

Mogućnosti primjene bespilotnih letjelica za pregled i praćenje stanja mostova

Jurica Pajan¹, izv. prof. dr. sc. Ivan Duvnjak²

¹Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, jurica.pajan@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, ivan.duvnjak@grad.unizg.hr

Sažetak

Starenje i degradacija mostova postaje sve veći teret za sustave gospodarenja prometnom infrastrukturom s obzirom da zahtijeva sve veća ulaganja u održavanje velikog broja mostova. Značajne uštede mogu se ostvariti pravovremenom izvedbom radova održavanja. Da bi se to postiglo, nužno je unaprijediti postojeće metode pregleda i praćenja stanja mostova kako bi njihovo provođenje postalo jeftinije, brže i pouzdanije. Na tržištu se u posljednjih desetak godina pojavio velik broj bespilotnih letjelica, a njihova primjenjivost za ocjenu stanja mostova prikazana je u ovom radu. Rad uključuje sljedeće: prikaz karakteristika i kriterija odabira bespilotne letjelice i pripadne opreme za prikupljanje podataka o stanju mostova; opis primjene bespilotnih letjelica za provedbu vizualnog pregleda; mogućnosti monitoringa mostova koristeći bespilotne letjelice; osvrt na ključne nedostatke koji ograničavaju njihovu primjenu u svakodnevnoj praksi.

Ključne riječi: mostovi, bespilotne letjelice, ocjena stanja, vizualni pregled, monitoring

Possibilities of unmanned aerial vehicles for bridge inspection and monitoring

Abstract

The aging and deterioration of bridges is becoming an increasing burden for transportation management systems as it requires increasing investments for the proper maintenance of a large number of bridges. Significant savings can be achieved by timely maintenance work. To achieve this, it is necessary to improve existing methods of inspection and monitoring of the condition of bridges to make their implementation cheaper, faster, and more reliable. In the last ten years, a significant number of unmanned aerial vehicles have appeared on the market. This paper presents their applicability for assessing the condition of bridges. It includes the following: important characteristics and selection criteria of unmanned aerial vehicles and associated equipment for collecting data on the condition of bridges; a description of the application of unmanned aerial vehicles to conduct a visual inspection on bridges; possibilities of monitoring bridges using data recorded by the unmanned aerial vehicle; a review of the key shortcomings that limit their application in everyday practice.

Key words: bridges, unmanned aerial vehicles, condition assessment, bridge inspection, structural health monitoring

1 Uvod

Osiguranje učinkovitosti i ekonomičnosti u sustavima gospodarenja mostovima u Hrvatskoj postaje sve izazovnije zbog velike i razgranate prometne mreže s velikim brojem mostova - više od 3180 objekata u cestovnoj i 548 mostova u željezničkoj infrastrukturi [1]. Čest je slučaj da su postojeći mostovi projektirani i izvedeni prema starijim propisima i tehničkoj praksi te zbog toga nisu u stanju preuzeti današnja opterećenja i zadovoljiti visoke standarde sigurnosti koje propisuju današnji propisi [2]. Unatoč tome, zbog ekonomskih i društvenih razloga potrebno ih je zadržati u upotrebi [3]. Kada svemu tome dodamo neizbježnu degradaciju konstrukcije (materijala) uslijed eksploatacije i atmosferskih djelovanja, uviđa se važnost redovitih pregleda konstrukcije te provođenja pravovremenih radova održavanja i rekonstrukcije s ciljem osiguranja sigurnosti prometne infrastrukture.

Pregledima se nastoji utvrditi stanje konstrukcije i materijala, pogotovo elementa konstrukcije mosta ključnih za sigurnost i funkcioniranje građevine u cjelini. Pregled se provodi u dva osnovna koraka: i) prikupljanje podataka o stanju konstrukcije; ii) obrada, interpretacija te elaboriranje prikupljenih podataka s ciljem utvrđivanja postojećeg stanja. Postojeće stanje utvrđuje se na temelju provedenog vizualnog pregleda, prikladnih statičkih ili dinamičkih ispitivanja te uvidom u dokumentaciju građevine [4]. Postojeće metode pregleda su skupe, dugotrajne, teško ponovljive, a prikupljeni podaci, iako neophodni za učinkovitost sustava gospodarenja objektima, često su rezultat subjektivne procjene bazirane isključivo na stručnosti osobe koja provodi pregled. Svi navedeni nedostaci posebno dolaze do izražaja nakon izvanrednih djelovanja, poput potresa i poplava kada je važno u što kraćem vremenu dati pouzdanu ocjenu postojećeg stanja uz istovremeno osiguranje sigurnosti korisnika i osoba koje provode pregled. Iz svega navedenog, jasno proizlazi potreba za razvojem novih metoda koje će osigurati učinkovitiju, jednostavniju i pouzdanju procjenu stanja mostova.

Bespilotne letjelice, koje su s razvojem tehnologije postale sve dostupnije i za civilne potrebe, nalaze sve veću primjenu u različitim područjima društvenih aktivnosti. Pod pojmom bespilotna letjelica u ovom se članku podrazumijeva složen sustav koji se sastoji od letjelice koja je daljinski upravljana, programirana ili autonomna [5] i opreme koju ona nosi – kamere i ostala osjetila. Njihov potencijal da unaprijede postojeću praksu pregleda mostova prepoznat je u radovima [6-8] a kao osnovna motivacija za korištenje navodi se mobilnost i mogućnost da teško dostupne dijelove mosta snime iz neposredne blizine bez upotrebe skupe opreme za osiguranje pristupa. Time, dio pregleda mosta koji se odnosi na prikupljanje podataka na terenu, može postati brži, jeftiniji i sigurniji.

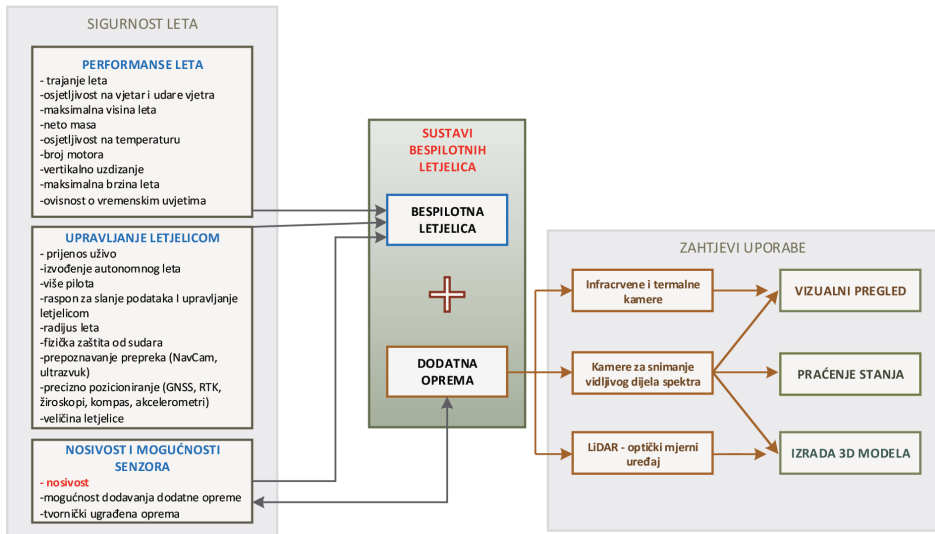
Korištenje bespilotnih letjelica također za sobom povlači i pojedina ograničenja. Dio njih vezan je uz regulatorna ograničenja leta, a dio na tehnička ograničenja letje-

lice. Unatoč brzom razvoju tehnologije bespilotnih letjelica, mogućnost kontakta letjelice s konstrukcijom za potrebe ispitivanja još uvijek se smatra izuzetno problematičnim, tako da je njihova praktična primjena uvelike ograničena isključivo na beskontaktno metode [6]. Prikupljeni podaci u obliku fotografija ili videozapisa bez dodatne obrade ne daju dovoljno informacija o cjelokupnom stanju konstrukcije, a njihova obrada i dalje predstavlja značajan izazov za brojne istraživače. Velika količina prikupljenih podataka u obliku foto i video sadržaja može biti problem za ručnu obradu, a sam podatak o postojanju nedostataka, bez informacija o položaju na konstrukciji često je nedovoljan za bilo kakvu procjenu stanja. Iz tog razloga mogućnosti upotrebe bespilotnih letjelica i pripadne opreme nužno je razmatrati s mogućim metodama obrade prikupljenih podataka kako bi dobivene informacije uistinu bile relevantne za sustave gospodarenja i održavanja mostova.

U ovom radu dan je pregled najvažnijih karakteristika bespilotnih letjelica za pregled mostova. Razmatrane su mogućnosti njihove primjene zajedno s prikladnim metodama za obradu prikupljenih podataka u cilju unapređenja pojedinih aktivnosti koje se provode u sklopu pregleda mosta, a važne su za procjenu postojećeg stanja i planiranje aktivnosti redovitog održavanja.

2 Odabir sustava bespilotnih letjelica za pregled mostova

Na tržištu postoji velik broj komercijalnih bespilotnih letjelica, njihovu prikladnost za pregled mostova potrebno je detaljno razmotriti s obzirom na specifične okolnosti u kojima se pregled odvija, ograničenja samog sustava i ciljeve pregleda. Zbog slabe dostupnosti GNSS signala, smetnji u radu kompasa uslijed prisutnosti velikih količina metala te turbulencija koje se javljaju u okolini mosta, let letjelicom u blizini mosta može biti rizičan, a korištenje letjelice ograničeno samo na snimanje pojedinih dijelova mosta. Rizici njihova korištenja vezani uz sam postupak prikupljanja podataka mogu se minimizirati ispravnim odabirom bespilotnih letjelica opremljenih sustavima osjetila kojima se poboljšavaju performanse i sigurnost leta. Metoda za evaluaciju pojedinih vrsta bespilotnih letjelica dana je u radu [9], a bazira se na ukupno 32 kriterija na temelju kojih se može provesti vrednovanje bespilotnih letjelica. Navedeni kriteriji u prvom se redu odnose na tehničke karakteristike same letjelice i sustava za upravljanje, a za vrednovanje njihove primjene s građevinskog aspekta važno je u obzir uzeti i mogućnosti osjetila i dodatne opreme, koji se mogu ugraditi/ili su tvornički ugrađeni na letjelicu, a bitni su za efikasno prikupljanje relevantnih podataka o stanju objekta. Na *slici 1.* prikazan je postupak odabira sustava bespilotnih letjelica za prikupljanje podataka o stanju mostova baziran na dva osnovna kriterija: prvi kriterij odnosi se na odabir bespilotne letjelice u cilju osiguranja sigurnosti leta, a drugi se odnosi na zahtjeve vezane uz njihovu primjenu.



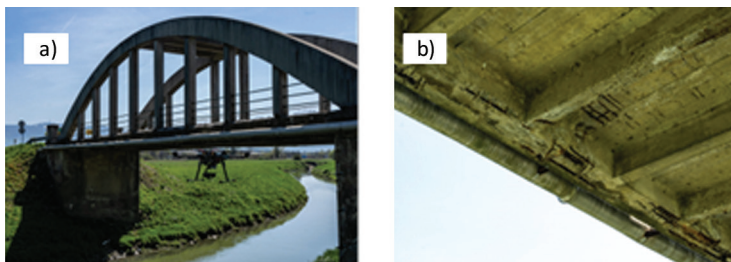
Slika 1. Postupak odabira sustava bespilotnih letjelica za prikupljanje podataka o stanju mostova

Nosivost letjelice još uvijek predstavlja glavno ograničenje za odabir dodatne opreme, stoga je njihov odabir ograničen na osjetila male mase. Komercijalni sustavi u pravilu su opremljeni kamerama za snimanje vidljivog dijela spektra (spektralni raspon s valnim duljinama od 390 do 700 nm). Također, termalne i infracrvene kamere te LiDAR (engl. *Light Detection And Ranging*) dostupni su za ugradnju na letjelicu. LiDAR je optički mjerni instrument koji mjeri udaljenosti i stvara prikaz predmeta ili područja interesa projicirajući snop svjetlosti, a može se koristiti za pozicioniranje letjelice ili za snimanje geometrije mosta [10]. Dodatnu opremu potrebno je izabrati ovisno o namjeni za koju želimo koristiti bespilotnu letjelicu. U nastavku su dani primjeri i mogućnosti korištenja bespilotnih letjelica s pripadnom dodatnom opremom za potrebe provođenja vizualnog pregleda te pojedinih mjerenja važnih za ocjenu, praćenje i održavanje mostova.

3 Vizualni pregled

Najveća prednost primjene bespilotnih letjelica očituje se upravo u njihovom korištenju za obavljanje vizualnog pregleda. Vizualnim pregledom nastoje se uočiti nedostaci koji mogu narušiti pravilno funkcioniranje građevine, dovesti do otkazivanja pojedinih elemenata ili u većoj mjeri ugroziti projektiranu trajnost. Takvi nedostaci najčešće su u obliku površinskih oštećenja poput pukotina, odlamanja betona, lošeg stanja antikorozivne zaštite ili promjena u strukturi materijala, odnosno geometrije (oblika) u odnosu na izvedeno stanje.

Za razliku od klasičnih metoda vizualnog pregleda, koje zahtijevaju skupu opremu za osiguranje pristupa kako bi se pregledao element konstrukcije s prikladne udaljenosti, vizualni pregled koji se oslanja na korištenje bespilotnih letjelica, u najjednostavnijem kontekstu, zahtijeva vještog pilota letjelice koji može dovesti letjelicu u takav položaj da s kamerom može snimiti određeni dio mosta (*slika 2*). Uspjeh takvog pregleda u najvećoj mjeri ovisi o mogućnosti snimanja fotografije dovoljne kvalitete, rezolucije i detaljnosti kako bi se s određenom razinom sigurnosti mogla utvrditi moguća oštećenja ili drugi nedostaci. Slaba osvjetljenost, refleksije svjetlosti od različitih površina, nestabilnost letjelice zbog rotacija i pomaka prilikom leta narušavaju kvalitetu fotografija i videozapisa. Kamere visoke rezolucije s mogućnosti zumiranja i podešavanja ekspozicije u kombinaciji s mehanizmima za kompenziranje pomaka letjelice mogu minimizirati navedene probleme i omogućiti snimanje fotografija dovoljne kvalitete. Također, radi osiguranja potpunosti pregleda važno je da kamera ima mogućnost snimanja prema gore, kako bi se mogao snimiti i podgled rasponske konstrukcije. Osim kamere, za obavljanje vizualnog pregleda mostova važno je odabrati sustav koji ima mogućnost pregledavanja snimki u realnom vremenu tako da se procjena njihove prikladnosti te otkrivanje mogućih nedostataka može obaviti na terenu za vrijeme trajanja pregleda/leta.

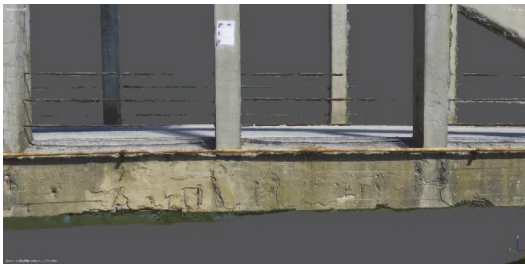


Slika 2. Vizualni pregled mosta primjenom bespilotne letjelice: a) snimanje konstrukcije; b) Korozija armature u podgledu rasponske konstrukcije

Detekcija oštećenja s prikupljenih fotografija ili videozapisa može se obaviti ručnim pregledavanjem te klasifikacijom i procjenom oštećenja prema postojećoj praksi vizualnih pregleda. Ovakav pristup obrade prikupljenih podataka je dugotrajan, podložan greškama i u pravilu primjenjiv samo za veće razmjere oštećenja s naglaskom na evidenciju postojećih oštećenja. Pouzdano kvantificiranje oštećenja, odnosno određivanje veličina poput debljine pukotine, površina zahvaćenih ljuštenjem betona, delaminacija, izmjera geometrije i promjene u geometriji može se postići isključivo primjenom naprednih metoda obrade fotografija ili video zapisa kao što su računalni vid i strojno učenje. Detaljan pregled primjene razvijenih metoda računalnog vida za potrebe pregleda i praćenja stanja infrastrukturnih objekata dan je u radu [11]. Načelno, algoritmi za obradu slike mogu unaprijediti preciznost i učinko-

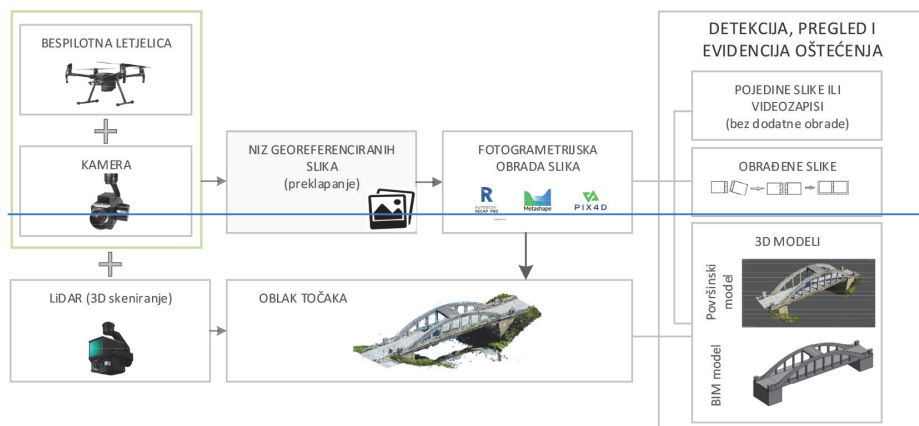
vitost otkrivanja oštećenja s fotografija na način da ih poboljšaju i filtriraju tako da je oštećenja lakše uočiti ili da autonomno otkrivaju oštećenja. Dorafshan i ostali [12] razvili su algoritam koji je uspoređivao primjenjivost postojećih algoritama za detekciju rubova na slici i njihove primjenjivosti za otkrivanje pukotina na fotografijama snimljenim s bespilotnom letjelicom. Dobiveni rezultati uspoređivani su na primjerima pukotina poznatih dimenzija i položaja. Utvrđeno je kako najveću točnost i preciznost u utvrđivanju dimenzije najmanje pukotine daje Laplaceov rubni operator (engl. *Laplacian of Gaussian; LoG*) koji je pokazao najveću točnost (92 %), preciznost (88 %) te najkraće vrijeme obrade (1,18 s po slici). Osim toga, dokazan je potencijal njegove primjene u detekciji pukotina u realnom vremenu. Dodatno, algoritmi za detekciju rubova mogu se koristiti s tehnikama kao što su konvolucijske neuronske mreže dubokog učenja (engl. *Deep Learning Convolutional Neural Network*), a rezultati u otkrivanju pukotina mogu konkurirati onima koje uoče inženjeri kada ručno pregledavaju snimke oštećenja [13].

Značajan napredak u odnosu na klasične metode vizualnog pregleda mostova može se postići izradom detaljnih digitalnih 3D modela tako da se djelomični pregled mosta može provesti u digitalnom okruženju. Ovakav pristup pruža jednostavnu i ponovljivu mogućnost pregleda konstrukcije te olakšava prikaz i interpretaciju prikupljenih rezultata. Na slici 3 dan je prikaz stanja rasponske konstrukcije dobiven iz generiranog 3D modela. 3D model mosta može efikasno prikazati veća oštećenja te poslužiti za određivanje geometrije i površina potrebnih za sanaciju, čime se mogu točnije odrediti troškovi i obuhvat izvedbe pojedinih radova sanacije.



Slika 3. Prikaz oštećenja u digitalnom 3D modelu mosta

Značajno ograničenje ovakvog pristupa je nemogućnost prepoznavanja oštećenja malih razmjera i sitnih pukotina. Otkrivanje manjih oštećenja još uvijek se bazira na obradi slike čija je obrada prethodno opisana, a učinkovita primjena može se postići integracijom oba pristupa (slika 4). Dobiveni 3d modeli mogu služiti za definiranje autonomnog leta letjelice i za prikaz rezultata vizualnog pregleda.



Slika 4. Vizualni pregled baziran na korištenju bespilotne letjelice i pripadne opreme

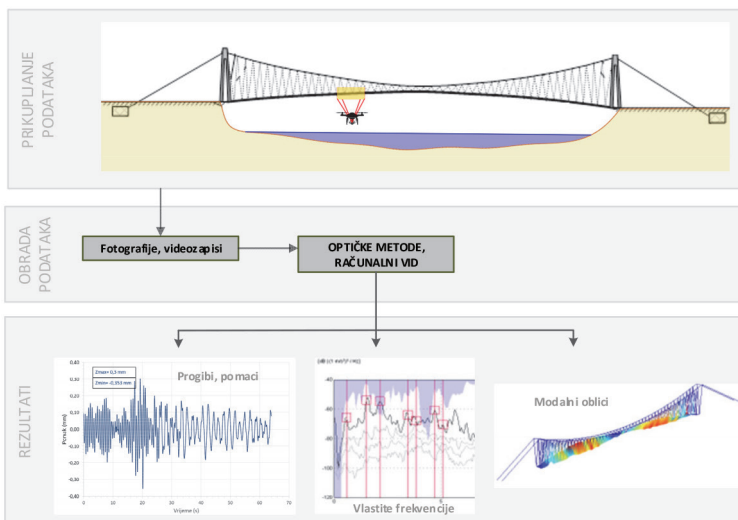
Osim kamera za snimanje u vidljivom dijelu spektra, čija je primjena prethodno opisana, bespilotne letjelice mogu biti opremljene termalnim i infracrvenim kamerama. Infracrvena termografija prepoznata je kao nerazorna metoda ispitivanja koja može otkriti oštećenja koja nisu površinska, poput ljuštenja ili odvajanja betona. Kod mostova, termografija je ograničena samo na pasivan pristup pri kojem se koristi ambijentalna temperatura mosta generirana temperaturnim utjecajima iz okoline. Aktivna termografija je neopravdana za primjenu na mostovima jer bi zahtijevala grijanje ili hlađenje čitavog mosta. Primjena bespilotne letjelice opremljene infracrvenom kamerom za detekciju delaminacije betona na probnom uzorku razmatrana je u radu [14]. Ispitivanjem je utvrđeno kako je razlika između rezultata dobivenih ručnom kamerom i kamerom montiranom na bespilotnu letjelicu minimalna. Za učinkovito otkrivanje delaminacije potrebno je osigurati dovoljan temperaturni kontrast ($>0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), čiji raspon ovisi o okolišnim uvjetima, debljini promatranog elementa i karakteristikama oštećenja [15]. Pojedini dijelovi mosta mogu biti više ili manje izloženi ambijentalnom zagrijavanju, stoga je primjena pasivne termografije na mostu u realnim uvjetima uvelike ograničena.

4 Monitoring mostova

Monitoring se provodi na složenim građevinskim konstrukcijama, a obuhvaća dugotrajno mjerenje mehaničkih i fizikalnih veličina kojima se može opisati ponašanje konstrukcije i osigurati njihovo pouzdano korištenje. U sklopu monitoringa te prilikom pregleda mostova, često se provode statička i dinamička mjerenja koja koriste kontaktne senzore koji mogu efektivno prikupiti podatke, ali su izrazito skupi za postavljanje i održavanje. Primjena bespilotnih letjelica za provođenje mjerenja, zbog

trenutnog ograničenja na beskontaktno metode u najvećoj mjeri ovisi o mogućnostima metoda računalnog vida da iz podataka u obliku fotografija ili videozapisa daju podatke relevantne za opisivanje ponašanja konstrukcije poput pomaka, deformacija ili pojedinih dinamičkih parametara (vlastite frekvencije ili modalni oblici). Videozapise možemo smatrati nizom slika u određenom vremenskom razmaku, drugim riječima, videozapisi slikama daju vremensku dimenziju. Opći princip mjerenja baziran na upotrebi bespilotnih letjelica prikazan je na slici 5. Kontinuitet mjerenja, koji je važan za sustave monitoringa, teško je postići korištenjem bespilotne letjelice zbog trajanja leta ograničenog kapacitetom baterije, a veća učestalost mjerenja može se povećati autonomnim letom.

Praćenje stanja konstrukcija bazirano na optičkim metodama (engl. *Vision-based Structural Health Monitoring - SHM*) već je dugo predmet brojnih istraživanja. Yoneyama i ostali [16] koristili su digitalnu korelaciju slike (engl. *Digital Image Correlation*) za određivanje progiba nosača. Odstupanje vrijednosti progiba određenog korelacijom digitalne slike i onoga dobivenog primjenom induktivnih osjetila za mjerenje pomaka bilo je neznatno. Također, određena je ukupna distribucija pomaka duž nosača mosta, a ne samo u diskretnim točkama kao što je slučaj kod klasičnih mjernih metoda. Sličan pristup obradi slika provjeravan je u radu [17], ali s kamerom za prikupljanje podataka ugrađenom na bespilotnu letjelicu. Dokazano je da nestabilnosti u letu bespilotne letjelice ne utječu u većoj mjeri na rezultate mjerenja zbog postojećih mehanizama za kompenziranje pomaka. Yoon i ostali [18] u svom su radu odredili apsolutnu vrijednost pomaka konstrukcije primjenom bespilotne letjelice opremljene komercijalnom kamerom. Navedena metoda testirana je u laboratorijskim i realnim uvjetima na mostu, a dobiveni rezultati bili su zadovoljavajuće preciznosti.



Slika 5. Princip mjerenja koristeći bespilotne letjelice

Marchewka i ostali [19] razvili su metodu za praćenje pomaka zakovica kod čeličnih mostova primjenom bespilotne letjelice i računalnog vida s ciljem otkrivanja kritičnih spojeva. Osim toga, razvili su model za detekciju korodiranih dijelova na čeličnoj konstrukciji mosta. Primjena bespilotnih letjelica razmatrana je i za određivanje vlačne sile u zategama mosta [20]. U laboratorijskom ispitivanju, razlika između vlačne sile u zatezi određene primjenom razlike u vlastitim frekvencijama dobivenim iz videozapisa snimljenog bespilotnom letjelicom i one određene primjenom akcelerometara iznosila je 3 %. Za određivanje vlastite frekvencije titranja kabela korišteni su harmonici viših frekvencija s ciljem smanjenja utjecaja vibracija letjelice u letu (odgovaraju nižim frekvencijama). Hoskere i ostali [21] odredili su modalne oblike i vlastite frekvencije mosta primjenom videozapisa snimljenog bespilotnom letjelicom. Razvijeni pristup testiran je u laboratoriju i u realnim uvjetima, a dobivene razlike u frekvencijama bile su oko 0,5 %. Usporedba određenih modalnih oblika provedena je primjenom kriterija modalne ortogonalnosti (MAC) koji poprima vrijednosti između 0 i 1 (vrijednost 1 označava savršeno preklapanje). Dobivena vrijednost iznosila je 0,996. Slične vrijednosti odstupanja dobivene su i prilikom mjerenja na stvarnoj konstrukciji mosta – MAC iznad 0,925 a razlike u frekvencijama manje od 1,6 %.

5 Zaključak

Razmatrane su različite mogućnosti primjene bespilotnih letjelica za prikupljanje relevantnih podataka za ocjenu stanja mostova. Zahtijevana razina detaljnosti, vrsta i karakter podataka koje želimo prikupiti uvelike diktira odabir sustava bespilotnih letjelica, pripadne opreme te plan i rizike vezane uz sam let. Važeća tehnička regulativa u Hrvatskoj propisuje sadržaj, obim i učestalost pregleda građevina. Trenutačna i praktična primjena bespilotnih letjelica u prvom redu moguća je za obavljanje vizualnih pregleda na razini osnovnog pregleda mosta kojeg je potrebno obavljati na godišnjoj (polugodišnjoj) razini. Prikupljeni podaci u obliku fotografija ili videozapisa dovoljne su kvalitete i mogu poslužiti inženjerima da iz njih prepoznaju veće nedostatke i oštećenja koji mogu ugroziti sigurnost korisnika građevine ili prouzročiti značajniju materijalnu štetu. Zbog različitog karaktera i prirode mogućih oštećenja i nedostataka na mostu, automatska detekcija u najvećoj mjeri moguća je samo za specifičnu vrstu oštećenja (npr. pukotine, ljuštenje, korozija) te može poslužiti kao pripomoć inženjerima prilikom pregleda.

Više razine pregleda, poput glavnog pregleda, zahtijevaju detaljniji pregled svih dijelova mosta. Fizički kontakt s konstrukcijom često je nužan radi otklanjanja nečistoća ili radi provođenja dodatnih ispitivanja (razornih ili nerazornih) kako bi se pouzdano odredilo stanje konstrukcije. Ograničenje bespilotnih letjelica isključivo na beskontaktnu metodu u tim okolnostima značajno smanjuje njihovu primjenjivost. Integra-

cija umjetne inteligencije i metoda računalnog vida u postupak obrade prikupljenih podataka može uvelike proširiti njihovu primjenu, a brojna provedena istraživanja dokazala su njihovu primjenjivost i za potrebe provođenja pojedinih statičkih i dinamičkih mjerenja. Razmatranje korištenja bespilotnih letjelice za monitoring mostova moguće je uz potpunu automatizaciju sustava za prikupljanje (autonomni let) i obradu podataka, s obzirom na to da monitoring podrazumijeva kontinuirano praćenje pojedinih parametara konstrukcije. Da bi korištenje bespilotnih letjelica postalo općeprihvaćeno za korištenje u svakodnevnoj praksi pregleda i praćenja stanja mostova, kroz buduća istraživanja potrebno je:

- riješiti probleme vezane uz trajanje leta (kapacitet baterije) i nosivost letjelice,
- smanjiti osjetljivost na vremenske utjecaje,
- osigurati upravljivost letjelicom i sigurnost leta prilikom gubitka signala, elektromagnetskih smetnji (čelični mostovi) te prisutnost prepreka – mogućnosti autonomnog leta,
- dokazati pouzdanost predloženih pristupa za različite tipove oštećenja i za različite tipove mostova,
- razviti prikladne metode obrade, pohrane i upravljanja velikom količinom prikupljenih podataka s ciljem osiguranja jednostavnosti korištenja, naknadnog pregleda te interpretacije prikupljenih podataka.

Zahvala

Istraživanje prikazano u ovom radu provedeno je nastavno na projekt “Autonomni sustavi za pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture - ASAP ” financiran sredstvima Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj. Također, autor zahvaljuje Hrvatskoj zakladi za znanost na podršci preko projekta “Projekt razvoja karijera mladih istraživača – izobrazba novih doktora znanosti” HRZZ DOK-2021-02.

Literatura

- [1] Serdar, M., Damjanović, D., Švaco, M., Jerbić, B., Orsag, M., Kovačić, Z.: Razvoj autonomnog sustava za pregled i predviđanje integriteta građevina, GRAĐEVINAR 73 (2021) 12, pp. 1173–1184.
- [2] Mandić, A., Radić, J.: Prilog osuvremenjivanju propisa za opterećenja mostova, GRAĐEVINAR 56 (2003) 7, pp. 409-422.
- [3] Šavor, Z., Šavor Novak, M.: Postupci ocjenjivanja pouzdanosti postojećih mostova, GRAĐEVINAR 67 (2015) 6, p.p. 557-572.
- [4] Tehnički propis za građevinske konstrukcije (Narodne novine, 17/2017).

- [5] Pravilnik o sustavima bespilotnih zrakoplova (Narodne novine, 104/2018).
- [6] Dorafshan, S., Maguire, M.: Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation, *J. Civ. Struct. Heal. Monit* (2018), pp. 443–476.
- [7] Ereiz, S., Bartolac, M., Goričanec, J., Orsag, M.: Primjena bespilotnih letjelica u ocjeni stanja mostovne infrastrukture, *GRAĐEVINAR* 73 (2021) 11, pp. 1095–1106.
- [8] Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project, (Minnesota Department of Transportation) Minnesota, 2015.
- [9] HekmatiAthar, S., N. Goudarzi, N., Karimoddini, A., Homaifar, A., Divakaran, D.: A systematic evaluation and selection of UAS-enabled solutions for bridge inspection practices, *IEEE Aerospace Conference*, Montana, pp. 1–11, (2020).
- [10] Bolourian, N., Soltani, M. M., Albahri, A., Hammad, A.: High Level Framework for Bridge Inspection Using LiDAR-Equipped UAV, *34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, (2017).
- [11] Spencer, B. F., Hoskere, V., Narazaki, Y.: Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring, *Engineering* (2019), pp. 199–222.
- [12] Dorafshan, S., Thomas, R. J., Maguire, M.: Benchmarking image processing algorithms for unmanned aerial system-assisted crack detection in concrete structures, *Infrastructures* 4 (2019) 2.
- [13] Dorafshan, S., Thomas, R. J., Coopmans, C., Maguire, M.: Deep Learning Neural Networks for sUAS-Assisted Structural Inspections: Feasibility and Application, *2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Dallas, pp. 874–882, 2018.
- [14] Mac, V. H., Tran, Q. H., Huh, J., Doan, N. S., Kang, C., Han, D.: Detection of Delamination with Various Width-to-depth Ratios in Concrete Bridge Deck Using Passive IRT: Limits and Applicability, *Materials* 12 (2019) 23, pp. 3996.
- [15] Raja, B. N. K., Miramini, S., Duffield, C., Sofi, M., Zhang, L.: Infrared thermography detection of delamination in bottom of concrete bridge decks, *Structural Control and Health Monitoring* 29 (2022) 3.
- [16] Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K., Kikuta, H.: Bridge deflection measurement using digital image correlation, *Experimental Techniques* 31 (2007) 1, pp. 34–40.
- [17] Reagan, D., Sabato, A., Niezrecki, C.: Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges, *Structural Health Monitoring* 17 (2018) 5, pp. 1056–1072.
- [18] Yoon, H., Shin, J., Spencer, B. F.: Structural Displacement Measurement Using an Unmanned Aerial System, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 33 (2018) 3, pp. 183–192.

- [19] Marchewka, A., Ziółkowski, P., Aguilar-Vidal, V.: Framework for structural health monitoring of steel bridges by computer vision, *Sensors* 20 (2020) 3.
- [20] Tian, Y., Zhang, C., Jiang, S., Zhang, J., Duan, W.: Noncontact cable force estimation with unmanned aerial vehicle and computer vision, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 36 (2021) 1, pp. 73–88.
- [21] Hoskere, V., Park, J.-W., Yoon, H., Spencer, B.F.: Vision-Based Modal Survey of Civil Infrastructure Using Unmanned Aerial Vehicles, *Journal of Structural Engineering* (2019), pp.1943-541