

Primljen / Received: 29.10.2021.

Ispravljen / Corrected: 24.12.2021.

Prihvaćen / Accepted: 28.12.2021.

Dostupno online / Available online: 10.1.2022.

Razvoj autonomnog sustava za pregled i predviđanje integriteta građevina

Autori:



¹Doc.dr.sc. **Marijana Serdar**
serdar@grad.unizg.hr
Autor za korespondenciju



¹Izv.prof.dr.sc. **Domagoj Damjanović**
domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr



²Doc.dr.sc. **Marko Švaco**
marko.svaco@fsb.hr



²Prof.dr.sc. **Bojan Jerbić**
bojan.jerbic@fsb.hr



³Izv.prof.dr.sc. **Matko Orsag**
matko.orsag@fer.hr



³Prof.dr.sc. **Zdenko Kovačić**
zdenko.kovacic@fer.hr

¹Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet

²Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

³Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva

Prethodno priopćenje

Marijana Serdar, Domagoj Damjanović, Marko Švaco, Bojan Jerbić, Matko Orsag, Zdenko Kovačić

Razvoj autonomnog sustava za pregled i predviđanje integriteta građevina

Kako bi se osiguralo racionalnije, plansko održavanje prometne infrastrukture uz smanjenje troškova te u konačnici minimalizirao rizik od katastrofalnih posljedica, nužan je razvoj inovativnih rješenja u području održavanja građevina prometne infrastrukture. Kroz projekt ASAP razvija se sustav za autonomni pregled građevina, koji se zasniva na naprednim mjernim metodama integriranim na robota penjača i bespilotnu letjelicu. Cilj ovog rada je dati osvrt i upozoriti na nedostatke konvencionalnog načina ispitivanja materijala i konstrukcija za potrebu ocjene stanja, koji su bili osnovna motivacija okupljanja multidisciplinarnog tima kroz projekt ASAP. U radu su također prikazane mogućnosti i izazovi razvoja autonomnog sustava za pregled građevina, a sve u svrhu povećanja pouzdanosti i efikasnosti sustavnog pregleda građevina.

Ključne riječi:

ocjena stanja, korozija, frekvencije, vizualni pregled, robot penjač, bespilotna letjelica

Research Paper

Marijana Serdar, Domagoj Damjanović, Marko Švaco, Bojan Jerbić, Matko Orsag, Zdenko Kovačić

Development of an autonomous system for assessment and prediction of structural integrity

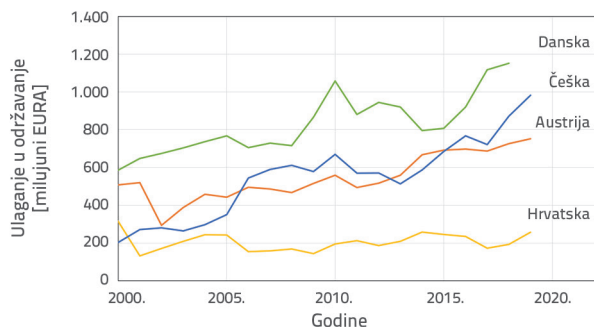
Development of innovative solutions for the maintenance of transport infrastructure facilities is needed in order to ensure a more rational, planned and lower-cost maintenance of transport infrastructure, and to ultimately minimise the risk of catastrophic consequences. A system for an autonomous inspection of structures, based on advanced measuring methods integrated on a wall-climbing robot and an unmanned aerial vehicle, is currently developed in the scope of the ASAP project. The objective of this paper is to provide an overview and draw attention to disadvantages of conventional methods for testing materials and structures in order to assess their condition. This objective was the main motivation for forming a multidisciplinary team through the ASAP project. Possibilities and challenges in the development of an autonomous structural-assessment system are also presented in the paper, with the purpose of increasing the reliability and efficiency of systemic assessment of structures.

Key words:

condition assessment, corrosion, frequency, visual inspection, wall-climbing robot, unmanned aerial vehicle

1. Uvod

Prometna infrastruktura čini jedan od ključnih kapitala Republike Hrvatske (RH), s većim brojem kilometara autoceste na 100.000 stanovnika od Velike Britanije, Italije ili Grčke. U RH se sada gospodari nad više od 3.180 objekata u cestovnoj i 548 mostova u željezničkoj infrastrukturi. U zemljama Europske unije sa sličnom mrežom autocesta, vidljivo je sustavno povećavanje ulaganja u održavanje. Dok su ulaganja u održavanje cestovne infrastrukture tijekom 2020. godine u Austriji, Danskoj ili Češkoj 800 - 1.200 milijuna eura, u Hrvatskoj je u istoj godini za održavanje izdvojeno tek oko 200 milijuna eura [1], slika 1.



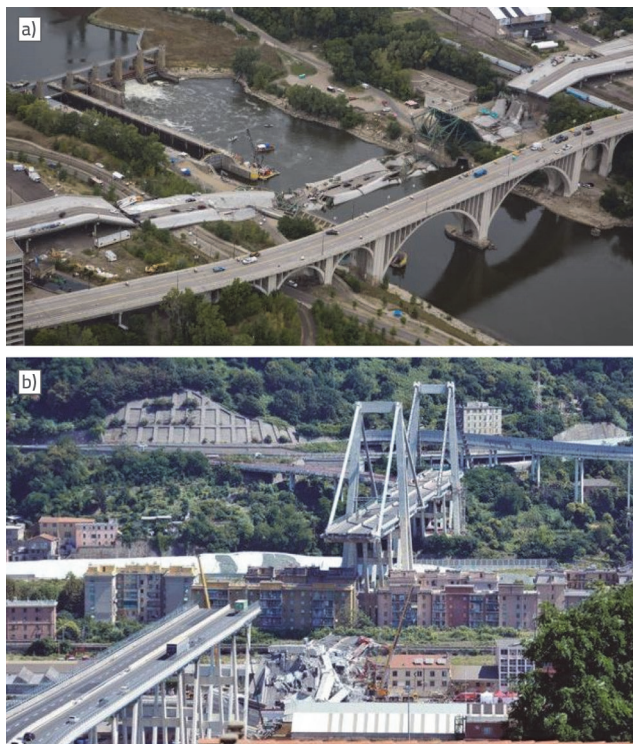
Slika 1. Usporedba ukupnog godišnjeg ulaganja u održavanje prometne infrastrukture od 2000. do 2020. godine za Dansku, Češku, Austriju i Hrvatsku [1]

Nedovoljna sustavna i proaktivna ulaganja u održavanje postojeće cestovne infrastrukture dovode do ugrožene uporabivosti i nosivosti velikog broja mostova te povećanog rizika za sigurnost korisnika hrvatske prometne infrastrukture. Očekuje se da će se u sljedećim godinama državna ulaganja u održavanje postojeće prometne infrastrukture morati značajno povećavati, s obzirom na kritičnu "životnu dob" postojećih konstrukcija, izuzetno agresivni okoliš te nedostatna ulaganja u održavanje tijekom proteklih 20 godina. Ako se u ovom trenutku ne poduzmu potrebne mjere, prometna infrastruktura RH neće samo opteretiti nacionalni budžet, već će ugroziti sigurnost njezinih korisnika, slika 2.



Slika 2. Oštećenja nadvožnjaka Bukovo na autocesti Zagreb – Rijeka

U svijetu su i dalje česti primjeri rušenja mostova, što nerijetko ima tragične posljedice. Primjer je most preko rijeke Mississippi, slika 3.a, koji se 2007. godine urušio s 13 smrtno stradalih i 56 ozlijeđenih osoba. Godinu dana prije naglog rušenja, nakon redovitog pregleda bio je zaključak da će popravak mosta trebati tek 2020. godine [2]. Drugi nedavni primjer je most Morandi u Genovi, Italija, koji se srušio 2019. godine s 43 smrtno stradale osobe, slika 3.b. Pregledi mosta od 1990. do nekoliko godina prije iznenadnog rušenja upozoravali su na loše stanje i velik rizik od nenadanog rušenja mosta [3]. Također, čest je slučaj rušenja mostova uslijed izvanrednih situacija kao što je potres, jer velik dio postojeće infrastrukture ne zadovoljava sadašnje propise za protupotresno projektiranje.



Slika 3. a) Kolaps mosta preko rijeke Mississippi, Minneapolis, SAD, 2007. godine [2], b) Kolaps mosta Morandi u Genovi, Italija, 2019. godine [3]

Pouzdana ocjena nosivosti i uporabivosti građevina može pridonijeti značajnim uštedama na nacionalnoj razini, no još važnije, sigurnosti korisnika prometne infrastrukture. Kako bi se osiguralo racionalnije, plansko održavanje prometne infrastrukture te minimalizirao rizik od katastrofalnih posljedica nekontroliranog rušenja građevina, nužan je razvoj inovativnih rješenja u području održavanja građevina prometne infrastrukture. Upravo s tim ciljem okupljen je tim projekta "Autonomni sustavi za pregled



Slika 4. Komplementarnost snaga projektnih partnera

i predviđanje integriteta prometne infrastrukture – ASAP”, sa svrhom da se osmisli sustav za autonomni pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture, kao dio inteligentnih transportnih sustava i logistike za održavanje cestovne i željezničke infrastrukture, praćenje i upravljanje. Sustav uključuje autonomno provođenje eksperimentalnih ispitivanja materijala i konstrukcije uz pomoć robota i bespilotne letjelice, bežično prikupljanje podataka u realnom vremenu, a potom postprocesno povezivanje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričkih modela za procjenu trajanja uporabljivosti i preostale nosivosti konstrukcija, te koncept pohranjivanja podataka za potrebe korištenja krajnjih korisnika u obliku baze velikih podataka.

Inovativno rješenje za logistiku održavanja prometne infrastrukture predloženo u projektu ASAP zasniiva se na povezivanju tri područja u interdisciplinarnu cjelinu: a) mjerne metode i numerički modeli za predviđanje integriteta prometne infrastrukture (Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, GF), b) autonomni robotski sustavi (Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, FSB) i bespilotne letjelice (Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, FER LARICS), te c) napredne mjerne jedinice (Fakultet elektrotehnike i računarstva, FER ZOEEM), slika 4.

Ideju primjene automatiziranih sustava za pregled građevina, sa svrhom smanjenja troškova provođenja pregleda građevina i povećanja pouzdanosti ocjene nosivosti nakon pregleda, trenutačno razvija nekoliko svjetskih timova. Najjednostavnija rješenja koja se razvijaju obuhvaćaju samo vizualni pregled [4, 5] ili samo jednu metodu ispitivanja [6], ili su predviđeni samo za kretanje na horizontalnim površinama [7]. U odnosu na razvijena rješenja, sustav koji se razvija u sklopu projekta ASAP obuhvaća cjeloviti pregled i predviđanje integriteta građevina, što uključuje:

- mjerni sustav za lociranje armature i mapiranje korodiranosti armature integriran na robota penjača
- mjerni sustav za vizualni pregled, detektiranje pukotina i njihovo praćenje, postavljanje senzora i prikupljanje podataka vezanih za deformacije i dinamičke parametre konstrukcije integriran na bespilotnu letjelicu

- povezivanje eksperimentalnih parametara s numeričkim modelima za predviđanje uporabljivosti i procjenu nosivosti konstrukcija
- automatsko pohranjivanje izmjerenih podataka za učinkovitije i sigurnije upravljanje građevinama.

Svaki od ovih dijelova ima određene specifične izazove, koji se rješavaju u interdisciplinarnim timovima projekta ASAP. U ovom radu bit će prikazani izazovi povezani s prve dvije točke razvoja sustava ASAP:

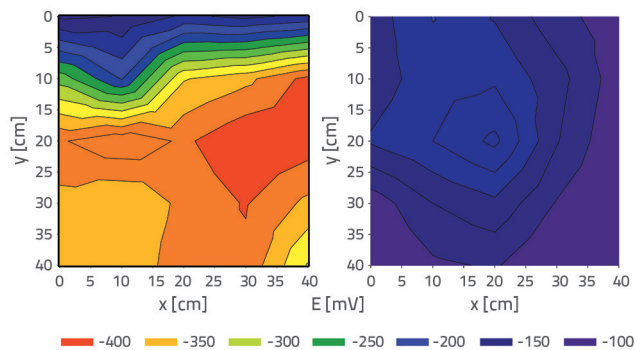
- izazovi razvoja robota penjača s integriranim mjernim sustavom za lociranje i mapiranje korodiranosti armature
- izazovi razvoja bespilotne letjelice koja će osim vizualnih pregleda i detektiranja pukotina imati mogućnost postavljanja senzora za mjerenje relativnih deformacija i vibracija.

2. Razvoj robota penjača za određivanje stanja armature (RoKo)

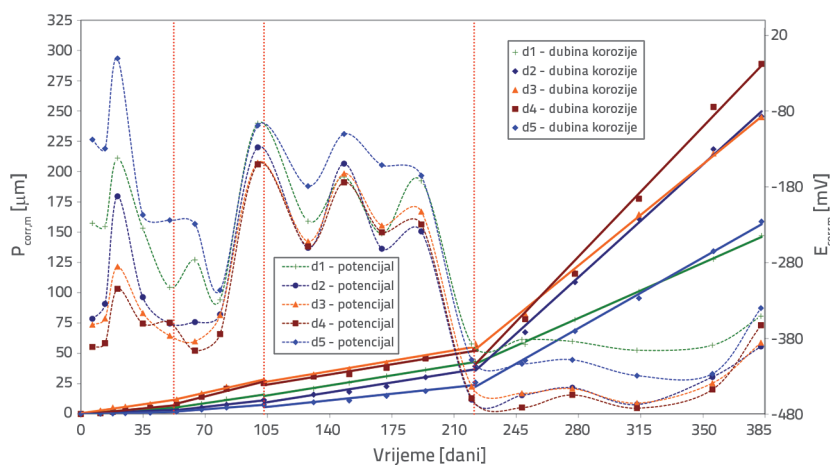
2.1. Klasičan način provođenja pregleda

Upravitelji mostova dužni su prema Zakonu o gradnji [8] i Tehničkom propisu za građevinske konstrukcije [9] provoditi glavne preglede svakih 5 godina, odnosno svakih 6 godina, prema Zakonu o cestama [10] i Pravilniku o održavanju cesta [11]. U današnjoj praksi klasični glavni pregledi obuhvaćaju ocjenu stanja betona i ocjenu stanja armature u pogledu rizika od pojave korozije, te po mogućnosti ispitivanje količine klorida [12] ili dubine karbonatizacije. Za određivanje stanja armature u pogledu korodiranosti postoji čitav niz dostupnih elektrokemijskih i neelektrokemijskih metoda [13]. Najčešće upotrebljavane u inženjerskoj praksi su elektrokemijske metode, koje se baziraju na mjerenju potencijala. Sama metoda obuhvaća zatvaranje strujnog kruga između armature unutar betona (radna elektroda) te protuelektrode i referentne elektrode koje se nalaze u samom uređaju. Nedostatak mjerenja isključivo potencijala armature je u tome što se rezultati ispitivanja mogu izraziti kvalitativno, s ocjenom vjerojatnosti pojave korozije. Rezultat mjerenja korozijskog potencijala ne može se izraziti u inženjerskim jedinicama, poput gubitka promjera armature u vremenu, koje bi se onda mogle iskoristiti u samom proračunu preostale nosivosti i uporabljivosti konstrukcije. Bez obzira na ovaj nedostatak, samo mjerenje je prihvaćeno u struci, te je propisano američkom normom [14]. Primjeri na slici 6. prikazuju mjerenje potencijala armature unutar betona. Iz primjera na slici 5.a moguće je primijetiti zone ispitane površine u kojima postoji povećani rizik od pojave korozije, jer je izmjereni potencijal izrazito negativan. S druge strane, na slici 5.b cijela izmjerena

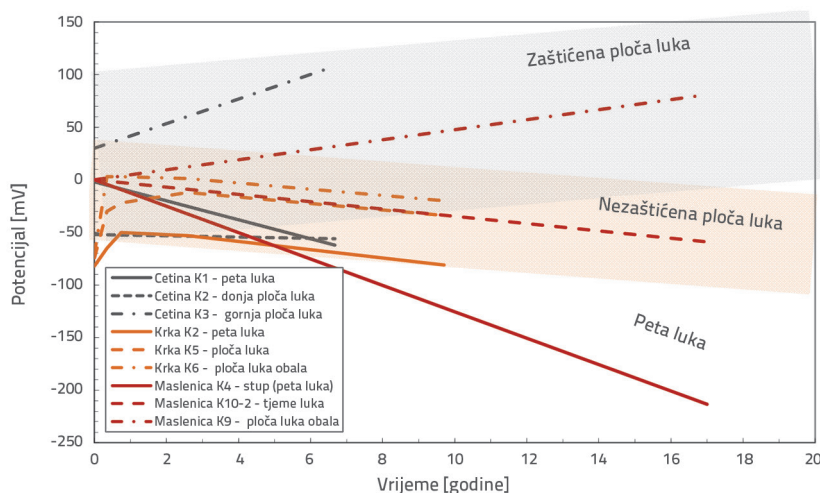
površina sastoji se od armature s malim rizikom od korozije, jer su izmjerene veće vrijednosti potencijala.



Slika 5. Korozijski parametri armature u pločama u XS3 okolišu: polučelijasti potencijal [15]



Slika 6. Mjerenje potencijala i struje, te izračun dubine korozije na temelju izmjerene struje u armiranobetonskim gredama izloženim simuliranom morskom okolišu [16, 17]



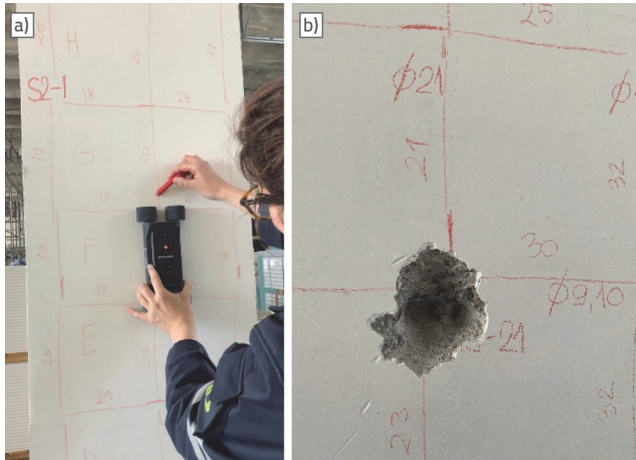
Slika 7. Korozijski potencijali na različitim dijelovima građevine, mjereni uz pomoć ugrađenih senzora za korozijski monitoring u Masleničkom mostu te mostovima preko rijeke Krke i Cetine [18]

S druge strane, mjerenje korozijske struje omogućava mjerenje kinetike korozijskog procesa i kao rezultat daje informaciju o brzini napredovanja korozijskog procesa u milimetrima godišnje. Kada se zna starost konstrukcije i brzina korozijskog procesa, može se izračunati koliko je očekivani gubitak promjera armature unutar betona, te na taj način provjeriti uporabljivost i nosivost konstrukcije. Primjer mjerenja korozijske struje i izračuna dubine korozije iz izmjerenih podataka prikazan je na slici 6. Iz izmjerenih potencijala u vremenu (točkaste linije) vidljivo je da nakon 210 dana izlaganja dolazi do naglog pada potencijala, što upozorava na porast vjerojatnosti pojave korozije. Vidljivo je da je u svim ostalim danima nakon 210 dana vrijednost potencijala mala, to jest oko -400 mV, što i prema američkoj normi upućuje na 90 postotnu vjerojatnost pojave korozije. S druge strane, iz izračunanih dubina korozije (pune linije), na temelju izmjerenih korozijskih struja, može se očitati točno koliki je gubitak

armaturnog čelika uslijed korozije. Jednom kada je poznato koliki je gubitak promjera armaturnog čelika, moguće je provesti proračun preostale nosivosti konstrukcijskih elemenata.

Određivanje stanja armature predstavlja jedan od ključnih parametara, jer može upozoriti na rizike bez vidljivih oštećenja na površini. Štoviše, u trenutku kada su oštećenja već vidljiva na površini, korozijski proces je već znatno uznapredovao te će potrebna sanacija biti obuhvatnija i skuplja. S druge strane rana detekcija i kvantifikacija korozijskog procesa može uvelike smanjiti troškove sanacije ili ih u potpunosti izbjeći ako se osigura adekvatno održavanje. Ovo je posebno vidljivo na primjeru na slici 7., gdje su prikazani korozijski potencijali mjereni uz pomoć sustava za korozijski monitoring ugrađenih u velikim hrvatskim mostovima na autocesti [18]. Negativnije vrijednosti potencijala povezuje se s rizikom od korozije, a pozitivnije se (ili manje negativne vrijednosti) povezuje s manjim rizikom od pojave korozije. Na osnovi potencijala je, dakle, moguće odrediti lokacije unutar betonskog elementa na kojima postoji pojačan rizik od pojave korozije. Na slici je vidljivo kako se vrijednosti potencijala mijenjaju tijekom uporabljivosti i kako jasno upućuju na kritične dijelove konstrukcije, koji se onda pravodobno mogu zaštititi ili održavati da se spriječi nekontrolirano propadanje i povećani troškovi sanacije.

U svakom slučaju, prije mjerenja korozijskih parametara na konstrukciji nužno je locirati armaturu, te se na nju i spojiti. Klasične metode lociranja armature baziraju se na vrtložnim strujama (eng. *Eddy current*), pri čemu uređaj signalizira kada se u njegovoj blizini nalazi metalni objekt. Ako je jedini metalni objekt u blizini betona armatura, tada se može očitati udaljenost armature od uređaja, odnosno debljina zaštitnog sloja, slika 8.



Slika 8. a) Lociranje armature, određivanje debljine zaštitnog sloja i promjera armature uređajem zasnovanim na vrtložnim strujama; b) Potvrđivanje lokacije otvaranjem zaštitnog sloja betona [19]

Lociranje armature i njezini parametri iznimno su važni prilikom ispitivanja stanja te procjene preostale nosivosti i uporabljivosti građevina. Način na koji se izdvojene metode zasad najčešće primjenjuju jest ručno mjerenje na odabranim lokacijama. Mjerenje se provodi tako da se najprije locira armatura, osigura se prihvat na barem jednom mjestu gdje je siguran spoj s ostalim armaturnim šipkama u elementu, te se nakon toga provodi korozijsko ispitivanje. Za pouzdana korozijska mjerenja, posebno za mjerenja gustoće korozijske struje, nužan je provodljiv beton, tj. beton određene vlažnosti. Ako je beton potpuno suh, korozijske parametre neće biti moguće mjeriti s određenom pouzdanošću. Zbog toga se lokacije na kojima se planira provoditi korozijsko mjerenje moraju navlažiti prije mjerenja.

Opisane metode su dugotrajne, te je njihova primjena ograničena na površinom manja mjerna mjesta te manji broj lokacija. Primjena takvih metoda je posebno izazovna na nedostupnim mjestima, gdje je nužno osigurati skelu ili posebna vozila za prilaz mjernim mjestima. U takvim slučajevima je ispitivanje nesigurno za ispitivače, te uključuje povećan sigurnosni rizik osoba koje obavljaju pregled i povećan sigurnosni rizik korisnika građevina prometne infrastrukture. Također, ručno provođenje takvih ispitivanja na manjim površinama može uzrokovati nekonzistentnost među različitim ispitivačima. S obzirom na to da ne postoji u praksi usuglašen protokol pregleda i korištenja dobivenih eksperimentalnih parametara, procjena uporabljivosti i nosivosti ovisi o osposobljenosti i znanju osoblja koje provodi

preglede, koje se uslijed pravila javne nabave često mijenja. Na kraju, samo ispitivanje može biti i ekonomski neefikasno jer zahtijeva skupu mehanizaciju ili montažu pomoćne skele za pregled teško dostupnih mjesta, velik broj radnih sati, zatvaranje prometnih traka ili cijele prometnice što predstavlja velike indirektno troškove.

2.2. Plan razvoja autonomnog sustava RoKo

Zbog svih navedenih nedostataka tradicionalnog provođenja ispitivanja stanja armature unutar betonske konstrukcije, u projektu ASAP predviđen je razvoj mjernog sustava za simultano lociranje armature uz pomoć georadara te mapiranje korodiranosti armature uz pomoć elektroda za mjerenje potencijala, sve integrirano na robota penjača. Sam razvoj ovakvog automatiziranog sustava za mjerenje uključuje s jedne strane razvoj u domeni primjene georadara u ocjeni stanja betonskih konstrukcija te s druge strane koncipiranje, razvoj, konstruiranje i računalne simulacije robota penjača.

U domeni ocjene stanja betonskih konstrukcija, za potrebe razvoja sustava bilo je nužno istražiti stanje područja korištenja georadara u određivanju lokacije armature i debljine zaštitnog sloja betona, te mogućem korištenju istog uređaja za određivanje stanja armature u pogledu korodiranosti [20, 21]. U laboratorijskim uvjetima potrebno je odrediti različitim georadara prilikom lociranja armature, u ovisnosti o različitim stanjima i električnom otporu betona (vlažno, suho stanje, zasićenost kloridima). Na temelju laboratorijskih istraživanja potencijalno se mogu odrediti kalibracijske krivulje za povezivanje polučelijastog potencijala izmjerenog elektrodama i korozijske struje izmjerene terenskim potencijostatima, kako bi se iz mjerenja korozijskih parametara mogla što preciznije dati informacija vezana za debljinu sloja armature koji je stradao uslijed korozije. Nadalje, eksperimentalno određeni parametri mogu služiti za razvoj inicijalnih numeričkih modela za predviđanje trajanja uporabljivosti građevina.

U domeni koncipiranja i razvoja robota penjača istražene su postojeće i razvijaju se nove ili poboljšane metode pokretanja i mehanizama stezanja robotske konstrukcije po vertikalnim površinama građevinskih elemenata. Također, u sklopu aktivnosti projekta verificira se izvedivost različitih upravljačkih koncepata:

- teledirigirano robotsko upravljanje
- razvoj upravljačkih modela za potpuno autonoman robotski rad
- hibridni upravljački modeli temeljeni na teledirigiranom upravljanju i autonomnom radu.

2.3. Izazovi razvoja autonomnog sustava RoKo

Kako bi se razvio autonoman robotski sustav, nužno je riješiti dva glavna izazova: a) osigurati robusnu adheziju robota na podlogu koja značajno ne ovisi o stanju podloge i b) osigurati višesmjerno kontinuirano kretanje robota po vertikalnim površinama.

Prilikom detaljnog pregleda mjerne opreme (georadara i uređaja za mjerenje korozijskog potencijala) odlučeno je koristiti sljedeću mjernu opremu zbog kompaktnih dimenzija (i mogućnosti nadogradnje): i) georadar StructureScan Mini XT (f = 2.7 GHz) proizvođača GSSI (slika 9.a), te ii) Profometer Corrosion s elektrodom na pokretnom kotaču, proizvođača Proceq (slika 9.b). S obzirom na odabranu mjernu opremu kao i faktor sigurnosti, radna nosivost robota treba biti najmanje 1,5 kg (GPR i HCP uređaj s odgovarajućom elektronikom i izvorima napajanja). S obzirom na područja skeniranja (do 10 m²), vertikalni doseg do ~30 metara i brzinu skeniranja (0,25 m/s), robotski sustav treba imati autonomiju od najmanje 30 minuta.



Slika 9. a) Lociranje armature i određivanje debljine zaštitnog sloja georadarom StructureScan Mini XT, b) Mjerenje polučelijastog potencijala uređajem Profometer Corrosion

Radi ispitivanja stanja armature pomoću georadara, potrebno je provesti matrično mjerenje (eng. *grid scan*) s vertikalnim i horizontalnim linijama skeniranja međusobno udaljenim 10-30 cm, ovisno o zahtjevima skeniranja. Matrično mjerenje potrebno je provesti na prethodno planiranom dijelu nosive konstrukcije te se stoga robotski sustav mora precizno i autonomno navoditi i kretati do zadane lokacije. Kako bi se omogućilo precizno relativno i apsolutno kretanje, robotski sustav opremljen je sensorima za mjerenje unutarnjih stanja (inercijalni mjerni uređaji, enkoderi) i sensorima vanjskih stanja (senzori optičkog toka, vizijski sustavi). U stručnoj i znanstvenoj literaturi opisani su različiti robotski lokomocijski mehanizmi, tj. načini kretanja po podlozi [22, 23]:

- bioinspirirani sustavi lokomocije (ruke i noge)
- lokomocija pomoću kabela ili vodilica
- lokomocija pomoću kotača ili gusjenica.

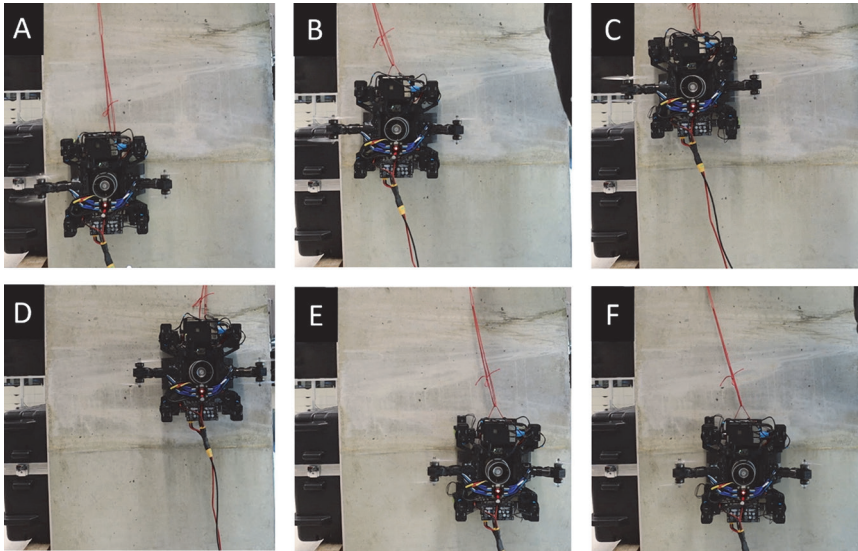
Bioinspirirani sustavi lokomocije najkompleksniji su s obzirom na broj stupnjeva slobode gibanja kao i potrebe za naprednim

upravljačkim algoritima. Najčešće izvedbe su četveronožni ili šestonožni hodači. Osnovni problem kod robota hodača su intermitentne kretnje kojima nije moguće osigurati kontinuitet u kretanju mjerne opreme koji je nužan za procese ispitivanja stanja armature. Lokomocija pomoću kabela i vodilica vrlo je robustan sustav jer koristi pomoćnu nosivu infrastrukturu. U projektu ASAP nije moguće primijeniti ovaj princip zato što se nosive stupove i ostalu infrastrukturu ne može opremiti kabelima ili vodilicama. Lokomocija gusjenicama ne omogućava višesmjerno kretanje s obzirom na moguće upravljačke konfiguracije robota, pa je za idejni koncept robota odabrana lokomocija kotačima. Lokomocija kotačima je najfleksibilnija s obzirom na projektne zahtjeve, a ako je spregnuta sa specifičnim ovjesom, omogućava kretanja i po najzahtjevnijim podlogama. Kako bi se robot mogao penjati po vertikalnim površinama, potrebno je također osigurati robustan sustav adhezije, tj. prianjanja na vertikalnu podlogu. U literaturi je moguće identificirati pet glavnih tipova adhezije [24-27]:

- magnetna adhezija
- elektrostatička adhezija
- kemijska adhezija
- mehanička adhezija
- adhezija potiskom i negativnim tlakom.

S obzirom na ispitivanja armiranobetonskih (AB) konstrukcija u kojima se armatura nalazi na određenoj dubini, adhezija magnetima (elektro ili permanentni magneti) nije prikladna zbog mogućnosti ostvarivanja vrlo malih sila te velikog omjera mase magneta i iskoristive sile. Elektrostatička i kemijska adhezija također omogućava vrlo male nosivosti koje su nedovoljne za parametre projektnog zadatka i mase mjerne opreme koju robot treba prenositi. Mehanička adhezija koristi hrapavost površine kako bi se robot hvatao pomoću različitih mikroiglica, pandži ili drugih mehaničkih elemenata. S obzirom na širok raspon hrapavosti površine, na ovaj način također nije moguće osigurati robustnu adheziju. Također, svi prethodno navedeni sustavi adhezije zahtijevaju intermitentno odvajanje od podloge čime je teško osigurati kontinuirana kretanja. Kao najbolje rješenje nameće se hibridni sustav potiska i negativnog tlaka koji omogućuju stvaranje kontinuiranih i kontroliranih vertikalnih i horizontalnih sila ovisno o konfiguraciji uređaja za stvaranje potiska i podtlaka. Detalje funkcionalnosti hibridnog sustava adhezije može se pobliže proučiti u radu [27] u kojem je izvršena njegova eksperimentalna validacija. Kombinacijom adhezije potiskom i negativnim tlakom postiže se dovoljna sila prianjanja za vertikalno i horizontalno kretanje RoKo robota.

Sadašnji RoKo prototip (slika 10.) koristi kompaktnu konstrukciju s malim propelerima montiranim blizu težišta robota te jednim cijevnim ventilatorom za stvaranje podtlaka. Dimenzija robota je ~380 x 300 mm i ukupne mase 3,25 kg. Prototip je dodatno optimiran s obzirom na omjer snage i mase, te koristi svesmjerni sustav kretanja s četiri nezavisno pogonjena kotača koji imaju mogućnost nezavisne rotacije oko osi okomite na podlogu (eng. *swerve drive*). Na taj se način može promijeniti smjer kretanja u



Slika 10. A do F test kretanja: RoKo robot je ručno upravljani za testiranje svih podsustava (mehanički, energetski, pogonski, adhezijski i upravljački podsustav), crveno užo koristi se kao sigurnosna mjera opreza i robotu ne pomaže u kretanju

bilo kojoj točci, omogućujući bilo koji smjer skeniranja nakon što će RoKo biti opremljen GPR uređajem. Sljedeća verzija robota bit će rekonstruirana i unaprijeđena za nošenje GPR uređaja na rotirajućem mehanizmu za okomito i vodoravno skeniranje armature. Prva uspješna laboratorijska ispitivanja svesmjernog kretanja RoKo robotskog sustava izvedena su na AB elementu dimenzije 80 x 120 cm što je prikazano na slici 10.

Daljnja istraživanja i razvoj robota RoKo kontinuirano se provode u sljedećim područjima:

- optimizacija sile adhezije, potiska i potrošnje energije hibridnog sustava prianjanja na eksperimentalnom laboratorijskom postavu
- razvoj upravljačkog algoritma za novi hibridni adhezijski sustav
- razvoj energetskog sustava temeljenog na visokonaponskom izvoru istosmjerne struje i 400-24V DC/DC pretvaračima
- razvoj komunikacijskog sustava i komunikacijskih protokola između RoKo-a i zemaljske postaje.

3. Razvoj bespilotne letjelice za vizualne preglede, detekciju pukotina i postavljanje osjetila (BePo)

3.1. Klasičan način provođenja pregleda i ispitivanja mostova

Glavni pregledi mostova obvezatno uključuju detaljan vizualni pregled

konstrukcije, a za to je često potrebno angažirati dizalice ili postaviti skelu kako bi se pristupilo elementima donjeg stroja mosta. Kod mnogih mostova i vijadukata nije moguće upotrijebiti klasične autodizalice ili postaviti skele zbog nepristupačnosti terena ili zbog visine stupova te se u tim slučajevima koriste specijalne dizalice sa zglobnim teleskopskim košarama ili platformama, slike 11. i 12. Iako se ne radi o posebno zahtjevnim radovima, uporaba takvih dizalica na kolničkoj konstrukciji podrazumijeva djelomično ili potpuno zatvaranje prometa na mostu, što osim direktnih troškova uzrokuje i znatne indirektno troškove.

Nakon izgradnje, a prije puštanja u promet provode se ispitivanja mostova probnim opterećenjem. Probna ispitivanja provode se i nakon radova na

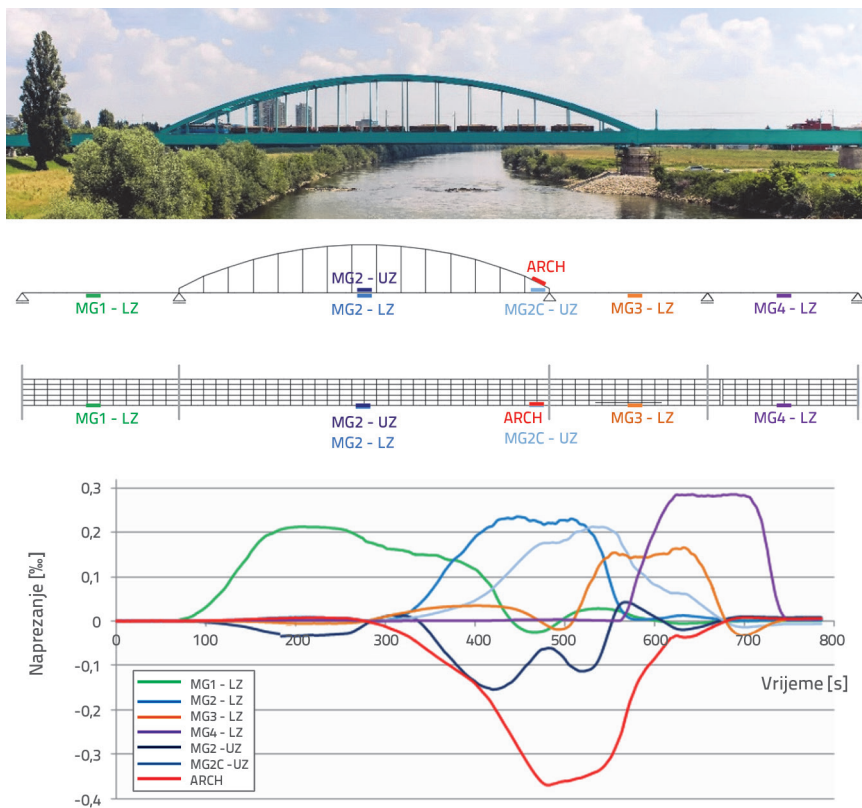
rekonstrukciji mosta, a mogu se zahtijevati i nakon izvanrednih djelovanja na mostu (npr. potres) ili u slučaju kada preko mosta treba prevesti izvanredni teret koji prelazi računsko prometno opterećenje na koje je most dimenzioniran. Prilikom probnog opterećenja, kao najvažniji parametri mjere se pomaci rasponske konstrukcije i oslonaca te relativne deformacije u kritičnim presjecima, odnosno na mjestima očekivanih ekstremnih vrijednosti. Pri dinamičkom djelovanju opterećenja mjere se dinamički pomaci koji se najčešće određuju integranjem zapisa



Slika 11. Pregled mosta Franje Tuđmana u Dubrovniku, 2005. godina [28]



Slika 12. Primjeri specijalnih dizalica za pregled mostova [29]



Slika 13. Mjerna mjesta i zapisi mjerenja relativnih deformacija na željezničkom mostu Sava u Zagrebu (zapis pri prolasku preko mosta dviju kompozicija ukupne mase 1437 tona brzinom od 2 do 3 km/h) [30]

izmjenjenih ubrzanja. Na slici 13. prikazani su zapisi mjerenja relativnih deformacija na rasponskoj konstrukciji željezničkog mosta Sava u Zagrebu prilikom prolaska dviju kompozicija ukupne mase 1437 tona brzinom 2-3 km/h preko mosta. Pomaci se mjere na kolničkoj konstrukciji, pješačkim ili servisnim stazama, pri čemu se uglavnom koriste geodetski uređaji (niveliri, totalne stanice, a u novije vrijeme i GPS - globalni položajni sustav uređaja), pa nije teško pristupiti mjernim mjestima. Kod ovješnih ili visećih mostova potrebno je kontrolirati pomake vrhova pilona kojima se obično teško može pristupiti, pa se u tom slučaju često treba koristiti dizalicama. Mjerenje relativnih deformacija uglavnom se provodi s donje strane rasponske konstrukcije te je za njihovo postavljanje potrebno koristiti dizalice ili skele, jer su na gornjoj površini nosivi elementi rasponskog sklopa skriveni ispod slojeva hidroizolacije, asfalta, pješačkih staza, vijenaca, itd. Primjeri postavljanja senzora za mjerenje relativnih deformacija na vijaduktu u Međunarodnoj zračnoj luci Zagreb i vijaduktu preko Radničke ceste u Zagrebu prikazani su na slici 14., a na slici 15. su prikazani postavljeni senzori na Masleničkom mostu. Kod mostova sa sandučastim poprečnim presjecima osjetila za mjerenje relativnih deformacija mogu se postaviti unutar sanduka, a u ostalim slučajevima treba koristiti skele ili specijalne dizalice. Pri mjerenju relativnih deformacija, senzore treba priključiti na sustav za prikupljanje podataka, što kod mostova velikih raspona može značiti da je potrebno postaviti stotine, a ponekad i kilometre kabela [32]. Sličan problem javlja se i kod mjerenja vibracija, a posebno pri određivanju dinamičkih parametara konstrukcije (eksperimentalna modalna analiza) kada se mjerenje provodi na velikom broju mjernih mjesta. Primjeri eksperimentalno određenih vlastitih oblika titranja i pripadnih vlastitih frekvencija prikazani su na slici 16. Upotrebom bespilotnih letjelica povećala bi se učinkovitost, smanjili troškovi i ubrzala provedba istražnih radova i vizualnih pregleda na mostovima

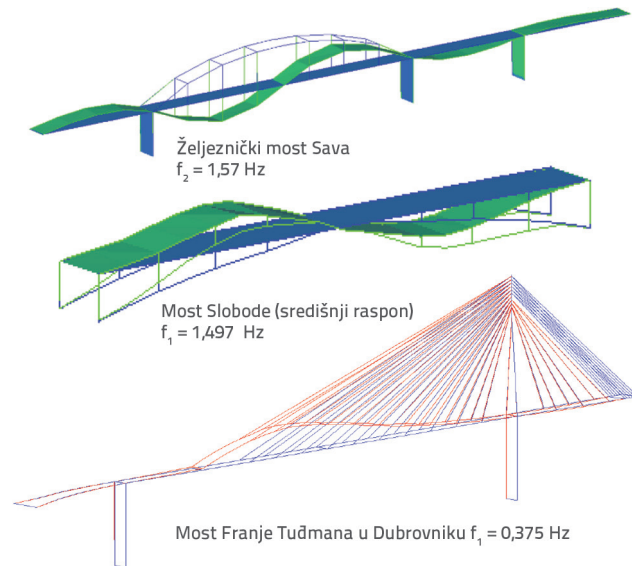


Slika 14. Postavljanje senzora s dizalice na vijaduktu u MZLZ i sa skele na nadvožnjaku Slavenska - Radnička u Zagrebu



Slika 15. Senzori za mjerenje relativnih deformacija na Masleničkom mostu [31]

[33]. Bespilotne letjelice potencijalno je moguće koristiti i za postavljanje senzora na nepristupačnim lokacijama, a razvoj bežičnih senzora i sustava za prikupljanje podataka dodatno bi ubrzalo i pojednostavilo provođenje ispitivanja na mostovima.



Slika 16. Eksperimentalno određeni vlastiti oblici titranja i pripadajuće vlastite frekvencije [34-36]

3.2. Plan razvoja autonomnog sustava BePo

U projektu ASAP razvija se mjerni sustav za vizualni pregled, detektiranje pukotina i njihovo praćenje, postavljanje senzora i prikupljanje podataka vezanih za deformacije i dinamičke parametre konstrukcije, sve integrirano na bespilotnu letjelicu. Za potrebe razvoja određuju se mjerne razlučivosti i optimalni položaji mjernih uređaja u svrhu jednostavnijega i bržega određivanja pomaka i/ili relativnih deformacija i dinamičkih parametara konstrukcije ili elementa mjerenjem ambijentalnih ili prisilno izazvanih vibracija. Kroz aktivnost se također optimizira mjerna oprema za pomake i dinamičke parametre, kako bi bila što prihvatljivija za primjenu na autonomnom robotskom sustavu i automatiziranom prikupljanju podataka.

U domeni razvoja i prilagodbe bespilotne letjelice projektom su obuhvaćene radnje kojima će se realizirati alfa-prototip bespilotne letjelice koja će imati mogućnost postavljanja senzora za mjerenje relativnih deformacija i vibracija na nepristupačne elemente konstrukcije. Te radnje mogu se podijeliti u tri međusobno povezane cjeline:

Koncipiranje, razvoj i konačno konstruiranje tijela bespilotne letjelice s mehaničkim elementima koji će omogućiti postavljanje mjernih uređaja na zadano mjesto. Pri tome se razvija matematički model sustava, s posebnim naglaskom na modeliranje dinamike kontakta i njezinog utjecaja na dinamička i aerodinamička svojstva letjelice.

Prilikom razvoja matematičkog modela sustava, poseban naglasak je na analizi stabilnosti vodeći računa o hibridnim

svojstvima dinamike kontakta s okolinom. Vodeći se rezultatima analize, provodi se sinteza nelinearnog sustava upravljanja sa zadovoljavajućim adaptivno-robustnim svojstvima koja će omogućiti stabilnost bespilotne letjelice prilikom leta i prilikom ostvarivanja kontakta.

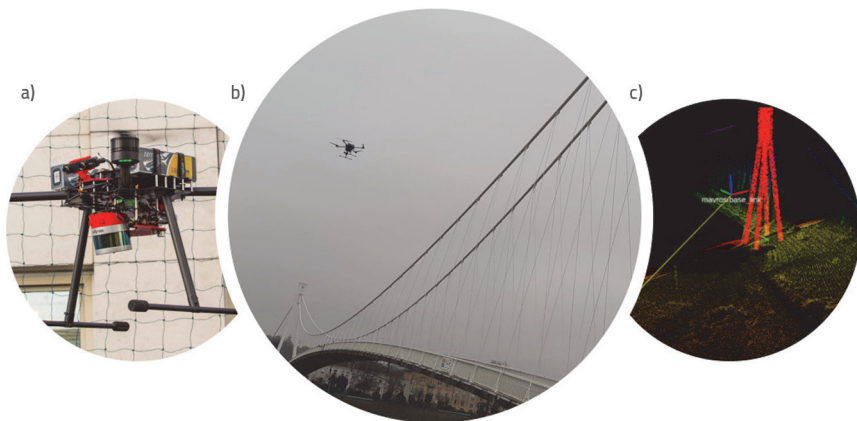
Treća važna stavka alfa-prototipa letjelice podrazumijeva preciznu lokalizaciju u danim uvjetima. U tu svrhu, a vodeći računa o nosivosti letjelice, ona se oprema potrebnim sensorima (3D laseri, stereokamere, RTK GPS i sl.). Nadalje, vodeći računa o dinamičkim mogućnostima letjelice provodi se sinteza algoritama planiranja trajektorije letjelice, koji će omogućiti autonomno postavljanje mjernih uređaja na zadane lokacije.

3.3. Izazovi razvoja autonomnog sustava BePo

Niti jedan robot nije rađen kao švicarski nožič, da bude svestran alat koji načelno nudi mnogo mogućnosti, ali praktično vrlo slabe rezultate [37]. Upravo suprotno, razvoj robotskih sustava svodi se na razvoj specijaliziranih alata prilagođenih specifičnoj primjeni i zadatku koji trebaju izvršiti. Sličan pristup potrebno je usvojiti u razvoju autonomnog sustava BePo, čija se dva načina upotrebe svode na vizualnu inspekciju konstrukcija te interakciju s okolinom, to jest postavljanje senzora na konstrukciju. Iako bazu autonomnog sustava čine identične bespilotne letjelice temeljene na standardnoj konstrukciji sa četiri rotora, oni će se razlikovati prema skupu senzora i alatima koje koriste.

Osnovni problem koji treba svladati kako bi oba sustava bila autonomna jest lokalizacija u prostoru i u odnosu na konstrukciju koju je potrebno ispitati. Bespilotne letjelice postale su vrlo čest alat za vizualnu inspekciju stanja konstrukcija [38-40]. Pri tome, dominantni način korištenja letjelice uključuje nadzor s dva operatera, pilota i snimatelja, koji ručno moraju obaviti pregled konstrukcije. Takve letjelice imaju implementiranu određenu razinu autonomije, pri čemu piloti često upravljaju letjelicom koristeći zatvorenu upravljačku petlju pozicije temeljenu na GPS mjerenjima. Fuzijom se mjerenja GPS-a povezuju s ostalim sensorima na letjelici, koji uključuju: barometarske senzore, inercijske mjerne uređaje i kamere. Takav sustav pruža mogućnost pilotu da zadaje točke prolaza u GPS koordinatnom sustavu, ali se oslanja na iskustvo pilota i znanje snimatelja kako bi odredio i postavio udaljenost od objekta, odnosno ispravno snimio konstrukciju.

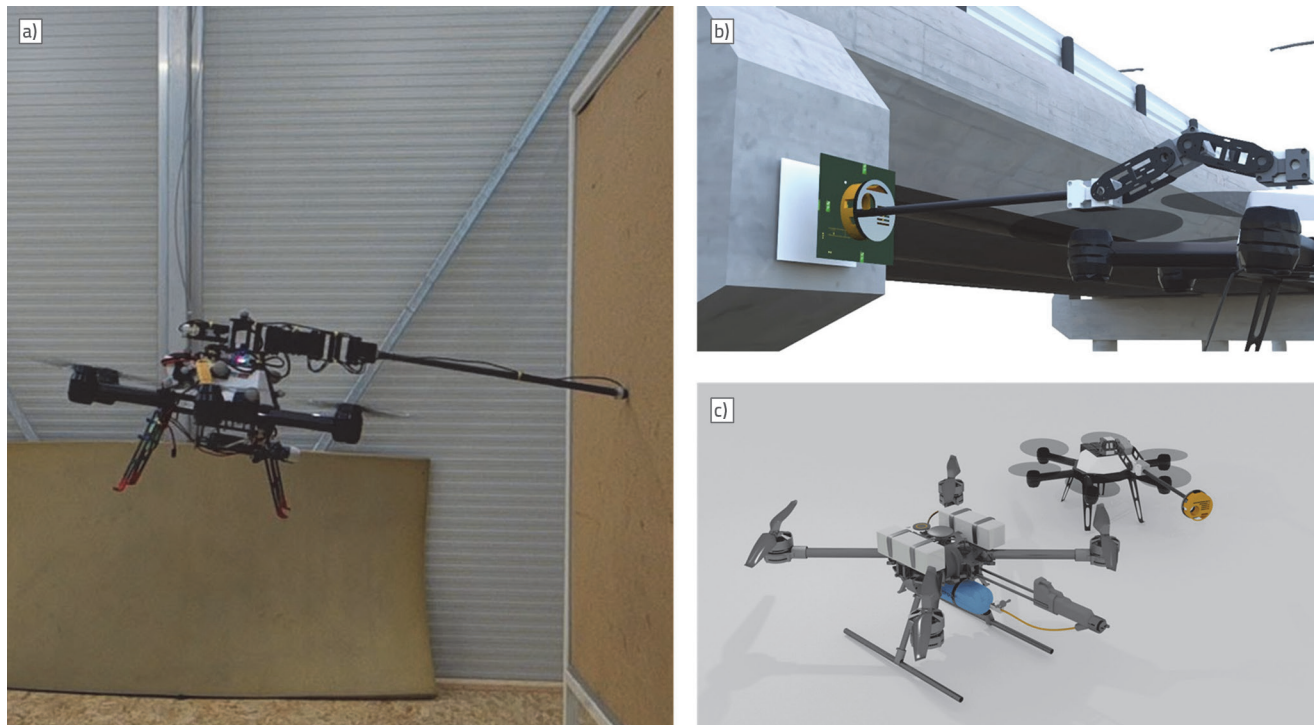
Kako bi bespilotna letjelica postala potpuno autonoman sustav koji je u stanju snimiti čitavu konstrukciju bez prisutnosti operatera, potrebno ju je opremiti dodatnim sensorima, 3D laserskim zrakama visoke razlučivosti (3D lidar) i kamerama sposobnim mjeriti dubinu piksela u slici (RGBD). Osim navedenih senzora, potrebno je razviti algoritme samolokalizacije i mapiranja (SLAM), koji će biti u stanju pronaći korespondenciju između oblaka točaka očitavanja senzora i 3D modela konstrukcije. Takvi algoritmi omogućuju potpunu autonomnost sustava prilikom inspekcije te mogu raditi u uvjetima kada GPS signal nije dostupan (ispod mostova), odnosno kad postoje značajne magnetske smetnje zbog feromagnetskog materijala korištenog



Slika 17. a) BePo autonomni sustav za snimanje konstrukcija u letu; b) Snimanje pješačkog mosta u Osijeku; c) Odgovarajući rezultat korespondencije oblaka točaka prikupljenih 3D lidarom, uspoređenih modelom pilona (crvena boja)

u konstrukciji. Usporedba najčešće korištenih algoritama lokalizacije i mapiranja, s naglaskom na primjenu u sustavima bespilotnih letjelica, pokazuje da je primjenom ove tehnologije moguće lokalizirati letjelicu točnije nego standardnim GPS uređajima [41]. Naravno, lokalizacija je tek prvi korak, dodatno je potrebno pravilno povezati više snimljenih oblaka točaka te precizno segmentirati i prepoznati 3D elemente konstrukcije. Prikaz rezultata primjene takvih algoritama u ispitivanju pješačkog mosta u Osijeku prikazan je na slici 17.

Za ostvarivanje kontakta autonomnog sustava BePo i okoline, predlaže se opremiti letjelicu dodatnim sensorima i aktuatorima. Samo pričvršćivanje će se odraditi u dvije faze pomoću dvokomponentnih ljepila. U prvoj fazi letjelica opremljena raspršivačem nanosi prvu komponentu ljepila, nakon čega druga letjelica, opremljena manipulatorom s više stupnjeva slobode, pričvršćuje senzor prethodno premazan drugom komponentom ljepila [42]. Kako bi se ostvarila čvrsta veza između konstrukcije i senzora, BePo autonomni sustav mora primijeniti kontroliranu silu na konstrukciju. Iznos te sile, kao i trajanje cijelog postupka diktira proizvođač ljepila. Standardan robotičarski pristup u primjeni sile na konstrukciju uključuje sintezu sustava upravljanja silom zasnovan na impedancijskom filtru upravljačke petlje položaja manipulatora. Takav sustav ispitani je u laboratorijskim uvjetima, a rezultati su prikazani u [43]. Prije samog ostvarivanja kontakta vizualnom povratnom vezom potrebno je precizno odrediti gdje se nalazi prva komponenta ljepila. Sustav detekcije prve komponente ljepila, zasnovan na kamerama smještenim na tijelu letjelice, povezat će se s postojećom metodom lokalizacije segmentacijom i preklapanjem oblaka točaka. Time će se omogućiti visoka razina preciznosti prilikom pričvršćivanja.



Slika 18. a) Bespilotna letjelica opremljena manipulatorom s više stupnjeva slobode prilikom ostvarivanja kontakta s površinom, primjenom impedantnog upravljačkog sustava silom manipulatora; b) Zamišljeni scenarij pričvršćivanja senzora na konstrukciju; c) primjenom heterogenog robotskog sustava

4. Zaključak

Ideja projekta ASAP proizašla je iz prepoznatog problema i potreba javnog i privatnog sektora za učinkovitijom provedbom pregleda građevina te primjenom rezultata pregleda za donošenje pouzdanijih odluka o njihovom integritetu. Kroz projekt su udruženi istaknuti predstavnici u različitim područjima: građevinarstvo, robotika, ICT, s ciljem razvoja sustava za autonomno provođenje eksperimentalnih ispitivanja materijala i konstrukcija uz pomoć robota i bespilotne letjelice, s mogućnošću bežičnog prikupljanja podataka u realnom vremenu. U radu je dan pregled mogućnosti razvoja ovakvog kompleksnog sustava, koji uključuje specifične izazove u svim disciplinama uključenim u razvoj. Nastavak razvoja autonomnog sustava ASAP uključuje i povezivanje rezultata eksperimentalnog ispitivanja i numeričkih analiza u svrhu procjene uporabljivosti i preostale nosivosti konstrukcija, te koncept pohranjivanja podataka za potrebe korištenja krajnjih korisnika u obliku baze velikih podataka.

Projektom ASAP se u domeni održavanja građevina uvodi industrija 4. generacije. S obzirom na usporeno uvođenje naprednih tehnologija u građevinski sektor, interdisciplinarna jezgra osnovana tijekom projekta, može postati snažan strateški partner javnom i privatnom sektoru te zajedno činiti svojevrsni klaster konkurentnosti u području modernizacije građevinarstva. Osim znanstvene zajednice uključene u projekt ASAP, nužni sudionici takvog klastera konkurentnosti su svakako upravitelji

postojeće prometne infrastrukture Republike Hrvatske, te mali, srednji i veliki poduzetnici koji se bave ocjenjivanjem stanja i procjenom nosivosti građevina, razvojem opreme za ispitivanje građevina, razvojem inteligentnih robotskih sustava i razvojem i primjenom računalnih platformi i aplikacija za građevinarstvo.

Zahvale

Istraživanje je dio znanstvenog projekta "Autonomni sustav za pregled i predviđanje integriteta prometne infrastrukture (ASAP)" koja financira Europska unija iz Europskog fonda za regionalni razvoj u sklopu poziva Ulaganje u znanost i inovacije – prvi poziv KK.01.1.1.04. Autori rada zahvaljuju svim doktorandima, poslijedoktorandima, istraživačima i stručnim suradnicima zaposlenima na projektu ASAP: Kseniji Tešić (GF), Suzani Ereiz (GF), Sandri Čurčija (GF), Mateju Božiću (FSB), Luki Rabuzinu (FSB), Lovru Markoviću (FER), Jurici Goričanecu (FER), Deanu Martinoviću (FER), Filipu Barišiću (FER). Bez njihovog vrijednog i predanog rada razvoj ovih kompleksnih sustava ne bi bio moguć. Autori također zahvaljuju svim ostalim članovima projektnog tima ASAP, a to su: Ana Baričević (GF), Ivana Banjad Pečur (GF), Ivan Duvnjak (GF), Marko Bartolac (GF), Marta Šavor Novak (GF), Mario Uroš (GF), Josip Atalić (GF), Gordana Hrelja Kovačević (GF), Zvezdana Matuzić (GF), Filip Šuligoj (FSB), Mladen Crneković (FSB), Bojan Šekoranja (FSB), Hrvoje Hegeduš (FER), Roman Malarić (FER), Stjepan Bogdan (FER), Marko Jurčević (FER), Petar Mostarac (FER).

LITERATURA

- [1] <https://stats.oecd.org/>
- [2] <https://minnesota.cbslocal.com/2014/08/01/friday-marks-7-years-since-i-35w-bridge-collapse/>
- [3] Calvi, G.M., Moratti, M., O'Reilly, G.J., Scattarreggia, N., Monteiro, R., Malomo, D., Calvi, P.M., Pinho, R.: Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge, *Structural Engineering International*, 29 (2019) 2, pp. 198-217, <https://doi.org/10.1080/10168664.2018.1558033>
- [4] Lovelace, B.: Unmanned Aerial Vehicle Bridge Inspection Demonstration Project, Minnesota Department of Transportation, Minnesota, 2015.
- [5] <http://www.engineering.com/DesignerEdge/DesignerEdgeArticles/ArticleID/13368/Surface-Clinging-Drone-Developed-for-Better-Bridge-Inspections.aspx>
- [6] Elsener, B., Leibbrandt, A., Glauser, O., Angst, U., Flatt, R., Caprari, G., Siegwart Y.: Climbing Robot for Corrosion Inspection and Monitoring of Reinforced and Post-tensioned Concrete Structures, Proc. Concrete Innovation Conference CIC 2014, Norwegian Concrete Association, 2014.
- [7] La, M., Gucunski, N., Dana, K., Kee, S.H.: Development of an Autonomous Bridge Deck Inspection Robotic System. *Journal of Field Robotics*, April 2017.
- [8] Zakon o gradnji (Narodne novine, 153/13, 20/17, 39/19, 125/19)
- [9] Tehnički propis za građevinske konstrukcije (Narodne novine, 17/2017)
- [10] Zakon o cestama (Narodne novine, 92/14)
- [11] Pravilnik o održavanju i zaštiti javnih cesta (Narodne novine, 90/2014)
- [12] 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>
- [13] Sekulić, D., Bjegović, D., Mikulić, D.: Monitoring behavior of reinforcement embedded in concrete, *GRAĐEVINAR*, 52 (2000) 10, pp. 577-586
- [14] ASTM C876 - 15 Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete
- [15] Bjegović, D., Serdar, M.: Izveštaj o stanju betona i armature u konstrukciji bazena bolnice u Rovinju, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2008.
- [16] Grandić, D.: Calculation procedures for evaluating remaining load bearing capacity and serviceability of corroded reinforced concrete structures, Doctoral Thesis, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, Croatia, 2008.
- [17] Grandić, D., Bjegović, D., Sorić, Z., Serdar, M.: Remaining Performance of Corroded Reinforced Concrete Elements Concrete: 21st Century Superhero / fib, London, Velika Britanija: fib, 2009.

- [18] Sekulić, D., Serdar, M.: Experience with corrosion monitoring using embedded sensors in three bridges on the Adriatic coast, Proceedings of the 1st International Conference COMS_2017, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, 2017.
- [19] Gabrijel, I., Serdar, M., Tešić, K., Vladić Kancir, I.: Izvještaj o naknadnom ispitivanju armiranobetonskih elemenata u prizemlju hale tvornice Torpedo u Rijeci, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2021.
- [20] Tešić, K., Baričević, A., Serdar, M.: Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Using Ground-Penetrating Radar: A Review, *Materials*, 14 (2021) 4, 975, <https://doi.org/10.3390/ma14040975>
- [21] Tešić, K., Baričević, A., Serdar, M.: Comparison of cover meter and ground penetrating radar performance in structural health assessment: case studies, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1131-1144, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3323.2021>
- [22] Nansai, S., Mohan, R.: A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges, *Robotics*, 5 (2016) 3, pp.14, <https://doi.org/10.3390/robotics5030014>
- [23] Mahmood, S.K., Bakhy, S.H., Tawfik, M.A.: Propeller-type Wall-Climbing Robots: A Review. *IOP Conf Ser: Mater Sci Eng.* 2021, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1094/1/012106>
- [24] Li, B., Ushiroda, K., Yang, L., Song, Q., Xiao, J.: Wall-climbing robot for non-destructive evaluation using impact-echo and metric learning SVM, *Int. J. Intell. Robot. Appl.*, 1 (2017), pp. 255–270.
- [25] Akutsu, A., Sasaki, E., Takeya, K., Kobayashi, Y., Suzuki, K., Tamura, H.: A comprehensive study on development of a small-sized self-propelled robot for bridge inspection, *Struct. Infrastruct. Eng.*, 13 (2017) 8, pp. 1056–1067, 2017, <https://doi.org/10.1080/15732479.2016.1236132>.
- [26] Jang, K., An, Y.K., Kim, B., Cho S.: Automated crack evaluation of a high-rise bridge pier using a ring-type climbing robot, *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, 36 (2021) 1, pp. 14–29, 2021, <https://doi.org/10.1111/mice.12550>.
- [27] Božić, M., Jerbić, B., Švaco, M.: Development of a Mobile Wall-Climbing Robot with a Hybrid Adhesion System. In: 2021 44th International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO). IEEE, 2021.
- [28] Rak, M., Damjanović, D.: Izvješće o redovnom i specijalističkom pregledu Mosta Dubrovnik, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2005.
- [29] <https://www.wemo-tec.co.uk/en/show.php?ID=5775> WEMO-tec GmbH Prospect: Underbridge inspection units.
- [30] Damjanović, D., Koščak, J., Duvnjak, I., Bartolac, M.: Static and dynamic testing of steel railway bridge Sava, Road and Rail Infrastructure IV, Proceedings of the Conference CETRA 2016, Department of Transportation, Faculty of Civil Engineering, University of Zagreb, 2016.
- [31] Rak, M., Krolo, J., Čalogović, V., Damjanović, D.: Izvješće o probnom ispitivanju Mosta Maslenica preko Novskog ždrića na državnoj cesti D8, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2005.
- [32] 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, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.2940.2020>
- [33] Ereiz, S., Bartolac, M., Goričanec, J., Orsag, M.: Application of UAVs for assessment of bridge infrastructure, *GRAĐEVINAR*, 73 (2021) 11, pp. 1095-1106, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.3254.2021>
- [34] Rak, M., Damjanović, D., Duvnjak, I., Koščak, J.: Izvješće o ispitivanju željezničkog mosta Sava, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2015.
- [35] Krolo, J., Damjanović, D., Atalić, J., Uroš, M., Duvnjak, I., Šavor Novak, M., Bartolac, M., Korlaet, L., Koščak, J.: Studija za saniranje posljedica potresa – 3. faza, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2020.
- [36] Duvnjak, I., Damjanović, D., Ereiz, S., Bartolac, M.: Izvješće o interventnom glavnom pregledu Mosta dr. Franja Tuđmana na državnoj cesti D8 u Dubrovniku, Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2020.
- [37] Arbanas, B., Ivanovic, A., Car, M., Haus, T., Orsag, M., Petrovic, T., Bogdan, S.: Aerial-ground robotic system for autonomous delivery tasks, in 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2016.
- [38] Henriques, M.J., Roque, D.: Unmanned aerial vehicles (UAV) as a support to visual inspections of concrete dams, Second international Dam World Conference, Lisbon, 2015.
- [39] Kanellakis, C., Fresk, E., Mansouri, S.S., Kominiak, D., Nikolakopoulos, G.: Autonomous visual inspection of large-scale infrastructures using aerial robots, Cornell University, Computer Science, Robotics, 2019.
- [40] Ridao, P., Carreras, M., Ribas, D., Garcia, R.: Visual Inspection of Hydroelectric Dams Using an Autonomous Underwater Vehicle, *Journal of Field Robotics*, 27 (2010) 6.
- [41] Milijaš, R., Marković, L., Ivanović, A., Petric, F., Bogdan, S.: A comparison of lidar-based slam systems for control of unmanned aerial vehicles, in 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2021.
- [42] Ivanović, A., Marković, L., Car, M., Duvnjak, I., Orsag, M.: Towards Autonomous Bridge Inspection: Sensor Mounting Using Aerial Manipulators, *Appl. Sci.*, 11 (2021) 18.
- [43] Marković, L., Car, M., Orsag, M., Bogdan, S.: Adaptive stiffness estimation impedance control for achieving sustained contact in aerial manipulation, in 2021 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA), 2021.