

FOTOGRAMETRIČNO MERJENJE DEFORMACIJ PRI PREIZKUSIH MEHANSKE ODPORNOSTI KONSTRUKCIJSKIH ELEMENTOV

PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT OF DEFORMATIONS IN TESTS OF MECHANICAL RESISTANCE OF STRUCTURAL ELEMENTS

Dejan Grigillo, Jure Snoj, Matjaž Dolšek

UDK: 528.7:624.014.1/7:539.4
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01
Prispelo: 6. 1. 2016
Sprejeto: 26. 2. 2016

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.13-27
SCIENTIFIC ARTICLE
Received: 6. 1. 2016
Accepted: 26. 2. 2016

IZVLEČEK

V članku so predstavljene metode bližnjepisne fotogrametrije, ki učinkovito dopolnjujejo klasične meritve pomikov pri preiskavah mehanske odpornosti konstrukcijskih elementov. Najprej so opisani fotogrametrični postopki, ki s samodejnimi meritvami na posnetkih omogočajo pridobitev merskih podatkov v realnem času. Poudarek je na enoslikovnih fotogrametričnih metodah, s katerimi določamo deformacije materiala v ravnini preizkušanca iz zaporednih posnetkov, narejenih z enim fotoaparatom. Sledi opis fotogrametričnega postopka za zagotavljanje natančnosti meritev deformacij in demonstracija predlaganega postopka na primeru armiranobetonske stene, ki je bila obremenjena s predpisanimi cikli horizontalnih pomikov ob vzdrževanju konstantne tlačne sile. Z rezultati meritev pokažemo polje pomikov v detajlnih točkah ter izračunamo deformacije na podlagi enoslikovne fotogrametrične metode z uporabo projekтивne transformacije. Pokažemo, da se vzorec deformacij dobro ujema s poškodovanostjo preizkušanca.

KLJUČNE BESEDE

kalibracija fotoaparata, slikovna korelacija, slikovno ujemanje po metodi najmanjših kvadratov, projekтивna transformacija, ciklični preizkus šibko armirane betonske stene, deformacije

ABSTRACT

Methods of close-range photogrammetry, which can be efficiently used to supplement the conventional measurements of displacements during the investigation of the mechanical capacity of structural elements, are presented. In the first part of the paper, an overview of photogrammetric procedures employing automatic measurements that enable the acquisition of measuring data in real time is given. The focus is placed on the single-image photogrammetric methods that use successive images taken with a camera for deformation measurements in the object plane. A description of the photogrammetric workflow follows, which assures precise measurements of deformations, as well as a demonstration of the proposed procedure by means of the cyclic test of the reinforced concrete wall, which was loaded with the prescribed cycles of the horizontal displacements and a constant axial force. The results of the measurements are the displacement field of the measuring points and the deformations, which are calculated on the basis of the single-image photogrammetric method applying projective transformation. We have demonstrated that the pattern of calculated deformations fits very well with the damage observed in the wall.

KEY WORDS

camera calibration, image correlation, least squares matching, projective transformation, cyclic test of lightly reinforced concrete wall, deformations

1 UVOD

Projektiranje konstrukcij postane dovolj zanesljivo, če temelji na eksperimentalnih preiskavah mehanskih lastnosti konstrukcijskih elementov. Na podlagi tega je mogoče razviti in ovrednotiti inženirske modele za oceno nosilnosti, ki se potem uporabljajo pri projektiranju. V potresnem inženirstvu se običajno izvajajo ciklični preizkusi, s katerimi merimo razmerje med silo v preizkušancu in pomikom v izbrani točki, kar določa histerezno zanko preizkušanca. V zadnjem času postaja vse bolj zanimivo napovedovanje poškodovanosti (razvoj razpok in njihova velikost, odpadanje betona, pretrg armature) v odvisnosti od doseženih pomikov. Takšne informacije so zelo pomembne pri napovedovanju finančnega tveganja zaradi potresov (Snoj, 2014; Snoj in Dolšek, 2015a). Klasične metode za merjenje pomikov in deformacij v eksperimentalnih raziskavah v gradbeništvu običajno obsegajo merjenje pomikov v izbranih točkah preizkušanca z induktivnimi merilniki pomikov (angl. *linear variable differential transformer* – LVDT) in merjenje osnih deformacij armature z merilnimi lističi (angl. *strain gauges*). Tako izmerjeni pomiki/deformacije so precej natančni, vendar lahko merimo pomike in deformacije zgolj v eni smeri in še to na zelo omejenem številu merskih mest, zato ne moremo zajeti deformacij na celotni površini preizkušanca. Pri velikih deformacijah obstaja nevarnost poškodbe merilnih senzorjev. Poleg tega je treba lokacijo merilne opreme določiti vnaprej, kar pomeni, da med eksperimentom včasih sploh ne zajamemo želenih meritev, poznejše prilagajanje merilne opreme pa je zelo zamudno, če ne celo nemogoče.

Zaradi opisanih izzivov in težav pri meritvah pomikov s kontaktnimi metodami so se razvile različne brezkontaktno metode, s katerimi lahko meritve izvajamo na velikem številu točk, enakomerno ali slučajno razporejenih po preizkušancu (Barazzetti in Scaioni, 2010). Mednje spadajo klasične geodetske metode, pri katerih se lahko uporablja samodejno sledenje točkam, vendar imajo omejeno uporabo pri dinamičnih preskusih materiala, metode bližnjelikovne fotogrametrije, terestrično lasersko skeniranje in optične interferometrične metode (Chunta in Ioannidis, 2012). V članku se omejimo na metodo bližnjelikovne fotogrametrije, ki rešuje zgoraj navedene pomanjkljivosti klasičnih metod. Takšen pristop omogoča spremljanje deformacij v veliko točkah z dobro prostorsko razporeditvijo po preizkušancu in obenem spremljanje razpok, razvoj poškodovanosti in pomikov tudi pri velikih vsiljenih deformacijah oziroma blizu porušitve.

Bližnjelikovna fotogrametrija omogoča natančna slikovna merjenja in določanje objektnih koordinat. Fotogrametrični zajem podatkov je hiter in brezkontakten, število merskih točk ne vpliva na čas za zajem podatkov, samodejne slikovne meritve zagotavljajo visoko in homogeno točnost rezultatov (Fraser in Gustafson, 1986), poleg tega fotogrametrija omogoča 3D-zajem podatkov in vizualni zapis preizkusa (Whiteman, Lichti in Chandler, 2002). V kombinaciji z računalniškim vidom in uporabo metod samodejne obdelave slik omogoča pridobitev merskih rezultatov v tako rekoč realnem času (El-Hakim, 1986). Meritve s klasičnimi merskimi instrumenti za merjenje deformacij lahko dopolnimo s fotogrametričnimi metodami, ki omogočajo sočasno merjenje poljubnega števila točk na preizkušancu tudi pri dinamičnih preizkusih. Natančnost fotogrametričnih meritev je običajno linearno odvisna od dimenzij preizkušanca. Standardni odkloni meritev dosežajo vrednosti v razmerju 1 : 100.000 glede na velikost preizkušanca (Maas in Hampel, 2006). Fotogrametrične metode delimo na enoslikovne (merjenje 2D-koordinat) ali večslikovne (merjenje 3D-koordinat). Med laboratorijskimi preizkusi materialov največkrat uporabljamo sisteme stereofotoaparatur in obravnavamo po dve sočasno posneti fotografiji. Stereofotogrametrične

metode so povsem ustrezne za izračun prostorskih deformacij, vendar so priporočljivejše postavitve več konvergentno usmerjenih fotoaparatorov, kar zagotavlja boljše konfiguracijo mreže, točnejše rezultate in omogoča iskanje grobih pogreškov v podatkih (Barazzetti in Scaioni, 2011). Uporabljeni fotoaparati morajo biti kalibrirani (Remondino in Fraser, 2006), predvsem je treba iz posnetkov odstraniti sistematične pogreške, kot je geometrična distorzija objektiv. Razvoj digitalnih fotoaparatorov omogoča uporabo nemerskih fotoaparatorov, ki nimajo stalne notranje orientacije. V teh primerih je nujna izvedba kalibracije med samim projektom. Med fotografiranjem izklopimo vso avtomatiko (na primer samodejno ostrenje), ki lahko spremeni parametre notranje orientacije fotoaparata.

S fotogrametričnimi metodami za spremljanje deformacij se običajno dokumentirajo pomiki točk, ki jih s tarčami signaliziramo na preizkušancu. Pomembno je, da uporabljamo tarče, ki imajo visok kontrast glede na preizkušane, kar omogoča učinkovito samodejno prepoznavanje tarč na posnetkih (Fraser in Riedl, 2000). Tarče so lahko kodirane, kar omogoča enolično in samodejno prepoznavanje iste točke na seriji več posnetkov (Niederöst in Maas, 1997). Pomembna je enakomerna osvetlitev objekta med celotnim preizkusom, kar zagotavlja skladne rezultate in hitro ter zanesljivo obdelavo podatkov (Maas in Hampel, 2006). Ko je signaliziranje točk onemogočeno, na primer pri majhnih objektih ali vzorcih tekočin, lahko kot merske točke uporabimo teksturo objekta (Scaioni in sod., 2015).

Merjenje absolutnih koordinat in pomikov signaliziranih tarč na objektih lahko izvajamo s številnimi komercialnimi fotogrametričnimi sistemi. Eden takih je ARAMIS (Yu in Dehmer, 2010), ki vsebuje fotogrametrično programsko opremo za obdelavo stereoparov, narejenih z dvema fotoaparatom hkrati. Fotoaparata kalibrira na podlagi več posnetkov kalibracijske plošče, rezultati kalibracije so zunanja in notranja orientacija fotoaparatorov. Za spremljanje deformacij je treba objekt opremiti s tarčami, ki so lahko na objekt tudi naslikane z vzorcem ali nanesene s sprejem. Podobno delujejo tudi drugi komercialni sistemi, na primer Linearis3D (<http://www.linearis3d.de>) ali VIC-3D™ System (<http://www.correlatedsolutions.com>). Stereofotogrametrični sistem so Tomažević, Gams in Berset (2015) uporabili za spremljanje deformacij med cikličnim preizkusom kamnitega zida. Kljub razvoju komercialnih sistemov za določanje absolutnih koordinat in pomikov signaliziranih tarč, v praksi še vedno obstaja vrsta nestandardnih primerov uporabe, ki zahteva razvoj prilagojenih sistemov za opazovanje deformacij (Maas in Hampel, 2006).

Za določanje deformacij ravnih objektov se velikokrat uporabljajo enoslikovne fotogrametrične metode, s katerimi pridobimo 2D-koordinate v ravnini objekta. Pomike točk in deformacije objekta izračunamo s primerjavo ravninskih koordinat točk na objektu iz zaporednih posnetkov, narejenih med preizkusom. Pregled postopkov, ki delujejo na podlagi 2D-slikovne korelacije in se uporabljajo za spremljanje deformacij ravnih objektov, so povzeli Pan in sod. (2009). Za izvajanje meritev s slikovno korelacijo moramo imeti na objekt nanesen naključen, največkrat točkast vzorec, ki se deformira skupaj z objektom. Razen signaliziranih točk se lahko pri slikovni korelaciji za meritve učinkovito uporablja tudi naravna tekstura površine objekta ali vzorec, ki ga sami nanesimo na objekt, na primer z naključnim nanosom črne in/ali bele barve. Teorijo in zasnovo postopkov za izvajanje korelacijskih meritev so opisali Sutton, Orteu in Schreier (2009). Primerjalno študijo naključnih vzorcev za slikovno korelacijo so naredili Stoilov, Kavardzhikov in Pashkouleva (2012). Wattrisse in sod. (2001) so uporabili korelacijske meritve za pridobitev 2D-vektorjev pomikov na tankih jeklenih listih med nateznim preskusom in na podlagi predpostavk o plastični nestisljivosti materiala ocenili deformacije tudi v tretji razsežnosti. Z uporabo slikovne ko-

relacije so bile analizirane tudi lastnosti plastičnih materialov (Xiang in sod., 2007), aluminijastih folij (Bastawros, Bart-Smith in Evans, 2000), polimerov (Chevalier in sod., 2001). Périé in sod. (2002) so za izračun korelacije uporabili hitro Fourierovo transformacijo, s čimer se je pospešil čas računanja. Hampel in Maas (2003) sta med preizkusom dinamičnih obremenitev vzorce pločnikov opremila s tarčami, na katerih sta spremljala ravninske deformacije. Calderini in sod. (2015) so fotogrametrične meritve združili s klasičnimi meritvami (LVDT), georadarjem in IR-termografijo za oceno odstopanja plasti in spremljanja razpok med preizkusom večslojnih kamnitih zidov.

V članku predstavljamo fotogrametrične postopke, ki jih izvajamo med eksperimentalnimi preiskavami mehanskih lastnosti na ravni materiala, elementa ali cele konstrukcije, pri čemer predlagamo enostaven in cenovno ugoden postopek za določanje deformacij v ravnini preizkušanca, kar nato demonstriramo na cikličnem preizkusu šibko armirane betonske stene. Uporabljena je enoslikovna fotogrametrična metoda, ki sloni na enačbah projekтивne geometrije. V članku je opisana izvedba preizkusa, kalibracija fotoaparata in orientacija fotografij, samodejne meritve točk in izračun deformacij na površini preizkušanca.

2 OBIČAJNI FOTOGAMETRIČNI POSTOPEK ZA LABORATORIJSKO MERJENJE DEFORMACIJ

Fotogrametrični postopek za laboratorijsko merjenje deformacij sestavljajo priprava okolja na fotografiranje, fotografiranje, kalibracija in obdelava posnetkov, ki vključuje merjenje točk, orientacijo posnetkov in izračun deformacij ali razpok.

Priprava na fotografiranje zajema namestitev tarč, načrtovanje stojišč za fotoaparata(e), vzpostavitev stalnih (predvsem svetlobnih) razmer za fotografiranje, vzpostavitev povezave fotoaparata(ov) z računalnikom, pri uporabi več fotoaparata za hkratno fotografiranje tudi njihovo sinhronizacijo. Običajno uporabimo dve vrsti tarč. Oslonilne točke, ki jih bomo uporabili za izračun zunanje orientacije posnetkov in s tem zagotovili enoten referenčni koordinatni sistem, običajno signaliziramo z reflektivnimi tarčami. Namestimo jih na stabilno območje v okolici preizkušanca, ki ni podvrženo pomikom (Barazzetti in Scaioni, 2011). Oslonilnim točkam z eno od geodetskih metod določimo prostorske koordinate. Poleg izračuna zunanje orientacije lahko te točke uporabimo tudi za preskus stabilnosti sistema fotoaparata med izvajanjem preskusa (Chunta in Ioannidis, 2012). Pri uporabi večslikovnih metod za določanje 3D-koordinat točk lahko z dobro prostorsko razporeditvijo oslonilnih točk izboljšamo geometrijo mreže in s tem rezultate blokovne izravnave snopov, s katero izračunamo zunanjo orientacijo posnetkov (Fraser in Riedl, 2000; Whiteman, Lichti in Chandler, 2002). Druga vrsta tarč so detajlne točke, na katerih bomo izvajali meritve in ki jih čim bolj enakomerno razporedimo po preizkušancu.

Fotografiranje izvajamo s stabilnih stativov, kar zagotavlja enoten referenčni sistem med celotnim snemanjem. Pred fotografiranjem (priporočljivo je tudi po njem) moramo poskrbeti za kalibracijske posnetke. Pomembno je, da se nastavitve fotoaparata med fotografiranjem preizkušanca in kalibracijskim fotografiranjem ne spreminjajo.

Kalibracija fotoaparata je bistvena sestavina fotogrametričnega postopka. Z njo izračunamo elemente notranje orientacije fotoaparata (goriščno razdaljo c in položaj glavne točke x_0, y_0) ter geometrično distorzijo fotoaparata. Kalibracijo izvajamo samostojno ali jo vključimo v fotogrametrično triangulacijo, v kateri se na

podlagi prostorsko razporejenih oslonilnih točk hkrati izračunajo parametri notranje in zunanje orientacije posnetkov. Pri uporabi nemerskih fotoaparatorov v bližnjelikovni fotogrametriji je bolj priporočljiva samostojna kalibracija, saj je velikokrat težko zagotoviti geometrijo slikovne mreže, ki bi omogočala zanesljivo določitev parametrov notranje orientacije (Remondino in Fraser, 2006). Samostojno kalibracijo lahko naredimo pred izvajanjem projekta na podlagi posnetkov ravninske kalibracijske plošče (Tsai, 1987; Zhang, 2000; Bouguet, 2015). Kalibracija na podlagi blokovne izravnave snopov več stereoposnetkov kalibracijske plošče se veliko uporablja v komercialnih sistemih za merjenje deformacij objektov (Yu in Dehmer, 2010), saj lahko s tovrstno kalibracijo določimo tudi relativni medsebojni položaj fotoaparatorov. Če fotografiramo preizkušane z enako razporeditvijo fotoaparatorov kot takrat, ko fotografiramo kalibracijsko ploščo, potem poleg elementov notranje orientacije zagotovimo tudi zunanjo orientacijo posnetkov (Furukawa, Ponce, 2009). V tem primeru fotoaparatorov ne smemo več premikati. Poznani parametri notranje orientacije omogočajo prevzorčenje posnetkov, s katerim odpravimo distorzijo, in nadaljnje meritve opravljamo na posnetkih, ki niso več obremenjeni s sistematičnimi napakami objektiva fotoaparata. Če želimo merjenje deformacij opravljati v realnem času, prevzorčenje posnetkov ni priporočljivo in izmerjene koordinate točk popravimo analitično. Popravljenе koordinate (x', y') zaradi geometrične distorzije lahko izračunamo po Brownu (1971):

$$\begin{aligned} x' &= x + (x - x_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0), \\ y' &= y + (y - y_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0) + p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2), \end{aligned} \tag{1}$$

kjer je $r = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{1/2}$ radialna oddaljenost točke od glavne točke, (k_1, k_2, k_3) so koeficienti radialne distorzije in (p_1, p_2) koeficienta tangencialne distorzije.

Eden od najbolj razširjenih postopkov za merjenje signaliziranih točk ali točkastih vzorcev je slikovno ujemanje z metodo korelacije, ki jo za subpikselsko natančnost meritev dopolnimo s slikovnim ujemanjem na podlagi metode najmanjših kvadratov (angl. *least squares matching*, LSM). Za izračun korelacije potrebujemo sintetično tarčo (angl. *template*), ki opisuje obliko merjene točke in jo piksel za pikselom premikamo prek celotnega posnetka. Za izračun korelacije barvne posnetke pretvorimo v sivinsko sliko. Za vsak položaj sintetične tarče t v sliki g izračunamo korelacijski koeficient ρ (Luhman in sod, 2014):

$$\rho = \frac{\sigma_{tg}}{\sigma_t \sigma_g} = \frac{\sum [(t_i - \bar{t})(g_i - \bar{g})]}{\sqrt{\sum (t_i - \bar{t})^2 \sum (g_i - \bar{g})^2}} \tag{2}$$

kjer sta \bar{t} in \bar{g} povprečni vrednosti sivin tarče in dela slike, ki ga prekriva tarča. Položaj iskane točke na sliki je tam, kjer ima ρ največjo vrednost. Ker je premikanje sintetične tarče po celotni sliki časovno potratno, običajno določimo položaj točk v sliki in korelacijo računamo le v predvideni okolici točk. Kandidate točk lahko poiščemo s histogramom slike, ki jo predhodno pretvorimo v binarni raster (Chunta in Ioannidis, 2012), ali z uporabo slikovne piramide (opis v poglavju 3). Korelacijski koeficient se običajno uporablja v povezavi s pragom, ki ga postavimo glede na vsebino in kakovost posnetkov. Primerne vrednosti praga so med 0,5 in 0,7 (Luhman in sod, 2014). Če kandidat za točko preseže postavljeni prag za korelacijski koeficient, lahko potrdimo, da smo s postopkom dejansko odkrili pravo točko.

S korelacijo izračunamo položaj točke na sliki le s pikselsko natančnostjo. Subpikselsko natančnost lahko dobimo na primer z razširitvijo enačbe (2) v gradientno navzkrižno korelacijo, ki združuje radiometrično in geometrično korekcijo slike (Campbell in Wu, 2008), ali različnimi subpikselskimi interpolacijami

(Pan in sod. 2009; Scaioni in sod., 2015). Načeloma lahko s korelacijo ocenimo le dva premika med sintetično tarčo in točko na sliki, ne moremo pa upoštevati geometričnih transformacij, kot so merilo, rotacija in perspektivno popačenje oblik, ki nastanejo, kadar slikovna ravnina in ravnina objekta nista vzporedni. Za subpikselsko natančnost meritev lahko uporabimo metodo LSM, s katero se med seboj primerjata sintetična tarča in okolica točke na sliki, ki smo jo izločili na podlagi izračuna korelacije. V idealnem primeru se tarča t in slika g povsem ujemata: Pri metodi LSM se upošteva tudi šum v radiometričnih vrednostih posnetka in geometrična transformacija med tarčo t in merjeno točko, kar je v enačbi (3) predstavljeno z vektorjem napak:

$$t(x, y) - e(x, y) = g(x, y). \quad (3)$$

Metodo je predlagal Gruen (1985), v njegovem delu je razložena tudi linearizacija in rešitev sistema enačb po metodi najmanjših kvadratov. S predlaganimi samodejnimi metodami za merjenje točk lahko izmerimo tako detajlne točke na preizkušancu kot geodetske točke, ki se uporabljajo za vzpostavitev referenčnega koordinatnega sistema. Če so geodetske točke signalizirane z reflektivnimi tarčami, se priporoča ročna meritev slednjih, saj reflektivne tarče niso najprimernejše za samodejne meritve (Chunta in Ioannidis, 2012). Če je fotogrametrični merski sistem med izvajanjem preizkusa stabilen, lahko meritve geodetskih točk opravimo le na prvi seriji posnetkov in za vse druge posnetke uporabimo iste parametre zunanje orientacije. V tem primeru je treba meritve vsekakor ponoviti vsaj še na zadnji seriji posnetkov, da se prepričamo, ali se fotoaparati med izvajanjem preizkusa niso premaknili.

Zunanjo orientacijo posnetkov zagotovimo z merjenjem oslonilnih točk, ki smo jim določili koordinate v prostoru z eno od geodetskih metod. Pri uporabi več fotoaparatorov in prostorsko razporejenih oslonilnih točk uporabimo kot matematični model enačbe centralne projekcije (4), ki povezujejo slikovne koordinate (x, y) in objektne koordinate (X, Y, Z) opazovane točke (Kraus, 1993):

$$x = x_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}, y = y_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}. \quad (4)$$

Z rešitvijo enačb (4) v postopku blokovne izravnave snopov izračunamo zunanjo orientacijo posnetkov, ki jo sestavljajo koordinate projekcijskih centrov fotoaparatorov (X_0, Y_0, Z_0) in zasuki fotoaparatorov v prostoru, ki sestavljajo rotacijsko matriko r_{ij} .

Pri opazovanju deformacij ravnih objektov vse točke ležijo na ravnini, zato lahko kot matematični model za povezavo med slikovnimi in objektnimi koordinatami uporabimo enačbe projektivne transformacije (Kraus, 1993):

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + c_3}, Y = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + c_3}. \quad (5)$$

Enačbe projektivne transformacije lahko uporabimo tudi za rektifikacijo, s katero iz posnetkov odpravimo perspektivni učinek (Barrazzeti in Scaioni, 2010). Tako izdelamo ortofoto, na katerem izvajamo meritve v objektnem prostoru ali ga upodobimo za učinkovito upodobitev rezultatov meritev.

Po orientaciji iz izmerjenih slikovnih koordinat točk izračunamo objektne koordinate točk. S primerjavo objektnih koordinat, izračunanih iz zaporednih posnetkov, dobimo informacijo o spreminjanju površine

preizkušanca oziroma izračunamo deformacije na preizkušancu. Deformacije ε ocenimo glede na razdalje med sosednjimi točkami:

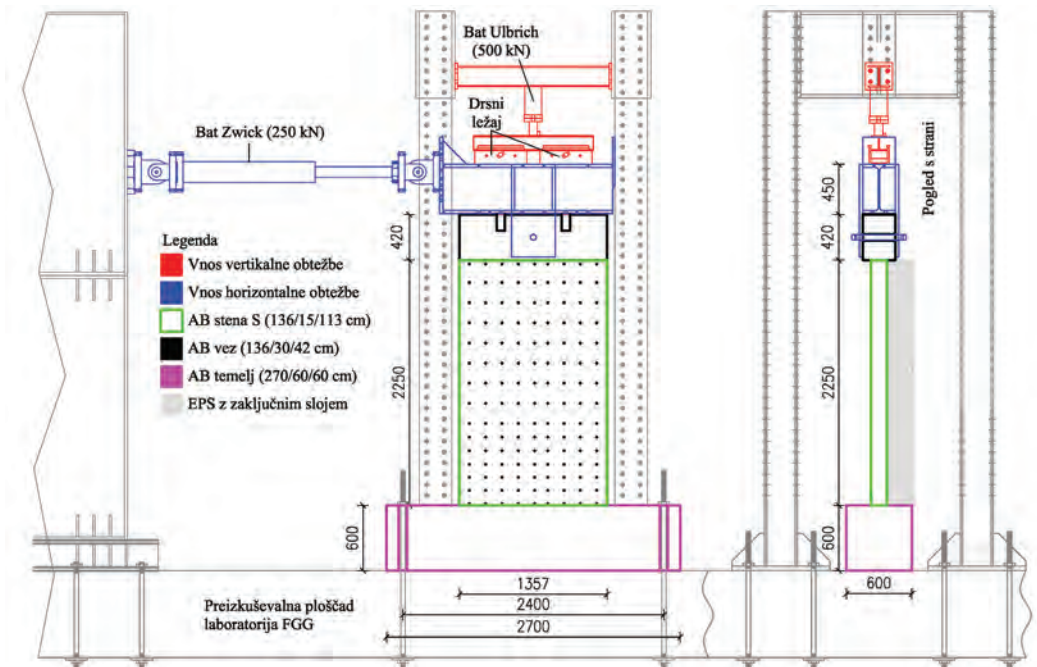
$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \tag{6}$$

kjer je l_0 razdalja med točkama na začetku preizkusa in l razdalja med istima točkama v posamezni fazi preskusa.

3 OPIS POSTOPKA MERJENJA DEFORMACIJ PRI PREISKAVAH MEHANSKE ODPORNOSTI ŠIBKO ARMIRANIH BETONSKIH STEN

Fotogrametrično merjenje deformacij smo demonstrirali pri preiskavah mehanske odpornosti armirano-betonskih sten, ki so bile izvedene v konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo (Snoj in Dolšek, 2016). Preizkušanci so ustrezali šibko armiranim betonskim stenam JUBHome WALL, ki jih je razvilo slovensko podjetje JUB d. o. o.

Preizkuševališče v laboratoriju FGG in preizkušanec, za katerega smo merili deformacije, sta shematično prikazana na sliki 1. Preizkušanci so bili obremenjeni ciklično, na podlagi predpostavljenih pomikov, ki so bili vodeni s hidravličnim batom znamke Zwick zmogljivosti 250 kN. Amplitudo vsiljenih pomikov smo povečevali po vnaprej predpisanih fazah, skladno s priporočili FEMA 461 (FEMA, 2007), vse dokler v temeljnem sklopu ni prišlo do porušitve. Preizkušanec je bil obremenjen tudi s tlačno silo, ki smo jo nadzorovali z batom znamke Ulbrich zmogljivosti 500 kN. Navpično silo v batu smo med preiskavo krmilili tako, da je bila med celotnim preizkusom konstantna.

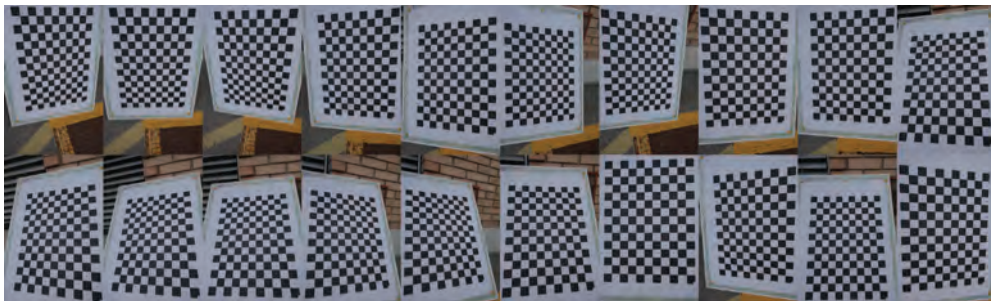


Slika 1: Shema preizkuševališča in preizkušanca s prikazom rastra točk za fotogrametrične meritve.

Poleg konvencionalnih meritev sil, pomikov in deformacij smo s fotogrametričnimi metodami merili deformacije na površini preizkušanca. Za določitev referenčnega koordinatnega sistema za meritev točk smo na stabilno ogrodje postavili štiri reflektivne geodetske tarče, ki so se uporabljale kot oslonilne točke. Oslonilne točke so na sliki 4 označene z identifikatorji. Pozorni smo bili, da so nameščene v ravnini preizkušanca in da njihov obod pokriva čim večjo površino preizkušanca, da pri izračunu objektnih koordinat detajlnih točk ne bi prihajalo do ekstrapolacije. Oslonilne točke smo pomerili z elektronskim tahimetrom Leica TS30. Koordinate oslonilnih točk smo izračunali iz merjenih dolžin in kotov, opazovanih v petih girusih. Ocenjena natančnost koordinat oslonilnih točk σ_{OT} je 0,2 milimetra. Za opazovanje deformacij smo na preizkušanelec nalepili 133 detajlnih točk, ki so bile signalizirane s tarčami enake oblike: črni krogi s premerom 7 milimetrov, natisnjeni na bel papir. Velikosti točk na posnetkih, narejenih med preizkusom, je približno 13 x 13 pikselov.

Fotografiranje smo izvedli s kompaktnim fotoaparatom Sony DSC-RX100M2 (Sony, 2015), nameščenim na stativ. Fotoaparat prek aplikacije PlayMemories omogoča povezavo s pametnim telefonom, s katerim smo prožili posnetke, kar je zagotovilo večjo stabilnost fotoaparata in nespremenjeno zunanjo orientacijo med fotografiranjem. Potrudili smo se, da je bil fotoaparat postavljen čim bolj pravokotno na preizkušanelec, s čimer smo dosegli, da so okrogle tarče na posnetkih ohranile svojo obliko. V vsaki fazi preizkusa smo naredili več zaporednih posnetkov. Število posnetkov v fazi smo priredili amplitudi vsiljenih pomikov. V vsaki fazi smo naredili začetni in končni posnetek stene, vmesne posnetke smo prožili glede na horizontalne pomike na vrhu stene, ki smo jih merili z induktivnim merilnikom. Pri manjših amplitudah (do 7,37 milimetra) smo poleg skrajnih položajev fotografirali še na sredini amplitude. Pri večjih amplitudah smo vmesne posnetke prožili na vsakih 5 milimetrov glede na pomik na vrhu stene.

Pred vsakokratno namestitvijo fotoaparata na stativ in med menjavo baterij v fotoaparatu smo opravili kalibracijo fotoaparata s slikanjem testnega polja. Primer fotografiranja testnega polja prikazuje slika 2. Pomembno je, da imamo s testnim poljem pokrite vse robove posnetkov, saj je na robovih in vogalih posnetkov geometrična distorzija največja. Notranjo orientacijo smo izračunali z Matlabovim orodjem za kalibracijo fotoaparata (Bouguet, 2015). Izračunane elemente notranje orientacije (c , x_0 , y_0 , k_1 , k_2 , k_3 , p_1 , p_2) smo uporabili za prevzorčenje vseh posnetkov. To smo izvedli v lastnem Matlabovem programu, ki deluje hitreje od modula, vključenega v orodje za kalibracijo. Vse nadaljnje meritve smo tako opravili na posnetkih, iz katerih je že bila odpravljena geometrična distorzija objektivna. Točnost pikseljskih koordinat na posnetkih po opravljeni kalibraciji je bila $\sigma_{kal} = 0,74$ piksla.



Slika 2: Posnetki testnega polja za kalibracijo fotoaparata.

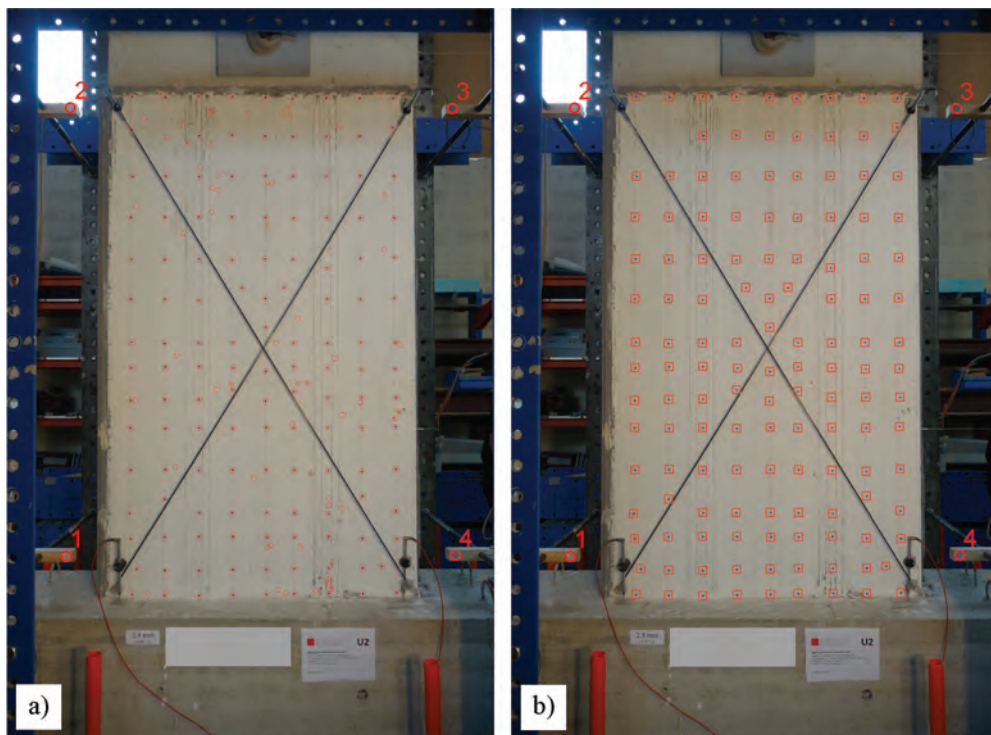
Meritve štirih oslonilnih točk smo opravili ročno na posnetkih z začetka posamezne faze. Ročne meritve oslonilnih točk smo ponovili tudi po končani fazi in se s tem prepričali, da je referenčni sistem ostal nespremenjen in da se fotoapararat med fotografranjem ni premaknil. Z razmerjem prostorskih razdalj med oslonilnimi točkami d_p v milimetrih in razdalj med istimi oslonilnimi točkami, izmerjenimi na posnetkih d_s v pikslih, izračunamo prostorsko ločljivost posnetkov $GSD = 1 [pix] d_p [mm] / d_s [pix]$, ki je v našem primeru znašala 0,6 milimetra (GSD , angl. *ground sampling distance* ustreza projekciji velikosti piksla na fotografriran objekt).

Za korelacijsko meritev detajlnih točk na vseh posnetkih smo izdelali sintetično tarčo, ki je dobro opisovala slike točk na posnetkih. Slika 3 prikazuje točko na posnetku z njeno okolico (levo) in sintetično tarčo (desno).



Slika 3: Okolice detajlne točke na posnetku (levo) in sintetična tarča (desno).

Korelacijske meritve detajlnih točk so časovno potraten postopek, če jih opravljamo po celotnem posnetku in pri njegovi izvorni ločljivosti. Na posnetku z začetka preizkusa smo zato določili približno okolico točk z uporabo slikovne piramide. Piramidi posnetka in tarče smo naredili z njunim prevzorčenjem na polovično velikost. Z izračunom korelacijskih koeficientov (enačba 2) na piramidi smo poiskali začetne kandidate za točke. Prag korelacijskega koeficienta za sprejetje kandidata smo postavili na 0,75. Kandidati za točke so prikazani na sliki 4 a). Meritve detajlnih točk s korelacijo na izvornih posnetkih smo tako izvajali le v okolici začetnih točk. Kot začetne točke za meritev smo potrdili kandidate, ki so tudi na sliki v izvorni ločljivosti dosegli isti prag. Z uporabo slikovne piramide so bili začetni položaji točk določeni štirikrat hitreje. Okolico točk smo določili kot del izvornega posnetka, ki se za dve dimenziji tarče razteza v vse smeri začetnega položaja točke. Kot začetne točke na posameznem posnetku smo vsakokrat privzeli izmerjene koordinate točk na predhodnem posnetku. Okolice začetnih točk na prvem posnetku prikazuje slika 4 b).



Slika 4: a) kandidati za točke, pridobljeni s slikovno piramido; b) okolica začetnih točk, potrjenih na sliki izvorne ločljivosti. Z identifikatorji so označene oslonilne točke, signalizirane z reflektivnimi tarčami.

Med fotografiranjem sta bili ravnina preizkušanca in slikovna ravnina fotoaparata vzporedni, zato so okrogle točke na sliki obdržale svojo obliko in velikost. Za določitev subpikselskih položajev točk na sliki smo zato uporabili enostavnejšo metodo slikovnega ujemanja, kot je podana v enačbi (3). Uporabili smo enačbe popravkov (7) in jih razrešili po metodi najmanjših kvadratov:

$$v_i + g(u, v) = b \cdot t(u + a_1, v + a_2) + c, \quad (7)$$

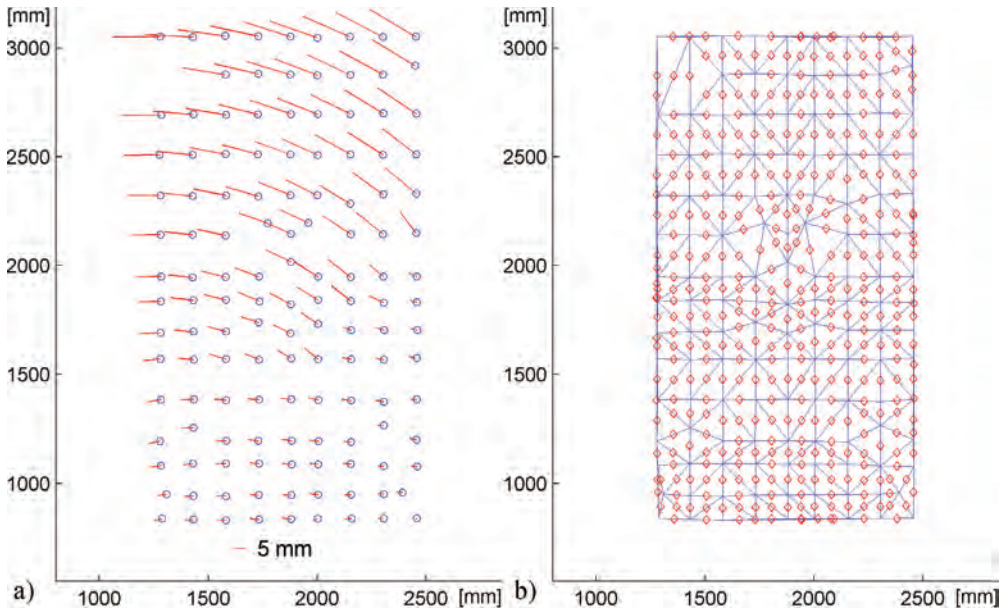
kjer sta b in c merilo in premik sivin slike glede na tarčo in a_1, a_2 popravka pikselskih koordinat točke po izračunu korelacije. Linearizacija in rešitev sistema enačb popravkov (7) z metodo najmanjših kvadratov je opisana v Höhle (1997). Navedena metoda se sicer v fotogrametriji uporablja za samodejno merjenje robnih mark in križev plošče *resseau* na skeniranih analognih posnetkih (Kraus, 1993). Enačbe (7) omogočajo oceno natančnosti samodejnih meritev točk, ki je bila v našem primeru $\sigma_m = 0,09$ piksla.

Koordinate točk v ravnini stene smo izračunali s projektivno transformacijo (enačba 5). Deformacije na površini stene smo izračunali iz razdalj med sosednimi točkami z enačbo (6). Sosednje točke smo prepoznali z Delaunayev triangulacijo (Lee in Schachter, 1980), ki raztresene točke poveže v trikotniško nepravilno mrežo. Izračunani velikosti deformacije smo pripisali položaj sredine stranice, ki povezuje točki, iz katerih je bila deformacija izračunana. Položaji izračunanih deformacij so na sliki 5 b) prikazani s karom. Deformacije po celotni površini stene smo interpolirali z metodo naravnih sosedov (Sibson, 1981).

4 REZULTATI

Že pri zelo majhnih vsiljenih pomikih na vrhu stene ($u_{HI} = 1,3 \text{ mm}$) je bilo mogoče vizualno opaziti majhne horizontalne lasaste razpoke na spodnji tretjini stene. Pri večjih vsiljenih pomikih so se višje na nateznem robu pojavile nove horizontalne razpoke, ki so se širile proti sredini stene. Pri pomiku $u_{HI} = 20 \text{ mm}$ je bila dosežena maksimalna prečna sila v steni $F_{max} = 201 \text{ kN}$. Poškodovanost v betonu je bila že kar precejšnja, saj se nekatere razpoke niso več zapirale in so postale trajne. Pri pomikih, večjih od 20 milimetrov, sta se začeli močno odpirati diagonalni razpoki, ki sta potekali od levega oziroma desnega robu malo nad sredino višine stene in sta potekali prek zgornjega delovnega stika približno na sredini višine stene. Od tega pomika dalje se je večina deformacij vršila v zgornji polovici stene. Sila v batu je pri pomiku $u_{HI} = 35 \text{ milimetrov}$ močno padla, saj je prišlo do tečenja vzdolžne armature nad delovnim stikom in do odpadanja krovnega sloja betona. Porušitev stene smo določili pri pomiku na $u_{HI} = 57 \text{ milimetrov}$, ko je počilo že več armaturnih palic in je tudi sila v steni upadla za več kot 50 % glede na njeno nosilnost.

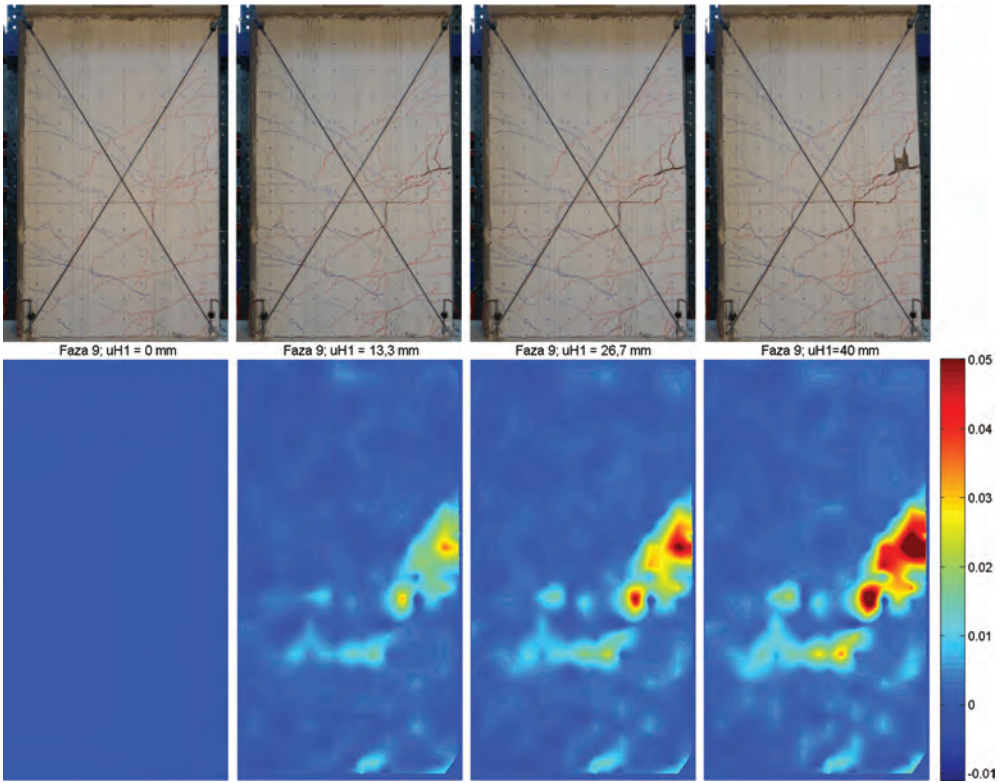
Pridobljene rezultate fotogrametričnih meritev uporabimo na različne načine. Lahko spremljamo pomike točk na površini stene v posameznih fazah, spremljamo deformacije, dolžino razpok ali iz posnetkov izdelamo ortofote, na katerih izvajamo različne meritve. Uporabno orodje so animacije, izdelane z razvrstitvijo zaporednih posnetkov, izračunanih pomikov ali deformacij, na katerih vizualno spremljamo obnašanje preizkušanca med izvedbo preizkusa in razvoj poškodb. Slika 5 a) prikazuje velikosti in smeri pomikov detajlnih točk v eni izmed faz. S krogi so prikazani položaji točk na začetku faze.



Slika 5: a) primer spremljanja pomikov točk znotraj faze; b) trikotniška nepravilna mreža; karo označuje sredine stranic, kamor smo pripisali velikosti deformacij.

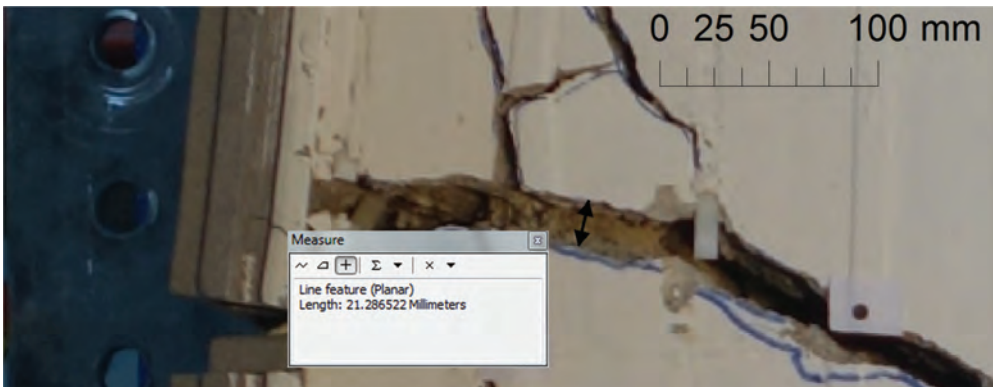
Slika 6 v zgornji vrsti prikazuje štiri obrezane posnetke stene v posameznem delu faze. Levo je prikazan začetni posnetek v fazi. V spodnji vrsti so ustrezne slike deformacij, interpoliranih na celotno površino stene. Opazimo, da izračunane deformacije dejansko opisujejo razpoke v steni, vendar slika razpok ni povsem

zvezna. To je posledica interpolacije in jo lahko izboljšamo z gostejšo razporeditvijo detajlnih točk. Ker smo za preizkus uporabili redkejšo mrežo detajlnih točk, velikosti razpok nismo določevali neposredno iz meritev detajlnih točk. Kot možnost za naknadno merjenje velikosti razpok omenjamo izdelavo ortofota (slika 7).



Slika 6: Izračun deformacij stene znotraj faze.

Slika 7 prikazuje ortofoto s prostorsko ločljivostjo 1 mm, izdelan s prevzorčenjem posnetka s projekтивно transformacijo. Primer prikazuje merjenje širine razpoke v ravnini stene, ki je opredeljena z oslonilnimi točkami.



Slika 7: Merjenje razpok na ortofotu.

Preglejmo še natančnost dobljenih objektnih koordinat točk. Povsem analitično oceno natančnosti žal nismo mogli izpeljati, saj smo za projektivno transformacijo uporabili le 4 oslonilne točke, kar je potrebno število skupnih točk za izračun parametrov v enačbah (5). Teoretično natančnost koordinat objektnih točk lahko ocenimo z enačbo (Barrazzeti in Scaioni, 2010):

$$\sigma_{xy} = \pm \frac{d}{c} \sigma_{xy}, \tag{8}$$

kjer je d razdalja fotografiranja, c goriščna razdalja in σ_{xy} natančnost slikovnih koordinat točk. Temeljna predpostavka v enačbi (8) je, da sta slikovna in objektna ravnina vzporedni, kar velja za naš preizkus. Na σ_{xy} vplivata točnost pikselskih koordinat po opravljeni kalibraciji σ_{kal} in natančnost samodejnih meritev točk σ_m . Natančnost slikovnih koordinat tako ocenimo $\sigma_{xy} = \sqrt{\sigma_{kal}^2 + \sigma_m^2} = 0,74$ piksla. Razmerje $\frac{d}{c}$ v

enačbi (8) predstavlja modul merila posnetkov, ki ga prav tako izraža razmerje med GSD in velikostjo piksla. Teoretično natančnost objektnih koordinat točk izračunamo $\sigma_{xy} = \frac{GSD}{1[pix]} \cdot \sigma_{xy} = 0,4$ milimetra.

Z upoštevanjem natančnosti koordinat oslonilnih točk σ_{OT} izračunamo natančnost koordinat objektnih točk $\overline{\sigma}_{xy} = \sqrt{\sigma_{xy}^2 + \sigma_{OT}^2} = 0,5$ milimetra. Če bi k temu dodali še natančnost merjenja oslonilnih točk na posnetkih, bi se natančnost koordinat objektnih točk povsem približala velikosti GSD (0,6 milimetra), kar sta s kontrolnimi meritvami potrdila tudi Barrazzeti in Scaioni (2010).

5 SKLEP

V članku smo predstavili fotogrametrične metode, ki omogočajo meritve pomikov in deformacij po celotni površini preizkušanca in na poljubnem številu merskih mest. Opisani so postopki, ki jih izvajamo za pridobivanje natančnih merskih podatkov s fotogrametričnimi metodami. V praktičnem primeru se osredotočimo na spremljanje deformacij v ravnini betonske stene na podlagi enoslikovne fotogrametrične metode in projektivne transformacije. Metoda je enostavna in cenovno ugodna, pridobljen vzorec deformacij se dobro ujema z dejansko poškodovanostjo stene. Uporabljeno metodo in postopek zajema podatkov je mogoče še precej izboljšati. Mrežo merskih točk lahko zgostimo ali namesto diskretnih točk uporabimo naključni vzorec za korelacijske meritve in s tem pridobimo zveznejšo sliko deformacij. Enoslikovne fotogrametrične metode so primerne le za merjenje ravnih objektov. Z več sinhroniziranimi fotoaparati in manjšimi prilagoditvami v obdelavi posnetkov bi pridobili 3D-merske podatke. S tem bi izboljšali natančnost meritev, kadar se preizkušavec med preizkusom zvije ali premakne zunaj projektivne ravnine, določene z oslonilnimi točkami. Z večslikovno metodo bi lahko merili tudi preizkušance, ki niso ravni.

Fotogrametrični posnetki so odlični za dokumentiranje preizkusa, omogočajo sledenje razvoja in poteka poškodb po celotni steni in tako lažje spremljanje nastanka porušnega mehanizma stene. Izdelani ortofoti omogočajo neposredne meritve razpok na steni, posnetki pa tudi nadaljnje meritve po že končanem preizkusu, če se pojavi potreba po njih. Meritve s fotogrametričnimi metodami so dovolj natančne in zato odlično dopolnjujejo klasične meritve, saj lahko enostavno ocenimo odnos med pomiki in debelino razpok, kar je eden izmed ključnih podatkov pri oceni pričakovanih izgub zaradi potresne obtežbe.

Literatura in viri:

- Barazzetti, L., Scaioni, M. (2010). Development and implementation of image-based algorithms for measurement of deformations in material testing. *Sensors*, 10(8), 7469–7495. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/s100807469>
- Barazzetti, L., Scaioni, M. (2011). Photogrammetric tools for deformation measurements. V: Proc. XX Congr. Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata (AIMETA), Bologna, Italija, 12.–15. sept. 2011. http://www.researchgate.net/profile/Marco_Scaioni2/publication228828761_Photogrammetric_tools_for_deformation_measurements/links/02e7e52a7d20b5271a000000.pdf, pridobljeno 20. 7. 2015.
- Bastawros, A. F., Bart-Smith, H., Evans, A. G. (2000). Experimental analysis of deformation mechanisms in a closed-cell aluminum alloy foam. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 48(2), 301–322. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0022-5096\(99\)00035-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0022-5096(99)00035-6)
- Bouquet, J.-Y. (2015). Camera calibration toolbox for Matlab. http://www.vision.caltech.edu/bouquetj/calib_doc, pridobljeno 8. 7. 2015.
- Brown, D. C. (1971). Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8), 855–866.
- Calderini, C., Degli Abbatì, S., Cotič, P., Kržan, M., Bosiljkov, V. (2015). In-plane shear tests on masonry panels with plaster: correlation of structural damage and damage on artistic assets. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(1), 237–256.
- Campbell, N. A., Wu, X. (2008). Gradient cross correlation for sub-pixel matching. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B7), 1065–1070.
- Chevalier, L., Calloch, S., Hild, F., Marco, Y. (2005). Digital image correlation used to analyze the multiaxial behavior of rubber-like materials. *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 20(2), 169–187.
- Chounta I., Ioannidis C. (2012). High Accuracy Deformation Monitoring of a Concrete Beam using Automatic Photogrammetric Techniques. V: Knowing to manage the territory, protect the environment; Evaluate the Cultural Heritage, Rim, Italija, 6.–10. maj 2012. https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2012/papers/ts02f/TS02f_chounta_ioannidis_5522.pdf, pridobljeno 16. 11. 2015.
- El-Hakim, S. F. (1986). Real-time image metrology with CCD cameras. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(11), 1757–1766.
- FEMA (2007). Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and non-structural components – FEMA 461. Washington D.C.: Federal emergency management agency.
- Fraser, C. S., Gustafson, P. C. (1986). Industrial photogrammetry applied to deformation Measurements. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 26(5), 199–208.
- Fraser, C. S., Riedel, B. (2000). Monitoring the thermal deformation of steel beams via vision metrology. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 55(4), 268–276. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-2716\(00\)00024-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-2716(00)00024-1)
- Furukawa, Y., Ponce, J. (2009). Accurate Camera Calibration from Multi-View Stereo and Bundle Adjustment. *International Journal of Computer Vision*, 84(3), 257–268. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11263-009-0232-2>
- Gruen, A. (1985). Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique. *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, 14(3), 175–187.
- Hampel, U., Maas, H. G. (2003). Application of digital photogrammetry for measuring deformation and cracks during load tests in civil engineering material testing. *Optical 3-D Measurement Techniques VI*, 2, 80–88.
- Höhle, J. (1997). The Automatic Measurement of Targets. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 1/97, str. 13–21. http://people.plan.aau.dk/~jh/auto_measurement.pdf, pridobljeno 2. 11. 2015.
- Kraus, K. (1993). *Photogrammetry. Volume I, Fundamentals and Standard Processes*. Bonn: Ferd. Dümmlers Verlag.
- Lee, D. T., Schachter, B. J. (1980). Two algorithms for constructing a Delaunay triangulation. *International Journal of Computer & Information Sciences*, 9(3), 219–242. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/bf00977785>
- Luhman, T., Robson, S., Kyle, S., Boehm, J. (2014). *Close-range photogrammetry and 3D imaging. 2nd Edition*. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH.
- Maas, H.-G., Hampel, U. (2006). Photogrammetric techniques in civil engineering material testing and structure monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72(1), 39–45. DOI: <http://dx.doi.org/10.14358/pers.72.1.39>
- Niederöst, M., Maas, H.-G. (1997). Automatic deformation measurement with a still video camera. V: Gruen, Kahmen (ur.). *Optical 3-D Measurement Techniques IV*. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 266–271.
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., Asundi, A. (2009). Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 062001. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/20/6/062001>
- Périé, J. N., Calloch, S., Cluzel, C., Hild, F. (2002). Analysis of a multiaxial test on a C/C composite by using digital image correlation and a damage model. *Experimental Mechanics*, 42(3), 318–328. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/bf02410989>
- Remondino, F., Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5), 266–272.
- Scaioni, M., Feng, T., Barazzetti, L., Previtali, M., Roncella, R. (2015). Image-based deformation measurement. *Applied Geomatics*, 7(2), 75–90. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12518-014-0152-x>
- Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation (Chapter 2). V: Barnett (ur.). *Interpreting Multivariate Data*, Chichester: John Wiley, 21–36.
- SIST EN 1998-1 (2005). Evrokod 8: Projektiranje potresnoodpornih konstrukcij. Del 1: Splošna pravila, potresni vplivi in vplivi na stavbe, marec 2005.
- Snoj, J., Dolšek, M. (2016). Eksperimentalne raziskave armiranobetonskih sten konstrukcijskega sistema JUBHome WALL. Ljubljana, Inštitut za konstrukcije, potresno inženirstvo in računalništvo.
- Snoj, J. (2014). Ocena potresnega tveganja zidanih stavb. Doktorska disertacija. Ljubljana: Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Snoj, J., Dolšek M. (2015a). Pushover-based loss estimation of masonry buildings with consideration of uncertainties. V: Proceedings of the 12th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, Vancouver, Kanada, 12.–15. julij 2015. Civil Engineering Risk and Reliability association (CERRA): Paper No. 333, 1–8.

- Sony (2015). Napreden fotoaprat s senzorjem tipa 1.0 RX100 II. <http://www.sony.si/electronics/kompaktni-fotoaparati-cyber-shot/dsc-rx100m2>, pridobljeno 26. 11. 2015.
- Stoilov, G., Kavardzhikov, V., Pashkouleva, D. (2012). A comparative study of random patterns for digital image correlation. *Journal of Applied Mechanics*, 42(2), 55–66. DOI: <http://dx.doi.org/10.2478/v10254-012-0008-x>
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements*. New York: Springer.
- Tomažević, M., Gams, M., Berset, T. (2015). Strengthening of stone masonry walls with composite reinforced coatings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(7), 2003–2027. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-014-9697-7>
- Tsai, R. Y. (1987). A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4), 323–344. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/jra.1987.1087109>
- Wattrisse, B., Chrysochoos, A., Muracciole, J. M., Némoz-Gaillard, M. (2001). Analysis of strain localization during tensile tests by digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 41(1), 29–39. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/bf02323101>
- Whiteman, T., Lichti, D., Chandler, I. (2002). Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 34(4). <http://www.isprs.org/commission4/proceedings02/pdfpapers/181.pdf>, pridobljeno 16. 11. 2015.
- Xiang, G. F., Zhang, Q. C., Liu, H. W., Wu, X. P., Ju, X. Y. (2007). Time-resolved deformation measurements of the Portevin–Le Chatelier bands. *Scripta materialia*, 56(8), 721–724. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.08.049>
- Yu, J. H., Dehmer, P. G. (2010). Dynamic impact deformation analysis using high-speed cameras and ARAMIS photogrammetry software (No. ARL-TR-5212). Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD Weapons and Materials Research Directorate. <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a537764.pdf>, pridobljeno 20. 7. 2015.
- Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11), 1330–1334. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.888718>



Grigillo D., Snoj J., Dolšek M. (2016). Fotogrametrično merjenje deformacij pri preizkusih mehanske odpornosti konstrukcijskih elementov. *Geodetski vestnik*, 60 (1): 13-27. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2016.01.13-27

asist. dr. Dejan Grigillo, univ. dipl. inž. geod.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: dejan.grigillo@fgg.uni-lj.si

prof. dr. Matjaž Dolšek, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: matjaz.dolsek@fgg.uni-lj.si

asist. dr. Jure Snoj, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana
e-naslov: jure.snoj@fgg.uni-lj.si