

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA  
CAMPUS DI CESENA

---

Scuola di Scienze  
Corso di Laurea in Ingegneria e Scienze Informatiche

**SIMULAZIONE DI EVACUAZIONE DI FOLLE IN  
ALCHEMIST: UN MODELLO DI MAPPA MENTALE  
PER PEDONI COGNITIVI**

Tesi di laurea in  
PROGRAMMAZIONE AD OGGETTI

*Relatore*

**Prof. Mirko Viroli**

*Candidato*

**Lorenzo Paganelli**

*Correlatore*

**Prof. Danilo Pianini**

---

Quarta Sessione di Laurea  
Anno Accademico 2018-2019

# Sommario

La simulazione computerizzata di folle in movimento è stato un campo piuttosto attivo recentemente, con applicazioni che vanno dall'intrattenimento alla gestione della sicurezza in luoghi pubblici o privati. Le simulazioni di folle devono prendere in considerazione non solo gli aspetti fisici dell'ambiente e dei pedoni, ma anche i fattori psicologici e sociali che hanno un effetto sul movimento delle persone. La capacità di orientarsi all'interno di un ambiente è una caratteristica fondamentale dell'essere umano e in quanto tale è indispensabile per una simulazione realistica. Diversi modelli assumono che i pedoni abbiano conoscenza totale dell'ambiente, cioè che ne conoscano la topologia e le metriche per intero. Ciò può essere ammissibile quando il processo di navigazione è banale, ad esempio in una piazza, tuttavia in ambienti più complessi questa è una grezza approssimazione, in quanto difficilmente ciascun pedone ne possiede una conoscenza completa (specie se molte delle persone coinvolte visitano l'edificio per la prima volta). Lo scopo del lavoro corrente è modellare la rappresentazione mentale che ciascun pedone ha dell'ambiente circostante, spesso parziale e inaccurata, comunemente nota come mappa cognitiva, e il processo mentale in atto in ogni persona che usa tali informazioni per scegliere quale percorso o direzione seguire (cioè orientarsi). In particolare, ci si ispira al recente lavoro di Andresen, arricchendolo in modo da dotare i pedoni simulati di due comportamenti originariamente non presenti, ossia la tendenza ad evitare vicoli ciechi e zone affollate. A questo si unisce la ricerca in letteratura di un algoritmo in grado di generare un grafo di navigazione di un dato ambiente con ostacoli, ossia un grafo i cui nodi sono poligoni convessi che descrivono le aree dell'ambiente percorribili dai pedoni, mentre gli archi rappresentano le connessioni tra queste. Infine, come parte del contributo del lavoro corrente, viene proposta una procedura in grado di generare in maniera automatica la mappa cognitiva di ciascun pedone, al fine di ridurre al minimo il tempo necessario alla scrittura di simulazioni. Gli algoritmi menzionati consentono di automatizzare la generazione di strutture dati fondamentali ai fini della navigazione, in quanto input necessari ai modelli proposti da Andresen, che però nel suo lavoro non ne tratta la generazione. I modelli e gli algoritmi descritti sono poi implementati all'interno del simulatore Alchemist, l'approccio adottato è ad agenti.

Di particolare interesse per il lavoro corrente sono le simulazioni di evacuazioni di folle, per il loro valore nel prevenire situazioni disastrose durante la pianificazione di eventi o la progettazione di edifici. Detto ciò, i modelli presentati sono pensati per essere usati in qualsiasi tipo di simulazione.

# Indice

<b>Sommario</b>	<b>i</b>
<b>1 Contesto e motivazioni</b>	<b>1</b>
1.1 L'evacuazione di folle . . . . .	1
1.2 La simulazione computerizzata . . . . .	1
1.3 Il simulatore Alchemist . . . . .	4
1.3.1 Il metamodello di Alchemist . . . . .	4
1.3.2 Evacuazione di folle in Alchemist . . . . .	5
1.3.3 Utilizzo . . . . .	6
<b>2 Navigazione cognitiva in Alchemist</b>	<b>8</b>
2.1 Analisi del dominio . . . . .	8
2.1.1 La capacità di orientarsi all'interno di un ambiente . . . . .	8
2.1.2 La conoscenza spaziale . . . . .	9
2.1.3 Il modello di Andresen et al. per lo human wayfinding . . . . .	11
2.1.4 Individuazione dei vicoli ciechi . . . . .	16
2.1.5 Aggiramento delle congestioni . . . . .	17
2.1.6 Generazione della mappa cognitiva . . . . .	18
2.2 Progettazione . . . . .	19
2.2.1 Grafo dell'ambiente e mappa cognitiva . . . . .	20
2.2.2 Pedoni con capacità di orientamento . . . . .	21
2.2.3 Comportamento dei pedoni . . . . .	22
2.3 Implementazione . . . . .	25
2.3.1 Metodologia di lavoro . . . . .	25
2.3.2 Strumenti di sviluppo . . . . .	26
2.3.3 Testing . . . . .	27
<b>3 Valutazione qualitativa</b>	<b>29</b>
3.1 Conoscenza completa dell'ambiente . . . . .	29
3.2 Conoscenza parziale dell'ambiente . . . . .	29
3.3 Nessuna conoscenza dell'ambiente . . . . .	32

<i>INDICE</i>	iv
3.4 Aggiramento delle congestioni . . . . .	32
<b>4 Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>37</b>
4.1 Conclusioni . . . . .	37
4.2 Sviluppi futuri . . . . .	37
<b>Ringraziamenti</b>	<b>44</b>
<b>A File di simulazione</b>	<b>45</b>
A.1 Conoscenza completa dell'ambiente . . . . .	45
A.2 Conoscenza parziale dell'ambiente . . . . .	46
A.3 Nessuna conoscenza dell'ambiente . . . . .	47
A.4 Aggiramento delle congestioni . . . . .	49

# Capitolo 1

## Contesto e motivazioni

### 1.1 L'evacuazione di folle

Al giorno d'oggi, le occasioni in cui un grande numero di persone si raduna in uno spazio relativamente ristretto sono piuttosto frequenti, si pensi ad esempio alla quantità di eventi su larga scala legati allo sport, l'intrattenimento, la cultura o la religione che prendono luogo regolarmente. In queste situazioni la sicurezza è un aspetto centrale ed è necessario essere preparati per ogni tipo di criticità. Solitamente, in situazioni d'emergenza i partecipanti devono essere condotti lontano dalla zona di pericolo nel minor tempo possibile. Talvolta, però, l'evacuazione può sfociare in una fuga incontrollata che muta l'evento in tragedia, come dimostrano gli eventi di piazza San Carlo a Torino (che comunque costituiscono solo uno dei molteplici esempi della pericolosità legata alle evacuazioni), si veda la fig. 1.1. Per evitare situazioni di pericolo, gli organizzatori seguono protocolli di sicurezza ed effettuano simulazioni di evacuazione in vari scenari. Tuttavia, un difetto non trascurabile delle simulazioni reali è la radicale differenza delle condizioni psicologiche dei partecipanti rispetto ad una situazione di vero o presunto pericolo. In più, i costi possono essere proibitivi: una simulazione organizzata dalla UK Marine Coastguard Agency sul traghetto "Stena Invicta" tenutasi al porto di Dover nel 1996 costò più di 10,000 GBP [1]. In questo senso, le simulazioni computerizzate possono talvolta costituire una valida alternativa.

### 1.2 La simulazione computerizzata

La simulazione computerizzata, rispetto a quella reale, presenta costi assai più ridotti e generalmente è in grado di valutare più scenari in minor tempo. In letteratura esistono diversi tipi di modelli per la simulazione di folle in movimento, ciascuno differisce per una gamma di caratteristiche descritte di seguito. Obbiet-



Figura 1.1: Piazza San Carlo a Torino poco dopo la fuga incontrollata della folla, scaturita dal panico e dalla calca causati dall'utilizzo di spray urticante da parte di malviventi, che ha causato più di 1500 feriti nonché la morte di tre persone.

tivo comune di tali modelli, però, è quello di riprodurre comportamenti realistici della folla, ossia comportamenti osservati empiricamente. I diversi modelli possono essere classificati sulla base delle seguenti caratteristiche [27]:

- **Granularità:** Per quanto riguarda la granularità della folla, i modelli vengono divisi in microscopici e macroscopici. Nei modelli microscopici ciascun individuo è rappresentato separatamente, solitamente permettendo di avere eterogeneità tra questi. In contrasto, nei modelli macroscopici è impossibile distinguere i singoli individui: ad esempio i modelli fluidodinamici rappresentano la folla nella sua interezza come, appunto, un fluido.
- **Spazio e tempo:** Per descrivere un sistema di pedoni in movimento si usano variabili che descrivono il tempo, lo spazio e lo stato (e.g. velocità dei pedoni). Ciascuna di queste variabili può essere discreta (cioè un numero intero) o continua (un numero reale), ogni combinazione è possibile. I modelli basati su automi cellulari, ad esempio, descrivono lo spazio in maniera discreta.
- **Determinismo:** I modelli possono essere distinti in deterministici e stocastici. Nei modelli deterministici il comportamento di un pedone in un certo istante è completamente determinato dal suo stato attuale, non c'è casualità. Nei modelli stocastici, invece, il comportamento degli individui è influenzato da un grado di casualità, in modo che un individuo possa reagire in maniera differente alla stessa situazione. Inoltre, l'introduzione di casualità nel

modello può talvolta riflettere la mancanza di conoscenza riguardo i reali processi fisici o mentali in atto nei pedoni.

- **Interazione tra i pedoni:** Per quanto riguarda l'interazione tra gli individui, vengono solitamente distinti modelli basati su regole (o rule-based) e modelli basati su forze (o force-based). Nei primi, i pedoni prendono decisioni sulla base del proprio stato e dell'ambiente circostante, le regole che ne descrivono il comportamento sono spesso derivate dalla psicologia. Nei modelli force-based, invece, i pedoni subiscono forze suscitate dall'ambiente o dagli individui circostanti. Tali forze modellano comportamenti osservati empiricamente, come ad esempio la tendenza ad evitare agglomerati di persone, o ad aggirare ostacoli in un certo modo. In questo caso, una netta distinzione tra i due tipi di interazione non è sempre possibile e diversi modelli combinano elementi di entrambi gli approcci.

Di particolare interesse per il lavoro corrente sono i modelli ad agenti e i modelli basati su forze sociali, entrambi categorizzabili come approcci microscopici, ma differenti per il tipo di interazione tra i pedoni.

**Modelli ad agenti.** I modelli basati sugli agenti approssimano il sistema ad un insieme di entità capaci di interagire tra loro e di prendere delle decisioni autonome basate su un insieme di regole. Ciascun agente percepisce ciò che accade nell'ambiente circostante, prende una decisione sulla base di questo e del suo stato interno, infine agisce. Tali modelli simulano le azioni locali di ciascun pedone e permettono di avere eterogeneità tra questi, essendo che ognuno è dotato di un proprio stato interno mutabile che lo rende diverso dagli altri. L'eterogeneità è essenziale per la realizzazione di pedoni con diversi gradi di conoscenza dell'ambiente.

**Modelli basati su forze sociali.** I modelli basati sulle forze sociali [16] considerano il movimento dei pedoni come la somma di diversi stimoli, ad esempio la volontà di raggiungere una destinazione o di mantenere una certa distanza da eventuali ostacoli. La combinazione di questi stimoli, chiamati appunto forze sociali, determina la velocità e la direzione del movimento di un pedone in ogni istante. Le forze sociali sono in grado di far emergere comportamenti piuttosto realistici partendo dalla somma di forze più semplici.

Un simulatore presente in letteratura che combina agenti e forze sociali è MACES (Multi-Agent Communication for Evacuation Simulation) [22], in grado di simulare pedoni capaci di orientarsi e di apprendere informazioni durante la simulazione. Un altro sistema di simulazione generalmente accreditato è quello proposto da Wagner et al. [32], anch'esso basato su un modello ad agenti ma

specializzato nella simulazione di evacuazioni da auditorium, stadi o edifici simili. Esistono anche strumenti commerciali per la simulazione di folle in movimento, come STEPS<sup>1</sup> o EXODUS<sup>2</sup>, entrambi esaminati da Pelechano in [23]. Infine, tra i simulatori emergenti è presente il progetto nato in seno all'Università di Bologna noto come Alchemist, scelto per questa tesi.

## 1.3 Il simulatore Alchemist

Alchemist [25] è un simulatore stocastico nato all'interno dell'Università di Bologna, che permette la simulazione di scenari inerenti la computazione pervasiva, aggregata ed ispirata alla natura. La chiave della pluralità di Alchemist sta nel suo metamodello, descritto di seguito. Qualunque evento rappresentabile mediante tale metamodello può essere simulato via Alchemist. Questa breve introduzione al simulatore ha come scopo quello di far familiarizzare il lettore con le entità costituenti il metamodello, in quanto in fase di progettazione si dovranno rappresentare i concetti introdotti nel capitolo 2 per mezzo di tali entità. Per una più completa descrizione di Alchemist si veda il sito ufficiale<sup>3</sup>.

### 1.3.1 Il metamodello di Alchemist

Le entità costituenti il metamodello di Alchemist sono le seguenti:

- **Molecola:** corrispettivo del concetto di variabile in un linguaggio di programmazione.
- **Concentrazione:** valore associato a una particolare molecola.
- **Nodo:** contenitore di molecole e reazioni, posizionato all'interno di un ambiente.
- **Ambiente:** contenitore di nodi, modella il concetto di spazio.
- **Reazione:** evento che può modificare l'ambiente, è costituito da condizioni e azioni. Ogni nodo ha un insieme di reazioni che ne definiscono il comportamento.
- **Condizione:** funzione booleana che determina se la reazione associata deve essere eseguita.

---

<sup>1</sup><https://www.steps.mottmac.com>

<sup>2</sup><https://fseg.gre.ac.uk/exodus/>

<sup>3</sup><https://alchemistsimulator.github.io>

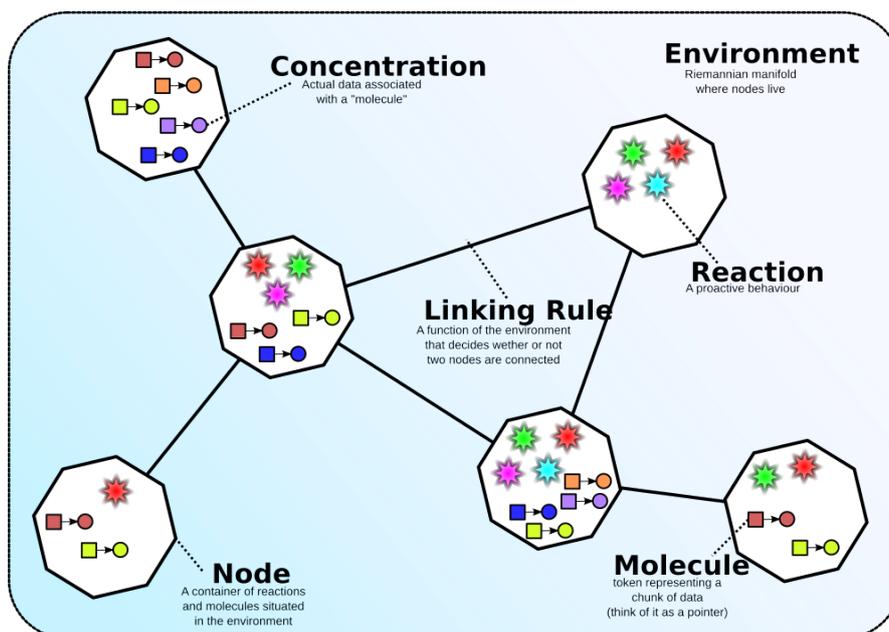


Figura 1.2: Il metamodello di Alchemist.

- **Azione**: modella un qualunque cambiamento dell'ambiente

La fig. 1.2 dà una rappresentazione grafica di tali entità. Queste sono ispirate al mondo della chimica per ragioni storiche, nonostante questo il simulatore è in grado di modellare vari scenari. La natura della sua generalità sta nell'ampia interpretazione dei concetti di molecola e concentrazione: questi due termini hanno un significato ben preciso in chimica, ma in Alchemist corrispondono rispettivamente ad un identificatore e un dato di qualche tipo.

### 1.3.2 Evacuazione di folle in Alchemist

Alchemist è dotato delle astrazioni necessarie a simulare l'evacuazione di folle i cui pedoni presentano diverse caratteristiche fisiche (come sesso ed età), psicologiche (come paura e sensazione di pericolo) e sociali (come la tendenza a rimanere vicino al proprio gruppo sociale). L'approccio adottato è un ibrido basato sul modello ad agenti (che in una certa misura è connaturato al metamodello stesso di Alchemist) con elementi di forze sociali. In particolare, i modelli adottati per descrivere i pedoni sono due: il Network Oriented Modeling [31] viene usato per rappresentare la sfera emotiva di ciascun individuo e la sua evoluzione. Fondamentalmente, tale approccio consiste nell'uso di un grafo orientato per definire processi emotivi interconnessi tra loro. I movimenti della folla, invece, sono realizzati impiegando i comportamenti di steering introdotti da C. W. Reynolds [26]. Questi descrivono il

movimento di un individuo come la somma di diversi stimoli (ad esempio la volontà di rimanere vicino alla propria famiglia, la tendenza ad allontanarsi dalle zone di pericolo), e sono dunque classificabili come forze sociali. Tale approccio è in grado di rappresentare il conflitto di interessi in atto in ogni pedone in una situazione di emergenza e pertanto è capace di far emergere comportamenti assai realistici.

Alla luce di quanto detto finora, si può procedere a classificare Alchemist secondo le quattro caratteristiche descritte in 1.2: esso è un simulatore stocastico che modella spazio, tempo e stato con variabili continue (generalmente più fedeli alla realtà). Ciascun individuo è rappresentato separatamente e c'è eterogeneità tra questi, dunque la granularità è microscopica; infine le interazioni presentano elementi sia degli approcci rule-based che force-based.

I pedoni simulati in Alchemist sono relativamente sofisticati, ma ad ora sprovvisti della capacità di orientarsi all'interno di un ambiente. Scopo del lavoro corrente è fornirli di questa caratteristica, modellando l'inaccuratezza delle informazioni spaziali in possesso di ciascun individuo e il processo mentale che sfrutta queste informazioni ai fini dell'orientamento.

### 1.3.3 Utilizzo

Il linguaggio utilizzato per la scrittura di simulazioni per Alchemist è YAML<sup>4</sup>, un formato per la serializzazione di dati facilmente leggibile dall'uomo. I file di simulazione sono mappe YAML, le principali chiavi utilizzabili sono le seguenti:

- **incarnation**: un'incarnazione è un'istanza del metamodello di Alchemist che definisce il tipo di concentrazione. Al momento esistono quattro incarnazioni, non si entra nei dettagli in quanto non utili ai fini del lavoro corrente. Si sappia unicamente che questa chiave deve indicare quale di queste quattro incarnazioni usare, è l'unica chiave obbligatoria.
- **seeds**: specifica i semi da utilizzare per la generazione di numeri casuali. In particolare, deve essere esplicitato il seme da utilizzare sia durante la creazione che durante l'esecuzione della simulazione. Questi prendono il nome rispettivamente di **scenario** e **simulation**.
- **variables**: valori che si vogliono riutilizzare all'interno del file di simulazione, possono essere sia semplici numeri che oggetti complessi.
- **environment**: l'ambiente dentro il quale si svolge la simulazione.
- **displacements**: le posizioni iniziali dei nodi.

---

<sup>4</sup><https://yaml.org>

Per una descrizione più dettagliata delle chiavi utilizzabili si faccia riferimento al sito di Alchemist<sup>5</sup>. Questa breve digressione riguardo l'utilizzo del simulatore ha l'obbiettivo di far familiarizzare il lettore con la modalità di scrittura delle simulazioni, che verrà citata a più riprese nel seguito.

---

<sup>5</sup><https://alchemistsimulator.github.io/wiki/usage/yaml/>

# Capitolo 2

## Navigazione cognitiva in Alchemist

### 2.1 Analisi del dominio

In questa sezione sono presentati i risultati di alcuni studi precedenti inerenti la capacità dell'essere umano di orientarsi all'interno di un ambiente, da questi risultati vengono poi ricavati dei modelli per rappresentare la conoscenza spaziale dei pedoni utilizzabili in simulazioni ad alto numero di agenti. Si noti che tali modelli non sono che un'approssimazione delle reali capacità dell'essere umano di orientarsi e navigare un ambiente, in quanto diversi dei processi mentali coinvolti in questi compiti rimangono tutt'ora sconosciuti.

Prima di procedere è opportuno fare una disambiguazione: in letteratura con il termine “navigazione umana” ci si riferisce a due capacità dell'uomo: la locomozione e l'orientamento. A grandi linee, la locomozione corrisponde all'abilità di muoversi fisicamente, mentre l'orientamento consiste nello scegliere un percorso o una direzione da seguire verso una destinazione o alla ricerca di qualcosa. Nel seguito si parlerà di “navigazione umana” riferendosi all'orientamento, in quanto i pedoni simulati in Alchemist sono naturalmente già dotati della capacità di locomozione.

#### 2.1.1 La capacità di orientarsi all'interno di un ambiente

Diverse delle abilità fondamentali della nostra specie (e.g. viaggiare, mercanteggiare, cacciare) si basano sulla capacità di navigare l'ambiente circostante. Anche in un contesto urbano, l'uomo sfrutta la sua abilità di orientarsi all'interno di spazi aperti o chiusi giornalmente. In letteratura ci si riferisce a questa capacità come *human wayfinding* [3]. Nonostante questo, diversi aspetti dello *human wayfinding*

rimangono tuttora sconosciuti: alcuni compiti, come ad esempio spostarsi da casa al luogo di lavoro, vengono elaborati automaticamente all'interno del cervello senza la necessità di pensieri espliciti [20]. In particolare, la domanda riguardante *come* diverse strategie e meccanismi mentali lavorino insieme ai fini dello human wayfinding non ha ancora trovato risposta. Prendere in considerazione l'abilità di orientarsi è indispensabile per le simulazioni di pedoni in movimento: è stato infatti dimostrato che in alcuni scenari tale capacità può influenzare significativamente il progredire dell'evacuazione [4]. In diverse simulazioni i percorsi seguiti dai pedoni vengono predeterminati con algoritmi capaci di trovare il cammino minimo (o quello ottimo secondo un qualche criterio) tra la posizione di ogni individuo e una qualche destinazione, assumendo dunque che i pedoni abbiano una conoscenza completa dell'ambiente. Come già detto, tale assunzione può essere ammissibile quando il processo di navigazione è banale, come in una piazza, ma è una grezza approssimazione in ambienti più complessi, in cui difficilmente i pedoni hanno una conoscenza completa della topologia e delle metriche. Lo scopo del lavoro corrente è fornire ciascun individuo di un grado di conoscenza diverso dello spazio circostante, per fare ciò è necessario analizzare come gli esseri umani memorizzano e rappresentano la conoscenza spaziale.

### 2.1.2 La conoscenza spaziale

La capacità di orientarsi all'interno di un ambiente si basa largamente sulla memorizzazione e valutazione di informazioni spaziali. La fonte primaria di tali informazioni è la mappa cognitiva di ciascun individuo, che consiste nella sua rappresentazione mentale dell'ambiente circostante. In questa sezione vengono presentate le principali fonti di informazioni spaziali.

#### Mappa cognitiva

La mappa cognitiva, *cognitive map* in letteratura, raffigura la rappresentazione mentale di un individuo dell'ambiente circostante, o meglio della sua topologia. La mappa cognitiva include anche informazioni riguardanti porzioni dell'ambiente non immediatamente percepibili, ad esempio stanze di un edificio già visitate ma lontane dalla posizione corrente. Tale mappa è costituita principalmente da oggetti e relazioni spaziali tra questi [11, 12]. Gli oggetti, chiamati *landmark* in letteratura, sono elementi architettonici in un qualche modo salienti che vengono memorizzati a causa della loro unicità o diversità. Un esempio di landmark potrebbe essere una torre particolarmente alta [12], in generale è stato mostrato che circa metà degli elementi architettonici di una città è considerato come landmark da praticamente ogni persona [13]. Per quanto riguarda le relazioni spaziali tra landmark, vengono perlopiù memorizzate informazioni riguardo connessioni dirette o indirette (cioè

rappresentabili con una linea spezzata) tra questi [12]. L'uomo tende infatti a determinare la propria posizione e quella di nuovi landmark rispetto a quelle di landmark già memorizzati, che fungono da "ancore" [12]. Originariamente, Tolman introdusse il termine *cognitive map* negli anni 30 quando, conducendo esperimenti sui topi, notò che questi erano in grado di trovare la direzione che li conducesse verso una destinazione già visitata. Tolman [30] dedusse quindi che i topi hanno la capacità di memorizzare le posizioni relative di luoghi specifici. Successivamente, capacità simili sono state osservate nell'uomo e in altri mammiferi [8, 17]. La mappa cognitiva consente alle persone di determinare la posizione relativa di una destinazione non visibile elaborando le informazioni in essa contenute. In generale, i landmark hanno un ruolo fondamentale nell'orientamento umano: la scelta del percorso da seguire viene spesso effettuata presso di questi; in più, i segmenti costituenti tale percorso di solito iniziano e finiscono in corrispondenza di landmark [12]. In molti casi, le mappe cognitive di ambienti poco familiari sono fornite di scarse informazioni, anche dopo più soggiorni in un ambiente la relativa mappa cognitiva può consistere di informazioni incomplete e inesatte [12]. La riproduzione delle mappe cognitive sotto forma di disegni abbozzati mostra poche somiglianze con lo spazio fisico corrispondente [12], i disegni suggeriscono che la mappa cognitiva è piuttosto una rappresentazione imprecisa e astratta dell'ambiente percepito [7]. Gli errori più frequenti riguardano le distanze tra gli oggetti e gli angoli formati dai vari elementi architettonici [12, 9]. Tuttavia, le informazioni contenute nella mappa cognitiva, anche se non complete né dettagliate, possono essere sufficienti per affrontare il problema della navigazione in quanto diversi compiti sono risolvibili con l'aiuto delle relazioni topologiche [9]. Una possibile spiegazione per cui tralasciamo diverse informazioni dettagliate e archiviamo solo parti selezionate e informazioni topologiche sull'ambiente potrebbe essere l'efficienza e i requisiti di memoria minori che accompagnano questa strategia [9].

### **Conoscenza generalizzata**

Gli esseri umani tendono a classificare le proprie esperienze: ogni volta che ci si trova in una nuova situazione questa viene prima confrontata con altre simili di cui si è già fatto esperienza, poi categorizzata di conseguenza. Dopodiché, le vengono associati attributi come aspettative e implicazioni relativi alla classe selezionata [2, 29]. Questo processo può essere utile ai fini della navigazione: anche quando un individuo si trova in un ambiente mai visitato prima, infatti, può ricavare informazioni riguardo il tipo di ambiente mediante il processo descritto. Le informazioni non riguardano la topologia dello specifico ambiente, quanto più alcune caratteristiche che spazi di questo tipo condividono [18, 33]. Ad esempio, immaginando di trovarsi in una stazione metropolitana (sottosuolo), in una scenario di evacuazione le persone cercherebbero naturalmente una scala per risalire. Questo

tipo di conoscenza è chiamata conoscenza generalizzata, in letteratura *generalised knowledge* o *background knowledge*.

### Informazioni esterne

Le fonti di informazioni esterne al pedone sono perlopiù due: la segnaletica (quando presente) e gli altri pedoni. Durante le evacuazioni le informazioni provenienti dalle altre persone sono ampiamente sfruttate da coloro che hanno scarsa familiarità con l'ambiente. In particolare, chi non conosce l'ambiente tende a seguire la folla, assumendo che questa ne abbia una conoscenza più estesa e che entrambi abbiano lo stesso obiettivo: trovare un'uscita (o comunque mettersi in salvo). Questo comportamento è noto come *herding* [15].

### 2.1.3 Il modello di Andresen et al. per lo human wayfinding

Per poter utilizzare quanto descritto finora in simulazioni di evacuazioni di folle è necessario ricavare un modello che descriva come questi concetti possano essere usati in un contesto simile. In particolare, è necessario modellare sia la conoscenza spaziale sia il processo di elaborazione di tale conoscenza, di cui finora si è parlato poco. In più, il modello deve essere adatto ad essere usato in simulazioni con un grande numero di agenti. Un approccio che presenta tutte le caratteristiche elencate è quello proposto da Andresen et al. [3], al cui lavoro questa tesi è largamente ispirata. In questa sezione viene descritta una variante di tale modello a cui sono state apportate alcune modifiche per renderlo più adatto alle esigenze del lavoro corrente. Tra le varie fonti di informazioni spaziali descritte in 2.1.2 si è scelto di utilizzare unicamente la mappa cognitiva, in quanto riveste un ruolo privilegiato nello human wayfinding. In futuro, il modello potrà essere esteso con le altre fonti di informazione.

### Rappresentare l'ambiente

L'ambiente viene descritto con un grafo  $G = (V, E)$  i cui vertici sono poligoni convessi rappresentanti le zone di questo percorribili dai pedoni, in letteratura *walkable areas*, e gli archi descrivono le connessioni tra le varie zone. Per rendere più chiara questa rappresentazione si pensi che, in un ambiente chiuso, le *walkable areas* dovrebbero corrispondere a grandi linee alle stanze e i corridoi dell'edificio, mentre le connessioni rappresentano le porte e i varchi tra questi. Il vantaggio di tale rappresentazione consiste nel fatto che, essendo le *walkable areas* convesse, un pedone può raggiungere due punti qualsiasi all'interno di una tale zona percorrendo il segmento che li congiunge (dunque senza incappare in ostacoli). Ottenere una

tale rappresentazione può non essere banale; a questo proposito, come parte del contributo di questo lavoro, è stato individuato in letteratura ed implementato in Alchemist un algoritmo [14] in grado di ricavare una tale struttura dati a partire da un ambiente con ostacoli. L'algoritmo implementato (una semplificazione di quello presente in letteratura) è soggetto a diverse limitazioni: supporta solo ostacoli convessi, al momento è in grado di individuare unicamente i varchi allineati agli assi dell'ambiente, infine non garantisce la copertura del 100% dell'area percorribile dai pedoni. Nel caso in cui sia necessaria più precisione, è consigliabile produrre il grafo di navigazione dell'ambiente in prima persona (cioè esplicitando a mano le coordinate delle varie walkable areas e le connessioni tra queste). Si noti, infine, che il grafo dell'ambiente è un concetto differente rispetto a quello di mappa cognitiva: il primo corrisponde a un modo di rappresentare l'ambiente più conveniente ai fini della navigazione, è composto da poligoni convessi che descrivono con esattezza lo spazio, e come l'ambiente stesso è unico. Una mappa cognitiva è l'imprecisa rappresentazione mentale di un pedone dello spazio circostante, è composta da landmark ed è potenzialmente differente per ogni individuo.

### **Abilità percettive**

Un pedone all'interno di una qualsiasi walkable area può percepire tutti gli archi incidenti su tale zona, ogni volta che questo entra in una nuova walkable area gli archi incidenti vengono valutati in base alle informazioni spaziali in possesso dell'individuo e viene scelto quello ritenuto "migliore". Questo processo è descritto in dettaglio più avanti. Ciascun pedone in Alchemist è dotato anche di un campo visivo, avente la forma di un settore circolare, usato per determinare quali sono gli agenti che influenzano l'individuo sul piano psicologico. Per semplicità, si è scelto di non usare tale campo visivo ai fini dell'orientamento; in futuro il modello potrà essere modificato in modo che il pedone possa percepire solo gli archi (o meglio, i passaggi) che si trovano nel suo campo visivo.

### **Mappa cognitiva**

Come già detto in 2.1.2, una mappa cognitiva difficilmente contiene informazioni complete o precise. Per modellare queste inaccurately, Andresen [3] propone di utilizzare delle ellissi per descrivere la posizione dei landmark: queste sono in grado sia di modellare l'imprecisione riguardante l'esatta posizione del landmark, sia di rappresentare l'inaccuratezza riguardo gli angoli formati dalle connessioni tra questi. Inoltre, le ellissi si rivelano più versatili delle circonferenze in aree rettangolari come i corridoi, in quanto sono in grado di coprire un'area maggiore e dunque di descrivere un'imprecisione maggiore. Il grado di familiarità di un individuo con l'ambiente può essere manipolato aggiungendo e rimuovendo dei landmark,

o modificando la forma delle ellissi. Per quanto riguarda le relazioni spaziali tra landmark, si è scelto di memorizzare unicamente un'informazione booleana indicante se tra due landmark è presente una connessione, diretta o indiretta che sia. Tale informazione va interpretata come segue: se c'è una connessione, allora è possibile trovare un percorso che conduca da un landmark all'altro (questo può essere diretto o indiretto, cioè rappresentabile con una linea spezzata); se al contrario non c'è una connessione, il pedone non ha alcuna informazione riguardante un possibile percorso tra i due landmark, che comunque potrebbe esistere. Infine, si assume che ogni landmark sia necessariamente contenuto all'interno della relativa ellisse e che ogni ellisse sia contenuta in una sola walkable area.

### Memoria volatile

La memoria volatile consta delle informazioni sull'ambiente che il pedone apprende durante l'evacuazione, si distingue dalla mappa cognitiva in quanto le informazioni contenute in quest'ultima sono in possesso del pedone prima dell'inizio dell'evacuazione. Andresen [3] si riferisce a questo concetto come *short-term memory*. Normalmente, vorremmo che tali informazioni si aggiungessero alla mappa cognitiva di ogni pedone. Per semplicità, però, si è scelto di modellare unicamente la capacità delle persone di ricordare e riconoscere aree dell'ambiente già visitate durante l'evacuazione. Per fare ciò, è sufficiente memorizzare le zone già visitate in una qualche struttura dati: durante la valutazione degli archi incidenti sulla zona in cui il pedone si trova, verranno preferiti quelli che conducono ad aree ancora non visitate.

### Elaborazione delle informazioni spaziali

L'elaborazione delle informazioni spaziali in possesso di un pedone ha come scopo quello di determinare la direzione (o meglio, il verso) in cui il pedone si muove in ogni istante, la velocità è determinata da altri fattori fisici e psicologici. Come già anticipato, ogni volta che un pedone entra in una walkable area gli archi incidenti vengono valutati sulla base delle informazioni spaziali in possesso dell'individuo e viene scelto quello ritenuto migliore. A fare questo è il sistema di pesi descritto alla fine di questa sezione.

**Valutazione della mappa cognitiva.** La valutazione della mappa cognitiva è effettuata un'unica volta all'inizio della simulazione e ha come scopo quello di fornire un percorso verso una possibile uscita. Si procede come segue: la mappa viene osservata cercando appunto un'uscita o una destinazione di qualche tipo, rappresentata con un landmark speciale. Se almeno una destinazione è presente

nella mappa, si cerca il landmark più vicino al pedone che sia connesso alla destinazione eventualmente mediante altri landmark. Il percorso ottenuto, costituito da una lista di landmark, sarà quello seguito dal pedone. Nel caso peggiore tale percorso consta unicamente di un elemento, ossia la destinazione, in quanto non è stato possibile trovare altri landmark connessi ad essa. Se invece nella mappa cognitiva non è presente alcuna informazione riguardo una possibile uscita, questa risulta inutile e altre strategie descritte di seguito vengono adottate.

**Navigazione verso la prossima sotto-destinazione.** Nel caso in cui la mappa cognitiva fornisca un percorso verso una destinazione, è possibile seguirlo utilizzando i landmark costituenti il percorso come progressive sotto-destinazioni: ogni volta che il pedone avvista una sotto-destinazione (ossia si trova nella walkable area che contiene tale landmark), quella successiva viene prelevata dal percorso e diventa il nuovo obiettivo. E' importante ricordare, però, che il pedone è al corrente unicamente del fatto che tra i vari landmark costituenti il percorso c'è un qualche tipo di connessione. Questa può essere diretta, cioè è possibile passare da un landmark all'altro percorrendo il segmento che li congiunge, o indiretta, ossia ci sono ostacoli tra i due e dunque è necessario seguire un percorso più articolato (si immagini ad esempio il caso in cui il cammino fornito dalla mappa cognitiva consti soltanto della destinazione finale). Si deduce quindi che non è sufficiente guidare il pedone in direzione della prossima sotto-destinazione, in quanto si rischia di rimanere bloccati da ostacoli. Né tantomeno è possibile usare alcun tipo di algoritmo di ricerca su grafo per trovare un percorso, in quanto il pedone non ha informazioni riguardo la struttura spaziale al di là della zona in cui si trova (eccezion fatta per la mappa cognitiva, le cui informazioni però sono già state considerate). Per questa casistica, Andresen [3] propone una procedura piuttosto realistica che permette ai pedoni di formulare una ragionevole ipotesi riguardo quale varco scegliere in ogni walkable area per avvicinarsi alla sotto-destinazione corrente. Ciò che fa è trovare le linee spezzate rappresentanti i percorsi più brevi possibili da ogni varco della zona corrente verso l'ellisse della prossima destinazione, con il vincolo che tali percorsi non si sovrappongano al poligono convesso in cui il pedone si trova. La fig. 2.1 dà una rappresentazione visiva di questo processo. I varchi vengono poi classificati in base alla lunghezza del percorso corrispondente, quello che in figura è tratteggiato è il percorso ritenuto preferibile.

**Il sistema di pesi.** Ogni volta che un pedone entra in una nuova walkable area, gli archi incidenti su tale zona (ossia i passaggi tra questa e le zone adiacenti) vengono valutati sulla base delle informazioni spaziali disponibili. Il sistema di pesi, in letteratura *weighting system* [3], è usato per assegnare un peso ad ogni arco; quello con peso minimo sarà poi selezionato. Il calcolo del peso  $w$  di un arco

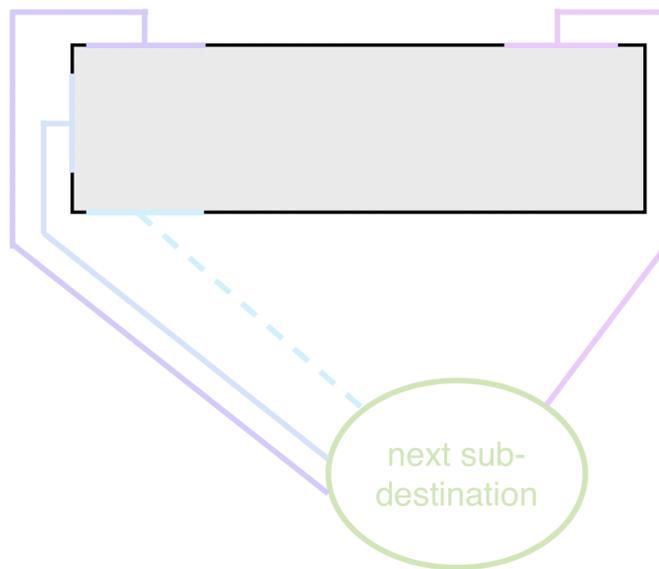


Figura 2.1: In grigio è disegnata una walkable area rettangolare, in nero è rappresentato il contorno di tale area: le porzioni di contorno di colori differenti corrispondono ai varchi che da questa conducono a zone adiacenti. Con colori diversi vengono mostrati i percorsi costituiti da linee spezzate (o *polygonal chains*) congiungenti ogni varco con l'ellissi della prossima sotto-destinazione. Il percorso tratteggiato è quello ritenuto migliore.

e visibile viene effettuato come segue:

$$w(e) = f_{volatile\ memory} \cdot f_{cognitive\ map} \cdot f_{final} \quad (2.1)$$

dove  $f_{volatile\ memory}$  è il fattore che tiene conto della memoria volatile, calcolato come segue:

$$f_{volatile\ memory} = 2^k \quad (2.2)$$

con  $k = 0, 1, 2, \dots$  che descrive quante volte la zona a cui l'arco conduce è stata visitata. Quando la mappa cognitiva si rivela inutile, questo fattore è fondamentale in quanto favorisce l'esplorazione dell'ambiente aumentando il peso di archi che conducono a zone già visitate.  $f_{cognitive\ map}$  è il fattore che tiene conto delle informazioni provenienti dalla mappa cognitiva, calcolato come segue:

$$f_{cognitive\ map} = \begin{cases} 1 - 0.5^r & \text{if cognitive map is in use} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.3)$$

dove  $r = 1, 2, 3, \dots$  è il ranking assegnato all'arco che si sta valutando. Se la mappa cognitiva non è in uso perché non contiene informazioni utili, si avrà  $f_{cognitive\ map} = 1$  per ogni arco. Infine,  $f_{final}$  è usato per tenere conto di eventuali uscite che vengono incontrate strada facendo, è calcolato come segue:

$$f_{final} = \begin{cases} \frac{1}{10} & \text{if edge leads to a final destination} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.4)$$

Se l'arco che si sta valutando conduce a una zona che contiene una destinazione di interesse allora gli sarà assegnato  $f_{final} = 0.1$ , altrimenti il peso assegnato è  $f_{final} = 1$ . Si noti che questo richiede di marcare alcune walkable areas dell'ambiente come finali, similmente a quanto già fatto per i landmark contenenti almeno una destinazione. Nel caso in cui venga incontrata un'uscita sconosciuta strada facendo, inoltre, l'eventuale percorso che si stava seguendo viene abbandonato. Le quantità costanti mostrate sono ricavate empiricamente in [3]. Quando più archi ottengono lo stesso peso e questo è il peso minimo, è necessario impiegare un qualche tipo di criterio per scegliere quale percorrere. In questi casi, viene scelto il varco più vicino alla posizione corrente del pedone, questo approccio è noto in letteratura come *nearest door heuristic* [28, 5]. In futuro si potrebbero adottare strategie che meglio riproducono il comportamento umano, ad esempio è stato osservato che le persone tendono a muoversi sempre nello stesso verso a meno che la deviazione dalla direzione corrente fornisca una visibilità maggiore [24].

### 2.1.4 Individuazione dei vicoli ciechi

Come parte del contributo di questa tesi, in questa sezione il sistema di pesi appena descritto viene raffinato in modo da fornire ai pedoni simulati un comportamento originariamente non presente ma ritenuto fondamentale, ossia la tendenza ad

evitare vicoli ciechi. Tale comportamento produce pattern di esplorazione assai più realistici quando il pedone è fornito di scarse informazioni riguardo l'ambiente. Un semplice modo per indurre gli agenti simulati a evitare i vicoli ciechi consiste nell'aggiungere un fattore all'eq. (2.1) che aumenti il peso degli archi conducenti ad aree di questo tipo, ad esempio:

$$f_{impasse} = \begin{cases} 10 & \text{if pedestrian knows that the edge being} \\ & \text{weighted leads to an impasse} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5)$$

Si noti che tale fattore è soggetto alla conoscenza del singolo:  $f_{impasse}$  assume valore massimo solo quando il pedone *sa* che l'arco in esame conduce ad un vicolo cieco. In particolare, in questo caso viene fatto uso della memoria volatile: un arco conducente ad un'area senza uscite viene assegnato peso massimo solo dopo averne fatto esperienza, sarebbe infatti inaccurato impedire che pedoni con scarsa familiarità con l'ambiente incappino in zone di questo tipo. E' invece decisamente più realistico far sì che tali pedoni evitino di visitarle una seconda volta.

### 2.1.5 Aggiramento delle congestioni

La tendenza ad evitare aree congestionate è fondamentale in scenari d'emergenza, in quanto può influire significativamente su tempi e modi di evacuazione. Essendo i pedoni simulati da Andresen [3] sprovvisti di questo comportamento, si è scelto di contribuire in tal senso. In modo analogo a prima, si aggiunge un fattore all'eq. (2.1) che aumenti il peso degli archi conducenti ad aree congestionate:

$$f_{congestion} = \frac{\text{occupied area}}{\text{total area}} + 1 \quad (2.6)$$

Il rapporto tra area occupata ed area totale della zona a cui l'arco in esame conduce corrisponde alla percentuale di occupazione di tale zona, o densità. Questo valore, originariamente appartenente all'intervallo  $[0, 1]$ , viene mappato nell'intervallo  $[1, 2]$  in modo da evitare che in caso di densità nulla anche gli altri fattori vengano annullati. Si noti che la tecnica appena descritta non è che un'approssimazione del comportamento noto come *congestion avoidance*. In una situazione di evacuazione reale, infatti, i pedoni coinvolti non solo tendono ad evitare aree affollate, ma sono generalmente in grado di ricalcolare il proprio obiettivo a fronte del movimento delle altre persone. Ad esempio, nel caso in cui il percorso verso l'uscita scelta risultasse troppo congestionato, un pedone reale potrebbe pensare di dirigersi verso un'uscita differente. In futuro, si potrebbe dotare i pedoni simulati di un tale comportamento.

In conclusione, il raffinamento dell'eq. (2.1) porta alla seguente formula:

$$w(e) = f_{\text{volatile memory}} \cdot f_{\text{cognitive map}} \cdot f_{\text{final}} \cdot f_{\text{impasse}} \cdot f_{\text{congestion}} \quad (2.7)$$

### 2.1.6 Generazione della mappa cognitiva

Come già detto, l'obiettivo di questa tesi è la realizzazione di pedoni con differenti gradi di conoscenza dell'ambiente circostante. E' stato spiegato che il livello di familiarità di un individuo con l'ambiente può essere variato aumentando o diminuendo il numero e la forma dei landmark presenti nella sua mappa cognitiva. In fase di scrittura di una simulazione, però, dover esplicitare la mappa cognitiva di ogni singolo individuo risulterebbe laborioso. Ciò che si vuole fare, invece, è permettere che tale struttura dati sia generata in modo automatico per ogni pedone, fornirne il livello di familiarità con l'ambiente e un grafo di navigazione dello stesso. Come parte del contributo di questa tesi, viene presentato di seguito un semplice algoritmo per farlo: si sceglie in modo casuale una percentuale di walkable areas pari al grado di familiarità del pedone, vengono scartate le zone la cui area risulta essere troppo piccola secondo una data soglia, in quanto difficilmente possono contenere un landmark. In ciascuna delle aree selezionate viene poi generata un'ellissi di dimensioni casuali ma completamente contenuta nella relativa zona. Per quanto riguarda le connessioni tra landmark, si produce un grafo in cui ogni ellissi è connessa ad ogni altra ellissi da essa raggiungibile, con un arco il cui peso è pari al numero di zone da attraversare per passare dall'una all'altra. Infine, viene generato un albero di copertura minimo di tale grafo; il significato di quest'ultima procedura è l'assunzione che i pedoni memorizzino la posizione di nuovi landmark rispetto a quella dei landmark già memorizzati più vicini, favorendo quindi relazioni spaziali tra landmark quanto più semplici possibili in termini di numero di aree da attraversare. Idealmente, più è alto tale numero più il percorso tra i due landmark è spezzato e, in un certo senso, complesso. Si noti che un albero di copertura per quanto minimo non necessariamente contiene un cammino minimo del grafo originale per ogni coppia di nodi, si veda la fig. 2.2. Dunque un pedone con una familiarità totale con l'ambiente potrebbe non scegliere il percorso ottimo verso la sua destinazione. Questo può o meno essere ammissibile: da una parte è realistico pensare che una persona con conoscenza completa dell'ambiente scelga il percorso migliore, dall'altra è pur vero che anche quando la familiarità di un individuo con un ambiente è alta questo tende a percorrere le strade a cui è più avvezzo. In futuro, se si riterrà opportuno, si potrà modificare l'algoritmo in modo da generare un grafo contenente almeno un cammino minimo del grafo originale per ogni coppia di nodi.

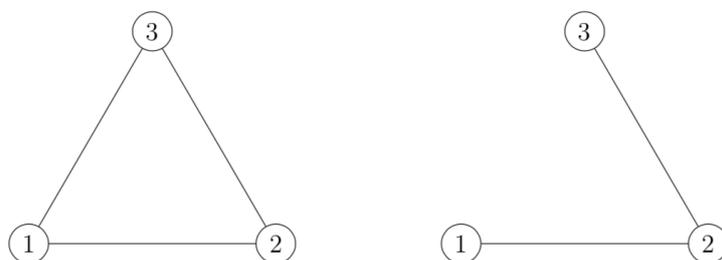


Figura 2.2: A sinistra: un grafo indiretto composto da tre vertici connessi da altrettanti archi di costo unitario. A destra: un albero di copertura minimo di tale grafo. Si noti che questo non contiene l'arco che congiunge i nodi 1 e 3, in quanto per definizione un albero di copertura contiene un solo cammino per ogni coppia di nodi. Si osservi dunque che tale albero non contiene il cammino minimo dal nodo 1 al nodo 3; o meglio, il cammino minimo da 1 a 3 ottenibile dall'albero di copertura ha peso 2, che è maggiore del peso del cammino minimo ottenibile dal grafo originale.

## 2.2 Progettazione

In questa sezione i concetti introdotti finora vengono mappati nell'universo di Alchemist, ossia vengono rappresentati per mezzo delle entità che ne costituiscono il metamodello. Prima di entrare nel merito delle scelte progettuali fatte, però, è bene spiegare quanto già presente in Alchemist. Esistono tre tipi di pedone di crescente complessità creati partendo dal concetto di nodo:

- **Pedone omogeneo:** un nodo con velocità di camminata e di corsa predefinite.
- **Pedone eterogeneo** un nodo con un sesso ed una età assegnati, dai quali sono determinate velocità, conformità alle regole ed attitudine ad aiutare.
- **Pedone cognitivo:** un pedone eterogeneo con delle emozioni, capace di influenzare e farsi influenzare dagli altri.

Esiste anche una varietà di azioni di steering create a partire dal concetto omonimo in Alchemist, e diverse reazioni che sfruttano e combinano queste azioni in modo differente. Per una più completa descrizione si veda il lavoro relativo [19].

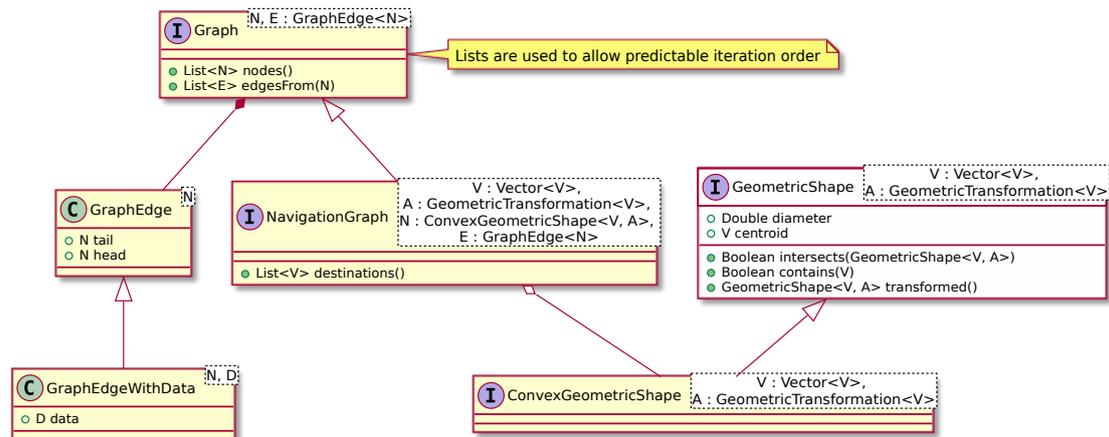


Figura 2.3: Diagramma delle classi UML che mostra la definizione del concetto di grafo di navigazione e la relativa gerarchia di interfacce. In giallo sono disegnati i componenti aggiunti, in bianco quelli già presenti.

### 2.2.1 Grafo dell'ambiente e mappa cognitiva

Grafo dell'ambiente e mappa cognitiva rivestono un ruolo principale nel processo di navigazione in quanto usati pervasivamente, entrambi sono rappresentabili come grafi i cui nodi possono essere riconducibili a figure convesse (poligoni in un caso, ellissi nell'altro), alcune delle quali necessitano di essere marcate come finali. Viste le somiglianze tra i due concetti, si è scelto di rappresentarli mediante una stessa interfaccia, si veda la fig. 2.3. Un `NavigationGraph` altro non è che un grafo usato per scopi di navigazione, i cui nodi sono appunto figure convesse. In aggiunta, una tale struttura dati è in grado di memorizzare un insieme di destinazioni: le figure convesse contenenti queste destinazioni saranno marcate come finali. Questa scelta, rispetto alla semplice marcatura di alcune aree, permette ai pedoni di raggiungere l'esatta destinazione di interesse una volta avvistatala, ossia una volta entrati nella relativa area. Come si può vedere, nella definizione delle interfacce si è cercato di mantenere quanta più generalità possibile: l'interfaccia `Graph` modella un generico grafo diretto e dunque può essere riusata per altri scopi, si noti che mappa cognitiva e grafo dell'ambiente sono invece indiretti: un tale grafo può essere ottenuto semplicemente aggiungendo un arco nel verso opposto per ogni arco presente nella controparte diretta. Inoltre, l'interfaccia `NavigationGraph` non è vincolata ad un particolare spazio, dunque potrà essere riusata in simulazioni tridimensionali (o  $n$ -dimensionali). Infatti, Alchemist al momento è dotato unicamente degli strumenti per simulazioni bidimensionali. Oltre a quanto mostrato, sono state aggiunte delle implementazioni assai banali dei concetti di `Graph` e `NavigationGraph`, nonché altrettante classi `Builder` utilizzabili per ottenere tali

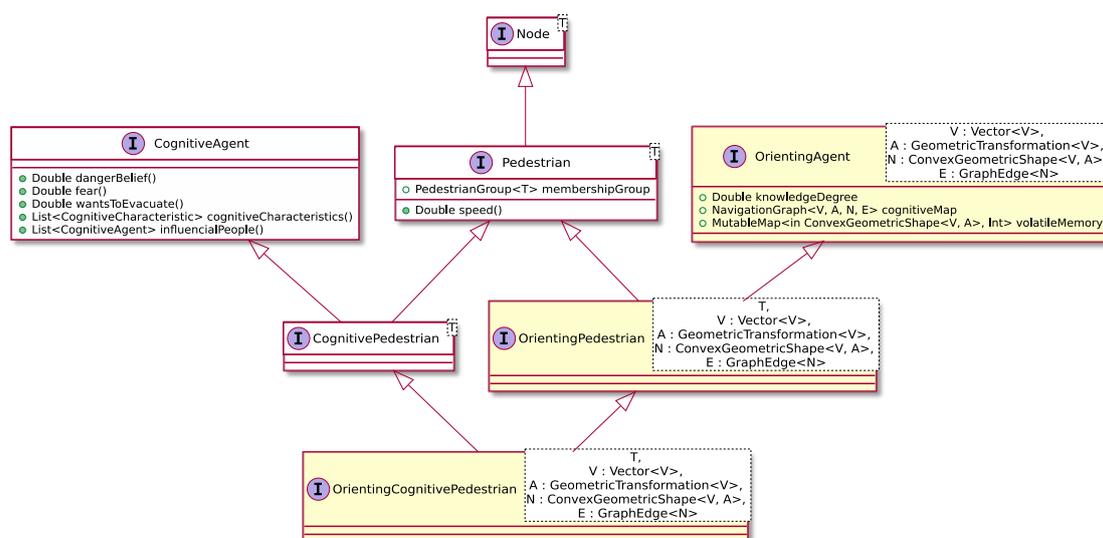


Figura 2.4: Diagramma delle classi UML che mostra la nuova gerarchia di interfacce relative al concetto di pedone. In giallo sono disegnati i componenti aggiunti, in bianco quelli già presenti.

oggetti secondo il paradigma definito dall'omonimo pattern [10].

### 2.2.2 Pedoni con capacità di orientamento

Scopo di questa sezione è fornire ai pedoni descritti sopra la capacità di orientarsi. E' opportuno notare, però, che esiste una netta distinzione tra il concetto di pedone e il suo comportamento: il primo corrisponde all'astrazione nella quale le informazioni spaziali come la mappa cognitiva sono contenute, il secondo consiste nell'elaborazione di tali informazioni ai fini dell'orientamento. Come già detto, in Alchemist i pedoni vengono definiti a partire dal concetto di nodo, mentre il loro comportamento corrisponde a una reazione. In questa sezione ci si concentrerà sulla nuova gerarchia di pedoni, mentre nella prossima si parlerà dei comportamenti associati. Fatta questa doverosa premessa, si può procedere alla progettazione: in fig. 2.4 viene mostrata la gerarchia di interfacce riguardanti il concetto di pedone, estesa con quanto descritto finora. Si è scelto di introdurre l'interfaccia `OrientingAgent`, in modo da non vincolare l'orientabilità ai pedoni umani. Come si può notare, inoltre, tale astrazione così come quelle da essa derivate non sono vincolate ad un particolare spazio, in modo da mantenere quanta più generalità possibile. In fig. 2.5 viene mostrata la gerarchia di classi che realizzano tali interfacce, capostipite della gerarchia è la classe astratta `AbstractOrientingPedestrian`, che mantiene la massima generalità e contiene

l'algoritmo descritto in 2.1.6 per la generazione automatica della mappa cognitiva. Il solo compito lasciato alle sotto classi è la creazione dei landmark, via `factory method` [10], in quanto dipendente dallo specifico spazio in cui il pedone si trova (ad esempio, in uno spazio tridimensionale è possibile che i landmark assumano la forma di ellissoidi anziché ellissi). La classe `OrientingPedestrian2D` definisce un pedone orientabile in un spazio euclideo bidimensionale ed implementa tale metodo; le sue sottoclassi realizzano delle versioni orientabili dei tipi di pedone già esistenti. A tal fine, `OrientingCognitivePedestrian2D` si compone dell'implementazione già presente di pedone cognitivo. Per evitare l'esplosione del numero di classi, si è scelto di evitare la realizzazione di pedoni eterogenei orientabili, in quanto ottenibili dai pedoni cognitivi orientabili ignorandone la parte cognitiva.

### 2.2.3 Comportamento dei pedoni

Scopo di questa sezione è definire una reazione capace di sfruttare le informazioni spaziali in possesso di un `OrientingPedestrian` ai fini della navigazione. In fig. 2.6 è mostrata la gerarchia di classi relativa: ne è capostipite la classe astratta `AbstractOrientingBehavior`, che definisce il comportamento desiderato mantenendo la massima generalità e lasciando due compiti alle sotto classi, via `template method` [10], similmente a quanto già visto per `AbstractOrientingPedestrian`. In questo caso, ancor più che nel precedente, tale generalità viene al prezzo di una grande quantità di tipi parametrici, che però permettono di avere flessibilità massima. I compiti lasciati alle sotto classi sono i seguenti:

- Classificazione dei varchi della zona corrente in base all'adeguatezza per il raggiungimento del prossimo landmark. Si tratta di quanto descritto in 2.1.3: essendo una computazione fortemente geometrica, si è preferito lasciare l'onere dell'implementazione alla sotto classe `OrientingBehavior2D`. Questa assume uno spazio euclideo bidimensionale, e dunque ha la possibilità di usare varie funzioni di utilità che rendono il compito assai meno laborioso. In futuro, l'implementazione potrà essere spostata nella classe padre.
- Calcolo della posizione verso la quale muovere il pedone, dato il varco che si è scelto di attraversare. Questa procedura consiste nell'identificazione del punto appartenente al contorno della walkable area corrente, verso il quale il pedone deve dirigersi per spostarsi nella zona adiacente scelta. Per fare ciò naturalmente è necessario essere in possesso di maggiori informazioni riguardo la forma del varco scelto. Solitamente tali informazioni vengono memorizzate negli archi del grafo dell'ambiente, che rappresentano appunto i passaggi tra le varie walkable areas. Essendo la classe astratta `AbstractOrientingBehavior` priva di assunzioni sul tipo di archi del grafo

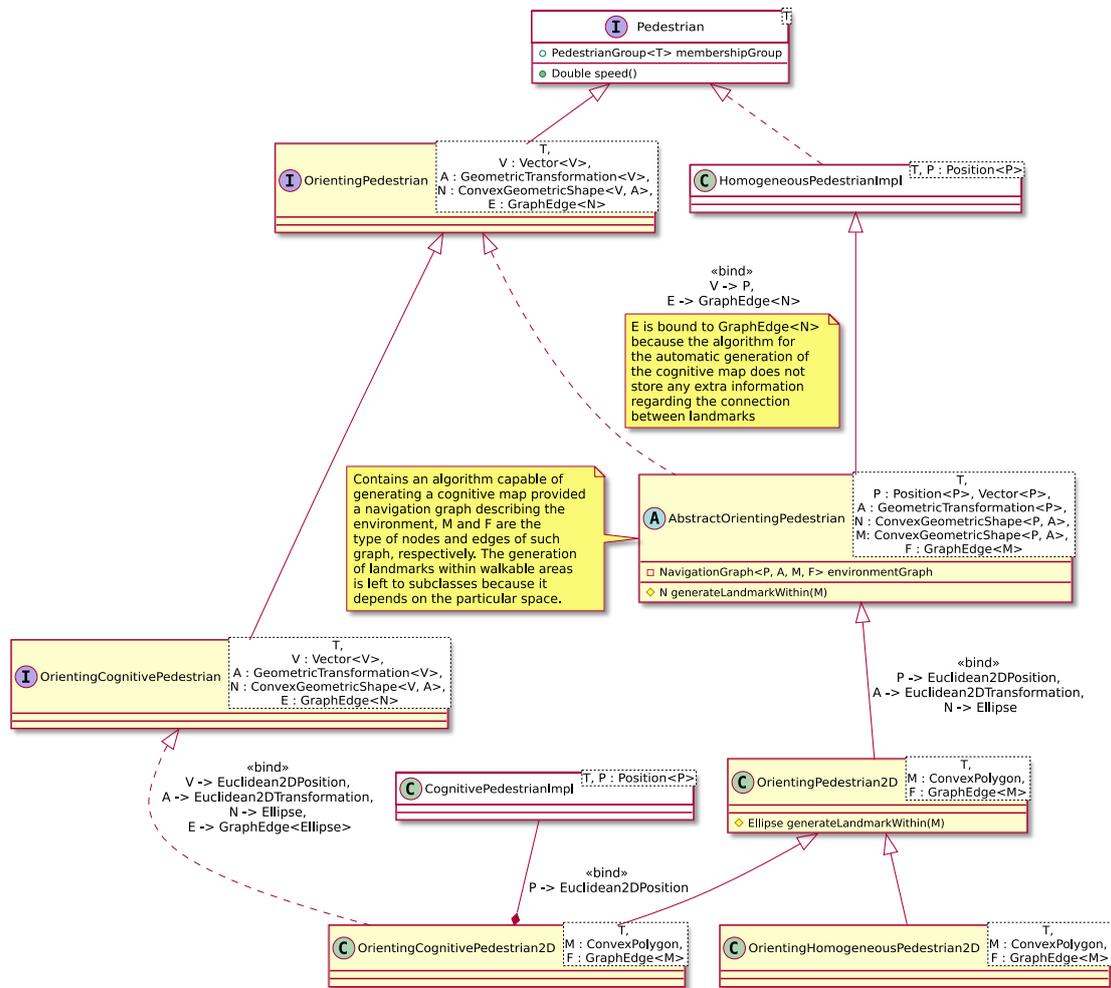


Figura 2.5: Diagramma delle classi UML che mostra la nuova gerarchia di classi relative al concetto di **OrientingPedestrian**. In giallo sono disegnati i componenti aggiunti, in bianco quelli già presenti.

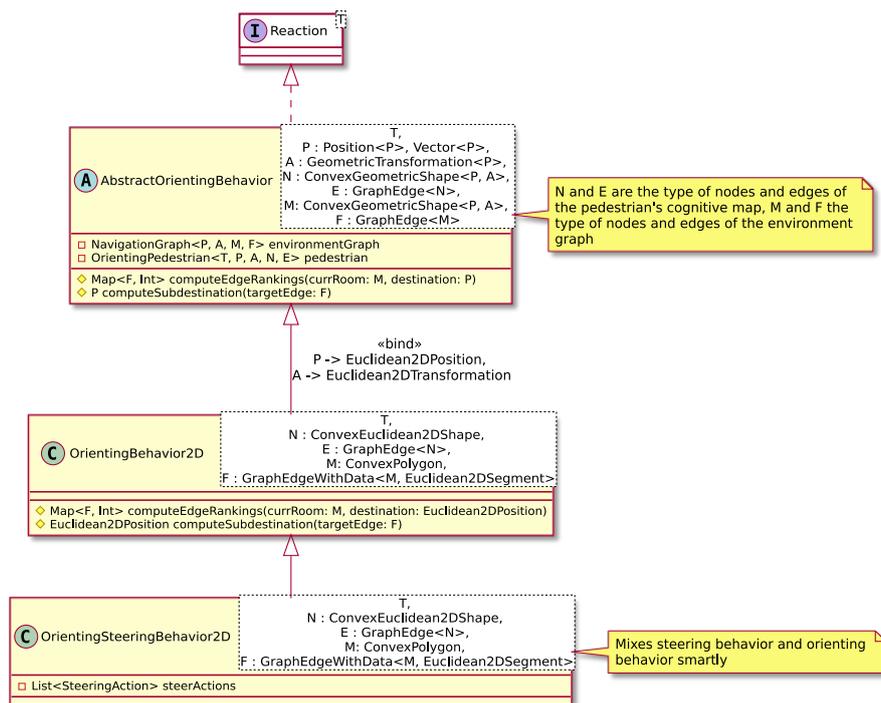


Figura 2.6: Diagramma delle classi UML che mostra la definizione delle reazioni costituenti il comportamento degli **OrientingPedestrian**. In giallo sono disegnati i componenti aggiunti, in bianco quelli già presenti.

e la presenza di eventuali informazioni aggiuntive, tale compito è lasciato alle sotto classi. Come si può vedere, la classe derivata `OrientingBehavior2D` accetta invece un grafo dell'ambiente i cui archi contengono come informazione aggiuntiva un `Euclidean2DSegment`. Tale segmento, localizzato sul bordo di un poligono convesso, rappresenta proprio un passaggio tra questo e un poligono adiacente. Scelto un arco incidente sulla zona corrente, la procedura in esame otterrà il segmento associato a tale arco e identificherà il punto di questo che più è conveniente attraversare (può essere quello più vicino al pedone, o quello più vicino alla direzione del prossimo landmark da trovare).

Infine, è stata realizzata una reazione che combina azioni di steering e capacità di navigazione. L'implementazione di una classe *ad hoc* si rende necessaria in quanto la combinazione delle forze provenienti dai due comportamenti tramite semplice somma può portare a situazioni poco realistiche. Si pensi al caso in cui più forze con verso opposto si annullino l'un l'altra: il pedone correrebbe il rischio di rimanere immobile nonostante sia sottoposto a diversi stimoli. La classe `OrientingSteeringBehavior2D` si premura di combinare tali forze in modo da garantire che il pedone possa raggiungere la sua destinazione. Non si entra nel merito di come le forze vengono combinate in quanto i risultati ottenuti per quanto corretti sono ancora scarsi: i pedoni dotati di tale comportamento riescono sì a raggiungere i propri obiettivi, ma muovendosi in maniera poco realistica. In particolare, si verifica un fenomeno noto come *shaking*, che causa movimenti a scatti. In futuro, si potranno adottare approcci più sofisticati e corretti alla combinazione delle forze rappresentati i diversi interessi di un individuo, in modo da rimuovere lo shaking.

## 2.3 Implementazione

### 2.3.1 Metodologia di lavoro

#### Divisione in moduli

Essendo Alchemist incentrato sulla modularità, si è seguito tale principio di divisione in moduli: le astrazioni relative ai pedoni orientabili sono state inserite nel modulo già esistente `alchemist-cognitive-agents`. La scelta è dovuta al fatto che i pedoni con capacità di navigazione cognitiva sono stati ritenuti a tutti gli effetti pedoni cognitivi. Le astrazioni relative al concetto di grafo e grafo di navigazione, invece, sono state inserite nel modulo `alchemist-implementationbase`, in quanto dotate di una certa generalità e riutilizzabili per diversi scopi.

## Divisione in package

Tutte le astrazioni derivanti da entità del metamodello di Alchemist sono state organizzate in package seguendo la stessa struttura: è stata eseguita una netta divisione tra interfacce e implementazioni. In più, le implementazioni sono state divise in ulteriori package a seconda dell'entità del metamodello a cui fanno riferimento: nodo, azione o reazione. Per quanto riguarda le entità relative al concetto di grafo, sono state organizzate in un package omonimo, ed è stata seguita la medesima differenziazione tra interfacce ed implementazioni. Durante la scrittura di simulazioni in linguaggio YAML, tali accorgimenti permettono di specificare il tipo di un oggetto indicando esclusivamente il nome della classe, omettendo quindi l'intero package di appartenenza.

### 2.3.2 Strumenti di sviluppo

#### Git

Git<sup>1</sup> è un sistema di controllo di versione distribuito (DVCS) che permette di tenere traccia delle modifiche effettuate durante lo sviluppo di software. Tra le altre cose, git offre la possibilità di mantenere due versioni dello stesso progetto: una stabile e una in via di sviluppo; tale organizzazione risulta piuttosto flessibile per fronteggiare i problemi che solitamente si incontrano in fase di implementazione. Alchemist è sviluppato con la metodologia di lavoro nota come Gitflow<sup>2</sup>, che prevede che ogni componente del team di sviluppo abbia una propria copia del progetto principale: l'aggiunta di codice al repository centrale avviene per mezzo di *pull requests*, con le quali un membro del team richiede che il suo codice sia aggiunto a tale repository.

#### Gradle

Gradle<sup>3</sup> è un sistema per l'automazione dello sviluppo software, la cui caratteristica principale è il supporto per sviluppi incrementali. In breve, esso è in grado di determinare quali porzioni del sistema software necessitano di essere ricostruite (fondamentalmente, quelle il cui codice è stato modificato), riducendo quindi significativamente il tempo di costruzione del progetto. Alchemist fa largo uso di tale strumento in quanto estremamente comodo soprattutto in progetti ad alto numero di dipendenze.

---

<sup>1</sup><https://git-scm.com>

<sup>2</sup><https://nvie.com/posts/a-successful-git-branching-model/>

<sup>3</sup><https://gradle.org>

## Travis CI

Travis CI<sup>4</sup> è un servizio di integrazione continua utilizzato per costruire e testare progetti software. Esso offre la possibilità di monitorare il comportamento del progetto su diversi sistemi operativi e con diverse configurazioni, permettendo quindi di tenere sotto controllo la retrocompatibilità ed il supporto multi-piattaforma di Alchemist, testandone il funzionamento con diverse versioni della JVM su tutti i principali sistemi operativi.

## Orchid

Orchid<sup>5</sup> è uno strumento che permette la generazione automatica di pagine web statiche contenenti la documentazione relativa a classi e interfacce presenti in Alchemist (comunemente nota come API). Tale documentazione è estrapolata direttamente dal codice sorgente del progetto in maniera completamente automatica.

## Kotlin

Kotlin<sup>6</sup> è un linguaggio di programmazione general purpose, multi-paradigma (presenta sia caratteristiche tipiche della programmazione ad oggetti sia del paradigma funzionale), multi-piattaforma e open source; scelto per l'implementazione degli agenti orientabili in Alchemist. La sua caratteristica principale consiste nella completa interoperabilità con Java e con la Java Virtual Machine (JVM), che gli permette di sfruttare l'enorme quantità di librerie disponibili per quest'ultimo. Rispetto a Java, però, Kotlin risulta essere significativamente più conciso, cosa che ha permesso di accelerare notevolmente la fase di implementazione. Volendo citare concretamente uno dei vantaggi di Kotlin in tal senso, non si può non nominare le funzioni di estensione: come intuibile dal nome, queste permettono di estendere le funzionalità di particolari classi o interfacce senza intaccarne l'API. Durante lo sviluppo, è stato fatto largo uso di tale strumento per aggiungere al concetto di grafo un insieme di funzioni utili (come ad esempio un algoritmo per trovare un cammino minimo tra due nodi, e un altro per la generazione di un albero di copertura minimo), pur mantenendo un'interfaccia quanto più minimale possibile.

### 2.3.3 Testing

Ogni funzionalità non banale introdotta è stata corredata di un apposito insieme di test automatici, al fine di verificarne il corretto funzionamento e di impedire che modifiche future possano comprometterlo. Da una parte, per testare i componenti

---

<sup>4</sup><https://travis-ci.org>

<sup>5</sup><https://orchid.run>

<sup>6</sup><https://kotlinlang.org>

geometrici introdotti (quali ellissi e poligoni convessi) e gli algoritmi su grafo, è stato usato il framework JUnit<sup>7</sup>. Per i test sui pedoni orientabili, invece, è stata usata la libreria Kotest (o KotlinTest)<sup>8</sup>. In particolare, per testare in modo automatico la correttezza del comportamento dei pedoni orientabili, sono state create simulazioni *ad hoc* che durante i test vengono caricate ed eseguite. La situazione finale di ogni simulazione viene confrontata con la situazione prevista per determinare la correttezza o meno del comportamento dei pedoni.

---

<sup>7</sup><https://junit.org>

<sup>8</sup><https://github.com/kotest/kotest>

# Capitolo 3

## Valutazione qualitativa

Di seguito vengono presentati quattro casi di studio con l'obbiettivo di evidenziare le potenzialità dei pedoni dotati di capacità di navigazione cognitiva. I primi tre coinvolgono un singolo pedone alle prese con uno stesso ambiente, ma con un livello di familiarità via via decrescente. L'ultimo caso mostra la tendenza dei pedoni orientabili ad evitare aree congestionate.

### 3.1 Conoscenza completa dell'ambiente

Un singolo pedone dotato di conoscenza completa dell'ambiente è inserito all'interno di un edificio dalla planimetria non banale. Inoltre, una destinazione di interesse è collocata diverse stanze oltre la posizione iniziale del pedone, in modo che raggiungerla con un percorso diretto sia impossibile. Si noti che un qualsiasi pedone non orientabile proverebbe a raggiungerla proprio percorrendo la direzione che lo collega in linea d'aria a tale destinazione. Si noti anche che in quanto la conoscenza del pedone simulato è completa, questo sicuramente è a conoscenza della posizione della destinazione (o meglio, la sua mappa cognitiva conterrà senz'altro un landmark speciale che racchiude tale destinazione). Ciò che ci aspetta da un individuo del genere è che intraprenda il percorso più corto possibile verso l'obbiettivo, senza incappare in vicoli ciechi o rimanere bloccato in alcun modo. In fig. 3.1 si può osservare che il pedone compie proprio un percorso del genere.

### 3.2 Conoscenza parziale dell'ambiente

Un singolo pedone dotato di conoscenza parziale dell'ambiente (30%) è inserito nel medesimo edificio della simulazione precedente. Allo stesso modo, una destinazione di interesse è collocata diverse stanze oltre la posizione iniziale del pedone. Questa volta il comportamento dell'individuo simulato è fortemente dipendente dalle



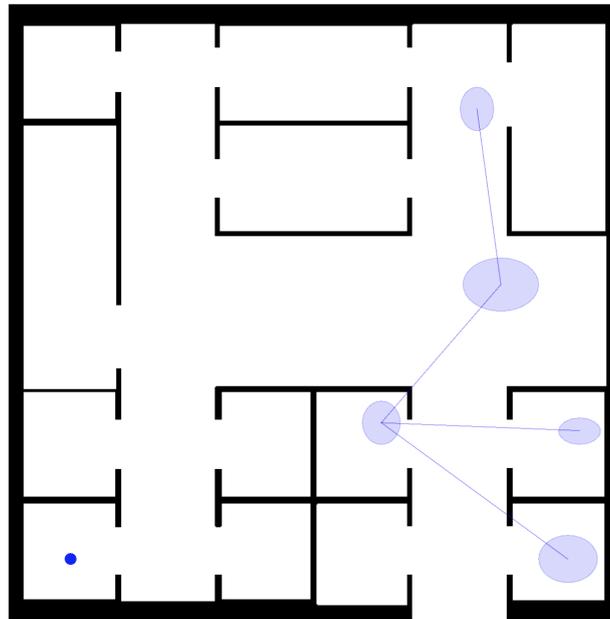


Figura 3.2: In blu è disegnata la mappa cognitiva del pedone orientabile con conoscenza parziale simulato nel caso di studio corrispondente. Si può osservare sia la forma ellittica dei landmark, sia le connessioni tra questi. Si ricorda che la mappa cognitiva in questione memorizza unicamente un'informazione booleana riguardo la connessione tra due landmark, tale dato in figura è mostrato disegnando un segmento tra i baricentri dei landmark connessi.

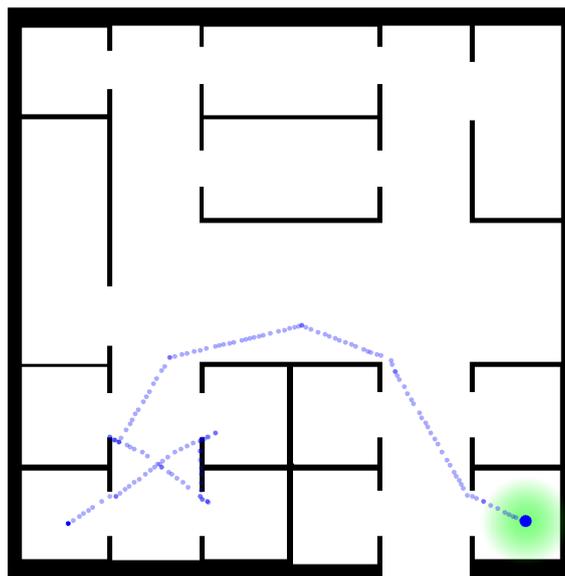


Figura 3.3: In blu è disegnato il percorso intrapreso da un pedone orientabile con conoscenza parziale dell'ambiente (30%) verso la destinazione marcata di verde.

### 3.3 Nessuna conoscenza dell'ambiente

Un pedone senza conoscenza dell'ambiente è inserito nel medesimo edificio delle simulazioni precedenti. Similmente a prima, una destinazione di interesse è collocata in diverse stanze oltre la posizione iniziale del pedone. Essendo l'individuo simulato sprovvisto di alcun tipo di conoscenza pregressa riguardo l'edificio, sicuramente non sarà a conoscenza della posizione della destinazione di interesse (in particolare, la sua mappa cognitiva sarà del tutto vuota). Nonostante questo, essendo dotato di capacità di orientamento, ci si aspetta che prima o poi il pedone riesca a trovare tale destinazione, specie in virtù del comportamento di esplorazione di cui si è parlato in 2.1. In fig. 3.4 si può osservare il percorso compiuto dall'individuo simulato: come preventivato, questo deve esplorare numerose stanze e incappare in diversi vicoli ciechi prima di trovare la destinazione ed arrestarsi.

### 3.4 Aggiramento delle congestioni

Per questo caso di studio centotrenta pedoni orientabili dotati di conoscenza completa dell'ambiente sono collocati in un edificio dalla planimetria assai più semplice della precedente, ma che permette di intraprendere diverse strade verso la desti-



nazione di interesse; la si può vedere in fig. 3.5. In prima istanza, viene effettuata una simulazione con lo scopo osservare le scelte dei pedoni orientabili in assenza di congestioni (se non quelle formate da loro stessi). Ciò che ci si aspetta è che tutti o quasi gli individui simulati compiano il percorso più breve possibile verso la destinazione di interesse, ossia quello che passa per il corridoio più a nord. In fig. 3.5 si può vedere come la quasi totalità dei pedoni si attiene a questa scelta. I pochi che optano per strade diverse lo fanno o per evitare la congestione formatasi nel primo corridoio, o per via di quanto detto in 2.1.6. Fatto ciò, la simulazione viene ripetuta con una variazione: una gran quantità di pedoni senza capacità di locomozione viene collocata nei due corridoi più a nord, in modo da causare un ingente congestione nei due percorsi più brevi. Ciò che ci aspetta, è che i pedoni orientabili scelgano il percorso meno congestionato verso la destinazione. In fig. 3.6 si può osservare che la totalità degli individui dotati di capacità di navigazione cognitiva compie proprio tale percorso.

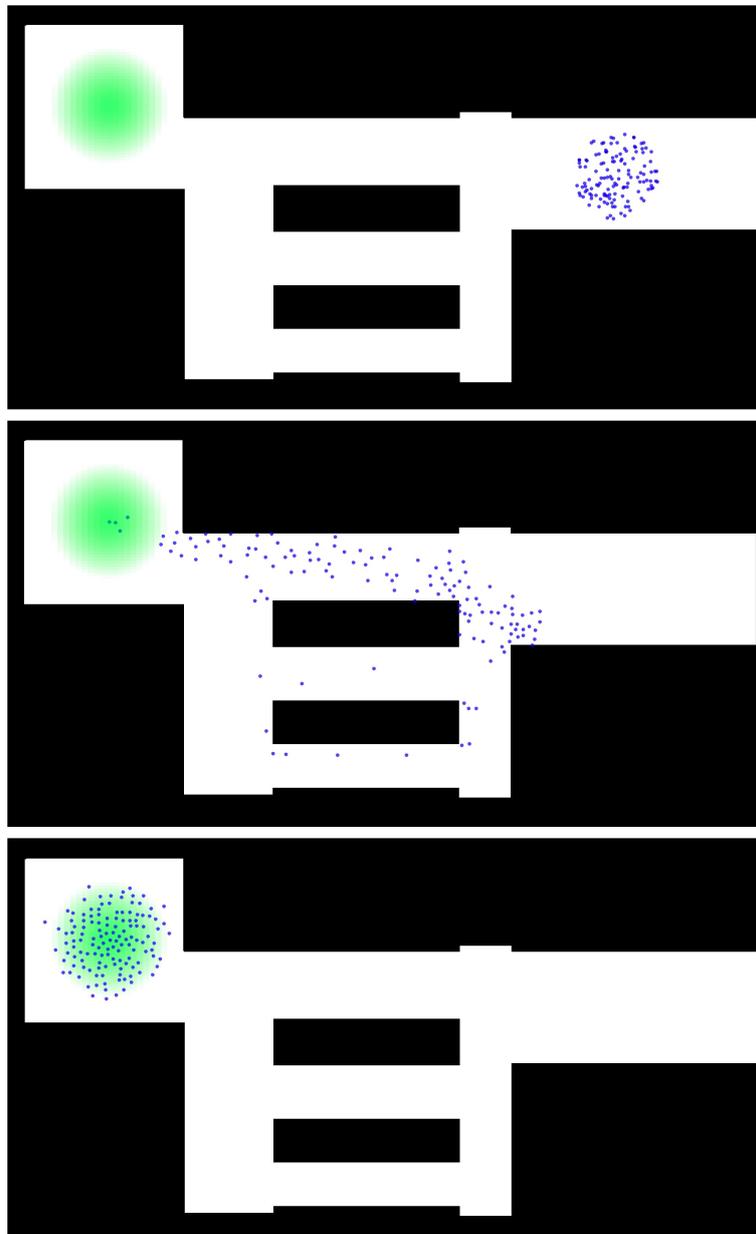


Figura 3.5: Istantanee della situazione a inizio, metà e fine della prima simulazione di *congestion avoidance*. In blu sono disegnati i pedoni orientabili coinvolti, in verde la destinazione di interesse.

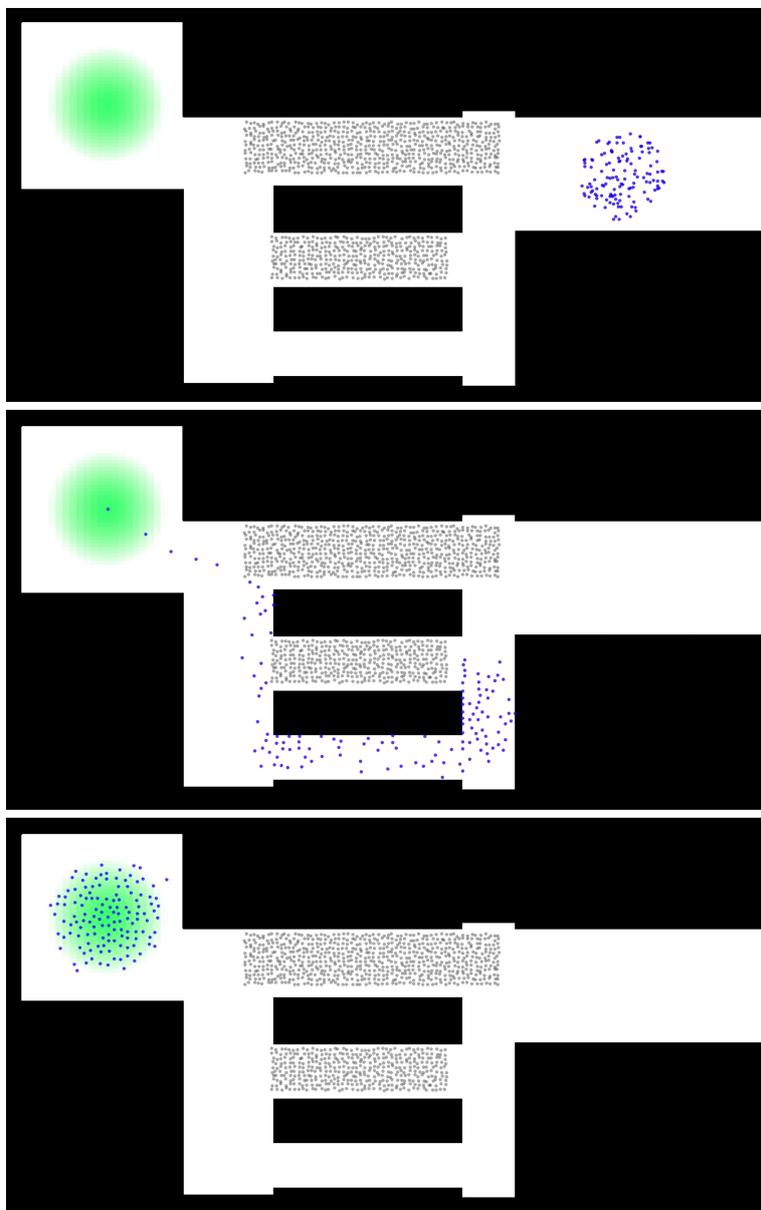


Figura 3.6: Istantanee della situazione a inizio, metà e fine della seconda simulazione di *congestion avoidance*. In blu sono disegnati i pedoni orientabili coinvolti, in grigio i pedoni sprovvisti di capacità locomotorie, in verde è marcata la destinazione di interesse.

# Capitolo 4

## Conclusioni e sviluppi futuri

### 4.1 Conclusioni

In questa tesi, a partire dalla letteratura esistente sul processo di human wayfinding e soprattutto dal lavoro di Andresen et al. [3], sono stati fatti i seguenti contributi: quanto proposto da Andresen è stato esteso in modo da dotare i pedoni simulati di due comportamenti ritenuti fondamentali, ossia la tendenza ad evitare vicoli ciechi e zone affollate. A questo si è unita la ricerca in letteratura di un algoritmo in grado di generare un grafo di navigazione di un dato ambiente con ostacoli, struttura dati fondamentale in quanto input necessario ai modelli utilizzati. Infine, è stata proposta una procedura per la generazione automatica della mappa cognitiva di ciascun pedone, con lo scopo di ridurre al minimo il tempo necessario alla scrittura di simulazioni.

A seguito di quanto mostrato nel capitolo 3, si può concludere che i pedoni realizzati presentano il comportamento desiderato e sono sufficientemente semplici (in termini di complessità computazionale) da essere utilizzati in simulazioni ad alto numero di agenti.

### 4.2 Sviluppi futuri

I pedoni realizzati presentano ad ora due principali svantaggi: il primo consiste nella mancanza di una tecnica affidabile e realistica per la combinazione di comportamenti di steering e navigazione cognitiva, come menzionato in 2.2.3. Finché Alchemist non sarà dotato di una tale tecnica, difficilmente si potranno dotare i pedoni simulati di entrambi gli aspetti (o meglio, lo si potrà fare ma ottenendo movimenti poco realistici, come già detto). Il secondo svantaggio sta nel fatto che il modello scelto per lo human wayfinding è fortemente dipendente dalla divisione dell'ambiente in poligoni convessi; in particolare, una divisione realistica è indi-

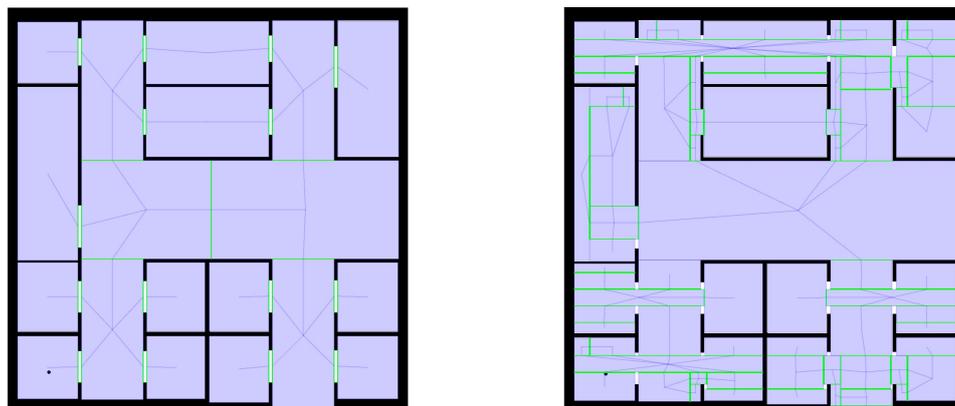


Figura 4.1: A sinistra: grafo dell'ambiente ottenuto in maniera semi automatica. A destra: grafo dell'ambiente ottenuto in maniera completamente automatica. I nodi sono poligoni convessi disegnati in blu, gli archi tra questi sono rappresentati con segmenti che congiungono il baricentro di ogni poligono al varco corrispondente. I varchi sono segmenti localizzati sui bordi dei poligoni convessi disegnati in verde.

spensabile per osservare un comportamento tale. Questo è dovuto perlopiù alle abilità percettive dei pedoni realizzati: essi sono in grado di percepire tutta e sola la walkable area in cui si trovano, ne percepiscono cioè la forma e i passaggi alle aree adiacenti (in realtà, sono in grado anche di valutare la congestione aldilà di un varco, ma questo è ritenuto del tutto accettabile). Si pensi dunque al caso in cui i poligoni generati siano eccessivamente grandi o oltremodo piccoli: i pedoni simulati avrebbero abilità percettive del tutto fuori luogo, e tali sarebbero i loro movimenti. Si veda la figura fig. 4.1, essa mostra due grafi di navigazione: uno generato in maniera semi automatica (dunque con l'aiuto dell'uomo), l'altro generato in maniera completamente automatica. Si può facilmente notare che i poligoni del secondo grafo sono notevolmente più frammentari e in generale offrono una descrizione dell'ambiente ritenuta peggiore. Si pensi infatti di voler simulare il movimento di pedoni orientabili attraverso i poligoni di cui si compone tale grafo: è facile immaginare che il comportamento risultante sarebbe poco realistico. Ottenere un grafo di navigazione soddisfacente può non essere banale, nonostante il simulatore sia stato dotato di un algoritmo per la generazione di una tale struttura dati, questo presenta diverse limitazioni ed è risultato inadeguato in più situazioni, rendendo necessario un (limitato) intervento umano. Essendo che in Alchemist gli ambienti con ostacoli vengono generati mediante immagini binarie, per gli sviluppi futuri inerenti questa problematica si consiglia di applicare l'algoritmo implementato direttamente sull'immagine invece che sull'ambiente estrattone, in modo da

usufruire di coordinate intere invece che continue. Si crede che in tal modo i risultati possano migliorare significativamente. Oltre a ciò, vengono proposti i seguenti raffinamenti di quanto realizzato come possibili direzioni di lavoro future:

- Raffinamento delle abilità percettive dei pedoni in modo da renderle più realistiche, in particolare facendo sì che questi possano percepire (e dunque valutare) solo i passaggi all'interno del proprio campo visivo.
- Sostituzione della tecnica nota come *nearest door heuristic* con un'euristica che meglio descrive il comportamento umano, si veda quanto proposto in 2.1.3.
- Raffinamento del comportamento di *congestion avoidance*, in particolare facendo sì che i pedoni simulati siano in grado di ricalcolare i propri obiettivi a fronte di affollamenti, si veda quanto spiegato in 2.1.5.
- Miglioramento dell'algoritmo per la generazione automatica di mappe cognitive, in particolare facendo sì che questo produca un grafo contenente almeno un cammino minimo del grafo originale per ogni coppia di nodi, si veda quanto spiegato in 2.1.6. Tale raffinamento ad ora risulta particolarmente laborioso e di poco impatto, in quanto permette di ottenere un comportamento più realistico solo per pedoni con conoscenza completa dell'ambiente.
- Importazione dei landmark tramite immagine: ad ora i landmark presenti in una mappa cognitiva sono generati casualmente dall'algoritmo descritto in 2.1.6, potrebbe però essere utile in certi scenari permettere che questi vengano esplicitati manualmente, o meglio permettere di specificare quali zone dell'ambiente contengono elementi architettonici identificabili come landmark. A tal scopo si potrebbe realizzare un formato visuale che permetta di specificare i landmark direttamente nell'immagine da cui è estratto l'ambiente (ad esempio, rappresentandoli con un colore prestabilito), da accoppiare ad un algoritmo che sia in grado di importare i landmark a partire da tale immagine, similmente a quanto già accade per gli ambienti con ostacoli. Tuttavia, si tenga conto del fatto che alcuni elementi architettonici vengono considerati landmark solo da determinati individui per via di fattori sociali o personali [6].

Infine, si identificano gli sviluppi futuri riguardanti aspetti ora del tutto assenti dal simulatore. I pedoni simulati in Alchemist al momento sono dotati di diverse caratteristiche psicologiche e sociali, e sono in grado di interagire sul piano psicologico. Sono invece assai limitate le caratteristiche fisiche e del tutto assenti le interazioni associate; il naturale corso di sviluppo porta alla realizzazione di pedoni dotati di vari aspetti fisici (e.g. resistenza), di una forma realistica (ora sono

modellati con semplici cerchi) e in grado di interagire tra loro sul piano fisico con spinte, urti e pressioni. Tali interazioni, in particolare, risultano estremamente importanti nonché interessanti al fine di introdurre nel simulatore aspetti come ferite o cadute; a tal proposito si veda quanto proposto in [21].

# Bibliografia

- [1] Marine Safety Agency and Department of the Environment, Transport and the Regions. Report on exercise invicta held in dover harbour saturday 13.1.96. Available from MSA, 105 Commercial Road, Southampton. 1996.
- [2] John Anderson. *Cognitive Psychology and Its Implications*. 01 2005.
- [3] Erik Andresen, Mohcine Chraibi, and Armin Seyfried. A representation of partial spatial knowledge: A cognitive map approach for evacuation simulations. *Transportmetrica A: Transport Science*, 14:1–34, 01 2018.
- [4] Erik Andresen, David Haensel, Mohcine Chraibi, and Armin Seyfried. Wayfinding and cognitive maps for pedestrian models. 02 2016.
- [5] Erik Andresen, Robert Zinke, Mohcine Chraibi, Armin Seyfried, and Gesine Hofinger. The impact of perception and wayfinding on pedestrian movements. 2016.
- [6] Donald Appleyard. Why buildings are known: A predictive tool for architects and planners. *Environment and Behavior*, 1(2):131–156, 1969.
- [7] Laura Carlson, Christoph Hölscher, Thomas Shipley, and Ruth Dalton. Getting lost in buildings. *Current Directions in Psychological Science - CURR DIRECTIONS PSYCHOL SCI*, 19:284–289, 10 2010.
- [8] Arne D. Ekstrom, Michael J. Kahana, Jeremy B. Caplan, Tony A. Fields, Eve A. Isham, Ehren L. Newman, and Itzhak Fried. Cellular networks underlying human spatial navigation. *Nature*, 425(6954):184–187, 9 2003.
- [9] C. Ellard. *You Are Here: Why We Can Find Our Way to the Moon, but Get Lost in the Mall*. Knopf Doubleday Publishing Group, 2009.
- [10] Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, and John Vlissides. *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*. 1995.

- [11] Tommy Gärling, Erik Lindberg, Manuel Carreiras, and Böök Anders. Reference systems in cognitive maps. 1986.
- [12] R. Golledge. Human wayfinding and cognitive maps. *Wayfinding Behavior*, 1, 1999.
- [13] R.G. Golledge and N.A. Spector. Comprehending the urban environment: Theory and practice. *Geographical Analysis*, 14:305–325, 01 1978.
- [14] D. Hale, G. Youngblood, and Priyesh Dixit. Automatically-generated convex region decomposition for real-time spatial agent navigation in virtual worlds. 01 2008.
- [15] Dirk Helbing, Illés Farkas, Peter Molnar, and Tamás Vicsek. *Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations*, volume 21, pages 21–58. 01 2002.
- [16] Dirk Helbing and Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51, 05 1998.
- [17] Joshua Jacobs, Michael Kahana, Arne Ekstrom, Matthew Mollison, and Itzhak Fried. A sense of direction in human entorhinal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107:6487–92, 03 2010.
- [18] Christopher Kalff and Gerhard Strube. Background knowledge in human navigation: A study in a supermarket. *Cognitive processing*, 10 Suppl 2:S225–8, 09 2009.
- [19] Diego Mazzieri. Progettazione e implementazione di agenti cognitivi per simulazioni di evacuazioni di folle in alchemist. 10 2019.
- [20] D.R. Montello and Corina Sas. *Human Factors of Wayfinding in Navigation*, pages 2003–2008. CRC Press/Taylor and Francis, Ltd., 2006.
- [21] Nuria Pelechano, Jan Allbeck, and Norman Badler. Controlling individual agents in high-density crowd simulation. volume 2007, pages 99–108, 08 2007.
- [22] Nuria Pelechano and Norman Badler. Modeling crowd and trained leader behavior during building evacuation. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 26:80 – 86, 12 2006.
- [23] Nuria Pelechano and Ali Malkawi. Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction*, 17(4):377 – 385, 2008.

- [24] John Peponis, Craig Zimring, and Yoon Choi. Finding the building in wayfinding. *Environment and behavior*, 22:555, 09 1990.
- [25] Danilo Pianini, Sara Montagna, and Mirko Viroli. Chemical-oriented simulation of computational systems with ALCHEMIST. *Journal of Simulation*, 2013.
- [26] Craig Reynolds. Steering behaviors for autonomous characters. 06 2002.
- [27] Andreas Schadschneider, W. Klingsch, Hubert Klüpfel, Tobias Kretz, Christian Rogsch, and Armin Seyfried. *Evacuation Dynamics: Empirical Results, Modeling and Applications*, pages 3142–3176. 2009.
- [28] Isabella Sivers, Michael Seitz, and Gerta Köster. *How Do People Search: A Modelling Perspective*, pages 487–496. 04 2016.
- [29] Michael St.Pierre and Gesine Hofinger. *Human Factors und Patientensicherheit in der Akutmedizin*. 01 2014.
- [30] Edward Tolman. Cognitive maps in rats and men. *Psychological review*, 55:189–208, 08 1948.
- [31] Jan Treur. The ins and outs of network-oriented modeling: From biological networks and mental networks to social networks and beyond. *LNCSTransactions on Computational Collective Intelligence*, 32:120–139, 09 2018.
- [32] Neal Wagner and Vikas Agrawal. An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. *Expert Systems with Applications*, 41:2807–2815, 05 2014.
- [33] Jan Wiener, Simon, J Büchner, Christoph Hölscher, and Simon Büchner. Taxonomy of human wayfinding tasks: A knowledge-based approach taxonomy of human wayfinding tasks: A knowledge-based approach. *Spatial Cognition and Computation*, 9:152–165, 05 2009.

# Ringraziamenti

Giunto al termine del mio percorso all'Università di Bologna, ringrazio tutti i professori del corso di studi in Ingegneria e Scienze Informatiche, che mi hanno trasmesso grande passione per le loro materie e per il mondo accademico in generale. In particolar modo, ringrazio il professor Viroli e il professor Pianini, che mi hanno seguito in questo progetto di tesi per me assai stimolante. Ringrazio poi i miei genitori e i miei amici, che mi hanno supportato incondizionatamente durante il mio percorso, e in particolar modo Filippo, la cui compagnia in questi anni è stata ed è per me fondamentale. Infine, ringrazio le Monache del Monastero di Pennabilli, che mi hanno ospitato per un breve periodo durante la realizzazione di questa tesi, e Paolo, a cui auguro le soddisfazioni più grandi nei suoi studi, con il quale ho condiviso quel periodo. Ad maiora!

# Appendice A

## File di simulazione

### A.1 Conoscenza completa dell'ambiente

Listato A.1: File di simulazione del caso di studio presentato in 3.1

```
1 incarnation: protelis
2
3 environment:
4   type: ImageEnvironment
5   parameters: [images/building-planimetry.png, 0.1]
6
7 positions:
8   type: EuclideanPosition2D
9
10 network-model:
11   type: NoLinks
12
13 seeds:
14   scenario: 0
15   simulation: 1
16
17 variables:
18   envGraph: &envGraph
19   formula: |
20     import it.unibo.alchemist.model.implementations.
21       positions.Euclidean2DPosition
22     it.unibo.alchemist.test.buildingPlanimetryEnvGraph
23     (
24       0.1,
```

```
23     mutableListOf(Euclidean2DPosition(135.0, 15.0))
24     )
25     language: kotlin
26
27 reactions: &behavior
28     - time-distribution:
29         type: DiracComb
30         parameters: [1.0]
31     type: OrientingBehavior2D
32     parameters: [*envGraph]
33
34 displacements:
35     - in:
36         type: Point
37         parameters: [15, 15]
38     nodes:
39         type: OrientingHomogeneousPedestrian2D
40         parameters: [1.0, *envGraph]
41     programs:
42         - *behavior
```

## A.2 Conoscenza parziale dell'ambiente

Listato A.2: File di simulazione del caso di studio presentato in 3.2

```
1 incarnation: protelis
2
3 environment:
4     type: ImageEnvironment
5     parameters: [images/building-planimetry.png, 0.1]
6
7 positions:
8     type: EuclideanPosition2D
9
10 network-model:
11     type: NoLinks
12
13 seeds:
14     scenario: 0
15     simulation: 3
```

```
16
17 variables:
18   envGraph: &envGraph
19   formula: |
20     import it.unibo.alchemist.model.implementations.
21       positions.Euclidean2DPosition
22     it.unibo.alchemist.test.buildingPlanimetryEnvGraph
23     (
24       0.1,
25       mutableListOf(Euclidean2DPosition(135.0, 15.0))
26     )
27   language: kotlin
28
29 reactions: &behavior
30   - time-distribution:
31     type: DiracComb
32     parameters: [1.0]
33   type: OrientingBehavior2D
34   parameters: [*envGraph]
35
36 displacements:
37   - in:
38     type: Point
39     parameters: [15, 15]
40   nodes:
41     type: OrientingHomogeneousPedestrian2D
42     parameters: [0.3, *envGraph]
43   programs:
44     - *behavior
```

### A.3 Nessuna conoscenza dell'ambiente

Listato A.3: File di simulazione del caso di studio presentato in 3.3

```
1 incarnation: protelis
2
3 environment:
4   type: ImageEnvironment
5   parameters: [images/building-planimetry.png, 0.1]
6
```

```
7 positions:
8   type: EuclideanPosition2D
9
10 network-model:
11   type: NoLinks
12
13 seeds:
14   scenario: 0
15   simulation: 1
16
17 variables:
18   envGraph: &envGraph
19   formula: |
20     import it.unibo.alchemist.model.implementations.
21       positions.Euclidean2DPosition
22     it.unibo.alchemist.test.buildingPlanimetryEnvGraph
23     (
24       0.1,
25       mutableListOf(Euclidean2DPosition(135.0, 105.0))
26     )
27   language: kotlin
28
29 reactions: &behavior
30   - time-distribution:
31     type: DiracComb
32     parameters: [0.25]
33   type: OrientingBehavior2D
34   parameters: [*envGraph]
35
36 displacements:
37   - in:
38     type: Point
39     parameters: [15, 15]
40   nodes:
41     type: OrientingHomogeneousPedestrian2D
42     parameters: [0.0, *envGraph]
43   programs:
44     - *behavior
```

## A.4 Aggiramento delle congestioni

Listato A.4: File di simulazione del caso di studio presentato in 3.4

```
1 incarnation: protelis
2
3 environment:
4   type: ImageEnvironment
5   parameters: [images/congestion-avoidance.png, 0.1]
6
7 positions:
8   type: EuclideanPosition2D
9
10 network-model:
11   type: NoLinks
12
13 seeds:
14   scenario: 0
15   simulation: 2
16
17 variables:
18   envGraph: &envGraph
19   formula: |
20     import it.unibo.alchemist.model.implementations.
21       positions.Euclidean2DPosition
22     it.unibo.alchemist.test.
23       congestionAvoidanceEnvGraph(
24         0.1,
25         mutableListOf(Euclidean2DPosition(12.0, 60.0))
26       )
27   language: kotlin
28
29 reactions: &behavior
30   - time-distribution:
31     type: DiracComb
32     parameters: [1.0]
33   type: OrientingBehavior2D
34   parameters: [*envGraph]
35
36 displacements:
37   - in:
```

```
36     type: Point
37     parameters: [70, 50]
38   nodes:
39     type: OrientingHomogeneousPedestrian2D
40     parameters: [1.0, *envGraph]
41   programs:
42     - *behavior
43 - in:
44     type: Grid
45     parameters: [27, 52, 56, 58, 0.5, 0.5, 0.3, 0.3]
46   nodes:
47     type: HomogeneousPedestrian2D
48 - in:
49     type: Grid
50     parameters: [30, 40, 50, 45, 0.5, 0.5, 0.3, 0.3]
51   nodes:
52     type: HomogeneousPedestrian2D
```