

# Algoritam za modeliranje i procjenu opsega debla na temelju fotogrametrijskog oblaka točaka

Luka JURJEVIĆ – Jastrebarsko<sup>1</sup>, Mateo GAŠPAROVIĆ,  
Robert ŽUPAN – Zagreb<sup>2</sup>, Hrvoje MARJANOVIĆ,  
Ivan BALENOVIĆ – Jastrebarsko<sup>1</sup>

*SAŽETAK.* Potrajno gospodarenje šumama zahtijeva prostorno i vremenski određene informacije o stanju šume koje se još uvijek u mnogim zemljama svijeta, uključujući i Hrvatsku, prikupljaju na tradicionalan način, terenskom izmjerom. Iako terenska izmjera pruža informacije zadovoljavajuće točnosti, ona zahtijeva dugotrajan i intenzivan rad. Stoga se u novije vrijeme intenzivno istražuju mogućnosti upotrebe laserskih skenera i fotogrametrijskih metoda kao brza i efektivna alternativa klasičnom pristupu izmjere šuma. U ovom je radu prikazan algoritam za ekstrakciju opsega i modeliranje debla iz fotogrametrijskog oblaka točaka baziran na RANSAC (engl. Random Sample Consensus) algoritmu i metodi rastavljanja na glavne komponente (engl. PCA – Principal Component Analysis). Analizirana je točnost ekstrakcije opsegâ na jednom deblu u ovisnosti o tipu kalibracije kamere (predkalibrirana, samokalibracija s inicijalnim parametrima, samokalibracija). Najmanja pogreška dobivena je predkalibriranom kamerom (RMSE=1,23 cm), slijede samokalibracija s inicijalnim parametrima (RMSE=1,35 cm) i samokalibracija (RMSE=1,63 cm). Predstavljeni algoritam pokazuje veliki potencijal primjene fotogrametrijskih mjerenja pri određivanju opsega debla, uz određene preinake u pristupu.

*Ključne riječi:* terestrička fotogrametrija, oblak točaka, RANSAC, PCA.

<sup>1</sup> Luka Jurjević, mag. ing. geod. et geoinf., Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: lukaj@sumins.hr,

dr. sc. Hrvoje Marjanović, Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: hrvojem@sumins.hr,

dr. sc. Ivan Balenović, Hrvatski šumarski institut, Cvjetno naselje 41, HR-10450 Jastrebarsko, Hrvatska, e-mail: ivanb@sumins.hr,

<sup>2</sup> doc. dr. sc. Mateo Gašparović, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: mgasparovic@geof.hr,

izv. prof. dr. sc. Robert Župan, Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, HR-10000 Zagreb, Hrvatska, e-mail: rzupan@geof.hr.

## 1. Uvod

Šuma je najrašireniji kopneni ekosustav na Zemlji te pruža mnogo direktnih i indirektnih dobrobiti čovječanstvu (FAO 2010, Pan i dr. 2013). Potrajno gospodarjenje šumama zahtijeva prostorno i vremenski određene informacije o stanju i razvoju šume koje se još uvijek u mnogim zemljama svijeta, uključujući i Hrvatsku, prikupljaju na tradicionalni način, terenskom izmjerom (Stepper i dr. 2014, Balenović i dr. 2017). Iako terenska izmjera pruža informacije zadovoljavajuće točnosti, ona zahtijeva dugotrajan i intenzivan rad, a u pojedinim je slučajevima pristup određenim šumskim područjima otežan ili čak nemoguć (Lu 2006). Upravo je zbog toga prepoznat potencijal upotrebe metoda daljinskih istraživanja pri izmjeri šuma. Među različitim metodama daljinskih istraživanja u posljednja dva desetljeća lasersko skeniranje iz zraka (*engl. ALS – Airborne Laser Scanning*) temeljeno na LiDAR (*engl. Light Detection and Ranging*) tehnologiji pobuđuje veliko zanimanje istraživača diljem svijeta te pronalazi operativnu primjenu u šumarstvu mnogobrojnih gospodarski razvijenih zemalja u kojima se LiDAR podaci redovito ažuriraju (npr. Finska, Norveška, Švedska) (Rahlf i dr. 2014). Visokoprecizni tro-dimenzionalni (3D) oblak točaka dobiven LiDAR tehnologijom omogućuje karakterizaciju vertikalne strukture šumskih sastojina, a u kombinaciji s referentnim terenskim podacima te izrađenim modelima i procjenu strukturnih elemenata šumskih sastojina (npr. visina, prsni promjer, drvena zaliha, biomasa), i to uglavnom na razini primjernih ploha (Rahlf i dr. 2014, White i dr. 2016). Također, u posljednje vrijeme, i istraživanja o mogućnosti primjene terestričkog laserskog skeniranja u izmjeri šuma pobuđuju sve veće zanimanje istraživača. Međutim, glavni ograničavajući faktor za upotrebu bilo zračnog ili terestričkoga laserskog skeniranja njihovi su visoki troškovi.

Osim metoda laserskog skeniranja, tijekom posljednjih nekoliko godina, veliku pozornost zauzimaju istraživanja o mogućnosti upotrebe oblaka točaka dobivenog digitalnom fotogrametrijom (Gašparović i dr. 2017). Pritom znatno prednjače istraživanja temeljena na aerosnimkama (White i dr. 2016, Gašparović i dr. 2017). Naime, primjena fotogrametrijskih metoda u posljednjih je desetak godina doživjela znatan napredak, i to ponajprije razvojem DIM (*engl. Dense Image Matching*) algoritama za produciranje oblaka točaka visoke gustoće te razvojem SfM (*engl. Structure from Motion*) algoritma, koji je anulirao potrebu za manualnim mjerenjima veznih točaka u fotogrametrijskoj izmjeri. Razvojem spomenutih algoritama potaknuta su istraživanja o mogućnosti primjene aerofotogrametrije u šumarstvu (White i dr. 2016). Međutim, primjena terestričke fotogrametrije u šumarstvu nije dovoljno istražena, barem ne u tolikoj mjeri da bi opravdala svoju praktičnu primjenu. Stoga je u ovom istraživanju predstavljen algoritam za modeliranje debela te procjenu opsega (prsno promjera) primjenom metoda terestričke fotogrametrije. Također je ispitan utjecaj triju načina kalibracije kamere (predkalibracija, samokalibracija s inicijalnim parametrima i samokalibracija bez inicijalnih parametara) na točnost određivanja opsega debela.

## 2. Prikupljanje i procesuiranje podataka

Predmet je ovog istraživanja deblo hrasta lužnjaka (*Quercus robur* L.) koje se nalazi u gospodarskoj jedinici Jastrebarski lugovi, sastavnom dijelu šumskoga



Slika 1. Canon EOS 80D s objektivom promjenljive žarišne daljine 18–55 mm.

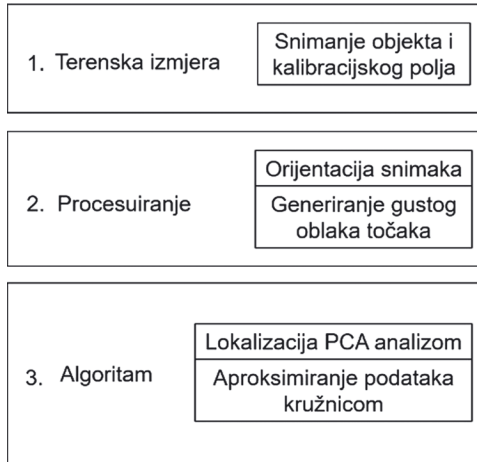
kompleksa Pokupski bazen, u neposrednoj blizini Jastrebarskog. Više informacija o predmetnim sastojinama hrasta lužnjaka može se naći u Ostrogović Sever i dr. (2017).

Za snimanje je upotrijebljen amaterski fotoaparat Canon EOS 80D (slika 1) s pripadnim objektivom promjenljive žarišne daljine od 18 mm do 55 mm. Specifikacije fotoaparata navedene su u tablici 1. Pretpostavka je da su parametri unutarnje orijentacije te kamere nestabilni u vremenu, te da ih je prilikom svake 3D rekonstrukcije potrebno ponovno odrediti.

Tablica 1. Specifikacije upotrijebljenog fotoaparata Canon EOS 80D.

Parametar	Vrijednost
Naziv kamere	Canon EOS 80D
Megapiksela	24,2 MP
Veličina senzora	APS-C 22,5 mm x 15,0 mm
ISO	100 – 256000
Brzina zatvarača	1/8000 s – 30 s
Dimenzije	139,0 mm x 105,2 mm x 78,5 mm
Masa	oko 730 g (CIPA standard)
Zatvarač	f/3,5–5,6
Žarišna udaljenost	18–55 mm

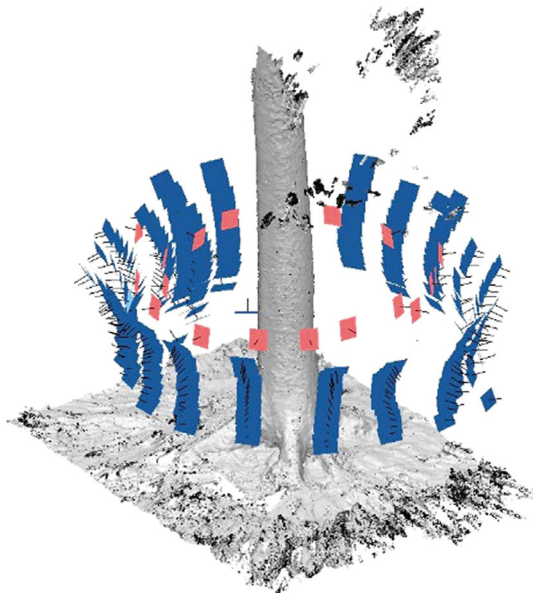
Slika 2 prikazuje pojednostavnjeni hodogram provedenih postupaka. Prvi se dio hodograma odnosi na terensku izmjeru, odnosno snimanje predmetnog debla i kalibracijskog polja, s tim da u jednom od triju odrađenih testova kalibracija na testnom polju nije primijenjena. Drugi se dio hodograma odnosi na fotogrametrijsku obradu snimaka, odnosno orijentaciju i generiranje gustog oblaka točaka. Treći se dio hodograma odnosi na razvijeni algoritam za određivanje opsega i modeliranje debla.



Slika 2. Hodogram provedenih postupaka.

S obzirom na to da je riječ o amaterskoj kameri i objektivu, objektiv je prije snimanja imobiliziran ljepljivom vrpcom te je ostao takav tijekom cijeloga postupka snimanja. U konačnici je za potrebe 3D rekonstrukcije debla snimljeno 316 fotografija, dok je za potrebe predkalibracije kamere i samokalibracije s inicijalnim parametrima snimljeno 55 fotografija kalibracijskog polja.

Primijenjena je tzv. *stop and go* metoda snimanja uz preinaku da se sa svake pozicije nije snimala samo jedna fotografija već vertikalni niz fotografija (slika 3) uz



Slika 3. Model debla, vertikalni nizovi fotografija (plavo), te dodatni set snimaka (crveno).

male varijacije u horizontalnoj udaljenosti od objekta i kutu između optičke osi objektiva i horizontalne ravnine. Putanja kretanja prilikom snimanja objekta opisuje kružnicu. Snimljena su ukupno 22 vertikalna niza snimaka uz prosječan pomak po kružnici od 16 stupnjeva. U svakom vertikalnom nizu snimljeno je prosječno 13 fotografija. Uz vertikalne nizove snimljene pri istoj udaljenosti od debla snimljen je još jedan dodatni skup snimaka pozicije kojih opisuju kružnicu, ali na različitoj udaljenosti od debla. Pritom je kamera zaokrenuta tako da je horizontalna os senzora kamere bila postavljena vertikalno, a optička os objektiva horizontalno u prostoru. Na taj način pokušalo se umanjiti moguću korelaciju pojedinih parametara unutarne i vanjske orijentacije u izjednačenju (*engl. adjustment*) prilikom rekonstrukcije u sklopu samokalibracije.

## 2.1. Kalibracija kamere

Kalibracija kamere postupak je određivanja parametara unutarne orijentacije kamere. Kada se u fotogrametrijske svrhe upotrebljava amaterska kamera, nužna je kalibracija osnovnih, ali i dodatnih parametara unutarne orijentacije (Luhmann i dr. 2013, Gašparović i Gajski 2016). Dodatnim parametrima nastoje se ukloniti različiti utjecaji koji dovode do odstupanja od idealne centralne projekcije, u prvom redu utjecaji leće kamere, odnosno pogreške preslikavanja koju unosi leća u model centralne projekcije, te nesavršenosti u izradi senzora. Ako se kalibracija obavlja u sklopu rekonstrukcije objekta (samokalibracija), najčešće se upotrebljavaju softveri Agisoft PhotoScan (URL 1), Pix4D mapper (URL 2) i dr. U slučaju kada se obavlja nezavisna kalibracija prije rekonstrukcije objekta (predkalibracija), najčešće se upotrebljavaju softveri Agisoft Lens (URL 1), Australis (URL 3) i dr. Model centralne projekcije, odnosno kolinearnosti prikazan je jednadžbom (1)

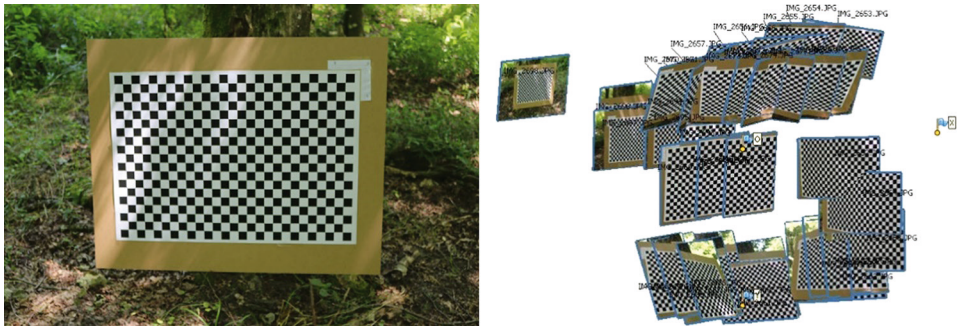
$$\begin{aligned}x' &= x'_0 + z' \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta x' \\y' &= y'_0 + z' \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} + \Delta y'.\end{aligned}\quad (1)$$

Pritom su  $x'$  i  $y'$  slikovne koordinate točke koja se projicira,  $r_{ij}$  su elementi rotacijske matrice vanjske orijentacije,  $z'$  je konstanta kamere,  $x'_0$  i  $y'_0$  su koordinate glavne točke autokolimacije (*engl. PPA – Principal Point of Autocollimation*), dok su  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  koordinate točke koja se projicira, a  $X_0$ ,  $Y_0$  i  $Z_0$  položajni parametri vanjske orijentacije snimke u referentnom koordinatnom sustavu.  $\Delta x'$  i  $\Delta y'$  su utjecaji koji se modeliraju dodatnim parametrima. Neki od utjecaja koji se modeliraju su radijalna i tangencijalna distorzija, nejednakost mjerila po osima senzora (odstupanje piksela od kvadratnog oblika) (Luhmann i dr. 2013), neokomitost osi (Mullen 2004), utjecaj rotirajućeg zatvarača (*engl. rolling shutter*) (Vautherin i dr. 2016) i dr. Metoda samokalibracije omogućava određivanje elemenata unutarne orijentacije (osnovnih i dodatnih) u sklopu 3D rekonstrukcije objekta. Pritom nikakvi referentni podaci nisu potrebni ako je geometrija konfiguracije snimanja kvalitetna, te ako nije nužno da rekonstruirani objekt bude u mjerilu.

U ovome radu ispitan je utjecaj kalibracije kamere na rekonstrukciju pojedinog debla. Ispitana su tri različita slučaja kalibracije kamere. U prvom slučaju upotrijebljeni su fiksni parametri unutarne orijentacije kamere koji su prethodno

određeni kalibracijom na 2D šahovskom testnom polju (tzv. predkalibracija). U drugom slučaju kamera je kalibrirana u sklopu rekonstrukcije objekta, ali uz upotrebu početnih parametara unutarnje orijentacije (tzv. samokalibracija s inicijalnim parametrima) prethodno određenih metodom kalibracije na 2D šahovskom testnom polju (Zhang 2000). U trećem slučaju kamera je kalibrirana u sklopu rekonstrukcije objekta, bez predznanja o parametrima kamere (tzv. samokalibracija bez inicijalnih parametara). Predkalibracijom kamere direktno se u rekonstrukciju objekta unosi podatak za modeliranje radijalne distorzije koja ima najveći utjecaj pri rekonstrukciji objekta (Gašparović i Gajski 2016). Sama predkalibracija kamere obavljena je pomoću slobodnog softvera Agisoft Lens. Objekt (deblo) je rekonstruiran na ta tri načina. U svakom postupku kalibracije upotrijebljeni su svi osnovni parametri unutarnje orijentacije (koordinate PPA i konstanta kamere), tri parametra radijalne, dva parametra tangencijalne distorzije, te parametri odstupanja piksela od kvadratnog oblika i neokomitost osi senzora. Pretpostavka je da se dobiveni oblaci točaka neće naočigled razlikovati, te da razlika u pristupu neće utjecati na kompletnost modela. Međutim, moguće je očekivati razliku u vrijednostima dobivenih opsega upotrebom algoritma za procjenu opsega debila.

Primjena kalibracije na 2D šahovskom polju uvelike je ispitana i korištena u praksi (URL 4, De la Escalera i Armingol 2010, Jurjević i Gašparović 2017). Što se tiče modela kamere, upotrijebljen je model centralne projekcije s Brownovim modelom radijalne i tangencijalne distorzije (Fryer i Brown 1986) koji modelira deformacijski utjecaj korištenja leće. Samokalibracija je analitička metoda kalibracije, te je implementirana u gotovo svim fotogrametrijskim programskim paketima (npr. Agisoft PhotoScan, Pix4D, Photomod i dr.). To je čini fleksibilnom i široko primjenljivom, ali i podložnom korelacijama parametara (Tang 2013). Najčešće koreliraju parametri vanjske orijentacije (u smjeru osi snimanja) i žarišna duljina leće, te koordinate PPA i parametara tangencijalne distorzije (Luhman i dr., 2013). Na slici 4a prikazano je korišteno šahovsko polje, dok je na slici 4b prikazana konfiguracija snimanja šahovskog polja.



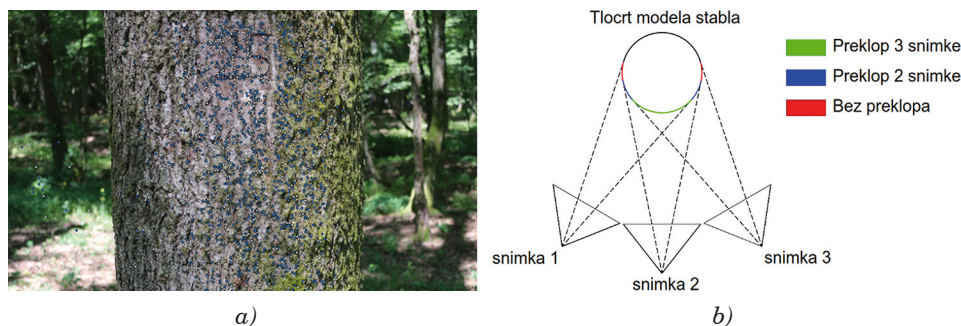
Slika 4. a) Šahovsko polje, b) konfiguracija snimanja šahovskog polja.

## 2.2. Orijentacija snimaka i produciranje gustog oblaka točaka

Preduvjet generiranja gustog oblaka točaka je orijentacija snimaka. Orijentacija snimaka nekad je bila mukotrpan, vremenski i računski zahtjevan postupak, dok

je razvojem SfM algoritama taj postupak postao potpuno automatiziran. Za potrebe ovog istraživanja korišten je softver Agisoft PhotoScan (verzija 1.4.0) koji upotrebljava implementirani inkrementalni SfM algoritam (Schonberger i Frahm 2016). Proizvod klasičnog SfM algoritma je model kreiran u koordinatnom sustavu prve snimke kojom je algoritam započeo rekonstrukciju. Dodavanjem kontrolnih točaka objekt se transformira u referentni koordinatni sustav, dok se dodavanjem mjerila model skalira u realne veličine.

Kvaliteta orijentacije snimaka uvelike ovisi o distribuciji točaka na snimkama. Na slici 5a vidljiva je distribucija veznih točaka na snimci debla. Većina veznih točaka sa snimke nalazi se na predmetnom deblu, dok je manji dio u daljini, na krošnjama drugih stabala, te na tlu u neposrednoj blizini. Uzmemo li da je žarišna udaljenost objektiva kamere tijekom cjelokupnog snimanja konstantna, distribucija veznih točaka ovisi o udaljenosti od objekta (debla) i kutu rotacije kamere oko objekta. Slika 5b zorno prikazuje kako mali pomak u kutu između stajališta kamere uzrokuje veliku promjenu u površini objekta koja se vidi na snimci. Zbog toga se na slici 5a većina automatski detektiranih veznih točaka (plave točke) nalazi na sredini debla.



Slika 5. a) Distribucija veznih točaka na snimci debla, b) geometrija preklopa na kružnom objektu.

U slučaju kvalitetno predkalibrirane kamere, točke u daljini dodatno stabiliziraju rotaciju vanjske orijentacije snimke oko vertikalne osi. S druge strane, uzme li se u obzir njihova brojnost i distribucija, u slučaju samokalibracije (kalibracije kamere u sklopu rekonstrukcije objekta) one ne pridonose stabilizaciji orijentacije snimaka.

Fotogrametrija je doživjela veliku popularizaciju razvojem prethodno spomenutog SfM algoritma, ali i razvojem DIM algoritama. Otkad je predstavljen SGM (*engl. Semi Global Matching*) algoritam (Hirschmuller 2008), primjena fotogrametrije proširila se na široki spektar industrija. Do razvoja DIM algoritama (Ahmadabadian i dr. 2013), fotogrametrija se bazirala na manualnoj stereo izmjeri koja je bila dugotrajna i ovisna o opažaču. Automatske metode DIM-a omogućuju nebrojeno puta veći broj mjerenja od manualne izmjere (koliko piksela toliko i mjerenja), a pritom nemaju moguću sustavnu (subjektivnu) pogrešku opažača. Funkcijom troška (*engl. cost function*) (2) računa se podudaranje piksela duž epipolarne linije rektificiranih snimaka (Hirschmuller 2008):

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} PT \left[ |D_p - D_q| \geq 1 \right]). \quad (2)$$

Prvi dio izraza računa nepodudaranje vrijednosti piksela duž epipolarne linije ( $D_p$ ), dok drugi penalizira nepodudaranje s obzirom na okolinu piksela. Na taj se način postiže zaglađenost objekta te se postiže neprekidnost rekonstruiranog objekta (Hirschmuller 2008).

Za potrebe ovog istraživanja, upotrebom programskog paketa Agisoft PhotoScan, gusti oblak točaka rekonstruiran je temeljem slika četvrte razine slikovne piramide (Adelson i dr. 1984) (*Lowest* parametar rekonstrukcije gustog oblaka točaka). Mjerilo je uvedeno u model direktno, rekonstrukcijom objekta poznatih dimenzija (promjera), zajedno s predmetnim stablom (slika 7a). Procesuiranje je provedeno na računalu koje ima procesor Intel Core i7-3770 3.40 GHz, 32 GB RAM, te grafičku karticu Nvidia Quadro K2000 2 GB. Postupak orijentacije snimaka *High* parametrima i rekonstrukcije oblaka točaka *Lowest* parametrima trajao je 4 sata i 35 minuta.

### 3. Algoritam za modeliranje debela

U dosadašnjim radovima primijenjene su različite metode za modeliranje pojedinačnih stabala na temelju oblaka točaka. Neke od njih se temelje na metodi najmanjih kvadrata (Huang i dr. 2011, Forsman i dr. 2016), neke na RANSAC (*engl. Random Sample Consensus*) algoritmu (Olofsson i dr. 2014, Fritz i dr. 2013), dok se sofisticiranije metode temelje na metodi rastavljanja na glavne komponente (*engl. PCA – Principal Component Analysis*) (Liang i dr. 2012). Metoda najmanjih kvadrata može se upotrebljavati za aproksimaciju skupa točaka kružnicom (npr. pri presjeku debela), ali je osjetljiva na mjerenja koja ne pripadaju skupu (npr. točke koje pripadaju granama, a ne deblu). RANSAC algoritam u iterativnom postupku odabire najpogodniji skup točaka koji može aproksimirati kružnicom. PCA je metoda koja omogućava modeliranje stabla i na višoj razini detalja (*engl. LOD – Level of Detail*), ali zahtijeva dodatnu implementaciju algoritama za klasifikaciju ili slično.

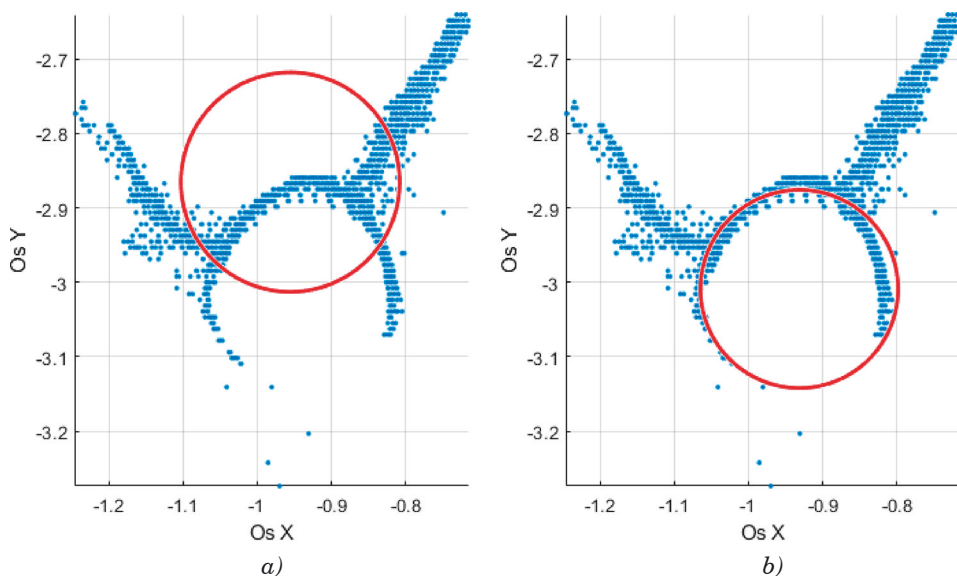
Sve te metode pokazale su se učinkovitima u modeliranju debela iz oblaka točaka dobivenog TLS-om (*engl. Terrestrial Laser Scanner*). Od navedenih, samo je metoda rastavljanja na glavne komponente u kombinaciji s K-means klasterizacijom dokazano učinkovita i kod fotogrametrijskog oblaka točaka (Liang i dr. 2014). U ovom je radu predstavljen algoritam za modeliranje debela na temelju fotogrametrijskog oblaka točaka, RANSAC algoritma i statističke analize PCA rezultata.

RANSAC (Fischler i Bolles 1981) algoritam proizašao je iz domene računalnog vida, ali ima široku primjenu i izvan istraživanja vezanih uz računalni vid. To je algoritam koji u  $N$ -iteracija (3) pronalazi skup podataka koji najbolje odgovara traženom modelu. Izrazom (3) računa se broj iteracija  $N$ , koliko će ih se ponoviti unutar algoritma želimo li pronaći najbolji skup podataka s vjerojatnošću  $p$ , ako očekujemo da je postotak točaka od ukupnog broja točaka koje ne pripadaju skupu koji se modelira jednak  $e$ , te da je za inicijalizaciju modela potreban skup od  $s$  točaka:



$$N = \frac{\log(1 - p)}{\log(1 - (1 - e)^s)} \tag{3}$$

U ovom slučaju riječ je o traženju skupa točaka koji najbolje odgovara matematičkomu modelu kružnice. Na slikama 6a i 6b prikazan je skup točaka poprečnog presjeka stabla koji osim debla zahvaća i grane, te kružnice koje aproksimiraju obrise debla. Na slici 6a prikazana je kružnica dobivena metodom najmanjih kvadrata, dok je na slici 6b prikazana kružnica dobivena RANSAC algoritmom. Iz prikazanog je jasno vidljivo kako RANSAC algoritam ne uzima u obzir točke koje pripadaju granama, već samo skup točaka na deblu. Točke na granama su klasificirane kao točke koje ne pripadaju skupu koji ulazi u model. Izuzimanjem odabranog skupa točaka iz početnog skupa, grane stabla mogu se dalje modelirati npr. modelom linije u prostoru, čime se postiže viša razina LoD-a. Na taj se način procjenjuje opseg debla.



Slika 6. Kružnica dobivena: a) metodom najmanjih kvadrata, b) RANSAC algoritmom.

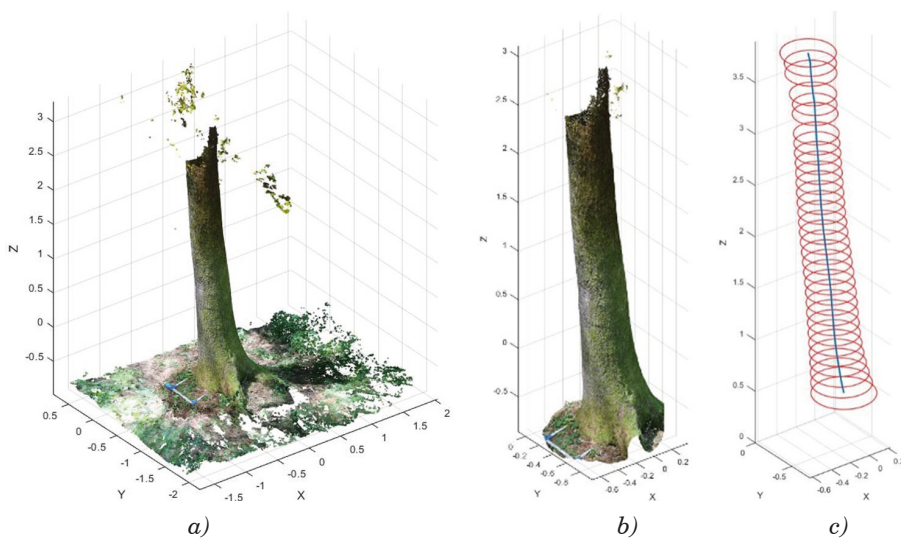
PCA metodom računaju se normale u svakoj točki oblaka točaka, u odnosu na okolinu te točke. Isto se postiže računanjem matrice kovarijance izrazom (4), te traženjem njezinih svojstvenih vrijednosti (Liang i dr. 2012):

$$C_p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (p_j - u)(p_j - u)^T \tag{4}$$

$C_p$  je tražena matrica kovarijance,  $N$  je broj promatranih točaka u okolini točke normalu koje računamo,  $p_j$  je vektor koji sadrži točku, dok je  $u$  vektor težišta promatranih točaka. Rezultat dekompozicije na svojstvene vrijednosti jedinični je vektor normale paralelan sa smjerom najmanjeg raspršenja promatranih točaka.

Pretpostavka je algoritma da je os  $Z$  koordinatnog sustava u kojem se nalazi oblak točaka vertikalna. Ako se za kreiranje modela upotrebljava inkrementalni SfM algoritam, orijentacija koordinatnog sustava objekta jednaka je koordinatnom sustavu prvog modela inkrementalnog postupka. Iz toga proizlazi da će os  $Z$  objektnoga koordinatnog sustava biti vertikalna ako je optička os tijekom snimanja kamere horizontalna u prostoru, a vertikalna os senzora vertikalna u prostoru. Isto je moguće postići upotrebom stabilizatora kamere tijekom snimanja, što nije provedeno u ovom radu. Za potrebe ovoga rada, gusti oblaci točaka prvo su međusobno registrirani, nakon toga su točke tla u neposrednoj blizini stabla korištene za aproksimaciju ravnine. Sljedeći je korak transformacija svih oblaka točaka. Transformacijom se aproksimirana ravnina postavlja u horizontalan položaj, odnosno os  $Z$  u približno vertikalni položaj. Za to je korišten softver CloudCompare (verzija 2.9.1 Stereo) (URL 5).

Algoritam za modeliranje debla radi u dva koraka. Prvi je korak grubo određivanje pozicije debla u danom oblaku točaka, tzv. lokalizacija debla. Sljedeći je korak traženje kružnica duž  $Z$  komponente oblaka točaka suženog na usko područje oko debla. Algoritam je dvostupanjski kako bi se postupak aproksimiranja debla s kružnicama ubrzao. Naime RANSAC algoritam je računski, a time i vremenski, zahtjevan pa traženje kružnice u skupu podataka koji je ne sadrži nije ekonomično. Zbog toga se statističkom analizom normala točaka prvo lokalizira deblo. Statistička analiza normala odnosi se na analizu kutnog odstupanja normala od horizontalne ravnine, odnosno deskriptivnih statističkih mjera (aritmetička sredina, medijan, standardno odstupanje). Očekuje se da je kut između normala točaka na tlu i horizontalne ravnine oko devedeset stupnjeva, a kut između normala točaka na deblu i horizontalne ravnine oko nula stupnjeva. Na slici 7a prikazan je inicijalni oblak točaka, na slici 7b lokalizirani oblak točaka te na slici 7c model debla s razinom detalja LoD2. Na LoD2 modelu debla vidi se da je uspješno modelirano tek na visini od pola metra iznad tla, te kako je geometrija pridanka debla nepo- godna za aproksimiranje kružnicom.



Slika 7. Oblak točaka: a) inicijalni, b) lokalizirani, c) model debla LoD2.

## 4. Rezultati

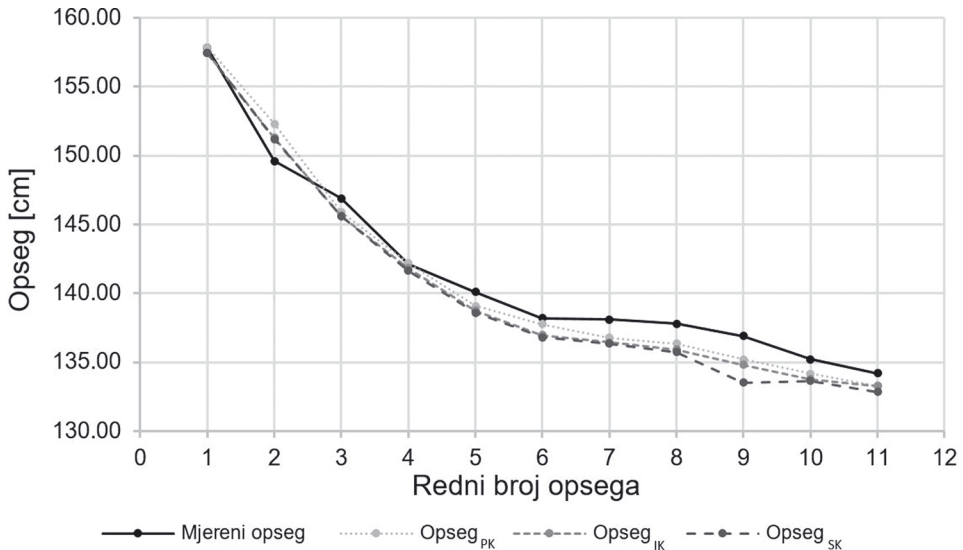
Upotrebom algoritma predstavljenog u ovom istraživanju procesuirana su tri različita oblaka točaka koja se razlikuju s obzirom na prethodno obavljenu orijentaciju snimaka i iz njih su procijenjeni opsezi predmetnog stabla. Prvi oblak točaka dobiven je iz orijentacije koja je uključivala predkalibriranu kameru, druga je uključivala samo inicijalno kalibriranu kameru, dok je treća uključivala samokalibriranu kameru bez upotrebe inicijalnih parametara. Predmetnom je deblu mjernom vrpcom s milimetarskom preciznošću izmjeren opseg u intervalima od svakih deset centimetara, od visine 40 cm iznad tla do 150 cm iznad tla. Ukupno je izmjereno 12 opsega, koji su uspoređeni s rezultatima dobivenim iz oblaka točaka upotrebom RANSAC algoritma. Nakon preliminarnе analize rezultata, iz daljnje je analize isključeno prvo mjerenje na visini od 40 cm jer se pokazalo nepogodnim za aproksimiranje kružnicom. Naime, površina debla se tek nakon neke određene visine može kvalitetno aproksimirati kružnicom. Za aproksimaciju kružnicom upotrijebljeni su slojevi oblaka točaka debljine jedan centimetar projicirani na horizontalnu ravninu. U drugim radovima koji su se bavili analizom laserskog oblaka točaka upotrijebljeni su slojevi od 5 ili 10 centimetara, ali s obzirom na korištenje fotogrametrijskog oblaka točaka koji je i desetak puta gušći od laserskoga (ovisno o GSD-u), sloj od jedan centimetar pokazao se dovoljnim. Izmjereni i procijenjeni opsezi i pripadajuća statistička analiza (usporedba) prikazani su u tablici 2.

Tablica 2. Statistika određivanja opsega stabla rekonstruiranog trima različitim pristupima kalibraciji kamere.

Redni broj opsega	Izmjereni opseg [cm]	Opseg <sub>PK</sub> [cm]	Opseg <sub>IK</sub> [cm]	Opseg <sub>SK</sub> [cm]
1	157,80	157,83	158,16	157,42
2	149,60	152,31	151,00	151,18
3	146,90	145,91	145,63	145,60
4	142,10	142,17	137,03	141,63
5	140,10	139,09	138,74	138,60
6	138,20	137,76	137,29	136,80
7	138,10	136,79	136,45	136,34
8	137,80	136,36	135,91	135,72
9	136,90	135,20	135,98	133,51
10	135,20	134,15	128,73	133,63
11	134,20	133,28	132,93	132,82
RMSE		1,23	1,35	1,63
RMSE (%)		0,86	0,94	1,14
ME		-0,50	-0,90	-1,13
ME (%)		-0,35	-0,63	-0,79
r		0,99	0,99	0,99

PK – predkalibracija; IK – inicijalna kalibracija; SK – samokalibracija

Rezultati prikazani u tablici 2 pokazuju iznimno visoku korelaciju (99%) između referentnih mjerenja i procjene. Nadalje, korijen srednje kvadratne pogreške (*engl. RMSE – Root Mean Square Error*) najmanji je za slučaj s predkalibriranom kamerom. Slučaj rekonstrukcije objekta s inicijalno kalibriranom i samokalibriranom kamerom imaju veći RMSE određivanja opsega. Najveće nepoklapanje procjena opsega između te dvije rekonstrukcije je na devetom opsegu (slika 8). To nepoklapanje vjerojatno je nastalo zbog probabilističke prirode RANSAC algoritma, a ne zbog razlike u rekonstruiranom objektu. Iako kalibracija u sklopu rekonstrukcije objekta (samokalibracija) zbog uključivanja više parametara u izjednačenje pomaže da se minimizira zbroj kvadrata pogrešaka slikovnih mjerenja, to ne znači da je objekt rekonstruiran s minimalnom pogreškom odstupanja od stvarne geometrije objekta. Navedeno se nazire u rezultatima s obzirom na to da je u danom slučaju prosječna popravka mjerenja slikovnih koordinata za slučaj samokalibracije 1,043 pix, za slučaj inicijalne kalibracije 1,127 pix, a za slučaj predkalibrirane kamere 1,508 pix. Iz navedenog se da naslutiti da je za potrebe rekonstrukcije debela bolje upotrijebiti predkalibriranu kameru zbog toga što kontrolne točke koje mogu spriječiti deformacije objekta nisu dostupne te je jedini referentni podatak upravo mjerilo u modelu. Osim toga, geometrija objekta poput debela ne nudi optimalnu distribuciju automatski mjerenih točaka za optimalnu kalibraciju kamere u postupku samokalibracije (slika 5a). Na temelju srednje pogreške (*engl. ME – Mean Error*), ali i prikaza na slici 8, očigledno je da predstavljena metoda uglavnom podcjenjuje izmjerene opsege.



Slika 8. Usporedba mjerenih i procijenjenih vrijednosti opsega.

## 5. Zaključak

U ovom radu prikazan je algoritam za modeliranje debla i procjenu opsega temeljem fotogrametrijskog oblaka točaka. Osim predstavljanja algoritma, ispitana je točnost procjene opsega temeljem triju rekonstrukcija objekta u ovisnosti o pristupu kalibraciji kamere. Točnost procjene ispitana je na objektima rekonstruiranim temeljem snimaka predkalibriranom kamerom, samokalibriranom kamerom s inicijalnim parametrima unutarnje orijentacije te kamerom samokalibriranom bez znanja o inicijalnim parametrima unutarnje orijentacije. Najmanje pogreške dobivene su procjenom na objektu rekonstruiranom na temelju snimaka predkalibriranom kamerom (RMSE=1,23 cm), slijede rekonstrukcija uz samokalibraciju inicijalnim parametrima (RMSE=1,35 cm) i samokalibracija bez inicijalnih parametara (RMSE=1,63 cm). Razlika u točnosti između procjena koje uključuju samokalibraciju je, očekivano, minimalna.

Evidentno je da je točnost prikazane metode dostatna za procjenu opsega debla osobito u praktičnoj primjeni, ali je isto tako jasno da je vremenski neisplativa. U ovom je slučaju terensko mjerenje trajalo deset minuta, dok je fotogrametrijska obrada trajala četiri sata. Modeliranje i procjena parametara trajali su relativno kratko u usporedbi s terenskim mjerenjem i fotogrametrijskom obradom. Bez obzira na to, uz preinake u pristupu (korištenje kalibriranog stereo ili multi-stereo sustava), moguće je drastično smanjiti vrijeme izmjere, ali i orijentacije snimaka. Trajanje generiranja oblaka točaka ovisno je o rezoluciji i broju snimaka. Preporuka je da se testira mogućnost određivanja opsega na temelju snimaka s krupnijim GSD-om. Manualni dio obrade koji uključuje manualnu orijentaciju (rotaciju) oblaka točaka potpuno bi se izbjegao korištenjem stabilizatora za kameru. Kako bi se potvrdila saznanja vezana uz procjenu opsega, predstavljena u ovom istraživanju, potrebno ga je ponoviti na znatno većem uzorku stabala. Osim toga, buduća bi se istraživanja trebala orijentirati ka primjeni na cijeloj plohi, te modeliranju stabla na većoj razini LoD-a.

*ZAHVALA. Ovaj je rad financirala Hrvatska zaklada za znanost projektom IP-2016-06-7686 "Uporaba podataka daljinskih istraživanja dobivenih različitim 3D optičkim izvorima u izmjeri šuma (3D-FORINVENT)".*

*Autori zahvaljuju dr. sc. Tomislavu Dubravcu na pomoći i ustupljanju opreme potrebne za ovo istraživanje.*

**Literatura**

- Adelson, E. H., Anderson, C. H., Bergen, J. R., Burt, P. J., Ogden, J. M. (1984): Pyramid methods in image processing, *RCA engineer*, 29 (6), 33–41.
- Ahmadabadian, A. H., Robson, S., Boehm, J., Shortis, M., Wenzel, K., Fritsch, D. (2013): A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 78, 157–167.
- Balenović, I., Šimić Milas, A., Marjanović, H. (2017): A comparison of stand-level volume estimates from image-based canopy height models of different spatial resolutions, *Remote Sensing*, 9 (3), 205.
- De la Escalera, A., Armingol, J. M. (2010): Automatic chessboard detection for intrinsic and extrinsic camera parameter calibration, *Sensors*, 10 (3), 2027–2044.
- Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981): Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, 24 (6), 381–395.
- Food and Agricultural Organization of United Nations (FAO) (2010): *Global Forest Resources Assessment 2010, Main Report*, FAO Forestry Paper 163, Rim, 340.
- Forsman, M., Börlin, N., Holmgren, J. (2016): Estimation of tree stem attributes using terrestrial photogrammetry with a camera rig, *Forests*, 7 (3), 61.
- Fritz, A., Kattenborn, T., Koch, B. (2013): UAV-based photogrammetric point clouds – Tree stem mapping in open stands in comparison to terrestrial laser scanner point clouds, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 40, 141–146.
- Fryer, J. G., Brown, D. C. (1986): Lens distortion for close-range photogrammetry, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 52 (1), 51–58.
- Gašparović, M., Gajski, D. (2016): Algoritam za preciznu eliminaciju utjecaja distorzije objektiva digitalnih kamera, *Geodetski list*, 70 (1), 25–38.
- Gašparović, M., Seletković, A., Berta, A., Balenović, I. (2017): The Evaluation of Photogrammetry-Based DSM from Low-Cost UAV by LiDAR-Based DSM, *Seefor – South-East European Forestry*, 8 (2), 117–125.
- Hirschmuller, H. (2008): Stereo processing by semiglobal matching and mutual information, *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 30 (2), 328–341.
- Huang, H., Li, Z., Gong, P., Cheng, X., Clinton, N., Cao, C., Wang, L. (2011): Automated methods for measuring DBH and tree heights with a commercial scanning lidar, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 77 (3), 219–227.
- Jurjević, L., Gašparović, M. (2017): 3D Data Acquisition Based on OpenCV for Close-range Photogrammetry Applications, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-1/W1, 377–382.
- Liang, X., Litkey, P., Hyypä, J., Kaartinen, H., Vastaranta, M., Holopainen, M. (2012): Automatic stem mapping using single-scan terrestrial laser scanning, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50 (2), 661–670.
- Liang, X., Jaakkola, A., Wang, Y., Hyypä, J., Honkavaara, E., Liu, J., Kaartinen, H. (2014): The use of a hand-held camera for individual tree 3D mapping in forest sample plots, *Remote Sensing*, 6 (7), 6587–6603.
- Lu, D. (2006): The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation, *International journal of remote sensing*, 27 (7), 1297–1328.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2013): *Close-range photogrammetry and 3D imaging*, Walter de Gruyter, Berlin.

- Mullen, R. (2004): Manual of photogrammetry, American society for photogrammetry and remote sensing, Bethesda.
- Olofsson, K., Holmgren, J., Olsson, H. (2014): Tree Stem and Height Measurements using Terrestrial Laser Scanning and the RANSAC Algorithm, Remote Sensing, 6 (5), 4323–4344.
- Ostrogović Sever, M. Z., Paladinić, E., Barcza, Z., Hidy, D., Kern, A., Anić, M., Marjanović, H. (2017): Biogeochemical Modelling vs. Tree-Ring Measurements – Comparison of Growth Dynamic Estimates at Two Distinct Oak Forests in Croatia, South-east European forestry, 8 (2), 71–84.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Jackson, R. B. (2013): The structure, distribution, and biomass of the world's forests, Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 44, 593–622.
- Rahlf, J., Breidenbach, J., Solberg, S., Næsset, E., Astrup, R. (2014): Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation, Remote Sensing of Environment, 155, 325–333.
- Schonberger, J. L., Frahm, J. M. (2016): Structure-from-motion revisited, In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 4104–4113.
- Stepper, C., Straub, C., Pretzsch, H. (2014): Using semi-global matching point clouds to estimate growing stock at the plot and stand levels: application for a broadleaf-dominated forest in central Europe, Canadian Journal of Forest Research, 45 (1), 111–123.
- Tang, R. (2013): Mathematical Methods for Camera Self-Calibration in Photogrammetry and Computer Vision, PhD thesis, Institute of Photogrammetry, University of Stuttgart, Stuttgart.
- Vautherin, J., Rutishauser, S., Schneider-Zapp, K., Choi, H. F., Chovancova, V., Glass, A., Strecha, C. (2016): Photogrammetric accuracy and modeling of rolling shutter cameras, ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 3 (3), 139–146.
- White, J. C., Coops, N. C., Wulder, M. A., Vastaranta, M., Hilker, T., Tompalski, P. (2016): Remote sensing technologies for enhancing forest inventories: A review, Canadian Journal of Remote Sensing, 42 (5), 619–641.
- Zhang, Z. (2000): A flexible new technique for camera calibration, IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, 22, 1330–1334.

## Mrežne adrese

- URL 1: Agisoft,  
<http://www.agisoft.com/>, (5. 7. 2018.).
- URL 2: Pix4D mapper,  
<https://pix4d.com/>, (17. 7. 2018.).
- URL 3: Australis,  
<http://www.photometrix.com.au/australis/>, (17. 7. 2018.).
- URL 4: Camera Calibration Toolbox for Matlab,  
[http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/), (17. 7. 2018.).
- URL 5: CloudCompare,  
<http://www.danielgm.net/cc/>, (5. 7. 2018.).

# An Algorithm for Tree Modelling and Stem Perimeter Estimation Based on the Photogrammetric Point Cloud

*ABSTRACT.* Diameter at the breast height is one of the most important parameters used in the forestry. In practice, field measurement of the test plots is an intensive and time-consuming process that requires specialized equipment. Recently, the application of terrestrial laser scanner and photogrammetry in forestry, are being investigated as a fast and effective approach to forest plot measurement. In this paper, we present the algorithm for modelling and tree stem perimeter extraction based on the RANSAC (RANdom Sample Consensus) algorithm and PCA (Principle Component Analysis). The accuracy of the tree perimeters extraction is tested on the three tree models differing on the reconstruction type (self-calibration, self-calibration with initial parameters and self-calibration without initial parameters). The smallest error is acquired by estimating perimeters on the model reconstructed with the precalibrated camera (RMSE=1.23 cm), self-calibration with initial parameters (RMSE=1.35 cm) and self-calibration (RMSE=1.63 cm) follow. The presented algorithm indicates the great potential of photogrammetric methods application in tree perimeter estimation, with some changes in the approach.

*Keywords:* terrestrial photogrammetry, point cloud, RANSAC, PCA.

*Primljeno / Received:* 2018-07-19

*Prihvaćeno / Accepted:* 2018-09-07