

Simulazione adattiva dei flussi di traffico

Roberto Gabrielli(*), Alessandra Guidazzi (*), Raffaele Miserocchi (*)
Marco Antonio Boschetti(**), Vittorio Maniezzo(**), Matteo Roffilli(**)

(*) Servizio Pianificazione territoriale, Provincia di Forlì-Cesena
e-mail: {gabrielli.roberto, guidazzi.alessandra, raffaele.miserocchi}@provincia.fc.it

(**) Scienze dell'Informazione, Università di Bologna
e-mail: {boschett, maniezzo, roffilli}@csr.unibo.it

Riassunto

La simulazione e la previsione dei flussi di traffico sono da tempo oggetto di studi approfonditi che hanno portato spesso alla realizzazione di pacchetti applicativi di ampia diffusione. Ciononostante, l'area di indagine è ancora molto attiva dato che i moduli simulativi integrati in questi pacchetti applicativi richiedono alte risorse computazionali a causa di un utilizzo intensivo di tecniche avanzate di ottimizzazione. La soluzione ottenuta dipende inoltre da un numero cospicuo di parametri operativi, i cui valori influenzano in modo determinante i risultati ottenuti sia globalmente che localmente. Questo aspetto è di solito mascherato negli applicativi proposti sul mercato.

Alla luce di queste considerazioni, in questo lavoro presentiamo un'applicazione che implementa un modello innovativo di simulazione e ottimizzazione, che è stato validato su un caso d'uso reale: la rete stradale della provincia di Forlì-Cesena. Abbiamo ottenuto simulazioni integrate di flusso veicolare e merci su tutta la rete stradale di interesse, sia a scala comunale che provinciale.

L'applicazione è basata sul GIS open source Ertha, disponibile online, arricchito da un insieme di plugin specifici per lo studio dei flussi di traffico. I plugin sfruttano tutte le risorse computazionali disponibili nella postazione di lavoro rendendo il processo simulativo molto efficiente e permettendo l'analisi di scenari multipli in breve tempo. Particolare attenzione è stata dedicata all'interattività con l'operatore, che ha un controllo esplicito e puntuale dei parametri che possono influenzare il processo simulativo. Il modello algoritmico utilizza, fra gli altri, un modulo di calibrazione centrato su tecniche lagrangiane. I risultati presentati sono incoraggianti sia dal punto di vista delle previsioni sia per quanto riguarda l'interattività con l'utente finale che riesce in modo semplice ed efficace a monitorare tutti i parametri di interesse.

Abstract

Traffic flow simulation and forecast have been subject of intense studies, which led to the design of widely available software packages. However, the area is still very active since the simulation modules at the heart of these packages require high computational loads, mainly because of the optimization algorithms they are based upon. Moreover, the solution they provide depends on a number of operational parameters, whose values heavily affect the proposed results.

Given this, we present here an application which implements an innovative simulation and optimization approach. It has been validated on a real-world case study, the road network of the province of Forlì-Cesena. We obtained simulations for the integrated vehicle and goods flows on the network of interest, both at municipality and at provincial level.

The deployed application is interfaced with the Ertha open source GIS, available online, and extends it with plugins designed for traffic flow analysis. These plugins make use of all computational resources of the running server, therefore the simulation process is highly efficient and supports the analysis of multiple scenarios in an acceptable time. Special attention was given to the interaction with the user, who has a clear control of the parameters that affect simulation results. The core algorithm implements a lagrangean-based calibration module. Computational results are satisfying both for the quality of the forecasts and for the easiness with which the operator can control all basic parameters.

Introduzione

Le pubbliche amministrazioni locali sono sempre più interessate alla pianificazione e al controllo dei processi che sono attivi nel loro territorio di competenza. Gran parte delle attività di governo, specialmente a livello locale, fanno infatti esplicito riferimento a processi inerentemente georeferenziati, cioè che fanno uso di infrastrutture dislocate nel medesimo territorio.

Le reti tecnologiche, ovvero reti stradali, reti fognarie, linee telefoniche, idriche, gasdotti, linee di distribuzione della elettricità, riserve idriche, reti di trasporto, ecc sono quelle più rilevanti tra queste infrastrutture.

Le amministrazioni locali hanno il dovere di gestire direttamente tutte queste infrastrutture o di controllare i loro gestori nel caso la loro amministrazione sia stata demandata a terze parti. La disponibilità di strumenti di modellazione che supportino sia interrogazioni sullo stato corrente delle infrastrutture sia simulazioni e ottimizzazioni con scopo previsionale diventa perciò essenziale per una gestione e un monitoraggio efficace ed efficiente. In linea con un piano a lungo termine inerente un progetto di sviluppo di tali strumenti per reti tecnologiche, abbiamo ottenuto alcuni interessanti risultati preliminari relativi alla modellazione di reti stradali.

La simulazione e la previsione dei flussi di traffico sono da tempo oggetto di studi approfonditi che hanno portato spesso alla realizzazione di pacchetti applicativi di ampia diffusione. Ciononostante, l'area di indagine è ancora molto attiva dato che i moduli simulativi integrati in questi pacchetti applicativi richiedono, anche per realtà di dimensioni medie, alte risorse computazionali, a causa di un utilizzo intensivo di tecniche avanzate di ottimizzazione.

La soluzione ottenuta dipende inoltre da un numero cospicuo di parametri operativi, i cui valori influenzano in modo determinante i risultati ottenuti, sia globalmente che localmente. Questo aspetto è di solito mascherato negli applicativi proposti sul mercato che richiedono una forte personalizzazione dei parametri da parte dell'utente, rallentando ulteriormente la velocità di elaborazione.

Alla luce di queste considerazioni, il contributo principale di questo lavoro risiede nella metodologia proposta per gestire in modo razionale ed efficiente, tramite tecniche avanzate di ottimizzazione, dati in ingresso intrinsecamente imprecisi e poco affidabili, quali quelli inerenti ai flussi veicolare e merci.

Abbiamo perseguito due obiettivi interconnessi: da un lato la simulazione e la previsione dei flussi di traffico da un altro la raffinazione delle matrici Origine-Destinazione (OD) già disponibili.

Per validare la bontà dell'approccio proposto abbiamo utilizzato dati georeferenziati a livello provinciale relativi alla rete stradale della provincia di Forlì-Cesena (regione Emilia-Romagna). La rete consta di circa 10000 archi stradali e di una zonizzazione dell'area di interesse composta da circa 60 zone ognuna della quali è rappresentata nella matrice OD sia come origine che come destinazione. La matrice OD è stata rilevata nel 1991 e poi ricalibrata nel 1999. Oltre a ciò abbiamo avuto accesso ai dati dei conteggi del rilevamento del traffico relativi a 100 postazioni di rilevamento dislocate all'interno della zona di interesse.

La Figura 1 mostra gli elementi rilevanti del territorio di nostro interesse: i punti gialli sono le postazioni di rilevamento del traffico, i punti rossi e quelli verdi indicano rispettivamente i centri

delle zone di origine e di destinazione (separati all'interno della stessa zona per motivi grafici), le linee in grassetto sono le strade principali e tutte le altre linee le strade secondarie o urbane.

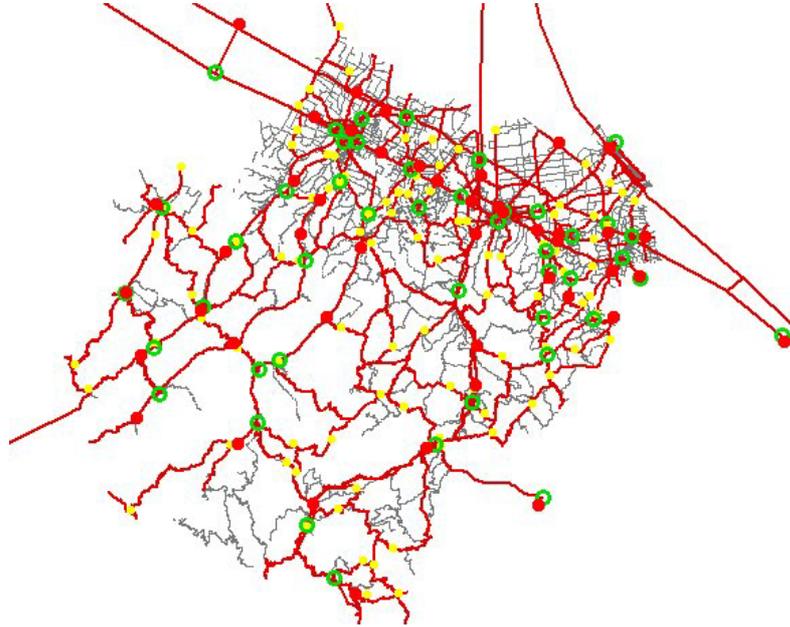


Figura 1 – La rete stradale dell'area geografica di interesse.

Formulazione matematica

Dal punto di vista matematico il problema è stato modellato come segue. La rete stradale è stata rappresentata come un grafo $G = (V, A)$, dove $V = V_s \cup V_c$ è il set dei nodi e $A = A_s \cup A_c$ il set degli archi. A_s è il subset degli archi realmente esistenti and V_s il subset dei relativi nodi terminali. V_c è il subset dei nodi virtuali (ovvero creati artificialmente), ognuno dei quali è associato o ad un'origine o ad una destinazione e A_c è il subset degli archi che connettono i nodi virtuali relativi a origine e destinazione a tutti i nodi in V_s che appartengono a quella particolare zona.

Modellizzazione del traffico

Per ogni arco $(i,j) \in A_s$ sono disponibili diversi parametri fisici come lunghezza, larghezza, capacità, pendenza, tortuosità, etc. Questi parametri sono utilizzati dall'algoritmo di assegnamento per calcolare un costo generalizzato di percorrenza dell'arco che permette in seguito di ottenere un costo minimo di assegnamento.

La soluzione finale deve specificare per ogni arco $(i,j) \in A$ una stima del flusso f_{ij} che lo attraversa. Il costo generalizzato c_{ij} è relativo al tempo necessario per attraversare l'arco, in accordo con il principio di Wardrop, ed è funzione del relativo flusso.

Per tutti gli archi del subset \bar{A} , $\bar{A} \subseteq A$ è anche disponibile un conteggio del traffico reale \bar{f}_{ij} . La matrice OD è modellizzata come un set indicizzato $\Lambda = [\ell]$ di coppie OD, ognuna delle quali ha associata una richiesta $\omega_\ell \in \Omega$. Le richieste sono quindi distribuite sul flusso ϕ_p che attraversa il percorso direzionato $p \in \Phi_\ell$ dove Φ_ℓ è l'indice del set dei percorsi per la coppia OD ℓ e $\Phi = \bigcup_{\ell \in \Lambda} \Phi_\ell$. Il risultante problema di assegnamento è il seguente:

$$(P) \quad \min \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}(f_{ij}) \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{p \in \Phi_\lambda} \varphi_p = b_\ell, \quad \ell \in \Lambda \quad (2)$$

$$f_{ij} = \sum_{p \in \Phi} \delta_{ij}^p \varphi_p \leq u_{ij}, \quad (i,j) \in A \quad (3)$$

Nella formulazione, b_ℓ rappresenta la richiesta da origine a destinazione per la coppia OD ℓ , δ_{ij}^p è una costante uguale a 1 se l'arco (i,j) appartiene al percorso p e a 0 in caso contrario, mentre u_{ij} è la capacità teorica dell'arco (i,j) . L'assegnamento deriva perciò dalla ricerca del punto di equilibrio dei flussi pertinenti a differenti coppie OD nel contesto di un modello deterministico a richiesta finita (Florian, Hearn, 1999). L'algoritmo di assegnamento è un'estensione che gestisce gli assegnamenti parziali dell'approccio all-or-nothing, basato su un codice per Min-Cost Multicommodity flow, che è infine decomposto in un sottoproblema di tipo Min-Cost flow (MC_k) per ogni origine $k \in V_c$.

Alla fine i flussi simulati potrebbero risultare differenti da quelli reali, cosa che è possibile verificare per gli archi in \bar{A} per i quali sono disponibili i conteggi del traffico. Proprio per tenere in considerazione questo fatto, è stato incluso un ulteriore modulo di *calibrazione*. Il risultato è di aggiungere al problema MC_k un ulteriore vincolo $f_{ij} - \bar{f}_{ij} = df_{ij}$ per ogni arco $(i,j) \in \bar{A}$ e un nuovo termine alla funzione obiettivo (1) che richiede di minimizzare la somma di tutti i df_{ij} . I vincoli $f_{ij} - \bar{f}_{ij} = df_{ij}$ sono quindi rilassati in modo Lagrangiano, associando una penalità λ_{ij} ad ogni arco $(i,j) \in \bar{A}$ e il corrispondente termine di penalità alla funzione obiettivo. L'assegnamento viene quindi calcolato mediante una ottimizzazione con subgradiente del problema Lagrangiano: ad ogni iterazione del subgradiente viene effettuato un assegnamento, che permette di ottenere nuovi df_{ij} e di conseguenza λ_{ij} possibilmente migliori.

Raffinamento della matrice OD

Un serio problema da affrontare in questo tipo di applicazioni è relativo alla intrinseca inaffidabilità della matrice OD. Infatti, la matrice è ottenuta di solito tramite interviste e/o deduzioni statistiche da dati geografici ed economici risultando così necessariamente approssimata. Inoltre, visto il costo delle campagne di acquisizione dei dati, spesso la matrice OD è anche obsoleta. Quest'ultima considerazione motiva sostanzialmente la ricerca di tecniche per l'aggiornamento delle matrici OD, tra cui ricordiamo diversi metodi basati sui conteggi del traffico sugli archi stradali (dati che hanno costo di produzione relativamente contenuto).

A tal proposito, abbiamo preso in considerazione ed esteso uno di questi metodi (Abrahamsson, 1998). Il problema della stima di una nuova matrice OD è stato modellizzato come un problema di ottimizzazione quadratico con vincoli. I dati di input sono: *i*) i flussi φ_p in ogni percorso $p \in \Phi$, *ii*) la vecchia matrice OD, *iii*) $\bar{\Omega} = [\bar{\omega}_\lambda]$, *iv*) il set $\bar{F} = \{\bar{f}_{ij}\}$ dei flussi campionati per ogni arco in \bar{A} , *v*) un limite inferiore L_ℓ e *vi*) un limite superiore U_ℓ per ogni coppia $\ell \in \Lambda$ in OD. Dato Φ_ℓ , ovvero l'indice del set contenente tutti i percorsi per la coppia OD ℓ così come calcolato dall'algoritmo di assegnamento, è possibile calcolare la percentuale ξ_{ij}^λ di utilizzo di ogni arco (i,j) per ogni coppia ℓ come di seguito

$$\xi_{ij}^\lambda = \frac{\sum_{p \in \Phi_\lambda} \delta_{ij}^p \varphi_p}{\sum_{p \in \Phi_\lambda} \varphi_p} \quad (4)$$

La nuova matrice OD è quindi calcolata gestendo il trade-off tra l'obiettivo di minimizzare lo scarto quadratico da $\bar{\Omega}$ e quello di minimizzare la differenza tra il flusso f_{ij} indotto da (4) in ogni arco in

\bar{A} e il flusso campionato (tramite i conteggi del traffico) \bar{f}_{ij} , mantenendo i vincoli L_ℓ and U_ℓ . La formulazione è la seguente:

$$(ODP) \quad \min \sum_{\lambda \in \Lambda} (\omega_\lambda - \bar{\omega}_\lambda)^2 + \gamma \sum_{(i,j) \in A} \left(\sum_{\lambda \in \Lambda} \omega_\lambda s_{ij}^\lambda - \bar{f}_{ij} \right)^2 \quad (5)$$

$$s.t. \quad L_\ell \leq \omega_\ell \leq U_\ell, \quad \ell \in \Lambda \quad (6)$$

dove γ è un parametro definito dall'utente che favorisce il risultato ad essere una matrice OD strutturalmente simile alla vecchia matrice \overline{OD} ma con i flussi derivanti differenti da quelli campionati o viceversa.

Gestione utente dei parametri

L'applicazione diretta dei risultati sopra descritti porta allo sviluppo di un pacchetto software le cui potenzialità sono allineate con quelle dei migliori concorrenti sul mercato. Il problema dell'interazione con l'utente resterebbe però un problema da risolvere. Infatti, i parametri fisici delle reti stradali utilizzati per l'assegnamento del traffico sono insufficienti per predire accuratamente le scelte dei guidatori. Questa è una constatazione ben nota, che ha portato allo sviluppo dei modelli di assegnamento stocastico, che però non sono applicabili nel nostro caso dato che veniva richiesto nelle specifiche un comportamento deterministico.

Per gestire il caso in cui i flussi effettivi seguono cammini non giustificati dal modello, abbiamo esteso quest'ultimo associando ad ogni arco $(i,j) \in A$ un peso, w_{ij} . Si noti che le penalità lagrangiane λ_{ij} , $(i,j) \in \bar{A}$, utilizzate per convergere verso i valori forniti dai counter laddove questi sono disponibili, sono in realtà penalità associate agli archi. Esse influenzano l'assegnamento, facendo sì che gli archi associati abbiano un flusso previsto compatibile con quello conteggiato (anche se non necessariamente identico). La stessa idea può essere generalizzata assumendo che l'utente, cioè il pianificatore del servizio, abbia un modello mentale della distribuzione corretta dei flussi che gli / le permetta di richiedere una variazione della distribuzione correntemente prevista, in modo analogo a quanto fanno i counter. La principale differenza è che l'utente non è abilitato a forzare un valore preciso di flusso, ma solo ad aumentare l'attrattività o la repulsività di un arco, lasciando al sistema il compito di ridefinire in accordo la distribuzione globale.

Tutti i pesi w_{ij} , $(i,j) \in A$, sono inizialmente impostati allo stesso valore, ma quelli degli archi in \bar{A} possono essere modificati manualmente dall'utente per variare il flusso sull'arco associato. Questi pesi possono poi essere combinati con le penalità lagrangiane, permettendo all'utente di controllare indirettamente la procedura di assegnamento grazie ad inclusione implicita nei costi generalizzati dell'arco di elementi che non sono associati alle caratteristiche fisiche scelte in input.

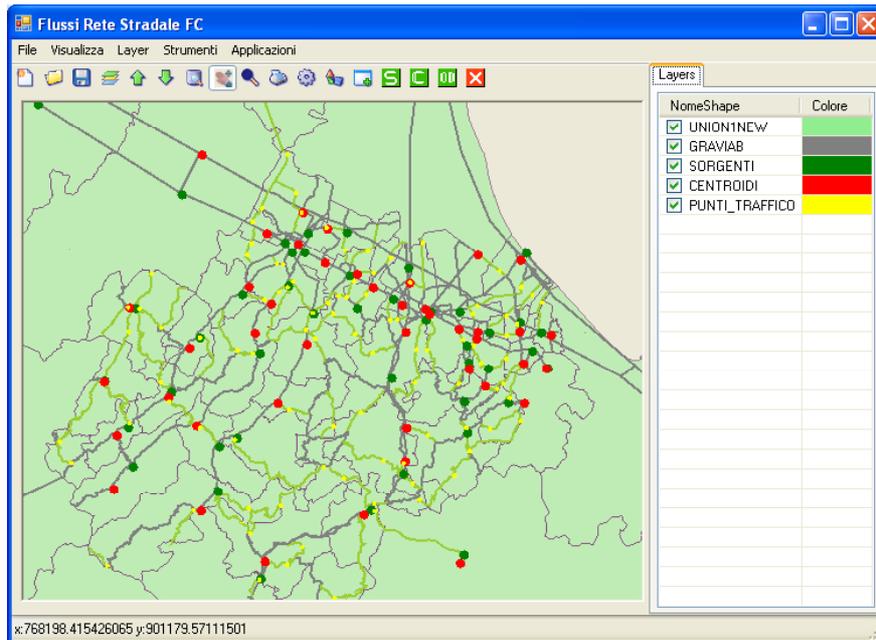


Figura 2 – L'interfaccia principale dell'applicativo open source Ertha con plugin traffico.

Caso di studio

I risultati ottenuti utilizzando il plugin di simulazione e previsione flussi di traffico, inserito nel pacchetto applicativo open source Ertha (Ertha project, 2007), che implementa il modello descritto sono stati validati sulla rete della nostra provincia. Abbiamo implementato tutto in C# e C++, usando l'algoritmo di ottimizzazione non lineare di Levenberg-Marquardt per risolvere il problema ODP (Lourakis, 2007). Abbiamo poi interfacciato il codice con il GIS della provincia di Forlì-Cesena, accedendo direttamente agli shapefile dei dati e ottenendo quindi un'integrazione completa e una completa interoperabilità con l'ArcGis della provincia.

La prima applicazione riguardava la definizione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), dove abbiamo previsto i flussi di traffico a seguito degli scenari di intervento infrastrutturale inclusi nel piano per i prossimi 20 anni. Abbiamo calibrato l'assegnamento sui dati del 2003 e quindi previsto i flussi degli anni 2010, 2015, 2020 e 2025. I risultati sono stati utilizzati per la definizione degli indicatori: valutazione delle emissioni nell'atmosfera, valutazione della congestione del sistema infrastrutturale viario e tempi di viaggio.

Le stime dell'impatto ambientale degli schemi di mobilità previsti, e dell'efficacia in termini di accessibilità del territorio derivante dalla quantificazione degli indicatori, hanno avuto un ruolo centrale nella valutazione dell'accessibilità ambientale e territoriale degli insediamenti e nelle scelte infrastrutturali del piano provinciale. Questo rappresenta un riferimento essenziale per la valutazione delle scelte contenute nel piano strutturale dei comuni controllati. Più specificamente, la previsione di mobilità sottolinea l'esigenza di complementare il sistema infrastrutturale con nuove, più articolate politiche modali (centri logistici, incentivazione all'uso del trasporto pubblico, ecc.), dato che le infrastrutture previste, da sole, non saranno in grado di affrontare efficientemente la richiesta crescente di mobilità nel territorio.

Riferimenti bibliografici

- Abrahamsson T., (1998) "Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey", *Interim Report ir-98-021*, International Institute for Applied Systems Analysis
- Ertha project, (2007), <http://astarte.csr.unibo.it/ertha/>, <https://sourceforge.net/projects/ertha>
- Florian M., Hearn D. (1999), "Network Equilibrium and Pricing", *Handbook of Transportation Science*, Hall R.W. (ed), Kluwer Academic Publishers, 361-393
- Lourakis M.I.A., (2007), "Levmar: Levenberg-Marquardt non-linear least squares algorithms in C/C++", <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/levmar/>