, podremos afirmar que el controlador LTS M creada a partir de (σ, u) es una solución a \mathcal{E} .

2.6.1. Control LTS SGR(1) a juegos GR(1)

Convertiremos el problema de control LTS SGR(1) a un juego GR(1). Dado un problema de control LTS SGR(1) $\mathcal{E} = \langle E, H, A_C \rangle$ construimos un juego GR(1) $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi_g)$ tal que cada estado en S_g representa un estado en E y una valuación de todos los flujos que aparecen en A_s y en G .

Mas precisamente, y por la definición de control LTS SGR(1) (definición 2.4.2) tendremos que $H = \{(\emptyset, I), (A_s, G)\}$, $E = (S_e, A, \Delta_e, s_{e_0})$, $A_s = \bigwedge_{i=1}^n \square \diamond \phi_i$, $I = \square \rho$ y $G = \bigwedge_{j=1}^m \square \diamond \omega_j$. Sea $fl = \{\dot{1}, \dots, \dot{k}\}$ un conjunto de flujos usados en A_s y en G donde $\dot{i} = \langle I_i, T_i, Init_i \rangle$. Construimos al juego $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi_g)$ de la siguiente manera.

Construimos S_g a partir de E de tal forma, que los estados en S_g corresponden a un estado en E y los valores de verdad de los flujos en φ . Formalmente, tenemos que $S_g = S_e \times \prod_{i=1}^k \{true, false\}$. Consideramos un estado $s_g = (s_e, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$. Dado un flujo fl_i , diremos que s_g satisface fl_i si α_i es *true* y s_g no satisface fl_i si no.

Además, definiremos las relaciones Γ^- y Γ^+ aplicando las siguientes reglas. Sea $s_g = (s_e, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$. Si s_g no satisface ρ (es decir, s_g es no seguro) no agregaremos los sucesores a s_g . Si s_g satisface ρ , por cada transición $(s_e, l, s'_e) \in \Delta_e$ agregaremos $(s_g, (s'_e, \alpha'_1, \dots, \alpha'_k))$ en Γ^β , donde β y α'_i cumplen las siguiente condiciones:

β	α'_i
es +: si $l \in A_C$,	es α_i : si $l \notin I_{fl_i} \cup T_{fl_i}$,
es -: si $l \notin A_C$.	es <i>true</i> : si $l \in I_{fl_i}$ o
	es <i>false</i> : si $l \in T_{fl_i}$.

El estado inicial s_{g_0} es $(s_{e_0}, initially_1, \dots, initially_k)$.

Por último, construiremos la *condición de ganada* φ_g , definida como un conjunto infinito de trazas, para A_S y G de la siguiente manera: abusando de la notación denotaremos ϕ_i al conjunto de estados s_g tales que s_g satisface las asunciones ϕ_i y a γ_i al conjunto de secuencias que satisfacen $gr((\phi_1, \dots, \phi_n), (\gamma_1, \dots, \gamma_m))$. De esta forma, obtendremos que $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi_g)$ es un juego GR(1).

Cabe destacar que las propiedades de seguridad (safety) que son parte de la especificación no están contempladas en la *condición de ganada* φ_g del juego GR(1), pero si se traducen a un problema de *deadlock avoidance* a la hora de construir Γ^- y Γ^+ . De esta manera, la *condición de ganada* es $\Box \rho \wedge (\bigwedge_{i=1}^n \Box \Diamond \phi_i \Rightarrow \bigwedge_{j=1}^m \Box \Diamond \omega_j)$.

2.6.2. Traduciendo la estrategia a un Controlador LTS

Ahora pasaremos a explicar como conseguir un controlador LTS a partir de una estrategia ganadora para el juego en GR(1). Intuitivamente, la transformación es de la siguiente manera: dado un problema de control LTS SGR(1) $\mathcal{E} = \langle E, H, A_C \rangle$, el juego $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi_g)$ obtenido a partir de \mathcal{E} y de la estrategia ganadora para G , construimos $M = (S_M, A, \Delta_M, s_{M_0})$ una solución para \mathcal{E} traduciendo a estados de S_M un estado de S_g y un estado de la memoria dada por la estrategia ganadora.

Mas formalmente, sea $E = (S_e, A, \Delta_e, s_{e_0})$, $fl = \{fl_1, \dots, fl_k\}$ el conjunto de flujos que aparecen en φ , $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi_g)$ el juego GR(1) construido a partir de E como explicamos anteriormente, y sea $\sigma : \Omega \times S_g \rightarrow 2^{S_g}$ y $u : \Omega \times S_g \rightarrow \Omega$ la estrategia ganadora para G . Construiremos la máquina $M = (S_M, A, \Delta_M, s_{M_0})$ de la siguiente manera.

Para construir $S_M \subseteq \Omega \times S_g$, consideremos dos estados $s_g = (s_e, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$ y $s'_g = (s'_e, \alpha'_1, \dots, \alpha'_k)$. Decimos que esa acción ℓ es *posible* desde s_g hacia s'_g si:

1. $(s_g, s'_g) \in \Gamma^- \cup \Gamma^+$,
2. existe una acción ℓ tal que $(s_e, \ell, s'_e) \in \Delta_e$ y
3. para cada *flujo* fl_i valga alguna de las siguiente condiciones:
 - ★ $\ell \notin I_{fl_i} \cup T_{fl_i}$ y $\alpha'_i = \alpha_i$,
 - ★ $\ell \in I_{fl_i}$ y $\alpha'_i = true$, o
 - ★ $\ell \in T_{fl_i}$ u $\alpha'_i = false$.

Para construir $\Delta_M \subset S_M \times A \times S_M$, consideremos la transición $(s_g, s'_g) \in \Gamma^-$. Por

definición de Γ^- existe una acción $\ell \notin A_C$ tal que ℓ es posible desde s_g hacia s'_g . Si $s'_g \in \sigma(\omega, s_g)$ entonces para cada acción ℓ tal que ℓ es posible desde s_g hacia s'_g agregamos $((\omega, s_g), \ell, (u(\omega, s_g), s'_g))$ hacia Δ_M . De forma similar, consideramos una transición $(s_g, s'_g) \in \Gamma^+$. Por definición de Γ^+ existe una acción $\ell \in A_C$ tal que ℓ es posible desde s_g hacia s'_g . Si $s'_g \in \sigma(\omega, s_g)$ entonces para cada acción ℓ tal que ℓ es posible desde s_g hacia s'_g agregamos $((\omega, s_g), \ell, (u(\omega, s_g), s'_g))$ hacia Δ_M .

El estado inicial de M esta definido como $s_{M_0} = (\omega_0, s_{g_0})$ donde ω_0 es el valor inicial de la memoria Ω . De esta forma completamos la definición de M .

2.6.3. Algoritmo

En esta sección, presentaremos el algoritmo implementado en la herramienta MTSA [DFCU08] el cual está basado en las ideas de Juvekar y Piterman [JP06a].

Este algoritmo realiza una búsqueda de ciclos de estados que satisfacen todas las asunciones pero no todos los objetivos restringiendo acciones controlables. De haber ciclos como estos podrían permitir tranzas en las que el controlador pierde el juego GR(1). Para lograr evitar estos ciclos, el algoritmo busca para cada estado, una estrategia que garantice la satisfacción de todos los objetivos. Para esto, se configura un orden en el cual satisfacer los objetivos. El algoritmo, mediante la técnica de punto fijo computa la mejor forma en que cada estado puede satisfacer el siguiente objetivo. A su vez, mide la "calidad" de cada uno de los diferentes sucesores para satisfacer un objetivo mediante un sistema de rankings [Jur00]. El ranking de un sucesor particular mide la distancia (cantidad de transiciones utilizadas) al siguiente objetivo en términos de número de veces que las asunciones son satisfechas antes de alcanzar el objetivo. Si este número tiende a infinito, deduciremos que desde el estado actual existe una traza infinita en la cual las asunciones del ambiente valen infinitamente, pero los objetivos no se satisfacen. Es así, como el algoritmo reconoce estados que deben ser evitados para la construcción de la estrategia para el controlador.

Definición 2.6.1. (*Función de Ranking*) Sea $G = (S_g, \Gamma^-, \Gamma^+, s_{g_0}, \varphi)$ donde $\varphi = gr((\phi_1, \dots, \phi_n), (\gamma_1, \dots, \gamma_m))$. Una función de ranking para un objetivo γ_j es una función $R_j : S_g \rightarrow (\mathbb{N} \times \{1, \dots, n\} \cup \{\infty\})$. Intuitivamente, $R_j(s_g) = (k, \ell)$ significa que para alcanzar desde s_g a un estado en el cual γ_j vale, todos los caminos satisfacen la asunción ϕ_ℓ a lo

sumo k veces. $R(s) = \infty$ significa que s es un estado perdedor, es decir, desde s no hay una estrategia para el controlador que pueda evitar una traza en la cual se satisface infinitamente las asunciones, pero no satisface infinitamente a todos los objetivos.

Algorithm 1 para resolver juegos SGR(1)

```

1: procedure SOLVEGAME(GAME=(STATES,TRANSITIONS),SAFE,GUARANTEES,ASSUMPTIONS)
2:   Inicialización:
3:   for state : states do
4:     for g : guarantees do
5:        $rank_g(state) \leftarrow (0,1)$ 
6:   Queue pending
7:   for state : states do
8:     if  $\exists g : guarantees / state \notin g \wedge state \in assume_1$  then
9:       pending.push(pair(state,g))
10:    if  $\Gamma^-(state) = \emptyset \wedge \Gamma^+(state) = \emptyset$  then
11:      for g : guarantees do
12:         $rank_g(state) \leftarrow \infty$ 
13:        pending.push(unstable_pred(state,g))
14:   Estabilización:
15:   while !pending.empty() do
16:     (state,g)  $\leftarrow$  pending.pop()
17:     if  $rank_g(state) = \infty$  then
18:       continue
19:     if isStable( $rank_g(state)$ ) then
20:       continue
21:      $rank_g(state) \leftarrow inc(best(state,g),state,g)$ 
22:     pending.push(unstable_pred(state,g))

```

El algoritmo 1 computa un ranking estable en cada estado $s_g \in T$ si s_g es ganador para el controlador (es decir, $R_1(t) < \infty$). Conceptualmente, podemos separar el algoritmo en dos grandes instancias, inicialización y estabilización. El valor inicial del ranking para cada estado en el juego, junto a la cola de estados *pending* para ser procesados, se crean en la etapa de inicialización. Agregaremos un estado a *pending* si no satisface ningún objetivo

y satisface las asunciones. Todos los estados en cada función de ranking son inicializados con el valor $(0, 1)$. Este valor indica el menor ranking posible. Los estados que cumplen que $\Gamma^- \cup \Gamma^+ = \emptyset$ serán inicializados con el valor ∞ . De esta manera, los estados cuyos rankings son ∞ son aquellos donde no se satisface ρ o son estados de *deadlock* en E .

La sección de estabilización es un iteración de punto fijo sobre la cola *pending* hasta que se vacía. La función `is_stable(state, g)` devuelve `true` si la g -ésima función de ranking es estable para `state`.

La función `unstable_pred(state, g)` devuelve un conjunto de pares de predecesores de `state` y un ranking g para el cual el ranking es inestable.

La función `best(state, g)` devuelve el mejor ranking basado en sus sucesores. Para eso utiliza la siguiente función $sr : S_g \rightarrow (\mathbb{N} \times \{1, \dots, n\} \cup \{\infty\})$. Esta función también codifica el hecho de que los estados de deadlock tienen ranking ∞ . Además, notemos que usa un orden lexicográfico para los objetivos. Dado un estado s_g y un objetivo γ_j , $sr(s_g, j)$ está definida de la siguiente manera:

- ★ Si $\Gamma^+(s_g) \cup \Gamma^-(s_g) = \emptyset$, entonces $sr(s_g, j) = \infty$, caso contrario,
- ★ si s_g es controlable y $s_g \in \gamma_j$, entonces $sr(s_g, j) = \min_{s'_g \in \Gamma^+(s_g)} R_{j \oplus 1}(s'_g)$.
- ★ si s_g es controlable y $s_g \notin \gamma_j$, entonces $sr(s_g, j) = \min_{s'_g \in \Gamma^+(s_g)} R_j(s'_g)$.
- ★ si s_g es no controlable y $s_g \in \gamma_j$, entonces $sr(s_g, j) = \max_{s'_g \in \Gamma^-(s_g)} R_{j \oplus 1}(s'_g)$.
- ★ si s_g es no controlable y $s_g \notin \gamma_j$, entonces $sr(s_g, j) = \max_{s'_g \in \Gamma^-(s_g)} R_j(s'_g)$.

Por último, `inc((k, l), state, g)` devuelve $(0, 1)$ si `state` está en γ_g , devuelve (k, l) si `state` no está en $assumption_\ell$, y devuelve el mínimo valor mayor que (k, l) en el resto de los casos. Notemos que `inc(∞ , state, g)` es ∞ , y si $n = \max_\ell(|\phi_\ell - (\gamma_g)|)$ y `state` está en $\phi_m - \gamma_g$ entonces `inc((n, m), state, g)` es ∞ . Este algoritmo calcula el mínimo ranking estable. Basados en ideas del mundo de autómatas de büchi [EWS05, JP06b], este algoritmo puede ser implementado en $O(m \cdot n \cdot |S|^2)$.

2.7. Procesos de estados Finitos (Finite State Process)

A esta altura, ya hemos definido las LTSs definiendo sus componentes, como lo son, sus estados, sus acciones, sus transiciones y su estado inicial. Esta representación es adecuada para LTSs con pocos estados, pero se vuelve muy poco práctica a la hora de trabajar con LTSs de gran tamaño. Por esta razón, usamos una simple notación de álgebra de procesos llamada procesos de estados finitos (FSP: Finite State Process) para especificar LTSs. [MKG97, MK99]

El FSP es un lenguaje de especificación de semántica bien definida en términos de (LTSs) que provee describirlos de manera concisa. Cada expresión FSP E puede ser relacionada a un LTS finito. Notaremos $lts(E)$ al LTS que corresponde a dicho FSP. A continuación discutiremos detalladamente la sintaxis del FSP.

A modo de ejemplo, en la figura 2.2, mostramos un código FSP que representa el funcionamiento de una planta nuclear.

En FSP, los nombres de los procesos empiezan con letras mayúsculas y las acciones con minúsculas. El código de la planta nuclear consta de dos procesos FPS, el primero, llamado **MAINTENANCE** modela el proceso de enviar un mensaje para que se realice el mantenimiento de la bomba refrigeradora y recibe la respuesta de dicho mensaje. Estas acciones se representan con la acción **request** y **ok** respectivamente. Por otro lado, tenemos el proceso **COOLER** que posee como procesos auxiliares a los subprocesos **STARTED** y **STOPPED** que son locales al proceso FSP en donde están definidas. **COOLER** está definida para que inicialmente se comporte como **STARTED** puesto que queremos modelar que la bomba en estado inicial esta prendida. Luego, podemos ejecutar diferentes acciones, **stopPump**, **procedure** y **ok**. **STARTED** está definido usando el operador de acción \rightarrow y recursión. Por ejemplo, dicho proceso está definido para empezar ejecutando, o bien **procedure** o **ok**, acciones que nos llevan a seguir ejecutando como el proceso **STARTED** indica, o **stopPump** que nos llevará a ejecutar el proceso **STOPPED**.

A su vez, los FSP soportan distintos operadores de composición como la composición en paralelo. Dicha operación, denotada como $||$, esta definida para preservar la semántica de la composición en paralelo de los LTS definidos en la definición 2.2.2. Por lo tanto,

```

MAINTENANCE = (request->ok->MAINTENANCE) .

COOLER = STARTED,
STARTED = (stopPump->STOPPED | procedure->STARTED |
           ok->STARTED) ,
STOPPED = (startPump->STARTED | procedure->STOPPED |
           ok->STOPPED) .

||COOLING_TOWER = (MAINTENANCE||COOLER) .

```

Fig. 2.2: Ejemplo FSP

dados dos procesos FSP P y Q , tenemos: $\text{ltts}(P||Q) = \text{ltts}(P)||\text{ltts}(Q)$.

En procesos FSP que están definidos mediante una composición de dos procesos no auxiliares, son llamados procesos compuestos y sus nombres poseen el prefijo $||$. En nuestro ejemplo, la composición en paralelo entre los procesos FSP **MAINTENANCE** y **COOLER** se escribe como **||COOLING_TOWER = (MAINTENANCE||COOLER)**.

Además, FSP posee palabras reservadas que se colocan antes de la definición de un proceso que fuerzan a la herramienta MTSA a realizar una operación mas compleja al proceso. Un caso de estos, es la palabra reservada **minimal**, la cual, hace que MTSA construya un LTS minimal que respeta la semántica equivalente o la palabra reservada **deterministic**, que construye un LTS minimal con respecto a las trazas.

FSP también permite definir propiedades FLTL. Un flujo que marca aquellos estados donde la bomba esta apagada puede ser expresada en lenguaje FSP mediante el siguiente código: **fluent IsStopped = <stopPump,startPump> initially 0**. Como dijimos anteriormente, la bomba empieza encendida, por lo tanto IsStopped es inicialmente falso, pasa a ser verdadero cuando sucede la acción **stopPump** y falso nuevamente cuando la acción **startPump** sucede.

Finalizando, FSP nos otorga facilidad para especificar LTSs y FLTL formulas. Este lenguaje es el que utilizaremos en los siguiente capítulos para definir modelos que representan ambientes y objetivos.

3. MTSA COMO HERRAMIENTA DE MODELADO Y SÍNTESIS

En el marco de este trabajo se hace uso de la herramienta MTSA tanto para el modelado de los procesos del sistema como para la síntesis de un controlador que, al ser compuesto con el entorno, permita satisfacer los objetivos. En el siguiente capítulo se describe la extensión de la herramienta para permitir ejecutar el controlador sintetizado en el entorno físico. Utilizaremos sistemas LTS para modelar las distintas entidades.

3.1. Construcción

En MTSA, los modelos son definidos mediante una extensión del lenguaje de Procesos de estados finitos (FSP). Dicho lenguaje es un lenguaje textual centrado en la construcción composicional de modelos complejos que originalmente fue usado para describir LTSs.

FSP incluye varios operadores tradicionales para describir modelos de comportamiento, de los cuales destacaremos el prefijo de acción (\rightarrow), elección ($|$), composición secuencial ($;$), composición paralela ($||$) y mezcla. La semántica de la mezcla es tal que dada dos descripciones parciales del mismo componente, el operador de mezcla devuelve una LTS que combina la información provista por las descripciones parciales originales.

Es necesario destacar que construir los modelos que son compuestos sigue siendo una tarea difícil que requiere de un intenso trabajo y un grado considerable de experiencia. Para mitigar este problema, MTSA también provee la funcionalidad que permite sintetizar modelos de comportamiento de forma automática a partir de especificaciones declarativas de los requerimientos, escenarios y casos de uso.

POR AHORA HASTA ACA ESTA BIEN

3.2. Análisis

Habiendo construido una aproximación inicial del comportamiento esperado del sistema, el análisis pasa a ser una tarea crucial que puede brindar información del dominio tanto del problema como de la solución, aumentando la confianza que se tiene de la adecuación y correctitud del software y llama a proseguir la elaboración del modelo parcial.

MTSA soporta varios tipos de análisis, el más básico involucra la inspección de modelos LTS y está soportado a través de la construcción automática de representaciones visuales de los modelos LTS escritos usando FSP. Esta inspección queda sujeta al tamaño del modelo, limitación tal que puede mitigarse haciendo uso de los operadores de minimización y ocultamiento.

Aunque la inspección y animación no permiten una exploración exhaustiva de los modelos LTS, MTSA implementa un número de técnicas de análisis automáticas para éste propósito. En particular, MTSA permite verificar si un modelo LTS satisface una propiedad expresada en FLTL. Un modelo LTS caracteriza un conjunto de implementaciones, de las cuales algunas pueden satisfacer la propiedad siendo verificada y algunas pueden violarla. Por este motivo MTSA automáticamente verifica una relación de satisfactibilidad trivaluada entre el modelo LTS y una fórmula FLTL. Mientras que un Modelo LTS M puede caracterizar a un conjunto extremadamente grande, potencialmente infinito, de implementaciones, verificar una propiedad en M con *emphmodel checking* se reduce a dos verificaciones tradicionales de FLTL. Finalmente, MTSA permite verificar si un modelo es libre de *deadlocks*. Al igual que en el caso de *model checking* para propiedades FLTL, el resultado de esta verificación tiene uno de tres valores: o bien todas las implementaciones exhiben *deadlocks*, o bien todas son libres de *deadlocks* o bien hay una combinación de implementaciones que exhiben *deadlocks* y otras que no.

3.3. Modelando objetivos para controladores actualizables

Agregamos un conjunto de palabras reservadas a FSP para poder soportar objetivos actualizables. En la figura ?? mostramos el código FSP necesario para síntesis de contro-

ladores actualizables para el ejemplo del reactor nuclear presentado en la sección ??.

El operador **updatingController** devuelve, si existe, un controlador que satisface una especificación acerca de los nuevos requerimientos. Necesitamos en esta declaración, además de los nuevos requerimientos, suministrar la información necesaria acerca de cual es el controlador actual, el modelo del ambiente actual, el modelo del ambiente nuevo y un conjunto de pares de flujos donde cada elemento indicará correspondencia de estados del ambiente actual al ambiente nuevo como dijimos en la sección ?. Por ejemplo, en la figura ? podemos observar que al usar la palabra reservada **updatingController** configuramos BLA1 como el controlador actual, BLA2 como modelo del ambiente actual, BLA3 como modelo del ambiente nuevo, **UpdateSpec** como la nueva especificación y $\{\{\mathbf{RequestPending}, \mathbf{RequestPending}\}, \{\mathbf{IsStopped}, \mathbf{IsStopped}\}\}$ es el conjunto de flujos.

Los objetivos nuevos están definidos mediante el operador **controllerSpec**. La palabra reservada **safety** permite definir requerimientos de seguridad (*safety*). Aquí incluiremos las formulas LTL descritas en la sección ?.

La seccion de *liveness* esta definida ...

4. PROBLEMA DE ACTUALIZACIÓN DE CONTROLADORES DINÁMICAMENTE

En este capítulo explicaremos primero como la actualización dinámica de controladores está formalmente especificada, luego como dicha especificación es convertida a un problema de síntesis de controladores. Por último, detallaremos como este problema de síntesis de controladores se resuelve.

4.1. Especificación

En capítulos anteriores mostramos ejemplos en los cuales nos referíamos a la actual y nueva especificación como entidades monolíticas (las llamaremos S y S' respectivamente). Sin embargo, para presentar la actualización dinámica de controladores como un problema de control asumiremos que la especificación S esta dividida en tres partes. La primera es la descripción de la interfaz del controlador dada como un conjunto de etiquetas A que representa las acciones controlables del controlador. La segunda es una descripción operacional E , en forma de LTS, que describe el comportamiento del ambiente en cuanto a acciones controlables y monitoriables. La tercera son los objetivos del controlador G , expresado como una formula FLTL.

Tenga en cuenta que como el estado inicial de E' depende el estado actual de E , el ingeniero debe proveer un mapeo de estados M de E a E' . Omitiremos referirnos a M hasta que lleguemos a la sección donde formalizaremos todos estos conceptos para mantener la presentación simple

En consecuencia, el problema general que apuntamos a resolver puede ser planteado de la siguiente manera: Ejecutar un sistema adaptable mediante un controlador C que controla un conjunto de acciones A y a su vez satisface los objetivos G para un ambiente E . El usuario desea cambiar dinámicamente el controlador que se esta ejecutando para empezar a satisfacer el nuevo objetivo G' en el nuevo ambiente E' controlando un conjunto

de acciones A' y a su vez satisfacer los requerimientos de transición T .

METER ALGÚN EJEMPLO

Los modelos de los ambientes E y E' pueden ser contruidos mediante la composición paralela de varios modelos LTSs que describen diferentes aspectos del comportamiento del ambiente. Por ejemplo podríamos definir una LTS que describa el comportamiento de un tren que va atravesando distintas secciones de una vía. Por otro lado, tenemos otra LTS que describe la comunicación que el tren realiza con la barrera electrónica para identificar si está habilitado para cruzar. Para definir por completo el ambiente, necesitamos componer en paralelo ambas LTS. El comportamiento del ambiente por completo puede verse en la sección de casos de estudio.

NECESITO EL EJEMPLO

4.2. La actualización dinámica de controladores como un problema de síntesis de controladores

Una primera aproximación intuitiva para implementar la actualización de controladores dinámicamente puede ser construyendo dos controladores adicionales al controlador actual C . El primero es un controlador C' que puede satisfacer los objetivos G' para el nuevo ambiente E' controlando acciones A' . El segundo es un “controlador de transición” C^* que controla el traspaso del controlador actual C al nuevo controlador C' satisfaciendo los requerimientos de transición T .

Si bien es conceptualmente elegante, el enfoque de los tres controladores es ingenuo ya que estos controladores están intrínsecamente relacionados. La nueva especificación solo puede ser alcanzada por un controlador C' desde estados específicos ($I_{C'}$). Estos estados iniciales de C' necesitan ser calculados y considerados como estados finales del “controlador de transición” C^* . Luego, los estados desde donde el “controlador de transición” puede alcanzar $I_{C'}$ necesitan ser computados (I_{C^*}). Finalmente, nos queda analizar si C puede ser extendido para garantizar que alcance algún estado en I_{C^*} sin violar sus objetivos (G).

La interacción entre estos tres controladores y la necesidad de generar una técnica para

computar C' y C^* puede ser obtenida mediante la resolución de un problema de control que produce un solo controlador (el cual vamos a llamar C_u) que ejecuta acciones simulando las tres faces, primero simulando a C , luego a C^* y finalmente a C' . Ahora pasaremos a explicar como la actualización de controladores dinámica puede ser expresada como un problema de control que abarca estas tres fases.

El problema de control para la actualización de controladores dinámicos, como cualquier otro problema de control, necesita de un modelo del ambiente, el cual llamaremos E_u , un objetivo, el cual llamaremos G_u , y un conjunto de acciones, A_u . El objetivo G_u , lo definiremos en términos de G , G' y T mas los eventos *stopOldSpec*, *startNewSpec* y *beginUpdate*. El ambiente E_u estará definido en base a E , E' y C . El conjunto de acciones A_u estará definido en base a A y A' .

4.2.1. El objetivo del problema de control

La formalización del objetivo para la actualización de controladores dinámicamente, G_u , puede ser formalizado como una conjunción de las siguientes formulas FLTL.

Definición 4.2.1. (*Objetivo para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente*) Sean $\Box G$ y $\Box G'$ los objetivos actuales y los nuevos para un escenario de actualización de controladores dinámicamente, donde G y G' son una combinación Booleana de flujos y T es una propiedad de safety. Definimos a G_u , el objetivo para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente como la conjunción de las siguientes fórmulas FLTL:

1. $\Box(G \text{ } W \text{ } stopOldSpec)$
2. $\Box(startNewSpec \implies G')$
3. $\Box T$
4. $\Box(beginUpdate \implies \Diamond startNewSpec)$
5. $\Box(beginUpdate \implies \Diamond stopOldSpec)$

La primer fórmula requiere que el objetivos viejo G valga hasta que el controlador active la señal *stopOldSpec*. Tenga en cuenta que esta propiedad de manera aislada significa que la especificación vieja, cualquiera sean su estado, puede dejar de valer en cualquier momento. Esto no es lo deseado para una actualización dinámica, por lo tanto debemos

restringirlo en la especificación de transición (T).

La segunda fórmula simplemente requiere que la nueva especificación empiece a valer desde el momento en que el controlador active la señal *startNewSpec*. Esto forzará al controlador a que solo produzca esta señal cuando puede asegurar G' .

La tercera fórmula indica que los requerimientos de transición deben valer siempre. Restringimos T a que sea una propiedad de seguridad (*safety*). T es esperado que predique sobre eventos *stopOldSpec* y *startNewSpec* para poder restringir el comportamiento del sistema cuando ni G ni G' valen. Un enfoque mas preciso sería requerir que T solo valga entre ambos eventos, esto seria $\Box inTransition \implies T$ donde $inTransition = \langle \{stopOldSpec\}, \{startNewSpec\}, \perp \rangle$. Esta idea es muy restrictiva ya que los requerimientos de transición pueden necesitar referirse a situaciones que suceden antes que la especificación vieja deje de valer. Por ejemplo COMPLETAR ACA CON UN EJEMPLO: a photograph taken before *stopOldSpec* that was not processed before *stopOldSpec* or after *startNewSpec* ...

Finalmente, las ultimas dos fórmulas requiere que el controlador luego de ejecutar la acción *beginUpdate*, continúe con el procedimiento y garantice que los eventos *stopOldSpec* y *startNewSpec* sucedan.

4.2.2. Modelo del ambiente del problema de control

El modelo del ambiente E_u para la actualización de controladores dinámicamente debe ser construido para cubrir las tres fases del controlador a ser sintetizado: el ambiente para la especificación vieja, el ambiente para la nueva especificación, y el ambiente para la transición. A grandes rasgos, esto significa definir a E_u para que sea una combinación de E y E' más el agregado de transiciones para los eventos *beginUpdate*, *stopOldSpec* y *startNewSpec*. Por otro lado, hay dos problemas que debemos tener en cuenta cuidadosamente a la hora de definir formalmente E_u .

El primer concepto clave que debemos considerar en la construcción de E_u esta relacionado en buscar un ambiente que permita un hot-swap transparente del controlador actual con el obtenido por la síntesis. Necesitamos que la actualización del controlador sea estructuralmente idéntico al controlador actual hasta que la acción *beginUpdate* su-

ceda. Este requerimiento es crucial para lograr establecer un mapeo de estados desde el controlador actual a los estados de controlador actualizable. Esto hace que sea trivial que debemos establecer el estado inicial del nuevo controlador basándonos en el estado actual del controlador viejo, y luego intercambiar controladores durante la ejecución sin perder información del estado. De esta manera, el nuevo controlador va a continuar ejecutando exactamente de la misma manera que como lo hacía el viejo hasta el momento que se inicie el proceso de actualización.

Para lograr esta propiedad en el controlador de actualización definiremos su ambiente en su parte inicial como la composición paralela del controlador viejo y su ambiente (es decir $E||C$). Esto apunta a construir un controlador actualizable que inicialmente ejecutará en un ambiente que ya esta siendo controlado por C . Tenga en cuenta que como no queremos que la actualización se interponga con C antes que *beginUpdate* suceda, vamos a asegurar que en esta fase el controlador actualizable no controle nada, solo monitorea lo que sucede.

Es cuando *beginUpdate* sucede, que el controlador actualizable debe empezar a tomar medidas e intentar garantizar la transición correcta para satisfacer la nueva especificación. Es decir que luego de que la actualización es solicitada necesitamos deshabilitar C y por lo tanto, cambiar de fase del ambiente.

Entonces, el ambiente E_u es construido para ser como $E||C$ y luego, cuando *beginUpdate* sucede, empezará a comportarse como E hasta que la nueva especificación se pueda cumplir, momento en el cual E_u se comportará como E' .

El segundo problema que debemos manejar en la construcción de E_u está relacionado con preservar el estado el estado del ambiente cuando cambia desde E a E' .

Consider, the moment in which... EJEMPLO

El mapeo desde estados de E a E' puede ser definido de varias maneras, solo necesitamos que todos los estados de E tengan al menos un estado correspondiente en E' . Tenga en cuenta que permitimos sub-especificar la correspondencia de estados de E' permitiendo, por ejemplo, una evolución no determinística desde un estado cuyo valor de batería es $\neg LowBattery$ a un estado donde el valor es *MidBattery* o $\neg HighBattery$. Durante este capítulo vamos a asumir una relación de mapping $M \subset S_E \times S_{E'}$ que cubre a todos S_E . En la herramienta que desarrollamos (ver ??), por conveniencia, definimos el mapeo

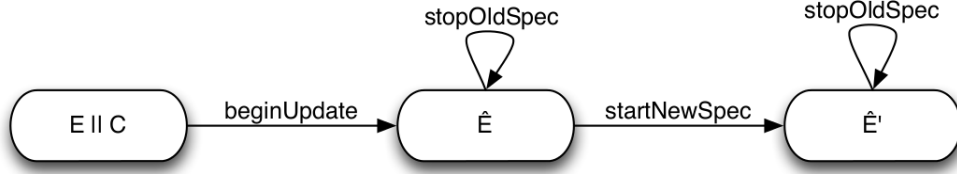


Fig. 4.1: Representación gráfica del ambiente E_u para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente - \hat{E} es E con la diferencia de que su estado inicial es el estado actual de E en $E||C$. \hat{E}' es E' con la diferencia de que su estado inicial es alguno de los estados relacionados en M con el estado actual de E .

naturalmente sobre definiciones de flujos: un estado E esta mapeado a todos los estados de E' que preservan el valor de flujos.

Ahora definiremos formalmente el ambiente E_u para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente:

Definición 4.2.2. (Ambiente para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente) Sean C el controlador actual, A , E y G la especificación actual y A' , E' y G' la especificación nueva para el problema de control de actualización, donde $E = (S_E, A_E, \Delta_E, s_{E_0})$ y $E' = (S_{E'}, A_{E'}, \Delta_{E'}, s_{E'_0})$. Además, sea $M \subset S_E \times S_{E'}$ un mapeo de estados tal que para todo $s \in S_E$ existe un estado $s' \in S_{E'}$. El ambiente para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente (E_u) es un LTS $(S_u, A_u, \Delta_u, s_u)$ tal que E_u es una unión disjunta de estados en $E||C$, E y E' (i.e. $E_u = S_{E||C} \uplus S_E \uplus S_{E'}$), $s_u = s_{E||C}$, $A_u = A_E \cup A_{E'} \uplus \bar{\ell} | \ell \in A$ y Δ_u es la relación mas pequeña que satisface las reglas que siguen a continuación donde $\ell \in A_u$:

- [1] si $(s, \ell, s') \in \Delta_{E||C} \wedge \ell \notin A$ entonces $(s, \ell, s') \in \Delta_u$
- [2] si $(s, \ell, s') \in \Delta_{E||C} \wedge \ell \in A$ entonces $(s, \bar{\ell}, s') \in \Delta_u$
- [3] si $(s, t) \in S_{E||C}$ entonces $((s, t), \text{beginUpdate}, s) \in \Delta_u$
- [4] si $(s, \ell, s') \in \Delta_E$ entonces $(s, \ell, s') \in \Delta_u$
- [5] si $s \in \Delta_E$ entonces $(s, \text{stopOldSpec}, s) \in \Delta_u$
- [6] si $s \in \Delta_{E'}$ entonces $(s, \text{stopOldSpec}, s) \in \Delta_u$
- [7] si $(s, s') \in M$ entonces $(s, \text{startNewSpec}, s') \in \Delta_u$
- [8] si $(s, \ell, s') \in \Delta_{E'}$ entonces $(s, \ell, s') \in \Delta_u$

Una representación gráfica informal de E_u esta representado en la figura 4.1

Las definiciones anteriores construyen a E_u para comportarse exactamente igual a $E||C$

(ver reglas 1 y 2) hasta que sucede *beginUpdate*. La regla 2 simplemente renombra acciones controladas de C para impedir que el controlador de actualización las controle. Juntas, ambas reglas permiten intercambiar C por C_u mientras aseguramos que C_u continua ejecutando exactamente de la misma manera que C . Una vez que *beginUpdate* se efectúa (regla 3), el ambiente se comporta como E (regla 4). Es justo en este momento que el nuevo controlador tendrá que mantener la vieja especificación pero forzándolo a llegar a un estado desde el cual los requerimientos de transición puedan ser satisfechos y luego alcanzar la nueva especificación. En cualquier momento el controlador puede efectuar la acción *stopOldSpec* (regla 5) e incluso *startNewSpec* (regla 7). En caso de que ya haya ocurrido la acción *startNewSpec*, el ambiente de actualización E_u se comporta como el nuevo ambiente E' (regla 8). Aunque como no forzamos que la vieja especificación deje de valer antes de que valga la nueva especificación, *stopOldSpec* puede ocurrir durante esta última fase (regla 6).

4.2.3. El problema de control de la actualización de controladores dinámicamente

Ahora podemos definir formalmente el problema de control que nos soluciona el escenario de la actualización de controladores dinámicamente.

El problema de control de la actualización de controladores dinámicamente puede ser visto como un problema de control de LTS usando un ambiente E_u como definimos en la definición 4.2.2, los objetivos G_u como definimos en la definición 4.2.1 y el conjunto de acciones controlables A_u definido como la unión de las acciones controlables entre A y A' . La única sutileza es que como E_u introduce cambios de nombres de acciones que son controladas por C en la primera fase ($E\|C$), estos cambios deben ser revertidos una vez computado el controlador de actualización (reemplazar las acciones $\bar{\ell}$ por ℓ). Recordar que el cambio de nombre es realizado para asegurar que el controlador de actualización, cuando se esta generando, no considere a las acciones de $E\|C$ como controlables hasta que suceda *beginUpdate*. Una vez computado, mientras el controlador de actualización es ejecutado las acciones deben ser revertidas a su nombre original.

Definición 4.2.3. (*El problema de control de la actualización de controladores dinámicamente*)

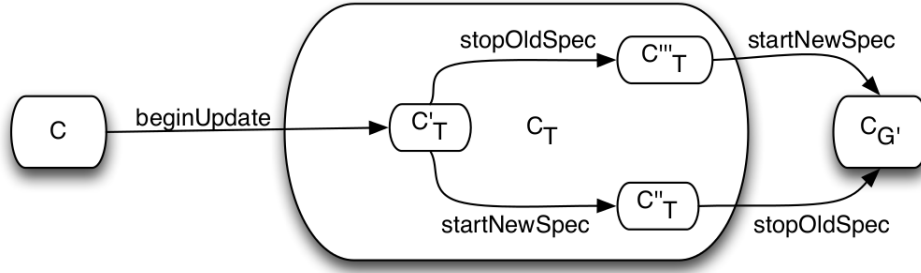


Fig. 4.2: Abstracción informal de un controlador C_u para el problema de control de la actualización de controladores dinámicamente - C_T representa el comportamiento que satisface T mientras que garantiza eventualmente tanto $stopOldSpec$ como $startNewSpec$, mientras que $C_{G'}$ representa el comportamiento del controlador que satisface G' .

camente) Sean G y G' expresiones de flujos sin expresiones temporales. Sea E un LTS y sea la formula FLTL $\Box G$ la especificación actual que el sistema esta satisfaciendo tras ejecutar el LTS C , controlador que controla las acciones en A . Sea E' un LTS, la formula FLTL $\Box G'$ y un conjunto de acciones controlables A' la nueva especificación que es esperada satisfacer con la actualización dinámica del controlador del sistema.

C_u es una solución al problema de control de actualización de controladores dinámicamente si C_u es el resultado de renombrar toda acción $\bar{\ell}$ por ℓ en el controlador \bar{C} que es una solución la problema de control LTS $\langle E_u, G_u, A_u \rangle$ donde E_u esta definido en la definición 4.2.2, G_u esta definido en la definición 4.2.1 y $A_u = A \cup A'$

Por definición, cualquier solución del problema de control de la actualización de controladores dinámicamente satisfecerá a G_u asumiendo que el ambiente se comporta como E_u . La validez de las asunciones de E_u dependen en la validez de las especificaciones actuales y nuevas, E y E' , que son responsabilidad del ingeniero, y que la infraestructura de ejecución del controlador va a dinámicamente cargar cualquier nueva habilidad descrita en E' cuando la señal $startNewSpec$ suceda.

Un controlador que es solución del problema definido recientemente tomará, informalmente, la estructura descrita en la figura 4.2. Primero va a comportarse como C excepto que aceptará en cualquier momento que la acción no controlable $beginUpdate$ suceda. Luego, se comportará como un controlador que esta intentando realizar las acciones

stopOldSpec y *startNewSpec* mientras satisface la propiedad T . Finalmente, una vez que la acción *startNewSpec* ha ocurrido se comportará como un controlador que satisface G' .

4.3. Resolviendo el problema de actualización dinámica de controladores

Resolver un problema de control LTS (como el definido en la definición 2.4.1 en el capítulo 2) por cada propiedad FLTL es 2EXPTIME complete [PR89]. El problema de actualización dinámica de controladores es una instancia específica del problema de control LTS general. En efecto, dada la estructura de G_u , su resolución puede ser computada bajo límites de menor complejidad.

Bajo la asunción de que G , G' y T son propiedades de seguridad, G_u puede ser codificado como propiedades de obligación (por ejemplo disyunciones de afirmaciones de seguridad y alcanzabilidad, $\bigwedge_{i=1}^n (\Box I_i \vee \Diamond R_i)$). Los problemas de control LTS con objetivos de obligación pueden ser resueltos en tiempo lineal para modelos de ambientes determinísticos. Para ambientes no determinísticos, un especializado subconjunto de construcciones pueden usarse para producir versiones determinísticas, sin embargo, podría crecer exponencialmente dependiendo del grado de no determinismo que exista.

Es simple de ver que el objetivo del problema de control de actualización dinámica de controladores, G_u , puede ser reformulado como afirmaciones de obligación. Las formulas 1) a 3) en definición 4.2.1 son propiedades de seguridad (tenga en cuenta que W es un “weak until” y por lo tanto es una propiedad de seguridad). Una propiedad de seguridad I_j puede simplemente ser codificada como $\Box I_j \vee \Diamond \perp$. Las otras dos formulas de la definición 4.2.1 son de la forma $\Box(p \implies \Diamond q)$ y pueden ser codificadas como $\Box \neg \text{UpdateBegan} \vee \Diamond(\text{UpdateBegan} \wedge \text{NewSpecStarted})$ y $\Box \neg \text{UpdateBegan} \vee \Diamond(\text{UpdateBegan} \wedge \text{OldSpecStopped})$ donde los flujos *NewSpecStarted*, *OldSpecStopped* y *UpdateBegan* modelan que sus respectivos eventos han sucedido alguna vez en el pasado. Formalmente estarían definidos como $\langle \text{startNewSpec}, \emptyset, \perp \rangle$, $\langle \text{stopOldSpec}, \emptyset, \perp \rangle$ y $\langle \text{beginUpdate}, \emptyset, \perp \rangle$.

El problema de control de la actualización dinámica de controladores puede tener o no una solución. La existencia de la esta solución significa que el controlador resultante C_u

garantiza que: se comporte inicialmente como el controlador actual C bajo la especificación del ambiente actual E y acepta en cualquier punto el comando *beginUpdate*; asegura una transición correcta, satisfaciendo T , preservando el objetivo viejo G y conduciendo al sistema a un punto en el cual (*startNewSpec*) el nuevo ambiente E' puede ser reemplazado y el nuevo objetivo G' puede ser garantizado.

La no existencia de una solución a este problema de control puede significar dos posibles escenarios. El primero es que el nuevo objetivo bajo las asunciones del nuevo ambiente no puede ser alcanzados por el controlador (esto es, el problema de control definido por E' y $\Box G'$ no tiene solución para ningún estado inicial de E'). Esta es una situación extrema donde el controlador tiene poco por hacer con la actualización que se le pide. El segundo, asumiendo que el problema de control definido por E' y $\Box G'$ tiene solución para algunos estados de E' , no es solo que la transición de una especificación a la otra no pueda satisfacer la propiedad T , sino que también puede suceder que sea imposible alcanzar un estado de E' desde el cual G' valga. Este segundo escenario puede producirse, por ejemplo, porque el requerimiento de transición T es excesivamente restrictiva o porque el controlador tiene capacidades insuficientes para asegurar alcanzar un estado desde el cual el nuevo ambiente puede garantizar la validez del nuevo objetivo. Mas generalmente, tendremos el problema cuando tenemos una combinación de especificaciones muy estrictas (E , G , E' , G' y T) y falta de control del controlador sobre los eventos del ambiente. En el capítulo 5 discutiremos las causas de no poder resolver el problema de actualización dinámica de controladores para algunos ejemplos específicos.

5. VALIDACIÓN

En este capítulo reportaremos los casos de estudio que corrimos para validar nuestro enfoque. El propósito de los casos de estudio es mostrar la aplicación del enfoque mediante la resolución de casos de estudios tomados de trabajos previos y a su vez, seguir analizando las virtudes y defectos de los trabajos previos existentes de actualización dinámica de controladores.

Según nuestro conocimiento, el primer y único trabajo que investiga sobre actualización dinámica de controladores donde hay un cambio de especificación explícito es en Ghezzi et al. [GGM12]. Ellos adoptan un criterio general, natural y correcto. Una actualización dinámica es correcta si el comportamiento exhibido por el sistema es equivalente al obtenido luego de una actualización apagando la máquina. Esto relaja el esfuerzo del ingeniero al no tener que especificar requerimientos de transición (como en nuestro trabajo) pero con el costo de limitar posibles actualizaciones que pueden ser soportadas. Como en [GGM12], permitimos especificaciones solapadas (ver figura 5.1); pero también permitimos periodos en los que ninguna especificación vale a diferencia de [GGM12] (ver figura 5.2).

Es posible obtener el comportamiento de actualización obtenido en [GGM12] especificando como parte del requerimiento de transición T que *startNewSpec* pueda ocurrir si la nueva especificación vale desde el último estado inicial antes de *beginUpdate* (ver la imagen de abajo de la figura 5.3) o tan pronto como el estado inicial es alcanzado nuevamente (ver la imagen de arriba de la figura 5.3). Esto, podemos formalizarlo de la siguiente

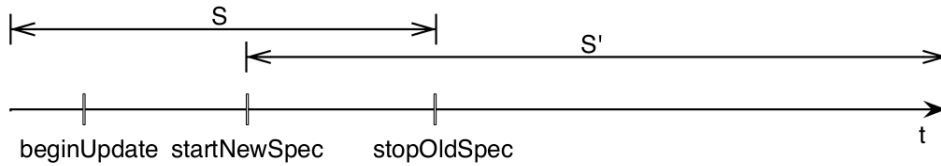


Fig. 5.1: Abstracción de la línea de tiempo de la actualización dinámica de controladores. Escenario en el cual la nueva especificación está garantizada antes de que la vieja especificación deje de valer.

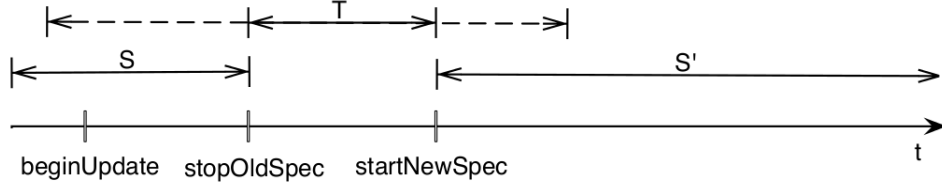


Fig. 5.2: Abstracción de la línea de tiempo de la actualización dinámica de controladores. Escenario en el cual hay un periodo donde ni la vieja, ni la nueva especificación vale.

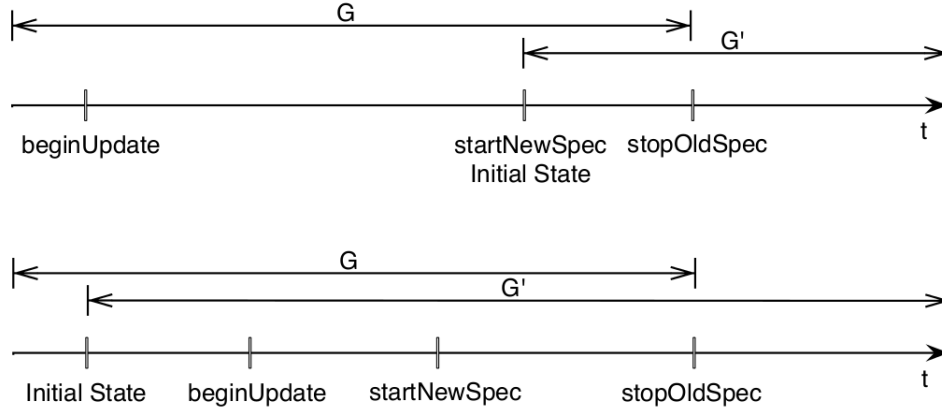


Fig. 5.3: Relación de eventos relevantes en la actualización de controladores dinámicamente para estados actualizables según [GGM12]

manera:

$$\Box[(LastInitBeforeUpdate \wedge G' \ W \ startNewSpec) \vee (startNewSpec \implies Init)] \quad (5.1)$$

donde $LastInitBeforeUpdate = Init \wedge \bigcirc(\neg Init \ W \ beginUpdate)$ y $Init$ representa estar en un estado inicial de C .

En [PLMGGB13], tres criterios de actualización mas débiles son introducidos para permitir actualizaciones en sistemas donde el estado inicial no es visitado nuevamente. Por ejemplo, la noción de estados co-inicial (estados que son similares al estado inicial), expande las situaciones en las cuales la actualización es permitida. De todos modos, no hay garantías, para ninguno de los nuevos criterios, que el criterio correcto original si tiene. La falta de garantías requiere de un ingeniero que valide el controlador resultante. En nuestro trabajo, involucramos a un ingeniero capacitado y habilitado para proveer una especificación de un criterio correcto para la actualización (T).

5.1. Casos de Estudio

Configuración experimental

Todos los casos de estudios se ejecutan usando una extensión de la herramienta MTSA [DFCU08] que nos da soporte para especificar LTSs y propiedades, usando una notación textual, álgebra de procesos y FLTL. La herramienta también nos da soporte para síntesis de controladores para problemas de control SGR(1), los cuales son estrictamente mas caros de lo que es requerido para problemas de control en la actualización de controladores dinámicamente. La herramienta fue extendida para automáticamente computar A_u , G_u y E_u , y resuelve el problema de control de la actualización dinámica de controladores. La versión extendida de la herramienta y la especificación completa de todos los casos de estudio pueden verse en [].

5.1.1. Planta de energía nuclear

En [PLMGGB13] se analiza un controlador para un sistema de refrigeración de una planta de energía nuclear. El controlador actual debe ejecutar servicios de mantenimiento primero apagando la bomba que refrigera la planta y luego reiniciarla. El nuevo controlador no necesita parar la bomba y reiniciarla para efectuar el mantenimiento. Hay también un invariante del sistema que indica que la bomba de refrigeración no puede estar apagada indefinidamente (esto puede llevar a un accidente devastador).

Los autores muestran que si una actualización se lleva a cabo en un estado en donde el controlador actual tiene la bomba apagada, entonces el nuevo controlador puede no reiniciar la bomba, generando un accidente. Esto nos muestra dos problemas. Primero, que la forma segura de preservar el invariante del sistema es requerir que la actualización preserve el comportamiento como si el controlador actual haya sido reemplazado desde su estado inicial (cuando la bomba es reiniciada). Esto es lo que los autores aseguran en [GGM12]. Segundo, que las restricciones de cuándo una actualización de [GGM12] es suavizada como en [PLMGGB13] puede generar fallas y consecutivamente ellos recomiendan que “el diseño de controladores actualizables dinámicamente basados en el criterio débil

de actualización incluye una subsiguiente validación de los controladores”.

5.1.2. RailCab

El sistema de RailCab es un sistema mecatrónico que fue desarrollado en la Universidad de Paderborn [oP14] donde los vehículos autónomos deben coordinar de que manera transportar pasajeros o bienes cada vez que le es solicitado. El sistema que se discute en [GGM12] como caso de estudio base es controlar RailCabs cuando está acercándose a un cruce de vías. El RailCab puede monitorear eventos como *endOfSection* que determinan que esta entrando a un cruce de vía, y otros eventos que indican si esta habilitado para usar el freno o si tiene que utilizar el freno de emergencia, que los llamaremos *lastBrake* y *lastEmergencyBrake*. El RailCab controla el freno (*brake*) y el freno de emergencia (*emergencyBrake*) e incluso puede recibir respuestas a pedidos que controla como *requestPermissionToEnter*.

La especificación del controlador actual requiere que el RailCab entre al cruce de vías solo si se le ha garantizado el permiso para hacerlo. La especificación también describe varias asunciones de que la respuesta al pedido de permiso es contestada antes de que el RailCab llegue a la sección de *lastEmergencyBrake*, siempre y cuando, el pedido haya sido realizado antes de llegar a la zona de *lastBrake*. Como ejemplo de una nueva especificación, en [GGM12] discuten hacer un objetivo más fuerte requiriendo que el RailCab envíe otro pedido preguntando si las barreras están funcionando antes de entrar al cruce de vía. También refuerzan la hipótesis del ambiente en relación a cuando la respuesta a *checkBarrier* puede ser recibida.

5.1.3. Buscador UAV de vida salvaje

5.1.4. Production Cell

Consideramos varios escenarios de actualización para el caso de estudio de Production Cell presentado en [LL95]. El caso de estudio es sobre una fábrica que manufactura diferentes tipos de productos, donde cada uno de ellos, requiere un proceso de producción que involucra distintas aplicar distintas herramientas en diferentes ordenes. El sistema de

producción de la fábrica debería adaptar su proceso de producción al número de factores como la cantidad de herramientas disponibles, la especificación de como procesar cada tipo de producto, y otras restricciones como por ejemplo, un requerimiento de consumo de energía que restringe el uso concurrente de ciertas herramientas.

Ademas de las herramientas, la fábrica tiene una bandeja de entrada, una bandeja de salida y un brazo robótico. El brazo robótico es el encargado de mover los productos entre las herramientas y las bandejas. Los productos en crudo llegan a la bandeja de entrada, para que el brazo robótico controle cada producto respetando la especificación y colocando el producto final en la bandeja de salida.

5.1.5. ARDrone

El propósito de este caso de estudio fue experimentar la técnica de actualización dinámica más allá de la especificación y tareas de síntesis discutidos en los casos de estudio previos. El enfoque, entonces, de este caso es poder analizar un controlador resultante ejecutando dicha solución en una infraestructura de adaptación (enactment), tomando un dominio de aplicación específico. Usamos una infraestructura reportada en [BDP⁺13], para poder dinámicamente cargar un controlador en un ARDrone [Par14]. La especificación, tanto vieja como nueva, son simplificaciones del caso de estudio del Buscador UAV de vida salvaje (sección 5.1.3).

El caso de estudio incluye las acciones de despegar (*takeOff*), aterrizar (*land*), detectar marcas mediante la cámara onboard (*read*) y objetivos relacionados con las acciones que el drone ejecuta, obteniendo feedback de los leds onboard, cuando las marcas son leídas (*blink*). La diferencia entre especificación vieja y nueva es que al principio el robot debe parpadear al leer una marca x y luego de la actualización debe parpadear al leer una marca x' distinta a la original. Además, luego de la actualización tendremos un contador de batería que irá decrementando su valor a medida que el ARDrone ejecute acciones. El nivel de batería no debe agotarse nunca para satisfacer los objetivos, y para esto el robot puede ejecutar la acción *charge* la que pondrá dicho contador en su nivel más alto.

Por cada una de estas acciones, que son parte de la especificación, definimos una clase *Action* dentro de nuestro enactment framework para ejecutar implementaciones del

framework YaDrone [Ham14].

5.2. Resultados

En esta sección detallaremos los resultados obtenidos para cada caso de estudio planteado en la sección 5.1.5. Para comparar diferentes resultados obtenidos por el problema de control notaremos $Tr(C)$ como el conjunto de trazas del LTS C . Informalmente, una traza es una secuencia de acciones que un controlador puede realizar. Por lo tanto, dado dos controladores C_1, C_2 , si toda traza de C_1 está en $Tr(C_2)$ (i.e. $Tr(C_1) \subset Tr(C_2)$) podremos decir que el controlador C_2 tiene mas comportamiento que C_1 debido a que en el controlador C_2 puedo ejecutar todas las secuencias de acciones de C_1 y algunas más.

5.2.1. Planta de energía nuclear

Nosotros resolvemos tres diferentes problemas de control de actualización dinámica de controladores para este caso de estudio. El primero no tiene requerimientos para el período de transición entre la especificación vieja y la nueva (esto es, T configurado como *true*). El controlador obtenido (C_u^1) exhibe el comportamiento invalido descrito en [PLMGGB13], permitiendo una actualización mientras la bomba esta apagada, prendiendo la bomba durante la transición y permitiendo al nuevo controlador a nunca reiniciarla.

El segundo problema de control usa a T con el requerimiento genérico de [GGM12] (ver fórmula 5.1). El controlador resultante (C_u^2) evita la actualización mientras la bomba esta apagada, y por lo tanto, evita que el nuevo controlador deje la bomba apagada sin intención. De hecho, como se espera, este controlador exhibe estrictamente menos comportamiento que el controlador previo ($Tr(C_u^2) \subset Tr(C_u^1)$).

Finalmente, el tercer problema de control modela explícitamente el requerimiento de que la bomba no debería estar apagada continuamente (esto es, en realidad, un requerimiento de transición de aceptación büchi que puede ser manejado por nuestro enfoque sin problemas. Ver capítulo 6). El controlador resultante (C_u^3) no solo evita el escenario descrito en [PLMGGB13] y exhibe menos comportamiento que el primer controlador ($Tr(C_u^2) \subset Tr(C_u^1)$) sino que también provee más oportunidades de actualización que el

segundo controlador exhibiendo estrictamente más comportamiento ($Tr(C_u^2) \subset Tr(C_u^3)$).

En otras palabras, nuestra técnica provee un criterio más relajado para controladores actualizables con respecto a [GGM12] y que a su vez, es correcto por construcción ya que satisface los requerimientos de transición y además no necesita de una validación manual posterior como en [PLMGGB13].

5.2.2. RailCab

Como en el caso de estudio previo, resolvimos tres problemas de control de actualización dinámica distintos. El primero sin requerimientos para la transición entre la vieja especificación y la nueva (i.e. $T = true$). El controlador resultante C_u^1

5.2.3. Buscador UAV de vida salvaje

5.2.4. Production Cell

Para analizar este caso, exploramos varios escenarios de adaptación definiendo una especificación inicial y nueva. Para cada escenario identificamos posibles especificaciones alternativas. Por ejemplo, una decisión común para todo escenario de actualización es como son los productos procesados. ¿Debería la cadena de montaje estar vacía antes de que se produzca la actualización? En este caso, los productos que están siendo procesados ¿deberían ser descartados? ¿o terminarlos?. Si decidimos terminarlos, ¿los deberíamos terminar con la vieja especificación o con la nueva? O tal vez, durante el proceso de transición, la cadena de montaje no necesita ser vaciada y no importa que receta se lleva a cabo para construir un producto, siempre y cuando, estén contruidos de una manera consistente.

Estas alternativas fueron modeladas cambiando el valor del requerimiento de transición T ...

5.2.5. ARDrone

Un aspecto interesante del controlador resultante, en este caso de estudio, es que en la vieja especificación el nivel de batería nunca es tenido en cuenta, generando en el ambiente de actualización E_u mucho no determinismo a la hora de efectuar la acción *startNewSpec* desde cualquier estado (i.e. una transición por cada nivel de batería distinto que puede tener el nuevo ambiente). A pesar del no determinismo que este problema de control tiene al cambiar la especificación, el controlador de actualización simplemente carga la batería inmediatamente después de que se efectúe la actualización (i.e. cuando *startNewSpec* ocurre). Esto sucede debido a que el controlador de actualización obtenido asume una actualización en el peor caso, que es cuando no hay batería disponible en el robot.

Por otra parte, Pudimos validar el comportamiento del drone tras observar mediante la herramienta MTSA como los estados del controlador de actualización eran recorridos, y a su vez, observar las acciones reales que el robot efectuaba. La única acción controlada por el operador del sistema vía MTSA fue *beginUpdate*. Un video con uno de estos experimentos puede ser visto en [1].

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Trabajo futuro

El problema de actualización dinámica ha sido estudiado extensivamente y hay una gran cantidad de problemas distintos que deben ser abordados en función del dominio de aplicación, tecnología y la forma en que se efectúa la actualización (vea [SAM13] para mas información). El grueso del esfuerzo en actualización dinámica asume que no hay cambios de especificación y por lo tanto el mismo comportamiento es esperado (por ejemplo en [PH13]), o que la especificación es genérica (como en [SSH⁺05], [CYH⁺11], [ORH02], [KM07], [GJB96], [KM90]) y no proporcionada por el usuario. Ejemplos de este último, aparte de asegurar que la actualización no desemboca un fallo, asegura type safety (ej. [SHM08]) y data isolation entre versiones [SHB⁺07]. Quiescence [KM90] y nociones relacionadas (ej. [VEBD07], [AR09], [GJB96]) no requieren una representación explícita de las propiedades a ser preservadas, pero fue utilizado en conjunto con técnicas que garantizan consistencia genérica de semántica (ej. [BMPT10]).

La necesidad de una actualización por medio de la definición de propiedades por parte del usuario han sido reconocidas en [BG10]. En [HMH⁺12], se considera la especificación de propiedades de actualización, pero posee un enfoque en verificar si el programa satisface estas propiedades, en vez de automáticamente sintetizar la actualización para satisfacer estas propiedades.

Síntesis, estrategia operacional para construir un autómata que satisface una especificación dada, ha sido usado extensivamente para garantizar código que es correcto por construcción (por ejemplo en [GBC⁺13]). La naturalidad automática de la síntesis logra poder aplicar esta técnica no solo en el momento en el que el diseño se lleva a cabo sino que también en tiempo de ejecución, generando una sistema adaptable. Dicha evolución no esta limitada exclusivamente para sistemas adaptables como describimos en la etapa de introducción y motivación (ver sección 1.1)

6.2. Conclusiones

Bibliografía

- [AR09] Austin Anderson and Julian Rathke. Migrating protocols in multi-threaded message-passing systems. In *Proceedings of the 2Nd International Workshop on Hot Topics in Software Upgrades*, HotSWUp '09, pages 8:1–8:5, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [BDP⁺13] Víctor Braberman, Nicolas D'ippolito, Nir Piterman, Daniel Sykes, and Sebastian Uchitel. Controller synthesis: From modelling to enactment. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Software Engineering*, ICSE '13, pages 1347–1350, Piscataway, NJ, USA, 2013. IEEE Press.
- [BG10] Luciano Baresi and Carlo Ghezzi. The disappearing boundary between development-time and run-time. In *Proceedings of the FSE/SDP Workshop on Future of Software Engineering Research*, FoSER '10, pages 17–22, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [BMPT10] F. Banno, D. Marletta, G. Pappalardo, and E. Tramontana. Handling consistent dynamic updates on distributed systems. In *Computers and Communications (ISCC), 2010 IEEE Symposium on*, pages 471–476, June 2010.
- [CYH⁺11] Haibo Chen, Jie Yu, Chengqun Hang, Binyu Zang, and Pen-Chung Yew. Dynamic software updating using a relaxed consistency model. *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 37(5):679–694, Sept 2011.
- [DBPU13] Nicolás D'ippolito, Victor Braberman, Nir Piterman, and Sebastián Uchitel. Synthesizing nonanomalous event-based controllers for liveness goals. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, 22(1):9:1–9:36, March 2013.
- [DFCU08] N. D'ippolito, D. Fischbein, M. Chechik, and S. Uchitel. Mtsa: The modal transition system analyser. In *Automated Software Engineering, 2008. ASE 2008. 23rd IEEE/ACM International Conference on*, pages 475–476, Sept 2008.

- [EWS05] K. Etessami, T. Wilke, and R. Schuller. Fair simulation relations, parity games, and state space reduction for büchi automata. *SIAM Journal on Computing*, 34(5):1159–1175, 2005.
- [GBC⁺13] Joel Greenyer, Christian Brenner, Maxime Cordy, Patrick Heymans, and Erika Gressi. Incrementally synthesizing controllers from scenario-based product line specifications. In *Proceedings of the 2013 9th Joint Meeting on Foundations of Software Engineering, ESEC/FSE 2013*, pages 433–443, New York, NY, USA, 2013. ACM.
- [GGM12] C. Ghezzi, J. Greenyer, and V.P.L. Manna. Synthesizing dynamically updating controllers from changes in scenario-based specifications. In *Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems (SEAMS), 2012 ICSE Workshop on*, pages 145–154, June 2012.
- [GJB96] D. Gupta, P. Jalote, and G. Barua. A formal framework for on-line software version change. *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 22(2):120–131, Feb 1996.
- [GM03] Dimitra Giannakopoulou and Jeff Magee. Fluent model checking for event-based systems. In *Proceedings of the 9th European Software Engineering Conference Held Jointly with 11th ACM SIGSOFT International Symposium on Foundations of Software Engineering, ESEC/FSE-11*, pages 257–266, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- [Ham14] Universität Hamburg. Yet another ardrone 2.0 framework. <http://vsis-www.informatik.uni-hamburg.de/projects/yadrone>, Aug. 2014. [Online; accessed 2-Oct-2014].
- [HMH⁺12] Christopher M. Hayden, Stephen Magill, Michael Hicks, Nate Foster, and Jeffrey S. Foster. Specifying and verifying the correctness of dynamic software updates. In *Proceedings of the 4th International Conference on Verified Software: Theories, Tools, Experiments, VSTTE’12*, pages 278–293, Berlin, Heidelberg, 2012. Springer-Verlag.
- [Jac95a] Michael Jackson. *Software Requirements & Specifications: A Lexi-*

-
- con of Practice, Principles and Prejudices*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., New York, NY, USA, 1995.
- [Jac95b] Michael Jackson. The world and the machine. In *Software Engineering, 1995. ICSE 1995. 17th International Conference on*, pages 283–283, April 1995.
- [JP06a] Sudeep Juvekar and Nir Piterman. Minimizing generalized büchi automata. In Thomas Ball and RobertB. Jones, editors, *Computer Aided Verification*, volume 4144 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–58. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [JP06b] Sudeep Juvekar and Nir Piterman. Minimizing generalized büchi automata. In Thomas Ball and RobertB. Jones, editors, *Computer Aided Verification*, volume 4144 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 45–58. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [Jur00] Marcin Jurdziński. Small progress measures for solving parity games. In Horst Reichel and Sophie Tison, editors, *STACS 2000*, volume 1770 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 290–301. Springer Berlin Heidelberg, 2000.
- [Kel76] Robert M. Keller. Formal verification of parallel programs. *Commun. ACM*, 19(7):371–384, July 1976.
- [KM90] J. Kramer and J. Magee. The evolving philosophers problem: dynamic change management. *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 16(11):1293–1306, Nov 1990.
- [KM07] J. Kramer and J. Magee. Self-managed systems: an architectural challenge. In *Future of Software Engineering, 2007. FOSE '07*, pages 259–268, May 2007.
- [KPR04] R. Kazhamiakin, M. Pistore, and M. Roveri. Formal verification of requirements using spin: a case study on web services. In *Software Engineering and Formal Methods, 2004. SEFM 2004. Proceedings of the Second International Conference on*, pages 406–415, Sept 2004.

- [LL95] Claus Lewerentz and Thomas Lindner, editors. *Formal Development of Reactive Systems - Case Study Production Cell*, London, UK, UK, 1995. Springer-Verlag.
- [LvL02] Emmanuel Letier and Axel van Lamsweerde. Agent-based tactics for goal-oriented requirements elaboration. In *Proceedings of the 24th International Conference on Software Engineering, ICSE '02*, pages 83–93, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [MK99] Jeff Magee and Jeff Kramer. *Concurrency: State Models & Java Programs*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1999.
- [MKG97] J. Magee, J. Kramer, and D. Giannakopoulou. Analysing the behaviour of distributed software architectures: a case study. In *Distributed Computing Systems, 1997., Proceedings of the Sixth IEEE Computer Society Workshop on Future Trends of*, pages 240–245, Oct 1997.
- [MPS95] Oded Maler, Amir Pnueli, and Joseph Sifakis. On the synthesis of discrete controllers for timed systems (an extended abstract). In *STACS*, pages 229–242, 1995.
- [oP14] University of Paderborn. New rail technology paderborn. <http://www.railcab.de/>, Aug. 2014. [Online; accessed 1-Oct-2014].
- [ORH02] A Orso, A Rao, and M.J. Harrold. A technique for dynamic updating of java software. In *Software Maintenance, 2002. Proceedings. International Conference on*, pages 649–658, 2002.
- [Par14] Parrot. Ardrone 2.0. <http://ardrone2.parrot.com/>, Aug. 2014. [Online; accessed 2-Oct-2014].
- [PH13] Cristian Cadar Petr Hosek. Safe software updates via multi-version execution. In *International Conference on Software Engineering (ICSE 2013)*, pages 612–621, 5 2013.
- [PLMGGB13] Valerio Panzica La Manna, Joel Greenyer, Carlo Ghezzi, and Christian Brenner. Formalizing correctness criteria of dynamic updates derived from specification changes. In *Proceedings of the 8th International Symposium*

-
- on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems*, SEAMS '13, pages 63–72, Piscataway, NJ, USA, 2013. IEEE Press.
- [PM95] David Lorge Parnas and Jan Madey. Functional documents for computer systems. *Science of Computer Programming*, 25:41–61, 1995.
- [PPS06] Nir Piterman, Amir Pnueli, and Yaniv Sa'ar. Synthesis of reactive(1) designs. volume 3855 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 364–380. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [PR89] A. Pnueli and R. Rosner. On the synthesis of a reactive module. In *Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages*, POPL '89, pages 179–190, New York, NY, USA, 1989. ACM.
- [RW89] P.J.G. Ramadge and W.M. Wonham. The control of discrete event systems. *Proceedings of the IEEE*, 77(1):81–98, Jan 1989.
- [SAM13] Habib Seifzadeh, Hassan Abolhassani, and Mohsen Sadighi Moshkenani. A survey of dynamic software updating. *Journal of Software: Evolution and Process*, 25(5):535–568, 2013.
- [SEA14] *ICSE Symposium on Software Engineering for Adaptive and self-Managing Systems, SEAMS. ACM/IEEE*, 2006-2014.
- [SHB⁺07] Gareth Stoyale, Michael Hicks, Gavin Bierman, Peter Sewell, and Iulian Neamtii. Mutatis mutandis: Safe and predictable dynamic software updating, 2007.
- [SHM08] Suriya Subramanian, Michael Hicks, and Kathryn S. McKinley. Dynamic software updates for java: A vm-centric approach, 2008.
- [SSH⁺05] Junrong Shen, Xi Sun, Gang Huang, Wenpin Jiao, Yanchun Sun, and Hong Mei. Towards a unified formal model for supporting mechanisms of dynamic component update. *SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, 30(5):80–89, September 2005.
- [VEBD07] Y. Vandewoude, P. Ebraert, Y. Berbers, and T. D'Hondt. Tranquility: A

low disruptive alternative to quiescence for ensuring safe dynamic updates. *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 33(12):856–868, Dec 2007.

- [VL01] Axel Van Lamsweerde. Goal-oriented requirements engineering: A guided tour. In *Proceedings of the Fifth IEEE International Symposium on Requirements Engineering*, RE '01, pages 249–, Washington, DC, USA, 2001. IEEE Computer Society.
- [vL09] A. van Lamsweerde. *Requirements Engineering: From System Goals to UML Models to Software Specifications*. Wiley, 2009.
- [VLL00] A Van Lamsweerde and E. Letier. Handling obstacles in goal-oriented requirements engineering. *Software Engineering, IEEE Transactions on*, 26(10):978–1005, Oct 2000.
- [ZJ97] Pamela Zave and Michael Jackson. Four dark corners of requirements engineering. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 6:1–30, 1997.