



**POLITECNICO DI MILANO**  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA  
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA

**ANALISI TEORICO E SPERIMENTALE DI  
UN SISTEMA PER ISPEZIONE DI  
IMPALCATI**

**Relatore**

Ing. Hermes Giberti

**Correlatore**

Ing. Marco Tarabini

**Tesi di laurea di**  
Steve Manieri 802547

Anno Accademico 2013/2014



*Alla mia famiglia*



## RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della mia Tesi; in primo luogo il Prof. Giberti, per la sincerità dei suoi consigli, ed il Prof. Tarabini, per essersi sempre mostrato disponibile per rispondere alle mie domande, anche al di fuori dell'orario di lavoro. Vorrei inoltre ringraziare gli Ingegneri Silvio Giancola e Matteo Giovanni Gritti per l'aiuto che mi hanno dato nei loro rispettivi settori, l'Ing. Matteo Sgrenzaroli di Gexcel S.r.l., sempre molto disponibile e professionale. A loro va la mia gratitudine, anche se a me spetta la responsabilità per ogni errore contenuto in questa Tesi.

E' doveroso infine ringraziare la mia famiglia, cui la Tesi è dedicata, per la pazienza ed il supporto che hanno avuto nei miei confronti, e tutti i miei amici, il cui aiuto, anche se inconscio, è stato fondamentale per arrivare fino in fondo.



# INDICE

<b>RINGRAZIAMENTI</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>1 Ispezione di ponti e viadotti: metodologie tradizionali e stato dell'arte</b>	<b>3</b>
1.1 Ispezione di ponti e viadotti con metodologie tradizionali . . . . .	3
1.1.1 La procedura di ispezione standard . . . . .	4
1.1.2 Problematiche dei sistemi di ispezione tradizionali . . . . .	5
1.2 Stato dell'arte in ambito di automazione del processo di ispezione . . . . .	6
1.2.1 Tecniche di visione . . . . .	6
1.2.2 GPR e SLDV . . . . .	8
1.2.3 Modelli 3D e Laser Scanner . . . . .	9
1.3 Una metodologia alternativa di scansione degli impalcati . . . . .	15
1.3.1 Linee guida emerse dallo studio di fattibilità . . . . .	15
1.3.2 Il Laser Scanner 3D CAM2 Faro . . . . .	17
1.3.3 Il presente lavoro . . . . .	19
<b>2 Sintesi della catena di misura</b>	<b>21</b>
2.1 Il contesto operativo . . . . .	21
2.1.1 Il by-bridge . . . . .	21
2.1.2 Il camion . . . . .	23
2.1.3 Oscillazioni del sistema . . . . .	24
2.2 Idea alla base della catena di misura . . . . .	25
2.3 Dal contesto operativo al modello matematico . . . . .	26
2.3.1 Terne di riferimento necessarie alla ricostruzione della traiettoria del laser scanner . . . . .	27
2.3.2 Modello matematico generalizzato del sistema . . . . .	29
2.4 Definizione della catena di misura . . . . .	30
2.4.1 Misure indirette . . . . .	34

2.4.2	Riepilogo degli strumenti utilizzati e della catena di misura . . . . .	39
2.5	Il modello SimMechanics . . . . .	41
2.5.1	Caratteristiche del modello . . . . .	41
<b>3</b>	<b>Valutazione della catena di misura</b>	<b>45</b>
3.1	Deformazioni del modello 3D dovute ad errori sulla traiettoria . . . . .	45
3.1.1	Errori di posizione . . . . .	46
3.1.2	Errori di orientamento . . . . .	48
3.2	Accuratezza attesa sulla ricostruzione della traiettoria del laser scanner	51
3.2.1	Errori di traiettoria dovuti all'ipotesi di piccole rotazioni . . . . .	51
3.2.2	Errori di traiettoria dovuti all'incertezza degli strumenti . . . . .	53
3.2.3	Errori di traiettoria dovuti a calibrazioni e setup . . . . .	55
3.3	Valutazioni conclusive . . . . .	58
<b>4</b>	<b>Determinazione della distribuzione attesa dei punti nel modello 3D</b>	<b>59</b>
4.1	Simulazioni in Matlab/Simmechanics . . . . .	59
4.1.1	Parametri delle simulazioni . . . . .	60
4.2	Risultati delle simulazioni . . . . .	61
4.2.1	Effetto della distanza tra laser scanner ed impalcato . . . . .	62
4.2.2	Effetto della velocità del carrello . . . . .	62
4.2.3	Effetto dell'orientamento del laser scanner . . . . .	63
4.2.4	Effetto della Risoluzione e della Qualità del laser scanner . . . . .	66
4.3	Parametri di moto consigliati . . . . .	66
<b>5</b>	<b>Setup sperimentale</b>	<b>69</b>
5.1	Caratteristiche tecniche degli strumenti di misura . . . . .	69
5.2	Dispositivi per l'ancoraggio degli strumenti . . . . .	72
5.3	Mezzo di movimentazione del Laser Scanner: il carrello . . . . .	75
5.4	Il varo della passerella . . . . .	79
5.5	Calibrazione della catena di misura . . . . .	82
5.5.1	Procedura di allineamento dei puntatori laser e distanziometri . . . . .	83
5.5.2	Piano degli spot superiore . . . . .	85
5.5.3	Calibrazione delle telecamere . . . . .	85
5.5.4	Scansioni statiche della catena di misura assemblata . . . . .	87
5.5.5	Correzione via software degli angoli di beccheggio ed imbardata del carrello . . . . .	87
5.6	Architettura del sistema di acquisizione dei dati . . . . .	89

---

<b>6</b>	<b>Prove sperimentali</b>	<b>95</b>
6.1	L'importanza dei test sperimentali . . . . .	95
6.2	Prove sperimentali al Politecnico di Milano . . . . .	96
6.3	Prove sperimentali eseguite a Ventimiglia . . . . .	102
6.4	Analisi dei dati sperimentali: osservazioni generali e post-trattamento dei dati . . . . .	103
6.5	Risultati della ricostruzione della nuvola di punti . . . . .	116
6.5.1	Confronto qualitativo con l'acquisizione statica . . . . .	118
6.5.2	Stima dell'accuratezza . . . . .	122
6.6	Discussione dei risultati ottenuti . . . . .	123
6.6.1	Densità di punti e risoluzione . . . . .	124
6.6.2	Accuratezza della ricostruzione . . . . .	125
6.7	Riepilogo dei risultati . . . . .	129
<b>7</b>	<b>Soluzioni alternative</b>	<b>131</b>
7.1	Sistema di scansione con dispositivi scanner stazionari . . . . .	131
7.1.1	Vantaggi e svantaggi del nuovo sistema di scansione . . . . .	131
7.1.2	Modifiche alla catena di misura . . . . .	132
7.1.3	Calibrazione del sistema . . . . .	133
7.1.4	Simulazioni relative alla densità di punti ottenibile . . . . .	133
7.1.5	Accuratezza attesa . . . . .	135
7.2	Il Kinect e la SLAM . . . . .	135
	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>137</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>139</b>



## ELENCO DELLE FIGURE

1.1	Ispezione di impalcati mediante passerella . . . . .	4
1.2	Diversi sistemi di ispezione di impalcati mediante tecniche di visione. . .	7
1.3	Tecnologia GPR per la scansione di impalcati [32]. . . . .	8
1.4	Laser triangolatori . . . . .	10
1.5	Laser a tempo di volo . . . . .	11
1.6	Finestre utili di scansione. . . . .	12
1.7	Modello 3D di un impalcato, ottenuto tramite acquisizione statica terrestre [16]. . . . .	13
1.8	Scansioni dinamiche con piattaforme inerziali e GPS. . . . .	14
1.9	Immagine CAD del carrello messo a punto nella fase di studio di fattibilità. . . . .	16
1.10	E870 CAM2 della Faro. . . . .	17
1.11	Caratteristiche tecniche dello scanner E870 CAM2, prodotto da Faro. . .	18
1.12	Modi di operare dello strumento . . . . .	19
2.1	Giunti che permettono la distensione del by-bridge . . . . .	22
2.2	Distensione del by-bridge durante una delle prove preliminari . . . . .	23
2.3	Dimensioni della sezione di passaggio della passerella . . . . .	24
2.4	Modello a corpi rigidi del by-bridge, con evidenziati i giunti in cui si concentra il moto, A e B. . . . .	25
2.5	CAM2 Edge ScanArm 3D, dispositivo prodotto dalla Faro . . . . .	26
2.6	Schema delle terne utilizzate per la ricostruzione della traiettoria del laser scanner; i vettori in rosso rappresentano i “link” che collegano le terne. . . . .	27
2.7	Esempio di pattern planare. . . . .	35
2.8	Movimento degli spot sul piano di proiezione . . . . .	37
2.9	Schematizzazione della colonna come asta rigida incernierata alla traversa	38
2.10	Posizionamento degli strumenti di misura su camion, by-bridge e carrello.	40

2.11	Immagine dell'animazione del modello SimMechanics; nell'immagine camion, montante e traversa sono sostituiti da corpi fittizi. . . . .	42
2.12	Particolare del modello SimMechanics raffigurante la modellazione degli spot . . . . .	43
2.13	Modello SimMechanics . . . . .	44
3.1	Scansione di un impalcato planare simulata in Matlab. Le spire dell'elica sono state approssimate con delle linee. . . . .	46
3.2	Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione x. . . . .	47
3.3	Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione y. . . . .	47
3.4	Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione z. . . . .	48
3.5	Ricostruzione errata della scansione di un impalcato planare, a causa di un errore nella determinazione del rollo del carrello. . . . .	49
3.6	Ricostruzione della scansione di un impalcato planare con un offset nel beccheggio del carrello. . . . .	50
3.7	Effetto di errori angolari non costanti. . . . .	51
3.8	Errori di traiettoria dovuti all'ipotesi di piccole rotazioni. . . . .	53
3.9	Valutazione delle incertezza degli strumenti di misura della catena, individuate tramite datasheet e prove sperimentali. . . . .	54
3.10	Errori di traiettoria dovuti alla combinazione dell'ipotesi di piccole rotazioni e dell'incertezza degli strumenti. . . . .	55
3.11	Effetto di un errore nel dimensionamento della parte camion/montante/traversa	56
3.12	Errore di traiettoria dovuto ad un offset dell'ampiezza di $1^\circ$ sull'angolo $\alpha$ dell'inclinometro inferiore . . . . .	57
3.13	Errore di traiettoria dovuto ad un offset dell'ampiezza di $1^\circ$ sull'angolo $\beta$ dell'inclinometro inferiore . . . . .	57
4.1	Sottosistema SimMechanics utilizzato per simulare il laser scanner . . . .	60
4.2	Densità della nuvola di punti ottenuta per i parametri di riferimento; il rettangolo giallo rappresenta l'ampiezza della superficie dell'impalcato scansionata. . . . .	61
4.3	Effetto dell'orientamento del laser scanner . . . . .	63
4.4	Effetto della disanza tra laser scanner ed impalcato . . . . .	64
4.5	Densità della nuvola di punti per velocità del carrello pari a $0.5 \frac{m}{s}$ . . . .	65
4.6	Densità della nuvola di punti per orientamento del laser scanner pari a $45^\circ$	65
4.7	Disposizione attesa dei punti della nuvola sull'impalcato, per vari valori di Risoluzione . . . . .	67

5.1	L'odometro utilizzato nelle prove sperimentali. . . . .	69
5.2	I distanziometri. . . . .	70
5.3	L'inclinometro SEIKA SBG2U . . . . .	71
5.4	Le telecamere . . . . .	72
5.5	Ancoraggio dell'odometro al camion. . . . .	72
5.6	Distanziometro alla base del montante. . . . .	73
5.7	Struttura di sostegno del piano degli spot superiori, in fase di assemblaggio. . . . .	74
5.8	Fissaggio delle due piastre con annessi laser, distanziometro ed inclinometro al by-bridge . . . . .	75
5.9	Il carrello, durante una delle prove sperimentali tenutasi al Politecnico . . . . .	76
5.10	Particolare inferiore del carrello . . . . .	77
5.11	Strutture porta faro e telecamere . . . . .	77
5.12	Soluzione di mozzo sviluppata. . . . .	78
5.13	Il motore vincolato al telaio. . . . .	78
5.14	Effetto del disallineamento dei puntatori laser sul piano del carrello. . . . .	84
5.15	Regolazione del piano degli spot; si possono notare i pannelli neri utilizzati per proteggere dalla luce del sole. . . . .	85
5.16	I calibratori per le telecamere del carrello, con i relativi pattern . . . . .	86
5.17	Terne di riferimento in gioco; per semplicità in figura sono state trascurate le rotazioni di rollio e beccheggio. . . . .	88
5.18	Compact RIO della National Instruments, con installati alcuni moduli . . . . .	89
5.19	Screenshot del programma Labview utilizzato per la gestione del moto del carrello tramite il Compact RIO . . . . .	90
5.20	Compact DAQ della National Instruments . . . . .	91
5.21	Single-Board RIO della National Instruments . . . . .	91
5.22	Schema riassuntivo dell'architettura del sistema di acquisizione . . . . .	92
5.23	Fissaggio del PC sul by-bridge (nella scatola metallica); si possono notare sopra il PC le antenne per la rete Wireless, e sotto il Compact DAQ. . . . .	93
6.1	Test sperimentali al Politecnico di Milano . . . . .	96
6.2	Schema semplificato delle terne in gioco durante le prove al Politecnico. . . . .	97
6.3	Confronto tra il profilo del terreno individuato manualmente, e tramite il carrello; l'errore massimo compiuto risulta inferiore a 1 cm. . . . .	99
6.4	Immagine reale della facciata del Politecnico ricostruita. . . . .	99
6.5	Ricostruzione della facciata del Politecnico tramite acquisizioni dinamiche con il laser scanner. . . . .	100
6.6	Vista laterale della ricostruzione della facciata del Politecnico tramite acquisizioni dinamiche con il laser scanner. . . . .	101

6.7	L'impalcato di Ventimiglia . . . . .	102
6.8	Nomenclatura utilizzata nell'analisi dei dati. . . . .	103
6.9	Spettro delle misure rilevate dagli inclinometri. . . . .	104
6.10	Dato acquisito dal distanziometro inferiore. . . . .	105
6.11	Distanziometro alla base del montante . . . . .	106
6.12	Angoli determinati dai due inclinometri . . . . .	107
6.13	Zoom dell'angolo $\alpha$ di fig.6.12, in corrispondenza del picco maggiore. . . . .	108
6.14	Coordinate dello spot del distanziometro sul piano superiore, come sono state restituite dalle telecamere. Le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento della telecamera . . . . .	109
6.15	Coordinate dello spot del distanziometro sul piano superiore, dopo essere state trattate. . . . .	109
6.16	Angoli relativi tra colonna e montante, determinati tramite inclinometri e tramite gli spot . . . . .	110
6.17	Il carrello durante il moto sulla passerella; sono evidenti i tre spot luminosi allineati del distanziometro (al centro) e dei puntatori laser. In figura inoltre, per maggior chiarezza, è stato riportato l'orientamento della terna della telecamera sul piano degli spot. . . . .	111
6.18	Coordinate dello spot del distanziometro sul piano del carrello, in funzione dello spostamento del carrello determinato tramite il distanziometro. I dati in figura sono relativi ad una intera prova sperimentale, la quale comprende più passaggi del carrello. . . . .	112
6.19	Traiettoria seguita dal carrello sulla passerella, vista dall'alto. . . . .	113
6.20	Effetto della correzione dell'inclinazione laterale dei laser sulle coordinate degli spot. . . . .	113
6.21	Effetto della correzione dell'inclinazione verticale dei laser sulle coordinate degli spot. . . . .	114
6.22	Effetto della correzione del disallineamento dei laser sul rollio del carrello. . . . .	115
6.23	Angoli di beccheggio ( $\beta$ ) ed imbardata ( $\gamma$ ) del carrello rispetto alla passerella. . . . .	115
6.24	Ricostruzione della traiettoria e dell'orientamento della terna del laser scanner nello spazio; il segmento rosso corrisponde all'asse delle x, il verde alle y, il blu alle z. . . . .	116
6.25	Il modello 3D dell'impalcato, come appare nel software SCENE di elaborazione di dati per laser scanner. . . . .	117
6.26	Particolare del modello 3D dell'impalcato. Si può notare come le aree in grigio uniforme presenti sulle superfici verticali delle travi siano zone d'ombra, cioè zone per le quali non si hanno punti acquisiti. . . . .	118
6.27	Scansione dell'impalcato, con evidenziati i piani utilizzati per le sezioni. . . . .	119
6.28	Sezione verticale 1: in grigio è indicata la nuvola di punti individuata tramite acquisizione statica, in rosso quella tramite acquisizione dinamica. . . . .	119

6.29	Sezione verticale 2: in grigio è indicata la nuvola di punti individuata tramite acquisizione statica, in rosso quella tramite acquisizione dinamica. In particolare, il tratto in figura è uno zoom che riporta la sovrapposizione di due passaggi del carrello distinti. . . . .	119
6.30	Sezione orizzontale della nuvola di punti. . . . .	120
6.31	Mappa di planarità in corrispondenza del pilastro verticale. . . . .	120
6.32	Mappa di planarità della superfici dell'impalcato. . . . .	121
6.33	Particolare della superficie dell'impalcato; a sinistra la ricostruzione dinamica, a destra quella statica. Si evidenzia che le zone bianche sono zone d'ombra, prive di punti acquisiti. . . . .	121
6.34	Particolare della superficie laterale del pilastro; a sinistra la ricostruzione dinamica, a destra quella statica. Si nota come le righe bianche nell'acquisizione dinamica siano dovute a mancanza di punti acquisiti, probabilmente legata ad una eccessiva velocità del carrello, o al beccheggio dello stesso. . . . .	122
6.35	Distribuzione dell'errore sull'impalcato, dato fornito da Gexcel S.r.l. . . . .	122
6.36	Particolare della sezione in larghezza dell'impalcato; in figura sono riportati il modello statico, il modello dinamico con singolo passaggio del carrello, ed il modello dinamico con più passaggi del carrello. . . . .	124
6.37	Scostamenti tra modello dinamico e statico, nella sezione longitudinale dell'impalcato. Sull'ascissa è riportata la coordinata $y$ rispetto al sistema di riferimento assoluto, la quale appunto coincide con la direzione di avanzamento del camion. . . . .	124
6.38	Simulazione della densità di punti ottenibile con una distanza tra impalcato e scanner di 3m, singolo passaggio del carrello, e risoluzione dell'immagine pari a $1m^2$ . . . . .	125
6.39	Scansioni effettuate dal Faro in modalità sferica, con indicati i punti utilizzati per la determinazione delle matrici di rototraslazione delle terne. . . . .	127
6.40	Angolo di imbardata del carrello fornito dalla telecamera di terra utilizzando due diversi settaggi dell'algoritmo "edge detection". . . . .	128
7.1	Scanner fisso e zone d'ombra. . . . .	132
7.2	Densità di punti attesa per laser scanner posizionati a $90^\circ$ . . . . .	134
7.3	Densità di punti attesa per laser scanner posizionati a $45^\circ$ . . . . .	134
7.4	Disposizione dei laser scanner lungo la passerella nelle simulazioni effettuate. . . . .	135
7.5	La seconda generazione del dispositivo Kinect. . . . .	136



## INTRODUZIONE

L'ispezione di impalcati per la verifica del relativo stato di salute è attualmente un'operazione svolta in maniera manuale, e dunque lenta, costosa, soggettiva. Per questo motivo molta ricerca, negli ultimi anni, si è concentrata in questo settore al fine di determinare un'efficace alternativa automatizzata. Tra le varie tecnologie disponibili, la scansione laser 3D è molto promettente; essa infatti consente di ottenere ricostruzioni 3D affidabili, ripetibili, complete ed intuitive.

In questa tesi viene teorizzato e sperimentato un sistema di scansione per impalcati basato su tecnologia laser scanner 3D. Tale sistema, al fine di limitare i costi di implementazione, prevede l'utilizzo delle stesse passerelle sottoponte mobili utilizzate per le ispezioni manuali; esso inoltre prevede di effettuare le scansioni in maniera dinamica, movimentando durante l'acquisizione il dispositivo scanner mediante un carrello servozionato sulla passerella. La natura dinamica delle acquisizioni implica la necessità, al fine di ricostruire in maniera corretta il modello 3D dell'impalcato, di conoscere posizione ed orientamento del laser scanner in ogni istante; per tale motivo parte fondamentale del sistema di scansione è un'apposita catena di misura basata principalmente su puntatori laser e sistemi di visione, la quale permette di determinare sia le oscillazioni della passerella, che il moto del carrello su di essa. Le potenzialità del sistema sono state valutate tramite simulazioni in ambiente Matlab/SimMechanics e prove sperimentali.



## CAPITOLO 1

### **Ispezione di ponti e viadotti: metodologie tradizionali e stato dell'arte**

In questo primo Capitolo la tesi viene contestualizzata introducendo la tematica dell'ispezione di ponti e viadotti, illustrando le metodologie tradizionali attualmente utilizzate, ed evidenziandone i difetti.

A seguito della descrizione dello stato della ricerca in ambito di automatizzazione di tale processo, viene presentata una metodologia di ispezione semi-automatica basata sulla sostituzione del lavoro dell'uomo mediante l'utilizzo di un Laser Scanner 3D.

#### **1.1 Ispezione di ponti e viadotti con metodologie tradizionali**

Ponti e viadotti sono esposti a diversi fattori che portano inevitabilmente al deterioramento dei materiali e degli elementi strutturali di cui sono costituiti; tra questi l'intensità della circolazione stradale, l'ambiente aggressivo, i fattori climatici, i carichi eccessivi, gli urti occasionali e soprattutto l'inadeguato sistema di smaltimento delle acque meteoriche.

Poiché le conseguenze del degrado possono manifestarsi in maniera repentina portando, nei casi più gravi, anche al collasso definitivo della struttura, assume un'importanza fondamentale la programmazione di un'adeguata cadenza delle verifiche ispettive in grado di diagnosticare le eventuali forme di degrado in atto, l'estensione e la loro evoluzione futura.

Di norma a queste attività segue la messa a punto di uno specifico programma di interventi teso a ricondurre l'opera ad un adeguato standard prestazionale e di sicurezza. Tutte le attività devono venire espletate secondo normativa vigente, ovvero:

- circolare del Ministero LL.PP. n. 6736-61-A1 del 19/7/1967;
- circolare del Ministero LL.PP e Presidenza del Consiglio Superiore del S.T.C. n. 34233 del 25/2/1991 B.U. CNR n. 165 del 30/12/1993.

### 1.1.1 La procedura di ispezione standard

Generalmente le ispezioni di ponti e viadotti si svolgono in maniera manuale, seguendo le seguenti fasi [1]

**Fase preliminare:** l'attività è volta al riconoscimento delle tipologie strutturali presenti ed al loro raggruppamento in insiemi simili (pile, pulvini, travi, traversi, ecc.). Per ogni insieme di opere o componenti strutturali viene quindi redatta una lista di anomalie e, ad ogni anomalia, viene assegnato, in relazione al tipo di elemento strutturale interessato, un coefficiente di classe con relativi gradi di severità. Fa seguito, infine, la preparazione degli schemi grafici delle singole parti strutturali componenti ciascuna opera, pronti a ricevere la digitalizzazione delle anomalie per come rilevate nel corso dell'ispezione.

**Fase d'ispezione:** l'attività è svolta da ispettori qualificati sotto la supervisione di un coordinatore, utilizzando per l'accesso alle strutture passerelle sottoponte, cestelli elevatori e scale a sfilo. Osservando tutte le superfici visibili degli elementi strutturali (pile, pulvini, travi, ecc.) si classificano le anomalie, riportandole su schemi grafici predisposti ed assegnando ad ognuna di esse la classe di gravità.



(a) Camion con annessa passerella.



(b) Operatori durante un'ispezione.



(c) Operatori durante un'ispezione.

**Figura 1.1:** Ispezione di impalcati mediante passerella

**Esecuzione di prove e di prelievi:** l'attività di ispezione viene di norma integrata mediante l'esecuzione di prove non distruttive quali:

- misura della resistenza a compressione dei calcestruzzi mediante ultrasuoni e/o sclerometro;
- misura dello spessore del copriferro mediante pacometro;
- misura dello spessore di carbonatazione del calcestruzzo con il metodo della fenolftaleina.
- misura, in laboratorio, del contenuto in cloruri previo prelievo di campioni con trapano o microcarotaggio.

**Fase di restituzione:** le anomalie registrate sugli schemi grafici di campagna vengono riportate fedelmente sul file grafico corrispondente. L'attività è assistita da un software che provvede a separare su piani diversi le anomalie a seconda delle classi di importanza (tipo di anomalia) e gravità (giudizio dell'ispettore). Il software procede quindi a calcolare l'area effettiva delle anomalie riscontrate e a calcolare il valore indice secondo un algoritmo di calcolo che tiene conto dei coefficienti di classe, di gravità e dell'estensione dell'anomalia in termini di area effettivamente interessata. Tutti i valori indici così determinati sono inseriti in un data base che consente poi di effettuare raggruppamenti, medie, incidenze statistiche, valori massimi, minimi, ecc.

### 1.1.2 Problematiche dei sistemi di ispezione tradizionali

Le procedure ispettive, da quanto emerso, per essere affidabili devono perseguire i seguenti obiettivi:

- ridurre sensibilmente l'influenza di interpretazioni soggettive da parte dei singoli ispettori;
- ottenere, oltre a giudizi di merito, anche un numero o indice di valutazione significativo delle osservazioni effettuate;
- rendere consultabili i dati delle ispezioni, anche mediante un archivio informatizzato.

Il raggiungimento di tali obiettivi, tuttavia, nel caso di ispezione manuale è strettamente legato all'abilità dell'operatore e alle condizioni di ambientali ed operative nella quali l'ispettore si trova a lavorare. Inoltre, la fase di restituzione con la creazione di archivi informatizzati è lenta e laboriosa, in quanto richiede un sostanziale intervento umano.

Un'altra problematica è la sicurezza; ponti e viadotti, infatti, possono essere di dimensioni molto elevate, ed obbligare dunque gli ispettori ad operare su passerelle sottoponte posizionate a diversi metri dal suolo.

Tutte queste motivazioni hanno portato alla ricerca di metodologie di ispezione alternative, più automatizzate e meno dipendenti dal lavoro dell'uomo.

## 1.2 Stato dell'arte in ambito di automazione del processo di ispezione

Il processo di automazione dell'ispezione di impalcati richiede la soluzione di tre problematiche fondamentali:

- individuazione di una tecnologia che sia in grado di fornire informazioni sullo stato di salute degli impalcati;
- progettazione di un sistema più o meno automatico che permetta alle tecnologia di accedere all'intradosso dell'impalcato;
- post-processing dei dati acquisiti che sia in grado di sostituirsi al giudizio dell'ispettore, individuando i difetti, e favorendo la fase di restituzione e catalogazione.

Di seguito si propone una breve panoramica dello stato dell'arte in tale ambito, usando come punto di riferimento la tecnologia impiegata per ricavare informazioni sullo stato di salute dell'impalcato.

### 1.2.1 Tecniche di visione

Attualmente molta ricerca si sta svolgendo sull'utilizzo di **tecniche di visione**, basate sull'acquisizione e l'analisi di fotografie dell'opera ispezionata; le immagini infatti permettono di documentare con facilità e precisione difetti superficiali dell'impalcato, quali crepe o distaccamenti di materiale.

Per le acquisizioni delle immagini è stato ipotizzato un gran numero di metodologie diverse (e creative). Per citare alcuni esempi, in [21] delle camere CCD sono state installate su un manipolatore a quattro assi posizionato su di un camion, ed in grado di raggiungere la parte inferiore dell'impalcato; in [22] al contrario è stato utilizzato un UAV, ed è stata implementata una opportuna logica di controllo del volo al fine di garantire che tutto l'impalcato venga ispezionato, nel minor tempo possibile; infine, in [15] è stato sviluppato un sistema di ispezione di peso contenuto basato su cavi e pulegge, il quale permette agli operatori di scattare fotografie dell'intradosso dell'impalcato restando nella parte superiore della struttura. (fig.1.2) .

Per quanto riguarda il post-processing, una volta acquisite varie immagini dell'opera da ispezionare è possibile implementare degli algoritmi in grado di individuare automaticamente le zone deteriorate, confrontando le diverse proprietà di riflessione della luce delle varie aree [28]; tali algoritmi possono essere anche molto complessi, tanto che in alcuni casi si cerca anche di stimare lunghezza e profondità della crepa dalle immagini bidimensionali [24].

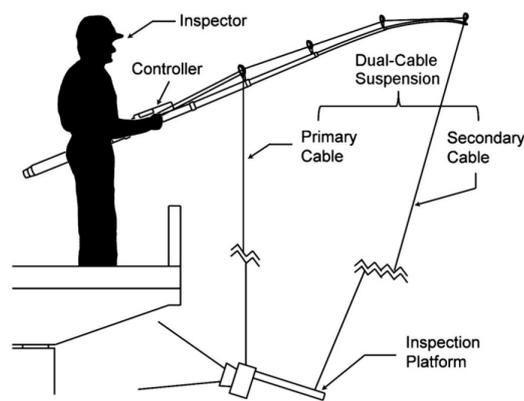
Esistono inoltre una grande quantità di pubblicazioni relative al trattamento delle immagini, finalizzate all'implementazione di sistemi informatici di gestione dei dati [29], in grado di registrare nella maniera più sistematica possibile le immagini acquisite, facilitando così la "fase di restituzione".



(a) Manipolatore a 4 gdl



(b) UAV



(c) Sistema di ispezione basato sull'utilizzo di cavi e pulegge.

**Figura 1.2:** Diversi sistemi di ispezione di impalcati mediante tecniche di visione.

Uno dei difetti delle tecniche di visione è la bidimensionalità dei dati raccolti. In verità, esiste un ramo delle misure di visione, denominato **fotogrammetria**, finalizzato alla ricostruzione di modelli 3D a partire da delle fotografie scattate da angolature diverse di un determinato oggetto; sono già in commercio software specializzati per tali funzioni, ed un esempio è Autodesk 123D Catch. In generale, tali tecnologie sono adatte ed utilizzate per oggetti di piccole dimensioni; tuttavia esistono in letteratura esempi di acquisizioni di facciate di edifici o cantieri, basati su tecniche stereoscopiche, cioè effettuate con una coppia camere al posto di una, nel tentativo di ottenere delle nuvole di punti tridimensionali [26] [31].

La fotogrammetria, purtroppo, è difficilmente utilizzabile per la ricostruzione di intradossi di impalcati. Affinché la ricostruzione 3D possa avvenire correttamente, infatti, è necessario individuare nelle fotografie delle texture che permettano di combinare efficacemente le immagini. Purtroppo, gli intradossi sono generalmente molto uniformi, sia dal punto di vista geometrico che cromatico, e ciò complica l'utilizzo di tali tecnologie in quest'ambito.

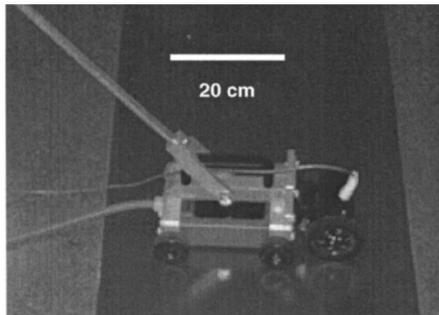
Un'altra problematica è legata alla difficoltà di avere immagini dell'intero impalcato con risoluzione sufficientemente elevata da poter individuare i difetti; a riguardo è

possibile citare alcune tentativi di sintetizzare le varie immagini locali scattate dalle camere, al fine di creare delle grande immagini globali del sistema scansionato [30]. I risultati tuttavia anche in questo caso non sempre sono soddisfacenti, in quanto la già citata mancanza di texture rende complessa l'operazione di sintetizzazione.

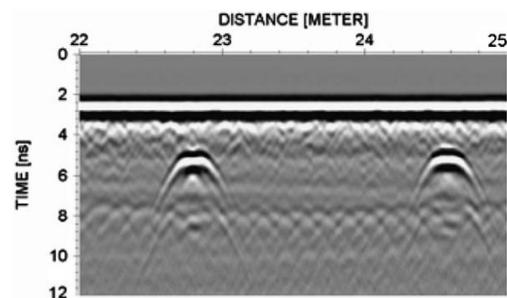
### 1.2.2 GPR e SLDV

Il **GPR** (Ground Penetrating Radar), anche detto georadar, è un'altra tecnologia sul quale attualmente si sta svolgendo molta ricerca. Esso è un dispositivo non invasivo attualmente utilizzato principalmente nello studio del primo sottosuolo, e si basa sull'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse nel terreno. Tale metodo fornisce, a partire da una profondità di alcuni metri fino al limite di alcune decine di metri, una "sezione" del terreno indagato dalla superficie. La tecnica georadar viene frequentemente utilizzata per l'individuazione plano-altimetrica dei sottoservizi interrati quali condotte idriche, fognarie e del gas, per la ricerca di strutture murarie archeologiche sepolte.

Recentemente l'utilizzo di tale strumento si sta affermando anche per l'ispezione di impalcati ed opere stradali, in particolare con l'obiettivo di individuare la profondità dei tondi, verificare lo spessore dell'asfalto ed individuare danni al di sotto della superficie dell'opera [32] [33].



(a) Un dispositivo GPR per la scansione manuale di impalcati



(b) Esempio di dato raccolto da un GPR



(c) Utilizzo di dispositivi GPR installati su autovetture.

**Figura 1.3:** Tecnologia GPR per la scansione di impalcati [32].

In questo caso, a differenza dei sistemi di visione, la ricerca è ancora fortemente incentrata sulla dimostrazione dell'effettiva efficacia dello strumento per l'ispezione degli impalcati; per quanto riguarda invece le rilevazioni stradali, esistono diverse pubblicazioni relative all'utilizzo dello strumento installato su delle autovetture in grado di circolare normalmente in strada, dunque senza la necessità di bloccare il traffico. [27]

E' degno di nota il tentativo di implementare delle ispezioni non distruttive volte all'individuazione di difetti interni basate sull'utilizzo di sorgenti sonore direzionali ad alta potenza e **SLDV** (Scanning Laser Doppler Vibrometer) [5], il quale mira ad affiancarsi a dispositivi già citati come il GPR.

### 1.2.3 Modelli 3D e Laser Scanner

Le tecnologie fino ad ora nominate sono in grado di fornire informazioni importanti, ma generalmente di natura locali. I sistemi automatizzati precedentemente descritti, inoltre, lamentano l'assenza di una efficace procedura di localizzazione del difetto nell'impalcato, la quale tuttavia è molto importante in quanto gli stessi difetti possono avere gradi di pericolosità molto diversi, a seconda di dove sono posizionati sulla struttura. Per questo motivo crescente interesse si sta manifestando verso quelle tecnologie che consentono la rilevazione di un modello 3D completo dell'impalcato. Grazie al progresso tecnologico, l'accuratezza di tali tecnologie sta migliorando a tal punto da rendere interessante l'utilizzo di tali tecniche non solo per finalità semplicemente descrittive, ma anche diagnostiche. Esse inoltre garantiscono:

- possibilità di integrare informazioni provenienti da altri sistemi di ispezione, quali telecamere e GPR, garantendo una precisa collocazione del difetto sulla struttura;
- informazioni oggettive e comparabili da una scansione alla successiva;
- possibilità di individuare, confrontando scansioni successive, variazioni macroscopiche di forma dell'impalcato.

Sono già disponibili in letteratura studi relativi al trattamento automatico delle nuvole di punti al fine di individuare automaticamente alcuni parametri di controllo utili al monitoraggio della struttura, cosiddetti "surveying goals" (diminuzione delle sezioni, deformazioni macroscopiche) [10].

Tra le suddette tecnologie di rilevamento, oltre alla già citata fotogrammetria, vi è il **laser scanner 3D**, il quale è molto adatto per ottenere modelli 3D di oggetti di grandi dimensioni, ed al quale verrà dedicato il seguente paragrafo.

Il Laser Scanner 3D è uno strumento che permette di ricostruire un modello 3D virtuale dello spazio tridimensionale che lo circonda.

Esso si può in generale considerare frutto dell'unione di un distanziometro ed un insieme di apparati meccanici di alta precisione. Il primo permette di conoscere la distanza dal dispositivo di un punto nello spazio, mentre la parte meccanica permette di conoscere la direzione lungo la quale avviene l'acquisizione; in questo modo, è di fatto possibile individuare la posizione del punto acquisito nello spazio. Ripetendo velocemente tale acquisizione per direzioni diverse, si ottiene un insieme di punti sparsi nello spazio in

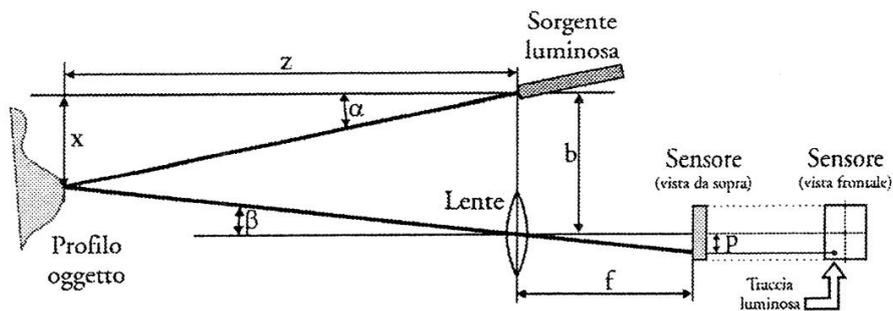
modo più o meno regolare, che comunemente viene chiamata “nuvola di punti”. Congiuntamente alla misurazione della distanza, i sensori dei distanziometri sono generalmente in grado di misurare anche la riflettanza<sup>1</sup> di ciascun punto-oggetto alla frequenza propria del raggio (in genere nella zona spettrale dell’infrarosso), restituendo dunque un’immagine in scala di grigio.

I laser scanner oggi presenti sul mercato sono molti ed ognuno di essi presenta caratteristiche differenti nel principio di acquisizione, nella precisione ottenibile, nella portata e nella velocità di acquisizione; è comunque possibile fornire una prima classificazione di questi strumenti basandosi sul principio di acquisizione utilizzato dal sensore di distanza; in particolare, possiamo distinguere tra laser scanner a triangolazione, e laser scanner a tempo di volo.

**Laser scanner a triangolazione:** sono usati generalmente per oggetti di piccole dimensioni, ed un’applicazione tipo è la prototipazione rapida o Rapid Prototyping, grazie alla quale un manufatto creato in maniera artigianale o già esistente in natura viene rilevato nel suo complesso per produrne poi copie in maniera automatica ed industriale. Grazie alle elevate precisioni, gli scanner triangolatori trovano largo impiego nella catalogazione di reperti archeologici o nel rilievo di monumenti importanti quali statue, fontane, bassorilievi.



(a) Esempi di laser triangolatori.



(b) Schema di principio di uno scanner 3D a triangolazione.

**Figura 1.4:** Laser triangolatori

Il principio di funzionamento è piuttosto semplice [19]: si immagina di avere una sorgente luminosa ed un sensore piano vincolati rigidamente tra loro. La sorgente laser genera un sottile fascio di luce che produce un puntino luminoso sull’oggetto da rilevare; in

<sup>1</sup>ossia il rapporto tra l’intensità del flusso radiante riflesso e l’intensità del flusso radiante incidente su una superficie. La riflettanza è dunque una grandezza adimensionale.

questo modo sorgente, centro di proiezione sul sensore, e puntino luminoso riflesso dalla superficie vengono a formare un triangolo. Con riferimento fig.1.4, essendo il sistema calibrato, si possono considerare noti a priori sia l'inclinazione  $\alpha$  della sorgente luminosa che la distanza  $b$  tra sorgente e sensore. La stima della posizione del puntino focalizzato sul piano del sensore consente quindi di misurare la distanza  $p$ , attraverso la quale facilmente risalire all'angolo  $\beta$ :

$$\tan\beta = \frac{p}{f}$$

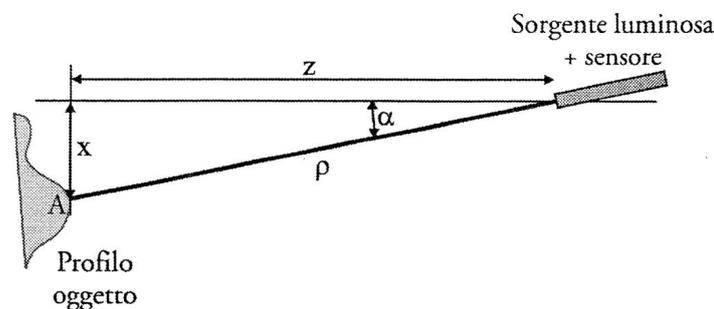
E' dunque ora possibile individuare tutti i parametri del triangolo.

In gergo, si usa affermare che questi scanner sono utilizzati per indoor objects; infatti i principali rilievi vengono fatti in laboratori, officine o in locali chiusi. Questa necessità è dettata sia dalla dimensione dell'oggetto, il quale deve essere dell'ordine della distanza tra laser e sorgente, sia dalle problematiche dovute alla luce ambientale. Questi dispositivi garantiscono in genere un'incertezza dell'ordine di 0.1 mm.

**Laser scanner a tempo di volo:** anche denominati tramite l'acronimo TOF (Time Of Flight), sono i più utilizzati in campo topografico, architettonico ed ambientale.



(a) Esempi di laser a tempo di volo.



(b) Schema di principio di uno scanner 3D a tempo di volo.

**Figura 1.5:** Laser a tempo di volo

Il principio di funzionamento [19] prevede l'invio di un impulso laser e la successiva

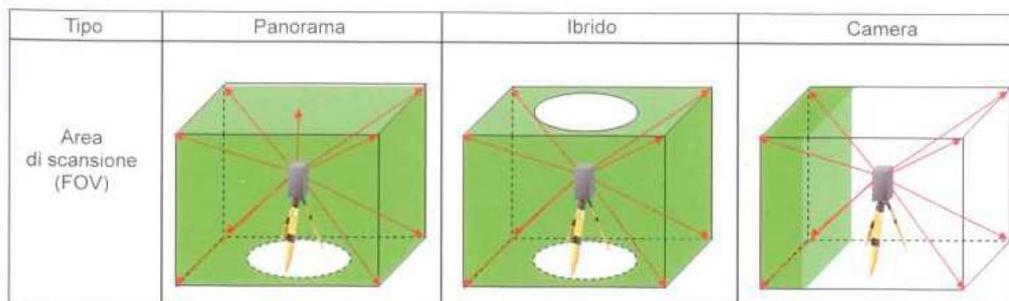
misura del tempo impiegato dalla luce per andare sulla superficie, e tornare fino allo strumento di misura (tempo di volo); tale intervallo di tempo permette di risalire alla distanza; lo spazio percorso dal raggio laser nel tempo  $t$  è infatti  $s = ct/2$ , con  $c$  pari alla velocità della luce. Gli strumenti di questo tipo sono genericamente indicati con il nome di LIDAR (LIght Detection And Ranging).

Esistono diverse strategie volte a sfruttare il ritardo di propagazione per determinare la distanza: oltre alla misura diretta del tempo di volo, è possibile effettuare una misura indiretta attraverso la modulazione dell'intensità luminosa (modulazione AM, Amplitude Modulation), o attraverso gli sfasamenti del segnale (modulazione FM, Frequency Modulation). Ognuna di queste comporta complessità diverse, offrendo per contro prestazioni via via crescenti, che vanno dai pochi centimetri al millimetro; anche il range di misura tuttavia varia, andando da 1500 m ai 60-120 m per i dispositivi a ritardo di fase.

I laser scanner possono anche essere classificati in laser statici o mobili. Gli strumenti statici sono quelli generalmente impiegati nelle linee di controllo meccanico, per il monitoraggio di movimenti e deformazioni o per il rilevamento di alta precisione. I laser scanner mobili, o trasportabili, sono strumenti di dimensioni ridotte, posizionabili su treppiedi, spesso utilizzati nel campo del rilevamento topografico.

Un'altra classificazione dei laser scanner può essere fatta in base alla finestra utile di scansione.

Gli scanner a panorama permettono di misurare la quasi totalità di ciò che li circonda;



**Figura 1.6:** Finestre utili di scansione.

l'unica area di ombra può essere quella descritta dal treppiede o dalla base dello scanner stesso, se appoggiato a terra. Questi scanner ruotano sul loro asse verticale a  $360^\circ$  ed hanno un ricoprimento quasi sferico. Gli scanner ibridi hanno anch'essi la possibilità di ruotare a  $360^\circ$  sull'asse verticale, ma sono leggermente più limitati rispetto ai primi per quanto riguarda il ricoprimento nella parte zenitale. Gli scanner a camera sono mono-direzionali e permettono, come una fotocamera, di riprendere una sola zona alla volta; spesso vengono impiegati per le misurazioni a grandi distanze nel campo della geologia.

### Utilizzo del laser scanner per scansioni di impalcati

I laser scanner si stanno affermando nella pratica in vari settori, che vanno appunto dalla topografia, ai rilevamenti nei cantieri, alla misura e controllo di tubi, raccordi e

componenti speciali per il settore nucleare [8]. Recentemente il laser scanner 3D, ed in particolare il laser scanner a tempo di volo, si sta diffondendo anche come ausilio nel monitoraggio e nella diagnostica di opere stradali, quali appunto gli impalcati. In tal senso, esistono in letteratura esempi di utilizzo basati su:

- scansioni statiche;
- scansioni dinamiche con piattaforme inerziali e GPS.

Il primo caso è il più comune; consiste nel posizionare un laser scanner panoramico sotto l'impalcato, su di un treppiede, ed eseguire diverse scansioni della struttura da angolazioni diverse. In genere si acquisiscono più scansioni<sup>2</sup>, in quanto ciò consente di aumentare la densità di punti acquisita, evitare zone d'ombra (cioè zone non raggiunte dal raggio del laser scanner) e garantire una maggiore affidabilità della misura: in questo modo infatti si ha ridondanza di dati, ed è possibile evitare di utilizzare punti rilevati troppo distanti dal dispositivo, o acquisiti su superfici inclinate, i quali hanno evidentemente un'incertezza maggiore. Generalmente, grazie alla presenza di GPS in molti dispositivi laser scanner commerciali, è possibile georiferire le scansioni che si effettuano. Un esempio di utilizzo di tale procedura è riportato in [12] (fig. 1.7).



**Figura 1.7:** Modello 3D di un impalcato, ottenuto tramite acquisizione statica terrestre [16].

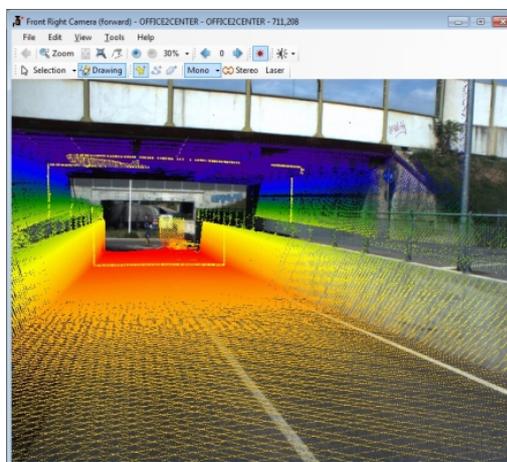
Purtroppo tale metodologia non è sempre applicabile per l'ispezione di impalcati in quanto non sempre la zona sottoponte è accessibile, a causa della boscaglia elevata o della presenza di corsi d'acqua; a volte invece gli impalcati sono semplicemente così sopraelevati da non garantire una sufficiente risoluzione/accuratezza nell'acquisizione da terra.

<sup>2</sup>Per unire due scansioni diverse è possibile utilizzare due algoritmi principali: “Rigid Registration con Singular Value”, e “Iterative Closest Point”. Il primo algoritmo è molto più veloce del secondo, ma da risultati peggiori; esso permette di accoppiare due nuvole che abbiano un minimo di tre punti comuni noti. Per l'individuazione di tali punti in genere si sfrutta la geometria dell'impalcato stesso come riferimento, oppure si posizionano opportunamente dei marker nello spazio circostante. Il secondo algoritmo prende in considerazione tutti i punti delle nuvole, e cerca di minimizzarne la distanza; questo algoritmo è solitamente eseguito in seguito al primo, rispetto al quale è molto più lento, ma più preciso.

Nel secondo caso le acquisizioni vengono effettuate posizionando su di un'autovettura un Mobile Mapping System (MMS). L'MMS è formato da un insieme di dispositivi, quali appunto dispositivi scanner, GPS ed Inertial Navigation Systems.



(a) Il dispositivo Road-Scanner4 di Siteco.



(b) Scansione di impalcati ed opere stradali con il dispositivo Road-Scanner4

**Figura 1.8:** Scansioni dinamiche con piattaforme inerziali e GPS.

Il laser scanner, in questo caso, generalmente non funziona in modalità panoramica, ma il fascio laser viene movimentato tramite un unico asse di rotazione, generando una sorta di “piano di scansione”; è poi il movimento del mezzo su cui è posizionato a permettere allo scanner di acquisire lo spazio circostante. Gli ultimi due dispositivi sono utilizzati per la determinazione in ogni istante della posizione dei laser scanner. Questa operazione è fondamentale per avere una corretta ricostruzione del modello 3D di ciò che si scansiona; i punti acquisiti, infatti, sono riferiti al dispositivo stesso, il quale nelle acquisizioni dinamiche si sposta nello spazio. Dunque, mentre nelle acquisizioni statiche è sufficiente conoscere la direzione del raggio laser, nota grazie alla meccanica di alta precisione dello strumento, in questo caso è necessario conoscere con precisione la traiettoria del dispositivo, per poter ricostruire correttamente la nuvola di punti.

L'INS è un dispositivo che include almeno un calcolatore ed una piattaforma o modulo contenente degli accelerometri, dei giroscopi, od altri dispositivi sensibili al moto; esso è in grado, integrando le informazioni che riceve dai sensori, di determinare gli spostamenti del mezzo su cui è posizionato. Preso singolarmente, l'INS soffre tuttavia di deriva di integrazione: piccoli errori nelle misurazioni dell'accelerazione e nella velocità angolare vengono integrati in errori progressivamente maggiori nella velocità, che vengono aggravati in errori ancora maggiori nella posizione. Questo è un problema inerente ad ogni sistema di controllo ad anello aperto. E' tuttavia possibile, sfruttando la teoria dei controlli in generale ed il filtraggio Kalman in particolare, combinare opportunamente informazioni dal sistema inerziale e dal sistema GPS, ottenendo dunque errori in posizione e velocità numericamente stabili; allo stesso tempo, si riesce a migliorare notevolmente l'accuratezza dei dati forniti dal GPS.

Questo sistema di acquisizione dinamica si sta negli ultimi anni affermando, grazie alla rapidità nella raccolta dei dati. Tra le pubblicazioni relative è possibile ricordare [11]; sono inoltre disponibili prodotti già industrializzati [9], come quello riportato in figura 1.8.

Purtroppo anche questa modalità di scansione non è esente da difetti; in particolare la precisione del dispositivo di position tracking al di sotto degli impalcati cala notevolmente, in quanto le antenne GPS non sono generalmente in grado di connettersi ai relativi satelliti. Inoltre, per effettuare l'acquisizione è necessario che l'intradosso dell'impalcato sia facilmente accessibile da un'autovettura; in questo modo si limita di fatto la possibilità di ispezione a sovrappassi stradali e cavalcavia.

### 1.3 Una metodologia alternativa di scansione degli impalcati

In questo contesto si inserisce l'attività di ricerca che da alcuni anni si sta portando avanti al Politecnico di Milano.

In particolare, nel 2013 è stato realizzato uno studio di fattibilità [7] in collaborazione con l'azienda Sineco S.p.A. , specializzata nell'ispezione di grandi infrastrutture, il quale ha portato alla pubblicazione di diversi articoli [2] [4]; l'obiettivo del lavoro fino ad ora svolto è stato quello di gettare le basi per la realizzazione di un nuovo sistema di ispezione di impalcati basato su tecnologia laser scanner, che sia in grado di superare le difficoltà messe in luce nel precedente paragrafo, rendendo dunque possibile la scansione di ponti e viadotti di grandi dimensioni e difficilmente accessibili, utilizzando un setup dai costi ridotti.

#### 1.3.1 Linee guida emerse dallo studio di fattibilità

Dallo studio di fattibilità sono emerse alcune linee guida per la progettazione del nuovo sistema di ispezione:

- utilizzo della tecnologia laser scanner 3D;
- sfruttamento delle passerelle sottoponte (già utilizzate dalle ditte che lavorano nel settore) come mezzo per raggiungere l'intradosso dell'impalcato ;
- scansione dinamica, ottenuta tramite la movimentazione del laser scanner sulla suddetta passerella mediante l'utilizzo di un carrello servo-azionato;
- individuazione della traiettoria del laser scanner mediante la messa a punto di una catena di misura che consenta di riferirne la posizione rispetto ad una terna assoluta, facendo a meno dell'utilizzo diretto di GPS e piattaforme inerziali per determinare la posizione dello scanner.

Discutiamo brevemente i punti indicati, ripercorrendo le deduzioni dello studio di fattibilità. Le passerelle sottoponte sono dei sistemi meccanici piuttosto complessi e costosi, in quanto sono strutture di grandi dimensioni fissate su dei camion, con la possibilità di ripiegarsi per favorirne il trasporto. Esse tuttavia sono già disponibili per le aziende che si occupano di ispezione di impalcati, essendo utilizzate nelle ispezioni manuali (fig.1.1). Di conseguenza, il loro riutilizzo garantisce un abbattimento significativo dei costi di implementazione del sistema proposto. Tra le altre alternative prese in considerazione nello studio di fattibilità è possibile citare l'utilizzo di bracci meccanici costruiti su

misura; tale ipotesi è stata presto scartata, date le grandi dimensioni degli impalcati da scansionare ed il conseguente costo del manipolatore.

L'utilizzo di scansioni statiche ottenute posizionando lo scanner sulla passerella, tuttavia, non è fattibile; le passerelle infatti tendono generalmente ad oscillare, e ciò può ridurre sensibilmente l'accuratezza della rilevazione; inoltre, la distanza tra scanner e impalcato è molto ridotta, e per evitare zone d'ombra consistenti risulterebbe necessario effettuare numerose acquisizioni, le quali poi risulterebbero complesse da sintetizzare. E' dunque possibile risolvere questo problema utilizzando delle scansioni dinamiche, movimentando il laser scanner sulla passerella; ciò permette infatti di evitare la presenza di zone d'ombra, e di sfruttare al massimo le potenzialità di un unico dispositivo scanner, il quale è uno strumento molto costoso.

Le passerelle sottoponte possono avere dei piani di calpestio anche molto irregolari; inoltre devono potersi ripiegare così da permettere al camion sul quale sono montate di trasportarle. La decisione di utilizzare un carrello (fig.1.9) per il trasporto del laser scanner nasce da queste considerazioni: esso è un mezzo in grado di muoversi su passerelle anche diverse ed irregolari; inoltre, avendo dimensioni contenute, facilita l'operazione di varo. Un'alternativa al carrello potrebbe essere l'utilizzo di guide rettilinee; in tal caso, sebbene si garantirebbe un moto del laser scanner più regolare, il varo della passerella diventerebbe problematico, in quanto la passerella estesa raggiunge in media i 18m di lunghezza, e sarebbe dunque necessaria una guida altrettanto lunga.



**Figura 1.9:** Immagine CAD del carrello messo a punto nella fase di studio di fattibilità.

L'ultimo punto deriva dalla necessità di conoscere la traiettoria e l'orientamento del laser scanner in ogni istante dell'acquisizione. Per i motivi sopra citati, non è possibile risalire ad essi con precisioni sufficienti tramite l'utilizzo di GPS e piattaforme inerziali; è dunque necessario mettere a punto una catena di misura che permetta di individuare:

- il moto del carrello sulla passerella;
- le eventuali oscillazioni del by-bridge, cioè la struttura che collega la passerella al camion che la trasporta;

- il moto del camion sopra l'impalcato.

### 1.3.2 Il Laser Scanner 3D CAM2 Faro

Vediamo nel dettaglio lo strumento di misura utilizzato nello studio di fattibilità per effettuare le scansioni, in quanto esso sarà utilizzato anche nel presente lavoro. Il modello in questione di laser scanner 3D è denominato E870 CAM2, prodotto da Faro.



**Figura 1.10:** E870 CAM2 della Faro.

Le principali caratteristiche ed il principio di funzionamento di questo strumento possono essere brevemente riassunte nei seguenti punti:

- Il Focus3D invia un raggio laser a infrarossi nel centro di uno specchio rotante (parte centrale della figura). Lo specchio devia il laser proiettandolo verso l'ambiente sottoposto a scansione; la luce diffusa dagli oggetti circostanti viene quindi riflessa nuovamente nello scanner;
- Il Focus3D è un laser scanner a tempo di volo, ed in particolare utilizza la tecnica per differenza di fase;
- Le coordinate  $x$ ,  $y$ ,  $z$  di ogni punto vengono calcolate utilizzando codificatori angolari per misurare la rotazione dello specchio e la rotazione rispetto all'asse verticale del Focus3D (vedi le modalità di funzionamento, nel seguito);
- Le scansioni del laser vengono registrate su una scheda di memoria SD rimovibile e per poi essere trasferite a SCENE, il software per la manipolazione delle nuvole di punti.

**Caratteristiche tecniche:** le caratteristiche del dispositivo sono riassunte in fig. 1.11, tratta dal manuale dello strumento.

<p><b>Ranging unit</b></p> <p><b>Unambiguity interval:</b> 153,49 m</p> <p><b>Range Focus<sup>3D</sup> 120<sup>1</sup>:</b> 0,6 m - 120 m indoor o outdoor con poca luce ambientale e incidenza normale su superficie riflettente (90%)</p> <p><b>Range Focus<sup>3D</sup>:</b> 0,6 m - 20 m con incidenza normale su superfici opache riflettenti &gt;10%</p> <p><b>Velocità di misura:</b> 122.000 / 244.000 / 488.000 / 976.000 punti/secondo</p> <p><b>Errore di distanza lineare<sup>2</sup>:</b> ±2 mm a 10 m e 25 m, con una riflettività del 90% e 10%</p> <p><b>Rumore<sup>3</sup>:</b></p> <p>@10 m - dati grezzi: 0,6 mm rms @ 90% refl.   1,2 mm rms @ 10% refl.</p> <p>@10 m - rumore filtrato<sup>4</sup>: 0,3 mm @ 90% refl.   0,6 mm @ 10% refl.</p> <p>@25 m - dati grezzi: 0,95 mm @ 90% refl.   2,2 mm @ 10% refl.</p> <p>@25 m: rumore filtrato<sup>4</sup>: 0,5 mm @ 90% refl.   1,1 mm @ 10% refl.</p>
<p><b>Unità a colori</b></p> <p><b>Risoluzione:</b> fino a 70 megapixel a colori</p> <p><b>Funzionalità colore dinamica:</b> adeguamento automatico della luminosità</p>

Figura 1.11: Caratteristiche tecniche dello scanner E870 CAM2, prodotto da Faro.

Le prestazioni del dispositivo possono essere regolate dall'utente agendo su due parametri principali: *Risoluzione* e *Qualità*.

La Qualità è legata alla velocità di scansione; se si aumenta tale parametro, diminuisce il numero di punti acquisiti per secondo. Si possono impostare quattro valori di Qualità diversi:

- 1x, cui corrisponde una velocità di acquisizione pari a  $976 \frac{kpt}{s}$ ;
- 2x, cui corrisponde una velocità di acquisizione pari a  $488 \frac{kpt}{s}$ ;
- 3x, cui corrisponde una velocità di acquisizione pari a  $244 \frac{kpt}{s}$ ;
- 4x, cui corrisponde una velocità di acquisizione pari a  $122 \frac{kpt}{s}$ ;

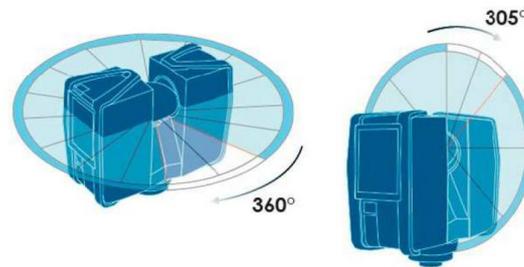
La Risoluzione è legata al numero di punti per rotazione dello specchio, e va da un massimo di  $\frac{1}{1}$  ad un minimo di  $\frac{1}{32}$ , cui corrispondono  $40960 \frac{pt}{360^\circ}$  e  $1280 \frac{pt}{360^\circ}$ .

A parità di Qualità, dunque, se la Risoluzione passa ad esempio da  $\frac{1}{1}$  ad  $\frac{1}{2}$ , la frequenza di rotazione dello specchio raddoppia.

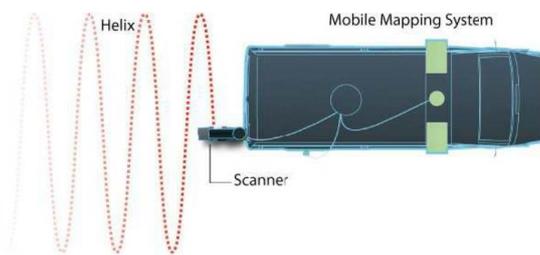
**Modi di operare dello strumento:** i due principali modi di operare del Focus3D sono lo “helical mode” e lo “spherical mode”.

- Nello spherical mode lo specchio ruota sul proprio asse e lo strumento ruota attorno al proprio asse corpo verticale.
- Nell'helical mode lo specchio ruota sul proprio asse mentre la rotazione attorno all'asse verticale dello strumento è bloccata.

Nel helical mode lo scanner è tipicamente montato su un mezzo di trasporto e acquisisce una serie continua di punti che hanno la forma tipica di un'elica.



(a) Rotazioni dello scanner nella modalità "spherical mode"



(b) Laser scanner in modalità "helical mode"

**Figura 1.12:** Modi di operare dello strumento

### 1.3.3 Il presente lavoro

Lo studio di fattibilità si è concluso con l'esecuzione di alcuni test sperimentali preliminari, nei quali è stata utilizzata una catena di misura dall'architettura molto semplice, basata sull'utilizzo di puntatori laser e sistemi di visione. Essi hanno sostanzialmente evidenziato la fattibilità dell'idea, con la necessità di realizzare una catena di misura più accurata. Il presente lavoro di tesi si propone dunque come secondo step nella progettazione del sistema automatico di scansione degli impalcati.

Seguendo le linee guida evidenziate dal precedente studio di fattibilità, sono state svolte le seguenti attività:

- messa a punto di una catena di misura più accurata, e del relativo sistema di acquisizione dei dati;
- riprogettazione del carrello, al fine di renderne più agevole l'utilizzo in condizioni operative;
- realizzazione ad hoc di supporti per i vari strumenti di misura, con il fine di facilitarne la calibrazione ed il montaggio;

- simulazioni finalizzate alla verifica della bontà della catena proposta, e della densità di punti raggiungibile nel modello 3D;
- prove sperimentali sul campo, con analisi dei risultati ottenuti.

E' importante evidenziare che il sistema di ispezione sviluppato, sebbene in questo caso sia utilizzato per la scansione di impalcati tramite laser scanner 3D, può essere facilmente integrato con altri strumenti di misura che troverebbero spazio sul carrello. Ad esempio, affiancando al laser scanner una telecamera, si potrebbero utilizzare tecniche proprie della fotogrammetria con il vantaggio di poter collocare su di un modello 3D i difetti rilevati, e poter ricostruire con maggior facilità un'immagine complessiva dell'impalcato, unendo le singole fotografie.

### **Organizzazione dei contenuti**

Nel secondo capitolo viene definita la catena di misura necessaria ad identificare la traiettoria del laser scanner; ciò avviene passando per uno studio preliminare del sistema camion/by-bridge, e per la definizione di un modello matematico in grado di esprimere la traiettoria del dispositivo scanner mediante la notazione tipica della meccanica dei robot. Contestualmente, vengono individuati gli strumenti di misura protagonisti della catena, e viene descritto un modello multibody del sistema.

Nel terzo capitolo, tramite l'ausilio di alcune simulazioni, viene valutata l'accuratezza che è legittimo aspettarsi dalla catena di misura messa a punto.

Nel quarto capitolo vengono individuati dei parametri di moto ottimali volti a garantire uniformità e massima densità della nuvola di punti ottenibile tramite la scansione dell'impalcato.

Il quinto capitolo è interamente dedicato al setup sperimentale del sistema; viene dunque descritto il carrello, i dispositivi di ancoraggio degli strumenti, l'architettura del sistema, le procedure di calibrazione della catena e di varo della passerella con la strumentazione a bordo.

Nel sesto capitolo vengono descritte le prove sperimentali, e ne vengono analizzati i risultati.

Il settimo capitolo è dedicato agli sviluppi futuri. In particolare, vengono riportate alcune simulazioni relative alla densità di punti ottenibile utilizzando una soluzione diversa rispetto a quella analizzata nel presente lavoro.

Nelle conclusioni, infine, vengono tratte le somme sul lavoro svolto e l'effettiva applicabilità del sistema.

## CAPITOLO 2

### Sintesi della catena di misura

In questo Capitolo viene affrontato il problema della ricostruzione della traiettoria del laser scanner, individuando e modellando una catena di misura opportuna da installare su camion, by-bridge e carrello al fine di monitorarne i movimenti.

Per prima cosa viene analizzato il contesto operativo, ed in particolare il camion ed il by-bridge, al fine di conoscere meglio le caratteristiche di questi elementi, e le possibilità di moto di cui sono dotati.

Nel seguito, dopo aver definito l'idea base sulla quale fondare la catena di misura, viene illustrato un modello matematico in grado di descrivere, tramite un approccio tipico della meccanica dei robot, il movimento del laser scanner rispetto ad una terna assoluta, passando per varie terne definite mediante la catena di misura.

Infine, a partire dalle incognite del suddetto modello matematico, vengono definiti gli strumenti della catena di misura.

### 2.1 Il contesto operativo

Il mezzo che si intende utilizzare per raggiungere l'intradosso dell'impalcato è una passerella sottoponte; tali passerelle possono essere considerate come una parte di una struttura metallica più ampia, comunemente definita "by-bridge", la quale generalmente è ripiegabile, ed installata su di un camion che ne permette il trasporto.

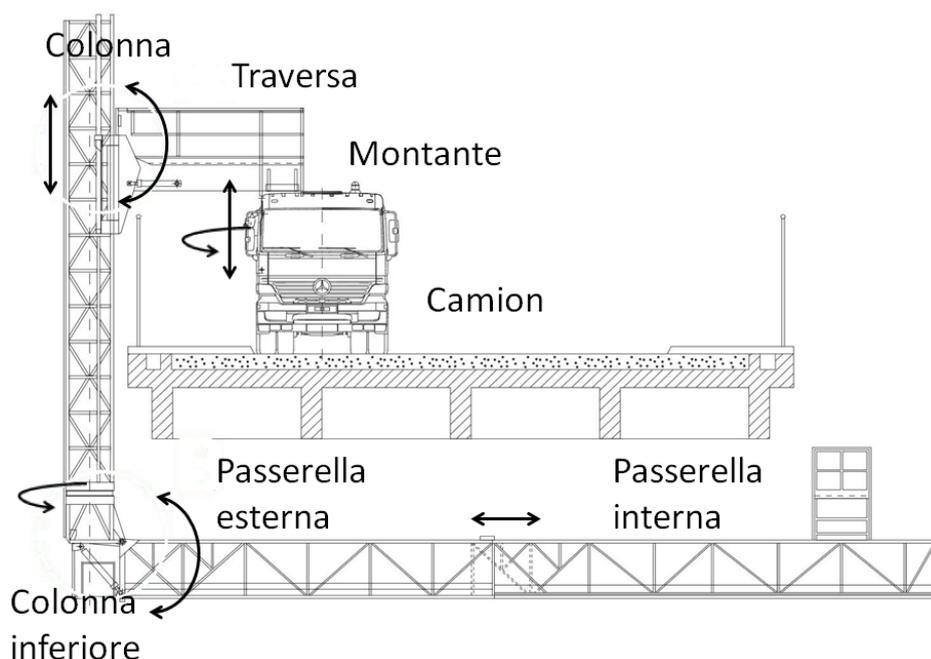
Tali sistemi sono molto costosi; nel nostro caso, il camion ed il by-bridge utilizzati nelle prove sperimentali sono di proprietà della ditta Sineco S.p.A., specializzata nella sorveglianza di grandi infrastrutture. Essi sono stati esaminati a fondo, al fine di effettuare una scelta più consapevole nella definizione della catena di misura e del mezzo di movimentazione del dispositivo scanner.

#### 2.1.1 Il by-bridge

Il by-bridge è una struttura a traliccio metallico che permette ai tecnici della manutenzione di accedere all'intradosso dell'impalcato ed effettuare l'ispezione. Tale struttura è posizionata a bordo di un camion che ne permette il trasporto, ed è completamente ripiegabile.

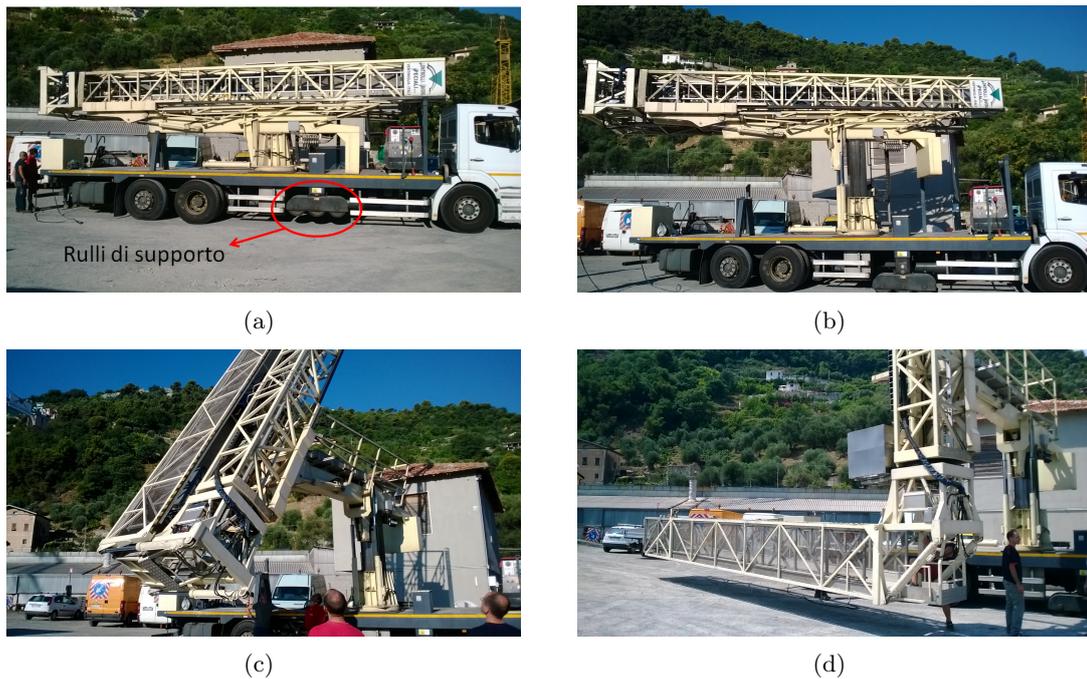
Il by-bridge è formato da varie parti, le quali sono collegate da dei giunti che permettono di muovere la struttura. Con riferimento a fig.2.1 esse sono:

- Montante. E' la parte verticale che collega il by-bridge al camion. Esso, mediante dei pistoni idraulici, permette di sollevare ed abbassare la struttura, e di ruotarla;
- Traversa. Essa è la parte orizzontale in figura, ed è collegata rigidamente al montante;
- Colonna. Essa è collegata alla traversa da un pattino che le permette di scorrere verso l'alto ed il basso. Essa inoltre può ruotare rispetto alla traversa, secondo la direzione riportata in figura;
- Colonna inferiore: è l'ultimo tratto di colonna, collegato alla precedente tramite una ralla, che permette la rotazione con asse verticale della passerella;
- Passerella esterna. E' il primo tratto di passerella, e può ruotare nella direzione indicata in figura rispetto alla colonna inferiore, grazie a delle cerniere e dei pistoni idraulici;
- Passerella interna. Può scorrere all'interno della passerella esterna. Se completamente distesa, la lunghezza totale della passerella raggiunge i 18 m circa.



**Figura 2.1:** Giunti che permettono la distensione del by-bridge

La procedura di apertura del by-bridge è riassunta in fig. 2.2. In (a) è visibile il by-bridge ripiegato sul camion; la distensione inizia con il sollevamento del montante (b); in seguito il montante ruota rispetto al camion in maniera da disporre la traversa ortogonalmente all'asse del mezzo. In (c) è visibile la rotazione del blocco colonna/passerella rispetto alla traversa; infine in (d) avviene l'apertura della passerella, e la successiva distensione della parte interna. Si nota che, nel caso di fig. 2.2, il camion non è posizionato su di un impalcato; la procedura di apertura del by-bridge resta comunque



**Figura 2.2:** Distensione del by-bridge durante una delle prove preliminari

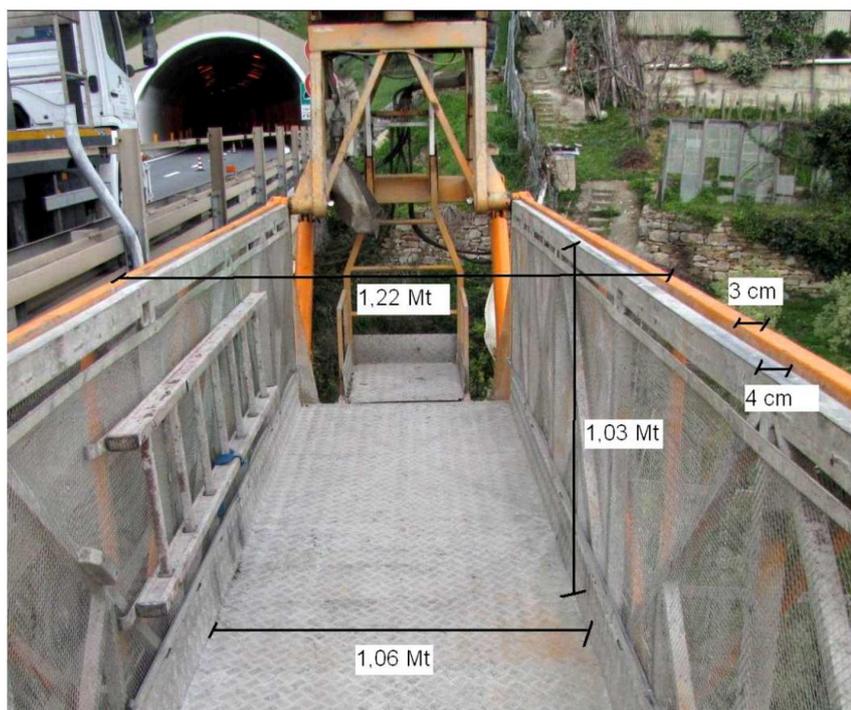
pressoché la stessa.

Nelle ispezioni manuali gli operatori raggiungono la passerella passando sopra la traversa, e calandosi all'interno della colonna utilizzando un'apposita scala a pioli. L'area di lavoro utilizzata dagli operatori nelle ispezioni manuali ha le dimensioni riportate in figura 2.3. Essa non è uniforme, in quanto la passerella esterna ed interna hanno dimensioni diverse per ovvi motivi. Nella figura, in particolare, sono riportate le dimensioni della passerella interna. Questa variazione di dimensioni provoca, nella passerella estesa, la presenza di uno scalino dell'altezza di circa 6 cm; è possibile anticipare fin da ora che, per permettere il passaggio sullo scalino del carrello utilizzato nelle scansioni, è stata realizzata una piccola rampa. Il piano di calpestio è piuttosto irregolare. Nella colonna inferiore è presente una plancia dei comandi ed alimentazione in corrente continua con tensione di 24 V.

### 2.1.2 Il camion

Il camion sul quale è fissato il by-bridge è un mezzo a 3 assi, sul quale sono state effettuate delle modifiche volte a garantire la massima sicurezza durante le fasi di ispezione. In particolare, dato l'elevato peso del by-bridge ed il momento che esso può esercitare durante le fasi di distensione, sono presenti ai lati del mezzo dei rulli; questi, quando vengono calati durante le ispezioni, conferiscono al mezzo una elevata stabilità, limitandone le oscillazioni dovute alle sospensioni (fig. 2.2 (a)).

Tipicamente nelle ispezioni manuali il camion avanza molto lentamente, a velocità costante, mantenendo circa la stessa distanza dal bordo dell'impalcato.



**Figura 2.3:** Dimensioni della sezione di passaggio della passerella

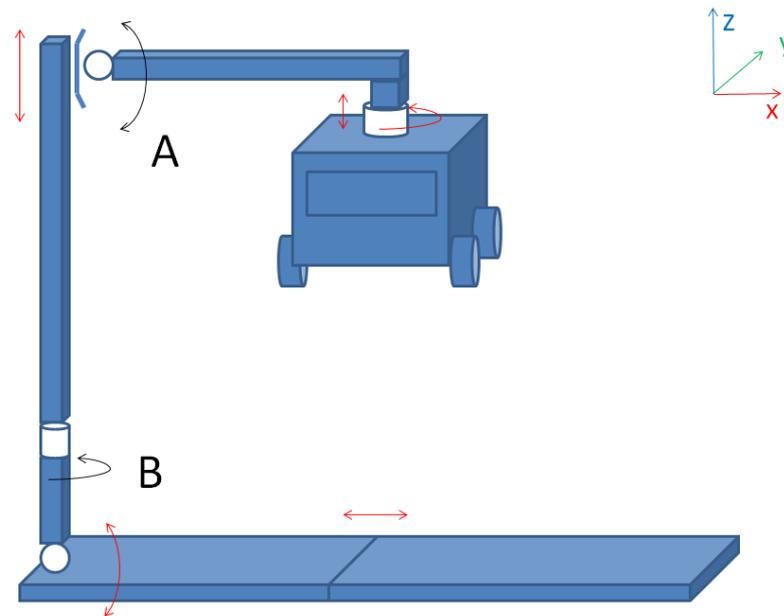
### 2.1.3 Oscillazioni del sistema

Nonostante la presenza dei rulli di supporto è evidente, trovandosi sulla passerella distesa, che essa tende ad oscillare. Al fine di indagare la natura di tali oscillazioni, in fase di studio di fattibilità [7] sono stati eseguiti dei test accelerometrici.

Da tali test è emerso che il contributo di maggiore importanza alla vibrazione della struttura è dovuto a moti rigidi della stessa, con frequenze associate al di sotto dell'Hertz (circa 0.58 Hz); in particolare risultano più importanti le rotazioni intorno a due dei giunti che permettono il varo e il controllo della posizione del by-bridge, ovvero il giunto che permette la rotazione del tratto verticale rispetto alla prima traversa orizzontale (giunto A in fig.2.4) ed il secondo giunto che permette la rotazione del tratto recante il piano di calpestio rispetto al tratto verticale (giunto B in fig.2.4). L'asse di rotazione principale del giunto A può essere considerato parallelo alla direzione di avanzamento del camion, mentre quello del giunto B può essere considerato verticale. Le oscillazioni, dunque, sono dovute principalmente alla presenza di giochi in alcuni giunti, e non a deformazioni della struttura stessa.

In prima approssimazione, dunque, si può considerare il sistema formato dalle seguenti parti rigide (fig.2.1):

- sistema camion-montante-traversa;
- colonna, legata al sistema camion-montante-traversa tramite il giunto A;
- colonna inferiore e passerella, legati alla colonna tramite il giunto B.



**Figura 2.4:** Modello a corpi rigidi del by-bridge, con evidenziati i giunti in cui si concentra il moto, A e B.

Tali parti rigide possono muoversi tra loro prevalentemente secondo i giunti A e B indicati in figura.

## 2.2 Idea alla base della catena di misura

Il concetto di base che sta dietro al sistema di ispezione proposto è assimilabile a quello utilizzato dal dispositivo in fig.2.5 . Esso è costituito da uno scanner laser posizionato sulla pistola, ed un braccio robotico opportunamente controllato, dotato di link rigidi, dalle dimensioni note perfettamente, e giunti strumentati. Esiste dunque una catena di misura molto semplice, costituita dagli encoder presenti nei giunti, la quale permette di riferire la posizione della pistola scanner in qualsiasi istante rispetto una terna inerziale fissa.

Il nostro caso è evidentemente più complesso, essendo le dimensioni del sistema notevolmente maggiori, ed essendo l'intero sistema posizionato su di un camion in moto rispetto al sistema assoluto. La struttura del by-bridge, sulla base delle considerazioni precedenti, può essere assimilata ad un braccio robotico, dotato di link rigidi; tuttavia, a differenza del dispositivo di cui sopra, i giunti non sono strumentati, e la dimensione stessa dei link non è nota a priori con precisione sufficiente: si pensi ad esempio alle irregolarità del piano di calpestio della passerella, alle deformazioni statiche che la stessa passerella subisce, o più semplicemente al fatto che alcuni giunti possono essere bloccati in posizioni diverse in ogni prova (ad esempio giunto tra colonna e traversa e quello tra passerella esterna e interna).



**Figura 2.5:** CAM2 Edge ScanArm 3D, dispositivo prodotto dalla Faro

Una soluzione per consentire la ricostruzione della traiettoria del laser scanner è stata individuata nell'utilizzo di raggi laser e sistemi di visione fissati sulla struttura. L'idea principale è che, se si proiettano dei raggi laser su di un piano di cui è noto l'orientamento nello spazio, è possibile risalire al movimento relativo tra il piano stesso e la sorgente laser a partire dagli spostamenti degli spot sul piano (determinati appunto dai sistemi di visione) e dalla lunghezza del fascio laser. Tale sistema è utilizzabile sia per determinare la posizione del carrello sulla passerella, sia per determinare il moto della colonna.

Senza entrare troppo nel dettaglio della catena di misura installata sul by-bridge, per ora basti indicare dunque la presenza di due **puntatori laser** posizionati in corrispondenza della parte terminale della traversa, ed all'inizio della passerella. Essi proiettano il proprio raggio su due **piani di proiezione**, posizionati uno sulla colonna, al di sotto della ralla che permette la rotazione della passerella, ed uno sul carrello. Su ciascun piano, infine, è presente una **telecamera** in grado di determinare la posizione dello spot laser rispetto ad una terna di riferimento giacente sul piano stesso. Questi elementi della catena di misura sono importanti, in quanto permettono di definire dei "link virtuali" perfettamente noti che, assieme ai "link fisici" costituiti da alcune parti del by-bridge, consentono di risalire alla posizione e all'orientamento del laser scanner nello spazio tramite un approccio rigoroso tipico della meccanica dei robot (fig. 2.6), e quindi analogo all'esempio iniziale. In questo caso, il laser scanner assume il ruolo di "end-effector". Il resto della catena di misura è necessario a determinare l'orientamento dei link nello spazio e la loro lunghezza, e sarà descritto in seguito alla definizione del modello matematico.

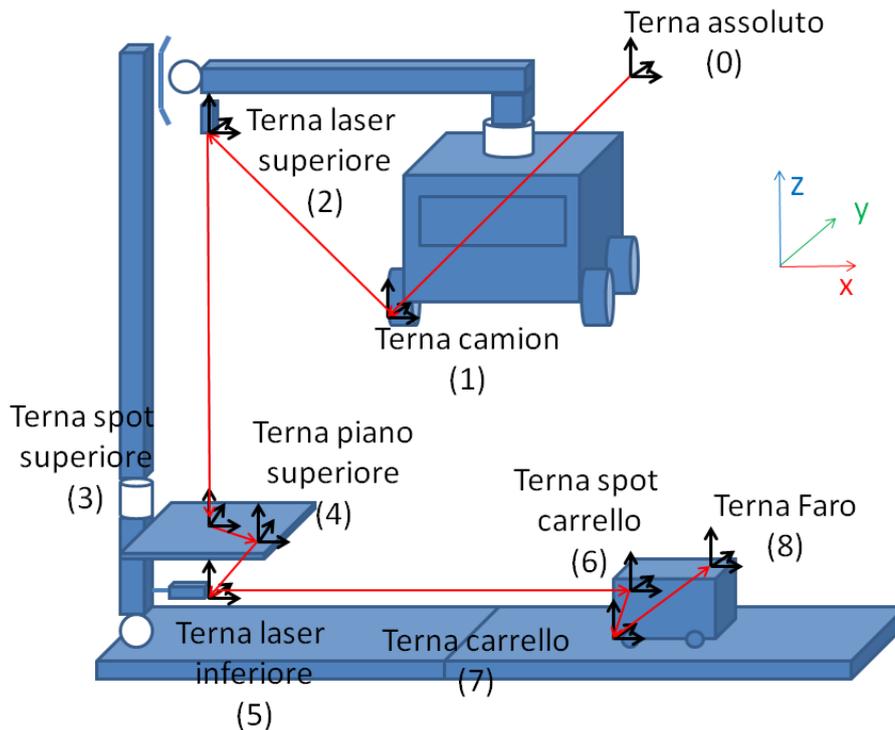
## 2.3 Dal contesto operativo al modello matematico

In meccanica dei robot un generico link rigido è identificato a partire da una terna di riferimento solidale al corpo stesso. La posizione di tale terna rispetto ad una seconda terna è definibile tramite matrici di rototraslazione.

Nel seguito del paragrafo, dunque, definiremo prima le terne utilizzate per descrivere il problema in questione; in seguito verrà indicato un metodo matematico grazie al quale sarà possibile esprimere traiettoria e orientamento del laser scanner (cioè il nostro "end

effector”) rispetto ad una terna di riferimento fissa, passando per le terne definite. Infine verranno presentate alcune osservazioni volte a semplificare il problema.

### 2.3.1 Terne di riferimento necessarie alla ricostruzione della traiettoria del laser scanner



**Figura 2.6:** Schema delle terne utilizzate per la ricostruzione della traiettoria del laser scanner; i vettori in rosso rappresentano i “link” che collegano le terne.

Si faccia riferimento alla fig.2.6, la quale rappresenta una schematizzazione del sistema camion/by-bridge/carrello.

Si noti che, sebbene genericamente in meccanica dei robot le terne alla fine di ogni link vengano orientate in maniera tale da far coincidere uno degli assi con l’asse del link stesso, in questo caso esse sono orientate seguendo criteri diversi, che saranno indicati terna per terna.

**Terna assoluto (0):** la *terna assoluto* coincide con il punto di contatto tra terreno e rulli di supporto del camion nell’istante iniziale. Gli assi sono posizionati con  $z$  rivolto verso l’alto,  $y$  parallela alla direzione di avanzamento del camion ed  $x$  giacente sul piano della strada.

**Terna camion (1):** la *terna camion* è la terna che identifica la posizione nello spazio del camion.

Nell’istante iniziale, tale *terna camion* coincide con la *terna assoluto*; di conseguenza, essa è posizionata in corrispondenza del punto di contatto tra asfalto e rulli di supporto.

Tale scelta deriva dalle osservazioni effettuate sul moto del camion/by-bridge relative alla rigidità di tali elementi, per cui si ipotizza che rollio, imbardata e beccheggio del mezzo siano definiti attorno agli assi di tale terna.

**Terna laser superiore (2):** tale terna è posizionata in corrispondenza del puntatore laser superiore, e cioè nella parte terminale della traversa. La sua posizione nella *terna camion* è fissa, in quanto si ipotizza che camion, montate e traversa siano un unico corpo rigido; di conseguenza, si può immaginare di determinarla una sola volta, prima di effettuare la scansione.

Per quanto riguarda l'orientamento della terna, esso esprime l'orientamento del puntatore; l'asse  $z_2$ , dunque, coincide con la direzione del fascio laser.

**Terna spot superiore (3):** questa terna è posizionata con l'origine posta sul piano degli spot situato nella parte inferiore della colonna, in corrispondenza dello spot del raggio laser.

Gli assi  $x_3$  ed  $y_3$  sono giacenti sul piano degli spot, orientati parallelamente alla terna delle telecamere relativa al piano<sup>1</sup>.

**Terna piano superiore (4):** questa terna è solidale al piano degli spot, che è a sua volta collegato rigidamente alla parte inferiore della colonna, al di sotto della ralla.

La sua origine è posizionata sul piano degli spot, in corrispondenza dell'origine della terna della telecamera.

Per quanto riguarda l'orientamento della terna, esso è lo stesso della terna precedente, e dunque gli assi  $x_4$  ed  $y_4$  sono paralleli a quelli della terna della telecamera.

**Terna laser inferiore (5):** questa terna è posizionata in corrispondenza del puntatore laser inferiore, e l'asse  $x_5$  coincide con l'asse del fascio laser. Tale puntatore deve essere installato in maniera che il fascio laser sia il più possibile parallelo all'asse della passerella.

**Terna spot carrello (6):** l'origine della *terna spot carrello* coincide con lo spot del laser sul piano del carrello.

Come per la *terna spot superiore*, gli assi  $z$  ed  $y$  giacciono sul piano degli spot, e sono orientati come la terna della relativa telecamera.

**Terna carrello (7):** la terna carrello è solidale al carrello. La sua origine è posizionata sul piano degli spot, in corrispondenza dell'origine della terna della telecamera.

Per quanto riguarda l'orientamento della terna, esso è lo stesso della terna precedente, pertanto gli assi sono paralleli a quelli della terna della telecamera.

---

<sup>1</sup>Come si vedrà nel dettaglio in seguito, la terna della telecamera è viene definita mediante la procedura di calibrazione della telecamera ed è solidale al piano che viene ripreso; a partire dalle immagini acquisite dalla telecamera, è possibile determinare le coordinate dello spot luminoso sul piano rispetto tale terna.

**Terna faro (8):** è la terna solidale al dispositivo laser scanner. In particolare, l'asse  $z$  coincide con l'asse verticale, e l'asse  $x$  con l'asse di rotazione dello specchio del dispositivo.

### 2.3.2 Modello matematico generalizzato del sistema

Definite due generiche terne (0) ed (1) e definiti  $\alpha_{01}$   $\beta_{01}$   $\gamma_{01}$  gli angoli di Cardano<sup>2</sup> che descrivono l'orientamento della seconda terna rispetto alla prima, l'orientamento della terna (1) rispetto alla terna (0) può essere espresso tramite la matrice di rotazione (dove per brevità  $\alpha = \alpha_{01}$ ,  $\beta = \beta_{01}$ ,  $\gamma = \gamma_{01}$ ) [14]

$$R_{01} = \begin{bmatrix} c(\beta)c(\gamma) & -c(\beta)s(\gamma) & s(\beta) \\ s(\alpha)s(\beta)c(\gamma) + c(\alpha)s(\gamma) & -s(\alpha)s(\beta)s(\gamma) + c(\alpha)c(\gamma) & -c(\beta)s(\alpha) \\ -c(\alpha)s(\beta)c(\gamma) + s(\alpha)s(\gamma) & c(\alpha)s(\beta)s(\gamma) + s(\alpha)c(\gamma) & c(\beta)c(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Definito inoltre  $\mathbf{t}_{01}$  il vettore rappresentante la posizione dell'origine della terna (1) nel sistema di riferimento (0), la matrice di posa (rototraslazione) della terna (1) rispetto alla terna (0) è esprimibile come:

$$M_{01} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{01} & \mathbf{t}_{01} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \quad (2.2)$$

con

$$\mathbf{t}_{01} = \begin{bmatrix} x_{01} \\ y_{01} \\ z_{01} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Tale procedimento può essere ripetuto per ogni coppia di terne successiva. Avendo in  $n$  terne, la matrice di posa della terna  $n$  rispetto alla terna (0) può essere individuata come:

$$M_{0n} = M_{01}M_{12} \dots M_{(n-1)n} \quad (2.4)$$

nel nostro caso, per il laser scanner si ha  $n = 8$ .

Si fa notare che, nel caso in cui non sia possibile individuare l'orientamento relativo di una terna  $j$  rispetto alla precedente  $R_{(j-1)j}$ , con  $0 < j < n$ , ma sia noto l'orientamento della terna  $j$  rispetto la terna assoluta  $R_{0j}$  ed il vettore  $\mathbf{t}_{(j-1)j}$ , è possibile costruire direttamente la matrice  $M_{0j}$ :

$$\left[ \begin{array}{c} \mathbf{t}_{0j} \\ 1 \end{array} \right] = M_{0(j-1)} \left[ \begin{array}{c} \mathbf{t}_{(j-1)j} \\ 1 \end{array} \right] \quad (2.5)$$

$$M_{0j} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{0j} & \mathbf{t}_{0j} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \quad (2.6)$$

Questa osservazione tornerà utile nella scelta degli strumenti di misura, in quanto non sempre sarà possibile determinare gli angoli relativi tra due terne, ma a volte sarà disponibile solo l'orientamento assoluto.

<sup>2</sup>da intendersi come di consuetudine come rotazioni rispettivamente intorno all'asse  $x$ , all'asse  $y$  ed all'asse  $z$  dei sistemi di riferimento intermedi

### Semplificazioni modello per piccole rotazioni

Gli studi preliminari hanno accertato che le rotazioni tra i vari membri del sistema sono piccole. Conseguenza diretta è che le matrici di rotazione possono essere semplificate e quindi considerate indipendenti dalla parametrizzazione scelta (i.e. dall'ordine di applicazione delle rotazioni).

Ipotizzando di avere angoli piccoli, infatti, valgono le approssimazioni:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &\simeq 1 & \cos \beta &\simeq 1 & \cos \gamma &\simeq 1 \\ \sin \alpha &\simeq \alpha & \sin \beta &\simeq \beta & \sin \gamma &\simeq \gamma \end{aligned} \quad (2.7)$$

La matrice di rotazione definita con l'equazione 2.3.2 dunque si può semplificare; si ottiene:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma & \beta \\ \gamma & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Questa operazione di semplificazione è di fondamentale importanza per quanto riguarda la misura delle rotazioni di ciascuna terna rispetto alla precedente o all'assoluto. Essa infatti ci permette di determinare l'entità di ciascuna rotazione trascurando gli effetti delle altre due, e semplificando dunque fortemente il sistema di misura.

## 2.4 Definizione della catena di misura

Definite le terne e le relazioni matematiche necessarie all'individuazione di posizione ed orientamento del laser scanner rispetto ad un sistema assoluto, vediamo ora come ricavare le grandezze da sostituire nel modello precedentemente presentato.

Per le descrizioni complete degli strumenti di misura utilizzati, si rimanda al paragrafo 5.1.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(1)	$x_{01}$	nullo
	$y_{01}$	odometro
	$z_{01}$	nullo
	$\alpha_{01}$	inclinometro
	$\beta_{01}$	inclinometro
	$\gamma_{01}$	nullo

**Note:** la posizione e l'orientamento del camion sull'impalcato potrebbe essere determinato tramite l'utilizzo combinato di GPS e IPS, come illustrato nel precedente Capitolo; tuttavia, non essendo tali strumenti disponibili per via del costo elevato, si è dovuta adottare una soluzione di compromesso. In particolare, si è ipotizzato che il camion avanzi in maniera rettilinea, senza subire traslazioni verticali o laterali. In questa

maniera, per determinare l'avanzamento del camion è sufficiente un odometro montato sul retro del mezzo. Per quanto riguarda l'orientamento, dato che l'avanzamento del camion è estremamente lento e regolare, è possibile utilizzare un inclinometro per quanto riguarda il rollio ed il beccheggio; l'imbardata può essere semplicemente posta a zero, in quanto si fa l'ipotesi che il camion avanzi in maniera rettilinea.

Si evidenzia che tale ipotesi di avanzamento del camion non è indolore; essa infatti comporta che impalcati curvilinei verranno ricostruiti come impalcati rettilinei; inoltre la presenza di buche ed oscillazioni verticali del camion vengono trascurate (ipotesi accettabile, considerata la rigidità dei rulli di supporto).

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(2)	$x_{12}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$y_{12}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$z_{12}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$\alpha_{02}$	inclinometro
	$\beta_{02}$	inclinometro
	$\gamma_{02}$	nullo

**Note:** il vettore  $\mathbf{t}_{12}$  che indica la traslazione della terna (2) rispetto alla terna (1), secondo le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti, può essere considerato costante; di conseguenza esso può essere determinato una sola volta, “off-line”, prima dell'esecuzione dell'acquisizione stessa. A tale fine, è possibile utilizzare un'acquisizione statica dell'intero sistema ricavata con il laser scanner. Il setup necessario ad ottenere tale scansione sarà descritto in seguito.

Per quanto riguarda l'orientamento, ancora una volta è possibile utilizzare per le rotazioni  $\alpha_{02}$  e  $\beta_{02}$  un inclinometro solidale al puntatore laser. Per come è stata definita la terna, inoltre,  $\gamma_{02}$  può essere arbitrariamente considerato pari a  $\gamma_{01}$ , e quindi nullo. Si può inoltre notare che, essendo le terne (1) e (2) collegate rigidamente, è possibile utilizzare un solo inclinometro per determinare gli orientamenti di entrambe<sup>3</sup>.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(3)	$x_{23}$	nullo
	$y_{23}$	nullo
	$z_{23}$	distanziometro
	$\alpha_{03}$	inclinometro
	$\beta_{03}$	inclinometro
	$\gamma_{03}$	puntatori laser e sistema di visione con “blob detection”

<sup>3</sup>Dato che la *terna camion* è parallela alla *terna assoluto* nell'istante iniziale, e quindi  $\alpha_{01}(0) = \beta_{01}(0) = 0$ , è possibile compensare eventuali disallineamenti tra le terne (1) e (2) utilizzando l'inclinometro per determinare  $\alpha_{02}$  e  $\beta_{02}$ , e individuando  $\alpha_{01}$  e  $\beta_{01}$  utilizzando i dati dello stesso inclinometro, e sottraendo i valori iniziali (in questo caso si fa uso dell'ipotesi di piccole rotazioni).

**Note:** il vettore  $\mathbf{t}_{23}$  che indica la traslazione della terna (3) rispetto alla terna (2) di fatto rappresenta il fascio laser che dal puntatore raggiunge il piano degli spot. Di conseguenza,  $x_{23}$  e  $y_{23}$  sono nulli, in quanto il raggio è rettilineo;  $z_{23}$  può essere ricavata direttamente se come puntatore laser si utilizza un distanziometro.

$\alpha_{03}$  e  $\beta_{03}$  possono essere individuati ancora una volta utilizzando un inclinometro;  $\gamma_{03}$ , il quale coincide con l'angolo relativo  $\gamma_{23}$ , può essere ricavato proiettando sul piano degli spot un'ulteriore coppia di fasci laser, ed implementando delle relazioni trigonometriche con le coordinate dei relativi spot.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(4)	$x_{34}$	telecamera
	$y_{34}$	telecamera
	$z_{34}$	nullo
	$\alpha_{34}$	nullo
	$\beta_{34}$	nullo
	$\gamma_{34}$	nullo

**Note:** il vettore  $\mathbf{t}_{34}$  giace in questo caso sul piano degli spot, per cui  $x_{34}$  e  $y_{34}$  coincidono con le coordinate degli spot nella terna della telecamera (cambiate di segno). Gli angoli  $\alpha_{34}$ ,  $\beta_{34}$  e  $\gamma_{34}$ , per come sono state definite le due terne, sono nulli.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(5)	$x_{45}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$y_{45}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$z_{45}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$\alpha_{05}$	inclinometro
	$\beta_{05}$	inclinometro
	$\gamma_{05}$	nullo

**Note:** valgono considerazioni analoghe a quelle già effettuate per la terna (2), in quanto le terne (5) e (4) sono tra loro solidali; anche in questo caso, visto che le terne (5) e (6) sono collegate rigidamente, è possibile utilizzare un solo inclinometro, a patto che sia noto l'orientamento iniziale di una delle due terne.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(6)	$x_{56}$	distanziometro
	$y_{56}$	nullo
	$z_{56}$	nullo
	$\alpha_{56}$	sistema di visione con "blob detection"
	$\beta_{56}$	sistema di visione con "edge detection"
	$\gamma_{56}$	sistema di visione con "edge detection"

**Note:** per la posizione valgono considerazioni analoghe a quelle già effettuate per la terna (3), in quanto anche in questo caso il vettore  $\mathbf{t}_{56}$  rappresenta un fascio laser. Per quanto riguarda l'orientamento del piano del carrello, non è possibile utilizzare degli inclinometri in quanto il moto del carrello non è regolare, e dunque gli urti e le accelerazioni che esso subisce genererebbero delle oscillazioni nelle misure fornite. Per questo motivo vengono utilizzati dei sistema di visione basati su un algoritmo di "edge detection": l'idea è quella di posizionare delle telecamere solidali al carrello, e valutare le rotazioni riprendendo dei riferimenti rettilinei posizionati sulla passerella. Dato tuttavia che gli angoli  $\beta_{56}$  e  $\gamma_{56}$  non sono le rotazioni del carrello rispetto alla passerella, ma quelle relative ad puntatore laser della terna (5), è necessario che il fascio laser sia orientato parallelamente alla passerella.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(7)	$x_{67}$	nullo
	$y_{67}$	telecamera
	$z_{67}$	telecamera
	$\alpha_{67}$	nullo
	$\beta_{67}$	nullo
	$\gamma_{67}$	nullo

**Note:** valgono considerazioni analoghe alla terna (4), in quanto anche in questo caso le terne giacciono su di un piano degli spot.

Terna	Incognite	Strumenti di misura
(8)	$x_{78}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$y_{78}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$z_{78}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$\alpha_{78}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$\beta_{78}$	acquisizioni statiche con laser scanner
	$\gamma_{67}$	acquisizioni statiche con laser scanner

**Note:** per la posizione valgono considerazioni analoghe alla terna (2), in quanto anche in questo caso le due terne sono solidali. Anche l'orientamento può essere determinato tramite scansioni statiche, come illustrato nel paragrafo 2.4.1.

Ricordando dunque le espressioni di paragrafo 2.3.2, il modello matematico della catena di misura può essere espresso ricavando nell'ordine le seguenti grandezze.

$$\begin{aligned}
M_{01} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{01} & \mathbf{t}_{01} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
&\quad \mathbf{t}_{02} = M_{01}\mathbf{t}_{12} \\
M_{02} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{02} & \mathbf{t}_{02} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
&\quad \mathbf{t}_{03} = M_{02}\mathbf{t}_{23} \\
M_{03} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{03} & \mathbf{t}_{03} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
M_{34} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{34} & \mathbf{t}_{34} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
&\quad M_{04} = M_{03}M_{34} \\
&\quad \mathbf{t}_{05} = M_{04}\mathbf{t}_{45} \\
M_{05} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{05} & \mathbf{t}_{05} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
M_{56} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{56} & \mathbf{t}_{56} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
M_{67} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{67} & \mathbf{t}_{67} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
M_{78} &= \left[ \begin{array}{c|c} R_{78} & \mathbf{t}_{78} \\ \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \\
M_{08} &= M_{05}M_{56}M_{67}M_{78}
\end{aligned}$$

### 2.4.1 Misure indirette

In questo paragrafo vengono approfondite alcune misure effettuate in maniera indiretta, elaborando i dati forniti dai sistemi di visione e dalle scansioni statiche tramite laser scanner. Essendo gli strumenti in questione degli strumenti “non convenzionali”, si ritiene opportuno approfondirne in questo frangente il funzionamento, fornendo alcune informazioni di carattere generale.

#### Sistemi di visione

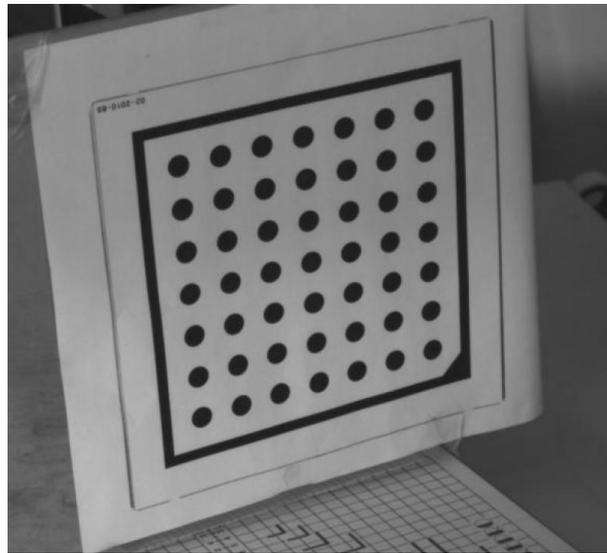
Elemento principale di ciascun sistema di visione è la telecamera. Grazie all'avanzamento della tecnologia e ad un costante abbassamento dei prezzi, le telecamere sono sempre più utilizzate nell'ambito delle misure; esse, infatti, consentono di identificare le caratteristiche geometriche di un oggetto fotografato, quali angoli o distanze. A tal fine si rende necessaria una opportuna procedura di calibrazione, cioè un processo di determinazione dei parametri che definiscono il modello della telecamera.

**Calibrazione dei sistemi di visione:** a oggi non esiste una norma che imponga una particolare metodologia di calibrazione, quindi, in base all'applicazione in cui le telecamere sono utilizzate, si può ricorrere a una determinata tecnica piuttosto che

un'altra.

La tecnica scelta nel nostro caso ha come vantaggio quello di poter utilizzare un setup semplice ed economico, in grado di garantire comunque risultati molto accurati. Per prima cosa è necessario individuare delle immagini di calibrazione di dimensioni opportune. Tali immagini sono essenzialmente dei pattern contenenti rettangoli e cerchi i quali possono essere stampati su dei fogli di carta e fissati su delle superfici piane. E' necessario che i pattern presentino le seguenti proprietà:

- almeno 4 punti facilmente distinguibili;
- distanze note tra i punti;
- caratteristiche morfologiche accurate (tolleranze di planarità e parallelismo molto elevate).



**Figura 2.7:** Esempio di pattern planare.

Dopo aver scelto il calibratore più adatto, si procede all'acquisizione delle immagini. Esse devono essere acquisite in modo da caratterizzare al meglio tutto il sensore e con una qualità elevata, così da poter determinare con accuratezza la posizione dei punti d'interesse. Anche l'illuminazione della scena rappresenta un importante parametro per la riuscita della calibrazione. I punti noti del calibratore, infatti, devono ricevere un'illuminazione omogenea e tale da creare un forte contrasto tra essi e il resto della scena (senza però saturare l'immagine), in modo da renderli ben visibili e riconoscibili. Accoppiando i punti del calibratore nelle immagini con un modello di esso, è possibile calcolare la matrice di omografia e da questa ricavare i parametri della telecamera. Per farlo è possibile utilizzare Labview; il programma riesce a determinare i parametri della telecamera al fine di minimizzare la distorsione ottica, sia radiale che tangenziale.

Al termine della procedura di calibrazione, la telecamera avrà dunque definito una propria terna, posizionata con gli assi  $x$  ed  $y$  paralleli al piano di calibrazione, e passanti per il centro dei punti utilizzati come riferimento; l'asse  $z$  sarà entrante al calibratore. Sarà dunque possibile, analizzando i fotogrammi forniti dalla telecamera, effettuare valutazioni quantitative relativamente a dimensioni ed orientamenti di "texture" presenti

sul piano usato per la calibrazione.

Le misure di visione sono degli strumenti molto duttili; ne seguito vedremo possibili applicazioni.

**Sistemi di visione con “blob detection”:** il blob detection è un algoritmo il quale permette, analizzando i fotogrammi acquisiti dalla telecamera, di riconoscere e determinare la posizione di elementi circolari, denominati appunto “blob”. La posizione è espressa in coordinate  $x$  ed  $y$ , ed è riferita alla terna della telecamera. Si evidenzia che, affinché le coordinate restituite siano esatte, è necessario che i blob si trovino sul piano di calibrazione della telecamera.

**Misure indirette con “blob detection”:** nella catena di misura sono presenti due telecamere che utilizzano questo algoritmo, posizionate sul piano degli spot superiore, e sul carrello. Esse hanno diverse funzioni:

- determinazione di  $x_{34}$ ,  $y_{34}$ ,  $y_{67}$  e  $z_{67}$ . Tali valori coincidono con gli opposti delle coordinate degli spot determinate tramite l’algoritmo di “edge detection”;
- determinazione di  $\gamma_{34}$  ed  $\alpha_{67}$ ;
- possibile determinazione diretta ed approssimata di  $\alpha_{25}$  e  $\beta_{35}$ .

Approfondiamo gli ultimi due punti. Le rotazioni  $\gamma_{34}$  ed  $\alpha_{67}$  sono le rotazioni dei piani rispetto all’asse del relativo fascio laser; Esse sono individuate tramite l’ausilio di quattro puntatori (una coppia per ogni piano).

Consideriamo ad esempio il piano degli spot superiori; i due puntatori laser sono posizionati solidali al distanziometro, con i fasci paralleli ad esso, sul relativo asse  $y$ ; la proiezione degli spot laser sul piano è rappresentata in fig.2.8. Le coordinate dei due spot laser nel sistema di riferimento della telecamera saranno  $P_1 = [x_{P1}, y_{P1}]$  e  $P_2 = [x_{P2}, y_{P2}]$  nella configurazione iniziale, e  $P'_1 = [x_{P1'}, y_{P1'}]$  e  $P'_2 = [x_{P2'}, y_{P2'}]$  in quella deformata.

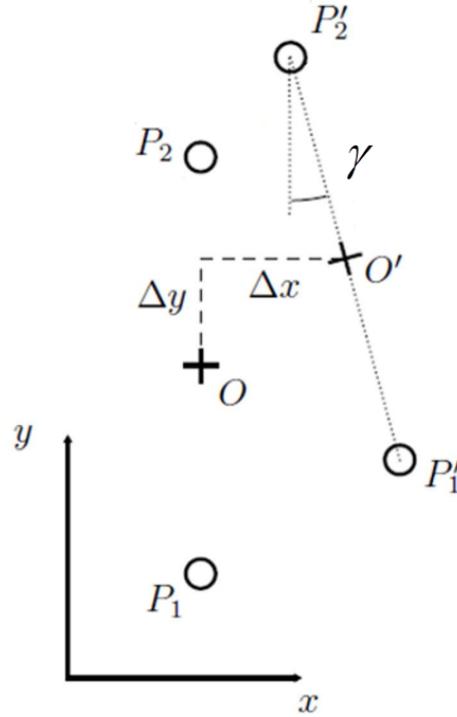
La rotazione  $\gamma$  dei due spot attorno all’asse  $z$  può essere dunque determinata come:

$$\gamma = \arctan \left( \frac{x_{P2'} - x_{P1'}}{y_{P2'} - y_{P1'}} \right) \quad (2.9)$$

Dato tuttavia che siamo interessati alla rotazione del piano rispetto agli spot e non viceversa, è necessario invertire il segno:  $\gamma_{23} = -\gamma$ .

Si fa notare che tale operazione è possibile in quanto, grazie all’ipotesi di piccole rotazioni, eventuali inclinazioni del piano attorno agli assi  $x$  ed  $y$  non influenzano la rotazione attorno l’asse  $z$ .

Per il carrello vale un discorso analogo.



**Figura 2.8:** Movimento degli spot sul piano di proiezione

Relativamente all'ultimo punto, il movimento degli spot sul piano superiore può essere utilizzato anche per trovare direttamente gli angoli  $\alpha_{25}$  e  $\beta_{35}$ ; ciò permette di fatto di bypassare le terne (3) e (4). Tale operazione, tuttavia, costituisce un'approssimazione valida solamente nel caso in cui le rotazioni siano effettivamente molto piccole e non vi sia flessione della colonna, che può essere utilizzata per la verifica dei dati forniti dai due inclinometri.

Si ipotizzi che la colonna, rigida, ruoti rispetto alla traversa secondo una cerniera posizionata in corrispondenza della terna (2), e che il piano degli spot sia perpendicolare all'asse della colonna (fig.2.9). Tramite delle semplici considerazioni trigonometriche, è possibile scrivere:

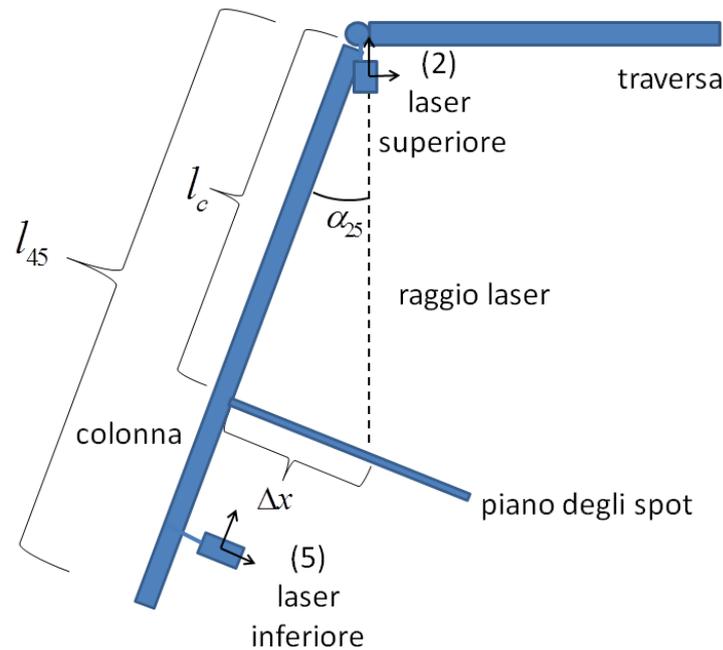
$$\begin{aligned}\alpha'_{25} &= -atan\left(\frac{\Delta y}{l_c}\right) \\ \beta'_{25} &= atan\left(\frac{\Delta x}{l_c}\right)\end{aligned}\quad (2.10)$$

dove  $l_c$  è la lunghezza misurata dal distanziometro. Considerando dunque che  $\gamma_{25} = \gamma_{23}$ , e che  $\mathbf{t}_{25}$  può essere ricavato come:

$$\mathbf{t}_{25} = \begin{bmatrix} l_{25} \sin(\beta_{25}) \\ l_{25} \sin(\alpha_{25}) \\ l_{25} \cos(\alpha_{25}) \cos(\beta_{25}) \end{bmatrix}$$

è possibile ricavare direttamente  $M_{25}$ .

Si evidenzia che con questo modello si tende a sottostimare le rotazioni  $\alpha_{25}$  e  $\beta_{25}$  nel caso la colonna sia sottoposta a flessione; inoltre esso si basa su una geometria semplificata del sistema. In fase di analisi dei risultati i due modelli saranno confrontati.



**Figura 2.9:** Schematizzazione della colonna come asta rigida incernierata alla traversa

**Sistemi di visione con “edge detection”:** l’algoritmo di “edge detection” permette di individuare, a partire dai fotogrammi registrati dalla telecamera, l’angolo formato dalla terna di riferimento e un generico elemento rettilineo.

Nella catena di misura vengono utilizzati due sistemi di visione di questo tipo; entrambi sono posizionati sul carrello, e sono adibiti all’individuazione degli angoli di beccheggio ed imbardata del carrello stesso rispetto alla *terna distanziometro inferiore*, e dunque gli angoli  $\beta_{56}$  e  $\gamma_{56}$ . Gli elementi rettilinei cui fanno riferimento le telecamere sono posizionati sul piano di calpestio della passerella per l’imbardata, e sul corrimano per il beccheggio. Senza entrare nel dettaglio del setup sperimentale, possiamo anticipare che sono costituiti da un decametro svolto e fissato a terra, ed una serie di profilati di alluminio fissati al corrimano.

Relativamente a questi sistemi di visione è inoltre necessario evidenziare che:

- anche per queste misure si fa uso dell’ipotesi di piccole rotazioni, in quanto non si tiene conto degli effetti prospettici che vengono a crearsi a causa del generico orientamento del carrello rispetto alla passerella;
- affinché la misura sia esatta, è necessario che il distanziometro sia solidale alla passerella, e gli elementi rettilinei siano paralleli al fascio del distanziometro.

Per determinare l’orientamento del piano del carrello non è possibile utilizzare un inclinometro, in quanto il moto del carrello disturberebbe la misura; inoltre, con tale strumento non sarebbe possibile trovare l’imbardata del carrello.

## Laser scanner

Effettuando delle scansioni statiche, e dunque in modalità sferica, del camion, del by-bridge e del carrello, è possibile ricostruirne un modello 3D, dal quale ricavare diverse informazioni utili. In particolare, le grandezze determinabili con questa procedura sono, come abbiamo visto, i vettori  $\mathbf{t}_{12}$ ,  $\mathbf{t}_{45}$ ,  $\mathbf{t}_{78}$  e gli angoli  $\alpha_{78}$   $\beta_{78}$   $\gamma_{78}$ .

Si evidenzia che tale grandezze sono costanti, pertanto è sufficiente individuarle una sola volta mediante una procedura di calibrazione iniziale.

La determinazione di un vettore da una nuvola di punti è piuttosto intuitiva; ad esempio, per quanto riguarda il vettore  $\mathbf{t}_{12}$ , è necessario innanzitutto definire nel modello 3D la terna (1), selezionando dalla nuvola l'origine e tre punti rappresentanti gli assi della terna. Una volta definita la terna, il programma restituisce in automatico le coordinate di ciascuno degli altri punti nella suddetta terna.

La procedura è più complessa per quanto riguarda le rotazioni tra due terne. In questo caso è necessario individuare almeno tre punti nello spazio, le cui coordinate siano note sia nel sistema di riferimento del Faro, sia in quello della generica terna; per quanto riguarda l'orientamento tra le terne (7) e (8), ad esempio, è possibile utilizzare i blob del pattern per la calibrazione della telecamera, in quanto la terna (7) è definita proprio a partire da tali riferimenti. E' dunque possibile determinare la matrice di rototraslazione tra le due terne, risolvendo numericamente l'equazione:

$$Acquisition = RModel + T \quad (2.11)$$

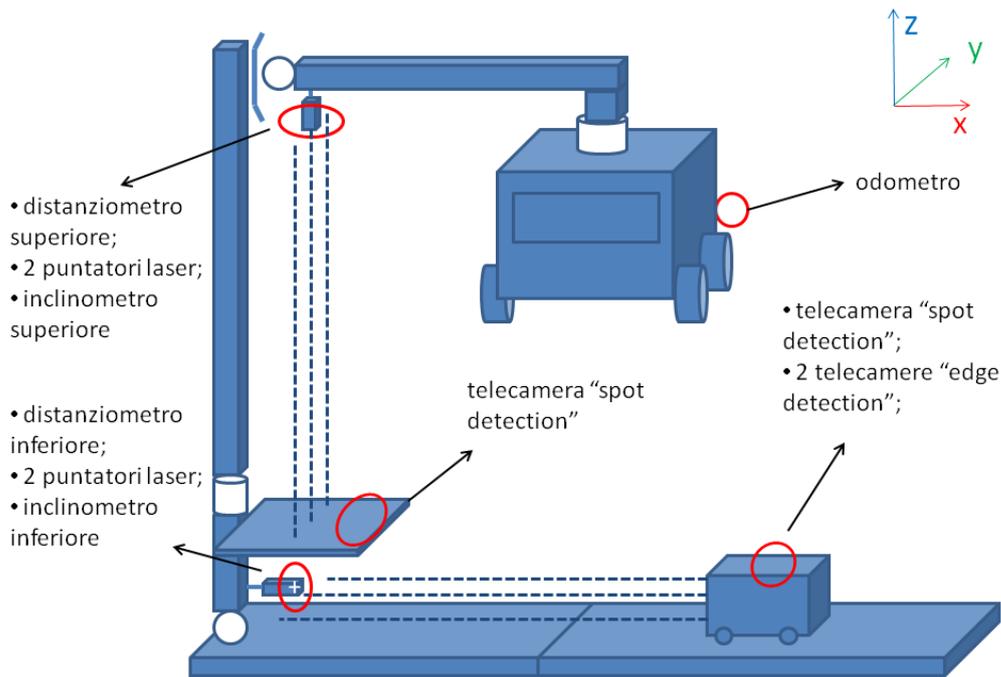
dove *Acquisition* e *Model* sono le matrici 3x3 contenenti le coordinate dei tre punti nei due sistemi di riferimento, , ed *R* e *T* sono la matrice di rotazione ed il vettore di traslazione, incognite della procedura. Nello specifico la soluzione numerica nel nostro caso è stata ottenuta tramite la funzione Matlab svd.m .

### 2.4.2 Riepilogo degli strumenti utilizzati e della catena di misura

Gli strumenti di misura e la loro posizione nella catena, dunque, sono rappresentati in fig.2.10.

Riepilogando, nel retro del camion viene posizionato un **odometro**, il quale permette di individuare l'avanzamento rettilineo del camion.

Al termine della traversa orizzontale troviamo un gruppo di strumenti di misura, costituito da un **distanziometro**, **due puntatori laser** ed un **inclinometro**. I tre strumenti laser proiettano su di un **piano di proiezione** opportunamente fissato nella parte inferiore della colonna, al di sotto della ralla; i loro fasci sono diretti in verticale, paralleli tra di loro, e giacenti su un piano che può essere considerato, a meno del moto della struttura, perpendicolare all'asse x di figura. L'inclinometro, il quale è uno strumento che sfrutta la forza di gravità per definire l'inclinazione di un piano nello spazio, viene utilizzato per determinare la direzione dei fasci laser. Il distanziometro, è utilizzato essenzialmente per individuare la distanza del piano dalla traversa; i due puntatori laser sono invece utilizzati per individuare la rotazione del piano intorno alla ralla.



**Figura 2.10:** Posizionamento degli strumenti di misura su camion, by-bridge e carrello.

Solidale al piano superiore abbiamo diversi strumenti di misura. In primo luogo una **telecamera**, che riprende il piano e che è in grado di fornire gli spostamenti degli spot laser sul piano stesso, tramite un algoritmo di **"spot detection"**. Sotto al piano, ma collegati rigidamente ad esso, trovano posto altri **due puntatori laser**, un **distanziometro**, ed un **inclinometro**. Grazie ai dati forniti dalla telecamera, dal distanziometro superiore, dall'inclinometro, è di fatto possibile individuare il moto del piano rispetto alla traversa, indipendentemente dal moto e dalle eventuali deformazioni della struttura del by-bridge che collega questi due elementi.

Il distanziometro inferiore, i due puntatori laser e l'inclinometro costituiscono un insieme di strumenti sostanzialmente analogo a quello posizionato sulla traversa. In questo caso i fasci laser sono posizionati parallelamente, a meno del moto della struttura, all'asse della passerella. Anche in questo caso i fasci giacciono su un unico piano orizzontale.

Sul carrello, che si muove in avanti ed indietro sulla passerella, sono presenti, oltre al **piano** sul quale proiettano i tre dispositivi laser, tre **telecamere**. Una telecamera è rivolta verso il piano degli spot, ed grazie ad un algoritmo di **"spot detection"** è in grado di fornire le coordinate degli spot sul piano stesso; grazie ai due puntatori ed ai dati forniti dalla telecamera, in particolare, è possibile individuare il rollio del carrello rispetto alla sorgente laser. Il compito di individuare beccheggio ed imbardata del carrello è affidato questa volta alle restanti **due telecamere** presenti sul carrello. Esse sono rivolte verso il corrimano laterale, e verso il piano di calpestio della passerella, sul quale viene preventivamente posizionato un elemento rettilineo, quale ad esempio un decametro svolto, parallelo all'asse della passerella. I due angoli sono individuati

tramite un algoritmo di “**edge detection**” eseguito sulle immagini acquisite dalle telecamere: tale algoritmo è in grado di riconoscere, in ciascun frame video, la presenza di elementi rettilinei (nel nostro caso il decametro e il corrimano), e di calcolarne l’inclinazione rispetto alla terna di riferimento della telecamera.

Infine, sul piano superiore del carrello viene posizionato il **laser scanner 3D**. Tale strumento viene fatto funzionare in “modalità elicoidale”; ciò significa che il fascio laser che esso utilizza per scansione l’ambiente circostante viene movimentato tramite un unico asse di rotazione, andando a formare una sorta di “piano di scansione” perpendicolare all’asse del carrello. Il movimento combinato del carrello sulla passerella, e del camion sull’impalcato, dunque, permette al dispositivo di eseguire una scansione completa dell’intradosso della struttura.

## 2.5 Il modello SimMechanics

Un modello semplificato a corpi rigidi del sistema camion/by-bridge/carrello è stato ricostruito tramite il software multibody SimMechanics. Esso ha la caratteristica di simulare sia la struttura fisica, costituita da camion, bybridge e carrello, sia i dati restituiti dal sistema di misura, e dunque i movimenti degli spot laser sui piani sui quali vengono proiettati.

Il modello SimMechanics non può sostituirsi al modello matematico per la ricostruzione della traiettoria, in quanto le misure sperimentali sono inevitabilmente affette da errore, e dunque un loro utilizzo nel modello SimMechanics porterebbe ad incongruenze geometriche, non “digeribili” dal software.

Ciononostante esso costituisce un ausilio fondamentale, in quanto in fase preliminare può sostituirsi al sistema reale; è possibile infatti, imponendo dei movimenti ai corpi che compongono il modello SimMechanics del by-bridge, ottenere gli output della catena di misura da inserire nel modello matematico. In tal modo permette di verificare velocemente la correttezza del modello matematico, ed effettuare considerazioni relative ad approssimazioni nella catena di misura, o a possibili errori nella stessa.

### 2.5.1 Caratteristiche del modello

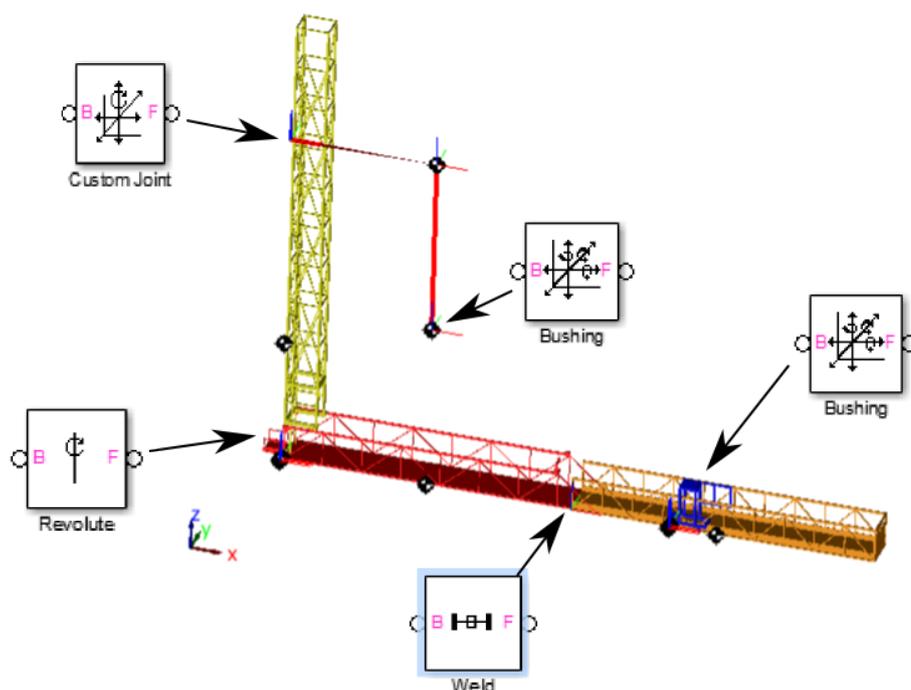
La struttura fisica del by-bridge è stata simulata tramite le seguenti parti rigide:

- camion con montante e traversa;
- colonna;
- passerella esterna;
- passerella interna;
- carrello.

I giunti utilizzati sono i seguenti:

- “bushing” tra camion ed asfalto. Tale giunto permette di imporre tutte e tre le rotazioni e gli spostamenti del camion rispetto ad una terna assoluta iniziale;

- “custom joint” tra traversa e colonna, nel quale vengono consentite rotazioni attorno agli assi x ed y;
- “revolute” tra colonna e passerella, cioè una cerniera con asse parallelo a z;
- “weld” tra passerella esterna ed interna. Tale giunto unisce i due corpi impedendone il moto relativo;
- “bushing” tra cerniera e carrello.



**Figura 2.11:** Immagine dell’animazione del modello SimMechanics; nell’immagine camion, montante e traversa sono sostituiti da corpi fittizi.

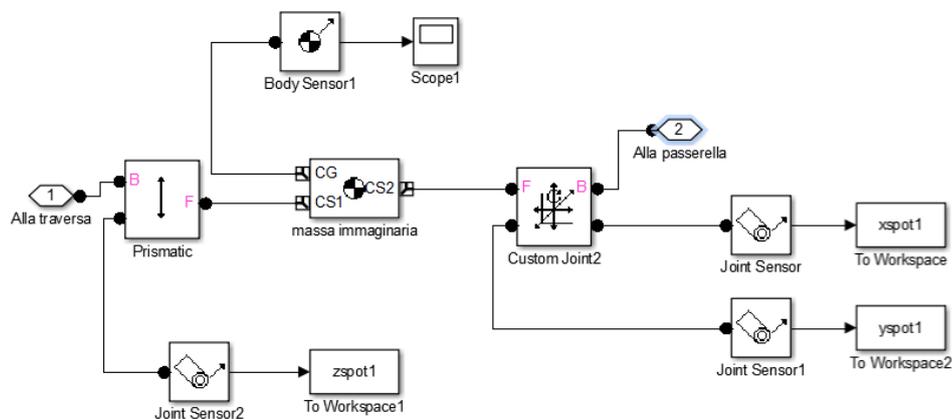
Il sistema ora presentato può essere movimentato imponendo degli ingressi arbitrari ai giunti, riproducendo così il moto del camion, del by-bridge e del carrello.

Per quanto riguarda la riproduzione della catena di misura, gli output di alcuni strumenti che effettuano delle misure dirette possono essere approssimati proprio tramite gli ingressi forniti ai giunti. In particolare:

- odometro: il suo output coincide con il valore di avanzamento del camion imposto tramite il giunto “bushing”;
- inclinometro superiore: il suo output coincide con i valori di beccheggio ed imbardata del camion imposti tramite il giunto “bushing”;
- telecamera laterale del carrello: il suo output coincide con la rotazione di beccheggio del carrello imposta tramite il giunto “bushing” tra carrello e passerella;

- telecamera di terra: il suo output coincide con la rotazione di imbardata del carrello imposta tramite il giunto “bushing” tra carrello e passerella.

Per determinare gli output degli strumenti legati ai fasci laser è necessario invece modellare il moto degli spot laser sui rispettivi piani. Ciò è stato effettuato utilizzando dei corpi fittizi di dimensione nulla, rappresentanti gli spot, opportunamente vincolati al resto della struttura. Per quanto riguarda il piano superiore, ad esempio, il corpo fittizio è stato collegato alla traversa tramite un giunto “prismatic” (prismatico), ed alla colonna tramite un “custom joint” costituito da un giunto sferico e due traslazioni prismatiche lungo gli assi del piano.



**Figura 2.12:** Particolare del modello SimMechanics raffigurante la modellazione degli spot

In questo modo è possibile ottenere gli output dei seguenti strumenti:

- distanziometro superiore: il suo output è determinato tramite un “joint sensor” sul giunto “prismatic” del relativo spot;
- telecamera superiore: le coordinate degli spot sono determinate tramite un “joint sensor” sulle traslazioni prismatiche del giunto “custom joint” dei relativi spot;
- distanziometro inferiore: il suo output è determinato tramite un “joint sensor” sul giunto “prismatic” del relativo spot;
- telecamera inferiore: le coordinate degli spot sono determinate tramite un “joint sensor” sulle traslazioni prismatiche del giunto “custom joint” dei relativi spot;

Dunque grazie al modello ora presentato è possibile imporre il moto di camion, by-bridge e carrello; il modello restituisce gli output degli strumenti di misura della catena, i quali possono essere utilizzati per effettuare delle verifiche e delle simulazioni preliminari tramite il modello matematico precedentemente illustrato.

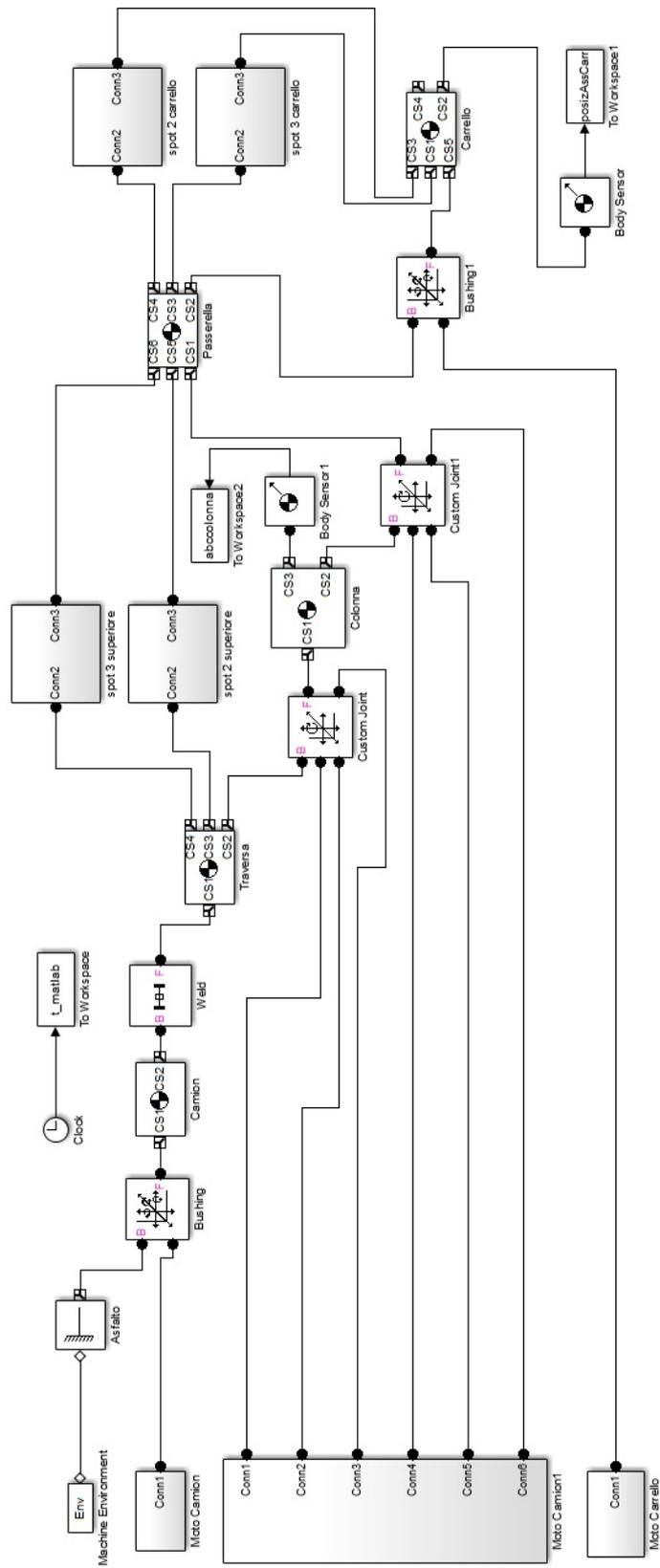


Figura 2.13: Modello SimMechanics

## CAPITOLO 3

### Valutazione della catena di misura

Questo Capitolo si propone di valutare la validità della catena di misura descritta precedentemente, stimandone l'incertezza nella determinazione della posizione assoluta del carrello. Questa fase di valutazione è molto importante, al fine di evitare di realizzare una catena di misura che non abbia utilità pratica, perché non sufficientemente accurata.

Nella prima parte del capitolo si cerca di comprendere l'effetto di errori nella traiettoria del laser scanner sulla ricostruzione modello 3D finale dell'impalcato; in questo modo è possibile definire l'ordine di grandezza del margine di errore che è possibile commettere nel calcolo della traiettoria.

Nella seconda parte, si valuta l'accuratezza della catena di misura definita; in particolare, vengono definiti tre possibili errori: errori legati all'ipotesi di piccole rotazioni, errori legati all'accuratezza degli strumenti, ed errori di calibrazione e setup.

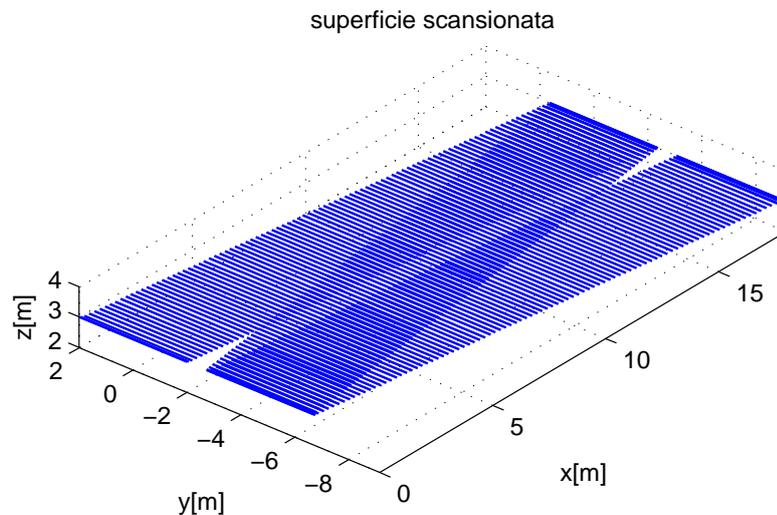
Dai risultati ottenuti derivano delle indicazioni sulla qualità dei processi di calibrazione ed azzeramento da ottenere in fase di setup sperimentale.

#### 3.1 Deformazioni del modello 3D dovute ad errori sulla traiettoria

Cosa succede al modello 3D dell'impalcato se si commettono errori nell'individuazione della traiettoria del laser scanner? Una risposta a tale domanda è stata individuata con l'ausilio di alcune simulazioni Matlab.

Si ipotizzi di effettuare la scansione di un impalcato perfettamente planare, tramite un laser scanner posto a distanza fissa (3 m) dall'impalcato, con assi paralleli al sistema di riferimento assoluto. Il movimento imposto al dispositivo è a velocità costante in direzione  $y$  (la quale coincide con l'asse dell'impalcato), e con legge di moto ad accelerazione costante tagliata in direzione  $x$  (la quale coincide alla larghezza dell'impalcato). In questo modo, si riproduce approssimativamente il moto del carrello nello spazio sottostante l'impalcato.

In fig. 3.1 è riportata la simulazione della scansione correttamente ricostruita dell'impalcato, che si ottiene se non si commettono errori nell'individuazione della traiettoria del laser scanner. Essa sarà di riferimento per il seguito del paragrafo. Per semplicità, si è deciso di sostituire i punti acquisiti con delle linee, le quali sono circa disposte come le spire caratteristiche dell'acquisizione in modalità elicoidale. Le coordinate visualizzate in figura sono riferite ad una terna assoluta posizionata in maniera da coincidere con



**Figura 3.1:** Scansione di un impalcato planare simulata in Matlab. Le spire dell'elica sono state approssimate con delle linee.

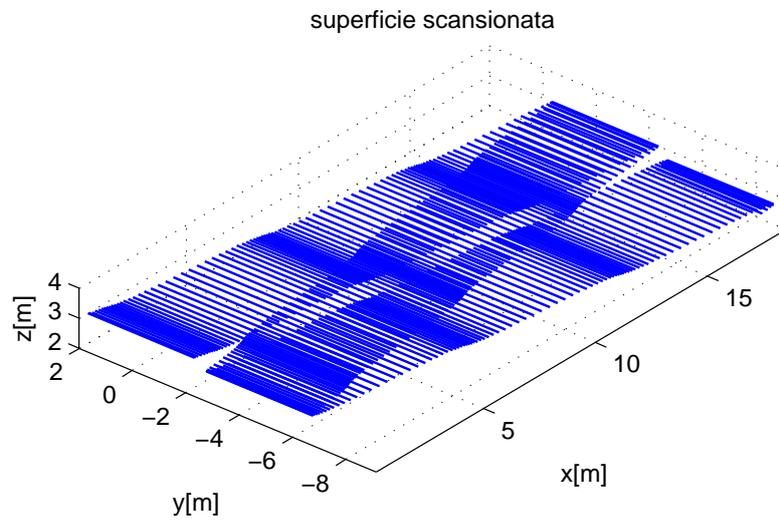
la terna del dispositivo scanner nell'istante iniziale.

Nel seguito verranno rappresentate le simulazioni di scansioni eseguite non correttamente, viziate da errori nella posizione o nell'orientamento del laser scanner.

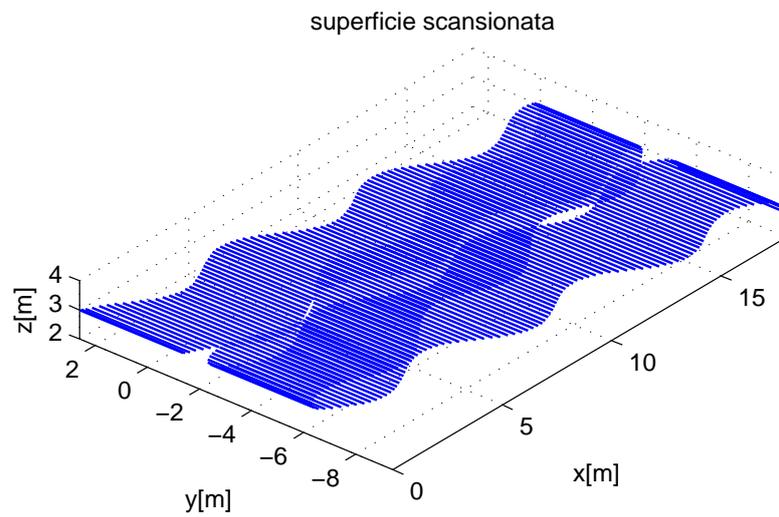
### 3.1.1 Errori di posizione

Errori di posizione stazionari nel tempo comportano semplicemente una traslazione del modello nello spazio; ciò non costituisce un problema, in quanto il riferimento assoluto è comunque scelto in maniera arbitraria. Effettuare il confronto tra due modelli 3D dello stesso impalcato è comunque possibile, è sufficiente traslare una delle due nuvole di punti.

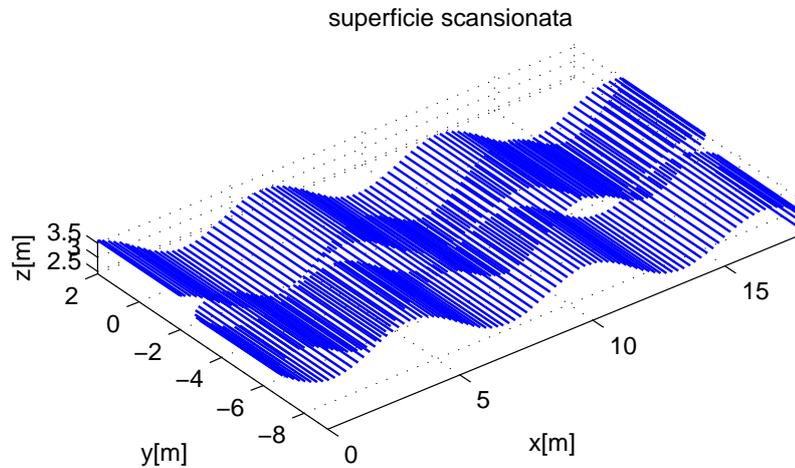
Errori di posizione non costanti, al contrario, provocano delle deformazioni dell'impalcato della stessa entità e forma dell'errore di posizione. Tali deformazioni potrebbero essere scambiate per difetti dell'impalcato stesso, e pertanto vanno evitate. In fig.3.2, 3.3, 3.4 vengono riportate le ricostruzioni viziate da errori di posizione sinusoidali dell'ampiezza di 0.2 m. Si può notare che l'effetto varia a seconda dell'asse considerato: per l'asse  $x$  l'effetto è di dilatare e comprimere il modello dell'impalcato, per l'asse  $y$  di distorcerlo "in maniera sinusoidale", per l'asse  $z$  di generare oscillazioni perpendicolari alla superficie dell'impalcato.



**Figura 3.2:** Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione  $x$ .



**Figura 3.3:** Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione  $y$ .



**Figura 3.4:** Effetto sulla ricostruzione dell'impalcato di un'oscillazione sinusoidale in direzione z.

### 3.1.2 Errori di orientamento

Nel caso di errori di orientamento, anche la presenza di offset fissi può provocare deformazioni nel modello 3D. Nel seguito questa eventualità verrà analizzata nel dettaglio; osservazioni simili si possono estendere al caso di errori oscillanti.

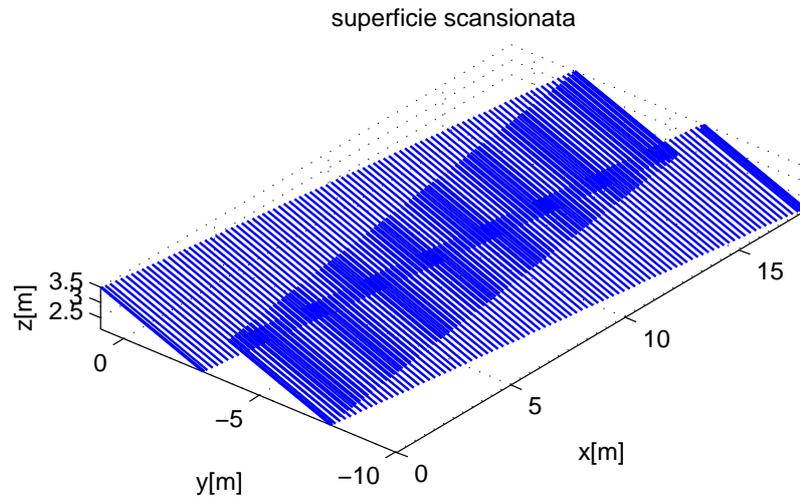
#### Offset di rollio

Ipotizziamo di avere un errore costante nel rollio del carrello, e dunque nell'orientamento del laser scanner, dovuto a procedure di azzeramento sbagliate, ecc.. ; ipotizziamo tale errore pari a  $\alpha_0 = 20^\circ$ , un valore molto elevato, così da evidenziare il fenomeno. Dai risultati della simulazione (fig.3.5) si può notare che le scansioni relative a due passaggi contigui del carrello non si sovrappongono, e ciò rende la superficie dell'impalcato ricostruito non continua. Si può inoltre notare una piccola traslazione dell'impalcato in direzione y, la quale, come visto in precedenza, non è problematica.

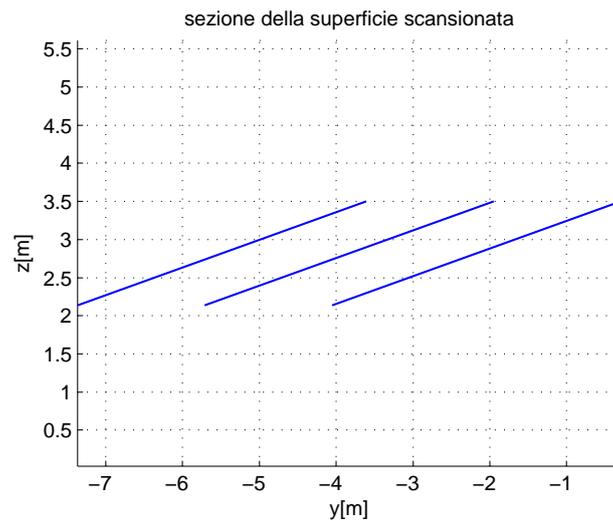
Tale errore dunque non comporta una rotazione rigida del modello dell'impalcato, come si potrebbe erroneamente pensare in un primo istante, ma una ricostruzione deformata della nuvola 3D<sup>1</sup>. Si può dimostrare che, anche per errori molto piccoli, l'errore compiuto è importante. Trascurando infatti l'effetto della traslazione, ed ipotizzando che le linee di scansione siano lunghe 6 m, un errore  $\alpha_0 = 0.5^\circ$  comporta un errore di posizionamento  $e$  dei punti più esterni della linea pari circa a :

$$e = \frac{6[m]}{2} \sin(0.5^\circ) = 2.6[cm]$$

<sup>1</sup>Si otterrebbe una rotazione del modello nel caso in cui l'offset angolare sia accompagnato da una rotazione dello stesso offset della traiettoria del carrello, rispetto al riferimento assoluto.



(a) Vista in 3D della ricostruzione dell'impalcato.



(b) Sezione della nuvola di punti.

**Figura 3.5:** Ricostruzione errata della scansione di un impalcato planare, a causa di un errore nella determinazione del rollio del carrello.

il quale non è un errore trascurabile; si evidenzia inoltre che tale errore cresce linearmente con la lunghezza della linea di scansione, ed è dunque più elevato per punti lontani dal laser scanner al momento dell'acquisizione.

### Offset di imbardata

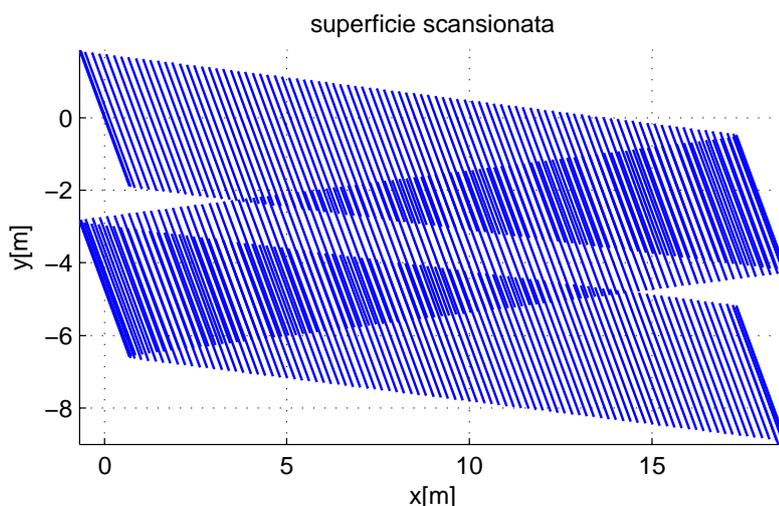
Ipotizziamo di avere un errore fisso nell'imbardata del carrello, anche in questo caso pari a  $\gamma_0 = 20^\circ$ .

In fig. 3.6 è riportato il risultato della simulazione. Anche in questo caso l'impalcato

non è ricostruito correttamente, tuttavia gli effetti sono diversi rispetto a quelli visti per il rollio. In particolare, si può notare che le pareti esterne dell'impalcato non sono continue; ciò è ancora più evidente utilizzando una vista dall'alto, la quale al contrario nel caso del rollio non avrebbe sollevato problemi.

Inoltre, nelle scansioni si perde l'ortogonalità degli elementi giacenti sul piano  $xy$ , quali potrebbero essere nel caso reale le travi presenti sull'impalcato. In questo caso, facendo una sezione verticale della nuvola di punti otterremmo una sezione continua: a differenza del caso precedente, la planarità della superficie scansionata viene mantenuta.

La valutazione numerica dell'errore è essenzialmente analoga a quanto visto per il



**Figura 3.6:** Ricostruzione della scansione di un impalcato planare con un offset nel beccheggio del carrello.

rollio.

### Offset di beccheggio

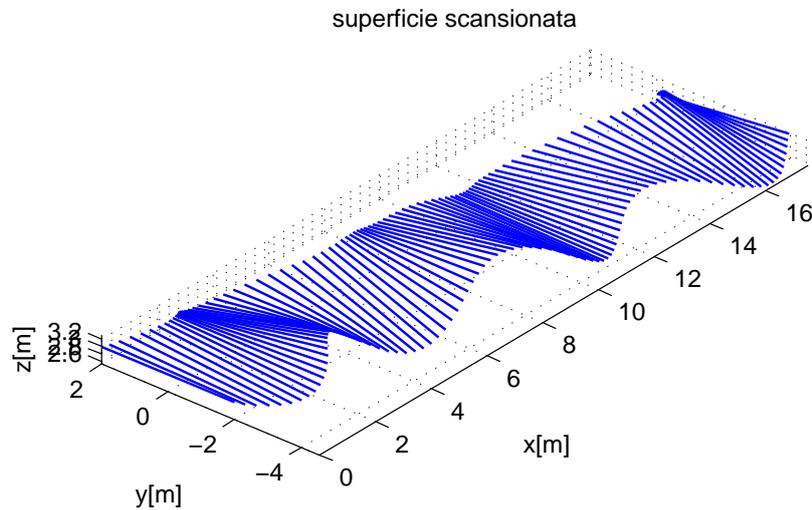
Un errore fisso nel beccheggio del carrello non da luogo a deformazioni nella ricostruzione della superficie dell'impalcato, ma solamente ad una traslazione.

Si potrebbe dimostrare tuttavia che, in una scansione effettuata sul piano  $xz$ , l'effetto di offset nel beccheggio e nell'imbardata del carrello è invertito.

### Errori angolari non costanti

Al fine di visualizzare l'effetto di errori angolari non costanti sulla ricostruzione del modello 3D, è stata effettuata una simulazione nella quale sono stati imposti errori sinusoidali a diverse frequenze su rollio, beccheggio ed imbardata, con ampiezza di  $10^\circ$ . Ne risulta una superficie altamente ondulata, nella quale gli effetti dei singoli errori si confondono. In fig.3.7, per maggior chiarezza, è rappresentato un singolo passaggio

del carrello; si lascia immaginare al lettore l'effetto della sovrapposizione dei passaggi contigui.



**Figura 3.7:** Effetto di errori angolari non costanti.

## 3.2 Accuratezza attesa sulla ricostruzione della traiettoria del laser scanner

La traiettoria e l'orientamento del laser scanner individuati tramite la catena di misura sono inevitabilmente affetti da errori; in questa sezione alcune delle cause principali di tali errori sono state individuate e valutate singolarmente, tramite l'ausilio del modello SimMechanics.

In particolare sono state individuate tre cause di errori:

- approssimazione di piccole rotazioni;
- incertezza degli strumenti;
- calibrazioni e setup errati.

Si evidenzia che le prime due cause di errore sono inevitabili.

### 3.2.1 Errori di traiettoria dovuti all'ipotesi di piccole rotazioni

L'ipotesi di piccole rotazioni che è stata effettuata nel Capitolo precedente implica delle approssimazioni, la cui entità sarà valutata nel presente paragrafo. Si noti che tale ipotesi non è resa necessaria dalla formulazione del modello matematico, ma dal

processo di misura delle rotazioni tra le varie terne.

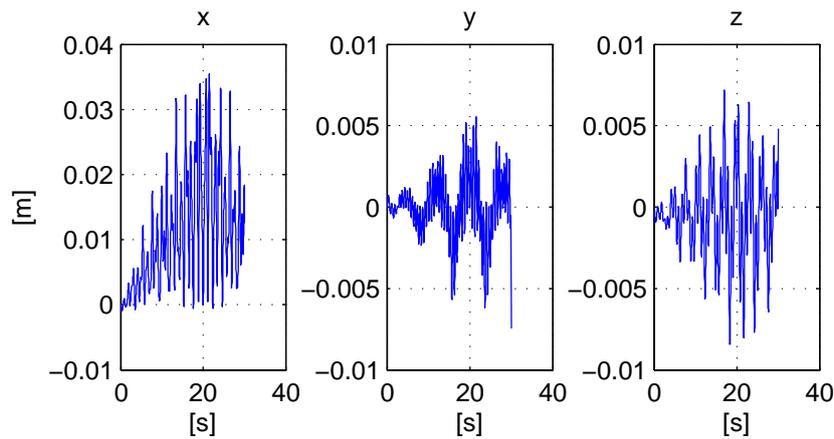
Per dare una stima dell'impatto complessivo sulla catena di misura è possibile utilizzare come riferimento il modello SimMechanics; in particolare:

- si movimentano il modello multibody applicando degli ingressi arbitrari sui vari giunti che uniscono i corpi rigidi;
- si registrano i valori delle misure virtuali;
- si utilizzano tali valori come input del modello matematico, nel quale le matrici di rotazione siano definite utilizzando l'ipotesi di piccole rotazioni (equaz. 2.3.2);
- si confronta l'output del modello matematico, cioè la traiettoria del laser scanner ricostruita, con quella effettiva assunta nel modello Simmechanics.

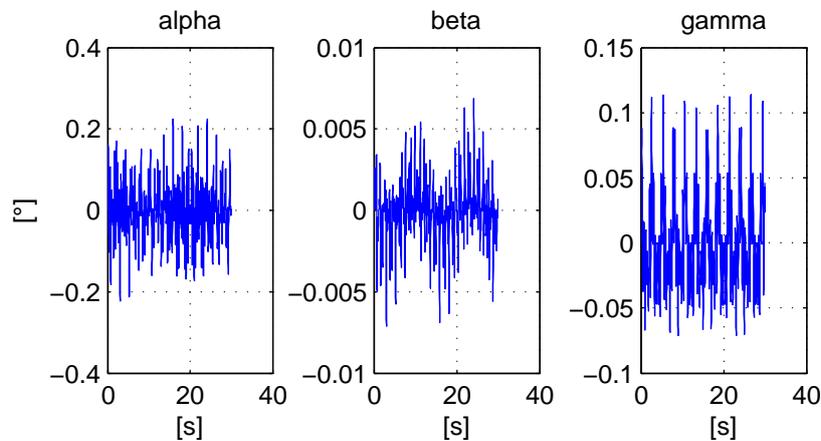
Le simulazioni sono state effettuate imponendo ai vari giunti dei moti sinusoidali con delle ampiezze considerate verosimili, e delle frequenze arbitrarie; in particolare:

- $2^\circ$  per rollio, beccheggio e imbardata del carrello;
- $3^\circ$  per la rotazione della passerella intorno all'asse z;
- $2^\circ$  per la rotazione della colonna intorno all'asse y;
- $1^\circ$  per il rollio del camion;
- $0.5^\circ$  per il beccheggio del camion;

Le simulazioni, inoltre, prevedono il moto del carrello sulla passerella. In particolare, esso raggiunge la fine della passerella dopo circa 20 s; la durata totale delle simulazioni è di 30 s. Si ottengono gli errori sulla traiettoria finale del carrello riportati in fig.3.8, dell'ordine dei centimetri per la posizione, e dei decimi di grado per l'orientamento; si può notare come l'errore massimo compiuto dipenda dalla posizione del carrello sulla passerella.



(a) Errore in metri sulla posizione del carrello.



(b) Errore in gradi sull'orientamento del carrello.

**Figura 3.8:** Errori di traiettoria dovuti all'ipotesi di piccole rotazioni.

### 3.2.2 Errori di traiettoria dovuti all'incertezza degli strumenti

La misura finale della posizione e dell'orientamento del laser scanner è affetta dall'inevitabile errore dovuto all'incertezza degli strumenti di misura.

Tale errore è stato valutato utilizzando il metodo Monte Carlo nel corso di una tesina sviluppata sull'argomento [6]. Anche in questo caso si è ricorso all'ausilio del modello SimMechanics, sulla falsariga di quanto fatto precedentemente; in particolare:

- si è movimentato il modello multibody applicando degli ingressi arbitrari sui vari giunti che uniscono i corpi rigidi;
- i valori delle misure virtuali sono stati registrati;
- le misure virtuali sono state perturbate da rumore casuale, proporzionale all'incertezza degli strumenti;
- le misure perturbate sono state utilizzate come ingresso del modello matematico;

- la posizione del carrello derivata dal modello matematico è stata confrontata con i risultati di SimMechanics, identificando gli errori in corrispondenza delle varie posizioni del carrello.

In una prima fase di valutazione preliminare della catena di misura le incertezze degli strumenti sono state ipotizzate sulla base dello stato dell'arte e della ricerca tra i principali fornitori di strumentazione. I valori impostati sono:

- errore massimo di  $0.01^\circ$  per le misure angolari fornite dagli inclinometri
- errore massimo di 1 mm per le misure ottenute tramite distanziometri
- 0.5 pixel per le misure delle coordinate dei centri dei blob attraverso sistemi di visione
- $0.01^\circ$  per le misure angolari tramite edge detection e sistemi di visione;
- incertezza di 0.1 mm nella misura dell'odometro

I giunti del modello multibody sono stati movimentati imponendo gli stessi movimenti utilizzati per verificare l'effetto delle ipotesi di piccole rotazioni:

- $2^\circ$  per rollio, beccheggio e imbardata del carrello;
- $3^\circ$  per la rotazione della passerella intorno all'asse z;
- $2^\circ$  per la rotazione della colonna intorno all'asse y;
- $1^\circ$  per il rollio del camion;
- $0.5^\circ$  per il beccheggio del camion;

In tali condizioni l'incertezza delle coordinate del laser scanner è risultata inferiore a 1 mm lungo x, y e z; gli errori massimi sono inferiori a 2 mm.

A valle dei risultati delle simulazioni si è provveduto a selezionare gli elementi della catena di misura; senza entrare nel dettaglio dei vari strumenti di misura, nella seguente tabella sono riportati i valori di incertezza valutati sperimentalmente (si veda [6]) e forniti nei datasheets degli strumenti.

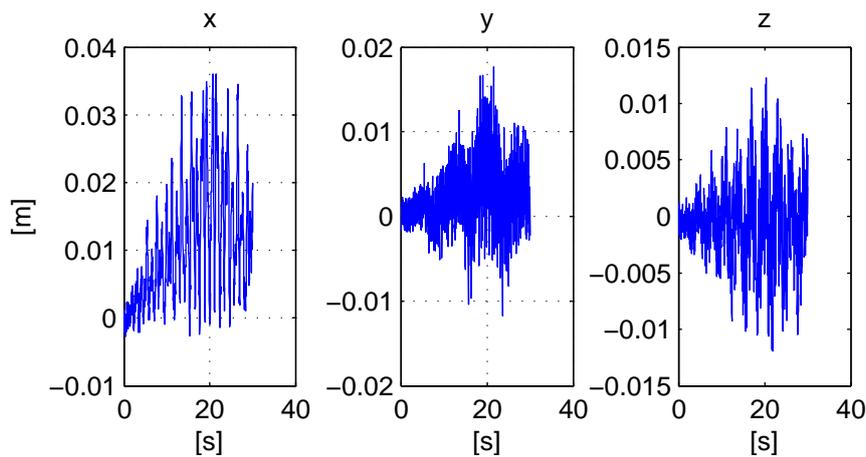
	<b>Datasheet</b>	<b>Prove</b>
<b>Inclinometro</b>	$0.01^\circ$	$0.018^\circ$
<b>Distanziometro</b>	1 mm	1 mm
<b>Telecamere spot</b>	0.1 mm	0.06 mm
<b>Telecamere angoli</b>	$0.01^\circ$	$0.04^\circ$

**Figura 3.9:** Valutazione delle incertezze degli strumenti di misura della catena, individuate tramite datasheet e prove sperimentali.

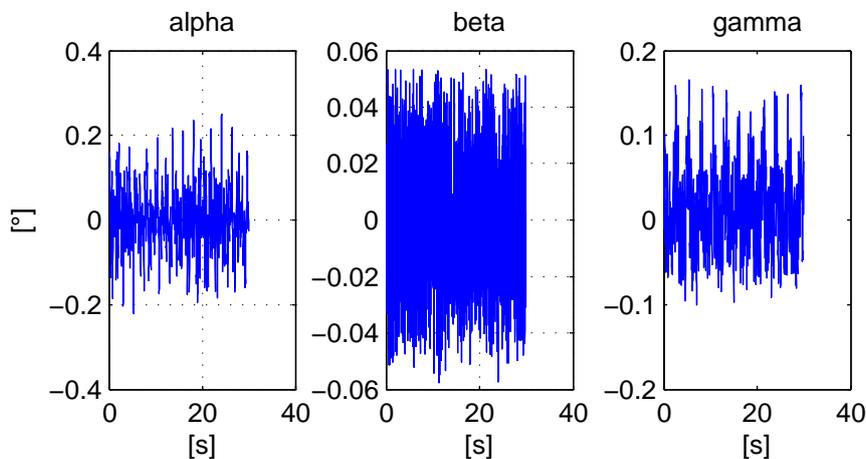
Utilizzando le distribuzioni di probabilità ottenute durante la verifica metrologica sono state effettuate nuove analisi numeriche, che hanno mostrato come l'incertezza attesa lungo i tre assi coordinati sia prossima a 5 mm, e dell'ordine del decimo di grado per l'orientamento in ciascuno dei tre assi.

### Combinazione degli errori di traiettoria dovuti a piccole rotazioni ed all'incertezza degli strumenti

Combinando l'effetto dell'ipotesi di piccole rotazioni e dell'accuratezza degli strumenti, individuati come descritto precedentemente, si ottengono gli errori di fig.3.10. Per quanto riguarda gli strumenti, le incertezze utilizzate sono quelle relative alle prove sperimentali. Si nota che l'errore sugli assi coordinati è dell'ordine dei centimetri, fino ad un massimo di circa 3.5 cm; relativamente all'orientamento, l'errore arriva ad alcuni decimi di grado.



(a) Errore in metri sulla posizione del carrello.



(b) Errore in gradi sull'orientamento del carrello.

**Figura 3.10:** Errori di traiettoria dovuti alla combinazione dell'ipotesi di piccole rotazioni e dell'incertezza degli strumenti.

### 3.2.3 Errori di traiettoria dovuti a calibrazioni e setup

Quest'analisi è importante in quanto ci permette di capire quanto, in fase di setup sperimentale, potremo scostarci dalla catena di misura ideale presentata nel Capitolo precedente. Essa dunque fornisce delle linee guida nella progettazione dei supporti di

fissaggio degli strumenti al by-bridge, e nella messa a punto delle procedure di calibrazione della catena (volte ad esempio alla determinazione preliminare delle distanze tra terne solidali, o all'allineamento dei laser).

Calibrazioni errate implicano misure errate; poiché tuttavia gli output della catena di misura sono innumerevoli, nel presente paragrafo sono stati analizzati solo quelli ritenuti più a rischio di errore, e con impatto sulla traiettoria finale più importante:

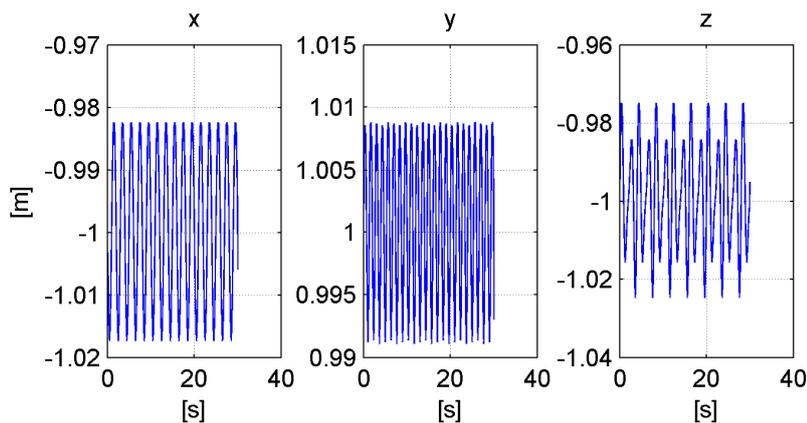
- errori nella misura  $t_{12}$ ;
- errori nelle misure fornite dagli inclinometri.

Anche in questo caso l'analisi è stata svolta con l'ausilio del modello SimMechanics.

### $t_{12}$ errato

Errori nel dimensionamento della parte camion/montante/traversa sono eventualità da prendere in considerazione. In primo luogo, perché tale grandezza è una distanza considerevole, per cui è probabile che vengano commessi errori rilevanti. In secondo luogo, perché essa è legata all'ipotesi che il camion oscilli rispetto ad assi passanti per il punto di contatto tra rulli di supporto e asfalto. Tale ipotesi tuttavia è una semplificazione, per cui i reali assi di oscillazione del camion non sono noti.

Per valutare l'effetto di tale errore è stata utilizzata una procedura analoga a quella dei paragrafi precedenti, impostando tuttavia nel modello Matlab e in quello SimMechanics valori diversi di lunghezza di montante e traversa. In particolare, nelle coordinate del distanziometro superiore rispetto alla terna camion è stato considerato un errore di un metro ciascuna. Il moto imposto ai vari giunti è lo stesso dei paragrafi precedenti. L'errore finale sulla posizione del laser scanner è riportato in fig. 3.11.



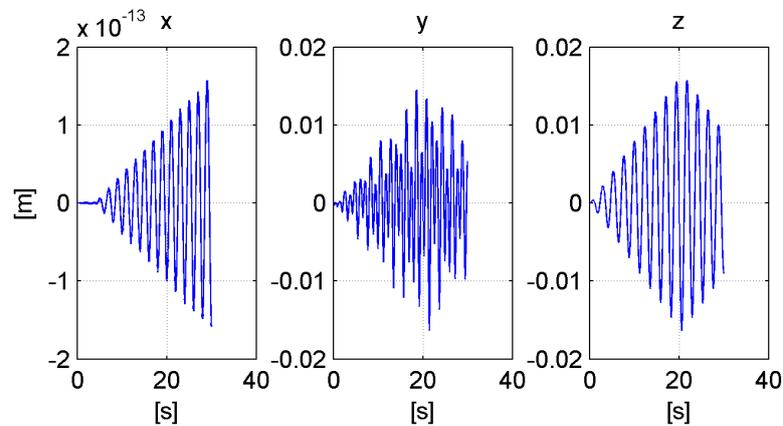
**Figura 3.11:** Effetto di un errore nel dimensionamento della parte camion/montante/traversa

Dalla figura si può notare che l'errore è composto da una parte fissa, pari ad 1m sui tre assi, ed una parte oscillante, dell'ordine dei centimetri.

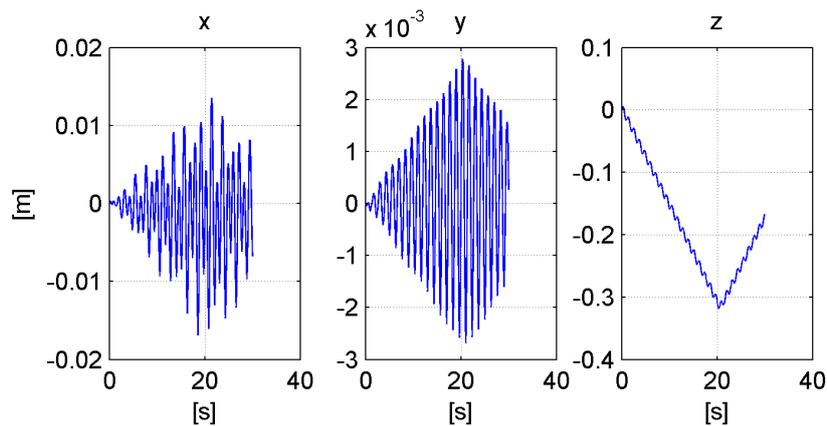
### Misure inclinometriche errate

Questa possibilità è stata presa in considerazione in quanto gli inclinometri misurano in maniera diretta degli angoli, ed avendo il by-bridge dei bracci di lunghezza elevata, sono sufficienti piccoli errori angulari per commettere errori elevati in posizione. Errori di questo tipo potrebbero essere legati ad un errato fissaggio degli strumenti alla struttura del by-bridge, ad esempio mediante dei supporti troppo cedevoli, o ad errori di calibrazione; nel primo caso avremmo degli errori oscillanti nella misura dell'angolo, nel secondo degli offset angulari costanti.

Ma che cosa significa dunque sbagliare la misura di una rotazione di ad esempio  $1^\circ$ ? Si è cercato di dare una risposta a questa domanda eseguendo delle simulazioni analoghe alle precedenti, movimentando il by-bridge come nel caso delle piccole rotazioni, ed ipotizzando un offset angolare costante, pari a appunto ad  $1^\circ$ , sugli assi x ed y dell'inclinometro inferiore. Gli errori ottenuti sono riportati in fig. 3.12 e 3.13.



**Figura 3.12:** Errore di traiettoria dovuto ad un offset dell'ampiezza di  $1^\circ$  sull'angolo  $\alpha$  dell'inclinometro inferiore



**Figura 3.13:** Errore di traiettoria dovuto ad un offset dell'ampiezza di  $1^\circ$  sull'angolo  $\beta$  dell'inclinometro inferiore

A tali errori nella posizione, naturalmente, si accompagna un errore costante nell'orientamento pari all'offset imposto. Dalle figure si può notare innanzitutto che anche da offset angulari costanti possono nascere oscillazioni nell'errore di posizione. Si può

notare inoltre che gli effetti sono molto diversi.

In particolare, in 3.13 si può notare per l'asse  $z$  un errore molto elevato; la sua dipendenza circa lineare dal moto del carrello, tuttavia, combinata con l'offset angolare in  $\beta$ , genera in verità nella ricostruzione semplicemente una rotazione rigida dell'impalcato lungo l'asse  $y$ , e non deformazioni; è dunque di pericolosità relativa. La situazione sarebbe stata molto più problematica nel caso in cui il disturbo imposto non fosse stato costante, ma oscillante con ampiezza di  $1^\circ$ : in tal caso, l'errore lineare sarebbe diventato anch'esso oscillante, con ampiezza fino a 30cm.

### 3.3 Valutazioni conclusive

La bontà della ricostruzione del modello 3D dell'impalcato dipende dalla presenza di errori nella ricostruzione della traiettoria del laser scanner; errori di natura oscillatoria sono pericolosi, in quanto deformano il modello nascondendo i difetti reali. Gli errori sistematici sono critici solo nel caso di errori di orientamento, in quanto provocano comunque delle deformazioni nel modello 3D; in particolare, offset nel rollio del carrello rispetto alla passerella compromettono la sovrapposizione di scansioni relative a passaggi contigui del carrello. Offset nel beccheggio e nell'imbardata, invece, possono implicare la perdita di ortogonalità degli elementi dell'impalcato. Le analisi numeriche effettuate hanno mostrato che sono sufficienti errori di mezzo grado per generare incongruenze nel modello di diversi centimetri.

L'accuratezza nella ricostruzione della traiettoria del laser scanner è governata sia dalle approssimazioni del modello matematico (approssimazione di piccole rotazioni) sia dall'accuratezza degli strumenti di misura (incertezze strumentali). L'influenza di entrambi i fattori è stata valutata per oscillazioni della struttura inferiori a  $3^\circ$ ; in queste condizioni si hanno, per l'approssimazione di piccole rotazioni, errori massimi sui singoli assi dell'ordine dei 3 cm e  $0.2^\circ$ . L'incertezza strumentale invece comporta, in assenza di errori del modello, errori inferiori al centimetro e  $0.1^\circ$ . Essendo gli errori strumentali e di modello dello stesso ordine di grandezza non è possibile aumentare l'accuratezza finale della misura agendo singolarmente su un singolo componente. Un aumento dell'accuratezza può essere ottenuto solamente attraverso un modello più accurato che non si basi sull'ipotesi di piccole rotazioni, e quindi tramite una catena di misura più complessa basata su strumenti con accuratezza superiore. La combinazione dei due effetti implica errori massimi previsti di circa 4 cm, e  $0.2^\circ$ .

A questi errori si aggiungono errori legati a calibrazioni e setup non ottimali degli strumenti; questi errori sono particolarmente pericolosi, in quanto anche offset costanti, sia in posizione che angolari, possono provocare, a causa del moto oscillatorio della struttura, errori in posizione variabili nel tempo. Le simulazioni effettuate hanno mostrato come le calibrazioni debbano garantire errori sistematici inferiori al decimo di grado per quanto riguarda le misure angolari. Gli errori nell'identificazione delle distanze tra i vari componenti della catena di misura sono meno critici (risultano tollerabili errori massimi dell'ordine della decina di centimetri).

## CAPITOLO 4

### **Determinazione della distribuzione attesa dei punti nel modello 3D**

Affinché il modello 3D sia effettivamente utilizzabile, è necessario che sia formato da una nuvola di punti sufficientemente fitta e regolare. Al tempo stesso, per poter limitare i costi dell'ispezione è necessario ridurre il tempo impiegato per l'acquisizione. In questo Capitolo, dunque, vengono descritte una serie di simulazioni effettuate in Matlab e SimMechanics al fine di ottenere sensibilità sul legame tra i parametri di moto del sistema e la densità di punti delle ricostruzioni 3D dell'impalcato, e comprendere dunque se il sistema descritto è in grado di effettuare scansioni sufficientemente dettagliate.

Nella prima parte del Capitolo vengono illustrate le caratteristiche ed i parametri delle simulazioni; nel seguito si mostrano i risultati delle stesse, e se ne traggono delle conclusioni.

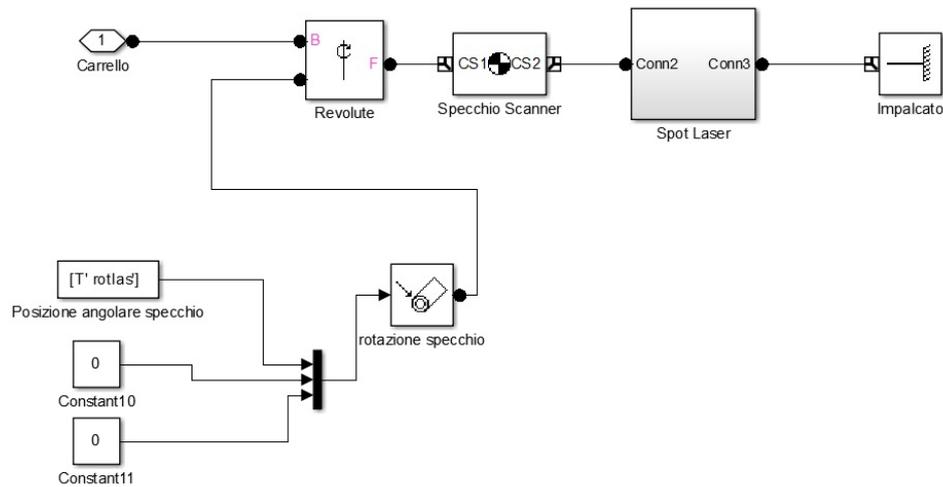
#### **4.1 Simulazioni in Matlab/Simmechanics**

Obiettivo della scansione dell'impalcato è ottenere, nel minor tempo possibile, un modello 3D caratterizzato da una distribuzione dei punti il più uniforme e "densa" possibile. Dato che tali proprietà contrastanti, è necessario agire sui parametri in gioco al fine di trovare una buona soluzione di compromesso.

Ciò è stato effettuato con l'ausilio di alcune simulazioni al calcolatore, in particolare utilizzando Matlab e SimMechanics. Il lavoro è stato organizzato nelle seguenti fasi:

- le leggi di moto del carrello e del camion sono state implementate in Matlab, scegliendo il passo temporale in base alla frequenza di acquisizione del laser scanner impostata;
- le leggi di moto individuate sono state applicate al modello SimMechanics, derivato dal modello descritto nel Capitolo 2 tramite l'implementazione di una parte di codice volta a simulare il funzionamento del laser scanner (fig.4.1). Essa si basa sullo stesso principio utilizzato per modellare il moto degli spot laser sui piani, con l'aggiunta di un asse di rotazione che rappresenta il moto dello specchio dello scanner;

- dalla simulazione in SimMechanics si ricava un vettore contenente le coordinate sull'impalcato di ciascuno dei punti acquisiti dallo scanner. Per semplicità, l'impalcato è stato considerato planare;
- per il calcolo della densità, la superficie dell'impalcato è stata divisa in tanti quadratini di 10 cm di lato, e per ciascuno di essi è stato ricavato il rapporto  $\frac{\text{punti}}{\text{area}}$ .



**Figura 4.1:** Sottosistema SimMechanics utilizzato per simulare il laser scanner

Al fine di alleggerire il calcolo computazionale, viene simulato solamente un passaggio del carrello sulla passerella; le nuvole di punti dovute ai passaggi successivi sono ottenute ripetendo la prima nuvola nello spazio, congruentemente al moto del carrello.

#### 4.1.1 Parametri delle simulazioni

Tramite le simulazioni è stato valutato l'effetto della variazione di quattro parametri principali:

- distanza tra laser scanner ed impalcato;
- velocità massima raggiunta dal carrello;
- orientamento del laser scanner;
- qualità e risoluzione del laser scanner.

In particolare, si è deciso di valutare l'effetto della variazione di un solo parametro alla volta, lasciando gli altri parametri indagati costanti.

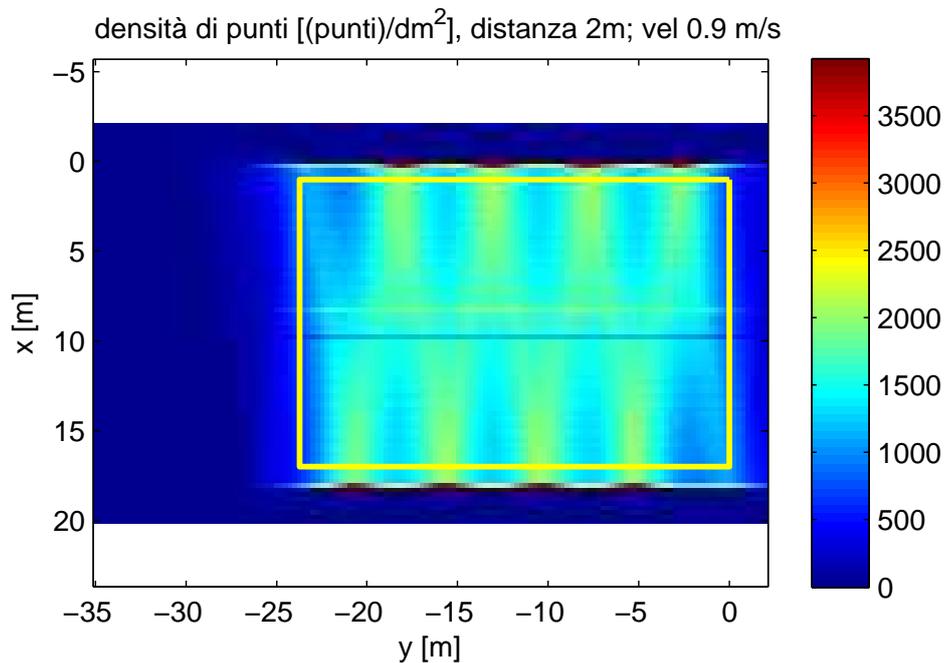
Altri parametri, il cui effetto non è stato indagato, sono stati considerati costanti in tutte le simulazioni. In particolare:

- il camion è stato movimentato con una velocità costante pari a  $0.1275 \frac{m}{s}$ ;

- rollio, beccheggio ed imbardata del camion sono assenti;
- il carrello è stato movimentato utilizzando una legge di moto ad accelerazione costante tagliata, con accelerazione imposta pari a  $1 \frac{m}{s^2}$  sia in partenza che in frenata;
- traslazioni del carrello laterali e verticali sono state trascurate;
- rollio ed imbardata del carrello sono state trascurate, mentre in corrispondenza della parte centrale della passerella si è tenuto conto dello scalino impostando un angolo di beccheggio di  $-5^\circ$ ;
- il by-bridge è stato considerato rigido, trascurando dunque l'effetto delle oscillazioni.

## 4.2 Risultati delle simulazioni

La simulazione di riferimento è riportata in fig. 4.2.



**Figura 4.2:** Densità della nuvola di punti ottenuta per i parametri di riferimento; il rettangolo giallo rappresenta l'ampiezza della superficie dell'impalcato scansionata.

Essa è caratterizzata dall'utilizzo dei seguenti parametri:

- velocità del carrello pari a  $0.9 \frac{m}{s}$ ;

- asse dello specchio rotante del laser scanner parallelo alla passerella;
- distanza del laser scanner dall'impalcato di 2 m.

Nell'immagine si può notare che la densità di punti è misurata in  $\frac{pt}{dm^2}$ ; in queste condizioni, la variazione dei parametri di risoluzione e qualità del laser scanner non dà effetti visibili; per tale motivo, tali parametri saranno presi in considerazione solamente nel relativo paragrafo.

Per maggior chiarezza, si riportano alcune informazioni relativamente alle scelte grafiche effettuate; le zone blu sono quelle in cui c'è assenza di punti, quelle rosse quelle in cui la densità di punti è maggiore. Il rettangolo giallo rappresenta l'area di impalcato scansionata; si fa notare che la passerella è più lunga rispetto alla larghezza dell'impalcato. Gli assi x ed y riportati in ascissa e ordinata sono gli stessi utilizzati nel modello matematico; quindi si può immaginare che il camion avanzi da destra verso sinistra, e che il carrello si muova lungo la direzione verticale.

Da questa prima simulazione derivano alcune osservazioni generali; in primo luogo, è possibile notare come le zone ai confini della passerella siano quelle con densità di punti maggiore; ciò è dovuto al fatto che in tali zone il carrello rallenta fino a fermarsi, e cambiando direzione tende a scansionare la stessa area dell'impalcato.

Inoltre, nella zona centrale dell'impalcato appaiono due linee orizzontali, una caratterizzata da una bassa densità di punti, ed una con una densità di punti elevata. Esse sono dovute al beccheggio del carrello in corrispondenza dello scalino, il quale dunque può generare carenze di punti in alcune zone della parte centrale dell'impalcato.

#### 4.2.1 Effetto della distanza tra laser scanner ed impalcato

L'effetto della distanza è stato indagato tramite l'esecuzione di due ulteriori simulazioni, in cui tale valore è stato impostato pari a 1 m ed a 3 m.

I risultati ottenuti sono riportati in fig.6.10. Da queste simulazioni si nota che per distanze ravvicinate i punti della nuvola tendono a addensarsi vicino alla traiettoria seguita dal carrello; all'aumentare della distanza, i punti risultano distribuiti in maniera molto più uniforme.

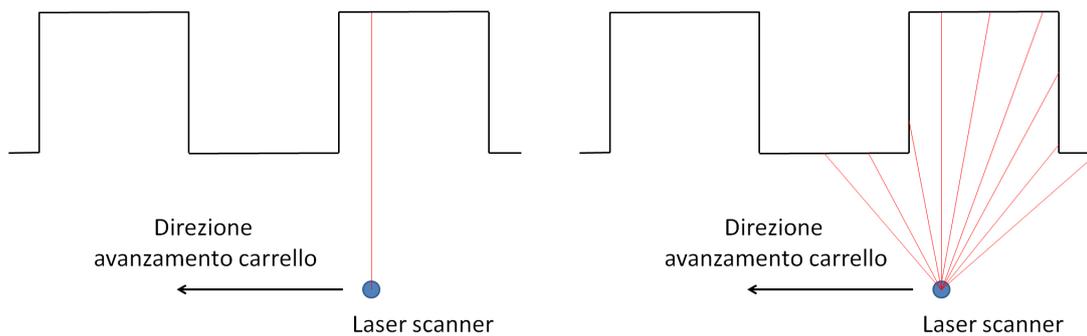
#### 4.2.2 Effetto della velocità del carrello

Per indagare l'effetto della velocità del carrello, è stata eseguita un'ulteriore simulazione, in cui tale valore è stato impostato pari a  $0.5 \frac{m}{s}$ .

I risultati ottenuti sono riportati in fig.4.5. Da questa simulazione si nota che rallentando il carrello si ottiene una densità di punti maggiore sul singolo passaggio; tuttavia, se non si interviene in maniera opportuna anche sulla velocità del camion, la traiettoria a "zig-zag" del carrello nello spazio tende ad distendersi troppo, e non garantisce più una sufficiente sovrapposizione tra le nuvole relative nei singoli passaggi del carrello. Si ricorda però che abbassare la velocità del camion significa allungare i tempi di ispezione, e dunque aumentarne i costi.

### 4.2.3 Effetto dell'orientamento del laser scanner

La disposizione del dispositivo scanner con asse dello specchio rotante non parallelo alla direzione di avanzamento del carrello si rende necessaria al fine di garantire una migliore definizione delle superfici verticali che costituiscono l'impalcato nel modello 3D. Si faccia riferimento a fig.4.3 ; genericamente, gli intradossi degli impalcati non hanno una superficie piana, ma sono presenti delle travi, che lo percorrono longitudinalmente. Dunque, se l'asse di rotazione dello specchio che movimentava il raggio laser del dispositivo scanner è parallelo alla direzione di avanzamento del carrello, il risultato sarà che tali superfici verticali non saranno scansionate; l'effetto della scansione migliora se l'angolo è diverso da zero, fino a diventare ottimale per un angolo di  $90^\circ$ .



(a) Schema di una sezione dell'impalcato scansionata con asse dello specchio rotante parallelo alla direzione di avanzamento del carrello.

(b) Schema di una sezione dell'impalcato scansionata con asse dello specchio rotante parallelo alla direzione di avanzamento del carrello.



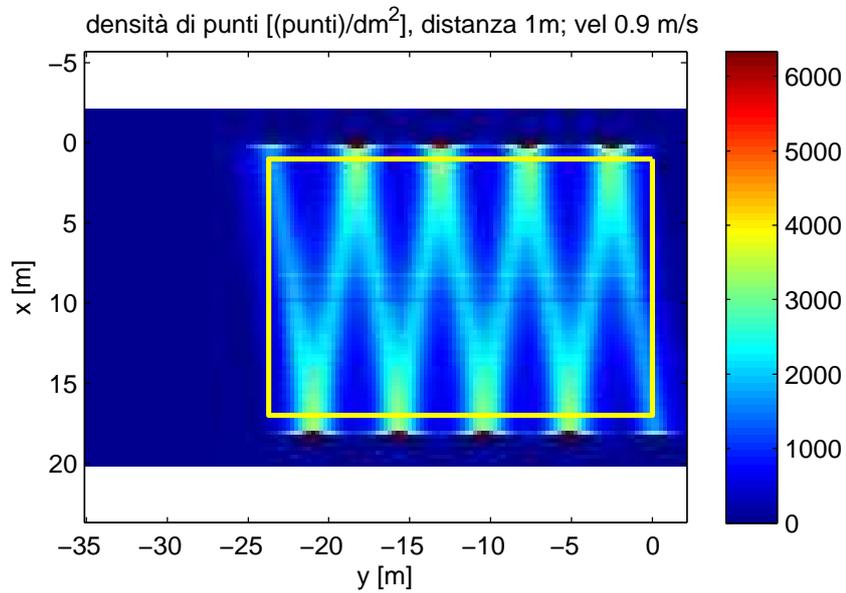
(c) Esempio di intradosso di un impalcato

**Figura 4.3:** Effetto dell'orientamento del laser scanner

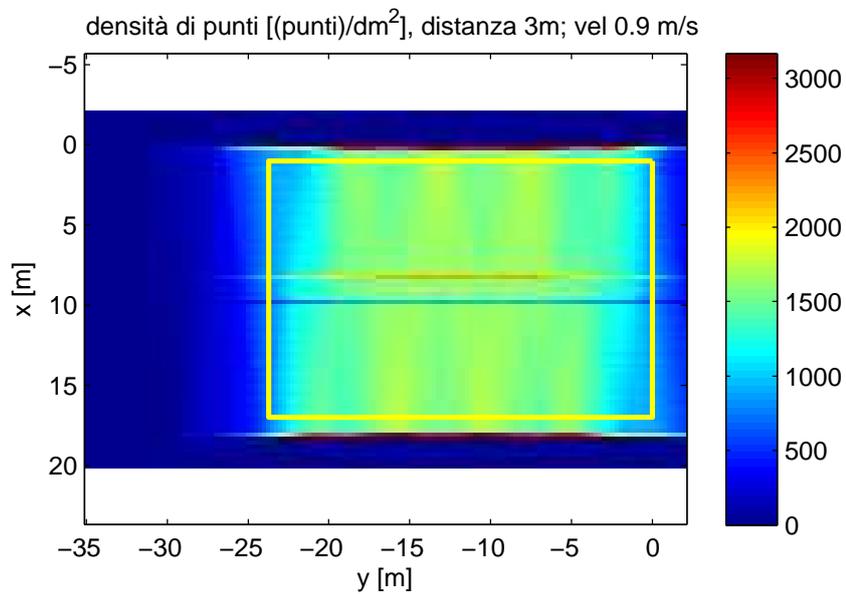
Per indagare l'effetto dell'orientamento del laser scanner è stata dunque eseguita una ulteriore simulazione, con asse dello specchio del dispositivo posto a  $45^\circ$  rispetto alla direzione di avanzamento del carrello.

I risultati ottenuti sono riportati in fig.7.3. Da tale figura si può osservare che la disposizione del laser a  $45^\circ$  genera una forte asimmetria nella densità della nuvola di punti. In particolare, la combinazione del moto del carrello con l'avanzamento del camion fa sì che nella fase di ritorno del carrello la scansione risulti più "stretta" e "densa". Inoltre si nota che, se la passerella non è sufficientemente più lunga dell'impalcato, si vengono

a generare delle zone triangolari a bassa densità di punti in corrispondenza dei confini laterali dell'impalcato.



(a) Distanza tra laser scanner ed impalcato di 1m



(b) Distanza tra laser scanner ed impalcato di 3m

**Figura 4.4:** Effetto della distanza tra laser scanner ed impalcato

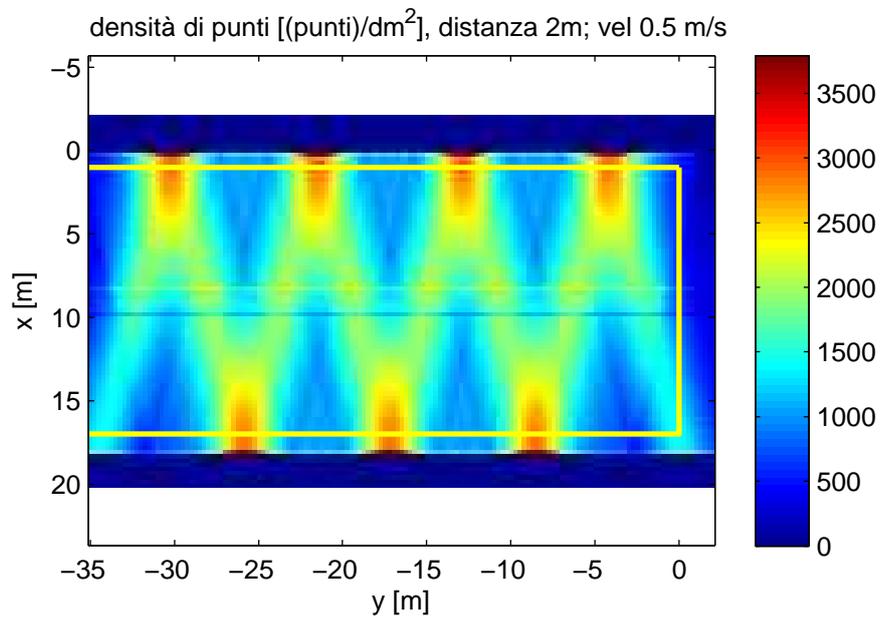


Figura 4.5: Densità della nuvola di punti per velocità del carrello pari a  $0.5 \frac{m}{s}$

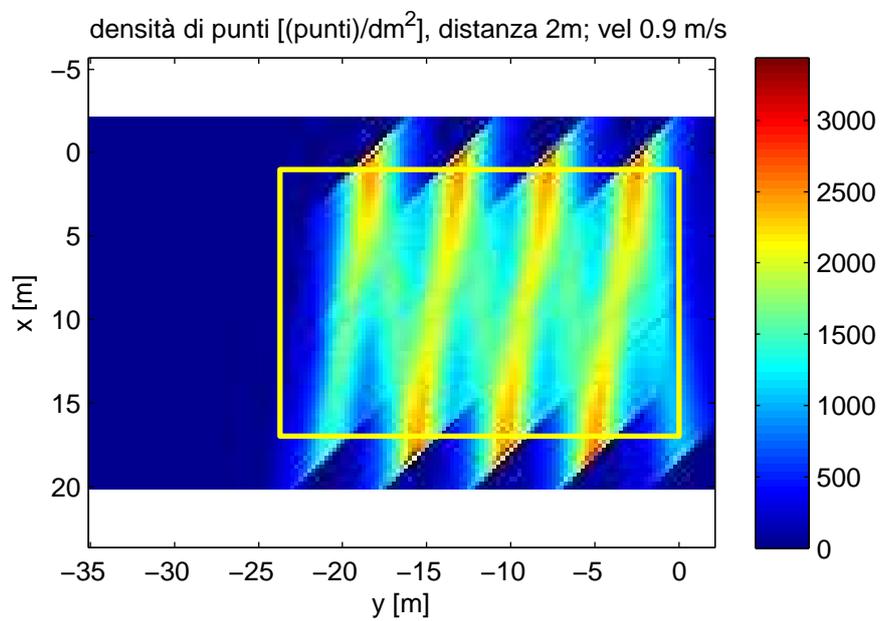


Figura 4.6: Densità della nuvola di punti per orientamento del laser scanner pari a  $45^\circ$

#### 4.2.4 Effetto della Risoluzione e della Qualità del laser scanner

Risoluzione e Qualità sono due parametri del laser scanner che possono essere impostati prima di ogni utilizzo. Ricordiamo che la Qualità è legata al numero di punti rilevati al secondo, mentre la Risoluzione è da intendersi come una risoluzione angolare, ed è quindi legata al numero di punti per giro dello specchio del dispositivo, e quindi a parità di Qualità alla frequenza di rotazione dello stesso.

Al fine di massimizzare il numero di punti acquisiti, e quindi permettere la massima velocità di esecuzione dell'ispezione e/o la massima densità di punti, il parametro "Qualità" viene mantenuto costante al valore 1x. Esso corrisponde infatti alla massima velocità di acquisizione possibile, pari a  $976 \frac{kpt}{s}$ .

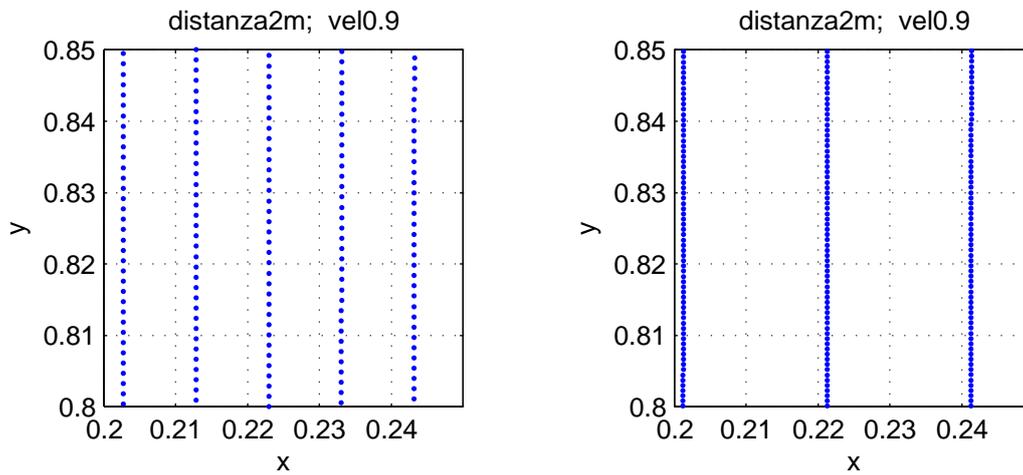
Al contrario, l'effetto della "Risoluzione" viene indagato, variandolo da 1/4 a 1/2 a 1/1. Così facendo, varia il numero di punti acquisiti per ciascuna rotazione dello specchio, e di conseguenza la frequenza di rotazione dello specchio dello scanner, che passa da 95Hz a 48Hz a 24Hz. Altri valori di Risoluzione non vengono presi in considerazione, in quanto per essi non è possibile impostare la velocità massima di acquisizione.

In fig.4.7 è riportata la disposizione dei punti che ci si aspetta per il carrello che avanza ad una velocità di  $0.9 \frac{m}{s}$  ed una distanza tra laser scanner ed impalcato di  $2m$ . Si può notare che con la risoluzione 1/4 si ottiene una disposizione più omogenea dei punti, e dunque una nuvola migliore.

### 4.3 Parametri di moto consigliati

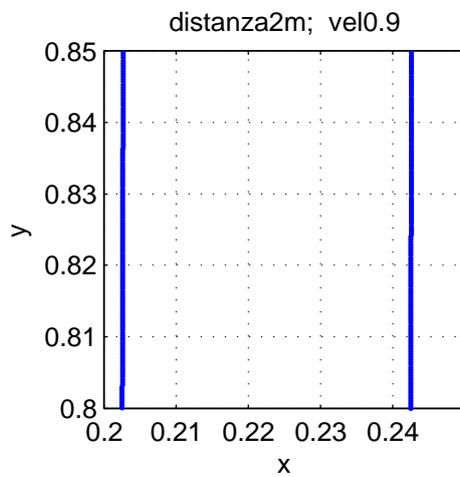
Dalle simulazioni eseguite, il miglior compromesso tra velocità di ispezione, densità della nuvola di punti ed uniformità della stessa risulta quello rappresentato in fig.4.2, e caratterizzato da velocità del carrello pari a circa  $0.9 \frac{m}{s}$ , distanza dall'impalcato pari a  $2m$ , risoluzione pari a 1/4 e qualità 1x.

Discorso a parte vale per l'orientamento del laser scanner; sebbene infatti la disposizione a  $45^\circ$  generi una forte asimmetria nella scansione, essa rappresenta comunque l'unico modo per scansionare le pareti verticali delle superfici verticali eventualmente presenti sull'impalcato. Di conseguenza, una soluzione auspicabile sarebbe quella di utilizzare due laser scanner sul carrello, uno con asse di rotazione posto a  $45^\circ$  rispetto alla passerella, ed uno posto a  $0^\circ$ .



(a) Risoluzione 1/4 e Qualità 1x, frequenza di rotazione di 95Hz

(b) Risoluzione 1/2 e Qualità 1x, frequenza di rotazione di 48Hz



(c) Risoluzione 1/1 e Qualità 1x, frequenza di rotazione di 24Hz

**Figura 4.7:** Disposizione attesa dei punti della nuvola sull'impalcato, per vari valori di Risoluzione



## CAPITOLO 5

### Setup sperimentale

In questo Capitolo viene descritto tutto ciò che è legato al setup sperimentale utilizzato nei test.

Per prima cosa vengono illustrate le caratteristiche degli strumenti di misura utilizzati; vengono inoltre presentati nel dettaglio il mezzo di movimentazione del laser scanner ed i dispositivi di ancoraggio degli strumenti di misura al by-bridge. In seguito vengono descritte la procedura di varo della passerella con la strumentazione a bordo e le procedure di calibrazione ed azzeramento della catena di misura. Infine viene mostrata l'architettura del sistema di acquisizione, in particolare a livello hardware. .

#### 5.1 Caratteristiche tecniche degli strumenti di misura

In questa sezione verranno descritti gli strumenti di misura utilizzati per le prove sperimentali, e le relative caratteristiche tecniche.

##### Odometro

Modello	Caratteristiche
non noto	Strumento digitale a 5V



**Figura 5.1:** L'odometro utilizzato nelle prove sperimentali.

E' un trasduttore relativo in grado di misurare la distanza percorsa dal mezzo su cui è installato in riferimento ad una posizione iniziale, in base al numero di rotazioni

effettuate dalla ruota.

Il modello dello strumento utilizzato non è noto; si sa che è uno strumento con uscita digitale a 5V.

## Distanziometro

Modello	Caratteristiche
FAE LS121 FA	Range di misura: 0.1 m - 100 m Incertezza: $\pm 2$ mm Output digitale
microEpsilon IDL1401-100	Fondoscala: 100 mm Risoluzione: $20\mu\text{m}$ Output digitale



(a) Il distanziometro FAE LS121 FA.



(b) Il distanziometro microEpsilon IDL1401-100.

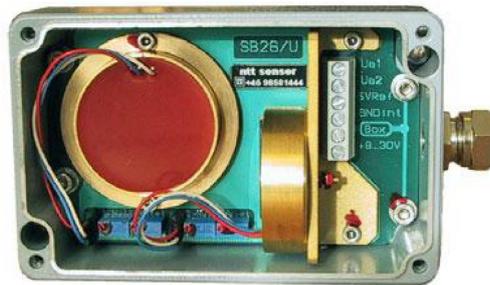
**Figura 5.2:** I distanziometri.

Il primo modello è il distanziometro utilizzato nei due sistemi di visione della catena di misura. E' un dispositivo a tempo di volo, ed utilizza il metodo della differenza di fase. Incorporato nello strumento è presente anche un puntatore laser di colore rosso, il quale permette di individuare la posizione del punto di cui si sta misurando la distanza. Il trigger di acquisizione può venire da un dispositivo esterno, o essere generato internamente.

Il secondo è un distanziometro inizialmente non previsto nella catena di misura, inserito al fine di verificare l'effettiva rigidità della rotazione del montante rispetto al camion. E' un distanziometro a triangolazione.

## Inclinometro

Modello	Caratteristiche
SEIKA SBG2U	Range di misura: $-10^\circ/10^\circ$ Fondoscala a 4.00099V e voltaggio di $0^\circ$ a 2.5011V Uscita analogica Sensitività: $199.911 \frac{mV}{^\circ}$



**Figura 5.3:** L'inclinometro SEIKA SBG2U

È uno strumento che misura l'inclinazione, sia positiva che negativa, di un oggetto rispetto alla gravità.

Questo sensore genera un orizzonte artificiale rispetto al quale misura l'inclinazione angolare. Trova applicazione in vari campi, ad esempio, in macchine, camion, ponti, navi, sistemi radar, macchinari agricoli. Esso ha la possibilità di amplificare il segnale di uscita e di filtrare (tramite un filtro passa basso del terzo ordine) le alte frequenze ed il rumore. Ha un'elevata precisione e una deriva termina molto ridotta in tutto il campo di misura, con una banda passante da 0 a 160 Hz.

## Telecamere

Modello	Caratteristiche
IDS UI-5240CP-M-GC	Risoluzione: 1280 x 1024 Frame Rate: 50 fps
NI 1772	Risoluzione: 640*480 Frame Rate: 110 fps Processore Real Time da 1.6GHz

Il primo è il modello di telecamera utilizzato a bordo del carrello, sia per il “blob detection”, sia per l’ “edge detection”; in quest'ultimo caso, le telecamere sono state anche dotate di illuminatori ad infrarossi.

La seconda il modello di telecamera utilizzato per il piano degli spot superiore. Essa è in verità una smart-camera, in quanto è dotata di un processore Real Time che le permette di analizzare in autonomia i fotogrammi acquisiti, e di comunicare direttamente le coordinate degli spot laser. Questo, se da un lato è vantaggioso in quanto lo spazio



(a) La telecamera IDS UI-5240CP-M-GC

(b) La smart-camera NI 1772

**Figura 5.4:** Le telecamere

su disco rigido necessario all'acquisizione è inferiore rispetto a quello richiesto dalle altre telecamere, dall'altro può creare dei problemi. Non avere le immagini disponibili, infatti, significa non poter calibrare i parametri dell'algoritmo di individuazione degli spot nel caso in cui le condizioni di luce dovessero cambiare. L'utilizzo di questa tecnologia in questo caso è imposto dall'architettura del sistema di acquisizione; grazie al processore interno, infatti, la telecamera è in grado di auto-triggerarsi, e può funzionare in autonomia.

## 5.2 Dispositivi per l'ancoraggio degli strumenti

I dispositivi di ancoraggio degli strumenti di misura sono degli elementi molto importanti, in quanto devono garantirne la stabilità, e permettere di regolarne l'orientamento. Nella progettazione di tali sistemi si è cercato di essere il meno "invasivi" possibile, evitando di effettuare modifiche permanenti e dispendiose al by-bridge.

### Odometro



**Figura 5.5:** Ancoraggio dell'odometro al camion.

L'odometro è stato fissato sul retro del camion tramite un'asta metallica imbullonata al paraurti dello stesso.

### Distanziometro alla base del montante

Questo strumento, inizialmente non previsto nella catena di misura, è stato inserito in seguito per verificare l'assenza di movimento relativo tra camion e montante. Lo strumento è stato installato su di un apposito braccio snodabile, fissato al camion tramite dei magneti.



Figura 5.6: Distanziometro alla base del montante.

### Piano degli spot superiore

Il piano degli spot superiore è stato fissato tramite una struttura costruita ad hoc, la quale ha richiesto di apportare delle piccole modifiche al by-bridge stesso (fig.5.7). In particolare, una piastra metallica di alcuni centimetri di spessore è stata saldata alla colonna, in una superficie piana al di sotto della ralla. Lo scopo di tale elemento è di permettere di fissare e smontare agevolmente la struttura di sostegno vera e propria, la quale è visibile in figura. Essa è costituita da una coppia di tubolari saldati ad un'altra piastra, ed a loro volta fissati nella parte finale da un'ulteriore asta metallica. Tale struttura, piuttosto massiccia, è stata pensata al fine di garantire massima stabilità al piano degli spot, ed agli strumenti di misura ad essa fissati, che saranno descritti nel seguente paragrafo. In figura è possibile vedere, ancora in fase di assemblaggio, un insieme di profilati che formano gli spigoli di un cubo: la faccia inferiore, riempita con un pannello in plastica, andrà a costituire il piano degli spot; gli spigoli laterali fungeranno da supporto per la copertura, anch'essa in plastica, finalizzata a garantire che il piano degli spot resti in ombra durante l'acquisizione, prerogativa fondamentale in quanto gli spot laser monitorati dalla telecamera sono degli spot luminosi. La telecamera NI, infine, sarà posizionata nello spigolo superiore interno.

Tale sistema permette la regolazione di alcuni gradi dell'inclinazione del piano, tramite dei bulloni avvitati ai due tubolari.



**Figura 5.7:** Struttura di sostegno del piano degli spot superiori, in fase di assemblaggio.

### **Piastre porta distanziometro, laser ed inclinometro**

Sono una coppia piastre metalliche, posizionate l'una nella parte finale della traversa, l'altra nella parte terminale della colonna (fig. 5.8). Ciascuna di esse è utilizzata come supporto per un distanziometro, due puntatori laser ed un inclinometro. In particolare, il distanziometro è avvitato alla piastra mediante quattro bulloni posti ai vertici dello strumento, mentre i puntatori laser utilizzano un'unica vite centrale. L'inclinometro è fissato alla piastra tramite una coppia di viti; poiché per funzionare correttamente esso deve essere fissato ad un piano verticale, nel caso della piastra inferiore è stato necessario utilizzare un profilato ad L.

Le due piastre sono ancorate al by-bridge in maniera diversa. Per quanto riguarda la piastra superiore, essa è fissata alla traversa tramite dei magneti permanenti; è possibile regolare l'inclinazione della piastra tramite un sistema di dadi/controdadi, che collegano la piastra ai singoli magneti permanenti.

La piastra inferiore ha un sistema di ancoraggio al by-bridge più complesso, che la rende solidale al piano degli spot superiore, e quindi all'ultimo tratto della colonna. Esso è costituito da un profilato in alluminio posto verticalmente, fissato tramite dei bulloni alla struttura di sostegno del piano superiore; per evitare oscillazioni, nella parte centrale è a sua volta ancorato alla struttura del by-bridge. La piastra, visibile in figura, è fissata a tale struttura di sostegno mediante tre viti di regolazione; essa inoltre può ruotare tramite una cerniera ad asse verticale rispetto al profilato principale, consentendo così il passaggio degli operatori.



(a) Piastra superiore



(b) Piastra inferiore

**Figura 5.8:** Fissaggio delle due piastre con annessi laser, distanziometro ed inclinometro al by-bridge

### 5.3 Mezzo di movimentazione del Laser Scanner: il carrello

La soluzione adottata come il mezzo di locomozione del laser scanner è un carrello formato da profilati di alluminio. Questa caratteristica lo rende facilmente riconfigurabile, e ne garantisce peso ridotto e basso costo. La struttura del carrello è molto semplice; esso non è dotato di ruote sterzanti o di sospensioni, la cui funzione è delegata alle ruote in gomma. La direzione rettilinea è garantita dalla presenza di respingenti laterali, grazie ai quali il carrello è in grado di seguire la direzione della passerella.

Il carrello deve essere in grado di muoversi con autonomia sulla passerella e di trasportare la strumentazione necessaria all'individuazione della traiettoria del laser scanner; esse è dunque dotato di un motore elettrico servoazionato, e di batterie.



**Figura 5.9:** Il carrello, durante una delle prove sperimentali tenutasi al Politecnico

### Telaio

Il telaio è realizzato attraverso profilati in alluminio vincolati l'uno all'altro attraverso viti e dadi, rendendone di fatto riconfigurabile la struttura e lasciando ampia possibilità di modifica del sistema.

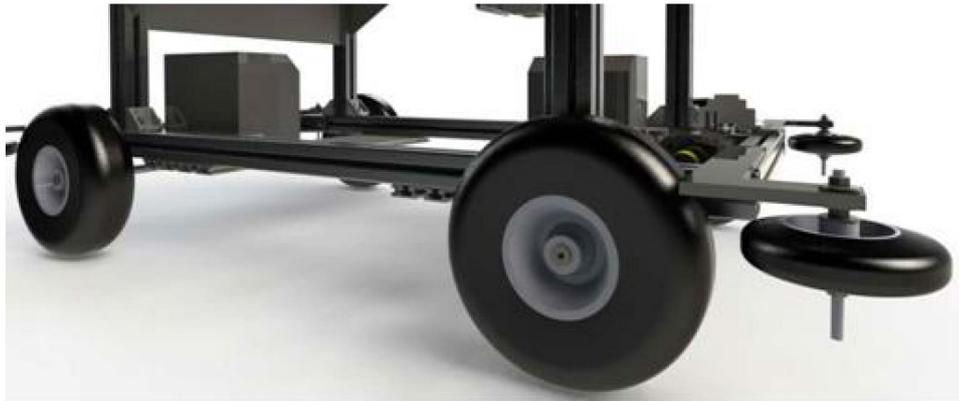
In fig.5.10 sono evidenti i respingenti montati alle estremità del telaio necessari ad impedire impuntamenti del carrello durante il movimento lungo la passerella. Il sistema sviluppato non è, infatti, provvisto di sterzo e se, per i sobbalzi o per imperfezioni del fondo lungo il quale si muove, dovesse cambiare direzione la collisione con le ringhiere di protezione poste ai fianchi della passerella risulterebbe inevitabile. I respingenti provvisti di ruote gommate dovrebbero essere in grado di assorbire l'eventuale urto ed impedire che il carrello si fermi reindirizzandolo lungo la direzione di sviluppo della passerella. Il telaio del sistema di movimentazione del laser scanner è caratterizzato da uno sviluppo verticale necessario per poter posizionare il laser scanner all'altezza idonea, a sorpassare i corrimano della passerella.

Sul pianale del telaio trovano alloggio le due batterie da 12 V per l'alimentazione di motore e della strumentazione presente a bordo.

Da notare è la struttura asimmetrica del carrello, con un piano di appoggio piuttosto stretto. Anche il piano per gli spot è stato concepito in maniera da poter essere chiuso su un lato. Tutto ciò, al fine di lasciare spazio sufficiente al passaggio di un operatore sulla passerella.

### Struttura porta Faro e telecamere

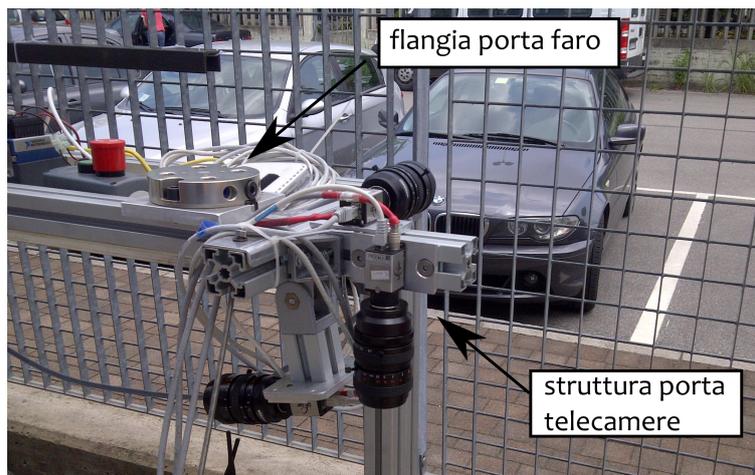
La struttura porta Faro è essenzialmente una flangia dotata di quattro fori, la quale permette un facile montaggio del Faro sia in configurazione a 45° che con asse di



**Figura 5.10:** Particolare inferiore del carrello

rotazione parallelo alla direzione di avanzamento del carrello.

La struttura porta telecamere è costituita da dei brevi tratti di profilato di alluminio assemblati insieme. Essa permette di smontare e montare facilmente le telecamere sul carrello.

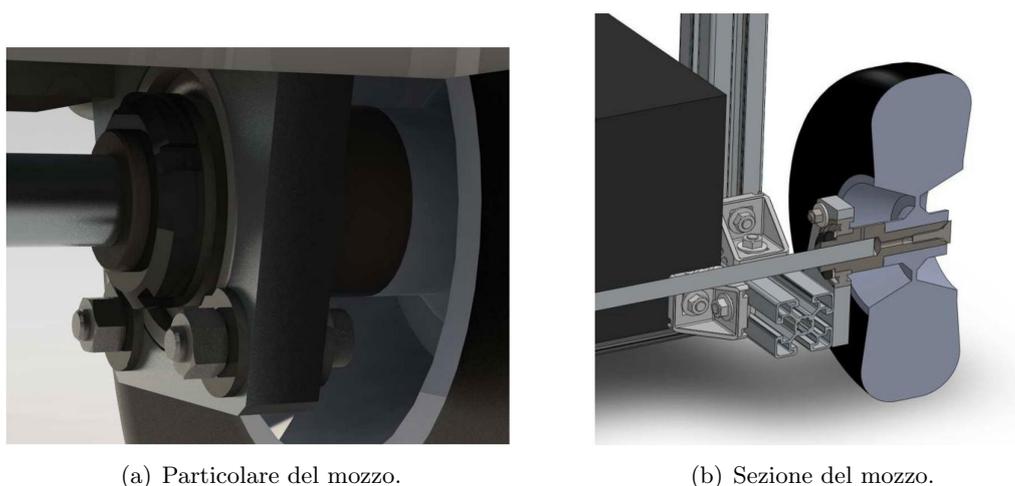


**Figura 5.11:** Strutture porta faro e telecamere

La rimozione delle telecamere si rende necessaria in quanto questi strumenti sono molto delicati e potrebbero subire danni durante il varo od in caso di maltempo.

### **Mozzi**

In fig.5.12 sono riportate le immagini che descrivono la soluzione di mozzo sviluppata. Le ruote sono vincolate al mozzo per mezzo di bussole ad espansione alle cui estremità sono montati dei cuscinetti a sfera. Quest'ultimi vengono inseriti in apposite piastre in alluminio a loro volta fissate al telaio. I mozzi di uno stesso asse sono collegati attraverso un albero d'alluminio.



**Figura 5.12:** Soluzione di mozzo sviluppata.

## Motore

All'albero motore viene calettata una puleggia dentata che riceve il moto attraverso una cinghia dal motoriduttore.

In fig.5.13 è riportata la soluzione adottata per vincolare il motore al telaio: due piastre d'acciaio saldate a L ed opportunamente nervate sorreggono da un lato il motoriduttore mentre dall'altra permettono di ancorarsi al telaio del carrello. Sono, inoltre, evidenti le due pulegge dentate, di 22 e 36 denti, vincolate ad albero motore e asse ruote attraverso dei grani, e la cinghia: serie T passo 5. Sempre in fig.5.13 è possibile notare una staffa di fissaggio fra telaio ed asse motore, tale elemento riduce le deformazioni dell'asse durante l'esercizio ed impedisce alla cinghia di perdere il passo.



**Figura 5.13:** Il motore vincolato al telaio.

Il motoriduttore presente sul carrello è della ditta Crouzet, serie Motomate, potenza 80W e rappresenta una soluzione tutto in uno: azionamento, motore e riduttore integrati in un unico elemento. Il riduttore ha un rapporto di riduzione 1/27 e consente di raggiungere 120 [rpm] come massima velocità in uscita e 5.2 [Nm] come massima

coppia.

Stimando la massa del carrello a 80 kg, è possibile farsi un'idea delle prestazioni massime del mezzo:

$\omega_m = 120rpm = 12.57 \frac{rad}{s}$	velocità angolare massima del motoriduttore
$\omega_r = \omega_m \frac{22}{36} = 7.68 \frac{rad}{s}$	velocità angolare massima dell'asse delle ruote
$v_{max} = \omega_r r_r = 7.68 \cdot 0.125 = 0.96 \frac{m}{s}$	<b>velocità massima del carrello</b>
$C_m = 5.2Nm$	coppia massima erogata dal motoriduttore
$m = 80kg$	massa del carrello
$C_r = C_m \frac{36}{22} = 8.52Nm$	coppia massima alle ruote
$F = \frac{C_r}{r_r} = 68.2N$	spinta massima del carrello
$a_{max} = \frac{F}{m} = 0.853 \frac{m}{s^2}$	<b>accelerazione massima del carrello</b>

## 5.4 Il varo della passerella

I dispositivi di ancoraggio degli strumenti, nonché il carrello stesso, sono stati progettati in maniera tale da semplificare il più possibile la procedura di varo della passerella; si ricorda infatti che il by-bridge, per poter essere trasportato, deve potersi ripiegare completamente; d'altro canto, ci sono degli elementi, quali ad esempio il carrello, che sono pesanti ed ingombranti, e che di conseguenza non possono raggiungere la passerella tramite la scala interna alla colonna utilizzata dagli addetti ai lavori.

La procedura di varo può essere riassunta nei seguenti punti:

- il camion viene portato in una zona ampia e libera da ostacoli, dove il by-bridge viene disteso;
- il carrello viene sollevato tramite un carroponete, e posizionato all'interno della passerella;



- il carrello viene fissato alla passerella tramite tre aste metalliche, due laterali a bloccare il moto del carrello in direzione della passerella, ed una superiore per evitare che il carrello possa cadere nella fase di chiusura della passerella. Si noti che in figura le aste sono in fase di montaggio, ed è visibile solo l'asta superiore;



- il piano degli spot superiore viene fissato al by-bridge;
- il by-bridge viene ripiegato. In questa fase, è necessario verificare che il carrello ed il piano degli spot non interferiscano tra loro;



- il camion raggiunge l'impalcato da ispezionare. Dopo aver sollevato il montante, dal camion, viene installata sulla traversa la piastra con il distanziometro ed i puntatori superiori;



- il by-bridge viene nuovamente disteso;



- la passerella viene posizionata in maniera da affiancare l'impalcato: in questa maniera, è possibile trasferire su di essa la piastra inferiore con il distanziometro i puntatori inferiori e l'inclinometro, che può dunque essere installata alla base della colonna.



- la catena di misura viene calibrata.

## 5.5 Calibrazione della catena di misura

In questa sezione vengono descritte tutte quelle procedure svolte prima dell'acquisizione, finalizzate a garantire il corretto funzionamento della catena di misura, e ad ottenere un sistema fisico il più possibile vicino, dal punto di vista geometrico, alla catena di misura ipotizzata nel Capitolo 2.

### 5.5.1 Procedura di allineamento dei puntatori laser e distanziometri

Il ruolo dei puntatori laser e dei distanziometri nella catena di misura è molto importante, in quanto ad essi ed ai sistemi di visione correlati è affidata l'individuazione di diversi parametri importanti per la catena di misura. Affinché tali grandezze vengano calcolate correttamente, è fondamentale che essi seguano le specifiche con la quale è stata ideata la catena di misura, e quindi è necessario che:

- il distanziometro inferiore sia allineato, per quanto possibile, all'asse della passerella;
- laser montati su ciascuna piastra siano allineati tra di loro.

Al fine di garantire il primo punto, è prevista una procedura di calibrazione manuale dell'orientamento della piastra inferiore, da eseguire prima della scansione, tramite le viti di regolazione presenti sulla piastra.

Relativamente al secondo punto, la soluzione migliore sarebbe la realizzazione di supporti rettificati per i puntatori laser; ciò non è stato tuttavia possibile, data la necessità di contenere i costi, ed i supporti utilizzati sono quelli descritti precedentemente, costituiti da delle semplici piastre di acciaio. La calibrazione, dunque, si svolge in maniera prettamente manuale in laboratorio. In particolare la procedura svolta prevede le seguenti fasi:

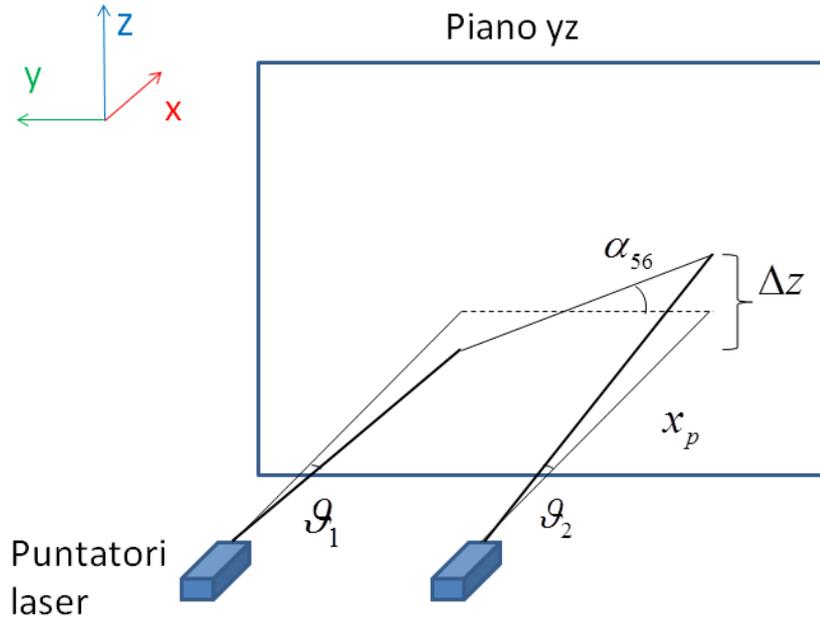
- posizionamento delle piastre su dei supporti orizzontali;
- fissaggio dei puntatori laser e del distanziometro alle piastre relativamente tramite viti e bulloni;
- proiezione dei fasci laser su dei piani posti a distanza diversa;
- correzione della direzione degli strumenti, mediante l'uso di spessori calibrati da interporre tra strumento e piastra, modificando le coppie di serraggio di viti e bulloni e regolando la direzione dei puntatori, i quali sono fissati alla piastra tramite una sola vite centrale e possono dunque essere ruotati attorno a tale asse;
- iterazione dei due punti precedenti, fino a raggiungimento di una soluzione soddisfacente.

Durante delle prove preliminari, tuttavia, è stato realizzato che la procedura di allineamento ora descritta non è sufficiente a garantire errori trascurabili nel calcolo del rollo del carrello. I puntatori laser, infatti, tendono a ruotare con facilità attorno alla vite centrale; le piastre inoltre si sono rivelate troppo sottili, pertanto tendono a deformarsi facilmente variando le coppie di serraggio delle viti. Per questo motivo è stata messa a punto una procedura via software per la correzione del disallineamento residuo.

#### Correzione via software del disallineamento tra i puntatori laser

Cerchiamo di approfondire matematicamente il problema. In particolare si prenda come riferimento la terna del distanziometro inferiore, e si posizionino i due laser in punti

diversi sull'asse  $y$ , l'uno leggermente ruotato rispetto l'altro di un angolo  $\theta$  attorno l'asse  $y$ . Osservando fig.5.14, si può notare che tale disallineamento genera un gap nelle proiezioni dei fasci laser su un generico piano  $yz$  rispetto all'asse  $z$  tra i due spot, pari a  $\Delta z = x_p \tan \theta$ , dove  $x_p$  è la distanza del piano degli spot dai distanziometri laser.



**Figura 5.14:** Effetto del disallineamento dei puntatori laser sul piano del carrello.

Dato che il rollio del carrello è determinabile tramite l'espressione 2.4.1, ottengo che:

$$\alpha_{56} = -\arctan\left(\frac{z_{P2'} - z_{P1'}}{y_{P2'} - y_{P1'}}\right) = -\arctan\left(\frac{x \tan \theta_2 - x \tan \theta_1}{y_{P2'} - y_{P1'}}\right) \simeq -\frac{x (\tan \theta_2 - \tan \theta_1)}{y_{P2'} - y_{P1'}} \quad (5.1)$$

Si nota dunque che il disallineamento dei laser genera un angolo di rollio fittizio che, per piccoli valori, può essere considerato lineare con la distanza  $x$  tra piano e piano dei laser; di conseguenza, è possibile eliminare questo contributo effettuando una regressione lineare su tale angolo calcolato tramite gli spot, ed eliminando la parte lineare con la distanza. Ciò è possibile utilizzando le funzioni Matlab `polifit.m` e `polival.m`, interpolando l'angolo in funzione della distanza con una funzione di primo ordine.

Si noti che l'allineamento dei laser è critico in particolare per il carrello, in quanto esso si sposta lungo la passerella; per il piano degli spot superiore, al contrario, la questione è marginale, ed è sufficiente sottrarre l'angolo formato dagli spot nell'istante iniziale.

$$\gamma_{23} = \arctan\left(\frac{x_{P2'} - x_{P1'}}{y_{P2'} - y_{P2'}}\right) - \arctan\left(\frac{x_{P2} - x_{P1}}{y_{P2} - y_{P2}}\right) \quad (5.2)$$

### 5.5.2 Piano degli spot superiore

Come illustrato nel Capitolo 2, poiché il piano degli spot ed il distanziometro laser inferiore possono essere considerati solidali, per determinare la variazione dell'orientamento delle due terne è sufficiente l'utilizzo di un solo inclinometro, posizionato in corrispondenza del distanziometro; tuttavia, in generale le due terne non saranno parallele, ma saranno presenti degli offset. Conoscendo l'orientamento del piano nell'istante iniziale è possibile compensare tali offset.

Per questo motivo, il supporto del piano permette di regolarne l'inclinazione; in particolare, tale operazione viene effettuata in seguito al varo della passerella, prima di iniziare l'acquisizione sperimentale, tramite l'ausilio di una livella a bolla.



**Figura 5.15:** Regolazione del piano degli spot; si possono notare i pannelli neri utilizzati per proteggere dalla luce del sole.

### 5.5.3 Calibrazione delle telecamere

La calibrazione è un processo indispensabile per ricavare informazioni metrologiche dall'immagine e poter così utilizzare una telecamera come strumento di misura. La procedura di base utilizzata è quella descritta nel Capitolo 2; essa deve essere ripetuta ogni volta che il sistema subisce delle modifiche. Entriamo ora nel dettaglio della calibrazione delle singole telecamere.

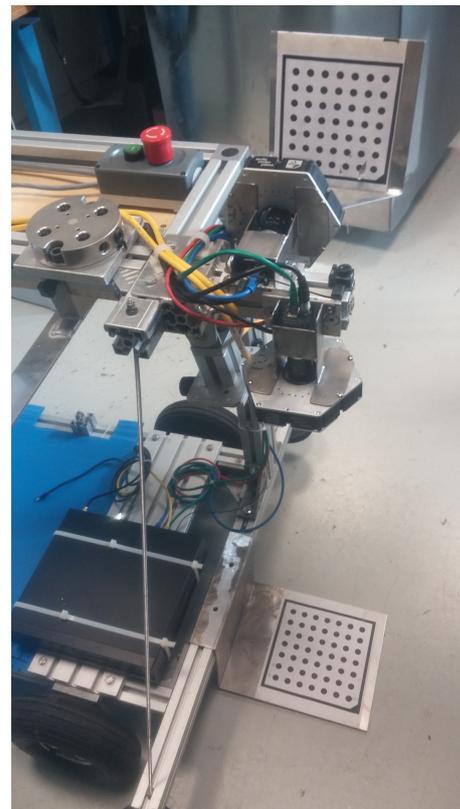
La telecamera solidale al piano degli spot superiore è stata calibrata applicando un pattern sul relativo piano, il quale è stato rimosso prima della prova. Dato che la telecamera non necessita di essere smontata, la calibrazione è stata effettuata una sola volta in laboratorio.

Al contrario, le telecamere posizionate sul carrello necessitano di essere smontate durante la fase di varo della passerella. Per questo motivo per la loro calibrazione sono stati progettati e costruiti dei calibratori ad hoc (fig.5.16). Essi godono delle seguenti caratteristiche:

- basso costo;
- permettono di posizionare i pattern perpendicolarmente agli assi delle rotazioni da determinare tramite edge detection;
- permettono di posizionare i pattern ad una distanza simile a quella assunta dai riferimenti rettilinei durante le acquisizioni;
- facilmente applicabili al carrello utilizzando delle viti, permettendo così di eseguire la calibrazione ovunque.



(a) Pattern di calibrazione per la telecamera laterale



(b) Pattern di calibrazione installati sul carrello

**Figura 5.16:** I calibratori per le telecamere del carrello, con i relativi pattern

#### 5.5.4 Scansioni statiche della catena di misura assemblata

Queste acquisizioni sono state effettuate in concomitanza con la prova sperimentale. Esse hanno lo scopo di “fotografare” il sistema nell’istante iniziale.

In particolare, vengono eseguite due scansioni, una del sistema camion/by-bridge, e una del carrello, con tanto di calibratori. Nel primo caso, la scansione viene effettuata con il by-bridge disteso, e la passerella posizionata al di sotto dell’impalcato. Sono necessari, al fine di ottenere una scansione priva di zone d’ombra, due laser scanner, posizionati l’uno all’inizio della passerella, l’altro sopra il viadotto, nei pressi del camion; ciò è dovuto alla presenza dell’impalcato, che si interpone tra camion e passerella. Si ricorda che tale scansione è necessaria al fine di individuare di quelli che nel Capitolo 2 sono stati definiti “link fisici” del sistema, e quindi  $\mathbf{t}_{12}$  e  $\mathbf{t}_{45}$ .

Anche per scansionare il carrello sono necessari due dispositivi scanner, posizionati l’uno sull’apposito supporto sopra il piano del carrello, ed il secondo a terra, così da poter “vedere” il piano degli spot, ed i calibratori delle altre telecamere. Si ricorda che tale scansione è necessaria al fine di determinare le matrici di rototraslazione tra il dispositivo scanner montato sul carrello ed usato nelle acquisizioni, e le terne delle telecamere, individuate appunto grazie alla presenza dei pattern di calibrazione. In particolare, in questo modo è possibile individuare  $\mathbf{t}_{78}$  e  $R_{78}$ .

#### 5.5.5 Correzione via software degli angoli di beccheggio ed imbardata del carrello

Affinché le telecamere di terra e di lato del carrello restituiscano i valori corretti di beccheggio ed imbardata è necessario che siano soddisfatte le seguenti condizioni:

- le terne di calibrazione delle tre telecamere presenti sul carrello devono avere gli assi paralleli;
- il distanziometro inferiore deve essere posizionato in maniera tale che il relativo fascio laser sia parallelo agli elementi rettilinei utilizzati per l’algoritmo di “edge detection”, presenti sulla passerella.

Entrambe queste questioni sono state affrontate con delle procedure fisiche di calibrazione, descritte nei paragrafi 5.5.3 e 5.5.1. Per quanto riguarda il primo punto, purtroppo, per via dell’ “artigianalità” con la quale sono stati realizzati i calibratori, essi non sono in grado di garantire un parallelismo sufficiente, ma sono presenti degli offset di alcuni gradi. Anche la seconda condizione è difficile da ottenere con precisione, dato che il processo di calibrazione è manuale. Per questo motivo è stata prevista una opportuna correzione dei dati forniti dall’algoritmo di edge detection.

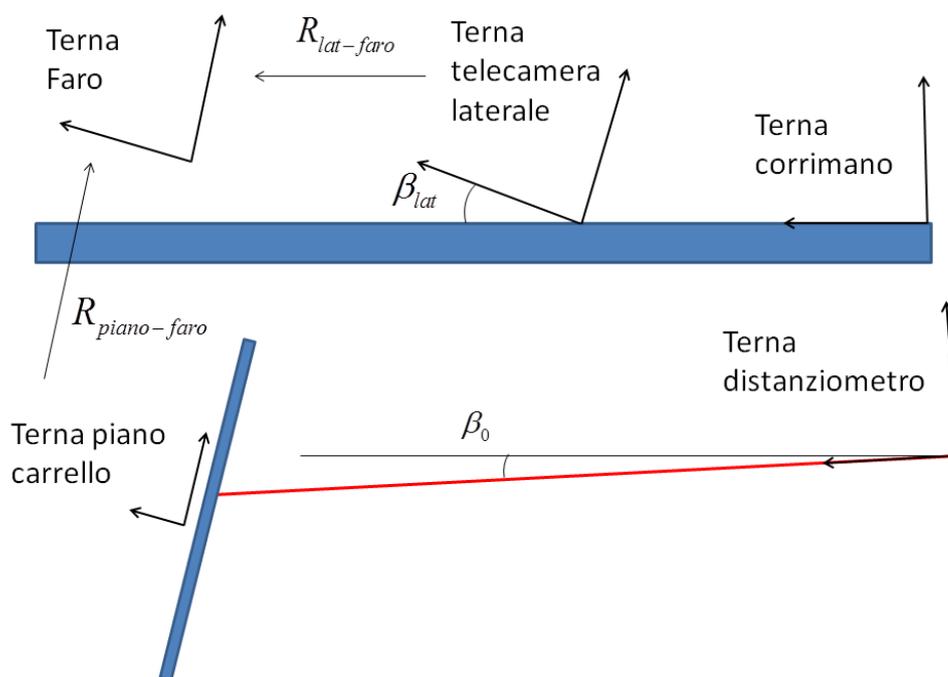
Le matrici di rototraslazione tra le terne delle tre telecamere possono essere determinate tramite scansioni statiche, come indicato nel paragrafo precedente e nel Capitolo 2.

L’individuazione del disallineamento del distanziometro inferiore rispetto alla passerella è più complesso. Il problema è stato risolto in maniera approssimata tramite delle considerazioni geometriche sul moto del carrello: si ipotizzi che i riferimenti rettilinei sulla passerella siano posti parallelamente all’asse della stessa, e che il carrello avanzi a contatto di un lato della passerella. Esso compirà nello spazio una traiettoria circa

rettilenea, con la presenza di rumore dovuto alle asperità del piano di calpestio della passerella. Se il distanziometro è effettivamente parallelo ai riferimenti rettilinei, la variazione media delle coordinate sul piano del carrello dovrebbe essere nulla; se ciò non avviene, allora distanziometro e riferimenti rettilinei sono disallineati.

Dunque, effettuando una regressione lineare tra le coordinate degli spot ed il distanziometro, è possibile individuare gli angoli di disallineamento  $\gamma_0$  e  $\beta_0$ .

Quindi, per quanto riguarda la correzione del beccheggio del carrello, si faccia riferimento a fig.5.17 .



**Figura 5.17:** Terne di riferimento in gioco; per semplicità in figura sono stati trascurate le rotazioni di rollio e beccheggio.

Una volta note le seguenti grandezze:

$\beta_0$	angolo tra distanziometro e corrimano, determinato con la regressione lineare di cui sopra
$\beta_{lat}$	angolo tra corrimano e terna della telecamera laterale, output dell'algoritmo di "edge detection"
$R_{lat-faro}$	matrice di rotazione della terna del faro rispetto alla terna della telecamera laterale, determinata mediante le acquisizioni statiche sul carrello
$R_{piano-faro}$	matrice di rotazione della terna del faro rispetto alla terna della telecamera del piano degli spot, determinata mediante le acquisizioni statiche sul carrello

è possibile determinare la rotazione  $\beta_{56}$ , cioè la rotazione della *terna piano carrello* rispetto alla *terna distanziometro inferiore*, passando per le matrici di rotazione tra le

varie terne:

$$R_{\text{dist-corr}} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_0) & -\sin(\beta_0) & 0 \\ \sin(\beta_0) & \cos(\beta_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{corr-lat}} = \begin{bmatrix} \cos(\beta_{\text{lat}}) & -\sin(\beta_{\text{lat}}) & 0 \\ \sin(\beta_{\text{lat}}) & \cos(\beta_{\text{lat}}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{\text{dist-piano}} = R_{56} = R_{\text{dist-corr}} R_{\text{corr-lat}} R_{\text{lat-faro}} R_{\text{piano-faro}}^{-1}$$

Ora, ricordando l'ipotesi di piccole rotazioni, posso ricavare il beccheggio della *terna carrello* rispetto alla *terna laser inferiore*:

$$\beta_{56} = (R_{56}(1, 3))$$

Per l'angolo di imbardata valgono considerazioni analoghe.

## 5.6 Architettura del sistema di acquisizione dei dati

Il sistema di acquisizione dei dati è piuttosto complesso ed articolato, anche a causa delle elevate distanze tra gli strumenti di misura.

### Sul carrello

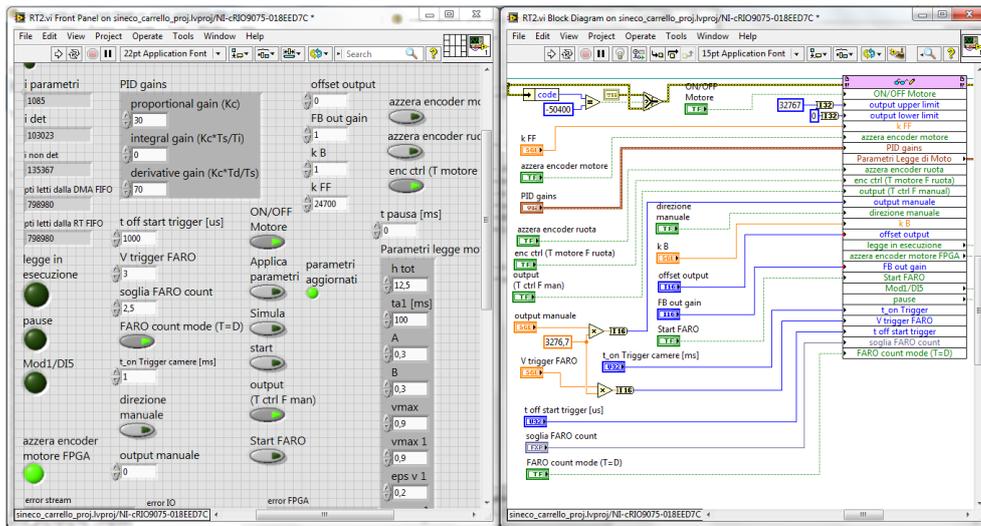
Gli strumenti a bordo del carrello sono le tre telecamere, il laser scanner ed un encoder posizionato sull'asse motore, il quale viene utilizzato per il controllo del moto del carrello.

L'acquisizione è gestita da un Compact RIO della National Instruments modello 9075 (fig.5.21).



**Figura 5.18:** Compact RIO della National Instruments, con installati alcuni moduli

Tale dispositivo è dotato di Processore Real Time e scheda FPGA; queste caratteristiche gli permettono, tra le altre cose, di controllare il moto del carrello, azionando il



**Figura 5.19:** Screenshot del programma Labview utilizzato per la gestione del moto del carrello tramite il Compact RIO

servoattuatore elettrico.

Sul dispositivo sono presenti quattro moduli:

- Modulo 9423 di input digitale. Tramite questo modulo sono acquisiti i dati dell'encoder del motore elettrico, ed il contatore del Faro (un numero progressivo che indica il numero di rotazioni effettuate dallo specchio del dispositivo);
- Modulo 9472 di output digitale. Questo modulo è utilizzato per definire la direzione del motore, e per dare il trigger di via al Faro ed alle telecamere;
- Modulo 9263 di output analogico. Fornisce l'ingresso in tensione, da 0V a 10V, al motore elettrico.

Durante l'acquisizione, il Compact Rio comunica tramite cavo Ethernet con un pc Windows posizionato a bordo del carrello. Sul pc vengono salvati i dati provenienti dai vari strumenti e dei file contenenti gli istanti temporali relativi alle acquisizioni. Le telecamere comunicano direttamente con il pc, tramite bus Ethernet.

Sottolineo che gli output delle telecamere non sono le coordinate degli spot e degli angoli, ma dei fotogrammi; le immagini vengono elaborate off-line in un secondo momento.

### Sul by-bridge

La strumentazione presente sul by-bridge è costituita dai due distanziometri, la telecamera sul piano superiore ed i due inclinometri.

Alla base della passerella è presente un secondo pc Windows, sul quale vengono salvati i dati acquisiti dalla strumentazione del by-bridge. Il dato digitale dei distanziometri è acquisito direttamente dal pc tramite due adattatori seriali-USB. Per quanto riguarda gli inclinometri, essendo degli strumenti analogici, comunicano con il pc tramite un Compact DAQ 9174 dotato di un modulo 9201 di input analogico.



**Figura 5.20:** Compact DAQ della National Instruments

In questo caso, il trigger di acquisizione è dato dai distanziometri: il dato degli inclinometri viene acquisito non appena è disponibile quello dei distanziometri. La telecamera sul piano superiore, essendo una smart-camera, è in grado di elaborare on-line le immagini acquisite, e di inviare i dati sulle coordinate degli spot al pc sulla passerella, tramite un cavo Ethernet.

### Sul camion

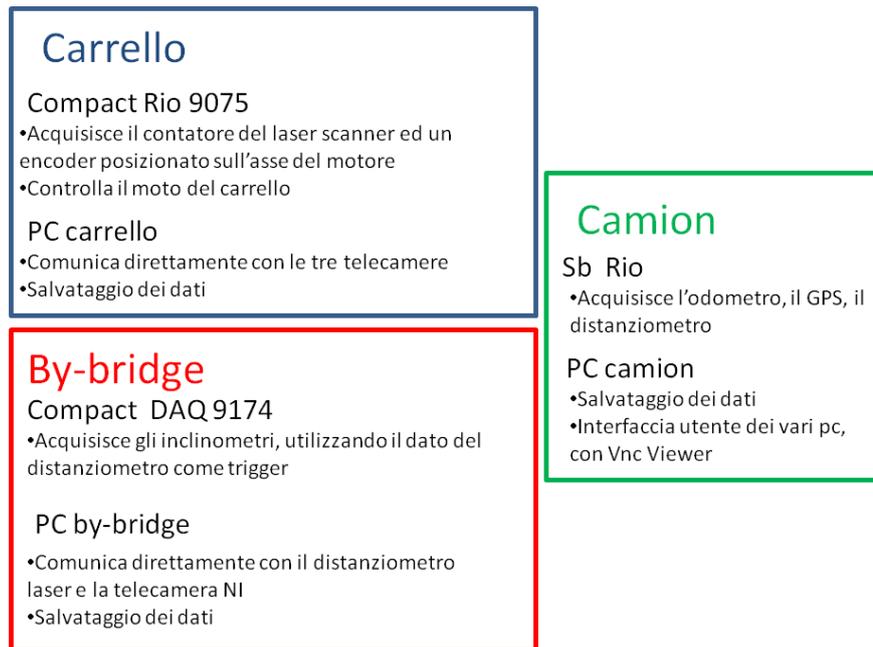
Gli strumenti di misura presenti sul camion sono l'odometro, un GPS ed il distanziometro posto alla base del montante.

Sul camion, l'acquisizione dei segnali è gestita da un sb RIO, una scheda elettronica in grado di svolgere funzioni simili al Compact Rio, ma senza il bisogno di utilizzare moduli aggiuntivi essendo già dotata di ingressi ed uscite digitali ed analogiche. Anche in



**Figura 5.21:** Single-Board RIO della National Instruments

questo caso i dati sono salvati, tramite l'sb RIO, su di un terzo pc Windows posizionato a bordo del camion, via wireless.



**Figura 5.22:** Schema riassuntivo dell'architettura del sistema di acquisizione

### Rete Wireless e interpolazione dei dati

I tre pc sono collegati tramite una rete Wireless. Questa connessione permette il controllo remoto dei vari pc tramite un unico terminale a bordo camion, mediante l'utilizzo di "Vnc Viewer". La rete è utilizzata per inviare ai vari sistemi di acquisizione il segnale di "avvio acquisizione". Tale segnale non è un vero e proprio trigger, in quanto non garantisce la sincronizzazione delle acquisizioni dei vari strumenti. Per questo motivo, ciascun gruppo di strumenti è acquisito a frequenze leggermente diverse. Per rimediare a questo inconveniente, per ciascun sistema di acquisizione viene anche salvato un vettore di tempi. Ciò permette infatti, nella fase di analisi dei dati, di interpolare ad una frequenza desiderata; si fa notare che, nel caso di dati acquisiti da processori non real time quali quelli dei pc, potrebbero esserci dei piccoli ritardi dovuti all'elaborazione. In particolare, ciò riguarda le telecamere a bordo carrello, gli inclinometri ed i distanziometri.

L'output del processo di acquisizione ed elaborazione delle immagini delle fotocamere è costituito da 8 file .txt, ciascuno dei quali contenenti delle grandezze misurate ed un vettore dei tempi:

- cam1.txt: contiene le coordinate determinate dalla telecamera sul piano degli spot del carrello, ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 25 Hz;
- cam2.txt: contiene l'angolo determinato dalla telecamera a lato del carrello, ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 25 Hz;
- cam3.txt: contiene l'angolo determinato dalla telecamera a terra del carrello, ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 25 Hz;



**Figura 5.23:** Fissaggio del PC sul by-bridge (nella scatola metallica); si possono notare sopra il PC le antenne per la rete Wireless, e sotto il Compact DAQ.

- `camNI.txt`: contiene le coordinate determinate dal telecamera sul piano degli spot superiore, ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 50 Hz;
- `crio.txt`: contiene i dati relativi all'encoder del carrello, il contatore del faro ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 50 Hz;
- `odo.txt`: contiene i dati relativi alla strumentazione a bordo del camion, e quindi l'odometro, distanziometro sul montante ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 50 Hz;
- `laser1.txt`: contiene i dati relativi al distanziometro superiore, i quattro canali degli inclinometri ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 50 Hz;
- `laser2.txt`: contiene i dati relativi al distanziometro del carrello ed un vettore dei tempi. La frequenza di campionamento è 50 Hz.

Si può fin da ora anticipare che l'interpolazione dei dati, in sede di analisi delle prove sperimentali, è stata effettuata tramite una interpolazione polinomiale a tratti cubica, implementata tramite la funzione Matlab "interp1.m".



## CAPITOLO 6

### Prove sperimentali

In questo Capitolo vengono descritte le prove sperimentali effettuate, e ne vengono esposti i risultati.

Dopo una breve premessa, si elencano i test sperimentali eseguiti e le relative caratteristiche. Seguono alcune considerazioni generali sui dati acquisiti, da cui conseguono delle deduzioni sull'effettivo moto del sistema; contestualmente vengono mostrati gli effetti di alcune post-elaborazioni dei dati volte a migliorare l'accuratezza generale del sistema di misura.

Nella parte finale del capitolo vengono illustrati i risultati della ricostruzione dell'impalcato di un ponte mediante il sistema di misura descritto nei capitoli precedenti. Dopo aver valutato l'incertezza di misura ed averla confrontata con le previsioni dei modelli numerici viene proposta un'analisi critica dei risultati.

#### 6.1 L'importanza dei test sperimentali

Alcune delle difficoltà maggiori nella progettazione e realizzazione del sistema di ispezione sono sicuramente legate alla difficoltà di eseguire prove in condizioni reali e alle tempistiche per l'elaborazione e l'analisi dei dati.

Le difficoltà nell'effettuare prove sperimentali complete sono legate alla necessità di disporre, per la loro esecuzione, del camion, del by-bridge e di un impalcato da ispezionare. Le passerelle sottoponte mobili, infatti, sono delle macchine molto costose, ed utilizzarne una per dei test sperimentali costituisce un costo (di opportunità) rilevante per l'azienda che ne è proprietaria. Bisogna inoltre considerare che, per poter eseguire un test, è necessaria una lunga fase di preparazione del setup sperimentale, legata all'ancoraggio sul by-bridge degli strumenti ed alla calibrazione della catena di misura. Per quanto riguarda la disponibilità dell'impalcato, per poter effettuare delle ispezioni è necessario deviare il traffico, richiedere i permessi necessari agli enti di dovere, ecc... Per questi motivi, di fatto è stato possibile disporre di un unico test sperimentale completo, della durata di due giorni, in un impalcato a Ventimiglia. Le suddette problematiche spiegano la necessità dell'esecuzione delle numerose simulazioni svolte nei Capitoli precedenti.

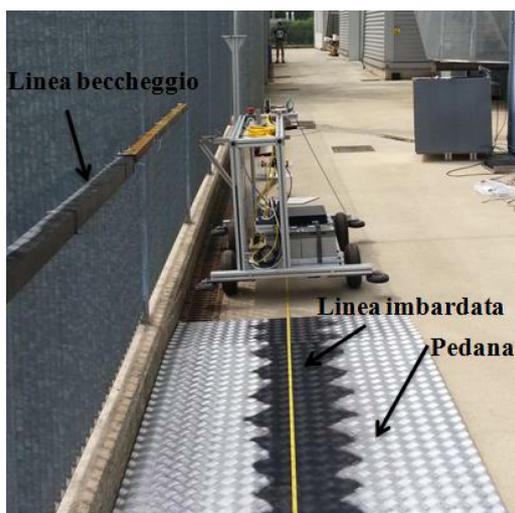
Essendo gran parte della strumentazione sempre disponibile, è stato comunque possibile realizzare una serie di prove sperimentali all'interno del Politecnico utilizzando una catena di misura parziale, costituita dal carrello strumentato e dal relativo gruppo

di puntatori laser e distanziometro, le quali saranno descritte nel dettaglio nel prossimo paragrafo. Ciò ha permesso da un lato di testare parte della catena di misura, e dall'altro di effettuare alcuni tentativi di ricostruzione della traiettoria del carrello. E' tuttavia importante sottolineare che l'unico modo valido per avere un effettivo riscontro sulla correttezza della traiettoria ricostruita, è di disporre del modello 3D di ciò che viene acquisito, e confrontarne la geometria con quella dell'elemento reale. Purtroppo però il laser scanner non è stato disponibile durante la fase iniziale dei test; inoltre, l'operazione di ricostruzione della nuvola di punti a partire dalla traiettoria dello scanner e dai dati acquisiti è stata svolta da un'azienda esterna al Politecnico, Gexcel S.r.l., specializzata nel settore software per laser scanner. Ciò implica che intercorra un certo intervallo di tempo tra l'acquisizione dati e l'analisi degli stessi; ciò ha ulteriormente complicato l'operazione di verifica.

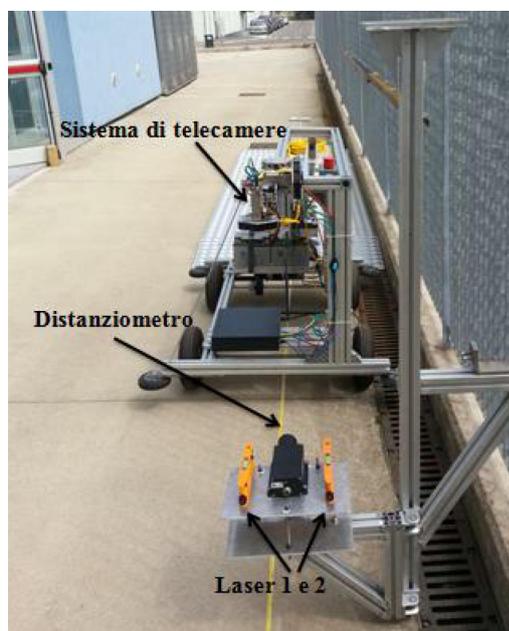
## 6.2 Prove sperimentali al Politecnico di Milano

Al Politecnico di Milano sono state eseguite delle prove sperimentali preliminari, volte principalmente a testare il corretto funzionamento dell'architettura di misura.

In particolare, in un'area esterna del Politecnico sono state riprodotte le condizioni operative del carrello sulla passerella, utilizzando una pedana metallica in luogo dello scalino, e sostituendo il corrimano tramite un profilato di alluminio fissato alla ringhiera (vedi fig.6.1).



(a) La rampa; si possono notare i riferimenti rettilinei per le telecamere, cioè il decametro in terra, ed il laminato al lato



(b) Il carrello, e la piastra con laser e distanziometri

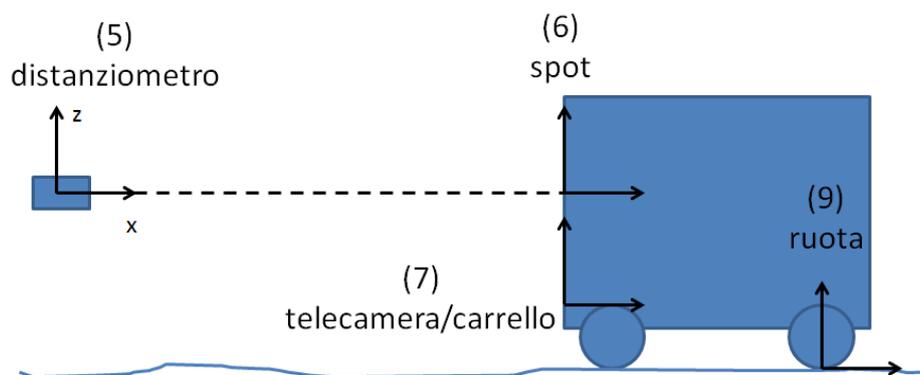
**Figura 6.1:** Test sperimentali al Politecnico di Milano

Non essendo di fatto possibile ricreare l'effetto del moto del camion e le oscillazioni del by-bridge, ai fini di una prima ricostruzione della traiettoria del carrello è stata utilizzata solamente la parte finale della catena di misura, in particolare il carrello con le tre telecamere a bordo, il distanziometro ed i puntatori laser; ciò equivale a prendere le terne (5), (6) e (7) del modello matematico presentato nel Capitolo 2. A tal proposito, si può notare in fig.6.1 (b) che, per sostenere i puntatori laser ed il distanziometro, è stato utilizzato proprio il supporto per la piastra inferiore (cioè il profilato di alluminio in primo piano), in quanto esso consente di regolare l'inclinazione del piano su cui sono posizionati i dispositivi laser.

Gli altri strumenti di misura sono stati acquisiti solamente al fine di verificare il corretto funzionamento del sistema di acquisizione.

Durante la fase iniziale dei test, data l'indisponibilità del dispositivo laser scanner, per verificare la correttezza del modello matematico e dei dati acquisiti si è utilizzato un metodo alternativo basato sulla ricostruzione del profilo del terreno e della rampa. Esso prevede il confronto tra dati statici acquisiti manualmente, e dati dinamici acquisiti con il carrello.

Dopo aver fissato la posizione e l'orientamento del distanziometro e dei puntatori laser in maniera da renderli paralleli ai riferimenti rettilinei, sono state effettuate delle acquisizioni statiche manuali: sfruttando un piano di proiezione in cartone, si è determinato manualmente, ad intervalli di 1 m individuati tramite il decametro a terra, la distanza dello spot luminoso del distanziometro dal terreno; in questo modo si ottiene, per punti, il profilo del terreno rispetto al fascio del distanziometro. In seguito, sono state effettuate delle acquisizioni dinamiche con il carrello in movimento. I dati acquisiti sono sufficienti per determinare la posizione e l'orientamento del carrello rispetto alla terna del distanziometro; per questo motivo è possibile ricostruire la traiettoria nella terna del distanziometro di qualsiasi punto solidale al carrello. Ricostruendo dunque la traiettoria del punto di contatto tra ruote e terreno (indicato in fig.6.2 come origine della terna (9)), e proiettandola su un piano verticale parallelo all'avanzamento del carrello, si ottiene di fatto una stima del profilo del terreno.



**Figura 6.2:** Schema semplificato delle terne in gioco durante le prove al Politecnico.

Utilizzando la stessa nomenclatura già vista per il modello matematico, avremo:

$$\mathbf{t}_{56} = \begin{bmatrix} x_{56} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

determinato tramite il distanziometro

$$R_{56} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma_{56} & \beta_{56} \\ \gamma_{56} & 1 & -\alpha_{56} \\ -\beta_{56} & \alpha_{56} & 1 \end{bmatrix}$$

utilizzando l'ipotesi di piccole rotazioni, dove  $\alpha_{56}$  è determinato tramite gli spot, e  $\beta_{56}$  e  $\gamma_{56}$  sono determinati tramite le telecamere laterali

$$\mathbf{t}_{67} = \begin{bmatrix} x_{67} \\ y_{67} \\ 0 \end{bmatrix}$$

dove  $x_{56}$  e  $y_{56}$  sono determinati tramite la telecamera sul piano degli spot

$$R_{67} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

poiché le due terne sono solidali

$$\mathbf{t}_{79} = \begin{bmatrix} x_{79} \\ y_{79} \\ z_{79} \end{bmatrix}$$

con la terna (9) posizionata con l'origine nel punto di contatto tra ruote anteriori e terreno, determinabile essendo note le dimensioni del carrello

Dunque, si può ricavare  $\mathbf{t}_{59}$  come:

$$\begin{bmatrix} t_{59} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{56} M_{67} \begin{bmatrix} t_{79} \\ 1 \end{bmatrix}$$

dove:

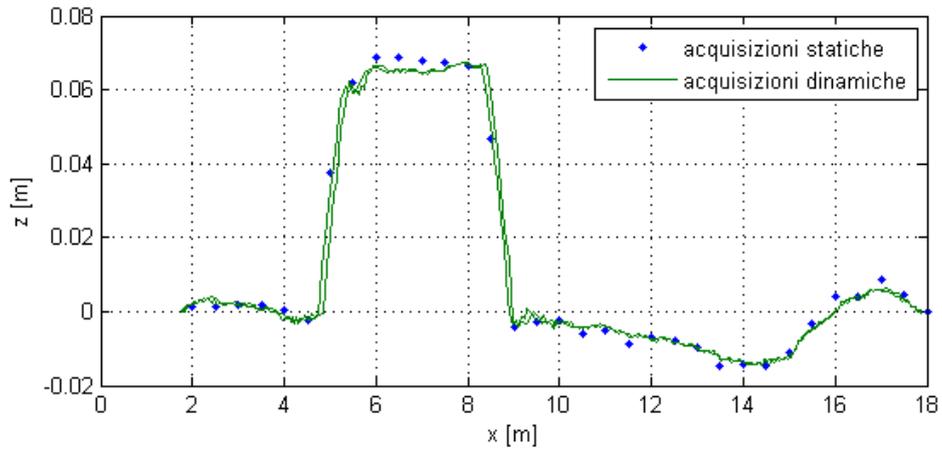
$$M_{56} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{56} & \mathbf{t}_{56} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right]$$

$$M_{67} = \left[ \begin{array}{c|c} R_{67} & \mathbf{t}_{67} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right]$$

E' quindi possibile confrontare tali dati con quelli individuati in precedenza con le acquisizioni statiche, plottando  $z_{59}$  in funzione di  $x_{59}$ ; i risultati ottenuti sono in fig.6.3, la quale mostra una sostanziale sovrapposibilità dei dati rilevati.

La disponibilità del laser scanner ha permesso di eseguire delle verifiche più accurate sulle traiettorie determinate. Utilizzando lo stesso setup sperimentale, è stato infatti possibile ricostruire un modello 3D della facciata del Politecnico, e verificarne la geometria confrontandolo con la facciata reale, riportata in fig.6.4.

Queste prove preliminari, pur non dando indicazioni sufficienti riguardanti l'accuratezza della catena di misura (essendo la prima parte della stessa assente), hanno comunque permesso tra le altre cose di fare osservazioni importanti relativamente all'efficacia della procedura di compensazione software del disallineamento dei laser. In particolare, in fig.6.5 e fig.6.6 sono riportati due modelli 3D; nel primo (fig.(a)) i puntatori laser sono stati allineati solamente tramite la procedura manuale, e si può notare come la facciata dell'edificio appaia leggermente deformata, mostrando una sorta di "torsione"

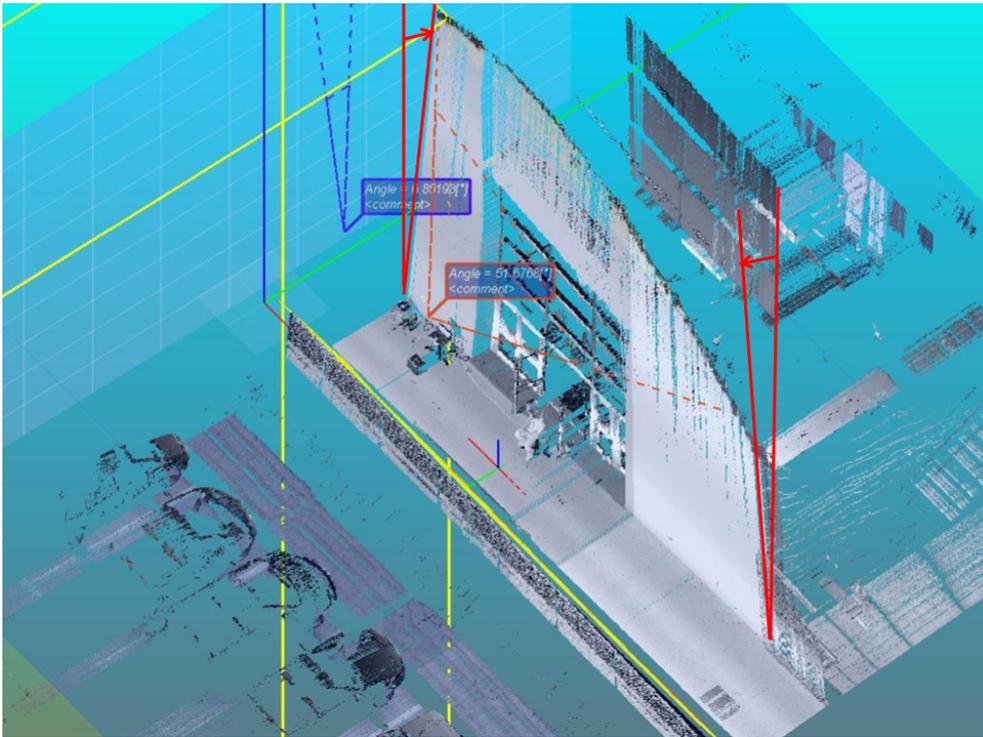


**Figura 6.3:** Confronto tra il profilo del terreno individuato manualmente, e tramite il carrello; l'errore massimo compiuto risulta inferiore a 1 cm.

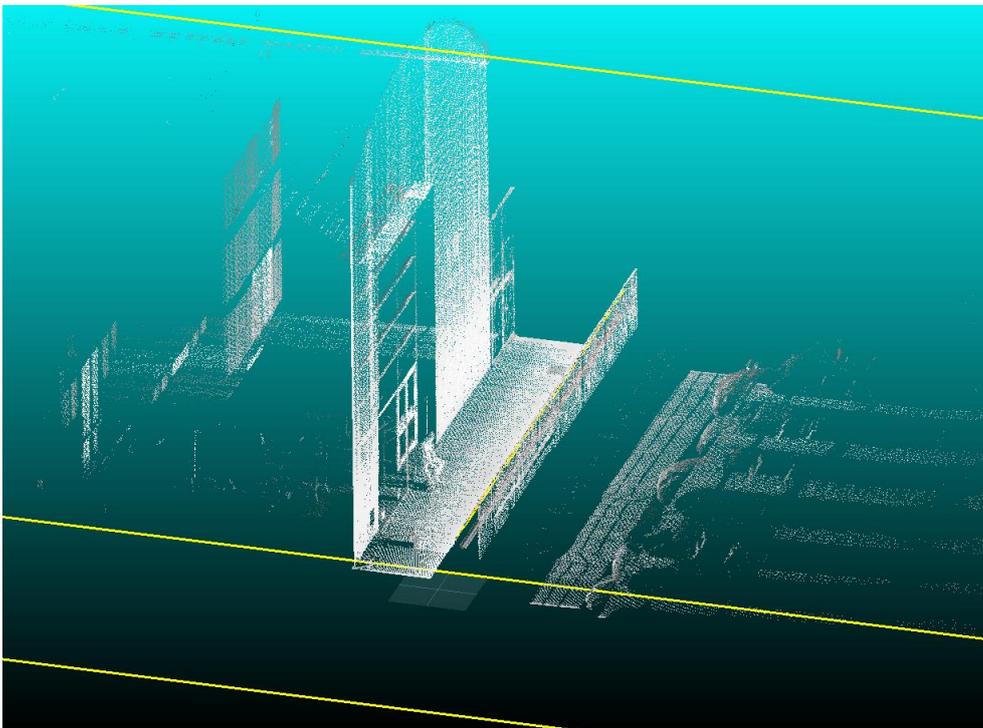
rispetto all'asse del moto del carrello. In figura (b), al contrario, è riportato il modello ottenuto in seguito alla correzione via software del disallineamento residuo degli spot tramite regressione lineare; in questo caso, la parete appare perfettamente verticale, a dimostrazione dell'efficacia del metodo utilizzato.



**Figura 6.4:** Immagine reale della facciata del Politecnico ricostruita.

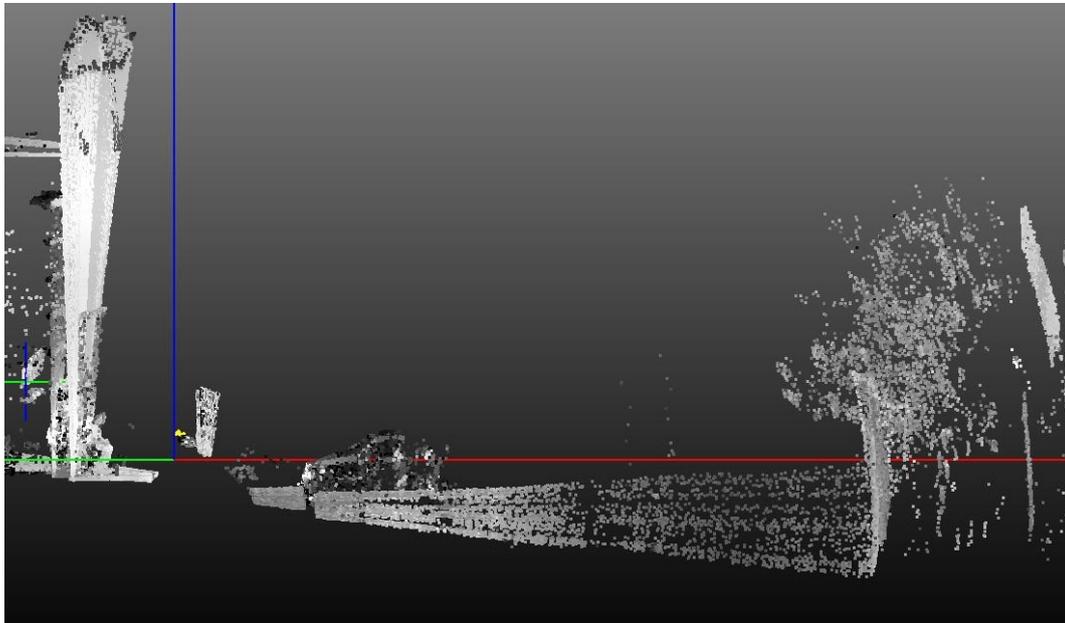


(a) Senza compensazione del disallineamento dei puntatori laser.

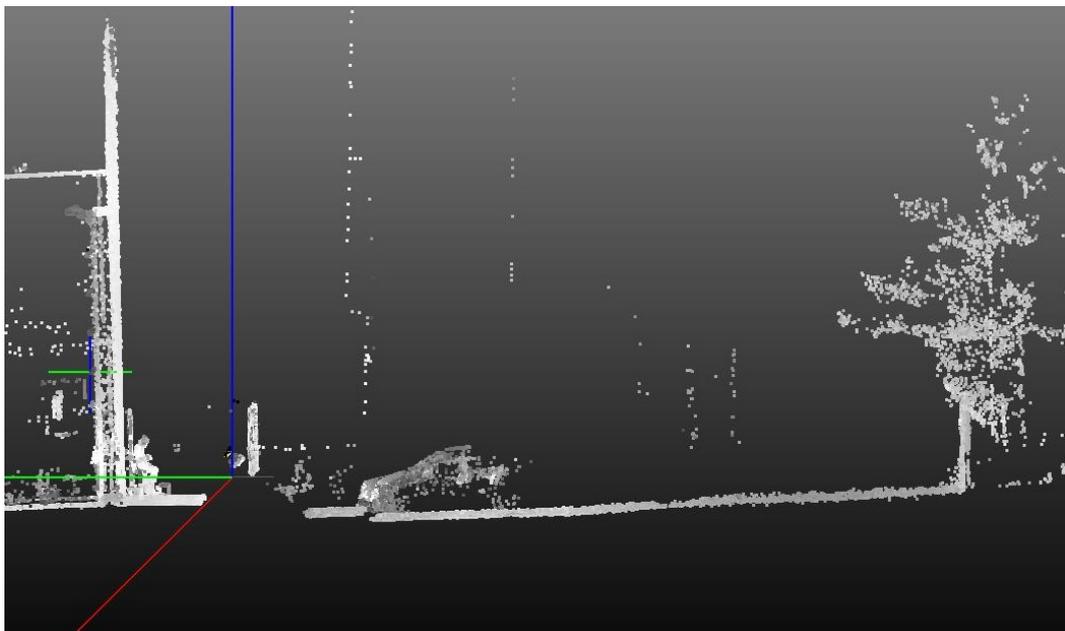


(b) Con compensazione del disallineamento dei puntatori laser.

**Figura 6.5:** Ricostruzione della facciata del Politecnico tramite acquisizioni dinamiche con il laser scanner.



(a) Senza compensazione del disallineamento dei puntatori laser.



(b) Con compensazione del disallineamento dei puntatori laser.

**Figura 6.6:** Vista laterale della ricostruzione della facciata del Politecnico tramite acquisizioni dinamiche con il laser scanner.

### 6.3 Prove sperimentali eseguite a Ventimiglia

Prove sperimentali con la catena di misura completa sono state effettuate su di un impalcato di Ventimiglia, rappresentato in fig.6.7.

La scelta è ricaduta su questo impalcato, anche perché la zona sottostante è facilmente accessibile; ciò ha permesso la realizzazione di acquisizioni statiche tramite il laser scanner 3D, utili per effettuare dei confronti con i risultati delle acquisizioni dinamiche.



**Figura 6.7:** L'impalcato di Ventimiglia

I test hanno avuto una durata totale di due giorni, durate i quali è stato possibile effettuare quattordici acquisizioni. Purtroppo durante le prove si sono avuti dei problemi con il sistema di acquisizione: a causa di un bug nel software sviluppato in Labview, i dati relativi alla strumentazione a bordo del camion in alcune prove non sono stati registrati correttamente; tale problema è stato identificato solamente in fase di analisi dei dati, ed ha obbligato a scartare parte dei dati acquisiti.

Nella seguente tabella sono riportate le prove effettuate; tutte le acquisizioni sono relative alla stessa campata dell'impalcato. Si può notare che sulle quattordici prove eseguite, solamente cinque sono complete; si può anche notare che nessuna delle prove acquisite con laser scanner a  $45^\circ$  è completa, per cui non è stato possibile effettuare ricostruzioni dell'impalcato con lo scanner in tale configurazione.

**N.B.:** nelle note della tabella, andata e ritorno stanno per moto in avanti od in retromarcia del camion. L'appellativo "parziale" significa che non tutta la campata dell'impalcato è stata acquisita. "Moto irregolare" significa che il camion è stato fatto

avanzare con velocità non costante.

Prova	Focus3D	Risoluzione	Qualità	Completa	Note
1	90°	1/4	1x	no	Andata
<b>2</b>	90°	<b>1/4</b>	<b>1x</b>	<b>sì</b>	<b>Ritorno</b>
3	90°	1/4	1x	no	Andata
4	90°	1/4	1x	no	Ritorno
<b>5</b>	90°	<b>1/4</b>	<b>1x</b>	<b>sì</b>	<b>Andata parziale</b>
6	90°	1/4	1x	no	Ritorno + Andata
7	45°	1/4	1x	no	Ritorno + Andata
8	45°	1/2	1x	no	Ritorno + Andata
9	45°	1/4	1x	no	Ritorno + Andata
<b>10</b>	90°	<b>1/4</b>	<b>1x</b>	<b>sì</b>	<b>Ritorno parziale</b>
<b>11</b>	90°	<b>1/4</b>	<b>1x</b>	<b>sì</b>	<b>Andata parziale</b>
<b>12</b>	90°	<b>1/4</b>	<b>1x</b>	<b>sì</b>	<b>Ritorno parziale</b>
13	90°	1/4	1x	no	Andata parziale
14	90°	1/4	1x	no	Ritorno moto irregolare

## 6.4 Analisi dei dati sperimentali: osservazioni generali e post-trattamento dei dati

In questa sezione sono riportate alcune osservazioni riguardo i dati acquisiti a Ventimiglia da ciascuno strumento, finalizzate a comprendere in maniera migliore il moto delle varie parti del sistema, e l'effetto delle operazioni di post-elaborazione dei dati quali la compensazione numerica del disallineamento dei laser. In particolare, si ripercorrerà la catena di misura, analizzando i dati forniti dagli strumenti più significativi.

I dati presentati sono presi dalla prova 2, in quanto per le altre prove valgono osservazioni analoghe. La prova 2 è stata scelta in quanto è l'unica acquisizione completa della campata dell'impalcato.

In fig.6.8 viene ricordata la convenzione utilizzata nella trattazione.

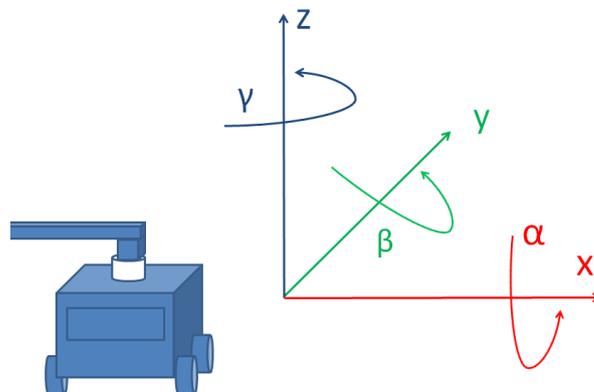


Figura 6.8: Nomenclatura utilizzata nell'analisi dei dati.

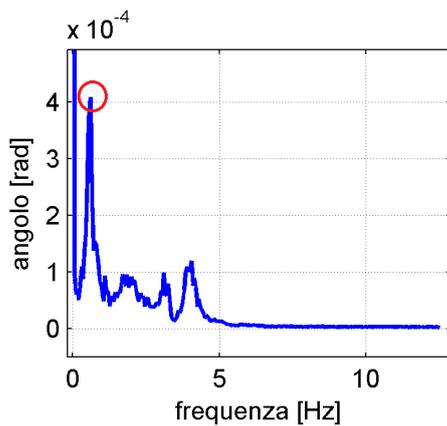
## Filtraggio dei dati

Piccoli errori nelle misure degli angoli possano portare ad errori significativi nella traiettoria del laser scanner. Tali errori possono essere dovuti a rumore, ma anche ad oscillazioni dei supporti di fissaggio dei vari strumenti. Risulta dunque importante capire quali frequenze possano essere eliminate e quali invece siano utili a descrivere il sistema.

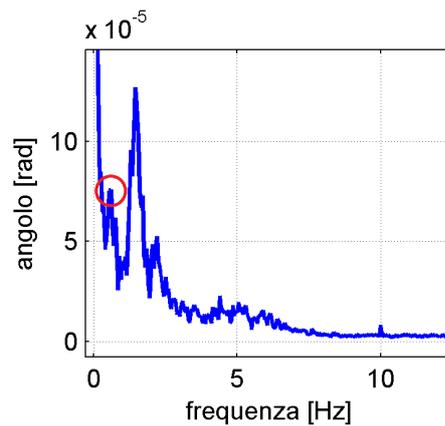
Dalle preliminari analisi accelerometriche sono stati identificati tre modi di vibrare della struttura associati alle seguenti frequenze:

- modo laterale a 0.29Hz;
- modo verticale a 0.58Hz;
- modo torsionale a 2.62Hz.

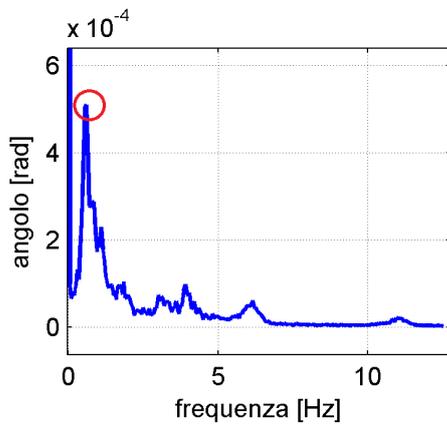
In figura 6.9 sono riportati gli spettri delle misure acquisite nella prova 2 dai due inclinometri, mediati utilizzando il metodo di Welch, con finestre temporali di 20s.



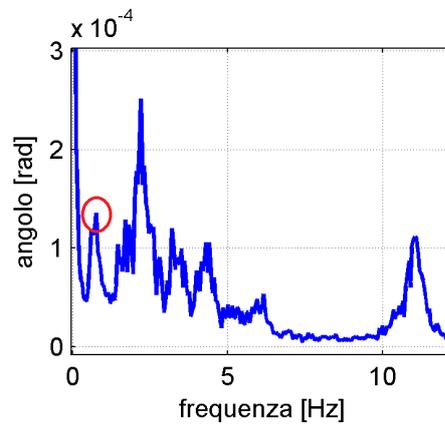
(a) Rotazioni attorno all'asse  $x$ , inclinometro superiore.



(b) Rotazioni attorno all'asse  $y$ , inclinometro superiore.



(c) Rotazioni attorno all'asse  $x$ , inclinometro inferiore.



(d) Rotazioni attorno all'asse  $y$ , inclinometro inferiore.

**Figura 6.9:** Spettro delle misure rilevate dagli inclinometri.

Tutti gli spettri mostrano dei picchi a circa 0.6Hz, frequenza che era già stata individuata nelle prove accelerometriche. Si è provveduto quindi a filtrare i valori misurati dai singoli sensori mediante filtro Butterworth passa-basso del secondo ordine avente frequenza di taglio pari a 0.7 Hz. Al fine di verificare la validità della scelta effettuata, durante la fase di post-processing sono state generate traiettorie del carrellino utilizzando una banda passante più elevata (5 Hz). I risultati ottenuti relativi alla ricostruzione dell'impalcato si sono tuttavia dimostrati peggiori rispetto a quelli ottenuti con traiettorie generate con un filtro sui segnali con banda passante ridotta.

### Distanziometro inferiore

Si ricorda che per distanziometro inferiore si intende lo strumento posizionato all'inizio della passerella, volto a determinare il moto del carrello su di essa. In fig.6.10 si riporta il dato rilevato.

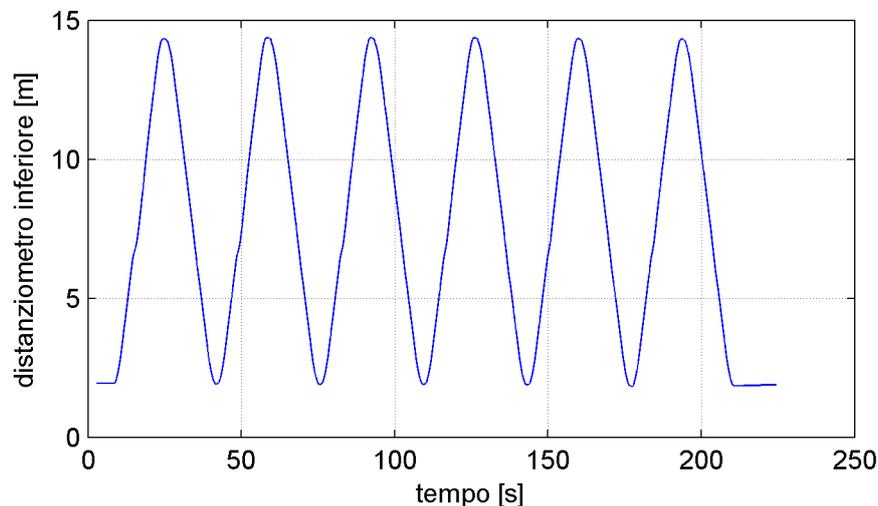
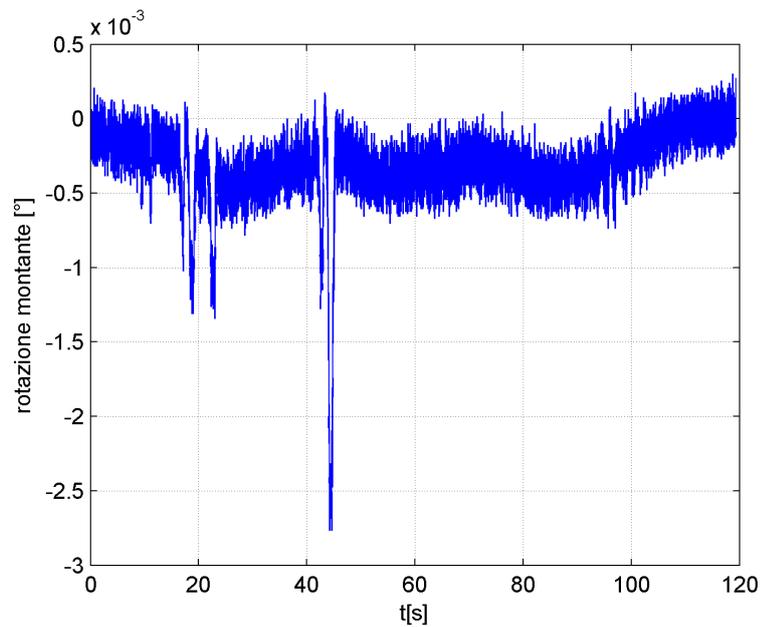


Figura 6.10: Dato acquisito dal distanziometro inferiore.

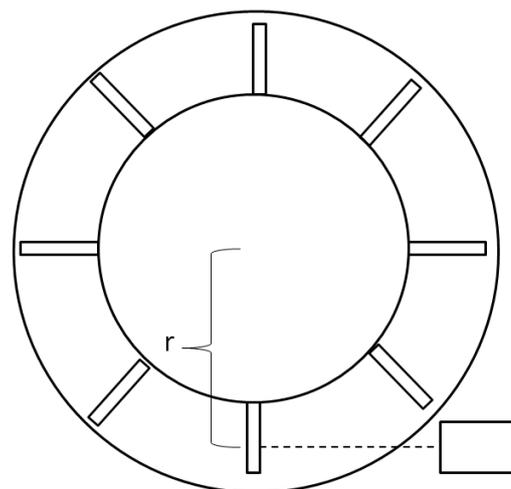
Si può notare, dunque, che nella prova 2 il carrello ha percorso la passerella per sei volte. Dal grafico in figura, inoltre, è possibile determinare gli istanti di tempo in cui il laser si trova in fondo alla passerella; tale informazione risulterà utile nell'analisi dei dati degli altri strumenti della catena di misura.

### Distanziometro alla base del montante

Le acquisizioni del distanziometro posto alla base del montante sono state elaborate al fine di ricavare una stima della rotazione del montante rispetto al camion; i risultati sono riportati in fig.6.11, avendo stimato  $r = 50cm$ . Tali dati confermano che il montante è essenzialmente fermo rispetto al camion durante l'acquisizione; è dunque possibile trascurare questo giunto rotazionale nel modello matematico.



(a) Rotazione del montante determinata tramite il distanziometro.



(b) Schema della posizione del distanziometro rispetto al montante, in sezione dall'alto.

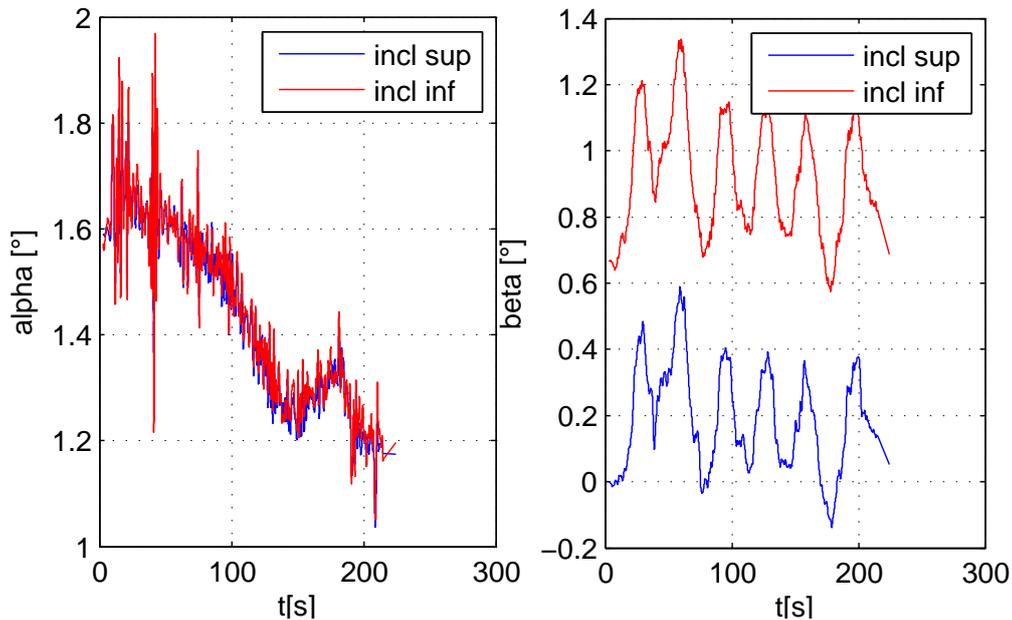
**Figura 6.11:** Distanziometro alla base del montante

### Misure inclinometriche

In fig.6.12 sono riportati gli angoli determinati tramite gli inclinometri, dopo il processo di filtraggio.

Si possono fare diverse osservazioni; per le rotazioni attorno l'asse  $y$ , denominate  $\beta$ , si osserva che:

- c'è un offset di circa  $0.7^\circ$  tra i due inclinometri, dovuto ad una diversa inclinazione delle due piastre sulle quali sono montati;

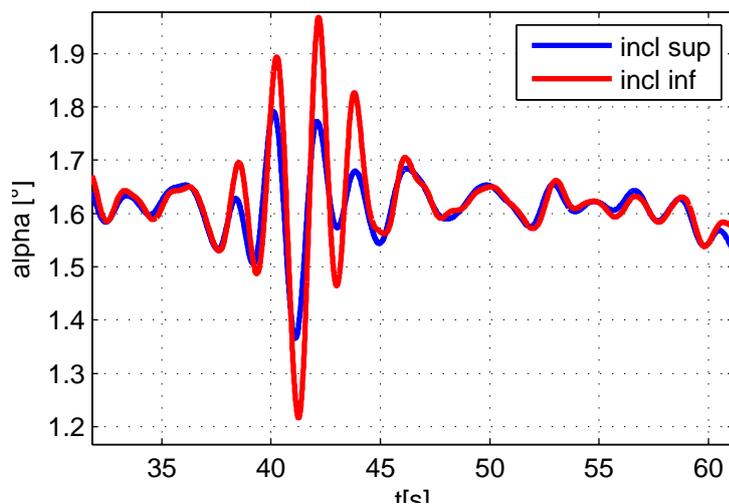


**Figura 6.12:** Angoli determinati dai due inclinometri

- le misure hanno un andamento molto simile. Ciò implica che le oscillazioni relative tra traversa e colonna devono essere di ampiezza limitata;
- si possono notare, per entrambi gli inclinometri, sei picchi massimi. Gli istanti temporali cui si verificano coincidono con gli istanti in cui il carrello si trova in fondo alla passerella, determinati precedentemente dai dati del distanziometro.

Per le rotazioni attorno l'asse  $x$ , denominate  $\alpha$ , si può notare che:

- le rotazioni di entrambi gli inclinometri partono da uno stesso valore iniziale diverso da zero, a differenza di quanto accade per l'angolo  $\beta$ . Ciò è dovuto al fatto che le piastre di supporto sono state montate a squadra rispetto al by-bridge, il quale tuttavia era inclinato rispetto al terreno;
- anche in questo caso le due misure sono molto simili tra loro, il che implica la presenza di oscillazioni relative tra colonna e traversa rispetto all'asse  $x$  limitate;
- il trend della misura non sembra legato al moto del carrello sulla passerella. Esso è probabilmente dovuto ad una variazione di pendenza dell'impalcato;
- il dato a prima vista può sembrare molto rumoroso, nonostante il filtraggio che è stato effettuato. In verità, se si esegue uno zoom della figura (fig.6.13) si osservano delle oscillazioni che, in quanto molto simili per entrambi gli inclinometri, possono essere considerate delle oscillazioni rigide dell'intero sistema, attribuibili al beccheggio del camion. Le oscillazioni dell'inclinometro inferiore sembrano essere leggermente più accentuate; ciò può essere dovuto ad un'amplificazione legata al supporto di alluminio con cui è fissato al by-bridge.



**Figura 6.13:** Zoom dell'angolo  $\alpha$  di fig.6.12, in corrispondenza del picco maggiore.

Dalle osservazioni effettuate dunque, si può concludere che le rotazioni relative tra colonna e traversa sono limitate, sia rispetto all'asse  $x$  che rispetto all'asse  $y$ ; le oscillazioni rilevate sono invece attribuibili principalmente al camion stesso, e sono inferiori al grado. In particolare, per quanto riguarda il rollio del camion, esse sono evidentemente legate al moto del carrello sulla passerella; relativamente al beccheggio, sono probabilmente dovute a frenate del mezzo.

### Blob detection sul piano degli spot superiore

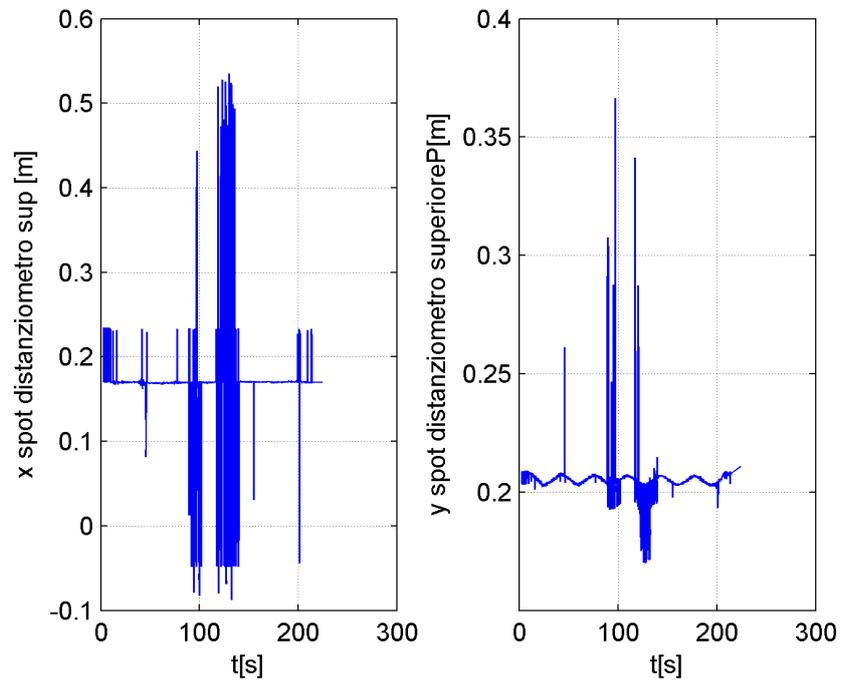
L'analisi dei dati ha evidenziato dei problemi nell'acquisizione delle coordinate degli spot da parte della smart-camera (fig.6.14). Tali problemi sono dovuti a parametri errati nell'algorithm di blob detection e ad una non perfetta protezione del piano degli spot dalla luce solare.

Purtroppo, dato che la smart-camera restituisce direttamente le coordinate dei punti, non si hanno a disposizione i fotogrammi per tentare di ricalibrare i parametri dell'algorithm. Di conseguenza, è stato necessario cancellare dal file acquisito le righe contenenti dati errati, ed interpolare i dati rimanenti. Il risultato ottenuto, relativamente allo spot del distanziometro, è riportato in fig. 6.15

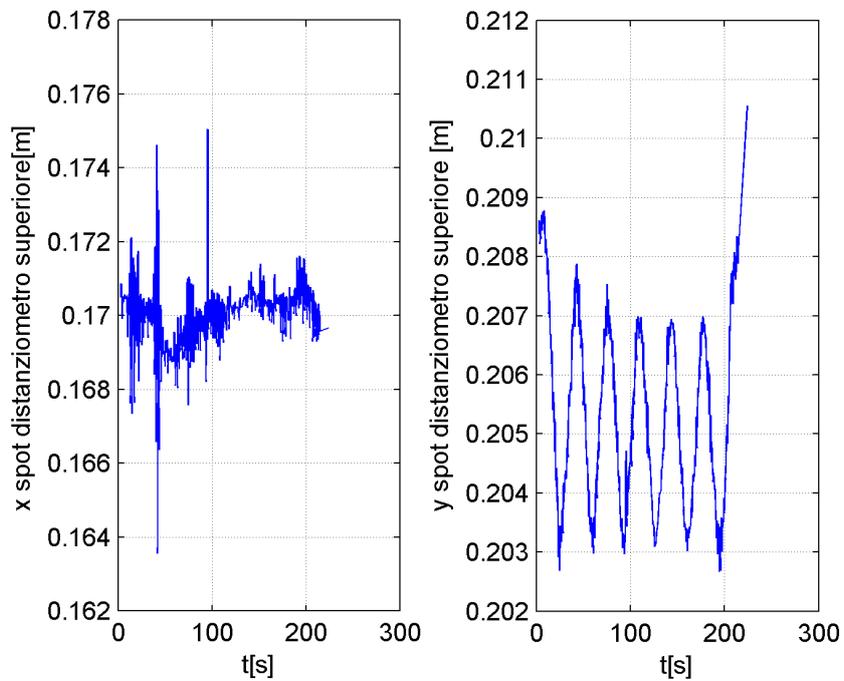
Il problema purtroppo si è verificato in tutte le prove eseguite; la procedura di correzione dei dati, tuttavia, come è possibile notare per lo spot del distanziometro in figura, si è dimostrata piuttosto efficace.

Analizzando i dati corretti si riescono a fare alcune osservazioni. In particolare si può notare che lungo l'asse  $x$  della telecamera<sup>1</sup> compaiono dei picchi improvvisi i quali arrivano fino ad 1 cm di ampiezza. La natura di tali picchi non è dovuta ad una errata correzione dei dati; infatti anche in fig.6.12 (riferita agli inclinometri, ed in particolare nell'angolo  $\alpha$ ) sono presenti forti oscillazioni negli stessi istanti di tempo. E' dunque probabile che esse siano dovute a frenate improvvise del camion, le quali provocano,

<sup>1</sup>Si ricorda che la terna della telecamera e la terna del piano superiore precedentemente indicata come (4) hanno le origini coincidenti e gli assi paralleli; tuttavia le terne sono orientate in maniera diversa, per cui in figura l'asse  $x$  ed  $y$  sono invertiti rispetto alla convenzione di fig.6.8



**Figura 6.14:** Coordinate dello spot del distanziometro sul piano superiore, come sono state restituite dalle telecamere. Le coordinate sono espresse nel sistema di riferimento della telecamera



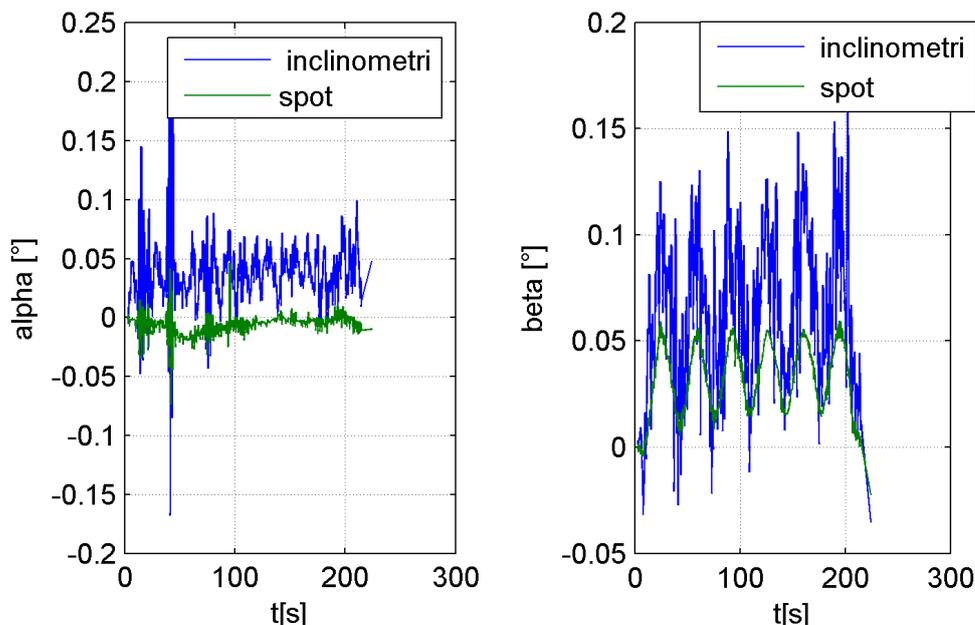
**Figura 6.15:** Coordinate dello spot del distanziometro sul piano superiore, dopo essere state trattate.

oltre ad oscillazioni complessive del sistema, anche moti della colonna rispetto alla traversa. Lungo l'asse  $y$ , si notano delle oscillazioni di poco inferiori al centimetro, anche in questo caso legate al moto del carrello sulla passerella.

### Individuazione delle rotazioni tra traversa e colonna tramite spot e tramite inclinometri

L'effettivo valore delle rotazioni tra traversa e colonna può essere valutato sia tramite i dati ottenuti dagli inclinometri, sia dal moto degli spot nel piano superiore. In particolare, le rotazioni tra i due membri attorno all'asse  $x$  (angolo  $\alpha$ ) e all'asse  $y$  (angolo  $\beta$ ) si possono individuare, sotto l'ipotesi di piccole rotazioni, per differenza tra dati forniti dai canali corrispondenti dei due inclinometri posti su traversa e colonna; tramite gli spot, la stessa rotazione può essere individuata come descritto nel paragrafo 2.4.1.

I risultati ottenuti nei due casi sono confrontati in fig. 6.16.



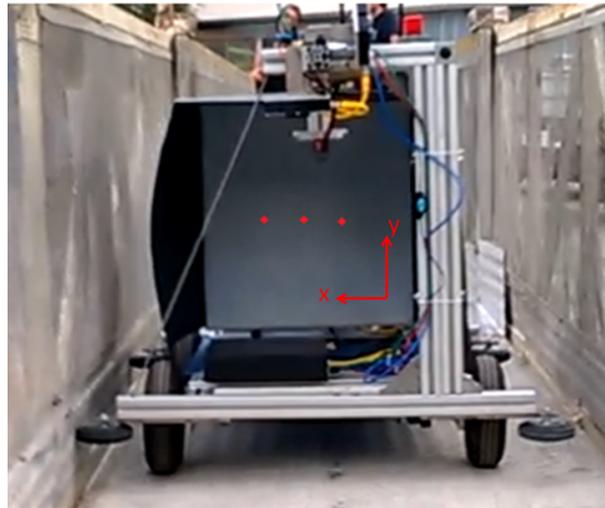
**Figura 6.16:** Angoli relativi tra colonna e montante, determinati tramite inclinometri e tramite gli spot

Dal grafico si ha una verifica definitiva del fatto che il giunto che unisce i due membri sia effettivamente piuttosto rigido, in quanto le le rotazioni massime rilevate sono dell'ordine dei decimi di grado.

Relativamente all'angolo  $\beta$ , si può osservare che, come era prevedibile da quanto visto in precedenza, le oscillazioni sono legate al moto del carrello sulla passerella. Inoltre, si nota che l'angolo determinato tramite gli spot risulta avere oscillazioni di ampiezza inferiore; ciò deriva dall'approssimazione utilizzata per calcolarlo, ed è indice di una probabile flessione della colonna generata dal moto del carrello sulla passerella. Dal confronto risulta infine che, nonostante sia stato filtrato, il dato ottenuto tramite l'inclinometro presenti un rumore più elevato rispetto il dato ottenuto dagli spot. Tale

rumore tuttavia è inferiore ai  $0.05^\circ$ , e dunque può essere considerato accettabile ai fini della ricostruzione della traiettoria.

### Blob detection sul piano del carrello: disallineamento tra distanziometro e passerella



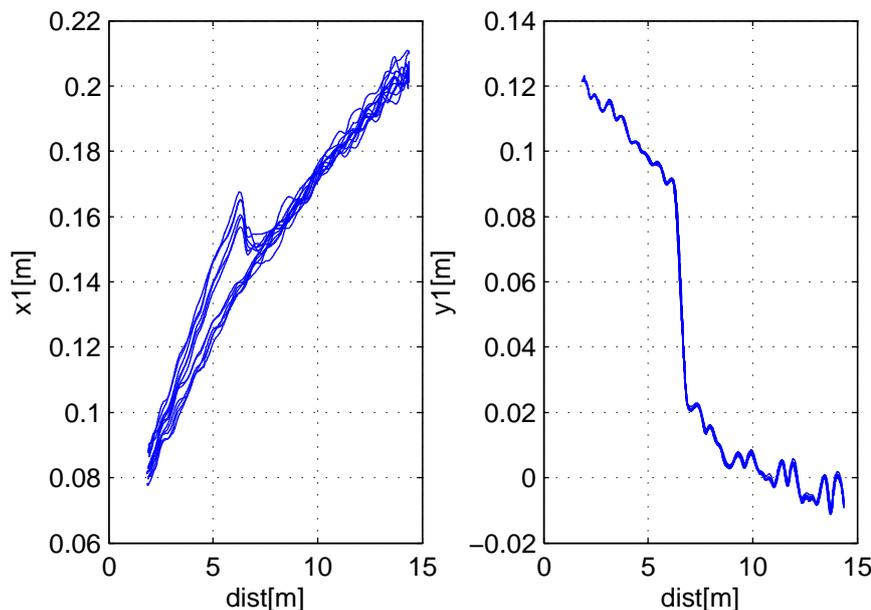
**Figura 6.17:** Il carrello durante il moto sulla passerella; sono evidenti i tre spot luminosi allineati del distanziometro (al centro) e dei puntatori laser. In figura inoltre, per maggior chiarezza, è stato riportato l'orientamento della terna della telecamera sul piano degli spot.

In fig.6.18 sono riportate le coordinate dello spot del distanziometro sul piano del carrello in funzione dello spostamento del carrello, espresse nella terna della relativa telecamera<sup>2</sup>.

Osservando la figura, ricordando che l'asse  $z$  della terna della telecamera è entrante nel piano, e che  $x$  ed  $y$  rappresentano rispettivamente l'asse orizzontale e l'asse verticale (fig.6.17), si possono fare diverse considerazioni:

- la coordinata  $x$  dello spot del distanziometro tende ad aumentare con la distanza del carrello sulla passerella. E' possibile spiegare ciò ipotizzando che il fascio del distanziometro sia inclinato verso sinistra rispetto all'asse della passerella ( $\gamma$  positivo, rispetto alla convenzione di inizio capitolo);
- osservando la coordinata  $y$ , si può osservare nella parte centrale la presenza dello scalino. Si nota inoltre che il valore della coordinata tende a diminuire con la distanza; è possibile spiegare ciò ipotizzando che il distanziometro sia inclinato verso il basso rispetto all'asse della passerella ( $\beta$  positivo, rispetto alla convenzione di inizio capitolo);
- nel grafico della  $x$  si nota che, nella fase di andata, compare una irregolarità, che non è presente tuttavia nella fase di ritorno. Ciò è spiegabile ipotizzando che il

<sup>2</sup>Si ricorda che la terna della telecamera e la terna del carrello precedentemente indicata come terna (7) hanno le origini coincidenti e gli assi paralleli; tuttavia, le due terne sono orientate in maniera diversa.



**Figura 6.18:** Coordinate dello spot del distanziometro sul piano del carrello, in funzione dello spostamento del carrello determinato tramite il distanziometro. I dati in figura sono relativi ad una intera prova sperimentale, la quale comprende più passaggi del carrello.

carrello nella fase di andata, in corrispondenza del restringimento della passerella, urti la passerella stessa, e venga spostato verso sinistra. Nella fase di ritorno, al contrario, l'allargamento di sezione non ha effetti sul carrello.

In fig.6.19 si riassumono le deduzioni fatte sul moto del carrello e sul disallineamento del distanziometro, riportando un disegno vista dall'alto dell'ipotetica traiettoria del carrello sul piano di calpestio della passerella.

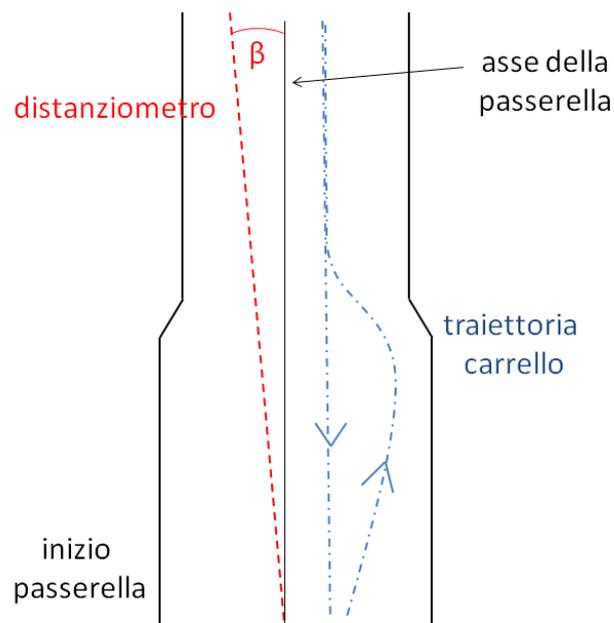
Partendo dai grafici di fig.6.18 si può pensare di individuare il disallineamento tra distanziometro e passerella, come già osservato nel paragrafo 5.5.5 relativo alle procedure di calibrazione.

Per quanto riguarda l'inclinazione verso sinistra del distanziometro, infatti, si può considerare che il carrello nella fase finale della passerella avanzi seguendo l'asse della passerella. In tale zona, infatti, la larghezza della passerella è circa pari a quella del carrello. Di conseguenza, nel caso in cui distanziometro e asse della passerella fossero allineati, nella seconda parte di passerella dovremmo registrare una variazione nella coordinata  $x$  dello spot circa nulla.

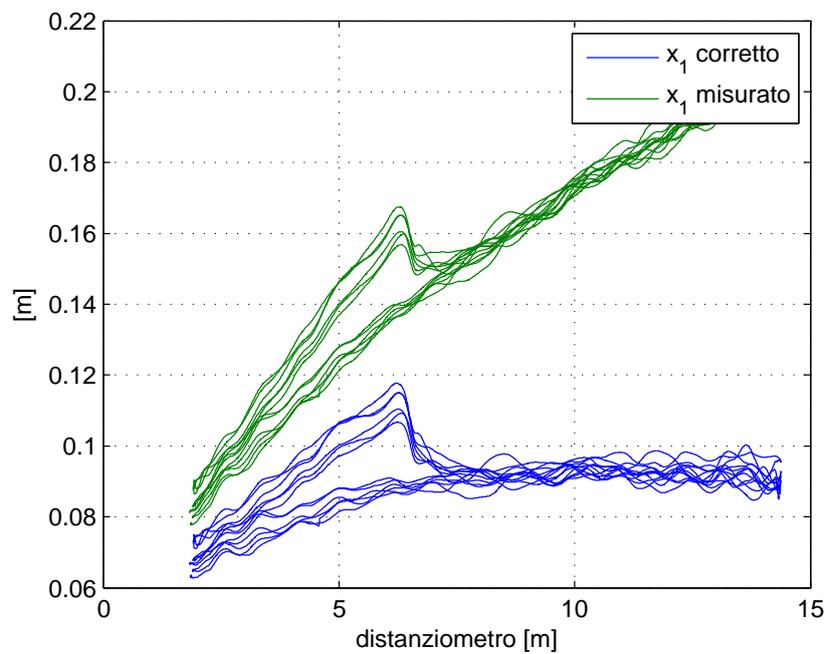
Imponendo questa condizione, si può determinare l'angolo  $\gamma$  di disallineamento tra distanziometro e passerella, pari a  $0.45^\circ$ .

Per l'offset  $\beta$  vale un discorso analogo. Utilizzando la stessa procedura è stato individuato un offset di  $0.32^\circ$ , il cui effetto è riportato in fig.6.21.

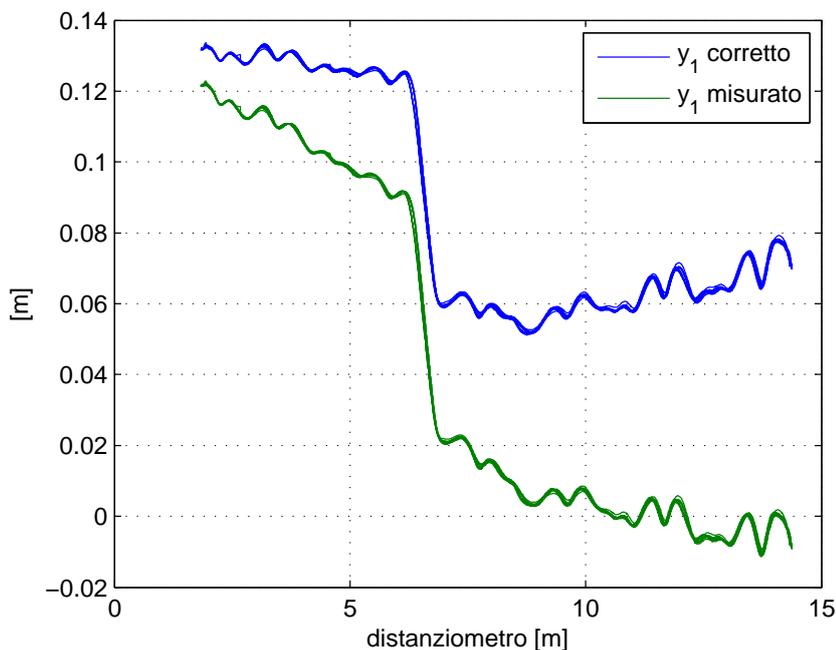
In tale figura è inoltre possibile notare che la coordinata  $y$  dello spot ad ogni passaggio del carrello tende a ripercorrere gli stessi punti; ciò è indice che del fatto che le oscillazioni del dato che si possono notare nel grafico sono dovute ad irregolarità del piano di calpestio della passerella; questo risultato non è banale, in quanto ci consente di verificare la correttezza del dato acquisito: se non ci fosse stata sovrapposizione, sarebbe



**Figura 6.19:** Traiettoria seguita dal carrello sulla passerella, vista dall'alto.



**Figura 6.20:** Effetto della correzione dell'inclinazione laterale dei laser sulle coordinate degli spot.



**Figura 6.21:** Effetto della correzione dell'inclinazione verticale dei laser sulle coordinate degli spot.

stata probabile la presenza di un errore. Per lo spostamento in direzione trasversale, al contrario, non c'è sovrapposizione perfetta per ogni passaggio del carrello; ciò conferma la presenza di alcuni centimetri di gioco tra i respingenti laterali del carrello e la passerella, i quali lasciano al carrello più ampia libertà di movimento.

### **Blob detection sul piano del carrello: rollio del carrello e disallineamento tra i puntatori laser**

Dai dati sperimentali risulta un effettivo disallineamento dei laser sulla piastra inferiore; plottando infatti l'angolo di rollio calcolato utilizzando le coordinate dei due spot (fig.6.22, in blu), si ottiene un legame circa lineare con la distanza percorsa dal carrello sulla passerella, come già discusso nel paragrafo 5.5.1. In figura, inoltre, è riportato l'effetto della compensazione numerica, mediante l'eliminazione della parte lineare della funzione.

Il valore medio di  $0.5^\circ$  del rollio del carrello che si ottiene dopo il trattamento del dato è attribuibile ad una effettiva inclinazione del distanziometro rispetto al carrello. Si nota inoltre che l'andamento del rollio appare ripetibile nei vari passaggi del carrello, e ciò è indice del fatto che anche il rollio dipende essenzialmente dalle irregolarità del piano di calpestio della passerella, e che la misura effettuata è buona.

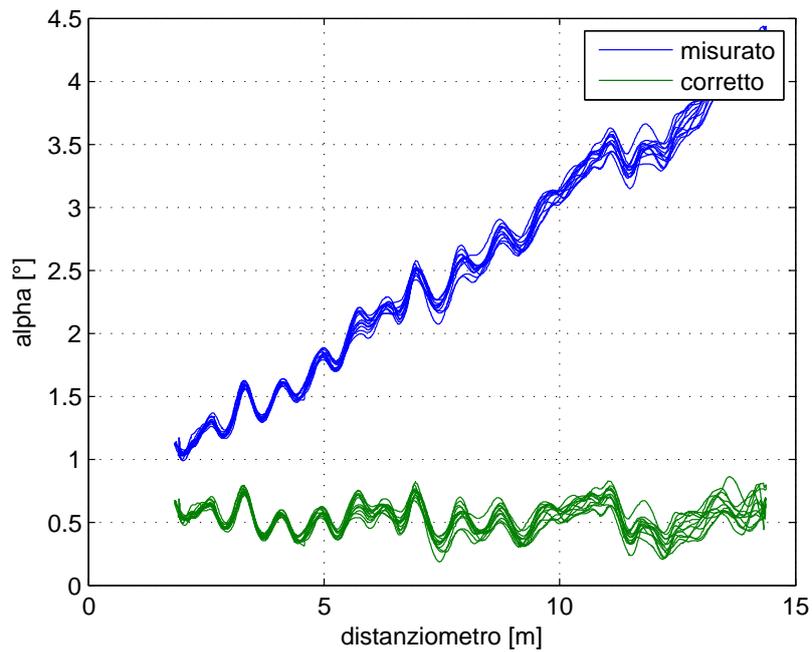


Figura 6.22: Effetto della correzione del disallineamento dei laser sul rollio del carrello.

### Sistemi di visione per beccheggio e imbardata del carrello

In fig.6.23 è riportato l'angolo in gradi determinato dalle telecamere di lato e di terra del carrello tramite l'algoritmo di "edge detection".

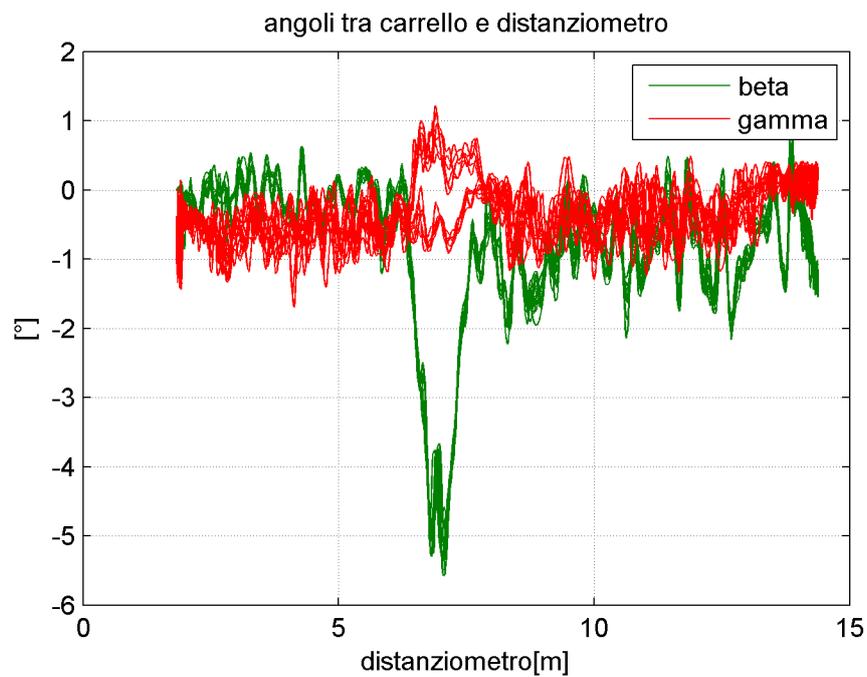


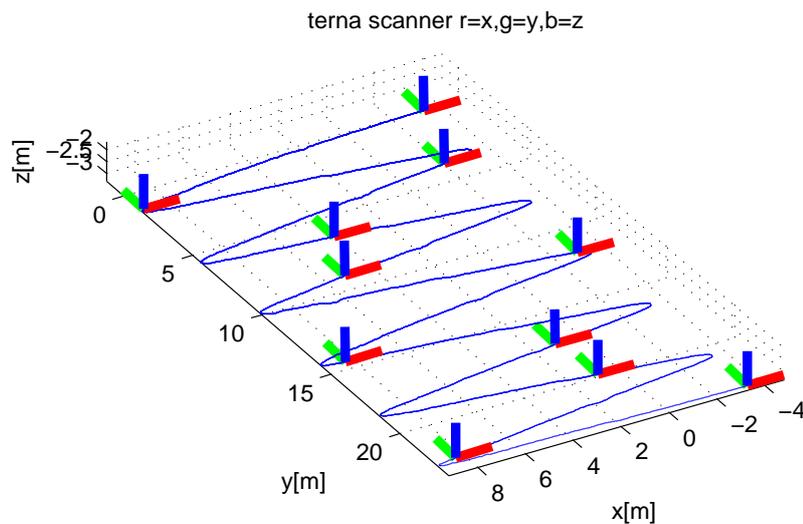
Figura 6.23: Angoli di beccheggio ( $\beta$ ) ed imbardata ( $\gamma$ ) del carrello rispetto alla passerella.

E' possibile osservare come l'angolo di beccheggio  $\beta$  del carrello raggiunga un picco negativo di  $-5^\circ$  in corrispondenza del gradino; inoltre, gradino a parte, le oscillazioni del carrello restano comunque considerevoli, con ampiezze da picco a picco dell'ordine dei  $2^\circ$ . Per quanto riguarda l'angolo di imbardata  $\gamma$ , si ha un picco solamente nella fase di andata del carrello; ciò è riconducibile al moto del carrello sulla passerella: nella fase di andata, il carrello tende a urtare il lato destro del restringimento della passerella. Dalla figura si nota anche che i dati ottenuti dalla telecamera laterale sono molto buoni; infatti la ripetibilità dei dati ad ogni passaggio del carrello è elevata, ad indicare che le variazioni di angolo indicate sono effettivamente dovute ad non planarità del piano di calpestio.

La ripetibilità è inferiore per quanto riguarda l'imbardata, in quanto in questo senso il moto del carrello non è vincolato, per cui ad ogni passaggio esso potrebbe compiere una traiettoria diversa.

### Traiettoria finale

In figura 6.24 è rappresentata la traiettoria finale del laser scanner espressa nel sistema di riferimento assoluto.



**Figura 6.24:** Ricostruzione della traiettoria e dell'orientamento della terna del laser scanner nello spazio; il segmento rosso corrisponde all'asse delle x, il verde alle y, il blu alle z.

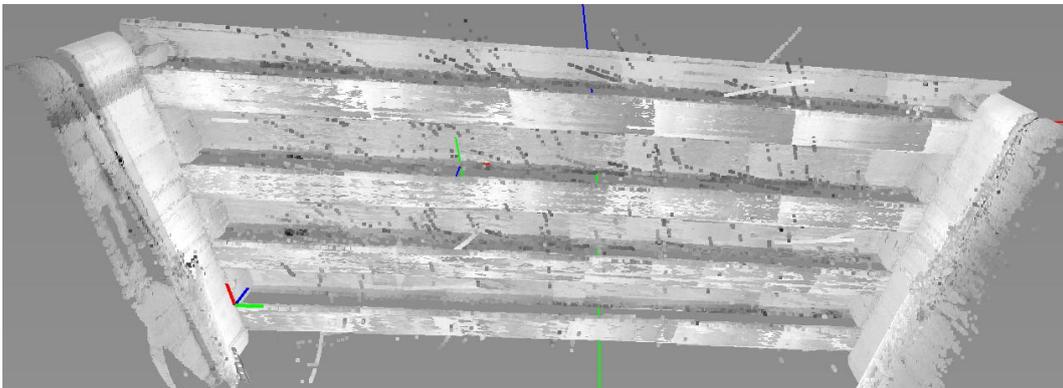
## 6.5 Risultati della ricostruzione della nuvola di punti

Le nuvole di punti sono state ricostruite da Gexcel S.r.l., un'azienda specializzata nell'elaborazione di dati laser scanner, a partire dalle traiettorie da noi fornite e dai dati acquisiti dallo strumento. In questa sezione ci limiteremo a mostrare i risultati della

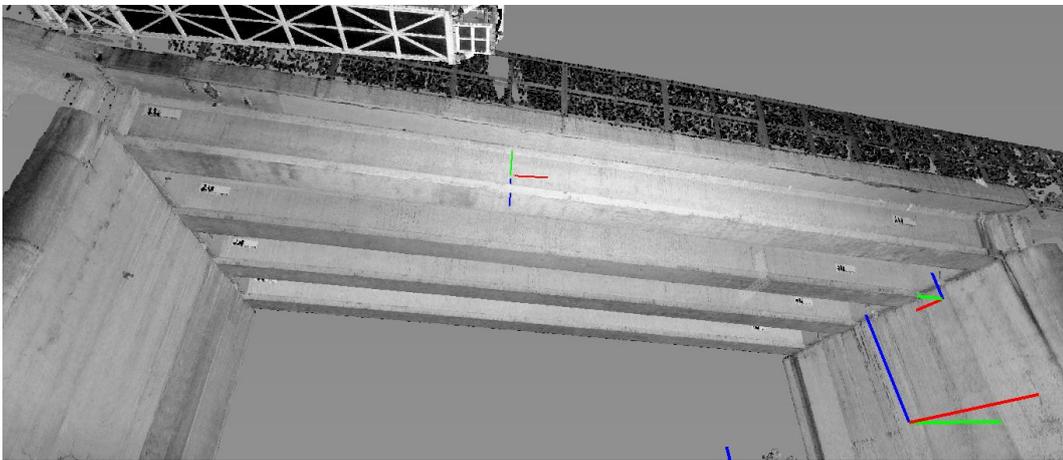
ricostruzione, riservando alla sezione successiva analisi critiche e discussioni.

A causa delle problematiche già citate ad inizio Capitolo relative ad i tempi di elaborazione, si è deciso di concentrare il lavoro di ricostruzione del modello 3D unicamente sulla prova 2, la quale costituisce la prova meglio riuscita e più completa.

Nella ricostruzione, si è deciso di scartare i dati del laser scanner relativi a punti distanti oltre 5m dal dispositivo, in quanto considerati troppo poco affidabili. La correttezza delle nuvole di punti ottenute è stata valutata confrontandole con quelle ottenute tramite acquisizione statica dell'impalcato, cioè posizionando il laser scanner a terra, sotto il ponte, ed effettuando una scansione sferica. Ciò è stato possibile in quanto l'altezza dell'impalcato in questione era limitata, ed il terreno sottostante era facilmente accessibile.

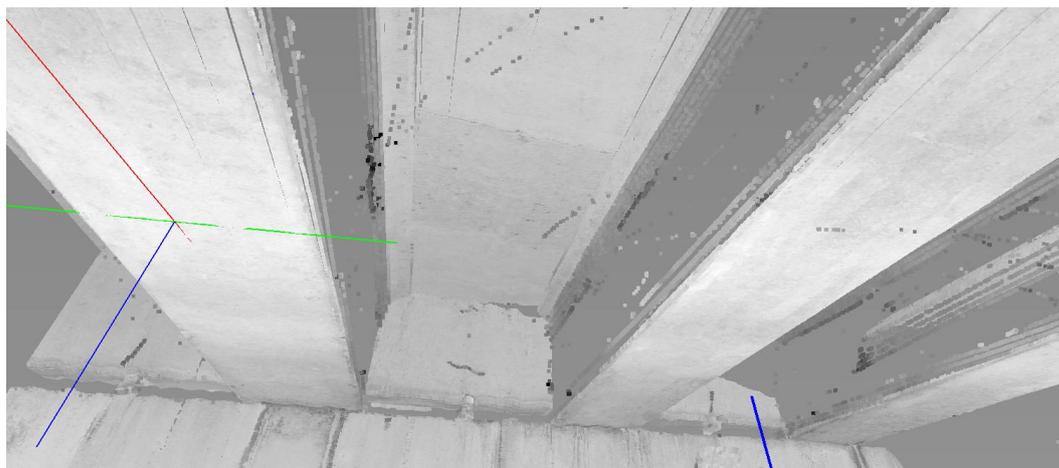


(a) Acquisizione dinamica.



(b) Acquisizione statica.

**Figura 6.25:** Il modello 3D dell'impalcato, come appare nel software SCENE di elaborazione di dati per laser scanner.



(a) Acquisizione dinamica.



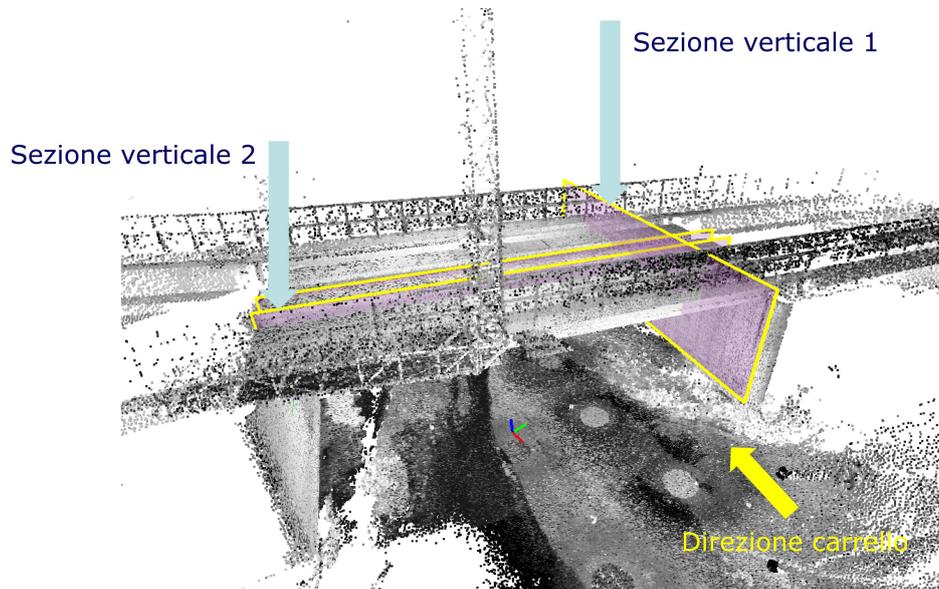
(b) Acquisizione statica.

**Figura 6.26:** Particolare del modello 3D dell'impalcato. Si può notare come le aree in grigio uniforme presenti sulle superfici verticali delle travi siano zone d'ombra, cioè zone per le quali non si hanno punti acquisiti.

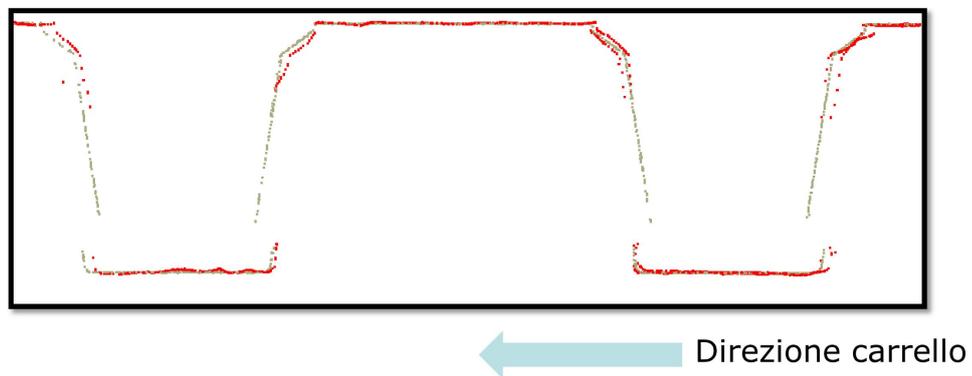
### 6.5.1 Confronto qualitativo con l'acquisizione statica

Nel seguito sono riportate alcune immagini ricavate da Gexcel, finalizzate a fornire un'idea globale delle differenze tra modello dinamico e statico. Esse in particolare sono organizzate nei seguenti gruppi:

- sezioni: immagini ottenute sezionando la nuvola di punti tramite opportuni piani di sezione. Da fig.6.27 a fig.6.30;
- mappe di planarità: immagini ottenute valutando, su delle superfici, l'errore in centimetri tra l'acquisizione statica e quella dinamica. Fig.6.31 e fig.6.32;
- risoluzione delle scansioni: immagini rappresentanti dei particolari della nuvola di punti. Fig.6.33 e fig.6.34.



**Figura 6.27:** Scansione dell'impalcato, con evidenziati i piani utilizzati per le sezioni.



**Figura 6.28:** Sezione verticale 1: in grigio è indicata la nuvola di punti individuata tramite acquisizione statica, in rosso quella tramite acquisizione dinamica.



**Figura 6.29:** Sezione verticale 2: in grigio è indicata la nuvola di punti individuata tramite acquisizione statica, in rosso quella tramite acquisizione dinamica. In particolare, il tratto in figura è uno zoom che riporta la sovrapposizione di due passaggi del carrello distinti.

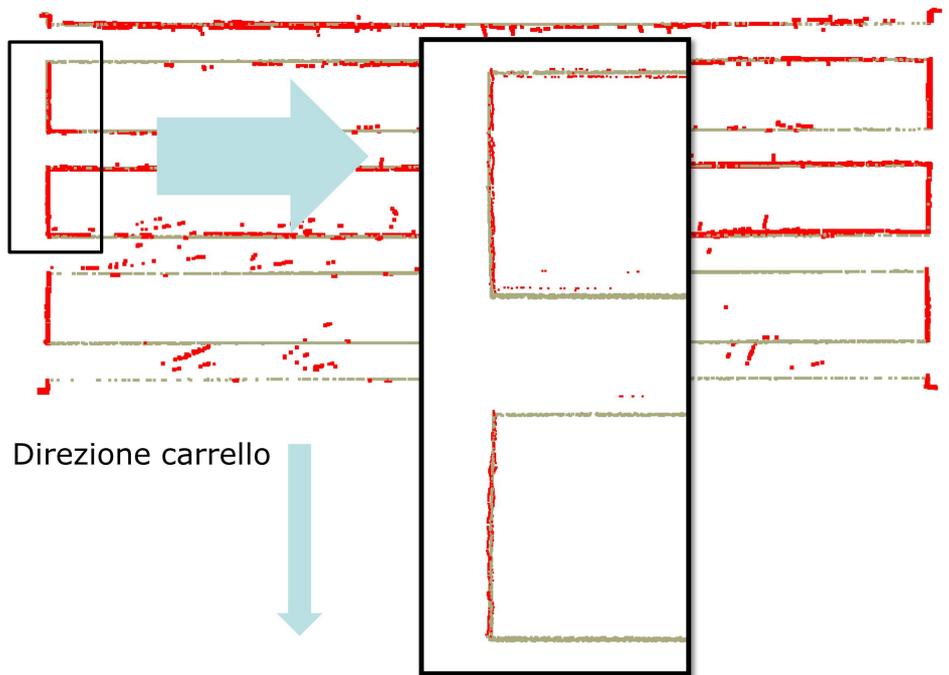


Figura 6.30: Sezione orizzontale della nuvola di punti.

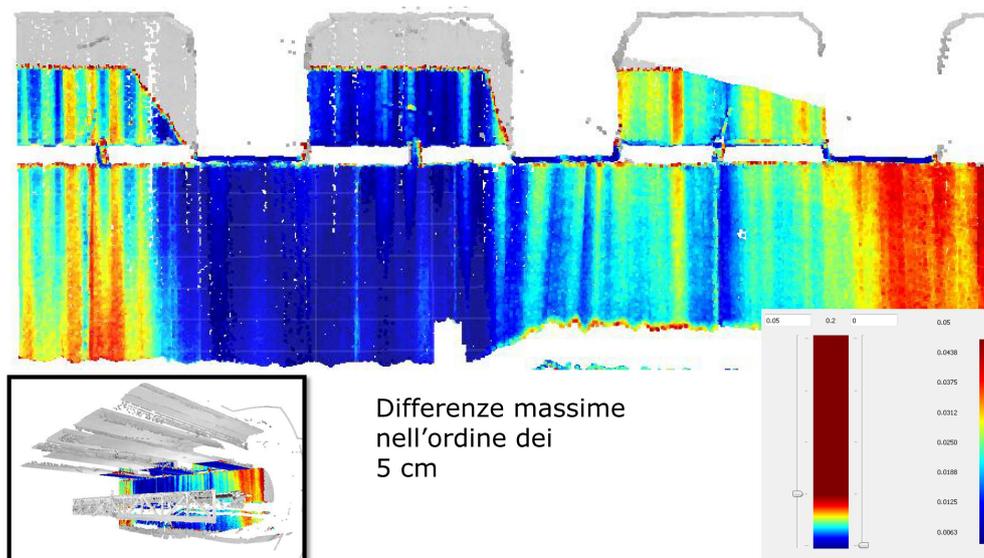


Figura 6.31: Mappa di planarità in corrispondenza del pilastro verticale.

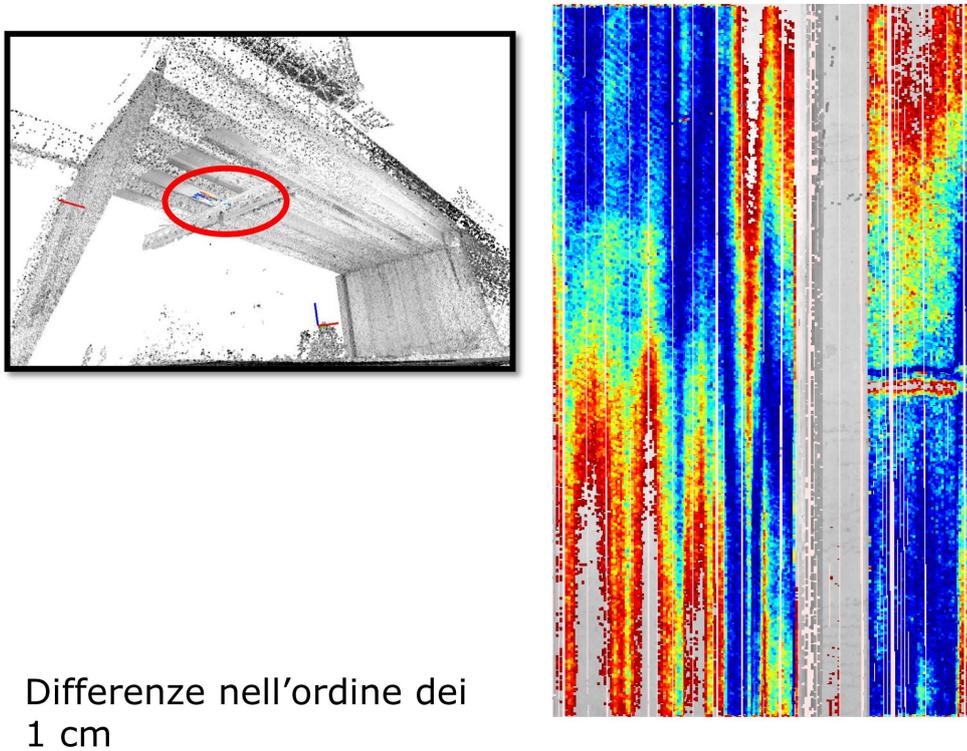


Figura 6.32: Mappa di planarità della superfici dell'impalcato.

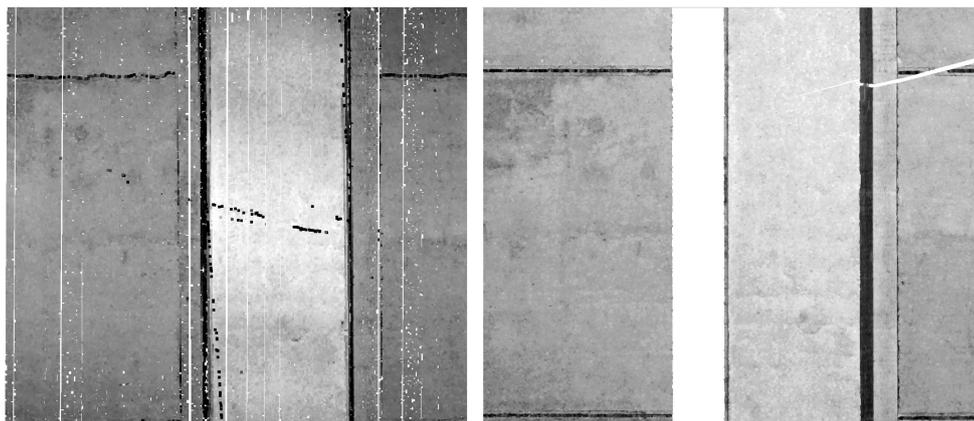
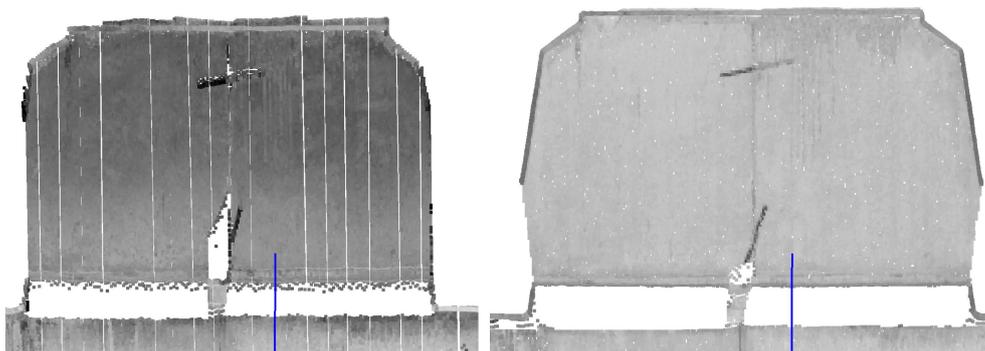


Figura 6.33: Particolare della superficie dell'impalcato; a sinistra la ricostruzione dinamica, a destra quella statica. Si evidenzia che le zone bianche sono zone d'ombra, prive di punti acquisiti.



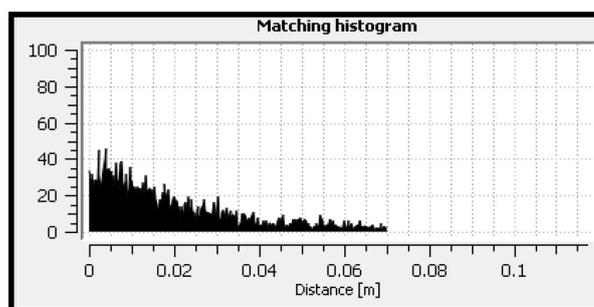
**Figura 6.34:** Particolare della superficie laterale del pilastro; a sinistra la ricostruzione dinamica, a destra quella statica. Si nota come le righe bianche nell’acquisizione dinamica siano dovute a mancanza di punti acquisiti, probabilmente legata ad una eccessiva velocità del carrello, o al beccheggio dello stesso.

### 6.5.2 Stima dell’accuratezza

L’accuratezza del modello 3D è stata valutata confrontandolo con il modello ottenuto tramite acquisizione statica; sono state effettuate diverse stime, utilizzando i punti del modello intero, oppure i punti su singole sezioni.

#### Stima dell’accuratezza sull’intera superficie

In questo caso la stima ci è stata fornita direttamente da Gexcel, utilizzando la seguente procedura:



**Figura 6.35:** Distribuzione dell’errore sull’impalcato, dato fornito da Gexcel S.r.l. .

- sovrapposizione dei modelli statico e dinamico, tramite l’algoritmo “Iterative Closest Point”;
- interpolazione lineare della superficie del modello statico, tramite mesh triangolata;
- calcolo dello scostamento di ciascun punto del modello dinamico dalla superficie interpolata del modello statico, lungo la direzione perpendicolare alla suddetta superficie;

- calcolo del valore RMS (Root Mean Square) degli scostamenti individuati.

La distribuzione di tale errore sull'intero modello è riportata in fig.6.35, mentre il valore RMS dello scostamento dei punti è pari a 0.023 m.

### Stima dell'accuratezza su singole sezioni

Utilizzando le singole sezioni, la procedura utilizzata è lievemente diversa:

- suddivisione dei modelli 3D allineati in sezioni da 1 cm di spessore;
- determinazione delle coordinate dei punti della sezione;
- individuazione, per ciascun punto del modello dinamico della sezione, del punto del modello statico più vicino, e calcolo dello scostamento;
- calcolo del valore RMS degli scostamenti individuati.

Si evidenzia che la stima dell'errore come distanza minima è probabilmente una sotto-stima; si ritiene tuttavia che il risultato ottenibile possa essere comunque significativo.

In questo caso sono state utilizzate due sezioni dell'impalcato, una in lunghezza, ed una in larghezza, rappresentate in fig. 6.27. Per la sezione in larghezza, l'accuratezza è stata valutata sia sul singolo passaggio del carrello, sia sulla sovrapposizione delle nuvole legate a passaggi contigui.

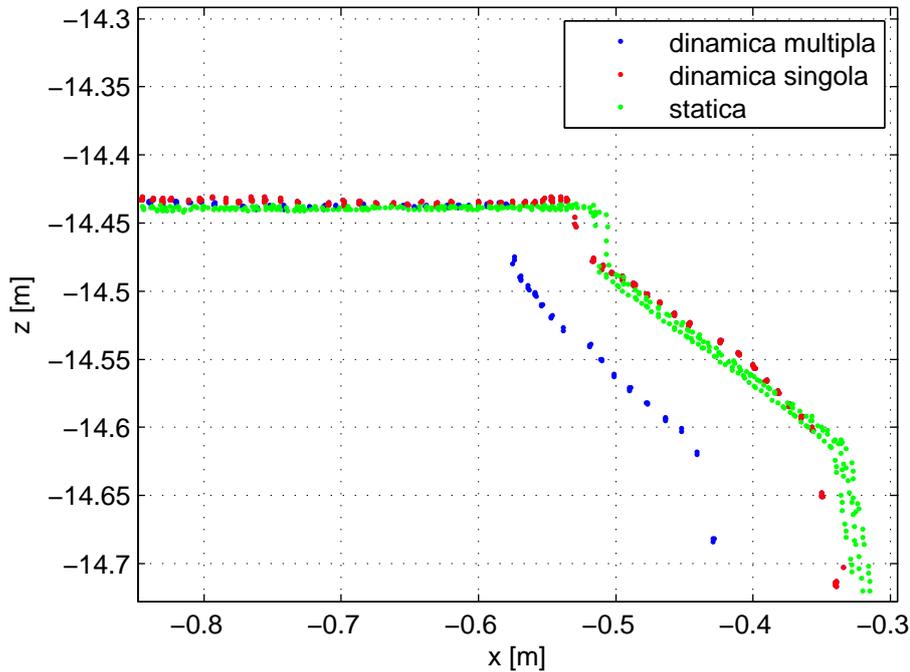
Nel primo caso si ottiene un'accuratezza migliore, pari a 0.0087 m; nel secondo caso, 0.0191 m. Questa differenza sostanziale può essere spiegata osservando fig.6.36, la quale riporta un particolare della sezione. Dall'immagine si può notare che la planarità dei punti acquisiti con scansione dinamica è effettivamente buona, vicina ai punti determinati con scansione statica. Tuttavia, le scansioni eseguite in due passaggi contigui del carrello, visualizzate in rosso ed in blu, non si sovrappongono, ma risultano traslate lungo la direzione della passerella.

Relativamente alla sezione in lunghezza del ponte, riporto in fig. 6.37 direttamente gli scostamenti.

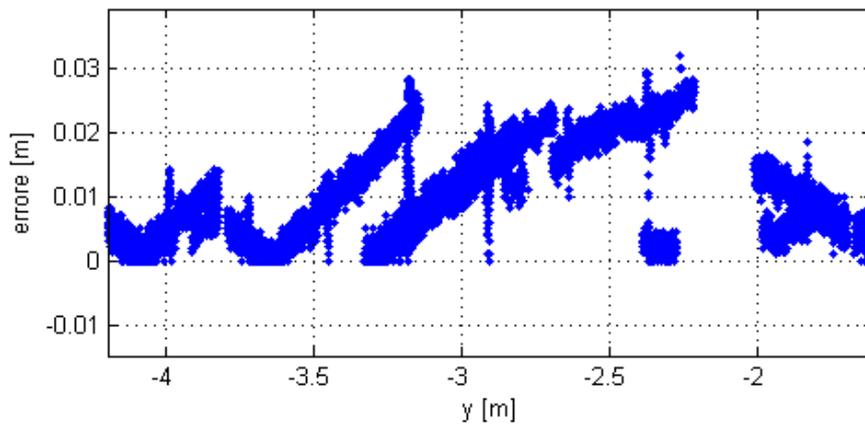
In questo caso l'incertezza ricavata è pari a 0.0224 m; si può tuttavia notare dalla figura che la planarità delle superfici dinamiche è in verità buona, in quanto gli errori hanno un andamento lineare spezzato, e non oscillante.

## 6.6 Discussione dei risultati ottenuti

Dalle immagini fornite, innanzitutto è evidente come la qualità delle acquisizioni statiche sia migliore di quella delle acquisizioni dinamiche, sia dal punto di vista della precisione delle acquisizioni, sia relativamente alla densità di punti. Questo risultato d'altronde era un risultato ampiamente prevedibile; si ricorda infatti che una delle finalità del sistema di scansione messo a punto è proprio quella di eseguire scansioni nel caso in cui scansioni statiche non fossero possibili.



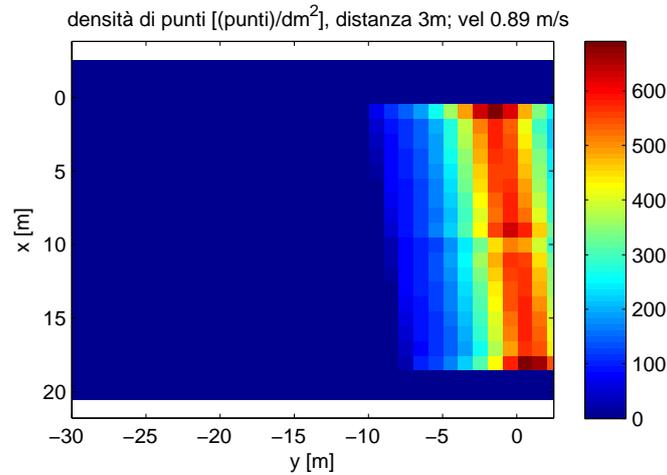
**Figura 6.36:** Particolare della sezione in larghezza dell'impalcato; in figura sono riportati il modello statico, il modello dinamico con singolo passaggio del carrello, ed il modello dinamico con più passaggi del carrello.



**Figura 6.37:** Scostamenti tra modello dinamico e statico, nella sezione longitudinale dell'impalcato. Sull'ascissa è riportata la coordinata  $y$  rispetto al sistema di riferimento assoluto, la quale appunto coincide con la direzione di avanzamento del camion.

### 6.6.1 Densità di punti e risoluzione

La **densità di punti** ottenuta è in linea con le simulazioni svolte; utilizzando infatti il software illustrato nel Capitolo 4, impostando un solo passaggio del carrello e condizioni operative simili a quelle delle prove sperimentali si ottiene il grafico di fig. 6.38, dal quale si osservano densità dell'ordine di  $50000 \frac{Pti}{m^2}$ .



**Figura 6.38:** Simulazione della densità di punti ottenibile con una distanza tra impalcato e scanner di 3m, singolo passaggio del carrello, e risoluzione dell'immagine pari a  $1m^2$ .

La risoluzione delle immagini ottenute è piuttosto buona; si può notare infatti da fig.6.33 e 6.34 che le macchie di umidità, seppur meno evidenti rispetto alle acquisizioni statiche, sono visibili anche nelle acquisizioni dinamiche. Per quanto riguarda le linee bianche presenti sulle superfici, esse sono dovute ad assenza di punti acquisiti; questo effetto può essere dovuto sia ad una velocità troppo elevata del carrello, sia al beccheggio dello stesso. Tali zone prive di punti, tuttavia, sono di entità limitata, e non pregiudicano la qualità della prova. Purtroppo, a causa della configurazione del laser scanner con asse di rotazione parallelo al moto del carrello, le superfici verticali delle travi hanno una densità di punti estremamente limitata (ciò è visibile dalla panoramica di fig. 6.26, che dalla sezione di fig.6.28).

## 6.6.2 Accuratezza della ricostruzione

Anche relativamente all'**accuratezza della ricostruzione** dell'impalcato i risultati ottenuti sono in linea con le simulazioni effettuate. E' comunque evidente la presenza di alcuni punti vistosamente fuori posto, ad esempio nella panoramica di fig.6.25, o nel particolare di fig.6.33, in cui compare una riga nera al centro dell'immagine. Tali effetti sono attribuibili ad errori occasionali della catena di misura, e probabilmente alle coordinate degli spot del piano superiore, che come abbiamo visto hanno avuto dei problemi di acquisizione.

Errori puntuali a parte, l'analisi dei risultati ha messo in luce due problematiche principali del modello 3D ottenuto nelle acquisizioni dinamiche:

- problemi di sovrapposizione delle nuvole di punti per passaggi contigui del carrello;
- problemi di planarità delle superfici sul singolo passaggio.

Nei prossimi paragrafi verranno indicate alcune possibili cause di tali problematiche.

### Problemi di sovrapposizione delle nuvole di punti

Come evidenziato in fase di valutazione della catena di misura (paragrafo 3.1), il problema di sovrapposizione delle nuvole di punti è adducibile essenzialmente ad offset sull'orientamento del carrello.

In particolare, con riferimento alle due sezioni precedentemente analizzate, la traslazione in direzione x di avanzamento del carrello di fig.6.36 può essere attribuita ad un offset di imbardata del carrello, mentre l'errore riportato in fig. 6.37 è riconducibile ad un offset nel rollio del carrello. In quest'ultimo caso, inoltre, si evidenzia che in verità l'offset inizialmente presente nel rollio del carrello (stimato in circa  $1.5^\circ$ ) è stato sensibilmente ridotto in maniera iterativa, cioè aggiungendo una rotazione costante arbitraria al rollio del carrello, ed osservando gli effetti sulla sezione.

Si ricorda che sono sufficienti errori di mezzo grado per provocare problematiche importanti di sovrapposizione in fase di ricostruzione (dell'ordine dei 2-3cm).

Purtroppo sono diverse le cause che possono portare a simili errori nell'orientamento del carrello. Nel seguito ne saranno presentate alcune.

**Disallineamento tra le telecamere del carrello :** la procedura via software di correzione del disallineamento tra le telecamere del carrello (paragrafo 5.5.5), purtroppo, si è rivelata meno robusta del previsto.

Le matrici di rototraslazione tra le suddette terne infatti dovevano essere individuate a partire da un'acquisizione statica con laser scanner 3D della geometria del carrello; il risultato di tale acquisizione è riportato in fig.6.39.

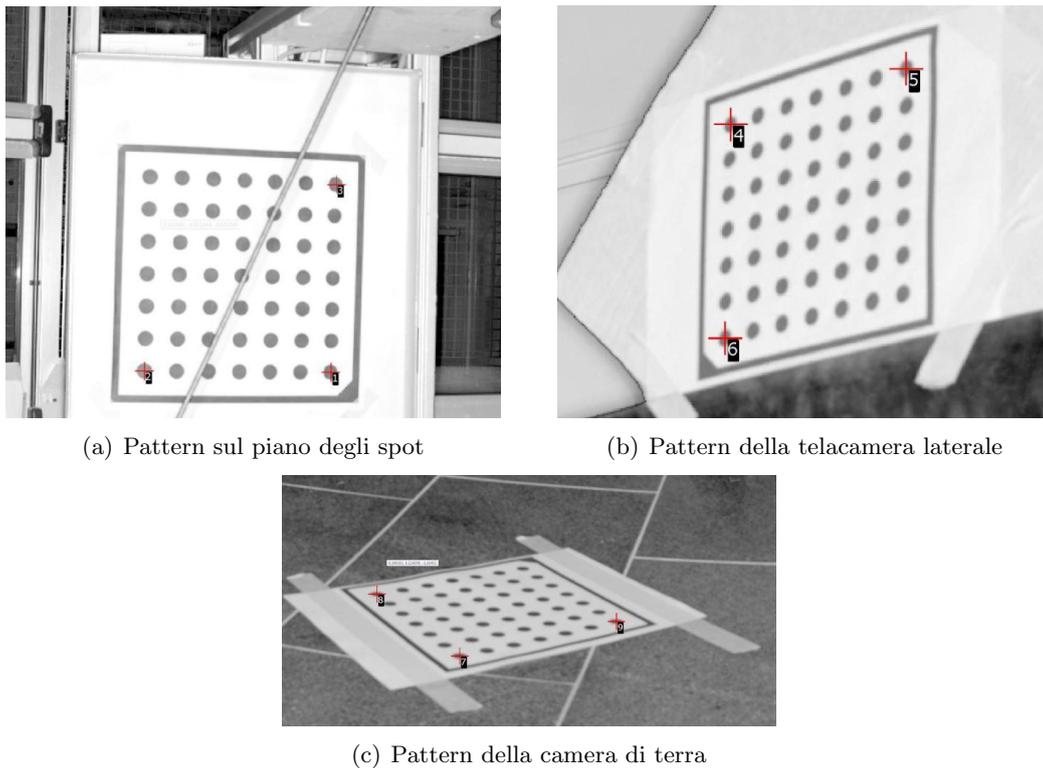
Si può notare purtroppo che alcuni pattern, in particolare il pattern di terra, sono posizionati obliquamente, e ciò riduce sensibilmente l'accuratezza dell'acquisizione.

Dunque, se si determinano gli angoli tra i vettori  $\mathbf{V}_{12}$ ,  $\mathbf{V}_{13}$ ,  $\mathbf{V}_{45}$ ,  $\mathbf{V}_{46}$ ,  $\mathbf{V}_{78}$ ,  $\mathbf{V}_{79}$  utilizzando il prodotto scalare (dove i punti 1,2,3,4,5,6,7,8,9 sono riportati in figura), i valori che si ottengono risultano:

- $90^\circ$  per il pattern sul piano;
- $90.6^\circ$  per il pattern laterale;
- $93.3^\circ$  per il pattern a terra.

Tali vettori dovrebbero rappresentare gli assi delle terne delle telecamere, pertanto tali angoli dovrebbero essere di  $90^\circ$  ciascuno.

Questa procedura di calibrazione, in conclusione, non è stata in grado di garantire una accuratezza inferiore al decimo di grado come necessario. Si prevede comunque di poter migliorare il risultato della calibrazione posizionando il dispositivo scanner in maniera più opportuna durante la calibrazione.



(a) Pattern sul piano degli spot

(b) Pattern della telecamera laterale

(c) Pattern della camera di terra

**Figura 6.39:** Scansioni effettuate dal Faro in modalità sferica, con indicati i punti utilizzati per la determinazione delle matrici di rototraslazione delle terne.

**Accoppiamento tra inclinometri e piastre:** nel modello matematico si è ipotizzato che gli inclinometri, essendo montati sulla stessa piastra dei laser e dei distanziometri, restituissero le inclinazioni dei fasci laser nello spazio.

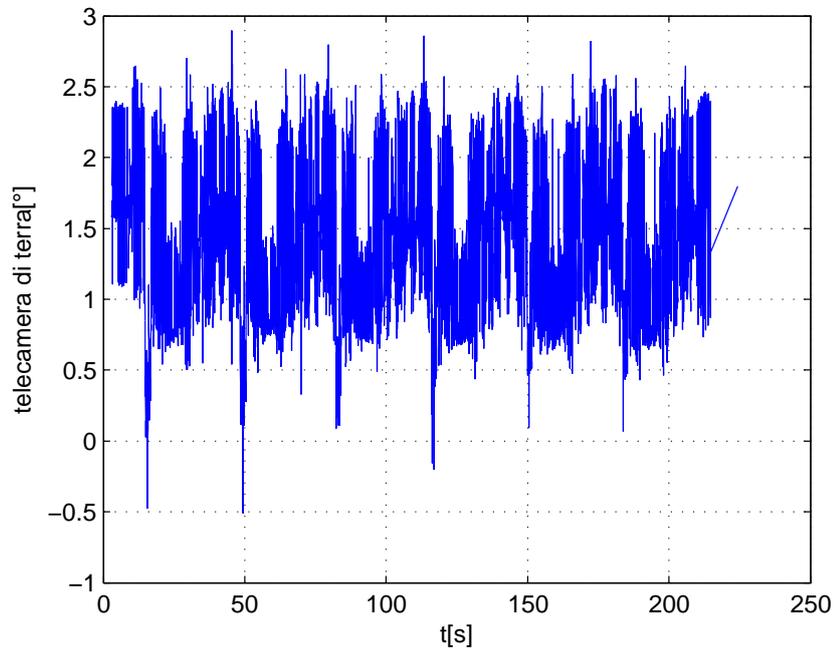
In verità questa ipotesi non è stata verificata da delle procedure di calibrazione mirate in laboratorio.

**Affidabilità dei dati rilevati dalle telecamere:** Purtroppo i dati di imbardata del carrello forniti dalla telecamera di terra si sono rivelati poco affidabili.

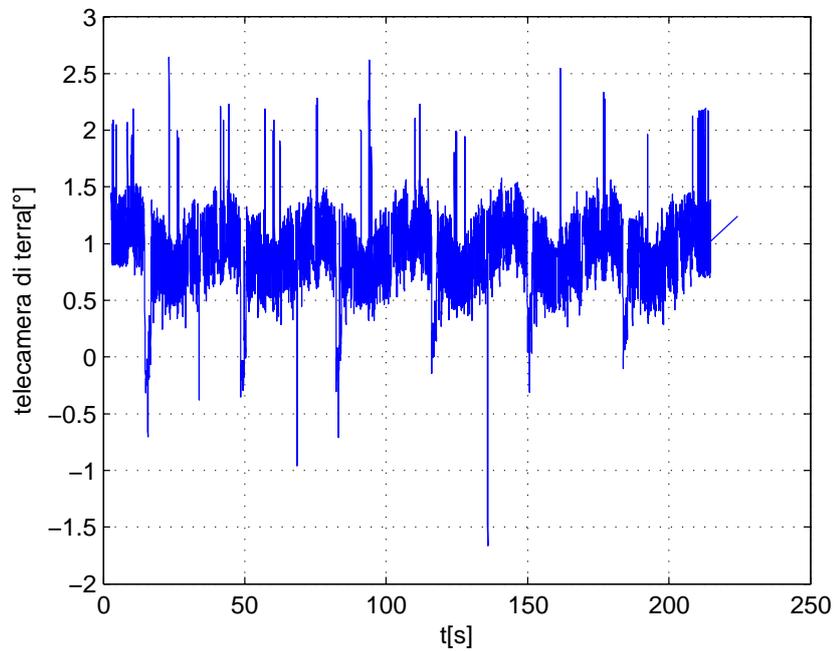
In fig.6.40 sono riportati i dati grezzi ricavati dalla telecamera per diversi settaggi dell'algoritmo di "edge detection".

Si nota che il rumore di misura è molto elevato, anche nella fase in cui il carrello è fermo. Effettuando un tuning dei parametri dell'algoritmo è possibile ridurre tale rumore; tuttavia in questo modo anche il valore medio della misura viene modificato.

Queste problematiche sono probabilmente dovute alla forma del decametro, ed ai riflessi creati dall'esposizione alla luce infrarossa di illuminazione della telecamera; potrebbero dunque essere risolte utilizzando un altro oggetto come riferimento rettilineo.



(a) Primo settaggio.



(b) Secondo settaggio.

**Figura 6.40:** Angolo di imbardata del carrello fornito dalla telecamera di terra utilizzando due diversi settaggi dell'algoritmo "edge detection".

### Problemi di planarità delle superfici

Abbiamo visto in fase di valutazione del modello che, sul singolo passaggio del carrello, errori di planarità della nuvola di punti sono dovuti ad errori non costanti nella traiettoria del laser scanner ed eventualmente nell'orientamento. Tra le cause di questi errori è sicuramente possibile citare l'approssimazione di piccole rotazioni e l'accuratezza degli strumenti di misura che, come abbiamo visto, possono portare ad errori massimi dell'ordine dei 3-4 cm.

Generalmente la planarità delle superfici ottenute, come si può osservare dalle mappe di planarità e dalle sezioni, è buona ed in linea con le simulazioni effettuate. Essa peggiora nelle zone in cui il moto del camion è più irregolare, e quindi in fase di partenza ed arresto; con riferimento alla mappa di planarità di fig. 6.32, ad esempio, che rappresenta il modello del pilastro verticale, si può notare che gli errori sono concentrati nell'area di destra, la quale coincide con il punto di partenza del camion. Al contrario, la zona dello scalino, nella parte centrale dell'intradosso, non sembra mostrare oscillazioni rilevanti, a dimostrazione della buona ricostruzione del moto del carrello.

## 6.7 Riepilogo dei risultati

Le prove sperimentali hanno dato risultati concordi con le simulazioni effettuate, sia per quanto riguarda la qualità del modello 3D ottenuto, sia per quanto riguarda la risoluzione.

Le problematiche in fase di ricostruzione della nuvola di punti possono essere riassunte in problematiche di sovrapposibilità dei passaggi contigui del carrello, e di planarità sul singolo passaggio.

Le prime sono legate ad offset angolari dell'ordine di  $1^\circ$ , dovuti a procedure di calibrazione non impeccabili ed a problematiche nell'algoritmo di "edge detection" della telecamera di terra.

Le seconde, dell'ordine del centimetro nelle zone in cui il moto del camion è regolare, sono in linea con gli errori attesi per l'ipotesi di piccole rotazioni e le accuratezze degli strumenti. Altre cause di errore possono essere attribuite a calibrazioni e setup migliorabili.



## CAPITOLO 7

### Soluzioni alternative

In questo capitolo viene descritte alcune possibili evoluzioni del sistema i scansione. Per prima cosa, viene introdotta una soluzione alternativa sempre basata su tecnologia laser scanner, ma che non prevede di movimentare un dispositivo sulla passerella tramite il carrello, ma di utilizzare più dispositivi stazionari in diverse posizioni della passerella stessa. Per tale soluzione vengono indicati vantaggi e svantaggi rispetto alla soluzione precedentemente analizzata, e vengono riportati i risultati di alcune simulazioni numeriche, volte alla determinazione della densità di punti ottenibile, e dell'accuratezza attesa.

In seguito, si presenta una nuova tecnologia che, in un prossimo futuro, potrebbe essere utilizzata al posto del laser scanner, o come parte della catena di misura.

#### 7.1 Sistema di scansione con dispositivi scanner stazionari

Durante il percorso di tesi sono state valutate soluzioni alternative rispetto all'utilizzo di un laser scanner movimentato tramite un mezzo di locomozione. In particolare, la soluzione più promettente prevede di eliminare il carrello, e di utilizzare più laser scanner disposti opportunamente sulla passerella, stazionari.

##### 7.1.1 Vantaggi e svantaggi del nuovo sistema di scansione

L'eliminazione del carrello garantisce una serie di vantaggi:

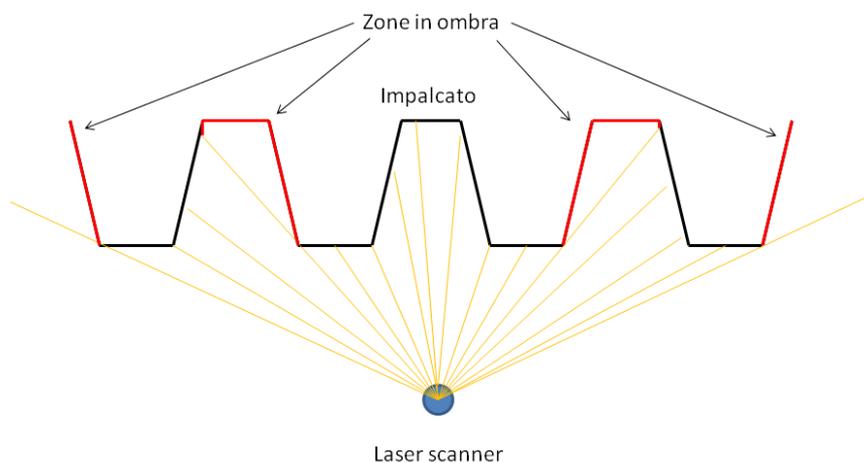
- il carrello è l'elemento del sistema di acquisizione dotato del moto più irregolare e dunque più difficile da ricostruire, il che implica una elevata probabilità di errore nella determinazione delle coordinate;
- il carrello si muove sulla passerella in tutti e sei i gradi di libertà, e per questo motivo sono necessari diversi strumenti di misura per determinarne la posizione (distanziometro, telecamera degli spot, telecamera di terra, telecamera di lato). Tali strumenti, oltre ad avere un costo, complicano l'architettura della catena di misura, e rischiano di invalidare le acquisizioni in caso dei dati non vengano acquisiti correttamente.
- il carrello, non potendo essere alimentato tramite la rete disponibile dal camion, deve essere dotato di batterie, le quali hanno un'autonomia limitata ed un peso elevato;

- il moto del carrello sul by-bridge implica un'oscillazione di rollio del camion;
- a causa della presenza dello scalino, l'ipotesi di piccole rotazioni introduce in verità degli errori non completamente trascurabili, in quanto in tale fase il beccheggio del carrello raggiunge angoli di circa  $-5^\circ$ .

L'ipotesi di eliminare il carrello ed utilizzare più laser stazionari in fase preliminare era stata scartata essenzialmente per un motivo: il costo; il dispositivo laser scanner, infatti, è lo strumento di misura più costoso della catena.

L'utilizzo di più dispositivi tuttavia, seppur qualche anno fa fosse impensabile, diventa un'ipotesi sempre più valida in un futuro prossimo grazie al continuo abbassarsi dei prezzi di tale tecnologia.

Si fa notare che un difetto dell'utilizzo di più laser scanner stazionari è la presenza di zone d'ombra, le quali possono essere evitate solamente nel caso in cui il numero di laser scanner sia pari al numero di travi più uno che compongono l'impalcato.



**Figura 7.1:** Scanner fisso e zone d'ombra.

### 7.1.2 Modifiche alla catena di misura

Non bisogna dimenticare che la ricostruzione della traiettoria del laser scanner durante l'acquisizione resta un obbligo imprescindibile; l'utilizzo di laser scanner stazionari, tuttavia, facilita tale compito.

La catena di misura attualmente progettata può essere almeno parzialmente riutilizzata; in particolare, può essere lasciata invariata fino al piano degli spot superiore. La parte successiva della catena va invece riprogettata, così come i supporti degli strumenti.

Una possibilità è posizionare i laser scanner su dei supporti fissati direttamente sui corrimano della passerella. Se si considera la passerella rigida rispetto alla parte di colonna al di sotto della ghiera, come è stato effettuato nella trattazione precedente, non è necessario utilizzare altri strumenti di misura; è infatti sufficiente determinare la posizione dei laser scanner sulla passerella una sola volta, in quanto tale posizione non varia durante la misura.

Al contrario, volendo essere cautelativi, è possibile posizionare un piano degli spot in fondo alla passerella, dotato di telecamera con “blob detection”, sul quale proiettare due puntatori laser, i quali potrebbero sfruttare il supporto già progettato per il distanziometro inferiore. In tal caso, è possibile determinare le rotazioni della passerella in maniera analoga a quanto visto in precedenza per il modello con colonna rigida.

### 7.1.3 Calibrazione del sistema

Sebbene la posizione dei laser scanner rispetto alla passerella resti invariata durante l’acquisizione, in linea teorica è comunque necessario individuarne posizione ed orientamento prima di ogni acquisizione; i supporti dei laser scanner, infatti, devono essere rimossi ogni volta che la passerella viene ripiegata.

Per quanto riguarda la posizione, essendo i corrimano della passerella sufficientemente regolari, essa può essere determinata facilmente anche utilizzando un metro; abbiamo visto infatti in fase di valutazione della catena di misura che offset nelle lunghezze hanno effetti limitati sul modello 3D dell’impalcato.

La determinazione dell’orientamento è meno banale. L’orientamento relativo tra i laser scanner potrebbe essere individuato tramite delle scansioni sferiche, mediante la sovrapposizione di almeno tre punti di ciascuna scansione; tale operazione tuttavia è di difficile attuazione pratica, in quanto esse dovrebbero essere eseguite con la passerella spiegata sotto all’impalcato, con il rischio dunque che le oscillazioni della stessa compromettano la riuscita della calibrazione.

Per queste ragioni, una soluzione alternativa potrebbe essere quella di cercare di allineare le scansioni direttamente nel software SCENE, rinunciando a determinare l’orientamento preciso dei vari laser scanner in maniera diretta. In questo caso infatti tale operazione dovrebbe essere possibile, in quanto gli errori di allineamento dei vari laser scanner restano costanti durante l’acquisizione.

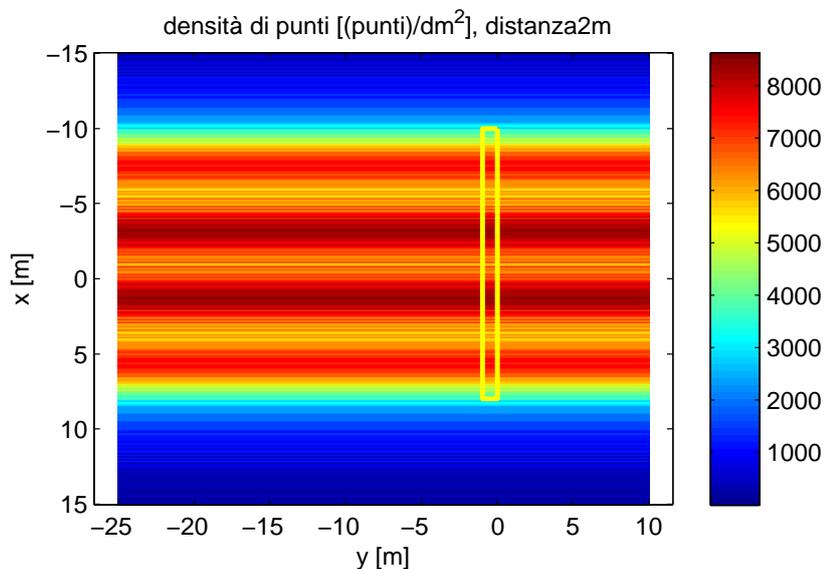
### 7.1.4 Simulazioni relative alla densità di punti ottenibile

Tramite Matlab sono state eseguite delle simulazioni al fine di determinare la densità di punti che è lecito attendersi nelle prove sperimentali.

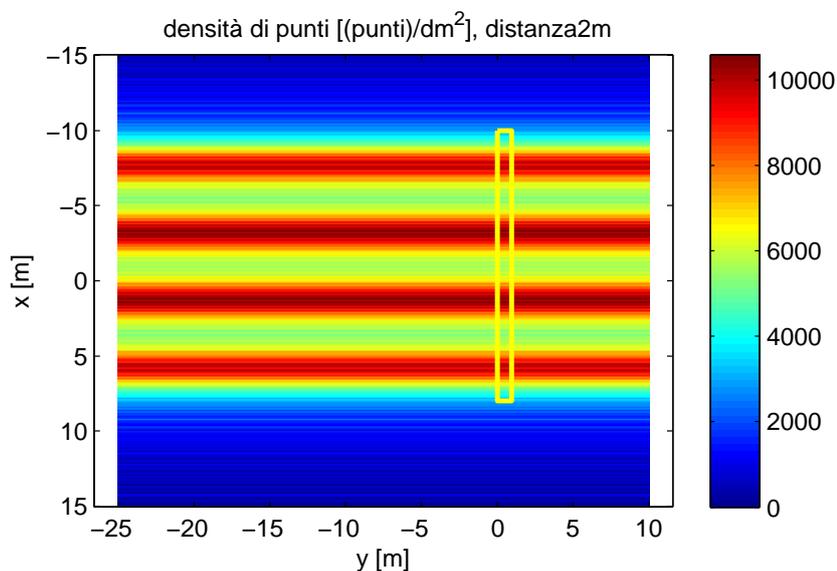
In particolare, in fig.7.2 e fig.7.3, sono riportati i risultati attesi utilizzando i seguenti parametri:

- velocità del camion pari a  $0.1275 \frac{m}{s}$ ;
- distanza tra i dispositivi scanner ed impalcato pari a  $2m$ ;
- parametri del laser scanner: Qualità pari ad 1x e Risoluzione pari a 1/4;
- orientamento del laser scanner a  $90^\circ$  e  $45^\circ$  rispetto all’asse della passerella; in questo caso, la disposizione a  $45^\circ$  è necessaria per poter scansionare le superfici verticali che costituiscono i pilastri.

Nelle simulazioni si è immaginato di avere una passerella lunga 18m, di dividerla in quattro parti uguali della lunghezza di 4.5m, e di posizionare al centro di ciascun segmento un laser scanner.

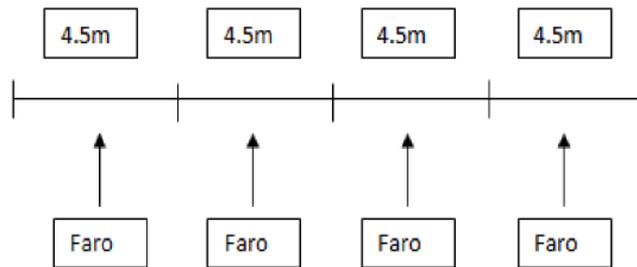


**Figura 7.2:** Densità di punti attesa per laser scanner posizionati a 90°



**Figura 7.3:** Densità di punti attesa per laser scanner posizionati a 45°

Dalle simulazioni si nota che, in particolare per prove a 45°, la densità di punti tende a concentrarsi in corrispondenza dei laser scanner, generando una forte variazione della densità di punti attesa. Si può notare tuttavia che questa è comunque superiore rispetto alle simulazioni effettuate utilizzando il carrello. Ciò è naturale, in quanto ora



**Figura 7.4:** Disposizione dei laser scanner lungo la passerella nelle simulazioni effettuate.

si utilizzano quattro dispositivi scanner invece che uno.

### 7.1.5 Accuratezza attesa

Sembra lecito aspettarsi una accuratezza nella ricostruzione dell'impalcato maggiore rispetto all'utilizzo del carrello, per i seguenti motivi:

- minori oscillazioni del bybridge, dovute al fatto che non c'è niente in moto sulla passerella;
- semplificazione della catena di misura, la quale comporta inevitabilmente meno errori di misura (oltre che maggiore affidabilità);
- calibrazione più semplice e veloce della catena di misura, e dunque meno probabilità di errori;
- impatto limitato di eventuali errori di offset angolari, in quanto l'impalcato è scansionato da un'unica "lama laser", e non da più passaggi da sovrapporre.

L'effettiva efficacia del sistema resta comunque da verificare con delle prove sperimentali.

## 7.2 Il Kinect e la SLAM

Il Kinect è un dispositivo innovativo, da poco sul mercato, di basso costo, che potrebbe verosimilmente sostituire il laser scanner nella scansione dinamica dell'impalcato, o comunque offrire un contributo rilevante nella determinazione del moto del carrello.

Esso può essere definito come una telecamera in grado di percepire la profondità di ciò che sta riprendendo; nato con scopi videoludici, ha in realtà grandi potenzialità in vari settori, ed ha riscosso un grande successo in ambito di ricerca universitaria [36] [37]. La seconda generazione di questo dispositivo, presentata nel 2013, è composta di una telecamera a colori, di risoluzione 1920x1080 pixel e di frame rate 30 Hz, una telecamera infrarossa di profondità, basata su tecnologia a tempo di volo, di risoluzione 512x424 pixel e di frame rate 30 Hz; ciò significa che, a differenza dei dispositivi laser scanner i quali acquisiscono un solo punto alla volta, essa è in grado di ricostruire una nuvola di punti densi di forma matriciale in una singola acquisizione.

Le reali potenzialità del dispositivo in verità non sono ancora note con certezza, in quanto la versione utilizzabile in ambiente Windows è uscita solamente nel luglio 2014; le prime ricerche comunque hanno evidenziato un campo di misura che va da 0.5 a 4.5 m ed un'accuratezza per il pixel centrale di 1.5 mm a una distanza di 1 m, e di 5 mm per una distanza di 4.5 m.



**Figura 7.5:** La seconda generazione del dispositivo Kinect.

Alcune delle attuali ricerche che vedono il Kinect come protagonista sono correlate a problemi di SLAM [38], il quale è un acronimo che sta per Simultaneous Localization And Mapping; con esso si intende la ricerca di una soluzione al problema computazionale di ricostruzione della mappa di un ambiente sconosciuto, e della contemporanea individuazione della propria posizione all'interno di essa.

Queste teorie, se applicate al nostro caso, potrebbero permettere di ricostruire la superficie dell'impalcato facendo a meno di tutta o di parte della catena di misura.

Si potrebbero percorrere diverse strade; una di queste è costituita dall'utilizzare numerosi dispositivi Kinect indirizzati verso l'impalcato, a sostituire il laser scanner. In questa maniera, si potrebbe provare ad eliminare completamente la catena di misura, e cercare di combinare direttamente le immagini 3D acquisite degli strumenti; sebbene infatti tale tentativo sia generalmente fallimentare per fotogrammetria, a causa dell'omogeneità cromatica dell'impalcato, in questo caso le informazioni di profondità potrebbero fornire una texture in più, utile all'operazione di sintesi.

Un'altra strada è legata alla ricostruzione diretta del moto del carrello sulla passerella; ciò potrebbe essere ottenuto posizionando uno o più dispositivi Kinect a bordo del carrello, riprendendo la passerella stessa durante il moto, e sfruttarne la geometria per determinare la posizione del carrello. Alternativamente, lo stesso obiettivo potrebbe essere raggiunto installando i Kinect sul corrimano, e monitorando la passerella e dunque il moto del carrello.

## CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha permesso di realizzare e testare un sistema di ispezione di impalcati semi-automatico basato sulla tecnologia laser scanner. Il sistema in questione permette di eseguire scansioni di impalcati di grandi dimensioni e difficilmente accessibili da altri sistemi automatizzati presenti in letteratura.

Uno dei vantaggi del sistema proposto è quello di avere costi di implementazione relativamente bassi, in quanto permette di riutilizzare, con qualche piccola modifica legata al fissaggio degli strumenti, le piattaforme by-bridge attualmente utilizzate per le ispezioni manuali.

Il modello 3D dell'impalcato che è stato ottenuto tramite le prove sperimentali è caratterizzato da un'accuratezza sulla scansione relativa ad un singolo passaggio del carrello dell'ordine del centimetro, con una risoluzione sufficiente per visualizzare distacchi del copriferro o macchie di umidità, ma non sufficiente per individuare crepe molto sottili.

Dal modello 3D, purtroppo, è altresì evidente come scansioni della stessa parte di impalcato dovute a passaggi diversi del carrello non si sovrappongano perfettamente, ma risultino traslate di alcuni centimetri; la causa di questo fenomeno sono offset nella determinazione dell'orientamento del carrello stesso, dovuti a difficoltà nella procedura di calibrazione del sistema di misura.

In generale, si può affermare che i risultati ottenuti sono in linea con le simulazioni effettuate, sia per quanto riguarda l'accuratezza attesa, sia relativamente alla densità di punti ottenuta nelle scansioni.

Affinché il sistema possa essere effettivamente utilizzato, sono necessari miglioramenti, da effettuare in fase di industrializzazione, sia dal punto di vista software che hardware. L'architettura in Labview del sistema di acquisizione, infatti, si è rivelata non sufficientemente stabile, ed ha portato alla perdita di alcuni dati. Tali difficoltà di programmazione sono dovute alla complessità della catena di misura, formata da numerosi strumenti, posizionati ad elevate distanze tra loro.

Dal punto di vista hardware, la problematica principale è legata alla calibrazione della catena di misura, la quale è eseguita manualmente ed richiede tempi elevati; viste le dimensioni in gioco, infatti, sono sufficienti errori limitati, specialmente angolari, per generare incongruenze rilevanti nel modello 3D. A tal proposito, si ritiene necessaria la realizzazione di supporti di ancoraggio degli strumenti rettificati, più rigidi e più facilmente regolabili.

L'effettiva convenienza dell'industrializzazione del sistema proposto è tuttavia da valutare, a causa del rapido evolversi del panorama misuristico. In particolare, il continuo abbassarsi dei prezzi dei dispositivi laser scanner può rendere conveniente l'e-

eliminazione del carrello, e l'utilizzo di più dispositivi scanner fissati sulla passerella. Ciò in particolare potrebbe contribuire fortemente a semplificare la catena di misura, e dunque prevenire le problematiche di cui sopra.

Inoltre, è necessario valutare le potenzialità offerte da dispositivi innovativi quali il Kinect. Esso, infatti, è una telecamera di profondità che permette, a differenza del laser scanner, di acquisire simultaneamente delle matrici di punti; l'utilizzo di tale dispositivo, unitamente all'applicazione di tecniche di SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), potrebbe rendere superflua la catena di misura utilizzata per la determinazione della traiettoria dello scanner.

Si riserva a lavori futuri la verifica di queste metodologie.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] <http://www.sinecoing.it>
- [2] Giberti, H., Zanoni, A., Mauri, M., and Gammino, M., 2014. “Preliminary study on automated concrete bridge inspection”. ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2014(20189), pp. 1–10.
- [3] D’Antona Sr., G., Davoudi, M., Ferrero, R., and Giberti, H., 2012. “A model-based approach to the protection of the steering mechanism of high-power antennas placed in a nuclear fusion tokamak”. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 61(1), pp. 55–63.
- [4] Zanoni A., Marinetti G., Cheli F., Garozzo M. 2014. “Development of a computer vision tracking system for automated 3D reconstruction of concrete bridges”. ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, ESDA 2014
- [5] R. Akamatsu, T. Sugimoto, N. Utagawa, and K. Katakura, 2013. “Proposal of Non Contact Inspection Method for Concrete Structures Using High-Power Directional Sound Source and Scanning Laser Doppler Vibrometer”. Toin University of Yokohama, Yokohama 225-8503, Japan
- [6] Maiorana C., “Studio preliminare di un sistema automatico per l’ispezione di impalcati”. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica, anno accademico 1013-2014, Politecnico di Milano
- [7] Dipartimento di Meccanica-Politecnico di Milano. “Studio di fattibilità e progettazione del sistema di automazione di un robot per l’ispezione dei ponti”. Committente: Sineco S.p.a. , 2013.
- [8] <http://www.faro.com>
- [9] <http://www.sitecoinf.it>
- [10] Pingbo Tang, Burcu Akinci, 2012. “Automatic execution of workflows on laser-scanned data for extracting bridge surveying goals”. School of Sustainable Engineering and the Built Environment, Arizona State University
- [11] H. González-Jorge, I. Puente, B. Riveiro, J. Martínez-Sánchez, P. Arias, 2013. “Automatic segmentation of road overpasses and detection of mortar efflorescence using mobile LiDAR data”, Department of Natural Resources and Environmental Engineering, School of Mining Engineering, University of Vigo

- [12] M.J. Minehane, R. O'Donovan, K.D. Ruane, B. O'Keeffe, 2013. "Use of 3D Laser Scanning Technology for Bridge Inspection and Assessment", University College Cork, College Road, Cork, Ireland
- [13] Shen-En Chen (2012). "Laser Scanning Technology for Bridge Monitoring, Laser Scanner Technology", Dr. J.Apolinar Munoz Rodriguez (Ed.), ISBN: 978-953-51-0280-9, InTech
- [14] G. Legnani, "Robotica industriale". Ed Ambrosiana, Milano, 2003.
- [15] Yi-Chu Chen, Chi-En Yang, Shih-Chung Kang, 2013. "A lightweight bridge inspection system using a dual-cable suspension mechanism". Department of Civil Engineering, National Taiwan University, No. 1, Sec. 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan.
- [16] ; Cihan Meral, 2011. "Evaluation of Laser Scanning Technology for Bridge Inspection". A Thesis Submitted to the Faculty of Drexel University, Master of Science in Civil Engineering.
- [17] D. Bertolucci, "Principi di laser scanning 3D". Ed. Dario Flaccovio Editore.
- [18] L. Bornaz, "Principi di funzionamento e tecniche d'acquisizione". Politecnico di Torino.
- [19] G.Guidi, J.A.Beraldin, "Acquisizione 3D e modellazione poligonale". Edizioni Poli.Design
- [20] McCrea, A., Chamberlain, D., and Navon, R., 2002. "Automated inspection and restoration of steel bridges – a critical review of methods and enabling technologies". *Automation in Construction*, 11, pp. 351–373.
- [21] Tung, P.-C., Hwang, Y.-R., and Wu, M.-C., 2002. "The development of a mobile manipulator imaging system for bridge crack inspection". *Automation in Construction*, 11, pp. 717–729.
- [22] Metni, N., and Hamel, T., 2007. "A uav for bridge inspection: Visual servoing control law with orientation limits". *Automation in Construction*, 17, pp. 3–10.
- [23] Oh, J.-K., Jang, G., Oh, S., Lee, J. H., Yi, B.-J., Moon, Y. S., Lee, J. S., and Choi, Y., 2009. "Bridge inspection robot sistem with machine vision". *Automation in Construction*, 18, pp. 929–941.
- [24] Adhikari, R., Moselhi, O., and Bagchi, A., 2013. "Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection". *Automation in Construction*.
- [25] Zhu, Z., German, S., and Brilakis, I., 2011. "Visual retrieval of concrete crack properties for automated post-earthquake structural safety evaluation". *Automation in Construction*, 20(7), pp. 874 – 883.
- [26] Fathi, H., and Brilakis, I., 2011. "Automated sparse 3d point cloud generation of infrastructure using its distinctive visual features". *Advanced Engineering Informatics*, 25(4), pp. 760 – 770. Special Section: Advances and Challenges in Computing in Civil and Building Engineering

- [27] Xu, X., Xia, T., Venkatachalam, A., and Huston, D., 2013. "Development of high-speed ultrawideband ground-penetrating radar for rebar detection". *Journal of Engineering Mechanics*, 139(3), pp. 272–285. cited By (since 1996)0.
- [28] Yu, S.-N., Jang, J.-H., and Han, C.-S., 2007. "Auto inspection system using a mobile robot for detecting concrete cracks in a tunnel". *Automation in Construction*, 16(3), pp. 255 – 261.
- [29] Abudayyeh, O., Al Betaineh, M., and Abdel-Qader, I., 2004. "An imaging data model for concrete bridge inspection". *Advances in Engineering Software*, 35, pp. 473–480.
- [30] Zhu, Z., German, S., and Brilakis, I., 2010. "Detection of large-scale concrete columns for automated bridge inspection". *Automation in Construction*, 19, pp. 1047–1055.
- [31] Brilakis, I., Fathi, H., and Rashidi, A., 2011. "Progressive 3d reconstruction of infrastructure with videogrammetry". *Automation in Construction*, 20(7), pp. 884 – 895.
- [32] Hugenschmidt, J., 2002. "Concrete bridge inspection with a mobile gpr system". *Construction and Building Materials*, 16, pp. 147–154.
- [33] Hugenschmidt, J., and Mastrangelo, R., 2006. "Gpr inspection of concrete bridges". *Cement and Concrete Composites*, 28, pp. 384–392.
- [34] Barazzetti, L., Sala, R., Scaioni, M., Cattaneo, C., Gibelli, D., Giussani, A., Poppa, P., Roncoroni, F., and Vandone, A., 2012. "3d scanning and imaging for quick documentation of crime and accident scenes". *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*(8359), p. art. no. 835910.
- [35] Zhang, C., and Arditi, D., 2013. "Automated progress control using laser scanning technology". *Automation in Construction*, 36(0), pp. 108 – 116.
- [36] K. Khoshelham, S. O. Elberink, "Accuracy and Resolution of Kinect Depth Data for Indoor Mapping Applications". Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, 2013.
- [37] YJ Chang, SF Chen, JD Huang, "A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities". Department of Electronic Engineering, Chung Yuan Christian University, Chung-Li, Taiwan, 2011.
- [38] F. Endres, J. Hess, "An evaluation of the RGB-D SLAM system". *Robotics and Automation (ICRA)*, 2012 IEEE International Conference.