



Borsa di studio attivata ai sensi di quanto disposto dal D.M. n. 1061 del 10/08/2021

Titolo del progetto: Sviluppo e calibrazione di un modello innovativo di simulazione del traffico veicolare e di minimizzazione dei consumi energetici e delle emissioni nocive

La borsa sarà attivata sul seguente corso di dottorato accreditato per il XXXVII ciclo:

INFRASTRUTTURE E TRASPORTI

Responsabile scientifico: Gaetano Fusco

Area per la quale si presenta la richiesta: GREEN

Numero di mensilità da svolgere in azienda: 6

Numero di mensilità da svolgere all'estero: 6 presso Université du Luxembourg

Azienda: Almaviva spa

Il Dipartimento è disponibile a cofinanziare per un importo pari a euro: 10000

Dipartimento finanziatore: DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE con delibera del 22.09.2021

Progetto di ricerca:

Abstract

Il progetto mira a sviluppare e implementare una metodologia generale per la calibrazione aggregata dei modelli di rete di trasporto, che sfrutti diverse fonti di dati ed è adatta a trattare dati individuali raccolti in mobilità, come Floating Car Data, congiuntamente ad altre fonti di dati all'interno di un multi- procedura di ottimizzazione del passo basata su algoritmi metaeuristici. L'applicazione della metodologia sarà testata in un caso studio riguardante l'aggiornamento del Modello di Traffico di Roma con nuovi dati raccolti in mobilità. I campi di applicazione della metodologia proposta per la calibrazione dei modelli di rete di trasporto aggregata saranno ampi e copriranno diverse tipologie di modelli, indipendentemente dalla loro specifica formulazione ed estensione. Il crowdsourcing dei dati individuali raccolti in mobilità è oggi una fonte di dati adeguata per l'aggiornamento dei modelli dei sistemi di trasporto e sarà ancora più ampiamente disponibile in futuro. Questi progressi tecnologici aprono prospettive ancora più ampie per l'applicazione della calibrazione aggregata basata sul crowdsourcing dei dati sulla mobilità.

Obiettivi del progetto

La calibrazione del modello è il processo di stima dei valori dei coefficienti del modello per ottenere la migliore corrispondenza tra i valori osservati e simulati delle variabili.

Il progetto mira a fornire una metodologia generale per la calibrazione dei modelli di rete di trasporto.

La calibrazione di un modello di rete è un compito non banale. È probabilmente il più grande ostacolo oltre alla trattabilità computazionale per l'applicazione di modelli di traffico nelle reti su larga scala. Richiede non solo una pletora di dati nel tempo, ma anche metodologie in grado di combinare efficacemente i dati in modo coerente, poiché i dati provengono spesso da varie fonti e talvolta potrebbero essere incoerenti o imperfetti (Ben-Akiva et al., 2012).

Stato dell'arte

L'ampia diffusione delle applicazioni dei sistemi di trasporto intelligenti ha reso disponibili nuove fonti di informazioni sulla mobilità delle persone e una quantità senza precedenti di dati sulle prestazioni dei sistemi di trasporto, che ha fornito nuove opportunità per metodi di calibrazione avanzati (Ben-Akiva et al., 2012; Fusco et al. , 2013; Qin & Mahmassani, 2004). Per motivi di privacy, questi dati non contengono informazioni personali sugli attributi degli utenti,

per cui una calibrazione disaggregata dei modelli comportamentali non è fattibile e può essere applicata una calibrazione aggregata. In letteratura, la maggior parte delle applicazioni si basa su metodi metaeuristici come algoritmi genetici (Ma et al., 2007; Leal et al., 2020), ottimizzazione dello sciame di particelle (Poole & Kotsialos, 2016; Tavassoli, 2020) e SPSS (Ben-Akiva et al., 2012; Antoniou et al., 2015) per cercare i valori dei coefficienti del modello che meglio si adattano ai conteggi del traffico o del flusso di passeggeri. Diversi studi (Hou et al., 2010; Vaze et al., 2009; Zheng & Van Zuylen, 2014) hanno esteso questo approccio per utilizzare più fonti di dati (compresi i conteggi dei collegamenti e i tempi di viaggio da punto a punto) per la calibrazione.

I Floating Car Data forniscono informazioni su ogni singolo viaggio e su posizioni e velocità dei veicoli connessi (Fusco et al., 2017) che possono essere efficacemente combinate con i conteggi del traffico e le velocità rilevate dai sensori stradali per migliorare il livello di conoscenza del sistema di trasporto in modo significativo. In letteratura, queste fonti di informazione provenienti dal tracciamento dei viaggiatori in mobilità sono spesso utilizzate per una stima diretta delle matrici di viaggio OD (Cipriani et al., 2014; Rahmani et al., 2017; Carrese et al., 2017; Nigro et al., al., 2018; Carrese et al., 2019; Cantelmo & Viti, 2020) o per calibrare i coefficienti di modelli di microsimulazione (Osorio & Punzo, 2019, tra gli altri). Il crowdsourcing dei dati sulla mobilità può fornire ampie opportunità per migliorare anche i metodi per la calibrazione del modello di trasporto. D'altro canto, l'uso di dati individuali raccolti tramite sensori di sonda introduce nuove problematiche legate allo sforzo computazionale ingombrante (Mudigonda & Ozbay, 2015) e alla necessità di includere la rappresentatività statistica dei dati nella funzione goodness-of-fit. Se il modello è costituito da una funzione o da un sistema di funzioni indipendenti, per risolvere il problema di calibrazione possono essere applicati gli usuali algoritmi di ottimizzazione come il gradiente proiettato a seconda delle proprietà matematiche della funzione. Tuttavia, modelli più complessi richiedono un insieme di procedure di aggiustamento per tentativi ed errori che possono essere parzialmente formalizzati come un problema di ottimizzazione (Park e Schneeberger, 2003), in modo che la loro calibrazione sia un processo caratterizzato da significative componenti euristiche. Quest'ultimo è il caso dei modelli di rete di trasporto, che implicano o la soluzione di un modello a punto fisso o la simulazione esplicita delle reti di trasporto. Nelle applicazioni pratiche di ingegneria, le linee guida richiedono che la calibrazione delle reti di trasporto sia conforme a una serie di procedure per garantire che i risultati siano coerenti sia con i dati osservati che con le caratteristiche fisiche e logiche del sistema (UK Department for Transport, 2020a; Dowling et al., 2004).

Metodologia

La calibrazione dei modelli della rete di alimentazione richiede il calcolo del flusso di velocità sui collegamenti di rete e i calcoli del ritardo alle giunzioni per funzionare come previsto. I controlli includeranno confronti di flussi e variabili di prestazioni del traffico in luoghi in cui sono disponibili osservazioni adeguate. Si valutano anche azioni correttive per eventuali adeguamenti di capacità o per rivedere la posizione di connettori baricentrici vicini.

La calibrazione del modello di rete stradale è composta dalle seguenti attività:

- Stima dei parametri di base (velocità libera, portata) e dei coefficienti delle Funzioni Volume-Ritardo per i collegamenti stradali. Questo compito sarà svolto utilizzando i dati di velocità e conteggio raccolti dai rilevatori di traffico;
- Stima delle funzioni di ritardo del volume dei nodi, che dipendono dai modelli di flusso di arrivo e dai ritardi alle intersezioni, che sono raramente disponibili e possono dipendere da altre intersezioni, in caso di spillback della coda. Questa attività sfrutterà i dati sui tempi di percorrenza del viaggio e sul volume del nodo;
- Confronto statistico tra i volumi di traffico di collegamento simulato ottenuti dal modello e i conteggi di traffico osservati su una prima serie di collegamenti e ulteriore adeguamento del modello di rete stradale.

La metodologia standard per la calibrazione delle funzioni di ritardo del volume del collegamento è relativamente semplice perché i tempi di percorrenza del collegamento sono funzioni separabili dei volumi del collegamento. Quindi, i normali metodi di stima come la minimizzazione del quadrato dell'errore possono essere applicati a due variabili per ogni collegamento. La disponibilità di FCD consente tuttavia di applicare una metodologia innovativa, che consente di ottenere informazioni aggiuntive quali tempi di percorrenza del percorso, velocità di collegamento, lunghezza delle code ai segnali.

La metodologia utilizzata per la calibrazione delle Funzioni Node Volume-Delay (VDF) è necessariamente diversa da quella applicata alle Link Volume-Delay Functions. In quest'ultimo caso sono disponibili coppie di osservazioni di ingressi (volumi) e uscite (velocità, cioè tempo di percorrenza); nel caso del Nodo VDF, vengono osservati direttamente solo i valori di input (conteggi dei movimenti di rotazione). D'altra parte, i dati disponibili dalle rilevazioni sui tempi di viaggio possono essere utilizzati per calcolare i valori di ritardo totale ai nodi appartenenti alle rotte. Pertanto, la calibrazione dei nodi VDF è stata eseguita in una procedura in due fasi.

La metodologia di calibrazione riguarda sia le funzioni di ritardo di collegamento che di nodo. L'obiettivo è calibrare un modello dettagliato di offerta della rete stradale in cui i nodi della rete stradale sono rappresentati con elevata granularità in termini di tipo di controllo (resa, fermate, segnale) e numero di movimenti di svolta e tipo di movimenti di svolta, come illustrato in il lato superiore destro della figura. Questa rappresentazione dettagliata della rete stradale comporta che i tempi di percorrenza dei veicoli sulla rete stradale dipendano non solo dalla funzione di costo del collegamento ma anche dalla funzione di costo del nodo. La figura evidenzia gli elementi principali del processo di calibrazione, che dipende da:

- la codifica della rete stradale per collegamenti e nodi;
- i dati disponibili per calibrare le funzioni di costo del collegamento e del nodo, costituiti da conteggi automatici del traffico, costi di movimento di svolta agli svincoli e rilevazioni dei tempi di viaggio su un insieme definito di percorsi.

Il problema della calibrazione sarà formulato come il problema della minimizzazione di una funzione di errore. La calibrazione di un modello di sistema di trasporto è un noto problema non convesso, le cui dimensioni e proprietà matematiche dipendono dal sottoproblema specifico. Gli algoritmi di ottimizzazione metaeuristica sono visti come un metodo di soluzione adatto per questo tipo di problema. Forniscono una procedura generale che può essere applicata a diversi problemi senza richiedere di modificare la formulazione matematica dei loro passaggi come richiesto, ad esempio, se si utilizza un algoritmo di proiezione del gradiente.

References

- Antoniou, C., Azevedo, C. L., Lu, L., Pereira, F., & Ben-Akiva, M. (2015). W-SPSA in practice: Approximation of weight matrices and calibration of traffic simulation models. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 59, 129-146.
- Antoniou, C., Balakrishna, R., Koutsopoulos, H. N., & Ben-Akiva (2009), M. Off-line and on-line calibration of dynamic traffic assignment systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(15), 104-111.
- Ben-Akiva, M., S. Gao, Z. Wei, & Y. Wen (2012). A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. *Transportation Research Part C*. 24, 62–82.
- Cantelmo, G., & Viti, F. (2020). A Big Data Demand Estimation Model for Urban Congested Networks. *Transport and Telecommunication Journal*, 21(4), 245-254.
- Carrese, F., Cantelmo, G., Fusco, G., & Viti, F. (2019). Leveraging GIS Data and Topological Information to Infer Trip Chaining Behaviour at Macroscopic Level. In 2019 6th International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, pp. 1-10.
- Carrese, S., Cipriani, E., Mannini, L., & Nigro, M. (2017). Dynamic demand estimation and prediction for traffic urban networks adopting new data sources. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 81, 83-98.
- Cascetta, E. (2009). *Transportation systems analysis: models and applications* (Vol. 29). Springer Science & Business Media.
- Cascetta, E., & Russo, F. (1997). Calibrating aggregate travel demand models with traffic counts: Estimators and statistical performance. *Transportation*, 24(3), 271-293.
- Cipriani, E., Nigro, M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2014). Effectiveness of link and path information on simultaneous adjustment of dynamic O.D. demand matrix. *European Transport Research Review*, 6(2), 139-148.
- Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic analysis toolbox, volume III: Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software* (No. FHWA-HRT-04-040). United States. Federal Highway Administration. Office of Operations.

- Fusco, G., Colombaroni, C., Gemma, A., & Lo Sardo, S. (2013). A quasi-dynamic traffic assignment model for large congested urban road networks. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 7(4), 341-349.
- Fusco, G., Colombaroni, C., Gemma, A., & Sardo, S. L. (2013). A quasi-dynamic traffic assignment model for large congested urban road networks. *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 7(4), 341-349.
- Hou, T., Mahmassani, H. S., Alfelori, R. M., Kim, J., & Saberi, M. (2013). Calibration of traffic flow models under adverse weather and application in mesoscopic network simulation. *Transportation Research Record*, 2391(1), 92-104.
- Isaenko, N., Colombaroni, C., & Fusco, G. (2017). Traffic dynamics estimation by using raw floating car data. In 2017 5th IEEE International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS), 704-709.
- Leal, S. S., de Almeida, P. E. M., & Ribeiro, R. G. (2020). Calibrating Traffic Microscopic Simulation Model Parameters Using an Evolutionary Approach. *Transportation Research Procedia*, 48, 1038-1045.
- Ma, J.T., Dong H., & Zhang H.M. (2007). Calibration of microsimulation with heuristic optimization methods, *Transp. Res. Rec.*, 1999, 208-217.
- Mudigonda, S., & Ozbay, K. (2015). Robust calibration of macroscopic traffic simulation models using stochastic collocation. *Transportation Research Procedia*, 9, 1-20.
- Nigro, M., Abdelfatah, A., Cipriani, E., Colombaroni, C., Fusco, G., & Gemma, A. (2018). Dynamic O.D. Demand Estimation: Application of SPSS AD-PI Method in Conjunction with Different Assignment Strategies. *Journal of Advanced Transportation*, 2018.
- Osorio, C., & Punzo, V. (2019). Efficient calibration of microscopic car-following models for large-scale stochastic network simulators. *Transportation Research Part B: Methodological*, 119, 156-173.
- Park, B., & Qi, H. (2005). Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. *Transportation Research Record*, 1934(1), 208-217.
- Poole, A., & Kotsialos, A. (2016). Swarm intelligence algorithms for macroscopic traffic flow model validation with automatic assignment of fundamental diagrams. *Applied Soft Computing*, 38, 134-150.
- Qin, X., & Mahmassani, H. S. (2004). Adaptive calibration of dynamic speed-density relations for online network traffic estimation and prediction applications. *Transportation research record*, 1876(1), 82-89.
- Rahmani, M., Koutsopoulos, H. N., & Jenelius, E. (2017). Travel time estimation from sparse floating car data with consistent path inference: A fixed point approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 85, 628-643.
- Tavassoli, A., Mesbah, M., & Hickman, M. (2020). Calibrating a transit assignment model using smart card data in a large-scale multi-modal transit network. *Transportation*, 47(5), 2133-2156.
- U.K. Department for Transport (2020a), TAG UNIT M3.1: Highway Assignment Modelling. Online available: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/427124/webtag-tag-unit-m3-1-highway-assignment-modelling.pdf. Accessed: October 2020.
- U.K. Department for Transport (2020b), TAG UNIT M2.1: Variable Demand Modelling. Online available: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/934979/tag-m2-1-variable-demand-modelling.pdf. Accessed: November 2020.
- Vaze, V., Antoniou, C., Wen, Y. & Ben-Akiva, M. (2009). Calibration of dynamic traffic assignment models with point-to-point traffic surveillance, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2090, 1-9.
- Zheng, F., & Van Zuylen, H. (2014). The development and calibration of a model for urban travel time distributions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 18(1), 81-94.

Titolo del progetto (inglese): Development and calibration of an innovative traffic simulation model finalized to the minimization of energy consumption and harmful emissions

Progetto di ricerca (inglese):

The project aims to develop and implement a general methodology for the aggregate calibration of transport network models, which exploits different data sources and is suitable to deal with individual data collected in mobility, like Floating Car Data, jointly with other data sources within a multi-step optimization procedure based on metaheuristic algorithms. The application of the methodology will be tested in a case study concerning the update of the Traffic Model of Rome with new data collected in mobility. The application fields of the proposed methodology for aggregate transport network models calibration will be broad and will cover different types of models, independently of their specific formulation and extent. The crowdsourcing of individual data collected in mobility is today a suitable source of data for updating transport system models and will be even more widely available in the future. These technological advances open even broader perspectives for the application of aggregate calibration based on crowdsourcing of mobility data.

Objectives of the Project

Model calibration is the process of estimating the values of model coefficients to obtain the best correspondence between observed and simulated values of the variables.

The project aims to provide a general methodology for the calibration of transport network models.

The calibration of a network model is a non-trivial task. It is arguably the biggest obstacle besides the computational tractability for applying traffic models in large-scale networks. It requires not only a plethora of data over time, but also methodologies that could effectively combine the data in a coherent way, as the data would often come from various sources and could be sometimes inconsistent or imperfect (Ben-Akiva et al., 2012).

State of the art

The wide diffusion of Intelligent Transportation Systems applications has made available new sources of information on people's mobility and an unprecedented amount of data on transport system performances, which provided new opportunities for enhanced calibration methods (Ben-Akiva et al., 2012; Fusco et al., 2013; Qin & Mahmassani, 2004). For privacy reasons, these data do not contain personal information on the users' attributes, so that a disaggregate calibration of behavioral models is unfeasible, and an aggregate calibration can be applied. In the literature, most applications are based on metaheuristic methods like genetic algorithms (Ma et al., 2007; Leal et al., 2020), particle swarm optimization (Poole & Kotsialos, 2016; Tavassoli, 2020), and SPSA (Ben-Akiva et al., 2012; Antoniou et al., 2015) to search for the values of model coefficients that best fit traffic or passenger flow counts. Several studies (Hou et al., 2010; Vaze et al., 2009; Zheng & Van Zuylen, 2014) extended this approach to use multiple data sources (including link counts and point-to-point travel times) for the calibration.

Floating Car Data provide information on every single trip and on positions and speeds of the connected vehicles (Fusco et al., 2017) that can be effectively combined with traffic counts and speeds collected by roadside sensors to improve the level of knowledge of the transport system significantly. In the literature, these sources of information coming from tracking travelers in mobility are often used for a direct estimate of the O-D trip matrices (Cipriani et al., 2014; Rahmani et al., 2017; Carrese et al., 2017; Nigro et al., 2018; Carrese et al., 2019; Cantelmo & Viti, 2020) or to calibrate the coefficients of microsimulation models (Osorio & Punzo, 2019, among others). Crowdsourcing of mobility data can provide ample opportunities to enhance also the methods for transport model calibration. On the other hand, the use of individual data collected through probe sensors introduces new issues related to the cumbersome computation effort (Mudigonda & Ozbay, 2015) and the need for including the statistical representativeness of the data into the goodness-of-fit function.

If the model consists of one function or a system of independent functions, usual optimization algorithms such as projected gradient depending on the mathematical properties of the function, can be applied to solve the calibration problem. However, more complex models require a set of adjustment trial-and-error procedures that can be partially formalized as an optimization problem (Park and Schneeberger, 2003), so that their calibration is a process characterized by significant heuristic components. The latter is the case of transport network models, which imply either the solution of a fixed-point model or the explicit simulation of the transport networks. In practical engineering

applications, guidelines require the calibration of transport networks to comply with a set of procedures to ensure the results are consistent with both observed data and the physical and logical characteristics of the system (U.K. Department for Transport, 2020a; Dowling et al., 2004).

Methodology

Calibration of the supply network models needs speed-flow calculation on network links and the delay calculations at junctions to be operating as expected. Checks will include comparisons of flows and traffic performance variables at locations where suitable observations are available. Remedial actions are also considered for the possible adjustments of capacity or reviewing the position of nearby centroid connectors.

Calibration of the Road network model is composed of the following tasks:

- Estimation of the basic parameters (free speed, capacity) and the coefficients of the Volume-Delay Functions for road links. This task will be carried out by using the speed and count data collected by traffic detectors;
- Estimation of Node Volume-Delay Functions, which depend on the arrival flow patterns and delays at intersections, which are rarely available and may depend on other intersections, if queue spillback. This task will exploit the data on journey travel times and node volume;
- Statistical comparison between the simulated link traffic volumes obtained by the model and observed traffic counts on a first set of links and further adjustment of road network model.

The standard methodology for the calibration of Link Volume-Delay Functions is relatively simple because link travel times are separable functions of link volumes. So, usual estimation methods such as error square minimization can be applied to two variables for every link. Availability of FCD allow however to apply an innovative methodology, which make it possible to obtain additional information such as route travel times, link speeds, queue lengths at signals.

The methodology used for the calibration of Node Volume-Delay Functions (VDF) is necessarily different from that applied to Link Volume-Delay Functions. In the latter case, pairs of observations of inputs (volumes) and outputs (speed, that is travel time) are available; in the case of Node VDF, only input values (turn movement counts) are directly observed. On the other hand, data available from travel time surveys can be used in order to compute the values of total delay at the nodes belonging to the routes. Thus, the calibration of Node VDFs was carried out in a two-step procedure.

The calibration methodology concerns both link and node delay functions. The objective is to calibrate a detailed road network supply model in which the nodes of the road network are represented with high granularity in terms of control type (yield, stops, signal) and numbers of turn movements and type of turn movements, as depicted in the upper right side of the Figure. This detailed representation of the road network entails that the vehicle travel times on the road network depend not only on the link cost function but also on the node cost function. The figure highlights the main elements of the calibration process, which depends on:

- the road network coding for links and nodes;
- the data available to calibrate the link and node cost functions, consisting of automatic traffic counts, turn movement costs at junctions, and travel time surveys on a defined set of routes.

The calibration problem will be formulated as the problem of minimizing an error function. The calibration of a transport system model is a well-known non-convex problem, whose size and mathematical properties depend on the specific sub-problem. Metaheuristic optimization algorithms are seen as suitable a solution method for this kind of problem. They provide a general procedure that can be applied to different problems without requiring to changing the mathematical formulation of their steps as it is required, for example, if using a gradient projection algorithm.