

## Modellazione ad agenti dei flussi passeggeri in una stazione di trasporto metropolitano

Annunziato Mauro\*, Liberto Carlo<sup>o</sup>, Pannicelli Alessandro\*

\*Enea - C.R. Casaccia

<sup>o</sup>Facoltà di Fisica, Università di Bologna

Mauro.annunziato@casaccia.enea.it, carlo.liberto@gmail.com,

alessandro.pannicelli@casaccia.enea.it

### Abstract

In questo articolo presentiamo un approccio basato su agenti autonomi per la modellazione del flusso di passeggeri nel contesto di una stazione di trasporto metropolitano. Gli algoritmi di questo tipo sono molto usati per implementare simulazioni in cui gli agenti devono essere in grado di agire e prendere decisioni in maniera autonoma ed indipendente. Per questo motivo in letteratura l'implementazione comportamentale degli agenti è stata spesso effettuata tramite algoritmi decisionali basati sulla teoria dei giochi, o sulle teorie decisionali; alcuni approcci differenti si riconducono al *particle swarming*, utilizzando un trattamento quasi-continuo dello spazio in cui le interazioni locali determinano un comportamento collettivo organizzato.

In questo lavoro il punto di vista dell'agente e le sue regole comportamentali sono implementate come risultanti di diverse forze, non propriamente intese come la classica forza di Newton, ma come delle forze di reazione alle informazioni percepite, al fine di *accompagnare* l'individuo verso il suo obiettivo, facendolo *reagire* agli stimoli esterni, quali gli altri attori, gli ostacoli sul percorso, i percorsi obbligati, sempre tramite l'applicazione di forze. Nell'approccio presentato gli agenti possono essere sottoposti ad interazioni particolare (decelerazioni, fermate o proibizioni) che, ovviamente, non conservano momento e energia.

In questa ottica vengono analizzati i comportamenti di tali agenti in relazione all'insieme di individui che li circondano, andando ad evidenziare sia i comportamenti individuali che i comportamenti *di gruppo* che si manifestano come risultato dell'interazione tra molti agenti.

Verranno introdotti anche alcuni indici nell'ambiente di simulazione per poter identificare delle situazioni critiche e poter misurare le situazioni ordinarie.

## 1. La simulazione ad agenti autonomi

Nell'ambito del progetto di ricerca SITI (ENEA, Consorzio TRAIN), finalizzato alla sicurezza nei sistemi di trasporto ed in particolare nei tunnel, si è intrapresa l'implementazione di un simulatore di flussi di persone all'interno delle stazioni metropolitane. *L'obiettivo finale del progetto è la transizione dal tradizionale concetto di sicurezza del tunnel vista staticamente (utile al più, a mitigare le conseguenze di un incidente) ad un più funzionale concetto di sicurezza che consideri il tunnel all'interno di un sistema complesso e dinamico, a rischio variabile nel tempo, in funzione delle condizioni contingenti, quantitative e qualitative, del traffico.*

Lo sviluppo di un simulatore ha lo scopo di riprodurre i *macrocomportamenti* che si possono evidenziare sia in condizioni ordinarie che incidentali. L'obiettivo è quello di migliorare l'analisi di sicurezza nella fase progettuale, la possibilità di effettuare verifiche sulle stazioni esistenti ed infine l'utilizzo di un tale modello come base per lo sviluppo di sistemi di supervisione per la gestione in sicurezza dell'intera stazione.

L'aspetto principale, quindi, non è tanto quello di riuscire a descrivere in forma di algoritmo il comportamento del singolo utente, quanto l'aver a disposizione uno strumento che possa evidenziare gli effetti della totalità delle persone in un ambiente. Viste le caratteristiche richieste al simulatore, è stata individuata una strategia: l'utilizzo di un ambiente di *vita artificiale* in cui gli attori principali sono implementati tramite algoritmi di *agenti autonomi*.

L'approccio proposto è dunque di tipo **bottom-up** e mira a ricostruire le caratteristiche del sistema come *fenomeni emergenti* dall'interazione di un gran numero di elementi esibendo un grado di complessità maggiore di quello mostrato ai livelli più bassi.

I simulatori di **Vita Artificiale** consistono di una collezione numerosa di semplici unità di base che producono delle proprietà interessanti se osservate a livelli più alti. In letteratura uno dei fenomeni più studiati per evidenziare gli *aspetti emergenti* è quello della cooperazione sociale osservabile nelle società di formiche; possiamo considerare la singola formica come un essere non "particolarmente intelligente" o meglio che non manifesta di per se un comportamento particolarmente complesso. Eppure l'interazione fra molte formiche dà luogo ad un'organizzazione sociale estremamente complessa ed efficiente; non a caso da essa sono nati una tipologia di algoritmi ormai molto noti nella letteratura della vita artificiale, l'*ant system*.

Un esempio pionieristico di un simulatore ad agenti che presenta forme di comportamento emergente sono i *Boids* introdotti nel 1987 da Craig Reynolds [Reynolds 1987]. Il suo obiettivo era quello di realizzare delle creature artificiali che volassero assieme in stormi come gli uccelli e senza avere un leader. Vedremo in seguito quanto questo problema abbia delle forti affinità con lo studio dei flussi di persone che ci apprestiamo a studiare.

Si può a questo punto introdurre un altro concetto particolarmente importante in questo contesto, l'*auto-organizzazione*. L'auto-organizzazione è la proprietà manifestata da alcuni sistemi complessi formati da molteplici elementi che, interagendo tra loro, sono in grado di sviluppare strutture ordinate da situazioni caotiche. Questi sistemi sono capaci di manifestare organizzazione e strutturazione facendo crescere la complessità interna anche quando i singoli elementi del sistema si muovono in modo autonomo ed in base a regole puramente locali.

Secondo la definizione di **Klir**<sup>1</sup> [Klir 1991] un sistema è detto auto-organizzante quando tende ad affinare le proprie capacità nel corso del tempo mediante una migliore organizzazione dei suoi elementi allo scopo di raggiungere un obiettivo prefissato. Più in generale per comportamento auto-organizzante si intende la formazione spontanea di strutture e pattern indipendentemente dalle condizioni iniziali. Come vedremo in seguito il movimento di gruppi di persone presenta forti caratteristiche di auto-organizzazione.

I sistemi ad agenti stanno assumendo sempre più rilevanza non solo nel campo della vita artificiale, ma anche in settori più tradizionali dell'informatica quali l'ingegneria del software ed i linguaggi di programmazione in quanto il concetto di agente può essere molto naturalmente considerato come un'estensione del concetto di oggetto.

Gli agenti autonomi hanno delle caratteristiche che si adattano perfettamente alle esigenze evidenziate precedentemente, in particolare con questa tipologia di algoritmo sarà possibile avere:

- *un'autonomia individuale*, ovvero la capacità del singolo agente di comportarsi autonomamente per soddisfare i propri obiettivi;
- una *capacità di ragionamento*, che permette all'agente di decidere in base alle informazioni che arrivano ai suoi sensori anche in situazioni che non siano state espressamente previste;
- una *capacità di cooperare*, ovvero la capacità degli agenti di aggregarsi in gruppi definendo delle regole comportamentali per il gruppo e per il singolo all'interno del gruppo, eventualmente condividendo obiettivi o conformando il proprio comportamento a quello dei vicini.
- una *capacità di apprendimento* (laddove necessario), ovvero la capacità di far tesoro delle esperienze in modo da ri-articolare i comportamenti futuri.

Nonostante il termine agente sia così diffuso in letteratura scientifica, non esiste una definizione universalmente accettata, e possiamo in prima analisi definire un agente come un'entità inserita in un dato ambiente in grado di interagire con esso e con altri agenti mediante la definizione di semplici regole locali, al fine di realizzare i propri obiettivi.

Da tale definizione emerge che ciò che caratterizza un agente è l'autonomia ovvero la capacità di eseguire azioni legate a determinati processi senza l'intervento di un utente: *un agente è detto autonomo o intelligente se possiede la capacità di operare in un ambiente dinamico ed imprevedibile, nel quale le azioni hanno una certa probabilità di fallire e le decisioni devono essere prese rapidamente*<sup>2</sup>.

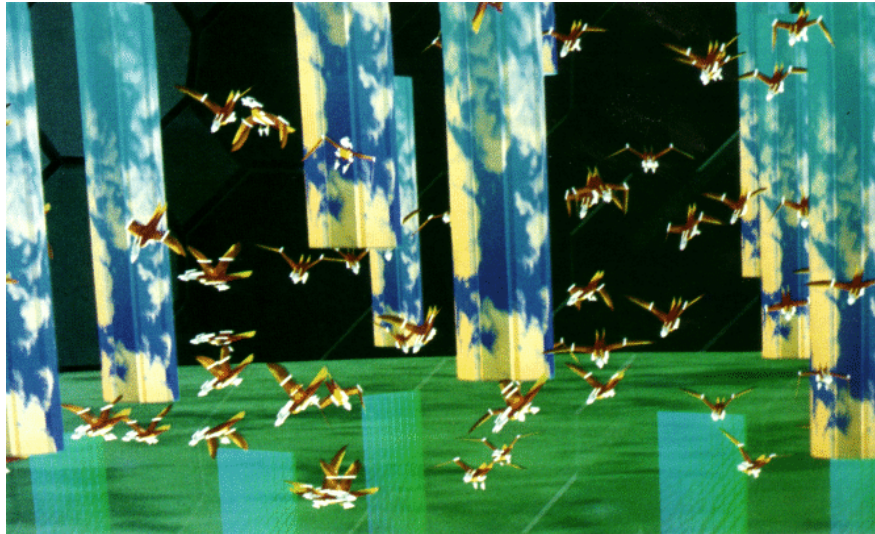
Il termine ambiente dinamico contenuto nella definizione precedente deve essere inteso nel nostro caso come la stazione metropolitana: al passare del tempo essa non è mai uguale a se stessa, ma la presenza di nuovi oggetti (es. treni, nuovi passeggeri) o di determinati flussi o densità di agenti in alcune zone, modifica la propensione dell'agente a compiere particolari scelte.

Ciò che determina il comportamento di un agente è la definizione di semplici regole locali e di una forma di controllo distribuito che si manifesta attraverso comunicazioni con agenti immediatamente vicini, stabilita attraverso osservazioni ambientali.

---

<sup>1</sup> G.J. KLIR, Facets of Systems Science. Plenum Press. 1991.

<sup>2</sup> M.Wooldridge, "Intelligent Agents", in "Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence", G. Weiss (Ed.), MIT Press, Cambridge, MA. (1999).



**Figura 1** – Un immagine tratta da “Stanley and Stella in: Breaking the Ice” [Reynolds 1987]

Comportamenti simili possono essere evidenziati anche in natura e cercando di caratterizzare tali comportamenti si può arrivare a definire dei modelli semplici di regole per l'interazione dell'agente nel gruppo: gli stormi di uccelli, i branchi di pesci o i greggi di pecore rientrano in quella classe generale di esseri viventi che esibiscono in un moto coordinato di gruppo.

Nel 1987 Craig Reynolds [Reynolds 1987] ha costruito un modello computazionale in grado di simulare il moto di tali gruppi chiamando la singola creatura simulata *boid*. Tale modello rappresenta un'evoluzione di un semplice sistema di particelle (*particle systems*) e rientra in quei sistemi di vita artificiale che, tramite l'interazione a basso livello di semplici unità di base, manifestano proprietà interessanti a livelli più alti. Questo comportamento collettivo è stato oggetto di numerosi studi ed è anche la base di questo lavoro. Di seguito sono riportate le principali caratteristiche:

- **Separazione:** ciascun boid cerca di mantenere una distanza di sicurezza rispetto ai suoi vicini in modo da evitare collisioni;
- **Coesione:** ogni boid tende a muoversi verso la posizione media dei boids vicini.
- **Allineamento:** ogni boid tende a spostarsi parallelamente ai suoi vicini.
- **Gruppo estraneo:** se entro il raggio di visibilità di un boid ne entra uno appartenente ad un gruppo diverso, il boid si muoverà nel senso opposto al suo moto.
- **Autonomia**
- **Controllo localizzato**

Ogni boid ha un vettore velocità  $V=s*U$  dove  $s$  è lo speed (cioè il modulo della velocità) e  $U$  un vettore unitario chiamato vettore tangente. Generalmente un boid varia questi due vettori gradualmente, il che corrisponde ad ammettere che esso ha una certa inerzia ed è anche in accordo con quello che avviene in natura dato che durante il volo non si hanno cambiamenti bruschi. Per ogni creatura sarà necessario ad ogni passo prima aggiornare i valori di  $s$  e  $U$  e poi calcolare la nuova posizione. Per quest'ultima operazione sia  $(x,y,z)$  il vettore posizione,  $(u_x,u_y,u_z)$  il vettore tangente, allora la posizione al passo successiva sarà  $(x+s*u_x, y+s*u_y, z+s*u_z)$ . Reynolds ha definito questo comportamento volo geometrico.

### **Agenti autonomi nelle architetture urbane**

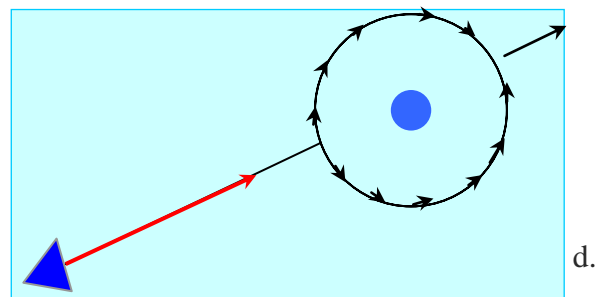
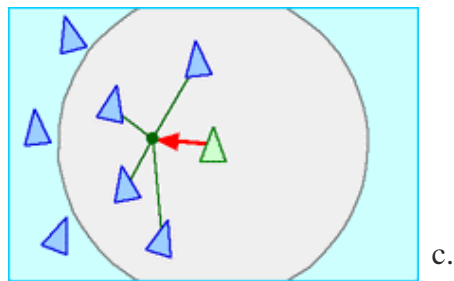
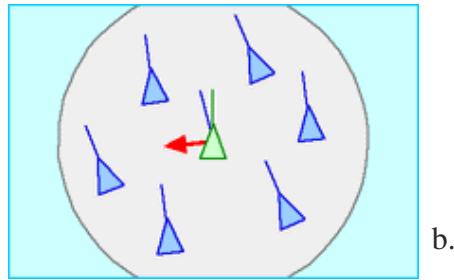
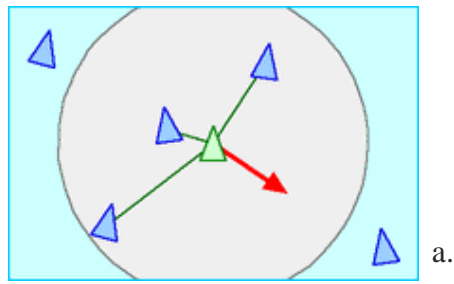
Il comportamento dei boids è un ottimo punto di partenza per iniziare a delineare quali saranno le linee di comportamento dei nostri agenti in una architettura bidimensionale edificata; riprendendo l'approccio proposto da Reynolds [Reynolds 1999] saremo in grado di definire delle interazioni locali in grado di mostrare alcune proprietà emergenti; possiamo iniziare ad evidenziare come il comportamento di un agente si baserà su delle semplici regole:

- Ogni agente ha un obiettivo spaziale da raggiungere;
- Per raggiungere l'obiettivo dovrà evitare altri agenti in movimento ed eventuali ostacoli architettonici;
- Ogni agente cercherà di "adeguarsi" al flusso di persone che vanno nella sua direzione;
- Ogni agente tenderà ad evitare i flussi di persone che viaggiano in direzione diversa dalla sua.
- Ogni agente potrà decidere di cambiare il proprio obiettivo locale in base alla situazione dinamica che gli si presenta (eccessiva densità, arrivo treni...)

Dopo aver definito il comportamento degli agenti vediamo come possa essere impostato un algoritmo che regola l'interazione tra di essi e in questo modo induce a presentare delle *proprietà emergenti*. Esso consiste di tre regole:

1. *Evitare le collisioni*: evitare le collisioni con i vicini e con gli ostacoli.
  2. *Adeguare la velocità*: cercare di adeguare la velocità a quella dei vicini.
  3. *Centrare lo stormo*: cercare di star vicino ai compagni circostanti.
- 1) Ogni agente cerca di mantenere una distanza di crociera dai suoi vicini per evitare collisioni. Così se è troppo vicino all'individuo che gli sta davanti rallenta, se è troppo vicino a quello che gli sta dietro accelera. Allo stesso modo eviterà di stare troppo distante dai *compagni di flusso*
  - 2) Ciascun agente cerca di camminare parallelo a quello più vicino. Questo è ottenuto adeguando il vettore tangente a quello del vicino, senza variare la velocità.
  - 3) Ogni agente cerca di essere circondato da altri compagni. Per fare ciò viene calcolata la posizione media degli altri agenti e si adeguerà mantenendo sempre la stessa distanza da essa.

Nella figure seguenti si può apprezzare come le interazioni tra agenti possano essere visualizzate (ed implementate) come somme di forze.



**Figura 2** – Comportamento di un agente in varie situazioni:  
a. *separazione*; b. *allineamento*; c. *coesione*; d. *aggiramento di un ostacolo*

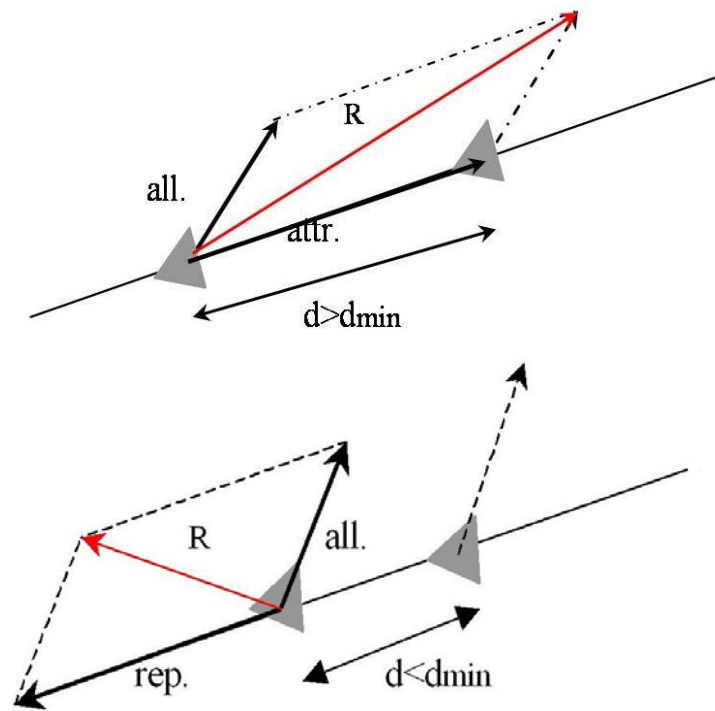
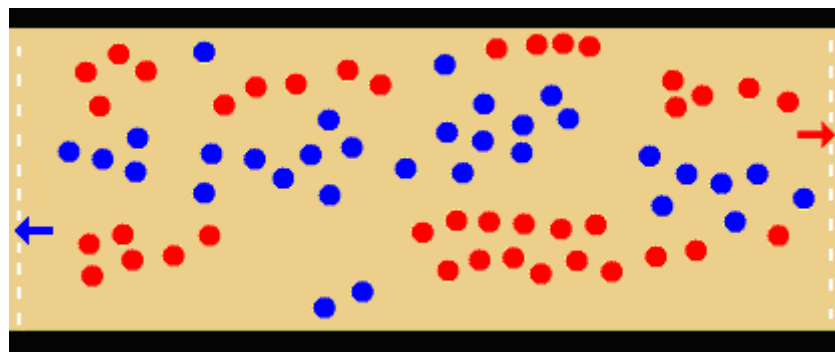


Figura 3. Attrazione e repulsione tra due agenti

## 2. Effetti di gruppo

Per molti decenni il comportamento dei pedoni è stato considerato un argomento delle scienze sociali; per questo è stato un gran successo per la teoria dei sistemi complessi scoprire che molti pattern di moto osservati possono essere compresi come fenomeni di auto-organizzazione in sistemi di molte particelle. La cosa più sorprendente è che sotto certe condizioni si può convertire il comportamento libero di un individuo in un sistema descritto da equazioni di forze fisiche; anche se un individuo può muoversi in modo del tutto arbitrario, normalmente egli tende ad ottimizzare il suo comportamento, ad esempio cercando di evitare collisioni con ostacoli o altri individui e questo comportamento è il risultato di un apprendimento che porta a reazioni automatiche in condizioni standard.

Sotto altre condizioni il singolo comportamento può tramutarsi in comportamento collettivo; per comportamento collettivo intendiamo la proprietà per cui l'attività di un individuo è dominata dai suoi vicini in modo da modificare il comportamento di tutti gli individui verso un pattern comune [Vicsek 2001].



**Figura 4** – Formazione di linee di direzione

La figura 4 mostra una semplice simulazione in cui gli agenti in blu si muovono da destra verso sinistra, e quelli in rosso in direzione opposta; gli agenti vengono creati con una posizione iniziale random lungo una delle due linee tratteggiate in bianco (rispettivamente quella di destra per i blu e quella di sinistra per i rossi) e hanno come obiettivo un punto qualsiasi della linea opposta.

L'immagine mostra la formazione spontanea di gruppi che si muovono lungo righe orizzontali, così come ci aspettavamo. La simulazione mostra che non c'è una preferenza e che, in generale, le righe crescono all'aumentare della densità.

Questo meccanismo di auto-organizzazione deve essere relazionato a un comportamento umano autonomo ed è una conferma qualitativa dell'ipotesi di minimo sforzo (*least effort hypothesis*<sup>3</sup>); in tal modo, infatti, si ottiene una velocità media maggiore dovuta ad una ottimizzazione spaziale dei flussi ovvero a una minimizzazione delle interazioni di ostruzione. La sequenza di figura 5, invece, mostra un altro comportamento tipico del movimento di gruppo, l'**effetto elastico** ovvero la capacità di un gruppo di persone che camminano assieme di ricongiungersi dopo essere stati attraversati da una o più persone non appartenenti al gruppo, come se fossero tenuti assieme da un elastico. Questo effetto mostra come un approccio "boi-like" risulta uno strumento più che adeguato per la simulazione della dinamica di gruppi in movimento (famiglie, comitive, ecc...).

Un altro studio recente si è soffermato su di un particolare forma di "coordinazione" di gruppo, le cosiddette onde Messicane, al fine di comprendere sotto quali condizioni il comportamento umano muta da comportamento individuale a comportamento di massa il che vuol dire che gli individui sono "eccitati" dai propri vicini [Helbing et al. 2002].

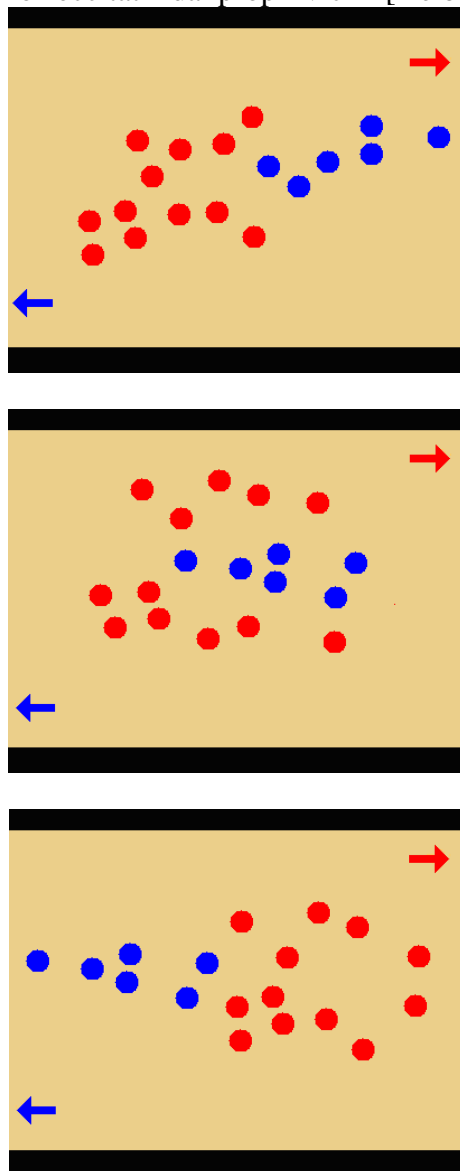


Figura 5 – Effetto elastico

---

<sup>3</sup> Zipf nel suo *Human Behaviour and the Principle of Least-Effort* (1949) propone il principio del minimo sforzo cognitivo secondo cui viene selezionata una strategia che assicuri il minimo sforzo nel raggiungimento di uno specifico risultato desiderato.

### 3. L'approccio delle forze sociali

Molti modelli comportamentali sono stati sviluppati negli ultimi anni poggiandosi su vari studi che spaziano dalla teoria dei giochi ai modelli di diffusione; Helbing [Helbing 1991] ha mostrato che le caratteristiche principali di questi modelli possono essere descritte mediante un modello comportamentale più generale: tale modello è essenzialmente stocastico in quanto si basa su equazioni del tipo di Boltzmann e di Fokker-Plank riformulate tramite un'approssimazione di Taylor al secondo ordine.

Il modello a forze sociali è probabilmente uno dei migliori modelli microscopici sviluppati negli ultimi anni per quel che concerne la mobilità pedonale. Esso è stato sviluppato da Helbing a partire dai primi anni novanta [Helbing et al. 1995], ma successivamente hanno partecipato al suo miglioramento ricercatori come Molnàr, Vicsek, Farkas e Schweitzer [Helbing et al. 2002].

Già dai primi anni settanta, in analogia fra il movimento di persone in situazioni di media e alta densità ed il moto dei fluidi o dei flussi granulari [Henderson 1971] si svilupparono le teorie gas-cinetiche e fluidodinamiche. Un grosso contributo è stato apportato nell'ultimo ventennio con l'avvento della teoria del caos, riconducendo il comportamento pedonale ad un fenomeno complesso.

La particolarità del modello a forze sociali risiede proprio nella capacità di conciliare alcune caratteristiche tipiche della fluidodinamica e della gas-cinetica (attriti viscosi, gradienti di velocità, auto-organizzazione in linee di direzione per flussi contrapposti, effetti di volume escluso, ecc..) con aspetti tipici del comportamento umano (proibizioni, decelerazioni, ecc..) che, ovviamente, non conservano l'energia o il momento.

#### **Campi e forze sociali**

Riprendendo un'idea di Lewin [Lewin 1951], Helbing ha sviluppato una formulazione matematica in accordo con le equazioni di cui sopra, in cui il comportamento degli individui è guidato dai cosiddetti campi sociali:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{H}_\alpha(\mathbf{x}, t) + \xi(t)$$

dove  $\mathbf{H}_\alpha$  è una quantità vettoriale che guida il cambiamento del comportamento  $\mathbf{x}(t)$  degli individui appartenenti ad una certa popolazione  $\alpha$ , mentre il termine  $\xi(t)$  è un rumore gaussiano che rappresenta le fluttuazioni comportamentali dei medesimi individui.

La quantità  $\mathbf{H}$  è detta forza sociale e possiamo interpretarla come gradiente di un potenziale o campo sociale:

$$\mathbf{H}_\alpha(\mathbf{x}, t) = -\nabla V_\alpha(\mathbf{x}, t) \quad \text{ovvero} \quad \mathbf{H}_{\alpha i}(\mathbf{x}, t) = -\frac{\partial}{\partial x_i} V_\alpha(\mathbf{x}, t)$$

La forza sociale dunque tende a guidare il comportamento di un determinato individuo verso un minimo  $\mathbf{x}_\alpha^*(t)$  del campo sociale per cui risulti ovviamente:

$$\nabla V_\alpha(\mathbf{x}, t) = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \mathbf{H}_\alpha(\mathbf{x}, t) = 0$$

In questa situazione non avvengono cambiamenti comportamentali se non per le fluttuazioni, e l'individuo raggiunge uno stato di equilibrio col campo sociale. Il potenziale  $V$  contempla tutte quelle influenze e interazioni che possono essere considerate rilevanti nel cambiamento di un determinato comportamento (opinioni pubbliche, regole sociali, trend, ecc..).

Nel modellare il movimento di un agente abbiamo formulato delle assunzioni iniziali. Nel modello fisico che proponiamo, imponiamo che la velocità e l'accelerazione di un agente siano funzioni che variano lentamente; in effetti tale affermazione non è del tutto esatta considerato che un pedone possiede fluttuazioni di velocità e accelerazione che possono essere molto più grandi (e contemporaneamente molto più piccole) di quelle ad esempio di un veicolo. D'altro canto quel che ci preme simulare non è tanto la capacità di un singolo agente di riprodurre fedelmente le caratteristiche di una persona, quanto piuttosto il comportamento emergente di una moltitudine di persone in movimento.

La seconda assunzione che proponiamo è che il movimento di ciascun pedone è il risultato dell'applicazioni di forze<sup>4</sup>; tali forze non devono essere considerate come forze classiche di Newton, ma come delle forze auto-applicate che regolano e guidano il movimento di ciascun agente al fine di realizzare i propri obiettivi<sup>5</sup>.

## La forza guida all'obiettivo

Consideriamo inizialmente un agente che si muove in un ambiente in assenza di ostacoli e di altri agenti; sia  $\vec{r}_i(t)$  la posizione del pedone  $i$ -esimo al tempo  $t$  e  $\vec{r}_i^\alpha$  la posizione d'arrivo; la direzione del moto al tempo  $t$  è definita da:

$$\hat{e}_i(t) = \frac{\vec{r}_i^\alpha - \vec{r}_i(t)}{\|\vec{r}_i^\alpha - \vec{r}_i(t)\|}$$

e chiameremo tale grandezza direzione desiderata in analogia con altri modelli già sviluppati (si veda ad esempio D. Helbing (1995)).

Nel caso specifico del moto di un unico agente senza interazioni con l'ambiente, egli sarà soggetto soltanto ad una diretta lungo  $\hat{e}_i(t)$  che rappresenta in un certo senso la motivazione interna dell'agente stesso. Chiameremo tale forza  $\vec{F}_{obj}$  poiché essa è la forza che spinge l'agente verso il proprio obiettivo (*objective*).

La velocità di ciascun agente è limitata superiormente da una velocità massima  $v_{max}$  ed il modulo di  $\vec{F}_{obj}$  è determinato in modo che, in assenza di interazioni, la velocità

<sup>4</sup> Questa assunzione sarà in parte modificata nel paragrafo relativo alla funzione decisionale.

<sup>5</sup> Sono forze che evocano effetti fisici come l'accelerazione o la decelerazione mediante le reazioni alle informazioni che gli individui posseggono su ciò che li circonda. In altre parole le forze sociali sono diverse dalle forze fisiche classiche poiché il loro effetto primario non è il trasferimento di momento ma piuttosto lo scambio di informazioni tramite processi fisici e psicologici.

dell'agente raggiungerà proprio il valore massimo. Questa ulteriore assunzione ha dei risvolti sia a livello implementativi che a livello teorico generale che discuteremo nel paragrafo relativo alla calibrazione dei parametri. Possiamo dunque scrivere:

$$\vec{F}_{obj}(t) = \alpha \cdot [v_{max} - v(t)] \cdot \hat{e}(t) \quad (1.0)$$

dove  $\alpha$  è un parametro positivo che serve a rendere generale il modello.

Appare chiaro che, in assenza di altre interazioni, il pedone si muoverà a velocità costante lungo una linea retta. Si noti che tale scelta rispetta il principio generale di minimo sforzo. In assenza di altre informazioni, la strada più corta rappresenta ovviamente anche quella più veloce e dunque quella che richiede il minimo sforzo per raggiungere un determinato obiettivo<sup>6</sup>.

### Forze di repulsione fra gli agenti

Nonostante la grande complessità del moto pedonale, è stato possibile individuare da varie osservazioni sperimentali alcune regole generali di comportamento; si è visto ad esempio che le persone in movimento tendono a mantenere una certa "distanza di crociera"<sup>7</sup> dai propri vicini e che al di sopra di tale distanza il moto del pedone non è influenzato dai vicini [Brilon 1985].

Bisogna inoltre aggiungere che una persona tiene conto non solo della propria posizione attuale e di quella del vicino, ma anche della propria direzione di moto e di quella del vicino e ciò genera comportamenti diversi a seconda delle direzioni di moto relative dei vari agenti (si pensi ad esempio a persone che si muovono lungo una stessa direzione o in direzioni opposte). Per tale motivo è stato necessario introdurre due componenti della forza di repulsione fra gli agenti, una, più a lungo raggio, che agisce tramite una sorta di previsione della propria posizione futura e di quella del vicino. L'altra, a corto raggio, che tiene conto soltanto della distanza effettiva fra i vari agenti allo scopo di evitarne il contatto:

$$\vec{F}_{ij}^{rep} = \vec{F}_{ij}^{rep} + \vec{F}_{ij}^{mrep} = \frac{\beta}{d'_{ij}} \cdot \hat{e}'_{ij} \cdot \Theta(d'_{min} - d'_{ij}) + \frac{\gamma}{d''_{ij}} \cdot \hat{e}''_{ij} \cdot \Theta(d''_{min} - d''_{ij}) \cdot \Theta(d''_{ij} - d'_{min}) \cdot \Theta(\varphi''_{min} - \varphi''_{ij}) \quad (1.1)$$

dove  $\Theta$  è la funzione gradino di Heaviside definita come:

$$\Theta(x - \alpha) = \begin{cases} 1 & \text{se } x > \alpha \\ 0 & \text{se } x \leq \alpha \end{cases}$$

<sup>6</sup> Ovviamente il percorso più corto non è sempre il più veloce, come ad esempio nel caso di abbondante livello di affollamento; inoltre lo sforzo minore, a livello psicologico, potrebbe contemplare anche fattori come l'estetica o il livello di sicurezza di una determinata strada.

<sup>7</sup> La distanza minima che un pedone è disposto a sopportare può dipendere da numerosi fattori locali quali, ad esempio, la densità o la particolare geometria dell'area d'interesse; trascureremo per semplicità questi fattori.

Ricordando che, anche in questo caso, i parametri  $\beta$  e  $\chi$  servono a rendere generale il modello, si consideri il primo termine che compare nell'equazione (1.0):

il termine  $d'_{ij} = |\vec{r}_j - \vec{r}_i|$  rappresenta il modulo della distanza fra la posizione

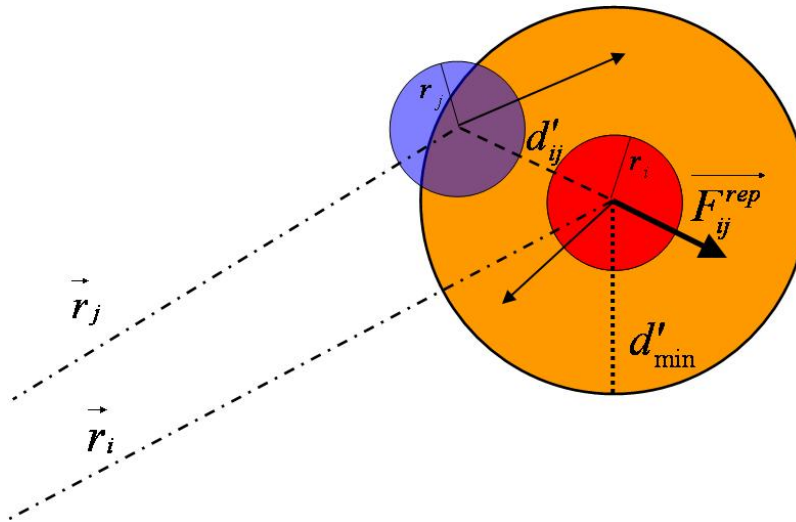
$$\hat{e}'_{ij} = \frac{(\vec{r}_j - \vec{r}_i)}{d_{ij}}$$

dell'agente i-esimo e quella dell'agente j-esimo mentre rappresenta il vettore normalizzato che punta dall'agente j-esimo a quello i-esimo.

Affinché tale componente della forza non risulti nulla abbiamo inserito una distanza di soglia  $d'_{\min}$  che rappresenta la distanza minima a cui gli agenti devono trovarsi per interagire fra loro; ciò equivale ad imporre che al di sopra di una certa distanza il moto di un agente non è influenzato dal moto del vicino.

Si noti che nel caso in cui si scelga  $d'_{\min} = r_{ij} = r_i + r_j$ , la forza assume il senso di una forza di contatto; si è però scelto di considerare tale forza come una “forza di intrusione”, che intervenga per distanze comunque maggiori dei raggi caratteristici degli agenti.

Si è infine assunto che in tali “zone d'intrusione” l'interazione avvenga a 360°, senza considerare le direzioni del moto dei vari agenti.



**Figura 6** – Forza di repulsione d'intrusione

Il parametri che compaiono nel secondo termine dell'equazione hanno lo stesso significato dei rispettivi quelli a patto di sostituire le posizioni attuali  $\vec{r}_j$  ed  $\vec{r}_i$  con le posizioni previste  $\vec{r}_j^{next}$  ed  $\vec{r}_i^{next}$ .

Le posizioni previste possono essere pensate qualitativamente come una proiezione nel tempo delle posizioni attuali lungo la direzione del moto. Da un punto di vista formale il

significato di tali quantità sarà più chiaro una volta introdotta l'approssimazione numerica. Si può dunque definire:

$$d_{ij}'' = \left| \vec{r}_j^{next} - \vec{r}_i^{next} \right|$$

$$\hat{e}_{ij}'' = \frac{(\vec{r}_j^{next} - \vec{r}_i^{next})}{d_{ij}''}$$

Per comprendere meglio il significato dell'approccio proposto si consideri a la seguente figura:

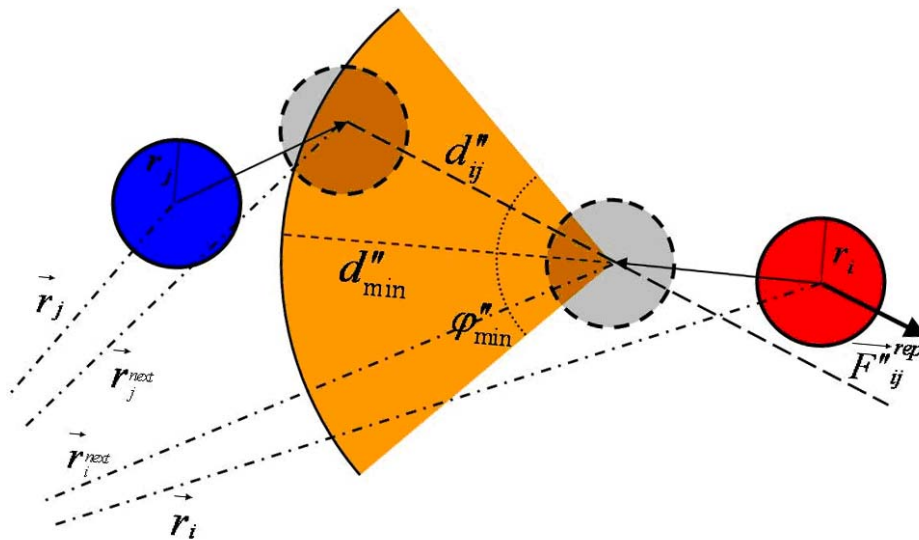


Figura 7 – Forza di repulsione revisionale

L'interazione avviene mediante una proiezione nel tempo delle posizioni degli agenti in base alla propria direzione del moto e alla propria velocità; componendo il raggio di interazione  $d_{min}''$  con il relativo angolo di visibilità  $\varphi_{min}''$  si ottiene un settore circolare che fornisce il range totale dell'interazione.

Come si evince dalla figura, l'interazione tiene conto solo di pedoni situati entro un certo angolo  $\varphi_{min}''$  rispetto alla direzione del moto.

Si noti inoltre come la funzione  $\Theta(d_{min}' - d_{ij}'')$  garantisca l'annullamento della seconda componente della forza di repulsione, nel caso in cui un pedone entri nella zona d'intrusione del vicino.

Tale forza è ha messo in evidenza la formazione di alcuni effetti di auto-organizzazione (stratificazione in linee di direzione per flussi contrapposti) di cui abbiamo parlato in precedenza.

## Obstacle Avoidance

La forza di repulsione dagli ostacoli (come ad esempio i muri) può essere formulata con considerazioni analoghe alle precedenti:

$$\overrightarrow{F_{iW}^{rep}} = \frac{\delta}{d_{iW}} \cdot \hat{e}_{iW} \cdot \Theta(d_{min} - d_{iW}) \cdot \Theta(\varphi_{min} - \varphi_{iW}) \quad (1.2)$$

Per comprendere meglio il significato di tale interazione si consideri la seguente figura:

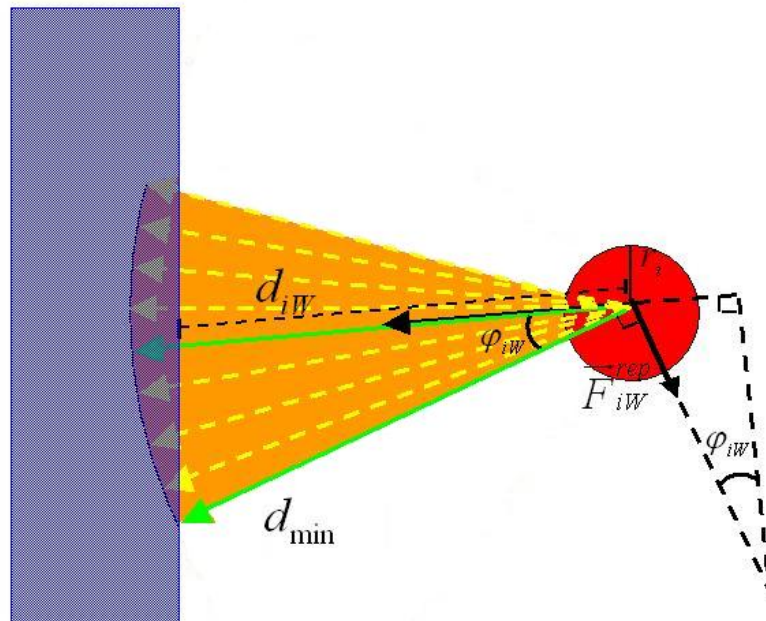


Figura 8 – Obstacle Avoidance

L'agente (cerchio in rosso) è dotato di un certo raggio di visibilità  $d_{min}$  (vettore verde) diretto lungo la direzione del moto; se tale vettore interseca un determinato ostacolo (rettangolo in blu) egli ruoterà il proprio raggio di visibilità di un certo angolo  $\varphi_{iW}$  (in senso orario ed antiorario) finché l'intersezione del raggio di visibilità ruotato con l'ostacolo non risulterà nulla; il vettore normalizzato  $\hat{e}_{iW}$  calcolato compiendo (in questo caso in senso antiorario) un angolo pari a  $\varphi_{iW} + \pi/2$  dalla direzione del moto, fornirà la direzione della forza da applicare.

Questo approccio è stato testato con successo in varie topologie di ambienti e fornisce all'agente uno strumento estremamente potente al fine di evitare ostacoli di diversa forma e dimensione. Dall'osservazione di numerose simulazioni sembra che non ci sia la necessità di aggiungere ulteriori componenti a tale forza a differenza del caso della forza di repulsione fra gli agenti; una possibile spiegazione di ciò è data dal fatto che gli ostacoli sono

oggetti statici, quindi più facili da evitare rispetto ad oggetti dinamici quali altri agenti in movimento.

## Gruppi

Per quanto riguarda infine le persone che camminano in gruppo, si può riprendere una variante del “*moto geometrico*” ideato da Reynolds e regolare i movimenti dei vari gruppi mediante l’introduzione di tre semplici forze, una di repulsione, una di allineamento ed una di coesione:

$$\vec{F}_{SWARM} = \vec{F}_{rep} + \vec{F}_{all} + \vec{F}_{coe} \quad (1.3)$$

La grandezza di tali gruppi sembrerebbe seguire la distribuzione di Poisson [Coleman 1964].

Sebbene l’equazione (1.3) serva a tener conto di persone che camminano in gruppo, si è ipotizzato che tali forze agiscano in maniera ridotta anche su persone che non appartengono a gruppi reali, in quanto, come descritto nel capitolo relativo alla dinamica delle folle, la psicologia di un individuo tende a passare da individuale a collettiva man mano che la densità cresce, e sfocia in un “effetto gregge” nel caso di stato di panico [Quarantelli 1957; Keating 1982].

In quest’ultimo caso, tali comportamenti di imitazione possono far perdere di vista l’impiego di particolari vie di fuga o rendere inutile la presenza di eventuali uscite di sicurezza [D. Helbing 2002].

Introducendo dunque il parametro  $P$  possiamo ridefinire una nuova forza di swarming che simuli tale effetto gregge:

$$\vec{F}_{SWARM}^{(loc)} = P \cdot (\vec{F}_{all} + \vec{F}_{coe}) \quad (1.4)$$

$$dove \quad P_{ij} = \begin{cases} 1 & se \text{ obj}_i = \text{obj}_j \\ 0 & altrimenti \end{cases}$$

ed  $\text{obj}_i$  rappresenta l’obiettivo del pedone  $i$ -esimo; dunque, il parametro  $P$  sarà diverso da zero solo nel caso in cui  $i$  due pedoni abbiano lo stesso obiettivo locale. In quest’ultimo caso ovviamente la forza di swarming dipenderà dagli stessi parametri che regolano lo swarming per i gruppi reali ovvero i parametri che regolano l’intensità delle forze di coesione e allineamento, il numero massimo di vicini e la distanza minima d’interazione. Tali parametri sono stati regolati nuovamente in modo da non limitare eccessivamente l’autonomia di un pedone in condizioni di media e bassa densità, e di far emergere dei pattern di imitazione ad alte densità.

## L'equazione del moto

Siamo finalmente in grado di scrivere l'equazione del moto:

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{r}}{dt} &= \vec{v}(t) \\
 m' \cdot \frac{d\vec{v}(t)}{dt} &= \vec{F}_{obj}(t) + \vec{F}_{ij}^{rep} + \vec{F}_{iW}^{rep} + \vec{F}_{SWARM} + \vec{F}_{SWARM}^{(P)} + \varepsilon = \\
 &= \alpha \cdot [v_{max} - v(t)] \cdot \hat{e}(t) + \frac{\beta}{d'_{ij}} \cdot \hat{e}'_{ij} \cdot \Theta(d'_{min} - d'_{ij}) + \\
 &+ \frac{\chi}{d''_{ij}} \cdot \hat{e}''_{ij} \cdot \Theta(d''_{min} - d''_{ij}) \cdot \Theta(d''_{ij} - d'_{min}) \cdot \Theta(\varphi''_{min} - \varphi''_{ij}) + \\
 &+ \frac{\delta}{d_{iW}} \cdot \hat{e}_{iW} \cdot \Theta(d_{min} - d_{iW}) \cdot \Theta(\varphi_{min} - \varphi_{iW}) + \vec{F}_{SWARM} + \vec{F}_{SWARM}^{(loc)} + \varepsilon
 \end{aligned}
 \tag{1.5}$$

La fluttuazione randomica  $\xi$  può essere considerato un rumore Guassiano e tiene conto di variazioni accidentali o deliberate delle regole del moto dovute all'impredicibilità intrinseca del comportamento umano.

Notiamo che le equazioni del moto (1.5) costituiscono due equazioni non lineari accoppiate di Langevin, ovvero equazioni differenziali stocastiche in cui il termine di rumore è additivo.

La soluzione analitica di tale sistema di equazioni differenziali è sostanzialmente impraticabile per questo abbiamo utilizzato un'approssimazione numerica: il metodo di Eulero.

#### **4. L'ambiente di simulazione: i primi passi di implementazione verso un caso reale**

Come introdotto nel primo paragrafo, gli studi effettuati in questo articolo fanno parte di un progetto in cui si vuole studiare la sicurezza nei tunnel e nelle gallerie metropolitane, e lo studio della stazione è previsto come “anticamera” del tunnel. Per il progetto è quindi previsto che il simulatore operi in ambienti reali, cioè ricostruiti partendo da planimetrie di stazioni reali e che fornisca informazioni spazio-temporali riconducibili a dimensioni reali.

Lo scopo degli studi è quello di studiare e modellare in che modo i flussi di persone si muovono all'interno della stazione sia in situazioni ordinarie, sia in situazioni di criticità o emergenza. In questo modo sarà anche possibile valutare se gli elementi architettonici ed il disegno della stazione possano essere un'agevolazione o un intralcio ad eventuali procedure di emergenza.

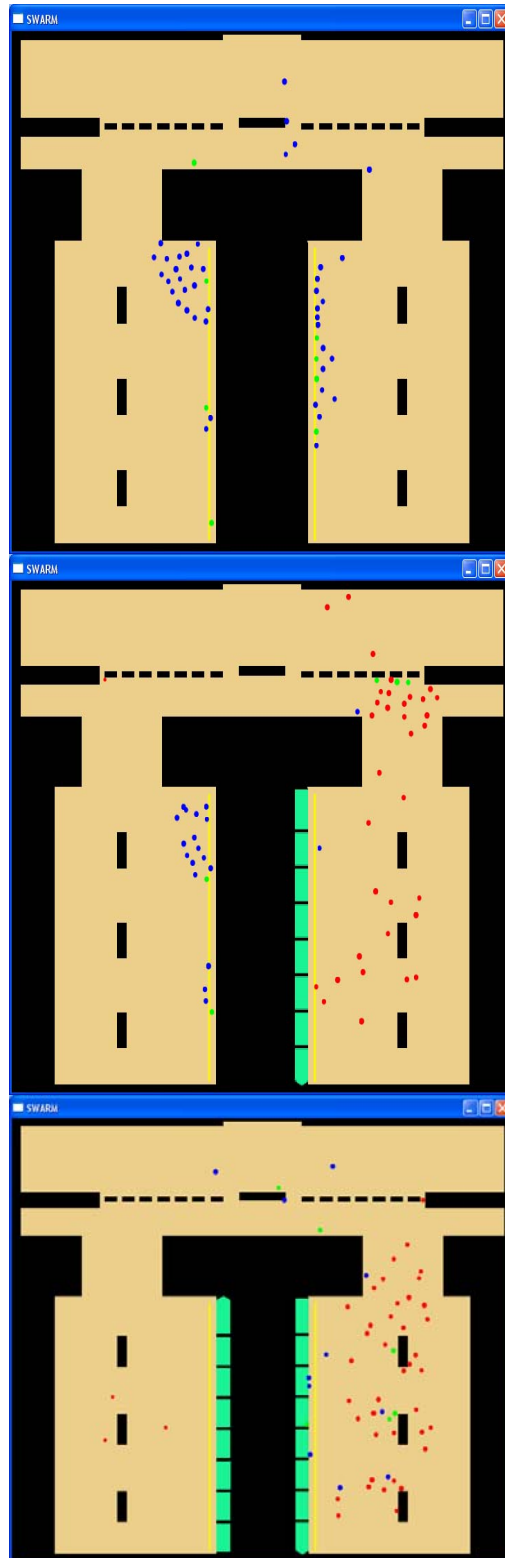
Inoltre oltre ai modelli sopra descritti, si renderà necessaria, nel prossimo futuro, una modellazione (con successiva implementazione nell'ambiente di simulazione) del comportamento degli agenti in caso di emergenza, con l'introduzione di uno stato di panico che modifichi il comportamento degli attori in funzione dell'emergenza in atto.

Passiamo a vedere ora quali sono stati i primi passi implementativi effettuati.

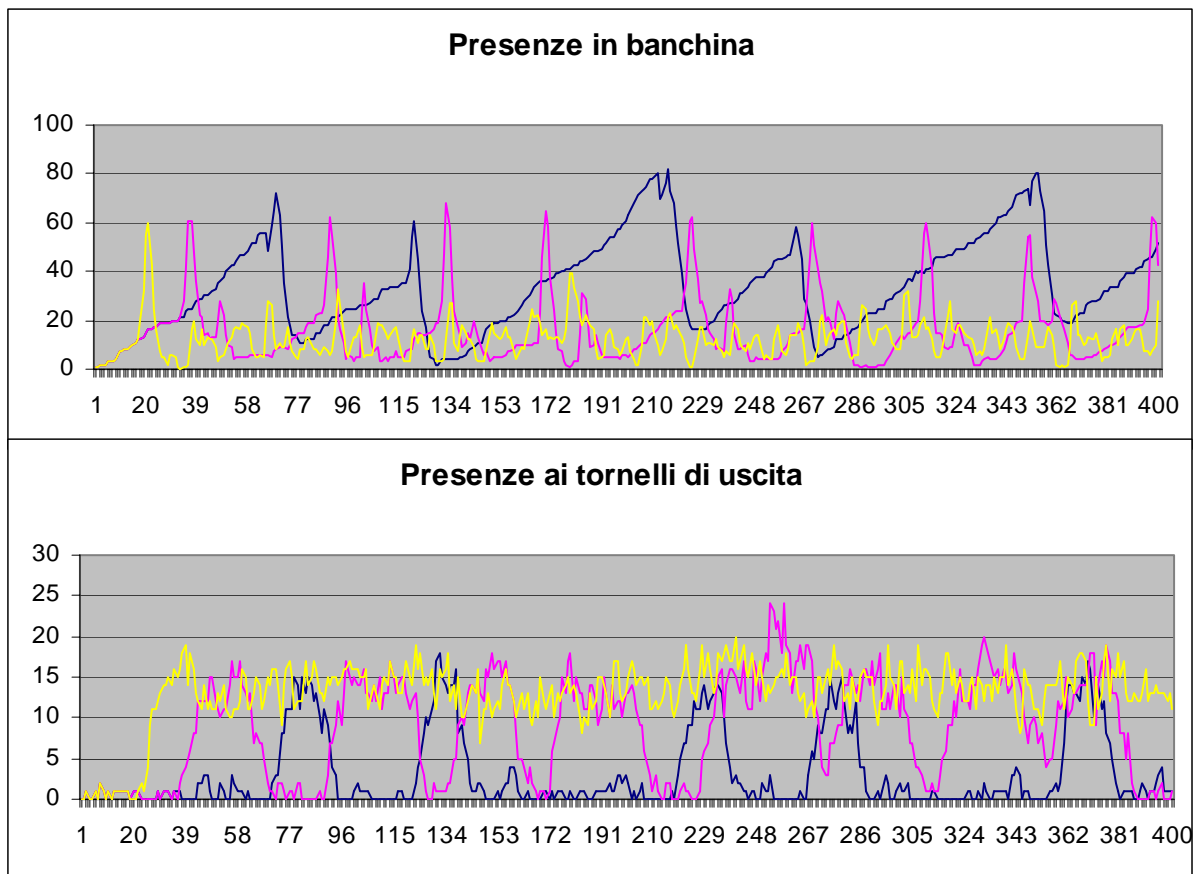
L'ambiente su cui opera inizialmente il simulatore è una ricostruzione in 2D fatta a partire dalla planimetria tipo di una stazione metropolitana. In tale stazione sono presenti un ingresso, dei tornelli di accesso alle due banchine, una per ogni direzione, e i tornelli di uscita dalla stazione oltre alle banchine con i due binari per l'arrivo dei treni. In figura 9a possiamo vedere la struttura della stazione e nelle successive i flussi di pedoni in attesa del treno e all'arrivo del treno.

Nelle simulazioni iniziali effettuate abbiamo cercato di avere delle *fotografie* dell'intero sistema, introducendo parametri di misura che possano fornire indicazioni sulla criticità in base al numero di presenze nella stazione e sulle singole banchine. Nella figura 10 possiamo vedere, ad esempio, l'andamento del numero di persone presenti in banchina e ai tornelli di uscita durante alcune simulazioni. Questo parametro rappresenta la densità di pedoni presenti nella banchina e può fornire un'utile indicazione del livello di criticità del sistema.

Nelle tre differenti simulazioni della figura 10 abbiamo provato a testare tre intervalli di tempo diversi per il passaggio dei treni. Siamo riusciti ad evidenziare dei fenomeni quali la densità particolarmente alta in banchina nel caso di treni poco frequenti, o anche la alta densità, con conseguente difficoltà di evacuazione dalla stazione, nel caso di treni troppo frequenti.

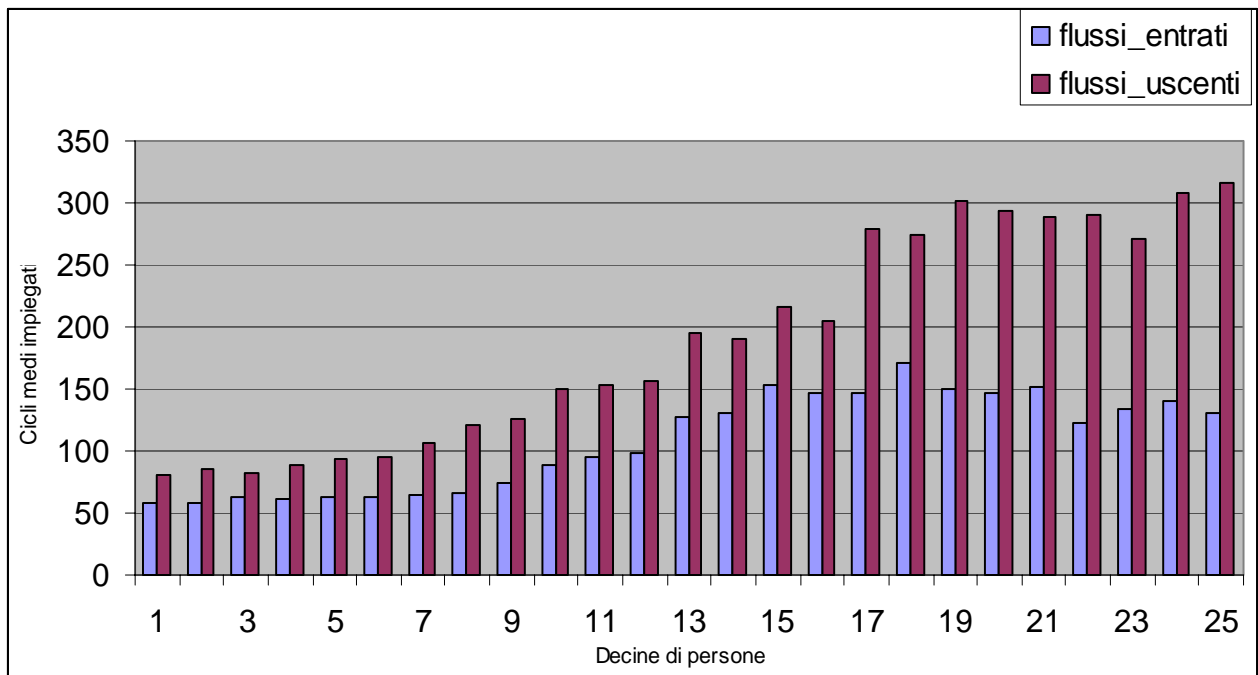


**Figura 9** – Alcune schermate della simulazione:  
attesa alle banchine, arrivo di un treno e arrivo di entrambi i treni



**Figura 10** – Grafici con le presenze nella stazione per diverse simulazioni: la linea gialla indica un passaggio di treni frequente, la linea rosa una frequenza standard, mentre la blu una frequenza ridotta

Un'ulteriore parametro di studio introdotto è legato alla permanenza degli individui nella stazione, ovvero quanto tempo impiega l'utente a compiere il suo percorso verso l'obiettivo (banchina dei treni o uscita). Per dare un ordine di misura di tale parametro vengono registrati i tempi di percorrenza per ciascun individuo, e ad ogni istante di simulazione sono disponibili due valori che rappresentano i tempi medi di entrata (percorso entrata-banchina) e di uscita (banchina-uscita) degli individui; tali tempi sono calcolati in cicli di azione degli individui (ad ogni ciclo tutti gli individui compiono un'azione). Con tale parametro è possibile identificare lo stato di *congestione* all'interno della stazione. Nel grafico presente in figura 11 possiamo vedere come questi tempi aumentino in maniera quasi esponenziale all'aumentare del numero di persone presenti in stazione, in particolare nei tempi di uscita dalla stazione, poiché la congestione (come visto anche nei grafici precedenti) si manifesta in particolare al passaggio dei tornelli, mentre non influenza in maniera eccessiva i flussi di persone in entrata.



**Figura 11** – Istogrammi con i tempi medi di percorrenza (in blu i flussi in entrata, in viola quelli in uscita) in base al numero (ascisse) delle persone presenti in stazione

Come detto in precedenza, per esigenze di progetto, e per poter dare una qualificazione sperimentale, nel prossimo futuro il simulatore dovrà essere testato sui dati progettuali reali di una stazione metropolitana. La stazione individuata è quella di Darsena a Genova, costruita dalla Ansaldo Sistemi Ferroviari.

Su questa base è stata eseguita una semplificazione della planimetria, omettendo i dettagli non utili alla sperimentazione ed evidenziando gli aspetti che interesseranno il progetto. Ad esempio occorre codificare le varie aree della stazione, individuando gli ostacoli, le zone interdette agli utenti, e le aree di interesse (biglietterie, tornelli, banchina). Nella figura 12 si può vedere una rappresentazione della planimetria (su uno dei due piani), e nella figura successiva una semplificazione per l'ambiente simulato, in cui i due piani sono stati riportati su un'unica visuale in 2D. Le sperimentazioni ed i test di qualificazione del simulatore saranno effettuati su questa architettura, utilizzando dove possibile i dati reali di transito all'interno della stazione e valutando anche delle simulazioni che utilizzeranno i dati ipotetici di flusso di persone progettuali.

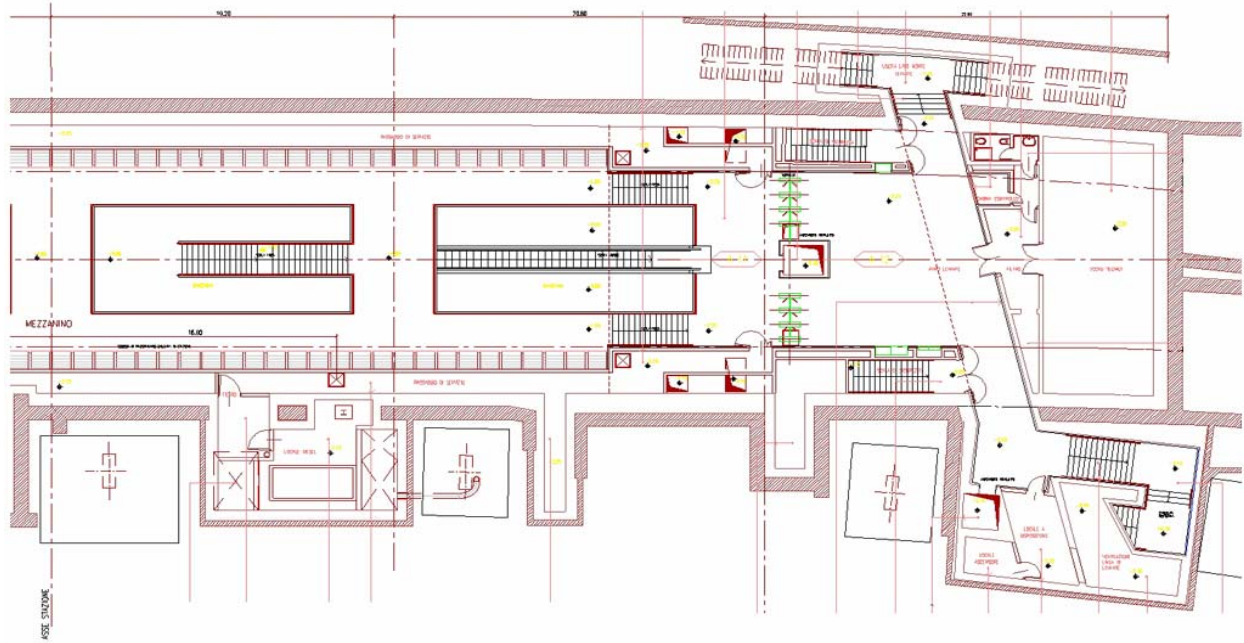
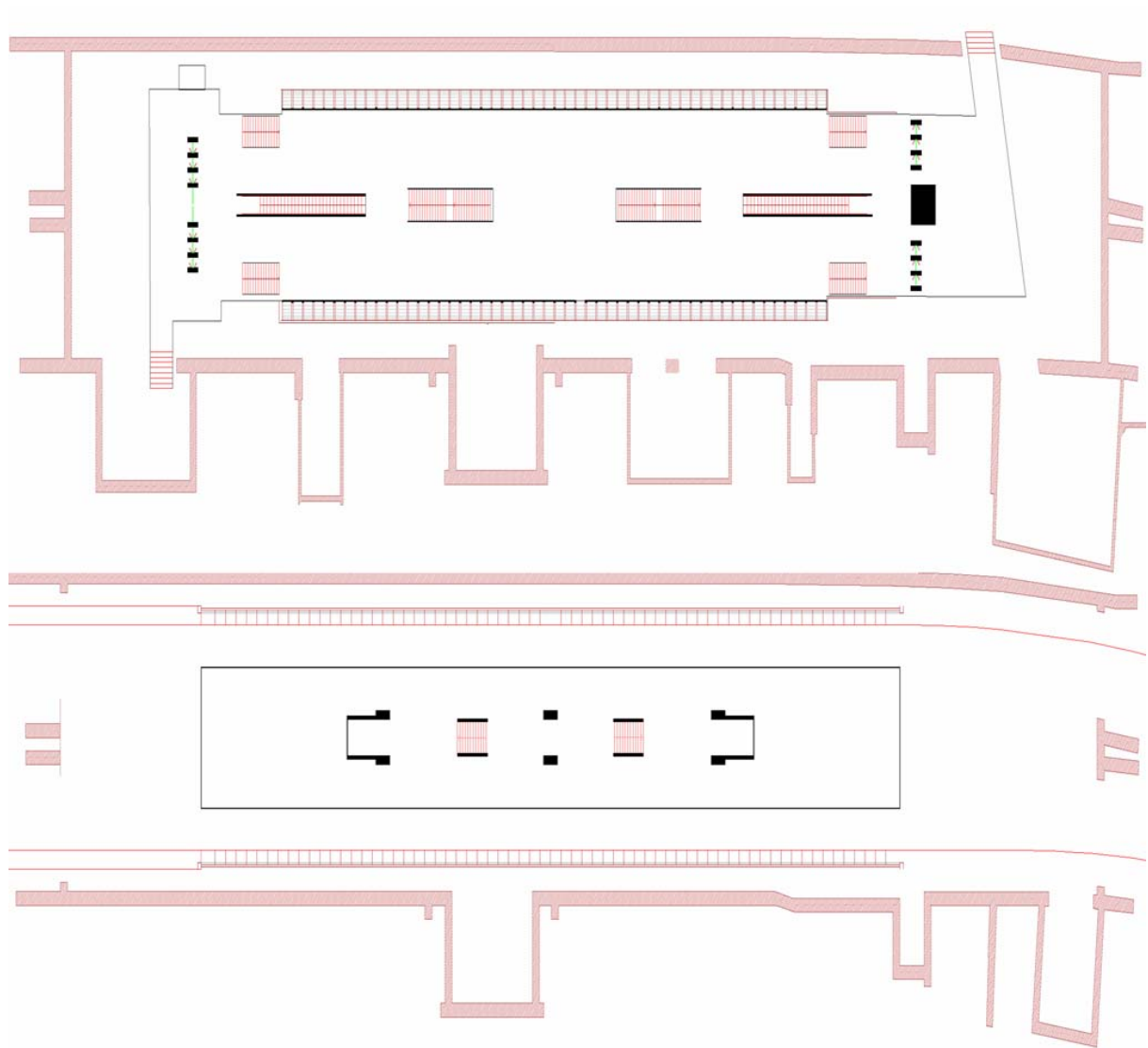


Figura 12 – Parte della planimetria della stazione Darsena a Genova



**Figura 12b** – La semplificazione della stazione per il simulatore

## 5. Conclusioni

In questo lavoro abbiamo visto come è possibile affrontare dei problemi *classici* con un approccio leggermente diverso da quelli utilizzati fino ad ora.

Il comportamento umano, in particolare, è sempre stato un problema in fase di implementazione, data la sua irregolarità e la sua non predicibilità. E' stato definito un comportamento *caotico*, dove il termine caotico indica un fenomeno che si trova tra il *non lineare* ed il randomico. Grazie all'approccio di Helbing [Helbing 1991] è stato possibile introdurre il concetto di *forze sociali*, delle particolari forze che vanno a sostituire le classiche forze che intervengono nel moto, e che influenzano il comportamento di un individuo simulato, in base all'ambiente e agli altri individui che esso si trova attorno. L'idea di base è che tali forze siano innescate da *stimoli* esterni, in grado di modificare la traiettoria, la velocità e l'accelerazione del singolo attore. Il comportamento di un singolo pedone può essere descritto mediante la metafora delle forze sociali. Dotando gli agenti di queste regole comportamentali comuni a tutti, sono stati individuati nella collettività alcuni fenomeni comportamentali interessanti (*effetto elastic, formarsi di linee di direzione di cammino...*). Tali fenomeni sono effetti non descritti dalle regole comportamentali dei singoli attori, ma evidenti quando si osserva il fenomeno da un livello più alto. Un paragone potrebbe essere quello degli *ant systems*, ovvero l'osservazione della capacità auto-organizzativa delle formiche che si può notare osservandole in gruppo, ma che è invisibile a livello comportamentale del singolo insetto.

Nel nostro studio abbiamo introdotto dei parametri per poter quantificare alcune grandezze che possano essere indici di criticità nell'ambiente, o indici di un buon deflusso di persone all'interno dell'ambiente.

Negli sviluppi futuri dello studio è prevista l'implementazione in tre dimensioni, associando anche dei dati di visibilità dell'ambiente in caso di incidente al fine di evidenziare i comportamenti di *panico* in casi di emergenza valutando quanto l'architettura dell'ambiente sia di aiuto o di intralcio nelle situazioni critiche.

## Riferimenti bibliografici

C. REYNOLDS (1987), *Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioural Model*, Computer Graphics 21(4), pp.25-34.

G.J. KLIR (1991), *Facets of Systems Science*, Plenum Press.

C. REYNOLDS (1999), *Steering Behaviors For Autonomous Characters*, Conference Proceedings of the 1999 Game Developers Conference, pp. 763-782.

T. VICSEK (2001), *Collective behaviour: A question of scale*, Nature 411, pp. 421-422.

D. HELBING, I. FARKAS, T. VICSEK (2002), *Mexican waves in an excitable medium*, Nature 419, pp. 131-132.

D. HELBING (1991), *A mathematical model for the behavior of pedestrians*, Behavioral Science 36, pp. 298-310.

J. S. COLEMAN, *Introduction to Mathematical Sociology*, The Free Press of Glencoe, pp. 361-375.

D. HELBING, P. MOLNÁR (1995) , *Social force model for pedestrian dynamics*, Physical Review E.

D. HELBING, J. FARKAS, P. MOLNÁR, T. VICSEK (2002), *Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations*, M. Schreckenberg and S. D. Sharma (eds.) Pedestrian and Evacuation Dynamics (Springer, Berlin), pp. 21-58.

L. F. HENDERSON (1971), *The statistics of crowd fluids*, Nature 229, pp. 381-383.

K. LEWIN (1951), *Field Theory in Social Science* - Harper & Brothers, New York.

W. BRILON, M. GROßMANN, H. BLANKE (1993), *Verfahren für die Berechnung der Leistungsfähigkeit und der Qualität des Verkehrsablaufs auf Straßen*. Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 669.

J. S. COLEMAN, *Introduction to Mathematical Sociology*, The Free Press of Glencoe, pp. 361-375.

E. QUARANTELLI (1957), *The behavior of panic participants*, Sociology and Social Research 41.

J. P. KEATING (1982), *The myth of panic*, Fire Journal.