

Dr. sc. Mladen Gomerčić, dipl. ing., GOM mbH, Mittelweg 7-8, 38106 Braunschweig, Njemačka

Doc. dr. sc. Janoš Kodvanj, dipl. ing., FSB, Ivana Lučića 5, Zagreb

Mr. sc. Boris Ljubenković, dipl. ing., FSB, Ivana Lučića 5, Zagreb

Ante Bakić, dipl. ing., FSB, Ivana Lučića 5, Zagreb

Anthony Marinov, dipl. ing., Toyota Croatia, Prisavlje 2, Zagreb

Nenad Drvar, dipl. ing., FSB, Ivana Lučića 5, Zagreb

Tomislav Hercigonja, Topomatika d.o.o., Ilica 231, Zagreb

KONTROLA DIMENZIJA I OBLIKA POMOĆU FOTOGRAMETRIJE

Sažetak

U članku je prezentirana fotogrametrijska metoda u kontroli oblika i dimenzija. Definirane su teoretske osnove metode i opisan fotogrametrijski sustav TRITOP. Slijedi prikaz postupka snimanja, obrade snimaka i analize rezultata te aktivnosti nužne za praktičnu primjenu metode. Također su predstavljena buduća nastojanja i razvoj mjernog sustava. Primjerom je prikazana primjena metode u brodogradnji u fazi montaže trupa broda.

Ključne riječi: kontrola oblika i dimenzija, fotogrametrija, brodograđevni proizvodni proces

DIMENSIONAL AND FORM CONTROL BY PHOTOGRAMMETRY

Summary

Paper presents photogrammetry method in the dimensional and form control. Theoretical basis of the method are defined and a photogrammetry system TRITOP is described. Measuring procedure, image and results analysis are presented. Also, necessary activities for practical application are given. Future efforts and the measurement system development are expressed. Method application in the shipbuilding is presented by an example of ship hull assembly.

Key words: dimensional and form control, photogrammetry, shipbuilding production process

1. Uvod

Brodogradnja je industrija kapitalnih dobara gdje se brodovi, grade pojedinačno, velikih su vrijednosti, a u gradnji su angažirana znatna materijalna sredstva i živi rad. Brod je kompleksan proizvod specifičan po svojim dimenzijama, kao i po brojnim sustavima koje mora imati za funkcioniranje u službi. Razvoj proizvoda u brodogradnji, postupci projektiranja i izrada zahtijevaju visoku tehnologiju i multidisciplinarni pristup istraživanju.

Da bi brodogradilište opstalo na tržištu mora zadovoljavati uvjete kao što su niska cijena, kratki rokovi isporuke i dobra kvaliteta, te uz to ostvariti potreban financijski rezultat. Cilj svakog brodogradilišta je postići što bolju cijenu objekta na tržištu i uz što niže troškove proizvodnje isporučiti brod. Snižavanje troškova proizvodnje ostvaruje se mjerama kao što su bolja organizacija pripremnog procesa, skraćenje proizvodnog ciklusa, veća proizvodnost i ukoliko je to moguće izrada brodova u seriji. Skraćenje proizvodnog ciklusa može se ostvariti stalnom i efikasnom kontrolom dimenzija i oblika u svrhu smanjenja dorade i minimiziranja predmontažnih i montažnih viškova. Korištenje fotogrametrijske metode u kontroli oblika i dimenzija omogućiti će brzo i jednostavno mjerenje, veliki broj mjernih točaka, te će proširiti mogućnosti analize i prikazivanja rezultata mjerenja.

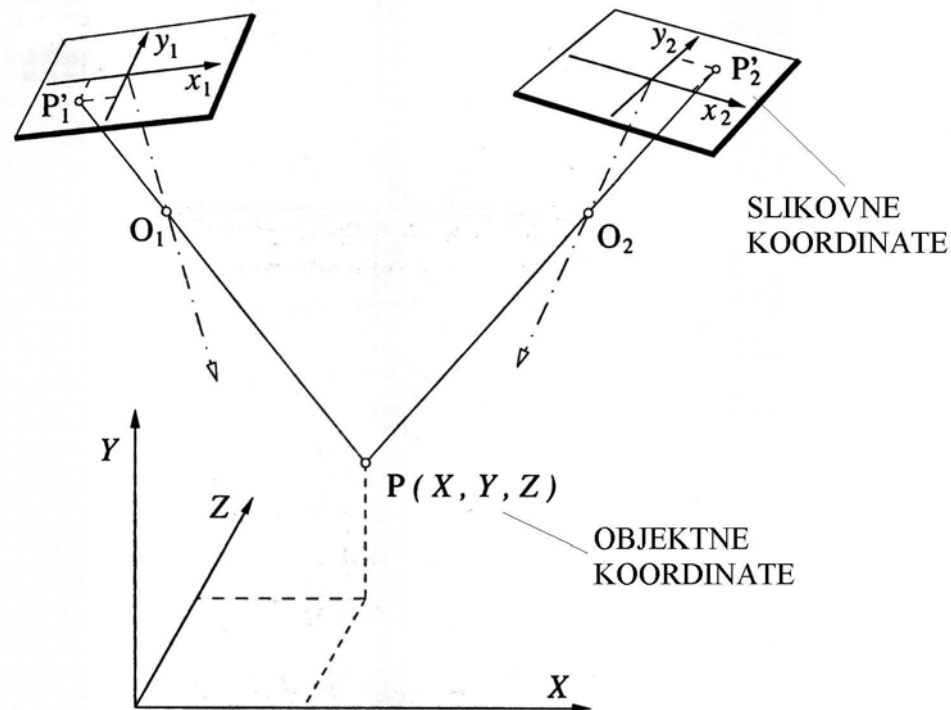
2. Kontrola dimenzija u brodograđevnom procesu

Proizvodni proces u brodogradilištu je dugotrajan i složen, te zahtjeva dobru organizaciju i upravljanje. Unutar proizvodnog procesa stalno se obavljaju ispitivanja kvalitete materijala, opreme, kao i kontrola dimenzija i oblika poluproizvoda i proizvoda. Uvođenjem automatizacije, pojedini dijelovi brodograđevnog proizvodnog procesa prelaze iz tipičnog intermitentnog – isprekidanog tehnološkog procesa u ponavljajući proces. To se prvenstveno odnosi na obradu i rane faze sastavljanja gdje se koriste numerički upravljani strojevi, kao što su strojevi za rezanje ili panel linija za sastavljanje, gdje prevladava automatizacija u odnosu na ljudski rad. Kontrola dimenzija u ovim dijelovima procesa obavlja se na samim strojevima. Tamo gdje se ne koriste numerički upravljani strojevi, u kontroli dimenzija i oblika upotrebljavaju se klasične traserske metode koje uključuju jednostavna pomagala kao što su šablone, ručno označavanje i mjerenje kredom i metrom. U kasnijim fazama sastavljanja broda, intenzivniji je i izraženiji ljudski rad u odnosu na prethodne automatizirane postupke. Dimenzije i masa građevnih jedinica posljedica su proizvodnog koncepta brodogradilišta pri čemu je najbitnija nosivost dizalica. Pri tome građevne jedinice mogu biti sekcije, blokovi ili moduli. Domaća brodogradilišta brodove grade na kosom ležaju – navozu, koristeći dizalice nosivosti do 300 t, pa se trup broda sastavlja najčešće iz sekcija ili okrupnjenih sekcija. Nedostatak ovakvog načina sastavljanja je veći broj građevnih jedinica, a s time i veći broj međusekcijskih spojeva na navozu i duže trajanje sastavljanja trupa. Problemi netočnosti izrade sekcija trupa najviše se uočavaju u fazi montaže trupa kada treba pripremljenu sekciju postaviti i pozicionirati pomoću dizalica na mjesto spajanja s trupom. Pri tom je sekciju često potrebno vratiti na doradu, a nakon dorade ponovo dignuti na navoz. Ponekad će se dorada provesti na navozu, ali tada dolaze do izražaja teži radni uvjeti kao što su kosina navoza, izloženost radnika i opreme atmosferskim prilikama ili velike visine. Postojeća kontrola dimenzija pretežno koristi jednostavne metode i pomagala kao što su metar, visak ili spojne posude. Kada se koriste složena pomagala kao što su teodoliti i laserske metode mjerenja i označavanja, broj mjernih točaka relativno je malen. Uz to, da bi se objekt prekontrolirao s više strana, mjerni se uređaji trebaju postavljati na više pozicija. Pri tom sva pojedinačna mjerenja treba prebaciti u zajednički koordinatni sustav što je podložno nepreciznostima. Nedostatak ovih metoda je sporost mjernog postupka, mala količina zabilježenih informacija, te teško snalaženje u rezultatima, što otežava primjenu pri montaži sekcija u trup broda.

Cilj dimenzijske kontrole jest smanjiti broj radnih sati i troškove dorade. Stoga bi bilo od velike važnosti prikladnim mjernim metodama, još prije sastavljanja na navozu, ustanoviti postojeća odstupanja oblika i dimenzija sekcije od dijela trupa broda na koji se sekcija treba ugraditi. Na taj bi se način sekciju kontroliralo i provelo potrebne korekcije na predmontažnoj platformi kada je to mnogo jednostavnije, jeftinije i brže.

3. Teorijska osnova fotogrametrijske metode

Fotogrametrija je optička mjerna metoda gdje se prostorne koordinate točaka promatranog predmeta određuju pomoću snimaka napravljenih fotoaparatom. Osnova metode je princip triangulacije prikazan slikom 1. Položaj točke u prostoru određuje se presjekom pravaca koji su određeni točkom na objektu P i njenom projekcijom P' na fotografiji.



Slika 1. Određivanje prostornog položaja točke P metodom triangulacije pomoću dvije kamere

Fig. 1 Determining the position of point P by two cameras – triangulation method

U matematičkom modelu rekonstrukcije pravaca definiraju se dva skupa koordinata:

OBJEKTNE (X, Y, Z) – koordinate točke na objektu

SLIKOVNE (x, y) – položaj projekcije promatrane točke na fotografiji

Rješenje matematičkog modela postiže se metodom izjednačenja zrakovnog snopa, odnosno postavljanjem sustava jednadžbi u kojem su slikovne koordinate u funkciji: objektnih koordinata, parametara vanjske orijentacije kamere tj. položaja i kuta fotoaparata kod snimanja svake fotografije te unutrašnjih parametara kamere koji uključuju npr. karakteristike objektiva. Početne vrijednosti tih parametara određuju se u postupku predkalibracije fotografija.

Snimanjem većeg broja fotografija povećava se broj jednadžbi slikovnih koordinata, pa sustav postaje znatno predefiniran tj. broj jednadžbi bitno je veći od broja nepoznanica. Takav predefinirani sustav nelinearnih jednadžbi rješava se iterativnim postupkom minimizacije odstupanja, a konačno rješenje su prostorne koordinate promatranih točaka i svi ostali parametri matematičkog modela.

4. Postupak mjerenja fotogrametrijskim sustavom

U ovome radu korišten je fotogrametrijski sustav TRITOP-V4.7 (GOM mbH, Njemačka) koji se sastoji od digitalnog fotoaparata visoke rezolucije, prijenosnog računala za automatiziranu obradu fotografija i računanje mjernog rezultata, referentnih motki i mjernih markacija kao što je prikazano slikom 2. TRITOP-om su određene prostorne koordinate mjernih točaka, dok je prikaz rezultata obrade proveden programskim paketom IMAGEWARE. Nova verzija sustava TRITOP-V5.3 omogućuju kompletnu obradu i prikaz rezultata, tako da dodatni programski paketi (poput IMAGEWARE-a) nisu više potrebni. Nadalje, na osnovu kontrasta objekta i okoline može se automatski odrediti prostorni položaj i oblik bridova ili linija nacrtanih na objektu, tako da je postupak snimanja i obrade rezultata mjerenja osjetno ubrzan i pruža znatno više informacija.



Slika 2. Fotogrametrijski sustav TRITOP (GOM mbH, Njemačka)

Fig. 2 Photogrammetric system TRITOP (GOMmbH, Germany)

Postupak mjerenja fotogrametrijskim sustavom dijeli se u nekoliko koraka, a to su:

- a) izbor objekta i strategije snimanja
- b) postavljanje mjernih točaka
- c) priprema fotoaparata za snimanje
- d) snimanje objekta
- e) obrada fotografija
- f) prikaz i analiza rezultata

Svaki od ovih koraka objasniti će se na primjeru snimanja sekcije palube u fazi montaže u trup broda.

4.1. Izbor objekta i strategije snimanja

Izabrana je sekcija palube skladišnog prostora broda za prijevoz sirove nafte. Paluba se montira u trup tako da se oslanja dijelom pregrade na uzdužnu pregradu koja se nalazi u centralnoj liniji broda, a okvirne sponje palube se spajaju s okvirnim rebrima na boku broda. Snimanjem je bilo potrebno utvrditi kolika su odstupanja okvirnih sponja sekcije palube od okvirnih rebara na brodu gdje se trebaju spojiti, jer su se na tim mjestima pri montaži palube znale događati velike razlike. Ovisno o veličini i obliku odabranoga mjernoga objekta razrađuje se strategija snimanja: koliko i kako velike mjerne točke koristiti, kako pripremiti objekt, koliko je fotografija potrebno, iz kojih položaja će se snimati, kako provesti analizu itd.

4.2. Postavljanje mjernih točaka

U drugom koraku na objekte se postavljaju mjerne točke. Nužan uvjet za precizno određivanje točaka u programskom paketu TRITOP je njihov izraziti kontrast tj. crna točka na bijeloj podlozi ili bijela točka na crnoj podlozi. Prema vrsti razlikuju se kodirane i nekodirane mjerne točke, prikazane slikama 3 i 4. Kodirane točke programski paket TRITOP prepoznaje prema definiranom bar kodu, a potrebne su za automatsko određivanje položaja kamere kod svakog snimanja (predorijentacija kamere). Nekodirane točke se postavljaju na karakteristična mjesta strukture objekta kako bi se dobile potrebne mjerne informacije.



13.

Slika 3. Kodirana mjerna točka

Fig. 3 Encoded measure point



Slika 4. Nekodirana mjerna točka

Fig. 4 Unencoded measure point

U ovom primjeru, prikazanom slikama 5 i 6, točke su postavljene na sekciji uz rub opločenja palube i na okvirnim sponjama, a u trupu gdje se montira sekcija palube na okvirnim rebrima i na rubu opločenja. Veća točnost rezultata će se postići ako su točke jednolično raspoređene po objektu i ako je snimanje provedeno iz više položaja kamere.



Slika 5. Mjerne točke na sekciji palube

Fig. 5 Measure points on the deck section



Slika 6. Mjerne točke na trupu broda

Fig. 6 Measure points on the ship hull

4.3. Priprema fotoaparata za snimanje

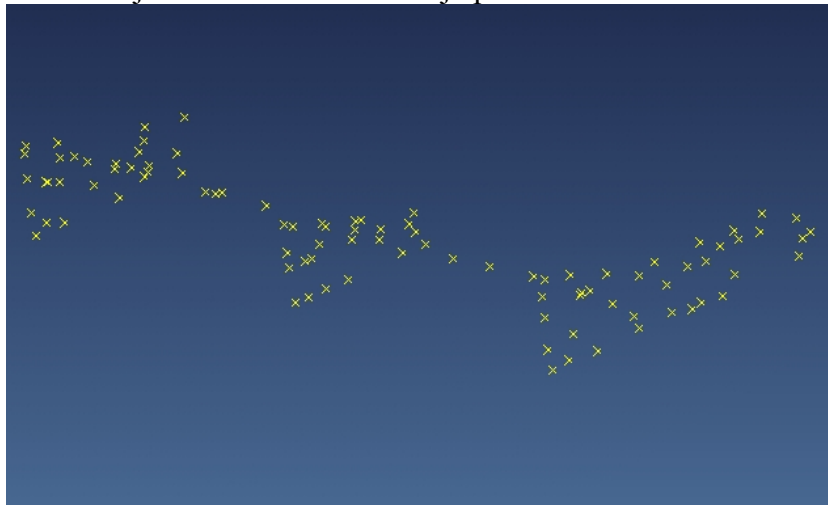
U trećem koraku priprema se oprema za snimanje. Potrebno je odrediti udaljenost snimanja, prilagoditi parametre fotoaparata uvjetima, regulatore na objektivu fiksirati i držati istim tokom cijelog snimanja. Prema potrebi koristi se bljeskalica ili dodatno osvjetljenje.

4.4. Snimanje objekta

Za postizanje visoke mjerne točnosti poželjno je da svaka točka bude snimljena u tri ili više fotografija snimljenih pod različitim kutovima. Kod snimanja objekata velikih dimenzija treba paziti na dovoljno međusobno preklapanje snimaka, kako bi se sve mjerne točke u analizi povezale u jednu cjelinu. Da bi se rezultati mogli vjerno prikazati tj. da bi mjerne točke mogle zauzeti realni položaj u prostoru potrebno je definirati mjerilo snimanja. To se postiže pomoću referentnih motki ili zadavanjem izmjerene udaljenosti između dvije ili više točaka. Referentne motke su štapovi s mjernim točkama poznatoga međusobnog razmaka koji se postavljaju na objekt.

4.5. Obrada fotografija

Obrada fotografija i proračun prostornih koordinata točaka na objektu obavlja se programskim paketom TRITOP. U slikama se prvo automatski pronalaze položaji mjernih točaka, odnosno ustanove njihove slikovne koordinate. Kodirane točke se prepoznaju preko njihovog bar koda, tako da im je redni broj jednoznačno određen. Na temelju kodiranih točaka TRITOP provodi predorijentaciju, odnosno određivanje približnog položaja kamera i točaka u prostoru. Nakon što su slike uspješno orijentirane, moguća je automatska identifikacija nekodiranih točaka. Na kraju slijedi metoda izjednačenja zrakovnog snopa kojom se cijeli rezultat optimira u cilju minimizacije mjernih pogrešaka. Ispravno pripremljena i snimljena mjerenja obrađuju se potpuno automatski, a proces kod jednostavnih objekata traje samo nekoliko minuta. Rezultat obrade fotografija je oblak točaka prikazan slikom 7 ili tekstualna datoteka s podacima o mjernim točkama kao što je prikazano slikom 8.



Slika 7. Oblak mjernih točaka sekcije palube

Fig. 7 Cloud of deck section measure points

Label	X-Coord	Y-Coord	Z-Coord
"1000"	-4822.9785	-365.75314	-757.63404
"1001"	-3376.4319	-117.03488	-383.02818
"1002"	-2898.3507	-37.27705	-260.32791
"1003"	-3528.0063	-395.89199	-1986.6724
"1012"	-2320.0042	271.08285	-93.357913
"1013"	-1901.9163	145.37217	-1.405824
"1014"	-923.95747	351.7783	252.65726
"1015"	-366.71123	338.3334	643.48149
"1016"	939.01896	608.49833	730.12817
"1017"	2132.8306	815.70625	1039.3254
"1018"	2727.885	953.96668	1196.175
"1110"	4926.6696	1618.6935	687.43461
"1204"	-4334.2562	-1539.8452	-585.52152
"1205"	-4169.2119	-1499.1696	-1285.349
"1206"	-4389.7681	-498.36558	-1090.4548
"1207"	-4058.2442	-1089.3297	-1988.4738
"1208"	-3626.0488	-715.67827	-2126.4334
"1209"	-3830.1094	-1413.9123	-2636.3945
"1210"	-3855.2158	-479.57402	-3169.4221
"1211"	-3700.8374	-1169.6079	-3301.2528
"1212"	-3588.7523	-542.48399	-4151.9737
"1304"	-114.49739	-801.73242	503.15797
"1305"	-152.8732	242.20595	-70.509017
"1306"	-121.56267	-232.69896	145.99968
"1307"	-32.262374	-785.92515	181.42854
"1308"	76.731093	-759.51046	-247.82175
"1309"	86.378947	102.66051	-897.29923
"1310"	212.49968	-728.2269	-782.32485
"1311"	296.91619	-149.46772	-1549.1382
"1312"	680.88043	195.82874	-1678.7709
"1313"	636.36976	-464.68404	-1741.5643
"1404"	4082.4733	-81.881255	1594.1789
"1405"	4172.3628	-11.451699	1207.1377
"1406"	4064.1437	908.4444	1026.6396
"1407"	4334.3081	611.8297	197.62324
"1408"	4358.4456	-18.449528	506.89584
"1409"	4446.4288	892.65519	-422.1946

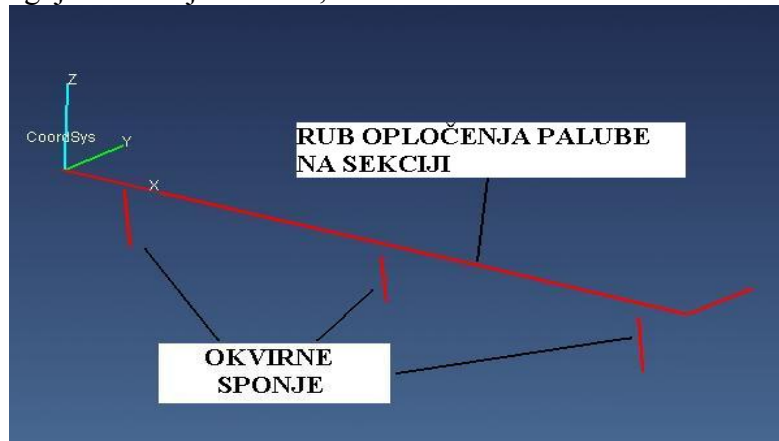
end c\loud

Slika 8. Segment tekstualne datoteke izlaznih rezultata

Fig. 8 Segment of the output text file

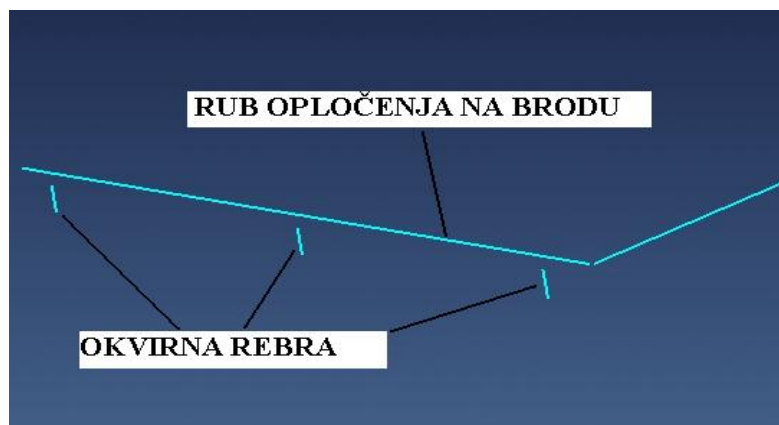
4.6. Prikaz rezultata

Budući da na raspolaganju nije bila nova verzija TRITOP-V5.3, prikaz rezultata u ovome radu proveden je pomoću programskog paketa IMAGEWARE. Iz oblaka mjernih točaka odabrane su karakteristične točke pomoću kojih su rekonstruirane za analizu bitne linije. U ovom primjeru to su položaji okvirnih sponja i rebara, te rub opločenja palube sekcije i mjesta na brodu gdje se sekcija montira, kao što se vidi slikama 9 i 10.



Slika 9. Okvirne sponje i rub opločenja palube

Fig. 9 Web beam and deck plating edge on the deck section

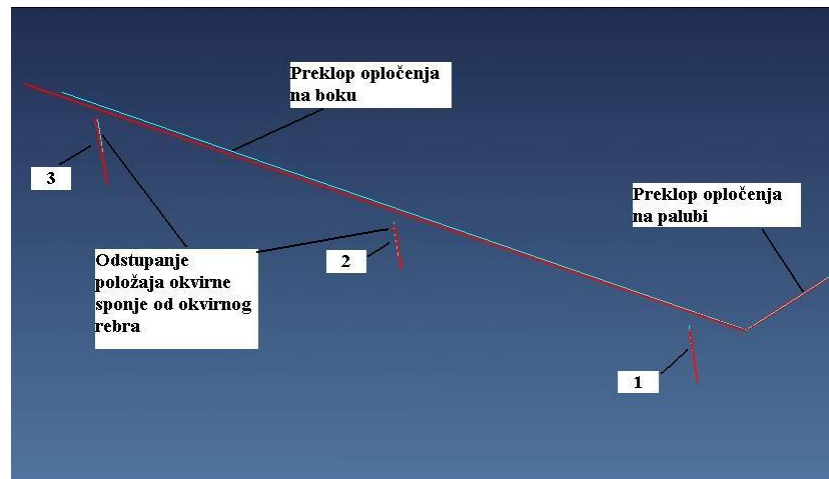


Slika 10. Okvirna rebra i rub opločenja na brodu

Fig. 10 Web frames and deck plating edge on the ship hull

Oba mjerenja se postavljaju u zajednički koordinatni sustav, te se virtualno spajaju u cjelinu na osnovu koje se utvrđuju odstupanja oblika sekcije od mjesta na brodu kamo ona mora biti ugrađena, kao što je prikazano slikom 11. Scenarij spajanja sekcija u računalu može biti različit, jer se mogu ostvariti sva translacijska i rotacijska gibanja, no poželjno je da virtualna montaža što vjernije odgovara stvarnom postupku montaže na navozu.

Virtualno spajanje palube u trup broda u ovom primjeru gdje su se provjeravali položaji okvirnih sponja i okvirnih rebara napravljeno je tako da se u prvom koraku spojila okvirna sponja i okvirno rebro na poziciji 1. U drugom koraku pozicija 1 se držala nepomičnom, a okvirne sponje na pozicijama 2 i 3 su se rotacijom oko vertikalne osi dovodile u najbolji položaj prema okvirnim rebrima. Usporedbom položaja okvirnih sponja i rebara utvrđena su odstupanja na pozicijama 2 i 3 u iznosu do 10 mm, dok odstupanja na poziciji 1 nema, jer je takav uvjet korišten kod poklapanja koordinatnih sustava. Na slici su također prikazani preklopi opločenja na boku koji prosječno iznose 40 mm, te na palubi gdje njihova prosječna vrijednost iznosi 20 mm.



Slika 11. Prikaz virtualno montirane sekcije palube u trup broda

Fig. 11 View of virtually mounted deck section into the ship hull

5. Zaključak

Brodograđevni proizvodni proces nužno treba brzu i pouzdanu metodu kontrole dimenzija u svim dijelovima procesa, a pogotovo u fazama predmontaže, montaže na navozu i opremanja što bi djelovalo na skraćivanje proizvodnog procesa i smanjenje troškova proizvodnje. Primjerom su se ukratko prikazale mogućnosti fotogrametrijske metode kontrole dimenzija. Prednost u odnosu na sadašnje postupke kontrole dimenzija je u prvom redu mogućnost dobivanja velikog broja mjernih točaka pomoću kojih se analiza oblika i dimenzija sekcije može napraviti puno bolje i kvalitetnije. Nadalje, mogućnost virtualnog spajanja sekcija na računalu svakako podiže kvalitetu kontrole dimenzija i oblika, te daje mogućnost ranijih intervencija na strukturi kada je to puno lakše i jeftinije napraviti. Razvoj programskog paketa TRITOP se ne zaustavlja. Svaka slijedeća verzija olakšati će njegovu upotrebu i povećati njegove mogućnosti. U novom programskom paketu V5.3 već je sada ugrađeno automatsko traženje bridova na osnovu kontrasta objekta i okoline, prepoznavanje nacrtanih ili nalijepljenih linija na objektu, mjerenje provrta i otvora, te određivanje položaja i oblika cijevi u prostoru. Rezultati se mogu uspoređivati na različite načine i prikazati u obliku izvještaja o kontroli kvalitete.

Navedene prednosti korištenja fotogrametrije, kao i one koje tek treba otkriti razlog su za daljnja i još detaljnija istraživanja primjene metode u brodogradnji. Cilj je fotogrametrijsku kontrolu dimenzija i oblika uklopiti u proizvodni proces na način da bude brza i pouzdana, da na vrijeme otkriva nepravilnosti i pomaže u njihovom otklanjanju, a da pri tom sam proces proizvodnje ne bude prekinut ili ometen.

LITERATURA

- [1] SLADOLJEV, Ž: Tehnologija gradnje plovnih objekata, skripta – interno izdanje, FSB, 1987.
- [2] GOMERČIĆ, M.; JECIĆ, S.: A New Self-Calibrating Optical Method For 3d-Shape Measurement, 17th Symposium "Danubia-Adria" on Experimental Methods in Solid Mechanics, Prag, 2000.
- [3] GOMERČIĆ, M: Doprinos automatskoj obradi optičkog efekta u eksperimentalnoj analizi naprezanja, Doktorska disertacija, Zagreb 1999.
- [4] JOHNSON, G. W.; WALKER H. F.: Automated Measurement Techniques in Robotics and Quality Control with Digital-Close Range Photogrammetry, Flexible Automation and Intelligent Manufacturing Conference, Juli 1-3, 1998, Portland, SAD
- [5] THIYAGARAJAN R.: Use of 3D Laser Scanning and Close Range Photogrammetry for Shipbuilding, 2003 Ship Production Track of the World Maritime Conference, October 17-20, 2003, San Francisco, SAD