

Primljen / Received: 22.12.2023.

Ispravljen / Corrected: 25.9.2024.

Prihvaćen / Accepted: 5.10.2024.

Dostupno online / Available online: 10.2.2025.

# Beskontaktna inteligentna tehnologija detekcije degradacije performansi željezničkoga lučnog mosta temeljena na UAV prepoznavanju slike

## Autori:



<sup>1</sup>Shifu Wang, univ.bacc.ing. aedif.  
ailanrusi@163.com



<sup>2</sup>Dr.sc. Shaopeng Yang  
spyang@my.swjtu.edu.cn



<sup>2</sup>Izv.prof.dr.sc. Qi Wang  
wangchee\_wind@swjtu.edu.cn  
Autor za korespondenciju



<sup>3</sup>Dr.sc. Lingfeng Luo  
526884687@qq.com



<sup>2</sup>Mr.sc. Feng Wang  
2023210042@my.swjtu.edu.cn

<sup>1</sup> Željeznički ured Nanning, Kina  
Odjel za infrastrukturu brze željeznice Guilin

<sup>2</sup> Jugozapadno sveučilište Jiaotong, Kina  
Građevinski fakultet

<sup>3</sup> Chongqing Wukang Technology Co., Kina

Izvorni znanstveni rad

[Shifu Wang](#), [Shaopeng Yang](#), [Qi Wang](#), [Lingfeng Luo](#), [Feng Wang](#)

## Beskontaktna inteligentna tehnologija detekcije degradacije performansi željezničkoga lučnog mosta temeljena na UAV prepoznavanju slike

Mostovi su ključne komponente projekata brzih željeznica, a njihov konstrukcijski integritet znatno utječe na operativnu sigurnost brzih željeznica. U ovome radu predstavljena je tehnologija beskontaktno inteligentne detekcije za procjenu propadanja željezničkih mostova za velike brzine pomoću prepoznavanja slike bespilotnih letjelica (UAV). Metodologija uključuje prikupljanje slikovnih podataka pomoću UAV-a i digitalne kamere te njihovu tehničku obradu za generiranje dosljednih podataka oblaka točaka. Naknadno se ti podaci integriraju u jedinstveni model oblaka točaka poravnanjem oblaka točaka. Konačno, rafinirani trodimenzionalni (3D) model željezničkog mosta za velike brzine razvijen je spajanjem heterogenih podataka kroz 3D rekonstrukciju uživo. Metoda ima prednosti poput velike brzine otkrivanja i manje zahtjeva za osobljem. Ta se tehnologija može primjenjivati za dnevno praćenje tehničke osnove i za obavljanje dnevne inspekcije uz manji broj radnika. Empirijski rezultati pokazuju da ta metoda inspekcije nije ograničena točkama svjetlarnika i da pruža vrlo učinkovit odraz stanja mosta u stvarnome vremenu. Točnost prepoznavanja i raspon snimanja slike zadovoljavaju zahtjeve inspekcije za rad i održavanje željezničkih mostova za velike brzine.

### Ključne riječi:

željeznički most za velike brzine, oštećenja na mostu, beskontaktno mjerenje, bespilotna letjelica

Original research paper

[Shifu Wang](#), [Shaopeng Yang](#), [Qi Wang](#), [Lingfeng Luo](#), [Feng Wang](#)

## Non-contact intelligent detection technology for railway arch bridge performance degradation based on UAV Image recognition

Bridges are crucial components of high-speed railway projects, and their structural integrity significantly impacts the operational safety of high-speed railways. This paper introduces a non-contact intelligent detection technology for assessing the deterioration of high-speed railway bridges using unmanned aerial vehicle (UAV) image recognition. The methodology involves collecting image data using a UAV and digital camera and processing them technically to generate consistent point-cloud data. Subsequently, these data are integrated into a unified point-cloud model through point-cloud alignment. Finally, a refined three-dimensional (3D) model of a high-speed railway bridge was developed by fusing heterogeneous data through live 3D reconstruction. The method has the advantages of high detection speed and fewer personnel requirements; this technology can be used for daily monitoring of the technical basis and can arrange a small number of personnel to complete the daily inspection. The empirical results demonstrate that this inspection method is not constrained by skylight points and provides a real-time and highly efficient reflection of the conditions of the bridge. The recognition accuracy and image acquisition range satisfy the inspection requirements for the operation and maintenance of high-speed railway bridges.

### Key words:

high-speed railway bridge, bridge faults, non-contact measurement, UAV

## 1. Uvod

Mostovi za brze željeznice, posebno oni u planinskim regijama, ključni su za osiguranje sigurnog rada željezničkih pruga za velike brzine. Izazovi uključuju potencijalnu štetu koja može nastati zbog opasnih odrona stijena na strmim padinama, što može dovesti do urušavanja planine. Također, mostovi u gusto naseljenim riječnim područjima podložni su manjim oštećenjima uzrokovanim erozijom. Projektirani životni vijek željezničkih mostova za velike brzine obično se proteže do sto godina [1]. Za njihova životnog vijeka neizbježna je pojava različitih nedostataka te oštećenja i prirodnih oštećenja, što potencijalno može rezultirati oštećenjima konstrukcije ili čak kolapsom u teškim slučajevima. Moguće oštećenje ili urušavanje znatno utječe na redovitu upotrebu željezničkih mostova za velike brzine i znatno povećava troškove održavanja te kritične infrastrukture.

Trenutačno prevladavajuće metode inspekcije željezničkih mostova za velike brzine ponajprije obuhvaćaju tri pristupa, koja se uglavnom primjenjuju u Europi, jugoistočnoj Aziji i Kini:

1. Ručna inspekcija, standardizirano označavanje inspektora, neophodan je postupak inspekcije u kišnim planinskim područjima. Nakon toga relevantno osoblje provodi jedinstveno modeliranje i arhiviranje. Međutim, ta metoda pokazuje nedostatke, uključujući nedostatnu pouzdanost, neučinkovitost, znatno radno opterećenje, opsežne pohranjene informacije i neadekvatnu sljedivost.
2. Ručna inspekcija, videoinspekcija i pojačanje. Iako ta metoda obuhvaća dnevne i noćne inspekcije, suočava se s izazovima kao što su opsežna videopohrana, poteškoće u otkrivanju oštećenja tijekom nepovoljnih vremenskih uvjeta i visoki troškovi.
3. Infracrveni laserski nadzorni sustav za detektiranje odrona stjenke mase. Iako taj sustav ispunjava zahtjeve za rad noću i za nepovoljnih vremenskih uvjeta, pokazuje ograničenja u otkrivanju manjih lezija.

U modernoj industrijaliziranoj proizvodnji često su potrebna trodimenzionalna mjerenja ciljeva. Beskontaktna inspekcija građevina opsežno je istražena u brojnim područjima inženjerskih istraživanja [2, 3]. Karakteristike mehaničkog oštećenja i evolucije energije kamenog ugljena istražene su pomoću tehnologije mjerenja digitalne slike (engl. *digital image measurement technology* - DIMT) [4]. Rezultati su otkrili da DIMT nudi beskontaktni pristup bez smetnji u usporedbi s tradicionalnim metodama mjerenja (na primjer, mjerenja mjeračem naprezanja i ekstenzometrom). Ta tehnologija učinkovito zaobilazi pogreške koje proizlaze iz ograničenja tradicionalnih metoda za mjerenje deformacija i oštećenja ugljena. Zahvaljujući tome omogućuje visokoprecizno praćenje deformacije tijela ugljena i promjena deformacija u stvarnome vremenu.

Uveden je hibridni mjerni instrument topografije površine za inženjerska mjerenja topografije površine [5]. Taj instrument

sposoban je izvoditi kontaktna i beskontaktna mjerenja te je prikladan za različite primjene. Raspon okomitog mjerenja i razlučivost su 1 mm i 10 nm za kontaktna mjerenja odnosno 500  $\mu\text{m}$  i 3 nm za beskontaktna mjerenja. Prikaz različitih scenarija primjene potvrđuje široku primjenjivost beskontaktnih mjerenja. Sažeti su napredak i primjene optičkih mjernih sustava za ispitivanje površine standardnih komponenti u analitičkoj industriji [6]. Predložena je automatizirana metoda analize deformacija koja se temelji na topografskome laserskom skeneru [7]. Metoda krute analize primjenjuje pristup fizičke simulacije klizišta uz obradu oblaka točaka za kvantitativno dobivanje informacija o trodimenzionalnome (3D) polju deformacije. Rezultati pokazuju da organizirana i prostorno korelirana segmentacija oblaka točaka sfernih ciljeva omogućuje uklapanje segmentiranog oblaka točaka za određivanje položaja i varijacija položaja svih unaprijed definiranih ciljeva. Ta istraživanja potvrđuju primjenjivost i pouzdanost beskontaktnih mjerenja u različitim scenarijima.

Tradicionalnu segmentiranu metodu mjerenja, koja se oslanja na dugogodišnje iskustvo, karakterizira složen i dugotrajan proces mjerenja, zbog čega je izazovno ispuniti zahtjeve suvremenog praćenja i kartiranja. Posljednjih godina primjena digitalnih kamera postala je sve popularnija, a istaknute su prednosti njihove upotrebe za trodimenzionalna mjerenja [8, 9]. Kamera uređaja sa spregnutim nabojem može poslužiti kao senzor slike, a integracijom tehnike obrade slike i preciznih mjerenja mogu se postići beskontaktna 3D koordinatna mjerenja. 3D mjerenja temeljena na slikama uključuju snimanje dvodimenzionalnih slika objekta iz više kutova pomoću digitalne kamere za dobivanje 3D informacija. Nakon toga uspostavlja se korespondencija između značajki slike kako bi se odredile prostorne koordinate objekta koji se mjeri. Predložena je nova metoda za mjerenje konstrukcijskih deformacija segmenata trupa broda koja se temelji na trodimenzionalnoj rekonstrukciji prostora temeljena na fotografijama (fotogrametrija) [10]. Tom metodom moguće je rekonstruirati 3D model cijelih segmenata trupa upotrebljavajući samo fotografije. Taj proces uključuje kalibraciju kamere, prethodnu obradu slike, usklađivanje točaka značajki, generiranje gustog oblaka točaka, iscrtaavanje mreže i mapiranje tekture za 3D rekonstrukciju. U koraku usklađivanja točaka obilježja, algoritam transformacije obilježja nepromjenjivog mjerila primjenjuje se i optimira uvođenjem globalnih vektora za smanjenje nepodudarnosti, čime se povećava točnost rekonstrukcije. Rezultati studije pokazuju da se tom metodom segmenti trupa mogu mjeriti brže i s većom točnošću od drugih metoda. Uvedena je metoda optičkog nagiba za rekonstrukciju 3D terena primjenom površinski raspršenog svjetla za obnavljanje finih detalja terena iz monokularnih slika [11].

Zahvaljujući brzome napretku računalnih i fotografskih tehnologija, razlučivost slika iz zraka znatno je poboljšana u usporedbi s prijašnjim slikama nastalima tijekom daljinskog snimanja, a troškovi su znatno smanjeni. Taj napredak omogućio je primjenu tehnologija snimanja iz zraka i računalnog vida u

upravljanju brodarstvom. Sustav geomorfoloških mjerenja koji integrira svjetlosno zamjećivanje i klasifikaciju (engl. *Light Detection and Ranging* - LiDAR) te bespilotne letjelice (eng. *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV) predložen je upotrebom letjelice s više rotora [12]. Taj sustav dizajniran je za predviđanje, praćenje i forenzičku analizu klizišta i održavanje prepreka protoku krhotina. UAV RGB slike korištene su za predviđanje nadzemne biomase travnjaka (engl. *Above-Ground Biomass* - AGB) primjenom tehnike strojnog učenja nasumičnih šuma (engl. *Random Forest* - RF) [13]. Ta tehnika omogućuje brzu procjenu AGB travnjaka na regionalnoj razini unutar raspona uzorkovanja na znatan i nedestruktivan način. U istraživanju usmjerenome na točno predviđanje svojstava biljaka (fenotipizacija) bespilotna letjelica (DJI Mixire 1 Raw) opremljena RGB kamerom (DJI Zenmuse x5) korištena je za standardiziranje sondiranja pokrova krošnje (engl. *canopy cover* - CC) jednogodišnjega endemskog usjeva [14]. Tehnologija upotrebe UAV-a s opremom za nagibnu kameru za snimanje iz zraka, hvatanje 3D topografskih informacija i podataka strukturalnih mjerenja na velikim područjima ima široku primjenu u raznim industrijama. U usporedbi s tradicionalnim mjernim metodama taj pristup omogućuje brzo prikupljanje više podataka, eliminirajući pogreške ručnog mjerenja i postizanje dobre točnosti mjerenja. Te prednosti predstavljaju obećavajuće izgleda u inženjerskome istraživanju.

Nalazi istraživanja pokazuju da se tehnologija beskontaktno inteligentne detekcije temeljena na slikama dobivenima dronom opsežno primjenjuje u raznim područjima. Međutim, praktične primjene i istraživanja degradacije željezničkih mostova za velike brzine ograničeni su. U njima razmatraju se karakteristike prevencije propadanja i kontrole u željezničkim mostovima za velike brzine kao što su velika poteškoća sondiranja, širok raspon i opsežan istraživački rad, usklađujući se s prednostima tehnologije beskontaktno inteligentne detekcije. Zato je ovaj rad usredotočen na otkrivanje propadanja temelja željezničkih mostova za velike brzine. Uzima u obzir inženjerski kontekst i kombinira izvanmrežne dronove, 3D lasersko skeniranje i mjerenja 3D digitalne kamere za dobivanje slika iz zraka i zemlje. Usvojeni su inteligentna fuzija s mrežnom bazom podataka u oblaku točaka s više izvora i primjena tehnologije digitalnih blizanaca. Ovo istraživanje predlaže tehnologiju beskontaktno inteligentne detekcije koja se temelji na prepoznavanju slike nastale dronom za utvrđivanje propadanja željezničkih mostova za velike brzine. Ta se tehnologija primjenjuje za provjeru uvjeta kao što su pukotine mostova, korozija, deformacije i drugi problemi u lučnim mostovima.

## 2. Inženjerska pozadina, testiranje i instrumenti za proračun

### 2.1. Inženjerska pozadina

Ovaj je rad usredotočen na lučni most Bali Street Cross-Highway s upetim lukom na željezničkoj pruzi za velike brzine Guiguang u gradu Guilinu, provinciji Guangxiju, kao predmet

istraživanja. Most je armiranobetonski lučni s upetim lukom rasponske konstrukcije 65 m + 65 m. Izgrađen je 2013. i proteže se u obliku slova "Y" u gradskoj zoni, točnije u području ulice Bali. U gotovo 10 godina u prometu most je pokazao znakove različitih vrsta i razina propadanja, uključujući napuknuti beton, izloženu armaturu i korodirane dijelove. U ovome istraživanju primijenjena je tehnika beskontaktnog snimanja primjenom UAV videa da bi se izradio 3D model mosta te kako bi se identificirali i karakterizirali lokacija, vrsta i ozbiljnost oštećenja.

### 2.2. Instrumenti za detekciju i proračun

U ovome istraživanju oprema se uglavnom sastojala od dviju komponenti. Prvi dio bio je posvećen snimanju fotografija na licu mjesta pomoću opreme za inspekciju namijenjene za precizno snimanje iz zraka dronom. Riječ je o dronu DJI Elf 4P opremljenome senzorom prepreka u pet smjerova i radnom frekvencijom daljinskog upravljanja od 2,4 GHz / 5,8 GHz. Sadržava troosni samostabilizirajući gimbal, a kamera je CMOS od 1 inča, s 20 milijuna efektivnih piksela kao što je to prikazano na slici 1. Upotreba litijskih baterija od 12 V pri hlađenju baterija na radnu temperaturu može trajati oko pet minuta. Primjena jakih ventilatora za hlađenje i prisilnog hladnjaka s poluvodičima prikazana je na slikama 2. i 3. Niskonaponsku opremu za punjenje (slika 4.), napajaju litijske baterije s kojima UAV može neprekidno raditi deset sati.

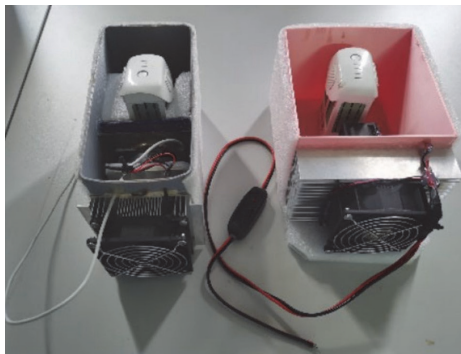


Slika 1. Dron za snimanje iz zraka

Drugi dio opreme upotrijebljene u ovome istraživanju činile su grafičke radne stanice za obradu grafike i modeliranje 3D modela visoke preciznosti, u kojima su fiksne radne stanice za grafičku obradu HPZ-840 profesionalne grafičke radne stanice sa šest računala u klasteru. Upotrijebljen je procesor Intel Xeon E5-2690, sa 192 GB memorije i profesionalnom Nvidia Quadro M5000 grafičkom karticom (8 GB). Mobilna profesionalna grafička radna stanica primjenjivala je Del Professional Graphics Workstation s Intel Core i7-4810MQ procesorom, 16 GB



Slika 2. Jaki ventilator za hlađenje zraka



Slika 3. Prislilni hladnjak poluvodiča



Slika 4. Niskonaponski punjači

RAM-a i profesionalnom odvojenom grafičkom karticom (Nvidia QuadroK2 100M [2GB]).

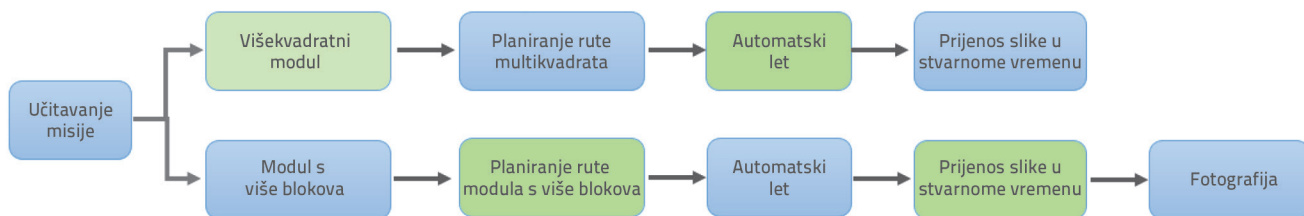
### 3. Metoda tehnologije beskontaktno inteligentne detekcije degradacije mosta

#### 3.1. Snimanje i optimiranje elektroničke slike UAV-a

Snimanje elektroničkih fotografija tijekom leta uglavnom uključuje elektroničku granicu leta UAV-a i UI tehnologiju upozorenja prije leta na temelju okruženja mjesta i GPS informacija, preliminarno određivanje granica leta i točnu prilagodbu parametara kontrole leta, uključujući smjer i bočno preklapanje, kut položaja kamere i visinu leta. Dijagram procesa prikazan je na slici 5. Za planiranje linije automatskog snimanja iz zraka UAV-om, prema uvjetima područja snimanja iz zraka, rute snimanja iz zraka općenito imaju dvije mogućnosti. Jedna je upotreba pravocrtne fotografije snimljene iz zraka (kamera

iznad glave, kamera pod kutom od 45° lijevo i desno, prednji i stražnji letovi, ukupno pet puta) kao što je to prikazano na slici 6. Drugi je upotreba prstena (leća kamere prema sredini prstena), kao što je prikazano na slici 7. Načelo je planiranja osigurati da fotografije imaju odgovarajuće preklapanje, ISO, ekspoziciju i jasnoću. Razlika u visini zraka iznosi  $\leq 200$  mm, a u zemljopisnoj širini i dužini  $\leq 300$  mm. Nakon planiranja linije iz zraka i njezina učitavanja u UAV, UAV automatski leti i snima fotografije prema postavljenim parametrima kako bi se osiguralo da su fotografije snimljene s jednakim razmakom i parametrima.

Također je potrebno provesti dopunsko fotografiranje pomoću UAV-a kojim se upravlja ručno kako bi se osigurala razlučivost i jasnoća 3D modela, u kojemu je stvarni slučaj uglavnom na bermi i otvoru tunela, a ostali dijelovi povećanja su u malome dometu ručne kontrole UAV-ove dodatne fotografije. Dodatno snimanje od operatera zahtijeva posebno iskustvo kako bi se osiguralo preklapanje ekspozicije i jasnoće svake fotografije (obično od



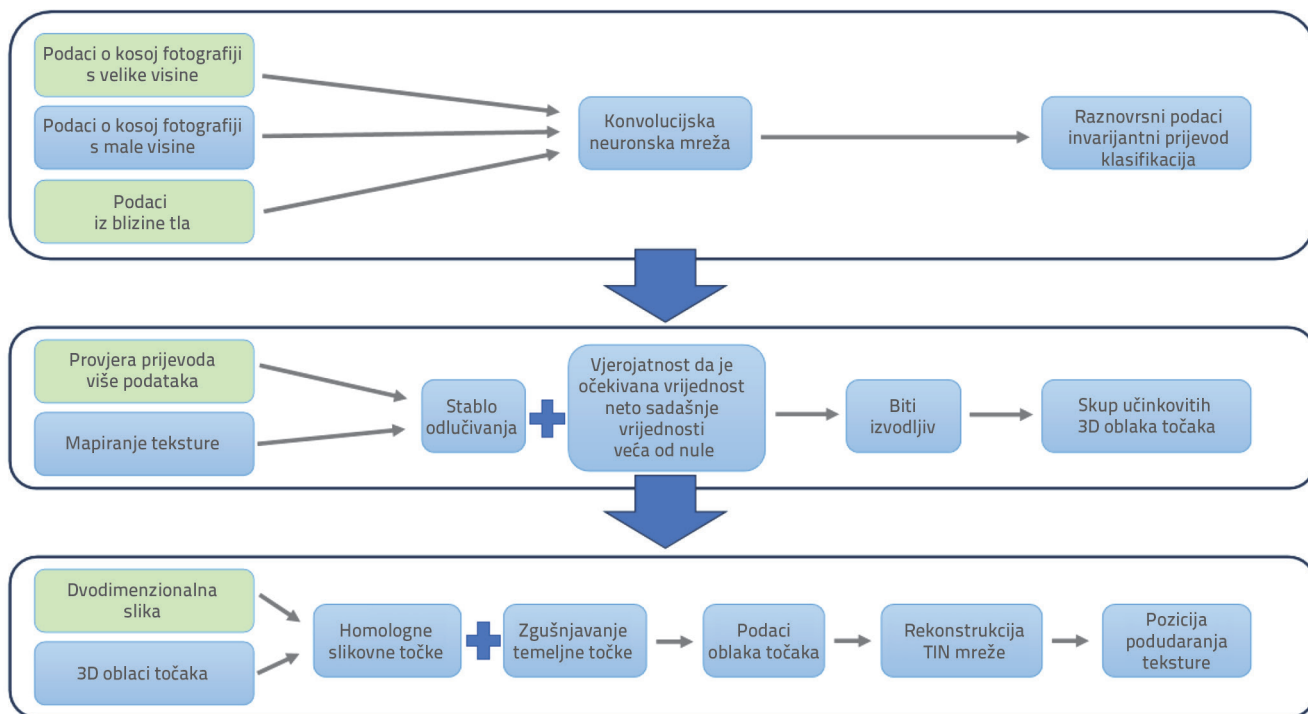
Slika 5. Linearna fotografija iz zraka za više misija



Slika 6. Linearna fotografija iz zraka za više misija



Slika 7. Fotografija iz zraka s petljom s jednom misijom



Slika 8. Dijagram toka povezivanja podataka iz više izvora

50 % do 85 %), a istodobno i to da su udaljenosti između drona i objekta koji se fotografira iste (kako bi se osiguralo da su veličina fotoobjekta i vizualne slike iste). Snimanje vanjskog mosta s velikim lukom iz zraka dovršeno je primjenom kombinacije automatskog leta i umjetnog snimanja iz zraka, a omjer vremena snimanja iz zraka dronom obavljenog tijekom njegova automatskog leta i vremena umjetnog snimanja iz zraka iznosio je približno 1 : 4.



Slika 9. Karta terena s više područja s izravnom fotografijom iz zraka

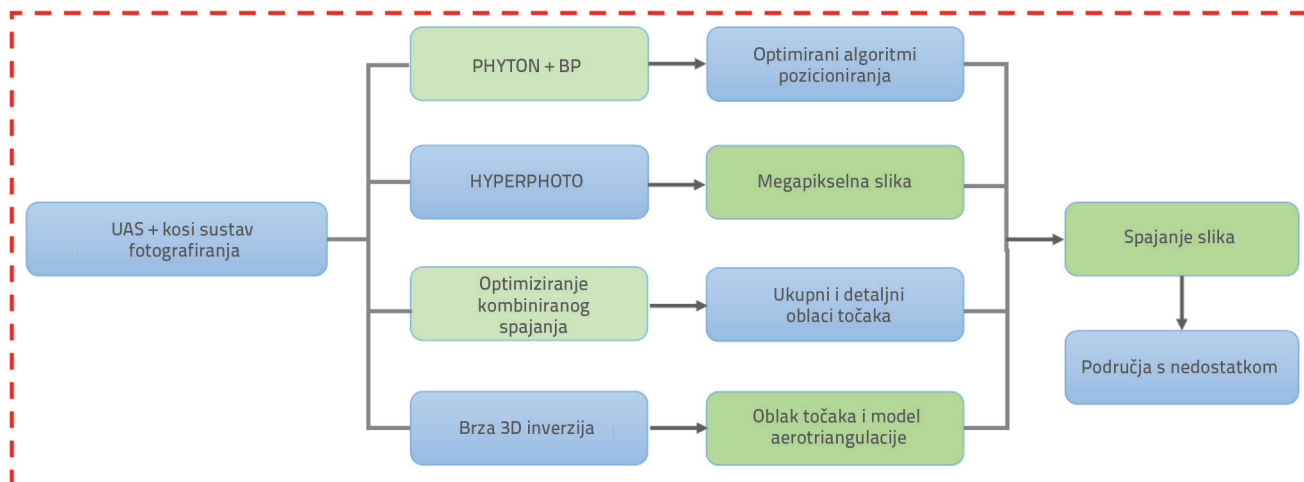
Učinkovita metoda jest uklanjanje šuma i poravnanje s osnovnom linijom izvornih fotografija i postizanje organske fuzije podataka iz više izvora primjenom konvolucijske neuronske mreže, podudaranja osnovnih i slikovnih elemenata i tehnika stabla odlučivanja, što može optimirati grafiku snimljenu UAV-om. Specifični tijek obrade prikazan je na slici 8. primjenom

niza optimizacijskih metoda za dovršetak povezivanja UAV-a i velikih podataka s tisuća fotografija bespilotnim spajanjem gotovo 10.000 fotografija za generiranje topografske karte visoke razlučivosti ciljanog područja. Kao što je to prikazano na slici 9., područje topografske karte visoke razlučivosti (gotovo 110 kvadratnih kilometara) uspoređeno je s jasnoćom topografske karte s više područja (područje uokvireno crvenom crtkanom linijom na slici 9.) i izravnom fotografijom iz zraka (područje crnom crtkanom linijom na slici 9.).

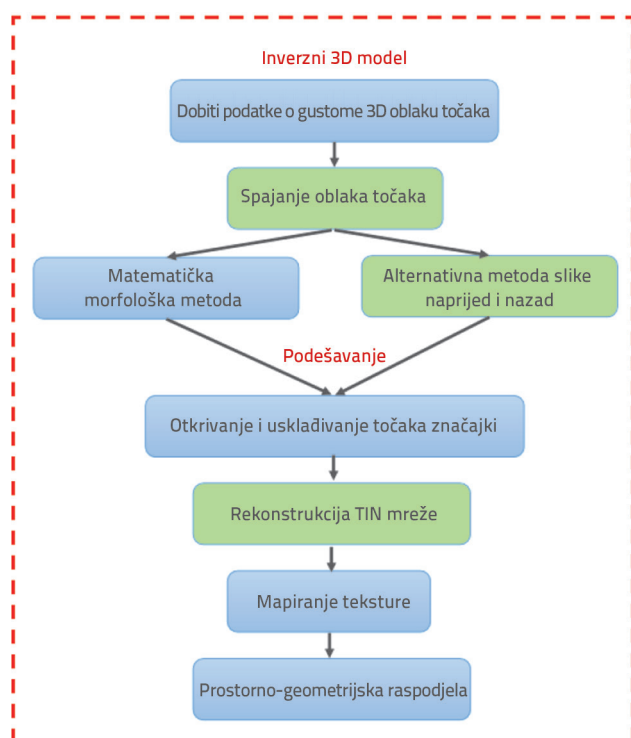
U ovoj studiji jasnoća slike procijenjena je pomoću algoritma maksimalne lokalne varijacije [15]. Taj algoritam procjenjuje oštrinu slike izračunavanjem razlike između točke piksela slike i osam susjednih točaka piksela. Jasnoća slike dobivene topografskim spajanjem više područja i algoritama optimiranja usvojenih u ovom istraživanju stotinu je puta veća od običnih fotografija iz zraka.

### 3.2. Rafinirano strukturno modeliranje u više okruženja

Za rafinirano strukturno 3D modeliranje u više okruženja slikovni podaci prikupljeni bespilotnom letjelicom i digitalnom kamerom uglavnom se spajaju u istu vrstu podataka oblaka točaka tehničkom obradom, a zatim spajaju u integrirani model oblaka točaka poravnavanjem oblaka točaka. Konačno, pročišćeni 3D model HSR mosta s heterogenom fuzijom podataka realiziran je kroz 3D rekonstrukciju iz stvarnog života. Visokoprecizna uspostava 3D modela strukture uglavnom uključuje obradu prostorne stereoinverzne strukture i *air-three* optimiranja, čiji su izračuni prikazani na slikama 10. i 11.



Slika 10. Dijagram toka izračuna aerotriangulacije



Slika 11. Prostorna kubična inverzna struktura

Obrada podataka u oblaku točaka podijeljena je na dva aspekta: spajanje oblaka točaka između različitih mjesta i poravnanje oblaka točaka između oblaka točaka gustog podudaranja slike i spajanja na više mjesta. Budući da koordinatni sustav svakog mjesta u 3D laserskome skeniranju i geografski koordinatni sustav bespilotne letjelice iz zraka nisu isti, potrebno je objediniti koordinate oblaka točaka translacijom koordinata i transformacijom rotacije kako bi se postiglo grubo poravnanje. Nakon što su koordinate objedinjene, ICP algoritam izvodi iterativno optimiranje najmanjih kvadrata na oblaku točaka, a

optimalna stroga transformacija dovršava točno podudaranje dviju skupina oblaka točaka kako bi se spojile slike UAV-a i podaci o oblaku točaka. Zatim se točno usklađeni oblak točaka uvozi u Context Capture za izradu realističnog 3D modela i dobivanje konačnih rezultata visoke preciznosti.

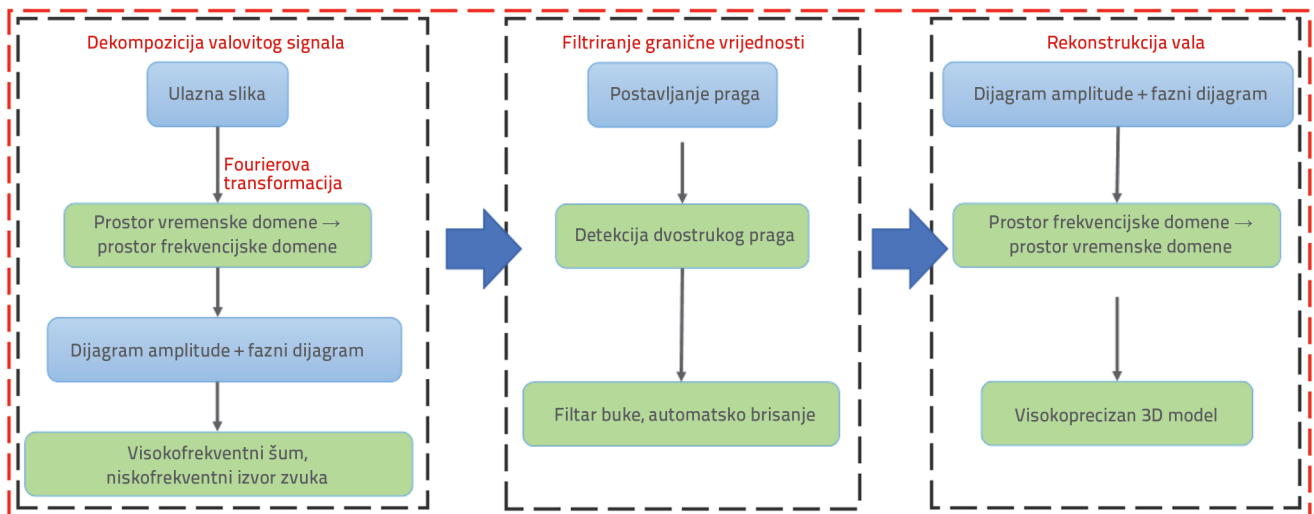
Istodobno, kako bi se poboljšala točnost modela, na temelju 3D modela nizom optimizacijskih algoritama (kao što je to prikazano na slici 12.) provodi se optimiranje 3D modela. U ovome istraživanju planimetrijske, visinske i 3D pogreške svakog modela izračunane su pomoću izraza (1), (2) i (3) na temelju RTK izmjerenih koordinatnih vrijednosti kontrolnih točaka i izmjerenih koordinatnih vrijednosti odgovarajuće pozicije u modelu. Tako je procijenjena točnost prepoznavanja 3D modeliranja usvojenog u ovome istraživanju. Među njima granice pogreške postavljene su na  $\leq 1$  cm u ravninskoj pogrešci i  $\leq 2$  cm u elevacijskoj pogrešci kada su koordinate točaka mjerene stvarnim mjerjenjima. Kada podaci dosegnu fiksno rješenje određeno kao stvarna vrijednost koordinate, rezultati testiranja pokazuju da je točnost puno veća od točnosti modela općega fotografskog 3D modeliranja.

$$M_{xy} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{Ri} - X_{Mi})^2 + (Y_{Ri} - Y_{Mi})^2]}{n}} \tag{1}$$

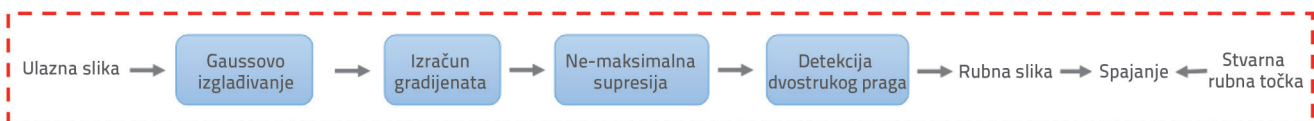
$$M_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{Ri} - X_{Mi})^2}{n}} \tag{2}$$

$$M = \sqrt{M_{xy}^2 + M_z^2} \tag{3}$$

Točnost relativne orijentacije spajanja fotografija i pogreška inverzne projekcije spojnih točaka nakon optimiranja bile su bolje od 1 piksela, a maksimalna rezidualna razlika iznosila je 3 piksela. Za snimanje fotografija upotrijebljena je kamera od 20 megapiksela, a veličina svakog piksela iznosila je 3,3  $\mu$ m.



Slika 12. 3D model procesa optimiranja visoke preciznosti



Slika 13. Dijagram toka metode procjene ruba

Stvaranjem "stvarnih rubnih točaka" (slika 13.) i "hipotetskih rubnih točaka" (slika 14.) rješava se problem poteškoća u kvantificiranju rubnoga gubitka zbog ograničenja razlučivosti 3D inverzne strukture, a točna procjena ostvaruje se rubom proizvoljnoga kuta, čime se znatno poboljšava točnost veličine objekta.

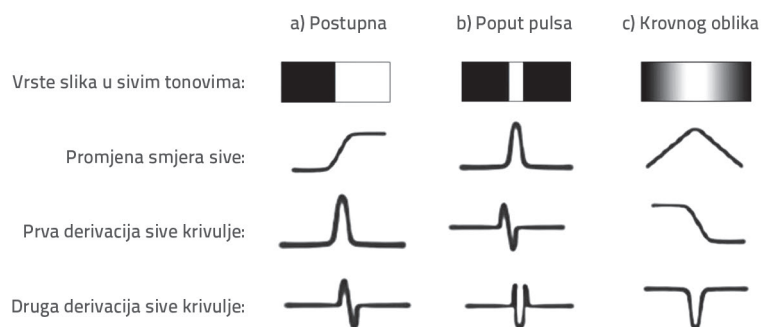
Razvoj tehnika prostornog stereosklađivanja (slika 15.), učinkovita integracija modeliranja slike i 3D skeniranja te druge tehnike beskontaktnog mapiranja konvolucijskom neuronskom mrežom rezultiraju znatnom agregacijom analize podataka kako bi se formirao traženi izvor podataka. Spajanje 3D modela površine, fuzija, uređivanje i druge tehnologije prostornog stereosklađivanja primjenjuju se za dobivanje podataka 3D oblaka točaka tradicionalne drevne arhitekture i potpune, visoke preciznosti temeljene na 3D prostornim koordinatama 3D digitalnog modela komponenti mosta.

Konačni rezultat može se dobiti dovršavanjem stvarnog 3D modela, koji je podvrgnut obradi na tri razine: opći popravak, fini popravak i ultrafini popravak, uklanjanjem raspršenih fragmenata, rubova podataka i druge estetske dorade. 3D model dobiven metodom detekcije i obrade predloženom u ovome radu ima karakteristike visoke rezolucije (rezolucija tla  $\leq 3$  mm) i visoke razlučivosti (točnost modela  $\leq 0,5$  mm) te pripada najpreciznijim 3D modelima. Vrijedno je spomenuti da je ta točnost detekcije dovoljna za uočavanje pukotina u armiranobetonskome (AB) mostu jer

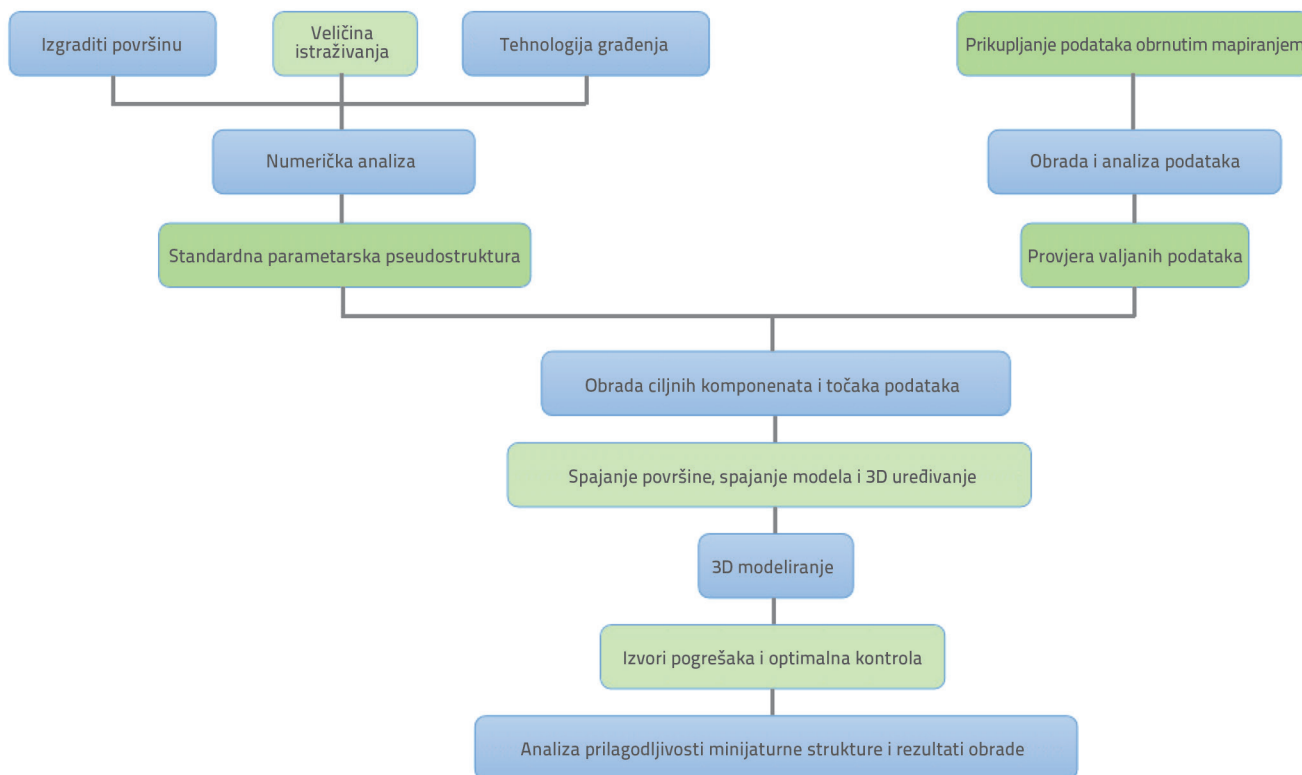
su pukotine koje dosegnu razinu dotrajnosti kod AB mostova obično veće od 0,5 mm u širinu i više od 5 mm u duljinu. Tekstura je modela prirodna, ukupna je nijansa podataka ista, a pogreška u kontrastu reprodukcije boja  $\leq 5\%$ . U efektivnoj površini mosta nema lebećih krhotina i rupa od  $100 \times 100$  mm, što u cijelosti zadovoljava točnost i druge zahtjeve za detekciju propadanja mosta.

#### 4. Evaluacija rezultata terenskih ispitivanja

Ovo istraživanje razmatra lučni most za brzu željeznicu kao predmet istraživanja. Usvaja metodu tehnologije beskontaktno inteligentne detekcije predloženu u prethodnoj studiji za istraživanje stanja oštećenja. Prvi je korak uspostaviti čvrsti 3D model visoke preciznosti lučnog mosta. Gornji dio lučnog mosta generiran je iz zračne fotografije UAV-a predobradom slike, podudaranjem značajki slike, rekonstrukcijom oblaka točaka na temelju strukture



Slika 14. Ilustracija procesa optimiranja hipotetskih rubnih točaka



Slika 15. Tehnika prostornog (3D) usklađivanja

oporavka kretanja i rekonstrukcijom gustog oblaka točaka na temelju metode CMVS–PMVS. Nakon toga su podaci o oblaku točaka s više mjesta 3D laserskog skenera uvezeni u računalni program SCENE za spajanje i dodjelu boja, a spojeni oblak točaka donjeg dijela mosta i oblak točaka generiran fotografijom iz zraka UAV-a točno su usklađeni kako bi formirali potpune podatke o oblaku točaka lučnog mosta. Konačno, podaci oblaka točaka uvezeni su u Context Capture dodavanjem kontrolnih i konstrukcijom nepravilne trokutaste mreže i automatskim mapiranjem teksture za generiranje konačnoga, realističnoga 3D modela visoke preciznosti. Model lučnog mosta prikazan je na slici 16.



Slika 16. Čvrsti 3D model

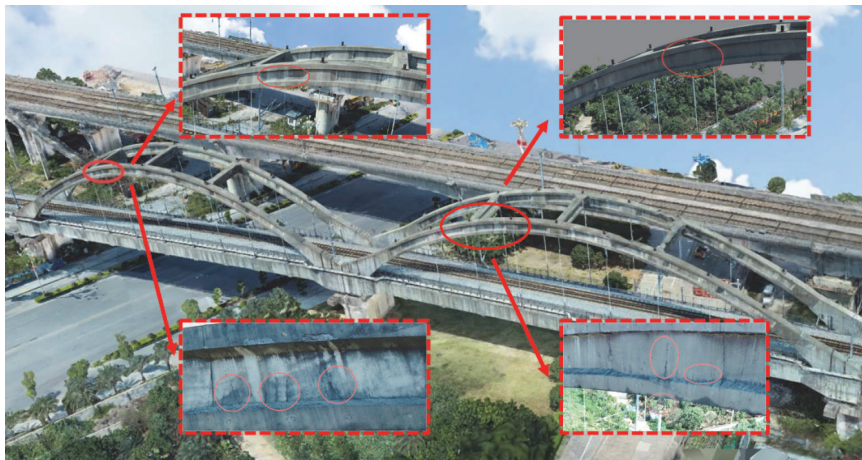
Rezultati pokazuju da uspostavljeni model može učinkovito prikazati ukupnu situaciju mosta i okoliša te da se može upotrebljavati za nastavak ispitivanja detalja lučnog mosta istrage i istraživanja propadanja.

Ta sonda usvaja rješenje sekundarne zračne triangulacije i predlaže upotrebu prijelazne slike kao medija za objedinjavanje zračnih slika različitih zračnih visina. To eliminira učinak prebrzog približavanja točke ekspozicije osnovnoj liniji i učinkovito rješava fenomene pogrešnog sloja oblaka točaka, gubitka slike i sferne površine koji će se pojaviti u trenutačnome modeliranju iz zraka kako bi se osigurao učinak cjelokupnog modeliranja.

Model lokalnog područja pokazuje da je lučni most na mnogim mjestima oštećen, uglavnom u rebrima luka. Pogoršanje se može podijeliti u dvije kategorije. Prva je pojava pukotina na luku (slika 17.). Rezultati istraživanja pokazuju da ta vrsta oštećenja čini najveći udio, od podnožja luka do četvrtine i vrha luka.

Za mjerljiva oštećenja poput pukotina i lokalnih lomljenja obrada poboljšanja slike i detekcija rubova učinkovito poboljšavaju točnost detekcije. Uzimajući postojeće značajke oštećenja kao referencu, obrada slike odvaja područje oštećenja od betonske površine, eliminirajući čimbenike utjecaja nenadziranog područja. Obradom poboljšanja, otkrivanjem rubova i izdvajanjem značajki točno izdvaja područje, duljinu, širinu i druge karakteristične informacije o dimenzijama ključnih lezija. Time se prevladavaju poteškoće točne kvantifikacije ključnih područja zbog gubitka oštećenih rubova uzrokovanog ograničenjima razlučivosti tradicionalnih slika pregleda i znatno poboljšava točnost pregleda.





Slika 17. Pukotine na konstrukciji luka



Slika 18. Iscvjetavanje na površini lukova

Druga primarna vrsta propadanja jest prisutnost iscvjetavanja na mnogim mjestima na lukovima mosta kao što je to prikazano na slici 18. Pretpostavlja se da je to uzrokovano prodiranjem vlage s površine materijala u unutrašnjost materijala, koja zatim curi iz unutrašnjosti člana. Dugoročni razvoj može utjecati na strukturnu čvrstoću i estetski izgled zgrada te može uzrokovati pogoršanje izvedbe čelične armature. Stupanj oštećenja uzrokovan iscvjetavanjem nije tako visok kao onaj uzrokovan izravnim pukotinama. Međutim, ako se dugotrajno zanemaruje, potencijalno će nanijeti nepopravljivu štetu čvrstoći čelične armature. S obzirom na to da je prisutnost iscvjetavanja u dijelu mosta znatna, potrebno je razmotriti i problem tog propadanja. Detalji gornjeg dijela mosta odozdo prema gore prikazani su na slici 19., koja u kombinaciji s prethodno izmjerenim slikama pokazuje da tehnologija beskontaktno inteligentne detekcije može imati dobar učinak prikupljanja podataka o mostu kao cjelini.

Na temelju navedenih rezultata detekcije dotrajnosti vidljivo je da je najveći dio dotrajnosti koncentriran u luku mosta. Osim toga mnoga mjesta pogoršanja spadaju u konvencionalne mrtve zone umjetnog promatranja, što pravodobno otkrivanje čini izazovnim primjenom tradicionalnih metoda inspekcije. Ova metoda ističe prednosti predložene tehnologije beskontaktno

inteligentne detekcije propadanja željezničkog mosta za velike brzine. Rezultati na licu mjesta pokazuju da tehnologija nudi nekoliko ključnih prednosti:

- Visoka razina sigurnosti jer se otkrivanje odvija beskontaktno, upravljanjem sa zemlje, tako se eliminira rizik od penjanja ili rada na visini.
- Visoka razina učinkovitosti jer tim od četiri osobe može dovršiti terenski rad za dva lučna mosta u jednome danu.
- Pravi 3D podaci jer 3D model pruža puni prikaz od 720° iz mrtvog kutu u bilo kojemu trenutku, poboljšavajući sljedivost podataka.
- Praktično i intuitivno izvješćivanje o provedenim radovima na konstrukciji jer primjena 3D modela za izvješćivanje omogućuje pregled stanja na gradilištu na bilo kojoj lokaciji, omogućujući jasnoću i intuitivnost.
- Pogodnost za sastanke i analizu na daljinu: moguće je konzultirati stručnjake za projektiranje, građevinarstvo, ispitivanje konstrukcija i druga relevantna područja na temelju početne identifikacije žarišta propadanja te nema potrebe za fizičkim prisustvom na gradilištu.

- Trajno očuvanje podataka jer 3D model bilježi okruženje gradilišta u stvarnome vremenu, osiguravajući trajno čuvanje za potrebe pregleda, analize, dijagnoze i određivanja razvoja i trendova procesa propadanja.
- Metoda je jednostavna za primjenu: operateri mogu brzo i uz jednostavnu obuku učinkovito prikupljati podatke na licu mjesta.
- Metoda promiče transformaciju i nadogradnju svakodnevnoga inspeksijskog rada primjenjujući modernu opremu i naprednu tehnologiju. Takav pristup zamjenjuje ručni inspeksijski rad, smanjujući intenzitet rada, povećavajući učinkovitost i poboljšavajući sigurnost inspektora.

U usporedbi s tradicionalnim ručnim pregledima i poluautomatskim tehnikama predložena tehnologija beskontaktnoga inteligentnog pregleda za propadanje željezničkih mostova za velike brzine nije ograničena svjetlarnicama i velikim brzinama leta. Primjenom visokoprecizne tehnologije 3D modeliranja i tehnologije dinamičkoga visokopreciznog pozicioniranja u stvarnome vremenu stvarno stanje mosta može se prikazati sveobuhvatno i realistično, a moguće je skenirati ključne komponente u sveobuhvatnome i multiskeniranju od 720° po točkama u bilo kojemu trenutku.



Slika 19. Detalji gornje konstrukcije mosta odozdo

Most se može skenirati u bilo kojemu trenutku bilo kojom komponentom mosta, a ključne komponente mogu se skenirati sveobuhvatnim skeniranjem od 720° u više točaka. Može riješiti ograničenja trenutnog stadija slijepog područja perspektive pregleda željeznice velikih brzina 6C, ciklusa pregleda i vremena pregleda. To je učinkovita nadopuna sustava 6C, koji igra važnu ulogu u smanjenju opsega rada ručnog pregleda, poboljšanju učinkovitosti pregleda te održavanja i preciznosti pregleda te u dinamičkome i stvarnome vremenu shvaćanja vanjskog okruženja linije, što je posebno pogodno za rad i održavanje željeznice. Formira podatkovni ekološki lanac "proizvodnje podataka s informacijama, pomaganja analizi podacima i nadopunjavanja podataka rezultatima analize" za poslove inspekcije željeznica velikih brzina.

Ovo istraživanje sugerira da će usvajanje te tehnologije iz temelja promijeniti metodologiju praćenja željezničkih mostova. Uključuje suvremene tehnologije kao što su analiza slika, fotoelektrična pretvorba, strojni vid i UI opsežna analiza podataka u tradicionalnoj industriji održavanja željeznica. Taj inovativni pristup nastoji zamijeniti ručnu inspekciju opsežnim podacima o otkrivanju. Prednosti tog pristupa iskorištene su za izvođenje teorijskog rudarenja nestrukturiranih podataka za željezničku infrastrukturu velikih brzina, procjenu zdravstvenog stanja infrastrukture i uspostavljanje novog okvira za siguran rad i održavanje željezničkih objekata. Ta transformacija označava promjenu paradigme u održavanju željeznice, najavljujući napredniju i učinkovitiju eru za osiguranje sigurnosti i operativnog integriteta željezničkih struktura. Međutim, nekoliko je istraživanja pokazalo da napredna tehnika pregleda konstrukcije također treba uzeti u obzir stabilnost i točnost u različitim teškim uvjetima kao što su slabi signali GPS veze, slaba vidljivost i područja s velikim rasponom nadmorske visine [16-20]. U tome smjeru treba provesti daljnja dubinska istraživanja.

## 5. Zaključak

U ovome radu predložena je tehnologija beskontaktno inteligentne detekcije koja se temelji na analizi slika nastalih UAV-om za detekciju propadanja željezničkih mostova za

velike brzine. Slike mosta prikupljene su odvojeno pomoću UAV-a i digitalne kamere (bez GPS informacija i POS podataka). Ti su podaci tehničkom obradom stopljeni u oblak točaka. Naknadno su integrirani u jedinstveni model oblaka točaka poravnanjem oblaka točaka. Konačno, obrađen 3D model željezničkog mosta za velike brzine razvijen je spajanjem heterogenih podataka primjenom 3D rekonstrukcije uživo. Taj rafinirani 3D model olakšao je identifikaciju i dnevno praćenje propadanja mosta. Vrijedno je spomenuti da dnevno praćenje u ovome slučaju nije praćenje u stvarnome vremenu, već vrsta periodične detekcije koja se temelji na prednostima predložene metode detekcije kao što su velika brzina detekcije i manje potrebnog osoblja, što se postiže prilagodbom osoblja unutar određenog razdoblja. Djelotvornost i učinkovitost te tehnologije potvrđeni su otkrivanjem propadanja glavnoga lučnog mosta za brze željeznice. Ovo istraživanje pokazuje da ta metoda detekcije nije ograničena točkom svjetlarnika i daje sveobuhvatan i realan prikaz stvarnog stanja mosta. Može se primijeniti u bilo kojemu trenutku za bilo koju komponentu mosta, provodeći sveobuhvatno skeniranje kritičnih komponenti u više točaka od 720°. Predložena tehnologija bavi se ograničenjima trenutačne inspekcije brze željeznice 6C, uključujući nepokrivena vidna područja, ciklus inspekcije i vrijeme inspekcije. Učinkovito nadopunjuje sustav 6C, znatno smanjujući opseg ručnih inspeksijskih operacija, poboljšavajući učinkovitost inspekcije i održavanja, poboljšavajući točnost detekcije i dinamički hvatajući vanjske uvjete okoline u stvarnome vremenu duž željezničkih pruga. Ta je tehnologija posebno prikladna za rad i održavanje željeznica.

## Zahvala

Istraživanje su podržali Nacionalni ključni istraživački i razvojni program Kine (potpora br. 2022YFC3005304), Planski projekti znanosti i tehnologije Odjela za promet provincije Zhejiang (potpora br. 2021069) i Nacionalna zaklada za prirodne znanosti Kine (potpora BR. 52378537), što je primljeno sa zahvalnošću. Podaci koji podupiru nalaze ovog istraživanja dostupni su na zahtjev upućen autoru.

## LITERATURA

- [1] EN 1992-1-1: Design of concrete structures (Part 1) General rules and rules for buildings Report No. BD 49/01, Eurocode Committee for Standardization, EU, n.d. 2004.
- [2] Pearson, E., Smith, M.W., Klaar, M.J., Brown, L.E.: Can high resolution 3D topographic surveys provide reliable grain size estimates in gravel bed rivers, *Geomorphology*, 293 (2017), pp. 143-155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.015>
- [3] Zhang, B.Y., Li, M.Y., Huan, Y.K., Khan, U., Wang, L.F., Wang, F.Y.: Bedrock mapping based on terrain weighted directed graph convolutional network using stream sediment geochemical samplings, *Network using stream sediment geochemical samplings, Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 33 (2023), pp. 2299-2814. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(23\)66299-5](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(23)66299-5)
- [4] Wang, X., Qi, X., Gao, W., Ma, H., Dong, J.: Research on mechanical damage-energy evolution characteristics of coal based on digital image measurement technology, *Measurement (Lond)*, 220 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113394>
- [5] Lu, S., Gao, Y., Xie, T., Xie, F., Jiang, X.Q., Li, Z., Wang, F.: A novel contact/non-contact hybrid measurement system for surface topography characterization, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, (2001)
- [6] Walczak, D., Krolczyk, J.B., Chudy, R., Gupta, M.K., Pruncu, C., Krolczyk, G.M.: Role of optical measurement systems in analysing the surface topography of an industry standard component, *Optik (Stuttg)*, 283 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2023.170919>
- [7] Cáceres-Criado, I., Triviño-Tarradas, P., Valderrama-Zafra, J.M., García-Molina, D.F.: Proposition for the graphic representation, interpretation and evaluation of the degree of terrain resolution in virtual reconstructions, *Interpretation and evaluation of the degree of terrain resolution in virtual reconstructions, J Cult Herit*, 63 (2023), pp. 42-51. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.07.009>
- [8] Ramos, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., Tavares, P.J., Moreira, P.M.G.P.: 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering - Measurements in a Masonry Wall, in: *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, (2015), pp. 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.061>
- [9] Shao, Y., Li, L., Li, J., Li, Q., An, S., Hao, H.: Monocular vision based 3D vibration displacement measurement for civil engineering structures. *Eng Struct*, 293 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116661>
- [10] Wei, Y., Ding, Z., Huang, H., Yan, C., Huang, J., Leng, J.: A non-contact measurement method of ship block using image-based 3D reconstruction technology, *Ocean Engineering*, 178 (2019), pp. 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.015>
- [11] Liu, W.C., Wu, B.: Atmosphere-aware photogrammetry for pixel-wise 3D topographic mapping of Mars, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 204 (2023), pp. 237-256. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2023.09.017>
- [12] Choi, S.K., Ramirez, R.A., Kwon, T.H.: Acquisition of high-resolution topographic information in forest environments using integrated UAS- LiDAR system: system development and field demonstration, *Heliyon*, e20225 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20225>
- [13] Zhang, H., Tang, Z., Wang, B., Meng, B., Qin, Y., Sun, Y., Lv, Y., Zhang, J., Yi, S.: A non-destructive method for rapid acquisition of grassland aboveground biomass for satellite ground verification using UAS RGB images. *Glob Ecol Conserv*, 33 (2022), <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2022.e01999>
- [14] Priyanka, G., Choudhary, S., Anbazhagan, K., Naresh, D., Baddam, R., Jarolimek, J., Parnandi, Y., Rajalakshmi, P., Kholova, J.: A step towards inter-operable Unmanned Aerial Vehicles (UAV) based phenotyping; A case study demonstrating a rapid, quantitative approach to standardize image acquisition and check quality of acquired images, *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 9 (2023), 100042, <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2023.100042>
- [15] Bahrami, K., Kot, A.C.: A fast approach for no-reference image sharpness assessment based on maximum local variation. *IEEE Signal Processing Letters*, 21 (2014) 6, pp. 751-755
- [16] Milič, I., Bleiziffer, J.: Rating systems for the sustainability assessment of infrastructure, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 4, pp. 335-345, <https://doi.org/10.14256/JCE.3858.2023>
- [17] Ereiz, S., Bartolac, M., Goričanec, J., Orsag, M.: Application of UAVs for assessment of bridge infrastructure, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1095-1106, <https://doi.org/10.14256/JCE.3254.2021>
- [18] Zambon, I., Vidovic, A., Strauss, A., Matos, J.: Use of chloride ingress model for condition assessment in bridge management, *GRAĐEVINAR*, 71 (2019) 5, pp. 359-373, <https://doi.org/10.14256/JCE.2411.2018>
- [19] Ristic, J., Ristic, D., Hristovski, V.: Upgrading of isolated bridges with uniform gapped HS devices: Seismic tests, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 12, pp. 1047-1058, <https://doi.org/10.14256/JCE.3580.2022>
- [20] Wang, C.: Overview of integrated health monitoring system installed on cable-stayed bridge and preliminary analysis of results, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 6, pp. 591-604, <https://doi.org/10.14256/JCE.2940.2020>