



UN SISTEMA A BASSISSIMO COSTO LASER-TELECAMERE PER LA MISURA DELL'INTERAZIONE GEOMETRICA RUOTA-ROTAIA

Andrea Bracciali

Dipartimenti di Meccanica e Tecnologie Industriali, Università di Firenze, bracciali@ing.unifi.it

Sommario/Abstract

Per la misura della geometria di contatto ruota-rotaia, di fondamentale importanza per verificare il comportamento dinamico di un rotabile ferroviario, occorre rilevare il profilo delle rotaie e la posizione laterale reciproca sala/binario durante la marcia del treno.

A tale scopo si usano sistemi a triangolazione con illuminatori laser e telecamere digitali ad alta velocità che, unite ad un hardware dedicato, consentono di effettuare tali rilievi in tempo reale fino a velocità elevate; tali sistemi hanno peraltro costo molto elevato sia di acquisto che di eventuale noleggio.

Nella presente memoria si presenta un sistema a bassissimo costo, denominato Ve.Lo.Co. WRIST (Very Low-Cost Wheel-Rail Interaction Survey Technique) che consente di effettuare i rilievi descritti, sebbene non in tempo reale e con precisioni limitate, con costi hardware/software estremamente ridotti ai sistemi attualmente disponibili sul mercato

Parole chiave: ruota, rotaia, interazione, geometria, profili, laser

1. Introduzione

La dinamica di marcia di un rotabile, intesa come insieme dei comportamenti che esso assume durante la marcia, è una scienza relativamente recente, affinata grazie al contemporaneo sviluppo delle conoscenze teoriche sul contatto ruota-rotaia e allo sviluppo di codici di simulazione *multibody* che consentono di predire il comportamento di un veicolo ferroviario con notevole veridicità.

Una delle peculiarità del sistema ferroviario, sistema di trasporto a guida vincolata, consiste nella varietà dei contatti possibili fra ruota e rotaia che, in virtù delle notevoli rigidità in gioco, dà luogo a numerosi fenomeni che per quanto riguarda le ruote possono essere descritti come segue:

- *infossamento* della cosiddetta tavola di rotolamento della ruota, fenomeno tipico della marcia centrata in rettilineo dovuto a plasticizzazioni ripetute (fenomeni di *ratchetting*). Questo tipo di usura colpisce particolarmente i rotabili ad alta velocità (linee ad ampio raggio di curvatura); in Italia si sono avuti in passato fenomeni estesi derivanti da scartamento troppo stretto. Questa usura modifica la conicità delle ruote ed origina moti di serpeggio particolarmente pericolosi;

- accoppiato o meno all'infossamento, tipicamente nelle locomotive pesanti che sfruttano appieno l'aderenza per lunghi periodi di esercizio si verifica il fenomeno del *rifollamento*, ossia il flusso plastico di materiale che deborda dal lato esterno della tavola di rotolamento dando origine ad un labbro metallico che può interferire con l'armamento. Questo fenomeno è tipico delle locomotive da montagna che lavorano con peso per asse elevato, coppie al limite di aderenza e transito in curve strette con allargamento di scartamento di progetto o "naturale" dovuto all'usura della rotaia alta;
- usura del bordino delle ruote a causa di forze di guida elevate. Occorre rimarcare [Wickens] che le forze laterali, sopportate dal bordino, non dipendono solo dall'accelerazione non compensata a_{nc} (ossia l'accelerazione corrispondente alla forza centrifuga rimanente dopo aver tolto la componente centripeta della forza peso dovuta alla sopraelevazione) ma, ed in maniera assolutamente predominante, dalle forze di contatto. Il carrello a due assi tende a disporsi in maniera diagonale in curva anche per accelerazioni non compensate nulle, e la letteratura è fiorente di tipologie e soluzioni di carrelli ad assi sterzanti. E' assolutamente necessario però sottolineare come la più semplice delle possibili soluzioni, ossia la riduzione della rigidità longitudinale della sospensione primaria, ha effetti positivi nel caso di veicoli trainati (carrozze) ma non sortisce praticamente alcun effetto nel caso dei veicoli trainanti (locomotive); in quest'ultimo caso, infatti, la forza di trazione satura pressoché completamente l'aderenza disponibile con la conseguenza che le locomotive tendono sempre a marciare con gli assi del medesimo carrello paralleli. Le usure di bordino, ove vi sia materiale sufficiente, vengono eliminate ripristinando finché possibile il profilo originario della ruota mediante ritorniture.

Per quanto riguarda le rotaie, limitandosi alle sole tipologie di interesse nel presente contesto, si possono descrivere i seguenti fenomeni:

- *marezzatura* (o corrugazione) ed appiattimento della rotaia bassa in curve di raggio ridotto. Queste usure nascono dal fatto che l'effetto bicono delle sale ferroviarie non è sufficiente a compensare la differenza di percorso fra ruota esterna ed interna alla curva e quindi si hanno dei macrostrisciamenti. Inoltre, fenomeni estesi di *stick-slip* portano ad ondulazioni, la cui genesi è piuttosto complessa;
- usura della testa (fungo) della rotaia, specialmente sulla rotaia alta delle curve strette o percorse ad elevate a_{nc} , dovute a notevole strisciamenti dei bordini delle ruote.

Limitandoci in questa sede all'insorgenza dei problemi di usura del bordino e della parte interna della rotaia (*flange side*), pratica ferroviaria comune è l'utilizzo di una opportuna lubrificazione al fine di ridurre il lavoro di attrito e, conseguentemente, la quantità di materiale asportato.

2. Definizione del problema

Il presente lavoro nasce dall'esperienza pratica rilevata su alcune locomotive di un gruppo omogeneo (4 assi su due carrelli con un motore per asse (rodiggio B₀B₀) per una potenza di 6 MW) impiegato per treni merci pesanti su una linea di valico. Benché le locomotive siano in servizio da diversi anni, esse erano state progettate per l'impiego su linee veloci con treni Intercity con velocità massima di 220 km/h. E' abbastanza logico che le *performances* di un veicolo che deve essere stabile a quelle velocità contrastino con le doti di "agilità" che hanno sempre contraddistinto le locomotive "arrampatrici".

Al fine di comprendere al meglio il comportamento durante la marcia, il costruttore, d'intesa con l'operatore e con il gestore dell'infrastruttura, ha ritenuto di dover effettuare delle indagini riguardanti il comportamento dinamico della locomotiva, ovvero l'insieme delle condizioni che regolano la marcia del rotabile.

Fondamentale a questo proposito è la misura della geometria di contatto ruota-rotaia. Dato il profilo trasversale della ruota, e nell'ipotesi che essa sia rotonda, occorre misurare il profilo delle rotaie e la posizione laterale reciproca sala/binario, grandezze che evidentemente dipendono dalla posizione istantanea del convoglio lungo la linea. A tale scopo si usano sistemi a triangolazione con illuminatori laser e telecamere digitali ad alta velocità che, unite ad un hardware dedicato, consentono di effettuare tali rilievi in tempo reale fino a velocità elevate. Diversi fornitori, anche in Italia, sono in grado di fornire veicoli capaci di effettuare tali misurazioni, ma per motivi legati a tempi ed a costi, il costruttore ha preferito commissionare all'autore lo sviluppo di un sistema che consentisse di effettuare dei primi rilievi celermente ed a basso costo.

3. Il sistema Ve.Lo.Co. WRIST

Nella presente memoria si presenta un sistema a bassissimo costo, denominato Ve.Lo.Co. WRIST (Very Low-Cost Wheel-Rail Interaction Survey Technique) che consente di effettuare i rilievi descritti con costi hardware/software di circa 1/20 rispetto ai sistemi concorrenti, sebbene non in tempo reale e con precisioni notevolmente ridotte.

I principali vantaggi di tale sistema consistono nella facilità di reperimento dei componenti, nella modularità che consente il reimpiego su altri veicoli, nell'uso di metodologie di elaborazione standardizzate e di uso comune.

Nella sua versione qui descritta il sistema è composto da due unità, una per la ruota destra ed una per la ruota sinistra, assolutamente speculari, basate sull'impiego di un gruppo illuminatore e di un gruppo rilevatore montati sul telaio del carrello di un qualsiasi rotabile in prossimità del punto di contatto ruota/rotaia. Come verrà illustrato, non vi sono comunque restrizioni alla possibilità di utilizzare un numero arbitrario di sistemi.

Ciascuna unità è basata sui seguenti componenti:

- una sorgente laser a bassa potenza (50 mW) nel dominio del visibile (luce rossa, 685 nm di lunghezza d'onda), utilizzata per generare una lama di luce coerente disposta su un piano parallelo al piano del ferro;
- uno specchio ottico con prima superficie riflettente che, deviando parte del fascio generato, illumina la testa delle rotaie con una lama di luce verticale;
- una *webcam* con risoluzione VGA (640*480) con interfaccia USB 2.0 (*throughput* nominale di 480 Mbps);
- un *notebook* con capacità di elaborazione sufficiente ad effettuare la codifica MPEG 1 in real time. Il notevole vantaggio del formato MPEG rispetto al formato AVI o al PAL DV standard è la notevole capacità di riduzione delle dimensioni dei files, circa 1.5 GB/h, che risultano ancora gestibili per la memorizzazione su disco e, soprattutto, per la successiva elaborazione;
- un sistema di fissaggio al carrello della locomotiva costruito con semplici profilati metallici imbullonati, completamente registrabile e riutilizzabile per altri veicoli.

Completano il sistema:

- un *notebook* con una scheda PCMCIA che si interfaccia alla logica di veicolo registrando i parametri più importanti durante la marcia (tensione di linea, corrente di linea, velocità, coppia di ciascun motore, distanza dalla partenza);
- un ricevitore GPS (*Global Positioning System*) Garmin V, ad antenna staccabile posizionata sul tetto all'interno dell'apposito alloggiamento del quale sono provviste le locomotive in questione, con collegamento via RS-232C al medesimo *notebook* qui sopra descritto.

La sincronizzazione delle acquisizioni è stata effettuata utilizzando il *clock* del GPS (dato, come noto, da un orologio atomico) e settando tutti gli orologi della catena di misura (3 PC + la logica di veicolo) corrispondentemente.

Fra le caratteristiche notevoli del sistema occorre rimarcare:

- il costo particolarmente contenuto. Pur non avendo i PC a disposizione porte USB 2.0, sono state acquistate due schede PCMCIA con 2 porte USB 2.0 ciascuna ed alimentatore, che ha consentito l'alimentazione delle *webcam* anche se con cavi a specifica USB 2.0 per un totale di 10.5 m ciascuna; il costo di tutto il materiale acquistato (schede, *webcam*, specchi, cavi, laser) è risultato essere in totale inferiore a 1500 Euro;
- nonostante la presenza di notevoli sorgenti di disturbi elettromagnetici (i cavi USB passano in prossimità di due motori da 1.5 MW ciascuno azionati elettronicamente con inverter PWM), le immagini finali sono risultate esenti da qualunque difetto, evidenziando l'intrinseca ed elevatissima immunità ai disturbi elettromagnetici dell'intera catena di misura. Sempre per tale motivo erano stati scartati a priori sistemi di videocomunicazione radio;
- la totale assenza di parti mobili che possono risultare danneggiate. Essendo l'attrezzatura montata sul carrello, l'uso di videocamere digitali convenzionali era da escludere per la loro intrinseca delicatezza;
- la frequenza di campionamento, pari a 25 frames/s, viene ritenuta sufficiente per gli scopi del presente lavoro. Ad una velocità di 90-100 km/h, massima per la linea ed il materiale in oggetto, ciò corrisponde ad una frequenza di campionamento spaziale di circa 1 frame/m, sufficiente per distinguere gli elementi caratteristici del binario (deviatoi);
- grazie all'illuminazione esterna è possibile vedere direttamente nei filmati la porzione di ruota in prossimità del contatto con la ruota. Ciò consente un'ispezione visiva immediata della condizione di marcia della locomotiva;
- l'utilizzo di un HD esterno con interfaccia USB 2.0 da 160 GB e di un masterizzatore di DVD multistandard ha consentito di salvare in maniera permanente i risultati di ciascuna giornata, spesso superiori a 10 GB.

Nelle figure 1 e 2 sono mostrate alcune viste del sistema VeLoCo WRIST.

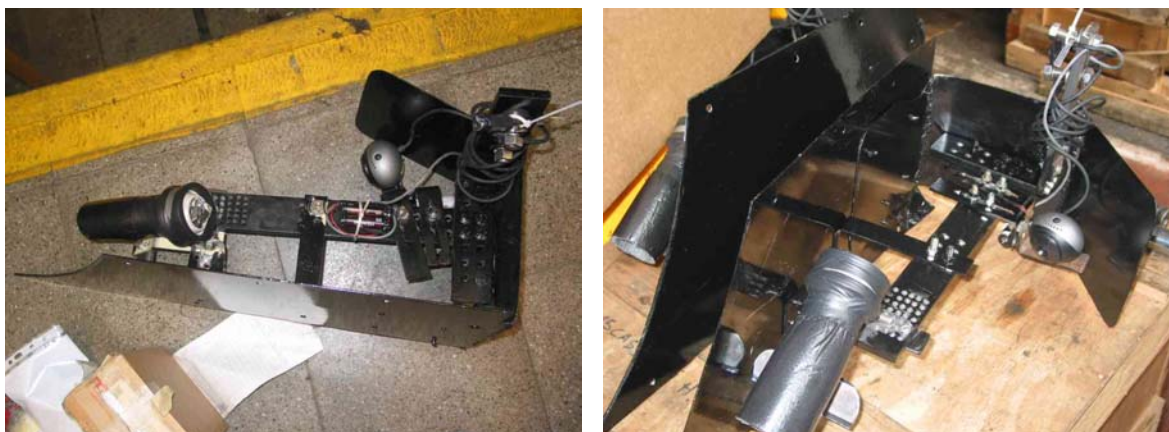


Figura 1. Viste complessive delle unità da montare sui due lati della locomotiva. Laser, *webcam*, specchio e faretto sono facilmente individuabili.



Figura 2. Montaggio parziale di una unità Ve.Lo.Co. WRIST in corrispondenza del supporto lanciasabbia – cacciapietre – ungiobordo (a sinistra) e vista durante le prove dell'unità installata davanti alla ruota destra del primo asse senso marcia (a destra)

4. La pianificazione e l'effettuazione della campagna prove

L'effettuazione di prove in linea è un'attività estremamente costosa. Sempre nell'ottica della riduzione dei costi, fortemente richiesta dal committente, è stata pianificata una campagna prove che non impone alcuna soggezione alla normale attività della locomotiva. La progettazione della campagna prove doveva coprire tutte le possibili condizioni di marcia della locomotiva. A tal fine è opportuno ricordare che la locomotiva in prova (*locomotiva test*) può essere accoppiata in comando multiplo ad una seconda locomotiva (*locomotiva partner*). La locomotiva di testa viene detta *master* mentre quella telecomandata viene detta *slave*.

L'attività è stata compiuta su una locomotiva che ha l'asse 4 soggetto a particolari usure mentre l'asse 1 non ha mostrato problemi di rilievo. La locomotiva accoppiata è stata scelta sulla base delle locomotive disponibili nel periodo delle prove, senza alcun altro vincolo o esigenza.

L'insieme delle condizioni di marcia individuate è risultato dalla combinazione delle varie possibilità: sala anteriore/posteriore, salita o discesa (trazione o frenatura), locomotiva *master* o *slave* e tiene conto di alcune condizioni al contorno fondamentali, quali il fatto che fra la corsa di andata e quella di ritorno non è possibile compiere operazioni di sorta sul sistema e

che per motivi di sicurezza non è possibile operare con il personale addetto alle misure nella cabina di guida corrente del convoglio.

La configurazione riportata in Tabella 1 soddisfa tutti i requisiti richiesti con il minimo numero possibile di corse.

Tabella 1. Schema delle programmazione delle corse prova

Giorno	Composizione treno	Posiz. loco	Asse e posiz.
1		Slave	4 Testa Salita
		Master	4 Coda Discesa
2		Master	4 Coda Salita
		Slave	4 Testa Discesa
3		Master	1 Coda Salita
		Slave	1 Testa Discesa
4		Slave	1 Testa Salita
		Master	1 Coda Discesa

L'attività prevedeva le prime due giornate sull'asse 4 e le rimanenti sull'asse 1; per effettuare la taratura del sistema di acquisizione la locomotiva è stata portata prima di tali giornate sul *calaassi*, un dispositivo che può abbassare il livello delle rotaie (vedasi il punto successivo).

La campagna prove è stata effettuata nella settimana 17-21 maggio 2004, sfruttando le condizioni climatiche favorevoli in termini di temperatura (rimasta sempre sopra zero anche nelle ore notturne) e di assenza di precipitazioni. A tal fine giova riportare che il sistema

Ve.Lo.Co. WRIST non solo non può misurare come tutti i sistemi ottici in presenza di pioggia, ma che anche, non avendo alcuna protezione, verrebbe danneggiato da qualunque organo, oggetto o precipitazione atmosferica con i quali venisse a contatto. A tal fine sono stati smontati nella locomotiva, ed isolati dai rispettivi rubinetti, i sistemi lanciasabbia e di lubrificazione dei bordini.

Le prove sono normalmente iniziate “dandosi pronti” intorno alle 19, con partenza intorno alle 21 e rientro in deposito ad un’ora variabile fra le 3 e le 8 del mattino. La sosta al terminale a Monte consentiva esclusivamente un controllo dell’integrità del sistema o al limite un nuovo serraggio, ma non di effettuare interventi più pesanti. Per l’effettuazione delle prove due persone si sono rivelate sufficienti, essendo una addetta alle acquisizioni con telecamere con due PC e l’altra all’acquisizione del segnale GPS e del bus di veicolo.

Durante l’effettuazione delle prove l’acquisizione del segnale video veniva di tanto di tanto interrotta per consentire il salvataggio su disco di file di dimensioni ben superiori ad 1 GB. Tali interruzioni, di durata inferiore ad 1 minuto, sono state effettuate ad intervalli normalmente non inferiori ad 1 ora, limitando in tal modo al massimo la quantità di informazioni perse.

Al termine delle corse prova i filmati sono stati salvati su 15 DVD.

5. La selezione delle immagini

Prima di elaborare le immagini è stato necessario effettuare una preselezione degli spezzoni maggiormente significativi. Questo si è reso necessario data l’enorme mole di dati registrati: si tenga conto che ogni minuto di acquisizione genera, per le due unità, un totale di 3000 immagini da processare.

La selezione delle tratte è stata effettuata considerando un’estensione delle caratteristiche anzidette:

- sforzo di trazione o di frenatura,
- posizione dell’asse (anteriore o posteriore),
- raggio di curvatura (al limite in rettilineo),
- posizione della locomotiva nel convoglio (master o slave).

Non sempre l’incrocio di queste caratteristiche è stato possibile per tutte; la selezione dei filmati è stata possibile grazie all’analisi combinata dei dati del GPS, del cosiddetto *file di linea*, riportante raggi di curvatura e pendenza di ogni tratta, e del file del bus della locomotiva con lo sforzo di trazione. In assenza del segnale GPS (galleria, zone non coperte dai satelliti) ci si è serviti dei *files* del *bus* che contengono un segnale di odometria e di tempo.

La selezione della posizione istantanea esatta è stata grandemente facilitata dall’uso di un software di gestione e visualizzazione georeferenziata dei dati GPS unita ad una mappa vettoriale del territorio, ferrovia inclusa, ed alla conoscenza della quota attraverso le mappe DEM (*Digital Elevation Map*). La funzione di *track replay* del software consente di ripercorrere a velocità reale o accelerata la sequenza di punti acquisiti dal GPS. In fig. 3 viene mostrato un istante della riproduzione di una registrazione, con indicazione dell’ora esatta (dal satellite), della velocità e dell’altitudine, insieme ad una vista globale della cabina di guida della locomotiva durante le prove.



Figura 3. Cabina di guida della locomotiva (a sinistra); sono visibili i 3 PC di acquisizione, il ricevitore GPS Garmin V ed il *roadbook* compilato durante le corse prova. *Track replay* con indicazioni di velocità, tempo e altitudine (a destra).

Il processo di selezione delle tratte è particolarmente oneroso in termini di tempo; al momento della stesura della presente memoria (7 luglio 2004) ci si è focalizzati sulle tratte a maggiore pendenza e con maggiore curvatura della prima giornata di prove. L'obiettivo è quello di determinare dei filmati relativamente brevi, dell'ordine dei 10-20 s ciascuno, in condizioni perfettamente determinate e di risalire, da questi, alle condizioni di marcia della locomotiva.

6. L'elaborazione delle immagini

Sebbene l'elaborazione delle immagini sia ancora da mettere a punto, in questa sede si vuole accennare la procedura di analisi delle stesse, lasciando ad una futura memoria la descrizione dei dettagli.

Mediante l'uso di un *freeware* sono stati generati degli insiemi di immagini JPEG dai filmati MPEG registrati. L'analisi delle immagini consente di determinare il profilo trasversale attuale di ciascuna rotaia; l'opportuna sovrapposizione delle immagini permette di stimare lo scartamento del binario e la posizione relativa del binario rispetto alla sala osservata con le precisazioni sotto indicate.

La prima operazione da compiere sul singolo fotogramma è quella dell'estrazione delle caratteristiche di interesse, ossia le porzioni di fotogramma che contengono la "lama" laser sulla rotaia e sulla ruota. Dall'analisi dei filmati è stato possibile individuare la massima escursione di tali caratteristiche, consentendo di ridurre a circa 1/5 le dimensioni da analizzare.

L'estrazione del profilo viene effettuata attraverso la ricostruzione di una immagine in toni di grigio ottenuta da una opportuna combinazione lineare delle matrici RGB (*red, green, blue*) che compongono una qualunque immagine a colori. Le singole matrici, disponibili all'interno di MATLAB, vengono pesate in modo da garantire il massimo contrasto e la massima luminosità all'immagine risultante. Si tenga presente che l'immagine contiene 256 toni di grigio, mentre la successiva estrazione del profilo richiede una immagine monocromatica (bianco e nero, profondità 1 bit). La conversione finale è ottenuta mediante una semplice sogliatura. Per determinare il valore di soglia si tenga presente che la *webcam* è dotata di un

sistema di esposizione automatica, non gestibile dall'utente, per cui, ad esempio, si sono dovute adottare soglie diverse per le immagini "destra" e "sinistra" in quanto la luminosità delle due immagini è risultata diversa.

Una volta ottenuta un insieme di *pixel* monocromatici occorre riportare questi punti nel sistema di riferimento definito dal piano ortogonale all'asse del binario. A tal fine è stata realizzata una trasformazione di coordinate basandosi sull'acquisizione preliminare di una serie di immagini di un opportuno sistema di riferimento graduato. Come prima accennato, la locomotiva è stata portata sul *calaassi* e la barra di riferimento è stata opportunamente posizionata in modo da risultare esattamente in corrispondenza del piano illuminato dai laser (figura 4). L'uso di una griglia di passo 10 mm per ogni lato ha consentito di identificare il sistema di riferimento con precisione sufficiente per le misure in oggetto. Visto il numero di pixel coinvolto nella definizione dell'immagine del profilo e le sue dimensioni si ritiene di poter identificare le caratteristiche del binario (piano del ferro e scartamento) con una incertezza dell'ordine di 0.5 mm. Ovviamente il sistema non può e non vuole competere con sistemi commerciali estremamente più precisi.

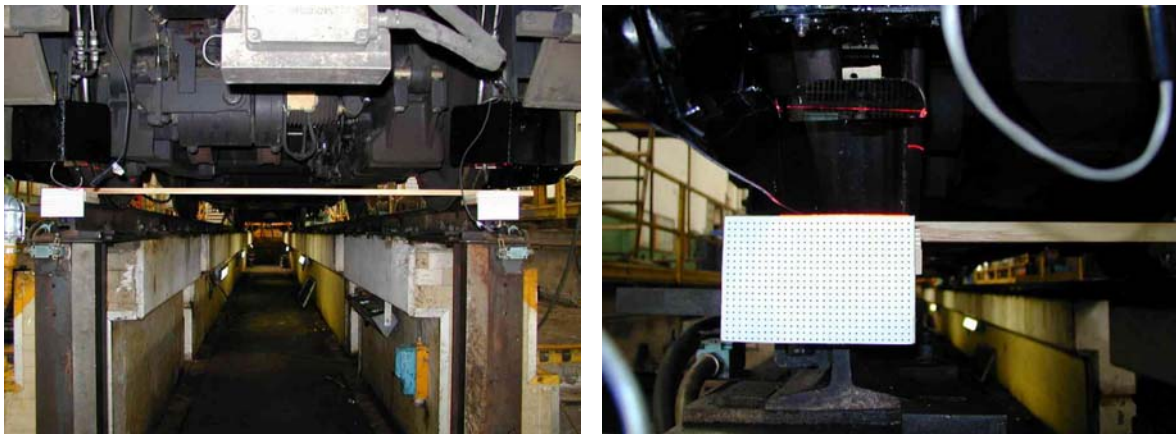


Figura 4. Operazioni di calibrazione necessarie per costruire un sistema di riferimento per la rotazione delle immagini. A sinistra: locomotiva sul *calaassi* con struttura di calibrazione; a destra: particolare della griglia di riferimento.

L'algoritmo di trasformazione delle immagini è integralmente basato sulle *routines* disponibili nell'*Image Processing Toolbox* di Matlab.

Una volta ruotate le immagini, il profilo viene determinato attraverso una approssimazione polinomiale della "nuvola" di punti. L'ordine di tale polinomio è piuttosto critico, in quanto si hanno due zone completamente diverse, una sostanzialmente orizzontale (la testa della rotaia) ed una sostanzialmente verticale (il fianco interno della rotaia, ove questo non sia consumato). Se per il primo tratto un polinomio di ordine ridotto potrebbe essere sufficiente, la transizione ed il tratto verticale impongono l'uso di polinomi di grado più elevato che, come noto, sono meno stabili al di fuori dei punti di passaggio stabiliti. L'algoritmo di approssimazione polinomiale è gestito con criteri di minimizzazione degli errori ai minimi quadrati; nonostante questo la definizione dell'ordine del polinomio e la verifica del suo buon comportamento hanno rappresentato una parte importante del lavoro, soprattutto per una delle *webcam* che è risultata disturbata in maniera particolare dal riflesso della luce bianca utilizzata per illuminare le ruote. Attualmente sono in corso di valutazione tecniche alternative che comportano la media sulle generatrici delle rotaie e la derivazione del polinomio interpolante in un sistema di riferimento ruotato di 45° che dovrebbe contribuire a ridurre il grado del polinomio.

Dati i due polinomi e referenziate le immagini fra loro, è stato semplice individuare il cosiddetto “piano del ferro”, definito istante per istante dalla retta tangente alla superficie di rotolamento delle rotaie, e determinare lo scartamento istantaneo come la distanza fra i punti individuati dall’intersezione fra i profili e una retta parallela al piano del ferro e traslata di 14 mm verso il basso.

A titolo di esempio vengono riportati in figura 5 un *frame* pronto per l’estrazione del profilo ed un esempio di accoppiamento dei profili di ruota e rotaia misurati.

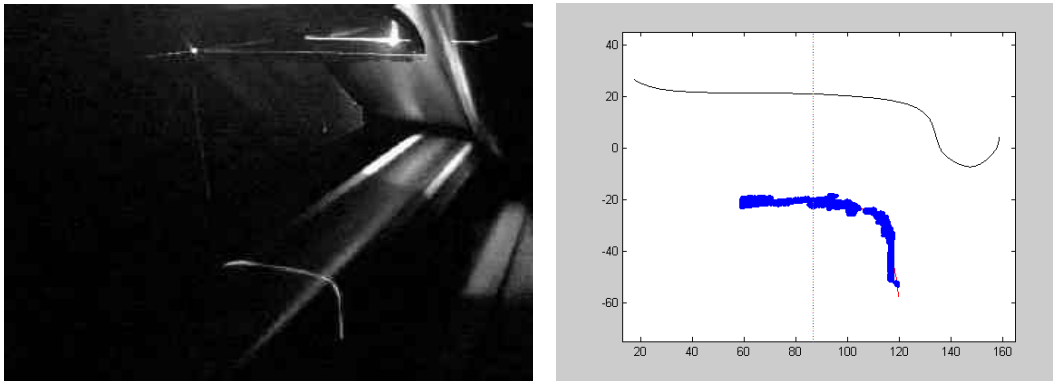


Figura 5. Esempio di *frame* riportato in toni di grigio mediante combinazione lineare delle componenti RGB (a sinistra) con estrazione del profilo della rotaia ed accoppiamento con il profilo della ruota (a destra). Il profilo delle ruote è stato misurato con uno strumento MINIPROF.

Dalle immagini è anche possibile determinare la posizione relativa fra il telaio del carrello, al quale il sistema laser-*webcam* è solidale e le rotaie. Si tenga presente che questa posizione è determinata solo in prima approssimazione in quanto non si può tenere conto dell’*angolo di attacco*, ossia dell’angolo formato dall’asse della sala e dall’asse del binario ($=\pi/2$ in condizioni ideali), con le informazioni a disposizione.

Anche la deformazione elastica della sospensione primaria trasversale ha una notevole importanza, ed è per tale motivo che una parte della lama laser è stata proiettata sul bordino della ruota. In alcune porzioni di filmato è possibile distinguere nettamente le variazioni di larghezza di tale zona illuminata, il che testimonia come siano in atto forze trasversali notevoli che spostano relativamente sala e telaio carrello. Per quanto noto all’autore, nessuno dei sistemi attualmente in commercio tiene conto di questo parametro con misurazioni ottiche, anche perché tali sistemi sono volti alla misura della geometria del binario e non all’investigazione del comportamento dinamico di un veicolo. Dalla combinazione delle informazioni sulla posizione relativa binario-telaio carrello e sala-telaio carrello è ovviamente possibile risalire, pur con le notevoli limitazioni sopra indicate relative alla mancata conoscenza dell’angolo di attacco, alla posizione relativa sala-binario.

Al momento della stesura delle presente memoria, l’intera sequenza di processamento è oggetto di ulteriore messa a punto; inoltre, motivi di riservatezza dettati dal cliente finale non permetterebbero di riportare i risultati in questa sede.

7. Conclusioni ed ulteriori sviluppi

La concezione, la prototipazione, lo sviluppo e l’implementazione di un sistema a basso costo mediante triangolazione ottica con laser-telecamere per la rilevazione delle caratteristiche di marcia di una locomotiva e di alcune caratteristiche geometriche del binario sono stati svolti con successo. Di particolare interesse è l’uso di componentistica di recentissima introduzione

sul mercato, al punto che il sistema non avrebbe potuto essere realizzato soltanto qualche mese fa.

Sebbene l'elaborazione delle misure comporti tempi di calcolo notevoli, peraltro facilmente parallelizzabili facendo elaborare a più calcolatori spezzoni di rilevazioni differenti, il costo estremamente ridotto, l'uso di elementi di uso commerciale e la facilità di montaggio/smontaggio hanno consentito un uso pienamente soddisfacente del sistema VeLoCo WRIST.

Le attività svolte hanno consentito di disporre di una base di dati notevole che costituirà una indubbia fonte di ispirazione per ulteriori analisi e prove. Il sistema, per la sua modularità e semplicità, può infatti trovare alloggiamento sotto numerosi veicoli ferroviari, motori o trainati, e può contribuire sensibilmente alle fasi di verifica e quindi di sviluppo della dinamica di marcia dei rotabili.