

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



26202825

Kandidat:

Vid Peterman

Fotogrametrična določitev deformacij površine jeklenega nosilca z večslikovno metodo

Diplomska naloga št.: 856

Mentor:
doc. dr. Mojca Kosmatin Fras

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **VID PETERMAN** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
**»FOTOGRAMETRIČNA DOLOČITEV DEFORMACIJ POVRŠINE JEKLENEGA
NOSILCA Z VEČSLIKOVNO METODO«.**

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz edla za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Ljubljana , 06. 03. 2011

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 528.7:624.014.2:624.072.2(043.2)
- Avtor:** Vid Peterman
- Mentor:** doc. dr. Mojca Kosmatin Fras
- Naslov:** Fotogrametrična določitev deformacij površine jeklenega nosilca z večslikovno metodo
- Obseg in oprema:** 69 str., 38sl., 9 preg., 42 en., 4 pril.
- Ključne besede:** bližnjieslikovna fotogrametrija, večslikovni zajem, direktna linearna transformacija, aplikacija v gradbeništvu, deformacije površine, jekleni nosilec

Izvleček:

Nemerski digitalni fotoaparati so v zadnjih nekaj letih tehnično precej napredovali. V diplomskem delu sem raziskal in testiral primernost uporabe nemerskih digitalnih fotoaparatorov za spremljanje deformacij. Izvedena sta bila dva predhodna eksperimenta in nato končna meritev deformacij. V prvem predhodnem eksperimentu je bila na podlagi testa učinkovitosti metode slikovnega ujemanja in geometrične natančnosti slikovnih meritev ocenjena empirična ločljivost fotoaprata. Na podlagi rezultatov prvega predhodnega testa smo v drugem predhodnem testu preizkusili konfiguracijo s tremi fotoaparati in njihovo primernost za trirazsežno fotogrametrično merjenje deformacij. Izvedli smo testno večslikovno meritev deformacij na jeklenem nosilcu. V ta namen smo kombinirali ustrezne merske postopke in razvili potrebno programsko opremo, s katero smo obdelali fotografije in izračunali deformacije. Na podlagi rezultatov predhodnih testov smo v končnih eksperimentih fotogrametrično izmerili deformacije na štirih vzdolžno ojačanih polnostenskih nosilcih, ki smo jih v okviru tritočkovnih testov obremenjevali s hidravličnim batom. V končnih fotogrametričnih meritvah deformacij smo uporabili tri nemerske fotoaprata Canon EOS 5 Mk II. Položaje signaliziranih točk na nosilcu, iz katerih smo računali deformacije, smo izračunali po metodi direktne linearne transformacije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 528.7:624.014.2:624.072.2(043.2)
Author: Vid Peterman
Supervisor: Assist. Prof. dr. Mojca Kosmatin Fras, Univ.Grad.in Geod.Eng.
Title: Photogrammetric assessment of steel girder surface deformations with multi image acquisition
Notes: 69 p., 38 fig., 9 tab., 42 eq., 4 ann.
Key words: close range photogrammetry, multi image acquisition, direct linear transformation, application in civil engineering, surface deformation, steel girder

Abstract:

Non-metric consumer cameras have become more and more advanced in the recent years. Their capability to measure deformations has been investigated and described in the diploma thesis. Two preliminary experiments were conducted before the final deformation measurements. In the first preliminary experiment a test of efficiency of the image matching method and geometric accuracy of image measurements was conducted. Based on this test, second preliminary test was conducted in order to test configuration of three non-metric cameras, and their suitability to measure photogrammetrically 3D deformations. A multi image measurements of deformations of a steel girder were conducted. Based on the outcome of these tests, close range photogrammetry was used to measure deformations of longitudinally stiffened plated girders in a bending-shear interaction experiment. In this final experiment three non-metric cameras Canon EOS 5 Mk II were used to document deformations. Positions of targeted points in each steel girder, from which deformations were calculated, were computed with the direct linear transformation.

ZAHVALA

Mentorici doc. dr. Mojci Kosmatin Fras se zahvaljujem za idejo za diplomsko nalogo ter za nasvete in pomoč pri izdelavi diplomske naloge. Prof. dr. Darku Begu se zahvaljujem za izkazano zaupanje pri odločitvi, da fotogrametrično izmerimo deformacije na polnostenskih jeklenih nosilcih. Franciju Sinurju in njegovi ekipi pa se zahvaljujem za konstruktivno pomoč pri pripravi eksperimentov in izvedbi meritev.

Iskreno se zahvaljujem Tomažu Gvozdanoviću, Tomažu Izaku, Mohorju Kunšiču in Mihi Mikošu, ki so mi posodili fotoaparate, s katerimi sem izvajal meritve.

Posebna zahvala gre tudi gospodu Karlu Oskarju Dolencu za nasvete in pomoč pri izvedbi fotografiranja ter za izposojlo fotoaparata in ostale fotografske opreme.

Zahvaljujem se tudi staršem in vsem ostalim, ki so mi ob pisanju diplome stali ob strani in mi nudili moralno in intelektualno podporo.

1 UVOD	1
2 TEORETIČNE OSNOVE	5
2.1 Samodejna meritev označenih točk	5
2.1.1 Križna korelacija	5
2.1.2 Slikovno ujemanje po metodi najmanjših kvadratov	6
2.2 Helmertova transformacija	11
2.3 Afina Transformacija	12
2.6 Projektivna transformacija	12
2.4 Direktna linearna transformacija	14
3 TEST EMPIRIČNE LOČLJIVOSTI DIGITALNEGA FOTOAPARATA	18
3.1 Uvod	18
3.2 Metodologija	19
3.3 Obdelava in rezultati	20
3.3.1 Izmera križev na prvem posnetku v seriji	20
3.3.2 Izračun premikov med zaporednimi posnetki	21
3.3.3 Projektivna transformacija premikov križev testnega polja	22
3.3.4 Helmertova transformacija in ocena natančnosti izmerjenih premikov	23
3.4 Komentar in analiza rezultatov	24
4 TEST FOTOGAMETRIČNE MERITVE DEFORMACIJ	26
4.1 Uvod	26
4.1.1 Opis lokalnega koordinatnega sistema	27
4.2 Metodologija	28
4.3 Uporabljeni fotoaparati	28
4.4 Kalibracija fotoaparatom	28
4.5 Izvedba tritočkovnega testa in fotografiranje	29
4.6 Določitev koordinat oslonilnih točk	31
4.7 Računska obdelava	32
4.7.1 Odprava radialne distorzije na fotografijah	32
4.7.2 Meritev premikov označenih točk med zaporednimi fotografijami	33

4.7.3 Direktna linearna transformacija	36
4.7.4 Rezultati	36
4.7.5 Analiza rezultatov	41
5 FOTOGRAMETRIČNA DOLOČITEV DEFORMACIJ POVRŠINE JEKLENIH NOSILCEV Z VEČSLIKOVNO METODO	43
5.1 Uvod	43
5.1.1 Opis lokalnega koordinatnega sistema	44
5.2 Metodologija	44
5.3 Razlike med testno meritvijo deformacij in fotogrametrično določitvijo deformacij površine jeklenih nosilcev	45
5.4 Določitev položajev oslonilnih točk	46
5.5 Fotografiranje	47
5.6 Računska obdelava posnetih fotografij	49
5.6.1 Izračun začetne oblike nosilca	49
5.6.2 Izračun deformacij površine nosilca	50
5.7 Analiza rezultatov	52
6 ZAKLJUČEK	55
VIRI	57

KAZALO SLIK

- Slika 1: Primer deformacij na polnostenskem nosilcu
- Slika 2: Shema poteka raziskovalne naloge
- Slika 3: Primer sintetične tarče
- Slika 4: Primer naravne tarče
- Slika 5: Primer območja iskanja
- Slika 6: Tarča, idealen primer križa
- Slika 7: Iskalno okno, izrezano iz posnetka
- Slika 8: Prevzorčenje tarče
- Slika 9: Skica Helmertove transformacije
- Slika 10: Skica afine transformacije
- Slika 11: Skica projektivne transformacije
- Slika 12: Primer fotografije iz testa empirične ločljivosti digitalnega fotoaparata
- Slika 13: Shema računske obdelave fotografij
- Slika 14: Izmerjeni centri križev na prvi fotografiji v peti seriji
- Slika 15: Izris premikov križev med drugo in tretjo fotografijo v peti seriji, obe fotografiji posneti v istem merilu (prikazani premiki povečani za 1000x)
- Slika 16: Izris premikov križev med šest in sedmo fotografijo v peti seriji, sedma fotografija posneta v manjšem merilu kot šesta (prikazani premiki povečani za 1000x)
- Slika 17: Projektivna transformacija izmerjenih premikov križev testnega polja iz slikovnega koordinatnega sistema v koordinatni sistem testnega polja
- Slika 18: Scena testne meritve deformacij na jeklenem tramu
- Slika 19: Shema poteka testne meritve deformacij
- Slika 20: Primer fotografije testnega polja za kalibracijo fotoaparata
- Slika 21: Fotografija začetnega stanja, posneta s fotoaparatom Canon EOS 400D
- Slika 22: Skica postavitve fotoaparata
- Slika 23: Fotografija testne meritve deformacij pred odpravo radialne distorzije
- Slika 24: Fotografija testne meritve deformacij po odpravljeni radialni distorziji
- Slika 25: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Eos 450D
- Slika 26: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Cannon Eos 450D
– brez ozadja

Slika 27: Izrisani premiki (povečani za faktor 50x) med 1. in 2. posnetkom Cannon Eos 400D

Slika 28: Izrisani premiki (povečani za faktor 50x) med 1. in 2. posnetkom Pentax K200 D

Slika 29: Kartonska podlaga točke 1 med premikom 8 pritisne na ročico, ki drži merilno urico, in se med premikom 10 deformira.

Slika 29: Kartonska podlaga točke 1 med premikom 8 pritisne na ročico (leva slika), ki drži merilno urico, in se med premikom 10 deformira (desna slika)

Slika 30: Izvedba meritve ploskovnih deformacij na jeklenem polnostenskem nosilcu

Slika 31: Primerjava uporabljenih tač za oslonilne točke v predhodnem (levo) in končnem (desno) testu

Slika 32: Tloris mreže za določitev koordinat oslonilnih točk

Slika 33: Fotoaparat Canon EOS 5 Mark II

Slika 34: Fotografija razbremenjenega nosilca, na katerem so vidne plastične deformacije nosilca

Slika 35: Fotografije začetnega stanja nosilca, z izmerjenimi položaji oslonilnih (zeleni križi) in detajlnih točk (rdeči križi), ter izračunana začetna oblika nosilca

Slika 36: Primer izmerjenih premikov točk izven ravnine na opazovanem delu nosilca, po zaključku testa (deformacije izven ravnine - končno stanje)

Slika 37: Primer izmerjenih vertikalnih pomikov točk na opazovanem delu nosilca, po zaključku testa (vertikalne deformacije - končno stanje)

Slika 38: Graf primerjave pomikov iz ravnine na kontrolni točki 14, izmerjenih fotogrametrično (rdeča graf) in z induktivnim merilcem (moder graf), po posameznih korakih obremenitve nosilca

KAZALO PREGLEDNIC

- Preglednica 1: Pregled ocenjene natančnosti izmerjenih premikov centrov križev po posameznih serijah
- Preglednica 3: Primerjava ocenjenih absolutnih natančnosti izračunanih premikov v primeru različnih kombinacij podatkov, ocenjenih na podlagi izravnave
- Preglednica 2: Tehnični podatki uporabljenih fotoaparatorov
- Preglednica 4: Primer izmerjenih vertikalnih premikov detajlnih točk (dZ) na tramu med zaporednimi fotografijami [mm]
- Preglednica 5: Primerjava izračunanih relativnih vertikalnih premikov s kontrolnimi meritvami [mm]
- Preglednica 6: Primerjava kontrolnih horizontalnih meritev premikov detajlne točke 1 z vrednostmi izračunanimi z direktno linearno transformacijo
- Preglednica 7: Primer izračunanih vrednosti premikov stacionarnih točk v vertikalni smeri [mm]
- Preglednica 8: Natančnost določitve premikov stacionarnih točk [mm]
- Preglednica 9: Ocenjene natančnosti s katerimi smo izmerili deformacije površine v smeri X (izven ravnine)

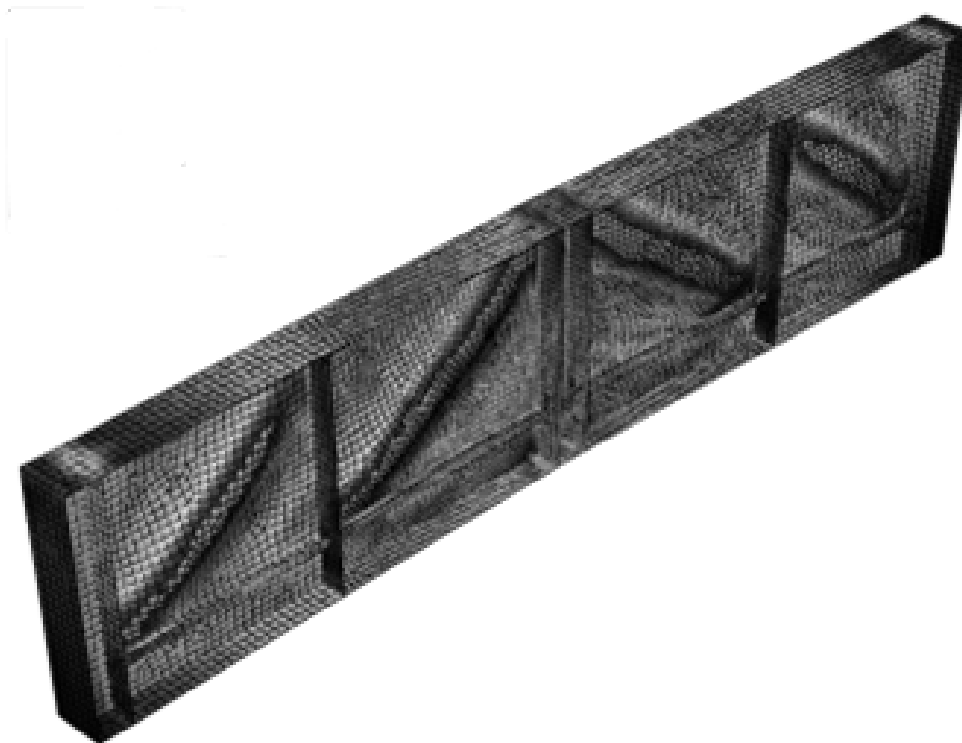
1 UVOD

Večino informacij ljudje zberemo na podlagi vida. To velja na primer za informacije kot so znanje, ki ga najdemo v knjigah, neverbalno komunikacijo, ki jo zabeležimo med pogovori, ter za zelo pomembne informacije o fizičnem okolju, ki nas obdaja. V obdobju zadnjih 150 let se je v geodeziji, arhitekturi, medicini ter na drugih področjih uveljavila merska tehnika določitve oblike in velikosti opazovanih objektov iz njihovih fotografij. Merska tehnika se imenuje fotogrametrija in za stereoskopsko merjenje izkorišča fiziologijo človeškega vida. Sama fotogrametrija se deli na dve glavni področji: na bližnjelikovno fotogrametrijo in na topografsko fotogrametrijo.

Medtem, ko se topografska fotogrametrija v glavnem ukvarja z določitvijo oblike Zemljinega površja na osnovi podatkov pridobljenih iz letalskih oziroma satelitskih posnetkov, se bližnjelikovna fotogrametrija ukvarja z določitvijo oblike precej manjših objektov. Postopki bližnjelikovne fotogrametrije so pogosto praktično uporabljeni v različnih aplikacijah kot so določanje oblike zgradb, mostov, anten radio teleskopov, položajev in oblike zbirnih zrcal pri sončnih elektrarnah. Uporablja se tudi za dokumentiranje kulturne dediščine. V okviru forenzične fotogrametrije se bližnjelikovne metode uporabljajo za rekonstrukcijo prometnih nesreč ali prizorišč zločinov, kot pomoč pri identifikaciji storilcev kaznivih dejanj, ki se ujamejo na posnetke varnostnih kamer ipd. Pri bančnih ropih se pogosto s pomočjo bližnjelikovne fotogrametrije določi telesno višino roparjev. V okviru medicine se bližnjelikovna fotogrametrija uporablja za določitev oblike širokega nabora delov človeškega telesa, vključno z določitvijo oblike trupa, glave, okončin, prsi, stopal, kože, oči. Prav tako se uporablja za določitev oblike notranjosti našega telesa. V tem primeru se uporabljajo merske tehnike kot so na primer ultrazvok, radiografija, skeniranje z računalniško tomografijo ter preiskave z magnetno resonanco. V povezavi z medicino športa se fotogrametrija uporablja v študijah gibanja človeškega telesa.

Na naši fakulteti kolegi iz katedre za kovinske konstrukcije razvijajo računske modele, ki napovedujejo, kako se ojačani jekleni polnostenski nosilci deformirajo pod vplivom sile. Računske modele morajo tudi praktično preizkusiti. V ta namen izvajajo tri-točkovne obremenitvene eksperimente. V okviru eksperimenta vzamejo nosilec in ga podprejo na dveh

skrajnih točkah. Nato ga na sredini postopoma obremenjujejo. Pri tem jih zanima, kako se nosilec deformira. Izrazili so potrebo po sistemu, ki z visoko natančnostjo in visoko ločljivostjo izmeri obliko površine nosilca po vsaki stopnji obremenitve.

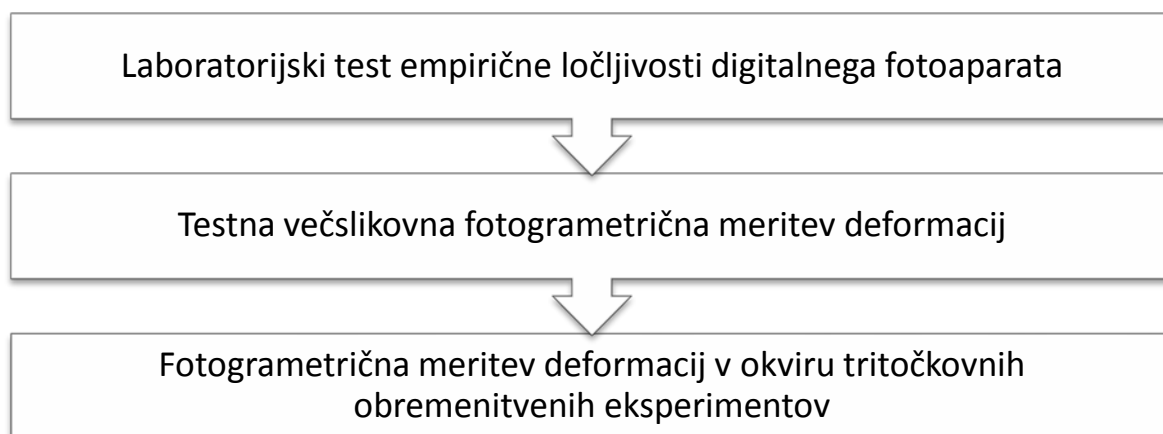


Slika 1: Primer deformacij na polnostenskem nosilcu

V ta namen so obravnavali uporabo različnih merskih sistemov, od uporabe avtomatiziranih tahimetrov, laserskega skeniranja, do uporabe bližnjelikovne fotogrametrije. Glavni prednosti fotogrametrije pred drugima tehnikama sta, da so položaji vseh opazovanih točk zajeti naenkrat, sama meritev pa je opravljena v trenutku.

Mentorica doc. dr. Mojca Kosmatin Fras mi je ponudila raziskovalno nalogo, v kateri sem najprej z laboratorijskimi testi izvedel raziskavo zmogljivosti fotoaparatorov višjega cenovnega razreda, da z zadostno ločljivostjo in natančnostjo zabeležijo deformacije na površini nosilcev, ter razvil programsko opremo in postopke, potrebne za izmero deformacij.

Metodološko je raziskovalna naloga potekala v treh fazah.



Slika 2 : Shema poteka raziskovalne naloge

V prvi fazi je bil opravljen enoslikovni test digitalnega fotoaparata in njegovih sposobnosti zaznavanja in merjenja premikov označenih točk. Testiral sem meritve premikov točk velikostnega reda 10 μm , 100 μm in 1 mm. Preizkusil sem tudi različne nastavitve fotoaparata, različne pogoje osvetlitve in različne oddaljenosti fotoaparata od označenih točk.

Na podlagi rezultatov prvega testa smo v drugi fazi poskusili praktično izmeriti trirazsežne deformacije jeklenega trama. V okolici trama smo postavili oslonilne točke, na tramu pa smo signalizirali detajlne točke. Tram smo nato postopoma obremenjevali. Med posameznimi stopnjami obremenitve smo s tremi digitalnimi fotoaparati istočasno napravili fotografije iz treh stojišč. Razvil sem programsko opremo, s katero sem obdelal fotografije, ter z večslikovno metodo izračunal trirazsežne deformacije trama.

Zaradi dobrih rezultatov v prvih dveh fazah je bila fotogrametrična metoda uporabljena tudi pri tritočkovnih obremenitvenih eksperimentih v tretji fazi. Uporabili smo izpopolnjene postopke iz druge faze in kvalitetnejšo opremo. V tretji fazi smo skupno izvedli štiri tritočkovne obremenitvene eksperimente. Pridobljeni rezultati deformacije ploskve nosilca pa so bili uporabljeni v doktorski disertaciji na temo deformiranja kovinskih konstrukcij.

V diplomski nalogi so najprej opisane teoretične osnove za izvedbo naloge, sledi opis praktične izvedbe vseh treh eksperimentov in rezultatov. V drugem poglavju so tako predstavljene teoretične osnove. Predstavljeni so postopki, ki omogočajo samodejno merjenje

točk na fotografijah in matematične transformacije, ki so bile uporabljene za izvednotenje in kontrolo rezultatov. V tretjem poglavju so predstavljeni izsledki prve faze raziskave, v kateri smo izvedli praktični test empirične ločljivosti digitalnega fotoaparata. V četrtem poglavju je predstavljena druga faza raziskave, v kateri smo praktično izvedli testno meritev deformacij. V petem poglavju pa je predstavljena tretja faza raziskave, ki predstavlja jedro in končni cilj naloge, v kateri smo v okviru pravih laboratorijskih eksperimentov fotogrametrično zabeležili in izmerili deformacije površine vzdolžno ojačanih polnostenskih nosilcev med tritočkovnimi obremenitvenimi testi.

2 TEORETIČNE OSNOVE

2.1 Samodejna meritev označenih točk

Položaje označenih točk na fotografijah določimo s samodejno meritvijo slikovnih koordinat. Poteka v dveh korakih. V prvem koraku se na podlagi izračuna količnika križne korelacije določi center križa na sliki na piksel natančno. V drugem koraku se določil center križa s podpikselsko natančnostjo z ujemanjem po metodi najmanjših kvadratov.

2.1.1 Križna korelacija

Križna korelacija je metoda za ocenjevanje stopnje podobnosti dveh vzorcev. Uporablja se tudi kot metoda slikovnega ujemanja v postopku samodejne meritve točk. V tem primeru računamo stopnjo podobnosti med dvema slikama oziroma tarčo in iskalnim oknom. V postopku samodejne meritve tarčo premikamo po območju iskanja in za vsak možen položaj tarče iz območja iskanja izrežemo iskalno okno. Nato za vsako iskalno okno ter tarčo izračunamo koeficient križne korelacije (Kraus, 1997):

$$\frac{\sum_{i,j} g_r(i,j) \cdot g_s(i,j)}{n \cdot \bar{g}_r \cdot \bar{g}_s} \quad (1)$$

Pri tem so:

- g_r ... matrika sivih vrednosti tarče,
- g_s ... matrika sivih vrednosti iskalnega okna,
- \bar{g}_r ... aritmetična sredina sivih vrednosti tarče,
- \bar{g}_s ... aritmetična sredina sivih vrednosti iskalnega okna,
- n ... število pikslov v tarči.

Koeficient r lahko zavzame vrednosti med -1 in 1. Vrednost koeficienta križne korelacije 1 pomeni, da sta tarča in izrez območja iskanja enaka, medtem ko vrednost koeficienta 0 pomeni, da sta tarča in izrez območja iskanja popolnoma različna. Vrednost -1 pa pomeni da

je tarča negativ iskanega okna. Vrednosti koeficienta križne korelacije 1, -1 ali 0 v realnih primerih nikoli ne dobimo. Najboljše ujemanje tarče in izreza iz območja iskanja je tam, kjer je vrednost koeficienta najbližje 1.

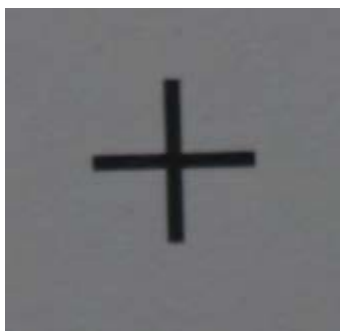
Če uporabljamo tarčo, ki je tudi izrezana iz posnetka, govorimo o naravni tarči, če pa je sestavljena umetno (na primer sestavljena v grafičnem programu), govorimo o sintetični tarči.



Slika 3: Primer sintetične tarče



Slika 4: Primer naravne tarče



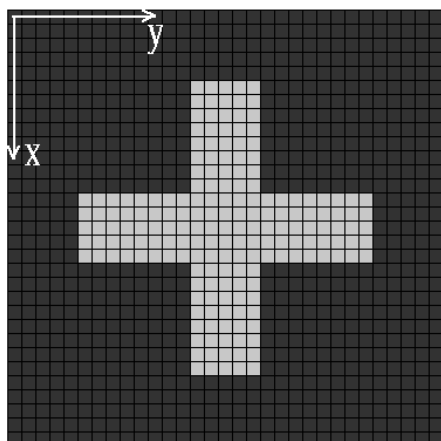
Slika 5: Primer območja iskanja

2.1.2 Slikovno ujemanje po metodi najmanjših kvadratov

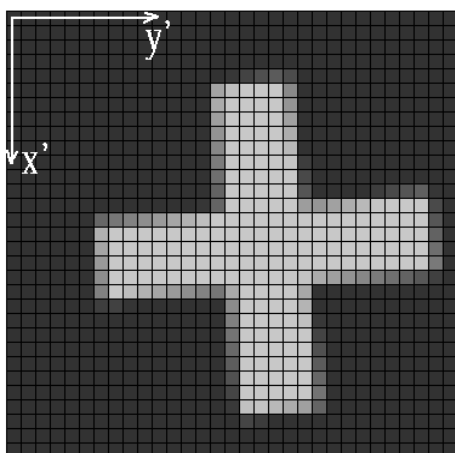
Slikovno ujemanje po metodi najmanjših kvadratov omogoča izračun točke najboljšega ujemanja tarče ter iskalnega okna s podpikselsko natančnostjo. Je ena najnatančnejših metod slikovnega ujemanja. Poleg radiometričnih se namreč upoštevajo tudi geometrične lastnosti vzorca. Ima pa eno slabo lastnost. Predhodno moramo namreč poznati točko najboljšega

ujemanja tarče ter iskalnega okna s pikselsko natančnostjo. Zato se ta metoda navadno kombinira z metodo iskanja največjega koeficienta križne korelacije.

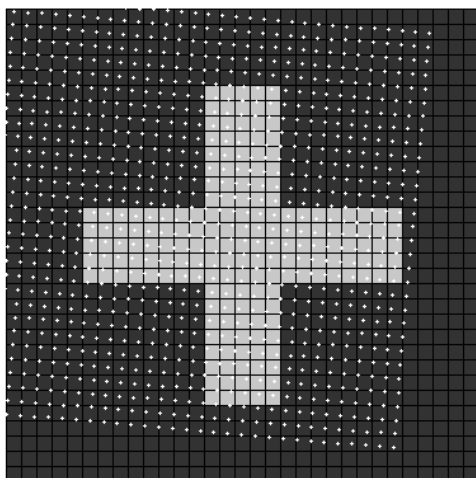
V postopku slikovnega ujemanja po metodi najmanjših kvadratov modeliramo zvezo med tarčo in iskalnim oknom z geometričnim modelom (šest parametrična afina transformacija) in z radiometričnim modelom (dvoparametrična transformacija). Slika 6 prikazuje tarčo v postopku slikovnega ujemanja, slika 7 pa iskalno okno. Pri obeh so poudarjene meje pikslov. Zveza med koordinatnima sistemoma tarče in iskalnim oknom je definirana s šest parametrično afino transformacijo. Slika 8 prikazuje prevzorčenje tarče iz slike 5 z afino transformacijo. V postopku slikovnega ujemanja torej iščemo rešitev, kako z afino transformacijo prevzorčiti tarčo, da bo enaka iskalnemu oknu.



Slika 6: Tarča, idealen primer križa



Slika 7: Iskalno okno, izrezano iz posnetka



Slika 8: Prezorčenje tarče

Matematično postopek slikovnega ujemanja poenostavljeno (če upoštevamo samo parametre geometričnega modela) zapišemo kot iskanje rešitve enačbe (J. Bethel, Least squares image matching for CE604, 1997) :

$$g(x, y) = h(x', y') \quad (2)$$

kjer sta koordinatna sistema tarče ter iskalno okno povezana z afino transformacijo

$$x' = a_1 x + a_2 y + a_3 \quad (3)$$

$$y' = b_1 x + b_2 y + b_3 \quad (4)$$

Razširjen model slikovnega ujemanja vključuje še radiometrična parametra za spremembo kontrasta in svetlosti. Zapis v obliki enačbe:

$$g(x, y) = k_1 h(x', y') + k_2 \quad (5)$$

Če to enačbo zapišemo v obliki pogojne enačbe, dobimo:

$$F = g(x, y) - k_1 h(x', y') - k_2 = 0 \quad (6)$$

Pri tem so iskane količine (oziroma neznanke) parametri $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, k_1$ in k_2 . Količine $g(x, y)$ so opazovanja, $h(x', y')$ pa konstante. To enačbo lahko lineariziramo v obliki:

$$v + B \Delta = f \quad (7)$$

Za začetne vrednosti neznank uporabimo vrednosti:

$$(8)$$

Koeficiente matrike B sestavljajo odvod enačbe (6) po neznankah (pri tem uporabimo začetne vrednosti neznank):

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (9)$$

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (10)$$

Vrednosti odvodov in izračunamo iz tonskih vrednosti območja iskanja po enačbi:

$$\text{-----} \quad (11)$$

$$\text{-----} \quad (12)$$

Po istem principu izračunamo ostale odvode funkcije iz enačbe (9) :

$$\text{---} \quad (13)$$

$$\text{---} \quad (14)$$

$$\text{---} \quad (15)$$

$$\text{---} \quad (16)$$

$$\text{---} \quad (17)$$

$$\text{---} \quad (18)$$

$$\text{---} \quad (19)$$

Ostane nam samo še izračun vektorja f , ki ga izračunamo:

$$f = -F = -(g(x,y) - k_1 h(x',y') - k_2) \quad (20)$$

Če v enačbo (20) vstavimo začetne vrednosti spremenljivk, dobimo:

$$f = h(x,y) - g(x,y) \quad (21)$$

Kot opazovanja obravnavamo tonske vrednosti slike $g(x,y)$, za katere velja, da imajo vse enako natančnost. Vrednosti neznank tako izračunamo po naslednjih enačbah:

$$N = B' P B \quad (22)$$

$$t = B' P f \quad (23)$$

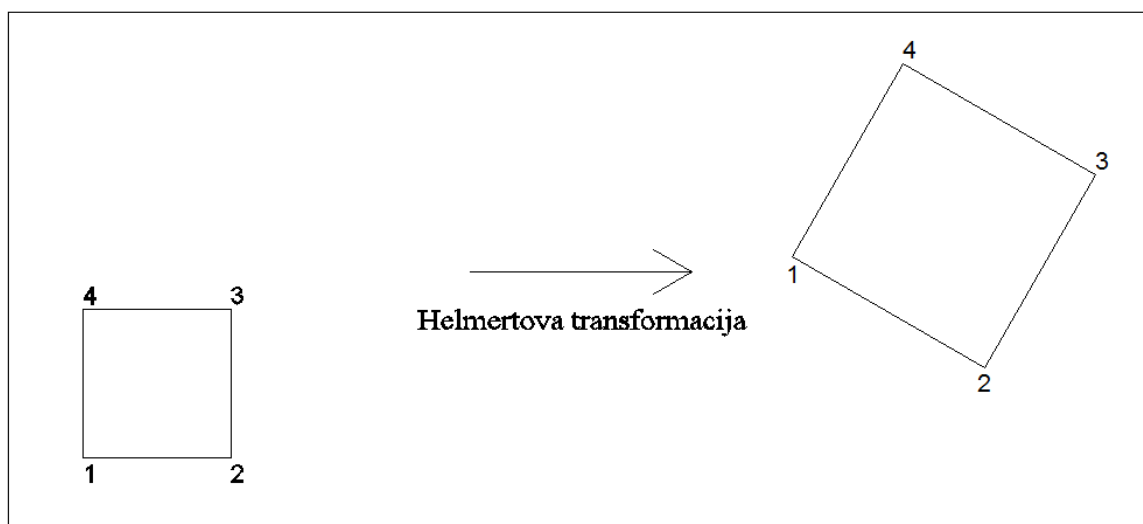
$$\Delta = N^{-1} t \quad (24)$$

Vektor neznank Δ vsebuje parametre afine transformacije. Parametra dx in dy pa povesta, za koliko moramo premakniti tarčo, da dobimo položaj najboljšega ujemanja med tarčo in iskalnim oknom. Če izvajamo izravnavo v večih korakih, te izvajamo tako, da izračunamo

inverzne parametre afine transformacije. Z njimi prevzorčimo tarčo $g(x,y)$, ter nato ponovimo cel postopek. Na ta način se izognemo kompleksnejšim odvodom v matriki B.

2.2 Helmertova transformacija

Helmertova ali podobnostna transformacija je štiri parametrična transformacija, ki ohrani kote oblike, spremenijo pa se orientacija, merilo in položaj objektov. Ti štirje parametri so premik v smeri X, premik v smeri Y, sprememba merila ter zasuk. Transformiran kvadrat ostane kvadrat, spremenijo se mu položaj, velikost in orientacija.



Slika 9 : Skica Helmertove transformacije

Matematično Helmertovo transformacijo zapišemo kot (Kraus, 1997):

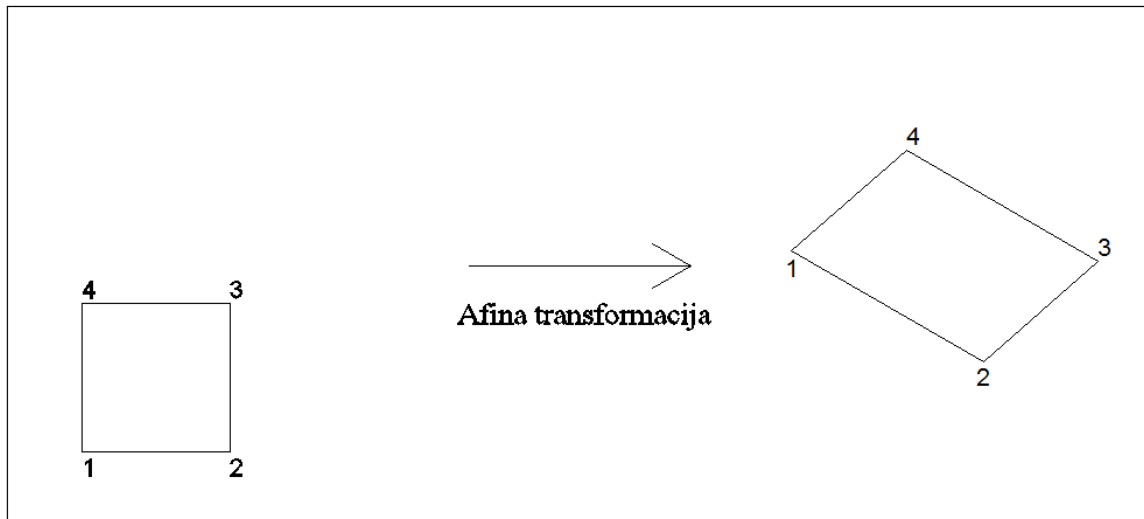
$$X = dx + (1 + m) \times (x \cos(\alpha) + y \sin(\alpha)) \quad (25)$$

$$Y = dy + (1 + m) \times (y \cos(\alpha) - x \sin(\alpha)) \quad (26)$$

Za določitev parametrov Helmertove transformacije moramo poznati koordinate vsaj dveh točk v obeh koordinatnih sistemih.

2.3 Afina Transformacija

Afina transformacija je šest parametrična transformacija, ki ohrani vzporednost linij, uvaja pa premik v smereh x in y, spremembo merila v smereh x in y, rotacijo ter kotni strig. Transformacija kvadrat preslika v premaknjen in zasukan paralelogram.



Slika 10 : Skica afine transformacije

Matematično afino transformacijo zapišemo z enačbama (Kraus, 1997):

$$X = a x + b y + c \quad (27)$$

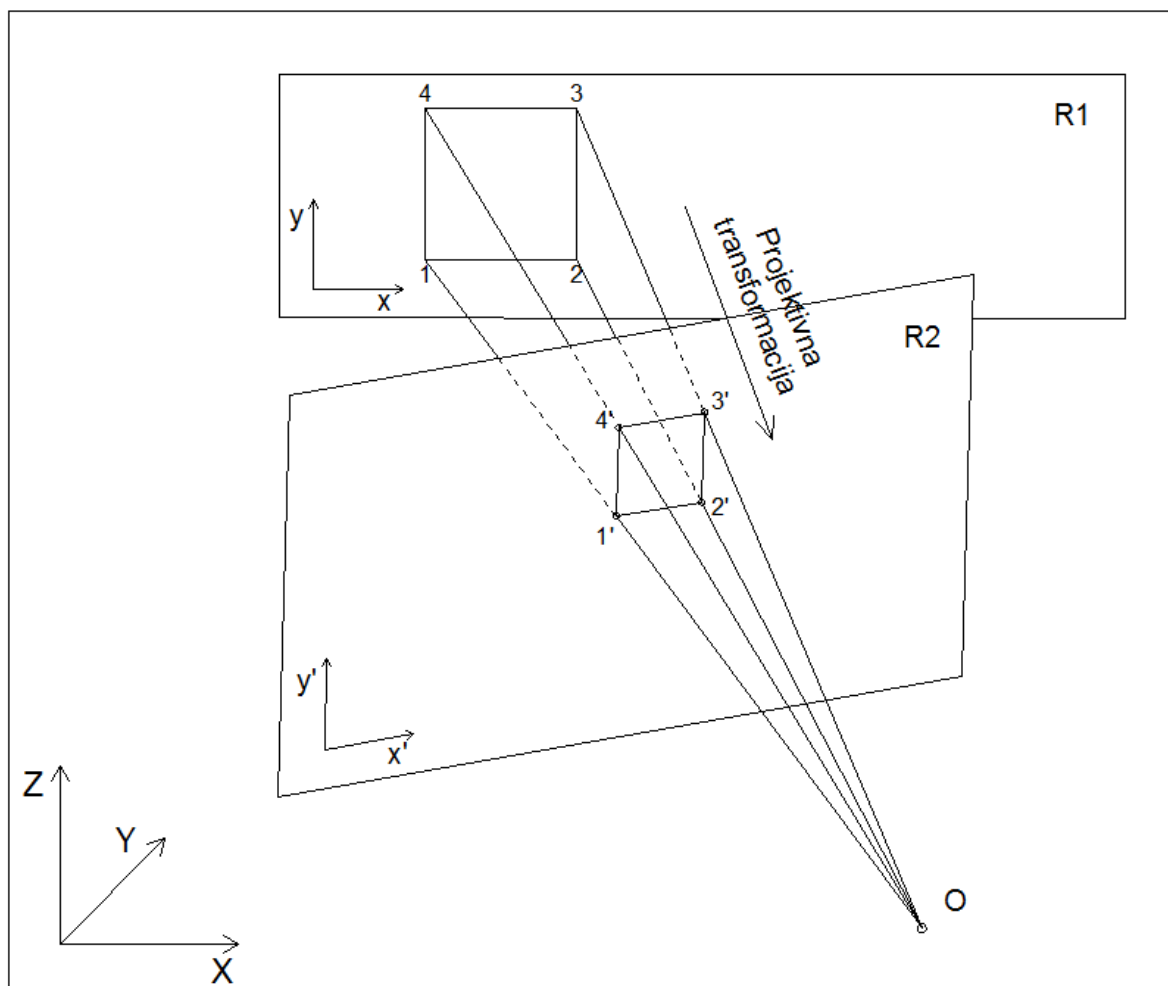
$$Y = d x + e y + f \quad (28)$$

Za določitev parametrov afine transformacije moramo poznati koordinate vsaj treh točk v obeh koordinatnih sistemih.

2.6 Projektivna transformacija

Projektivna transformacija je transformacija med dvema ravninama. Ravne črte po transformaciji ostanejo ravne črte. Kvadrat se preslika v četverkotnik. Vzporednost linij se lahko ohrani, ni pa nujno. Pri projektivni transformaciji se zgodi perspektivna projekcija iz

ravnine R1 na ravnino R2 z izhodiščem v točki O (kot je ponazorjeno na sliki 11). V praksi se s projektivno transformacijo srečamo, ko fotografiramo ravninski objekt. V tem primeru gre za projektivno transformacijo iz ravnega objekta na ravnino senzorja fotografskega aparata.



Slika 11: Skica projektivne transformacije

Matematično projekcijo zapišemo z enačbami (Kraus, 1997):

$$\frac{y'}{x'} = \frac{y}{x} \quad (29)$$

$$\frac{z'}{x'} = \frac{z}{x} \quad (30)$$

Za določitev parametrov projektivne transformacije moramo poznati koordinate vsaj štirih točk v obeh koordinatnih sistemih.

2.4 Direktna linearna transformacija

Direktno linearno transformacijo (na kratko DLT) lahko izpeljemo iz enačb centralne projekcije. Te izgledajo takole (Kraus, 1997):

$$\frac{x}{a_1 + a_2 \frac{x}{Z} + a_3 \frac{y}{Z} + a_4 \frac{1}{Z}} = \frac{y}{b_1 + b_2 \frac{x}{Z} + b_3 \frac{y}{Z} + b_4 \frac{1}{Z}} \quad (31)$$

$$\frac{x}{c_1 + c_2 \frac{x}{Z} + c_3 \frac{y}{Z} + c_4 \frac{1}{Z}} = \frac{y}{d_1 + d_2 \frac{x}{Z} + d_3 \frac{y}{Z} + d_4 \frac{1}{Z}} \quad (32)$$

Pri tem so

x_0, y_0	...	koordinate glavne točke fotoaparata,
r_{11}, \dots, r_{33}	...	elementi rotacijske matrike R,
	...	koordinate stojišča snemanja,
c	...	konstanta kamere.

Koordinate glavne točke prenesemo v ulomek in uvedemo nove parametre a_i , b_i in c_i :

$$\frac{x}{a_1 + a_2 \frac{x}{Z} + a_3 \frac{y}{Z} + a_4 \frac{1}{Z}} = \frac{y}{b_1 + b_2 \frac{x}{Z} + b_3 \frac{y}{Z} + b_4 \frac{1}{Z}} \quad (33)$$

$$\frac{x}{c_1 + c_2 \frac{x}{Z} + c_3 \frac{y}{Z} + c_4 \frac{1}{Z}} = \frac{y}{d_1 + d_2 \frac{x}{Z} + d_3 \frac{y}{Z} + d_4 \frac{1}{Z}} \quad (34)$$

Novi parametri a_i , b_i in c_i so izpeljani iz originalnih parametrov:

$$(35)$$

$$(36)$$

itd...

Števec in imenovalac ulomka v enačbah (33) in (34) delimo s parametrom Z ter tako poenostavimo relacije med slikovnimi koordinatami x, y ter objektnimi koordinatami X, Y, Z . Dobimo nove enačbe z novimi parametri a_i , b_i ter c_i :

$$\text{—————} \quad (37)$$

$$\text{—————} \quad (38)$$

Enajst koeficientov a_i , b_i ter c_i je izpeljanih iz devetih parametrov notranje ter zunanje orientacije centralne projekcije. Ker zamenjava devetih parametrov centralne projekcije z enajstimi novimi parametri DLT ni dovoljena, moramo enačbam centralne projekcije dodati dva dodatna parametra. Ta parametra sta drugačno merilo v smeri y in v smeri x , ter nepravokotnost med osema x in y . Tako dobimo razširjeno centralno projekcijo, katere rezultat je enak rezultatu direktne linearne transformacije.

Rešitev sistema DLT poteka v dveh korakih. V prvem koraku za vsako od fotografij, iz slikovnih ter objektnih koordinat oslonilnih točk, izračunamo enajst parametrov direktne linearne transformacije. Nato v drugem koraku iz slikovnih koordinat detajlnih točk in parametrov direktne linearne transformacije vsake od fotografij izračunamo objektne koordinate detajlnih točk.

Parametre DLT izračunamo tako, da za vsako od n oslonilnih točk na fotografiji zapišemo enačbe (37) in (38) v linearni obliki (Kraus, 1997):

$$(39)$$

$$(40)$$

Pri tem so :

Sistem enačb rešimo z izravnavo. Ker imamo enajst neznanih parametrov, potrebujemo najmanj šest oslonilnih točk. Zaradi večje stabilnosti rešitve pa se v praksi navadno uporabi večje število oslonilnih točk (deset in več).

Ko imamo izračunane parametre DLT za vsako od fotografij, se lahko lotimo izračuna objektnih koordinat detajlnih točk. Za vsako od detajlnih točk (i) na fotografiji (m) zapišemo enačbi:

(41)

(42)

Pri tem so:

- objektne koordinate detajlne točke i – neznanke, iskane količine,
- parametri dlt za posamezen posnetek m – obravnavano kot dane količine,
- slikovne koordinate detajlne točke i na posnetku m – opazovanja.

Sistem enačb zopet rešimo z izravnavo. Za vsako detajlno točko imamo tri neznanke, zato mora biti vsaka od detajlnih točk vidna na vsaj dveh fotografijah.

Prednosti direktne linearne transformacije pred centralno projekcijo so naslednje (Kraus, 1997):

- Zaradi linearne relacije med slikovnimi in objektnimi koordinatami je za transformacijo dokaj preprosto napisati izravnalne enačbe in napisati računalniški program za izravnavo transformacije.
- Slikovne koordinate so lahko izražene v nepravokotnem koordinatnem sistemu, z različnimi merili v smereh x ter y .
- Položaj slikovnega koordinatnega sistema je nepomemben. Robne marke oziroma meritve položajev robnih mark niso potrebne.
- Ni nam treba poznati konstante kamere oziroma se ta lahko spreminja od slike do slike.

Obstajajo pa tudi slabosti direktne linearne transformacije (Kraus, 1997):

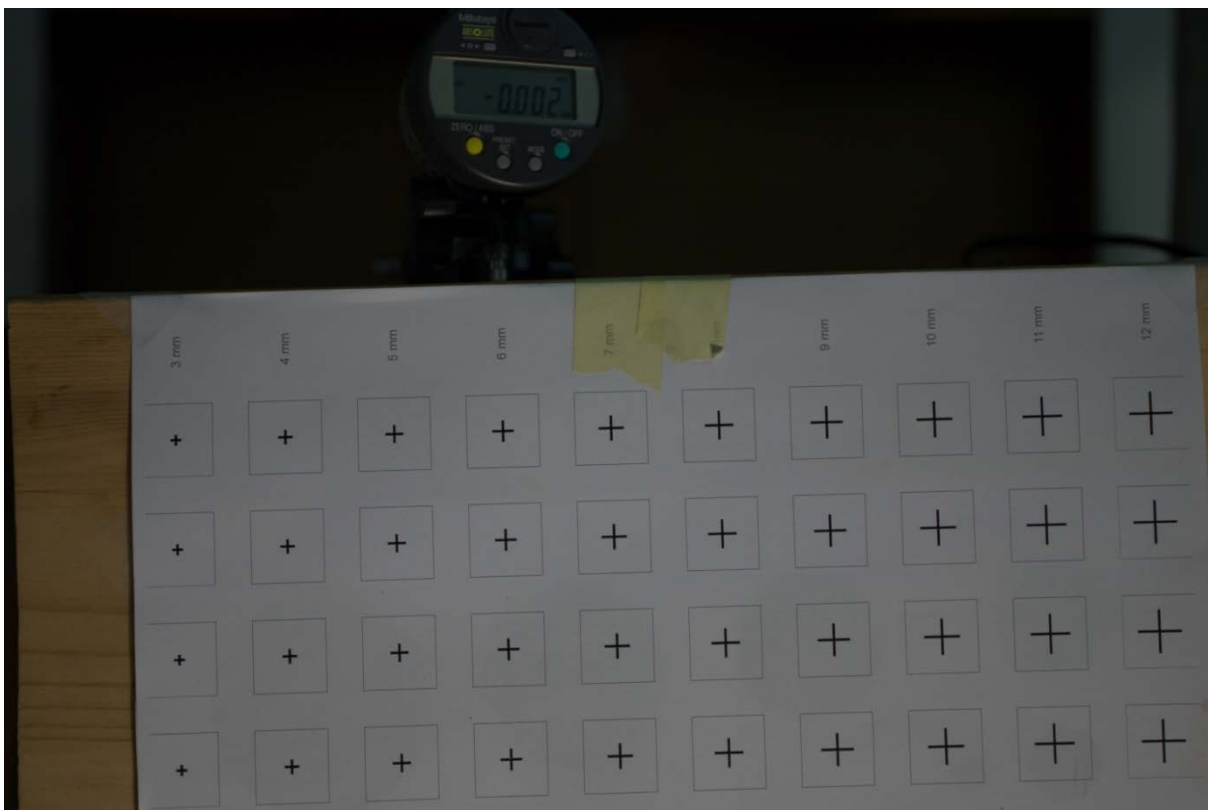
- Zaradi večjega števila iskanih parametrov je potrebno večje število oslonilnih točk, kot bi jih bilo potrebno v primeru uporabe centralne projekcije.
- Rešitev sistema direktne linearne transformacije postane nestabilna, ko vse oslonilne točke ležijo v ravnini, oziroma ležijo skoraj v isti ravnini. Problemu se lahko izognemo z dobro prostorsko razporeditvijo oslonilnih točk. V idealnem primeru morajo oslonilne točke ležati na stranicah navidezne kocke ki obdaja opazovani objekt.

Zaradi teh lastnosti je direktna linearna transformacija uporabna predvsem, kadar imamo opravka s fotografijami, posnetimi z nemerskimi fotoaparati, oziroma kadar parametri notranje orientacije niso znani.

3 TEST EMPIRIČNE LOČLJIVOSTI DIGITALNEGA FOTOAPARATA

3.1 Uvod

Namen tega testa je bil ugotoviti, kakšna je empirična (dejanska) ločljivost slike in s kakšno natančnostjo lahko fotogrametrično izmerimo premike označenih točk, če uporabimo nemerski digitalni fotoaparati. Kolegi iz podjetja DFG Consulting so izvedli enoslikovni test in mi dali fotografije v obdelavo. Fotografije so bile posnete z digitalnim fotoaparatom Canon EOS 1D Mark III z ločljivostjo 10 megapikslov. Fotografirano je bilo testno polje velikosti A4. V testnem polju so bili križi različnih velikosti. Testno polje je bilo prilepljeno na desko, ki se je postopoma premikala navpično navzdol. S testom smo hoteli ugotoviti, koliko izmerjeni premiki posameznih križev odstopajo od srednjega oz. povprečnega premika križev in kako povprečni premik sovpada z velikostjo vertikalnega premika deske. Kontrolne meritve vertikalnega premika deske smo opravili z merilno urico. Premiki so bili izmerjeni z mikrometrsko natančnostjo in izpisani na zaslončku merilne urice nad desko.

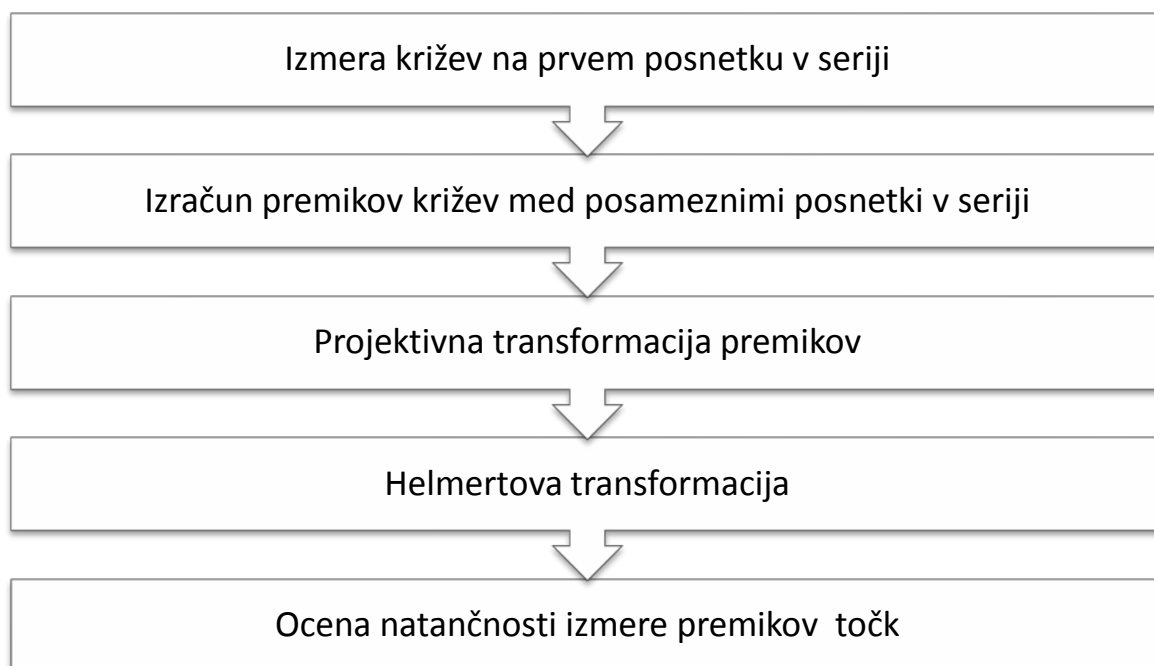


Slika 12: Primer fotografije iz testa empirične ločljivosti digitalnega fotoaparata

3.2 Metodologija

Fotografije so bile narejene v dvanajstih serijah, v vsaki seriji je bilo od 11 do 13 fotografij. V prvih 6-ih serijah so bile fotografije narejene z razdalje 60 cm, fotografije v naslednjih 6-ih serijah pa z razdalje 1.5 m. Pri tem so se od serije do serije spreminjali red velikosti premikov (od 10 μm do 1 mm), nastavitev ISO in čas osvetlitve.

Vsako serijo sem obdelal posebej. Obdelava je potekala v Matlabu, kjer sem v ta namen razvil potrebne programe. Najprej sem s samodejno metodo izmeril položaje križev na prvem posnetku v seriji. Nato je sledil izračun premikov teh križev med posameznimi posnetki v seriji. S projektivno transformacijo sem premike med posameznimi posnetki transformiral iz slikovne ravnine v ravnino, v kateri je ležala deska s križi. Rezultat so bili vertikalni in horizontalni premiki križev. Ker smo uporabljali nemerski fotoaparata, je med posameznimi posnetki prihajalo do majhnih sprememb merila posnetka ter spreminjanja glavne točke fotoaparata. Vpliv teh sprememb na izmerjene premike križev sem modeliral s helmertovo transformacijo. Iz izravnave helmertove transformacije pa sem pridobil tudi oceno natančnosti izmerjenih premikov, ki so v izravnavi nastopali kot opazovanja.

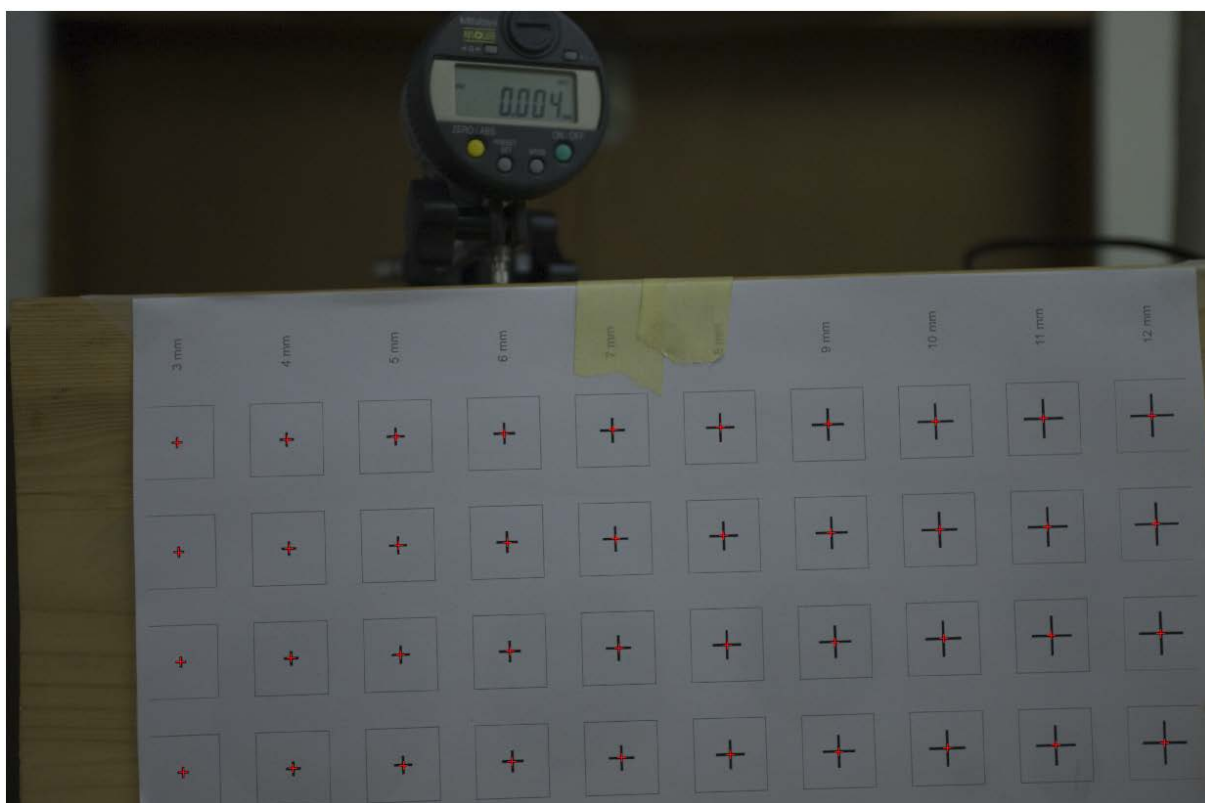


Slika 13: Shema računske obdelave fotografij

3.3 Obdelava in rezultati

3.3.1 Izmera križev na prvem posnetku v seriji

Ker samodejna meritev točk zahteva znane približne položaje točk, je bilo potrebno najprej le-te oceniti. V ta namen sem ročno izmeril koordinate štirih vogalnih križev. Ker so bili križi v testnem polju razporejeni enakomerno, sem lahko njihove približne položaje določil z interpolacijo. V okolici približnih položajev križev sem nato s sintetično tarčo po samodejni metodi določil centre križev.

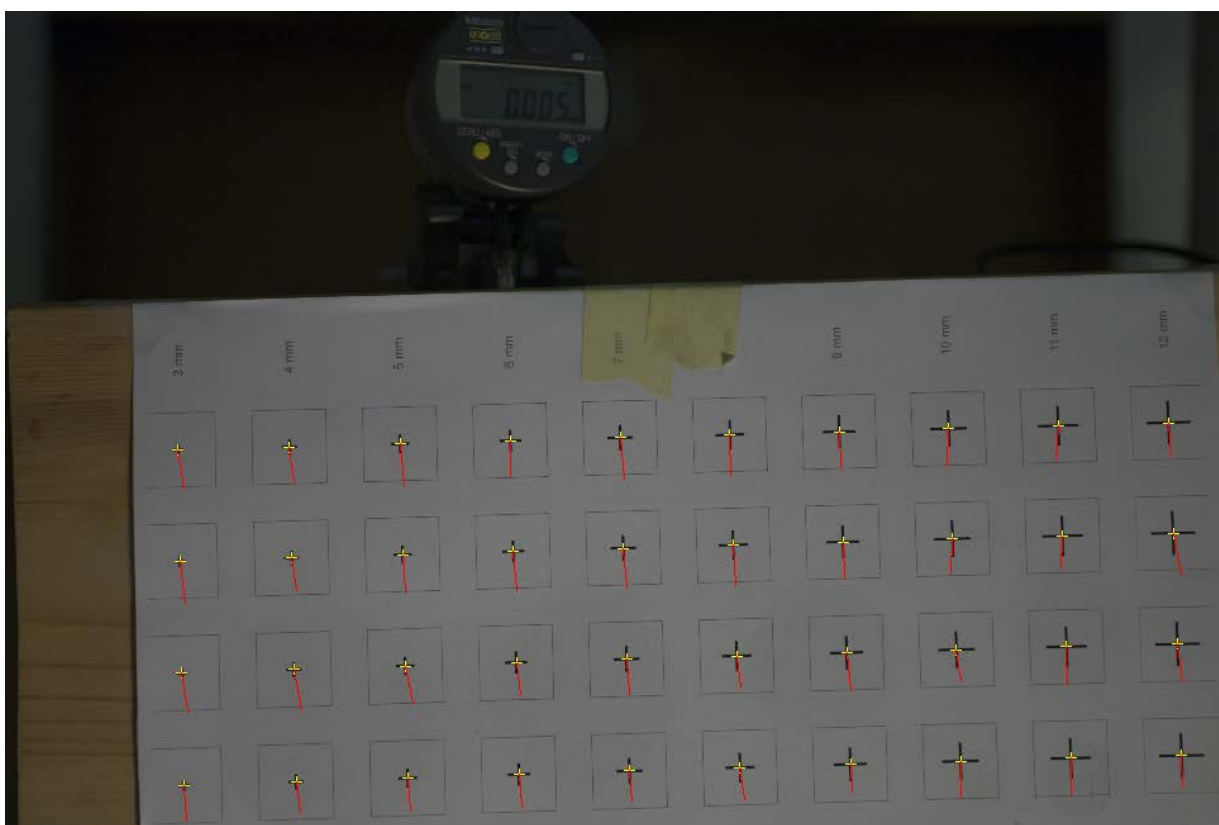


Slika 14: Izmerjeni centri križev na prvi fotografiji v peti seriji

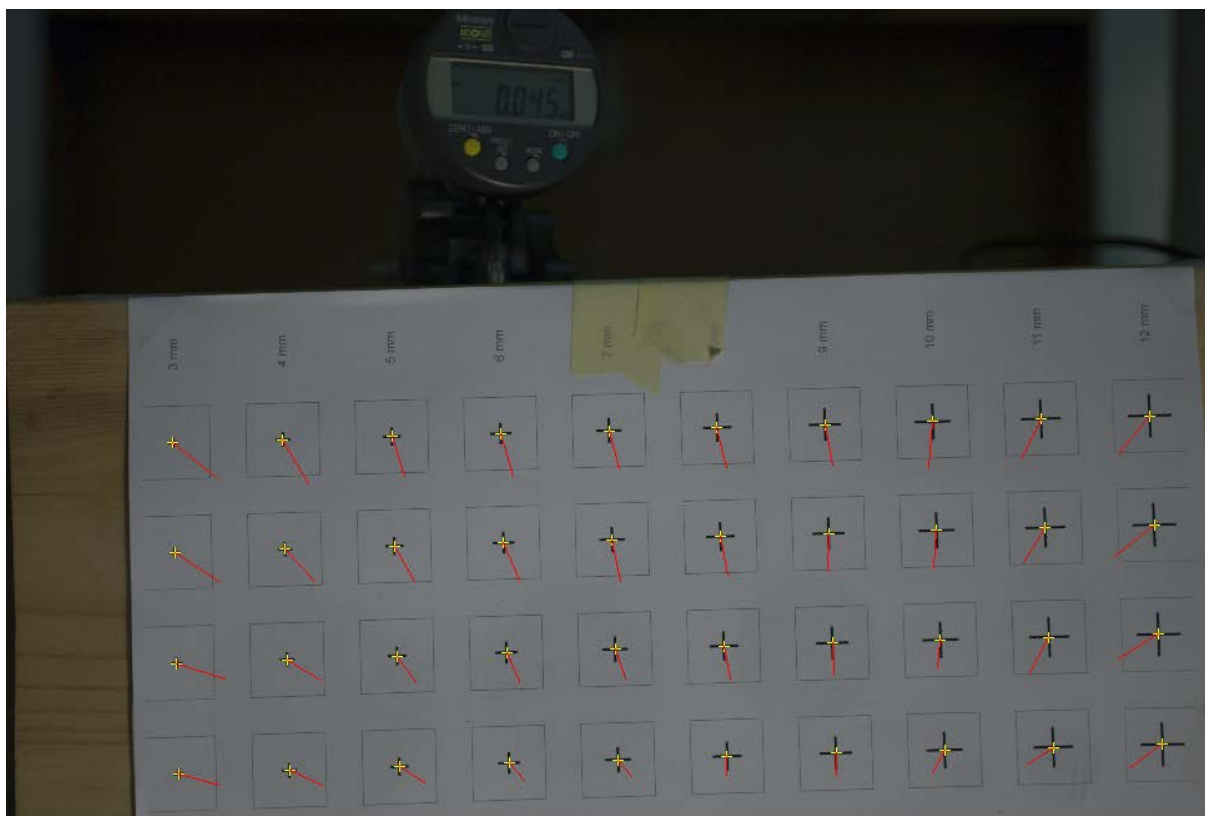
3.3.2 Izračun premikov med zaporednimi posnetki

Sledil je izračun premikov križev med zaporednimi posnetki v seriji. Iz prvega posnetka sem na položajih centrov križev izrezal naravne tarče. Za vsak križ je bila izrezana svoja tarča. Na naslednjem posnetku sem za vsakega od križev definiral območje iskanja. S samodejno

metodo meritve točk sem iz naravne tarče in območja iskanja izračunal, kako so se posamezni križi premaknili med zaporednima fotografijama. Premike križev sem grafično predstavil. Ko sem jih izrisal, se je pokazalo, da med zaporednimi fotografijami ne prihaja samo do premikov, ampak se v nekaterih primerih spreminja tudi merilo fotografij. Poleg tega pa je prihajalo tudi do premikanja glavne točke. V teh primerih je bil poleg vertikalnega zabeležen tudi horizontalni premik križev. Spremembe merila in položaja glavne točke (spremembe parametrov notranje orientacije) so posledica nestabilnosti fotoaparata, ki je ključen problem pri nemetrskih sistemih.



Slika 15: Izris premikov križev med drugo in tretjo fotografijo v peti seriji, obe fotografiji sta posneti v istem merilu (prikazani premiki povečani za 1000x)

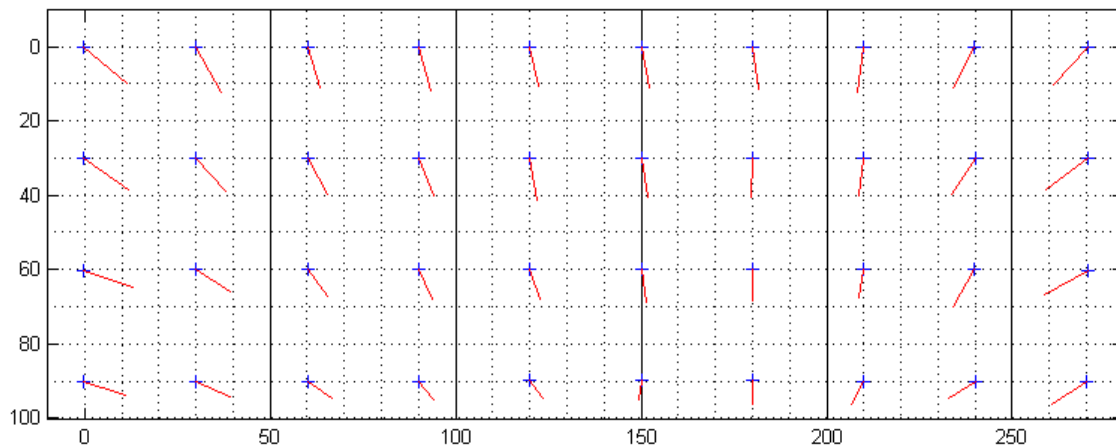


Slika 16: Izris premikov križev med šest in sedmo fotografijo v peti seriji, sedma fotografija posneta v manjšem merilu kot šesta (prikazani premiki povečani za 1000x)

3.3.3 Projektivna transformacija premikov križev testnega polja

Križi testnega polja so na listu tvorili pravilno mrežo z razmikom tri centimetre. Iz koordinat centrov križev na listu in iz slikovnih koordinat centrov križev na prvi fotografiji v seriji sem izračunal parametre projektivne transformacije med slikovnim koordinatnim sistemom in koordinatnim sistemom, ki ga definirajo križi testnega polja. Te parametre sem uporabil za transformacijo premikov križev iz slikovne ravnine v ravnino, v kateri je ležalo testno polje. Rezultat so bili premiki križev v ravnini testnega polja. Ker so se med posameznimi fotografijami parametri notranje orientacije spreminjali (merilo posnetka ter položaj glavne točke fotoaparata), parametri projektivne transformacije pa so bili ocenjeni samo na podlagi prve fotografije v seriji, so bili transformirani premiki še vedno obremenjeni s sistematičnim vplivom spremembe merila ter translacije. Na sliki 17 so prikazani s projektivno transformacijo preslikani izmerjeni premiki križev testnega polja med šesto in sedmo

fotografijo v peti seriji (netransformirani premiki prikazani na sliki 16). Položaji modrih križev predstavljajo izmerjene položaje križev testnega polja, rdeče črte pa predstavljajo transformirane vektorje izmerjenih premikov križev med šesto in sedmo fotografijo v peti seriji. Pri tako transformiranih premikih na sliki 17 se lepo vidi sistematični vpliv spremembe merila na izmerjene premike med zaporednimi fotografijami.



Slika 17: Projektivna transformacija izmerjenih premikov križev testnega polja iz slikovnega koordinatnega sistema v koordinatni sistem testnega polja

3.3.4 Helmertova transformacija in ocena natančnosti izmerjenih premikov

Vpliv spremembe merila in spremembe položaja glavne točke na izmerjene premike sem modeliral s helmertovo transformacijo. Parametre transformacije sem izračunal z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov. Vhodni podatki so bili premiki centrov križev testnega polja pred premikom in njihovi položaji. Rezultati pa so bili translacija v smeri x in y, sprememba merila in sprememba rotacije polja. Prav tako sem iz izravnave pridobil oceno natančnosti vhodnih podatkov (natančnost izmerjenih premikov centrov križev). Za vsako od serij sem izračunal povprečno oceno natančnosti izmere premikov križev med zaporednimi fotografijami. Ocenjene natančnosti izmere premikov po posameznih serijah sem skupaj z razdaljami fotoaparata od testnega polja in nastavitvami fotoaparata predstavil v preglednici 1.

Preglednica 1: Pregled ocenjene natančnosti izmerjenih premikov centrov križev po posameznih serijah

Seriya	Red velikosti premikov (μm)	Oddaljenost fotoaparata (cm)	Čas osvetlitve	Vrednost ISO	Ocena natančnosti izmerjenih premikov (μm)	Ocena natančnosti izmerjenih premikov (piksli)
1	1000	59	1/50	400	5.7	0.06
2	1000	59	1/250	1600	3.4	0.04
3	100	59	1/250	1600	4.0	0.05
4	10	59	1/250	1600	2.6	0.03
5	10	59	1/250	400	1.6	0.02
6	100	59	1/250	400	1.6	0.02
7	10	154	1/250	400	6.4	0.03
8	100	154	1/250	400	10.3	0.05
9	1000	154	1/250	400	10.0	0.05
10	1000	154	1/250	1600	17.9	0.08
11	100	154	1/250	1600	17.2	0.08
12	10	154	1/250	1600	20.6	0.09

V prilogi A se nahaja preglednica s podatki o odčitanih kontrolnih premikih, izračunanih ocenah natančnosti izmerjenih premikov in nastavitvah fotoaparata za vsako od posnetih fotografij v okviru testa.

3.4 Komentar in analiza rezultatov

Po pričakovanjih na natančnost izmerjenih premikov najbolj vpliva oddaljenost fotoaparata od testnega polja (merilo slike). Pokazalo pa se je tudi, da na natančnost izmerjenih premikov vpliva velikost samega merjenega premika. Pri manjših premikih namreč svetlobni žarek potuje vsakič od opazovanega križa do točke na senzorju fotoaparata po skoraj enaki poti. Tako se eliminirajo vplivi radialne in tangencialne distorzije. Kar pa zadeva nastavitve občutljivosti senzorja (ISO), se je pokazalo, da so natančnosti dobljene iz serije, kjer je bila vrednost ISO 400, nekoliko boljše kot pri tistih, kjer je bila vrednost ISO 1600. Za čas osvetlitve 1/50 s se je pokazalo, da nastale slike niso dovolj ostre. Zaradi tega je natančnost v prvi seriji nižja. Pri vseh ostalih serijah pa je bil uporabljen čas osvetlitve 1/250 s.

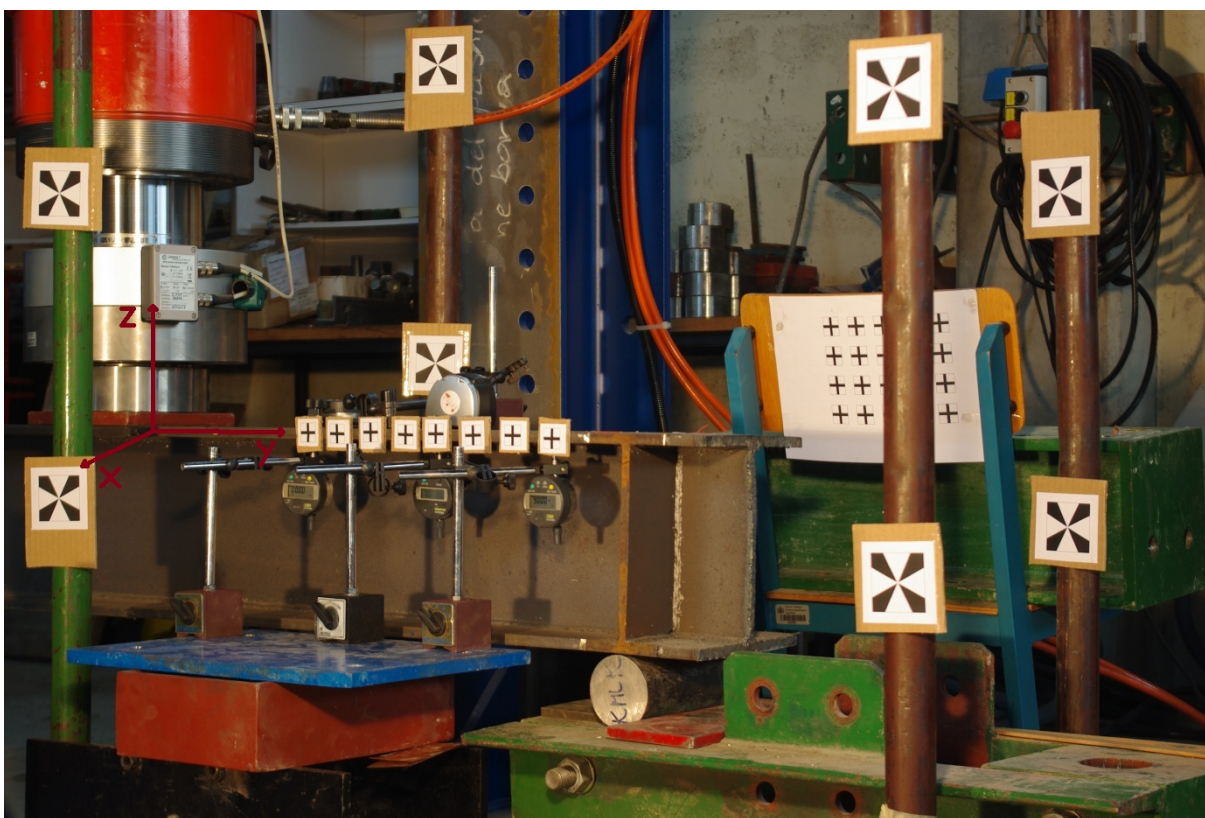
Pri fotografijah, posnetih z razdalje 59 cm, je bila velikost piksla 85 μm , pri tistih, posnetih z razdalje 154 cm, pa je bila velikost piksla 222 μm . V obeh primerih je bilo uporabljeno isto testno polje. Velikosti križev so bile bolj primerne za snemanje z razdalje 59 cm kot 154 cm. Križi testnega polja na fotografijah posnetih s 154 cm so bili manj ostri in slabše kvalitete. Rezultat tega je bil, da so ocenjene natančnosti izmerjenih premikov, preračunane v piksele, precej nižje kot pri fotografijah, posnetih z razdalje 59 cm.

Kljub temu pa je bila ocenjena natančnost boljša od pričakovane. Pričakovali smo namreč natančnost izmerjenih premikov okoli 0.1 piksla. V primeru najboljših serij posnetih z razdalje 59 cm, je bila ocenjena natančnost izmerjenih premikov celo od 0.02 piksla do 0.06 piksla. Ker so bili ti rezultati pridobljeni na osnovi transformacije, smo jih vzeli z določeno mero zadržanosti. Rezultati so sicer kazali, da bi nemerski digitalni fotoaparati lahko bili uporabni za potrebe merjenja deformacij v okviru tritočkovnih obremenitvenih eksperimentov. Vseeno pa smo se odločili, da bi bilo smiselno izvesti dodatni večslikovni test, s katerim bi ocenili njihovo sposobnost merjenja trirazsežnih deformacij.

4 TEST FOTOGRAMETRIČNE MERITVE DEFORMACIJ

4.1 Uvod

V testu empirične ločljivosti digitalnega fotoaparata smo ugotovili, s kolikšno natančnostjo je mogoče izmeriti premike točk na fotografiji. Na osnovi rezultatov tega testa smo izvedli nov eksperiment. S testno fotogrametrično meritvijo smo preverili, s kakšno natančnostjo lahko iz izmerjenih premikov točk na fotografijah, posnetih iz različnih perspektiv, izračunamo premike detajlnih točk v trirazsežnem prostoru. V ta namen je bil izveden tritočkovni obremenitveni test. V okolici trama smo postavili osem oslonilnih točk. Na tramu pa smo signalizirali osem detajlnih točk. Dodatno smo signalizirali še testno polje točk, ki so med poskusom mirovale. Tram je bil podprt na skrajnjih točkah, na sredini pa smo ga postopoma obremenjevali s hidravličnim batom. Po vsaki stopnji obremenitve smo signalizirane točke istočasno fotografirali iz treh stojišč. Opravili smo tudi kontrolne meritve. V ta namen smo uporabili štiri merilne urice.



Slika 18: Scena testne meritve deformacij na jeklenem tramu z vrisanimi smermi lokalnega koordinatnega sistema

4.1.1 Opis lokalnega koordinatnega sistema

Meritve smo izvajali v lokalnem koordinatnem sistemu. Os Z smo izbrali v smeri vertikale. Os Y smo izbrali v vodoravni smeri, vzporedno z vzdolžnim potekom nosilca. Os X pa smo izbrali tako, da je bila pravokotna na ravnino YZ in usmerjena proti fotoaparatom. Določitev lokalnega koordinatnega sistema je grafično predstavljena na sliki 22.

4.2 Metodologija

Fotografije signaliziranih točk so bile narejene istočasno s tremi fotoaparati. Pred samim testom je bila izvedena kalibracija vsakega od fotoaparatom. V okviru tritočkovnega testa smo z vsakim fotoaparatom posneli enajst fotografij. Med fotografijami smo postopoma povečevali obremenitev jeklenega trama, kar je povzročalo vedno večje deformacije na tramu. Z merilnih uric smo sproti zapisovali kontrolne meritve deformacij. Po koncu tritočkovnega testa smo po metodi zunanjega ureza z bazno lato izmerili položaje oslonilnih točk. Položaji označenih točk na fotografijah so bili izmerjeni s samodejno metodo. Z direktno linearno transformacijo smo iz premikov označenih točk na fotografijah izračunali trirazsežne deformacije trama. Na koncu smo, na podlagi primerjave izračunanih deformacij trama s kontrolnimi meritvami, ocenili natančnost meritve deformacij.



Slika 19: Shema poteka testne meritve deformacij

4.3 Uporabljeni fotoaparati

V testu so bili uporabljeni trije fotoaparati:

- Canon EOS 400D
- Canon EOS 450D
- Pentax K200 D (razmik med vrsticami)

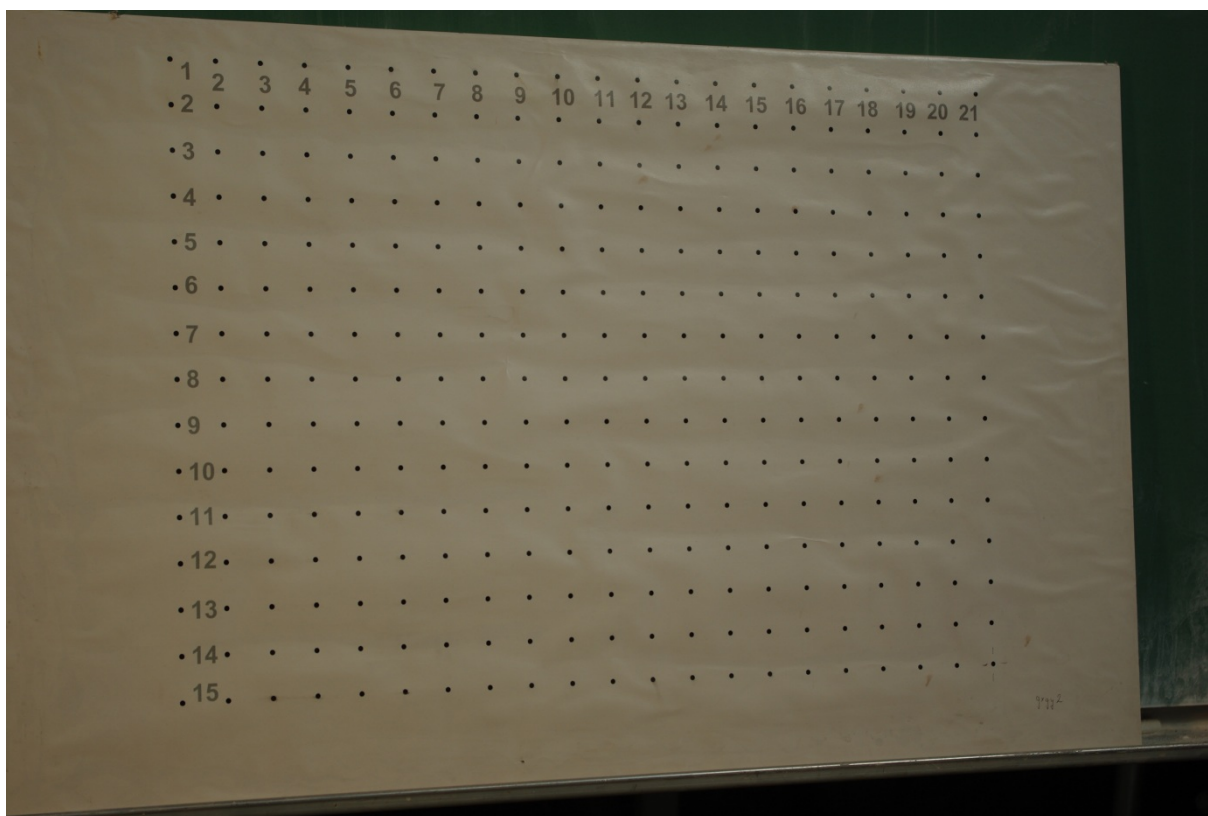
V preglednici 2 so predstavljeni tehnični podatki uporabljenih fotoaparatorov.

Preglednica 2: tehnični podatki uporabljenih fotoaparatorov

	Canon EOS 400D	Canon EOS 450D	Pentax K200D
Tip senzorja	CMOS	CMOS	CCD
Velikost senzorja	22.2 x 14.8 mm	22.2 x 14.8 mm	23.5 x 15.7 mm
Resolucija	10.1 megapikslov	12.2 megapikslov	10.2 megapikslov

4.4 Kalibracija fotoaparatorov

Kalibracijo fotoaparatorov sem izvedel s programom Foto analist (avtor Dejan Grigillo). Testno polje velikosti A2 sem z vsakim fotoaparatom fotografiral iz devetih stojišč in sicer iz desnega kota zgoraj, iz sredine zgoraj, iz levega kota zgoraj, iz desne strani, iz sredine, iz leve strani, iz desnega kota spodaj, iz sredine spodaj ter iz levega kota spodaj.



Slika 20: Primer fotografije testnega polja za kalibracijo fotoaparata

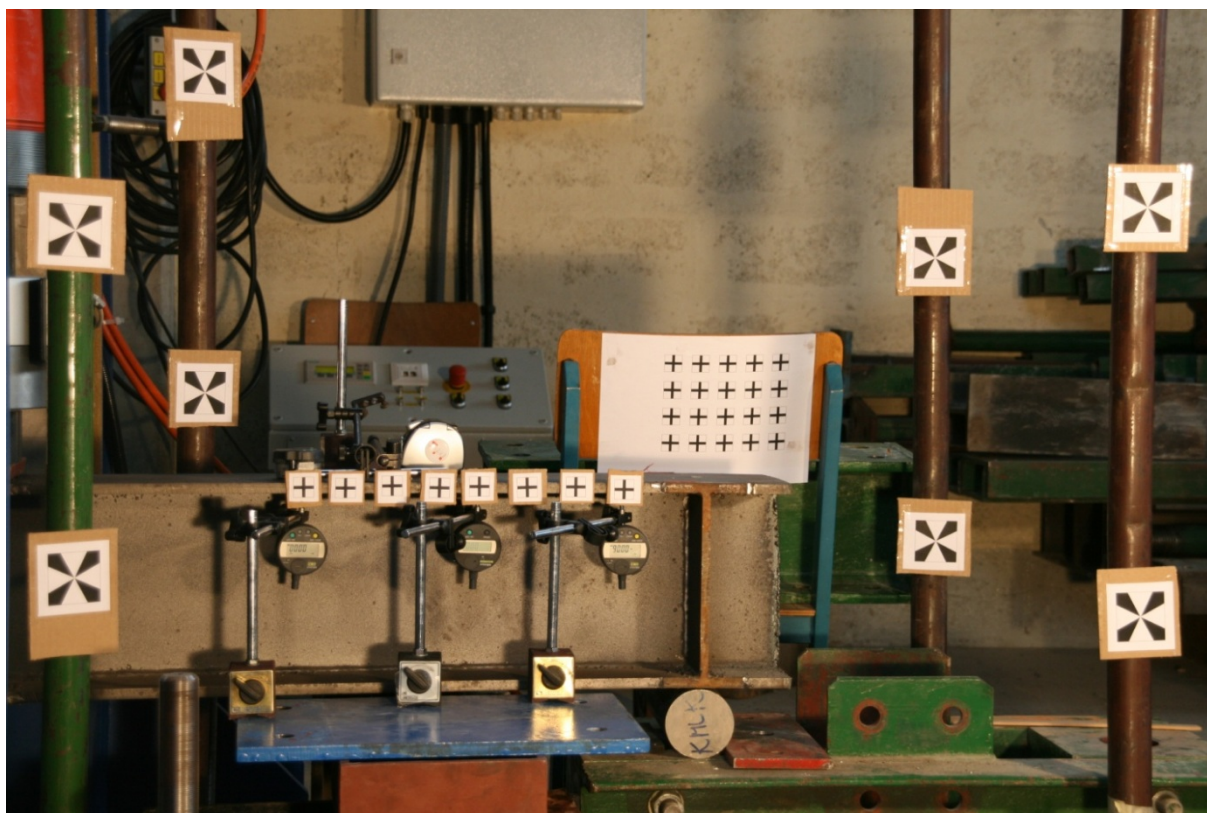
V programu Foto analist sem s samodejno metodo izmeril slikovne koordinate točk testnega polja na vseh fotografijah. Nato sem v programu naložil datoteko z natančnimi objektnimi koordinatami lokacij točk testnega polja. Iz slikovnih koordinat točk testnega polja in objektnih koordinat istega testnega polja program nato izračuna glavno točko fotoaparata ter parametre radialne distorzije.

4.5 Izvedba tritočkovnega testa in fotografiranje

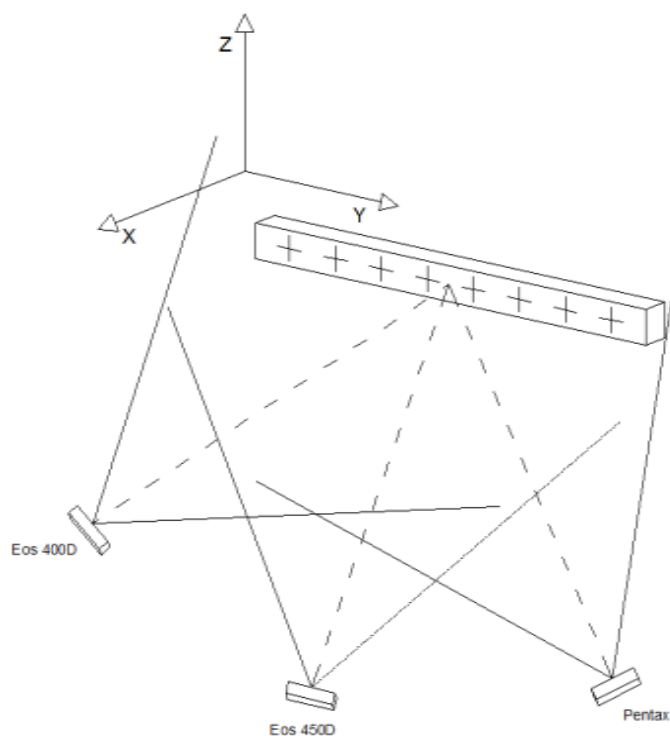
V okolici opazovanega trama smo postavili osem oslonilnih točk. Razporedili smo jih enakomerno okoli trama. Signalizirali smo jih s tarčami v obliki črke 'x'. Takšno obliko smo izbrali, da smo lahko kasneje položaje oslonilnih točk izmerili s teodolitom po metodi zunanega ureza. Detajlne točke smo signaliziral s tarčami v obliki znaka '+', ter jih prilepili na jekleni tram, ki smo ga kasneje obremenjevali, ter na naslonjalo stola, obteženega s kovinskim blokom (obtežen zato, da bi zagotovili stabilnost). Te točke so služile kot statične kontrolne točke. Fotoaparate smo postavili na oddaljenosti približno 3 metre od detajlnih točk

na tramu. Oba fotoaparata Canon sta bila fiksirana z uporabo fotografskega stativa, fotoaparata Pentax pa smo fiksirali tako, da smo ga z elastiko privezali na kovinski blok.

Ko je bilo vse pripravljeno, smo izvedli fotografiranje. Najprej smo posneli fotografije začetnega stanja. Posnetke smo z vsemi fotoaparati posneli istočasno. Nato smo postopoma obremenjevali tram. Po vsaki stopnji obremenitve smo izvedli fotografiranje trama in si zapisali kontrolne meritve z merilnih uric.



Slika 21: Fotografija začetnega stanja, posneta s fotoaparatom Canon EOS 400D



Slika 22: Skica postavitve fotoaparatov

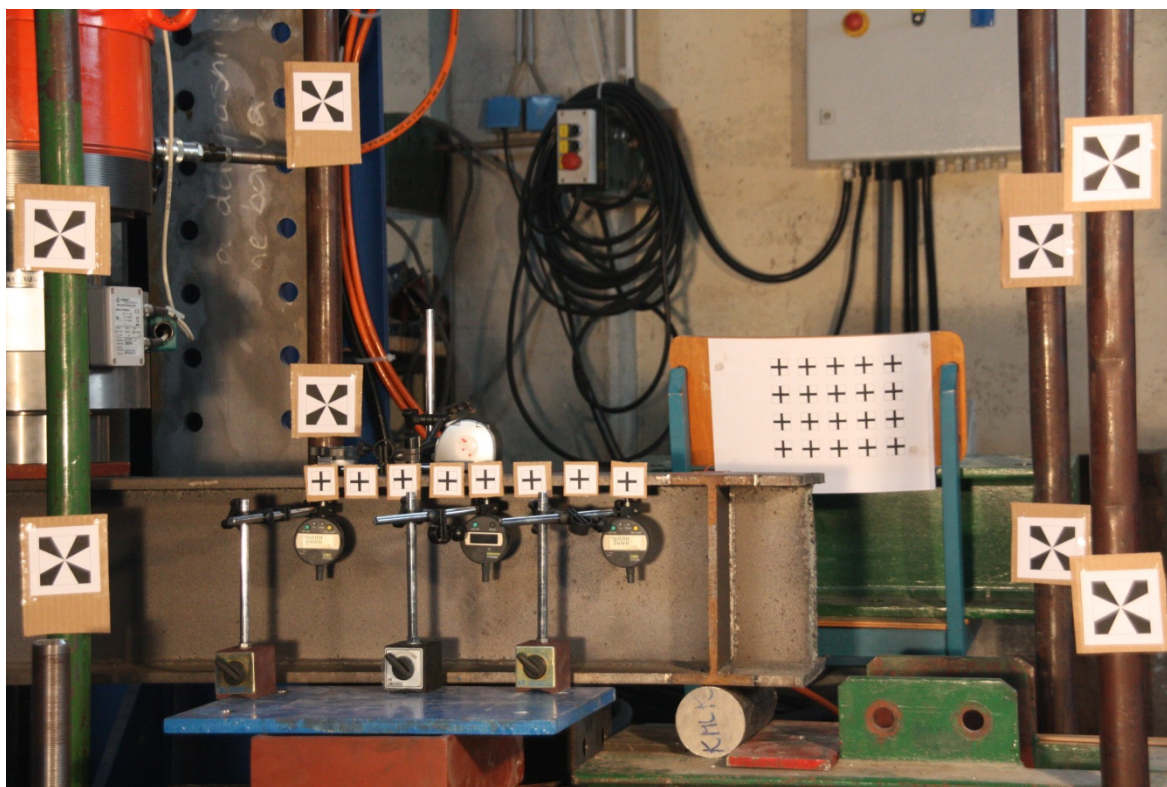
4.6 Določitev koordinat oslonilnih točk

Oslonilne točke so bile izmerjene po metodi zunanega ureza z uporabo bazne late. Uporabljen je bil inštrument Leica 2003. Iz dveh stojišč sem meril horizontalne smeri in zenitne razdalje proti oslonilnim točkam ter proti krajiščema bazne late. Meritve so bile izvedene v štirih girusih (to pomeni, da je bila vsaka točka iz vsakega stojišča izmerjena osemkrat). Rezultat so bile trirazsežne objektne koordinate oslonilnih točk, določene z natančnostjo velikostnega reda milimeter.

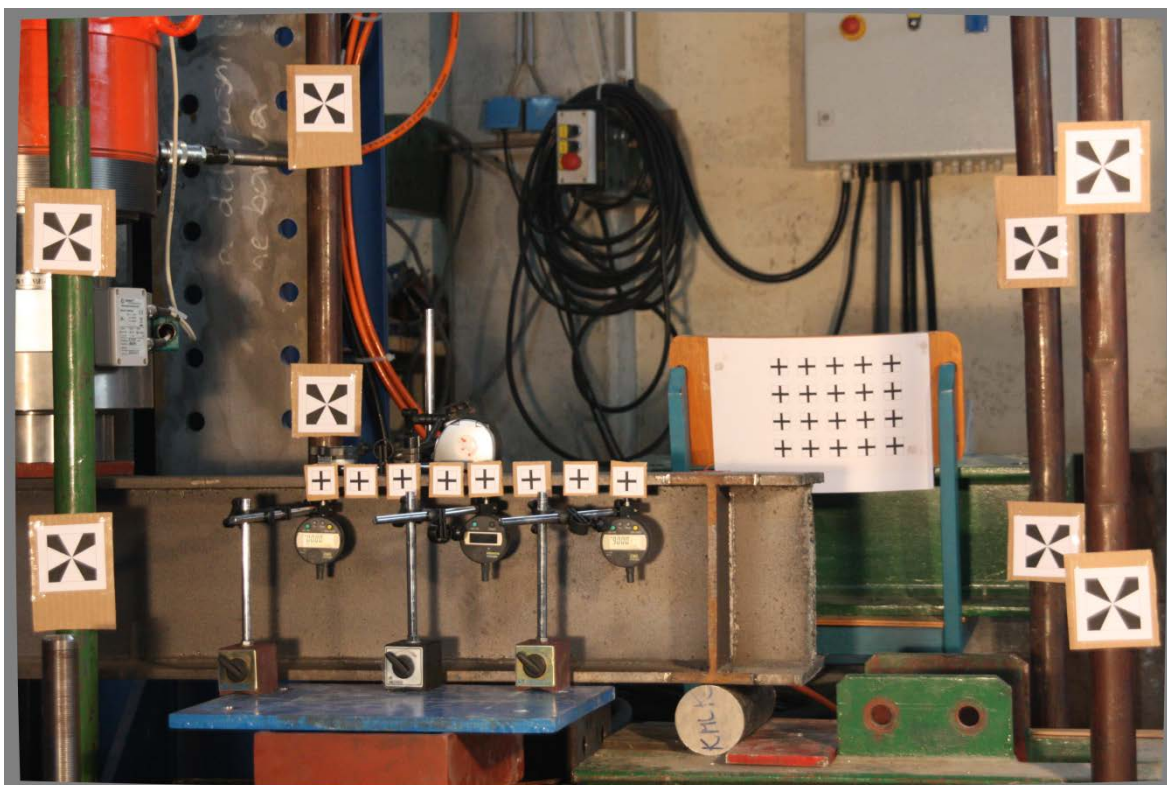
4.7 Računska obdelava

4.7.1 Odprava radialne distorzije na fotografijah

Na fotografijah trama sem moral najprej odpraviti vpliv radialne distorzije. V ta namen sem uporabil parametre radialne distorzije, izračunane v okviru kalibracije fotoaparata. S temi parametri sem popravil fotografije trama. Rezultat so bile fotografije z odpravljen radialno distorzijo.



Slika 23: Fotografija testne meritve deformacij pred odpravo radialne distorzije



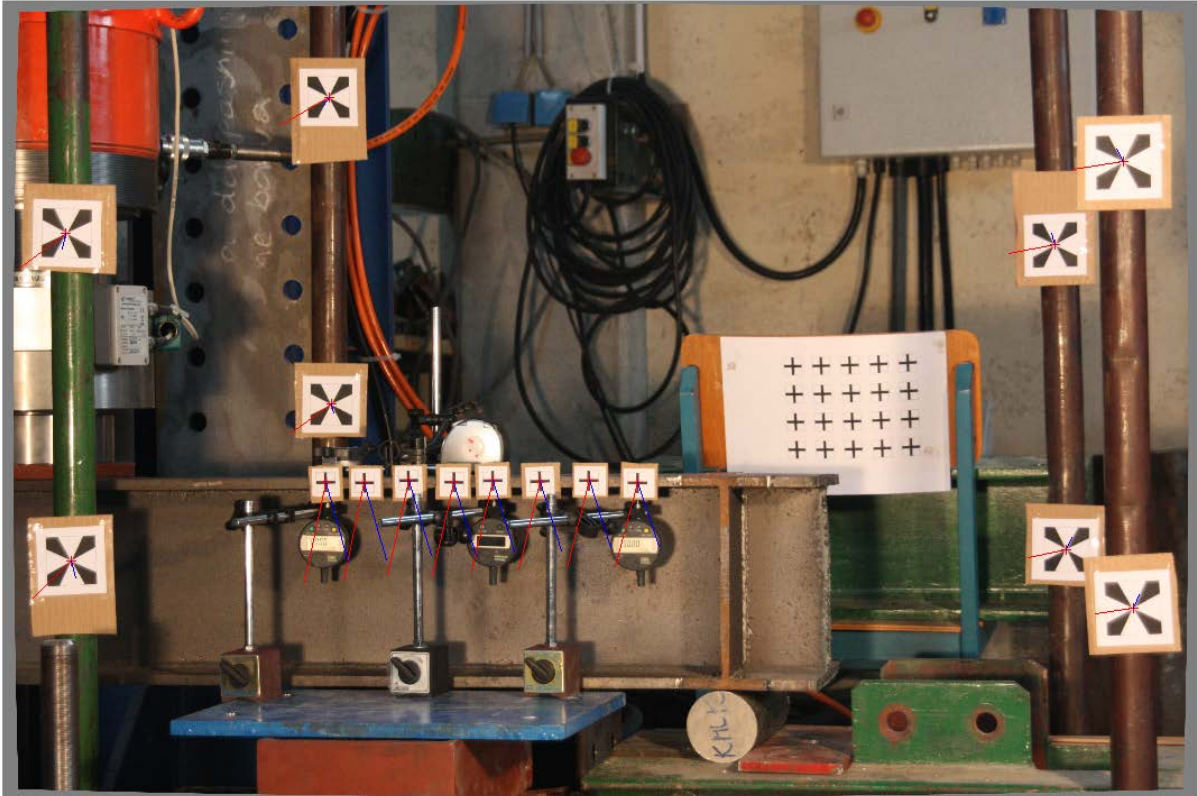
Slika 24: Fotografija testne meritve deformacij po odpravljeni radialni distorziji

4.7.2 Meritev premikov označenih točk med zaporednimi fotografijami

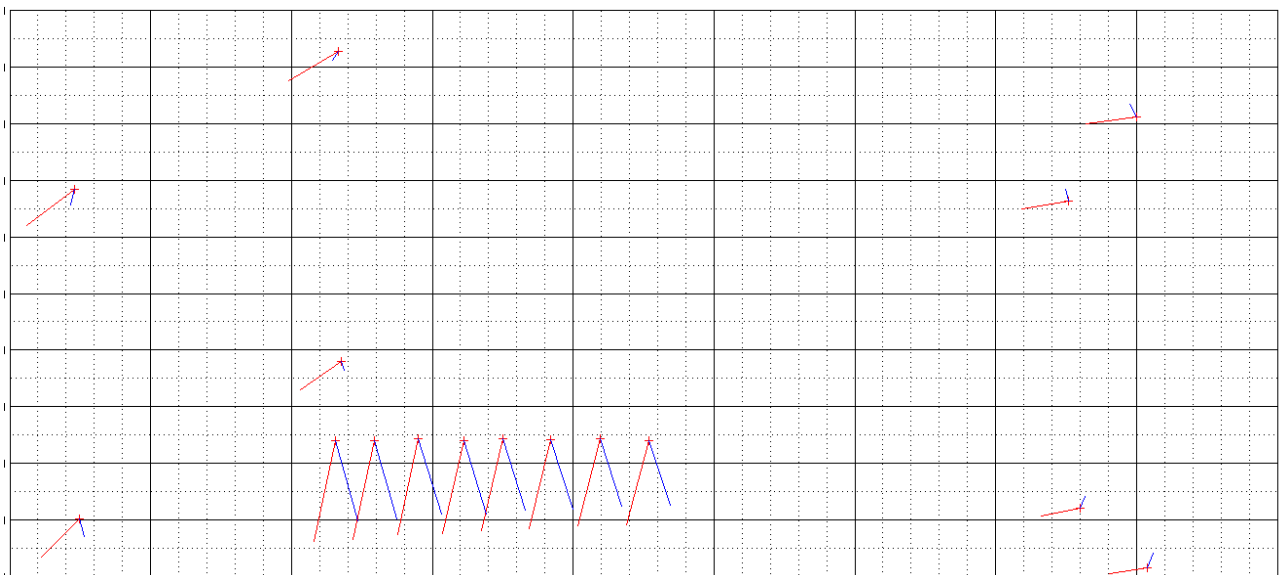
Premike označenih točk med zaporednimi posnetki sem izmeril s samodejno metodo. Najprej sem s sintetično tarčo izmeril položaje označenih točk na fotografijah začetega stanja. Nato sem na teh položajih iz fotografije izrezal naravne tarče ter z njimi izmeril premike med zaporednimi fotografijami. Premike sem izrisal. Med zaporednimi fotografijami sem izmeril tudi premike oslonilnih točk. Ti premiki so bili posledica premikov fotoaparata med zaporednimi posnetki. Pokazalo se je, da se je stabilizacija s fotografskimi stativi (uporabljena pri fotoaparatih Canon EOS 400D in Canon EOS 450D) obnesla slabše kot fiksiranje fotoaparata z elastiko na kovinski blok (uporabljeni pri fotoaparatu Pentax K200 D). Uporabljena stativa žal nista bila najboljše kvalitete.

Na slikah 25 do 28 sem izrisal izmerjene premike, povečane za faktor 50. Z rdečo barvo so izrisani premiki, kot so bili izmerjeni. Da bi dobil boljšo predstavbo, kaj se je s dogajalo med

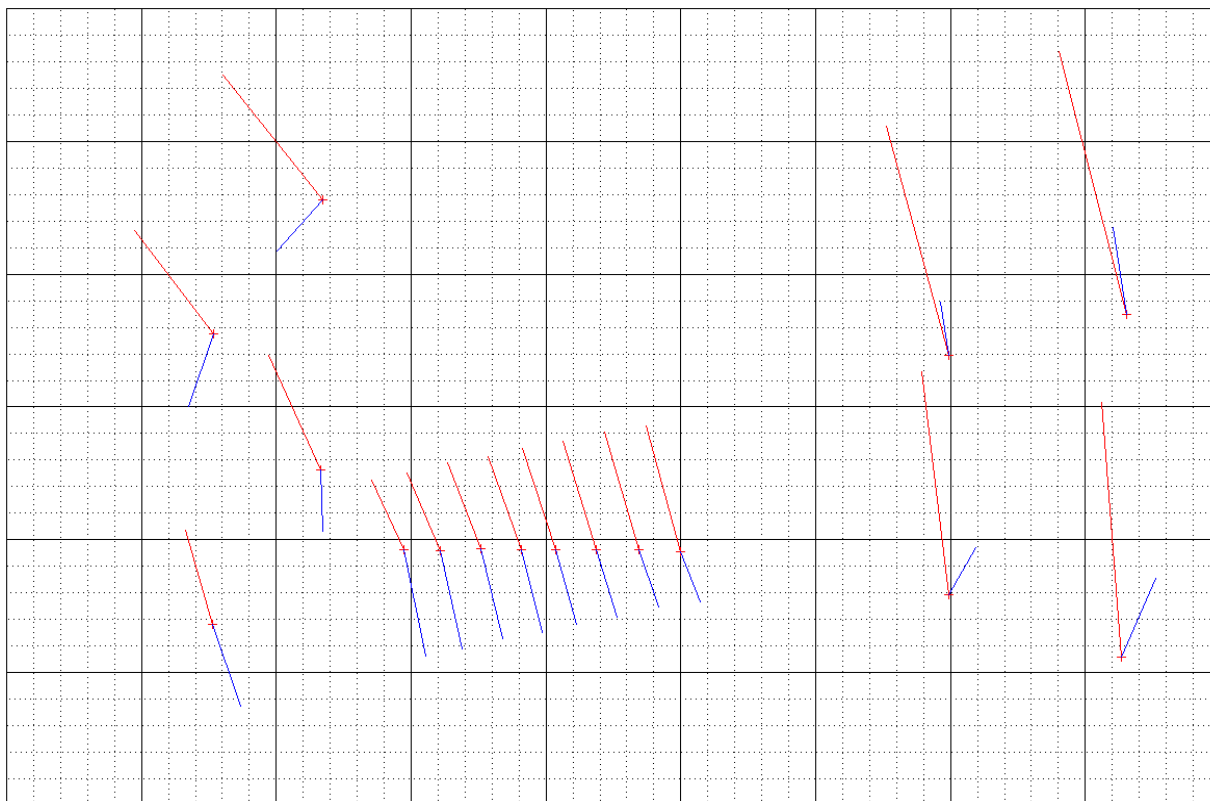
zaporednimi posnetki, sem od izmerjenih premikov odštel srednji premik oslonilnih točk, ter te izračunane premike izrisal z modro barvo.



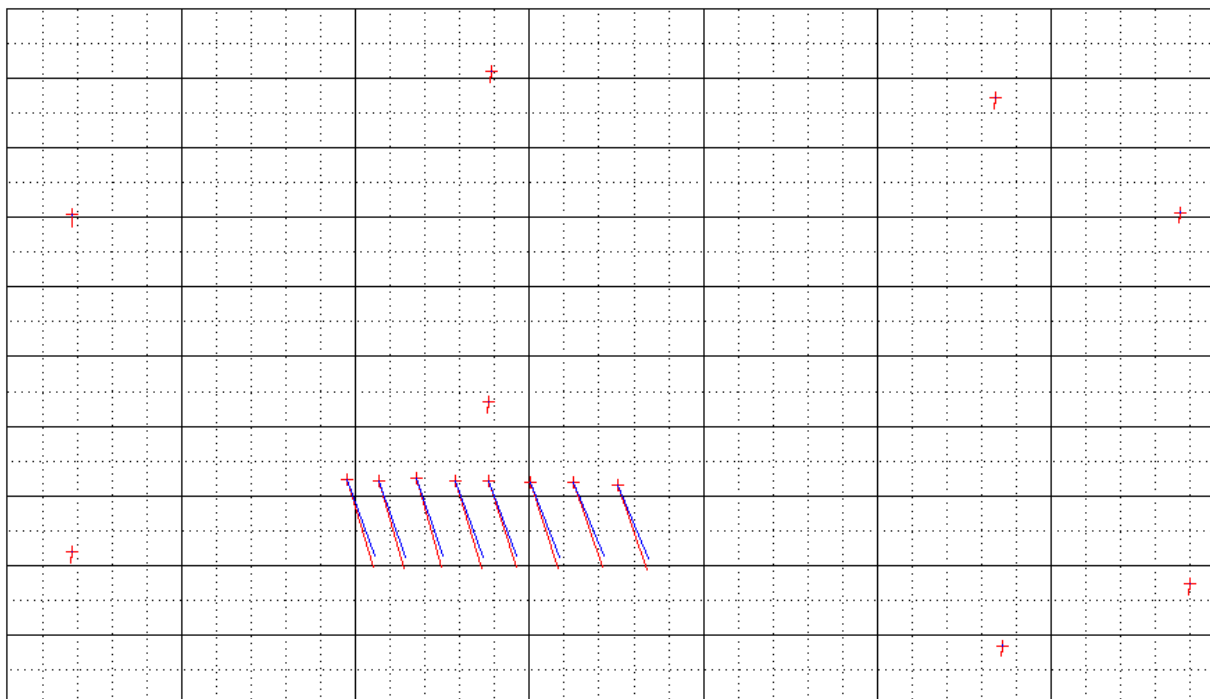
Slika 25: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Eos 450D



Slika 26: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Canon Eos 450D – brez ozadja



Slika 27: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Canon Eos 400D



Slika 28: Izrisani premiki (povečani za faktor 50) med 1. in 2. posnetkom Pentax K200 D

4.7.3 Direktna linearna transformacija

Iz izmerjenih premikov oslonilnih in detajlnih točk sem po metodi direktne linearne transformacije računal trirazsežne relativne premike detajlnih točk. Ker izmerjeni relativni premiki na fotografijah, posnetih s fotoaparatom EOS 400D, kažejo, da se je sam fotoaparatus med posameznimi fotografijami precej premikal (posledica uporabe premalo masivnega stativa), sem izvedel dve varianti izračuna. Prvič sem uporabil samo fotografije, napravljene s fotoaparatom EOS 450D in Pentax K200 D, drugič pa fotografije posnete z vsemi tremi fotoaparati. Izračunal sem oceno natančnosti izmerjenih premikov za oba primera.

Oceno natančnosti določitve premikov detajlnih točk na tramu sem izračunal na osnovi izravnave direktne linearne transformacije. Položaje detajlnih točk na fotografijah pred vsakim posameznim premikom sem obravnaval kot konstante, premike detajlnih točk med zaporednimi fotografijami pa kot opazovanja. Iz položajev detajlnih točk na fotografijah sem na osnovi izravnave direktne linearne transformacije izračunal trirazsežne položaje detajlnih točk pred premikom. Položaje detajlnih točk po premiku sem izračunal tako, da sem položajem detajlnih točk na fotografijah pred premikom prištel vrednost izmerjenih premikov detajlnih točk med zaporednimi fotografijami. Iz tako izračunanih položajev detajlnih točk na fotografijah sem z izravnavo izračunal trirazsežne položaje detajlnih točk po premiku. Od trirazsežnih položajev detajlnih točk po premiku sem odštel trirazsežne položaje detajlnih točk pred premikom. Kot rezultat sem pridobil trirazsežne premike detajlnih točk, na podlagi izravnave pa sem iz variančno-kovariančne matrike pridobil tudi oceno absolutne natančnosti izračunanih premikov. Ta ocena, ker je pridobljena iz izravnave presekov žarkov, vključuje še pogreške zaradi nepravilne določitve absolutnih položajev detajlnih točk.

4.7.4 Rezultati

Izkazalo se je, da so rezultati precej boljši v primeru uporabe vseh razpoložljivih fotografij. Razlog zato se gotovo skriva tudi v postavitvi fotoaparatorov (slika 22), kjer je vidno, da je bil fotoaparatus Eos 400D na skrajni levi. Rešitev, ki jo pridobimo ob uporabi slik, posnetih samo z ostalima dvema fotoaparatom, je slabša kot v primeru uporabe vseh razpoložljivih slik, ker ta dva fotoaparata ne zagotavljata dovolj dobrega prostorskega preseka žarkov. V preglednici 3

sem naredil primerjavo absolutnih ocen natančnosti izmerjenih premikov, pridobljenih iz variančno-kovariančne matrike, izračunane v izravnavi.

Preglednica 3: Primerjava absolutnih natančnosti izračunanih premikov v primeru različnih kombinacij podatkov

Absolutna ocena natančnosti izmerjenih premikov	Izračun na osnovi fotografij iz TREH stojišč [mm]	Izračun na osnovi fotografij iz DVEH stojišč [mm]
v horizontalni smeri X	0.38	0.59
v horizontalni smeri Y	0.18	0.37
v vertikalni smeri Z	0.12	0.15

V nadaljevanju sem uporabljal samo podatke, pridobljene ob uporabi vseh razpoložljivih fotografij. V preglednici 4 so prikazani na osnovi fotografij iz treh stojišč izračunani vertikalni premiki detajlnih točk med posameznimi stopnjami obremenitve.

Preglednica 4: Primer izmerjenih vertikalnih premikov detajlnih točk (dZ) na tramu med zaporednimi fotografijami [mm]

	Točka 1 [mm]	Točka 2 [mm]	Točka 3 [mm]	Točka 4 [mm]	Točka 5 [mm]	Točka 6 [mm]	Točka 7 [mm]	Točka 8 [mm]
Premik 1	-1.71	-1.69	-1.65	-1.63	-1.60	-1.59	-1.54	-1.51
Premik 2	-0.92	-0.86	-0.79	-0.71	-0.65	-0.57	-0.48	-0.34
Premik 3	-0.70	-0.69	-0.60	-0.52	-0.47	-0.40	-0.35	-0.20
Premik 4	-0.93	-0.86	-0.78	-0.70	-0.62	-0.55	-0.46	-0.31
Premik 5	-1.00	-0.93	-0.86	-0.78	-0.71	-0.63	-0.53	-0.43
Premik 6	-1.01	-0.95	-0.86	-0.77	-0.66	-0.58	-0.49	-0.29
Premik 7	-0.79	-0.66	-0.62	-0.57	-0.49	-0.44	-0.35	-0.23
Premik 8	-1.04	-1.01	-0.93	-0.83	-0.71	-0.64	-0.52	-0.27
Premik 9	-0.92	-1.06	-0.95	-0.85	-0.73	-0.66	-0.54	-0.18
Premik 10	-0.86	-1.05	-0.94	-0.84	-0.73	-0.62	-0.50	-0.29

Na točkah 1, 5 ter 8 na tramu so bile z merilnimi uricami opravljene kontrolne meritve vertikalnih premikov točk. Izračunane vertikalne premike na teh točkah sem primerjal s kontrolnimi meritvami in rezultate predstavil v preglednici 5.

Preglednica 5: Primerjava izračunanih relativnih vertikalnih premikov s kontrolnimi meritvami [mm]

	Točka 1 [mm]			Točka 5 [mm]			Točka 8 [mm]		
	Kontr.	DLT	razlika	Kontr.	DLT	razlika	Kontr.	DLT	razlika
Premik 1	-1.63	-1.71	0.08	-1.57	-1.60	0.03	-1.47	-1.51	0.04
Premik 2	-0.94	-0.92	-0.02	-0.66	-0.65	-0.01	-0.37	-0.34	-0.03
Premik 3	-0.50	-0.70	0.20	-0.31	-0.47	0.16	-0.03	-0.20	0.17
Premik 4	-0.91	-0.93	0.02	-0.62	-0.62	0.00	-0.29	-0.31	0.02
Premik 5	-0.99	-1.00	0.02	-0.69	-0.71	0.02	-0.47	-0.43	-0.04
Premik 6	-0.63	-1.01	0.38	-0.47	-0.66	0.19	-0.24	-0.29	0.05
Premik 7	-0.70	-0.79	0.09	-0.54	-0.49	-0.05	-0.25	-0.23	-0.02
Premik 8	-0.29	-1.04	0.75	-0.65	-0.71	0.06	-0.40	-0.27	-0.13
Premik 9	-0.84	-0.92	0.08	-0.67	-0.73	0.06	-0.23	-0.18	-0.04
Premik 10	-1.78	-0.86	-0.92	-0.69	-0.73	0.04	-0.28	-0.29	0.02
	$\sigma 1 :$		0.17	$\sigma 2 :$		0.09	$\sigma 3 :$		0.07

Za meritve na vsaki od kontrolnih točk sem izračunal oceno natančnosti izvedenih meritev vertikalnih premikov. Od kontrolnih meritev premikov sem odštel premike, ki so bili iz slikovnih koordinat izračunani po metodi DLT (v nadaljevanju fotogrametrične meritve). Za vsak premik vsake od kontrolnih točk sem izračunal vrednost razlike med kontrolnimi in fotogrametričnimi meritvami. Nato sem iz teh razlik po enačbi (43) za vsako od kontrolnih točk izračunal oceno natančnosti fotogrametričnih meritev (σ) na tej točki.

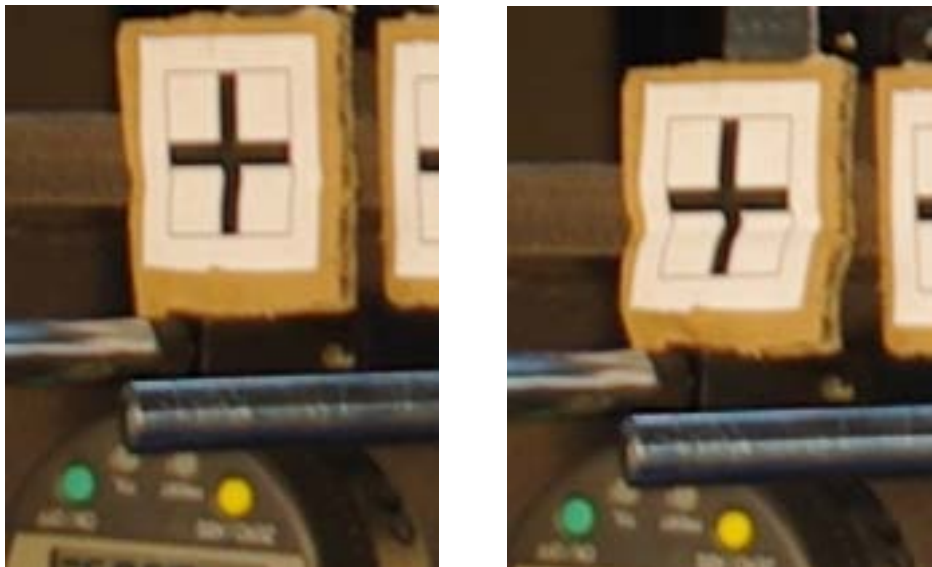
$$\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (43)$$

Na enak način (z uporabo enačbe (43)) sem ocenil tudi srednjo natančnost vseh fotogrametričnih meritev vertikalnih premikov na kontrolnih točkah, ki znaša 0.11 mm.

V to oceno natančnosti niso vključeni premiki 8, 9 ter 10 na točki 1 (v preglednici obarvani rdeče). Pri teh premikih se namreč pojavi večje odstopanje med kontrolno in izračunano vrednostjo premika, ki je posledica grobega pogreška.

Pri premiku 8 se namreč kartonska podloga, na katero je bil prilepljen križ, ki označuje detajlno točko 1, pritisne na ročico, ki drži merilno urico na mestu. Zaradi tega merilna urica

izmeri manjši premik, kot bi ga morala. Pri premiku 10 se kartonska podlaga deformira in rezultat je prevelik izmerjen premik na merilni urici.



Slika 29: Kartonska podlaga točke 1 med premikom 8 pritisne na ročico, ki drži merilno urico, in se med premikom 10 deformira

Kontrolne meritve z merilno urico so bile na točki 1 opravljene tudi v horizontalni smeri X. V preglednici 6 sem naredil primerjavo med premiki, pridobljenimi s kontrolnimi meritvami, in premiki, ki so bili izračunani z direktno linearno transformacijo.

Preglednica 6: Primerjava horizontalnih kontrolnih meritev premikov detajlne točke 1 z vrednostmi premikov, izračunanih z direktno linearno transformacijo

	Točka 1 [mm]		
	Kontr.	DLT	razlika
Premik 1	0.45	0.66	-0.21
Premik 2	0.33	0.43	-0.10
Premik 3	0.29	0.82	-0.53
Premik 4	0.42	0.44	-0.02
Premik 5	0.10	0.13	-0.03
Premik 6	0.42	0.42	0.00
Premik 7	0.46	0.67	-0.21
Premik 8	0.40	0.41	-0.01
Premik 9	0.44	0.45	-0.01
Premik 10	0.13	0.01	0.12
		σ :	0.20

Na podlagi primerjave premikov detajlnih točk v horizontalni smeri, izračunanih z direktno linearno transformacijo, s premiki, izmerjenimi s kontrolnimi meritvami, sem tudi v tem primeru z uporabo enačbe (43) ocenil relativno natančnost fotogrametrično izračunanih vrednosti premikov. Relativna ocena natančnosti izračunov premikov v horizontalni smeri znaša 0.20 mm.

Iz polja dvajsetih točk, prilepljenih na naslonjalo stola, sem izbral enajst takih, ki so bile lepo vidne na vseh fotografijah, ter izračunal vrednosti njihovih premikov. Ker vemo, da se kontrolne stacionarne točke med testom niso premikale, izmerjeni premiki že predstavljajo napako določitve premikov, in so tako lahko podlaga za oceno natančnosti. Izračunani premiki stacionarnih točk so razporejeni naključno, s srednjo vrednostjo blizu ničle.

Preglednica 7: Primer izračunanih vrednosti premikov stacionarnih točk v vertikalni smeri [mm]

Vertikalni premiki stacionarnih točk [mm]											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11
Premik 1	-0.005	0.010	0.000	0.000	0.001	0.003	-0.005	0.011	-0.014	0.000	0.000
Premik 2	-0.087	-0.099	0.001	0.004	-0.003	-0.001	0.003	0.007	-0.024	0.002	0.003
Premik 3	0.085	0.083	0.001	0.004	0.002	-0.002	0.001	0.005	-0.002	-0.007	0.007
Premik 4	0.008	0.012	-0.004	0.007	-0.005	-0.001	0.002	0.105	-0.010	0.000	-0.001
Premik 5	-0.005	0.004	0.003	0.006	0.000	0.002	0.005	-0.097	0.001	-0.005	0.000
Premik 6	-0.008	-0.002	0.006	-0.010	0.010	-0.010	0.005	-0.011	-0.005	-0.002	0.002
Premik 7	-0.009	-0.003	0.004	0.007	-0.002	-0.004	0.003	0.006	-0.010	0.007	0.007
Premik 8	-0.010	-0.002	0.014	0.006	-0.005	-0.003	0.010	-0.011	-0.008	-0.004	0.006
Premik 9	-0.008	0.000	0.015	0.001	-0.008	0.003	0.000	0.000	-0.005	0.014	-0.017
Premik 10	0.000	0.007	-0.004	0.007	-0.006	-0.005	0.004	-0.007	0.002	0.002	-0.008
Premik 11	0.004	0.001	0.007	0.007	-0.010	-0.002	0.006	0.096	-0.001	-0.002	-0.002

Tudi za premike stacionarnih točk sem po enačbi (43) ocenil natančnost fotogrametrično izmerjenih premikov. Ker so stacionarne točke med testom mirovale, so kontrolne vrednosti njihovih premikov znašale 0, razlika med izračunano in kontrolno vrednostjo posameznega izmerjenega premika pa je bila enaka negativni vrednosti izmerjenega premika. Rezultate sem predstavil v preglednici 8. Izkazalo se je, da je tako ocenjena relativna natančnost

izmerjenih premikov stacionarnih točk desetkrat boljša od ocenjene absolutne natančnosti izmerjenih premikov detajlnih točk na tramu, ki je bila izračunana v izravnavi.

Preglednica 8: Natančnost določitve premikov stacionarnih točk [mm]

Ocena relativne natančnosti izmerjenih premikov stacionarnih točk [mm]	
σ v horizontalni X smeri	0.024
σ v horizontalni Y smeri	0.012
σ v vertikalni Z smeri	0.010

4.7.4 Analiza rezultatov

Ocenjena relativna natančnost določitve vertikalnih premikov detajlnih točk na tramu, pridobljena na osnovi primerjave izračunanih vrednosti s kontrolnimi meritvami, je znašala 0.11 mm. Ta vrednost se dobro ujema z vrednostjo absolutne natančnosti premikov, ocenjeno na podlagi izravnave direktne linearne transformacije. V izravnavi ocenjena natančnost premikov detajlnih točk v vertikalni smeri je namreč znašala 0.12 mm. Pri tem so znašale vrednosti vertikalnih premikov točk med testom okoli 1 mm.

Za horizontalne premike v smeri X, je znašala na osnovi primerjave izračunanih vrednosti s kontrolnimi meritvami ocenjena natančnost izmerjenih premikov 0.22 mm. To je precej bolje kot v izravnavi ocenjena natančnost v tej smeri, ki je znašala 0.38 mm. Pri tem so bili premiki točk v smeri X velikosti okrog 0.4 mm.

Pri merjenju premikov označenih točk gre za merjenje dolžine med dvema točkama v različnih časovnih trenutkih. Pridobljeni rezultati kažejo, da v primeru merjenja premikov točk veljajo podobna pravila kot v primeru merjenja dolžin. Natančnost izmerjenega premika namreč pada z večanjem premika, ki ga merimo. Zaradi tega so izmerjene relativne natančnosti premikov stacionarnih točk okoli desetkrat manjše, kot ocenjene relativne natančnosti izmerjenih premikov detajlnih točk. Iz istega razloga je bila relativna natančnost

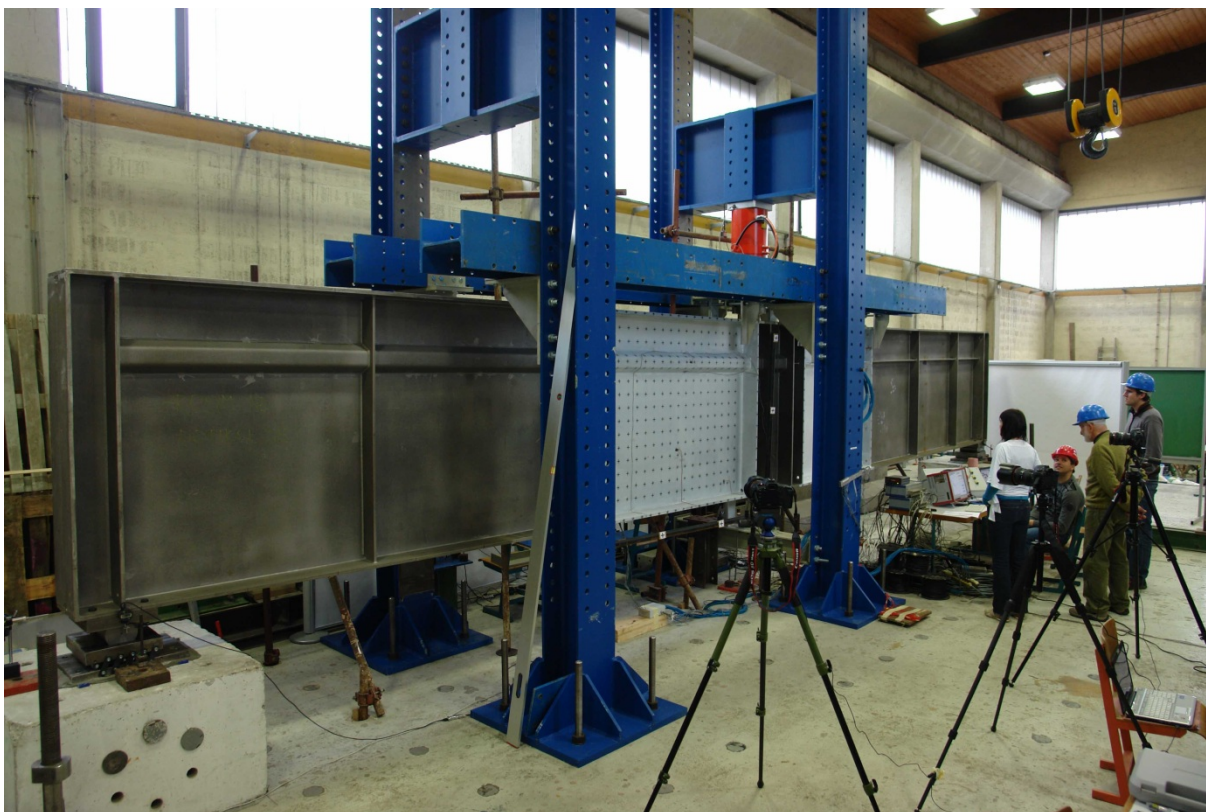
izmerjenih premikov v smeri X ocenjena na podlagi kontrolnih meritev boljša, kot v izravnavi ocenjena absolutna natančnost.

Rezultati testa fotogrametrične meritve deformacij so bili zadovoljivi. Ker smo ugotovili, da male deformacije lahko izmerimo z relativno visoko natančnostjo, ter ker so bile natančnosti izmerjenih premikov detajlnih točk dovolj visoke, smo sklenili, da bomo v pri izvedbi tritočkovnih obremenilnih testov polnostenskih nosilcev za spremljanje deformacij uporabili opisano fotogrametrično večslikovno metodo.

5 FOTOGRAMETRIČNA DOLOČITEV DEFORMACIJ POVRŠINE JEKLENIH NOSILCEV Z VEČSLIKOVNO METODO

5.1 Uvod

Končne meritve deformacij površine jeklenega nosilca so bile izvedene na osnovi rezultatov predhodnih testov. Postopke, ki smo jih razvili v predhodnih testih, smo tudi izboljšali in uporabili bolj kakovostno opremo. V okviru eksperimentov smo skupno izvedli štiri meritve deformacij površine opazovanega dela nosilca. Meritve smo izvajali na dveh nosilcih (na vsakem nosilcu sta bili izvedeni dve meritvi). Posamezne meritve deformacij so potekale v razmaku štirinajstih dni. Deformacije so nastale kot posledica ukrivljanja nosilcev s hidravličnim batom. Ta je nosilec obremenjeval s silo, ki se je postopoma povečevala do vrednosti 2000 kN, potem pa smo nosilec še postopoma razbremenili. Po vsakem koraku obremenitve (oziroma razbremenitve) smo posneli fotografije površine opazovanega dela nosilca iz treh stojišč. Na osnovi teh fotografij smo določili začetno obliko opazovanega dela nosilca in izračunali, kako se je med eksperimentom deformirala opazovana površina.



Slika 30: Izvedba meritve ploskovnih deformacij na jeklenem polnostenskem nosilcu

5.1.1 Opis lokalnega koordinatnega sistema

Meritve smo izvajali v lokalnem koordinatnem sistemu. Koordinatno os Z smo izbrali v smeri vertikale. Os Y smo izbrali tako, da je bila horizontalna in vzporedna z vzdolžnim potekom nosilca. Ker je bil nosilec postavljen vertikalno, je bila ravnina YZ vzporedna s steno nosilca. Smer osi X smo nato izbrali pravokotno na ravnino YZ. Usmerjena je bila proti fotoaparatom.

5.2 Metodologija

Izvedene so bile štiri meritve deformacij. V nadaljevanju bodo predstavljeni rezultati in postopki, ki so vodili do rezultatov v četrti meritvi deformacij. Enaki postopki so bili uporabljeni pri ostalih treh meritvah.

Opazovani del nosilca smo prebarvali z belo barvo. Detajlne točke na nosilcu smo signalizirali tako, da smo nanj nalepili posebne, na matirano folijo natisnjene križe. Pred vsakim testom smo najprej izvedli kalibracijo fotoaparatom. V ta namen smo z vsakim fotoaparatom posneli fotografije testnega polja. Na podlagi teh smo pozneje izračunali vpliv radialne distorzije. V okolici opazovanega območja smo signalizirali oslonilne točke. Položaje oslonilnih točk smo izmerili z elektronskim tahimetrom. Fotoaparate smo stabilizirali s fotografskimi stativi. Proženje fotoaparatom smo nadzorovali z računalnikom, ki je imel naloženo posebno programsko opremo. Najprej smo posneli fotografije začetnega stanja nosilca. Nato smo pričeli z obremenjevanjem. Po vsaki stopnji obremenitve smo posneli fotografije nosilca.

Sledila je računska obdelava posnetih fotografij. Po metodi direktne linearne transformacije sem najprej iz fotografij začetnega stanja izračunal začetno obliko opazovanega dela nosilca. Nato sem na osnovi relativnih premikov označenih detajlnih točk, med fotografijami začetnega stanja in fotografijami po posameznih stopnjah obremenitve, izračunal premike detajlnih točk v trirazsežnem prostoru. Podatke o začetnih položajih detajlnih točk ter podatke o premikih detajlnih točk sem povezal in grafično predstavil. Kot rezultat smo pridobili

informacijo o prostorski deformaciji površine opazovanega dela nosilca, ki je nastala kot posledica obremenjevanja nosilca.

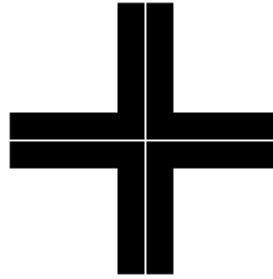
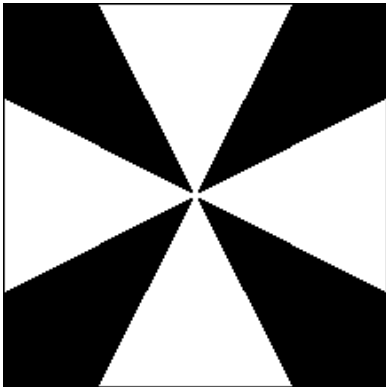
5.3 Razlike med testno meritvijo deformacij in fotogrametrično določitvijo deformacij površine jeklenih nosilcev

Cilj končne meritve deformacij je bil izmeriti deformacije površine nosilca z natančnostjo, ki je večja ali vsaj enaka natančnosti doseženi v testni meritvi deformacij. Opazovano območje je bilo v primeru meritev deformacij površine nosilcev precej večje, kot v primeru predhodne testne meritve deformacij na tramu. Zato smo uporabili fotoaparate višje kakovosti, z večjimi dimenzijami senzorjev ter večjo ločljivostjo.

Da bi zmanjšali samo premikanje fotoaparatorov med potekom eksperimenta, smo za stabilizacijo fotoaparatorov uporabili masivne fotografske stativne.

Fotoaparate smo upravljali elektronsko. V ta namen smo fotoaparate preko USB vmesnika povezali na prenosni računalnik, na katerem smo imeli naloženo programsko opremo DSLR Remote Pro Multi-Camera. Ta program nam je omogočal spreminjanje nastavitvev za vse fotoaparate naenkrat ter njihovo istočasno proženje.

Da bi zagotovili višjo natančnost določitve položajev oslonilnih točk, smo spremenili obliko oslonilnih točk iz tarč v obliki znaka " X ", ki so bile uporabljene v predhodnem testu, v tarče v obliki črnega znaka " + ", ki je imel na sredini tanek bel križ. Ta je omogočal, da smo s teodolitom precizno vizirali v sredino tarče.



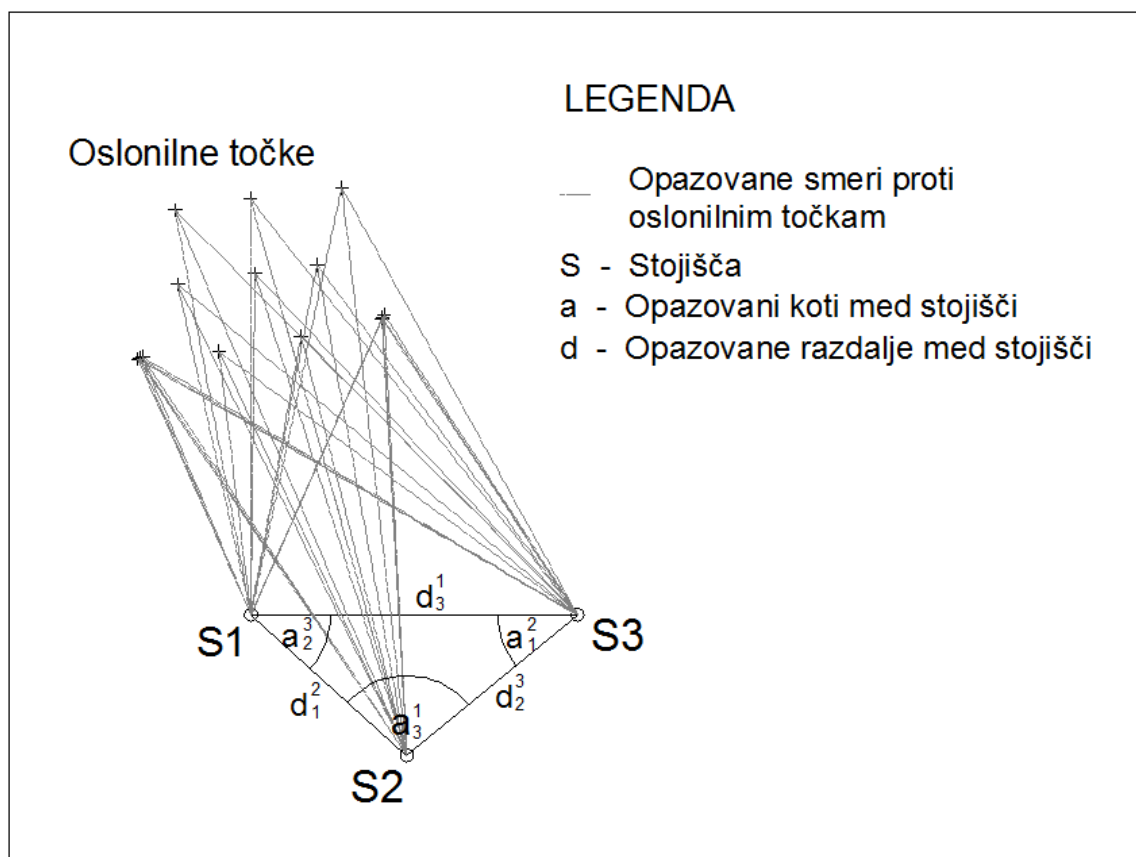
Slika 31: Primerjava uporabljenih tarč za oslonilne točke v predhodnem (levo) in končnem (desno) testu

Število oslonilnih točk smo z osmih točk, uporabljenih v predhodnem testu, povečali na štirinajst, uporabljenih v meritvah deformacij površine nosilca.

Da bi položaje oslonilnih točk določili z višjo natančnostjo, smo postopek izmere položajev oslonilnih točk izvedli z nadštevilnimi meritvami. Iz treh stojiščnih točk smo opazovali smeri proti oslonilnim točkam. Položaje oslonilnih točk smo nato izračunali z izravnavo in tako pridobili še oceno natančnosti določitve položajev oslonilnih točk.

5.4 Določitev položajev oslonilnih točk

Položaje oslonilnih točk sem določil z nadštevilnimi opazovanji kotov proti oslonilnim točkam. V ta namen sem uporabil elektronski tahimeter - Leica 2003. Izbral sem si tri stojiščne točke. Z vsake od teh točk sem v treh girusih opazoval kote in dolžine proti ostalima stojiščnima točkama, ter kote proti oslonilnim točkam. Iz opazovanj kotov in dolžin med stojiščnimi točkami sem z izravnavo po metodi najmanjših kvadratov izračunal koordinate stojiščnih točk v lokalnem koordinatnem sistemu. Izračunane koordinate sem v nadaljnji izravnavi uporabil kot dane količine ter s programom GEM izravnaval opazovanja kotov s stojiščnih točk proti oslonilnim točkam. Kot rezultat sem pridobil koordinate oslonilnih točk v lokalnem koordinatnem sistemu, ter pripadajoče ocene natančnosti izračunanih koordinat.



Slika 32: Floris mreže za določitev koordinat oslonilnih točk

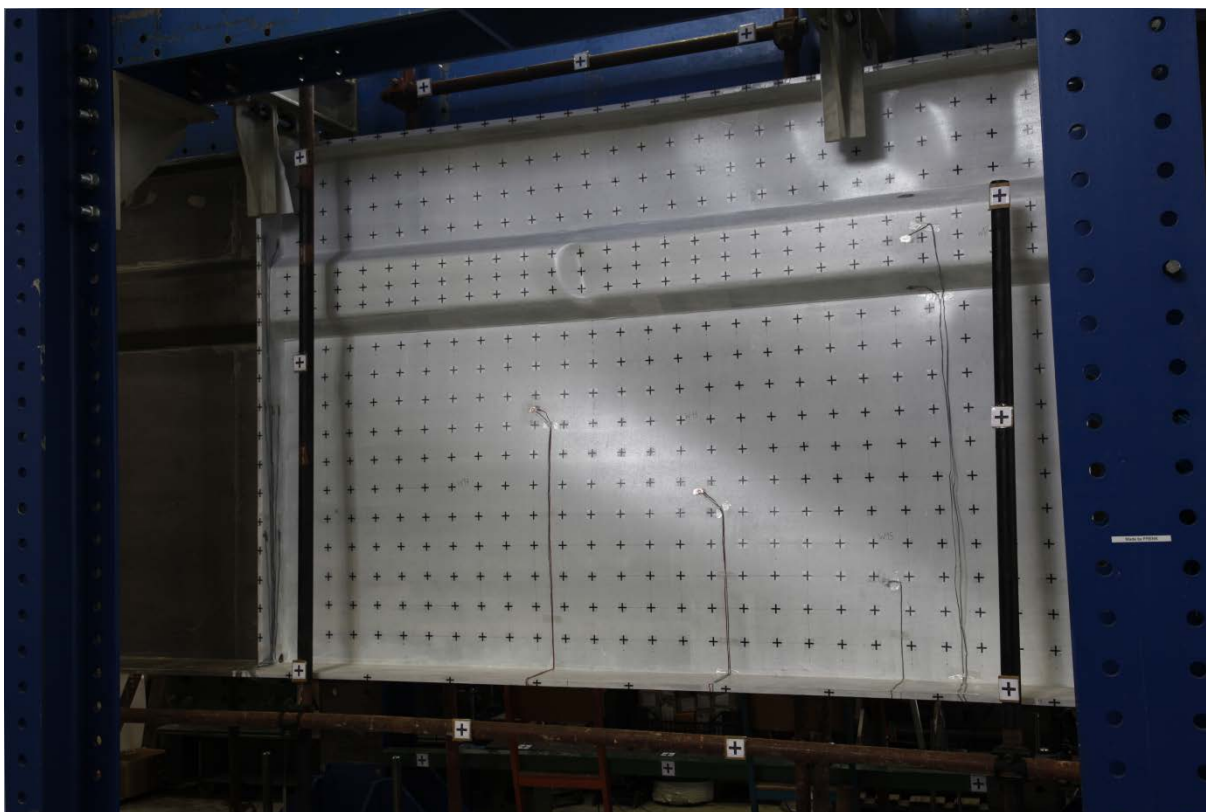
5.5 Fotografiranje

Fotografije smo posneli istočasno iz treh stojišč. Uporabljeni so bili trije fotoaparati Canon EOS 5 mk. II. Fotoaparati imajo CMOS senzor ločljivosti 21 megapikslov. Velikost senzorja je 36 mm x 24 mm. Fotoaparate so nam posodili podjetje Fotoizposoja, Miha Mikoš in fotograf Karel Oskar Dolenc. Gospod Dolenc je tudi zagotovil ustrezne fotografske stativo in je tudi sodeloval pri fotografiranju.



Slika 33: Fotoaparati Canon EOS 5 Mark II

Najprej smo posneli fotografije stanja nosilca pred pričetkom obremenjevanja. Nato smo začeli postopoma obremenjevati nosilec. Po vsaki stopnji obremenitve smo napravili novo serijo fotografij. Sila, s katero smo obremenjevali nosilec, je postopoma naraščala do vrednosti 2000 kN. Ko je bila faza obremenjevanja končana, smo nosilec še postopoma razbremenili ter sproti fotografirali. Kot zadnje fotografije v seriji smo posneli fotografije razbremenjenega nosilca, na katerem so ostale vidne plastične deformacije, kot posledica obremenjevanja nosilca.

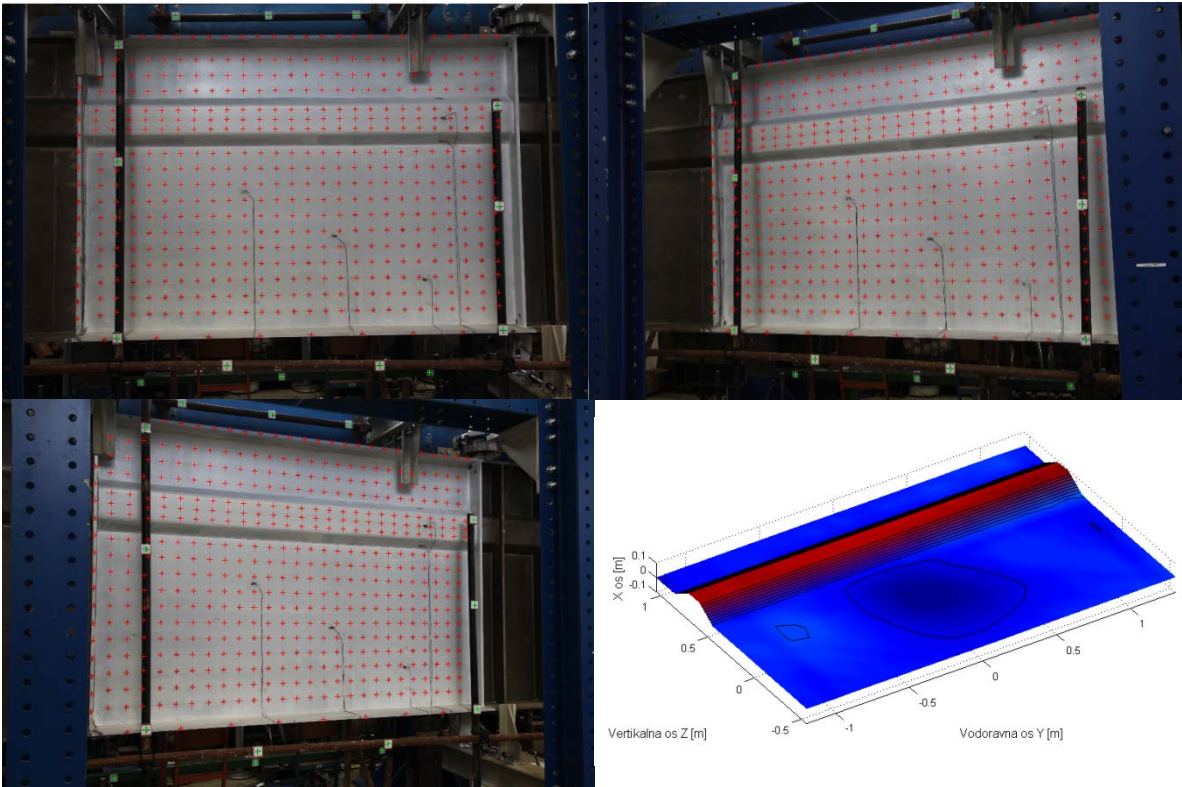


Slika 34: Fotografija razbremenjenega nosilca, na katerem so vidne plastične deformacije nosilca

5.6 Računska obdelava posnetih fotografij

5.6.1 Izračun začetne oblike nosilca

Na posnetih fotografijah sem najprej v programu Foto analist odpravil vpliv radialne distorzije. Na fotografijah začetnega stanja nosilca sem nato s samodejno meritvijo izmeril slikovne koordinate detajlnih in oslonilnih točk. Iz trirazsežnih objektnih koordinat oslonilnih točk in slikovnih koordinat oslonilnih točk na fotografijah sem izračunal parametre direktne linearne transformacije, za vsako od fotografij začetnega stanja nosilca. Iz izračunanih parametrov direktne linearne transformacije ter iz slikovnih koordinat detajlnih točk na fotografijah sem izračunal trirazsežne koordinate detajlnih točk. V primerih, kjer nekatere detajlne točke niso bile vidne na fotografijah iz vseh treh stojišč (ker so jih prekrivali drogovi z oslonilnimi točkami), sem trirazsežne položaje teh točk izračunal na osnovi položajev točk na ostalih dveh fotografijah.



Slika 35: Fotografije začetnega stanja nosilca, z izmerjenimi položaji oslonilnih (zeleni križi) in detajlnih točk (rdeči križi), ter na osnovi teh položajev izračunana začetna oblika nosilca

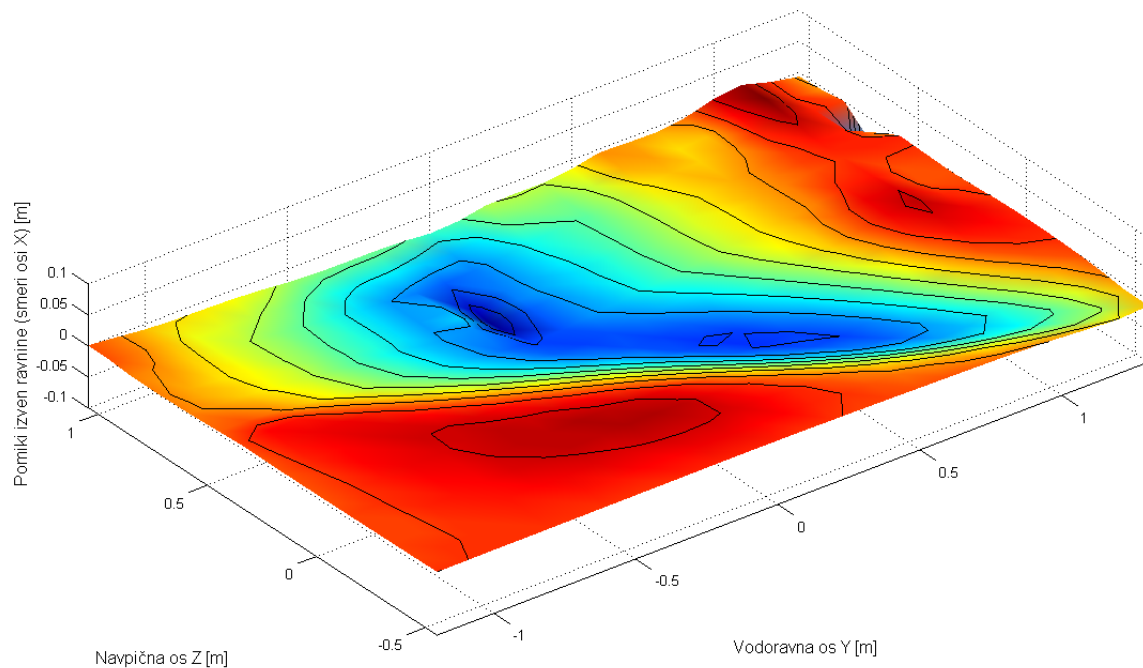
Na osnovi izravnave direktne linearne transformacije sem izračunal povprečno oceno natančnosti položaja detajlnih točk, s katerimi je bila določena začetna oblika nosilca. Ta je v smeri X (pravokotno na ravnino stene nosilca) znašala 1.3 mm, v vertikalni smeri Z 0.44 mm in v horizontalni smeri Y 0.45 mm.

V prilogi B so prikazane izmerjene začetne oblike vseh štirih nosilcev, na katerih smo izvajali meritve deformacij.

5.6.2 Izračun deformacij površine nosilca

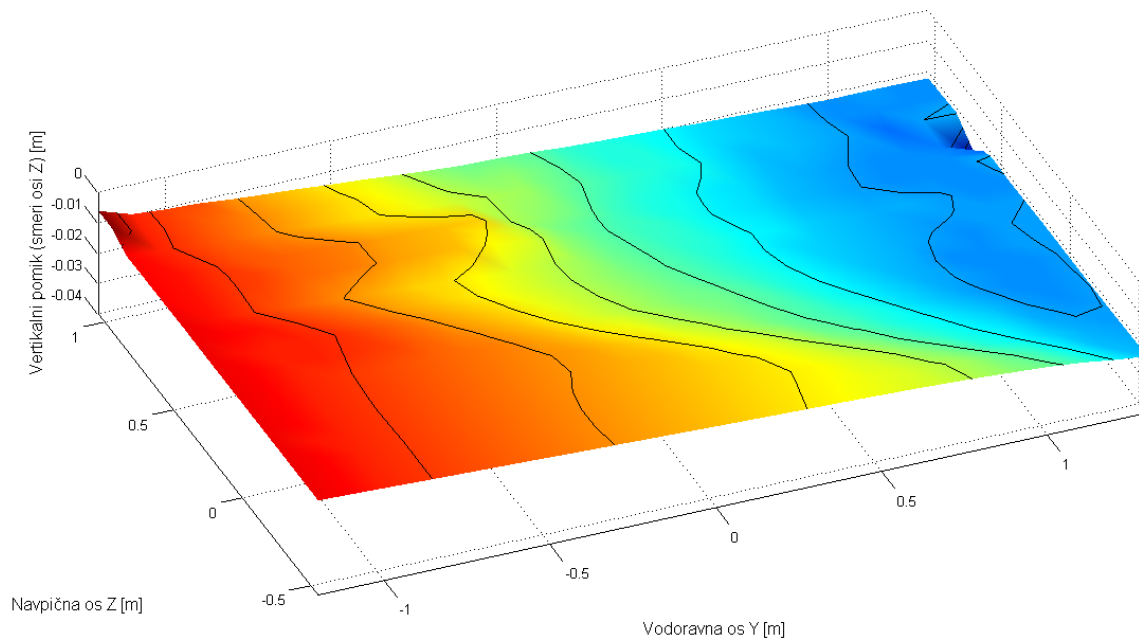
Sledil je izračun deformacij nosilca. Za vsako stopnjo obremenitve sem izračunal deformacije, ki so nastale na nosilcu. V ta namen sem opazoval premike detajlnih in oslonilnih točk med fotografijami začetnega stanja nosilca in fotografijami trenutnega stanja nosilca. Iz premikov

signaliziranih točk, položajev signaliziranih točk na fotografijah začetnega stanja, ter objektnih koordinat oslonilnih točk sem izračunal trirazsežne premike detajlnih točk. Ker je bilo število točk, na katerih so bili merjeni posamezni pomiki točk, veliko (več kot 400), sem deformacije predstavil tako, da sem interpoliral ploskev, ki je za vsako točko na nosilcu prikazovala izmerjeno vrednost premika te točke.



Slika 36: Primer izmerjenih premikov detajlnih točk v smeri izven ravnine stene na opazovanem delu nosilca, po zaključku testa (deformacije v smeri X - končno stanje)

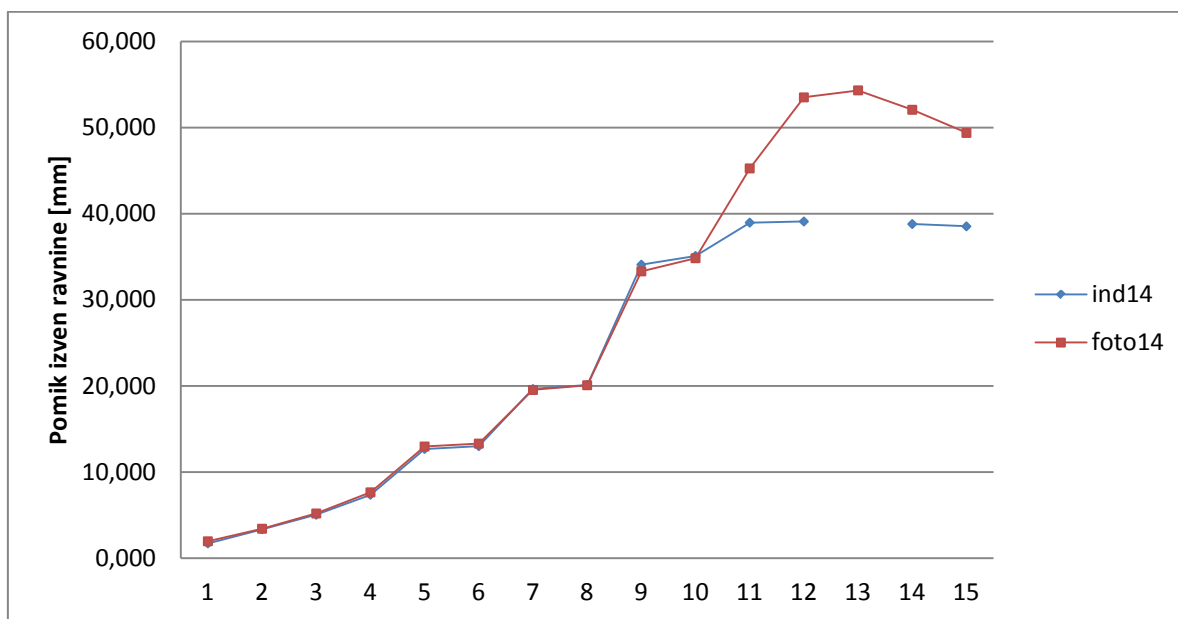
V prilogi C je prikazan razvoj deformacij v smeri pravokotno na ravnino stene nosilca po posameznih stopnjah obremenitve, izmerjenih v okviru četrtega obremenitvenega testa.



Slika 37: Primer izmerjenih vertikalnih pomikov detajlnih točk na opazovanem delu nosilca, po zaključku testa (deformacije v vertikalni smeri - končno stanje)

5.7 Analiza rezultatov

Na treh kontrolnih detajlnih točkah so bile opravljene kontrolne meritve. Meritve je izvajal univ.dipl.inž.grad. Franci Sinur (doktorand). Z induktivnimi merilci je na položajih kontrolnih točk izmerili pomike izven ravnine nosilca. Induktivne merilci so bili z vrstico, ki je tekla preko škripca, povezani z zadnjo stranjo nosilca. Pomiki kontrolnih točk nad oziroma pod ravnino so povzročili dviganje oziroma spuščanje merilnega dela na induktivnem merilcu. Kontrolne meritve pomikov točk izven ravnine nosilca (v smeri X) smo primerjali s fotogrametričnimi meritvami.



Slika 38: Graf primerjave premikov iz ravnine na kontrolni točki 14, izmerjenih fotogrametrično (rdeča graf) in z induktivnim merilcem (moder graf), po posameznih korakih obremenitve nosilca

V prilogi D so prikazani vsi grafi primerjav fotogrametrično in induktivno izmerjenih premikov kontrolnih točk v smeri pravokotno na ravnino stene nosilca.

Izkazalo se je, da tudi kontrolne meritve niso bile povsem zanesljive. V primeru na sliki 38 je bil hod induktivnega merilca v pozitivni smeri slabih 4 cm. Zato v tem primeru induktivne meritve pomikov večjih od 4 cm niso bile točne. Podatek o induktivni meritvi v trinajsti stopnji ni bil zabeležen, zato je modra linija, ki predstavlja induktivne meritve na grafu, na tem mestu prekinjena.

Za vsako od štirih meritev deformacij v okviru obremenitvenih testov sem ocenil natančnost izmerjenih deformacij. Na podlagi primerjave kontrolnih induktivnih in fotogrametričnih meritev sem po enačbi (43) izračunal oceno natančnosti za vsako od štirih meritev deformacij v posameznih obremenitvenih testih in jih predstavil v preglednici 9. V primeru podatkov na grafu iz slike 38 sem v oceni natančnosti uporabili podatke o meritvah premikov do vključno 10 stopnje obremenitve.

Preglednica 9: Ocenjene natančnosti (iz primerjave induktivnih in fotogrametričnih meritev) s katerimi smo izmerili deformacije površine v smeri X (izven ravnine)

Obremenitveni test	Ocenjena natančnost meritve deformacij
Prvi test	0.44 mm
Drugi test	0.72 mm
Tretji test	0.85 mm
Četrti test	0.72 mm

Deformacije površine nosilca smo uspešno izmerili. Pridobljeni rezultati bodo uporabljeni v nadaljnjih raziskavah deformiranja metalnih konstrukcij in bodo del doktorske disertacije kandidata Francija Sinurja na temo deformiranja metalnih konstrukcij.

6 ZAKLJUČEK

Rezultati testa empirične ločljivosti nemerskega fotoaparata v prvi fazi raziskave so pokazali, da so digitalni fotoaparati napredovali do te mere, da so uporabni za merjenje deformacij oziroma za pridobivanje metričnih informacij o okolju. Ugotovili smo, da lahko z metodami samodejnih meritev signaliziranih točk zaznamo in izmerimo premike takšnih točk od 0.02 piksla do 0.06 piksla natančno.

V drugi fazi raziskave smo nato izvedli testno večslikovno fotogrametrično meritev deformacij na jeklenem tramu. Izmerjene deformacije smo primerjali s kontrolnimi meritvami, ter na podlagi te primerjave ocenili natančnost izmerjenih deformacij. Natančnost izmerjenih deformacij v vertikalni smeri smo ocenili na 0.12 mm, natančnost v horizontalni smeri X pa na 0.22 mm.

V tretji fazi raziskave smo pridobljene rezultate uporabili pri merjenju deformacij površine vzdolžno ojačanih polnostenskih nosilcev. Deformacije površine smo uspešno izmerili z relativno natančnostjo okoli 0.7 mm.

Na podlagi pridobljenih rezultatov smo pokazali, da se bližnjeslikovna fotogrametrija lahko kosa s precej dražjimi tehnikami, kot je na primer lasersko skeniranje. Ker so fotoaparati precej bolj razširjeni kot laserski skenerji, je uporaba fotogrametrije toliko bolj privlačna. Glavne prednosti fotogrametrije pred laserskim skeniranjem so istočasno zajetje vseh opazovanih točk, beleženje pa je opravljeno v trenutku. Poleg tega je natančnost meritev premo sorazmerna z merilom snemanja. V primeru višje zahtevane natančnosti tako vedno lahko posnamemo več fotografij manjšega območja v večjem merilu. Ugotovljene slabosti fotogrametrije so, da je včasih težko v vidnem polju fotoaparata zagotoviti dovolj prostorsko lepo razporejenih oslonilnih točk, prav tako je težko dobro prostorsko razporediti stojišča fotoaparatorov ter s tem zagotoviti dober prostorski presek slikovnih žarkov. Zaradi tega je navadno pri uporabi fotogrametrije dosežena natančnost izmerjenih količin v smeri optičnih osi slabša kot v ostalih smereh.

S pridobljenimi rezultati smo pokazali, da je razvoj digitalnih fotoaparatorov napredoval do te mere, da so uporabni za najnatančnejše meritve. V obdobju zadnjih desetih let je ločljivost senzorjev nemerskih fotoaparatorov namreč napredovala z vrednosti okoli 4 megapiksle do vrednosti nad 20 megapikslov. Relativno zahteven trg fotografske opreme namreč narekuje hiter razvoj digitalnih fotoaparatorov. V prihodnosti lahko pričakujemo boljše fotoaparate, z višjo ločljivostjo senzorjev, ki bodo tako lahko ponudili natančnejši model realnosti. Tako bo bližnjėslikovno fotogrametrijo še lažje uporabiti za potrebe meritev deformacij ali oblik objektov. Algoritmi, uporabljeni za izračun deformacij, bodo uporabni tudi za nadaljnje raziskave in eksperimente.

VIRI

Ackermann, F., 1988, Digital Image Correlation: Performance and Potential Application in photogrammetry. The photogrammetric record, Volume 11, 64: 429-439 .

Bethel, J. 1997. Least squares image matching for CE604. Purdue University, 7.
<http://cobweb.ecn.purdue.edu/~bethel/main1.pdf> (07. 03. 2011)

Fryer, J., Mitchell, H., Chandler, J., 2007. Applications of 3D measurements from images. Dunbeath, založba Whittles publishing: 336 str.

Gruen, A.W., 1985. Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology, 175-187, 187. http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/AG_pub/ALSM_AWGruen.pdf (07. 03. 2011)

Kraus, K., 1997. Photogrammetry Volume 2, Advanced Methods and Applications. Bonn, založba Dümmler: str. 99 – 113, 177.

PRILOGE

Priloga A: Preglednica s podatki iz testa empirične ločljivosti fotoaparata

Serijska	ID	Odčitek (mm)	Opomba slike	Opomba serije	Odčitani premik (mm)	Izmerjeni premik (mm)	Odstopanje (mm)	s0 (µm)	Nivo kvalitete
1	1	0.758		D=0.59 cm, 1/50, f4.0, ISO 400, @40mm					2
	2	1.759			1.001	0.965	0.036	6.21	1
	3	2.765			1.006	0.988	0.018	2.39	1
	4	3.781			1.016	1.006	0.010	3.65	1
	5	4.806			1.025	1.026	-0.001	7.92	2
	6	5.839			1.033	1.020	0.013	2.12	2
	7	6.869			1.030	1.007	0.023	9.90	1
	8	7.866			0.997	1.017	-0.020	3.15	2
	9	8.881			1.015	1.000	0.015	3.94	1
	10	9.894			1.013	1.005	0.008	4.86	1
	11	10.134	postfestum	0.240	0.225	0.015	12.84	2	

2	1	0.004		D=0.59 cm, 1/250, f4.0, ISO 1600, @40mm	0.000				1
	2	0.843			0.839	0.862	-0.023	2.22	1
	3	1.843			1.000	0.993	0.007	2.48	1
	4	2.850			1.007	1.005	0.002	2.62	1
	5	3.865			1.015	1.002	0.013	3.56	1
	6	4.891			1.026	1.036	-0.010	3.38	2
	7	5.922			1.031	1.019	0.012	4.49	2
	8	6.949			1.027	1.021	0.006	6.16	1
	9	7.950			1.001	1.003	-0.002	3.29	1
	10	8.966			1.016	1.005	0.011	2.21	2
	11	9.981			1.015	1.018	-0.003	4.66	1
	12	10.134			0.153	0.122	0.031	1.82	1
3	1	0.002		D=0.59 cm, 1/250, f4.0, ISO 1600, @40mm	-10.132				3
	2	0.075			0.073	0.076	-0.003	7.17	1
	3	0.173			0.098	0.097	0.001	4.17	3
	4	0.272			0.099	0.099	0.000	5.06	1
	5	0.378			0.106	0.090	0.016	3.07	2
	6	0.478			0.100	0.103	-0.003	2.68	2
	7	0.569			0.091	0.097	-0.006	2.61	2
	8	0.669			0.100	0.100	0.000	1.76	2

	9	0.771			0.102	0.114	-0.012	4.51	2
	10	0.870			0.099	0.126	-0.027	8.03	3
	11	0.969			0.099	0.057	0.042	5.35	2
	12	1.068			0.099	0.101	-0.002	1.56	1
	13	1.089	postfestum		0.021	0.016	0.005	1.81	1
-0.002 vmesna -0.113									
4	1	0.003		D=0.59 cm, 1/250, f4.0, ISO 1600, @40mm	-1.086				3
	2	0.008			0.005	-0.024	0.029	4.62	2
	3	0.018			0.010	0.014	-0.004	1.68	2
	4	0.029			0.011	0.007	0.004	1.94	2
	5	0.039			0.010	0.008	0.002	3.12	1
	6	0.048			0.009	0.011	-0.002	4.88	2
	7	0.058			0.010	0.011	-0.001	1.47	2
	8	0.068			0.010	0.003	0.007	3.48	2
	9	0.078			0.010	0.008	0.002	2.62	1
	10	0.088			0.010	0.012	-0.002	2.95	2
	11	0.097			0.009	0.008	0.001	1.46	2
	12	0.108			0.011	0.008	0.003	1.54	2
	13	0.111	postfestum			0.003	0.001	0.002	1.68
5	1	-0.002		D=0.59 cm, Osvetlite v z lučjo, 1/250, f4.0, ISO 400, @40mm	0.000				1
	2	0.005			0.007	0.007	0.000	1.21	1
	3	0.014			0.009	0.010	-0.001	0.79	1
	4	0.025			0.011	0.008	0.003	0.93	1
	5	0.035			0.010	0.010	0.000	0.80	1
	6	0.045			0.010	0.012	-0.002	0.88	1
	7	0.055			0.010	0.008	0.002	1.38	1
	8	0.065			0.010	0.015	-0.005	1.63	1
	9	0.075			0.010	0.007	0.003	4.03	2
	10	0.085			0.010	0.010	0.000	4.00	1
	11	0.093			0.008	0.008	0.000	1.58	1
	12	0.103			0.010	0.011	-0.001	0.94	1
	13	0.118	postfestum			0.015	0.009	0.006	1.39
6	1	-0.001		D=0.59 cm, 1/250, f4.0, ISO 400, @40mm	-0.119				1
	2	0.079			0.080	0.090	-0.010	1.88	2
	3	0.179			0.100	0.101	-0.001	1.12	2
	4	0.276			0.097	0.098	-0.001	2.37	1
	5	0.378			0.102	0.100	0.002	0.89	1
	6	0.478			0.100	0.097	0.003	1.20	1

	7	0.574			0.096	0.101	-0.005	0.98	1
	8	0.674			0.100	0.101	-0.001	0.97	1
	9	0.774			0.100	0.100	0.000	1.49	2
	10	0.874			0.100	0.103	-0.003	1.40	1
	11	0.973			0.099	0.096	0.003	3.50	2
	12	1.057			0.084	0.079	0.005	2.20	1

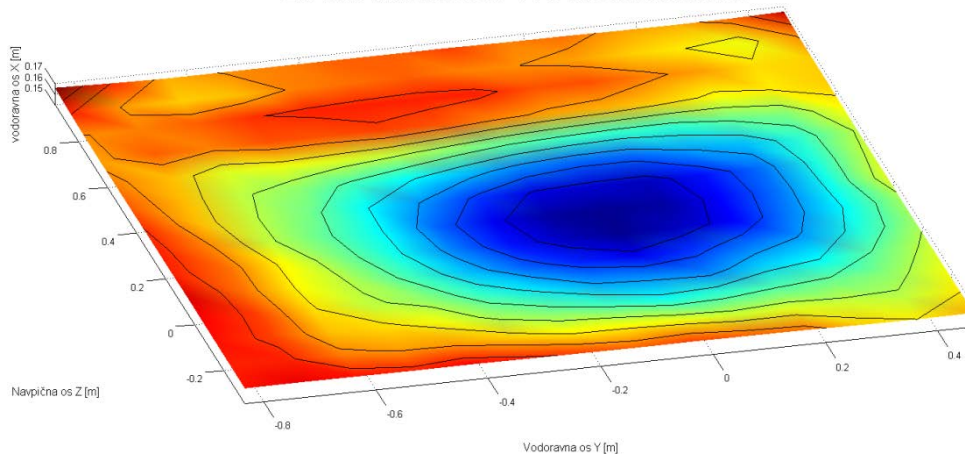
7	1	-0.002		D=1.54 cm, 1/250, f4.0, ISO 400, @40mm, MED SERIJO BILA PREMA KNJEN A KAMER A	0.000				3
	2	0.005	PREMAKN JENA KAMERA		0.007	0.002	0.005	11.88	2
	3	0.014			0.009	-0.002	0.011	8.02	2
	4	0.025			0.011	0.018	-0.007	5.95	2
	5	0.035			0.010	0.009	0.001	6.19	2
	6	0.045			0.010	0.011	-0.001	5.35	2
	7	0.055			0.010	-0.006	0.016	5.79	2
	8	0.065			0.010	0.020	-0.010	5.73	2
	9	0.074			0.009	0.010	-0.001	5.73	2
	10	0.085			0.011	0.009	0.002	5.23	2
	11	0.095			0.010	0.001	0.009	4.95	2
	12	0.104			0.009	0.023	-0.014	6.35	2
	13	0.110	postfestum		0.006	-0.025	0.031	6.79	2
8	1	-0.002		D=1.54 cm, 1/250, f4.0, ISO 400, @40mm, MED SERIJO BILA PREMA KNJEN A KAMER A	-0.112				2
	2	0.079			0.081	0.083	-0.002	8.19	2
	3	0.176			0.097	0.130	-0.033	11.45	2
	4	0.272			0.096	0.057	0.039	8.15	2
	5	0.376			0.104	0.141	-0.037	11.35	2
	6	0.476			0.100	0.091	0.009	7.25	2
	7	0.572			0.096	0.098	-0.002	6.96	2
	8	0.671			0.099	0.085	0.014	8.05	2
	9	0.774			0.103	0.098	0.005	8.37	3
	10	0.870	PREMAKN JENA KAMERA		0.096	0.107	-0.011	28.36	2
	11	0.970			0.100	0.115	-0.015	7.75	2
	12	1.041			0.071	0.069	0.002	7.50	2
9	1	0.001		D=1.54 cm, 1/250, f4.0, ISO 400,	-1.040				2
	2	0.863	slabo čitljivo		0.862	0.865	-0.003	10.06	2
	3	-	slabo čitljivo			1.001	-1.001	9.66	2

	4	2.857		@40mm		0.988	-0.988	10.19	2
	5	3.911			1.054	1.034	0.020	12.16	2
	6	4.902			0.991	0.976	0.015	8.92	2
	7	5.934			1.032	1.019	0.013	10.09	2
	8	6.962			1.028	1.042	-0.014	11.30	2
	9	7.999			1.037	1.029	0.008	11.08	2
	10	8.981			0.982	0.951	0.031	9.78	2
	11	10.030			1.049	1.070	-0.021	10.78	2
	12	10.148	postfestum		0.118	0.067	0.051	6.16	2
10	1	0.002		D=1.54 cm, Brez luči (?), 1/250, f4.0, ISO 1600, @40mm MED SERIJO BILA PREMA KNJEN A KAMER A	-10.146				2
	2	0.747			0.745	0.784	-0.039	20.07	3
	3	1.749			1.002	0.908	0.094	24.09	3
	4	2.756			1.007	1.025	-0.018	15.15	3
	5	3.773	PREMAKN JENA KAMERA		1.017	1.024	-0.007	20.48	2
	6	4.799			1.026	0.955	0.071	17.35	2
	7	5.838			1.039	1.007	0.032	14.17	2
	8	6.890	slabo čitljivo		1.052	0.996	0.056	18.07	2
	9	7.862			0.972	1.069	-0.097	15.39	2
	10	8.879			1.017	1.001	0.016	15.84	2
	11	9.894	slabo čitljivo		1.015	1.084	-0.069	15.75	3
	12	10.150	postfestum		0.256	0.175	0.081	20.39	3
11	1	0.004		D=1.54 cm, 1/250, f4.0, ISO 1600, @40mm, MED SERIJO BILA PREMA KNJEN A KAMER A	-10.074				3
	2	0.080			0.076	0.035	0.041	26.54	3
	3	0.180			0.100	0.066	0.034	17.03	2
	4	0.278			0.098	0.180	-0.082	20.03	2
	5	0.378			0.100	0.044	0.056	36.33	2+
	6	0.479	PREMAKN JENA KAMERA		0.101	0.029	0.072	17.22	2+
	7	0.575			0.096	0.165	-0.069	14.34	2+
	8	0.674			0.099	0.118	-0.019	10.80	2+
	9	0.773			0.099	0.020	0.079	10.24	2+
	10	0.873			0.100	0.160	-0.060	13.93	2+
	11	0.973			0.100	0.117	-0.017	11.88	2+
	12	1.072			0.099	0.087	0.012	11.00	2+
12	1	0.002		D=1.54				2	

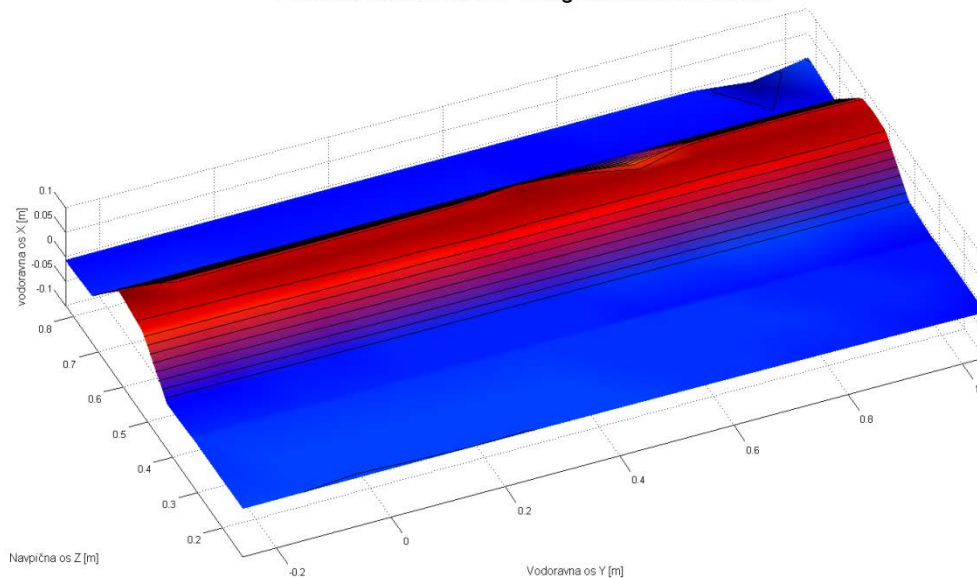
	2	-	slabo čitljivo	cm, 1/250,		0.052	-0.052	48.14	3
	3	0.016		f4.0, ISO		-0.038	0.038	18.73	3
	4	0.028		1600, @40mm,	0.012	0.044	-0.032	25.63	3
	5	0.037		MED	0.009	-0.048	0.057	19.08	3
	6	0.046		SERIJO BILA	0.009	0.074	-0.065	20.92	2
	7	0.057	PREMAKN JENA KAMERA	PREMA KNJEN A	0.011	-0.028	0.039	16.78	2+
	8	0.067		KAMER A	0.010	-0.029	0.039	12.25	2
	9	0.076			0.009	0.083	-0.074	19.51	2
	10	0.085			0.009	-0.040	0.049	17.72	2
	11	0.096			0.011	0.072	-0.061	16.18	2
	12	0.105			0.009	-0.029	0.038	13.84	2
	13	0.109	postfestum		0.004	-0.070	0.074	17.90	2+

Priloga B: Začetne oblike testiranih nosilcev

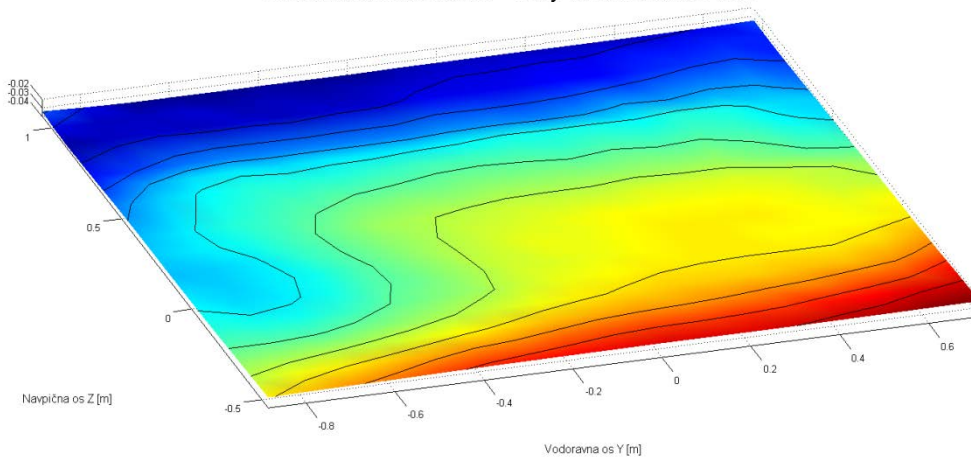
Začetna oblika nosilca - Prvi obremenitveni test



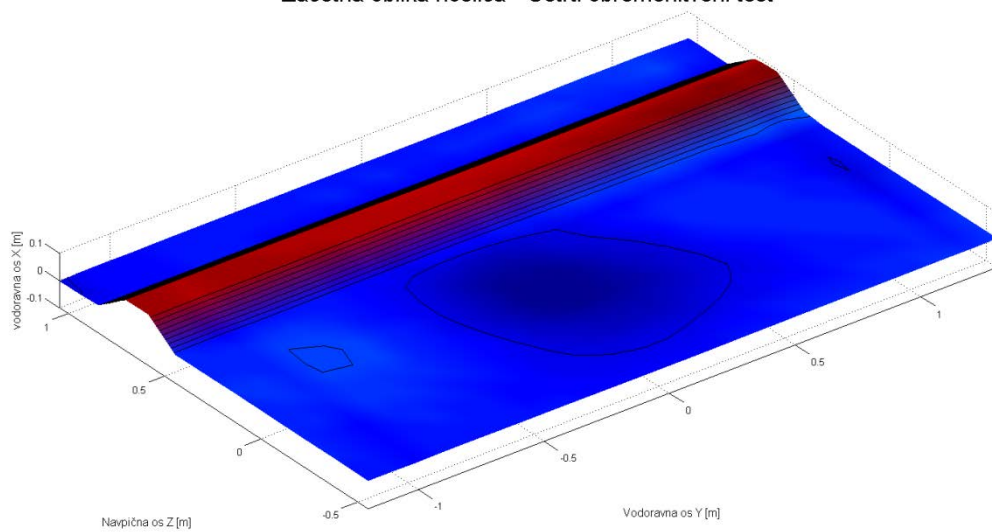
Začetna oblika nosilca - Drugi obremenitveni test



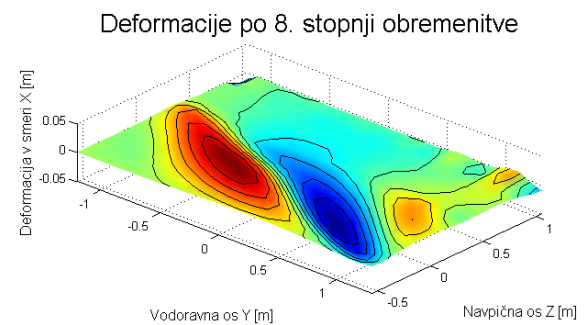
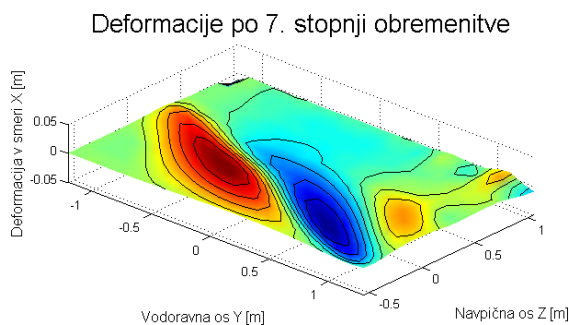
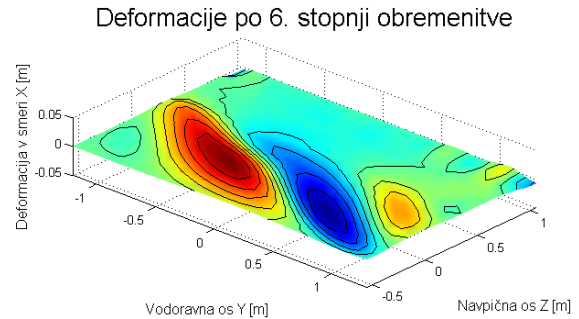
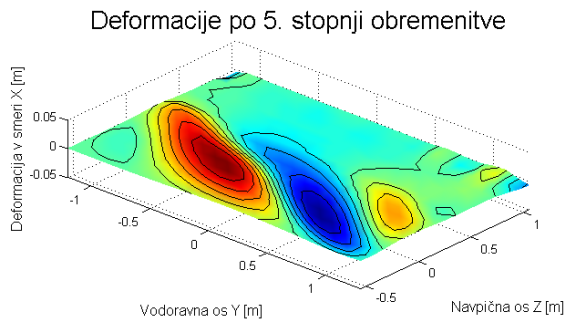
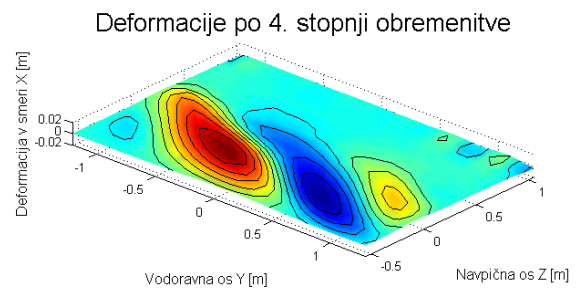
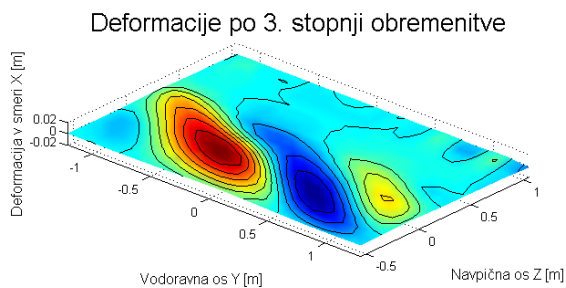
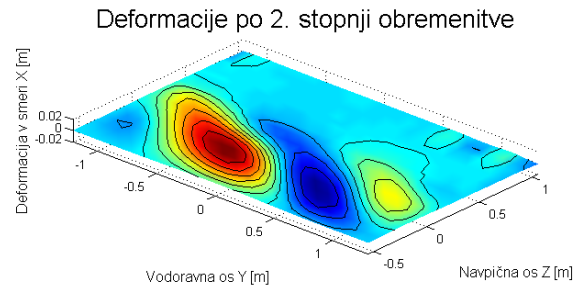
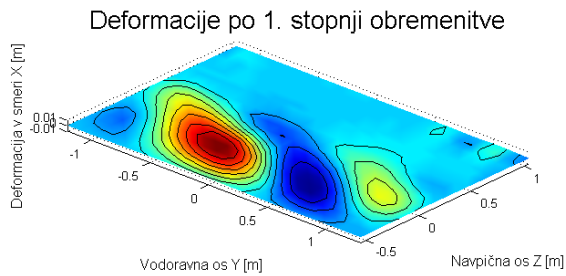
Začetna oblika nosilca - Tretji obremenitveni test



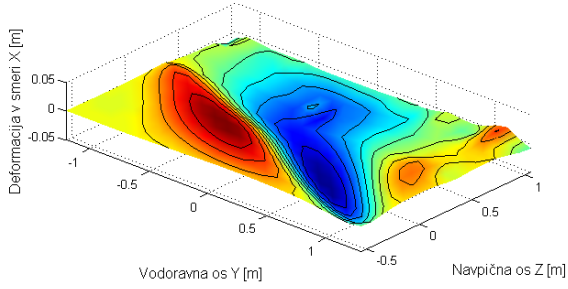
Začetna oblika nosilca - Četrti obremenitveni test



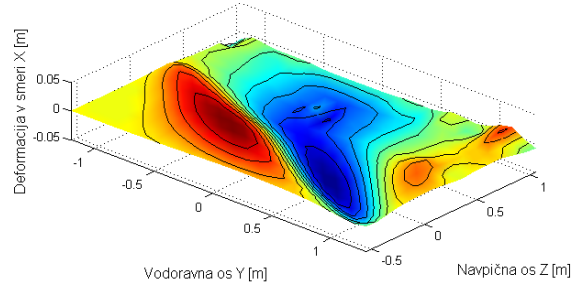
Priloga C: Predstavitev deformacij izmerjenih v četrtem obremenitvenem testu po posameznih stopnjah obremenitve nosilca



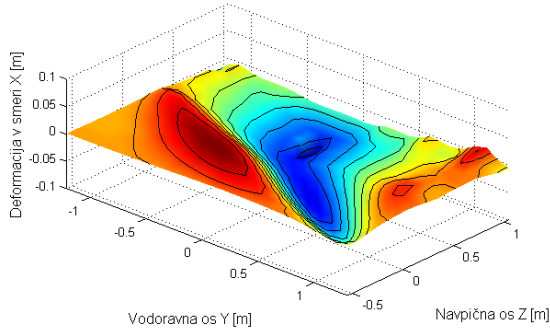
Deformacije po 9. stopnji obremenitve



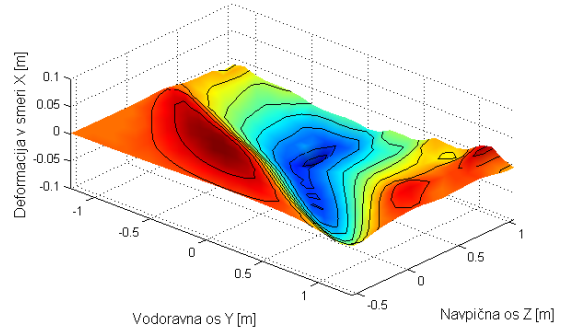
Deformacije po 10. stopnji obremenitve



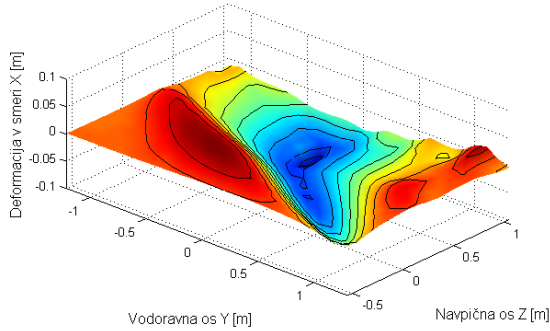
Deformacije po 11. stopnji obremenitve



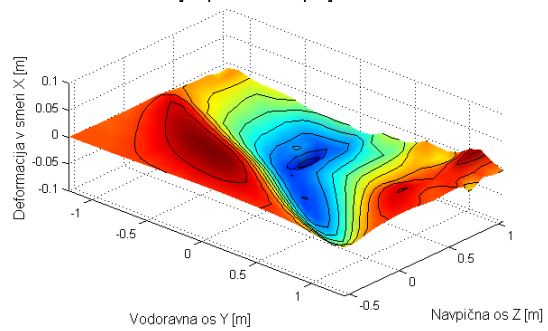
Deformacije po 12. stopnji obremenitve



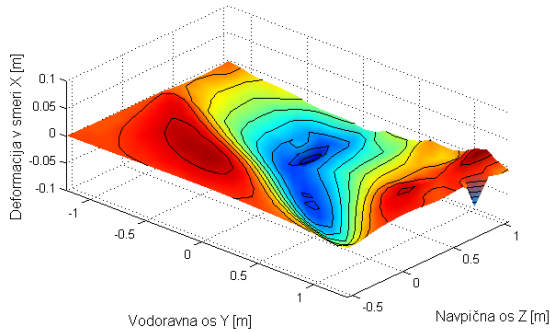
Deformacije po 13. stopnji obremenitve



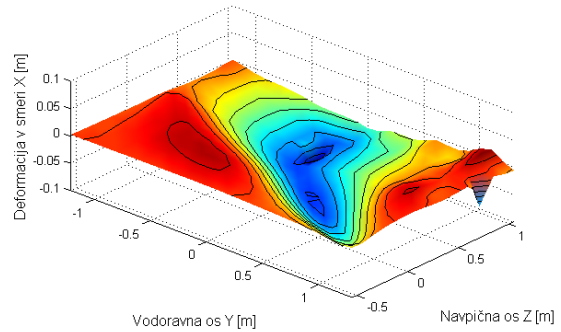
Deformacije po 1. stopnji razbremenitve



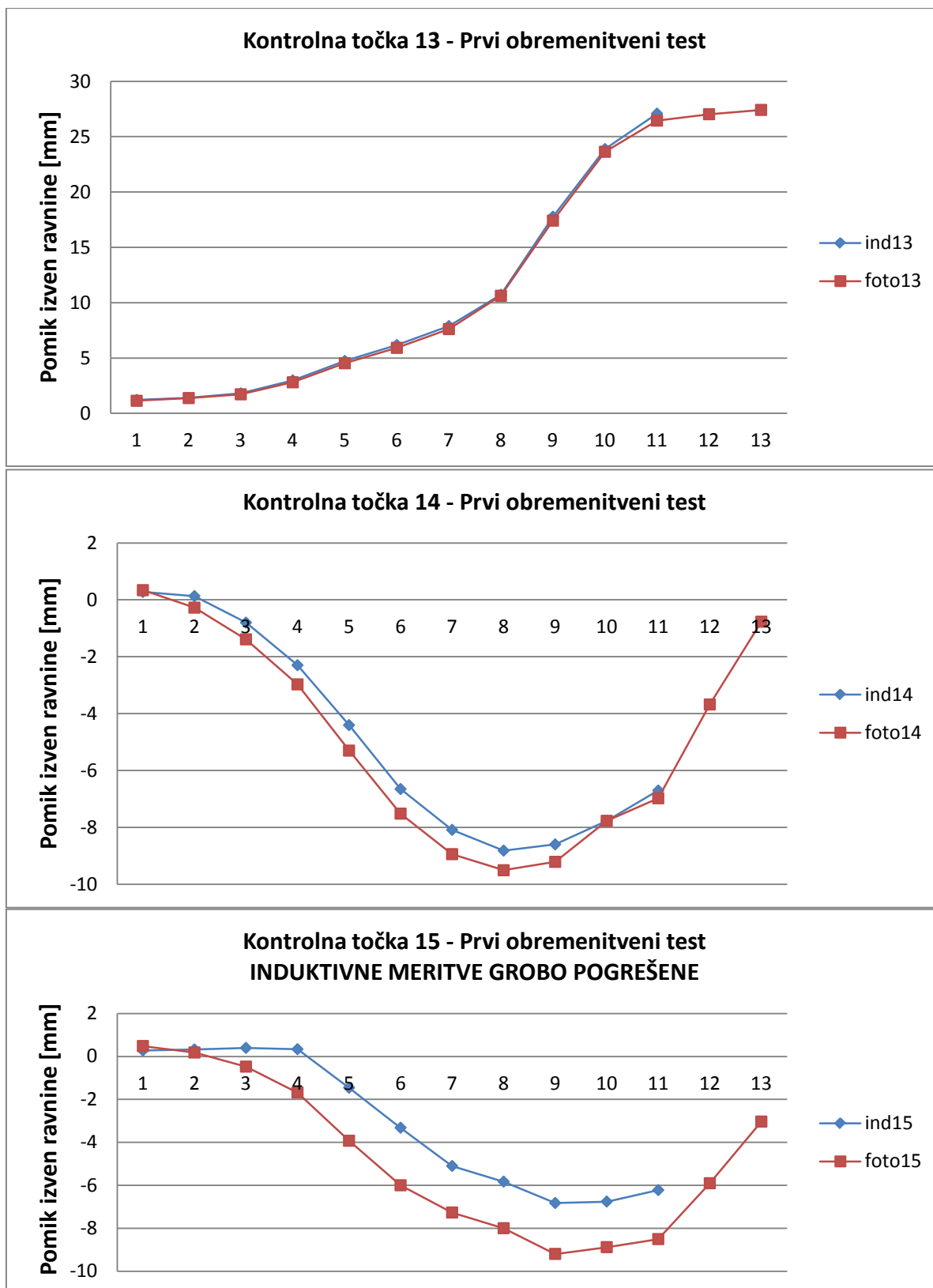
Deformacije po 2. stopnji razbremenitve



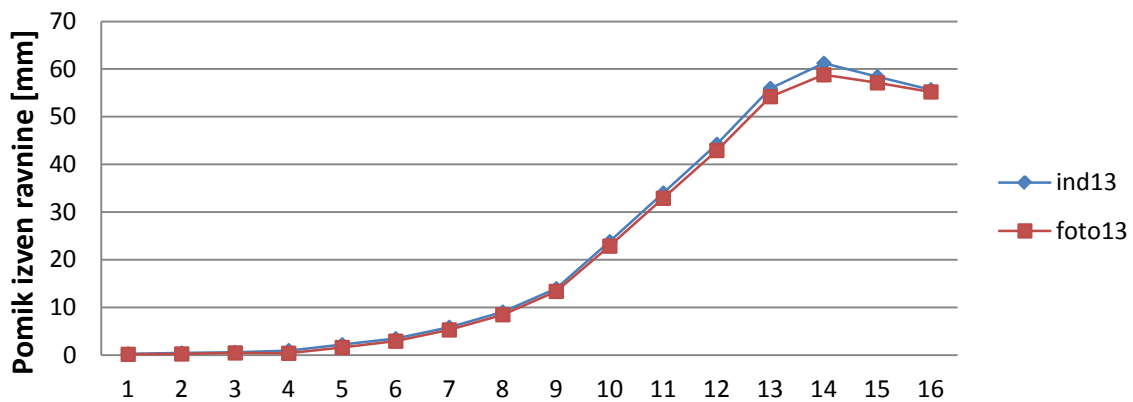
Deformacije po 3. stopnji razbremenitve



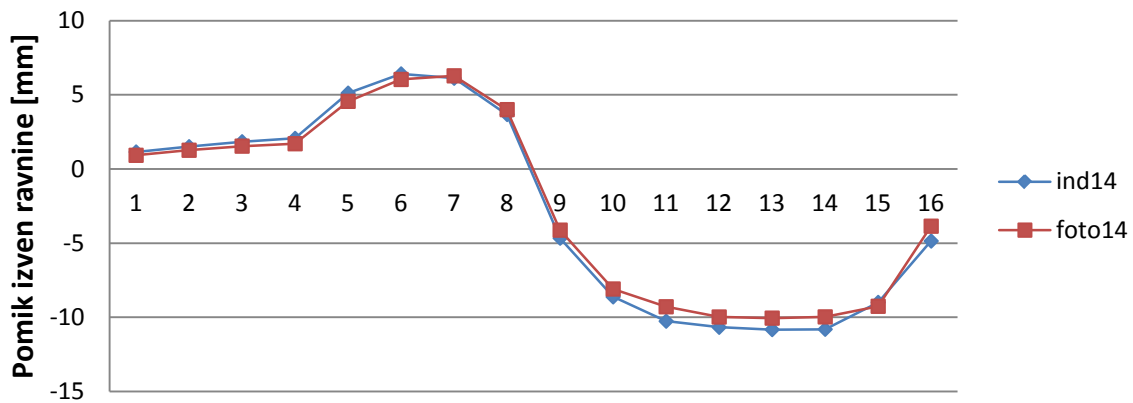
Priloga D: Grafi primerjav fotogrametričnih in kontrolnih induktivnih meritev na kontrolnih točkah v posameznih obremenitvenih testih



Kontrolna točka 13 - Drugi obremenitveni test



Kontrolna točka 14 - Drugi obremenitveni test



Kontrolna točka 15 - Drugi obremenitveni test

