



Specifiche di requisiti per sistemi di misura e monitoraggio del binario

Requirement specifications for track measuring and monitoring systems

Marco ANTOGNOLI^(*)
 Cristiano MARINACCI^(*)
 Stefano RICCI^(*)
 Luca RIZZETTO^(*)

Sommario - L'articolo descrive i primi risultati di Assets4Rail, un progetto, finanziato con fondi UE, che vuole offrire un contributo al trasferimento modale a favore della ferrovia attraverso lo studio, l'adattamento e la sperimentazione delle più avanzate tecnologie di monitoraggio e manutenzione, in modo da realizzare un sistema di intervento proattivo ed economicamente efficiente sugli asset ferroviari (intesi sia come infrastruttura, sia come materiale rotabile con particolare riguardo ai difetti che hanno conseguenze sull'armamento)). Il cuore del progetto è lo sviluppo di un sistema integrato per raccogliere ed analizzare informazioni, utilizzando specifici sensori lungo la linea o sistemi automatici di monitoraggio, montati a bordo dei veicoli commerciali, per la rilevazione di difetti che hanno impatti non trascurabili sull'infrastruttura. La prima parte del progetto, come descritto nel presente articolo, è costituita dall'indagine sullo stato dell'arte, attraverso l'esame di precedenti progetti nazionali ed europei, articoli scientifici, idee proposte dall'industria, con lo scopo di individuare catalizzatori, riferimenti e soluzioni emergenti e di valutare tecnologie e soluzioni potenzialmente applicabili nel campo dei sistemi di sensori per il monitoraggio della geometria del binario. In questo contesto l'articolo definisce i requisiti funzionali, operativi, di sicurezza e le prestazioni per lo sviluppo e la sperimentazione di un sistema di sensori da installare a bordo, in grado di misurare la posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia per coadiuvare le misure della geometria del binario.

1. Panoramica del progetto

Assets4Rail è iniziato nel dicembre 2018 ed ha una durata di 30 mesi [1]. Il principale obiettivo del progetto (Fig. 1) è quello di rendere l'infrastruttura affidabile e la

Summary - The paper shows some initial results of Assets4Rail, an EU funded project that aims to contribute to the modal shift towards rail by exploring, adapting and testing the most advanced technologies for railway asset monitoring and maintenance, in order to ensure a proactive and cost-effective maintenance and intervention systems on the assets (both rail infrastructure and rolling stock with regard to defects affecting the track). The core of the project is to develop an integrated system to gather and analyse information, collected by specific on-site sensors, as well as train mounted automated monitoring systems, for detecting defects that have non-negligible impacts on infrastructure. The first step of the project, as described in the present paper, is the state-of-the-art review of previous EU/national funded projects, industry solutions and research papers, to identify drivers, benchmarks and emerging solutions and assess potentially applicable technologies and solutions in the fields of sensor system for track geometry monitoring. In this context, the paper defines the requirements, classified into functional, operational, performances and safety for further developments and testing of an on-board sensor system able to measure the transversal position of the wheel in relation to the rail in order to support track geometry measurements.

1. Project overview

Assets4Rail begun in December 2018 and will last 30 months [1]. The main objective of the project (Fig. 1) is to achieve cost efficient and reliable infrastructure developing a set of innovative asset-specific measuring and monitoring devices following a twofold approach, including Workstream 1, related to monitoring and upgrading solutions addressed to bridges and tunnels, and Workstream 2, regarding monitoring solutions for trains, track geometry

^(*) Sapienza Università di Roma, Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale.

^(*) Sapienza University of Rome, Faculty of Civil and Industrial Engineering, Civil, Buildings and Environmental Eng. Dpt.

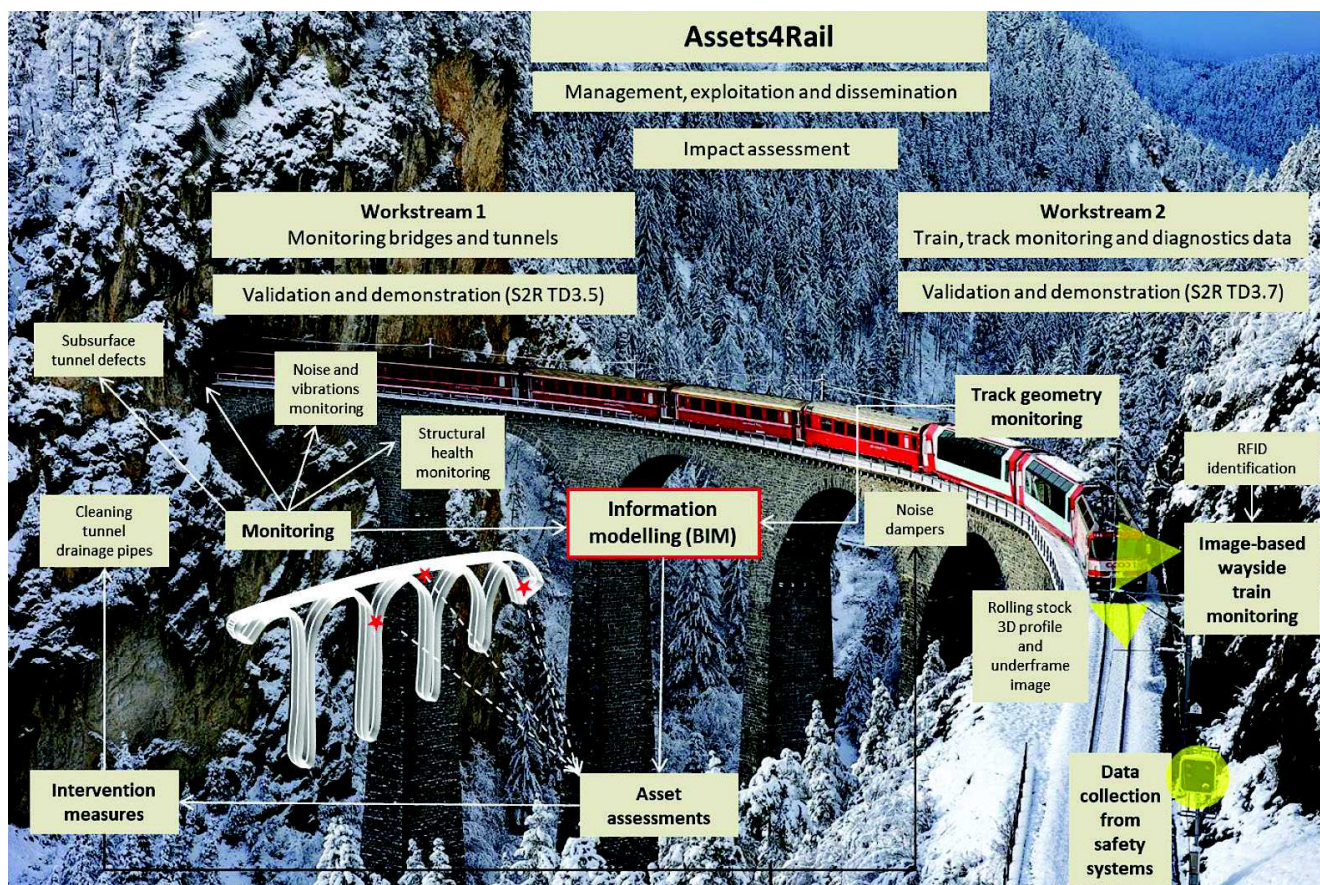


Figura 1 – Schema del progetto Assets4Rail.
 Figure 1 – Concept of Assets4Rail.

sua manutenzione a basso costo, sviluppando un insieme di strumenti di misura e monitoraggio innovativi e specifici, seguendo un duplice approccio: il Workstream 1, che si occupa delle soluzioni per il monitoraggio ed il miglioramento delle opere d'arte, in particolare ponti e gallerie, ed il Workstream 2, dedicato ai sistemi di monitoraggio per i treni, per la geometria del binario e alla raccolta dati dai sistemi di comando e controllo ferroviari¹.

Il progetto è finanziato da SHIFT2RAIL [2] e ne condivide la visione di un'infrastruttura ferroviaria europea che necessita di adeguarsi all'incremento di traffico atteso per il futuro. Inoltre, sarà necessario l'utilizzo di materiale rotabile affidabile per realizzare il desiderato trasferimento modale verso la rotaia. Entrambi gli obiettivi non possono prescindere da un sistema di manutenzione ed intervento degli asset proattivo e a basso costo.

and data collection from fail-safe systems of rail fixed installations¹.

The project shares the SHIFT2RAIL view [2] of European railway infrastructures that needs to cope with the expected future increase of traffic. Likewise, reliable rolling stock will be required to crystallize the desired modal shift to rail. Both goals rely on a proactive and cost-effective maintenance and intervention system in the assets.

Assets4Rail aims to contribute to this modal shift by developing technologies for railway asset monitoring and maintenance, by analysing the information collected by specific sensors, which will monitor subsurface tunnel defects, fatigue life consumption, noise and vibrations of bridges (track-side sensors) as well as track geometry (on-board sensors). Moreover, train monitoring will include the installation of trackside and underframe imaging au-

⁽¹⁾ I sistemi di comando e controllo considerati sono: deviatori, segnali, circuiti di binario, conta assi, e sistemi per i passaggi a livello. I sistemi di raccolta dati digitali sono stati considerati all'interno dei dispositivi di interblocco digitale e delle apparecchiature di controllo locale (basate su PLC).

⁽¹⁾ The considered safety-critical systems are: point machines, light signals, track circuits, axle counters and level crossing systems. The digital data collection systems has been considered within the digital interlocking devices and the local control (PLC based) equipment.

Assets4Rail mira a contribuire a questo trasferimento modale sviluppando tecnologie per il monitoraggio e la manutenzione degli asset ferroviari, analizzando le informazioni raccolte attraverso sensori specifici, che monitoreranno i difetti delle gallerie, l'usura a fatica, il rumore e le vibrazioni dei ponti (mediante sensori a terra) come pure la geometria del binario (tramite sensori di bordo). Inoltre, il monitoraggio del treno include l'installazione di un sistema automatizzato di video sorveglianza a terra per raccogliere dati utili alla rilevazione di quei difetti del rotabile che possono avere impatti non trascurabili sull'infrastruttura.

La combinazione dei dati raccolti in tempo reale dai sistemi di monitoraggio sviluppati dal progetto e dei dati esistenti, insieme all'implementazione di tecniche di deep learning per la valutazione di grandi volumi di dati, renderà possibile la realizzazione di un processo manutentivo proattivo ed economico dell'infrastruttura e del materiale rotabile. A tal fine Assets4Rail si avvale di un consorzio con competenze multidisciplinari necessarie alla realizzazione delle attività e al raggiungimento degli ambiziosi obiettivi del progetto.

In particolare, in questa sede ci si concentra sul Workstream 2 (Fig. 2), il cui obiettivo è lo sviluppo dei seguenti tre sistemi di misurazione e monitoraggio focalizzati sugli asset:

1. una stazione di monitoraggio a terra, integralmente automatizzata, per rilevare i guasti del materiale rotabile prioritari in termini di effetti sull'infrastruttura (ad es. degrado dell'armamento);
2. un sistema di sensori di bordo in grado di misurare la posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia per supportare le misurazioni della geometria del binario;
3. una soluzione di raccolta ed elaborazione dati per la lettura dei dati forniti dai sistemi fail-safe di installazioni fisse ferroviarie esistenti (vedi nota n. 1); al fine di realizzare:
 - a) ispezioni automatiche dei suddetti asset ferroviari per ridurre i costi delle lunghe ispezioni manuali e i rischi per il personale coinvolto;
 - b) estrazione delle informazioni rilevanti per la manutenzione delle infrastrutture dalle misure effettuate, mediante lo sviluppo di metodi di elaborazione intelligenti dei dati finalizzati al supporto decisionale delle attività manutentive;
 - c) adeguata archiviazione e gestione delle informazioni generate, attraverso l'utilizzo di soluzioni per big data e interfacce standardizzate,

tomated system to collect data for detecting specific types of defects that have non-negligible impacts on infrastructure.

The combination of mentioned real-time collected and existing data along the implementation of deep learning techniques for assessing large data volumes will pave the way towards a cost-effective and proactive maintenance process of infrastructure and rolling stock. Assets4Rail benefits from a strong multidisciplinary consortium committed to concrete exploitation activities aligned towards the achievement of the challenging project objectives.

In particular, the Work Stream 2 (Fig. 2) aims to develop the three asset-specific measuring and monitoring systems as follows:

1. an integral autonomous wayside monitoring station for detecting the prioritised rolling stock failures, in terms of effects on infrastructure (e.g. track degradation), where the monitoring actions should focus;
2. an on-board sensor system able to measure the transversal position of the wheel in relation to the rail in order to support track geometry measurements;
3. a data collection solution for reading data from fail-safe systems of rail fixed installations (see footnote n. 1); to achieve the following features:
 - a) automatic inspections of the above-mentioned railway assets in order to reduce costs of time-consuming manual inspections and risks for the personnel involved;
 - b) extraction of relevant maintenance infrastructure-related information from measurements by the development of smart data processing methods for decision support of maintenance activities;
 - c) appropriate storage and management of generated information, considering big data solutions and standard-

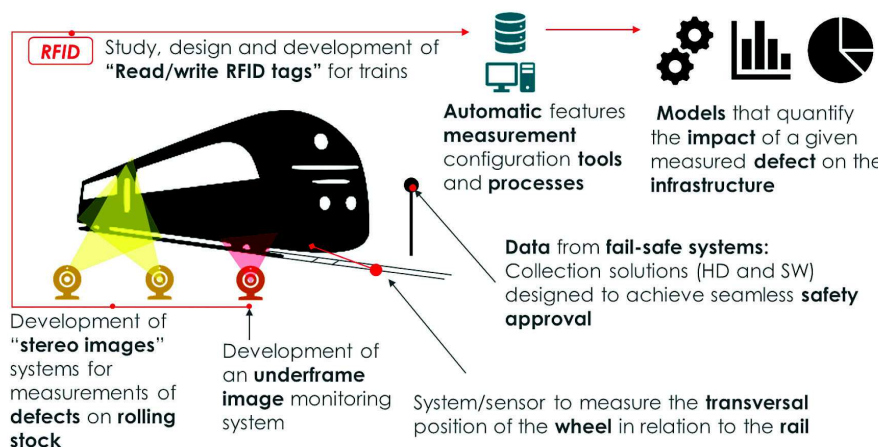


Figura 2 – Schema logico del Workstream 2: Railway Measuring and Monitoring Systems.

Figure 2 – Logical scheme of Workstream 2: Railway Measuring and Monitoring Systems.

al fine di consentire l'ulteriore estrazione e trasmissione dei dati ad altri sistemi di gestione.

Per lo sviluppo dei tre sistemi di misura e monitoraggio, il progetto adotta un approccio globale al fine di assicurare la medesima organizzazione del lavoro tecnico. La Fig. 3 mostra la metodologia adottata, che si sviluppa nelle seguenti tre fasi:

- I. una fase incentrata nel fornire un forte supporto agli sviluppi successivi mediante l'individuazione di tecnologie di riferimento e la definizione di specifiche adatte al contesto di applicazione per i sistemi di misurazione e monitoraggio e delle relative condizioni sperimentali;
- II. un processo di sviluppo iterativo, che consenta rilasci e perfezionamenti incrementali ed includa esplicitamente la gestione degli obiettivi, la valutazione delle alternative e la risoluzione dei rischi;
- III. una validazione nell'ambiente ferroviario pertinente e la fornitura dei risultati attesi;

ed indica i Work Package (WP) del Workstream 2 nell'ambito dei quali tale metodologia viene attuata.

In particolare, il Work Package 6 (WP6) - Benchmarks and Specifications fornisce la panoramica sullo stato dell'arte delle tecnologie rilevanti e dei prodotti di riferimento per i successivi sviluppi di un sistema innovativo di monitoraggio dei treni, di un sistema di sensori per la rilevazione della geometria del binario e di una raccolta di dati per la diagnostica dai sistemi di sicurezza

used interface, in order to allow further data mining and transmission of data to other management systems.

To ensure the successful developments of measuring and monitoring systems, an overall approach is devised for the organisation of technical work in the same way. Fig. 3 shows the fast and flexible methodology used with three stages:

- I. a stage centred in providing a strong support for the further development with the aim of providing benchmark technologies and stablishing the context dependent specifications for the measuring and monitoring systems and the experimental conditions;
- II. an iterative development process, allowing for incremental releases and refinements and explicitly including objective management, evaluating alternatives and resolving risks;
- III. a validation in the relevant railway environment and delivering the expected results;

and shows the Work Packages (WPs) of Work Stream 2 which implement this methodology.

Within the Work Stream 2, the Work Package 6 (WP6) - Benchmarks and Specifications deals with the state-of-the-art overview on the relevant technologies and benchmark products for the subsequent developments of an innovative train monitoring system, a sensor system for track geometry monitoring and a data collection for diagnostics from safety-critical systems (trackside signalling components). Furthermore, WP6 aims to the definition of requirement specifications for subsequent developments and specifica-

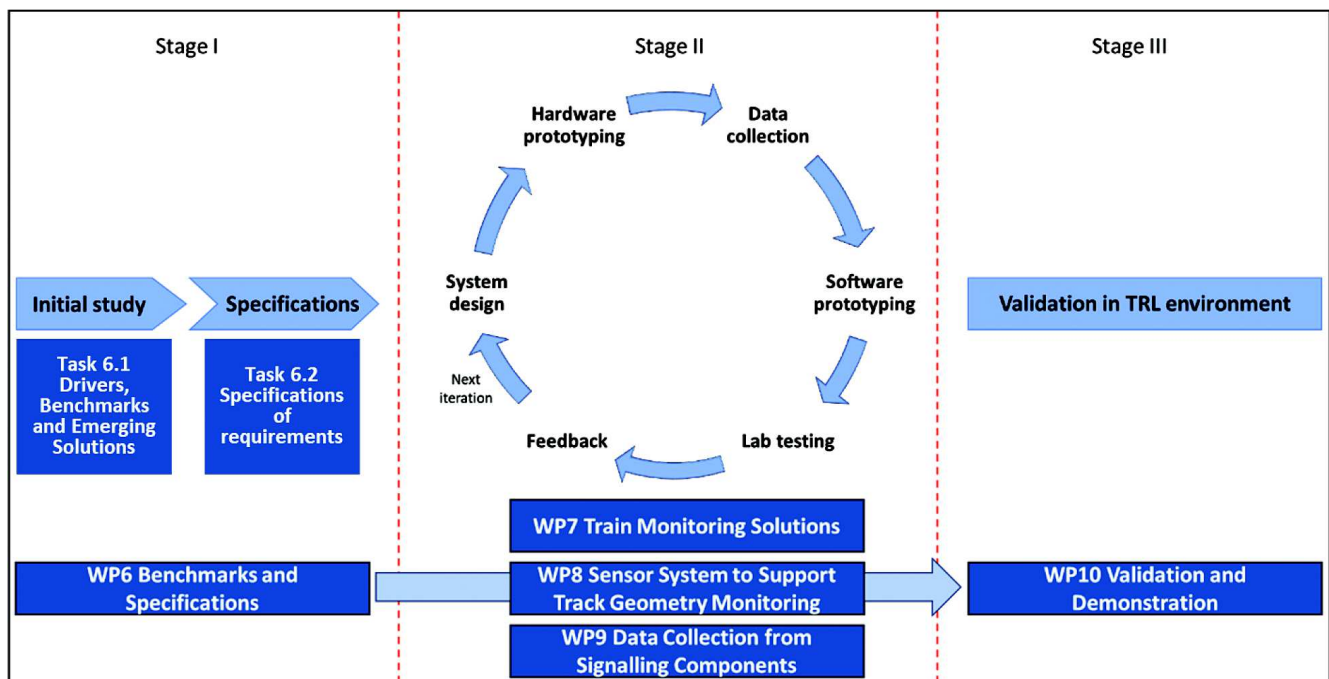


Figura 3 – Processo di sviluppo del flusso di lavoro.

Figure 3 – Workstream development process.

(componenti di segnalamento a terra). Inoltre, il WP6 definisce le specifiche e i requisiti per i successivi sviluppi, nonché le specifiche per le prove di laboratorio e per i test in ambiente ferroviario; esso è strutturato nei seguenti task:

- 6.1 - Drivers, Benchmarks and Emerging Solutions;
- 6.2 - Specifications of requirements.

L'obiettivo del Task 6.1 è identificare i driver, i benchmark e le soluzioni emergenti, non solo all'interno del settore ferroviario, e valutare le tecnologie e le soluzioni potenzialmente applicabili, in vista del loro impiego per gli aspetti previsti dai successivi Work Package del progetto:

- Wayside train monitoring (WP7);
- Sensor system to support track geometry monitoring (WP8);
- Diagnostics from safety-critical systems (trackside signalling components) (WP9).

Pertanto, la sequenza logica dei Work Package relativa al monitoraggio della geometria del binario è WP6, WP8, WP10.

Nella Tab. 1 sono riassunti i principali risultati dell'esame dello stato dell'arte, raggruppati in tre colonne corrispondenti ai WP7, WP8 e WP9.

Essi sono costituiti principalmente dai risultati delle ricerche sviluppate dai precedenti progetti europei IN2SMART [3] e IN2RAIL [4] e includono soluzioni tecnologiche emergenti (es. prodotti hardware per sistemi di visione artificiale, sensori per misurazioni della geometria del binario, ecc.) e metodologie di supporto (es. modelli di degrado del binario, metodologie di valutazione degli effetti dei guasti al materiale rotabile, ecc.).

Il Task 6.2 si è concentrato sulla definizione delle specifiche dei requisiti per lo sviluppo e la sperimentazione, sulla base di una struttura gerarchica di suddivisione del sistema (*System Breakdown Structure-SBS*) (Fig. 4), considerando le tecnologie identificate nel Task 6.1.

Questi requisiti sono stati ulteriormente classificati in cluster funzionali, operativi, prestazionali e di sicurezza e saranno validati nei prossimi

tions for laboratory testing and pilots in the railway environments, structured into the following tasks:

- 6.1 - Drivers, Benchmarks and Emerging Solutions;
- 6.2 - Specifications of requirements.

The objective of Task 6.1 is to identify drivers, benchmarks and emerging solutions, not only within the railway

Tabella 1 – Table 1

Principali risultati dell'esame dello stato dell'arte oggetto del WP6 (task 6.1)
Main findings of the review the state-of-the-art carried out within WP6 (task 6.1)

Monitoraggio treni da terra <i>Wayside train monitoring</i>	Monitoraggio della geometria di binario <i>Track geometry monitoring</i>	Diagnostica della geometria di binario <i>Diagnostics from signalling components</i>
Modelli di degrado del binario (per quantificare l'impatto dei guasti del materiale rotabile sull'infrastruttura) <i>Track degradation models (to quantify the impact of rolling stock failures on infrastructure)</i>	Risultati rilevanti di IN2SMART e IN2RAIL <i>Relevant results of IN2SMART and IN2RAIL</i>	Risultati rilevanti di IN2SMART <i>Relevant results of IN2SMART</i>
Guasti del materiale rotabile e metodologie di valutazione (ad esempio FMECA) <i>Rolling stock failures and assessment methodologies (e.g. FMECA)</i>	Sensori e metodi per le misurazioni della geometria del binario <i>Sensors and methods for track geometry measurements</i>	Raccolta dati e soluzioni di rilevamento per la diagnostica <i>Data collection and sensing solutions for diagnostics</i>
Prodotti hardware per sistemi di visione artificiale (ad es. stereo matrix-scan) <i>Hardware products for computer vision systems (e.g. stereo matrix-scan)</i>	Tecnologie per misurare i parametri della geometria del binario <i>Technologies for measuring track geometry parameters</i>	Interfacce di comunicazione e formato dati <i>Communication interfaces and data format</i>
Algoritmi di riconoscimento degli oggetti (segmentazione, rappresentazione, riconoscimento) <i>Object recognition algorithms (segmentation, representation, recognition)</i>	Soluzioni di monitoraggio per la valutazione delle condizioni del binario <i>Monitoring solutions for assessment of track conditions</i>	Trasmissione dati (sistemi di bordo e di terra) <i>Data transmission (on-board and trackside systems)</i>
Database di immagini referenziate <i>Database of referenced images</i>	Sensori per misurare le caratteristiche del contatto ruota/rotaia <i>Sensors for measuring wheel/rail contact characteristics</i>	
Soluzioni per big data (ad es. raccolta, elaborazione, archiviazione) <i>Big data solutions (e.g. collection, processing, storage)</i>		
Tecnologie RFID per l'identificazione del materiale rotabile <i>RFID technologies for rolling stock identification</i>		

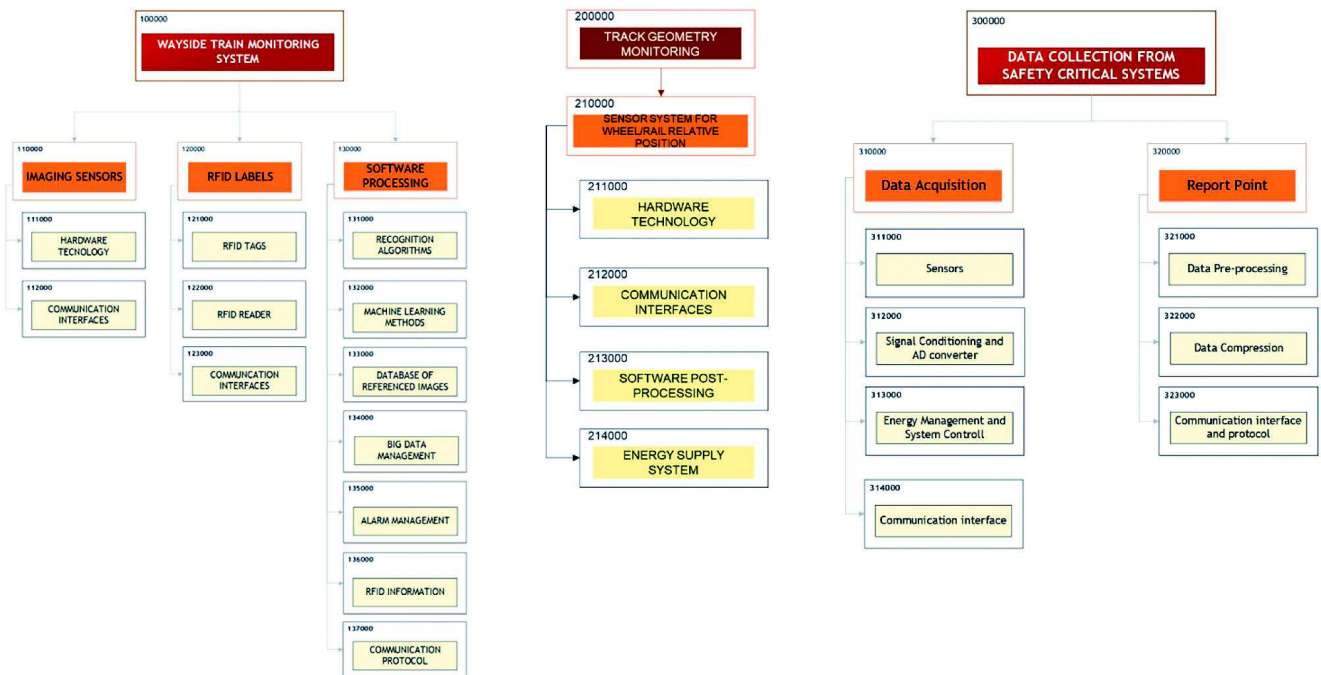


Figura 4 – Struttura gerarchica del sistema: struttura delle specifiche dei requisiti.
 Figure 4 – Hierarchical System Breakdown Structure of requirements specifications.

Work Package del progetto in base ai loro attributi; ovvero specificità, misurabilità, raggiungibilità, verosimiglianza e tracciabilità, con particolare riguardo ai seguenti aspetti operativi:

- acquisizione (mezzi e tecnologie per estrarre valori reali dall’ambiente, compreso il condizionamento del segnale acquisito e le specifiche di alimentazione);
- trasporto e controllo (tecnologie che incapsulano i dati acquisiti in un formato ottimale per essere trasmessi dai sistemi di comunicazione);
- raccolta e analisi dei dati (formato per l’archiviazione dei dati, classificazione e tecniche per estrarre i valori dai dati acquisiti).

2. Monitoraggio della geometria del binario

Questo articolo si concentra su uno dei tre campi coperti dal Work Stream 2 di Assets4Rail: il monitoraggio della geometria del binario. Questa attività è essenziale per garantire la sicurezza dell’esercizio ferroviario e viene oggi svolta dai gestori dell’infrastruttura utilizzando veicoli diagnostici in grado di analizzare le condizioni del binario e di rilevarne i difetti in una fase iniziale.

La ricerca nell’ambito di queste attività diagnostiche è principalmente finalizzata al miglioramento delle strategie manutentive, unitamente alla riduzione dei costi di gestione delle infrastrutture.

Le principali soluzioni di monitoraggio per la valutazione dello stato dell’armamento, emerse da un’indagine

sector, and assess the potentially applicable technologies and solutions related to the further developments in view their applications in the fields covered by the next Work-Packages of the project:

- Wayside train monitoring (WP7);
- Sensor system to support track geometry monitoring (WP8);
- Diagnostics from safety-critical systems (trackside signalling components) (WP9).

Therefore, the logical sequence of Work Packages regarding track geometry monitoring is WP6, WP8, WP10.

In Tab. 1 the main findings of this state-of-the-art review are reported in three columns corresponding to WP7, WP8 and WP9.

They mainly consist of the results of the researches developed by previous European projects IN2SMART [3] and IN2RAIL [4] and include emerging technological solutions (e.g. hardware products for computer vision systems, sensors for track geometry measurements, etc.) and methods (e.g. track degradation models, rolling stock failures and assessment methodologies, etc.).

Task 6.2 focused on the definition of requirement specifications for development and testing of systems, basing on a hierarchical System Breakdown Structure (SBS) (Fig. 4) considering the candidate technologies identified in Task 6.1.

These requirements have further been classified into functional, operational, performance and safety clusters and will be under validation in next work-packages of the

dedicata riferita al contesto italiano [5] [6] [7] [8] [9], sono riassunte nella Tab. 2.

In questa sede ci si focalizza sui sistemi di monitoraggio della geometria del binario basati su tecnologie ottiche / inerziali senza contatto (Fig. 5).

I sensori ottici sono utilizzati per le misure del profilo del binario e della posizione del binario, mentre l'unità inerziale fornisce le accelerazioni lineari e angolari. La combinazione di dati ottici e inerziali consente la determinazione della qualità della geometria del binario attraverso la misurazione dei parametri geometrici del binario, i principali dei quali sono: scartamento, livello trasversale/sopraelevazione, livello longitudinale, allineamento, sghebo.

Le definizioni dei principali parametri geometrici del binario, i requisiti per la loro misurazione e i metodi di analisi sono forniti dalla norma EN 13848-1:2019 [10].

I gestori dell'infrastruttura (GI) utilizzano comunemente i veicoli di misura (*Track Recording Vehicle-TRV*) o carrozze di misura (*Track Recording Coach-TRC*) che percorrono la rete raccogliendo i dati sulla geometria del binario a fini di ispezione e misurazione [11]. La misurazione attraverso appositi veicoli TRV e TRC è una tecnologia matura e standardizzata nella norma EN 13848-2:2006 [12] riguardo sia ai dispositivi, sia ai metodi di misurazione, che copre diversi aspetti riguardanti la caratterizzazione della geometria del binario. Vengono rilevati i seguenti parametri geometrici: scartamento, livello longitudinale, livello trasversale, allineamento e sghebo. Questi parametri possono essere misurati utilizzando un sistema inerziale o corda-freccia, che è anche il principio di misurazione dei veicoli TRV e TRC. Il progetto di ricerca europeo RIVAS [13] ha esaminato i veicoli TRC in esercizio in Svizzera, Svezia e Regno Unito descrivendo i metodi di misurazione menzionati.

Il monitoraggio della geometria del binario con i treni in servizio commerciale è sempre più di interesse sia per i gestori dell'infrastruttura sia per le imprese ferroviarie.

Negli ultimi anni, i GI hanno tentato di implementare sistemi automatici di misurazione della geometria del bi-

Tabella 2 – Table 2

Soluzioni di monitoraggio per la valutazione dello stato dell'armamento
Monitoring solutions for assessment of track conditions

Condizione monitorata <i>Monitored condition</i>	Parametri monitorati <i>Monitored parameters</i>	Tecnologie utilizzate <i>Applied technologies</i>
Qualità geometrica del binario <i>Track geometry quality</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Parametri geometrici del binario (scartamento, livello trasversale/sopraelevazione, livello longitudinale, allineamento, sghebo) • Geometria del profilo della rotaia • Accelerazioni • <i>Track geometric parameters (gauge, cross level/cant, longitudinal level, alignment, twist)</i> • <i>Rail profile geometry</i> • <i>Accelerations</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Profilometro ottico/laser • Sistema di misura inerziale • <i>Optical/laser profilometer</i> • <i>Inertial measuring unit</i>
Usura <i>Wear</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria del profilo della rotaia • Superficie della rotaia • <i>Rail profile geometry</i> • <i>Rail surface</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Profilometro ottico/laser • Video camera • <i>Optical/laser profilometer</i> • <i>Video camera</i>
Comportamento dinamico del veicolo <i>Vehicle dynamic behaviour</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Conicità equivalente • Accelerazioni (boccola, sala montata, carrello e cassa) • Forze di contatto ruota/rotaia • <i>Equivalent conicity</i> • <i>Accelerations (axle box, wheelset, bogies and vehicle body)</i> • <i>Wheel-rail contact forces</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Profilometro ottico/laser • Accelerometro • Estensimetro elettrico (deformazione della rotaia, deformazione della sala montata, deformazione della ruota) • <i>Optical/laser profilometer</i> • <i>Accelerometer</i> • <i>Electrical strain gauge (rail strain, wheelset strain, wheel strain)</i>
Non conformità del binario <i>Track unconformity</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Attacchi mancanti, traverse, massicciata, etc. • Stato dei giunti, rotture, scalfitture delle rotaie, etc. • <i>Missing fastenings, sleepers, track bed, etc.</i> • <i>Joint status, crack, scratch, etc.</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Video camera • <i>Video camera</i>
Stato termico del binario <i>Rail thermal state</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • <i>Temperature</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Sonda termica • Termo camera • <i>Thermal probe</i> • <i>Thermal camera</i>

project according to their attributes; i.e. specificity, measurability, attainability, realism and traceability, with specification of the following operative segments:

- *acquisition (means and technologies to extract real values from the environment, including the conditioning of the signal captured and the power requirements);*
- *transport and control (technologies encapsulating the data acquired in optimal format to be transmitted by the communication systems);*

nario (UGMS) sui veicoli in servizio commerciale senza la necessità di impegnare tracce orarie aggiuntive rispetto al normale esercizio ferroviario [11]. Sul mercato sono presenti UGMS, che utilizzano sia la tecnologia inerziale sia la tecnologia corda-freccia, in grado di effettuare la misura completa dei parametri geometrici e del profilo del binario ad alte velocità (fino a 400 km/h per l'UGMS inerziale e fino a 320 km/h per quelli basati sul corda-freccia) (Fig. 6). Questi sistemi di misura automatici devono essere compatti e leggeri in modo da poter essere installati sui veicoli in normale servizio. La metropolitana di Londra è stata la prima al mondo a introdurre la tecnologia di misurazione automatica per il monitoraggio dei suoi 408 km di binari [14].

A differenza della misura completa dei parametri geometrici e del profilo del binario, il monitoraggio mira più a indicare la qualità della geometria del binario e a rilevare le deviazioni della geometria del binario locale, piuttosto che a ricostruire i parametri originali di posa della geometria del binario, cosa che fanno i sistemi di ispezione e misurazione. La spinta per l'utilizzo dei sistemi UGMS sui veicoli in servizio, ha determinato lo sviluppo di molti sistemi di monitoraggio del binario che, tuttavia, non forniscono la geometria completa [11], né quelli commerciali utilizzati dai GI né quelli sviluppati nella ricerca accademica e sperimentale.

La misurazione dell'accelerazione insieme alle tecniche avanzate di elaborazione dei dati è l'opzione più utilizzata nei sistemi UGMS, grazie alla robustezza degli accelerometri. D'altra parte, i sensori ottici, come quelli basati su laser, su telecamere, ecc., devono essere puliti regolarmente per poterne garantire il corretto funzionamento e quindi necessitano di un trattamento speciale per evitare di sporcarsi quando vengono applicati sui veicoli commerciali. Infatti, la robustezza è il fattore più importante per le applicazioni sui veicoli in normale servizio, in quanto il sistema di monitoraggio non dovrebbe richiedere manutenzione aggiuntiva, influenzando

- *data collection and analysis (format for data storage, classification and techniques to extract values from the captured data).*

2. Track geometry monitoring

This paper focuses on one of the three fields covered by Assets4Rail Work Stream 2: track geometry monitoring, which is an essential activity to ensure the safety of railways operation, nowadays performed by Infrastructure Managers by diagnostic vehicles capable to analyse track conditions and detect potential problems at an early stage.

The research in the field of these diagnostic activities is mainly aimed at the improvement of maintenance strategies, in combination with the reduction of infrastructure management costs.

The principal monitoring solutions for the assessment of track condition emerging from a dedicated survey referred to the Italian context [5] [6] [7] [8] [9] are summarized in Tab. 2.

The focus is here on the track geometry monitoring systems basing on contactless optical/inertial technologies (Fig. 5).

Optical sensors are used for the measurements of the rail profile and the rail location, while the inertial unit make available the linear and angular accelerations. The combination of optical and inertial data allows the determination of the track geometry quality through the measurement of track geometric parameters, the main of which are: gauge, cross level/cant, longitudinal level, alignment, twist.

The definitions for the principal track geometry parameters and the requirements for their measurement and the analysis methods are given by European Standard EN 13848-1:2019 [10].

Infrastructure Managers (IM) commonly deploy a dedicated Track Recording Vehicle (TRV) or hauled Track Recording Coach (TRC) running along the network gathering track geometry data for inspection and general measurement purposes [11]. The measurement by TRV and TRC is mature technology, standardized in the EN 13848-2:2006 [12], which covers several aspects concerning characterization of track geometry and measurement devices and methods. The following geometry parameters are covered: track gauge, longitudinal level, cross level, alignment and twist. These parameters can be measured by using either an inertial or a versine system, which is also the measurement principle of TRV and TRC. The EU research project RIVAS [13] reviewed TRC operating in



(Fonte – Source: MERMEC)

Figura 5 – Sistema di monitoraggio della geometria del binario composto da un'unità inerziale e due sensori ottici.

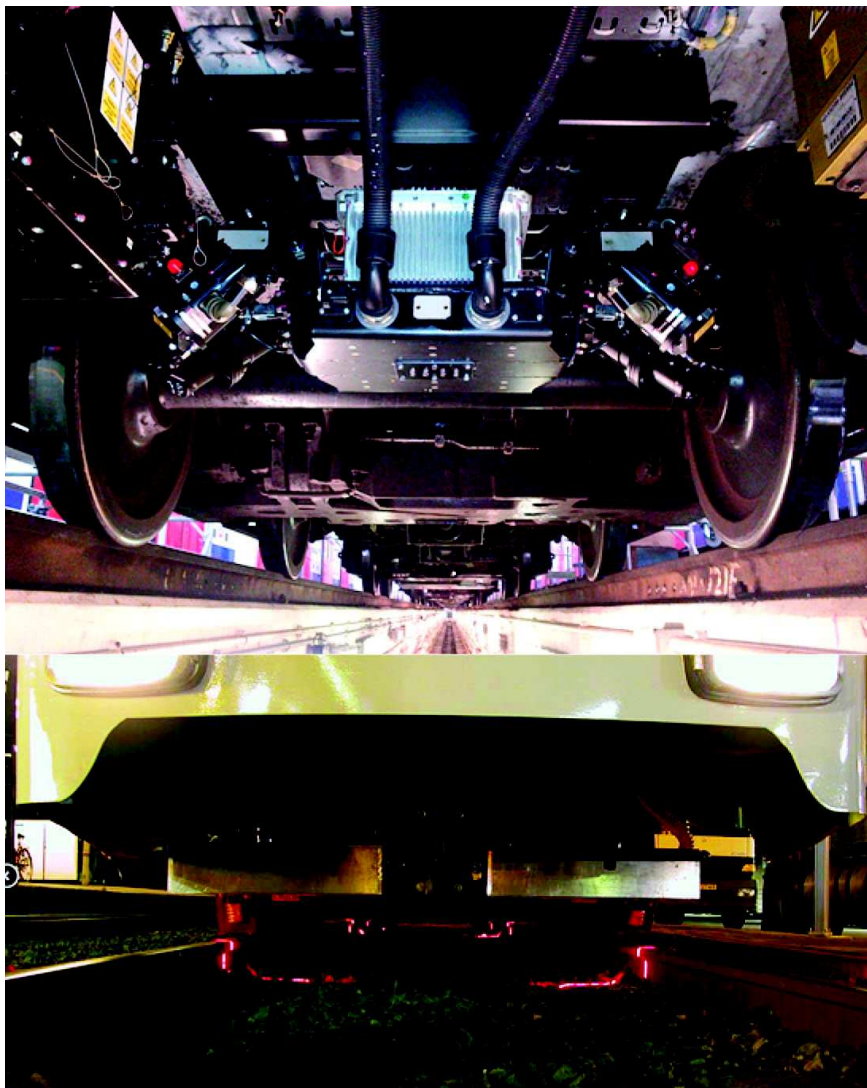
Figure 5 – Track geometry monitoring system composed by an inertial unit and two optical sensors (source MERMEC).

sull'affidabilità e sulla disponibilità dei veicoli stessi.

Allorquando la ricostruzione dei parametri della geometria del binario non sia richiesta, è possibile l'utilizzo di indicatori chiave per il rilievo della qualità della geometria del binario. Ad esempio, la norma EN 13848-1:2019 [10] raccomanda il calcolo e l'analisi dei valori da media a picco e/o da picco a picco delle accelerazioni in boccia in un dato intervallo di frequenza, che sono in relazione alle forze dinamiche ruota-rotaia e a difetti isolati. La deviazione standard su una specifica distanza e in un dato intervallo di frequenza può essere utilizzata per valutare l'usura ondulatoria e/o la densità di difetti geometrici della rotaia di limitata lunghezza d'onda. Le accelerazioni su carrello e cassa possono anche essere utilizzate per rilevare difetti isolati mediante il confronto delle deviazioni dei valori picco-media o picco-zero con le soglie tollerate secondo gli standard dei GI. Come esempio di applicazione commerciale, esistono reti di sensori wireless che misurano le accelerazioni in boccia e altri indicatori delle condizioni del binario. Non appena un indicatore supera la soglia, i GI vengono informati che in un tratto di binario è necessario un intervento manutentivo.

Qualora, invece, sia richiesta la ricostruzione dei parametri della geometria del binario, è necessaria una gestione specifica dei dati. Il livello longitudinale e il profilo verticale della rotaia possono essere ottenuti dalla doppia integrazione delle accelerazioni verticali. In termini di fattibilità su veicoli commerciali e di accuratezza, la misura migliore è probabilmente quella contemporanea dell'accelerazione sul carrello in corrispondenza della boccia e dello spostamento verticale dell'accelerometro dalla boccia, nonostante i trasduttori di spostamento siano più vulnerabili e costosi degli accelerometri [11]. Per evitare l'utilizzo dei trasduttori di spostamento, possono essere utilizzati anche accelerometri montati sulla boccia, in combinazione con tecniche di elaborazione del segnale dedicate, ad es. Sistema RAIDARSS-3 installato in Giappone sui treni Shinkansen [16].

Il livello trasversale e lo sghembo possono essere ottenuti dall'utilizzo di un sensore che racchiuda un giroscopio di imbardata, un giroscopio di rollio, un accelerometro laterale e un misuratore della velocità del veicolo [17].



(Fonte – Source: [15])

Figura 6 – Sistema UGMS MERMEC basato sul metodo inerziale (in alto) e sul metodo corda-freccia (in basso).

Figure 6 – MERMEC inertial based (top) and optical versine based (bottom) UGMS.

Switzerland, Sweden and the United Kingdom describing the mentioned measurement methods.

Monitoring of track geometry with in-service trains is more and more of interest for the infrastructure managers and railway undertakers.

In recent years, IMs attempted to deploy Unattended Geometry Measurement Systems (UGMS) on in-service vehicles without interrupting the normal traffic [11]. On the market are present both inertial based and optical versine based UGMS for measuring full track geometrical parameters and full rail profile at high speeds (up to 400 km/h for the inertial based UGMS and up to 320 km/h for the versine based ones) (Fig. 6). UGMS is compact and lightweight so

Tuttavia, l'allineamento è difficile da misurare con precisione senza sensori ottici. Si è tentato di utilizzare l'accelerazione laterale del carrello più lo spostamento laterale del carrello rispetto alla faccia interna della ruota, ma la componente di spostamento è risultata troppo piccola per effettuare la misura. L'allineamento come risulta dalla traiettoria in pianta delle sale montate è diverso dall'allineamento del binario. Inoltre, determinare l'allineamento laterale del binario e lo scartamento senza sensori ottici non è pratico [11].

Per affrontare la misurazione dell'allineamento laterale del binario, WESTON [11] ha proposto di utilizzare un modello di dinamica inversa per calcolare il movimento laterale del carrello rispetto al binario mediante la misura della velocità angolare di imbardata del carrello o la sua accelerazione laterale, ottenendo così il valore dell'allineamento laterale per un campo di lunghezze d'onda da circa 35 a 70 m. Tuttavia, questo metodo non è semplice e non può misurare l'allineamento per campi di lunghezze d'onda inferiori, che vanno da 3 a 35 m.

Quindi, la misura del livello longitudinale del binario è semplice grazie alla stretta correlazione tra la dinamica del veicolo (es. accelerazione verticale delle boccole) e i difetti verticali del binario. Pertanto, la misura di questo parametro della geometria del binario può essere effettuata con gli accelerometri, come avviene nell'ICE2 da diversi anni [11].

Altri parametri della geometria del binario, come lo sghembo o l'allineamento, che vengono misurati dai veicoli diagnostici e sono anche essi essenziali per la manutenzione e la sicurezza, sono molto più complicati da monitorare utilizzando gli accelerometri a bordo di treni commerciali.

I sistemi automatici installati sui treni commerciali in grado di misurare tutti i parametri del binario utilizzano sofisticati e costosi sistemi ottico/inerziali (ad esempio Velaro in Russia [18] o MERMEC [14]).

Inoltre, un preciso posizionamento delle misure è importante per verificarne la riproducibilità, in modo da fornire informazioni sufficienti per l'analisi dell'andamento, per prevedere il degrado del binario ed identificarne le cause profonde.

In Fig. 7 viene mostrato lo schema di principio sviluppato dal progetto di ricerca europeo IN2SMART per il monitoraggio e la stima dell'allineamento mediante la misura delle accelerazioni effettuata da un sistema di sensori di bordo.

3. Misura della posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia

3.1. Premessa

Alla luce di quanto sopra esposto, al fine di sviluppare

that it can be installed on in-service vehicles. London Underground was the world's first metro to introduce unattended measuring technology for the monitoring of its 408 km of track [14].

Unlike measuring full track geometrical parameters and full rail profile, monitoring aims at indicating track geometry quality and detecting the local track geometry deviations, rather than reconstruct track geometry parameters, which inspection and measurement systems do. Despite the push for UGMS on in-service vehicles, many track condition monitoring systems that do not provide full geometry have been developed [11] in commercial monitoring systems used by IM as well as in academic and experimental research.

Acceleration measurement along with advance data processing techniques is the most popular option due to the robustness of accelerometers. In comparison, optical sensors, such as laser based, camera based, etc., have to be cleaned regularly to keep them working and thus need special treatment to avoid getting dirt when applied on commercial vehicles. Robustness is the most important factor for the applications on in-service vehicles, as the monitoring system should not require additional maintenance, affecting the reliability and the availability of the vehicles themselves.

If the reconstruction of track geometry parameters is not required, key indicators can reveal the quality of the track geometry. For instance, the standard EN 13848-1:2019 [10] recommends calculation and analysis of mean to peak and/or peak to peak values of axle-box accelerations in the given frequency range, which are linked to dynamic wheel-rail forces and to isolated defects. Standard deviation over a specified distance and a given frequency range can be used for assessing corrugation and/or density of short geometric defects of the rail. Accelerations on bogie and carbody can also be used to represent isolated defects by comparing mean-peak or zero-peak values deviations with thresholds tolerated according to IM standards. As a good example of commercial applications, there are wireless sensors networks which measure axle-box accelerations and track condition dedicated indicators. As soon as the indicator exceeds the threshold, IM are informed that maintenance is required on some track sections.

If the reconstruction of track geometry parameters is required, specific data handling is needed. Longitudinal level and vertical rail profile can be obtained by double integration of vertical accelerations. In terms of feasibility on commercial vehicles and accuracy, the best measurement is probably by the acceleration on the bogie over the axle-box and the vertical displacement from the accelerometer to the axle-box, despite displacement transducers are more vulnerable and expensive than accelerometers [10]. To avoid involving displacement transducers, axle-box mounted accelerometers, in conjunction with dedicated signal processing techniques, can also be used, e.g. RAIDARSS-3 system installed in Japan on Shinkansen train sets [16].

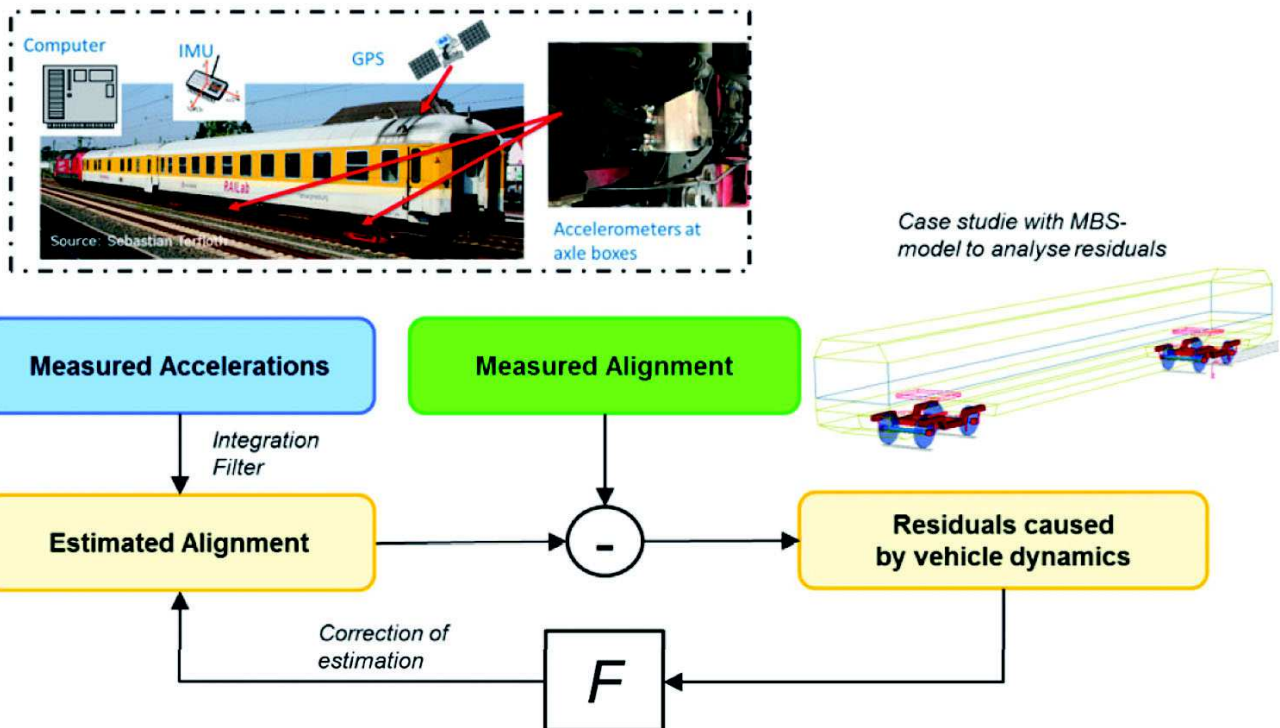


Figura 7 – Schema di principio sviluppato dal progetto di ricerca europeo IN2SMART per il monitoraggio e la stima dell'allineamento mediante un sistema di sensori di bordo.

Figure 7 – Concept developed by IN2SMART project for monitoring/estimating the lateral alignment by measurement of on-board accelerations.

un sistema di monitoraggio della geometria del binario adatto all'impiego sui veicoli commerciali, che sfrutti la misura delle accelerazioni, risulta necessaria la determinazione della posizione relativa ruota-rotai.

Pertanto, questo progetto si focalizza su sistemi in grado di rilevare la posizione ruota-rotai nella direzione trasversale.

Nel 1999, CORAZZA e altri [19] avanzarono una proposta concettuale per il rilievo del punto di contatto fra ruota e rotaia. Secondo questa proposta, una ruota ingaggia la rotaia secondo un angolo α e una distanza trasversale variabili (Fig. 8).

Per rilevare la posizione relativa ruota-rotai, si applica alla boccola un braccio opportunamente sagomato, con due sensori (ottici) di spostamento alle estremità M e N, che rilevano le distanze m e n .

I due punti di riferimento sono allineati sulla traccia del piano definito dalla superficie laterale interna della ruota. Pertanto, la distanza media $(m + n) / 2$ corrisponde alla distanza a , alla quale dev'essere sottratto lo spessore del bordino k per ottenere la distanza ruota-rotai e, conseguentemente, la posizione del punto di contatto.

Un esempio di applicazione dello schema di misura proposto è quello usato per misurare la posizione relativa tra carrello e binario sulla linea B della metropolitana di Roma nell'ambito di una campagna sperimentale svol-

Cross-level and twist can be obtained by sensor fusion of a yaw rate gyro, roll rate gyro, laterally sensing accelerometer and vehicle speed [17].

However, lateral alignment is hard to measure accurately without optical sensors. Lateral acceleration at the bogie plus lateral displacement from the bogie to the wheelback have been tried, but the displacement component was found to be too small. The lateral alignment according to the plan view trajectory taken by the wheelsets is different from the lateral alignment of the track. Furthermore, determining track lateral alignment and gauge without optical sensors is not practical [11].

To address the measurement of track lateral alignment, WESTON [11] proposed to use an inverse dynamics model to calculate the bogie lateral movement on the rail by bogie yaw rate gyro data or lateral acceleration data so that an approximation of 35÷70 m lateral track alignment can be obtained. However, this method is not straightforward and cannot measure short wavelength alignments, ranging from 3 m to 35 m.

Monitoring of the longitudinal levelling of track is a straightforward method thanks to the strong relationship between the vehicle reaction (e.g. vertical acceleration of axle boxes) and the vertical track defects. Therefore, monitoring of track geometry with accelerometers is mainly done for this track geometry parameter only, like in the ICE2 for several years [11].

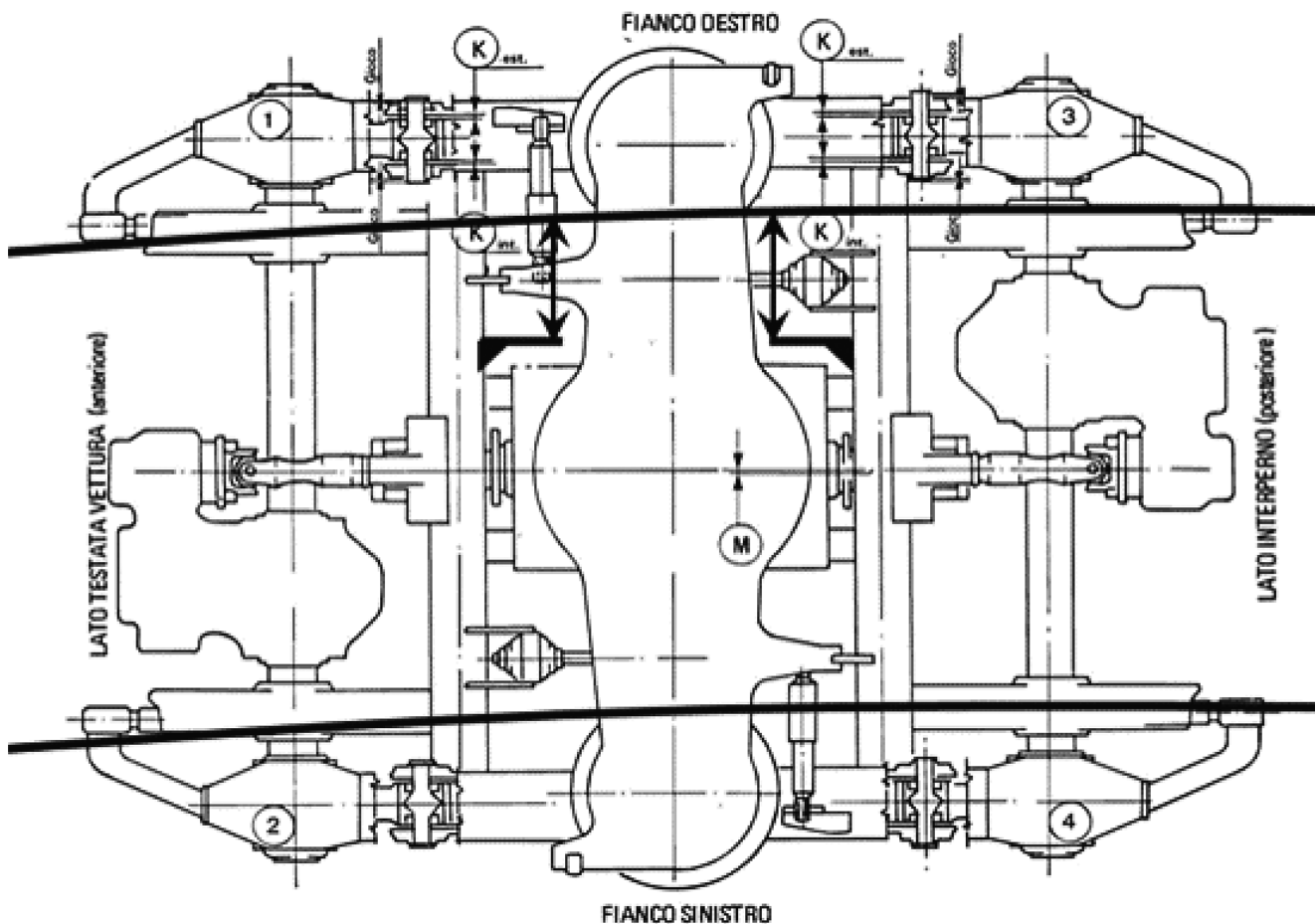


Figura 9 – Distanze rilevate dal sistema di misura proposto.
 Figure 9 – Distances detected by the proposed measurement system.

Ulteriori interessanti risultati relativi ad analisi teoriche su sistemi ferroviari leggeri sono descritti in [21] e [22].

3.2. Linee guida, confronti e soluzioni emergenti

Per lo sviluppo di un sistema di sensori per la misura da bordo della posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia sono stati analizzate alcune tecnologie potenzialmente applicabili.

Le tecnologie più promettenti per la determinazione del punto di contatto fra ruota e rotaia sono sinteticamente descritte in Tab. 3.

In particolare, sono disponibili in letteratura i risultati di due diversi test sull'impiego di termocamere per determinare il punto di contatto fra ruota e rotaia.

Nel 2011 BURSTOW e altri [23] hanno descritto alcuni test effettuati utilizzando una termocamera per determinare se le forze sviluppate nel punto di contatto ruota-rotaia fossero in grado di generare una variazione di temperatura sulla testa della rotaia tale da poter essere rilevata e

For this reason, this project intends to focus on systems that allow the detection of the wheel-track position by avoiding the inertial platforms to localize the geometric parameters.

In 1999, CORAZZA and others [19] proposed a concept for the detection of the contact point between the wheel and the rail. According to the proposed scheme, a wheel engages the rail with an angle α and a variable transversal distance (Fig. 8).

In order to detect the wheel-rail relative position, an appropriately shaped arm is applied to the axle-box, which carries at the two ends M and N two (optical) displacement sensors, which detect the distances m and n .

The two reference points are aligned on the trace of the plane defined by the inner lateral surface of the wheel-tire. Therefore, the average distance $(m + n) / 2$ corresponds to the distance a , to which the thickness of the wheel-flange k must be subtracted to have the wheel-rail distance and, consequently, the position of the contact point.

An example of application of the proposed measurement scheme is that used to measure the relative position

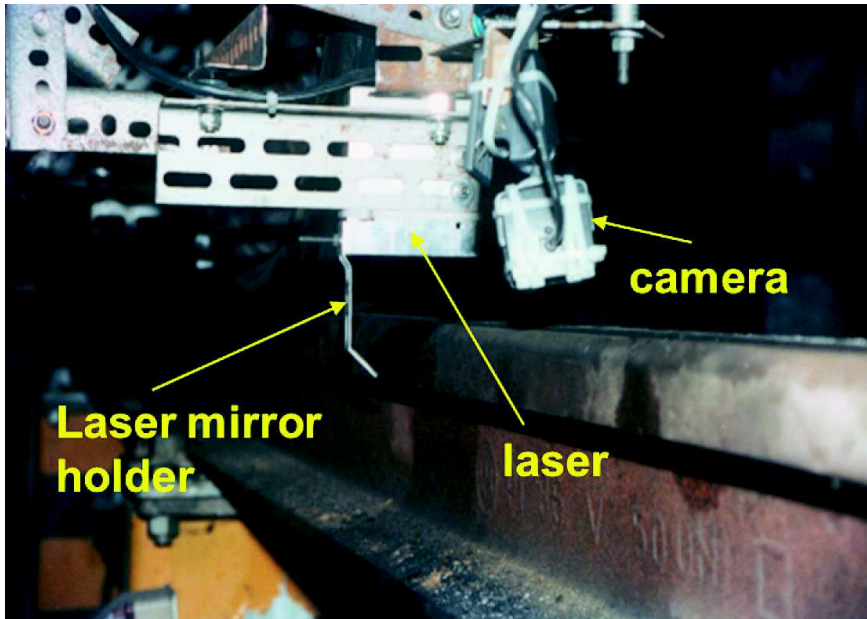


Figura 10 – Sistema di misura montato sul carrello di un veicolo della linea B della metropolitana di Roma.

Figure 10 – Measurement system mounted on the bogie of a Rome Metro B vehicle.

utilizzata per localizzare l'impronta di contatto e possibilmente fornire informazioni sull'entità di tali forze.

Una termocamera è stata montata su un veicolo diagnostico di Network Rail e le immagini sono state registrate durante una corsa da Crewe a Londra (252 km), con buona parte del tragitto effettuato alla velocità massima di linea. La termocamera, una FLIR A320G, capace di acquisire 60 fotogrammi/s, è stata montata sulla cassa del veicolo e puntata verso una ruota della sala montata posteriore del carrello, come mostrato in Fig. 12.

Sebbene il montaggio della telecamera in questa posizione fosse più semplice da realizzare per l'effettuazione del test, non è ideale in quanto le forze di contatto ruota-rotaia più intense sono presumibilmente localizzate sulla sala montata anteriore del carrello. Tuttavia, la possibilità di rilevare con buona sensibilità la temperatura sull'asse posteriore, con forze meno intense, fa ritenere probabile che si possano ottenere risultati affidabili con questo metodo sulla più sollecitata sala anteriore.

L'acquisizione e l'elaborazione delle immagini termiche del punto di contatto tra ruota e rotaia sono rese complesse da diversi fattori:

- sfocatura dell'immagine: la frequenza di acquisizione (60 fotogrammi/s) della termocamera è relativamente bassa e provoca la sfocatura dell'immagine sulla testa della rotaia quando il veicolo viaggia alla massima velocità;
- bassa emissione della rotaia: si stima che solo il 10÷20% della radiazione termica acquisita dalla ter-

of the bogie and the track on line B of the Rome Metro within an experimental campaign carried out in 2002 in order to investigate the wheel-rail contact forces [20].

The aim of the measurement system was to detect the position of the bogie with respect to the track indirectly, by measuring the two distances shown by the two arrows in Fig. 9.

In this case the measurement was carried out using lasers and optical sensors: the laser beam is emitted in the vertical direction downwards, through a mirror placed at 45° it is reflected to illuminate the inner edge of the rail (Fig. 10). Through the optical triangulation, the sensor creates a signal correlated to the total distance covered by the beam.

In Fig. 11, an example of the images provided by the measurement system is shown.

A critical element of the system is the choice of the mirror size:

- should it be too small, it can cause the loss of the linearity between signal and distance;
- should it be too large, it can exceed the loading gauge.

In any case, the system worked effectively in the described application.

Nevertheless, the system is very sensitive to shocks and vibrations, due to the mirror itself, and requires frequent

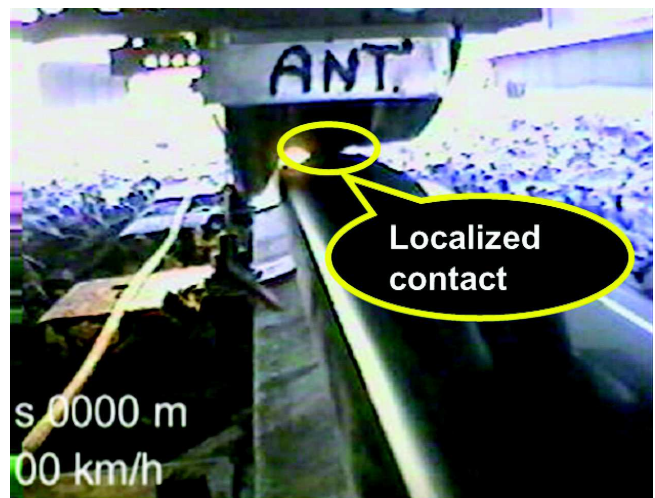


Figura 11 – Ripresa fotografica durante la campagna di misure effettuata sulla linea B della metropolitana di Roma.

Figure 11 – Picture taken during the measurement campaign on Rome Metro B.

Prestazioni delle tecnologie utilizzabili per i sistemi di misura del punto di contatto ruota-rotaia
Performances of possible technologies for wheel-rail contact measuring system

Tecnologia <i>Technology</i>	Vantaggi (+) / Svantaggi (-) <i>Advantages (+) / Disadvantages (-)</i>
Correlazione di Immagini Digitali (DIC) riprese ad alta velocità <i>Digital Image Correlation (DIC) of high-speed filming</i>	(+) Utilizzabile per misure di spostamento ad ogni possibile velocità dei treni (+) Accurata a basse velocità, dove accelerometri, giroscopi e geofoni perdono di affidabilità (-) Suscettibile a vibrazioni dovute al posizionamento della telecamera (causate dall'interazione veicolo- via e dal vento) nonostante i metodi di correzione esistenti (-) Soggetta a potenziali problemi di visibilità (+) <i>Usable for measurements of displacement at any realistic train speed</i> (+) <i>Accurate at lower speeds, where accelerometers, gyroscope and geophones loose reliability</i> (-) <i>Susceptible to vibration at the camera location (ground-borne and wind), despite existing correction methods</i> (-) <i>Potentially problematic sightline</i>
Sistemi laser <i>Laser based systems</i>	Presentano i medesimi vantaggi/svantaggi della tecnologia DIC con un ulteriore svantaggio: (-) Differenze relative di accuratezza Same as DIC plus the following disadvantage: (-) <i>Relative differences in accuracy</i>
Deflettometri a profondità multiple <i>Multi depth deflectometer</i>	(+) Misure assolute di spostamento con shift diverso da zero e posizioni fisse basate sul principio del sistema di trasformazione differenziale a variabili lineari (LVDT) installati in fori superficiali verticali nel sottofondo (-) Necessità di dati fissi di posizione affidabili (-) Installazione difficile o problematica (+) <i>Absolute measurements of displacement with no zero shift and permanent settlements in principle thanks to Linear Variable Differential Transformer (LVDT) based systems installed in shallow vertical borehole in track bed</i> (-) <i>Fixed datum required at depth</i> (-) <i>Difficult or problematic installation</i>
Misure di profili laser <i>Laser profile measurements</i>	(+) Diversi sistemi commerciali incorporati disponibili per la misura delle ruote (-) Sensibile all'ambiente (pioggia, sporcizia) (-) Bassa precisione delle misure del profilo delle ruote, possibili solo a breve distanza e non in linea (-) Laser scanner, movimentato automaticamente nell'area del binario da bracci robot o droni, poco affidabile e costoso (+) <i>Several commercial embedded systems available for wheel profile</i> (-) <i>Sensitive to environment (rain, dirt)</i> (-) <i>Low precision of measurements of rail profile, only possible at short distance and outside the track</i> (-) <i>Unlikely and costly automatically moving laser scanner into the track area by robot arms or drones</i>
Sensore di distanze laser <i>Distance sensor laser</i>	(+) Misure possibili a ogni distanza (+) Alta precisione (-) Misure possibili in punti singoli (+) <i>Measurements at all distances</i> (+) <i>High precisions</i> (-) <i>Measurements on single points</i>
Telecamera a tempo di volo <i>Time of flight camera</i>	(+) Possibilità di effettuare riprese d'insieme (-) Bassa risoluzione (+) <i>Capability to take a whole picture</i> (-) <i>Low resolution</i>
Termocamera <i>Thermographic camera</i>	(+) Utilizzabile senza la necessità di sistemi d'illuminazione aggiuntivi (-) Sensibile alla luce diretta del sole e alla temperatura ambiente (che dovrebbe essere bassa e poco variabile) (-) Soggetta a sfocatura delle immagini (-) Necessità di un software per processare le immagini (+) <i>Usable without additional requirements for the lighting components</i> (-) <i>Sensitive to direct sunlight and ambient temperature (temperature should be low and moderately fluctuating)</i> (-) <i>Subject to image blurring</i> (-) <i>Additional software for imaging processing required</i>
Stereo camera <i>Stereo camera</i>	(+) Acquisizione completa delle immagini ad alta risoluzione (+) Massima accuratezza delle misure in un ampio raggio dall'oggetto misurato (-) Sensibilità alle condizioni d'illuminazione (necessità di un sistema d'illuminazione aggiuntivo) (-) Necessità di un software per processare le immagini (+) <i>Complete imaging acquisition at high resolution</i> (+) <i>Maximum accuracy of measurements in a wide range of distance from the measured object</i> (-) <i>Sensitive to lighting conditions (additional lightening system required)</i> (-) <i>Additional software for imaging processing required</i>

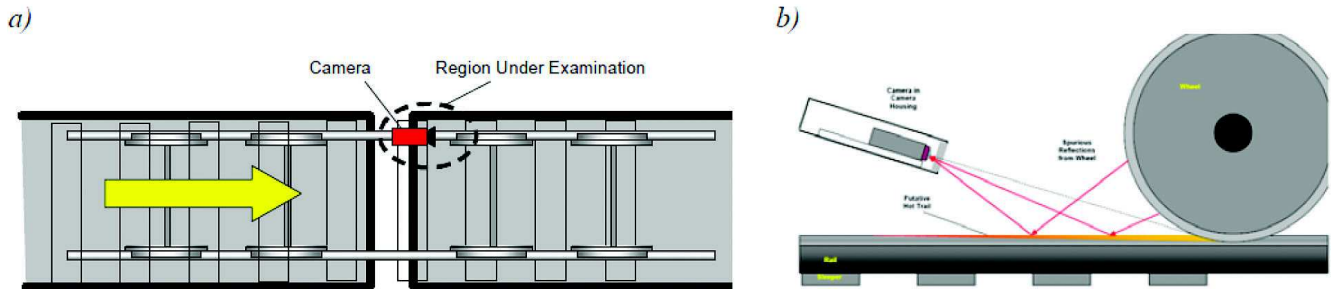


Figura 12 – Posizione della termocamera diretta verso l’asse portante del carrello (a) e dietro il contatto ruota-rotaia (b).
 Figure 12 – Location of the mounted thermal camera directed towards the trailing wheelset of the trailing bogie (a) and the camera directed towards the head of the rail just behind the wheel (b).

termocamera provenga dalla rotaia mentre il resto sia riflesso dall’ambiente;

- emissione variabile di ruota e rotaia: alcune parti della rotaia e della ruota (es. bordino, smussature) sono opache e sporche e presentano un’emissione maggiore, che le rende più luminose in un’immagine termica;
- riflessione dalle superfici pulite di rotaia e ruota: la radiazione riflessa non è diffusa ma può mostrare immagini distorte di altri oggetti (ad esempio il riflesso della ruota può apparire sulla rotaia).

Tuttavia, nonostante queste complessità, nella zona della rotaia dove ci si aspettava l’impronta di contatto, le immagini mostravano un chiaro incremento della temperatura sul tratto di rotaia appena lasciato dalla ruota, non evidente nell’immagine della rotaia prima del contatto con la ruota; indice questo di un incremento di temperatura osservabile come risultato dell’impronta di contatto. Pertanto, il risultato della sperimentazione è che queste misure sono in grado di fornire risultati interessanti e utili sull’interazione ruota-rotaia e le variazioni di temperatura osservate risultano in buona concordanza con i calcoli teorici.

Migliorando il metodo di acquisizione presentato in [23], nel 2019 YAMAMOTO [24] ha proposto una nuova tecnica per localizzare più precisamente il punto di contatto ruota-rotaia installando una termocamera sotto il telaio del carrello in prossimità della testa della rotaia e determinando il punto di contatto sulle immagini termiche attraverso un opportuno algoritmo. I test per verificare la validità della tecnica proposta sono stati svolti sul circuito di prova del *Railway Technical Research Institute* del Giappone, alle velocità di 10, 20 e 30 km/h rispettivamente.

Poiché lo spazio per installare la termocamera sotto il telaio era limitato, è stata utilizzata la compatta e leggera *AIR32 Professional* della *IR System Co. Ltd.*, capace di prestazioni simili a quella utilizzata in [23]. Per facilitare la misura della temperatura al contatto ruota-rotaia, il range di temperatura di acquisizione della termocamera è stato fissato a $20 \div 40^\circ\text{C}$.

Per ottenere una localizzazione accurata del contatto ruota-rotaia con una soluzione di montaggio semplice, la

maintenance. For this reason, it appears suitable for a measurement campaign but much less to be mounted on a vehicle in commercial operation. Therefore, for the application to commercial vehicles, the implementation would require a different technology.

Other interesting related theoretical analysis concerning light rail systems are in [21] and [22].

3.2. Drivers, benchmarks and emerging solutions

Some candidate technologies have been examined for the development of the on-board sensor system able to measure the transversal position of the wheel in relation to the rail.

In Tab. 3, the most promising technologies for determining the contact point between wheel and rail are synthetically described.

In particular, the results of two different tests in which thermographic cameras were used to determine the contact point between wheel and rail are available in the literature.

In 2011, BURSTOW and others [23] described some tests, which were undertaken using a thermal imaging camera to determine whether the forces developed in the wheel-rail contact patch resulted in a change in temperature on the rail head, which could be detected and therefore used to indicate the location of the contact patch and possibly infer information about the magnitude of the wheel-rail forces.

A thermal imaging camera was mounted on a railway vehicle of Network Rail’s track measurement fleet and thermal images were recorded on a journey from Crewe to London (157 miles), with much of the running at (or near) line speed. The camera, a FLIR A320G, which was capable of imaging data at 60 frames/s, was mounted on the vehicle body directed towards the wheel-rail interface behind the trailing wheelset of the bogie, as shown in Fig. 12.

Although this mounting position was convenient for the test, it was not ideal as the highest wheel-rail forces would be expected to be generated at the leading wheelset of the bogie. However, detection of temperature changes from the lower forces developed at the trailing wheelset and the

termocamera è stata montata sotto una delle travi trasversali del telaio, in prossimità della testa della rotaia in modo da inquadrare posteriormente la ruota bersaglio (Fig. 13). Tale soluzione di montaggio, però, risente del fatto che, a causa della flessibilità della sospensione primaria, variabile in funzione del tipo di sospensione, la sala montata ruota rispetto al telaio del carrello attorno all'asse verticale del veicolo; tuttavia, tale spostamento molto ridotto può essere trascurato.

Per comprendere il movimento della sala montata, sono state proposte due tecniche:

- digitalizzare le immagini termiche basandosi sulla relazione fra una scala a pettine di metallo e il numero di pixel, dopodiché il punto di contatto ruota-rotaia può essere localizzato accuratamente con calcoli opportuni;
- fissare due punti di riferimento, rispettivamente sul bordino e sul bordo esterno della superficie di rotolamento della ruota.

I test, effettuati sotto le seguenti tre condizioni:

- minimizzazione della luce solare diretta sull'immagine ripresa dalla termocamera;
- temperatura bassa e poco variabile dell'ambiente, del binario e della zona di contatto ruota-rotaia;
- alto innalzamento della temperatura nel punto di contatto ruota-rotaia;

hanno consentito di localizzare accuratamente il punto di contatto e di intuire il moto della sala montata.

In conclusione, i risultati indicano che è possibile utilizzare la tecnica proposta per localizzare accuratamente il punto di contatto ruota-rotaia a patto che le riprese vengano effettuate in condizioni ambientali favorevoli, ossia svolgendo i test di notte, quando le temperature sono basse e hanno variazioni moderate.

interpretation of the behaviour of this wheelset would give confidence that this method would yield useful results if applied to the leading wheelset.

A thermal image of a wheel running on a rail is very complex because of a number of factors:

- *image blurring: the relatively low frame rate of 60 frames/s results in blurring of the image on the rail head when the vehicle is running at speed;*
- *low emissivity of the rail: it is estimated that 10÷20% of the thermal radiation reaching the camera comes from the rail; the rest of the radiation is reflected from the environment;*
- *variable emissivity of wheel and rail: some parts of rail or wheel (e.g. flange and wheel chamfer) are dull or dirty and have a higher emissivity, which makes them appear brighter in a thermal image;*
- *reflections from the polished rail and wheel surfaces: reflected radiation is not diffuse but can show distorted images of other objects (e.g. a reflection of the wheel can appear on the rail).*

However, despite these complexities in the region on the rail, where the contact patch would be expected, images showed a clear temperature increase on the rail emerging from the wheel, which was not evident in the image of the rail before the wheel enters, indicating that some temperature rise due to the forces in the contact patch was observable. Therefore, the measurements were able to show interesting and useful information about wheel-rail interaction and the observed changes in temperature are in good agreement with theoretical calculations.

By improving the visualization method presented in [23], in 2019, YAMAMOTO [24] proposed a new technique for locating the wheel-rail contact point more precisely, i.e. by installing a thermographic camera under the truck frame close to the rail head and locating the contact point on ther-

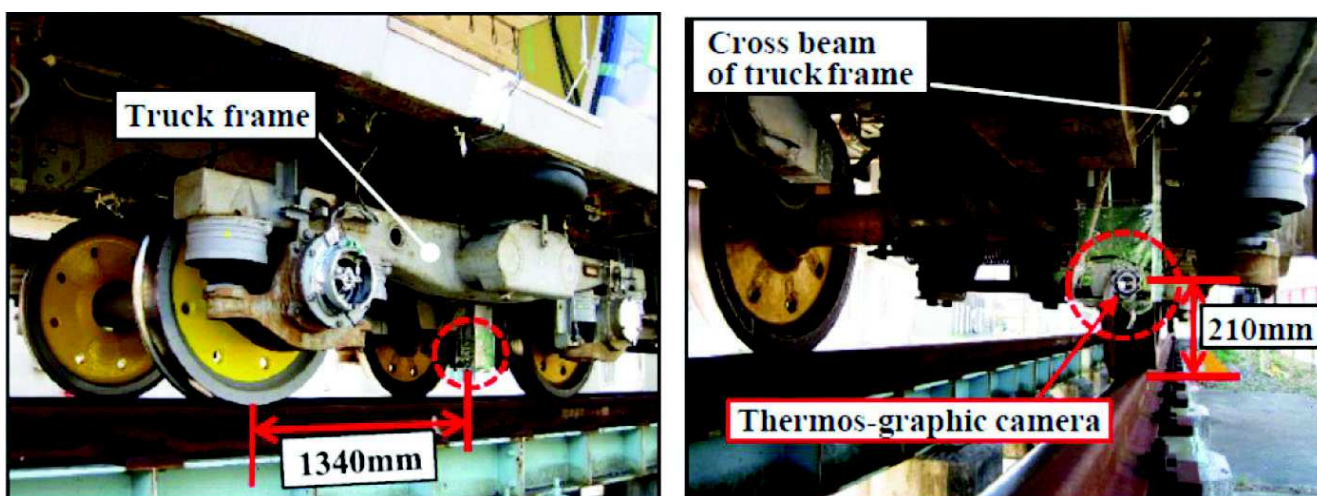


Figura 13 – Termocamera montata sul telaio del carrello.
Figure 13 – Thermographic camera mounted on the truck frame.

4. Specifica dei requisiti

Come menzionato in precedenza, per sviluppare un sistema di monitoraggio della geometria del binario applicabile ai veicoli in servizio commerciale, è essenziale sviluppare un sistema di sensori economico e robusto per la determinazione della posizione relativa ruota-rotaia.

Pertanto, il focus di questa ricerca è lo sviluppo di un sensore di bordo capace di misurare la posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia per supportare il sistema di monitoraggio della geometria del binario da svilupparsi nell'ambito del programma SHIFT2RAIL.

Il primo passo è stato la messa a punto di una *System Breakdown Structure* (SBS) considerando le tecnologie candidate identificate nella ricognizione dello stato dell'arte precedentemente descritta.

In generale, il sistema per il rilievo della posizione relativa ruota-rotaia è articolato nei moduli rappresentati in Fig. 14.

Successivamente, sono stati identificati i requisiti per l'intero sistema e per ogni modulo della SBS, classificandoli in requisiti funzionali, operativi, prestazionali e di sicurezza², come di seguito descritto.

In generale, il sistema per la determinazione della posizione del contatto ruota-rotaia dovrebbe rilevare con continuità la posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia, essere integrato e sincronizzato con il sistema principale di bordo per il rilievo della geometria del binario sviluppato da SHIFT2RAIL e avere la possibilità di essere installato su diverse tipologie di carrelli.

Inoltre, il sistema dovrebbe essere in grado di funzionare a velocità variabili fra 60 e 200 km/h in un ampio spettro di condizioni ambientali (polvere, pioggia, neve, ecc.) e resistere alle sollecitazioni dovute alle vibrazioni nell'intero campo di velocità di esercizio.

Infine, il sistema dovrebbe essere semplice da mantenere ed essere alimentato dai sistemi a bassa tensione dei veicoli o da batterie dedicate alimentate da tecnologie sostenibili e permanenti (ad esempio sistemi di *harvesting* eccitati dalle vibrazioni dei carrelli).

Per quanto riguarda la tecnologia hardware, in generale essa dovrebbe avere un'accuratezza tale da identificare in continuo la posizione del punto di contatto ruota-rotaia. Inoltre, essa dovrebbe acquisire le immagini con una frequenza dello stesso ordine di grandezza delle acquisizioni del sistema principale di rilievo della geometria del binario.

La configurazione prefigurata include una camera, un alloggiamento protettivo, un dispositivo d'illuminazione, un'unità di processamento e immagazzinamento dei dati.

⁽²⁾ Il sistema da sviluppare deve essere sottoposto ad analisi del rischio (Regolamenti UE 402/2013 and 2015/1136).

mal images by computed analysis. Running tests were carried out to verify the validity of the proposed technique on the Japanese Railway Technical Research Institute test line. Tests were carried out at speeds of 10 km/h, 20 km/h and 30 km/h respectively.

As the space for installing the thermographic camera under the truck frame was small, it was used the compact and light-weight AIR32 Professional by IR System Co. Ltd., with similar performances to the one used in [23]. To make it easier to measure the frictional temperature of the wheel-rail, the measurement range of the camera was customized to 20÷40°C.

In order to locate the contact position of wheel-rail accurately with a simple measurement device, the thermographic camera was mounted under one of the cross beams of the truck frame, close to the rail head and viewing the target wheel from behind (Fig. 13). Depending on the type of the axle box suspension, the running wheelset can be displaced in the yawing direction due to bending of the axle spring, however, since this displacement is very small, it could be ignored.

In order to understand wheelset motion, two techniques were proposed:

- *to digitalize thermal images based on the relationship between a metal comb type scale and the number of pixels, after which the wheel-rail contact point could be accurately located through calculation;*
- *to understand wheelset motion by setting two search points, respectively on the wheel flange and on the edge of the wheel tread touching the outside face of the wheel.*

As a result of the running tests, the wheel-rail contact point could be accurately located and insight could also be gained into wheelset motion, when the experiment was carried out under the following three conditions:

- *minimal influence from direct sunlight;*
- *low surface temperature of the earth, track facilities and wheel-rail interface and little fluctuation in temperature;*
- *high wheel-rail flash temperature.*

To conclude, the above results indicate that it is possible to use to the proposed technique to locate the wheel-rail contact point accurately if the photographing is done in suitable environmental conditions, i.e. performing test runs at night when temperatures are low and moderately fluctuating.

4. Specification of requirements

As mentioned before, in order to develop a track geometry monitoring system applicable to vehicles in normal commercial service, it is essential to develop a robust and cheap sensor system to determine the wheel-rail relative position.

Le interfacce di comunicazione sono i modi fisici di comunicare fra i sensori e la rete o altri dispositivi. Una possibile configurazione comprende un RS-232, fibre ottiche, cavi coassiali e bus.

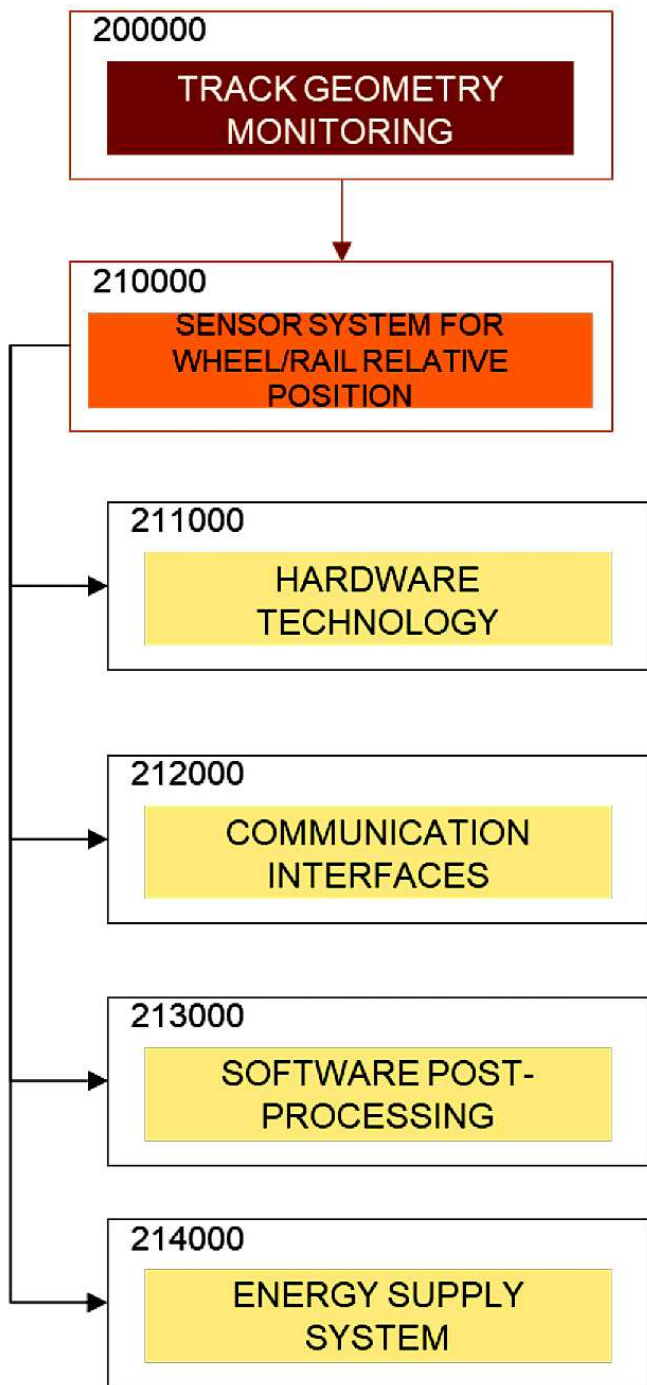


Figura 14 – Moduli del sistema per la misura della posizione relativa ruota-rotaia.

Figure 14 – Modules of system for measurements of wheel-rail relative position.

Therefore, the focus of this research is the development of an on-board sensor system able to measure the transversal position of the wheel in relation to the rail in order to support the track geometry monitoring system to be developed by SHIFT2RAIL.

The first step was the definition of a System Breakdown Structure (SBS) by considering the candidate technologies identified in state-of-the-art recognition described above.

In general, the system for wheel-rail relative position detection is articulated into the modules represented in Fig. 14.

Later, for the whole system and for each module of the above reported System Breakdown Structure, requirements have been identified and classified into functional, operational, performance and safety², as described below.

In general, the system for determining wheel-rail contact position should determine continuously the transversal position of the wheel in relation to the rail, must be integrated and synchronized with the main on-board system for detecting the track geometry to be developed by SHIFT2RAIL and should be able to be installed on different typologies of bogies.

Moreover, the system should be able to work on in-service trains at 60÷200 km/h under a large set of weather and environmental conditions (dust, rain, snow, etc.), it must be able to withstand the stresses due to vibrations in the entire operation speed range.

Finally, the system should be easily maintained and should be powered by the low-voltage power supply system of the wagons or by dedicated batteries powered both by sustainable and permanent technologies (e.g. harvesting systems using the vibration of bogies).

Regarding the hardware technology to be selected, in general it should have an accuracy such as to identify continuously the position of the wheel-rail contact point. Moreover, it should acquire images with a frame rate of the same order of magnitude of the acquisitions made by the main on-board system for detecting the track geometry.

The envisaged configuration includes camera, protection case, illumination device, image processing unit and data storage.

The communication interfaces are the physical ways to communicate between sensors and network or other devices.

A possible configuration includes RS.232, optical fibres, coaxial cables and buses.

The communication protocol used to communicate with the server or the database should be safe and based on

⁽²⁾ The system to be developed must be subject to a risk assessment (EU Regulations 402/2013 and 2015/1136).

Il protocollo utilizzato per la comunicazione con il server o il database dovrebbe essere sicuro e basato sulla norma EN 50159 o su un protocollo pubblico quale il TCP con tutti i livelli definiti.

Il processamento dei dati dovrebbe basarsi su algoritmi per la determinazione della posizione trasversale della sala montata rispetto al binario, determinando i punti di contatto ruota-rotai e l'angolo di attacco.

In particolare, in funzione della tecnologia hardware utilizzata, potrebbe essere necessario un algoritmo per la correzione degli spostamenti relativi della sala montata rispetto al telaio del carrello o alla cassa, sui quali sono montati gli altri sensori per il monitoraggio del binario.

Il sistema di alimentazione dovrebbe prevedere batterie dedicate alimentate da tecnologie continue e sostenibili (ad esempio sistemi di *harvesting* eccitati dalle vibrazioni dei carrelli) e/o dai sistemi a bassa tensione dei veicoli.

In Tab. 4 sono riportati tutti i requisiti identificati per il sistema di sensori in generale e per tutti i moduli che lo compongono. I requisiti sono raggruppati in funzione della SBS, che include quattro livelli di dettaglio.

5. Sviluppi futuri della ricerca: confronto dei sistemi di sensori e loro installazione

Il passo successivo è rappresentato dallo sviluppo di strumenti analitici per il confronto fra i possibili sensori e la loro installazione per scegliere le tecnologie più appropriate e le relative procedure d'implementazione.

Questo problema può essere affrontato con i metodi della ricerca operativa, quali quelli di supporto decisionale multicriteri.

Il metodo identificato, basato sui requisiti individuati in precedenza, si compone delle seguenti fasi:

- selezione dei criteri essenziali per il confronto dei sensori e della loro installazione: ciò sarà realizzato mediante la raccolta di giudizi esperti attraverso un'indagine basata su questionari, nei quali gli esperti interpellati potranno ordinare i criteri e verificheranno la compatibilità e l'armonizzazione dei risultati;
- post-processamento dei risultati dell'indagine per identificare un processo di ponderazione capace di produrre un ordinamento dei criteri individuati;
- qualificazione dei criteri attraverso test di laboratorio in ambienti simulati per assegnare valori quantitativi ai criteri stessi;
- classificazione dei sistemi di sensori compatibili attraverso tecniche di ordinamento per similarità alla soluzione ideale (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution = TOPSIS*) implementate per scegliere le più appropriate soluzioni considerando misure sia dirette sia indirette.

I criteri di ponderazione attesi includeranno presta-

standard EN 50159 or a public protocol like TCP with all layers defined.

Data processing should be based on algorithms for determining the transversal position of the wheelset in relation to the rail by determining the wheel-rail contact points and the angle of attack.

In particular, depending on the hardware technology used, an algorithm could be necessary to correct the relative displacement of the wheelset with respect to the bogie frame or to the carbody, on which the other sensors for track monitoring are mounted.

Energy supply system should include dedicated batteries, powered by both sustainable and permanent technologies (e.g. harvesting systems using the vibration of bogies) and/or low-voltage power supply system of the wagon.

Finally, in Tab. 4 type and textual description of all the requirements identified for the system and its modules are listed. Requirements are grouped according to the System Breakdown Structure, which includes 4 levels of detail.

5. Next research steps: comparison of sensor systems and their installation

The next step is to develop analytical tools for comparison of sensors and their installation to choose the most suitable technologies and related implementation procedures.

It is a problem that can be tackled by operation research approaches, such as multi-criteria decision-making methods.

The identified method, basing on the identified requirements to fulfil, consists of the following steps as follows:

- *selection of the most essential criteria for comparison of sensors and their installation: it will be possible by expert judgements summarized in a survey based on questionnaires, where experts will rank criteria and will check the compatibility and the harmonisation of the results;*
- *post-processing of survey results to identify significance criteria generating a weighting process able to produce a ranking of criteria;*
- *qualification of criteria by laboratory testing in simulated environments aiming at assign quantitative values to criteria themselves;*
- *ranking of identified compatible sensor systems by Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) implemented to choose the most suitable solutions considering both direct and indirect measurements.*

The expected weighting criteria will include performances in terms of functionality, integration and safety, as well as easiness of installation, cleaning and calibration need, weather and environmental conditions, energy-efficiency and sustainability, measurement accuracy, etc.

Tabella 4 – Table 4

System Breakdown Structure del sistema di monitoraggio della geometria del binario proposto
System breakdown structure of the proposed track geometry monitoring system

Livelli di dettaglio <i>Levels of detail</i>				Testo <i>Text</i>	Tipo <i>Type</i>
L1	L2	L3	L4		
200000				Monitoraggio della geometria del binario <i>Track Geometry Monitoring</i>	Intestazione <i>Heading</i>
	210000			Sistema di sensori della posizione relativa ruota-rotaia <i>Sensor System for wheel-rail relative position</i>	Intestazione <i>Heading</i>
				Dovrebbe determinare in continuo la posizione trasversale della ruota rispetto alla rotaia <i>Should determine continuously the transversal position of the wheel in relation to the rail</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dev'essere integrato e sincronizzato con il sistema principale di bordo per il rilievo della geometria del binario <i>Must be integrated and synchronized with the main on-board system for detecting the track geometry</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe poter operare su treni commerciali a velocità di 60÷200 km/h <i>Should be able to work on commercial trains at 60÷200 km/h</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe essere installabile su diverse tipologie di carrelli <i>Should be able to be installed on different typologies of bogies</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe poter operare in un ampio range di condizioni meteorologiche e ambientali (polvere, pioggia, neve, ecc.) <i>Should be able to be operated under a large set of weather and environmental conditions (dust, rain, snow, etc.)</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe essere manutenibile con semplicità <i>Should be easily maintained</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Deve sopportare le sollecitazioni dovute alle vibrazioni nell'intero range di velocità <i>Must be able to withstand the stresses due to vibrations in the entire operation speed range</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Non deve eccedere la sagoma limite dei veicoli <i>Must not exceed the vehicle's loading gauge</i>	Sicurezza <i>Safety</i>
				Dovrebbe avere un basso consumo energetico <i>Should be low energy consuming</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe essere alimentato da tecnologie continue e sostenibili e/o dal sistema a bassa tensione del veicolo <i>Should be powered both by means of sustainable and permanent technologies and/or low-voltage power supply system of the wagon</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		211000		Tecnologia Hardware <i>Hardware technology</i>	Intestazione <i>Heading</i>
			211100	Sistema di acquisizione delle immagini <i>Image Monitoring System</i>	Intestazione <i>Heading</i>
				Dovrebbe comprendere camera, alloggiamento protettivo, dispositivo d'illuminazione, unità di processamento e immagazzinamento dei dati <i>Should be composed of camera, protection case, illumination device, image processing unit and data storage</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				Dovrebbe avere un'accuratezza tale da identificare in continuo la posizione del punto di contatto ruota-rotaia <i>Should have an accuracy such as to identify continuously the position of the wheel-rail contact point</i>	Funzionale <i>Functional</i>
				La camera dovrebbe acquisire le immagini con frequenza dello stesso ordine di grandezza delle acquisizioni effettuate dal sistema principale di bordo per il rilievo della geometria del binario <i>Should have an accuracy such as to identify continuously the position of the wheel-rail contact point</i>	Prestazione <i>Performance</i>

(segue... - follows...)

(segue tab. 4 - follows tab. 4)

			L'alloggiamento dovrebbe proteggere la camera e i dispositivi di illuminazione da polvere, sporcizia e possibili impatti con il ballast durante la corsa <i>Protection case should protect cameras and illumination devices from dust, dirt and possible impacts with the ballast during train running</i>	Operativo <i>Operational</i>
			L'unità di processamento dati non dovrebbe essere posizionata in prossimità della camera e dei dispositivi di illuminazione <i>Processing unit should not be placed with cameras and illumination system</i>	Operativo <i>Operational</i>
			L'unità di processamento dati dovrebbe sincronizzare i dati acquisiti dalla camera con quelli acquisiti dal sistema principale di bordo per il rilevamento della geometria del binario <i>Processing unit should synchronize data acquired from camera with those acquired by the main on-board system for detecting the track geometry</i>	Funzionale <i>Functional</i>
			Il sistema di immagazzinamento dovrebbe avere una capienza tale da contenere i dati acquisibili fra due soste consecutive del veicolo in deposito <i>Data storage should be able to store the amount of data acquired by the cameras between 2 successive stops of the train in depot</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		212000	Interfacce di Comunicazione Communication interfaces	Intestazione Heading
		212100	Unità di processamento - Camera Processing Unit - Camera	Intestazione Heading
			Dev'essere robusta e capace di gestire l'alta densità di dati generati dalla camera <i>Must be robust and manage the high density of data generated by the camera</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		212200	Unità di processamento - Immagazzinamento dati Processing Unit - Data storage	Intestazione Heading
			Dev'essere robusta e capace di gestire l'alta densità di dati generati dalla camera <i>Must be robust and manage the high-density data generated by the cameras</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		212300	Immagazzinamento dati - Database server Data storage - Database server	Intestazione Heading
			Dovrebbe gestire il trasferimento dei dati processati dall'unità di bordo al database server <i>Should manage the transfer of data processed by the on-board processing unit to the database server</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		213000	Software di post-processamento Post-Processing software	Intestazione Heading
			Gli algoritmi dovrebbero determinare la posizione trasversale della sala rispetto al binario a partire dal punto di contatto ruota-rotaia e dall'angolo di attacco <i>Algorithms should determine the transversal position of wheelset in relation to rail by determining the wheel-rail contact points and the angle of attack (yaw)</i>	Funzionale <i>Functional</i>
			Gli algoritmi dovrebbero determinare lo spostamento laterale della sala rispetto al telaio del carrello <i>Algorithms should determine the lateral displacement of wheelset with respect to bogie frame</i>	Funzionale <i>Functional</i>
			Gli algoritmi dovrebbero operare nell'unità di processamento <i>Algorithms should be executed in the processing unit</i>	Funzionale <i>Functional</i>
		214000	Sistema di alimentazione Energy supply system	Intestazione Heading
			Dovrebbe essere costituito da batterie dedicate alimentate da tecnologie sostenibili e continue (ad esempio sistemi di <i>harvesting</i> eccitati dalle vibrazioni dei carrelli) e/o dai sistemi a bassa tensione del veicolo <i>Should be constituted by dedicated batteries powered both by sustainable and permanent technologies (e.g. harvesting systems using the vibration of bogies) and/or low-voltage power supply system of the wagon</i>	Funzionale <i>Functional</i>

zioni in termini di funzionalità, integrazione e sicurezza, ma anche di semplicità di installazione, necessità di pulizia e calibrazione, sensibilità alle condizioni meteorologiche e ambientali, efficienza e sostenibilità, accuratezza della misura, ecc.

6. Conclusions

The initial results of Assets4Rail research for track geometry monitoring by systems suitable for being mounted on commercial trains, allowed to identify the System

6. Conclusioni

I risultati iniziali del progetto di ricerca Assets4Rail, per il monitoraggio della geometria del binario effettuata da treni commerciali, hanno consentito di costruire una struttura (SBS) e definire i requisiti di un sistema di sensori di bordo per il rilievo della posizione relativa ruota-rotaia e di individuare le tecnologie più adatte e promettenti per la sua realizzazione.

Queste ultime sono state identificate fra i sistemi di:

- misura diretta, quali laser, camere ad alta velocità, stereo camere e termocamere;
- misura indiretta, quali quelle attraverso le accelerazioni e la riflessione ultrasonica.

In questo ampio spettro di sistemi di misura applicabili alla determinazione della posizione relativa ruota-rotaia, le tecnologie più promettenti per i futuri sviluppi sembrano essere le stereo camere e le termocamere.

In particolare, le termocamere sono già state impiegate con buoni risultati in due sperimentazioni, sebbene per ridotti campi di velocità e senza affrontare la maggior parte delle condizioni atmosferiche che possono incontrarsi durante il normale esercizio di un treno commerciale.

Questo articolo si propone come il primo di una serie, che descriveranno i successivi sviluppi del progetto ASSETS4RAIL per quanto riguarda il monitoraggio della geometria del binario. In particolare, le fasi principali dello sviluppo del prospettato sistema di sensori di bordo saranno:

- selezione della tecnologia più appropriata per realizzare il sistema di rilievo della posizione relativa fra ruota e rotaia per mezzo di strumenti analitici per il confronto dei sensori e del loro montaggio;
- test di laboratorio preliminari della tecnologia selezionata;
- progettazione del sistema di sensori;
- validazione del sistema di sensori e dimostrazione fino ai *Technology Readiness Level* (TRL) 5-6;
- valutazione dell'impatto del sistema sviluppato come supporto alle decisioni di *asset management*.

Breakdown Structure (SBS) and the requirements of an on-board sensor system for wheel-rail relative position detection and the most appropriate and promising candidate technologies to realize it.

They have been identified in the fields of:

- *direct measurement systems, such as lasers, high speed cameras, stereo cameras and thermographic cameras;*
- *indirect measurements, such as accelerations and ultrasonic reflection.*

In this large set of systems, for the specific target of measurements of wheel-rail relative position, the most promising technologies to be taken into consideration for next developments, seem to be stereo cameras and thermographic cameras.

In particular, thermographic cameras have already been tested with good results in two experiments, even if for a restricted speed range and without facing most atmospheric conditions that may occur during normal operation of a commercial train.

This paper is expected to be the first in a series that will describe Assets4Rail project further developments with regard to track geometry monitoring. In particular, the main phases of the development of the envisaged on-board sensor system to support track geometry measurements will be described:

- *the selection of the most suitable technology to realize the system for wheel-rail relative position detection by means of analytical tools for the comparison of sensors and their installation;*
- *the preliminary laboratory tests of the selected technology;*
- *the design of the sensor system;*
- *the sensor system validation testing and demonstration in TRL (Technology Readiness Levels) 5-6 environment;*
- *the evaluation of the impact of the developed system on support asset management decisions.*

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] <http://www.assets4rail.eu/about/>
- [2] SHIFT2RAIL – STRATEGIC MASTER PLAN. Version 1.0 – 31 March 2015
- [3] https://projects.shift2rail.org/s2r_ip3_n.aspx?p=IN2SMART
- [4] <http://www.in2rail.eu/>
- [5] www.mermecgroup.com
- [6] www.dmatorino.it
- [7] www.esimgroup.com
- [8] www.amg-tech.it

- [9] www.mariniimpianti.it
- [10] EN 13848-1:2019; *Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 1: Characterization of track geometry*
- [11] WESTON P., ROBERTS C., YEO G., STEWART E., (2015), “*Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles*”, *Vehicle System Dynamics*, 53:7, 1063-1091, DOI: 10.1080/00423114.2015.1034730
- [12] EN 13848-2:2006: “*Railway applications - Track - Track geometry quality - Part 2: Measuring systems - Track recording vehicles*”
- [13] RIVAS: Railway Induced Vibration Abatement Solutions, EU FP7 project - *Deliverable 2.5: Overview of Methods for Measurement of Track Irregularities Important for Ground-Borne Vibration - 2013*
- [14] Mermec, (2012), “*London Underground chose MERMEC Unattended Geometry Measuring Systems (UGMS) for line inspection*”, Online resource: <http://www.mermecgroup.com/de/pageview2.php?i=730&sl=1> , accessed on 21.08.2020
- [15] Mermec (2020), trackmeasurement - Track Geometry, online resource: <http://www.mermecgroup.com/inspect/track-measurement/185/track-geometry.php> , accessed on 21.08.2020
- [16] TSUNASHIMA H., NAGANUMA Y., MATSUMOTO A., MIZUMA T., MORI H. – “*Condition Monitoring of Railway Track Using In-Service Vehicle*” - *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics* 3(1), March 2012
- [17] LEWIS R.B., RICHARDS A.N., (1988), “*A compensated accelerometer for measurement of railway track cross level*” - *IEEE Trans Vehicle Technologies*; 37(9): 174–178
- [18] Infotrans, (2015), online resource: http://www.infotrans-logistic.ru/page.htm?title=MIBIS_Velaro, accessed on 21.08.2020
- [19] CORAZZA G.R., LICCIARDELLO R., MALAVASI G., MARCONE M., (1999), “*La ruota come sensore di interazione ruota-rotaia*” - *Ingegneria Ferroviaria*, n. 9.
- [20] LICCIARDELLO R., (2002), “*Il rilievo in linea dei parametri d’interazione ruota/rotaia come strumento di ricerca. Identificazione sperimentale dei parametri fondamentali dei modelli teorici di simulazione*” – Tesi di Dottorato in Ingegneria Ferroviaria XV ciclo presso l’Università degli Studi di Roma “La Sapienza”.
- [21] BRUNER M., RIZZETTO L., (2008), “*Dynamic simulation of tram-train vehicles on railway track*” – *WIT Transactions on the Built Environment* n. 101: 491-501
- [22] RIZZETTO L., (2009), “*Safety and geometric compatibility of the track of the tram-train in railroads*” – *Ingegneria Ferroviaria*, n. 5: 457-476
- [23] BURSTOW M., DE PODESTA M., PEARCE J., (2011), “*Understanding wheel/rail interaction with thermographic imaging*” - *Proceedings of the 22nd IAVSD Symposium*, paper N. 105, Manchester.
- [24] YAMAMOTO D., (2019), “*Improvement of Method for Locating Position of Wheel/Rail Contact by Means of Thermal Imaging*”. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI)*, Vol. 60, n. 1, February.