

Primjena fotogrametrijskog mjernog sustava kod ispitivanja alatnih strojeva

Javorić, Leonardo

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:060847>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-21**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Leonardo Javorić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. ing.

Student:

Leonardo Javorić

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru profesoru Tomislavu Staroveškom, asistentu Luki Drobilu te ostalim djelatnicima s katedre za alatne strojeve koji su mi uvelike pomogli pri izradi ovog završnog rada. Također veliko hvala kolegi Danijelu Ivšacu iz tvrtke Topomatika d.o.o. na pomoći i uloženom vremenu.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji koja mi je omogućila studiranje te me podržava na svakom koraku.

Leonardo Javorić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Leonardo Javorić**

JMBAG: **0035232691**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena fotogrametrijskog mjernog sustava kod ispitivanja alatnih strojeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of photogrammetric measurement system for machine tool testing**

Opis zadatka:

Fotogrametrijski mjerni sustavi u području strojarstva se najčešće koriste za beskontaktnu kontrolu dimenzija i oblika proizvoda, te za proučavanje deformacija konstrukcija pod opterećenjem. Međutim, isti se sustavi mogu potencijalno iskoristiti i kod provjere geometrijske točnosti i točnosti pozicioniranja alatnih strojeva.

Stoga je u radu potrebno:

1. Objasniti princip rada fotogrametrijskog mjernog sustava.
2. Primijeniti dostupni fotogrametrijski mjerni modul njemačkog proizvođača GOM za provjeru geometrijske točnosti i točnosti pozicioniranja numerički upravljanog alatnog stroja „ADRISS“, koji se nalazi u Laboratoriju za alatne strojeve.
3. Obraditi dobivene podatke primjenom softvera *GOM Inspect* i prokomentirati dobivene rezultate.
4. Donijeti zaključke rada.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

24. 4. 2024.

2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao:

izv. prof. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednik Povjerenstva:

prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY	VI
1 UVOD	1
2 FOTOGRAMetriJA	2
2.1 Kratka povijest fotogrametrije	2
2.2 Osnove fotogrametrije.....	3
3 MJERNI POSTAV I OPREMA	4
3.1 Alatni stroj ADRISS.....	4
3.2 Sustav TRITOP	5
3.2.1 Marker i kalibracijska oprema	6
3.2.2 Softver GOM Inspect	9
4 MJERENJE I OBRADA PODATAKA	10
4.1 Priprema ispitnog postava	10
4.2 Položaj ishodišta.....	12
4.3 Opis i postupak mjerenja.....	13
4.4 Dobivanje oblaka točaka	15
4.5 Obrada referentnog mjerenja.....	16
4.5.1 Definiranje komponenata i elemenata.....	17
4.5.2 Poravnanje.....	19
4.5.3 Točka za mjerenje	20
4.6 Obrada mjerenja	21
4.7 Obrada skupova točaka	22
5 ANALIZA	24
5.1 Udaljenost između točaka	24

5.2	Odstupanje točkaka od ravnina	26
5.2.1	Odstupanje od X ravnina.....	27
5.2.2	Odstupanje od Y ravnina.....	28
5.2.3	Odstupanja od Z ravnina	29
6	ZAKLJUČAK	30
	LITERATURA.....	31

POPIS SLIKA

Slika 2.1 Princip triangulacije, stereomodel [4]	3
Slika 3.1 Numerički upravljani alatni stroj ADRISS	4
Slika 3.2 3D model stroja ADRISS.....	5
Slika 3.3 TRITOP sustav.....	6
Slika 3.4 Neke vrste kodiranih markera [5]	7
Slika 3.5 Korišteni kodirani markeri	7
Slika 3.6 Različite veličine nekodiranih markera.....	8
Slika 3.7 Korištena mjerna letva	8
Slika 3.8 Kalibracijski križ.....	9
Slika 4.1 Ispitni postav u referentnoj poziciji - prednja strana.....	10
Slika 4.2 Ispitni postav u referentnoj poziciji – desna strana.....	10
Slika 4.3 Ispitni postav radne ploče	11
Slika 4.4 Ispitni postav prigona Z osi.....	11
Slika 4.5 Šiljak	12
Slika 4.6 Različite lokacije snimanja 1	14
Slika 4.7 Različite lokacije snimanja 2	14
Slika 4.8 Prikaz oblaka točaka ostvarenih mjerenjem.....	15
Slika 4.9 Prepoznavanje markera	16
Slika 4.10 Referentno mjerenje	16
Slika 4.11 Oblak točaka referentnog mjerenja	17
Slika 4.12 Komponente postava.....	18
Slika 4.13 Ravnine i linije definirane iz komponenti.....	18
Slika 4.14 Inicijalno poravnanje.....	19
Slika 4.15 Referentno mjerenje s poravnanjem	19
Slika 4.16 Točka za mjerenje na šiljku	20
Slika 4.17 Drugi pokušaj točke za mjerenje.....	20
Slika 4.18 Izabrana točka za mjerenja.....	21
Slika 4.19 Nominalne i mjerene točke	22
Slika 4.20 Ravnine, pravci i točke za poravnanja	22
Slika 4.21 Poravnanje skupova točaka	23
Slika 4.22 Konačni skup točaka	23
Slika 5.1 Ravnine iz povezanih točaka.....	26
Slika 5.2 Odstupanja točaka od ravnina X	27

Slika 5.3 Odstupanja točaka od ravnina Y	28
Slika 5.4 Odstupanja točaka od ravnina Z.....	29

POPIS TABLICA

Tablica 1 Odstupanja mjerenih od nominalnih točaka.....	24
---	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis
CAD	(Computer-Aided Design) – Oblikovanje pomoću računala
CNC	(Computer Numerical Control) – Računalno numeričko upravljanje
3D	(3 Dimensions) - trodimenzionalno
CSV	(Comma-separated values) – vrijednosti odvojene zarezima

SAŽETAK

Fotogrametrijski mjerni sustavi u strojarstvu koriste se za proučavanje deformacija dijelova pod opterećenjem i beskontaktnu kontrolu dimenzija i oblika proizvoda. U ovom radu se detaljnije obrađuje princip rada fotogrametrijskog mjernog sustava i provjerava se geometrijska točnost i točnost pozicioniranja alatnog stroja "ADRISS" koji se nalazi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Teorijski dio opisuje što je fotogrametrija, njezinu primjenu u strojarstvu i princip mjerenja. Prikazan je cijeli proces mjerenja, od postavljanja elemenata na stroj do analize rezultata u softveru "GOM Inspect". U zaključku su iznesena opažanja o točnosti pozicioniranja stroja te u kojem području stroj postiže najveću preciznost u radu.

Ključne riječi: fotogrametrija, mjerni sustavi, deformacije, beskontaktna kontrola, točnost pozicioniranja

SUMMARY

Photogrammetric measurement systems in engineering are used to study the deformation of parts under load and for non-contact control of product dimensions and shapes. This paper examines the working principle of the photogrammetric measurement system in more detail and verifies the geometric accuracy and positioning accuracy of the "ADRISS" machine tool located at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture. The theoretical section provides an explanation of what photogrammetry is and the measurement principle. The entire measurement process is presented, from setting up elements on machine to analyzing results in the "GOM Inspect" software, with the goal of determining the machine's precision and potential deviations. In conclusion, observations were made regarding the accuracy of the machine's positioning and the area in which the machine achieves the highest precision in operation.

Keywords: photogrammetry, measurement systems, deformations, non-contact control, positioning accuracy

1 UVOD

U modernoj industriji, fotogrametrijski sustavi našli su široku primjenu u različitim područjima, među kojima je i ispitivanje na alatnim strojevima. Alatni strojevi, kao ključna oprema u proizvodnim procesima, zahtijevaju visoku razinu preciznosti kako bi osigurali kvalitetu proizvoda. Korištenjem fotogrametrije moguće je analizirati geometrijske karakteristike strojeva te identificirati njihova odstupanja.

Ovaj rad objašnjava pojam fotogrametrije i njezin princip rada. Cilj je ispitati geometrijsku točnost i točnost pozicioniranja numerički upravljano alata "ADRISS", koji se nalazi u laboratoriju za alatne strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Za tu svrhu u ovom radu koristi se fotogrametrijski sustav TRITOP od njemačkog proizvođača GOM.

Prvi, teorijski dio rada, podijeljen u dvije cjeline. U drugom poglavlju opisano je što je fotogrametrija, princip rada fotogrametrijskog sustava te područja njihove primjene u industriji. Zatim je u trećem poglavlju prikazan i objašnjen ispitni postav na alatnom stroju „ADRISS“ na kojem se ovaj rad izvodio, te elementi i oprema korištena za mjerenje i analizu, a posebno sustav TRITOP.

Drugi dio rada, onaj eksperimentalni, fokusira se na mjerenje i analizu. U četvrtoj cjelini je prikazan cijeli proces postavljanja elemenata i markera za mjerenje na stroju kod pripreme ispitnog postava. Prikazan je i opisan proces izvođenja samog mjerenja i obrade podataka. U drugom dijelu eksperimentalnog postupka, odnosno petoj cjelini fokus je na analizi podataka koji su dobiveni mjerenjem te na usporedbi izmjerenih vrijednosti sa teorijskim vrijednostima elemenata koji se razmatraju. Cilj je utvrditi točnost stroja i potencijalna odstupanja koja bi mogla utjecati na njegovu preciznost u radu.

2 FOTOGRAMetriJA

Fotogrametrija je znanost i tehnika koja se bavi određivanjem točnih mjera i informacija o objektima putem fotografskih snimaka. Taj proces se temelji na geometrijskim i optičkim zakonima te računalnoj obradi slikovnih podataka koji omogućuju djelomičnu ili potpunu rekonstrukciju snimljenih objekata iz fotografija. Osnovna ideja fotogrametrije je da se iz niza slika (fotografija) ostvare trodimenzionalni podaci, poput dimenzija, oblika i položaja objekta.

Kada se koristi jedna fotografija, moguće je odrediti dvodimenzionalna svojstva objekta, što omogućuje potpunu rekonstrukciju relativno ravnih objekata kao što su zemljišta ili pročelja zgrada. Za trodimenzionalnu rekonstrukciju, odnosno za detaljno prikazivanje prostornog objekta, potrebno je snimiti najmanje dvije fotografije iz različitih kutova, što se naziva stereopar [1].

2.1 Kratka povijest fotogrametrije

Osnove o fotogrametriji kao tehnici datiraju još iz 15. stoljeća, točnije oko 1480. godine, kada je Leonardo da Vinci provodio istraživanja o perspektivi u kojima je proučavao kako trodimenzionalni prostor prikazati na dvodimenzionalnoj površini. Kasnije, godine 1851. francuski izumitelj Aimé Laussedat je prepoznao mogućnost korištenja tada novootkrivene kamere u kartografske svrhe. Tek se je 1867. godine prvi put upotrijebio termin „fotogrametrija“ u članku „Die Photometrophie“ od pruskog arhitekta Albrechta Meydenbauera čime je formaliziran naziv za ovu tehniku. Iako je koncept fotogrametrije bio prepoznat stoljećima, njezin puni potencijal nije dugo bio u potpunosti realiziran sve do nekih desetak godina prije Prvog svjetskog rata kada se primarno počela primjenjivati u vojne svrhe za snimanja iz zraka te je postala glavna metoda za izradu karata i prikupljanje obavještajnih podataka sve do kraja Drugog svjetskog rata. Nakon rata je njezina primjena u kartografiji još uvijek ostala, pogotovo na teško dostupnim područjima. Korištena je i za snimanje fotografija s kamerama na tlu u svrhu raspoznavanja reljefa zemlje što je kasnije nazvano „terestrička fotogrametrija“ [2].

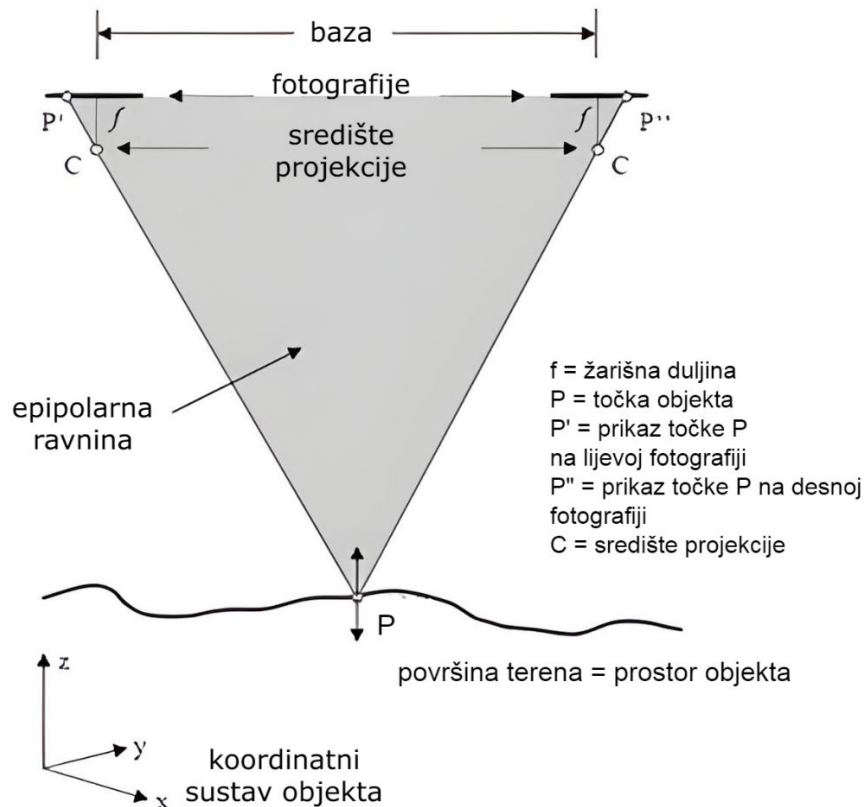
U 20. stoljeću, tzv. „Svemirska utrka“ donijela je revolucionarnu tehnologiju, uključujući satelite te je zbog toga fotogrametrija bila ključni dio u istraživanjima svemira u 60-ima i kasnije, s tehnološkim napretkom koji ju je učinio još relevantnijom [2].

Daljnijim razvojem i ulaganjem u tehnologiju, prelaskom s analognog na digitalni način obrade fotografija i podataka, razvojem računalne tehnologije i digitalnih kamera u kratko vrijeme je došlo do velikog napretka te se danas fotogrametrija koristi u širokom spektru industrije, u raznim disciplinama i istraživanjima.

2.2 Osnove fotogrametrije

Osnovno načelo u fotogrametriji je **triangulacija**. Kada se objekt fotografira iz najmanje dvije različite pozicije, mogu se povući linije pogleda od svake kamere prema točkama od interesa na objektu. Te linije se zatim, zbog prirode svjetlosnih zraka, presijecaju i omogućuju izračunavanje 3D koordinata tih točaka na objektu u koordinatnim sustavima korištenih kamera [3].

Sljedeća slika prikazuje princip triangulacije (Slika 2.1).



Slika 2.1 Princip triangulacije, stereomodel [4]

Svaka točka na razmatranom objektu mora biti predstavljena na barem dvije fotografije. Ako su poznati ili se mogu rekonstruirati svi geometrijski parametri u trenutku snimanja fotografija, tada je moguće izračunati trodimenzionalne koordinate (x, y, z) točke P postavljanjem jednadžbi zraka $[P' \rightarrow P]$ i $[P'' \rightarrow P]$, i zatim izračunom njihova sjecišta.

Može se reći da je glavna zadaća fotogrametrije pronaći sjecište dviju zraka u prostoru. Ukoliko se to postigne uz prethodno proveden kalibracijski postupak kamera, moguće je digitalizirati točke, linije i površine za izradu modela ili dobiti neke druge značajke od interesa [4].

3 MJERNI POSTAV I OPREMA

U ovome poglavlju su navedeni i ukratko objašnjeni elementi ispitnog postava na alatnom stroju „ADRISS“ i oprema koja se koristila pri izvođenju mjerenja.

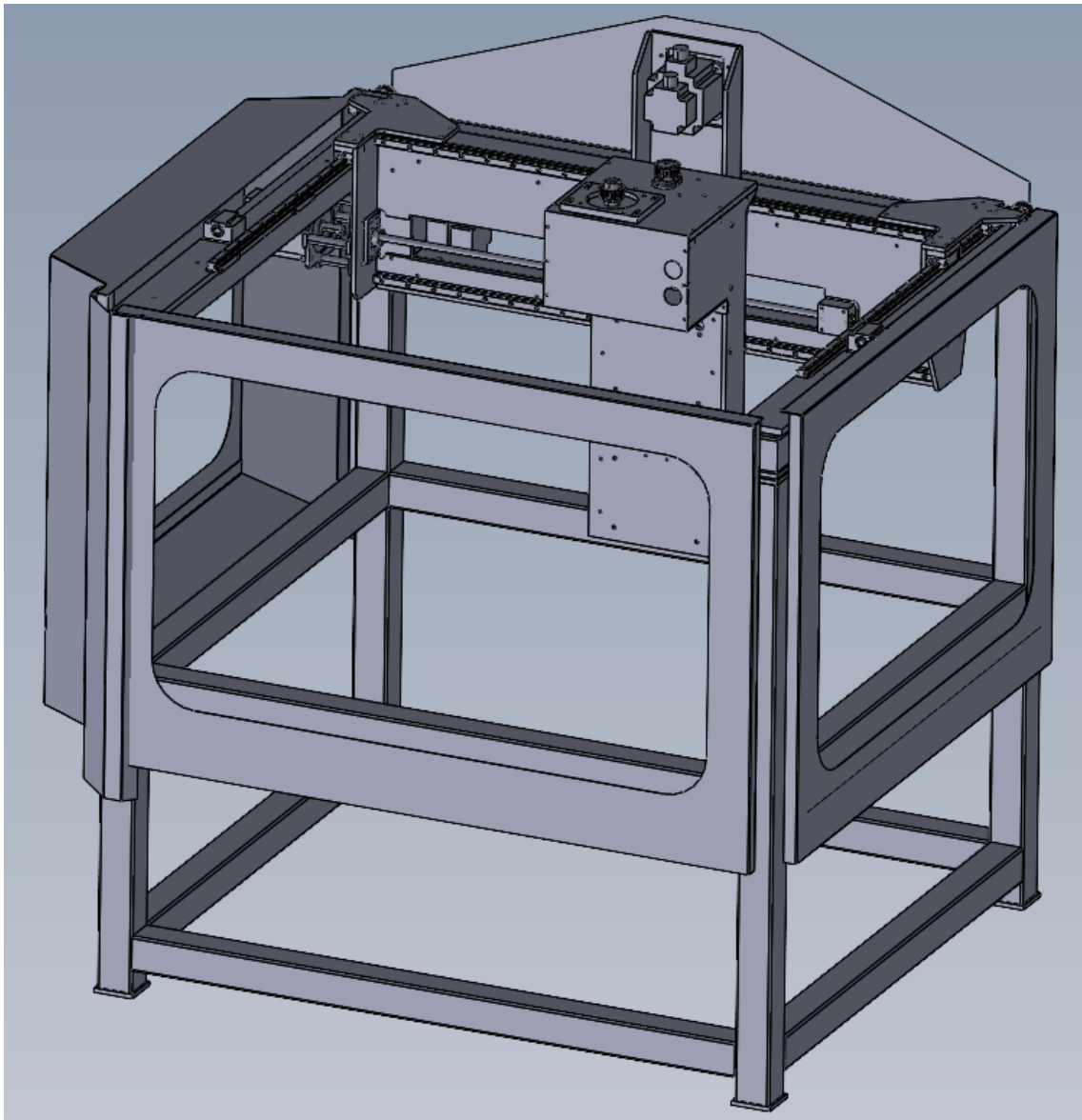
3.1 Alatni stroj ADRISS

Na slici 3.1 može se vidjeti numerički upravljani alatni stroj „ADRISS“.



Slika 3.1 Numerički upravljani alatni stroj ADRISS

Konstrukcija predmetnog stroja zasnovana je na čeličnim cijevima. 3D model stroja prikazan je na slici 3.2.

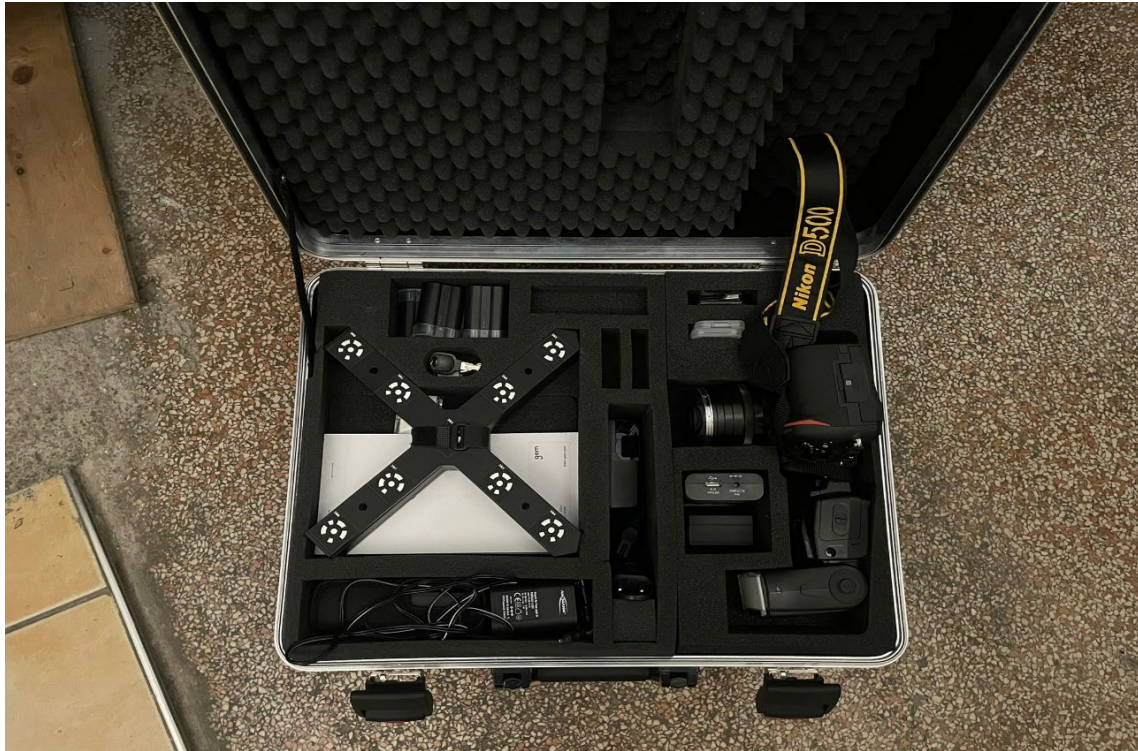


Slika 3.2 3D model stroja ADRISS

3.2 Sustav TRITOP

TRITOP je mobilni optički mjerni sustav koji omogućava brza i efikasna mjerenja 3D položaja markera i drugih karakterističnih elemenata s površine mjernog objekta. Često se koristi na složenim i velikim objektima za određivanje položaja referentnih točaka, za provjeru namještanja naprava i strojeva te kontrolu tolerancija oblika i položaja.

TRITOP kod nekih aplikacija predstavlja alternativan pristup konvencionalnim metodama mjerenja, kao što su mjerne trake i letve ili složeni sustavi za mjerenje pomaka i pretvornici pomaka. Na slici 3.3 prikazuje se dio sustava TRITOP.



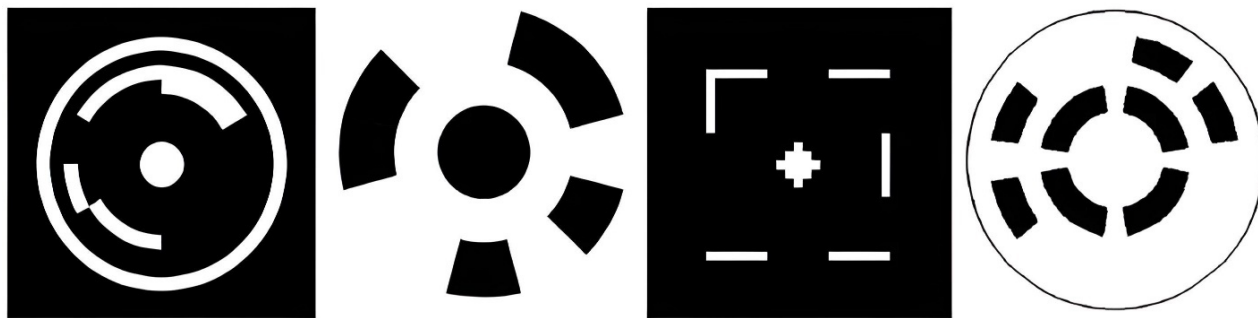
Slika 3.3 TRITOP sustav

3.2.1 Markeri i kalibracijska oprema

U kontekstu 3D skeniranja markeri se često nazivaju i referentnim točkama ili ciljnim točkama. Ovi pojmovi preciznije opisuju njihovu ulogu u postupku skeniranja. Postoje dvije različite vrste markera: kodirani i nekodirani.

Kodirani markeri, vidljivi na slici 3.4, su ustvari male pločice ili naljepnice koje sadrže različite kodove za svaki marker kako bi se povećala preciznost i učinkovitost snimanja. Svaka kodirana točka odgovara jedinstvenoj vrijednosti koda i tako pruža bitne informacije za raspoznavanje značajki scene. Središnji krug ili križić daje precizne koordinate pozicije, a okolne kružne trake nude kodirane informacije za dekodiranje prema nekim određenim pravilima.

Prednost ovih markera je što je svaki jedinstven, znači da sustav ne može pomiješati pozicije markera u prostoru. Također, uz to što pružaju precizne informacije o položaju, softver ih automatski prepoznaje tako da nema potrebe za naknadnim ručnim dodavanjem markera u mjerenje [5].



Slika 3.4 Neke vrste kodiranih markera [5]

U ovome radu su korišteni kodirani markeri s bijelim krugovima na crnoj podlozi jer takvi dolaze u paketu s korištenim TRITOP sustavom (Slika 3.5).



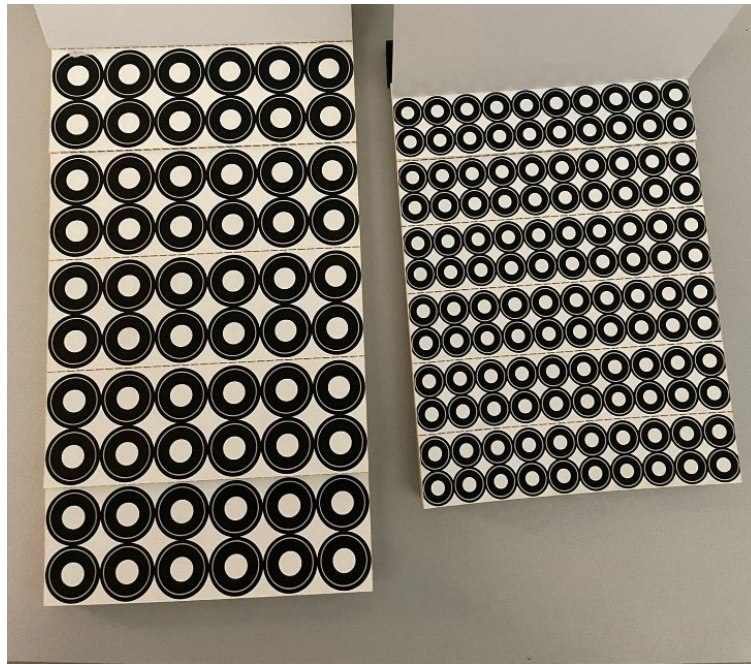
Slika 3.5 Korišteni kodirani markeri

Nekodirani markeri jednostavnija su vrsta markera koja se većinom sastoji od para međusobno koncentričnih krugova, od kojih je jedan bijele, a drugi crne boje. Mogu se izraditi pomoću pisača, šablone ili bilo kojeg postupka koji proizvodi krugove. Ako nemaju vlastitu pozadinu i postavljaju se kao mala točka izravno na površinu, treba osigurati da je točka u kontrastu s površinom (bijela točka na crnu površinu i obrnuto).

Za mjerenja više točnosti, gdje se osvjetljenje može kontrolirati i gdje se koristi bljeskalica na fotoaparatu, markeri mogu biti izrađeni od retroreflektirajućeg materijala. Takvi markeri mogu se vidjeti na puno veće udaljenosti i mogu povećati točnost kod preciznih industrijskih mjerenja te smanjiti vjerojatnost pogreške identifikacije. Na tržištu postoji više veličina markera različitih promjera – od 0.4 mm pa do 12 mm te se koriste u raznim situacijama.

Ako se primjerice koriste premali markeri onda oni možda neće biti jasni u fotografiji i sustav ih neće moći prepoznati. Stoga je važno koristiti prikladnu veličinu markera kod mjerenja [6].

Na slici 3.6 prikazuju se nekodirani markeri koji su korišteni u ovom ispitivanju.



Slika 3.6 Različite veličine nekodiranih markera

Mjerne kalibracijske letve osiguravaju dimenzijsku točnost mjerenja koordinata objekta. Karakterizira ih mala masa i nizak koeficijent toplinskog istezanja. Kalibrirane su na točnost od 1/10 mm ili bolju, te imaju definiranu duljinu između dva kodirana markera na krajevima, koja mora biti upisana negdje na letvama. U skupu preklapajućih fotografija, markeri na letvama omogućuju sustavu da prepozna letve i definira mjerilo. Nije nužno da se pojavljuju u svim fotografijama, ali moraju biti vidljivi na dovoljnom broju fotografija kako bi se njihova kalibrirana duljina mogla koristiti za precizno skaliranje prikupljenih podataka [5].

Na slici 3.7 prikazuje se mjerna letva koja je korištena u ovom radu.



Slika 3.7 Korištena mjerna letva

Kalibracijski križ (Slika 3.8) potreban je za pravilnu orijentaciju fotografija prilikom obrade u softveru. Na njemu se nalaze kodirani markeri koje softver automatski prepoznaje te time raspoznaje orijentaciju fotografije i smješta točke u prostoru. Time se ubrzava proces dobivanja 3D rastera točaka.



Slika 3.8 Kalibracijski križ

3.2.2 Softver GOM Inspect

U ovom radu je korišten softver „GOM Inspect 2022“. GOM Inspect je softver koji se koristi za inspekciju dimenzija, geometrijsku analizu i kontrolu kvalitete u različitim industrijama poput automobilske i zrakoplovne. Softver omogućuje vizualizaciju i usporedbu skeniranih objekata s CAD modelima, izračunavanje odstupanja, analizu deformacija i generiranje detaljnih izvještaja.

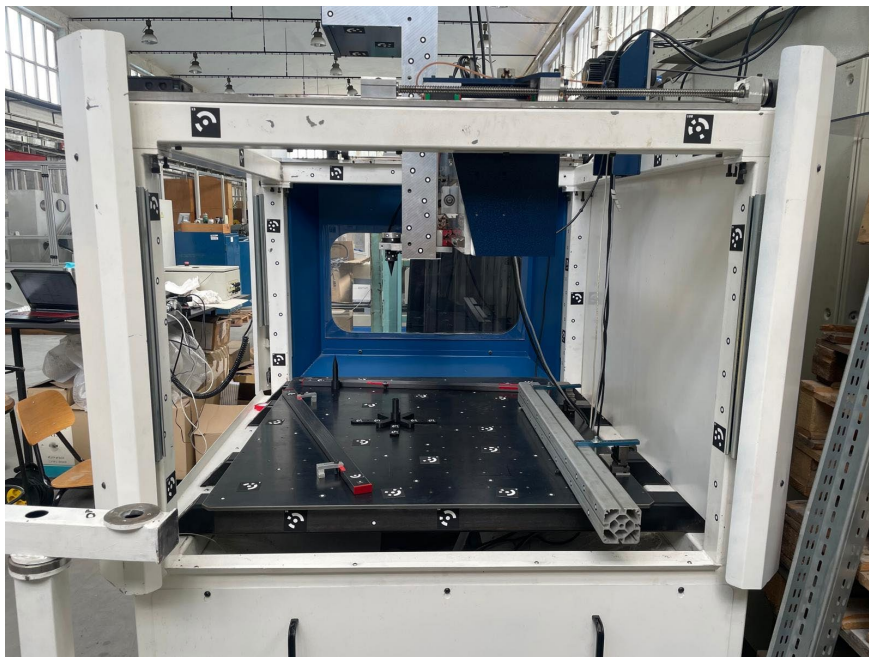
4 MJERENJE I OBRADA PODATAKA

4.1 Priprema ispitnog postava

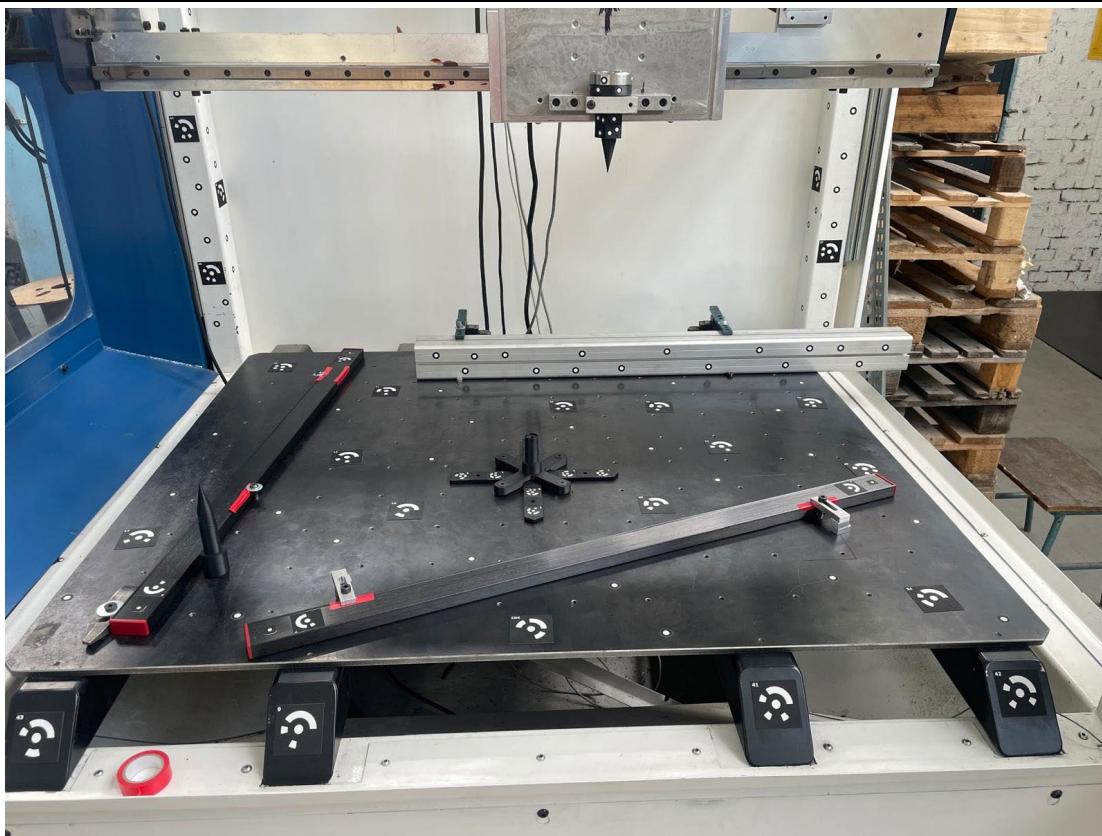
Kod pripreme ispitnog postava bilo je važno da se pri prvom referentnom mjerenju dobije što gušći oblak točaka u softveru, stoga je na stroj postavljeno više markera nego što je u stvarnosti potrebno. Korišteni su kodirani markeri prikazani na slici 3.5 te nekodirani markeri promjera 8 mm i 5 mm prikazani na slici 3.6. Marker promjera 5 mm su bili samo nalijepljeni na odgovarajući prihvatač koji je montiran na prigon Z osi.



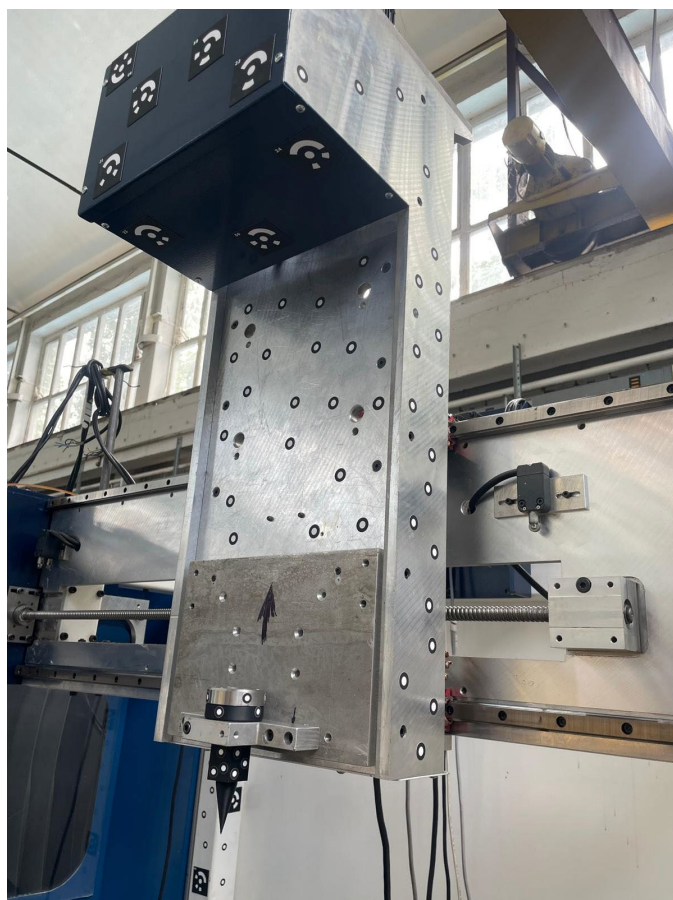
Slika 4.1 Ispitni postav u referentnoj poziciji - prednja strana



Slika 4.2 Ispitni postav u referentnoj poziciji – desna strana



Slika 4.3 Ispitni postav radne ploče



Slika 4.4 Ispitni postav prigona Z osi

Na slikama 4.1 do 4.4 vidi se kako je veliki broj markera raspoređen po površinama stroja zbog što veće preciznosti kod kasnije obrade podataka jer prilikom mjerenja nije bilo u potpunosti sigurno koja točka sa stroja će se uzeti kao točka za kasniju analizu podataka. Na ispitni postav je također bilo potrebno postaviti barem jednu mjernu letvu kako bi sustav imao mjerilo duljine, te jedan kalibracijski križ, bez kojeg bi softver teško odredio orijentacije snimljenih fotografija.

4.2 Položaj ishodišta

Za početnu točku mjerenja odabrana je rubna točka mjernog prostora s koordinatama:

- $X = 0$,
- $Y = 0$,
- $Z = 0$.

Ova točka je definirana uz pomoć dva šiljka izrađena aditivnom proizvodnjom. Jedan šiljak je smješten na stolu alatnog stroja, dok je drugi uložen u odgovarajući prihvat na prigonu Z osi stroja, te se mjesto njihova dodira smatra ishodištem sustava (Slika 4.5).



Slika 4.5 Šiljak

CNC program korišten za pokretanje alatnog stroja prilagođen je tako da ishodište bude u toj točki, a sva daljnja gibanja izvršavana su u odnosu na nju.

4.3 Opis i postupak mjerenja

Mjerenje je provedeno unutar unaprijed definiranog mjernog područja koje je usklađeno s radnim prostorom alatnog stroja. Dimenzije mjernog prostora iznosile su:

- U smjeru X osi 675 mm,
- U smjeru Y osi 420 mm,
- U smjeru Z osi 270 mm.

Svaka od tih dimenzija podijeljena je na tri jednaka dijela kako bi se mogao dobiti skup od 64 točke u prostoru, pri čemu su dobiveni pomaci:

- U smjeru X osi 225 mm,
- U smjeru Y osi 140 mm,
- U smjeru Z osi 90 mm.

Da bi se procijenila točnost pozicioniranja alatnog stroja potrebno je imati što više točaka u mjerenju.

Prilikom izvođenja mjerenja u laboratoriju je zabilježena okolišna temperatura od 35°C.

U program je ugrađena stanka nakon zauzimanja svake pozicije zbog toga što je za snimanje fotografija jedne pozicije bilo potrebno oko 4-5 minuta.

Za svaku od 64 pozicije bilo je potrebno snimiti približno 20 do 25 fotografija sa različitih lokacija oko stroja kako bi softver mogao prepoznati dovoljan broj markera na elementima ispitnog postava (Slika 4.6, Slika 4.7). Nakon snimanja fotografija pojedine pozicije mjerenja, potrebno je te fotografije pohraniti na računalo, za svaku poziciju mjerenja u posebnu mapu kako ne bi došlo kasnije do zabune pri obradi podataka.



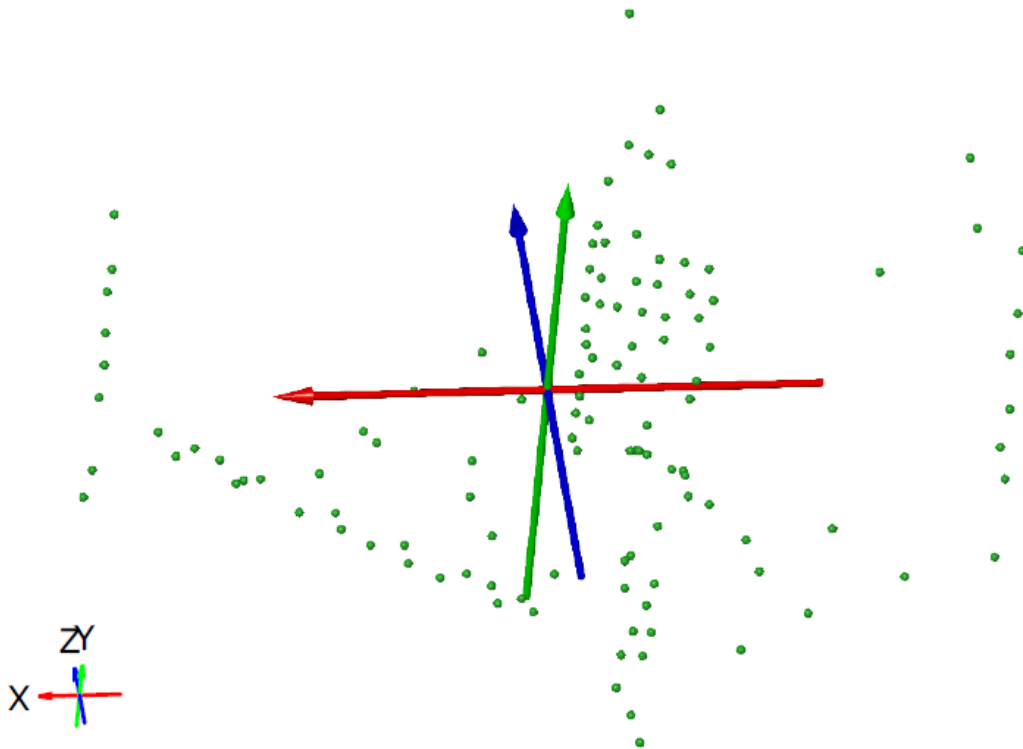
Slika 4.6 Različite lokacije snimanja 1



Slika 4.7 Različite lokacije snimanja 2

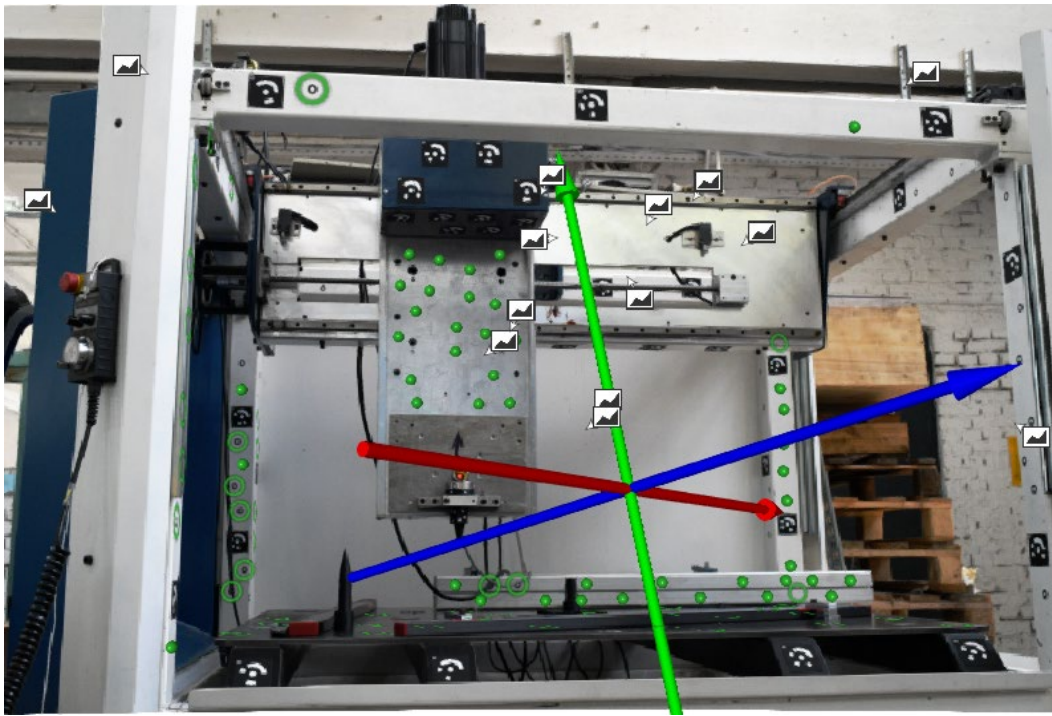
4.4 Dobivanje oblaka točaka

Nakon provedenog mjerenja referentne pozicije i svih 64 pozicija potrebno je fotografije tih pozicija učitati u softver „GOM Inspect 2022“. Prilikom učitavanja posebno za svaku poziciju bilo je potrebno podesiti žarišnu duljinu na 22 mm. Po pregledu ostvarenog oblaka točaka pojedine pozicije ustanovljeno je da se većina markera promjera 5 mm, koji su bili nalijepljeni na adapter ne vide, tj. da ih softver ne raspoznaje. Stoga su te točke bile izbačene iz rezultata mjerenja, a u softveru je postavljeno da se samo prikazuju nekodirani markeri od 8 mm promjera.



Slika 4.8 Prikaz oblaka točaka ostvarenih mjerenjem

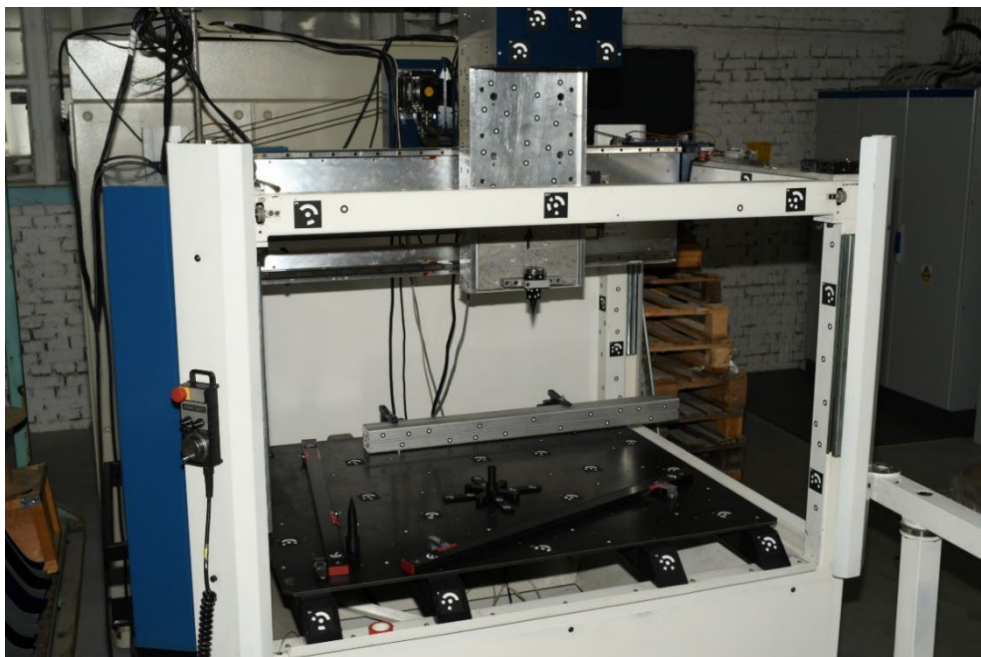
Iz slike 4.8 može se vidjeti kako oblak točaka dobiven nakon učitavanja fotografija pozicije nema orijentaciju prema nekom određenom koordinatnom sustavu već softver sam postavi svoj koordinatni sustav. To ne predstavlja veliki problem jer će se sve te pozicije orijentirati prema referentnoj poziciji koja se obrađuje kasnije u radu.



Slika 4.9 Prepoznavanje markera

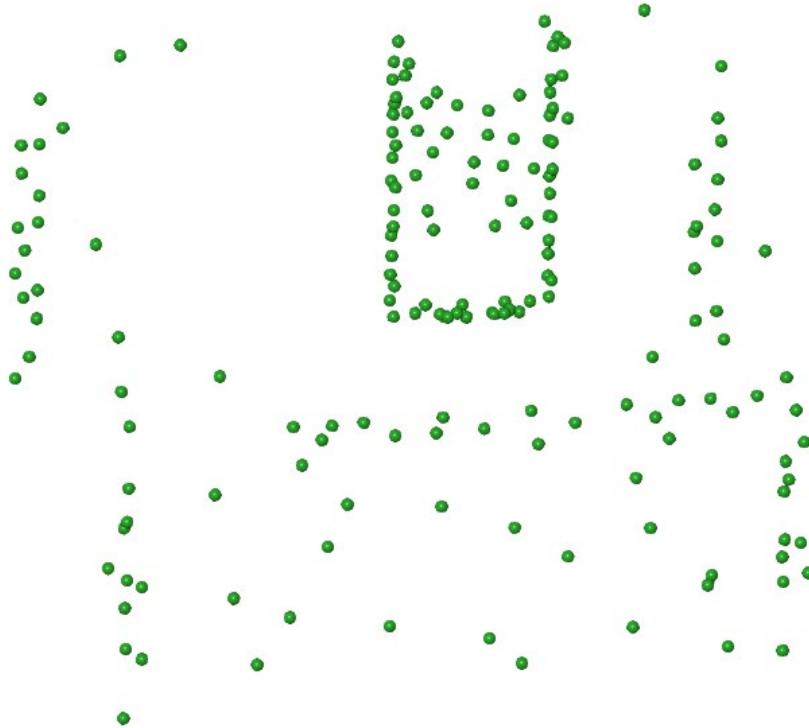
Na slici 4.9 vidi se kako softver ne prepoznaje sve markere vidljive na fotografiji. Softveru vidljivi markeri su označeni zelenom točkom, dok se zelenim prstenom označuju markeri koje softver raspoznaje, ali im ne može točno definirati poziciju ili ta definicija pozicije ima prevelika odstupanja. To se najčešće događa zbog preslabe ekspozicije nekih markera te softver ne može dobro raspoznati bijeli krug unutar crnog na markeru.

4.5 Obrada referentnog mjerenja



Slika 4.10 Referentno mjerenje

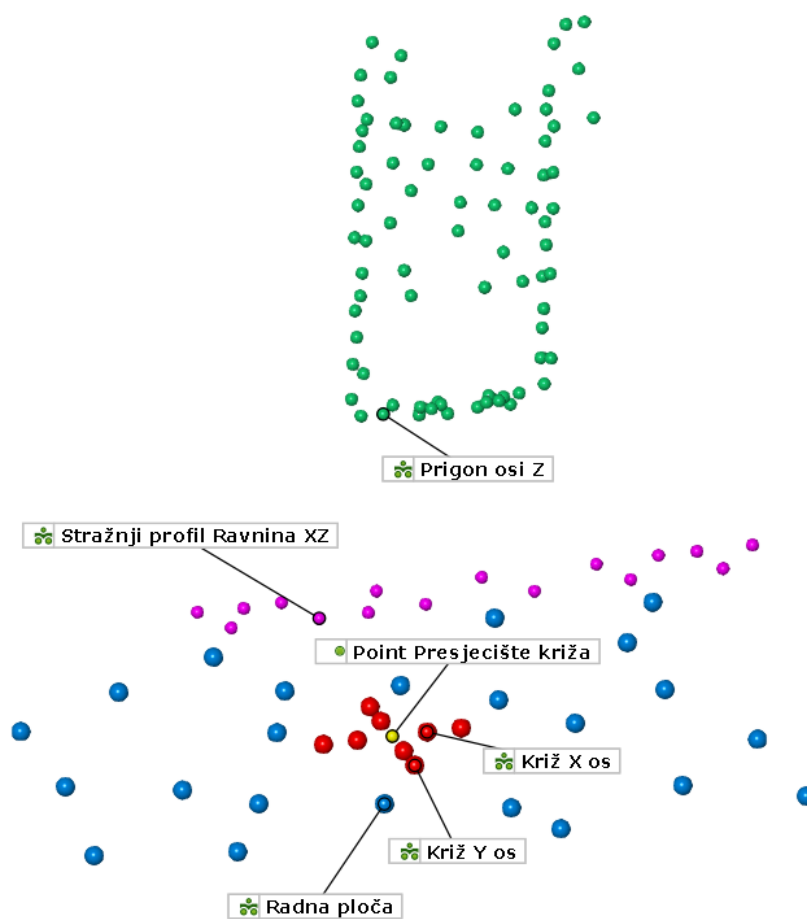
Za referentno mjerenje (Slika 4.10) je odabrana proizvoljna pozicija u radnom prostoru stroja kod koje je bilo moguće dobiti što veći i gušći oblak točaka kako bi bilo lakše vidjeti i definirati pojedine komponente postava u softveru. Zbog toga je fotografiran postav s većeg broja mogućih lokacija te je snimljeno puno više fotografija nego što se drži dovoljnim.



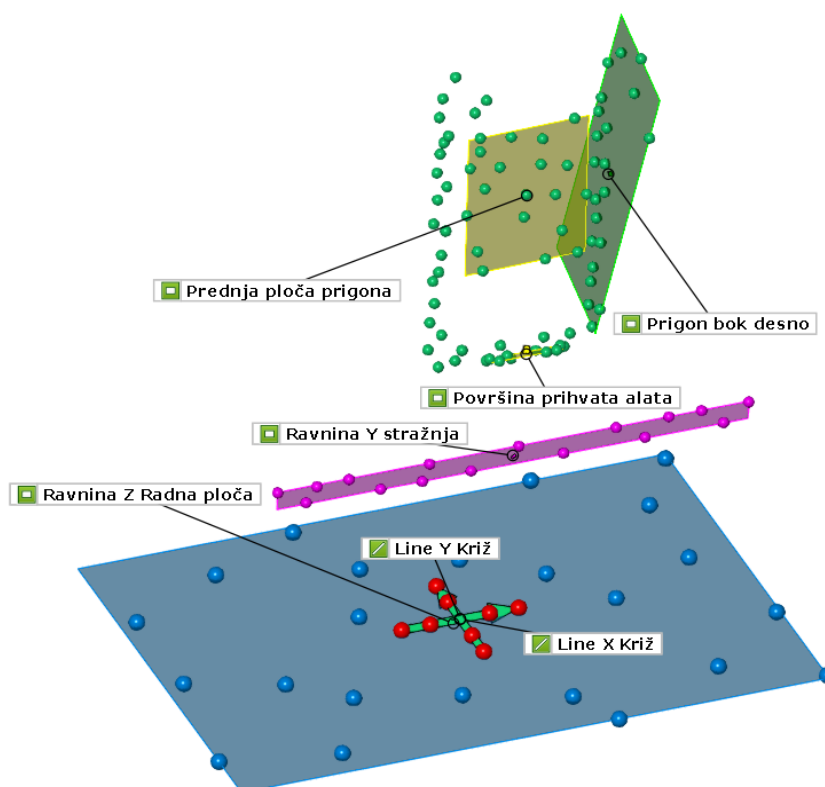
Slika 4.11 Oblak točaka referentnog mjerenja

4.5.1 Definiranje komponenata i elemenata

Nakon dobivenog oblaka točaka referentne pozicije (Slika 4.11), te točke je bilo potrebno razdvojiti u dvije grupe: prva grupa su točke koje pripadaju elementima postavljenim na radnom stolu stroja (kalibracijski križ i stražnji profil), uključujući i sam radni stol, dok su druga grupa točke koje pripadaju prigonu Z osi razmatranog alatnog stroja. Iz tih točaka je bilo potrebno definirati komponente vidljive na slici 4.12. Zatim je iz tih komponenti potrebno dobiti ravnine i linije za daljnju obradu (Slika 4.13). To se izvelo na način da su prvo odabrane točke koje pripadaju određenim komponentama te zatim pod naredbom „Construct“ odabran element koji je potrebno izraditi.



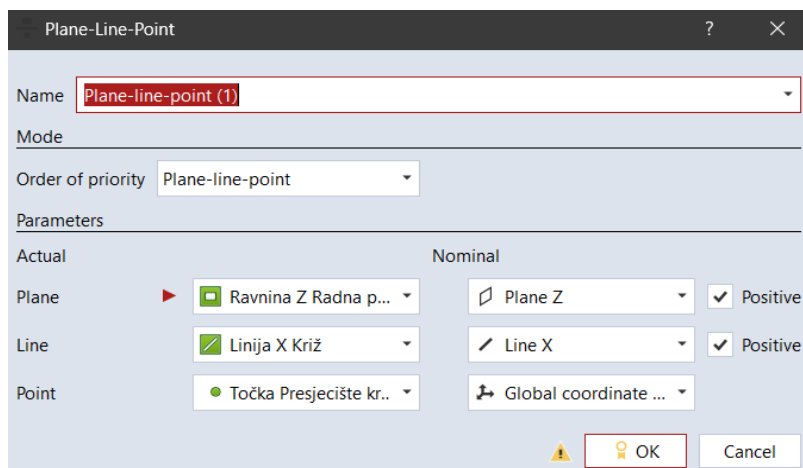
Slika 4.12 Komponente postava



Slika 4.13 Ravnine i linije definirane iz komponenti

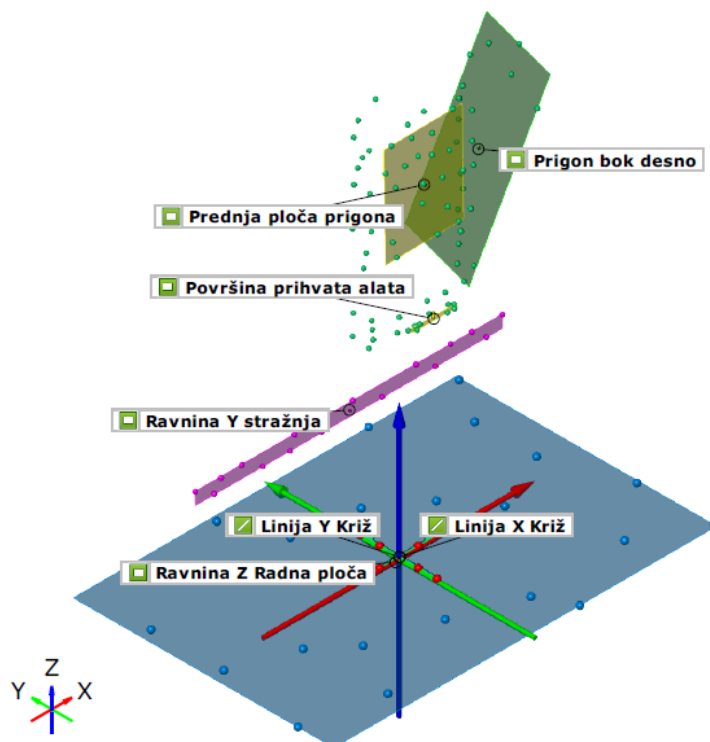
4.5.2 Poravnanje

Sljedeći korak, po određivanju geometrijskih elemenata je poravnanje istih jer prilikom učitavanja oblaka točaka, softver automatski definira proizvoljni koordinatni sustav koji nije poravnat prema nijednom elementu. Za inicijalno poravnanje u ovoj analizi uzeto je poravnanje „Ravnina – Linija – Točka“ (engl. *Plane – Line – Point*) te je definirano kao na slici 4.14.



Slika 4.14 Inicijalno poravnanje

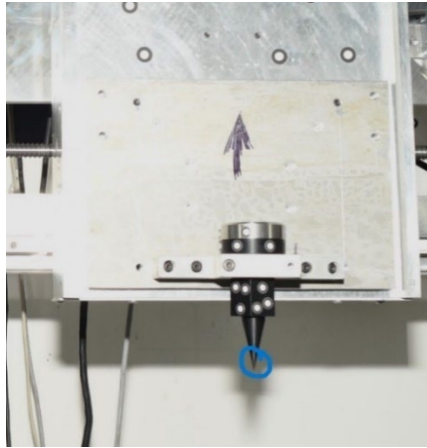
Za „Z“ ravninu uzeta je ravnina radne ploče stroja, kao os „X“ uzeta je „Linija X Križ“ te za ishodište koordinatnog sustava je postavljena središnja točka na križu, odnosno točka gdje se sijeku „Linija X križa“ i „Linija Y križa“. Referentno mjerenje nakon poravnanja je prikazano na slici 4.15.



Slika 4.15 Referentno mjerenje s poravnanjem

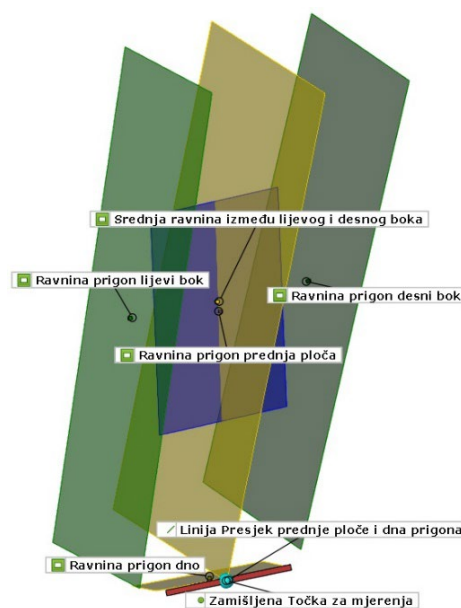
4.5.3 Točka za mjerenje

Prvotno je bilo zamišljeno da se točka za mjerenje pokuša postaviti na sam adapter ili još bolje u sam vrh adaptera koji je uložen u odgovarajući prihvat na prigonu Z osi. Međutim, prilikom učitavanja i obrade oblaka točaka pojedinih pozicija, zaključeno je da to neće biti izvedivo zbog toga jer je premalo markera sa adaptera bilo prepoznato od strane softvera na većini pozicija (Slika 4.16).



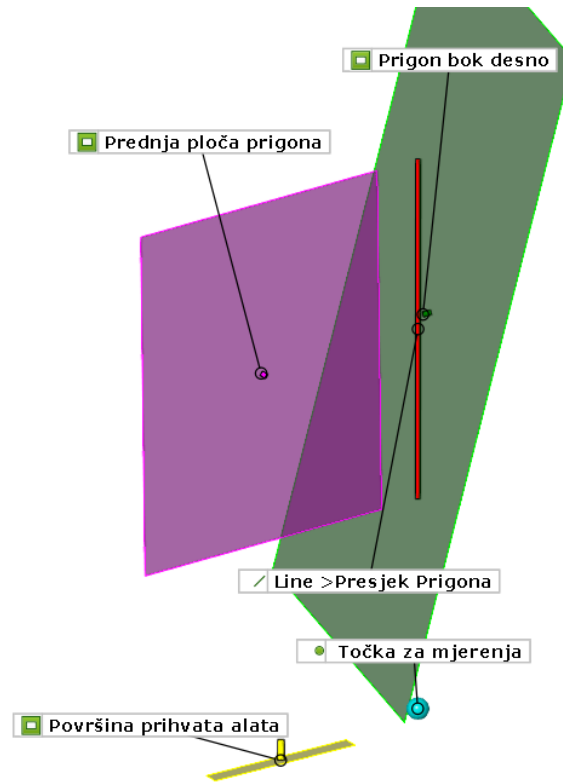
Slika 4.16 Točka za mjerenje na šiljku

Sljedeći pokušaj je bio da se dobije središnja ravnina između lijevog i desnog boka prigona Z osi, te da se pronade njezino sjecište sa linijom koja bi predstavljala rub između prednje ploče prigona i dna prigona te bi se time mogla dobiti točka za mjerenje (Slika 4.17). Problem je ovdje nastao kod snimanja fotografija za pozicije s koordinatama $X=0$ mm i $X=225$ mm jer se nije mogao dobro fotografirati lijevi bok prigona i na pozicijama s koordinatama $Z=0$ mm i $Z=90$ mm, također se dogodio isti problem s dnom prigona. Zbog toga je ovaj pristup također odbačen.



Slika 4.17 Drugi pokušaj točke za mjerenje

Naposljetku je odlučeno da se za „Točka za mjerenja“ uzme točka koja je sjecište između ravnine prihvata alata te linije koja se dobije presijecanjem ravnine desnog boka prigona sa ravninom prednje ploče prigona (Slika 4.18). Cilj je bio koristiti što veći broj elemenata kod određivanja te točke kako bi mjerenja bila preciznija.



Slika 4.18 Izabrana točka za mjerenja

4.6 Obrada mjerenja

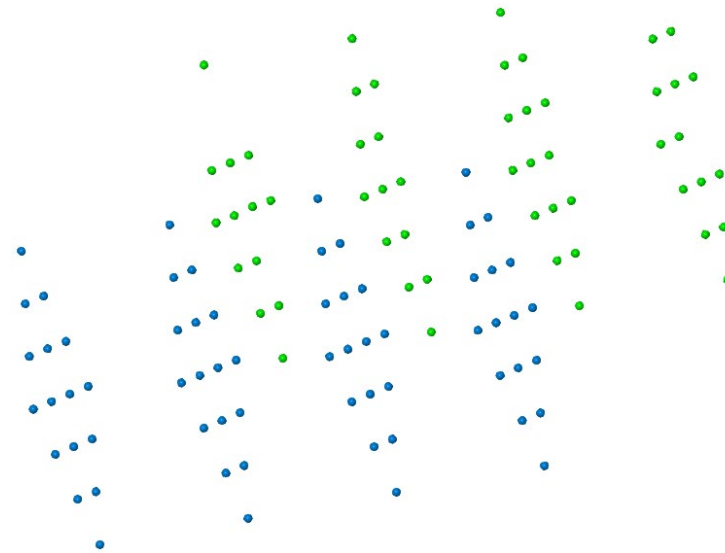
Sljedeće što je bilo potrebno učiniti je prethodno spremljene fotografije posebno od svake pozicije učitati u softver u obliku mjerenja kako bi se dobio oblak točaka za svaku poziciju. Zatim je bilo potrebno ta mjerenja spremati kao elemente da bi softver mogao klasificirati svako to mjerenje odnosno poziciju pojedinačno. Onda se ti elementi ubacuju kao faze (eng. *stages*) zajedno sa referentnim mjerenjem u jednu datoteku gdje se sve pozicije mogu poravnati prema obrađenom referentnom mjerenju. Nakon dobivenih faza iz elemenata, provedena je provjera faza i ustanovljeno je da kod njih deset nije moguće dobiti zadanu točku za mjerenje. Razlog tome je što softver nije uspio detektirati dovoljno markera za dobivanje pojedinih geometrijskih elemenata koji su potrebni da bi se definirala točka za mjerenje. To su redom točke 33, 34, 40, 45, 50, 51, 52, 54, 57 i 64. Stoga su one izbačene iz mjerenja i više nisu detaljnije razmatrane.

Nakon obrade točaka i izbacivanja prije spomenutih potrebno je koordinate preostalih točaka spremati u .CSV datoteku, kako bi se iz njih mogao učitati skup od 54 mjerene točke koje će se moći usporediti sa nominalnim točkama.

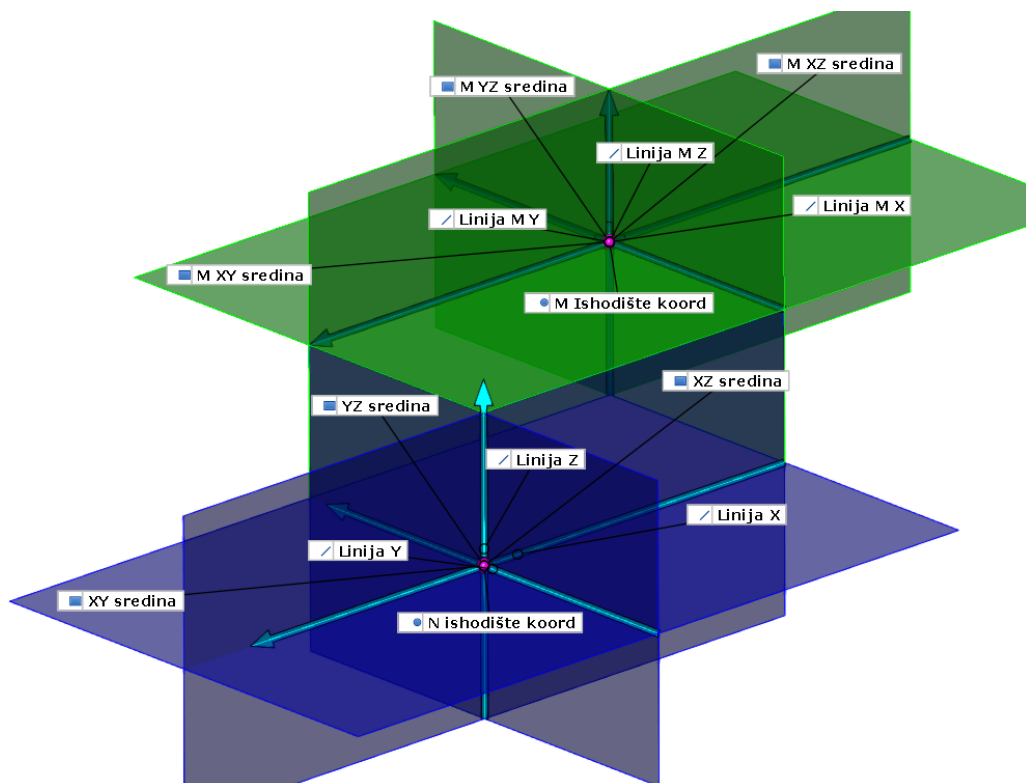
4.7 Obrada skupova točaka

Nakon ubacivanja oba skupa točaka, nominalnih i mjerenih, dobivena su dva odvojena skupa koje treba prebaciti u isti koordinatni sustav. To se postiže na način da se za svaki skup posebno provuku središnje ravnine, na njihovim presjecima se potom definiraju pravci, te zatim na sjecištu svih triju pravaca definira točka koja određuje ishodište koordinatnog sustava pojedinog skupa (Slika 4.20).

Na slici 4.19 nominalni skup je prikazan plavim, a mjereni zelenim točkama.



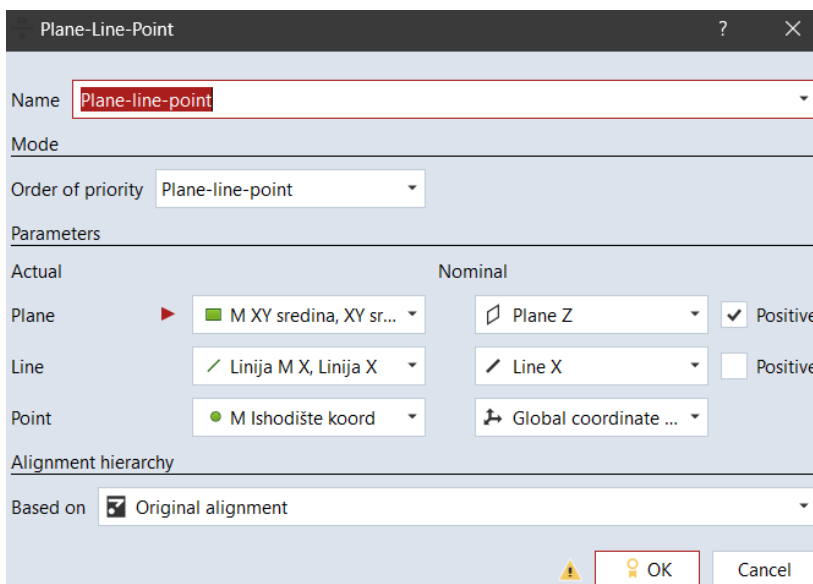
Slika 4.19 Nominalne i mjerene točke



Slika 4.20 Ravnine, pravci i točke za poravnanja

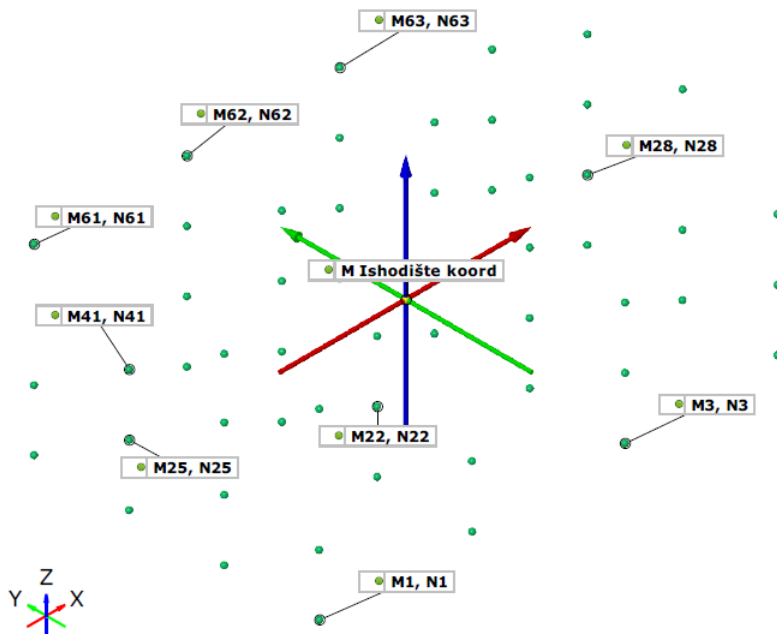
Po dobivenim točkama za ishodišta potrebno je povezati skupove točaka. To se može ostvariti korištenjem naredbe „Poveži na stvarni element“ (eng. *Link to actual element*). Potrebno je prvo odabrati nominalni element na koji se želi povezati, zatim odabrati prije spomenutu naredbu i njome povezati odabrani element sa njegovim parom u mjerenom skupu. Tek je nakon toga moguće međusobno povezati i poravnati razdvojene skupove točaka.

Poravnanje je moguće izvršiti već ranije spomenutom naredbom „Ravnina – Linija – Točka“ (Slika 4.21).



Slika 4.21 Poravnanje skupova točaka

Na kraju svih povezivanja i poravnanja dobije se skup povezanih točaka s jednim koordinatnim sustavom (Slika 4.22)



Slika 4.22 Konačni skup točaka

5 ANALIZA

U ovome radu provode se dvije analize podataka. Jedna je analiza udaljenosti između nominalnih i mjerenih točaka, dok je druga, analiza paralelnosti ravnina dobivenih iz povezanog skupa nominalnih i mjerenih točaka i odstupanja mjerenih točaka od nominalnih ravnina.

5.1 Udaljenost između točaka

Povezivanjem nominalnih i mjerenih točaka i njihovim svodjenjem u jedinstveni koordinatni sustav omogućen je izračun udaljenosti među njima, tj. odstupanja mjerenih točaka od njihovog para u nominalnom skupu. U tablici 1 su prikazana odstupanja mjerenih od nominalnih točaka.

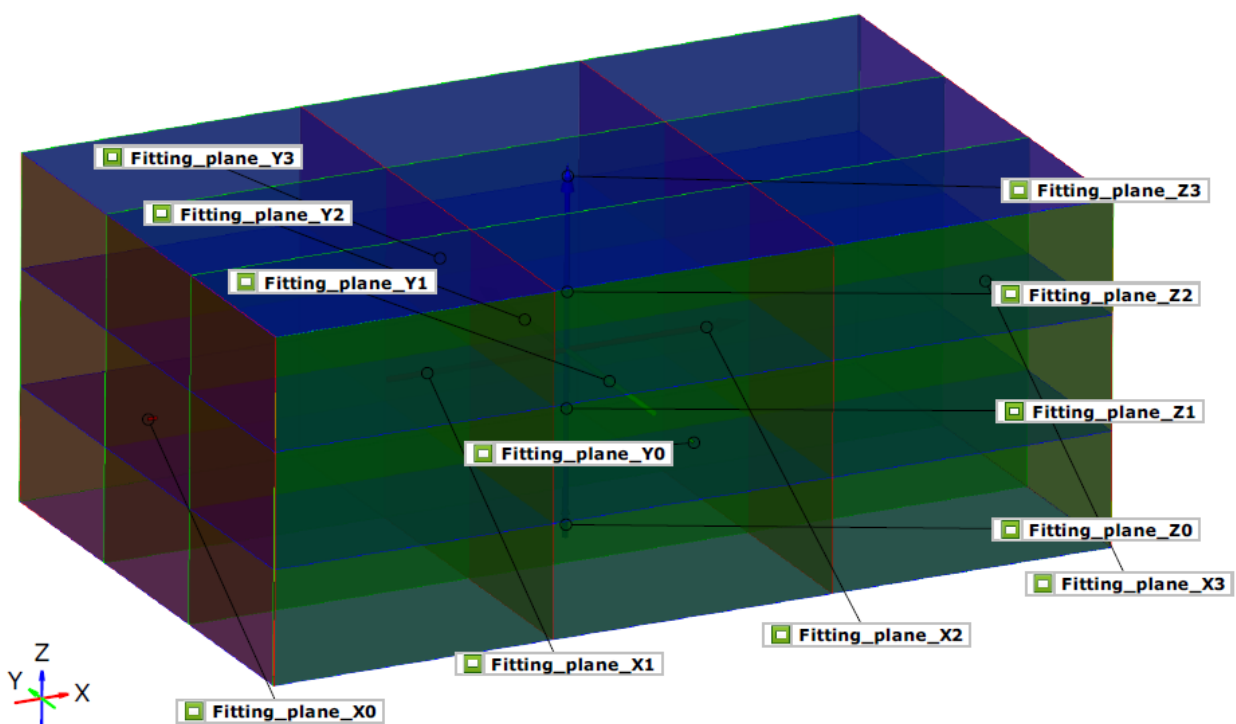
Tablica 1 Odstupanja mjerenih od nominalnih točaka

Element	X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	dXYZ [mm]
M1, N1	+0.00	+0.06	+0.13	+0.15
M2, N2	+0.10	-0.09	+0.01	+0.14
M3, N3	+0.22	-0.00	+0.04	+0.22
M4, N4	+0.13	+0.06	-0.09	+0.17
M5, N5	-0.29	+0.13	-0.02	+0.32
M6, N6	-0.05	-0.20	+0.02	+0.21
M7, N7	+0.18	+0.06	+0.06	+0.20
M8; N8	+0.13	+0.17	-0.07	+0.23
M9, N9	-0.34	+0.27	-0.12	+0.45
M10, N10	-0.04	+0.25	-0.09	+0.27
M11, N11	+0.07	+0.29	-0.06	+0.30
M12, N12	+0.08	+0.25	-0.01	+0.27
M13, N13	-0.31	+0.36	+0.00	+0.47
M14, N14	-0.14	+0.29	+0.02	+0.32
M15, N15	+0.17	+0.33	+0.04	+0.37
M16, N16	-0.01	+0.23	+0.14	+0.27
M17, N17	-0.47	-0.17	-0.02	+0.49
M18, N18	-0.13	-0.13	+0.09	+0.20
M19, N19	+0.02	-0.24	+0.11	+0.27
M20, N20	-0.03	-0.26	-0.07	+0.27
M21, N21	-0.47	-0.26	-0.11	+0.55
M22, N22	-0.13	-0.17	-0.12	+0.24
M23, N23	-0.11	-0.18	+0.01	+0.21

M24, N24	-0.10	-0.13	-0.09	+0.19
M25, N25	-0.49	-0.04	-0.30	+0.57
M26, N26	-0.28	+0.04	-0.09	+0.30
M27, N27	-0.17	+0.03	-0.01	+0.17
M28, N28	-0.29	+0.07	-0.00	+0.30
M29, N29	-0.65	+0.01	-0.05	+0.66
M30, N30	-0.36	+0.10	-0.04	+0.38
M31, N31	-0.21	-0.00	+0.07	+0.22
M32, N32	-0.25	-0.04	+0.08	+0.27
M35, N35	-0.20	-0.41	+0.01	+0.45
M36, N36	-0.21	-0.26	+0.40	+0.52
M37, N37	-0.56	-0.32	+2.36	+2.45
M38, N38	-0.39	-0.49	+0.12	+0.64
M39, N39	-0.27	-0.37	+0.04	+0.46
M41, N41	-0.64	-0.18	+0.01	+0.67
M42, N42	-0.55	-0.10	-0.16	+0.59
M43, N43	-0.36	-0.21	+0.01	+0.42
M44, N44	-0.38	-0.21	-0.06	+0.44
M46, N46	-0.55	-0.14	+0.03	+0.57
M47, N47	-0.49	-0.32	+0.07	+0.59
M48, N48	-0.41	-0.15	+0.10	+0.45
M49, N49	-0.67	-0.56	-0.02	+0.87
M53, N53	-0.75	-0.57	+0.08	+0.95
M55, N55	-0.47	-0.50	-0.05	+0.69
M56, N56	-0.50	-0.68	-0.37	+0.93
M58, N58	-0.66	-0.34	-0.11	+0.75
M59, N59	-0.52	-0.28	-0.02	+0.59
M60, N60	-0.54	-0.38	+0.03	+0.66
M61, N61	-0.99	-0.33	+0.04	+1.04
M62, N62	-0.92	-0.45	+0.22	+1.04
M63, N63	-0.64	-0.51	+0.07	+0.82

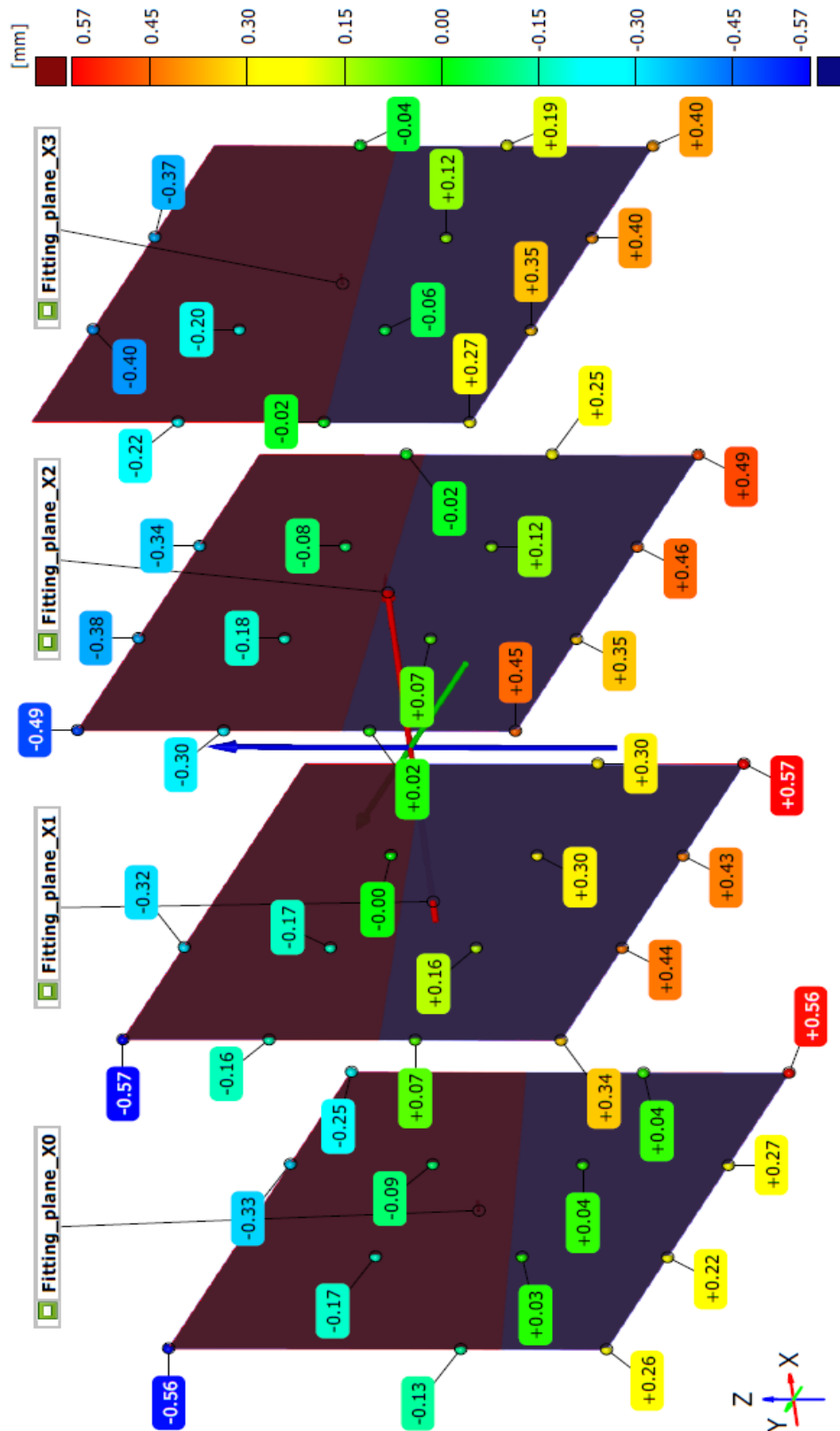
5.2 Odstupanje točkaka od ravnina

Kako bi se provjerila paralelnost među ravninama i odstupanja mjerenih točkaka od nominalnih ravnina potrebno je te ravnine konstruirati iz već prije povezanih točkaka. Na slici 5.1 crvenom bojom su označene ravnine „X“ (YZ ravnine), zelenom ravnine „Y“ (XZ ravnine), te plavom ravnine „Z“ (XY ravnine). Numeričke oznake u nazivima ravnina predstavljaju skup točkaka koje bi se trebale nalaziti na istoj koordinati. Na primjer u ravnini „Fitting_plane_X0“ se nalaze sve točke kojima je koordinata po osi „X“ jednaka nuli, dalje u ravnini „Fitting_plane_X1“ je koordinata X pomaknuta za prije određeni pomak po osi X, i tako analogno dalje i za ostale ravnine.



Slika 5.1 Ravnine iz povezanih točkaka

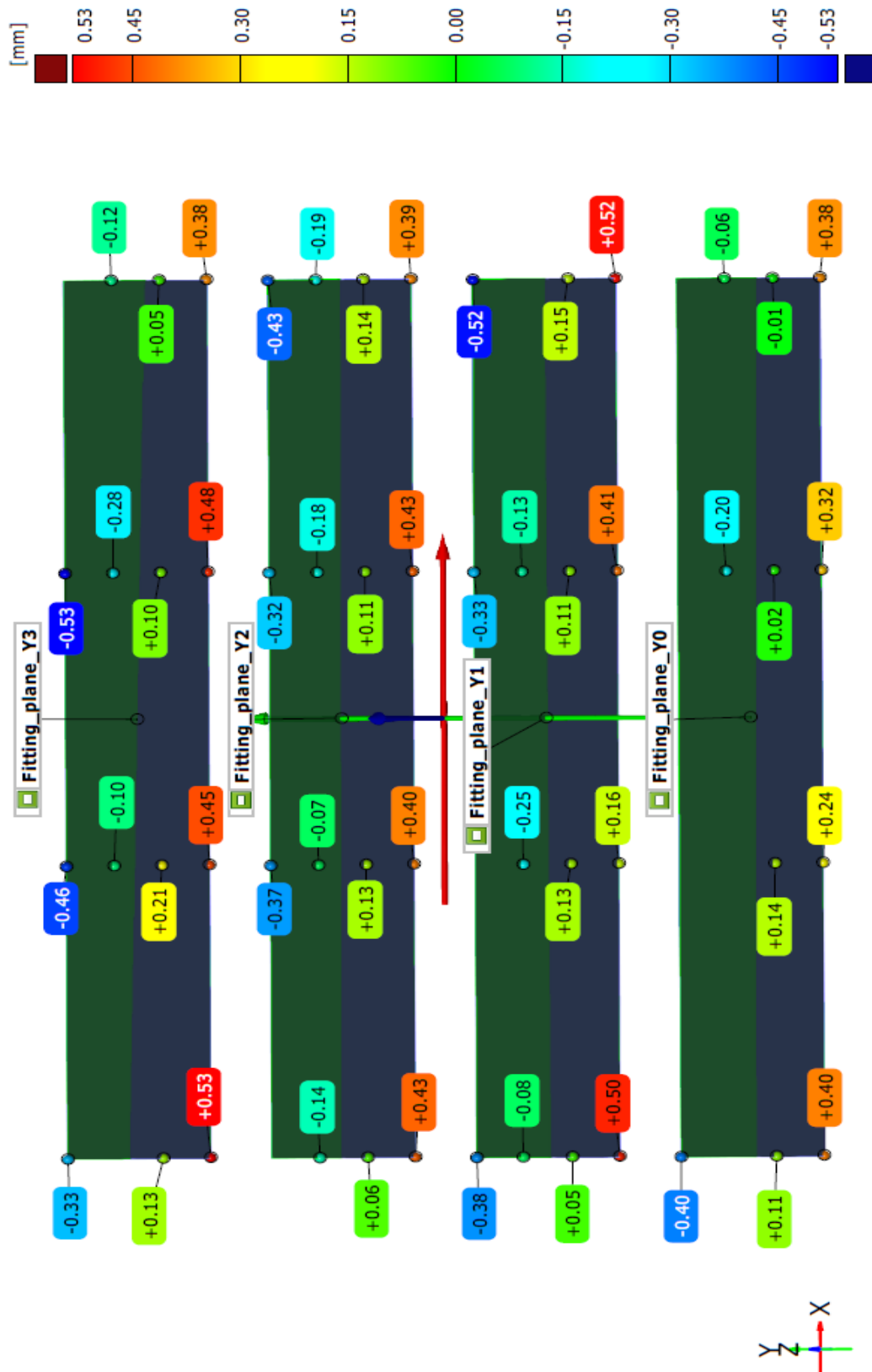
5.2.1 Odstupanje od X ravnina



Slika 5.2 Odstupanja točaka od ravnina X

Na slici 5.2 prikazuju se odstupanja izmjerenih točaka od idealnih ravnina okomitih na os X.

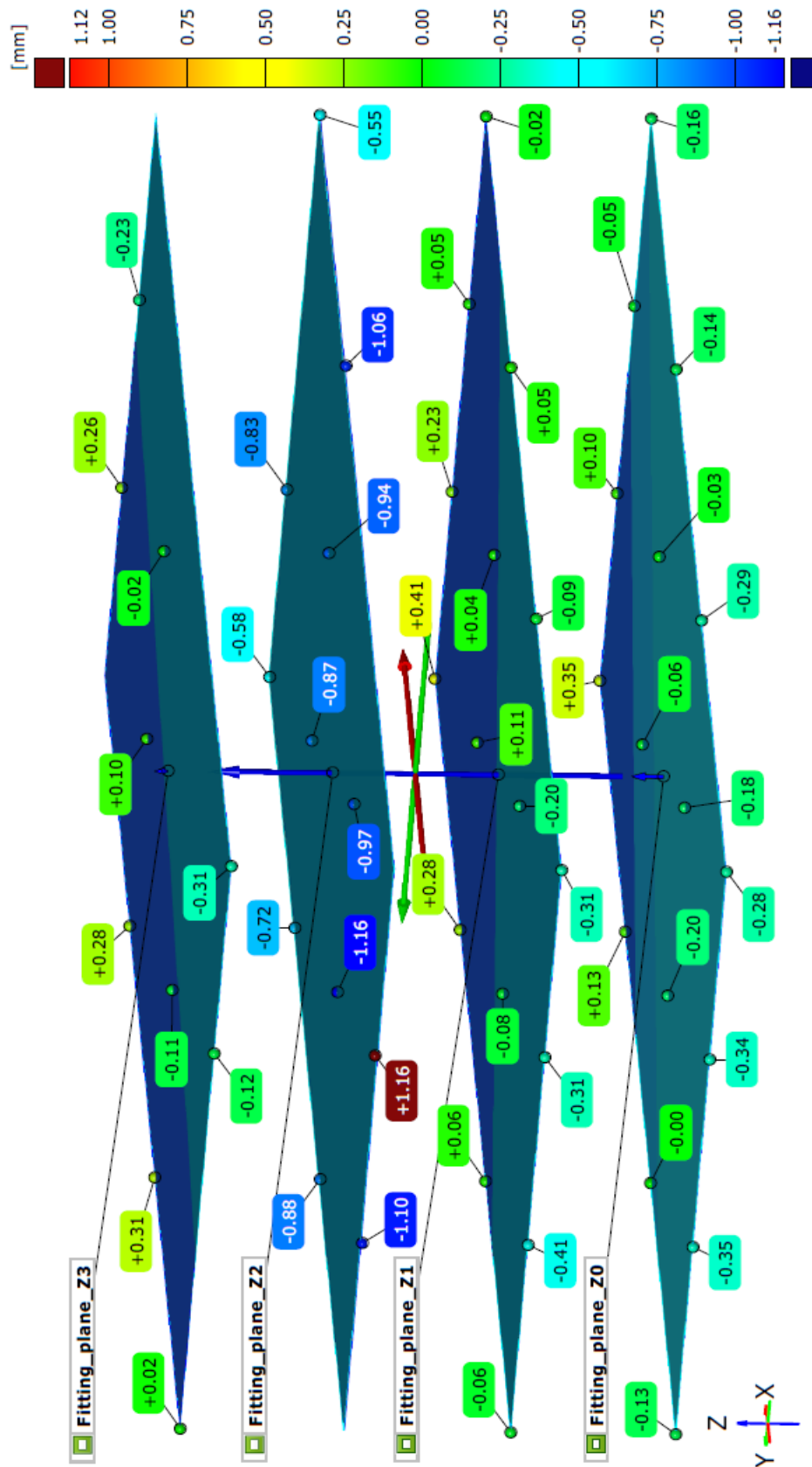
5.2.2 Odstupanje od Y ravnina



Slika 5.3 Odstupanja točaka od ravnina Y

Slika 5.3 prikazuje odstupanja izmjerenih točaka od idealnih ravnina okomitih na os Y

5.2.3 Odstupanja od Z ravnina



Slika 5.4 Odstupanja točaka od ravnina Z

Slikom 5.4 su vidljiva odstupanja izmjerenih točaka od idealnih ravnina okomitih na os Z.

6 ZAKLJUČAK

Cilj ovog završnog rada je bio pokušati provjeriti geometrijsku točnost i točnost pozicioniranja numerički upravljano alata stroja „ADRISS“ pomoću fotogrametrijskog mjernog uređaja TRITOP koji može postići preciznost mjerenja u rasponu od 0,01 mm do 0,1 mm. Iz dobivenih rezultata analize može se zaključiti da se korištenim fotogrametrijskim sustavom može provjeriti geometrijska točnost i točnost pozicioniranja alatnih strojeva, no potrebno je uzeti u obzir potencijalne izvore grešaka koji mogu utjecati na točnost rezultata.

U analizi odstupanja mjerenih od nominalnih točaka uočljivo je kako se ta odstupanja povećavaju odmicanjem od radnog stola u visinu. U nekim točkama je to odstupanje preko 0,8 mm što je prevelik iznos za ovaj mjerni sustav te može ukazivati na problem pri snimanju tih točaka ili na mogućnost da alatni stroj ne radi s očekivanom točnošću. Jedan od mogućih izvora greške je da se ispitivanje izvodilo pri 35 °C, a ne pri sobnoj temperaturi na kojoj bi se inače trebalo.

Iz priloženih izvješća za odstupanje točaka od ravnina i paralelnost tih ravnina može se zaključiti kako stroj ne radi u svakom dijelu svog radnog volumena podjednako, već da se greške pozicioniranja povećavaju kako se odmiče od središta radnog volumena stroja prema rubovima. To je vidljivo u svim prikazima odstupanja ravnina. Najmanje greške se javljaju kod ravnina okomitih na Z os, osim ravnine „Z2“ u kojoj su odstupanja veoma visoka naspram ostalih ravnina. Ovdje postoji značajna vjerojatnost da je došlo do pogreške pri mjerenju ili obradi podataka. Prema rezultatima, preporučeno bi bilo izbjeći rubne dijelove radnog volumena jer u njima stroj ima velika odstupanja, dok bi s druge strane bilo preporučljivo koristiti središte radnog volumena, upravo zbog manjih odstupanja stroja u tim dijelovima.

Za poboljšanje cjelokupnog sustava i izvođenja mjerenja predlaže se prvo izvesti mjerenje u kontroliranim uvjetima, s temperaturom laboratorija bližoj sobnoj. Nakon tih mjerenja i dobivenih rezultata, ako je potrebno, izmijeniti parametre stroja da bi se te greške smanjile te onda ponovo ponoviti mjerenje. Ako se i nakon izmjene parametara i ponovljenog mjerenja greške ne minimiziraju, potrebno je provjeriti ispravnost konstrukcijskih dijelova alatnog stroja te zamijeniti ili popraviti istrošene komponente.

LITERATURA

- [1] fotogrametrija. *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/fotogrametrija> (pristupljeno 4.9.2024.)
- [2] Photogrammetry – History and Modern Uses, <https://lumenandforge.com/photogrammetry-history-and-modern-uses/> (pristupljeno: 20.8.2024.)
- [3] Fotogrametrija, <https://steemit.com/you-stem/@miroslavrc/fotogrametrija> (pristupljeno 4.9.2024.)
- [4] Wilfried Linder: Digital Photogrammetry, A Practical Course, 2006
- [5] Guidelines for Calibrated Scale Bar Placement and Processing https://www.agisoft.com/pdf/tips_and_tricks/CHI_Calibrated_Scale_Bar_Placement_and_Processing.pdf (pristupljeno 7.9.2024.)
- [6] What are Markers, and Why are They Used in 3D Scanning?, <https://www.ireal3dscan.com/news/what-are-markers-and-why-are-they-used-in-3d-scanning/> (pristupljeno 7.9.2024.)