

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea Magistrale in Informatica



Tesi di Laurea

MODEL CHECKING COME SUPPORTO PER LE
SCELTE DI SISTEMI ADATTIVI

MARCO TINACCI

Relatore: *Rocco De Nicola*

Correlatore: *Michele Loreti*

Anno Accademico 2012-2013

Ohana means family.
Family means nobody gets left behind, or forgotten.
— Lilo & Stitch

Dedicated to the loving memory of Rudolf Miede.
1939 – 2005

ABSTRACT

Short summary of the contents in English. . .

*We have seen that computer programming is an art,
because it applies accumulated knowledge to the world,
because it requires skill and ingenuity, and especially
because it produces objects of beauty.*

— ?

ACKNOWLEDGMENTS

Put your acknowledgments here.

Many thanks to everybody who already sent me a postcard!

Regarding the typography and other help, many thanks go to Marco Kuhlmann, Philipp Lehman, Lothar Schlesier, Jim Young, Lorenzo Pantieri and Enrico Gregorio¹, Jörg Sommer, Joachim Köstler, Daniel Gottschlag, Denis Aydin, Paride Legovini, Steffen Prochnow, Nicolas Repp, Hinrich Harms, Roland Winkler, Jörg Weber, and the whole L^AT_EX-community for support, ideas and some great software.

Regarding: The port was initially done by *Nicholas Mariette* in March 2009 and continued by *Ivo Pletikosić* in 2011. Thank you very much for your work and the contributions to the original style.

¹ Members of GuIT (Gruppo Italiano Utilizzatori di T_EX e L^AT_EX)

INDICE

I INTRODUZIONE	1
1 Introduzione	3
II BACKGROUND	7
2 Background	9
2.1 Probabilità	10
2.2 Variabili casuali	11
2.3 Processi stocastici	12
2.4 Discrete-Time Markov Chains	12
2.5 Markov Decision Processes	13
2.6 Model Checking	14
2.6.1 Probabilità elementari	14
2.6.2 Probabilistic Computation Tree Logic	15
2.6.3 Sintassi di PCTL	15
2.6.4 Semantica di PCTL	15
2.7 PRISM	15
III LAPSA	17
3 LAPSA	19
3.1 Sintassi	19
3.2 Zucchero sintattico	21
3.3 Semantica	21
3.4 Esempi	24
3.5 Traduzione del codice	25
3.6 PRISM	25
IV CASO DI STUDIO	27
4 Caso di studio	29
4.1 Analisi	29
4.2 Approcci proposti	31
4.3 Simulazioni	34

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Grafico dei risultati delle simulazioni: sull'ascissa variano gli agenti che sono realmente nell'area assieme all'agente principale, sull'ordinata viene indicato il numero di collisioni e i diversi colori rappresentano di diversi scheduler utilizzati dall'agente principale.	35
----------	--	----

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Sintassi di un programma <i>Language for Population of Self-adaptive Agents (LAPSA)</i>	20
Tabella 2	Sintassi di un modulo <i>LAPSA</i>	21
Tabella 3	Sintassi <i>LAPSA</i> completa	22
Tabella 4	Traduzione da <i>LAPSA</i> a <i>PRISM</i>	25
Tabella 5	Risultati delle simulazioni	34

LISTINGS

4.1	Implementazione <i>LAPSA</i> dello scheduler basato su model-checking	32
-----	---	----

ACRONYMS

<i>PS</i>	<i>processo stocastico</i>
<i>DTMC</i>	<i>Discrete-Time Markov Chain</i>
<i>MDP</i>	<i>Markov Decision Process</i>

<i>PCTL</i>	<i>Probabilistic Computation Tree Logic</i>
<i>CTL</i>	<i>Computation Tree Logic</i>
<i>PCTL</i>	<i>Probabilistic Computation Tree Logic</i>
<i>LAPSA</i>	<i>Language for Population of Self-adaptive Agents</i>

Parte I

INTRODUZIONE

INTRODUZIONE

In molti scenari si stanno presentando problematiche inerenti a sistemi dove sono presenti agenti con capacità adattive. In tali sistemi un agente ha, generalmente, una conoscenza parziale del sistema in cui si muove e deve essere in grado di adattarsi alle circostanze modificando opportunamente la propria strategia per raggiungere l'obiettivo. Nel progetto ASCENS vengono proposti dei casi di studio dove sono coinvolti tre tipi diversi di agenti: robot, risorse e e-vehicles [6]. Pur sembrando tre scenari molto diversi vengono accomunati dalla necessità di interazione tra agenti al fine di raggiungere determinati obiettivi, del singolo o della collettività. Ogni agente è tipicamente a conoscenza delle sue caratteristiche interne ma può non avere a disposizione tutte le informazioni delle altre entità e dell'ambiente circostante.

Al fine di evitare ambiguità e di definire con maggior precisione gli obiettivi cerchiamo di rispondere alla domanda *“in che caso un sistema software si può dire adattivo?”* [2]. Diciamo che un sistema software è adattivo quando il suo comportamento e le sue scelte dipendono direttamente da un insieme di *dati di controllo* che possono variare a tempo di esecuzione. Un semplice esempio è un robot che deve arrivare a destinazione senza scontrarsi con altri robot o con ostacoli. L'area circostante il robot viene analizzata dai sensori di prossimità dai quali si potrà ricavare se e dove sono presenti ostacoli e sulla base di queste informazioni dovrà stabilire quale sarà la direzione migliore da prendere.

Gli scenari che coinvolgono robot sono tipicamente orientati sul comportamento di sciame: obiettivi come l'attraversamento di una buca [1] assemblandosi in gruppi richiedono una collaborazione esplicita mentre per la raccolta di risorse [3] o il raggiungimento di una posizione di arrivo comune è sufficiente minimizzare i casi in cui gli agenti si ostacolano a vicenda. Nel caso del cloud computing sono le risorse ad essere viste come gli agenti in gioco e gli obiettivi di interesse possono riguardare la disponibilità e gli aspetti legati alla qualità del servizio. Se consideriamo un insieme di veicoli elettrici (e-vehicles) in grado di comunicare entro un raggio limitato si può pensare a problemi legati all'ottimizzazione del trasporto di persone o oggetti, al traffico, alle disponibilità di parcheggio e alle stazioni di ricarica.

I due aspetti fondamentali comuni in questi scenari sono la comunicazione e la conoscenza limitata dell'ambiente, dove per ambiente si considera tutto quello che è esterno all'agente che osserva. Sono parte dell'ambiente anche gli altri agenti e quindi anche la conoscenza su di essi può essere parziale o nulla.

Quello che si propone è un metodo di risoluzione delle scelte di un agente basato sul *model checking*. L'uso convenzionale dei model checker è mirato alla

verifica di proprietà su modelli dei sistemi interessati. Generalmente si ha quindi la conoscenza completa del modello, cosa che non è garantita nel nostro caso. L'idea consiste nel formulare una strategia tramite la quale ipotizzare come si comporterà l'ambiente ed effettuare la verifica su proprietà di interesse. Quando si pone una scelta locale questa può essere risolta valutando la probabilità di raggiungere il nostro obiettivo dallo scenario in cui si arriva compiendo una determinata azione. Quello che viene fatto è quindi una previsione tramite la verifica della proprietà obiettivo sul modello ipotizzato.

Il model checker utilizzato è *PRISM* [4], in quanto in grado di gestire ed analizzare processi stocastici come i *Markov Decision Process* (MDP) che sono il principale modello a cui si fa riferimento. *PRISM* esegue model checking probabilistico ed è quindi in grado di restituire le probabilità con cui una certa formula viene soddisfatta.

Se prendiamo in considerazione un altro esempio con protagonista un robot che deve rimanere in movimento minimizzando gli scontri con altri robot o ostacoli, possiamo immaginare il sistema composto dal soggetto in parallelo all'ambiente. L'ambiente sarà composto da tutti gli altri robot e ostacoli che il robot adattivo riesce a percepire o di cui ipotizza la presenza. Supponendo che la scelta da prendere riguardi il punto cardinale verso quale muoversi, quello che può essere fatto è utilizzare il model checker per ricavare le probabilità di non scontrarsi con nessuno entro dieci passi nel caso in cui si faccia un passo in una delle quattro direzioni. Avremo così a disposizione una probabilità di successo finale per ogni scelta e sarà sufficiente propendere per quella più alta.

Per realizzare questo approccio è necessario un lavoro di formalizzazione, introduciamo quindi un linguaggio col quale modellare il comportamento dell'agente adattivo. Introduciamo la specifica di *LAPSA*, un linguaggio per agenti adattivi, dove i comportamenti vengono modellati da moduli descritti come modelli reattivi e vengono offerte primitive per la gestione della percezione dell'ambiente. L'utilizzatore di *LAPSA* può limitarsi alla descrizione del comportamento del soggetto e di come viene gestita la visione dell'ambiente. La compilazione del codice *LAPSA* comporrà un modello *PRISM* e un file di formule *Probabilistic Computation Tree Logic* (PCTL) sui quali potrà essere eseguito il model checking. A seconda delle potenzialità dell'agente si potrà inserire dei richiami al model checker da valutare sul momento oppure, in caso di un numero sufficientemente basso di scenari considerati, fornire un codice precompilato contenente solamente la migliore scelta da fare a seconda dell'ambiente percepito.

Viene fornita un'implementazione di *LAPSA* in *Xtext* [8], un plugin di *ECLIPSE* che permette lo sviluppo di compilatori per linguaggi completi di un ambiente di sviluppo a supporto. A partire dalla grammatica del linguaggio *Xtext* genera automaticamente funzionalità accessorie legate all'ambiente di sviluppo come auto-completamento e colorazione del codice. Inoltre aggiungendo istruzioni sulla traduzione del codice tramite il linguaggio di template *Xtend* [7] vengono

costruiti automaticamente lexer e parser basati su *ANTLR* [5]. Raccogliendo tutte queste funzionalità si ottiene un tool installabile come plugin direttamente su *ECLIPSE*.

Si mostreranno infine i risultati di un semplice caso di studio confrontando i risultati di simulazioni basate su ipotesi di complessità crescente e quelli di approcci naïve.

Parte II

BACKGROUND

BACKGROUND

- probabilità e distribuzioni
- spazi di borel
- processi stocastici
- dtmc
- model checking su dtmc
- mdp
- model checking su mdp

In questo capitolo saranno forniti gli strumenti necessari alla comprensione del lavoro.

Definizione 1 (Esperimento casuale \mathcal{C}) *Per esperimento casuale si intende un qualsiasi avvenimento, provocato più o meno direttamente dall'uomo, suscettibile di manifestarsi secondo una pluralità di eventi elementari.*

Definizione 2 (Spazio fondamentale Ω) *Lo spazio fondamentale Ω di \mathcal{C} è l'insieme di tutti i suoi eventi elementari. Indichiamo tali eventi elementari come gli elementi $\omega \in \Omega$.*

Definizione 3 (Eventi casuali \mathcal{E}) *Un evento casuale $A \in \mathcal{E}$ è una proposizione relativa all'esito di un evento casuale \mathcal{C} che, prima del compimento di \mathcal{C} , è in qualche modo incerto.*

Osservazione 1 *\mathcal{E} contiene sottoinsiemi di Ω*

$$A \in \mathcal{E} \Rightarrow A \subseteq \Omega$$

Definizione 4 (σ -algebra) *Sia Ω lo spazio fondamentale dell'evento casuale \mathcal{C} . $\mathcal{F} \subseteq 2^\Omega$ è una σ -algebra se e solo se*

- $\Omega \in \mathcal{F}$,
- $A \in \mathcal{F} \Rightarrow \bar{A} \in \mathcal{F}$,
- $\bigwedge_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{F} \Rightarrow \bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{F}$
oppure $A_i \in \mathcal{F} (i \in I) \Rightarrow \bigcup_{i \in I} A_i \in \mathcal{F} \wedge \bigcap_{i \in I} A_i \in \mathcal{F}$.

Gli elementi di una σ -algebra sono chiamati *insiemi misurabili*. Chiamiamo *spazio misurabile* uno spazio fondamentale su cui è definita una σ -algebra e quindi lo identifichiamo con la coppia (Ω, \mathcal{F}) .

Definizione 5 (Insieme dei rettangoli) Sia $\Omega = \mathbb{R}$, l'insieme dei rettangoli è definito come

$$I = \{(a, b] \mid a, b \in \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}\}$$

Definizione 6 (Insieme di Borel) Un insieme di Borel $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ è la più piccola σ -algebra che contiene l'insieme dei rettangoli I .

Definizione 7 (Spazio di Borel) Uno spazio di Borel su \mathbb{R} è lo spazio misurabile $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$.

2.1 PROBABILITÀ

Definizione 8 (Assiomi di Kolmogoroff) Dato lo spazio misurabile (Ω, \mathcal{F}) , una misura di probabilità su di esso è una funzione $\mathbb{P} : \mathcal{F} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ tale che

$$\mathbb{P}(\emptyset) = 0 \tag{2.1}$$

$$\mathbb{P}(\Omega) = 1 \tag{2.2}$$

e, per qualsiasi famiglia $\{A_i \mid A_i \in \mathcal{F}, i \in \mathbb{N}\}$ tale che $k \neq h \Rightarrow A_k \cap A_h = \emptyset$, vale:

$$\mathbb{P}\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i) \tag{2.3}$$

Chiamiamo *spazio di probabilità* dell'esperimento casuale \mathcal{C} la tripla $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, dove Ω è lo spazio fondamentale, (Ω, \mathcal{F}) lo spazio misurabile e \mathbb{P} la misura di probabilità su \mathcal{F} . Se esiste l'insieme numerabile $A \subseteq \Omega$ tale che $\sum_{a \in A} \mathbb{P}\{a\} = 1$ allora diciamo che \mathbb{P} è una *misura di probabilità discreta* e $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ è uno *spazio di probabilità discreto*.

Proposizione 1 (Proprietà di \mathbb{P}) Dato lo spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$:

1. $\forall A \in \mathcal{F} : \mathbb{P}A + \mathbb{P}\bar{A} = 1,$
2. $\forall A, B \in \mathcal{F} : A \subseteq B \Rightarrow \mathbb{P}A \leq \mathbb{P}B,$
3. $\forall A \in \mathcal{F} : \mathbb{P}A \leq 1,$
4. $\forall A, B \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(A \cup B) \geq \max\{\mathbb{P}A, \mathbb{P}B\},$

5. $\forall A, B \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(A \cap B) \leq \min\{\mathbb{P}A, \mathbb{P}B\},$
6. $\forall A, B \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(A \cup B) = \mathbb{P}A + \mathbb{P}B - \mathbb{P}(A \cap B),$
7. $\forall A, B \in \mathcal{F} : A \subseteq B \Rightarrow \mathbb{P}(B \setminus A) = \mathbb{P}B - \mathbb{P}A,$
8. $\forall A_i \in \mathcal{F} : \mathbb{P}(\bigcup_{i=0}^{\infty} A_i) \leq \sum_{i=0}^{\infty} \mathbb{P}A_i.$

Definizione 9 (Probabilità condizionata) Dato lo spazio di probabilità $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ e $A, B \in \mathcal{F}$ tali che $\mathbb{P}B > 0$ si definisce probabilità condizionata

$$\mathbb{P}(A|B) = \frac{\mathbb{P}(A \cap B)}{\mathbb{P}B}$$

o alternativamente

$$\mathbb{P}(A|B) \cdot \mathbb{P}B = \mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}(B|A) \cdot \mathbb{P}A$$

Definizione 10 (Eventi stocasticamente indipendenti) Due eventi A e B sono stocasticamente indipendenti se e solo se

$$\mathbb{P}(A \cap B) = \mathbb{P}A \cdot \mathbb{P}B$$

Proposizione 2 (Proprietà di eventi stocasticamente indipendenti) Se A e B sono eventi stocasticamente indipendenti allora valgono le seguenti proprietà:

1. \bar{A} e B sono stocasticamente indipendenti,
2. A e \bar{B} sono stocasticamente indipendenti,
3. \bar{A} e \bar{B} sono stocasticamente indipendenti,
4. $\mathbb{P}(A \cup B) = 1 - \mathbb{P}\bar{A} \cdot \mathbb{P}\bar{B}.$

2.2 VARIABILI CASUALI

Una variabile casuale è definita da una funzione che assegna un valore a ogni elemento dello spazio fondamentale Ω .

Definizione 11 (Funzione misurabile) Dati gli spazi misurabili $(\Omega_1, \mathcal{F}_1)$ e $(\Omega_2, \mathcal{F}_2)$, $f : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ è una funzione misurabile se e solo se

$$\forall A \in \mathcal{F}_2 : f^{\text{orig}}(A) \triangleq \{\omega \in \Omega_1 \mid f(\omega) \in A\} \in \mathcal{F}_1$$

Definizione 12 (Variabile casuale) Una variabile casuale è definita da una funzione misurabile

$$X : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$$

dove $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}))$ è lo spazio di Borel su \mathbb{R} .

Proposizione 3 *Dato $(\Omega_1, \mathcal{F}_1, \mathbb{P})$ spazio di probabilità, $(\Omega_2, \mathcal{F}_2)$ spazio misurabile e $f : \Omega_1 \rightarrow \Omega_2$ funzione misurabile, allora:*

$$(\Omega_2, \mathcal{F}_2, \mathbb{P} \circ f^{\text{orig}})$$

è uno spazio di probabilità.

2.3 PROCESSI STOCASTICI

Definizione 13 (processo stocastico (PS)) *Un PS è una famiglia T -indicizzata di variabili casuali*

$$\{X_i \mid i \in T\}$$

Definizione 14 (PS discreto) *Un PS discreto è un PS con $T = \mathbb{N}$*

$$\{X_n \mid n \in \mathbb{N}\}$$

Definizione 15 (PS continuo) *Un PS continuo è un PS con $T = \mathbb{R}$*

$$\{X_t \mid t \in \mathbb{R}\}$$

2.4 DISCRETE-TIME MARKOV CHAINS

Definizione 16 (Discrete-Time Markov Chain (DTMC)) *Una DTMC è una tupla $\mathcal{D} = (S, \bar{s}, \mathbb{P})$ dove:*

- S è un insieme finito di stati;
- $\bar{s} \in S$ è lo stato iniziale;
- $\mathbb{P} : S \times S \rightarrow [0, 1]$ è la matrice di probabilità delle transizioni, tale che:

$$\sum_{s' \in S} \mathbb{P}(s, s') = 1$$

per ogni stato $s \in S$.

Definizione 17 (DTMC path) *Un path di una DTMC \mathcal{D} che comincia da s_0 in \mathcal{D} è una sequenza non vuota s_0, s_1, s_2, \dots di stati con s_0 come stato iniziale e con $\mathbb{P}(s_i, s_{i+1}) > 0$.*

Osservazione 2 *Un path di una DTMC può essere finito o infinito.*

Definizione 18 (DTMC path up to n) *Sia σ un path, il path up to n , o $\sigma \upharpoonright n$, è il prefisso s_0, \dots, s_n di σ .*

Definizione 19 (DTMC paths) $\text{paths}_{s_0}^{\mathcal{D}}$ o $\text{paths}(\mathcal{D}, s_0)$, è l'insieme di tutti i DTMC path di \mathcal{D} che cominciano in s_0 .

Utilizziamo inoltre le seguenti notazioni riguardanti i path su DTMC:

- $\sigma(i)$ indica l' i -esimo stato del path σ ,
- $|\sigma|$ indica la lunghezza del path σ ,
- $\text{last}(\sigma)$ indica l'ultimo stato del path finito σ e
- σ_{fin} indica l'insieme di tutti i path finiti.

2.5 MARKOV DECISION PROCESSES

Definizione 20 Un MDP è una tupla $\mathcal{M} = (S, \bar{s}, \text{Act}, \text{Steps})$ dove:

- S è un insieme finito di stati;
- $\bar{s} \in S$ è lo stato iniziale;
- Act è un insieme di azioni;
- $\text{Steps} : S \rightarrow 2^{\text{Act} \times \text{Dist}(S)}$ è la funzione di transizione probabilistica.

Definizione 21 (MDP path) Un path di una MDP \mathcal{M} che comincia da s_0 , indicato con $\text{path}_{s_0}^{\mathcal{M}}$, è una sequenza infinita $s_0, a_1, \mu_1, s_1, a_2, \mu_2, s_2, \dots$ dove $s_i \in S$, $(a_{i+1}, \mu_{i+1}) \in \text{Steps}(s_i)$ e $\mu_{i+1}(s_{i+1}) > 0$ per ogni $i \geq 0$.

Osservazione 3 Un path di una MDP può essere finito o infinito.

Definizione 22 (MDP path up to n) Sia σ un path, il path up to n , o $\sigma \upharpoonright n$, è il prefisso s_0, \dots, s_n di σ .

Definizione 23 (MDP paths) $\text{paths}_{s_0}^{\mathcal{M}}$ o $\text{paths}(\mathcal{M}, s_0)$, è l'insieme di tutti gli MDP path della MDP \mathcal{M} che cominciano in s_0 .

Analogamente alle DTMC, anche per le MDP utilizziamo le seguenti notazioni:

- $\sigma(i)$ indica l' i -esimo stato del path σ ,
- $|\sigma|$ indica la lunghezza del path σ ,
- $\text{last}(\sigma)$ indica l'ultimo stato del path finito σ e
- σ_{fin} indica l'insieme di tutti i path finiti.

Definizione 24 (Scheduler) Uno scheduler Σ di una MDP \mathcal{M} è una funzione che mappa tutti gli elementi di σ_{fin} di \mathcal{M} in un elemento dell'insieme $\text{Steps}(\text{last}(\sigma_{\text{fin}}))$ indicato con $S(\sigma_{\text{fin}})$. Con $\text{Scheduler}_{\mathcal{M}}$ denotiamo l'insieme di tutti i possibili scheduler di \mathcal{M} e, per ogni scheduler Σ , indichiamo con $\text{path}_{s_0}^{\Sigma}$ il sotto insieme di path_{s_0} che corrisponde a Σ .

TODO risolvere uno scheduler permette di trasformare una mdp in una dtmc

2.6 MODEL CHECKING

TODO introduzione e schemi su model checking probabilistico e non

2.6.1 Probabilità elementari

Esistono due tipi di probabilità elementari delle DTMC:

- probabilità *transiente* e
- probabilità *a regime*, o *steady state*.

Definizione 25 (Probabilità transiente $\pi_j(n)$) La probabilità transiente $\pi_j(n) = \mathbb{P}\{X_n = j\}$ è la probabilità che la DTMC sia nello stato j al passo n

Possiamo quindi associare alla DTMC \mathcal{D} un vettore che al passo n descriva la probabilità di trovarsi in ogni stato $s \in S$

$$\underline{\pi}(n) \triangleq (\pi_1(n), \dots, \pi_{|S|}(n))$$

. Si indica con $\underline{\pi}(0)$ la distribuzione di probabilità iniziale mentre con $\underline{\pi}(n)$ la distribuzione di probabilità al passo n . Considerando che moltiplicare il vettore di distribuzione di probabilità per la matrice \mathbb{P} rappresenta un avanzamento del sistema che aggiorna la distribuzione al passo successivo, allora vale la seguente relazione di ricorrenza

$$\underline{\pi}(n) = \underline{\pi}(n-1) \cdot \mathbb{P}$$

da cui si ricava immediatamente la seguente forma dipendente solo dalla distribuzione iniziale e dalla matrice di transizione

$$\underline{\pi}(n) = \underline{\pi}(0) \cdot \mathbb{P}^n$$

.

Definizione 26 (Probabilità steady state π_j) La probabilità steady state $\pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}\{X_n = j\}$ è la probabilità che la DTMC sia nello stato j al passo a lungo andare.

L'esistenza di questo limite è garantita solo sotto determinate condizioni di *ergodicità* della catena. L'esistenza del limite permette quindi di ricavare una distribuzione di probabilità steady state che è indipendente dalla distribuzione iniziale. Per calcolare questa distribuzione è sufficiente risolvere il seguente sistema di equazioni lineari

$$\begin{cases} \underline{\pi} \cdot \mathbb{P} = \underline{\pi} \\ \sum_{i=1}^{|S|} \pi_i = 1 \end{cases}$$

dove $0 \leq \pi_i \leq 1$ e $1 \leq i \leq |S|$.

Una volta scelto uno scheduler che risolva le scelte nondeterministiche della *MDP* trasformandola in una *DTMC* sarà possibile applicare la valutazione delle probabilità sopra descritte. Il risultato però sarà valido solo in presenza di quello specifico scheduler che potrebbe avere un peso poco rilevante nell'analisi della *MDP*. Quello che si fa quindi è calcolare il range di probabilità in cui si muove la misura interessata *per ogni* possibile scheduler in modo da poter fare inferenza su *lower* e *upper bounds*.

2.6.2 Probabilistic Computation Tree Logic

Al fine di poter effettuare model checking su strutture come *DTMC* e *MDP* utilizziamo *PCTL*, un'estensione probabilistica della logica temporale *Computation Tree Logic* (*CTL*).

2.6.3 Sintassi di PCTL

2.6.4 Semantica di PCTL

2.7 PRISM

Parte III

LAPSA

3.1 SINTASSI

Per descrivere la sintassi *LAPSA* sarà utilizzato il formalismo *EBNF* indicando con le parole in corsivo i simboli non terminali e con quelle in neretto e quelle in stampatello i terminali. Le parole in neretto sono *keyword* del linguaggio mentre quelle in stampatello descrivono dei valori arbitrari su insiemi come nomi di variabili o costanti numeriche.

Il non terminale *program* è il simbolo iniziale della grammatica e nella sua struttura racchiude la dichiarazione dell'insieme di azioni considerato, il modulo che descrive il comportamento del soggetto, gli obiettivi del soggetto, i moduli che possono essere usati per descrivere l'ambiente e i dati necessari alla discretizzazione delle variabili.

In tabella ?? viene descritta anche la sintassi dell'insieme delle azioni, degli obiettivi e dell'ambiente. Le azioni e l'ambiente sono una semplice lista, rispettivamente, di *label* e di *module*. La lista di moduli di ambiente non esprime direttamente quali moduli sono considerati presenti nell'ambiente ma quelli che possono esserci inseriti.

La definizione di un modulo (tabella ??) consiste nell'attribuzione di un nome che lo identifica, un insieme di variabili che ne descrive lo stato, e un insieme di regole che ne descrive l'avanzamento. Le variabili vengono dichiarate all'inizio del modulo specificandone il tipo, il nome e il valore iniziale attribuito. Una regola, invece, è composta da una condizione di guarda che la abilita, un'azione da eseguire, e una distribuzione di possibili funzioni di *update*, ognuna delle quali ha associata una probabilità di essere eseguita. Le probabilità della distribuzione vengono determinate dalla normalizzazione dei pesi associati alle funzioni. La funzione *update* è una sequenza di azioni di aggiornamento di stato o di visione dell'ambiente.

- *A*
- \boxtimes
- *id*
- *module-name*
- *action-label*
- *type*

<i>program</i>	::=	actions { <i>actions</i> }
		subject <i>module</i>
		<i>targets</i>
		<i>environment</i>
		<i>system</i>
		ranges { <i>ranges</i> }
<i>actions</i>	::=	action-id <i>actions, actions</i>
<i>targets</i>	::=	target ... <i>targets targets</i>
<i>environment</i>	::=	<i>module</i> <i>environment environment</i>
<i>system</i>	::=	module-id <i>system</i> [{ <i>actions</i> }] <i>system</i>
<i>module</i>	::=	module module-id {variables rules}
<i>variables</i>	::=	type variable-id = <i>expression</i> ; <i>variables variables</i>
<i>rules</i>	::=	<i>condition</i> [action-id] ⇒ <i>distribution</i> <i>rules, rules</i>
<i>condition</i>	::=	exists variable-id : module-id such that <i>condition</i> <i>expression</i> ⋈ <i>expression</i> true <i>condition</i> or <i>condition</i> not <i>condition</i>
<i>distribution</i>	::=	< <i>expression</i> > <i>update</i> ; <i>distribution</i> # <i>distribution</i>
<i>update</i>	::=	variable-id = <i>expression</i> noaction <i>update</i> ; <i>update</i> env.add <i>system</i> env.remove id : module-id . <i>condition</i>
<i>expression</i>	::=	...

Tabella 1: Sintassi di un programma LAPSA


```

program ::= actions{actions}
           subject module
           targets
           environment
           ranges{ranges}

targets ::= ...

environment ::= module | environment environment

actions ::= action-label | actions, actions

ranges ::= module-name.id in(value, value, value)

module ::= module module-name{variables rules}

variables ::= type id = expression; | variables variables

expression ::= ...

system ::= module-name(params) | system [{actions}] system

params ::= void | expression | params, params

rules ::= condition[action-label]  $\Rightarrow$  distribution | rules, rule

condition ::= E id : module-name . condition | expression  $\bowtie$  expression
             | true | condition or condition | ! condition

distribution ::= < expression > update; | distribution # distribution

update ::= id = expression | noaction | update ; update
           | env.add system | env.remove id : module-name . condition

```

Tabella 3: Sintassi LAPSA completa

- *Distribution*: descrive una distribuzione probabilistica di azioni α , dove ogni azione è accompagnata da un'espressione e , che ne descrive il peso, e un'azione α ;
- *Action*: un'azione descrive un aggiornamento dello stato, che può consistere nell'assegnamento di una, nessuna, o più variabili.

Definiamo la semantica del linguaggio in termini di *MDP*. Alla definizione di ogni modulo sarà assegnata una *MDP* della forma:

$$(\Sigma, \text{Act}, \rightarrow_\rho, \sigma_0)$$

dove

- $\Sigma = \{\sigma \mid \sigma : \mathbb{VAR} \rightarrow \mathbb{VAL}\}$ è l'insieme degli *stati* rappresentati da funzioni che mappano variabili in valori,
- Act l'insieme delle azioni,
- $\rightarrow_\rho \subseteq \Sigma \times \text{Act} \times \text{Dist}(\mathbb{U})$ è la relazione di *avanzamento* di stato,
- $\sigma_0 \in \Sigma$ è lo *stato iniziale*,
- $\rho \subseteq \beta \times \text{Act} \times \text{Dist}(\mathbb{U})$ è la *struttura statica* del *MDP*,
- $\mathbb{U} = \{u \mid u : \Sigma \rightarrow \Sigma\}$ è l'insieme delle funzioni *update* di aggiornamento di stato.

$$\frac{(g, \alpha, d) \in \rho}{\sigma \xrightarrow{\alpha}_\rho d(\sigma)} \sigma \models g \quad (\text{Update})$$

$$\rho_m = \{(g, \alpha, d) \mid \gamma_m = g[\alpha] \Rightarrow \langle e_1 > \alpha_1 \oplus \dots \oplus \langle e_n > \alpha_n, d = [u_{\alpha_{i1}} : p_1, \dots, u_{\alpha_{in}} : p_n]\}$$

dove $u_\alpha \in \mathbb{U}$ è una funzione *update* definita nel seguente modo

$$u_\alpha(\sigma) = \begin{cases} \sigma[\text{eval}(e)/x] & \text{se } \alpha = x = e; \\ \sigma & \text{se } \alpha = \mathbf{noaction}; \\ u_{\alpha''}(u_{\alpha'}(\sigma)) & \text{se } \alpha = \alpha' \alpha'' \end{cases}$$

Le probabilità sono invece calcolate nel seguente modo

$$p_i = \frac{\text{eval}(e_i)}{\sum_{j=1}^n \text{eval}(e_j)}, i = 1, \dots, n$$

Salendo dal livello dei moduli a quello dei sistemi, introduciamo $\Pi \in \text{Dist}(\mathbb{S})$ per indicare distribuzioni di sistemi. Il sistema sarà rappresentato dalla *MDP* risultante dal parallelo di quelle che lo compongono.

$\frac{\sigma_m \xrightarrow{a}_{\rho_m} d(\sigma_m)}{S \xrightarrow{a} \Pi} \quad m \in S \quad \text{(Update)}$
$\frac{S_1 \xrightarrow{a} \Pi_1 \quad S_2 \xrightarrow{a} \Pi_2}{S_1 \parallel \{actions\} S_2 \xrightarrow{a} \Pi_1 \parallel \{actions\} \Pi_2} \quad a \in A \quad \text{(Sync)}$
$\frac{S_1 \xrightarrow{a} \Pi_1}{S_1 \parallel \{actions\} S_2 \xrightarrow{a} \Pi_1 \parallel \{actions\} S_2} \quad a \notin A \quad \text{(Async 1)}$
$\frac{S_2 \xrightarrow{a} \Pi_2}{S_1 \parallel \{actions\} S_2 \xrightarrow{a} S_1 \parallel \{actions\} \Pi_2} \quad a \notin A \quad \text{(Async 2)}$

Rimane da definire come si comporta l'operatore di composizione parallela tra un sistema e una distribuzione e tra due distribuzioni.

$$\begin{aligned} \Pi_1 \parallel \{actions\} S_2(S) &= \begin{cases} \Pi_1(S'_1) & \text{se } S = S'_1 \parallel \{actions\} S_2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \\ S_1 \parallel \{actions\} \Pi_2(S) &= \begin{cases} \Pi_2(S'_2) & \text{se } S = S_1 \parallel \{actions\} S'_2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \\ \Pi_1 \parallel \{actions\} \Pi_2(S) &= \begin{cases} \Pi_1(S_1) \cdot \Pi_2(S_2) & \text{se } S = S_1 \parallel \{actions\} S_2 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \end{aligned}$$

3.4 ESEMPI

Esempio di un modulo di robot che esegue una *random walk* su una griglia escludendo dalla scelta probabilistica le direzioni adiacenti occupate:

$$\begin{aligned} m_1() &\triangleq \text{true}[\text{step}] \Rightarrow \\ &< 1, \neg \exists m_1 \ v : v.x = x \text{ and } v.y = y + 1 > y = y + 1; \# \\ &< 1, \neg \exists m_1 \ v : v.x = x \text{ and } v.y = y - 1 > y = y - 1; \# \\ &< 1, \neg \exists m_1 \ v : v.x = x + 1 \text{ and } v.y = y > x = x + 1; \# \\ &< 1, \neg \exists m_1 \ v : v.x = x - 1 \text{ and } v.y = y > x = x - 1; \# \\ &< 1, \text{true} > \text{noaction}; \end{aligned}$$

Esempio di un modulo di robot analogo al precedente con la differenza che la scelta della mossa viene fatta in modo nondeterministico:

$$\begin{aligned} m_2() &\triangleq \neg E \ m_1 : v.(v.x = x \wedge v.y = y + 1) \quad [\text{north}] \Rightarrow < 1 > y = y + 1; \\ &\neg E \ m_1 : v.(v.x = x \wedge v.y = y - 1) \quad [\text{south}] \Rightarrow < 1 > y = y - 1; \\ &\neg E \ m_1 : v.(v.x = x + 1 \wedge v.y = y) \quad [\text{east}] \Rightarrow < 1 > x = x + 1; \\ &\neg E \ m_1 : v.(v.x = x - 1 \wedge v.y = y) \quad [\text{west}] \Rightarrow < 1 > x = x - 1; \\ &\text{true} \quad [\text{stay}] \Rightarrow < 1 > \text{noaction}; \end{aligned}$$

3.5 TRADUZIONE DEL CODICE

3.6 PRISM

La traduzione del sorgente *LAPSA* in codice *PRISM* necessita di alcuni dati aggiuntivi riguardo le variabili dei moduli. Dato che *PRISM* lavora con uno spazio degli stati finito è necessario aggiungere informazioni che permettano di trattare le variabili intere e reali. Per le variabili intere sarà sufficiente specificare il range, mentre per le variabili reali dovrà essere specificata anche l'ampiezza dell'intervallo di discretizzazione.

La traduzione delle variabili viene descritta in tabella 4. Con a , b e δ rappresentiamo costanti intere, con e un'espressione *LAPSA* e con e' la rispettiva traduzione in *PRISM*. I dati necessari alla discretizzazione vengono attualmente forniti direttamente nel file *PRISM* nella sezione *ranges*.

<i>LAPSA</i>	<i>Input file</i>	<i>PRISM</i>
<pre>module m{ ... bool x = e; ... }</pre>	-	<pre>x:bool init e';</pre>
<pre>module m { ... int y = e; ... }</pre>	$m.y \text{ in } (a,b);$	<pre>y:[a..b] init e';</pre>
<pre>module m { ... float z = e; ... }</pre>	$m.z \text{ in } (a,b,\delta);$	<pre>z:[0..floor((a-b)/delta)] init ceil((e'-a)/delta);</pre>
$z = e$	$m.z \text{ in } (a,b,\delta);$	$z' = \text{ceil}((e'-a)/\delta)$

Tabella 4: Traduzione da *LAPSA* a *PRISM*

Parte IV

CASO DI STUDIO

CASO DI STUDIO

Lo scenario preso come caso di studio prevede una popolazione di agenti mobili che si muovono casualmente all'interno di un'area limitata. Gli agenti possono venire a conoscenza, tramite dei sensori di prossimità, della presenza di altri agenti entro un raggio limitato. Ogni singolo agente può decidere periodicamente se muoversi verso nord, sud, est o ovest o se stare fermo. L'obiettivo primario è quello di associare uno scheduler all'agente protagonista che minimizzi il numero di collisioni con altri agenti che si verificheranno.

4.1 ANALISI

Per l'analisi del problema vengono effettuate le seguenti assunzioni:

- ogni agente si può muovere solo nelle quattro direzioni (nord, sud, ovest, est) o può decidere di rimanere fermo,
- tutti gli agenti sono *sincronizzati nello spazio*: esiste una griglia globale che rappresenta le strade percorribili dagli agenti,
- tutti gli agenti sono *sincronizzati nel tempo*: tutti eseguono allo stesso tempo un passo nella direzione scelta.

Possiamo quindi rappresentare la zona con una matrice $Z \in \mathbb{N}_0^{m \cdot m}$, dove $m \in \mathbb{N}$ indica la dimensione della zona e gli elementi della matrice indicano il numero di agenti in una certa posizione. Se $Z_{i,j} = 0$ la posizione è *libera*, se $Z_{i,j} = 1$ allora la posizione è *occupata* da un agente, mentre se $Z_{i,j} > 1$ allora in quella posizione si sta verificando una *collisione*.

Per analizzare la successione temporale dello scenario possiamo parametrizzare la matrice Z rispetto al tempo definendola come una funzione $Z : \mathbb{N}_0 \rightarrow \mathbb{N}^{m \cdot m}$ che, dato un certo istante temporale $n \in \mathbb{N}_0$, restituisce una matrice $Z(n)$ che descrive la zona in quell'istante. Lo scenario iniziale è rappresentato da $Z(0)$. Assumendo che i sensori di un agente permettano di rilevare se un altro agente si trova entro un passo di distanza, definiamo le *posizioni adiacenti* come le posizioni raggiungibili all'interno della zona che non portino ad uno scontro diretto con un altro agente:

$$N_{i,j} = \{(i', j') : |i - i' + j - j'| = 1 \wedge i', j' \in \{1, \dots, m\}\} \cup \{(i, j)\}$$

Il criterio seguito dal generico agente sarà quindi l'algoritmo 1. I parametri dell'algoritmo hanno il seguente significato:

Algorithm 1 Algoritmo di scelta generico

Require: $m, n, nrob \in \mathbb{N} \wedge i, j \in \{1, \dots, m\} \wedge Z \in \mathbb{N}_0^{m \cdot m}$ $p_0 = (i, j)$ **for** $k = 1$ **to** n **do** $p_k = \text{schedule}(\text{local}(Z, p_{k-1}, m), m, nrob)$ *barriera* $Z_{p_{k-1}} = Z_{p_{k-1}} - 1$ $Z_{p_k} = Z_{p_k} + 1$ *barriera***end for**

- m è la dimensione dell'area,
- n è il numero di passi che vengono eseguiti da ogni agente (generalmente possiamo immaginarlo come un numero molto grande),
- $nrob$ è il numero di agenti presenti nell'area,
- i e j sono la posizione iniziale dell'agente,
- Z è lo stato iniziale della matrice globale.

La funzione *local* viene così definita

$$\text{local}(Z, i, j, m) = Z[I(i, m), J(j, m)]$$

Il primo sottoinsieme di indici è definito come

$$I(i, m) = \begin{cases} \{i, i+1\} & \text{se } i = 1 \\ \{i-1, i\} & \text{se } i = m \\ \{i-1, i, i+1\} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

e il secondo, in modo analogo $J(j, m) = I(j, m)$. Con la funzione *local* si vuole definire formalmente la sottomatrice locale che viene rilevata dal sensore di prossimità dell'agente.

La funzione *schedule* dipende invece dal comportamento che si vuole associare all'agente e quindi che criterio utilizzerà per risolvere le scelte. Lo scheduler avrà quindi pochi dati su cui prendere una decisione e se si esclude anche una memorizzazione dello storico allora il dominio di *schedule* diventa il numero di combinazioni di un massimo di $nrob$ agenti all'interno delle posizioni locali. La conoscenza dell'agente si limita quindi alle posizioni locali $\text{local}(Z, i, j, m)$, il numero totale di agenti in gioco $nrob$ e la dimensione dell'area m .

Le *barriere* sono il costrutto di programmazione parallela dove ogni agente attende che tutti gli altri abbiano raggiunto il suo stesso punto, dopodichè tutti possono riprendere l'esecuzione. In questo caso vengono utilizzate per

un doppio scopo: il primo è di evitare la *race condition* e il secondo è quello di avere una separazione netta tra le fasi globali di decisione del prossimo passo e aggiornamento della mappa.

4.2 APPROCCI PROPOSTI

Introduciamo i due principali algoritmi di scheduling utilizzati in questo caso di studio:

- semi-casuale,
- basato sul model-checking.

Lo scheduling *semi-causale* non fa altro che scegliere casualmente una delle posizioni libere raggiungibili al prossimo passo.

Lo scheduling basato sul model-checking, invece, è incentrato sulla costruzione di un modello globale ottenuto facendo ipotesi sugli aspetti che non si conoscono. Una volta che si ha a disposizione il modello globale “stimato” si procede valutando la probabilità di soddisfare la formula che rappresenta l’obiettivo nel caso in cui si effettua una determinata scelta tramite model-checking.

In questo caso di studio si conosce quanti agenti sono presenti ma non il loro comportamento e con che criterio prediligono una direzione piuttosto che un’altra. Si ipotizza il movimento degli altri agenti come uno scheduling casuale che, a differenza di quello semi-casuale, può scegliere anche direzioni occupate da altri agenti vietando comunque direzioni che farebbero uscire dal perimetro dell’arena. Il modello globale viene quindi correttamente rappresentato da una *MDP* in quanto è composizione parallela dei modelli degli agenti contenenti scelte nondeterministiche e probabilistiche.

Assumiamo l’implementazione in *LAPSA* dello scheduler dell’agente mostrata nel listato 4.1, ipotizzando che esista solo un altro agente nell’area e che questo si muova secondo uno scheduler casuale:

- ogni variabile indica se una posizione è occupata da un altro agente (valore 1) o libera (valore 0), la posizione p1 indica l’area a nord-ovest, p2 quella a nord, fino alla p9 che è quella a sud-est,
- la posizione p5 è l’area interna di collisione con l’agente, se altri agenti vengono rivelati in quella zona lo stato viene interpretato come collisione, per questo motivo l’obiettivo dell’agente è formulato in termini di questa zona
- le transizioni contengono già l’assunzione di come gli agenti esterni effettueranno le loro scelte, nella prima transizione di esempio viene mostrato dove si può muovere un agente che si trova inizialmente in posizione p3: la scelta nondeterministica indica la direzione intrapresa dal modulo mentre

la distribuzione descrive come la scelta dell'agente esterno modifica lo stato percepito,

- gli agenti esterni sono già considerati all'interno del modulo principale, quindi possiamo assumere che non ci siano moduli nell'ambiente.

Listing 4.1: Implementazione *LAPSA* dello scheduler basato su model-checking

```

1  actions { a }
2
3  subject module NDRobot {
4      // variabili area locale
5      int p1; int p2; int p3;
6      int p4; int p5; int p6;
7      int p7; int p8; int p9;
8
9      // transizioni
10     p1+p2+p4+p5+p6+p7+p8+p9 == 0 and p3 = 1 [a]
11     => // resta fermo
12         <0.2> noaction #
13         <0.2> p3 = 0, p6 = 1 #
14         <0.4> p3 = 0 #
15         <0.2> p2 = 1, p3 = 0
16     => // vai a nord
17         <0.2> noaction #
18         <0.2> p3 = 0, p5 = 1 #
19         <0.2> p3 = 0, p6 = 1 #
20         <0.2> p3 = 0 #
21         <0.2> p3 = 0, p9 = 1
22     => // vai a ovest
23         <0.2> noaction #
24         <0.8> p3 = 0
25     => // vai a est
26         <0.2> noaction #
27         <0.2> p3 = 0, p5 = 1 #
28         <0.2> p1 = 1, p3 = 0 #
29         <0.2> p3 = 0 #
30         <0.2> p2 = 1, p3 = 0
31     => // vai a sud
32         <0.2> noaction #
33         <0.8> p3 = 0;
34
35     // ...
36
37     // obiettivo
38     target never p5 > 0
39 }
40
41 environment is empty

```

```

42 |
43 | ranges {
44 |     NDRobot.p1 in [0,1], NDRobot.p2 in [0,1],
45 |     NDRobot.p3 in [0,1], NDRobot.p4 in [0,1],
46 |     NDRobot.p5 in [0,1], NDRobot.p6 in [0,1],
47 |     NDRobot.p7 in [0,1], NDRobot.p8 in [0,1],
48 |     NDRobot.p9 in [0,1]
49 | }

```

Per brevità è stata riportata nel listato solo una transizione.

La compilazione del file *LAPSA* costruirà un modello *PRISM* e una formula *PCTL* ed otterrà, tramite model-checking, una lista di probabilità di successo che verranno salvate e serializzate all'interno di una struttura dati utilizzabile da un programma *JAVA* esterno. Si tratta di una *Hashtable* che ha come chiave lo stato del modulo e come dato la probabilità di successo in quello stato. Il programma *JAVA* che utilizza questa *Hashtable* decide la scelta da fare in base all'algoritmo 2. In questo caso la *Hashtable* generata dal compilatore *LAPSA* ha

Algorithm 2 Algoritmo di scheduling basato sul model-checking

Require: Actions: insieme delle azioni disponibili,

States: insieme degli stati possibili,

current: stato attuale dell'agente,

index: hash table delle probabilità calcolate dal model checker.

max = -1

for all act \in Actions **do**

for all next \in States **do**

 calcola la probabilità p_{step} di passare da current a next con l'azione act

$p_{\text{MC}} = \text{index}(\text{next})$

 prob = $p_{\text{step}} \cdot p_{\text{MC}}$

if prob > max **then**

 max = prob

 best_act = act

end if

end for

end for

return best_act

un solo livello di profondità in quanto non sono presenti moduli nell'ambiente. Per questo motivo è sufficiente una semplice ricerca del massimo al posto della più generale ricerca del massimo dei valori minimi.

	1 semi-random	2 semi-random	3 semi-random
semi-random	4.22	7.67	11.98
model-checker 1	2.87	6.52	10.02
model-checker 2	2.82	6.36	9.88
model-checker 3	2.44	6.27	9.82

Tabella 5: Risultati delle simulazioni

4.3 SIMULAZIONI

Gli esperimenti condotti su questo caso di studio consistono nell'osservare il numero di scontri che coinvolgono l'agente principale in simulazioni di 100 passi, variando il numero di agenti a scheduler casuale ipotizzati nel modulo *LAPSA*, il numero di agenti effettivi presenti nello scenario e lo scheduler utilizzato dagli agenti.

Gli scenari saranno quindi i seguenti:

- tutti gli scheduler sono semi-casuali, lo scenario reale è composto da
 - un agente principale e un agente secondario,
 - un agente principale e due agenti secondari,
 - un agente principale e tre agenti secondari,
- lo scheduler dell'agente principale è basato sul model-checker che assume la presenza di 1, 2 o 3 agenti secondari semi-casuale, gli scheduler degli agenti secondari sono semi-casuali, lo scenario reale è composto da
 - un agente principale e un agente secondario,
 - un agente principale e due agenti secondari,
 - un agente principale e tre agenti secondari,
- tutti gli scheduler sono basati sul model-checker assumendo la presenza di tre agenti secondari semi-casuali, lo scenario reale è composto da un agente principale e tre agenti secondari.

In tabella 5 vengono riportate le medie dei test effettuati, raffigurate nel grafico 1. Dal grafico si riesce ad osservare un effettivo miglioramento del risultato dello scheduler basato sul model-checker rispetto a quello semi-casuale. Si percepisce, seppure in minor misura, un leggero miglioramento all'aumentare della complessità dello scenario ipotizzato: anche nel caso in cui le simulazioni prevedano solamente un agente secondario si riscontra una media di collisioni per test più bassa se la Hashtable viene generata su ipotesi più complesse, assumendo due o tre agenti secondari. Nello scenario reale che comprende

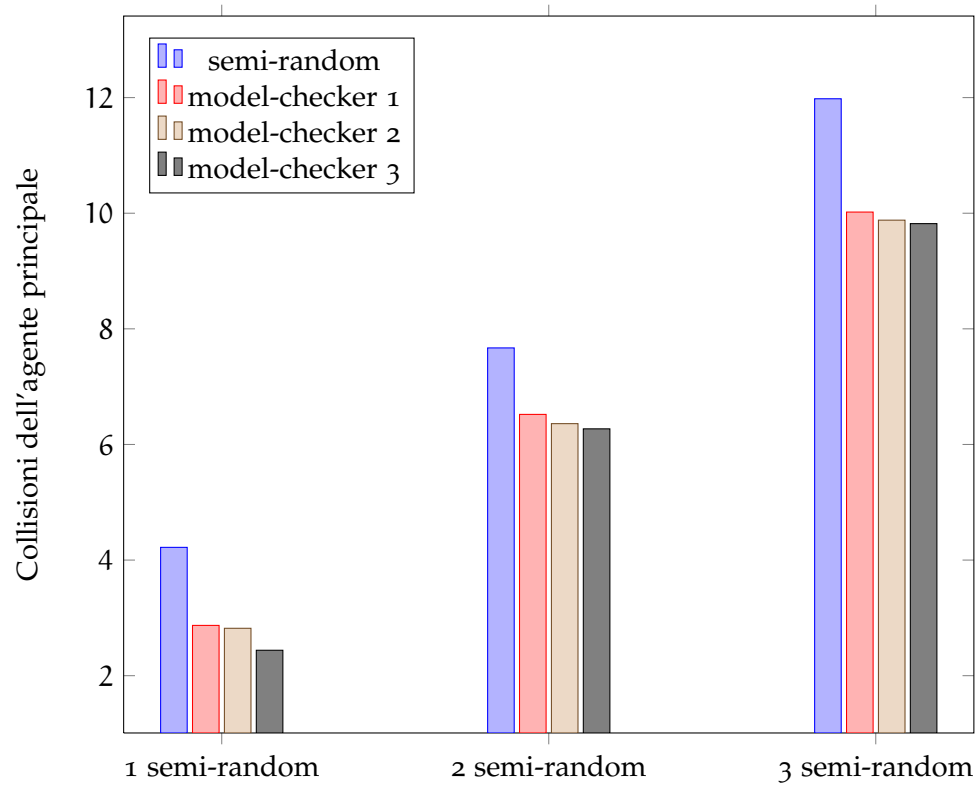


Figura 1: Grafico dei risultati delle simulazioni: sull'ascissa variano gli agenti che sono realmente nell'area assieme all'agente principale, sull'ordinata viene indicato il numero di collisioni e i diversi colori rappresentano di diversi scheduler utilizzati dall'agente principale.

due agenti esterni si verifica un leggero miglioramento medio passando dallo scheduler generato sull'ipotesi di un solo agente semi-casuale a quello che ne considera due: questo miglioramento è giustificato dal fatto che gli stati previsti sono un numero maggiore e se lo scheduler basato sul model-checker non dovesse trovare lo stato che sta cercando all'interno della Hashtable allora si comporterà come uno scheduler semi-casuale.

Le simulazioni tra agenti che utilizzano solo scheduler basati su model-checker danno origine a fenomeni che rendono i risultati non confrontabili con quelli mostrati finora. Tendono a crearsi situazioni ottime e pessime a seconda dei casi: in alcune occasioni tutti gli agenti si stabilizzano in una posizione di equilibrio dove nessuno ha interesse nello spostarsi, in altre lo scenario si ripete con un periodo più ampio portando a oscillazioni tra più zone ma ripetendo gli stessi errori dovuti all'approccio deterministico dello scheduler. Nel caso positivo si ha un numero di collisioni quasi sempre nullo mentre in quello negativo ci si avvicina al 50% della lunghezza della simulazione per il fenomeno sopra descritto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Roberto Bruni, Andrea Corradini, Fabio Gadducci, Alberto Lluch Lafuente, and Andrea Vandin. Modelling and analyzing adaptive self-assembling strategies with maude. *ASCENS*, 2012.
- [2] Roberto Bruni, Andrea Corradini, Alberto Lluch Lafuente, Fabio Gadducci, and Andrea Vandin. A conceptual framework for adaptation. *LNCS*, 7212:240–254, 2012.
- [3] Edmond Gjondrekaj, Michele Loreti, Rosario Pugliese, and Francesco Tiezzi. A robot foraging scenario in klaim. 2011.
- [4] M. Kwiatkowska, G. Norman, and D. Parker. PRISM 4.0: Verification of probabilistic real-time systems. <http://www.prismmodelchecker.org/>, 2011.
- [5] Terence J Parr, T. J. Parr, and R W Quong. Antlr: A predicated-ll(k) parser generator. <http://wwwantlr.org/>, 1995.
- [6] Nikola Serbedzija, Stephan Reiter, Maximilian Ahrens, José Velasco, Carlo Pinciroli, Nicklas Hoch, and Bernd Werther. Requirement specification and scenario description of the ascens case studies. *ASCENS*, 2011.
- [7] Xtend. <http://www.eclipse.org/xtend/>.
- [8] Xtext. <http://www.eclipse.org/Xtext/>.