

Un moderno approccio sull'analisi geometrico-funzionale delle rotatorie: strumenti in grado di stimare le prestazioni in modo corretto e completo, sia per una valutazione ex-post della progettazione sia per una base dati di supporto alla definizione di linee guida per la progettazione dei nuovi interventi

RICOSTRUZIONE DELLE TRAIETTORIE VEICOLARI NELLE INTERSEZIONI A ROTATORIA CON TECNICHE DI ANALISI DELLE IMMAGINI

Lorenzo Mussone*
Matteo Matteucci**
Andrea Bonarini***
Marco Bassani****

In Italia, la progettazione delle intersezioni a rotatoria si è sviluppata essenzialmente su soluzioni basate sulla sensibilità del singolo Progettista il quale, dovendo spesso inserire l'intersezione in un contesto territoriale e urbano già definito, ha altrettanto spesso derogato ai criteri indicati dalle Norme Tecniche vigenti (cogenti e non) e dalle indicazioni proposte nella letteratura tecnico-scientifica nazionale e internazionale. Ciò, unitamente alla complessità degli aspetti che si concentrano nelle rotatorie - non sempre perfettamente analizzati e compresi - ha comportato prestazioni non sempre soddisfacenti, anzi in taluni casi peggiori di quelle precedenti la loro entrata in esercizio.

Questa situazione determina oggi la necessità di affrontare l'analisi e la progettazione delle rotatorie secondo nuovi approcci e con strumenti in grado di stimarne in modo corretto e completo le prestazioni, sia per una valutazione ex-post della progettazione sia per la formazione di una base dati di supporto alla definizione di linee guida per la progettazione dei nuovi interventi.

Il presente lavoro illustra l'attività svolta da un gruppo di ricercatori del Politecnico di Milano e del Politecnico di Torino volta a creare una serie di strumenti e metodologie di analisi centrati in particolare sulla valutazione delle intersezioni a rotatoria, ma più in generale applicabili anche ad altri contesti stradali di maggiore o minore complessità. Il software di elaborazioni di immagini che viene qui presentato è stato sviluppato al fine di derivare in automatico le matrici Ingresso/Uscita (I/U) dei flussi in rotatoria, e per ricostruire le traiettorie dei veicoli e derivare le grandezze cinematiche ad esse associate. Questi due moduli consentono di avere un quadro dettagliato delle condizioni operative a cui le rotatorie sono sottoposte, e restituiscono le grandezze attraverso le quali è possibile individuare eventuali difetti di carattere geometrico. I due programmi messi a punto nell'ambito della ricerca si adattano



Figura 1

tano facilmente a qualsiasi tipo di rotatoria (per dimensione e numero di bracci) e richiedono solo un adeguato rilievo delle immagini.

Il frequente ricorso alla circolazione rotatoria per la soluzione delle intersezioni a raso e a livelli sfalsati, con esiti non sempre adeguati alle aspettative unitamente a una Norma tecnica carente di indicazioni tecniche, mantiene attivo il dibattito scientifico e professionale sul tema della organizzazione geometrica e funzionale delle intersezioni stradali. Gli Enti Pubblici ricorrono alla soluzione rotatoria per la possibilità da un lato di ridurre la superficie effettiva di manovra per i veicoli (rispetto alle intersezioni a livelli sfalsati), dall'altro di aumentare quella destinabile alle sistemazioni ambientali (isole divisionali, isola centrale, margini esterni), oltre che per la possibilità di escludere alcuni costi di esercizio di tipo tecnologico come, per esempio, quelli connessi alla realizzazione e alla gestione di un impianto semaforico. Inoltre, la riduzione delle velocità operative sui rami di accesso e all'interno dell'anello circolatorio costituisce un altro aspetto a favore di questa tipologia di intersezione. Infatti, alla riduzione delle velocità è normalmente associata anche la riduzione dell'incidentalità e della gravità media degli incidenti, almeno per quanto riguarda il flusso veicolare leggero. Le caratteristiche geometriche delle rotatorie esistenti sono molto diversificate e dipendono, più che dalla non esaustiva Normativa techni-



ca vigente, dalla sensibilità e dalla esperienza del Progettista che deve soddisfare, spesso senza la possibilità di verifiche analitiche ex-post, le esigenze di capacità, qualità del servizio, sicurezza e inserimento paesaggistico-ambientale.



Figure 2A, 2B, 2C e 2D - Alcuni esempi di intersezione a circolazione rotatoria nella città di Novara: la rotatoria Panathlon (A), la rotatoria Vercelli (B), la rotatoria di Via Valsesia (C), la rotatoria Vittoria (D)

Le quattro rotatorie riportate in Figure 2A, 2B, 2C e 2D costituiscono un esempio di come la tipologia di intersezione in esame costituisca uno schema versatile che ben si adatta a contesti anche complessi. Le intersezioni a circolazione rotatoria in questione si collocano nella corona periurbana della città di Novara dove nel recente passato l'Amministrazione Comunale ne ha realizzate circa 34 nel periodo compreso tra Giugno 1995 e Settembre 2008. Le immagini ben evidenziano le difficoltà che si sono dovute affrontare per il coordinamento degli elementi geometrici fondamentali quali gli assi di tracciamento e i cigli delle corsie, e per l'organizzazione degli attraversamenti pedonali, degli accessi privati e delle aree di sosta, in un contesto ricco di vincoli territoriali derivanti dalla presenza di edifici e, come nel caso della rotatoria Vittoria, anche di corsi d'acqua.

Sempre con riferimento ad esse, è anche evidente il maggior consumo di superficie conseguente all'adozione dello schema rotatorio. Il maggior ingombro di questo schema rispetto ai tradizionali schemi lineari viene generalmente accettato per la formazione di aree intercluse destinabili alle sistemazioni a verde che mitigano in parte gli impatti percepiti sulle aree circostanti.

Per quel che riguarda la sicurezza, le quattro rotatorie presentano dati alquanto contrastanti tra loro. Se nelle rotatorie Panathlon e Valsesia rispetto alla sistemazione precedente (intersezione lineare a incrocio) il numero medio di incidenti all'anno è diminuito di circa l'80%, nel caso delle rotatorie Vercelli e Vittoria il dato incidentale è invece cresciuto di circa il 10%.

Dati così notevolmente in contrasto tra loro vengono confermati nella letteratura internazionale. L'Insurance Institute for Highway Safety (Retting et al., 2001), ha osservato un campione rappresentativo di rotatorie realizzate negli Stati Uniti. I casi analizzati considerano la rotatoria come la soluzione adottata in sostituzione di precedenti intersezioni semaforizzate o regolate dal diritto di precedenza. I risultati indicano una riduzione generale del 39% del numero di incidenti, con una diminuzione del 76% di quelli con morti e feriti. Anche Persaud et al. (2001) osservano riduzioni del numero complessivo di incidenti sino anche al 72% e con una riduzione del numero di incidenti con feriti e/o morti fino anche all'88%.

Le osservazioni eseguite, tuttavia, evidenziano la presenza di rotatorie che non soddisfano i requisiti di sicurezza ricercati con la loro introduzione, soprattutto quando l'assetto geometrico adottato, molto spesso condizionato dai vincoli presenti sul suo contorno, non produce un efficace controllo della traiettoria e della relativa velocità. Ciò è confermato dagli studi sperimentali eseguiti nell'ambito del programma di ricerca per la messa a punto dell'Highway Safety Manual. Sebbene i valori del Crash Modification Factor conseguenti alla trasformazione da intersezione semaforizzata o regolata con diritto di precedenza a intersezione a rotatoria, siano tutti inferiori all'unità (e quindi positivi in termini di sicurezza), per alcune tipologie di rotatoria il corrispondente valore medio del coefficiente associato all'errore standard mette in luce l'esistenza di situazioni nelle quali anziché diminuire, l'incidentalità aumenta.

Gli esempi riportati evidenziano come sia complesso comprendere le cause di un'operatività inadeguata alle aspettative o, quantomeno, alla generale tendenza positiva che si registra nel corso delle osservazioni sperimentali. I numerosi contributi scientifici disponibili nella letteratura tecnica del settore sono concordi nell'indicare un numero assai elevato di variabili in gioco che influiscono sulle prestazioni funzionali in modo differente a seconda della rotatoria e del contesto nel quale essa si inserisce. Ciò porta a considerare ciascuna rotatoria come un singolo caso studio.

Il gruppo di lavoro costituito da Docenti del Politecnico di Milano e del Politecnico di Torino ha da tempo avviato un'attività di ricerca finalizzata all'analisi di traiettorie in rotatoria, con l'ausilio di strumenti automatici per l'analisi quantitativa dei dati geometrici e cinematici riconducibili alle traiettorie, al fine di valutare l'adeguatezza delle scelte progettuali e di fornire indicazioni per l'eventuale loro riprogettazione. L'analisi descritta all'interno della memoria può essere eseguita differenziando le classi veicolari in base alle loro caratteristiche prestazionali e cinematiche, in modo da evidenziare le differenze nel comportamento di guida delle diverse categorie di utenza. Le possibilità offerte dall'attuale tecnologia di analisi delle immagini consentono di conseguire questi risultati con strumenti operativi relativamente semplici che prevedono l'uso di videocamere digitali a costi relativamente contenuti. La ricostruzione delle singole traiettorie consente anche di ricostruire la matrice Ingresso-Uscita (I/U) dei flussi veicolari.

Alcune osservazioni

Come noto, un elemento fondamentale per la verifica di sicurezza di una rotatoria in progetto è il cosiddetto angolo di deflessione (β) formato dalle due rette tangenti alle traiettorie in ingresso e in uscita nella manovra di attraversamento dell'anello, e derivato secondo le indicazioni riportate nella Figura 3. Al crescere di β aumenta l'inflessione delle traiettorie e, di conseguenza, si riduce la velocità di manovra. Un accentuato angolo di deflessione β , che le Norme Tecniche italia-

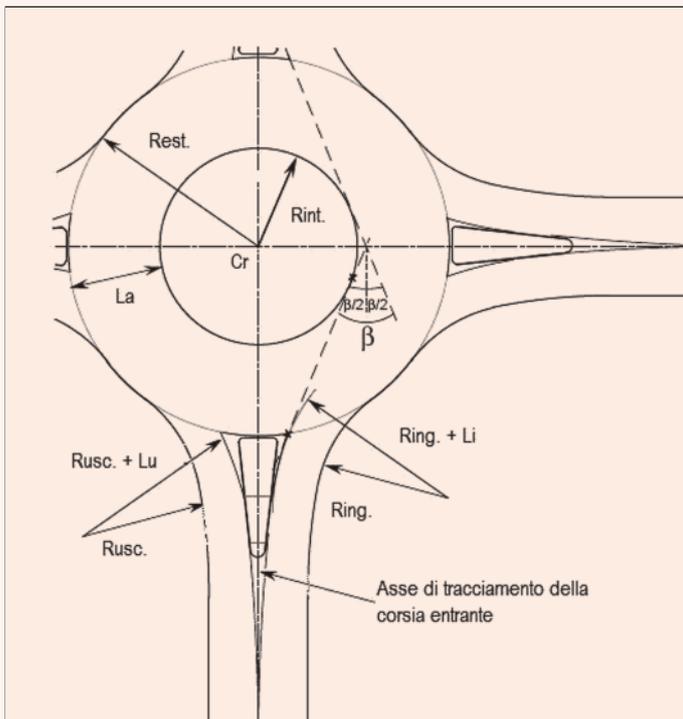


Figura 3 - Le grandezze geometriche che influiscono sull'angolo di deflessione della traiettoria

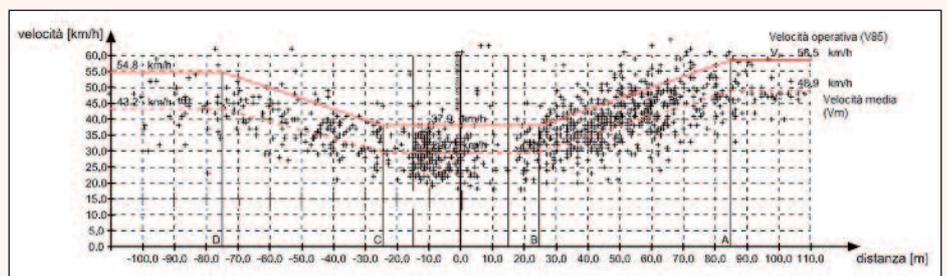
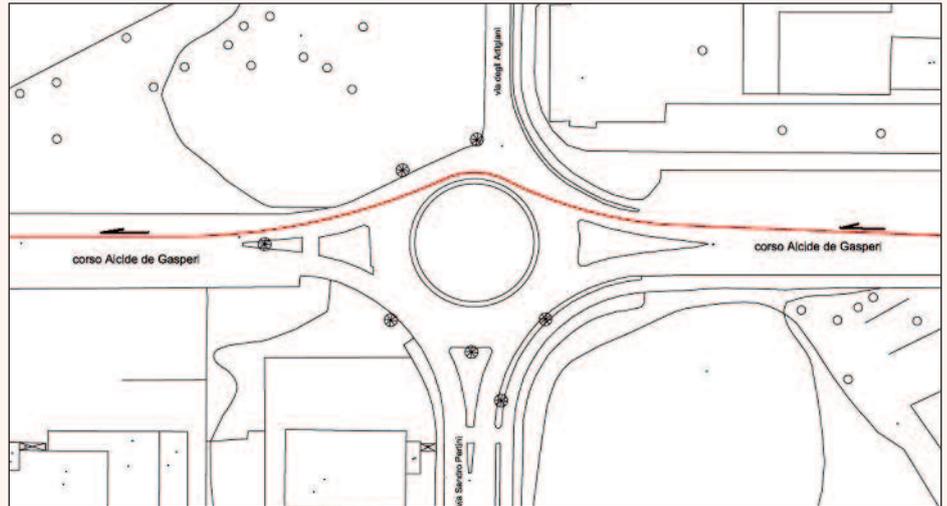


Figure 4A e 4B - Le velocità medie e operative relative alla rotatoria convenzionale della Posta (nella città di Cuneo)

ne (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2006) raccomandano sia superiore a 45° , è ottenibile a patto che siano correttamente organizzati gli assi di tracciamento dei bracci rispetto al centro della rotatoria (Cr), e che siano convenientemente selezionati i valori di alcune grandezze di progetto tra le quali:

- ♦ il raggio della corsia di ingresso ($Ring.$) e di quella di uscita ($Rusc.$);
- ♦ la larghezza della corsia di ingresso (Li) e di quella di uscita (Lu);
- ♦ il raggio dell'isola centrale ($Rint.$).

Le osservazioni sul campo confermano i presupposti delle Norme Tecniche. A questo proposito vengono presentati due casi emblematici di una estesa campagna di rilievi di velocità operativa compiuti nella primavera del 2006 in alcune tra le più rappresentative rotatorie della città di Cuneo. I rilievi sono stati eseguiti su veicoli isolati, ossia non condizionati nelle manovre di avvicinamento e attraversamento, mediante l'impiego di un misuratore laser di distanza e velocità, e secondo due differenti modalità:

- ♦ il rilievo in continuo delle velocità di uno stesso veicolo in più punti consecutivi in modo da mettere in evidenza la variazione di velocità del veicolo nell'affrontare le differenti caratteristiche geometriche dell'infrastruttura (raggio di ingresso, raggio della corona giratoria, raggio di uscita);
- ♦ misura puntuale delle velocità di veicoli in determinate sezioni dell'infrastruttura come ad esempio le sezioni di ingresso e di uscita dalla rotatoria.

Il primo esempio, riportato nelle Figure 4A e 4B, riguarda una rotatoria convenzionale con raggio esterno dell'anello circolatorio ($Rest.$) di circa 48 m. In questo caso è evidente come per una distanza dal centro della rotatoria di circa 100 m lungo i due rami opposti percorsi lungo la traiettoria indicata dalla linea rossa, la presenza della rotatoria comporti una sensibile riduzione della cosiddetta velocità operativa.



La velocità operativa (V_{85}) rappresenta il valore di velocità misurata direttamente sulla strada che non viene superata dall'85% degli utenti o, alternativamente, la velocità che viene superata solo dal 15 % di essi. L'85° percentile delle velocità rilevate su un elemento o su un tronco omogeneo di un tracciato viene riconosciuto a livello internazionale come misura della velocità operativa associata all'elemento stesso e per descrivere statisticamente come essa vari in funzione di una particolare caratteristica geometrica (per esempio, il raggio di una curva) e in una particolare ubicazione (es. all'interno di una intersezione, o lungo un tronco stradale).

Nel caso in esame, con β pari a 49° , i valori della V_{85} diminuiscono di ben 20,6 km/h (da 58,5 a 37,9 km/h) nei rami di ingresso, mentre crescono di 16,9 km/h (da 37,9 km/h a 54,8 km/h) nei rami in uscita.

Viceversa, per condizioni geometriche differenti come quelle rappresentate dalla minirotoratoria delle Figure 5A e 5B, si osserva come l'anello non sia in grado di esercitare alcun effetto sulle velocità operative. Anzi, i valori di V_{85} crescono già all'interno dell'anello e questo in virtù del ridotto angolo di deflessione determinato dalla geometria del-

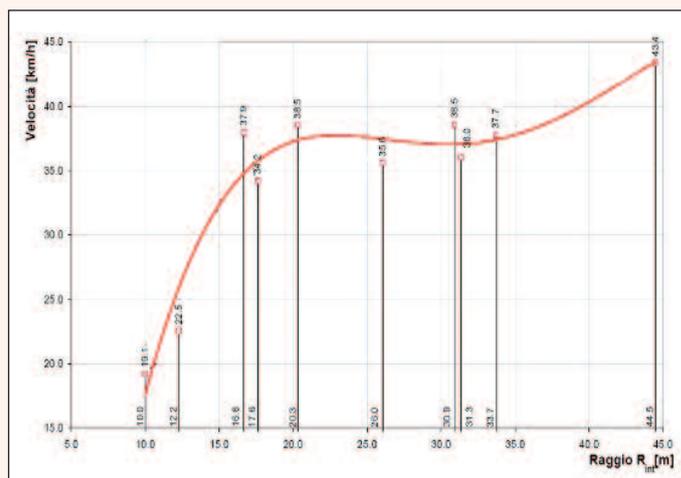


Figura 6 - Le velocità operative relative in funzione del raggio di manovra all'interno dell'anello circolatorio

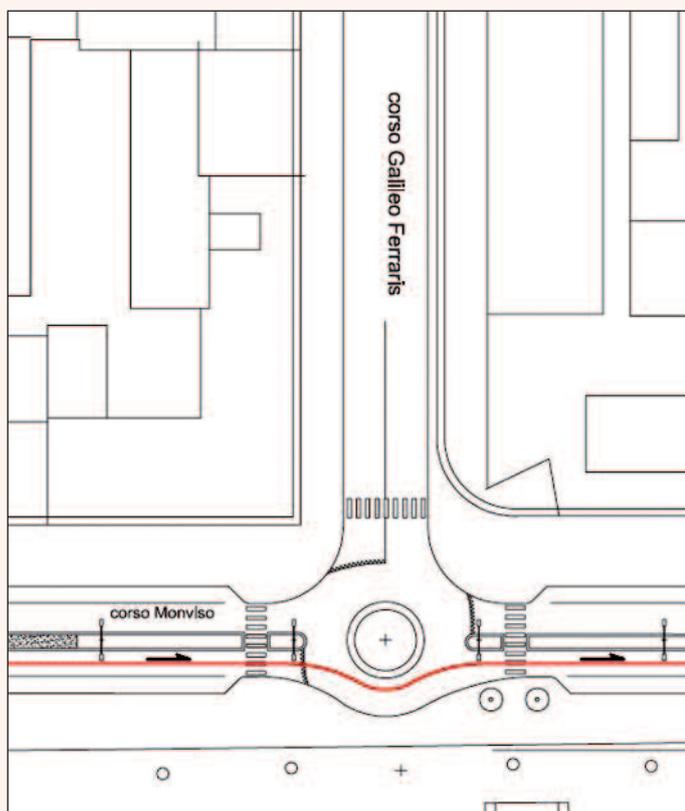
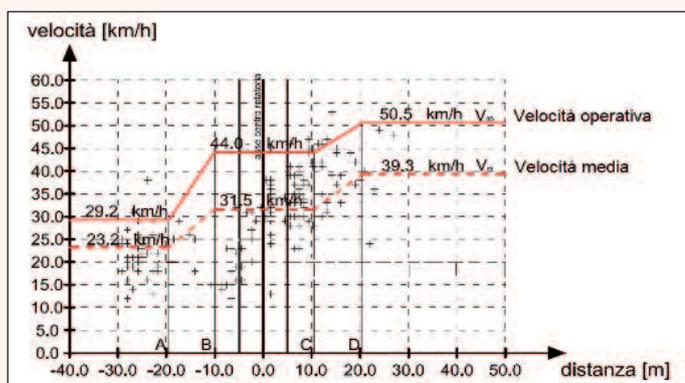


Figure 5A e 5B - Le velocità medie e operative relative alla mini-rotatoria tra Corso Monviso e Corso Galileo Ferraris (nella città di Cuneo)

la rotatoria (con β pari a 35°). Nel caso presentato, il controllo delle velocità è esercitato esclusivamente dalla sistemazione della sede del ramo di ingresso, mentre la rotatoria svolge la sola funzione di regolazione del diritto di precedenza, senza alcuna influenza sulle velocità di manovra. Nelle misure puntuali di velocità e distanza diventa complesso mettere in corrispondenza le velocità operative con i raggi delle traiettorie attuate dall'utenza. I soli confronti che si possono eseguire riguardano solo dati aggregati per manovra, come quelli rappresentati in Figura 6 in cui sulle ascisse sono riportati i valori del raggio di curvatura dell'isola centrale ($R_{int.}$) e sulle ordinate i valori delle velocità operative (V_{85}) misurate all'interno dell'anello per la sola manovra di attraversamento. Nello specifico caso studio, i dati confermano una dipendenza tra velocità e raggio dell'anello interno di tipo non lineare. L'esigenza di associare le velocità alle caratteristiche geometriche fondamentali di ogni traiettoria, sia essa di attraversamento o di svolta, richiede l'impiego di strumenti più evoluti in grado di restituire i valori di curvatura in punti predefiniti della traiettoria con i corrispondenti valori delle grandezze cinematiche più interessanti (velocità e accelerazioni in direzione longitudinale e trasversale alla traiettoria di moto) e per un numero statisticamente significativo di veicoli.

Gli strumenti per l'analisi delle traiettorie

La strumentazione con cui è possibile rilevare le traiettorie dei veicoli nelle rotatorie stradali è essenzialmente riconducibile ad alcune telecamere e a un PC portatile per l'acquisizione.

I dati sono elaborati in una fase successiva in cui i veicoli sono separati dallo sfondo consentendo di inseguirne il movimento dall'ingresso all'uscita della rotatoria.

Sia attraverso l'uso di un'unica telecamera, sia con l'uso di più telecamere è necessario curare alcuni dettagli del sistema di acquisizione al fine di ottenere la desiderata precisione nella ricostruzione della traiettoria. In particolare, nel caso di acquisizione con singola telecamera, è opportuno posizionare questa quanto più vicino alla verticale della rotatoria in modo da limitare gli effetti della distorsione prospettica; nel caso si usino più telecamere, è altresì opportuno che i tracciati video derivati da ciascuna di esse siano sincronizzati e sia possibile, tramite punti di riferimento ambientali, poter riferire geometricamente le telecamere tra loro.

Una volta acquisiti i filmati video di interesse, lo specifico software di elaborazione delle immagini sviluppato è in grado di ricostruire la traiettoria dei diversi veicoli attraverso alcune fasi:



- ◆ ricostruzione di un modello dello sfondo (background) da cui estrarre le macchine per differenza rispetto al fotogramma attuale;
- ◆ rilevazione delle zone di immagine in cui ci sono oggetti in movimento, compensazione delle ombre, filtraggio dei disturbi dovuti a rumore sull'immagine;
- ◆ associazione di queste aree ai veicoli precedentemente tracciati o generazione di nuovi veicoli qualora queste aree si riferiscano a nuovi veicoli che affrontano l'intersezione;
- ◆ aggiornamento della traiettoria dei veicoli sul piano immagine con le nuove misure acquisite nel frame attuale.

Le precedenti operazioni devono tenere in considerazione la variabilità delle condizioni di illuminazione che possono verificarsi durante i periodi di acquisizione e per tale motivo il meccanismo di sottrazione dello sfondo non può che essere adattativo. In particolare, il modello dello sfondo deve potersi adattare a cambiamenti di illuminazione ed eventualmente ad accidentali spostamenti del sistema di acquisizione.

Nelle Figure 7A, 7B, 7C, 7D, 7E e 7F è possibile notare come lo sfondo sia appreso in poco meno di un minuto (nella fase iniziale del video) e da lì in poi adattato per tener conto della non stazionarietà dell'ambiente. Questo è ottenuto modificando in ogni fotogramma il valore del pixel memorizzato come sfondo attraverso una combinazione convessa tra il valore attuale del modello e il valore attuale del pixel nell'immagine osservata come descritto da Migliore et al. (2006). Appreso il modello dello

sfondo una prima volta, questo viene continuamente aggiornato, anche se in modo meno rapido, per tutte quelle aree dove si è certi che non sia presente alcun veicolo. Una volta a disposizione il modello dello sfondo, i veicoli in movimento possono essere rilevati tramite differenza tra il frame attuale e il modello in questione. Questa differenza risente del rumore presente sull'immagine e per tale motivo, affinché un pixel immagine sia effettivamente classificato come oggetto in movimento, è confrontata con un'opportuna soglia che non può però essere unica per tutta l'immagine. Infatti, a causa della differente illuminazione delle zone riprese e per la presenza di eventuali riflessi, ogni pixel assume un diverso livello di rumore. Una volta selezionati in modo opportuno i pixel in primo piano da quelli di sfondo, sono applicate alcune elaborazioni atte a migliorare ulteriormente la qualità del risultato.

Come si può notare nella sequenza delle Figure 8A, 8B e 8C, il primo passo è l'applicazione di un filtro per la rimozione delle ombre. Questo filtro sfrutta alcune soglie riguardanti le componenti "tinta" e "saturazione" di un pixel scartando così l'informazione relativa alla sua intensità. Il risultato che si ottiene è purtroppo molto sensibile alla taratura di tali soglie e non è possibile in generale rimuovere completamente le ombre senza perdere informazioni sui veicoli. Oltre al filtro delle ombre, vengono applicati alcuni operatori morfologici per rimuovere il rumore di tipo "salt & pepper" e per riempire eventuali buchi formati in fase di rimozione delle ombre.



Figure 7A, 7B, 7C, 7D, 7E e 7F - L'adattamento del modello di sfondo nei fotogrammi 1, 25, 50, 100, 200 e 400 (0,04 s per fotogramma)



Figure 8A, 8B e 8C - La rilevazione dei veicoli per sottrazione dello sfondo e rimozione delle ombre



Una volta estratti i veicoli dallo sfondo è possibile utilizzare un filtro di Kalman a livello di piano immagine per inseguire i veicoli tra un fotogramma e l'altro andando così a ricostruire le loro traiettorie e di conseguenza le matrici I/U. In particolare quest'ultima operazione viene effettuata tramite la definizione di opportune spire virtuali che identificano le aree dell'immagine corrispondenti agli ingressi nella rotatoria e le aree corrispondenti alle uscite come riportato in Figura 9.

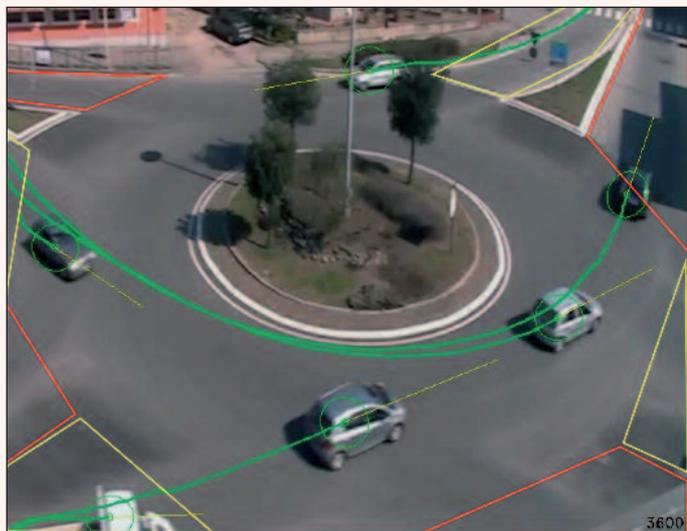


Figura 9 - La definizione delle spire virtuali per la ricostruzione della matrice I/U (in giallo le spire di ingresso e in rosso le spire di uscita dall'intersezione rotatoria)

A valle delle varie operazioni di elaborazione delle immagini, si hanno a disposizione le informazioni riguardanti il movimento dei veicoli come percepito dalle telecamere ovvero come insieme di punti sul loro piano immagine. Queste informazioni vengono quindi processate attraverso un software di ricostruzione 3D per stimare il movimento dei veicoli sul

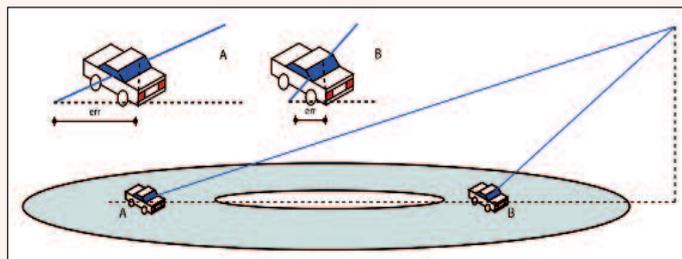


Figura 10 - L'errore della traiettoria "a terra" in funzione del posizionamento di una singola telecamera a lato della rotatoria

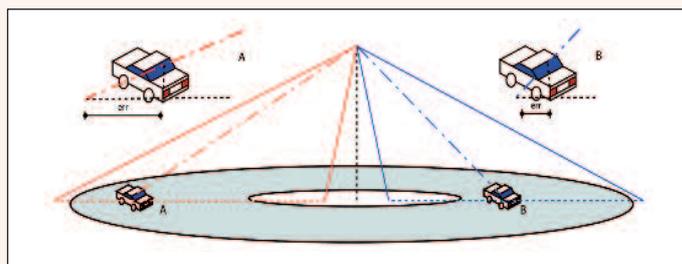


Figura 11 - L'errore della traiettoria "a terra" in funzione del posizionamento di due telecamere al centro della rotatoria

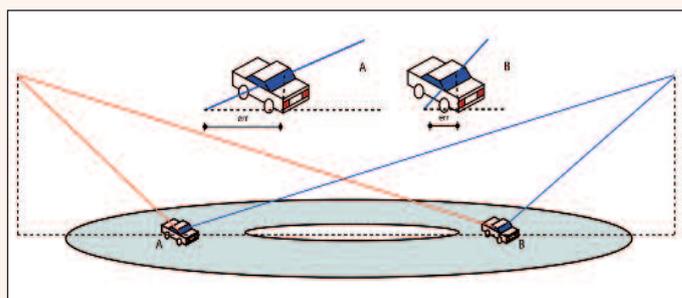


Figura 12 - L'errore della traiettoria "a terra" in funzione del posizionamento di due telecamere a lato della rotatoria

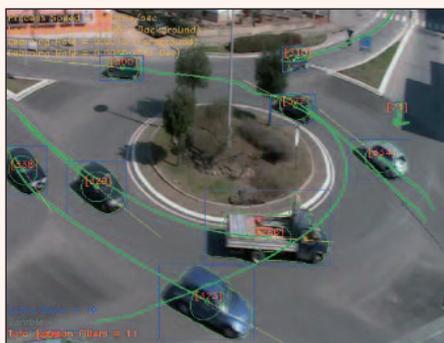
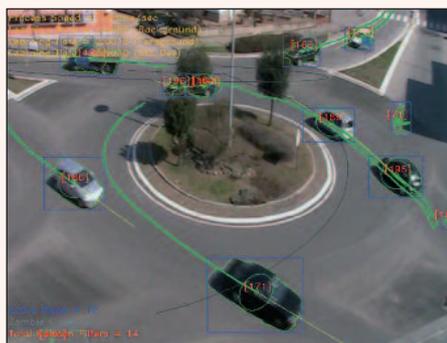
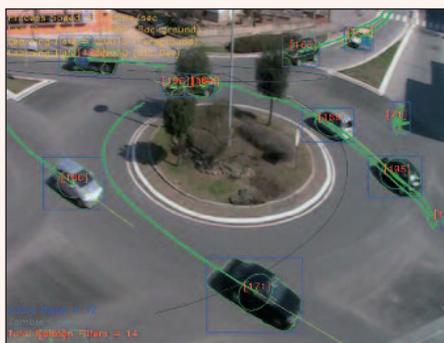
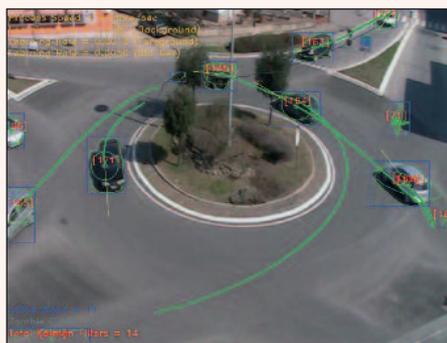


Figure 13A, 13B, 13C e 13D - La ricostruzione delle traiettorie veicolari in due situazioni (A e C) e per istanti successivi (B e D)

piano stradale e, quindi, stimare la traiettoria veicolare. In prima approssimazione si ipotizza che il punto inseguito corrisponda a un analogo punto "a terra", ipotesi che introduce un errore, come evidenziato in Figura 10, tanto più significativo tanto più il veicolo è lontano dalla telecamera. Il software può richiedere quindi una particolare procedura di calibrazione dato che l'errore commesso "a terra" dipende sia dalla distanza del veicolo dalla telecamera sia dall'altezza del veicolo che non è nota. Tale errore diviene trascurabile nel caso in cui la telecamera sia posta a elevata altezza sulla verticale della rotatoria (Figura 11), mentre, in presenza di più telecamere, il processo di ricostruzione 3D risulta più preciso e permette anche di compensare errori dovuti alla non conoscenza della reale altezza del veicolo osservato (Figura 12). La suddetta calibrazione avviene attraverso un altro sistema di acquisizione basato su tecnologia RTK-GPS. Tale sistema di rilevamento è composto da una stazione di base RTK-GPS collocata a terra, da una postazione mobile su un veicolo sonda e da un sistema di comunicazione radio veicolo-stazione di base.



La tecnologia RTK-GPS è in grado di raggiungere un'accuratezza di pochi centimetri grazie alla presenza di una base fissa e alla capacità di sfruttare informazioni relative alla portante del segnale GPS oltre che dal segnale stesso. Questa tecnologia permette un rilievo sicuramente più preciso e affidabile delle traiettorie e a costi relativamente contenuti, se si esclude il costo iniziale per l'acquisto dell'attrezzatura, rispetto alla metodologia basata sull'elaborazione di immagini. La necessità di avere veicoli sonda specificatamente attrezzati limita, allo stato attuale delle dotazioni standard dei veicoli, l'applicazione a una casistica ampia come quella necessaria per caratterizzare la circolazione in una rotatoria. Inoltre, non permette la ricostruzione delle matrici Ingresso-Uscita che sono fondamentali per la valutazione delle prestazioni.

Il programma di elaborazione delle immagini è stato applicato alla analisi dei flussi in una serie di rotatorie. Nelle Figure 13A, 13B, 13C e 13D sono riportati alcuni esempi di ricostruzione delle traiettorie in situazioni di flusso complesse. Il tracciamento delle traiettorie consente di differenziare le scelte di percorso effettuate dai veicoli. L'esempio mostra, inoltre, come la presenza di ostacoli visivi possa comportare in

alcuni punti una distorsione nei dati acquisiti, annullabile con una ripresa dalla verticale al centro dell'isola centrale o con un successivo filtro sulla curva della traiettoria.

Conclusioni

La valutazione delle prestazioni operative di rotatorie esistenti comporta uno studio statistico specifico sulle velocità e sulle traiettorie seguite dai veicoli, e suggerisce l'utilizzo di strumenti e metodologie in grado di raggiungere tali obiettivi in modo rigorosamente analitico. Ne consegue l'opportunità di creare un database di tali risultati che possa essere di supporto anche nella fase progettuale.

La tecnologia attualmente disponibile per realizzare tali obiettivi esiste ed è abbastanza matura per raggiungerli in modo soddisfacente con un impiego di risorse limitato in rapporto al costo delle infrastrutture e ai costi sociali inerenti la circolazione veicolare (sostanzialmente legati ai tempi persi e all'incidentalità).

Le tecniche di rilievo di precisione possono essere suddivise in due categorie: quelle che fanno uso di veicoli di prova equipaggiati con sistemi di rilievo della posizione e quelli che non richiedono la collaborazione strumentale dei veicoli rilevati. I primi, che comprendono i sistemi di trasmissione dati con GPS, permettono di acquisire una serie di informazioni molto dettagliate ma con limitata significatività statistica poiché riferiti a un numero assai limitato di utenti. I secondi, comprendono l'acquisizione delle immagini e la successiva elaborazione con acquisizione di tutte le informazioni necessarie senza particolari limiti. L'elaborazione delle immagini, essendo eseguita "fuori linea" con possibilità di successive rielaborazioni delle stesse sequenze, permette l'acquisizione dei dati relativi alle traiettorie veicolari e della matrice I/U con prestazioni molto elevate. Il software sviluppato specificatamente per questi obiettivi dal Politecnico di Milano risolve i numerosi problemi connessi all'elaborazione di immagini di flussi veicolari con differenti tipologie di veicoli, movimenti ed esposizione luminosa. L'installazione delle telecamere richiede particolari accorgimenti potendo condizionare la precisione nella ricostruzione delle traiettorie e il riconoscimento dei veicoli (nel caso risultino lontani dalla telecamera). La posizione centrale ed elevata rispetto al diametro delle rotatorie appare la condizione ottimale per la riduzione degli errori di prospettiva anche se l'uso di due o più telecamere sul bordo della corona rotatoria consente di ricostruire il veicolo e la relativa traiettoria in 3D. La metodologia di analisi esposta appare adatta alla realizzazione di archivi storici sul funzionamento delle rotatorie e per sviluppare le necessarie valutazioni sulle loro prestazioni. L'estendibilità di questa metodologia ad altri contesti stradali risulta del tutto ovvia. ■

* *Ricercatore, Trasporti, Politecnico di Milano, BEST*
** *Ricercatore, Sistemi di elaborazione delle informazioni, Politecnico di Milano, DEI*
*** *Professore Ordinario, Sistemi di elaborazione delle informazioni, Politecnico di Milano, DEI*
**** *Professore Associato, Strade, Ferrovie e Aeroporti, Politecnico di Torino, DITIC*

BIBLIOGRAFIA

- [1]. V. Curti, L. Marescotti, L. Mussone - "Rotonde - Tecnologie per la progettazione e la valutazione", Ottobre 2008, Quarta edizione, Maggioli, Santarcangelo di Romagna.
- [2]. A. Flannery, L. Elefteriadou - "A Review of Roundabout Safety Performance in the United States", Proceedings of the 69th Annual Meeting of the Institute of Transportation Engineers (CD-ROM), Institute of Transportation Engineers, Washington, D.C., 1999.
- [3]. P. Garder - "The Modern Roundabout: The Sensible Alternative for Maine", Technical Report 96-2, University of Maine, Department of Civil and Environmental Engineering, Orono, ME, 1997.
- [4]. E. Hauer - "Observational Before-After Studies in Road Safety", Pergamon Press, Elsevier Science Ltd., Oxford, England, 1997.
- [5]. C. Hyden, A. Varhelyi - "The Effects on Safety, Time Consumption and Environment of Large Scale Use of Roundabouts in an Urban Area: A Case Study", Accident Analysis and Prevention, Vol. 32, pp. 11-23, 1999.
- [6]. G. Jacquemart - "Modern Roundabout Practice in the United States", In NCHRP Synthesis of Highway Practice 264, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1998.
- [7]. H. McCulloch, R. Schell, T. Kligerman - "Roundabout design unit", National Roundabout Conference, 2005.
- [8]. D.A. Migliore, M. Matteucci, M. Naccari - "A reevaluation of frame difference in fast and robust motion detection", Proceedings of the 4th ACM international workshop on video-surveillance and sensor networks, Santa Barbara, California, USA, 1-59593-496-0, 2006.
- [9]. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti - "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali, Decreto 19 Aprile 2006", in Gazzetta Ufficiale Serie Generale, anno 147, n° 170, 24 Luglio 2006.
- [10]. B.N. Persaud, R.A. Retting, P.E. Garder, D. Lord - "Observational Before-After Study of the Safety Effect of U.S. Roundabout Conversions Using the Empirical Bayes Method", 2001 TRB Annual Meeting, Transportation Research Record 1751, pp. 1-8, 2001.
- [11]. R.A. Retting, B.N. Persaud, P.E. Garder, D. Lord - "Crash and injury reduction following installation of roundabouts in the United States", American Journal of Public Health 91:628-31, 2001.
- [12]. B.W. Robinson, L. Rodegerdts, W. Scarbrough, W. Kittelson, R. Troutbeck, W. Brilon, L. Bondzio, K. Courage, M. Kyte, J. Mason, A. Flannery, E. Myers, J. Bunker, G. Jacquemart - "Roundabouts: An Informational Guide", Report FHWA-RD-00-067, FHWA, U.S. Department of Transportation, June.
- [13]. TRB (2007) NCHRP Report 572, Roundabout in United States, Transportation Research Board, Washington, D.C..
- [14]. TRB (2007) NCHRP 3-65, Transportation Research Circular E-C110, Geometric Design, Strategic Research, Transportation Research Board, Geometric Design Committee, Operational Effects of Geometrics Committee, January.
- [15]. G. Artese, A. Treccoli - "Problematiche legate all'individuazione ed al tracciamento automatico dei percorsi dei veicoli nelle rotatorie", Atti del XVI Convegno Nazionale SIIV, vol. II, Arcavacata di Rende (CS), Settembre 2006.

Ringraziamenti

Le attività presentate in questo articolo sono state parzialmente finanziate con fondi PRIN 2007, progetto "Intersezioni stradali a raso, criteri di scelta della tipologia e dimensionamento: aspetti funzionali delle rotatorie non semaforizzate", in particolare per quanto riguarda il software di elaborazioni di immagini dei flussi veicolari in rotatoria.