



Università degli Studi di Milano Bicocca
Scuola di Scienze
Dipartimento di Informatica, Sistemistica e Comunicazione
Corso di laurea magistrale in Informatica

Sistemi Complessi: Modelli e Simulazione

Tsunami Evacuation Simulation

Giuseppe Magazzù
Gaetano Magazzù

A.A. 2021 - 2022

Indice

1	Introduzione	1
2	Background	2
2.1	Rete stradale / Griglia	2
2.2	Distribuzione della Popolazione	2
2.3	Rifugi	2
2.4	Inondazione da Tsunami	2
2.5	Casualty Model	3
3	Stato dell'arte	3
4	Descrizione del Modello	4
4.1	Ambiente	5
4.2	Agenti	5
4.2.1	Residenti	5
4.2.2	Pedoni	6
4.2.3	Auto	7
5	Estensione del Modello	7
5.1	Rete Stradale	8
5.2	Speed Variability dei Pedoni	9
5.3	Gestione degli Intersezioni	11
5.3.1	Pedoni	13
5.3.2	Auto	13
5.3.3	AWSC	14
5.3.4	TWSC	15
6	Simulazione	15
7	Analisi	16
8	Conclusioni	16

1 Introduzione

Gli tsunami sono eventi naturali pericolosi che negli ultimi decenni hanno causato la morte di oltre 250.000 persone e si verificano spesso dopo un terremoto.

Rispetto agli altri eventi naturali come uragani, eruzioni vulcaniche e inondazioni, i tempi di allerta sono molto più brevi (Katada, Kuwasawa, Yeh et al. 2006). Infatti possono raggiungere la costa dopo 20-40 minuti dalla prima scossa oppure dopo ore. Nel primo caso si parla di near-field tsunami, mentre nel secondo di far-field tsunami.

Considerando le disastrose conseguenze dovute a questi fenomeni è necessaria un'evacuazione efficiente per salvare vite umane.

Simulare l'evacuazione in caso di tsunami rappresenta uno strumento molto utile per prendere delle contromisure e migliorare le modalità di evacuazione.

In particolare i modelli agent-based sono ideali per gestire uno scenario così complesso come quello di un'evacuazione da tsunami e per modellare le diverse dinamiche che emergono quando diversi individui interagiscono tra loro durante un'emergenza.

Molti modelli non considerano o semplificano alcuni fattori importanti nell'evacuazione da tsunami. Alcuni modelli limitano i pedoni a muoversi solo lungo la strada e non permettono di sfruttare le aree aperte. Altri non gestiscono le interazioni tra pedoni e altri veicoli nell'evacuazione multimodale. Spesso non sono considerati i danni causati dal terremoto prima o durante l'evacuazione.

L'obiettivo di questo lavoro è sviluppare un modello di evacuazione multi-agente in caso di tsunami di auto e pedoni e gestire le interazioni tra gli agenti, in particolare nelle intersezioni. Il modello è stato sviluppato usando come base quello di Mostafizi et al. (2019).

Nella sezione 2 vengono presentati gli elementi principali di un modello di evacuazione da tsunami. 3 Nelle sezioni 4 e 5 viene presentato il modello base e la sua estensione e nelle sezioni 6 e 7 viene presentata l'impostazione della simulazione e l'analisi dei risultati. Infine la conclusione nella sezione 8.

2 Background

Un modello di evacuazione in caso di tsunami e' composto da diversi elementi.

2.1 Rete stradale / Griglia

L'ambiente può essere rappresentato da modelli grid-based o network-based.

I modelli grid-based rappresentano la città come griglia e permettono di muovere gli agenti in due dimensioni e sfruttare spazi ampi senza limitarsi alle strade (Makinoshima et al. 2018). Inoltre permettono una rappresentazione più efficace delle dinamiche tra gli agenti, ma il cui costo computazionale cresce con il numero di agenti considerati.

I modelli network-based invece rappresentano la rete stradale come un grafo dove i nodi sono le intersezioni e gli archi le strade percorribili. Gli archi possono avere associate delle informazioni come la lunghezza e la larghezza della strada che permettono di stabilire i tempi di percorrenza e la capacità. Con questa rappresentazione gli agenti possono muoversi solo lungo gli archi, al contrario di quelli grid-based che hanno maggior libertà. Questi modelli sono più limitati nella rappresentazione delle interazioni tra agenti, ma risultano più efficienti computazionalmente.

2.2 Distribuzione della Popolazione

La distribuzione spaziale della popolazione al momento dell'evacuazione varia in base a diversi fattori: l'ora del giorno, la stagione, eventi. Inoltre la popolazione può essere composta da residenti e turisti che si comporteranno diversamente al pericolo.

2.3 Rifugi

I rifugi sono dei luoghi sicuri dove evacuare. Si distinguono in luoghi al di fuori della zona a rischio (rifugi orizzontali) o luoghi che si trovano ad una altezza che lo tsunami non raggiunge (rifugi verticali). Solitamente si assume che resistano a terremoti e tsunami e che abbiano una capacità illimitata.

2.4 Inondazione da Tsunami

Le inondazioni da tsunami vengono simulate utilizzando un modello di inondazione che fornisce una serie temporale di altezza e velocità delle onde in una determinata area.

2.5 Casualty Model

Un casualty model defisce quando un individuo viene considerato una vittima. Spesso si utilizza semplicemente l'altezza dello tsunami. In alcuni studi vengono considerati altri fattori come la velocità e la temperatura dello tsunami o anche l'età e il genere dell'individuo (Yeh 2010).

3 Stato dell'arte

I primi modelli di evacuazione da tsunami sono stati basati sui modelli network-based utilizzati per l'evacuazione da altri disastri come uragani, incendi e inondazioni (Imamura et al. 2001; Usuzawa et al. 1997).

Uno dei primi aspetti che è stato preso in considerazione è il comportamento umano, in particolare come i residenti reagiscono all'arrivo dello tsunami e quanto tempo ci mettono per iniziare ad evacuare. Queste informazioni sono state raccolte tramite dei questionari rivolti ai residenti e usate per modellare i tempi di partenza dell'evacuazione (Imamura et al. 2001; Saito e Kagami 2004).

Questi primi modelli network-based hanno usato come regola di *path finding* proseguire verso il prossimo nodo più alto. Successivamente si è passati a usare il percorso più breve (Katada, Kuwasawa, Kanai et al. 2004) e altre strategie di routing basate sull'apprendimento come Nash equilibrium e system optimal (Lämmel e Flötteröd 2009).

Con l'aumento della potenza di calcolo è stato possibile passare da i modelli network-based ai modelli grid-based e ibridi. Inoltre è stato possibile usare una quantità di dati maggiore e sfruttare il calcolo parallelo (Makinoshima et al. 2018; Wijerathne et al. 2013).

Successivamente i modelli di evacuazione da tsunami sono stati sfruttati per prendere delle contromisure e migliorare le modalità di evacuazione, analizzando le congestioni del traffico, il posizionamento dei rifugi e lo scambio di informazioni.

Recentemente sempre più lavori hanno analizzato e approfondito diversi aspetti.

/

Qua sotto descriviamo alcuni lavori che hanno approfondito.

Lämmel, Rieser et al. (2010) Queue model, NASH

In molti modelli vengono considerati solo pedoni oppure pedoni e auto, ma senza gestire le interazioni tra essi. Goto et al. (2012) hanno considerato gli individui raggruppati in famiglie e categorizzato le famiglie in: pedoni lenti, pedoni normali, motociclisti e occupanti di un'auto. Z. Wang e Jia (2021) hanno ripreso il lavoro di Goto et al. (2012) e ...

Un'altro aspetto importante per l'evacuazione è la conoscenza dell'ambiente da parte degli agenti. Alcuni lavori distinguono gli agenti in base alla loro conoscenza e studiano gli effetti di diverse proporzioni tra categorie di agenti. Nguyen et al. (2012) hanno definito *fox agent* un pedone ben informato che segue i segnali stradali fino a un rifugio e *sheep agent* un pedone che non sa come comportarsi e quindi segue i *fox agent* o si muove casualmente. Takabatake et al. (2017) invece hanno distinto gli agenti in residenti e visitatori. I residenti sono agenti che conoscono il percorso più breve per evacuare, mentre i visitatori seguono gli altri scegliendo la strada con più individui o si muovono verso una zona più elevata.

Mas et al. (2012)

Wijerathne et al. (2013) hanno proposto un modello grid-based che utilizza un sistema di navigazione basato sulla visione. Gli agenti si muovono verso un luogo sicuro ben visibile scegliendo la strada con una maggiore distanza di visione. Anche in questo lavoro vengono distinti visitatori, che si affidano alla visione, e non-visitatori, che hanno conoscenza di un'area limitata al di fuori della quale vengono considerati visitatori.

Altri lavori hanno analizzato come i tempi di partenza influenzano i tempi di evacuazione e le vittime **H. Wang et al. (2016)**.

Z. Wang e Jia (2021) propongono un modello più realistico che considera i danni del terremoto prima dello tsunami sulla rete stradale.

4 Descrizione del Modello

Il modello considerato (Mostafizi et al. 2019) è un sistema multi-agente che prevede l'evacuazione della città di Seaside, Oregon in caso di tsunami di auto e pedoni. L'evacuazione inizia subito dopo il terremoto e non vengono considerati eventuali danni causati dal terremoto.

Il modello utilizza dati GIS per la distribuzione della popolazione, la rete stradale e i rifugi. Per la distribuzione della popolazione è stato considerato uno scenario a mezzogiorno di un fine settimana di estate, che presenta una maggiore concentrazione di residenti sulla spiaggia e nel centro della città. La popolazione sulla costa (40%) e nel centro (30%) è distribuita normalmente, mentre quella nella zona residenziale (30%) è distribuita uniformemente (Fig. 1).

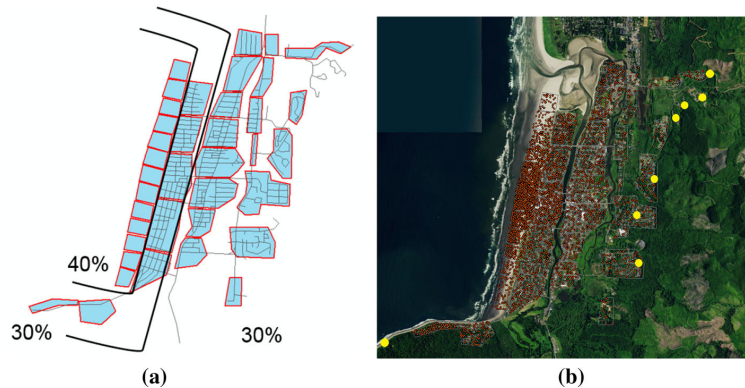


Figura 1: Distribuzione della popolazione nello scenario considerato. (a) Mostra le aree in cui è distribuita la popolazione, divise nelle tre macro aree: costa, centro, zona residenziale. (b) Immagine satellitare con la distribuzione della popolazione.

4.1 Ambiente

L'ambiente é composto dalla rete stradale della città con i relativi rifugi e dallo tsunami.

La rete stradale é rappresentata da un grafo, i cui nodi corrispondono alle intersezioni e gli archi alle strade. Tutte le strade sono considerate a senso unico, con una sola corsia e con una velocità limite di 55 km/h.

8 delle intersezioni sono marcate come rifugi con capacità illimitata.

Lo tsunami é rappresentato da una griglia discreta, dove ogni cella contiene i valori temporali di altezza delle onde. I dati usati in questo progetto sono quelli calcolati dal modello di inondazione ComMIT/MOST (Titov e Gonzalez 1997) per la zona di subduzione della Cascadia.

4.2 Agenti

La simulazione può prevedere diversi tipi di agenti: residenti, pedoni e auto.

4.2.1 Residenti

All'inizio dell'evacuazione i residenti si trovano all'esterno di edifici e auto e scelgono come evacuare autonomamente. Un residente può scegliere diverse modalità per evacuare: a piedi o in auto e raggiungere un rifugio verticale oppure orizzontale. Una volta che ogni agente decide in che modo evacuare non cambierà scelta per tutta la simulazione.

Prima di iniziare l'evacuazione i residenti impiegano del tempo per prepararsi che include il raggiungimento del veicolo. Questo tempo chiamato *milling time* é modellato tramite la distribuzione di Rayleigh (Eq. 1), con un tempo minimo (τ) di 10 minuti e un parametro di scala (σ) di 1.65.

$$f(x; \tau, \sigma) = \frac{(x - \tau)^2}{\sigma^2} e^{-(x-\tau)^2/(2\sigma^2)} \quad (1)$$

Scaduto il tempo di preparazione l'agente si muove verso l'intersezione più vicina e in base alla modalità scelta viene considerato un agente di tipo pedone o auto. L'agente quindi inizia a seguire il percorso più breve per il rifugio più vicino raggiungibile, trovato tramite l'algoritmo A*.

Gli agenti durante l'evacuazione possono continuare sulla strada attuale o cambiare strada seguendo il percorso, morire se l'altezza dell'onda nel punto in cui si trova è superiore o uguale a un parametro H_c .

4.2.2 Pedoni

La velocità di camminata viene stabilita tramite una distribuzione normale con media 1.21 m/s e deviazione standard 0.20 m/s. La velocità di ogni pedone rimane costante durante tutta l'evacuazione.

4.2.3 Auto

Ogni auto contiene una sola persona per considerare il caso peggiore. Le auto possono raggiungere la velocità massima imposta dalla strada, ovvero 55 km/h.

Il comportamento delle auto è modellato tramite il modello car-following, General-Motors.

La teoria sui modelli Car following descrivono come un veicolo ne segue un'altro e cambi il proprio comportamento reagendo a quest'ultimo.

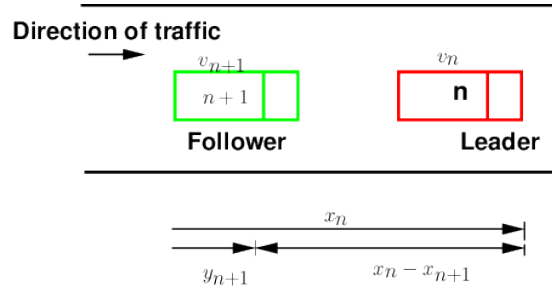


Figura 2: schema generale dei modelli car following, dove $n+1$ è il veicolo corrente ed n quello di fronte, v_{n+1} , v_n sono le rispettive velocità, mentre x_{n+1} , x_n sono le rispettive posizioni e $x_n - x_{n+1}$ è la distanza tra i due veicoli.

Secondo il modello General Motors ogni auto risponde alle condizioni del traffico circostante esclusivamente accelerando o decelerando, l'accelerazione dipende dalla velocità del veicolo corrente, la sua posizione relativa e la velocità con il veicolo di fronte. Basato sul concetto follow-the leader fondato su due assunzioni principali: più veloce è il veicolo di fronte maggiore sarà la distanza tra i due veicoli, inoltre una certa distanza di sicurezza dall'auto in fronte deve essere mantenuta.

$$a_{n+1}^t = \left[\frac{\alpha_{l,m} * (v_{n+1}^t)^m}{(x_n^t - x_{n+1}^t)^l} \right] [v_n^t - v_{n+1}^t] \quad (2)$$

Equation 2: qui viene riportata l'equazione principale del modello General-Motors, dove l è un esponente di distanza con il veicolo di fronte che può assumere valori da +4 a -1, m è un esponente di velocità con valori tra -2 a +2, α è un coefficiente di sensibilità.

5 Estensione del Modello

In questa sezione verranno descritte le modifiche e le aggiunte effettuate al modello base, ma prima verranno evidenziate le limitazioni e le mancanze del modello anche rispetto allo stato dell'arte.

Molte assunzioni sono poco realistiche come la velocità costante dei pedoni, tutte le strade a senso unico e l'assenza di interazioni nelle intersezioni. Inoltre

viene assunto che tutti gli agenti conoscano il percorso più breve per il rifugio. Un'altra limitazione riguarda le interazioni tra i vari tipi di agenti. Questo modello considera esclusivamente le interazioni auto-auto tramite il modello General Motors, ma non prevede nessuna interazione pedone-pedone o pedone-auto.

Quindi ci si concentrerà sulle interazioni nelle intersezioni introducendo meccanismi di coordinazione tra i vari tipi di agente. Inoltre la velocità dei pedoni verrà modificata in base alla congestione in modo da poter rappresentare uno scenario più realistico.

5.1 Rete Stradale

Prima di descrivere le varie aggiunte in questa sezione verranno elencate le varie modifiche che sono state effettuate alla rete stradale.

Tutte le strade della rete sono state considerate come strade locali secondo il *Seaside Transportation System Plan* (2010), ovvero strade a doppio senso e a una corsia con una larghezza variabile da 7.3 m a 9 m e opzionalmente un marciapiede per ogni lato della strada con una larghezza fissa di 1.5 m. È stato assunto che tutte le strade abbiano marciapiedi su entrambi i lati e che la larghezza sia fissata al valore minimo.

5.2 Speed Variability dei Pedoni

Nello stato dell'arte solitamente la velocità dei pedoni viene gestita tramite relazioni macroscopiche tra velocità-densità-flusso espresse tramite un diagramma fondamentale [survey]. Per estrarre queste relazioni sono richiesti dei dati sperimentali che non sempre disponibili soprattutto nei casi di emergenza.

Perciò analizzeremo come questo problema viene trattato da metodi allo stato dell'arte per la simulazione di evacuazione di tsunami.

Alcuni lavori distinguono i pedoni in gruppi in base alla loro velocità sulla base di questionari o altri lavori riguardanti il comportamento dei pedoni. Takabatake et al. (2017) hanno effettuato una distinzione sull'età con una velocità massima di 1.19 m/s (Under 65) e 0.96 m/s (Over 65). Basandosi su Older (1968) hanno assunto che una decrescita lineare della velocità da un livello di densità di 0.3 p/m² a 3.0 p/m² (Fig. 3b). Goto et al. (2012) hanno raggruppato i pedoni in famiglie che sono distinte in *normal walkers* con velocità massima di 1.5 m/s e *slow walkers* (famiglie con disabili o anziani) con velocità massima di 0.75 m/s (Fig. 3c).

Altri lavori hanno assunto che la velocità sia distribuita normalmente. Z. Wang e Jia (2021) considera una distribuzione normale $\mathcal{N}(\mu_p, \sigma_p)$ troncata tra 0.75 m/s e 3.83 m/s e con $\mu_p \sim \mathcal{U}(1.4, 2)$ e $\sigma_p \sim \mathcal{U}(0.1, 0.6)$.

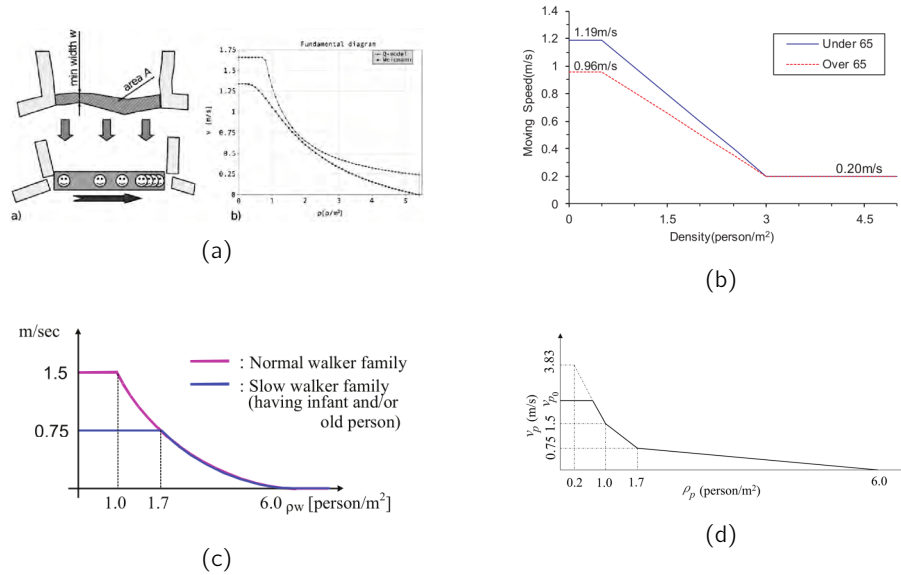


Figura 3: Esempi di relazione velocità-densità. a) Lämmel, Rieser et al. (2010), b) Takabatake et al. (2017), c) Goto et al. (2012), d) Z. Wang e Jia (2021).

In questi lavori la velocità viene aggiustata in base alla densità in un'area davanti ai pedoni (Fig. 3), tramite la seguente formula $\rho = n/(L \times W)$, dove n è il numero

di persone nell'area $L \times W$, L è la lunghezza di ricerca e W la larghezza della strada. La lunghezza solitamente assume valori tra 3 e 5 m.

Lämmel, Rieser et al. (2010) invece ha introdotto un modello network-based in cui in ogni link viene assegnata una coda FIFO. La velocità viene aggiornata tramite la relazione $v = \min[v_{max}, FC/D]$ (Fig. 3a), dove D la densità e FC è la *flow capacity*, ovvero il flusso di pedoni in uscita in un link della rete. La *flow capacity* è un parametro che è stato scelto approssimando la curva velocità-densità del modello a code a quella del diagramma fondamentale di Weidmann (1993). Inoltre è stata considerata una velocità massima di 1.66 m/s poichè i valori considerati da Weidmann sono relativi al flusso dei pedoni in condizioni normali e non in caso di emergenza.

Come appena descritto i lavori analizzati, apparte avere informazioni sull'età e sulle velocità massime dei pedoni, non hanno dati a loro disposizione per fittare i modelli. Di conseguenza non avendo dati empirici per questo lavoro si è deciso di usare il diagramma fondamentale di Weidmann (1993), il quale descrive la relazione tra densità e velocità tramite la Kladek-formula (Eq. 3), dove v_f è la free flow speed mentre ρ è la densità e ρ_{max} è la jam density.

$$v = v_f \times (1 - e^{-\gamma \times (\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_{max}})}) \quad (3)$$

I parametri scelti sono $\gamma = 1.913$, $v_f = 1.34$ m/s and $\rho_{max} = 5.4$ p/m² che secondo studi empirici hanno mostrato i risultati migliori.

Il calcolo della densità è stato effettuato considerando un'area di ricerca di 4 m x 1.5 m di fronte al pedone come in Goto et al. (2012) e Z. Wang e Jia (2021).

I pedoni nel caso in cui sono presenti anche auto, procedono esclusivamente sui marciapiedi, altrimenti occupano tutta la strada.

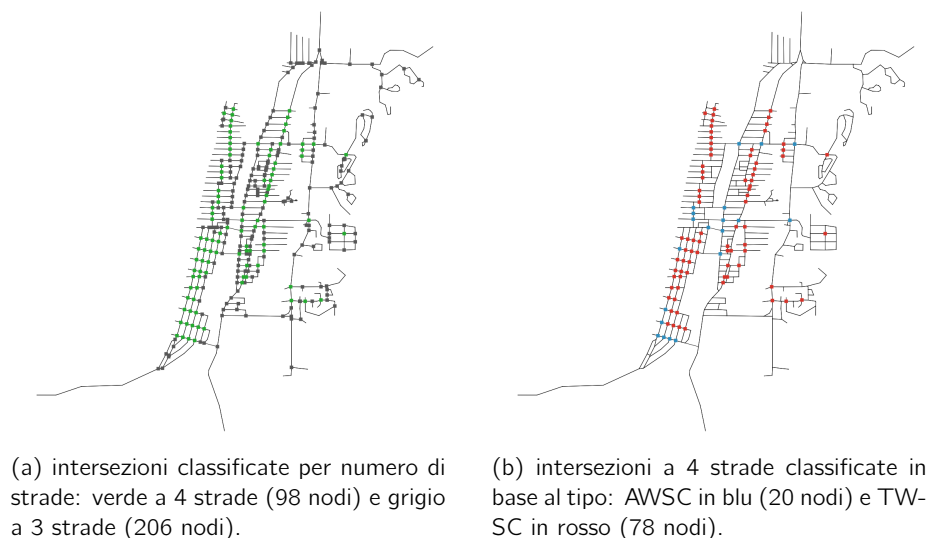


Figura 4: Tipi di intersezioni.

5.3 Gestione degli Intersezioni

Per la gestione delle intersezioni sono stati considerati esclusivamente gli incroci a 4 strade e trattati come intersezioni di tipo AWSC (All Way Stop Controlled) o TWSC (Two Way Stop controlled).

Tramite l'utilizzo di OpenStreetMap e GoogleMaps, sono state estratte manualmente le informazioni circa la posizione e nel case dei TWSC la direzione di precedenza di tali tipi di incroci per la città di Seaside, ottenendo la seguente (Fig. 4a).

Inoltre nelle intersezioni è stata introdotta una zona di attraversamento per la gestione delle interazioni tra auto e pedoni. È stato assunto che gli incroci abbiano lunghezza e larghezza pari alla larghezza della strada (10.3 m). Dal momento che la rappresentazione della strada è network-based è stato deciso che la zona inizia prima dell'incrocio e finisce dopo dell'incrocio a una distanza pari alla metà della larghezza (5.15 m) (Fig. 5).

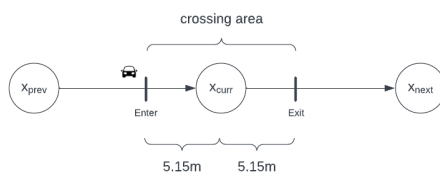


Figura 5: Zona di attraversamento di un'intersezione.

Per rappresentare l'attraversamento dei pedoni e delle auto sono state aggiunte le seguenti informazioni ad ogni intersezione i a 4 strade:

- C_{ij} = numero di pedoni che stanno usando l'attraversamento pedonale che si trova sulla strada che va dall'incrocio i all'incrocio j .
- $Arrival_i$ = coda delle auto nella zona di attraversamento ordinate per tempo di arrivo.
- $Crossing_i$ = insieme delle auto che possono passare contemporaneamente.
- $Stops_i$ = insieme delle intersezioni j collegate a i in cui è presente uno stop nella strada (i, j) .

Per stabilire la posizione all'interno della rete stradale, le precedenza e la direzione della prossima intersezione per ogni agente x vengono definite:

- x_{prev} l'intersezione precedente
- x_{curr} l'intersezione corrente
- x_{next} la prossima intersezione
- $x_{side} \in \{left, right\}$ il lato di marciapiede (solo pedoni)
- $x_{dir} \in \{left, straight, right\}$ la direzione verso x_{next}

5.3.1 Pedoni

Data la tripla $(x_{prev}, x_{curr}, x_{next})$ viene associata ad ogni intersezione collegata a x_{curr} la direzione per raggiungerla seguendo il senso orario a partire da x_{prev} , per cui I_d indica l'intersezione nella direzione $d \in \{origin, left, straight, right\}$. La direzione associata all'intersezione x_{next} è quella dove è diretto il pedone e viene identificata da x_{dir} .

Quando un pedone x entra nella zona di attraversamento di x_{curr} dall'intersezione x_{prev} e si trova sul marciapiede x_{side} ha tre direzioni in cui poter andare: *left, straight, right* (Fig. 6):

- Se $x_{dir} = straight$ e $x_{side} = side$ viene incrementato $C_{x_{curr}, I_{side}}$ di 1.
- Se $x_{dir} = side$ e $x_{side} \neq side$ viene incrementato $C_{x_{curr}, I_{origin}}$ di 1.
- Se $x_{dir} = side$ e $x_{side} = side$ non viene alterato nessun contatore.

Quando il pedone finisce di attraversare il contatore corrispondente viene decrementato di 1.

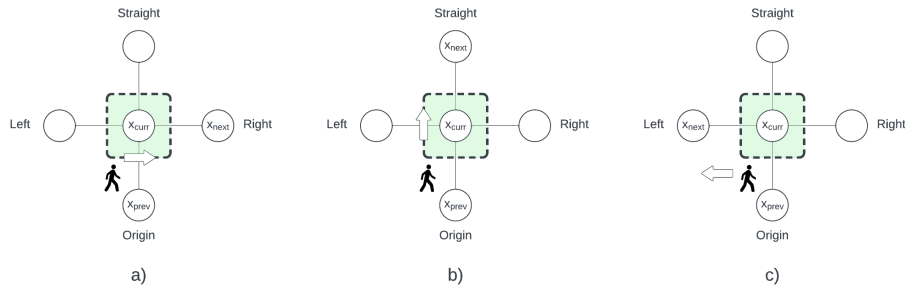


Figura 6: Esempio dei tre casi di attraversamento dal punto di vista del pedone che si trova sul marciapiede sinistro a) il pedone si trova sul lato sinistro e attraversa sul link collegato a origin. b) il pedone attraversa sul lato sinistro dell'incrocio, quindi sul link collegato a left. c) il pedone segue il marciapiede sulla sinistra senza attraversare.

5.3.2 Auto

Quando un'auto x raggiunge la zona di attraversamento dell'intersezione i viene aggiunta alla coda $Arrival_i$ che determina l'ordine di arrivo delle auto. In base al tipo di intersezione viene schedata e una volta avuto il via libera viene aggiunta a $Crossing_i$ e rimossa una volta lasciato l'incrocio.

Le auto quando raggiungono la zona di attraversamento vengono aggiunte alla coda $Arrival_i$ e schedate in base al tipo d'intersezione (Sec. 5.3.3), una volta avuto il via libera le auto sono aggiunte a $Crossing_i$ e rimosse una volta lasciato

l'incrocio. Se ci sono pedoni che stanno attraversando le strade (x_{curr}, x_{next}) e (x_{prev}, x_{curr}) l'auto dovrà attendere, quindi potrà passare se e solo se $C_{x_{curr}, x_{prev}} = 0$ e $C_{x_{curr}, x_{next}} = 0$ (Fig. 7).

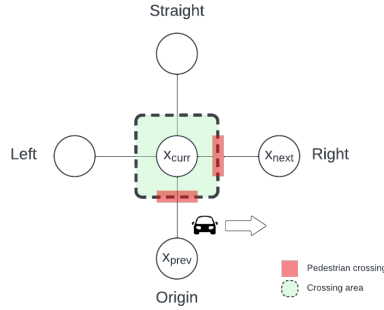


Figura 7: Esempio degli attraversamenti pedonali (in rosso) che vanno controllati per poter passare data la tripla $(x_{prev}, x_{curr}, x_{next})$ di un'auto x .

5.3.3 AWSC

Nelle intersezioni di tipo AWSC la prima auto che arriva ha la precedenza sulle altre auto e deve aspettare eventuali pedoni come spiegato in precedenza. Inoltre lo scenario in cui 4 auto arrivano contemporaneamente non è stato considerato poiché poco probabile.

La risoluzione delle precedenza avviene tra le auto che arrivano a un'intersezione allo stesso tempo. L'auto che ha la destra libera viene considerata provenire da *origin* e dal suo punto di riferimento vengono identificate le direzioni di provenienza delle altre auto.

Basandosi sulle direzioni di provenienza delle auto e sulle rispettive destinazioni viene verificato in senso orario (*origin* → *left* → *straight*) quali auto possono passare contemporaneamente o meno (Tab. 1, Tab. 2, Tab. 3).

Car1: Origin	Car2: Left
Left	Left
Right	Right
Right	Straight
Straight	Right

Tabella 1: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle due auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin* e *left*.

Car1: Origin	Car2: Straight
Left	Right
Right	Left
Right	Right
Straight	Right

Tabella 2: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle due auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin* e *straight*.

Car1: Origin	Car2: Left	Car3: Straight
Right	Left	Right
Left	Right	Left
Right	Right	Right
Straight	Right	Right

Tabella 3: Tutte le possibili combinazioni di destinazione delle tre auto che permettono di passare contemporaneamente nel caso in cui arrivano rispettivamente da *origin*, *left* e *straight*.

5.3.4 TWSC

Nel caso in cui l'intersezione è di tipo TWSC vengono identificate due vie: quella principale che ha la precedenza e quella secondaria in cui sono presenti gli stop.

A differenza dell'intersezioni AWSC, l'ordine di precedenza non importa poiché possono passare al più due auto alla volta che si trovano l'una di fronte all'altra. Quindi viene scelta casualmente come riferimento una delle due auto che viene considerata provenire da *origin*, mentre l'altra da *straight*. Una volta che la via principale è libera viene gestita nello stesso modo quella secondaria.

Per verificare se le due auto possono passare contemporaneamente si procede come già visto per il caso origin-straight (Tab. 3).

6 Simulazione

Distribuzione auto/pedoni gestita dai parametri...

Lista parametri

R1_HorEvac_Foot

R2_HorEvac_Car

R3_VerEvac_Foot

R4_VerEvac_Car

Hc

Tc

Ped_Speed

Ped_Sigma

max_speed

acceleration

deceleration

alpha

Rtau

Rsig

Monte-Carlo simulation mostly with 10 times repetition

7 Analisi

8 Conclusioni

Riferimenti bibliografici

- Goto, Yozo et al. (2012). «Tsunami evacuation simulation for disaster education and city planning». In: *Journal of Disaster Research* 7.1, pp. 92–101.
- Imamura, F, T Suzuki e M Taniguchi (2001). «Development of a simulation method for the evacuation from the tsunami and its application to Aomae, Okushiri Is., Hokkaido». In: *Journal of Japan Society for Natural Disaster Science* 20.2, pp. 183–195.
- Katada, Toshitaka, Noriyuki Kuwasawa, Masanobu Kanai et al. (2004). «Disaster education for Oiwake citizen by using tsunami scenario simulator and evaluation of that method». In: *Sociotechnica* 2, pp. 199–208.
- Katada, Toshitaka, Noriyuki Kuwasawa, Harry Yeh et al. (2006). «Integrated simulation of tsunami hazards». In: *EERI's Eighth US National Conference on Earthquake Engineering*. Vol. 1727.
- Lämmel, Gregor e Gunnar Flötteröd (2009). «Towards system optimum: Finding optimal routing strategies in time-dependent networks for large-scale evacuation problems». In: *Annual Conference on Artificial Intelligence*. Springer, pp. 532–539.
- Lämmel, Gregor, Marcel Rieser et al. (2010). «Emergency preparedness in the case of a tsunami—Evacuation analysis and traffic optimization for the Indonesian city of Padang». In: *Pedestrian and evacuation dynamics 2008*. Springer, pp. 171–182.
- Makinoshima, Fumiyasu, Fumihiko Imamura e Yoshi Abe (2018). «Enhancing a tsunami evacuation simulation for a multi-scenario analysis using parallel computing». In: *Simulation modelling practice and theory* 83, pp. 36–50.
- Mas, Erick et al. (2012). «Agent-based simulation of the 2011 great east japan earthquake/tsunami evacuation: An integrated model of tsunami inundation and evacuation». In: *Journal of Natural Disaster Science* 34.1, pp. 41–57.
- Mostafizi, Alireza et al. (2019). «An agent-based vertical evacuation model for a near-field tsunami: Choice behavior, logical shelter locations, and life safety». In: *International journal of disaster risk reduction* 34, pp. 467–479.
- Nguyen, Thi Ngoc Anh et al. (2012). «Simulation of emergency evacuation of pedestrians along the road networks in Nhatrang city». In: *2012 IEEE RIVF international conference on computing & communication technologies, research, innovation, and vision for the future*. IEEE, pp. 1–6.
- Older, SJ (1968). «Movement of pedestrians on footways in shopping streets». In: *Traffic engineering & control* 10.4.
- Saito, Takashi e Hiroshi Kagami (2004). «Simulation of evacuation behavior from tsunami utilizing multi agent system». In: *13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 1–10.
- Seaside Transportation System Plan* (2010). https://www.cityofseaside.us/sites/g/files/vyh1if6311/f/uploads/seaside_tsp_final.pdf, Accessed: 12-09-2022.

- Takabatake, Tomoyuki et al. (2017). «Simulated tsunami evacuation behavior of local residents and visitors in Kamakura, Japan». In: *International journal of disaster risk reduction* 23, pp. 1–14.
- Titov, Vasily V e Frank I Gonzalez (1997). «Implementation and testing of the method of splitting tsunami (MOST) model». In.
- Usuzawa, H, F Imamura e N Shuto (1997). «Development of the method for evacuation numerical simulation for tsunami events». In: *Annual meeting of the Tohoku Branch technology research conference, Japan society of civil engineers*, pp. 430–431.
- Wang, Haizhong et al. (2016). «An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety». In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 64, pp. 86–100.
- Wang, Zhenqiang e Gaofeng Jia (2021). «A novel agent-based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment». In: *Natural hazards* 105.2, pp. 2045–2071.
- Weidmann, Ulrich (1993). «Transporttechnik der fußgänger: transporttechnische eigenschaften des fußgängerverkehrs, literaturlauswertung». In: *IVT Schriftenreihe* 90.
- Wijerathne, MLL et al. (2013). «HPC enhanced large urban area evacuation simulations with vision based autonomously navigating multi agents». In: *Procedia Computer Science* 18, pp. 1515–1524.
- Yeh, Harry (2010). «Gender and age factors in tsunami casualties». In: *Natural Hazards Review* 11.1, pp. 29–34.