

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
KONSTRUKCIJSKA SMER**

Kandidat:

MOJCA USNIK

**EKSPERIMENTALNA IN NUMERIČNA SIMULACIJA
OBNAŠANJA SVETLOBNE KUPOLE**

Diplomska naloga št.: 3199/KS

**EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION OF
BEHAVIOUR OF SKY DOME**

Graduation thesis No.: 3199/KS

Mentor:
prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:
dr. Uroš Bohinc

Predsednik komisije:
izr. prof. dr. Janko Logar

Ljubljana, 2012

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Podpisana **MOJCA USNIK** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom »**EKSPERIMENTALNA IN NUMERIČNA SIMULACIJA OBNAŠANJA SVETLOBNE KUPOLE**«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 9. 1. 2012

(podpis)

BIBLIOGRAFSKODOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

- UDK:** 519.63:528.7:624(043.2)
- Avtor:** Mojca Usnik
- Mentor:** prof. dr. Boštjan Brank
- Somentor:** dr. Uroš Bohinc
- Naslov:** Eksperimentalna in numerična simulacija obnašanja svetlobne kupole
- Obseg in oprema:** 66 str., 8 pregl., 4 graf., 41 sl., 28 en.
- Ključne besede:** Digitalna bližnjelikovna fotogrametrija, svetlobna kupola, laboratorijski preizkus, numerična simulacija, metoda končnih elementov, gradbeništvo

Izvleček

Digitalna bližnjelikovna fotogrametrija je nedestruktivna metoda, s katero je mogoče pridobiti digitalno prostorsko rekonstrukcijo merjenega objekta ali izdelka. Pri izvedbi laboratorijskih preizkusov jo lahko uporabimo za določitev (izmero) polja pomikov med obremenjevanjem preizkušanca. Pri numeričnih simulacijah pa jo lahko uporabimo za določitev natančne osnovne geometrije obravnavanega objekta (izdelka) in pripravo mreže končnih elementov, ki jo potrebujemo pri računalniškem modeliranju odzivov pri poljubnih obremenitvah ter pri optimizaciji oblike ali topologije.

V diplomski nalogi je uporabljena tehnologija bližnjelikovne fotogrametrije pri izvedbi laboratorijskih preizkusov in pri numeričnih simulacijah na primeru svetlobne kupole. Preizkus, pri katerem so se merili pomiki, je bil izveden na Zavodu za gradbeništvo Slovenije v Ljubljani. Meritve osnovne geometrije so se nato uporabile pri numerični simulaciji preizkusa z metodo končnih elementov z računalniškim programom Abaqus. Izvedena je bila tudi primerjava med rezultati laboratorijskega preizkusa in numerične simulacije.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.63:528.7:624(043.2)

Author: Mojca Usnik

Supervisor: prof. dr. Boštjan Brank

Cosupervisor: dr. Uroš Bohinc

Title: Experimental and numerical simulation of behavior of sky dome

Notes: 66 p., 8 tab., 4 graph., 41 fig., 28 eq.

Key words: Digital close-range photogrammetry, sky dome, experimental test, numerical simulation of experiment, finite element method, civil engineering

Abstract

Digital close-range photogrammetry is a non-destructive method for digital 3D reconstruction acquirement of measured object or product. During the experiment execution we can use it for measuring field of displacements while loading. In numerical simulation we can use it for definition of percise basic geometry of investigated object (product) and preparation of finite element mesh. This gives us a possibility to use digital close-range photogrammetry for computer modeling, where the resposes under arbitrary loads are investigated and optimization of shape or topology is preformed.

In diploma thesis the technology of close range photogrammetry is used in experimental test and numerical simulation in the example of sky dome. The experimetal test, where displacements were measured, was held in Slovenian National Building and Civil Engineering Institute in Ljubljana. The measurements of basic geometry were further used in numerical simulation of experimental test with finite element method in computer program Abaqus. The comparison between the results of experimental test and numerical simulation is also presented.

ZAHVALA

Za mentorstvo, pomoč in korekten odnos se zahvaljujem prof. dr. Boštjanu Branku in dr. Urošu Bohincu.

Hvala Zavodu za gradbeništvo Slovenije v Ljubljani, ki mi je omogočilo izvajanje laboratorijskega preizkusa za potrebe diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi Javnemu skladu Republike Slovenije za razvoj kadrov in štipendije, ki me je finančno podprlo pri študijski izmenjavi na Tehniški Univerzi v Istanbulu (Istanbul Technical University).

Posebna zahvala pa gre tudi staršem za vso podporo tekom študija in Luku Vojnoviću za vse nasvete in pomoč.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD.....	1
1.1	Opredelitev problema	1
1.2	Namen in cilji diplomske naloge	2
2	NEKAJ O DIGITALNI BLIŽNJESLIKOVNI FOTOGRAMetriJI.....	3
2.1	Definicija in razvoj	3
2.2	Področja uporabe digitalne bližnjieslikovne fotogrametrije	5
2.3	Lastnosti digitalne bližnjieslikovne fotogrametrije.....	7
2.4	Principi delovanja digitalne bližnjieslikovne fotogrametrije	7
2.4.1	Digitalne slike	8
2.4.2	Digitalne metrične kamere	9
2.4.3	Določitev prostorskih koordinat	9
2.4.4	Slikovna korelacija	11
3	MERITEV POMIKOV PRI PREIZKUSU SVETLOBNE KUPOLE.....	19
3.1	Načrtovanje preizkusa.....	19
3.2	Oprema.....	20
3.3	Izvedba preizkusa	21
3.3.1	Postopek priprave opreme.....	22
3.3.2	Kalibracija.....	26
3.3.3	Postopek zajemanja meritev	29
3.4	Rezultati	30
4	NUMERIČNA SIMULACIJA PREIZKUSA.....	33
4.1	Podatki za analizo	33
4.1.1	Geometrija	33
4.1.2	Material.....	38
4.1.3	Obtežba in podprtost.....	39
4.2	Rezultati analize.....	41
5	PRIMERJAVA REZULTATOV SIMULACIJE Z MERITVAMI	49

5.1	Grafična primerjava diagramov pomikov po komponentah.....	49
5.2	Grafična primerjava razlik pomikov po komponentah.....	53
6	ZAKLJUČEK.....	62
VIRI.....		64

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Specifikacije sistema ARAMIS 5M	21
Preglednica 2: Kalibracijski objekti	24
Preglednica 3: Kalibracijski proces	28
Preglednica 4: Vrednosti debelin po področjih	37
Preglednica 5: $\sigma - \varepsilon$ podatki	39
Preglednica 6: Primerjava navpičnih pomikov	50
Preglednica 7: Primerjava horizontalnih pomikov v smeri x	51
Preglednica 8: Primerjava horizontalnih pomikov v smeri y	52

KAZALO GRAFIKONOV

Graf 1: $\sigma - \varepsilon$ diagram	39
Graf 2: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega navpičnega pomika za elastično in elastoplastično analizo	45
Graf 3: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega horizontalnega pomika v smeri x za elastično in elastoplastično analizo.....	46
Graf 4: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega horizontalnega pomika v smeri y za elastično in elastoplastično analizo.....	46

KAZALO SLIK

Slika 1: Princip delovanja digitalne bližnjelikovne fotogrametrije.....	3
Slika 2: Svetlobna kupola po nanosu umetnih signalizacijskih točk.....	19
Slika 3: Kalibracijski križ med postopkom kalibracije.....	27
Slika 4: Postavitev kamer in kalibracijskega križa.....	27
Slika 5: Med preizkusom.....	29
Slika 6: Območja svetlobne kupole.....	30
Slika 7: Maksimalni navpični pomiki pri podtlaku -40,715 mbar.....	30
Slika 8: Horizontalni pomiki v smeri x pri podtlaku -40,715 mbar.....	31
Slika 9: Horizontalni pomiki v smeri y pri podtlaku -40,715 mbar.....	32
Slika 10: Grafični prikaz rezultata bližnjelikovne fotogrametrije.....	34
Slika 11: Geometrija svetlobne kupole dobljena z interpolacijo med izmerjenimi točkami.....	34
Slika 12: Mreža ploskovnih geometrijskih elementov v Matlabu.....	35
Slika 13: Mreža ploskovnih končnih elementov v Abaqusu (brez robu).....	35
Slika 14: Model svetlobne kupole z dodanim robom.....	36
Slika 15: Končni element tipa S4R.....	36
Slika 16: Polja različnih debelin.....	37
Slika 17: Obtežba na spodnji strani svetlobne kupole.....	40
Slika 18: Področje nanosa obtežbe in položaj podpor.....	40
Slika 19: Nedeformirana geometrija svetlobne kupole pri podtlaku -40,715 mbar pri elastoplastični analizi.....	41
Slika 20: Deformirana geometrija (3-kratna povečava) svetlobne kupole pri podtlaku -40,715 mbar pri elastoplastični analizi.....	41
Slika 21: Navpični pomiki v z smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo...	42
Slika 22: Navpični pomiki v z smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo.....	42
Slika 23: Horizontalni pomiki v x smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo.....	43
Slika 24: Horizontalni pomiki v x smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo.....	43
Slika 25: Horizontalni pomiki v y smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo.....	44

Slika 26: Horizontalni pomiki v y smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo	44
Slika 27: Von Misesove napetosti (v N/dm ²) pri podtlaku -40,715 mbar pri elastični analizi.....	47
Slika 28: Plastične ekvivalentne deformacije.....	48
Slika 29: Navpični pomiki (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije	53
Slika 30: Navpični pomiki (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije	54
Slika 31: Navpični pomiki (v mm) iz numerične analize.....	54
Slika 32: Navpični pomiki (v mm) iz numerične analize brez roba.....	55
Slika 33: Razlika (v mm) navpičnih pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije in numerično analizo	56
Slika 34: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije	57
Slika 35: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni z numerično analizo.....	57
Slika 36: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni z numerično analizo brez roba.....	58
Slika 37: Razlika pomikov (v mm) pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije in numerično analizo	58
Slika 38: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije	59
Slika 39: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni z numerično analizo.....	60
Slika 40: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni z numerično analizo brez roba.....	60
Slika 41: Razlike pomikov (v mm) pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije in numerično analizo	61

KRATICE IN OKRAJŠAVE:

- 2D Dvo-dimenzionalno
3D Tri-dimenzionalno
ZAG Zavod za gradbeništvo Slovenije

1 UVOD

V dobi digitalizacije smo priča novim možnostim povezovanja sveta, ljudi in področij, kar omogoča nove aplikacije znanih tehnologij, dviga kvalitete storitev, hitrejše delovanje in avtomatizacijo različnih postopkov. Multidisciplinarnost je danes zaželjena na vseh področjih.

Fotogrametrija je tradicionalna geodetska metoda, ki izvira iz 19. stoletja. Z razvojem in digitalizacijo pa se je prenesla tudi v arhitekturo, gradbeništvo, industrijo, medicino, forenziko, biologijo, kemijo, ekologijo in turizem. Z razvojem računalniškega vida in grafike pa se njena uporaba širi tudi na animatorstvo, izdelavo virtualnih aplikacij itd.

V slovenskem gradbeništvu je bližnjelikovna fotogrametrija prisotna, vendar morda še premalo, lahko zaradi njenega nepoznavanja, lahko pa tudi zaradi nezaupanja v njeno zanesljivost in natančnost.

1.1 Opredelitev problema

Diplomska naloga se nanaša na uporabo digitalne bližnjelikovne fotogrametrije pri izvedbi laboratorijskih preizkusov ter pri pripravi mreže končnih elementov za numerično analizo. Navidezno nepovezana problema povezuje želja po določitvi natančne geometrije obravnavanega objekta oziroma izdelka tako v nedeformiranem kot v deformiranem stanju.

Za merjenje pomikov in specifičnih deformacij se pri standardnih laboratorijskih preizkusih uporablja induktivne pretvornike ali merilne lističe, ki omogočajo merjenje le v eni v naprej določeni smeri. Pri načrtovanju laboratorijskega preizkusa je zato potrebno predvideti potek preizkusa z namenom, da je merilna oprema pravilno orientirana in na pravih mestih. Bližnjelikovna fotogrametrija teh omejitev nima.

V zvezi z zajemom podatkov za računalniško analizo gre predvsem za objekte oziroma izdelke, za katere je pomembno natančno poznati njihovo geometrijo. Običajno gre za objekte, ki so izdelani prototipsko in so v fazi preiskovanja z namenom optimalizacije oblike. Lahko pa gre za objekte, katerih geometrija je kompleksna in je ni moč analitično izraziti.

1.2 Namen in cilji diplomske naloge

Namen diplomske naloge je uporabiti tehnologijo digitalne bližnjeliskovne fotogrametrije pri gradbeniškem problemu. V okviru diplomskega dela se je v ta namen izvedel laboratorijski preizkus na Zavodu za gradbeništvo Slovenije (ZAG) v Ljubljani. Hkrati pa se je tehnologija bližnjeliskovne fotogrametrije uporabila za pripravo mreže končnih elementov, ki je bila nato uporabljena pri numerični simulaciji omenjenega laboratorijskega preizkusa.

Cilji diplomske naloge so:

- preštudirati osnove digitalne bližnjeliskovne fotogrametrije,
- izvesti laboratorijski preizkus (obremenjevanje svetlobne kupole) z uporabo inštrumenta ARAMIS 5M, ki deluje na principu tehnologije bližnjeliskovne fotogrametrije in pri tem izkusiti delo v laboratoriju, spoznati opremo, postopke načrtovanja preizkusa ter postopke zajemanja, pridobitve ter analize rezultatov,
- uporabiti tehnologijo bližnjeliskovne fotogrametrije za pripravo geometrijskih podatkov za nelinearno numerično simulacijo omenjenega preizkusa z računalniškim programom Abaqus, ki deluje po metodi končnih elementov,
- primerjati rezultate laboratorijskega preizkusa in računalniške simulacije.

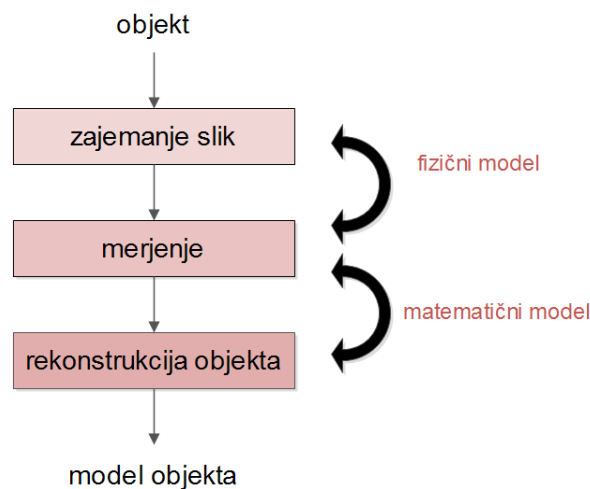
2 NEKAJ O DIGITALNI BLIŽNJESLIKOVNI FOTOGRAMetriJI

V naslednjih podpoglavjih so prikazana glavna področja današnje uporabe, njene lastnosti in nekaj matematičnega ozadja. Pregled je laičen, za poglobljeno poznavanje digitalne bližnjelikovne fotogrametrije pa glej reference.

2.1 Definicija in razvoj

Beseda fotogrametrija je sestavljena iz treh grških besed in sicer *photos*, kar pomeni svetlobo, *gramma*, kar pomeni zapis in *metreo*, kar pomeni merjenje (Gorski et al., 2010). Po najpreprostejši definiciji je torej fotogrametrija veda merjenja iz fotografij.

S pomočjo fotogrametrije in matematičnih algoritmov nam je omogočena rekonstrukcija pozicije, orientacije, oblike in velikosti objekta iz česar lahko oblikujemo geometrijski model v digitalni obliki (Kraus, Harley, Kyle, 2004).

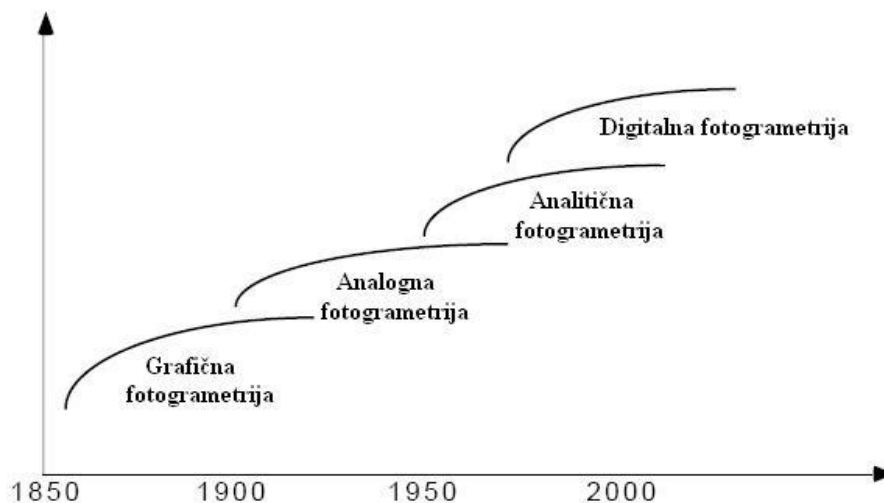


Slika 1: Princip delovanja digitalne bližnjelikovne fotogrametrije

Razvoj fotogrametrije lahko razdelimo na štiri faze:

- grafično,
- analogno,
- analitično in
- digitalno.

Vsako fazo zaznamujejo tehnološke in metodološke inovacije, ki so naredile fotogrametrijo še bolj učinkovito in prilagodljivo.



Razvoj fotogrametrije (Albertz, Wiedemann, 2011, 1)

Prvi začetki fotogrametrije segajo v sredino 19. stoletja, kmalu po izumu fotografije. Prvi znan eksperiment je bil izveden leta 1849, ko je francoski vojaški oficir Laussedat meril fasado Hotela des Invalides z uporabo metričnega fotoaparata (Luhmann et al., 2006). Iz poznavanja pozicije in točkovne primerjave fotografij objekta, posnetega iz različnih kotov, je bilo moč določiti višino, s pomočjo risanja rekonstrukcije na risalno desko upoštevajoč opisno geometrijo. Večji ko je bil format slike, večja je bila natančnost.

Pri analogni fotogrametriji je bila rekonstrukcija narejena s pomočjo optičnih in mehanskih pripomočkov. Z razvojem slednjih se je izboljšala tudi natančnost. Dodatni izračuni niso bili potrebni, nujen pa je bil izkušen fotogrametrist (Albertz, Wiedemann, 2011).

Z razvojem računalnikov in s tem analitične fotogrametrije je bilo mogoče opisati relacijo med slikovno točko in točko objekta z numeričnimi izračuni, ki temeljijo na kolinearnih enačbah. To omogoča visoko natančnost, fleksibilnost in učinkovitost, rezultate pa je mogoče direktno transformirati v CAD sistem.

Z digitalno fotogrametrijo se je kvaliteta zajetih slikovnih podatkov še povečala, prepoznavanje skladnih točk med fotografijami pa je postalo avtomatsko.

Tekom razvoja se je glede na področje uporabe fotogrametrija razdelila na dve glavni področji:

- topografska fotogrametrija in
- bližnjleslikovna fotogrametrija.

Topografska fotogrametrija se uporablja za določevanje oblike Zemljinega površja, medtem ko z bližnjleslikovno fotogrametrijo merimo obliko manjših objektov. Ločita se predvsem po razdalji med kamero in objektom. Pri topografski fotogrametriji ta znaša več kilometrov, saj so posnetki posneti iz letal ali satelitov, pri bližnjleslikovni pa je razdalja manjša od 300 metrov (Luhmann et al., 2006).

2.2 Področja uporabe digitalne bližnjleslikovne fotogrametrije

Digitalizacija je bližnjleslikovni fotogrametriji omogočila avtomatizacijo postopkov zajemanja in merjenja ter s tem dostopnost metode širši množici ljudi, ne zgolj izkušenim fotogrametristom. Na tržišču so dostopni digitalni bližnjleslikovni fotogrametrijski sistemi, s katerimi je mogoča kakršna koli rekonstrukcija objekta. Danes se digitalna bližnjleslikovna fotogrametrija uporablja na naslednjih področjih:

➤ Gradbeništvo

Možnost pridobitve natančnega in realnega geometrijskega modela novih ali že obstoječih inženirskih objektov, cest, zgradb in njihovih delov omogoča inženirju prihranek časa in denarja pri sami izdelavi geometrijskega modela, še posebej, če gre za komplicirano geometrijo, ali pa če je obstoječi objekt težko dostopen.

T. i. reverzno inženirstvo se ukvarja z izdelavo prototipa izdelka na naslednji način: njegova začetna (kompleksna) geometrija se pridobi z digitalno bližnjleslikovno fotogrametrijo in se nato prenese v poljuben računalniški program, kjer se izdelek lahko poljubno virtualno preizkuša in optimizira (Gorski et al., 2010).

Možnost uporabe tehnologije bližnjleslikovne fotogrametrije je tudi pri izvajanju eksperimentov. Metoda namreč omogoča pridobivanje natančnih podatkov o pomikih (in posredno specifičnih deformacijah) po celotni merjeni ploskvi ter s tem lahko učinkovito nadomesti merilne lističe in induktivne pretvornike, ki omogočajo merjenje pomikov in specifičnih deformacij le v eni v naprej določeni smeri.

➤ **Arhitektura, arheologija in ohranjanje kulturne dediščine**

Digitalna bližnjeliskovna fotogrametrija omogoča pridobitev digitalne dokumentacije z meritvami že obstoječih objektov. To omogoča izris načrtov in pripravo geometrijskih podatkov za matematične modele za statično in dinamično analizo, oceno stanja, načrtovanje renovacije, adaptacije, nadgradnje, vse z brezkontaktnimi meritvami, ki ne predstavljajo škode objektom, ki so kulturno zaščiteni (Luhmann et al., 2006).

➤ **Industrija**

V zadnjih desetletjih se v industriji pojavlja zahteva po natančnih in hitrih meritvah oblikovanih izdelkov in strojev, z namenom, da se doseže krajši čas izdelave, izboljša in avtomatizira proces izdelave, zmanjša odpadke in preverja kvaliteto izdelave. Tehnologijo bližnjeliskovne fotogrametrije se uporablja v avtomobilski, strojni, letalski, vesoljski industriji in ladjedelništvu (Luhmann et al., 2006).

➤ **Forenzične znanosti**

V forenzični znanosti se tehnologija bližnjeliskovne fotogrametrije uporablja za rekonstrukcijo nesreč, prizorišč zločina, identifikacijo zločincev in zbiranje ter identificiranje dokazov. Metoda je še posebej uspešna pri pridobivanju forenzičnih dokazov pri nesrečah, kot so požari ali eksplozije, kjer je fizičnih dokazov malo (World of Forensic Science).

➤ **Medicina**

V medicini se tehnologija bližnjeliskovne fotogrametrije uporablja za naslednje aplikacije (Tokarczyk, Tadeusz, 2006):

- zobje: merjenje oblike za izdelavo proteze, merjenje mikrorazpok
- obraz: merjenje sprememb po lepotnih operacijah in zobozdravstvena ortopedija
- koža: zaznavanje melanoma, merjenje globokih in širokih ran
- udi: merjenje za izdelavo protez
- hrbet: merjenje ukrivljenosti hrbtenice
- analiza drže (rehabilitacija)
- analiza gibanja: rehabilitacija, medicina športa in znanost športa

➤ **Biologija**

Merjenje velikosti divjih živali in preučevanje njihovega gibanja, ne da bi bilo potrebno živali uspavati in ujeti (Bräger, Chong, 1999).

Poleg zgoraj naštetih aplikacij, je možno uporabo tehnologije bližnjleslikovne fotogrametrije zaslediti tudi v kemiji, ekologiji, turizmu in animatorstvu.

2.3 Lastnosti digitalne bližnjleslikovne fotogrametrije

Glavne prednosti digitalne bližnjleslikovne fotogrametrije (Klug, 2008):

- Je nedestruktivna metoda.
- Zajem podatkov je takojšen.
- Fotografije so zajete v določenem času in omogočajo zapis časovno odvisnih parametrov, kot so hitrost, pospešek in frekvenca.
- Merijo se pomiki (tudi togi premiki objekta).
- Uporablja se v laboratorijih in na prostem.
- Cenovno dostopna.
- Omogoča 2D (dvo-dimenzionalen) in 3D (tri-dimenzionalen) zajem podatkov.
- Omogoča prosto izbiro konfiguracije s skoraj neomejenim številom fotografij.
- Omogoča vizualno in digitalno analizo slik.
- Omogoča predstavitev rezultatov v obliki prostorskih koordinat, CAD datotek, fotografij ali risb.
- Omogoča visoko natančnost.

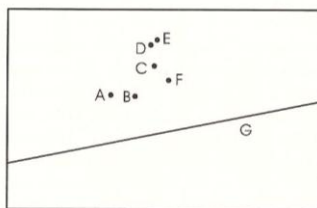
2.4 Principi delovanja digitalne bližnjleslikovne fotogrametrije

Za razumevanje principov delovanja in pridobivanja prostorskih podatkov je potrebno najprej pojasniti lastnosti digitalne slike in metrične kamere.

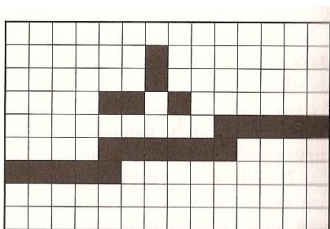
Po opisu postopka pridobivanja prostorskih koordinat iz slik, sledi nekaj o metodi križne korelacije in o metodi najmanjših kvadratov, ki omogočata vpogled v postopek natančne slikovne korelacije.

2.4.1 Digitalne slike

Digitalne slike se od analognih razlikujejo po sestavnih elementih. Analogne slike vsebujejo geometrijske like, kot so točke in črte, ki so nato vizualno interpretirane. Pri digitalnih slikah pa abstraktnih točk in črt ni. Elementi so slikovne točke ali piksli, ki so običajno kvadratne oblike.



Analitična slika (Kraus, Harley Kyle, 2004, 36)



Digitalna slika (Kraus, Harley Kyle, 2004, 36)

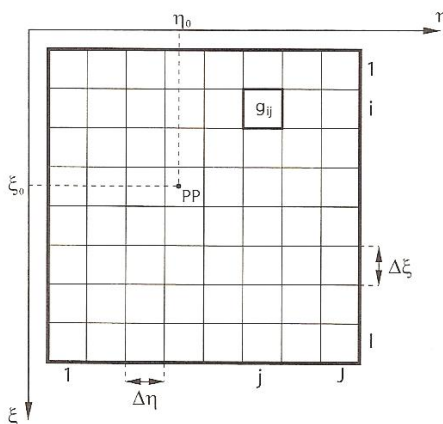
Pri digitalnih slikah so informacije o slikovnih elementih razvrščene v matrike. Vrednosti v matriki so odvisne od uporabljenih senzorjev in računalnika. Običajno so vrednosti med 0 in 255, kar je veliko bolj natančno kot človeško oko, ki lahko razloči okoli 50 senc. Informacije z 256 različnimi stanji so lahko predstavljene z 8 biti, kar je ravno 1 bajt. Pri zmogljivejših senzorjih so lahko slikovni podatki predstavljeni s 16 biti, kar je 65536 različnih vrednosti.

Pri običajnih črno belih slikah so vrednosti pikslov znane kot sive vrednosti, pri katerih je črna označena z 0 in bela z 255. V binarnih slikah imamo samo 2 sivi vrednosti, črno in belo, kar prikazuje slika zgoraj (Digitalna slika).

Če je zajem slik barven, so slike predstavljene z 24 biti, to je po 8 bitov za rdečo, zeleno in modro barvo (Kraus, Harley, Kyle, 2004).

2.4.2 Digitalne metrične kamere

Metrične kamere imajo centralno projekcijo in projekcijski center fiksen glede na sliko. Digitalna metrična slika je opisana z dvodimenzionalno matriko \mathbf{G} , ki vsebuje slikovne elemente g_{ij} . Vrstični indeks i teče od 1 do I s korakom 1 in enako stolpcični indeks j od 1 do J . Kot je razvidno iz spodnje slike, so slikovni elementi dimenzij $\Delta\xi \times \Delta\eta$.



Digitalna metrična slika (Kraus, Harley, Kyle, 2004, 39)

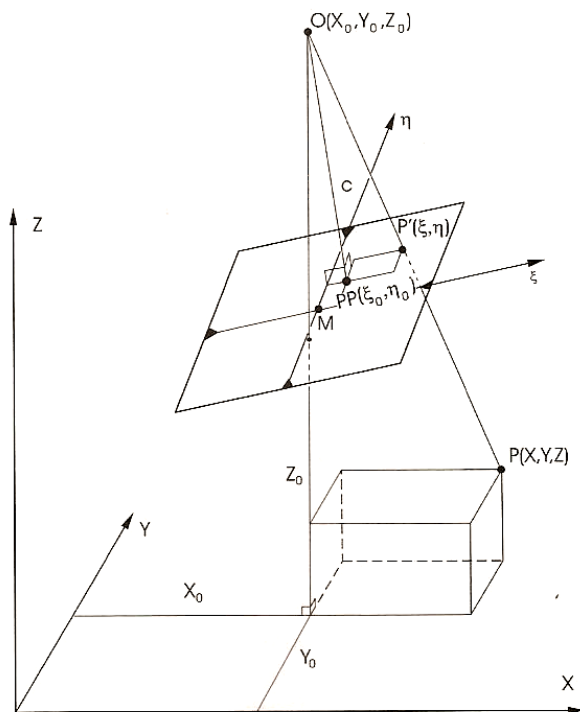
V digitalnih metričnih slikah je tako znano razmerje med pozicijo slikovnega elementa in koordinatnim sistemom $\zeta\eta$.

2.4.3 Določitev prostorskih koordinat

Z uporabo metričnih kamer poznamo geometrijo slikovnega sistema kamere, ki jo potrebujemo za določitev prostorskih koordinat. Tako lahko matematično zapišemo razmerje med koordinatama ζ in η slikovne točke P' in koordinatami X , Y in Z točke na objektu P s kolinearnimi enačbami (Kraus, Harley, Kyle, 2004):

$$\xi = \xi_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (1)$$

$$\eta = \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \quad (2)$$



Relacija med slikovnimi in prostorskimi koordinatami (Kraus, Harley, Kyle, 2007, 22)

Enačbi (1) in (2) ali kolinearni enačbi nam pretvorita točke na objektu v slikovne točke. V enačbah (1) in (2) so:

- ξ, η ... 2D slikovne koordinate točke P' ,
- ξ_0, η_0 ... slikovne koordinate glavne točke PP ,
- X, Y, Z ... koordinate v prostorskem oziroma globalnem koordinatnem sistemu,
- X_0, Y_0, Z_0 ... koordinate perspektivnega centra v prostorskem koordinatnem sistemu,
- c ... konstanta kamere.

Parametri r_{ik} v enačbah (1) in (2) so elementi rotacijske matrike \mathbf{R} , ki opisuje prostorsko orientacijo slike glede na koordinatni sistem objekta XYZ in jih lahko izrazimo kot kosinuse kotov koordinatnih osi. Pri tem je koordinatna os ζ pravokotna na osi ξ in η .

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\angle \xi X) & \cos(\angle \eta X) & \cos(\angle \zeta X) \\ \cos(\angle \xi Y) & \cos(\angle \eta Y) & \cos(\angle \zeta Y) \\ \cos(\angle \xi Z) & \cos(\angle \eta Z) & \cos(\angle \zeta Z) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Rešitev enačb (1) in (2) sta prostorski koordinati X in Y točke P :

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\xi - \xi_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (4)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\xi - \xi_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\xi - \xi_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \quad (5)$$

V enačbah (4) in (5) lahko opazimo, da je koordinata Z na desni strani enačbe, kar pomeni, da je za vsako slikovno točko možno neskončno mnogo točk objekta. Če želimo pridobiti rekonstrukcijo 3D objekta, moramo posneti vsaj še eno sliko z druge pozicije, da pridobimo informacijo o Z koordinati.

Transformacije v enačbah (1), (2), (4) in (5) predpostavljajo poznavanje parametrov notranje in zunanje orientacije kamere.

Parametri notranje orientacije so:

- slikovne koordinate glavne točke ξ_0 in η_0 ,
- konstanta kamere c .

Parametri zunanje orientacije pa so:

- koordinate perspektivnega centra X_0, Y_0, Z_0 ,
- parametri ω, φ, κ , ki so implicitno vsebovani v rotacijski matriki \mathbf{R} , ω kot zasuk okoli x osi, φ kot zasuk okoli y osi in κ kot zasuk okoli z osi.

2.4.4 Slikovna korelacija

Za prostorsko rekonstrukcijo objekta je potrebno posneti objekt iz vsaj dveh pozicij. Da bi določili prostorski položaj izbrane točke (tarče), jo moramo prepoznati na obeh zajetih slikah. Samodejno prepoznavo točk (tarče), ki ležijo na istih prostorskih koordinatah, izvedemo s slikovno korelacijo. Ta omogoča, da prepoznamo in določimo najboljši položaj tarče v iskalnem oknu, to je območju na drugi sliki, ki je predmet primerjave.

Da se prepoznavanje točk (tarče) sploh lahko omogoči, moramo zagotoviti zadostno nehomogenost površja merjenega objekta. Pogosto naravne teksture gradbenih materialov ne nudijo zadostne ločljivosti

točk, zato se poslužujemo ustvarjanju umetnih signalizacijskih točk. Za naravne gladke površine lahko dosežemo natančnost 1/50 piksla, medtem ko za umetno obdelane površine 1/100 piksla (Hampel, Maas, 2003).

Dobri algoritmi samodejne slikovne korelacije so ključni za hitrost in natančnost sistemov digitalne bližnjelikovne fotogrametrije. V nadaljevanju sta prikazani dve metodi slikovne korelacije, metoda križne korelacije in metoda najmanjših kvadratov.

Metoda križne korelacije

Za prepoznavanje korespondenčnih točk na dveh fotografijah se uporablja algoritme križne korelacije. Iskana pozicija referenčne točke ali tarče se lahko na iskalnem oknu izračuna s pomočjo koeficienta križne korelacije r .

1	1	9	1	1
1	1	9	1	1
9	9	9	9	9
1	1	9	1	1
1	1	9	1	1

Primer tarče (Kraus, Harley, Kyle, 2004, 324)

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	9	2	1	1	1	1	1
1	1	1	1	8	9	9	9	9	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	9	1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	1	1	9	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Primer iskalnega okna (Kraus, Harley, Kyle, 2004, 324)

Koeficient križne korelacije r je izražen kot količnik kovariance σ_{rs} sivih vrednosti tarče in iskalnega okna ter produktu standardnih deviacij σ_r in σ_s sivih vrednosti tarče in iskalnega okna (Kraus, Harley, Kyle, 2004):

$$r = \frac{\sigma_{rs}}{\sigma_r \sigma_s} = \frac{\sum (g_r - \bar{g}_r)(g_s - \bar{g}_s)}{\sqrt{\sum (g_r - \bar{g}_r)^2 \sum (g_s - \bar{g}_s)^2}} \quad (6)$$

Pri tem so:

g_r ... vrednost sivih vrednosti tarče,

g_s ... vrednost sivih vrednosti iskalnega okna,

\bar{g}_r ... pričakovana vrednost sivih vrednosti tarče in

\bar{g}_s ... pričakovana vrednost sivih vrednosti iskalnega okna.

Koeficient križne korelacije je izračunan za vse možne pozicije tarče v iskalnem oknu. Iskana pozicija je tista, ki ima največjo vrednost koeficienta križne korelacije.

Določevanje koeficienta križne korelacije je odlična metoda za prepoznavanje korespondenčnih točk s pikselno natančnostjo. Če želimo imeti podpikselno natančnost slikovnega ujemanja, moramo za izračun pozicije najboljšega ujemanja tarče z iskalnim oknom uporabiti natančnejšo metodo. Običajno se po najdbi pozicije tarče v iskalnem oknu s korelacijsko metodo uporabi metoda najmanjših kvadratov.

Metoda najmanjših kvadratov

Metoda najmanjših kvadratov je visoko natančna metoda, s katero optimiziramo slikovno ujemanje (Dazhao, Rong, Song, 2008). Z metodo najmanjših kvadratov se oceni transformacijske parametre med dvema ali večimi slikami površine objekta. Transformacijske parametre lahko zapišemo v obliki afine transformacije, katere elementi predstavljajo razdaljo med tarčo in korespondenčno površino v iskalnem oknu. Po definiciji metode najmanjših kvadratov, najboljše ujemanje doseženo z minimizacijo vsote kvadratov razdalj d med tarčo in korespondenčnim območjem v iskalnem oknu, kar lahko zapišemo kot (Gruen, Arca, 2005):

$$\sum \|d\|^2 = \min \quad (7)$$

Problem je v ocenjevanju transformacijskih parametrov, ki ustrezajo ujemanju po metodi najmanjših kvadratov med iskalnim oknom $g(X,Y,Z)$ in tarčo $f(X,Y,Z)$. V idealnem primeru bi imeli:

$$f(X, Y, Z) = g(X, Y, Z), \quad (8)$$

kjer funkciji $f(X, Y, Z)$ in $g(X, Y, Z)$ predstavljata območje objekta na tarči in v iskalnem oknu. Obe sta diskretni 3D aproksimaciji zvezne funkcije površine objekta. Enačba (7) velja le, če je površinski element na tarči $f(X, Y, Z)$ natančno enak površinskemu elementu v iskalnem oknu $g(X, Y, Z)$. Pri slikah iz različnih pozicij moramo zato dodati še dodaten člen $e(X, Y, Z)$, ki zajema napako sensorja, okoljskih pogojev in merskih metod:

$$f(X, Y, Z) - e(X, Y, Z) = g(X, Y, Z). \quad (9)$$

Enačba (9) je enačba opazovanj, ki opisuje odnos med opazovanji površinskih elementov tarče $f(X, Y, Z)$ glede na opazovanja površinskih elementov iskalnega okna $g(X, Y, Z)$. Ujemanje je doseženo z minimalizacijo funkcije $e(X, Y, Z)$.

Geometrijsko relacijo med tarčo in iskalnim oknom lahko zapišemo kot sedem parametrično 3D afino transformacijo (Arca, 2007):

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} + m \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Pri tem so:

- $[t_x, t_y, t_z]^T$... translacijski vektor,
- $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$... devet elementov ortogonalne rotacijske matrike $\mathbf{R}(\omega, \rho, \kappa)$,
- m ...faktor povečave.

Za izvedbo ocenjevanja z metodo najmanjših kvadratov, moramo linearizirati enačo (9) z razširitvijo funkcije $g(X, Y, Z)$ v Taylorjevo vrsto, s tem da zanemarimo člene drugega in višjih redov:

$$f(X, Y, Z) - e(X, Y, Z) = g^0(X, Y, Z) + \frac{\partial g^0(X, Y, Z)}{\partial X} dX + \frac{\partial g^0(X, Y, Z)}{\partial Y} dY + \frac{\partial g^0(X, Y, Z)}{\partial Z} dZ \quad (11)$$

Pri tem so:

$$dX = \frac{\partial X}{\partial p_i} dp_i, \quad dY = \frac{\partial Y}{\partial p_i} dp_i, \quad dZ = \frac{\partial Z}{\partial p_i} dp_i, \quad (12)$$

kjer $p_i \in \{t_x, t_y, t_z, m, \omega, \rho, \kappa\}$ vsebuje i -te transformacijske parametre enačbe (10).

Funkcija $g^0(X, Y, Z)$ je v enačbi (11) začetni približek funkcije $g(X, Y, Z)$.

Diferenciacija enačbe (10) nam da:

$$\begin{aligned} dX &= dt_x + a_{10} dm + a_{11} d\omega + a_{12} d\rho + a_{13} d\kappa \\ dY &= dt_y + a_{20} dm + a_{21} d\omega + a_{22} d\rho + a_{23} d\kappa \\ dZ &= dt_z + a_{30} dm + a_{31} d\omega + a_{32} d\rho + a_{33} d\kappa \end{aligned} \quad (13)$$

Če zapišemo rotacijsko matriko \mathbf{R} kot:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \rho \cos \kappa & -\cos \rho \sin \kappa & \sin \rho \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \rho \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \rho \sin \kappa & -\sin \omega \cos \rho \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \rho \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa + \cos \omega \sin \rho \sin \kappa & \cos \omega \cos \rho \end{pmatrix} \quad (14)$$

lahko izrazimo koeficiente a_{ij} iz enačbe (13) kot:

$$\begin{aligned} a_{10} &= r_{11} X_0 + r_{12} Y_0 + r_{13} Z_0 \\ a_{20} &= r_{21} X_0 + r_{22} Y_0 + r_{23} Z_0 \\ a_{30} &= r_{31} X_0 + r_{32} Y_0 + r_{33} Z_0 \\ a_{11} &= 0 \\ a_{12} &= m(-\sin \rho \cos \kappa X_0 + \sin \rho \sin \kappa Y_0 + \cos \rho Z_0) \\ a_{13} &= m(r_{12} X_0 - r_{11} Y_0) \\ a_{21} &= m(-r_{31} X_0 - r_{32} Y_0 - r_{33} Z_0) \\ a_{22} &= m(\sin \omega \cos \rho \cos \kappa X_0 - \sin \omega \cos \rho \sin \kappa Y_0 + \sin \omega \sin \rho Z_0) \\ a_{23} &= m(r_{22} X_0 - r_{21} Y_0) \\ a_{31} &= m(r_{21} X_0 + r_{22} Y_0 + r_{23} Z_0) \\ a_{32} &= m(-\cos \omega \cos \rho \cos \kappa X_0 + \cos \omega \cos \rho \sin \kappa Y_0 - \cos \omega \sin \rho Z_0) \\ a_{33} &= m(r_{32} X_0 - r_{31} Y_0) \end{aligned} \quad (15)$$

Če uporabimo naslednje izraze:

$$g_x = \frac{\partial g^0(X,Y,Z)}{\partial X}, \quad g_y = \frac{\partial g^0(X,Y,Z)}{\partial Y}, \quad g_z = \frac{\partial g^0(X,Y,Z)}{\partial Z} \quad (16)$$

lahko iz enačb (11), (13) in (16) zapišemo:

$$\begin{aligned} -e(X,Y,Z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z + (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm + (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega + \\ & + (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\rho + (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) d\kappa - (f(X,Y,Z) - g^0(X,Y,Z)) \end{aligned} \quad (17)$$

Enačbo (17) lahko zapišemo tudi v matrični notaciji:

$$-\mathbf{e} = \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{l}, \quad \mathbf{P}, \quad (19)$$

kjer je \mathbf{P} matrika uteži. Neznani transformacijski parametri vsebovani v vektorju $\mathbf{x}^T = [dt_x \ dt_y \ dt_z \ dm \ d\omega \ d\rho \ d\kappa]$ so stohastične vrednosti, nad katerimi imamo lahko kontrolo z uporabo ustreznih uteži \mathbf{P} . Vektor \mathbf{l} je vektor razlik med površinskim elementom tarče in začetnim približkom korespondenčnega površinskega elementa iskalnega okna in ga izračunamo kot:

$$\mathbf{l} = f(X,Y,Z) - g^0(X,Y,Z) \quad (20)$$

\mathbf{A} je oblikovna matrika in jo lahko zapišemo kot:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & A_n \end{bmatrix}, \quad (21)$$

kjer je

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i = & [g_x^i, g_x^i X_0, g_x^i Y_0, g_x^i Z_0, g_y^i, g_y^i X_0, g_y^i Y_0, g_y^i Z_0, g_z^i, g_z^i X_0, g_z^i Y_0, g_z^i Z_0], \\ & i=(1,2,\dots,n). \end{aligned}$$

Če uporabimo pogoj, da je (Kraus, Harley, Kyle, 2004):

$$\mathbf{e}^T \mathbf{e} = \min \xrightarrow{(19)} (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1})^T (\mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{1}) = \hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} - 2\mathbf{1}^T \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{1}^T \mathbf{1}, \quad (22)$$

lahko rezultat izrazimo kot (Kraus, Harley, Kyle, 2004):

$$\frac{\partial(\mathbf{e}^T \mathbf{e})}{\partial \hat{\mathbf{x}}} = 2\hat{\mathbf{x}}^T \mathbf{A}^T \mathbf{A} - 2\mathbf{1}^T \mathbf{A} = 0 \quad (23)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{1} \quad (24)$$

V primeru slabih začetnih približkov neznanih transformacijskih parametrov ali slabi prostorski razporeditvi točk, lahko algoritem konvergira k napačni rešitvi. V ta namen vpeljemo dodatne enačbo za sistemske parametre (Gruen, Arca, 2005):

$$-\mathbf{e}_b = \mathbf{I}_b \mathbf{x} - \mathbf{l}_b, \quad \mathbf{P}_b, \quad (25)$$

kjer je

\mathbf{I} ... enotska matrika,

\mathbf{l}_b ... observacijski vektor sistemskih parametrov,

\mathbf{P}_b ... matrika uteži.

Matrika uteži \mathbf{P}_b mora biti izbrana upoštevajoč uteži \mathbf{P} transformacijskih parametrov. Neskončna vrednost uteži ($(\mathbf{P}_b)_{ii} \rightarrow \infty$) izključi i -ti parameter iz sistema s tem, da ga določi kot konstanto, medtem ko vrednost uteži enaka 0 ($(\mathbf{P}_b)_{ii}=0$) dopušča i -temu parametru, da variira kot prosti parameter.

Z upoštevanjem matrik uteži \mathbf{P} in \mathbf{P}_b , lahko rešitev sistema (24) zapišemo kot (Gruen, Arca, 2005):

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + \mathbf{P}_b)^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{1} + \mathbf{P}_b \mathbf{l}_b) \dots \text{iterativen vektor} \quad (26)$$

Oznaka $\hat{\mathbf{x}}$ predstavlja oceno po metodi najmanjših kvadratov. Ko sistem konvergira, iterativen vektor konvergira proti 0 ($\hat{\mathbf{x}} \rightarrow 0$). Kar ostane je vektor površinskih opazovanj $(v)_i$, ki predstavlja končno razliko med ocenjenim iskalnim oknom in površino tarče:

$$(v)_i = \hat{g}(X, Y, Z)_i - f(X, Y, Z)_i, \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (27)$$

Vrednosti funkcije $g(X, Y, Z)$ v enačbi (9) so dejansko stohastične vrednosti, kar pa je v zgornjih enačbah zanemarjeno. Ta predpostavka je dovoljena, dokler so poljubne napake tarče in iskalnega okna normalno porazdeljene in nekorelirane.

Rešitev sistema je pridobljena iterativno, ker je funkcional modela nelinearen. Rešitev lineariziranega funkcionala modela pa lahko hitro konvergira k lokalnemu minimumu. Globalni minimum je lahko dosežen samo, če je $g(X, Y, Z)$ razvita v Taylorjevo vrsto v točki, kjer so približne vrednosti parametrov dovolj blizu njihovim pravim vrednostim ($p_i^0 \approx p_i \in R^u; i = 1, \dots, u$). To pa lahko zagotovimo z dobrimi začetni približki $p_i^0 \in \{t_x^0, t_y^0, t_z^0, m^0, \omega^0, \rho^0, \kappa^0\}$, ki jih lahko pridobimo s križno korelacijo.

Po pridobljenem iterativnem vektorju (enačba (26)) za 1. korak iteracije, se začetni približek iskalnega okna $g^0(X, Y, Z)$ transformira v novo pozicijo, iz katere lahko izračunamo novo oblikovno matriko \mathbf{A} in vektor razlike \mathbf{l} , ter s tem nov rešitveni vektor za 2. korak iteracije. Iteracija je zaključena, ko je vsak element rešitvenega vektorja \hat{x} manjši od določene vrednosti:

$$|dp_i| < c_i, \quad dp_i \in \{dt_x, dt_y, dt_z, dm, d\omega, d\rho, d\kappa\}. \quad (28)$$

3 MERITEV POMIKOV PRI PREIZKUSU SVETLOBNE KUPOLE

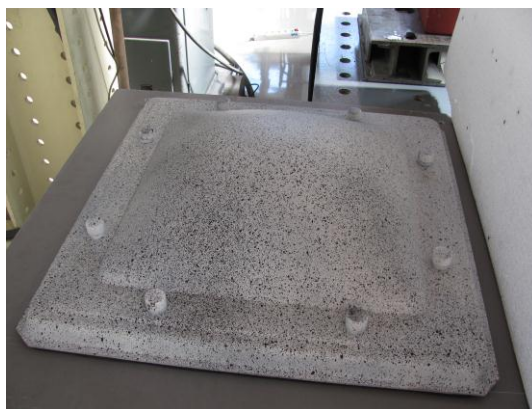
Za primeren laboratorijski preizkus smo izbrali testiranje obnašanja svetlobne kupole. Geometrija svetlobne kupole je sicer enostavna, ampak analitično težje opisljiva. Namen preizkusa ni bil samo izvesti meritev s tehnologijo bližnjefotogrametrije, ampak tudi pridobiti podatke o geometriji svetlobne kupole, ki bi bili potem lahko uporabljeni kot vhodni podatki za določitev mreže končnih elementov za računalniško simulacijo preizkusa.

3.1 Načrtovanje preizkusa

Preizkus obremenjevanja svetlobne kupole je bil izveden v Laboratoriju za konstrukcije na ZAG-u v Ljubljani. Obravnavana svetlobna kupola je dimenzij 59 x 59 cm, narejena je iz akrilnega stekla, obremenili pa smo jo s podtlakom na notranji strani svetlobne kupole.

Za izvedbo visoko natančne slikovne korelacije s podpikselno natančnostjo je bilo potrebno zagotoviti visoko ločljivost točk na merilnem območju. Svetlobna kupola ima gladko, močno odsevno površino, zato smo jo prebarvali z belo barvo in s sprejem nanесли različno velike, naključno razpršene črne pike, kot je prikazano na sliki 2. Poleg priprave površine je bilo potrebno zagotoviti zrakotesen rob, saj je bila kupola obremenjena s srkom zraka na notranji strani.

Zrakotesnost je bilo potrebno zagotoviti tudi v nastavkih za vijake. Svetlobne kupole se namreč vijačijo na jeklen venec, ki deluje kot podpora. V primeru preizkusa pa je podpora na skrajnem robu svetlobne kupole.



Slika 2: Svetlobna kupola po nanosu umetnih signalizacijskih točk

3.2 Oprema

Za izvedbo meritev s tehnologijo bližnjefotogrametrije je bil uporabljen sistem ARAMIS 5M podjetja GOM. ARAMIS 5M predstavlja celovito rešitev, saj vsebuje kameri, stativo, kalibracijske objekte, računalnik in programsko opremo.

Programska oprema ARAMIS 5M omogoča kalibracijo celotnega sistema pred izvedbo preizkusa, med preizkusom pa izvaja in kontrolira meritve, avtomatsko izračunava rezultate in jih shranjuje ter omogoča njihovo obdelovanje v fazi po sami izvedbi meritve. Kot rezultat omogoča izdelavo enostavne grafične projekcije, iz katerega lahko razumemo obnašanje merjenega objekta.

Sistem ARAMIS 5M lahko uporabimo za (Klug, 2008):

- določevanje pomikov,
- določevanje nosilnosti,
- dimenzioniranje različnih komponent,
- analizo nelinearnega obnašanja,
- karakterizacijo razpok in časovno odvisnih procesov,
- določevanje σ - ϵ diagrama,
- verifikacijo metode končnih elementov,
- določevanje materialnih karakteristik,
- analizo obnašanja homogenih in nehomogenih materialov med deformiranjem in
- izračun deformacij.

Glavne lastnosti sistema ARAMIS 5M (Klug, 2008):

- Omogoča prostorsko grafično predstavitev rezultatov meritev celotnega merilnega polja z visoko gostoto merjenih točk.
- Ustvari kvadratne fasete ali tarče nastavljivih dimenzij, ki so predmet slikovne korelacije.
- Avtomatsko kompenzira med različnimi svetlobnimi pogoji.
- Priprava merjenega objekta je enostavna, zagotoviti moramo le nelesketajočo in nehomogeno površino.
- Sistem je mobilni, poleg merilne opreme zadošča že zmogljivejši prenosni računalnik za opravljanje meritev na terenu.

- Omogoča izdelavo poročila in preprost izvoz podatkov meritev.
- Visoka stopnja avtomatizacije.

V preglednici 1 so prikazani tehnični podatki sistema ARAMIS 5M (Klug, 2008).

Preglednica 1: Specifikacije sistema ARAMIS 5M

Standardni merski volumni v mm	10 x 8 do 5000 x 4150
Resolucija v pikslih	2448 x 2050
Tipalo	2/3" CCD senzor
Maksimalna frekvenca zajemanja slik	15 Hz z osebni računalnikom 7 Hz s prenosni računalnikom
Povezava med kamero in računalnikom	Gigabit-Ethernet preko regulatorja senzorja
Področje shranjevanja slik	RAM računalnika
Osvetlitveni čas	0,1 ms do 2 s
Razpon zaznavanja deformacij	0,02 % do več kot 100 %

3.3 Izvedba preizkusa

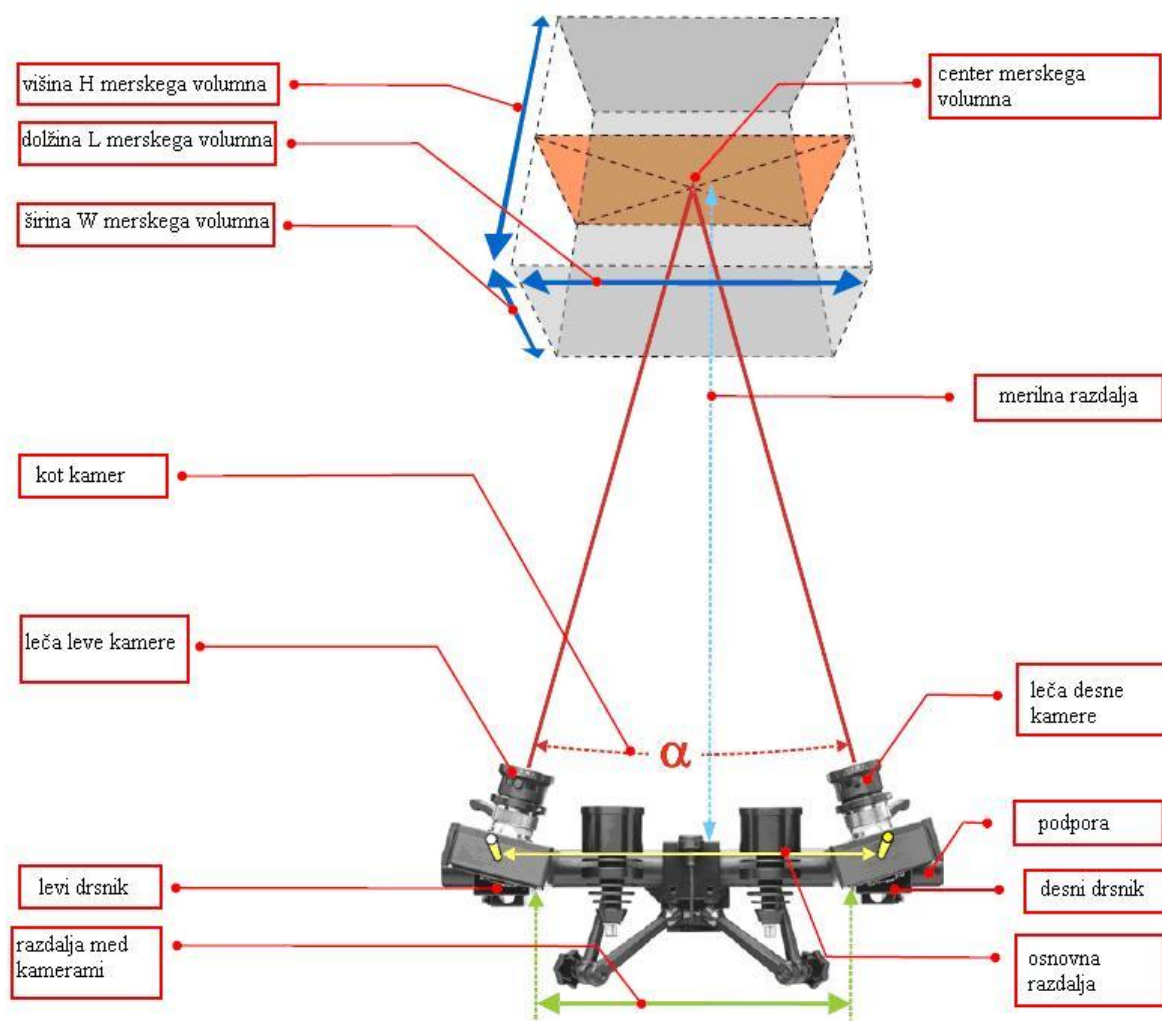
Pri izvedbi preizkusa smo uporabljali naslednje komponente sistema ARAMIS 5M:

- dve kameri,
- stativ,
- LED osvetlitev,
- laser za optimalno nastavitev položaja kamer,
- regulator senzorja za dovajanje energije kameram, nadzor zajema podatkov in prenos meritev na računalnik,
- visoko zmogljiv računalnik z Linux operacijskim sistemom,
- računalniški program ARAMIS,
- kalibracijski križ CC20 1000 x 800 s stativom.

3.3.1 Postopek priprave opreme

Vso opremo najprej pazljivo zložimo iz zaščitnih embalaž, sledi nameščanje leč, postavitve stativa in kamer, povezava kamer z računalnikom ter zagon računalniškega programa.

Najprej je bilo potrebno izračunati merski volumen preizkušanca. Na shematskem prikazu uporabljene opreme so predstavljeni parametri merskega volumna, kakor tudi parametri, ki so pomembni pri nastavitvi najbolj optimalnega položaja kamer. Merski volumen je definiran kot produkt višine, širine in dolžine preizkušanca in je izražen v mm^3 .



Shematski prikaz uporabljene opreme (Klug, 2008)

Pri preizkusu smo uporabili 12 milimetrске leče. Ker je kupola dimenzij 59 cm x 59 cm, izberemo iz preglednice za izbiro parametrov nastavitve kamer za 12 mm leče najustreznejšo širino in dolžino merskega volumna 750 mm x 630 mm. Iz iste preglednice lahko razberemo tudi potrebno razdaljo med kamerama, merilno razdaljo do objekta in ustrezen kalibracijski objekt.

Preglednica za izbiro parametrov nastavitve kamer za 12 mm leče (Klug, 2008)

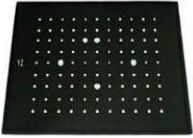



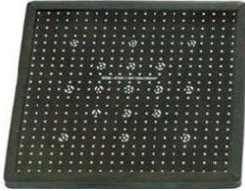


3.2.3.2 12 mm Lens (ARAMIS 5M)

Lens	Measuring volume [mm x mm]	Comment	Min. length camera support [mm]	Distance ring [mm]	Measuring distance [mm]	Slider distance [mm]	Camera angle [°]	Calibration objects	Aperture-dependent depth of field [mm]									
									1.4	2	2.8	4	5.6	8	11	16	22	32
12mm, lens family B	125 x 100	---	500	---	205	Mech. Stoo	26	CP20 90x72	n.a.	n.a.	11	29	54	94	>125	---	---	---
	150 x 130	---	500	---	245	70	25	CP20 175x140	n.a.	7.6	25	51	88	>150	>150	---	---	---
	175 x 150	---	500	---	280	86	25	CP20 175x140	n.a.	17	39	75	130	>175	>175	---	---	---
	200 x 170	---	500	---	320	104	25	CP20 250x200	6	28	59	110	180	>200	>200	---	---	---
	250 x 210	---	500	---	395	136	25	CP20 250x200	23	58	110	190	>250	>250	>250	---	---	---
	300 x 250	---	500	---	470	170	25	CP20 350x280	47	98	170	290	>300	>300	>300	---	---	---
	350 x 290	---	500	---	550	206	25	CP20 350x280	77	150	250	>350	>350	>350	>350	---	---	---
	400 x 330	---	500	---	625	238	25	CP20 350x280	110	210	350	>400	>400	>400	>400	---	---	---
	500 x 420	---	500	---	780	308	25	CC20 500x400	210	370	>500	>500	>500	>500	>500	---	---	---
	750 x 630	---	800	---	1160	476	25	CC20 700x580	590	>750	>750	>750	>750	>750	>750	---	---	---
	1000 x 840	---	800	---	1530	640	25	CC20 1000x800	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	---	---	---
	1250 x 1050	---	800	---	1915	688	22	CC20 1400x1120	>1250	>1250	>1250	>1250	>1250	>1250	>1250	---	---	---
	1500 x 1250	2)	1200 fixed	---	2270	---	29	CC20 1400x1120	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	>1500	---	---	---
	1750 x 1450	2)	1200 fixed	---	2640	---	25	CC20 2000x1600	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	>1750	---	---	---
	2000 x 1650	2)	1200 fixed	---	3010	---	22	CC20 2000x1600	>2000	>2000	>2000	>2000	>2000	>2000	>2000	---	---	---
	2500 x 2100	2)	1600 fixed	---	3740	---	24	on request	>2500	>2500	>2500	>2500	>2500	>2500	>2500	---	---	---
3000 x 2500	2)	1600 fixed	---	4475	---	20	on request	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	>3000	---	---	---	
3500 x 2950	2)	1600 fixed	---	5210	---	17	on request	>3500	>3500	>3500	>3500	>3500	>3500	>3500	---	---	---	

Legend:
 1) without laser pointer
 2) For further information, please refer to the User Information - Hardware for ARAMIS (Fixed Base).
 --- Lens cannot be adjusted to the aperture value.
 n.a. It is not possible to focus the complete measuring volume.

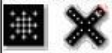
Kalibracijski objekti so potrebni pri postopku kalibracije z namenom, da zagotovijo pravilnost in konsistentnost meritev sistema (Klug, 2008). Obstajajo trije tipi kalibracijskih objektov v obliki plošč, kocke in križa, v različnih velikostih in različicah. Točke, ki so lahko nekodirane ali kodirane, so lahko razporejene na plošči in kocki v eni ali dveh merilnih skalah, medtem ko so pri kalibracijskem križu razporejene vedno v dveh različnih merilnih skalah (preglednica 2).

Preglednica 2: Kalibracijski objekti

Kalibracijski objekt	Opis
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijska plošča z nekodiranimi referenčnimi točkami in eno merilno skalo.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijska kocka z nekodiranimi referenčnimi točkami in eno merilno skalo. • Oznaka CQ.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijski križ z nekodiranimi referenčnimi točkami in dvema merilnima skalama. • Na rotacijski osi križa je kodirana referenčna točka.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijski križ s kodiranimi referenčnimi točkami in dvema merilnima skalama.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijska plošča z nekodiranimi in kodiranimi referenčnimi točkami ter dvema merilnima skalama. • Oznaka CP.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijska kocka z nekodiranimi in kodiranimi referenčnimi točkami ter dvema merilnima skalama. • Oznaka CQ.
	<ul style="list-style-type: none"> • Kalibracijski križ z nekodiranimi in kodiranimi referenčnimi točkami in dvema merilnima skalama. • Oznaka CC.

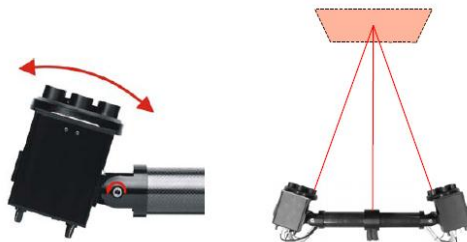
Izbira kalibracijskega križa je pogojena z objektom, ki ga želimo merit oziroma njegovim merskim volumnom. Na voljo smo imeli kalibracijski križ CC20 1000 x 800 in ne CC20 700 x 560 kot nam priporoča preglednica za izbiro parametrov nastavitve kamer za 12 mm leče. V preglednici razponov merskih volumnov glede na izbiro kalibracijskih objektov so prikazani še ustrezni merski volumni za posamezen kalibracijski objekt. V našem primeru je še ustrezna kombinacija med vrednostmi 780 mm x 650 mm in 1300 mm x 1100 mm, kar pa ne predstavlja prevelikega odstopanja in ustreza potrebam meritve svetlobne kupole.

Razponi merskega volumna glede na izbiro kalibracijskega objekta (Klug, 2008)

Calibration objects 	Measuring volume (Length x Width in mm)				
	ARAMIS 2M	ARAMIS 4M	ARAMIS 5M	ARAMIS HS	ARAMIS High Speed (Photron SA1)
CQ 10x8	10 x 8 to 13 x 10	10 x 7 to 13 x 10	9 x 8 to 13 x 11	9 x 7 to 13 x 10	8 x 8 to 10 x 10
CQ 15x12	15 x 11 to 19 x 14	15 x 11 to 19 x 14	13 x 11 to 19 x 16	14 x 11 to 19 x 15	11 x 11 to 15 x 15
CQ 23x18	23 x 18 to 29 x 22	23 x 17 to 29 x 21	21 x 18 to 29 x 24	22 x 18 to 29 x 23	17 x 17 to 23 x 23
CQ/CP20 30x24	29 x 22 to 50 x 38	30 x 22 to 50 x 37	26 x 22 to 50 x 42	28 x 22 to 50 x 40	22 x 22 to 44 x 44
CQ/CP20 55x44	49 x 37 to 90 x 70	50 x 37 to 90 x 65	44 x 37 to 90 x 75	46 x 37 to 90 x 70	37 x 37 to 75 x 75
CP20 90x72	85 x 65 to 130 x 100	90 x 65 to 130 x 95	80 x 65 to 130 x 110	80 x 65 to 130 x 100	65 x 65 to 110 x 110
CP20 175x140	140 x 110 to 200 x 150	150 x 110 to 200 x 150	130 x 110 to 200 x 170	140 x 110 to 200 x 160	110 x 110 to 170 x 170
CP20 250x200	220 x 170 to 370 x 280	230 x 170 to 370 x 270	200 x 170 to 370 x 310	210 x 170 to 370 x 300	170 x 170 to 310 x 310
CP20 350x280	330 x 250 to 500 x 380	340 x 250 to 500 x 370	300 x 250 to 500 x 420	310 x 250 to 500 x 400	250 x 250 to 460 x 460
CC20 500x400	510 x 390 to 670 x 510	530 x 390 to 670 x 490	470 x 390 to 670 x 560	490 x 390 to 670 x 540	390 x 390 to 670 x 670
CC20 700x560	680 x 520 to 890 x 680	710 x 520 to 890 x 650	620 x 520 to 890 x 750	650 x 520 to 890 x 710	520 x 520 to 890 x 890
CC20 1000x800	850 x 650 to 1300 x 990	880 x 650 to 1300 x 960	780 x 650 to 1300 x 1100	810 x 650 to 1300 x 1050	650 x 650 to 1300 x 1300
CC20 1400x1120	1200 x 910 to 1600 x 1200	1250 x 920 to 1600 x 1200	1100 x 920 to 1600 x 1350	1150 x 920 to 1600 x 1300	910 x 910 to 1600 x 1600
CC20 2000x1600	1700 x 1300 to 2350 x 1800	1750 x 1300 to 2350 x 1750	1550 x 1300 to 2350 x 1950	1650 x 1300 to 2350 x 1900	1300 x 1300 to 2350 x 2350

Pri izbiri razdalje med kamerama in merilne razdalje do svetlobne kupole, smo, poleg priporočenih vrednosti iz preglednice, upoštevali še samo geometrijo svetlobne kupole, ki ima na robovih strm naklon. Preglednica za izbiro parametrov nastavitvev kamer za 12 mm leče priporoča razdaljo med kamerami 800 mm in merilno razdaljo 1160 mm, da pa bi kameri lahko zajeli celotno področje, morata biti bolj skupaj in na večji razdalji od svetlobne kupole. Zato smo izbrali razdaljo med kamerami 500 mm, ki smo ju postavili na razdaljo 1500 mm stran od svetlobne kupole. Tudi pri postopku kalibracije, smo upoštevali razdaljo 1500 mm med kamerami in kalibracijskim križem.

Sledi postopek centriranja kamer, pri katerem si pomagamo z laserji, kot je prikazano na shemi centriranja kamer s pomočjo laserja. Kameri moramo postaviti pod takim kotom, da se laserski žarki iz kamer in iz centra stativa stikajo na isti točki na kalibracijskem križu.



Shema centriranja kamer s pomočjo laserja (Klug, 2008)

Nastaviti moramo še fokus leč. Fokus nastavimo tako, da popolnoma odpremo zaslonki obeh kamer in nato korigiramo čas osvetlitve, da dobimo na računalniškem zaslonu jasno sliko. Za potrebe preizkusov, ki potrebujejo kratek čas osvetlitve zaradi hitrega poteka preizkusa, lahko najprej nastavimo čas osvetlitve na želeno vrednost in nato korigiramo zaslonko.

3.3.2 Kalibracija

Dobra kalibracija kamer je predpogoj za izvedbo natančnih in zanesljivih 3D fotogrametričnih meritev. S postopkom kalibracije se modelirajo distorzije, ki se pojavljajo pri transformaciji med točkami na objektu in slikovnimi točkami (Clarke, Fryer, 1998). S sistemom ARAMIS 5M je postopek kalibracije avtomatiziran, to pomeni, da sistem avtomatsko korigira meritve z znanimi distorzijami in s tem zagotavlja natančnost meritev.

Na sliki 3 je prikazan uporabljen kalibracijski križ, medtem ko lahko na sliki 4 vidimo postavitev kamer in kalibracijskega križa med postopkom kalibracije.



Slika 3: Kalibracijski križ med postopkom kalibracije

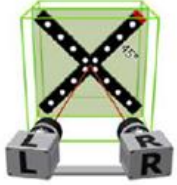
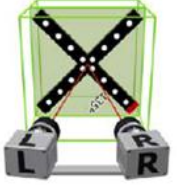
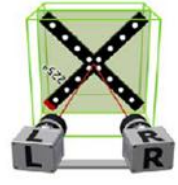
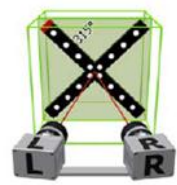
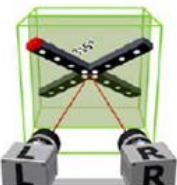
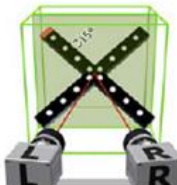
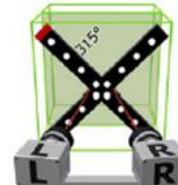
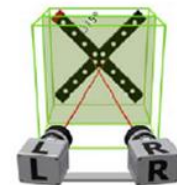
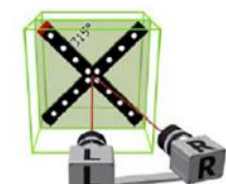
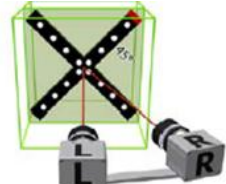
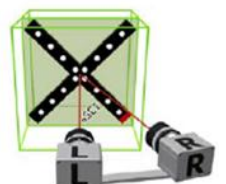
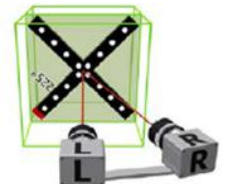
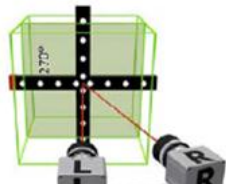
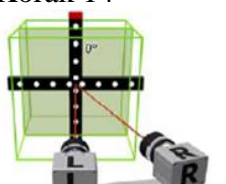
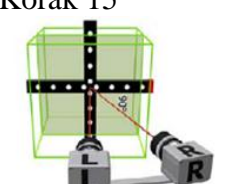
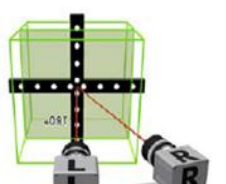
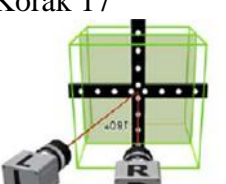
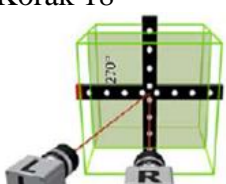
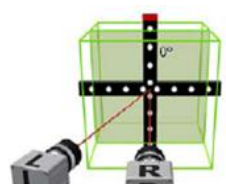
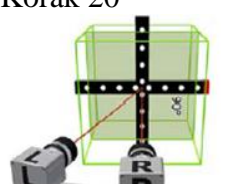
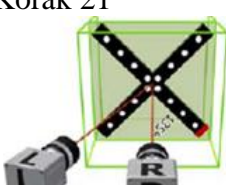
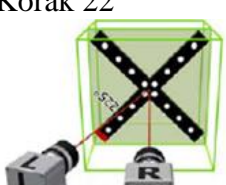

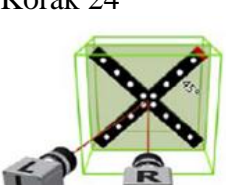
Eden izmed krakov križa ima rdečo oznako, ki nam pomaga določiti pozicijo križa v postopku kalibracije.



Slika 4: Postavitev kamer in kalibracijskega križa

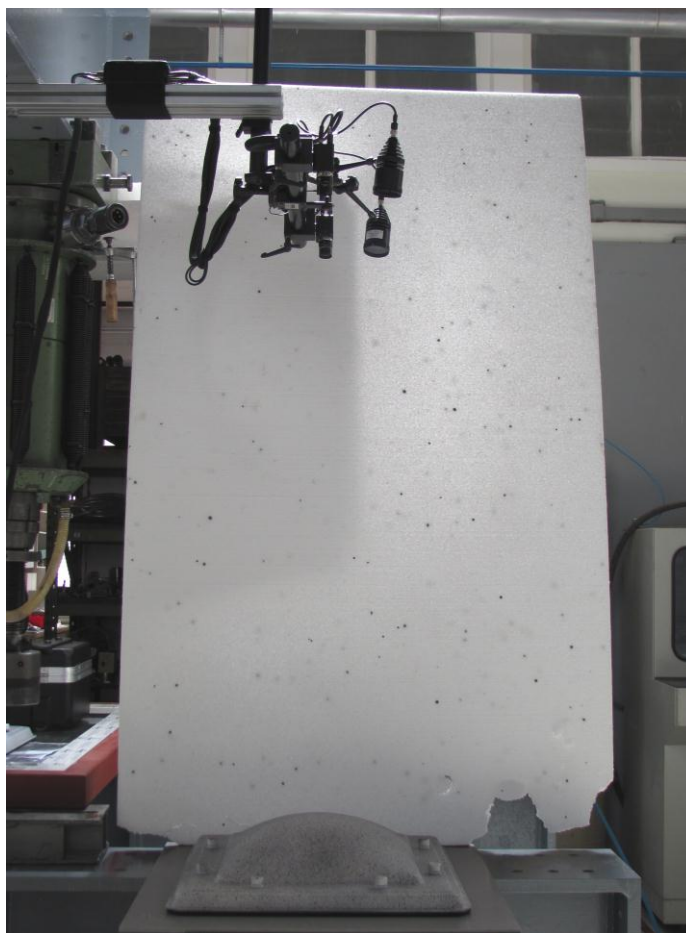
Skozi kalibracijo nas vodi programska oprema ARAMIS. Ta nam narekuje zaporedje štiriindvajsetih pozicij kalibracijskega križa, ki so prikazane v preglednici 3. Pozicije zahtevajo rotacijo, nagib, manjšanje in večanje razdalje do kamer, usmeritev v center, proti eni ali proti drugi kameri. Vsako pozicijo je potrebno slikati, program pa nato avtomatsko izračunava parametre distorzij.

Preglednica 3: Kalibracijski proces

Korak 1 	Korak 2 	Korak 3 	Korak 4 
Korak 5 	Korak 6 	Korak 7 	Korak 8 
Korak 9 	Korak 10 	Korak 11 	Korak 12 
Korak 13 	Korak 14 	Korak 15 	Korak 16 
Korak 17 	Korak 18 	Korak 19 	Korak 20 
Korak 21 	Korak 22 	Korak 23 	Korak 24 

3.3.3 Postopek zajemanja meritev

Po končani kalibraciji smo nadaljevali s preizkusom. Kameri smo namestili nad kupolo na enako razdaljo, kot je bila v postopku kalibracije med kamerami in kalibracijskim križem.



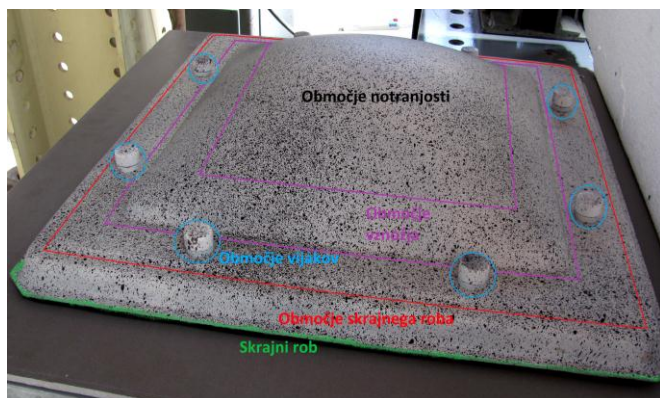
Slika 5: Med preizkusom

Svetlobno kupolo je bilo potrebno zaščititi pred direktnim soncem, da je bila osvetlitev enakomernejša in s tem bolj natančne meritve.

Preizkus smo hkrati pričeli s srkanjem zraka iz kupole in zajemanjem slik. Srkanje zraka je potekalo enakomerno do vrednosti 40,715 mbara v 93,8 sekundi. Sledilo je razbremenjevanje, ki je potekalo naslednjih 97 sekund. Frekvenca zajemanja slik je 0,92 slik na sekundo.

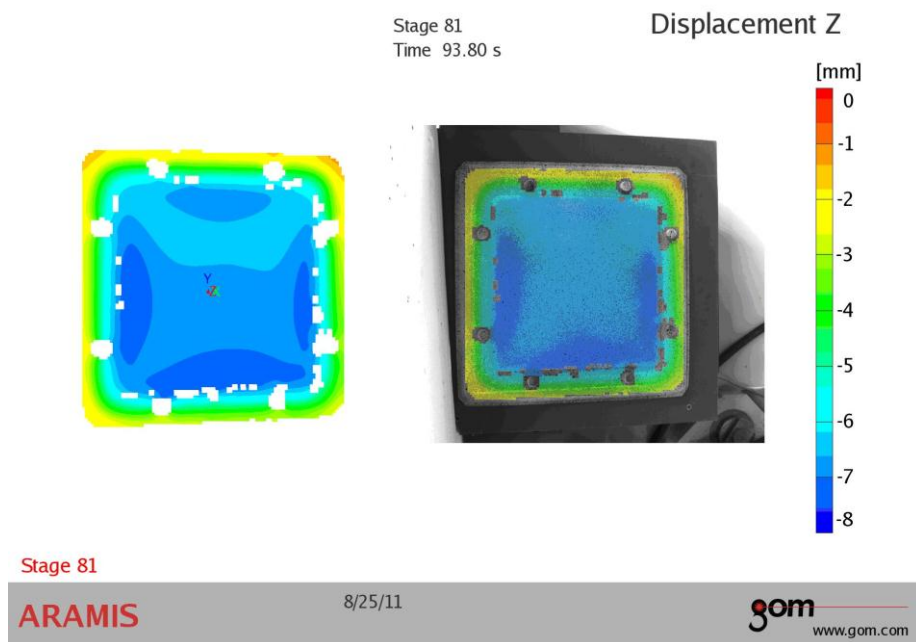
3.4 Rezultati

Za potrebe komentiranja smo svetlobno kupolo razdelili na skrajni rob, območje skrajnega roba, vijakov, vznožja in notranjosti svetlobne kupole. Na sliki 6 so območja shematsko predstavljena.



Slika 6: Območja svetlobne kupole

Kot že omenjeno je glavni rezultat meritev s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije polje pomikov po celotnem merilnem območju. Na sliki 7 lahko vidimo polje navpičnih pomikov pri srku zraka v vrednosti -40,715 mbara.

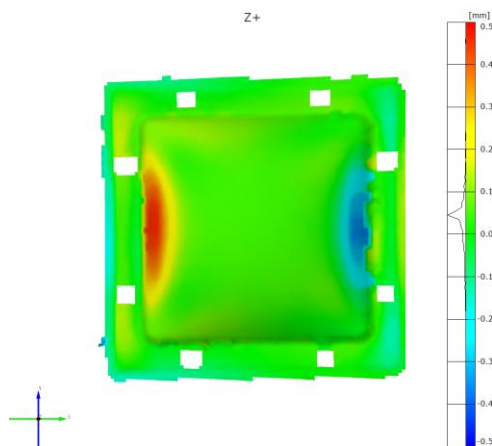


Slika 7: Maksimalni navpični pomiki pri podtlaku -40,715 mbar

Največji pomiki se pojavijo na vznožju kupole in so nesimetrični. Vzroki nesimetrije so lahko materialni ali geometrijski. Vrednost največjega pomika je -7,517 mm.

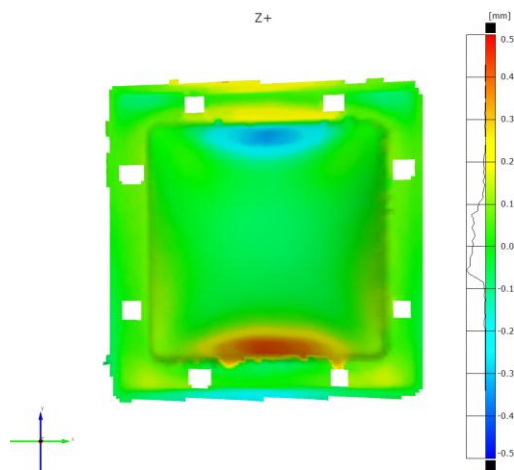
Opazimo lahko tudi, da kameri nista zajeli območja robu svetlobne kupole in območja vijakov. Kljub upoštevanju geometrije pri izbiri pozicije kamer in razdalje do objekta, je naklon na robovih in okoli vijakov prestrm, da bi ga kameri lahko zajeli. Ker so vertikalni pomiki na robovih zelo majhni zaradi bližine podpor, se ne odločimo za ponovitev eksperimenta. Za potrebe računalniške simulacije bo potrebno geometrijo manjkajočega roba dodati naknadno.

Na sliki 8 so prikazani horizontalni pomiki v smeri x pri podtlaku -40,715 mbar. Maksimalna vrednost je 0,525 mm, medtem ko je minimalna -0,470 mm. Največji pomiki so v območju vznožja kupole, opazimo pa lahko tudi nekaj skokov na skrajnem robu merilnega območja.



Slika 8: Horizontalni pomiki v smeri x pri podtlaku -40,715 mbar

Na sliki 9 so prikazani pomiki v smeri y pri podtlaku -40,715 mbar. V smeri y so maksimalni pomiki 0,980 mm in minimalni -0,931 mm.



Slika 9: Horizontalni pomiki v smeri y pri podtlaku -40,715 mbar

Vrednosti maksimalnih horizontalnih pomikov v smeri y so večje od vrednosti horizontalnih pomikov v smeri x, ker je tudi področje zajetega območja različno. V smeri y sta namreč kameri zajeli večjo površino območja. Posledično se maksimalni horizontalni pomiki v smeri y pojavljajo na skrajnem robu merjenega področja in nakazujejo, da se maksimalni pomiki svetlobne kupole zgodijo na območju skrajnega roba, katerega kameri nista zajeli. Na sliki 9 je povečevanje vrednosti pomikov na robu merjenega območja prikazano z modro barvo na spodnji ter oranžno barvo na zgornji stranici svetlobne kupole.

V območju vznožja in notranjosti svetlobne kupole, sta vrednosti in razporeditev horizontalnih pomikov v smeri x in y podobna.

Poleg grafičnega prikaza lahko iz programa ARAMIS izpišemo preprosto tekstovno datoteko s podatki o koordinatah, pomikih in deformacijah po komponentah v smereh x, y, z za vsako trenutek, ko je sistem posnel sliko. V primeru preizkusa s svetlobno kupolo imamo 176 posnetkov, na katerih so podatki za 8922 točk.

4 NUMERIČNA SIMULACIJA PREIZKUSA

Za izvedbo numerične simulacije izvedenega laboratorijskega preizkusa je bil izbran program Abaqus. Abaqus ponuja rešitve tako za rutinske, kakor tudi za sofisticirane linerane in nelinearne inženirske probleme.

Abaqus z analizo s končnimi elementi omogoča preverjanje konceptov, analiziranje konstrukcij in simulacijo procesov. Omogoča enostavno kreiranje modelov, uvoz CAD modelov in uvoz mrež, ki nimajo CAD geometrije. Odlikuje ga veliko možnosti pri izbiri materialnih modelov in pri vizualizaciji. Celoten program je možno do visoke mere prilagoditi posamezniku in njegovim željam (Abaqus FEA, 2011).

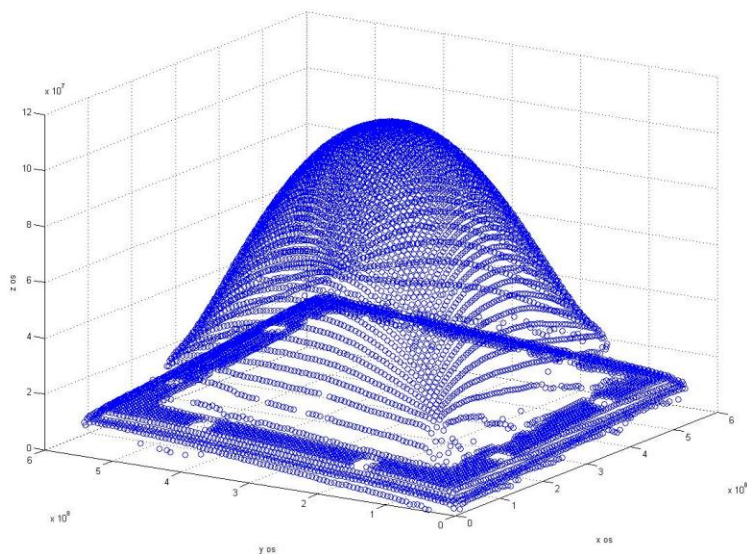
4.1 Podatki za analizo

Vhodni podatki zajemajo informacije o geometriji, materialu, podporah in obtežbi, ki jih je bilo potrebno ustrezno vnesti v program Abaqus za izračun želenih pomikov svetlobne kupole.

4.1.1 Geometrija

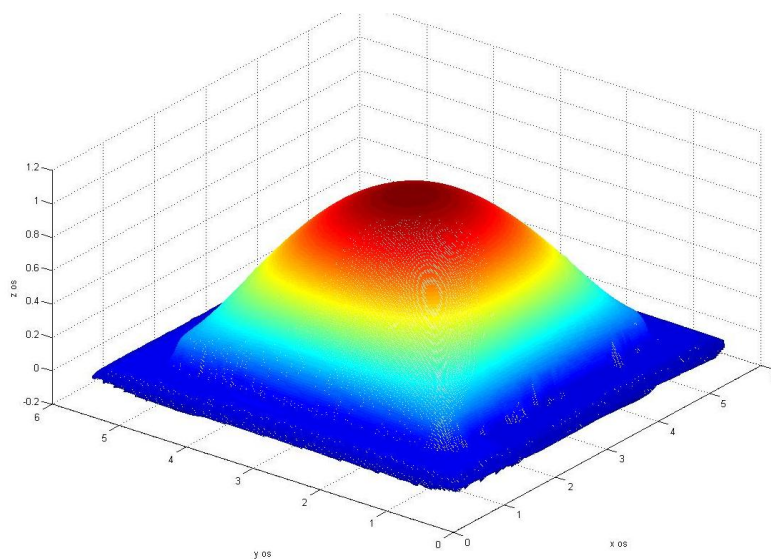
Za modeliranje geometrije svetlobne kupole smo uporabili rezultate meritev prostorskih koordinat na svetlobni kupoli s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije v nedeformiranem stanju. Robni del svetlobne kupole, ki ni bil zajet s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije, smo modelirali naknadno, kot bo prikazano v nadaljevanju.

Sistem ARAMIS nam je podal koordinate 8922 točk, ki so prikazane na sliki 10. Podatke je bilo potrebno najprej urediti, prestaviti koordinatno izhodišče na rob svetlobne kupole ter nekoliko zasukati svetlobno kupolo z uporabo Eulerjevih kotov tako, da je bil skrajni rob svetlobne kupole poravnan s koordinatnimi osmi. Za izvedbo slednjega je bilo uporabljeno programsko okolje Matlab. Nekaj meritev, ki so še posebno odstopala, je bilo potrebno odstraniti.

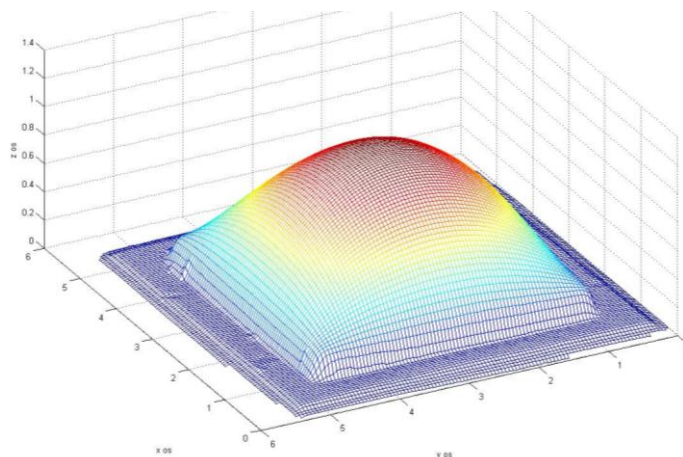


Slika 10: Grafični prikaz rezultata bližnjeliskovne fotogrametrije

Izvedena je bila interpolacija med koordinatami izmerjenih točk s funkcijo TriScatteredInterp, ki omogoča interpolacijo med množico točk (Mathworks, 2011). Rezultat je bila matrika navpičnih z koordinat nad predpostavljeno pravokotno mrežo v xy ravnini, ki jo potrebujemo za uvoz geometrije v Abaqus.

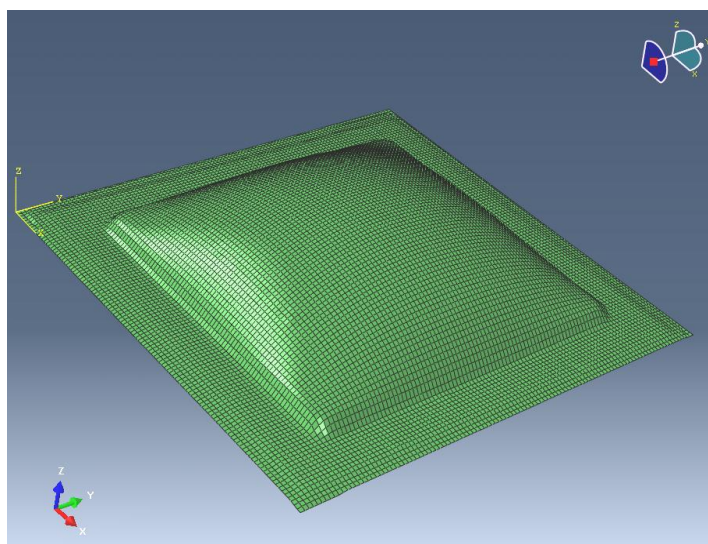


Slika 11: Geometrija svetlobne kupole dobljena z interpolacijo med izmerjenimi točkami



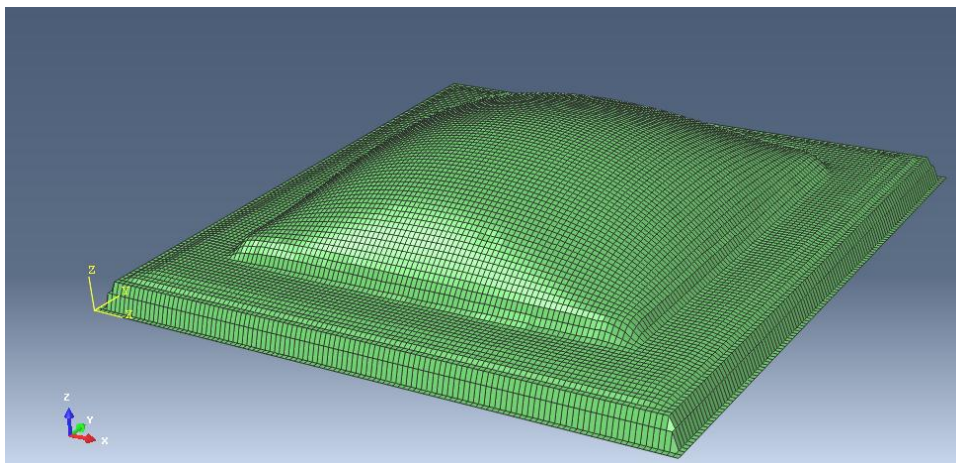
Slika 12: Mreža ploskovnih geometrijskih elementov v Matlabu

V programu Abaqus smo pripravili ravno ploščo, ki je bila v x in y smeri enakih dimenzij kot svetlobna kupola. Na ploščo smo razpeli mrežo ploskovnih končnih elementov, ki je ustrezala mreži geometrijskih ploskovnih elementov, ustvarjeni v Matlabu. Model svetlobne kupole smo ustvarili tako, da smo podatke o plošči iz Abaqusa izvozili v Matlab, kjer smo vrednosti z koordinat plošče zamenjali z vrednostmi z koordinat svetlobne kupole ter tako dobljeno mrežo ploskovnih elementov ponovno uvozili v Abaqus. Na sliki 13 lahko vidimo mrežo končnih elementov svetlobne kupole, ki pa še ne zajema robu.



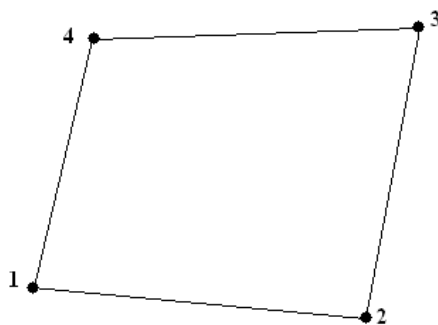
Slika 13: Mreža ploskovnih končnih elementov v Abaqusu (brez robu)

Tako pripravljeni mreži končnih elementov smo morali dodati še rob, ki ga kameri digitalne bližnjefotogrametrije nista uspeli zaznati. Celotna mreža končnih elementov za svetlobno kupolo je prikazana na sliki 14.



Slika 14: Model svetlobne kupole z dodanim robom

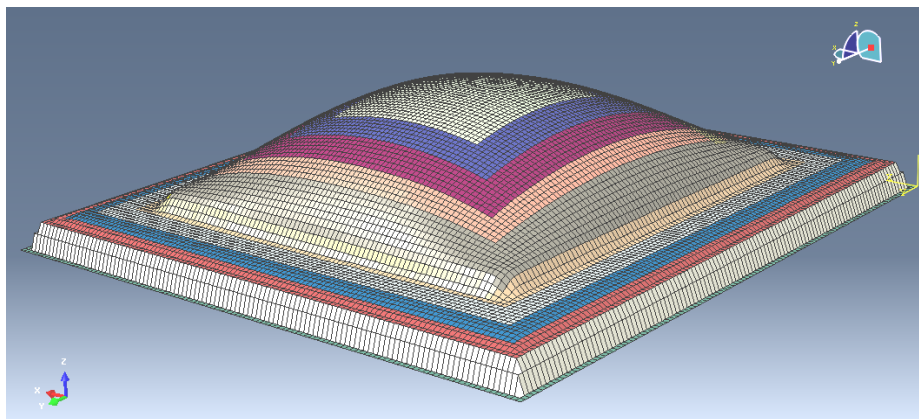
Svetlobna kupola je modelirana kot prostorska lupina. Vsebuje mrežo 11664 Abaqusovih lupinskih končnih elementov z oznako S4R (lupinast končni element z reducirano integracijo in kontrolo podintegiranih deformacijskih oblik) s 4 vozlišči in 4 robovi (Cook, 1995). Primer končnega elementa tipa S4R je prikazan na sliki 15.



Slika 15: Končni element tipa S4R

Debelina svetlobne kupole je bila izmerjena po preizkusu, ko smo svetlobno kupolo prerezali in ročno izmerili debelino. Neenakomerna debelina je posledica postopka ekstrudiranja pri izdelavi svetlobnih kupol.

Debelina svetlobne kupole močno vpliva na vrednosti pomikov pri izračunu. Glede na izmerjene vrednosti debelin svetlobne kupole, je bilo področje kupole razdeljeno na 11 področji, v katerih je debelina približno enaka. Polja so prikazana na sliki 16.



Slika 16: Polja različnih debelin

Vrednosti od skrajnega roba (področje 1) proti notranjosti (področje 11) so prikazane v tabeli 4.

Preglednica 4: Vrednosti debelin po področjih

Področje	Debelina [mm]
1	3,9
2	3,75
3	3,6
4	3,8
5	3,75
6	3,41
7	3,19
8	3,24
9	3,12
10	3,23
11	3,15

Za integracijo napetosti po debelini je v programu Abaqus predpostavljeno Simpsonovo pravilo s petimi integracijskimi točkami (ABAQUS/CEA User's Manual, 2004).

4.1.2 Material

Ko je bila geometrija pripravljena, je bilo potrebno določiti materialne karakteristike. Svetlobna kupola je narejena iz polimetylmetakrilata ali PMMA, znanega tudi kot akrilno steklo.

Akrilno steklo je termoplast, ki ima naslednje značilnosti (Akripol):

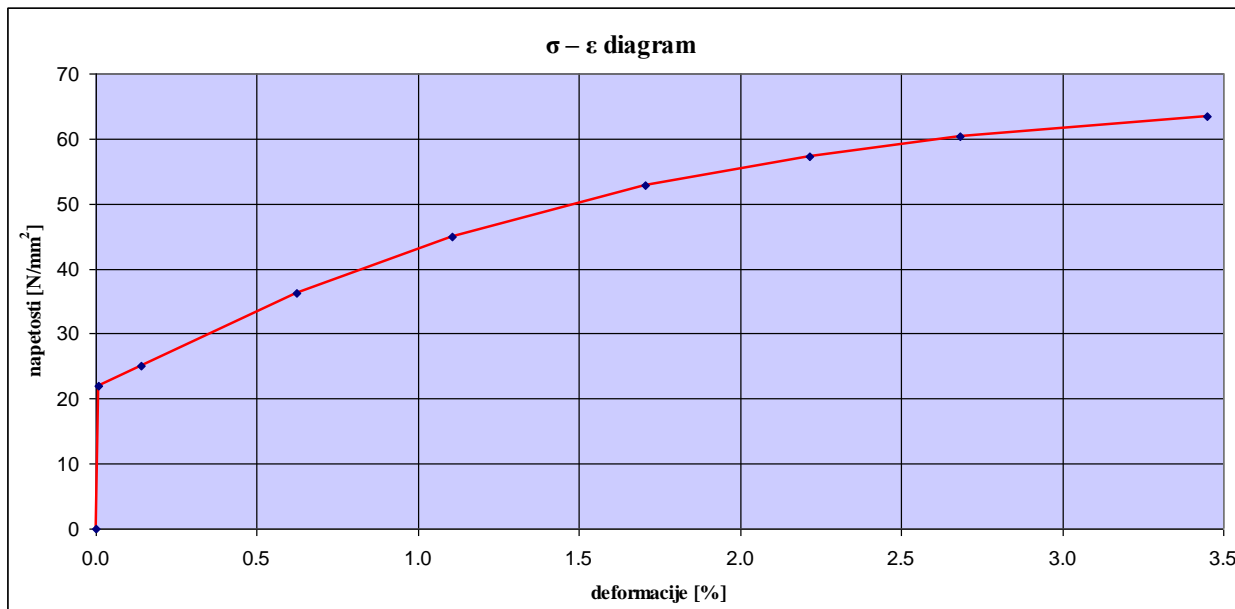
- dolga življenjska doba kljub izpostavljenosti ekstremnim vremenskim pogojem,
- izjemna prosojnost,
- dobra UV zaščita,
- odporen proti koroziji,
- dobra odpornost na udarce
- med gorenjem ne kaplja in ne širi požara,
- možna reciklaža.

V numerični simulaciji so bile uporabljene materialne karakteristike, ki so bile za material svetlobne kupole eksperimentalno določene na ZAG-u v Ljubljani, v Laboratoriju za polimere. V elastičnem stanju velja:

Youngov modul: $E = 3130 \text{ N/mm}^2$

Poissonov količnik: $\nu = 0,34$

Obnašanje materiala v neelastičnem območju pa je prikazano z eno-osnim $\sigma - \epsilon$ diagramom na grafu 1 in v preglednici 5.



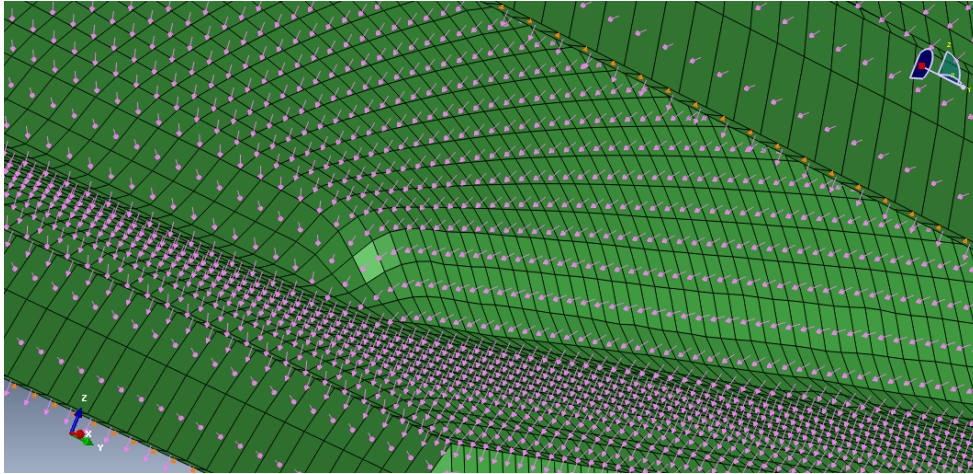
Graf 1: $\sigma - \epsilon$ diagram

Preglednica 5: $\sigma - \epsilon$ podatki

σ [N/mm ²]	ϵ [%]
21.91	0.007
25.06	0.142
36.33	0.623
44.88	1.104
52.79	1.705
57.24	2.216
60.34	2.683
63.42	3.449

4.1.3 Obtežba in podprtost

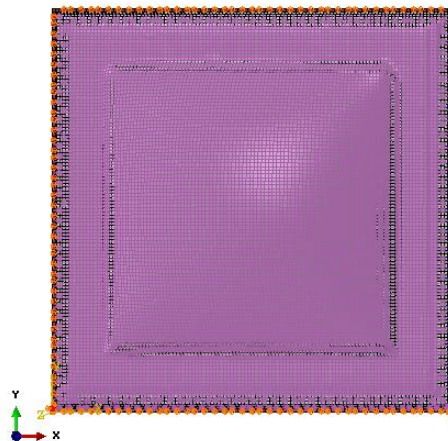
Kupola je bila pri preizkusu obtežena s pritiskom, ki deluje pravokotno na notranjo površino svetlobne kupole. Tudi pri numerični simulaciji je bila smer delovanja obtežbe upoštevana (glej sliko 17), njena največja vrednost pa je bila -40,715 mbar.



Slika 17: Obtežba na spodnji strani svetlobne kupole

Svetlobna kupola je bila pri preizkusu zgolj položena na podlago, zato smo v numerični simulaciji preprečili le pomike v navpični smeri na skrajnih robovih. Dodatno smo svetlobno kupolo podprli v smeri horizontalnih pomikov x in y v dveh točkah na skrajnem robu svetlobne kupole. S preprečitvijo togih premikov zagotovimo nesingularnost tangentne matrike (Huges, 2000).

Na sliki 18 je z vijolično barvo prikazano področje obtežbe, ki je nanešena na celotno področje geometrijskega modela svetlobne kupole. Z oranžno barvo so po celotnem skrajnem robu označene podpore, ki preprečujejo pomike v z smeri. V spodnjem levem in spodnjem desnem vogalu pa se nahajata dve rdeči točki, ki predstavljata podporo, ki preprečuje pomika v x in y smeri.

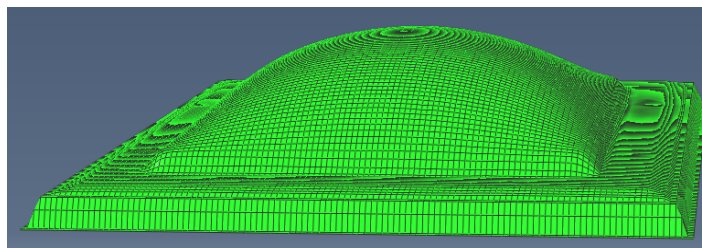


Slika 18: Področje nanosa obtežbe in položaj podpor

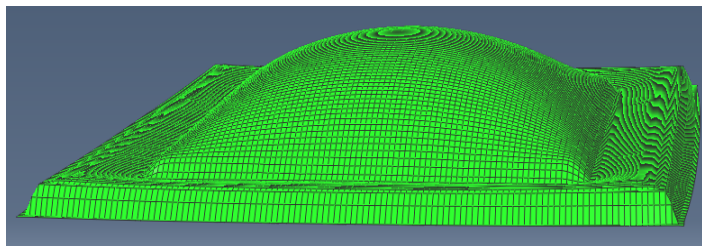
4.2 Rezultati analize

V Abaqusu smo obravnavali primera s predpostavljenim elastičnim in elastoplastičnim materialnim modelom. Geometrijska nelinearnost ni bila upoštevana. Za izračun sistema nelinearnih enačb v elastoplastični analizi je Abaqus uporabil Newtonovo metodo (Abaqus Theory Manual, 2003).

Na sliki 19 in 20 je prikazana nedeformirana in deformirana geometrija svetlobne kupole pri elastoplastični analizi pri podtlaku $-40,715$ mbar. Pri prikazu deformirane lege so zaradi nazornejšega prikaza deformacije povečane za faktor 3. Opazimo lahko, da se svetlobna kupola posede, pri tem pa območje notranjosti ostane skoraj nespremenjeno. Največji vertikalni pomiki se zgodijo na vznožju svetlobne kupole, kar povzroči, da se skrajni robovi pomaknejo navzven.



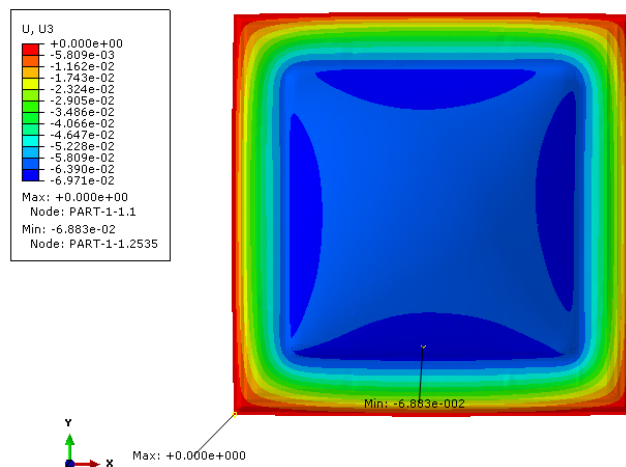
Slika 19: Nedeformirana geometrija svetlobne kupole pri podtlaku $-40,715$ mbar pri elastoplastični analizi



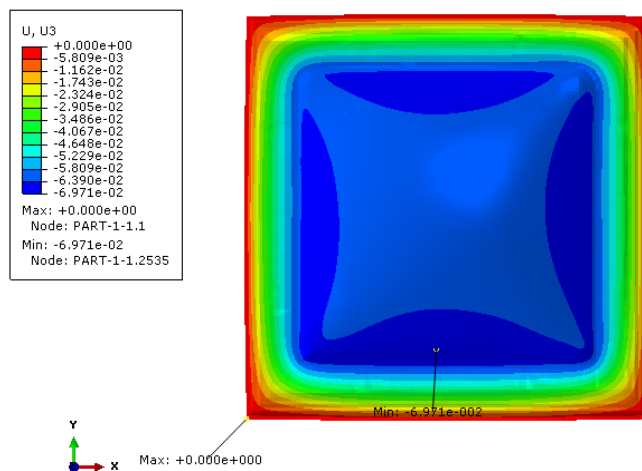
Slika 20: Deformirana geometrija (3-kratna povečava) svetlobne kupole pri podtlaku $-40,715$ mbar pri elastoplastični analizi

Ugotovitve nam potrdi tudi izpis rezultatov. Na sliki 21 in 22 so prikazane maksimalne vrednosti in razporeditev navpičnih pomikov za elastično in elastoplastično analizo. Pomiki v obeh primerih niso popolnoma simetrični, kar pa je posledica upoštevanja realne geometrije, ki prav tako ni popolnoma simetrična. Maksimalna navpična pomika se v obeh primerih pojavita na vznožju svetlobne kupole. Njune vrednosti sta $-6,883$ mm pri elastični in $-6,971$ mm pri elastoplastični analizi. Razlika v vrednostih

maksimalnih navpičnih pomikov se pojavlja zaradi prekoračitve meje elastičnosti na najbolj obremenjenih delih svetlobne kupole.



Slika 21: Navpični pomiki v z smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo

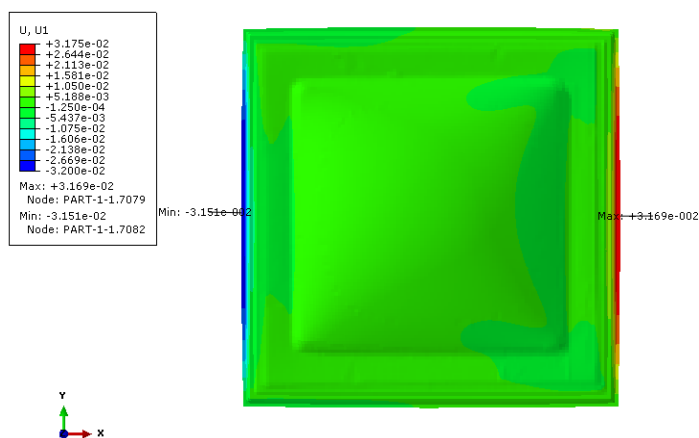


Slika 22: Navpični pomiki v z smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo

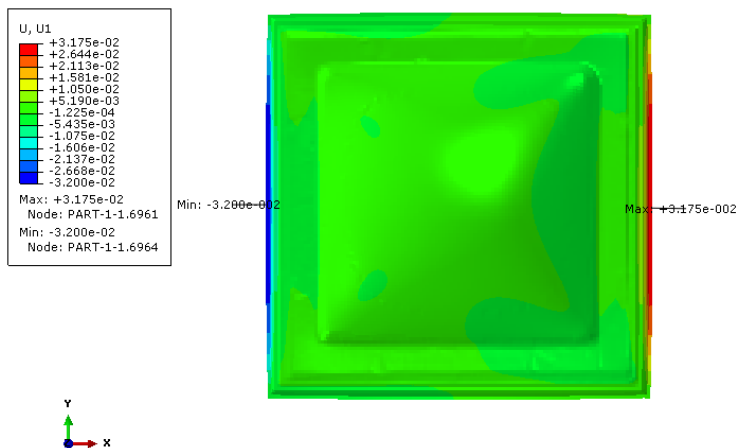
Na sliki 23 on 24 so prikazani horizontalni pomiki v smeri x za primer elastične in elastoplastične analize. Maksimalna horizontalna pomika v smeri x sta locirana na skrajnem desnem robu pri elastični in skrajnem levem robu pri elastoplastični analizi svetlobne kupole. Vrednosti sta 3,169 mm pri elastični in -3,200 mm pri elastoplastični analizi. Razlika v lokaciji maksimalnih pomikov je lahko posledica razporeditve območja, kjer je meja elastičnosti prekoračena. Ker je maksimalni horizontalni pomik v elastoplastični

analizi lociran na skrajnem levem robu, lahko sklepamo, da je območje plastifikacije bližje levemu delu svetlobne kupole.

V obeh primerih analize je razporeditev horizontalnih pomikov v smeri x simetrična, vendar pa vrednosti na obeh robovih (levem in desnem) niso popolnoma enake, razlikujeta se za 0,018 mm pri elastični in 0,025 mm pri elastoplastični analizi, kar je lahko posledica nesimetrične geometrije in razporeditve območja plastifikacije pri elastoplastični analizi.



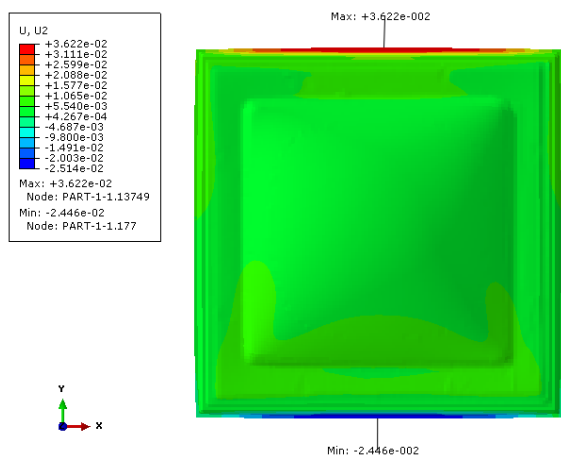
Slika 23: Horizontalni pomiki v x smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo



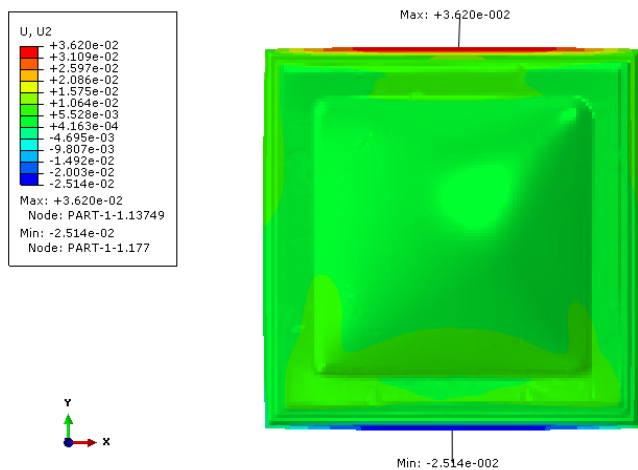
Slika 24: Horizontalni pomiki v x smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo

V smeri y je razporeditev največjih pomikov podobna kakor pri horizontalnih pomikih v smeri x , saj so prav tako skoncentrirani na skrajnem robu. Maksimalna vrednost je 3,622 mm za elastično in 3,620 mm za

elastoplastično analizo. Horizontalni pomiki v y smeri prav tako niso popolnoma nasprotno simetrični glede na navidezno simetrično os svetlobne kupole, razlika pa je nekoliko večja kot v x smeri, in sicer 1,176 mm pri elastični in 1,106 mm pri elastoplastični analizi. Razlog je načinu podpiranja, ki v spodnjem levem in spodnjem desnem vogalu preprečuje horizontalna pomika. Posledično so, razen na skrajnem spodnjem robu modela svetlobne kupole, vrednosti horizontalnega pomika v smeri y pozitivne.



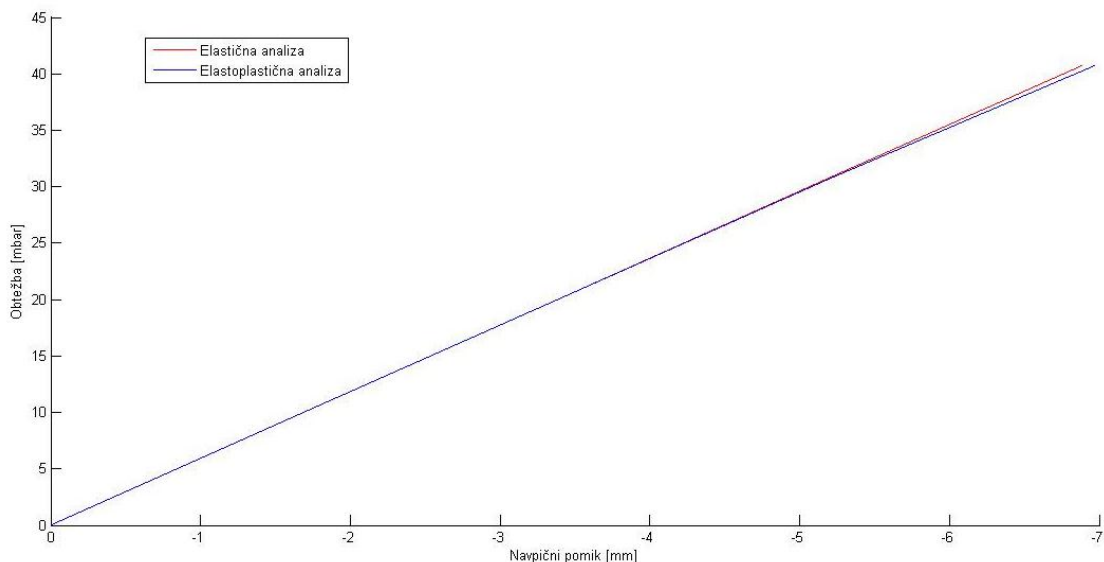
Slika 25: Horizontalni pomiki v y smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastično analizo



Slika 26: Horizontalni pomiki v y smeri (v dm) pri podtlaku -40,715 mbar pridobljeni z elastoplastično analizo

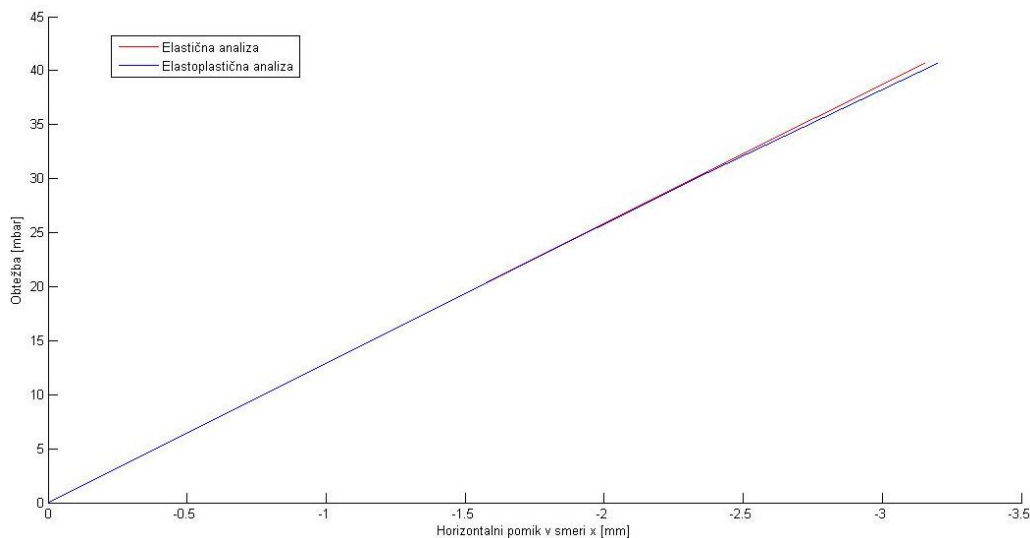
Iz slik 25 in 26 lahko opazimo še, da je ujemanje med elastično in elastoplastično analizo na zgornjem skrajnem robu boljše (razlika 0,002 mm) kakor na spodnjem (razlika 0,068 mm). Iz tega lahko sklepamo, da je območje plastifikacije materiala pri elastoplastični analizi bližje spodnjemu robu.

Za maksimalne vrednosti pomikov izrišemo grafe v odvisnosti obtežbe in pomika. Za maksimalni navpični pomik je rezultat prikazan na grafu 2. Z večanjem obtežbe nad 35 mbar se linearna premica pri elastični analizi in rahlo ukrivljena premica elastoplastične analize razcepita.



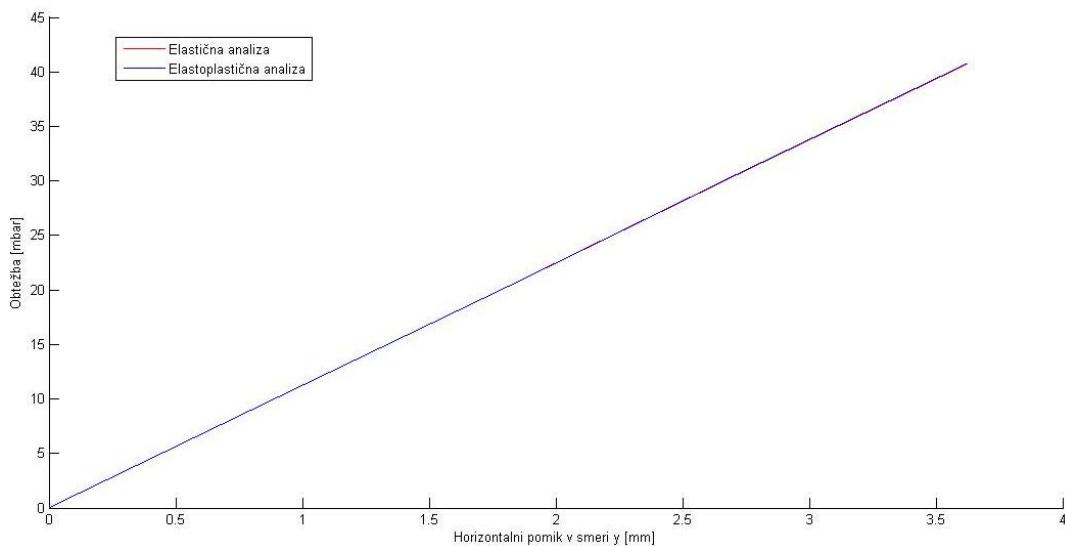
Graf 2: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega navpičnega pomika za elastično in elastoplastično analizo

Na grafu 3 je prikazan graf maksimalnega horizontalnega pomika v smeri x v odvisnosti od obtežbe. Ker je točka maksimalnega pomika pri elastični analizi druga kakor pri elastoplastični, smo za risanje grafa izbrali točko, kjer je v elastoplastični analizi pomik v smeri x največji. Rezultat je podoben kakor pri grafu 2, saj se premici z večanjem obtežbe razcepita.



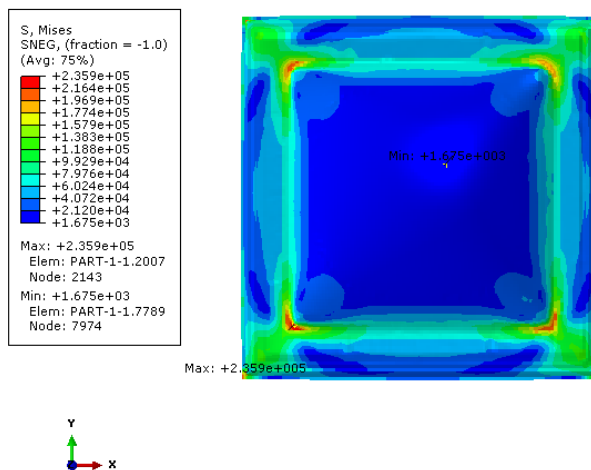
Graf 3: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega horizontalnega pomika v smeri x za elastično in elastoplastično analizo

Na grafu 4 je prikazan graf maksimalnega horizontalnega pomika v smeri y v odvisnosti od obtežbe. Vozlišče maksimalnega pomika v smeri y, ki smo ga izbrali za primerjavo med elastično in elastoplastično analizo, je po ugotovitvah nekoliko bolj oddaljen od območja plastificiranja materiala, zato je vpliv slednjega zanemarljiv. Premici se skoraj ne razcepita, razlika pri maksimalnih pomikih pa je kot že omenjeno 0,002 mm.



Graf 4: Prikaz odvisnosti obtežbe in maksimalnega horizontalnega pomika v smeri y za elastično in elastoplastično analizo

S primerjanjem vrednosti največjih von Misesovih napetosti na sliki 27 in grafa 1 lahko vidimo, da je v neelastičnem območju le zelo majhen del svetlobne kupole na spodnjih vogalih vznožja svetlobne kupole. Tam so vrednosti von Misesovih napetosti $23,59 \text{ N/mm}^2$, medtem ko je meja elastičnosti za uporabljen material $21,91 \text{ N/mm}^2$. Plastifikacija pa je tudi vzrok za nastanek razlik v vrednostih pomikov, ki se pojavljajo med elastično in elastoplastično analizo.

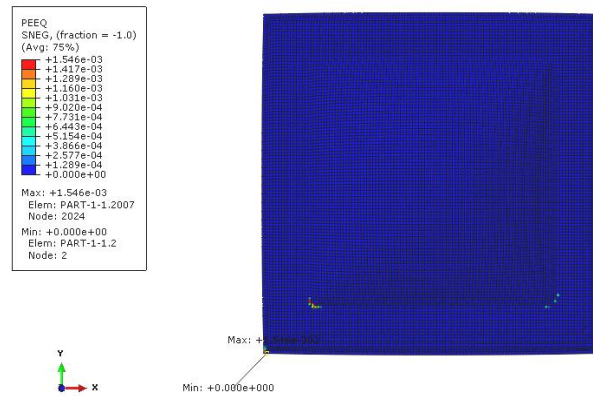


Slika 27: Von Misesove napetosti (v N/dm^2) pri podtlaku -40,715 mbar pri elastični analizi

Enako območje pojavljanja neelastičnosti lahko vidimo tudi na sliki 28, kjer so prikazane plastične deformacije. Ker je območje plastifikacije le na spodnjih vogalih vznožja svetlobne kupole, ima le to največji vpliv na navpične pomike, saj se maksimalne vrednosti le teh pojavljajo ravno med obema območjema plastifikacije.

Opazimo tudi, da je večje območje plastifikacije v levem spodnjem vogalu vznožja kakor v desnem spodnjem vogalu. To se odraža pri območju maksimalnih vrednostih horizontalnega pomika v smeri x , saj je pri elastični analizi na skrajno desnem robu, pri elastoplastični pa na skrajno levem robu svetlobne kupole.

Še najmanj vpliva ima območje plastifikacije na območje maksimalnih pomikov v smeri y , se pa pozna v vrednostih ta-istih pomikov (negativnih) na območju skrajnega spodnjega robu.



Slika 28: Plastične ekvivalentne deformacije

V nadaljnjih primerjavah bodo obravnavani samo rezultati elastoplastične analize.

5 PRIMERJAVA REZULTATOV SIMULACIJE Z MERITVAMI

S primerjavo rezultatov preizkusa in numerične simulacije nas je zanimalo predvsem, ali nam je z numerično analizo uspelo verodostojno simulirati preizkus. Ker smo s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije pridobili polje pomikov za vsako smer posebej, lahko najprej primerjamo diagrame pomikov, pozicijo in vrednosti maksimalnih pomikov pri preizkusu in numerični analizi po komponentah.

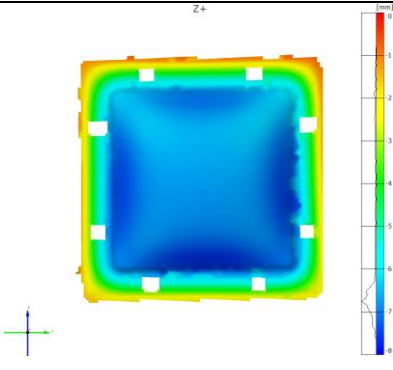
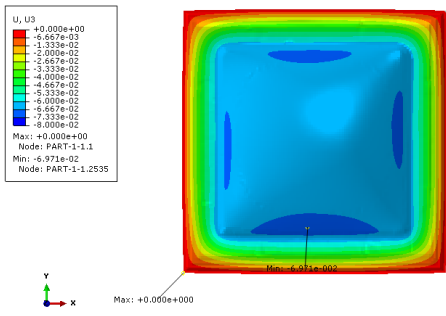
Da lahko rezultate preizkusa in numerične simulacije primerjamo, je potrebno področje primerjave in barvne skale med obema načinoma pridobivanja rezultatov uskladiti. Področje rezultatov, ki smo jih pridobili s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije, ne zajema območja skrajnega robu. Iz numerične analize zato izpišemo le področje brez robu in z enako barvno skalo kot pri izpisu rezultatov meritev.

5.1 Grafična primerjava diagramov pomikov po komponentah

➤ Vertikalni pomiki

V preglednici 6 so prikazani navpični pomiki v smeri z, ki so bili pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije in izračunani z numerično analizo v Abaqusu.

Preglednica 6: Primerjava navpičnih pomikov

Način pridobivanja rezultatov	Diagrami pomikov	Maksimalne vrednosti pomika
Digitalna bližnj slikovna fotogrametrija		-7,517 mm
Numerična analiza		-6,971 mm

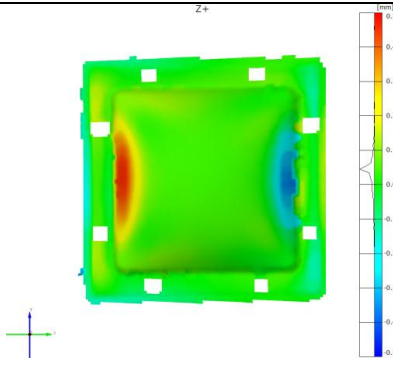
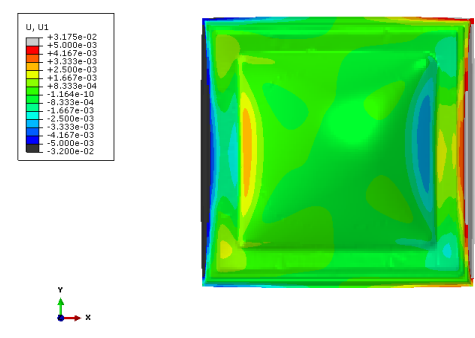
Iz preglednice 6 lahko vidimo podobno razporeditev navpičnih pomikov za oba načina pridobivanja rezultatov. V obeh primerih pomiki niso popolnoma simetrični glede na navidezne simetrijske osi svetlobne kupole.

Po pridobitvi meritev preizkusa smo ugotovili, da je nesimetričnost lahko posledica nesimetričnosti geometrije ali nehomogenosti materiala. Po opravljeni numerični analizi z realno geometrijo lahko sklepamo, da so nesimetrični pomiki v večji meri posledica nesimetrične geometrije, razlika v vrednosti pomikov pa je lahko nastala zaradi predpostavke o področjih z enako debelino in s tem neupoštevanja realne debeline svetlobne kupole v vsaki točki. Kljub temu ocenjujemo, da je ujemanje tako po razporeditvi kakor tudi po vrednosti ustrezno, saj je razlika v maksimalnih pomikih le 0,546 mm oziroma 7,26 % izmerjene vrednosti.

➤ **Horizontalni pomiki v smeri x**

V preglednici 7 so primerjani razporeditev in vrednosti horizontalnih pomikov v smeri x za rezultate, dobljene s tehnologijo bližnjefotogrametrije in numerične analize.

Preglednica 7: Primerjava horizontalnih pomikov v smeri x

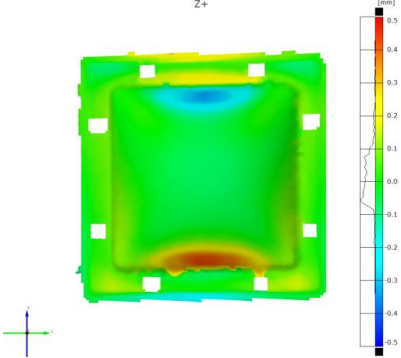
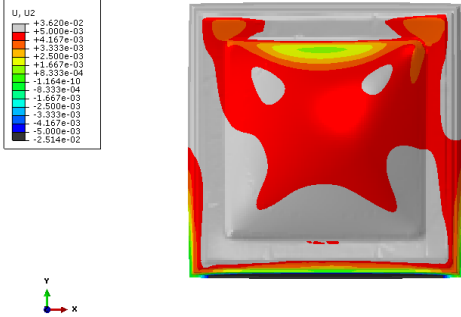
Način pridobivanja rezultatov	Diagrami pomikov	Maksimalne vrednosti pomika
Digitalna bližnjefotogrametrija		-0,490 mm
Numerična analiza		-0,405 mm

Pri primerjavi horizontalnih pomikov v smeri x pridobljenih s tehnologijo bližnjefotogrametrije in numerično analizo brez prikazanih rezultatov za skrajni rob ugotovimo, da je ujemanje razporeditve in vrednosti pomikov ustrezno. Razlika v maksimalnih pomikih je 0,085 mm, kar je 17,35 % izmerjene vrednosti.

➤ **Horizontalni pomiki v smeri y**

V preglednici 8 so prikazani rezultati horizontalnih pomikov v smeri y za oba načina pridobivanja rezultatov.

Preglednica 8: Primerjava horizontalnih pomikov v smeri y

Način pridobivanja rezultatov	Diagrami pomikov	Maksimalne vrednosti pomika
Digitalna bližnjeliskovna fotogrametrija		0,870 mm
Numerična analiza		0,945 mm

Pri primerjavi horizontalnih pomikov v smeri y smo ugotovili, da pride do večjih razlik, ki so posledica predpostavljenega podpiranja. Zaradi načina predpostavljenega podpiranja so vrednosti pomikov v smeri y po večjem delu svetlobne kupole pozitivnega predznaka, razen na skrajnem spodnjem robu. Ker je barvna skala privzeta iz rezultatov meritev, je zato del svetlobne kupole, kjer pomiki v smeri y presegajo vrednosti iz barvne skale, obarvan sivo.

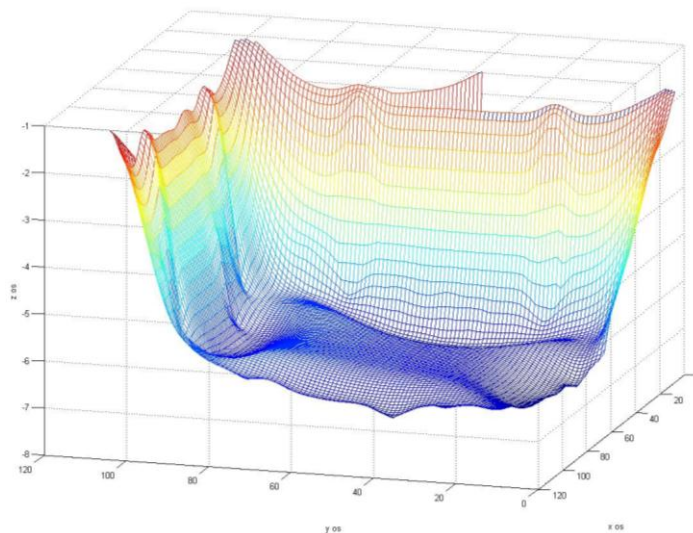
5.2 Grafična primerjava razlik pomikov po komponentah

Poleg primerjave razporeditve, vrednosti in pozicije pomikov iz diagramov, smo izračunali tudi razlike med pomiki pridobljenimi s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije in numerično analizo, ter jih prikazali s prostorskimi grafi.

Vrednosti pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije, so tako kot prostorske koordinate podane v obliki množice točk. Vrednosti pomikov smo zato najprej interpolirali in izpisali vrednosti pomikov nad mrežo, ki ustreza mreži končnih elementov iz numerične analize. Poenotenje mrež je nujno za pravilen izračun razlik pomikov svetlobne kupole.

➤ Vertikalne razlike pomikov

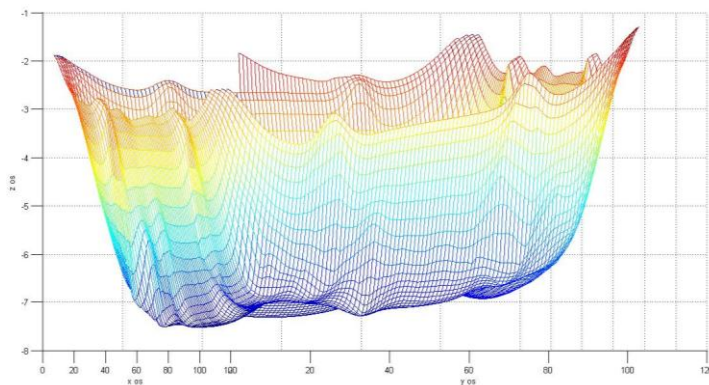
Na sliki 29 je prikazana mreža navpičnih pomikov, pridobljena s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije.



Slika 29: Navpični pomiki (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije

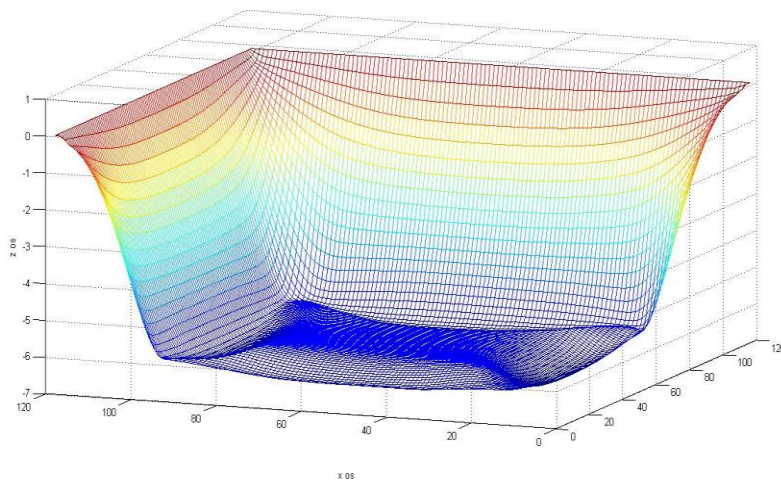
Tako kot nam prikazuje izpis rezultatov meritev, se v prostorski predstavitvi pomikov lahko vidi, da so na eni stranici vznožja svetlobne kupole pomiki veliko večji kakor na nasprotni, medtem ko so vrednosti na stranici vznožja svetlobne kupole vzporedni osi y podobne. Pomiki v notranjosti kupole so manjši, vendar še vedno naraščajoči v smeri manjšanja koordinate y .

Tudi pomiki na robovih merjenega področja se na posameznih stranicah močno razlikujejo, kar je razvidno iz slike 30.

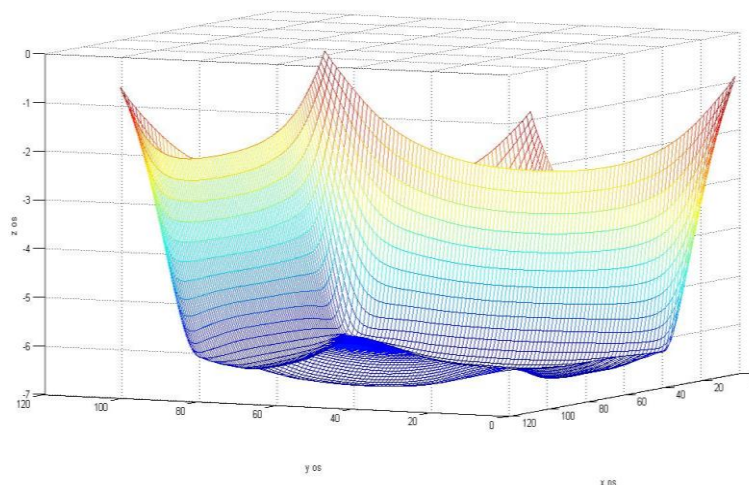


Slika 30: Navpični pomiki (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnj slikovne fotogrametrije

Navpični pomiki iz numerične simulacije so prikazani na sliki 31. Da bi rezultate lahko primerjali, moramo področje rezultatov iz numerične analize zmanjšati na področje rezultatov pridobljenih z digitalno bližnj slikovno fotogrametrijo. Vrednosti pomikov brez upoštevanja robu, so prikazane na sliki 32.



Slika 31: Navpični pomiki (v mm) iz numerične analize

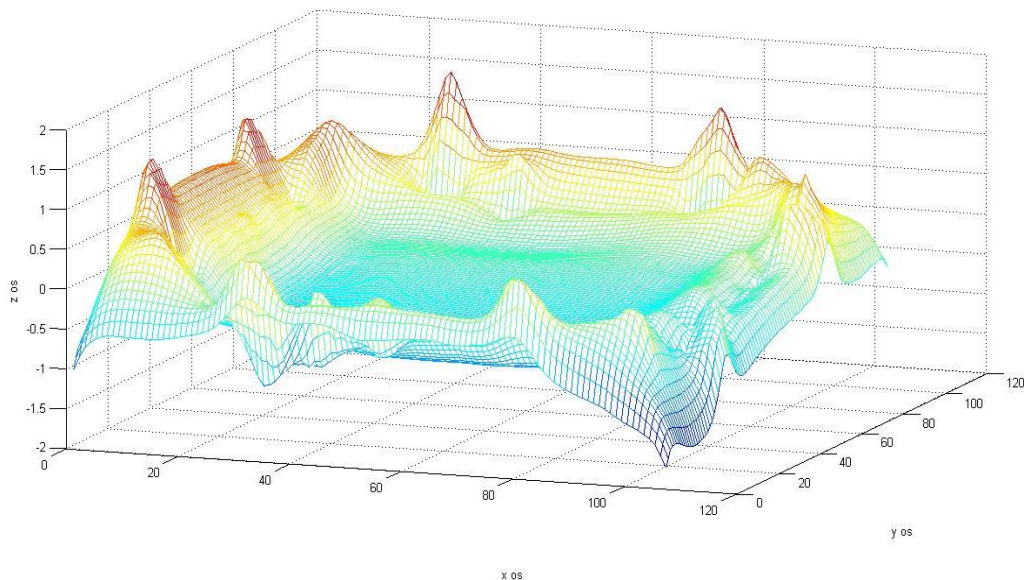


Slika 32: Navpični pomiki (v mm) iz numerične analize brez roba

Tudi pri pomikih pridobljenih z numerično analizo, so na eni stranici ob vznožju svetlobne kupole pomiki večji kakor na drugih stranicah, čeprav razlika ni tako očitna kakor pri rezultatih meritev. Prav tako se pomiki v notranjosti svetlobne kupole ne povečujejo tako izrazito proti področju maksimalnih pomikov, kakor pri meritvah preizkusa.

Za prikaz razlike navpičnih pomikov smo navpične pomike numerične analize odšteli od navpičnih pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije. Razlika je prikazana na sliki 33.

Največje pozitivne razlike se pojavljajo na območju vijakov, saj vrednosti pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjleslikovne fotogrametrije za to področje ni. Vrednosti pozitivnih razlik pomikov so razen v skokih na območju vijakov manjše od 0,7 mm.



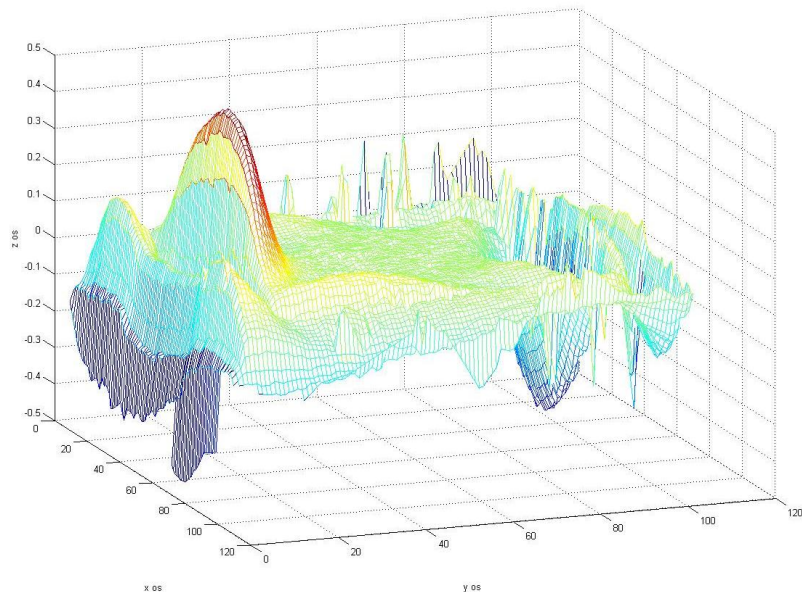
Slika 33: Razlika (v mm) navpičnih pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjefotogrametrije in numerično analizo

Največje odstopanje se pojavlja na robu merilnega območja. Delno je zato kriva dana geometrija svetlobne kupole, ki ima na robovih velik naklon, kar otežuje kameram natančno merjenje. Dodatno pa lahko opazimo, da vrednosti pomikov pridobljenih s tehnologijo bližnjefotogrametrije po celotnem območju merjenja absolutno gledano naraščajo v smeri področja maksimalnih navpičnih pomikov, medtem ko pri numerični analizi ta pojav ni tako očiten.

Razlike pomikov so v notranjosti kupole manjše, odstopanja so v večini manjša od 0,4 mm, le na območju maksimalnih pomikov ob vznožju svetlobne kupole vrednosti razlik pomikov dosežejo 0,7 mm.

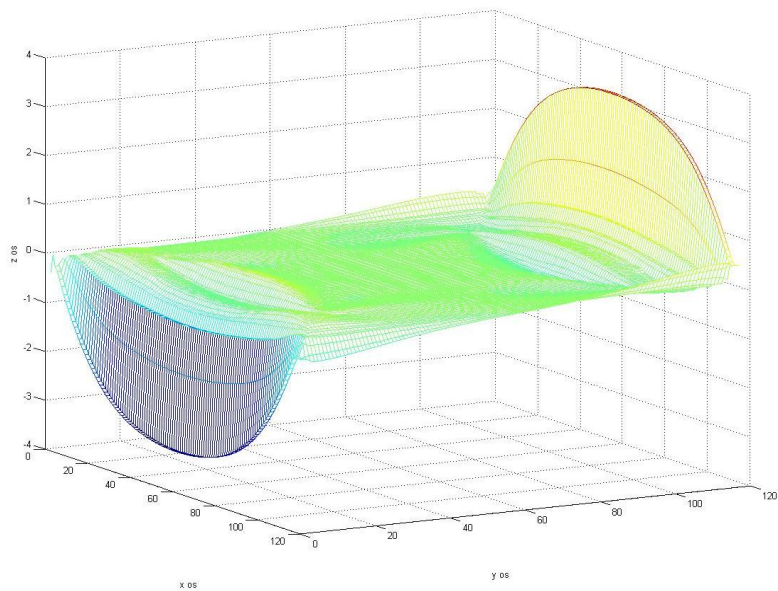
➤ **Horizontalne razlike pomikov v smeri x**

Na sliki 34 so prikazane vrednosti horizontalnih pomikov v smeri x iz rezultatov meritev. Pomiki so približno nasprotno simetrični, pojavlja pa se kar nekaj skokov na območju vznožja svetlobne kupole, ob vijakih in na skrajnem robu merjenega področja.

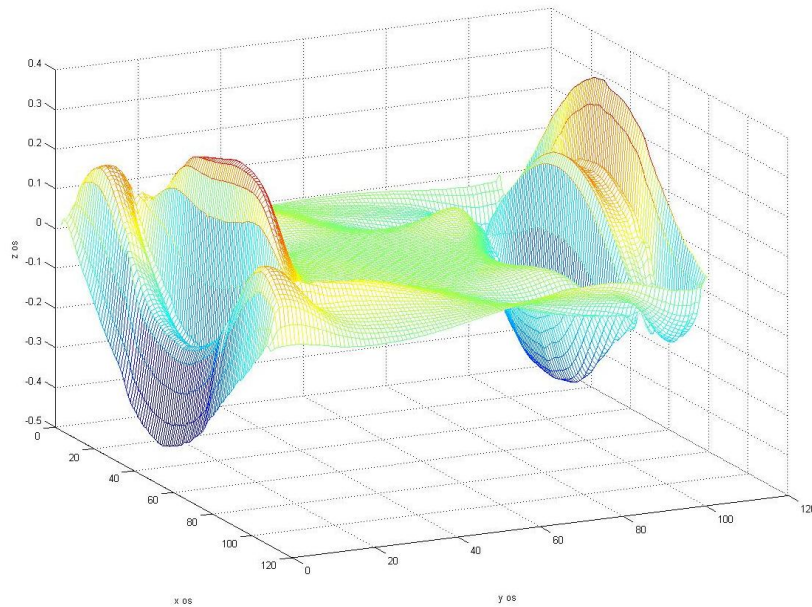


Slika 34: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjelikovne fotogrametrije

Horizontalni pomiki v smeri x iz numerične analize so prikazani na sliki 35. Da bi pomike lahko primerjali, je potrebno področje primerjave izenačiti s področjem meritev digitalne bližnjelikovne fotogrametrije, kar je prikazano na sliki 36.

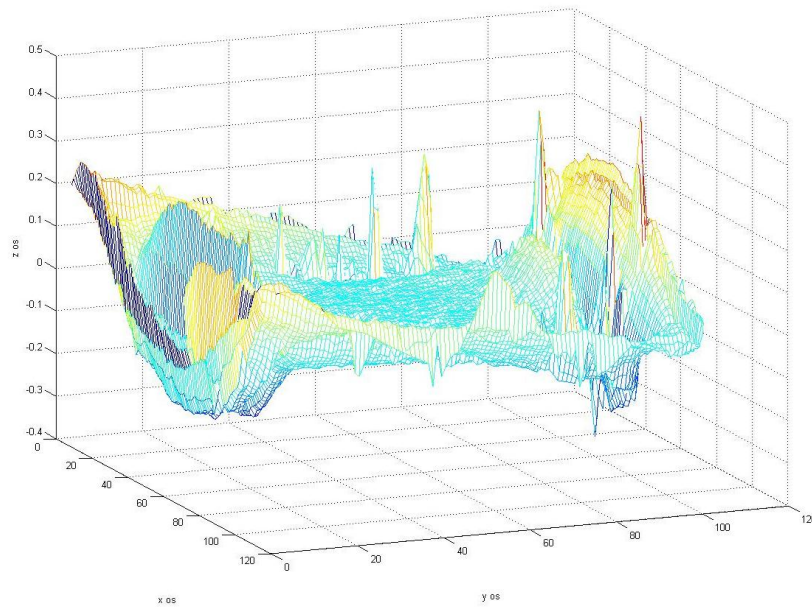


Slika 35: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni z numerično analizo



Slika 36: Horizontalni pomiki v smeri x (v mm) pridobljeni z numerično analizo brez roba

Da bi vrednosti lažje primerjali, naredimo še graf razlik pomikov, ki je prikazan na sliki 37.



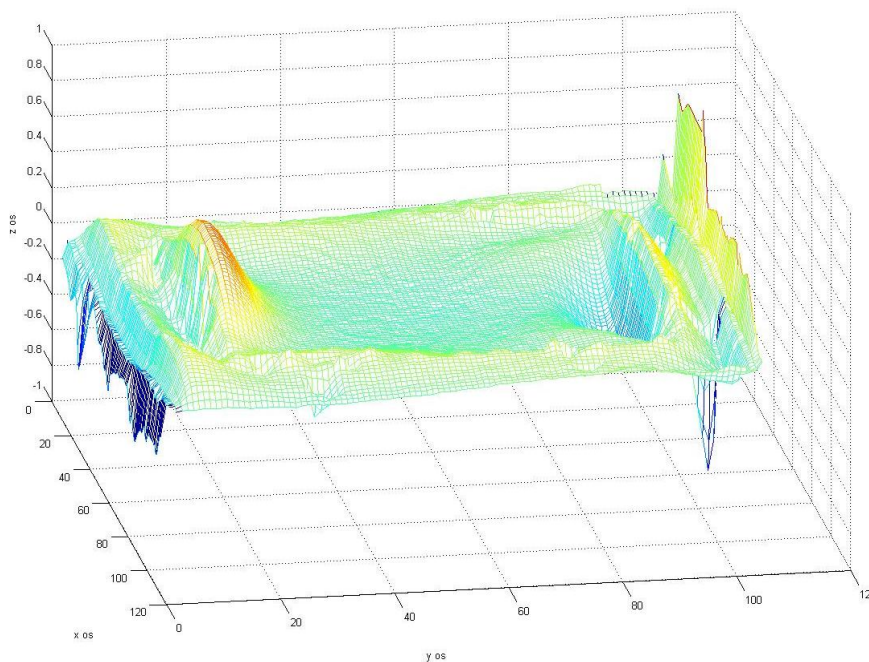
Slika 37: Razlika pomikov (v mm) pridobljenih s tehnologijo bližnjeliskovne fotogrametrije in numerično analizo

Največje razlike se pojavljajo na obrobem območju meritvenega področja in na vznožju svetlobne kupole. To je tudi področje največjega naklona geometrije. Skoki na območju vznožja svetlobne kupole in vijakov so posledica skokov vrednosti rezultatov meritev na vznožju in nezajetja območja vijakov z digitalno bližnjelikovno fotogrametrijo. V notranjosti in ob vznožju svetlobne kupole vzporedno osi y pa je ujemanje odlično.

Večina vrednosti razlik pomikov ne preseže 0,1mm, medtem ko na področjih maksimalnih razlik vrednosti ne presegajo 0,2 mm.

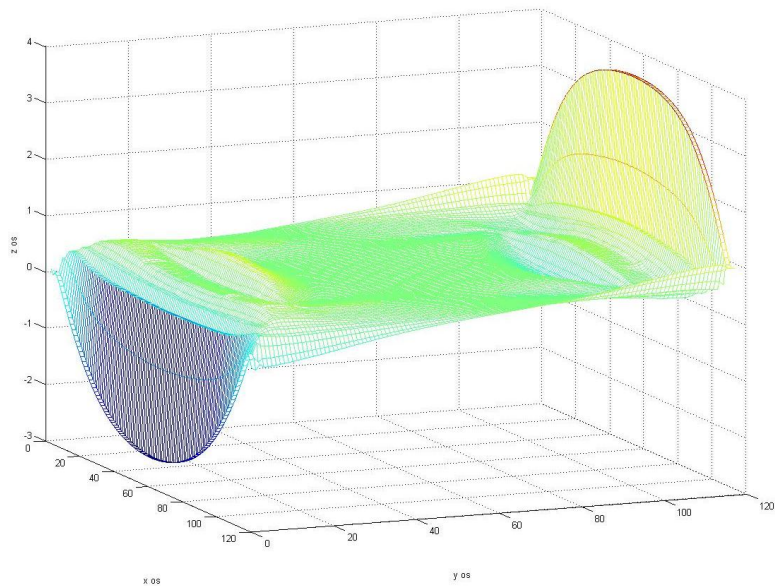
➤ Horizontalne razlike pomikov v smeri y

Na sliki 38 so prikazane vrednosti in razporeditev horizontalnih pomikov v smeri y , ki so pridobljeni s tehnologijo bližnjelikovne fotogrametrije. Opazimo lahko večje povečanje pomikov na obrobju meritvenega območja, ki nakazuje povečanje pomikov proti robu svetlobne kupole. Z razliko od prostorknega grafa za horizontalne pomike v smeri x , se pri izpisu rezultatov preizkusa za horizontalne pomike v smeri y ne pojavljajo posamečni skoki. Razlika pa se pojavlja tudi v razporeditvi pomikov, saj je odstopanje od simetričnosti večje, kakor pri horizontalnih pomikih v smeri x .

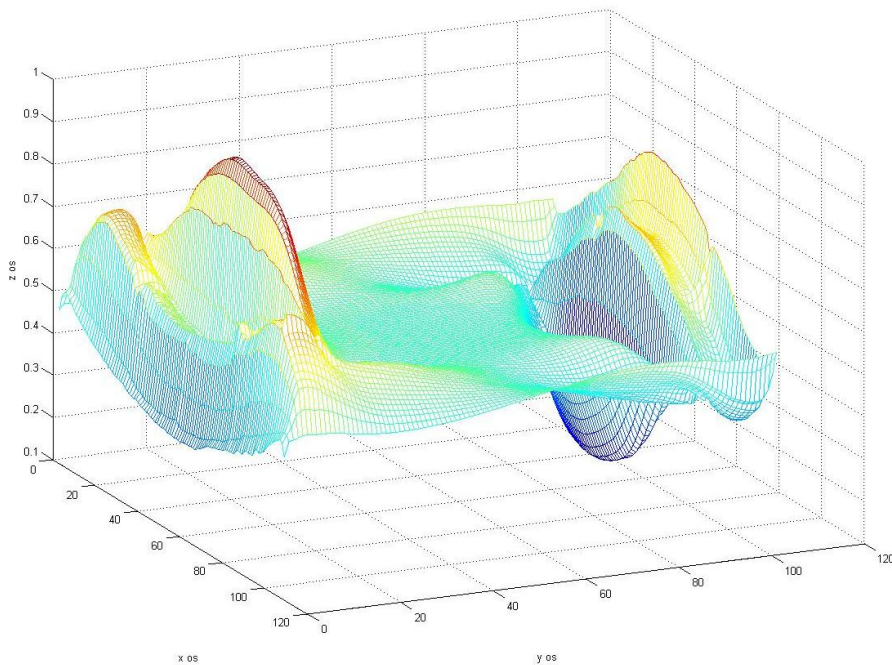


Slika 38: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni s tehnologijo bližnjelikovne fotogrametrije

Na sliki 39 in 40 sta prikazana prostorska grafa za horizontalne pomike v smeri y iz numerične analize, s tem da so na sliki 40 prikazani rezultati horizontalnih pomikov v smeri y brez prikazanega roba.



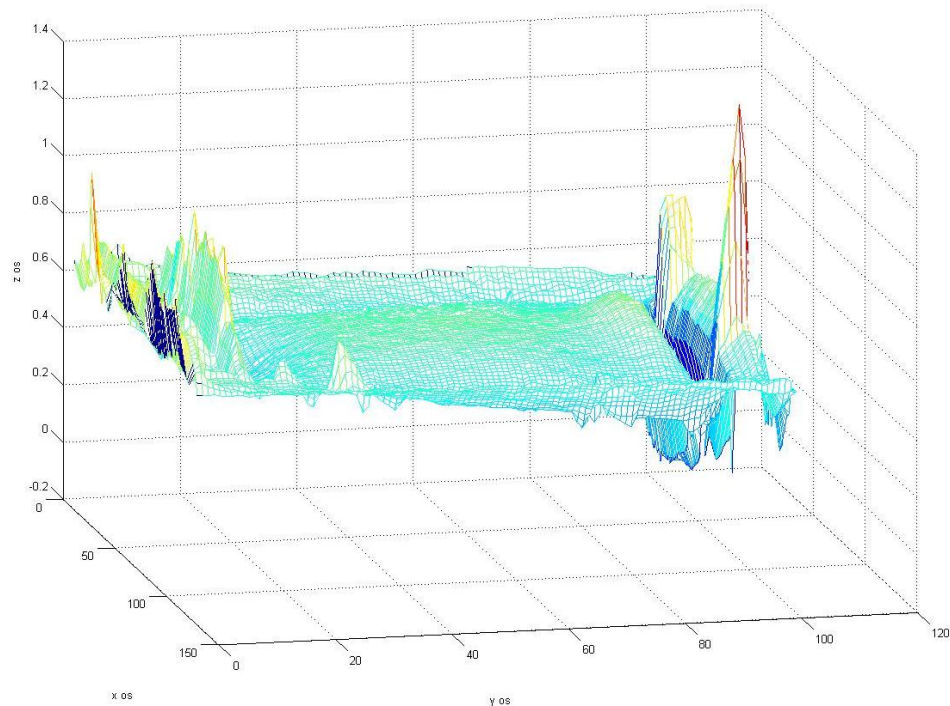
Slika 39: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni z numerično analizo



Slika 40: Horizontalni pomiki v smeri y (v mm) pridobljeni z numerično analizo brez roba

Takoj lahko opazimo, da grafa na slikah 39 in 40 nista simetrična. Vzrok leži v predpostavljenem načinu podpiranja, ki preprečuje horizontalna pomika v smeri x in y v dveh točkah na skrajnem robu vzporednem osi x . Vpiv se odraža v nesimetričnosti in pretežno pozitivnih vrednostih pomikov v smeri y .

Na sliki 41 so prikazane vrednosti razlik pomikov med rezultati za digitalno bližnjeliskovno fotogrametrijo in numerično analizo. Razlike so večje kot pri izračunu razlik pomikov v smeri z in x . Razlog je v načinu podpiranja v numerični analizi, pomankljivih meritvah na področju vznožja svetlobne kupole zaradi velikega naklona geometrije in nezajetja pomikov na področju vijakov pri merjenju preizkusa.



Slika 41: Razlike pomikov (v mm) pridobljenih s tehnologijo bližnjeliskovne fotogrametrije in numerično analizo

Na področjih maksimalnih skokov vrednosti razlik presegajo 1 mm, medtem ko so vrednosti na obrobju merjenega področja v večini manjše od 0,6 mm. V notranjosti, kjer je odstopanje najmanjše, pa razlike pomikov ne presegajo 0,3 mm.

6 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem tekom preučevanja teoretičnega ozadja, splošnih aplikacij, izvedbe preizkusa, izdelovanja geometrijskega modela in numerične analize, obdelave rezultatov ter primerjave rezultatov spoznala nekaj o digitalni bližnjelikovni fotogrametriji in jo uporabila pri reševanju gradbeniškega problema.

Pri izvedbi preizkusa je bila očitna prednost uporabe tehnologije bližnjelikovne fotogrametrije v pridobitvi polja rezultatov za celotno območje merjenja. S tem smo se izognili predhodnemu razmisleku, kje ter v kateri smeri lahko pričakujemo največje pomike, kar bi morali narediti pri uporabi standardnih merilnih pripomočkov. Je pa pri načrtovanju in pripravi preizkusa potrebno vedeti, kakšni so principi zajemanja rezultatov, kaj želimo pri preizkusu meriti in kako deluje oprema.

V literaturi lahko zasledimo, da lahko uporabimo tehnologijo bližnjelikovne fotogrametrije za pridobitev natančne digitalne rekonstrukcije objekta, kar je še posebej uporabno in nam prihrani ogromno časa, če potrebujemo realno geometrijo za numerično analizo ali pa je objekt zahtevnejše oblike, ki je težje analitično opisljiva. Z izvedbo preizkusa na svetlobni kupoli, ki ima sicer enostavno, ampak težje analitično opisljivo geometrijo, smo ugotovili, da so posebno problematični veliki skoki v geometriji, ki jih kameri težko zaznata. Zato je še posebej pomembno, da je območje, ki ga želimo meriti, dobro vidno za obe kameri. Pri tem je potrebno upoštevati vse parametre nastavitvev kamer glede na razpoložljivo opremo, željene meritve, merski volumen in obliko preizkušanca.

Po uspešno opravljenih meritvah je na voljo veliko možnosti grafične predstavitve rezultatov. Na voljo je pregled rezultatov za poljubno zajeto točko v poljubni fazi preizkusa, izris grafov, slik, ustvarimo pa lahko tudi film. Vse to pripomore k boljšemu razumevanju obnašanja preizkušanca med preizkusom in lažji predstavitvi rezultatov drugim. Za nadaljnjo analizo rezultatov v drugih računalniških programih pa je omogočen enostaven izvoz podatkov.

Na tržišču je dostopno veliko proizvajalcev in sistemov, s katerimi lahko izvajamo tovrstne meritve. Razlikujejo se predvsem po stopnji avtomatizacije zajemanja in obdelave rezultatov, potrebnega znanja in izkušenj upravljalca sistema, razpoložljive opreme, ki nudi različno natančnost. Sistem ARAMIS 5M, ki je bil uporabljen za meritve svetlobne kupole, je natančen, hiter in ima visoko stopnjo avtomatizacije. Čas

priprave opreme je majhen, uporabniku prijazen vmesnik v programski opremi pa omogoča tudi manjveščemu uporabniku kvalitetne meritve. Taki sistemi so običajno dragi, se je pa v zadnjih letih pojavilo kar nekaj cenejših alternativ, s katerimi lahko za merjenje uporabljamo že kvalitetnejše zrcalno refleksne fotoaparate. Programska oprema je brezplačno dostopna na internetu, seveda pa je kvaliteta in natančnost meritev manjša.

Po končanem preizkusu smo koordinate nedeformirane svetlobne kupole uporabili za izdelavo mreže končnih elementov v Abaqusu. Prenos podatkov v poljuben program je relativno enostaven, potrebujemo namreč le nekaj računalniškega znanja in inženirskih spretnosti za obdelavo velikega števila podatkov ter njihovo ustrezno pripravo.

S primerjavo rezultatov, pridobljenih s tehnologijo bližeslikovne fotogrametrije in numerično analizo, smo ugotovili, da smo z upoštevanjem realne geometrije v numeričnem modelu dobro simulirali preizkus. Rezultati bi se lahko še bolj ujemali, če bi z enako natančnostjo simulirali vse vhodne podatke, ne samo geometrijo. Odstopanja se tako pojavljajo predvsem zaradi predpostavke o povprečni debelini materiala na določenih področjih, zanemarili smo tudi vpiv pritrditvenih vijakov svetlobne kupole in poenostavili pogoje podpiranja.

VIRI

ABAQUS/CEA User's Manual. Version 6.5. 2004: 805 str.

<http://hikwww2.fzk.de/hik/orga/hlr/AIX/software/abaqus/pdf65/CAE.pdf> (Pridobljeno 15. 11. 2011.)

Abaqus FEA. 2011.

http://www.simulia.com/products/abaqus_fea.html (Pridobljeno 15. 11. 2011.)

Abaqus Theory Manual. Version 6.4. 2003: 983 str.

<http://hikwww2.fzk.de/hik/orga/hlr/AIX/software/abaqus/pdfs/docv64abathe.pdf> (Pridobljeno 8. 12. 2011.)

Akripol. 2011.

<http://www.akripol.si/si/proizvodi/alux/trakovi/akril/materiali/> (Pridobljeno 26. 10. 2011.)

Albertz, J., Wiedemann, A. 2011. From Analogue to Digital Close-range Photogrammetry: 9 str.

http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=from%20analog%20to%20digital%20close%20range%20photogrammetry&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.26.7604%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ei=bFb_Tsf8Ockawbk-8WtAQ&usg=AFQjCNEkEmHbtEmBbv_r2HGzGK_Vz7KzGw&cad=rja (Pridobljeno 9. 11. 2011.)

Arca, D. 2007. Least Squares 3D Surface Matching. Doktorska dezertacija. Swiss Federal Institute of Technology Zurich (samozaložba D. Arca): 78 str.

http://perso.ensg.ign.fr/mambap-fokouong/cours_lidar/doc_biblio/articles/georef/92.pdf (Pridobljeno 24. 12. 2011.)

Huges, T. J. R 2000. The Finite Element Method. Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. New York, Dover Publications, Inc.: 682 str.

Bräger, S., Chong, A. K. 1999. An Application of Close Range Photogrammetry in Dolphin Studies. Photogrammetric Record 16, 93: str. 503-517.

<http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=an%20application%20of%20close%20range%20photogrammetry%20in%20dolphin%20studies.%20&source=web&cd=1&ved=0CDEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fcite>

seerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.21.9065%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ei=dmP_TtGbKMaawbL2MS1AQ&usq=AFQjCNFMSzIpi2WFpVwijQFyllAtOr9vJA&cad=rja
(Pridobljeno 11. 11. 2011.)

Clarke, T.A., Fryer, J. F. 1998. The development of camera calibration methods and models. *Photogrammetric Record* 16, 91: str. 51-66.

http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/papers/DevelopmentCameraCalibrationMethodsModels.pdf (Pridobljeno 5. 12. 2011.)

Cook, R. D. 1995. *Finite element modeling for stress analysis*. New York idr., John Wiley & Sons, Inc.: 336 str.

Dazhao, F., Rong, L., Song, J. 2008. Least Square Matching Model AMMGC-LSM for Multi-line-array Digital Images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*. Volume XXXVII. Part B1: str. 795-798.

http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/137.pdf (Pridobljeno 28. 11. 2011.)

Gorski, F., Kuzcko, W., Wichniarek, R., Zawadski, P. 2010. Application of Close-range Photogrammetry in Reverse Engineering. V: *Industrial Engineering: proceedings in 7th International DAAAM Baltic Conference in Tallinn, Estonia, April 22-24, 2010*: 6 str.

<http://innomet.ttu.ee/daaam10/proceedings/PDF/gorski.pdf> (Pridobljeno 9. 11. 2011.)

Gruen, A., Arca, D. 2005. Least squares 3D surface and curve matching. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 59: str. 151-174.

http://www.geod.ethz.ch/p02/general/persons/devrim/2005_ls3d_isprsj59_3.pdf (Pridobljeno 28. 11. 2011.)

Hampel, U., Maas, H. G. 2003. Application of Digital Photogrammetry for Measuring Deformation and Cracks During Load Test in Civil Engineering Material Testing: 8 str.

http://www.tu-dresden.de/ipf/photo/publikationen/2003/Hampel_Maas_Opt3D2003.pdf (Pridobljeno 25. 10. 2011.)

Klug, H. P. 2008. Digitalni priročnik za uporabo sistema ARAMIS: interni vir. Ljubljana, lastnik Zavod za gradbeništvo Slovenije.

Kraus, K., Harley, I. (prev.), Kyle, S. (prev.) 2004. Photogrammetry. Geometry from Images and Laser Scans. 2nd Edition. Brelina, New York, Walter de Gruyter: 459 str.

Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Harley I. 2006. Close Range Photogrammetry. Principles, techniques and applications. Scotland, Whittles Publishing: 510 str.

Mathworks. 2011.

<http://www.mathworks.com/help/techdoc/ref/triscatteredinterp.html> (Pridobljeno 24. 10. 2011.)

Tokarczyk, R., Tadeusz, M. 2006. Photogrammetry-principal of operation and application in rehabilitation. Medical Rehabilitation 10, 14: str. 30-39.

http://www.rehmed.pl/images/upload/pdf_en/2006/4_2006/Tokarczyk.pdf (Pridobljeno 11. 11. 2011.)

World of Forensic Science. 2011.

<http://www.enotes.com/photogrammetry-reference/photogrammetry> (Pridobljeno 9. 11. 2011.)