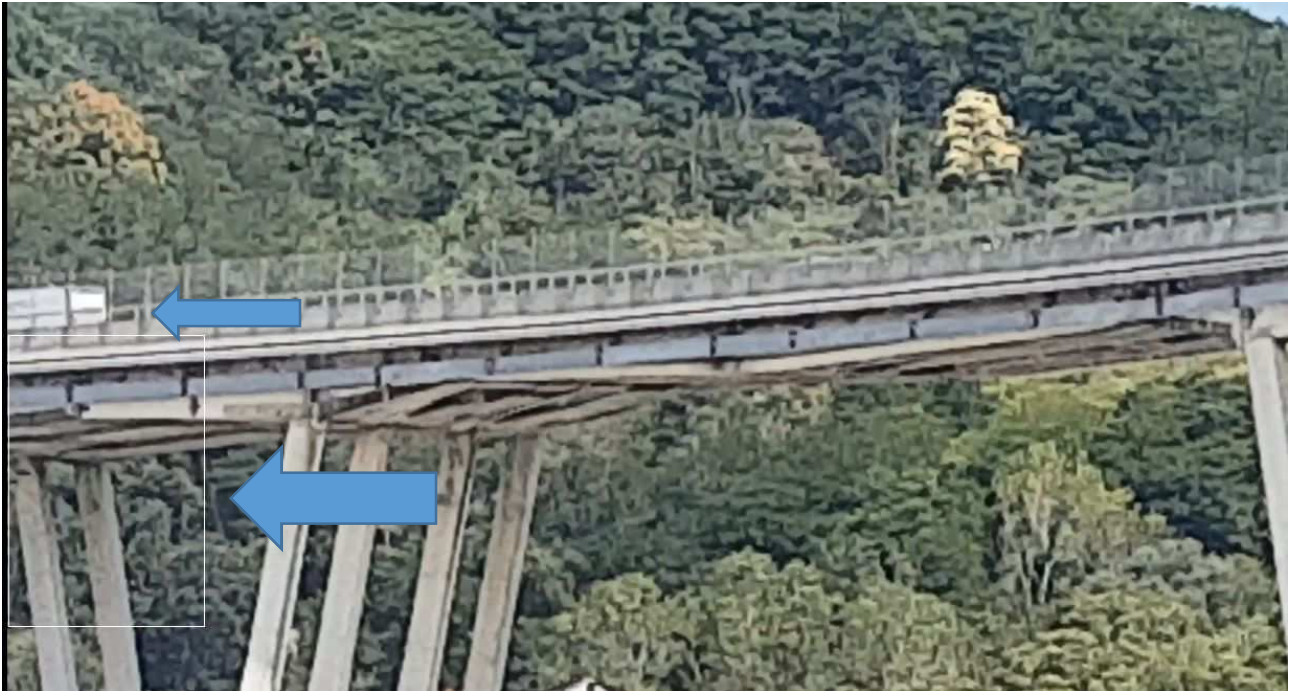


## TEST DI PROVA ESEGUITI AL PONTE MORANDI DI GENOVA IL 30 GIUGNO 2018

### Premessa



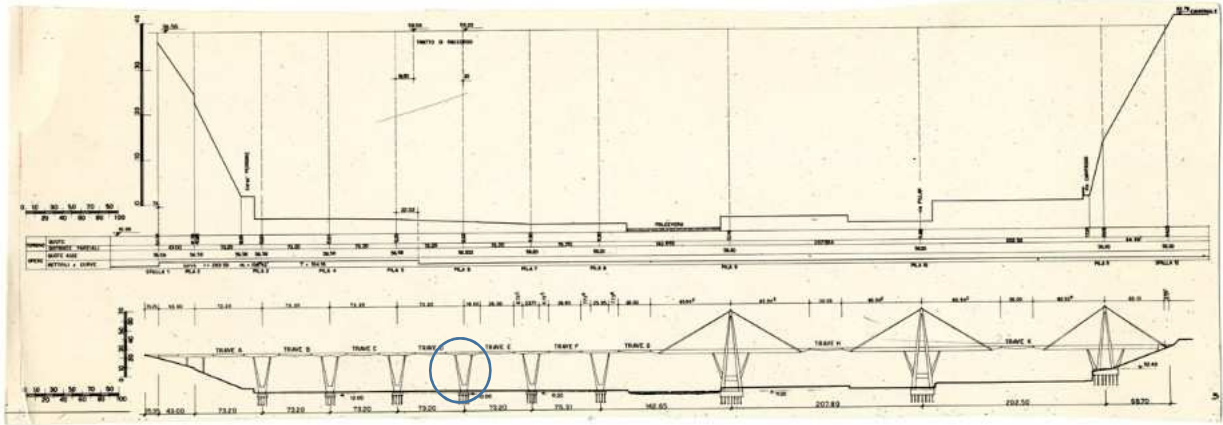
AREA MONITORATA IN LUCE VISIBILE AL MOMENTO DEL PASSAGGIO DI UN CAMION – LATO EST.

Le misure sono state effettuate con una camera speciale posta su uno stativo denominata “MIRA”, a semplice scopo di test dimostrativo delle peculiarità del sistema proposto ad un’azienda locale in data 30 giugno 2018 tra le ore 10 e 11 del mattino.

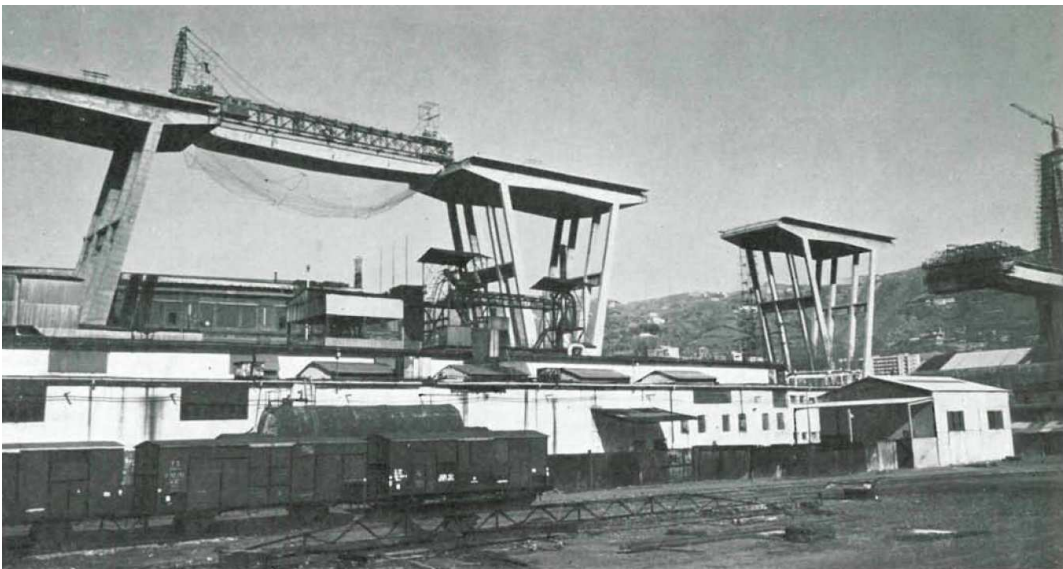
Il punto di misura è posto in corrispondenza della parte del ponte Morandi realizzata a travate su pile a V senza stralli, in corrispondenza dell’impalcato posizionato tra i due puntoni della pila.

Come si desume dalla relazione dell’ingegner Morandi del 25 agosto 1967, tale zona del ponte è costituita da “quattro doppi pilastri in sezione variabile collegati a metà e in sommità da traversi” e congiunti in fondazione da una zattera palificata.

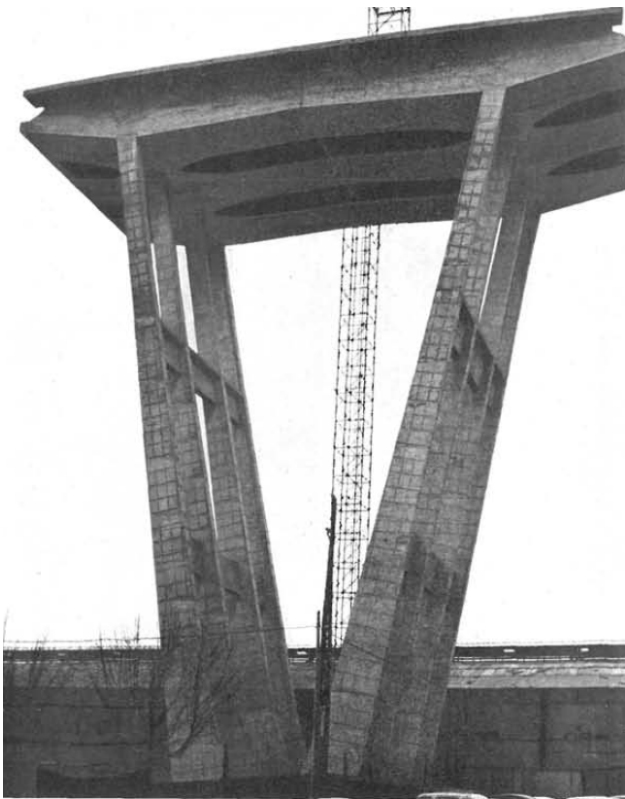
I pilastri sopportano una travata della lunghezza di 20 metri a sezione variabile (oggetto delle misure) che si protende poi a sbalzo oltre al pilastro per altri 7.5 metri e accoglie poi un elemento prefabbricato secondo lo schema degli implacati “gerber”.



*Prospetto dell'impalcato dai disegni di progetto del 1967*



*Fasi della realizzazione della travata prefabbricata sulla pila oggetto delle misure (a)*



*Fasi della realizzazione della travata prefabbricata sulla pila oggetto delle misure (b)*



*Fasi della realizzazione della travata prefabbricata sulla pila oggetto delle misure (c)*

## Esecuzione delle misure del 30 giugno 2018

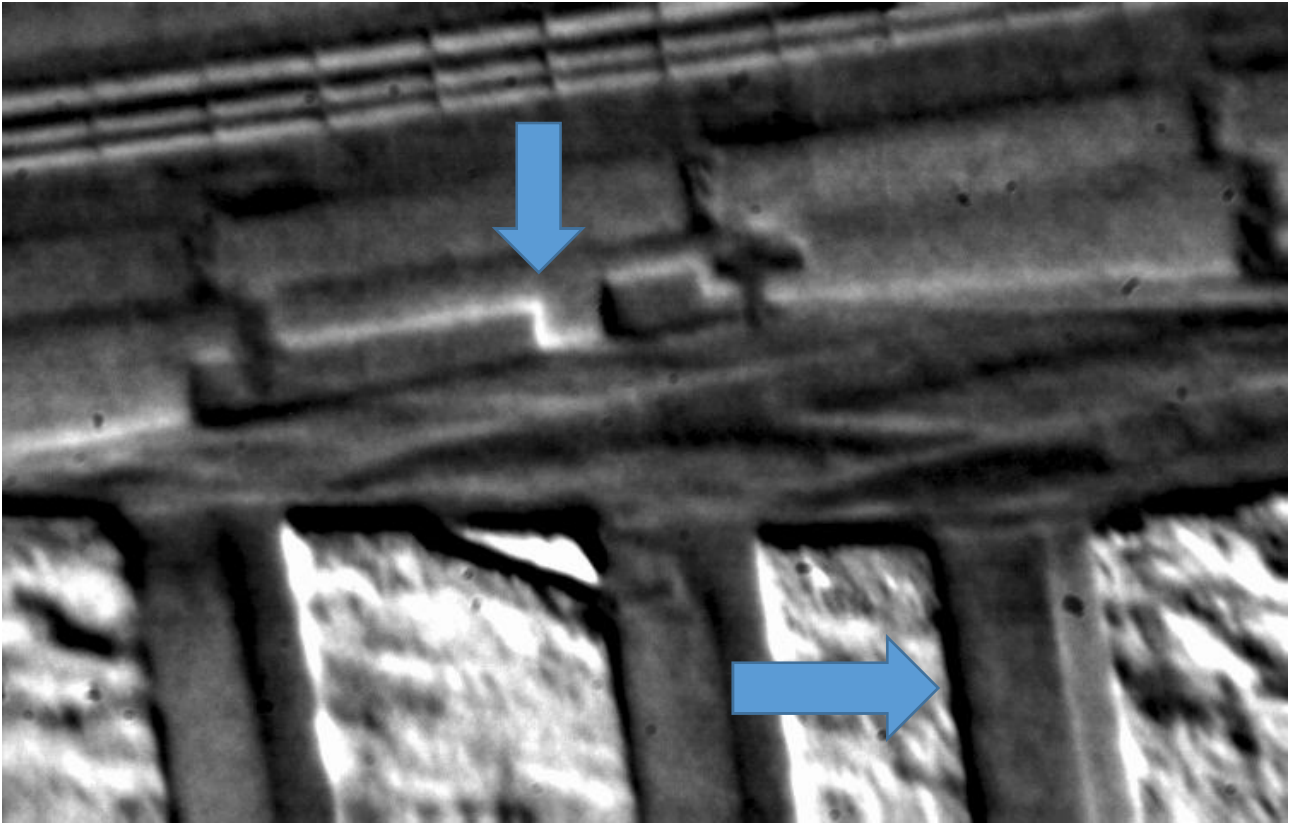
La giornata del 30 giugno 2018 era caratterizzata da cielo sereno, assenza di precipitazioni, vento lieve o assente e il traffico veicolare sul ponte Morandi era piuttosto modesto.

Abbiamo effettuato alcune riprese attendendo il passaggio di mezzi pesanti che transitavano saltuariamente. Questa camera prodotta dalla ditta Hyperspectral Imaging, consente di vedere con una “realtà aumentata” tutti i micro e macro movimenti delle infrastrutture, misurando l’oscillazione in frequenza e ampiezza.

In pratica, amplificando i piccoli movimenti presenti nei video delle vibrazioni indotte dai micro tremori naturali (vento, traffico, vibrazioni), questa innovazione consente di **rendere ben visibili gli spostamenti dell’oggetto analizzato**, con un dettaglio di pochi millesimi di millimetro. Tecnologia sviluppata dal MIT di Boston, che unitamente ad altri algoritmi proprietari inseriti nella camera, consentono di effettuare riprese in real-time e misurazioni abbastanza precise utili per una fase di pre-analisi del comportamento prestazionale e delle deformazioni non visibili ad occhio delle infrastrutture. La descrizione puntuale viene illustrata in appendice a complemento delle caratteristiche tecniche della camera e del certificato di calibrazione.

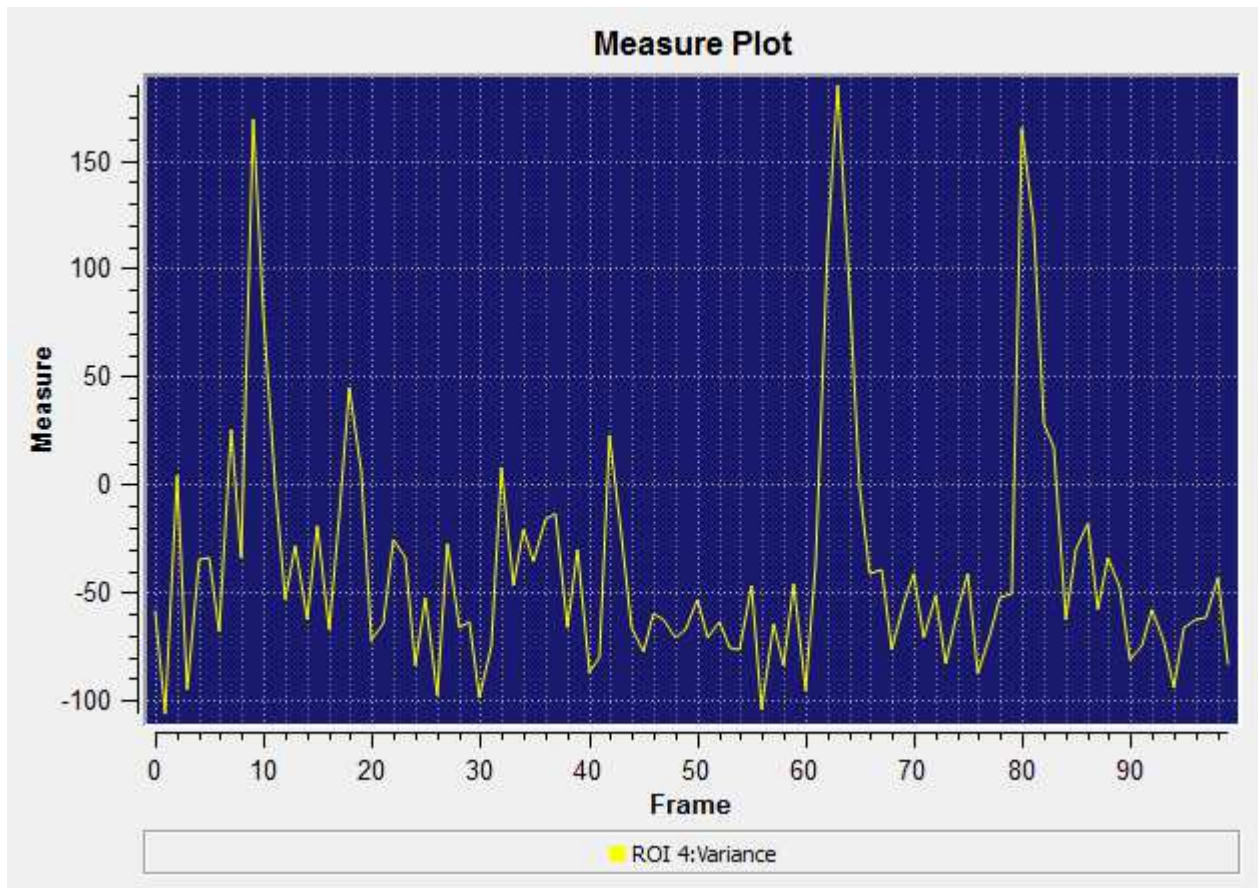
Di seguito si riportano alcuni frame delle registrazioni effettuate. A livello visivo, il cambio di cromatismo dal grigio al bianco evidenzia l’evidenza di una deformazione in atto.





La fluttuazione ben visibile in alcuni frame dopo il passaggio del camion, ci ha consentito osservare e di stimare un movimento impulsivo della struttura, in occasione del transito di tre camion, 2 in direzione est ed uno in direzione ovest.

Di seguito si riportano gli output del software con la storia temporale delle deformazioni puntuali.

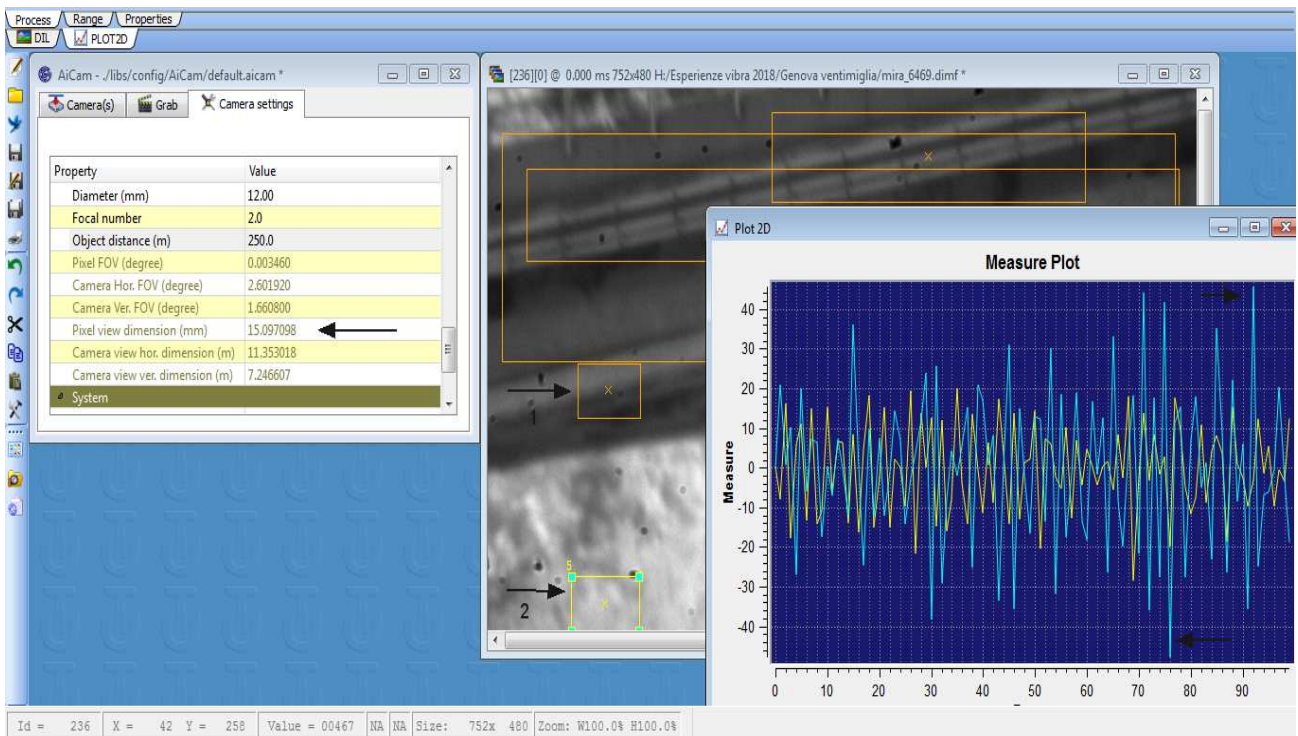


Qui si osservano i 3 picchi ed i relativi spostamenti in pixel al transito dei mezzi pesanti. Il secondo camion ed il terzo transitavano in direzioni opposte, quindi il punto di misura risente anche di effetti del secondo ordine di targa torsionale dell'impalcato.

Il secondo mezzo presenta una deviazione dei pixel compresa tra circa -100 a + 180, quindi di 280 pixel. Conoscendo la distanza dall'oggetto e la focale dell'ottica abbiamo stimato la grandezza di ogni singolo pixel, che equivale a 15,09 millimetri. Moltiplicando la grandezza del pixel per la deviazione stimata di 280, si ha un valore di 4.225 che diviso per il guadagno di amplificazione della camera, è pari a 52,8 mm. ovvero, 5,2 cm. di scostamento. Questo dato è relativo a tutta la lunghezza della trave misurata con una ROI e sottraendo il rumore dall'immagine.

Se si analizza un'area molto piccola dell'impalcato è possibile cogliere un'immagine amplificata, - immagine che segue- (si vedano le frecce sul punto 1 misurato e punto 2, rumore sottratto) e si fa il calcolo del Centroide in quella ROI, risulta esserci uno spostamento di 67,9 millimetri, ovvero 6,8 cm.

Nelle figure che seguono si plottano i particolari relativi alle peculiarità delle misure e all'evoluzione nel tempo delle stesse.

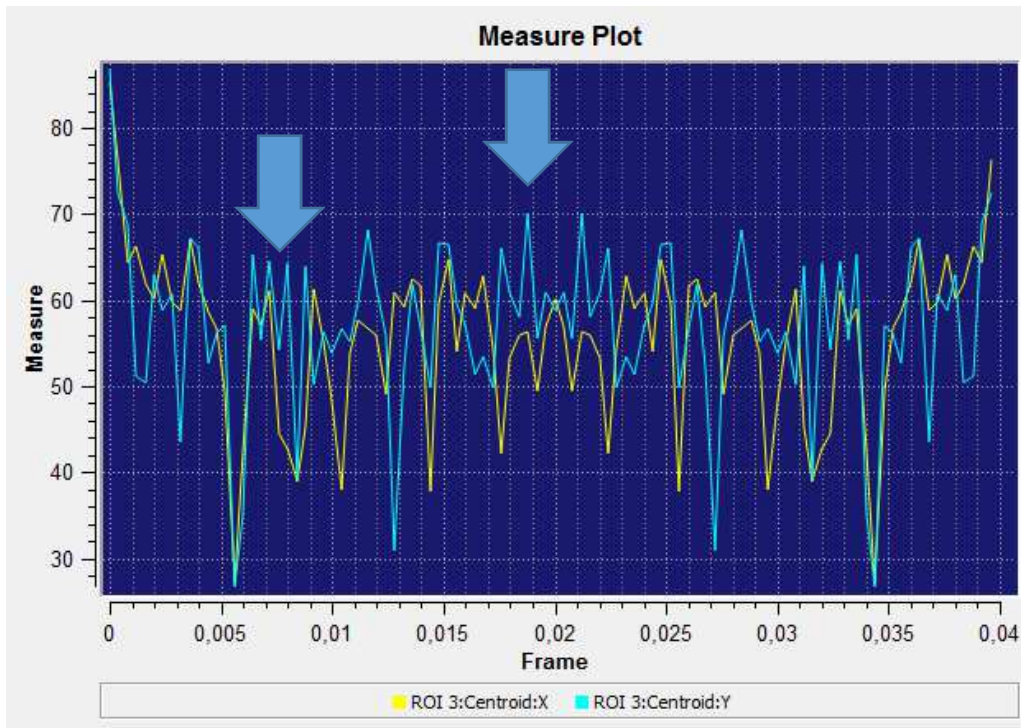


Nella Misure prese in una porzione di area di interesse.

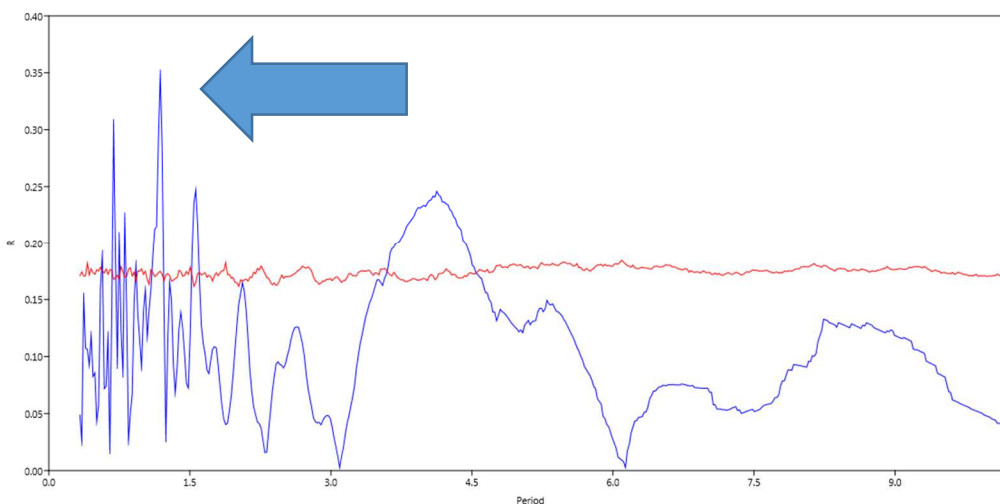
Dal movimento dei pixel i cui valori sono indicate dalle frecce, si osserva un movimento sussultorio con un picco di 6,8 cm.



Misurando il centroide su uno dei giunti, con una amplificazione della scala delle ordinate di x 160, si osserva uno scostamento verticale (azzurro) di 1200 pixel. In concomitanza del passaggio di un solo camion, si ha uno scostamento verticale (rosso) di circa 500 pixel. A conti fatti, con un singolo camion si ha una oscillazione di 4,7 cm. In occasione del passaggio simultaneo dei 3 camion, si ha una oscillazione /teorica, ipotizzando un comportamento perfettamente lineare) pari a 11,3 cm.



L'inviluppo spettrale in frequenza evidenzia un picco primario (freccia centrale) a 1,4 Hz e due picchi secondari, inoltre una serie di armoniche (freccia a sx.). Queste tipologie di rilievi possono essere molto utili agli ingegneri strutturisti per valutare l'idoneità o meno delle suddette oscillazioni.



Risposta spettrale con picco a circa 1.4 Hz e diverse armoniche.



## Test di prova eseguiti al ponte Morandi di Genova tra il 20 e 21 agosto 2018

Tra il 20 e il 21 di agosto si sono effettuate misure in particolare sulla sommità delle antenne rimaste in piedi dopo il crollo per evidenziare eventuali cinematismi locali sulla struttura.

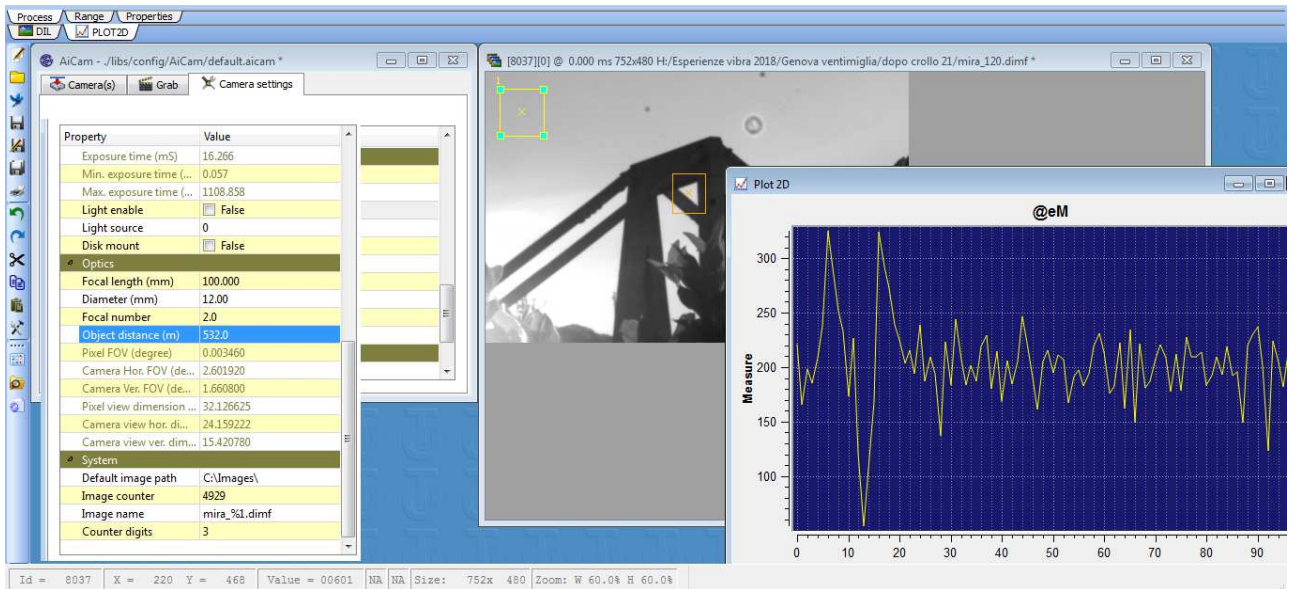
I carichi in gioco, azzerati i carichi di esercizio da traffico, sono i carichi da vento e eventuali carichi sismici (da una analisi ex post esclusi). È da sottolineare (come da schema riportato a pagina 2) che le due antenne presentano caratteristiche geometriche diverse soprattutto in riferimento alle altezze rispetto allo spiccatto di fondazione e alla rigidità degli stralli, da cui la risposta deformativa diversificata. Inoltre la posizione topologica e topografica potrebbe far supporre una diversa esposizione rispetto ai carichi derivanti dalla turbolenza del vento.



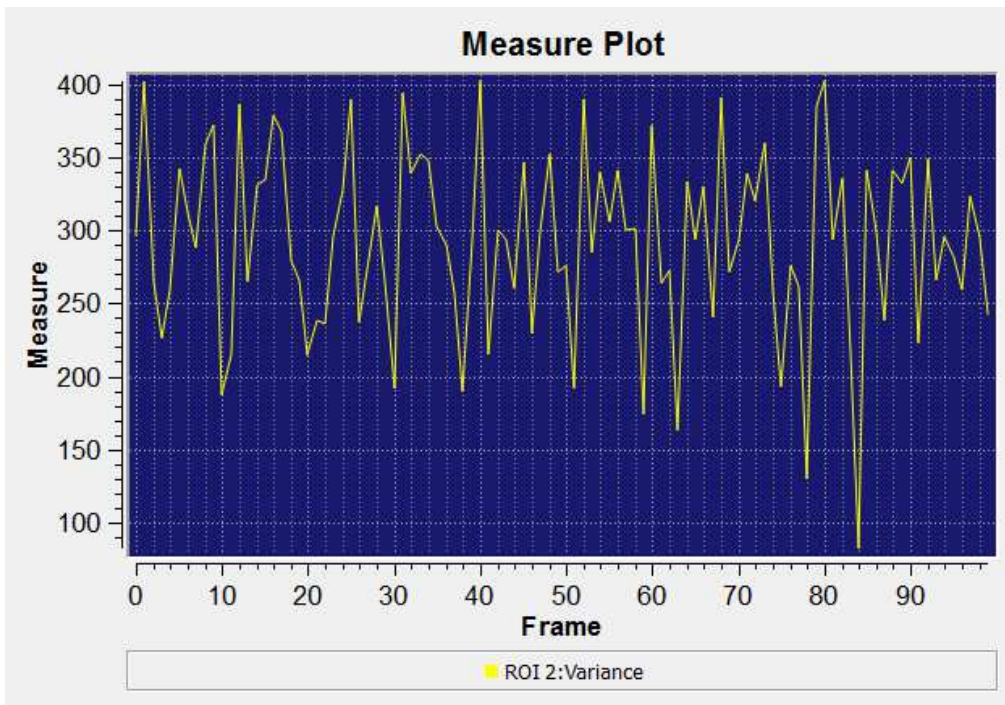
**Strumento di misura – Camera MIRA con ottica da 100mm. f. 4.5.**



**Il sottoscritto Daniele Gullà e l'Ing. Silvia Bonetti durante i rilievi.**



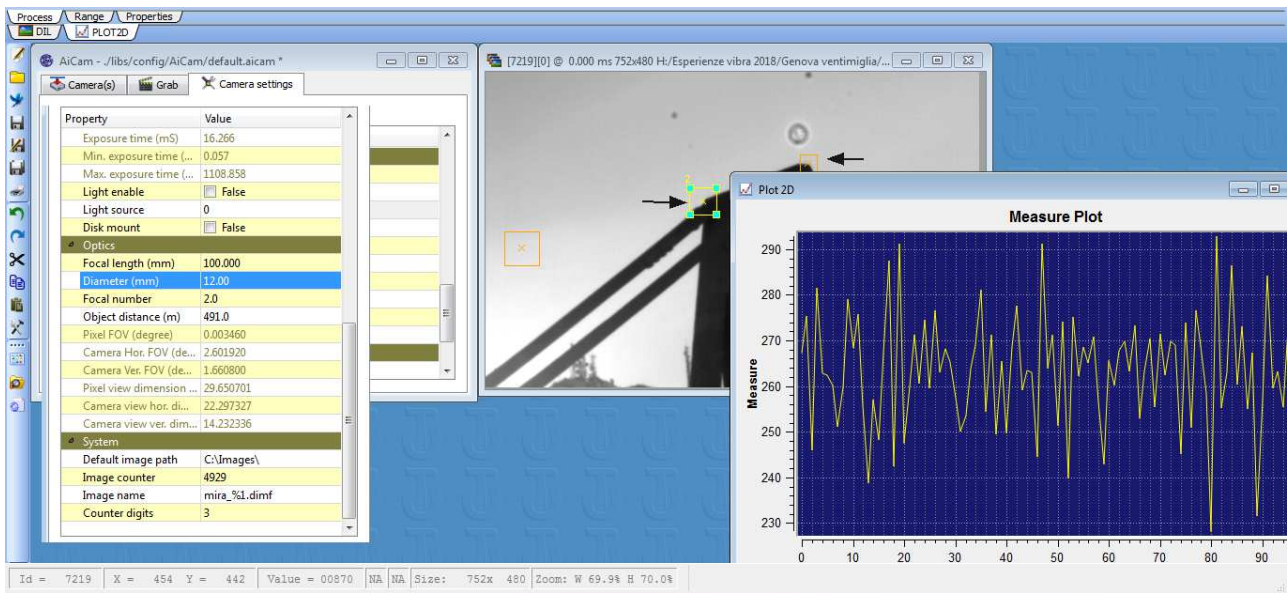
**Misurazione del 20 agosto ore 20 della sera. Distanza 532mt. Vento moderato. Oscillazione media di 4 cm**



In un altro rilievo video sempre del 20 agosto, lo scostamento per il vento medio risulta essere di 8 cm.

Property	Value
Exposure time (ms)	16.266
Min. exposure time (ms)	0.057
Max. exposure time (ms)	1108.858
Light enable	<input type="checkbox"/> False
Light source	0
Disk mount	<input type="checkbox"/> False
<b>Optics</b>	
Focal length (mm)	100.000
Diameter (mm)	12.00
Focal number	2.0
Object distance (m)	635.0
Pixel FOV (degree)	0.003460
Camera Hor. FOV (degree)	2.601920
Camera Ver. FOV (degree)	1.660800
Pixel view dimension (mm)	38.346629
Camera view hor. dimension (mm)	28.836665
Camera view ver. dimension (mm)	18.406382
<b>System</b>	
Default image path	C:\Images\
Image counter	4929
Image name	mira_%I.dimg
Counter digits	3

Misurazione del 21 agosto ore 10 del mattino sul nuovo strallo. Distanza 635mt. Vento lieve.  
Scostamento vibrazionale per il vento compreso tra di 2,5 cm e 3 cm.



**Misurazione del 21 agosto ore 10 del mattino. Vecchio strallo. Distanza 491 mt. Scostamenti per il vento lieve compresi tra 1,8 cm. e 2,4 cm.**

## Allegati

Descrizione della metodologia tecnica utilizzata per le misurazioni.

### ANALISI STRUTTURE – MIRA DEVICE TECHNOLOGY

In questo brevissimo articolo si tenta di spiegare come si possono misurare le deformazioni di una struttura ed in questo



Figura 1 - Tipico Ponte

caso un ponte.

Per meglio comprendere le dinamiche di deformazione di un ponte è bene fare riferimento alla sottostante figura:

Quando un ponte viene attraversato da un veicolo questo sollecita la struttura sui tre assi:

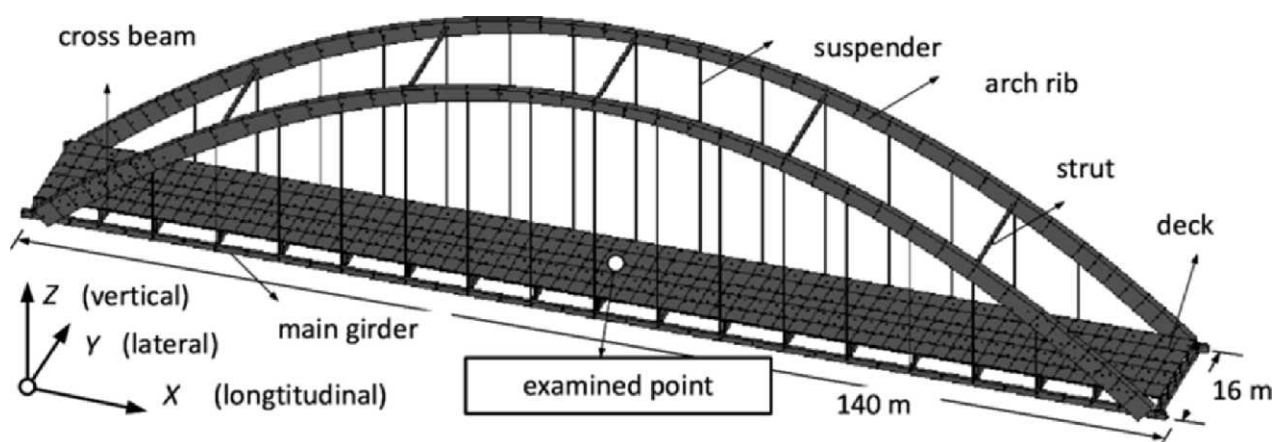


Figura 2 - Modello vettoriale di un ponte

X) È l'asse meglio difeso lavorando in compressione e trazione ma è anche il più difficile da misurare.

Y) È sicuramente l'asse più pericoloso, sono movimenti tangenziali che sollecitano la struttura lungo un asse

dove non sono previste forti sollecitazioni. La misura di deformazione di questo asse avviene tramite misura di distanza con laser e con magnificazione digitale dell'immagine.

Z) È l'asse dove avvengono le maggiori oscillazioni ma è anche il più strutturato a doverle supportare. La misura della deformazione su questo asse avviene con l'ausilio della magnificazione digitale ed il successivo trattamento dell'immagine per la misura della deformazione dei profili.

Deformazione del ponte sotto sollecitazione e dopo la ripresa con magnificazione digitale:

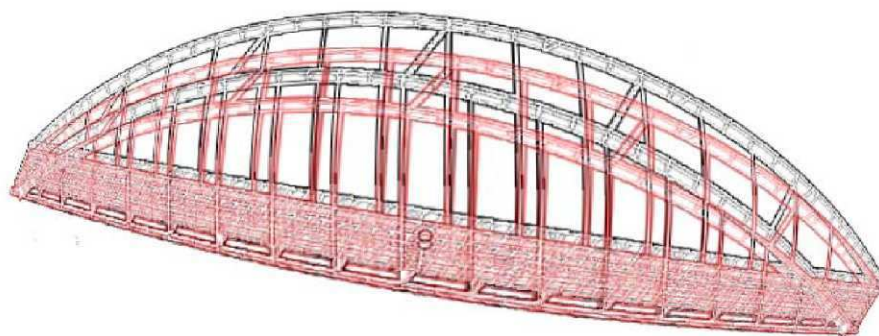


Figura 2 - Modello sollecitato



Figura 4 - Magnificazione Immagine

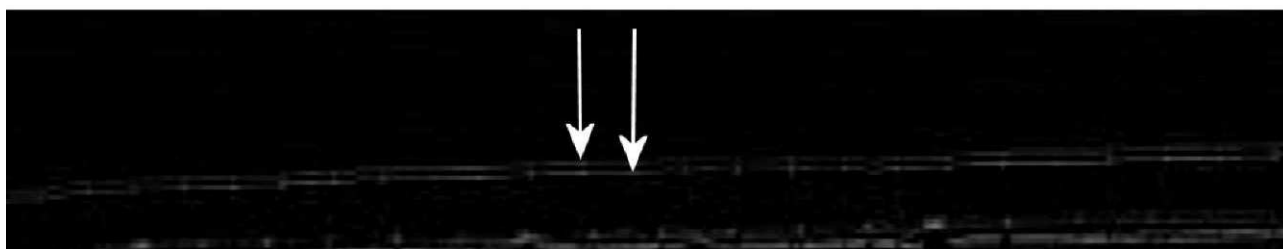
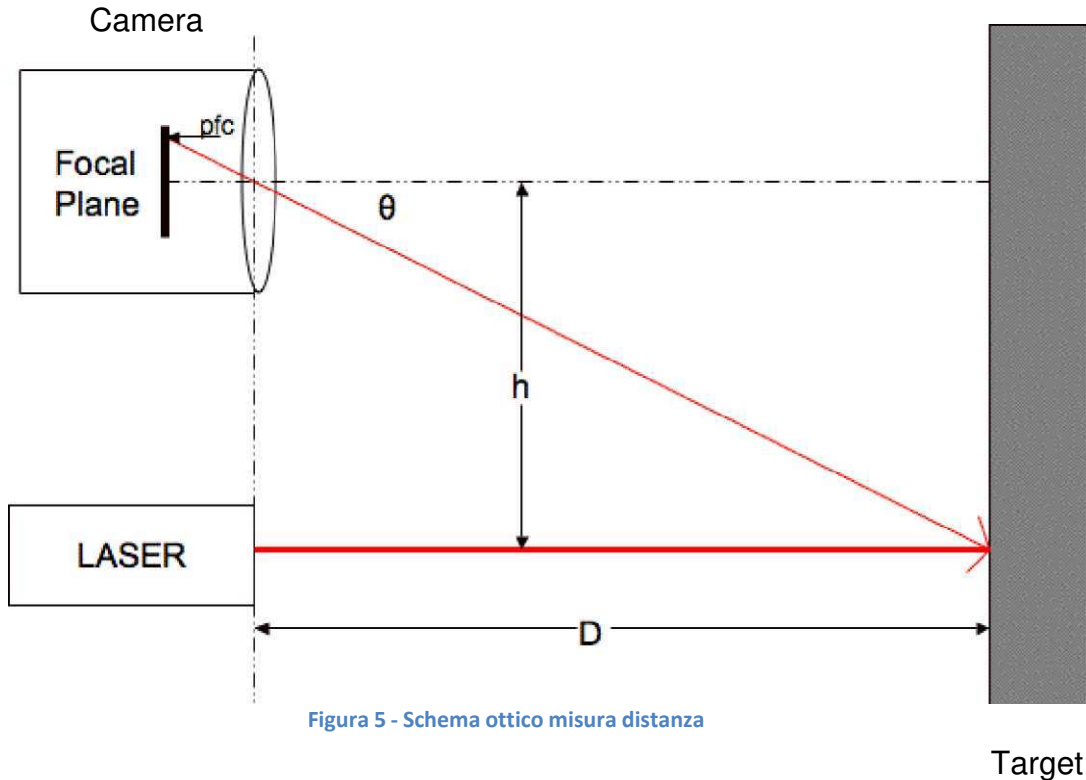


Figura 5 - Immagine magnificata con applicato Skeleton e vettori di spostamento

Con il nostro strumento sarà possibile misurare le deformazioni sugli assi Y e Z, vediamo come.

## MISURA ASSE Y

Per la misura su questo asse si usa una tecnica composita, realizzata con la classica tecnica di misura della distanza basata su illuminazione laser e magnificazione digitale dell'immagine.



L'equazione di base per questa misura è:

$$D = \frac{h}{\tan \theta}$$

Essendo h noto theta è definito come:

$$\theta = pfc * rpc + ro$$

Where:

*pfc* = Number of Pixels From Center of Focal Plane *rpc* = Radians per pixel pitch *ro* = Radian offset (compensates for alignment errors) Per cui l'equazione di base diventa:

$$D = \frac{h}{\tan(pfc * rpc + ro)}$$

Da cui si può anche ricavare il numero di pixel coinvolti al variare di D conoscendo h, rpc e trascurando ro:

$$pfc = \text{atan}(h / D) / rpc$$



Adesso per simulare la ns. ripresa cominciamo a definire i vari parametri:

NPO: Numero pixel orizzontali 752

NPV: Numero di pixel verticali 480

DP: Dimensione pixel 6  $\mu$ m

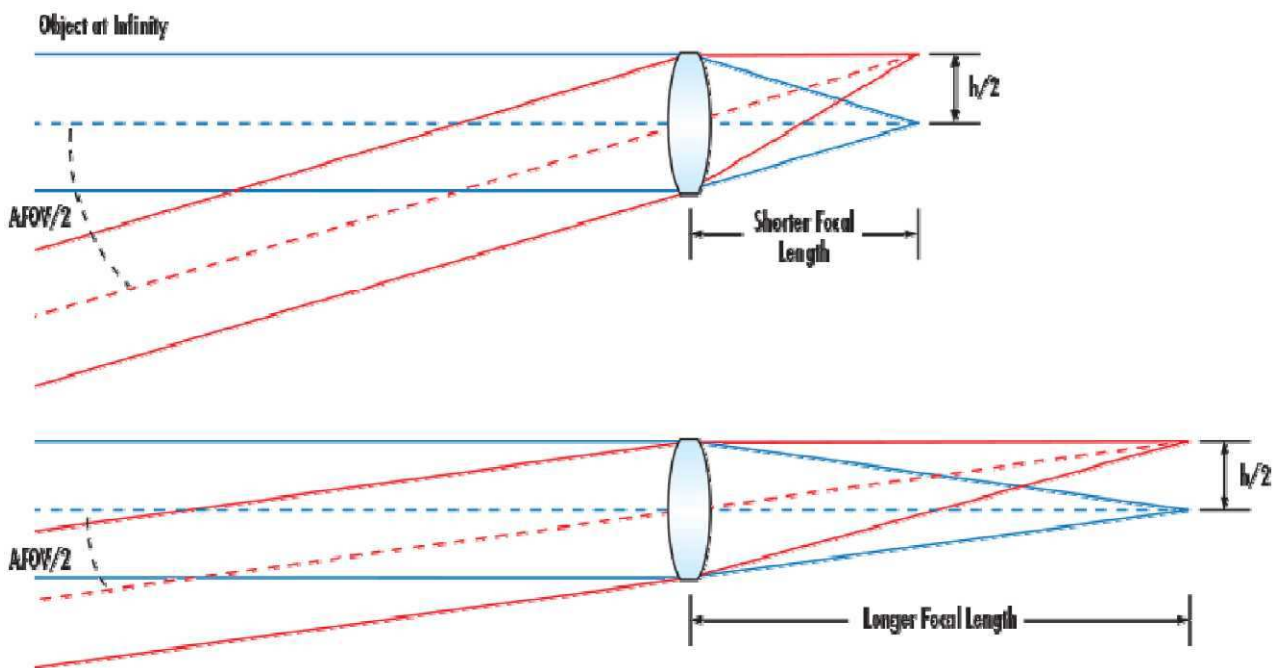
h: Dimensione sensore, 4.51H x 2.88V mm

f: Focale obiettivo

AFOV: Campo inquadrato in gradi dalla camera AFOVpix:

Il campo inquadrato è dato da:

$$AFOV(^{\circ}) = 2 \times \tan^{-1} \left( \frac{h}{2f} \right)$$



Campo inquadrato da un pixel

Adesso simuliamo di utilizzare un obiettivo da 50 mm ed otteniamo: AFOV =

$$2 * \text{atan}(4.51 / (2 * 50)) = 5.7^{\circ}$$

$$AFOV_{\text{pix}} = AFOV / NPO = 5.7 / 752 = 0.007579787^{\circ} = 27.28723404'' \text{ Trasformato in}$$

radianti AFOVpix diventa:  $0.007579787^{\circ} / 180 * 3.14 = 0.000132292$

Nella sottostante tabella si calcolano le varie grandezze utilizzando un interasse laser camera di 1m soggetto a distanza di 200m con diverse variazioni dimensionali.

f	AFOVpix	CAMPO	PIXEL MISURATI A = 1m	MAGNIFICAZIONE E A
50	0.000132292	5.7°	12	A 1mm @ 500x 6 pix
100	0.000066625	2.87°	24	A 0.1mm @ 500x 6 pix
500	0.000013327	0.57°	119	A 1mm @ 100x 12 pix
1000	0.000006663	0.28°	238	A 0.1mm @ 500x 12 pix


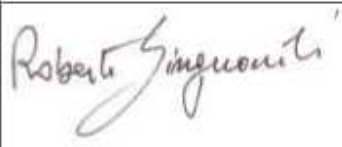
**CALIBRAZIONI DELLO STRUMENTO DI MISURA**



Test Report issued under the responsibility of:

Analytical S.r.l. (CETACE)

<b>TEST REPORT</b> <b>Mechanical Test Procedure</b> <b>Sinusoidal vibration and shock</b>	
Report Number.....	R3372017_3_01
Date of issue.....	2017-12-19
Total number of pages .....	15
Name of Testing Laboratory preparing the Report .....	Analytical S.r.l. (CETACE) Via dei Cadolingi 6 50018 Scandicci (FI), Italy
Applicant's name .....	Hyperspectral imaging di Daniele Gullà
Address.....	Via Caduti Della Via Fani, 7 40127 Bologna (BO)
<b>Test specification:</b>	
Standard .....	N/A
Test procedure .....	Test report
Non-standard test method .....	Customer internal procedure
Test Report Form No. ....	Sine_shock_a
Test Report Form(s) Originator....	Analytical S.r.l. (CETACE)
Master TRF .....	2017/12
<b>Copyright © 2015 IEC System of Conformity Assessment Schemes for Electrotechnical Equipment and Components (IECEE System). All rights reserved.</b>	
<small>This publication may be reproduced in whole or in part for non-commercial purposes as long as the IECEE is acknowledged as copyright owner and source of the material. IECEE takes no responsibility for and will not assume liability for damages resulting from the reader's interpretation of the reproduced material due to its placement and context.</small>	
<b>This report is not valid as a CB Test Report unless signed by an approved CB Testing Laboratory and appended to a CB Test Certificate issued by an NCB in accordance with IECEE 02.</b>	
<b>General disclaimer:</b>	
<small>The test results presented in this report relate only to the object tested. This report shall not be reproduced, except in full, without the written approval of the Issuing Testing Laboratory. The authenticity of this Test Report and its contents can be verified by contacting the Analytical S.r.l. (CETACE) laboratory, responsible for this Test Report.</small>	

<b>Test item description</b> ..... :	Acquisition data system (camera with data acquisition software and laser spot target)	
<b>Trade Mark</b> ..... :	Natural Change S.r.l.	
<b>Manufacturer</b> ..... :	Natural Change S.r.l.	
<b>Model/Type reference</b> ..... :	MiraPro	
<b>Ratings</b> ..... :	Power Supply DC 12 V or LiION 3.7 V	
<b>Responsible Testing Laboratory (as applicable), testing procedure and testing location(s):</b>		
<input checked="" type="checkbox"/> <b>Testing Laboratory:</b>		
<b>Testing location/ address</b> ..... :	Analytical S.r.l. (CETACE) Via dei Cadolingi 6 50018 Scandicci (FI), Italy	
<b>Tested by (name, function, signature)</b> ..... :	Lorenzo Signorini (ENG)	
<b>Approved by (name, function, signature)</b> ... :	Roberto Singuaroli (REW)	

## SCHEDA TECNICA STRUMENTO "MIRA"



### DESCRIZIONE

MIRA è una telecamera digitale in grado di fornire soluzione a problemi di visione finora risolti in modo complesso e costoso. I suoi punti di forza sono una grande capacità di elaborazione dell'immagine, il basso consumo (alimentabile batterie/pannello solare), le dimensioni ridotte ed un costo decisamente contenuto.

MIRA è una telecamera in grado di riprendere, elaborare, salvare immagini e comunicare con dispositivi remoti caratterizzandosi per tre funzioni principali:

- 1) Ripresa delle immagini grazie all'utilizzo di vari sensori CMOS a basso consumo, alta sensibilità, e di risoluzioni elevate nel range spettrale dal visibile al vicino infrarosso;
- 2) Grande capacità di elaborazione grazie all'utilizzo di un potente DSP (Digital Signal Processor) in grado di eseguire 800 MIPS e una considerevole memoria di lavoro di tipo SDRAM da 64Mbyte oltre ad una di tipo NAND da 8Gbyte;
- 3) Estrema duttilità nel salvataggio di dati e immagini grazie all'ulteriore espandibilità fino a 32Gbyte (FAT32 compatibile) di una SD inseribile nell'apposito connettore e/o grazie all'utilizzo dei molteplici canali di comunicazione (RS232,USB2,WiFi,GPRS o RF a 2.4GHz) in grado di inviare tutte le informazioni richieste a dispositivi esterni;

MIRA integra inoltre un piccolo ma efficiente sistema operativo che ha in dote una vasta lista di funzioni per l'elaborazione dell'immagine, per le comunicazioni e per il salvataggio dei dati. Al fine di massimizzare la flessibilità della telecamera sono disponibili svariate modalità di programmazione:

- Modalità BATCH: lista di comandi scritti in un file di testo e poi salvato con il nome AUTOEXEC.BAT in una SD. All'accensione della telecamera questo file verrà cercato nella SD e posto in esecuzione.
- Programmazione BASIC like: con la quale sarà possibile accedere pienamente a tutte le funzioni della telecamera o implementare nuove funzionalità.
- Programmazione C: La modalità più potente, completa di un SDK e di un ampio numero di librerie.

Tutto questo si realizza in un hardware di piccole dimensioni e a basso consumo.

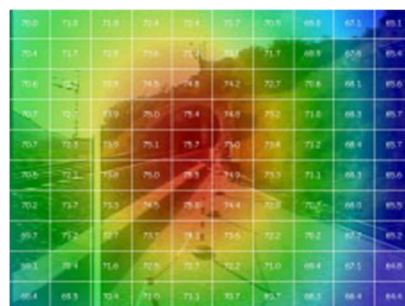
Qualche esempio di utilizzo della telecamera per elaborazioni evolute:

- 1) Salvataggio dell'immagine in f.to JPEG esclusivamente in presenza di un oggetto ben definito (es: per un viso) command: OBJD FACE JPG

N.B. È possibile riconoscere oggetti e cose utilizzando data-sets differenti.

- 2) Salvataggio dell'immagine in f.to JPEG esclusivamente in occasione di variazioni prestabilite dello scenario (command: BLB 50 2500 JPG)

- 3) Misurazione della frequenza dei micromovimenti di un viso per stabilire eventuali criticità psichiche (command: OBJA FACE 10) oltre alle più comuni elaborazioni come: Shape Analysis, Tracking, Dynamic Analysis, Vector analysis, Misura distanze, Vibrational analysis, Delta pixel analysis, Interferometer analysis, etc.



Esempio di analisi flusso vibrazionale in una galleria ferroviaria (vibrazioni struttura).