

# MONITORAGGIO DELLE DEFORMAZIONI DELLA CUPOLA DEL TEATRO MASSIMO DI PALERMO CON L'IMPIEGO DI TECNICHE TOPOGRAFICHE E FOTOGRAMMETRICHE INTEGRATE

Massimo Allegra, Gino Dardanelli, Valeria Giammarresi,  
Pietro Orlando, Benedetto Villa

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale (DICA)  
Università degli Studi di Palermo  
Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy  
e-mail: [pietro.orlando@unipa.it](mailto:pietro.orlando@unipa.it)

**Key words:** Deformations, Thermal dilatation, Monitoring, Robotic Total Station, Digital Photogrammetry, Thermographic camera.

**Parole chiave:** Deformazioni, Dilatazione termica, Monitoraggio, Stazione totale robotizzata, Fotogrammetria digitale, Termocamera.

**Abstract.** *This paper shows the first results of a study aimed at monitoring the deformations of the dome of the Massimo Theatre in Palermo caused by thermal dilatations, with the use of topographic and photogrammetric integrated techniques. Particularly, two robotic total stations and high precision digital photogrammetric systems were employed. In order to correlate the displacements of the rollers on which the steel structure of the dome rest with the thermal gradients, different thermal images were acquired. The main goal of the work was to compare the two techniques with reference to very small (sub-millimeter) deformation measurements. The obtained results show that the rollers are still working correctly. In fact, for a thermal gradient of 6 °C surveyed by thermographic camera, both topographic and photogrammetric techniques determined displacements of the order of 0.8 mm, according with the expected deformations of the theoretic model.*

**Sommario.** *L'articolo riporta i primi risultati di uno studio finalizzato al monitoraggio delle deformazioni della cupola del Teatro Massimo di Palermo provocate dalle dilatazioni termiche, con l'impiego di tecniche topografiche e fotogrammetriche integrate. In particolare, sono state utilizzate due stazioni totali robotizzate e sistemi di fotogrammetria digitale di elevata precisione. Per correlare gli spostamenti dei carrelli sui quali poggia la struttura in acciaio della cupola con i gradienti termici, sono state acquisite immagini termiche diversificate. L'obiettivo principale del lavoro consisteva nel confronto delle due tecniche di rilievo in relazione a misure di deformazione di entità molto ridotta (sub-millimetrica). I risultati ottenuti dimostrano che i carrelli funzionano ancora correttamente. Infatti, per un gradiente termico di 6° C misurato dalla termo camera, entrambe le tecniche topografiche e fotogrammetriche hanno evidenziato spostamenti dell'ordine di 0.8 mm, in accordo con le previsioni del modello teorico.*

## 1 INTRODUZIONE

La misura di spostamenti e deformazioni è stata da sempre oggetto di interesse da parte della geodesia e della topografia classica. Negli ultimi anni, le scienze topografiche hanno subito una profonda trasformazione per effetto della diffusione generalizzata della tecniche

elettroniche e informatiche; sono state prodotte nuove strumentazioni e nuove metodologie, sempre più automatiche, veloci, affidabili, che hanno notevolmente semplificato le operazioni di rilievo; basti pensare al GPS, alle stazioni totali robotizzate, alle tecniche fotogrammetriche digitali e a quelle laser-scanning. Ovviamente di questa trasformazione si è particolarmente avvantaggiato il settore del monitoraggio del territorio e delle strutture. In tale ambito, ad esempio, le stazioni totali robotizzate sono di grande utilità, permettendo infatti l'esecuzione delle misure di controllo senza l'intervento dell'operatore.

L'articolo presenta i risultati di uno studio, svolto nell'ambito di una collaborazione interdisciplinare all'interno del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Aerospaziale dell'Università di Palermo, finalizzato al monitoraggio dello stato deformativo della cupola del Teatro Massimo di Palermo, per effetto delle dilatazioni termiche, con l'impiego di tecniche topografiche e fotogrammetriche integrate.

Il Teatro Massimo (fig. 1) costruito a partire dal 1873, su progetto dell'arch. Ernesto Basile, è caratterizzato da un cupola, avente un raggio di 27.3 m, sostenuta da 16 nervature in acciaio che poggiano su carrelli mobili posti su un cordolo in muratura largo 1.1 m (figg. 2 e 3).



Figura 1: Foto aerea del Teatro Massimo con la cupola nella parte centrale



Figura 2: Vista interna della cupola



Figura 3 : Collegamento tra nervature e cordolo

I carrelli, costituiti da una parte mobile che scorre dentro un alloggiamento fisso (fig. 4), hanno il compito di assorbire le dilatazioni dell'acciaio indotte dai gradienti di temperatura che si manifestano nell'arco della giornata e nell'alternarsi delle stagioni, evitando così la nascita di tensioni nella struttura. Lo studio ha avuto appunto il compito di verificare l'efficienza dei carrelli, dopo più di un secolo dalla loro realizzazione.

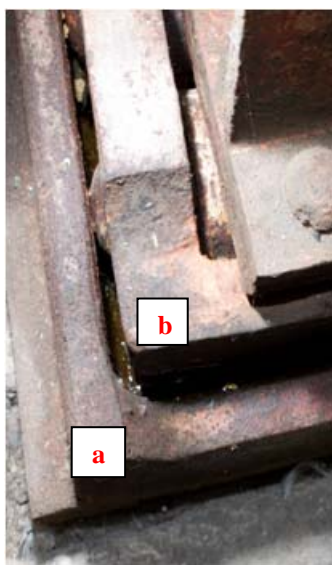


Figura 4: Particolare del carrello a) parte fissa b) parte mobile

## 2 RILIEVO TOPOGRAFICO

Per quanto riguarda l'approccio topografico, sono state utilizzate due stazioni totali motorizzate Trimble S8 (fig. 5), posizionate a centramento forzato, tramite piastra cementata, su due punti diametralmente opposti del cordolo ( $S_1$  e  $S_2$ ).

Prima di iniziare le operazioni di monitoraggio, sono state condotte alcune prove di laboratorio, finalizzate alla verifica degli scarti quadratici medi (s.q.m.) riportati nelle specifiche tecniche dello strumento, pari a  $\pm 1''$  per le misure angolari e  $1\text{mm} + 1\text{ppm}$  per la distanza. Sono stati posizionati due miniprisma ad una distanza di circa 30 metri, ripetendo 100 volte la misura di direzioni e distanze. I dati ottenuti hanno permesso di determinare gli s.q.m. effettivi; per la distanza è stato confermato il valore fornito dalla casa costruttrice, mentre per l'angolo si è trovato un valore pari  $\pm 3''$ .



Figura 5: Stazione totale *Trimble S8*

Il monitoraggio ha riguardato 6 dei 16 carrelli, individuati con codici crescenti da  $C_1$  a  $C_6$ ; ad ogni carrello sono stati fissati due mini prismi, per consentire la collimazione da entrambe le stazioni di misura (fig. 6). Un'altra mira con mini prisma è stata inoltre posizionata su un punto fisso esterno (F). In questo modo è stato possibile determinare gli spostamenti assoluti, oltre a quelli relativi fra i punti controllati, rispetto ad un sistema di riferimento esterno.



Figura 6: Particolare dei miniprismi

La figura 7 illustra lo schema dei punti interessati dalle operazioni di monitoraggio. Nell'arco della giornata sono stati effettuati sei cicli di misura, uno ogni quattro ore.

Per migliorare la precisione angolare, sono stati eseguiti diversi strati il cui numero è stato calcolato con la nota espressione:

$$n = \sigma^2 / \sigma_m^2 \quad (1)$$

dove:  $\sigma$  è il valore dello s.q.m. di misura e  $\sigma_m$  è il valore dello s.q.m. della media, che caratterizza quindi la precisione di misura che si vuole realizzare.

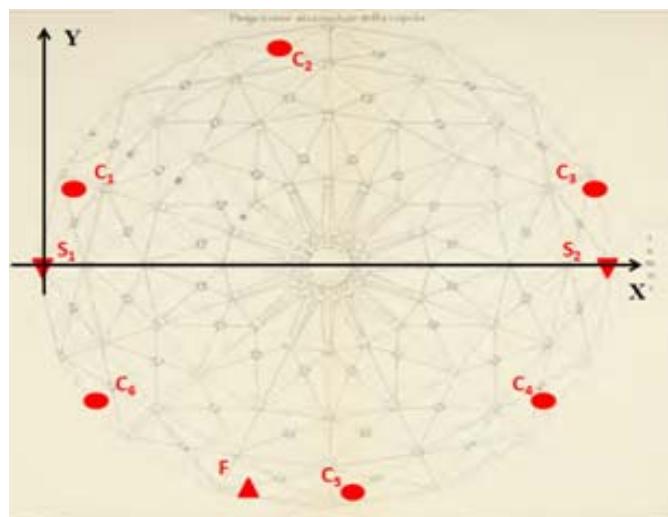


Figura 7: Schema del rilievo e sistema di riferimento

Considerato che gli spostamenti attesi, secondo il modello matematico fornito dagli strutturisti, erano dell'ordine di qualche decimo di millimetro e che il prisma più lontano si trovava ad una distanza di circa 27 m, è stato calcolato il valore dell'angolo corrispondente allo spostamento ipotizzato e ne è stata fissata l'incertezza, pari ad un ordine di grandezza inferiore a quello del valore della misura. E' risultato un numero di strati pari a 7, cautelativamente portato a 10, per ogni ciclo di misura.

Da ognuno dei due punti stazione sono state determinati i parametri angolari e di distanza relativi all'altro punto stazione, ai 6 punti di controllo sui carrelli e al punto fisso. Complessivamente sono stati acquisiti circa 1200 valori di direzioni azimutali, di angoli zenitali e di distanze inclinate. Per ogni ciclo di misura, eliminati gli outliers individuati preliminarmente, sono stati calcolati per ogni punto di controllo i valori medi degli angoli azimutali, zenitali e delle distanze inclinate, con il relativo s.q.m., e successivamente le coordinate ed il relativo s.q.m..

Per il calcolo delle coordinate è stato fissato una sistema di riferimento locale con origine sul punto  $S_1$ , asse x passante per il punto  $S_2$  e asse z rivolto verso l'alto.

La tabella I riporta, a titolo di esempio, i dati relativi al punto  $C_1/S_1$  (cioè relativo al carrello osservato dalla stazione  $S_1$ ) per i sei cicli di misura. La tabella II riporta invece i valori delle coordinate dei punti  $C_3/S_1$  e  $C_3/S_2$ , relativi al carrello  $C_3$  e osservati, rispettivamente, da  $S_1$  e da  $S_2$ ; la forte correlazione dei valori ottenuti dimostra l'attendibilità delle misure effettuate.

A partire dai valori delle coordinate sono stati quindi calcolate le variazioni  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ , cioè gli spostamenti planimetrici ed altimetrici, verificatisi ad ogni ciclo di misura. Le figure 8 e 9 illustrano gli spostamenti dei punti  $C_1/S_1$ ,  $C_3/S_1$  e  $C_3/S_2$  lungo le tre direzioni e lo spostamento planimetrico complessivo; si può notare come la componente altimetrica dello spostamento sia quasi del tutto assente, come del resto era facilmente prevedibile; si conferma inoltre la buona corrispondenza per i punti appartenenti allo stesso carrello.

	Time	media hz	media z	media $d_{inc}$	X	Y	Z
$C_1/S_1$	9.04.22	273.78712	106.12622	1.7527	100.506	101.669	9.832
	13.17.22	273.79217	106.12724	1.7525	100.507	101.669	9.832
	17.30.24	273.79201	106.1270	1.7524	100.507	101.669	9.832
	21.43.26	273.79349	106.12768	1.7522	100.506	101.669	9.832
	1.56.24	273.79238	106.12738	1.7526	100.507	101.669	9.832
	7.55.57	273.78678	106.12565	1.7525	100.506	101.669	9.832

Tabella 1: Dati relativi al punto  $C_1/S_1$

	Time	X	Y	Z		Time	X	Y	Z
$C_3/S_1$	9.04.22	126.1065	103.1575	9.9093	$C_3/S_2$	9.04.22	126.2273	103.2133	9.9086
	13.17.22	126.1066	103.1575	9.9092		13.17.22	126.2274	103.2131	9.9086
	17.30.24	126.1063	103.1578	9.9092		17.30.24	126.2272	103.2133	9.9086
	21.43.26	126.1063	103.1574	9.9092		21.43.26	126.2271	103.2132	9.9086
	1.56.24	126.1062	103.1572	9.9093		1.56.24	126.2269	103.2132	9.9086
	7.55.57	126.1063	103.1574	9.9093		7.55.57	126.2271	103.2132	9.9087

Tabella 2: Coordinate (in metri) dei punti di controllo del carrello  $C_3/S_1$  e  $C_3/S_2$

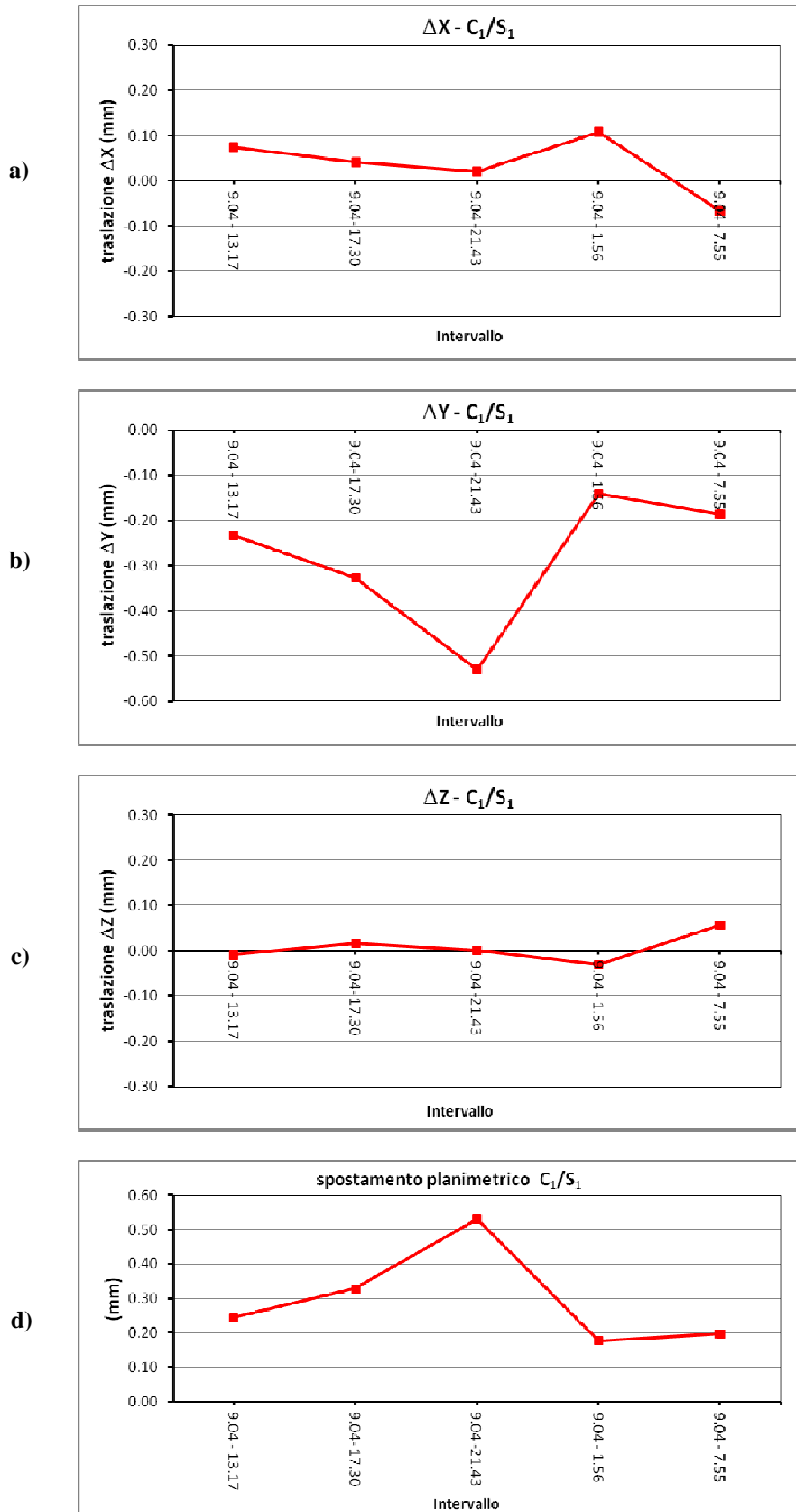


Figura 8: Spostamento del punto C1/S1 a)  $\Delta X$  b)  $\Delta Y$  c)  $\Delta Z$  d) spostamento planimetrico complessivo



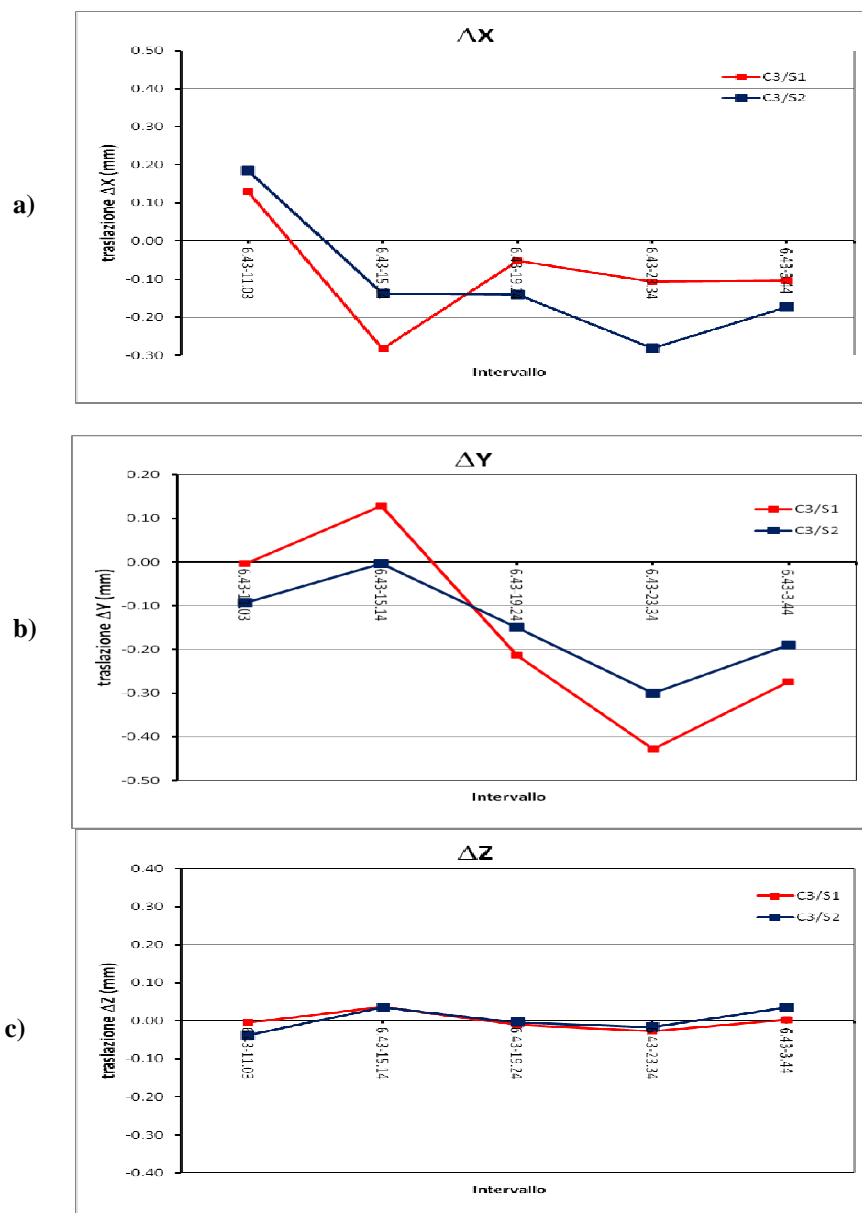


Figura 9: Spostamento dei punti C3/S1 (rosso) e C3/S2 (blu) a)  $\Delta x$  b)  $\Delta y$  c)  $\Delta z$  d) spostamento planimetrico complessivo

## 2 RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Il monitoraggio con tecniche fotogrammetriche è stato effettuato per ragioni logistiche su due soli carrelli ( $C_1$  e  $C_3$ ) orientando l'asse di presa verso il basso, quindi con modalità analoghe a quelle della fotogrammetria aerea. Per le operazioni di presa si è utilizzata la camera digitale Canon Eos-01 Mark II, con obiettivo a focale fissa di 50 mm, montata su slitta e treppiedi fotografico (fig. 10). Sulla parete superiore dei carrelli sono stati applicati target fotogrammetrici circolari, successivamente utilizzati come punti di legame (tie-points), indicati con la lettera D. Sui due carrelli sono state acquisite complessivamente 4 coppie stereoscopiche, effettuando le prese sempre nell'arco di una giornata, alle 10:00, alle 14:00, alle 15:30 e alle 18:00 (fig. 11)



Figura 10: Presa fotogrammetrica



Figura 11: Coppie stereoscopiche del carrello C1 a) ore 14:30 b) ore 18:30



La distanza di presa di presa è stata determinata in funzione dei valori degli s.q.m. delle coordinate del punto oggetto, secondo le note relazioni<sup>13</sup>

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sqrt{m_b^2 \sigma_\xi^2 + \left(\frac{\xi_1}{c} m_b \frac{Z}{B}\right)^2 \sigma_{P_\xi}^2} \\ \sigma_y &= \sqrt{m_b^2 \sigma_\eta^2 + \left(\frac{\eta_1}{c} m_b \frac{Z}{B}\right)^2 \sigma_{P_\xi}^2} \\ \sigma_z &= m_b \frac{Z}{B} \sigma_{P_\xi}\end{aligned}\tag{2}$$

dove:

- $c$  è la focale della camera
- $Z$  è la distanza di presa
- $B$  è la base di presa
- $Z/B$  è l'inverso del rapporto di base
- $m_b = Z/c$  è il denominatore della scala media del fotogramma
- $\xi_1, \eta_1$  sono le coordinate del punto immagine misurate sui fotogrammi
- $\sigma_\xi, \sigma_\eta$  sono gli s.q.m. delle coordinate dei punti immagine
- $\sigma_{P_\xi}$  è lo s.q.m. della parallasse  $P_\xi$

Avendo fissato la base di presa pari al massimo spostamento consentito dalla slitta fotogrammetrica (circa 7 cm), note la focale, la risoluzione e le dimensioni del sensore, e ipotizzato valori di parallasse tangenziale sub-pixel (successivamente verificati), la distanza di presa massima è risultata pari a 65 cm. Anche in questo caso l'analisi dei dati fotogrammetrici è stata finalizzata a determinare l'andamento nel corso della giornata delle coordinate dei tie-points ed a valutare la compatibilità dei risultati ottenuti con il modello strutturale disponibile.

L'elaborazione è stata articolata in quattro fasi: calibrazione della camera per eliminare le distorsioni radiali e tangenziali; orientamento interno, relativo ed assoluto delle coppie stereoscopiche; estrazione delle coordinate dei tie-points; analisi dell'andamento delle coordinate nell'arco della giornata.

La calibrazione è stata condotta con l'ausilio di una griglia di calibrazione formata da punti e forme di coordinate note (fig. 12); le immagini della griglia sono state acquisite da una distanza di presa uguale a quella utilizzata durante la sperimentazione così da riprodurre le stesse condizioni di messa a fuoco.

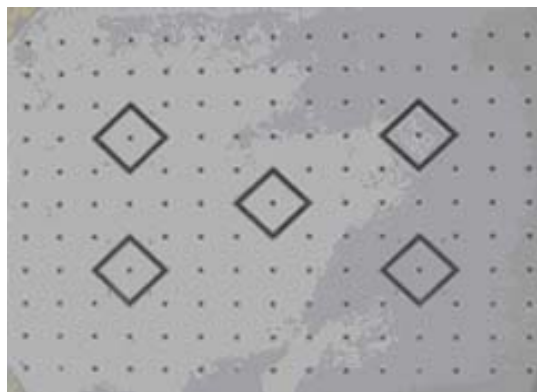


Figura 12: Reticolo di calibrazione

Si è utilizzato il software *PI-Calib* (fig. 13) che permette di ricavare i valori dei sette parametri (la distanza focale, le coordinate x, y del punto principale, i due coefficienti relativi alla distorsione radiale e i due relativi alla distorsione tangenziale) e le dimensioni del pixel necessari all'orientamento interno (tab. III).

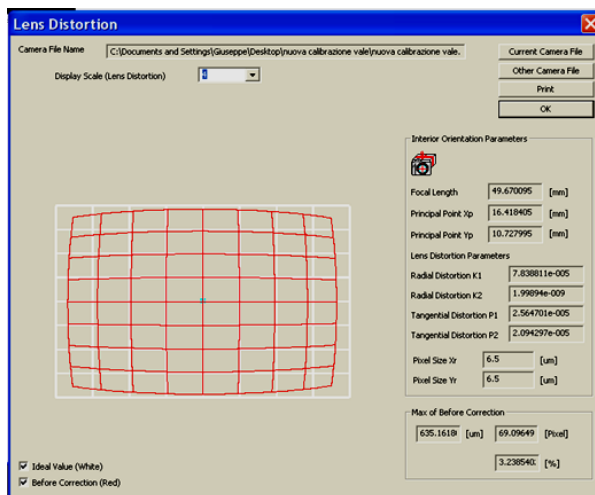


Figura 13 – Schermata del software *PI-Calib*

Focale	49.6701 mm
Xpp	16.4184 mm
Ypp	10.728 mm
pixel size (x)	0.0065 mm
pixel size (y)	0.0665 mm

Tabella 3: Parametri di orientamento interno

Le successive tre fasi di elaborazione sono state effettuate con l'impiego del software *Image Master* della Topcon, tradizionalmente utilizzato per l'estrazione di modelli a nuvola di punti da coppie stereoscopiche e caratterizzato da potenti algoritmi di image-matching e bundle adjustment necessari per ottenere precisioni sub millimetriche.

Le operazioni di orientamento relativo ed assoluto, di fondamentale importanza per ottenere le precisioni richieste, sono state condotte utilizzando, come punti di legame e di appoggio, target circolari opportunamente progettati. I tie-points sono stati disposti sia sulla parte fissa che su quella mobile del carrello (fig. 14). Il sistema di riferimento esterno, necessario per la fase di orientamento assoluto, è stato materializzato mediante una cornice su cui sono stati riportati punti di coordinate note (punti di appoggio) disposti su due righe, individuate rispettivamente dalle lettere A e B (fig.15). Nella tabella IV sono riportati i valori delle coordinate dei punti di appoggio.

Il software, tramite algoritmi di *image-matching*, individua il centro dei target relativi ai tie-points ed ai punti di appoggio in modo semi-automatico e indipendente dalle capacità dell'operatore. Tre dei punti di appoggio sono stati inseriti come punti di controllo (fig. 16) e ne sono state calcolate le coordinate. Il confronto di quest'ultime con quelle riportate nella tabella IV ha permesso di calcolare gli scarti che sono risultati di un ordine di grandezza inferiore rispetto all'accuratezza richiesta.

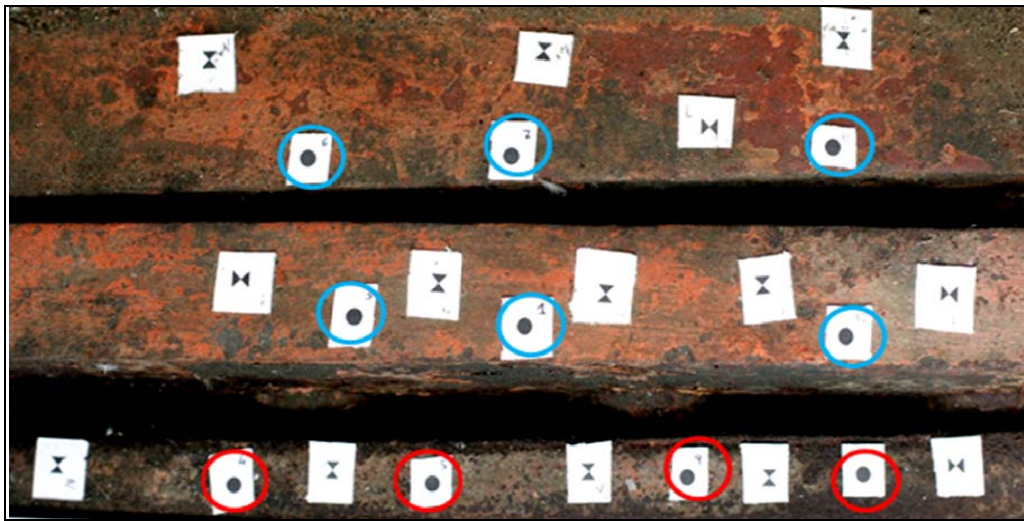


Figura 14: Tie-points: parte fissa (rosso), parte mobile (blu)

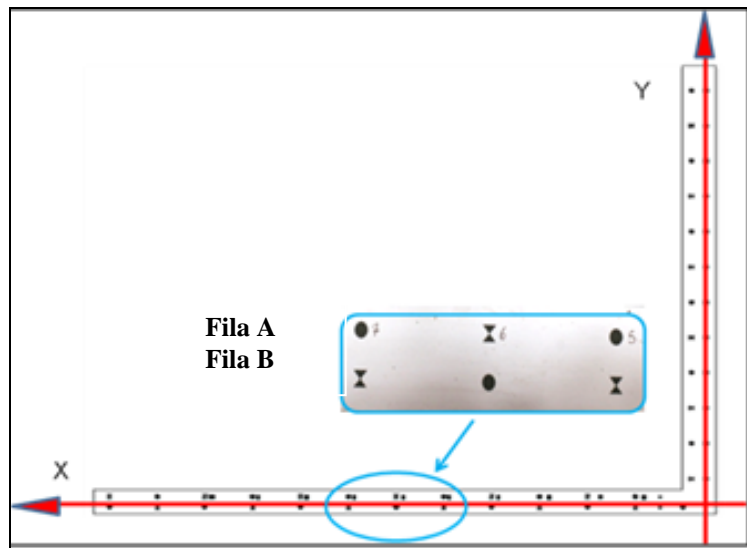


Figura 15: Cornice dei punti di appoggio

PUNTO	X		Y	
	A	B	A	B
1	0.015	0.000	0.10	0.10
2	0.015	0.000	0.15	0.15
3	0.015	0.000	0.20	0.20
4	0.015	0.000	0.25	0.25
5	0.015	0.000	0.30	0.30
6	0.015	0.000	0.35	0.35
7	0.015	0.000	0.40	0.40
8	0.015	0.000	0.45	0.45
9	0.015	0.000	0.50	0.50

Tabella 4: Coordinate dei punti di appoggio

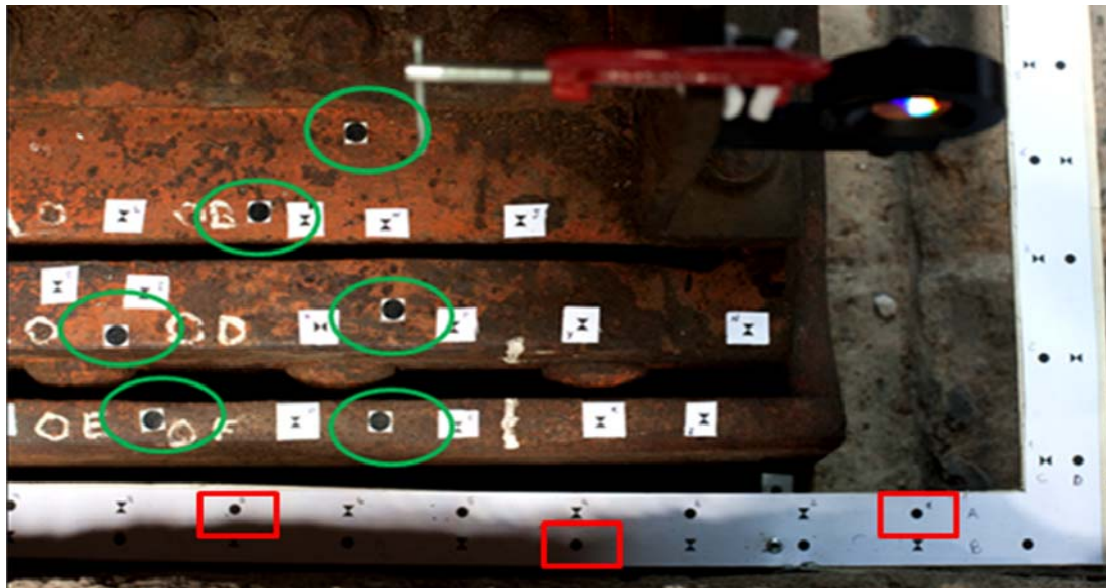


Figura 16: Punti di controllo (rosso), tie-points (verde)

Le tabella V e VI riportano i valori delle parallassi risultanti dall'orientamento relativo che sono risultati essere tutti sub-pixel coerentemente con l'ipotesi iniziale del progetto delle prese. Nella tabella VII sono riportate i valori delle coordinate e degli spostamenti dei punti D01 e D06, relativamente alle 4 prese; mentre la figure 17 illustra gli spostamenti  $\Delta X$  e  $\Delta Y$  degli stessi punti nei tre intervalli temporali. Il punto D06, posto sulla parte fissa, è risultato avere spostamenti di gran lunga inferiori a quelli del punto D01, come del resto era prevedibile.

Punti	ore 14:30					
	Y-Parallase dei Tie Points			coordinate		
	id punto	y-prx [pixel]	y-prx[mm]	X[m]	Y[m]	Z[m]
Punti di Appoggio	3	0.02	0.0116	0.02	0.15	0
	4	0.01	0.055	0.00	0.20	0
	5	-0.16	-0.01033	0.02	0.25	0
	6	0.31	0.1988	0.00	0.30	0
	7	-0.01	-0.0064	0.02	0.35	0
	8	0.05	0.0354	0.00	0.40	0
	9	-0.01	-0.0074	0.02	0.45	0
Tie Points	D05	-0.16	-0.01056	0.0561	0.2524	0.0108
	D06	-0.09	-0.0597	0.0549	0.3497	0.0136
	D04	-0.05	-0.0356	0.0962	0.2257	0.0567
	D01	-0.02	-0.0125	0.0945	0.3417	0.0598
	D07	-0.02	-0.0129	0.1416	0.358	0.0583
	D02	0.13	0.0856	0.1443	0.2625	0.0558

Tabella 5: Coordinate assolute dei tie-point e valori della parallasse

ore 18:00						
Punti	Y-Parallasse dei Tie Points			coordinate		
	id punto	y-prx [pixel]	y-prx[mm]	X[m]	Y[m]	Z[m]
Punti di Appoggio	3	-0.04	-0.0284	0.015	0.15	0
	4	0.04	0.0284	0	0.2	0
	5	-0.07	-0.0469	0.015	0.25	0
	6	0.08	0.0511	0	0.3	0
	7	-0.05	-0.0316	0.015	0.35	0
	8	0.22	0.01441	0	0.4	0
	9	-0.23	-0.01488	0.015	0.45	0
Tie Points	D05	-0.02	-0.011	0.0561	0.2522	0.0116
	D06	0.01	0.044	0.0549	0.3495	0.015
	D04	-0.08	-0.0492	0.0962	0.2253	0.0575
	D01	0.01	0.071	0.0945	0.3413	0.0613
	D07	0.08	0.0501	0.1417	0.3576	0.06
	D02	0.06	0.0415	0.1444	0.2622	0.0568

Tabella 6: Coordinate assolute dei tie-point e valori della parallasse

D01 Coordinate				D06 Coordinate			
	X (m)	Y (m)	Z (m)		X (m)	Y (m)	Z (m)
presa 14	0.0945	0.3417	0.0598	presa 14	0.0549	0.3497	0.0136
presa 18	0.0945	0.3413	0.06	presa 18	0.0549	0.3495	0.0138
presa 10	0.0941	0.3406	0.0621	presa 10	0.0547	0.3492	0.0144
presa 15:30	0.0943	0.3407	0.0619	presa 15:30	0.0548	0.3493	0.0139
Intervallo	Spostamenti			Intervallo	Spostamenti		
	$\Delta X$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Z$ (mm)		$\Delta X$ (mm)	$\Delta Y$ (mm)	$\Delta Z$ (mm)
14 - 18	0.011	-0.457	0.174	14 - 18	0.036	-0.16	0.148
18-ott	-0.431	-0.667	2.098	18-ott	-0.188	-0.294	0.659
10 - 15:30	0.271	0.152	-0.155	10 - 15:30	0.118	0.082	-0.529

Tabella 7: Coordinate e spostamenti

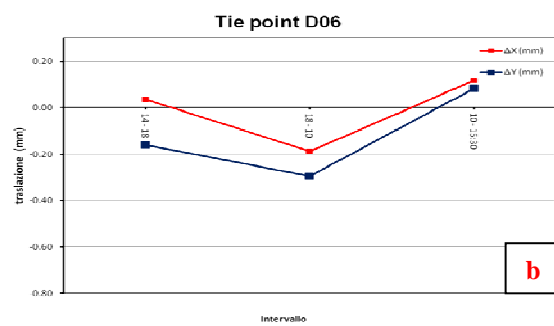
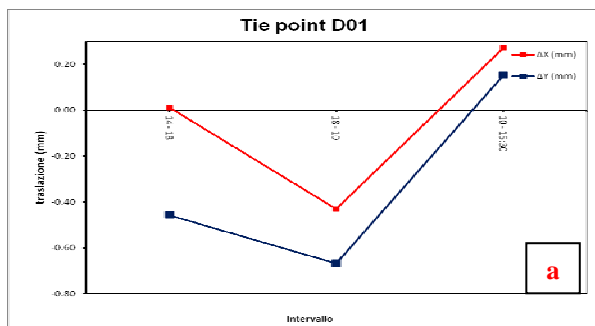




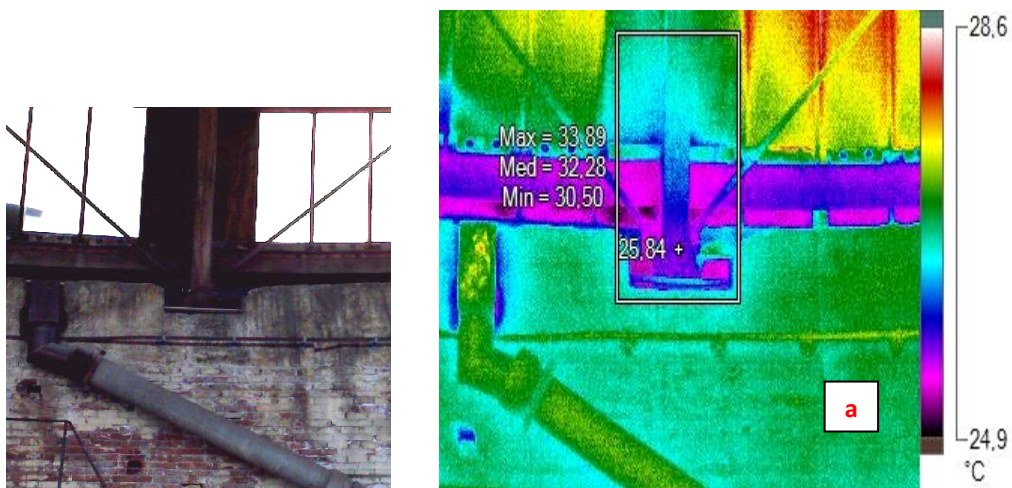
Figura 17: Spostamento dei tie-points a) D01 b) D06

#### 4 DATI TERMOGRAFICI

Durante le 24 ore, e precisamente alle 10, alle 15 e alle 20, contestualmente al rilievo topografico e fotogrammetrico, al fine di mettere in relazione gli spostamenti con le dilatazioni indotte dai gradienti termici dell'acciaio, sono state realizzate tre prese con la termocamera *Flucke TiR 32* (fig. 18). Le immagini termografiche hanno mostrato che l'acciaio durante la giornata è soggetto a gradienti termici di circa 6 gradi (fig. 19). Questo dato, utilizzato come input per il modello strutturale, ha permesso di verificare la congruenza tra gli spostamenti previsti e quelli misurati. In particolare, per ogni grado di gradiente termico il modello strutturale prevedeva spostamenti dell'ordine di 0.8 mm.



Figura 18: Termocamera *Flucke TiR 32*



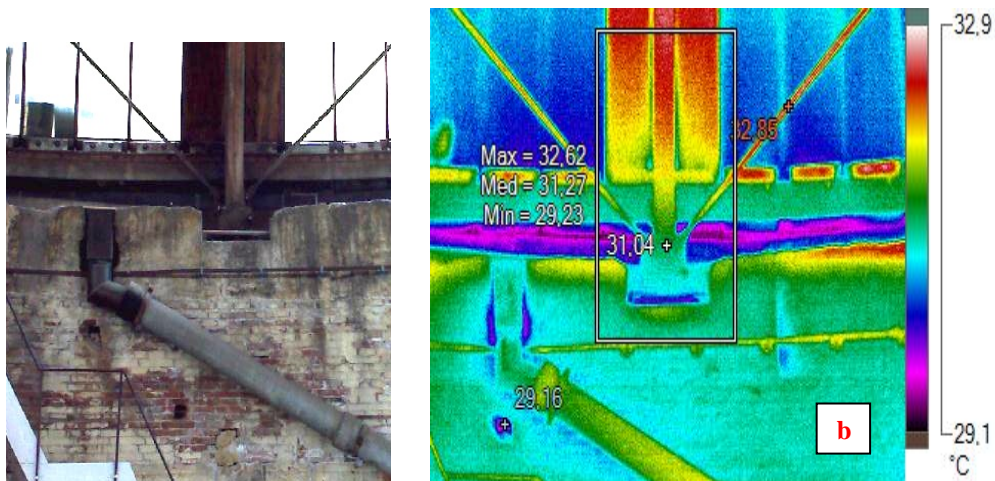


Figura 19: Termografie relative al carrello C1 a) ore 10:00 b) 20:00

## 5 CONCLUSIONI

Il progetto del rilevamento topografico e fotogrammetrico è stato finalizzato ad ottenere incertezze di misura di un ordine di grandezza inferiore a quello degli spostamenti attesi; se infatti tale valore fosse risultato dello stesso ordine di grandezza o addirittura superiore a quello degli eventuali spostamenti, non sarebbe stato possibile distinguere lo spostamento stesso dagli errori di misura.

I risultati ottenuti al termine di questa prima fase di sperimentazione evidenziano spostamenti relativi quasi esclusivamente alle direzioni X e Y; come era prevedibile, lungo la coordinata Z gli spostamenti sono praticamente nulli. Gli spostamenti determinati topograficamente, inoltre, risultano della stessa entità di quelli ottenuti fotogrammetricamente e per entrambi i metodi il valore medio dello spostamento assoluto dei carrelli relativo risulta praticamente identico, pari a circa 0.8 mm.

Questo risultato, perfettamente in linea con le previsioni derivate dallo studio del modello teorico, dimostra, da un lato, che i carrelli assolvono ancora oggi ottimamente il loro compito, dall'altro, che entrambe le tecniche, topografiche e fotogrammetriche, se ovviamente utilizzate con le dovute cautele, sono assolutamente adeguate alla determinazione di spostamenti sub-millimetrici.

Rispetto al metodo fotogrammetrico, quello topografico ha due fondamentali vantaggi: quello della completa automazione delle operazioni di misura, a parte il ciclo iniziale che richiede necessariamente l'intervento manuale, e quello della rapidità dell'elaborazione dei dati; infatti, lo strumento è solitamente corredato da un software che fornisce rapidamente valori delle coordinate, dei parametri statistici relativi alla qualità delle misure e degli spostamenti evidenziati. Il punto di forza del metodo fotogrammetrico è invece essenzialmente legato al costo dell'attrezzatura, notevolmente inferiore a quello richiesto per l'acquisto della strumentazione occorrente per il rilievo topografico; d'altra parte però, le fasi di elaborazione dei dati (orientamento e restituzione delle coordinate) richiedono tempi più lunghi e maggiore potenza di calcolo.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Sh. Amini, M. Varshosaz, M. Saadatseresht, *Deformation determination of aircraft parts by photogrammetry*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, part B5, 135-138 (2008).
- [2] L. Barazzetti, M. Scaioni, *Metodi fotogrammetrici per la misura delle deformazioni nelle prove sui materiali da costruzione*. Atti della 12a Conferenza Nazionale Asita, 263-268 (2008).
- [3] R. Brigante, D. Dominici, G. Fastellini, F. Radicioni, A. Stoppini, *Confronto e integrazione fra tecniche geomatiche per la documentazione e il monitoraggio dei beni culturali*. Atti della 13a Conferenza Nazionale Asita, 537-542 (2009).
- [4] U. Coppa, A. Guarnieri, F. Pirotti, A. Vettore, *Integrazione di tecniche di rilevamento per il controllo di stabilità di una struttura storica*. Atti del Convegno Nazionale Sifet, 174-181 (2008).
- [5] D. Dominici, G. Fastellini, F. Radicioni, A. Stoppini, *An integrated monitoring system for the monumental walls of Amelia*. Proc. of the 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation measurement and Analysis (2008).
- [6] R. Galetto, A. Spalla, *Lezioni di Topografia*, CUSL, Pavia (2000).
- [7] S. Grassi, F. Radicioni, A. Stoppini, *Monitoraggio tridimensionale in tempo reale delle deformazioni: Prove in condizioni operative su una stazione totale automatica di alta precisione*, Atti della 13a Conferenza Nazionale Asita (2003).
- [8] P. Grussenmeyer, T. Landes, T. Voegtle, K. Ringle, *Comparison methods of terrestrial laser scanning, photogrammetry and tacheometry data for recording of cultural heritage buildings*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, part B5, 213-218 (2008).
- [9] F. Guazzetti, A. Trebeschi, *Digital photogrammetric workstation e modellazione in un esempio di fotogrammetria dei vicini*, Boll. Sifet, 2, 143-154 (1995).
- [10] M. J. Henriques, P. B. Mateus, P. Palma, H. Cruz, *Modelling the behaviour of a large span glulam arch of Atlântico Pavillion*, Proc. of the 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation measurement and Analysis, (2008).
- [11] S. H. Junga, J. H. Yua, J. K. Leeb, L. Gea, *Automatic modelling method for steel structures using photogrammetry*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, part B5, 169-174 (2008).
- [12] M. Kasser, Y. Egels, *Digital Photogrammetry*, Taylor & Francis (2002)
- [13] K. Kraus, *Photogrammetry Vol. 1 & Vol. 2, Advanced Methods and Applications*, Levrotto & Bella Ed., Dummer/Bonn (1997).
- [14] W. Linder, *Digital Photogrammetry. Theory and Applications*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York (2003).
- [15] D. Palazzo, R. Friedmann, C. Nadal, M. Santos Filho, L. Veiga, P. Faggion, *Dynamic monitoring of structures using a robotic total station*, Proc. of the 13<sup>th</sup> FIG Congress Shape the Change, (2006).
- [16] A. Pozzoli, *Ricerca esaustiva e soluzione diretta dall'orientamento relativo all'orientamento assoluto*, Atti 7a Conferenza Nazionale ASITA (2003).
- [17] R. Roncella, G. Forlani, L. Pinto, *Photogrammetric Survey of Ancients Musical Instruments*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, part B5, 309-314 (2008).
- [18] A. Selvini, F. Guzzetti, *Fotogrammetria generale*, UTET, Torino (2000).

- [19]NG. Tsan-wing, L. Kin-wah, *Deformation survey for the preservation of lei Cheng Uk Han tomb*, Proc. of the 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 294-301 (2001).
- [20]F. Yilmazturk, S. Kulur, N. Terzib, *Determination of displacements in load tests with digital multimedia photogrammetry*, Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVII, part B5, pp. 719-721 (2008).