

RoboRAIL: istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture

**Luka Pušić¹, Danijela Jurić Kačunić², Mario Bačić³, Lovorka Librić⁴,
Meho Saša Kovačević⁵**

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, luka.pusic@grad.unizg.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, danijela.juric.kacunic@grad.unizg.hr

³Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mario.bacic@grad.unizg.hr

⁴Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, lovorka.libric@grad.unizg.hr

⁵Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, meho.sasa.kovacevic@grad.unizg.hr

Sažetak

U radu se prikazuje RoboRAIL kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Polazi se od potrebe za češćim i objektivnijim pregledom gornjeg i donjeg ustroja pruge u uvjetima povećanih prometnih opterećenja i klimatski uvjetovane degradacije. Naglasak je na integraciji višesenzorskih podataka, bežičnom prijenosu i primjeni umjetne inteligencije za detekciju anomalija, ranu dijagnostiku i potporu prediktivnom održavanju kritične infrastrukture.

Ključne riječi: RoboRAIL, robotski IoT sustav, višesenzorski nadzor, umjetna inteligencija

RoboRAIL: A research framework for developing a Robotic IoT system for railway infrastructure condition monitoring

Abstract

This paper presents RoboRAIL as a research framework for developing a robotic IoT system for railway infrastructure condition monitoring. The starting point is the need for more frequent and objective inspection of railway superstructure and substructure under increasing traffic loads and climate-induced degradation. The focus is on integrating multi-sensor data, wireless data transfer and artificial intelligence for anomaly detection, early diagnostics and support to predictive maintenance of critical infrastructure.

Key words: RoboRAIL, robotic IoT system, multi-sensor monitoring, artificial intelligence

1 Uvod

Željeznička infrastruktura pripada skupini kritične prometne infrastrukture čija se sigurnost i pouzdanost moraju održavati tijekom cijelog uporabnog vijeka. Stanje pruge ovisi o međudjelovanju elemenata gornjeg ustroja, kao što su tračnice, pragovi i zastor, te donjeg ustroja, odnosno podzastornog sloja, nasipa i temeljnog tla. Promjene u bilo kojem od tih dijelova mogu utjecati na geometriju kolosijeka, sigurnost prometa i troškove održavanja.

Potreba za učestalijim i podatkovno utemeljenim pregledima dodatno je naglašena zbog porasta prometnih opterećenja i utjecaja klimatskih promjena. Ekstremne temperature, intenzivne oborine, smrzavanje i promjene vlažnosti mogu ubrzati degradaciju zastora, podloge i nasipa, pri čemu se dio nepovoljnih procesa razvija postupno i nije uvijek vidljiv tijekom redovitih vizualnih pregleda [1].

Postojeći pristupi uključuju vizualne preglede, ručna mjerenja, specijalizirane mjerne vlakove te različite mobilne ili lokalne mjerne sustave. Iako daju vrijedne podatke, često su ograničeni cijenom, dostupnošću, složenom logistikom ili nedovoljnom učestalošću pregleda. Mobilni sustavi za pregled geometrije kolosijeka predstavljaju važan iskorak prema učinkovitijem prikupljanju podataka [2], dok su metode za procjenu stanja željezničkih nasipa pokazale da se odluke o održavanju mogu kvalitetnije donositi kada se različiti pokazatelji stanja povežu u jedinstveni okvir [3].

Usporedno s razvojem senzora, robotike i računalne obrade podataka razvijaju se i robotski sustavi za inspekciju željezničke infrastrukture. Dosadašnja istraživanja pokazuju da postojeća robotska rješenja najčešće pokrivaju pojedine zadatke, primjerice pregled tračnica, geometrije kolosijeka ili kontaktne mreže, dok je integrirani nadzor gornjeg i donjeg ustroja još uvijek otvoren istraživački problem [4]. Poseban izazov predstavlja povezivanje površinskih i podzemnih pokazatelja stanja pruge te pretvaranje velikih količina senzorskih podataka u informacije korisne za odlučivanje o održavanju.

U tom se kontekstu RoboRAIL promatra kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Za potrebe doktorskog istraživanja posebno je važan geotehnički aspekt problema, odnosno razvoj metodologije kojom se podaci prikupljeni s robotske platforme mogu koristiti za bolje razumijevanje stanja zastora, podzastornog sloja, nasipa i podloge. Projekt RoboRAIL koordinira Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, a partneri na projektu su ALTPRO, renomirana hrvatska tvrtka i jedan od vodećih regionalnih proizvođača sigurnosnih i signalno-sigurnosnih sustava za željezničku infrastrukturu, te Akademija tehničkih znanosti Hrvatske (HATZ), institucija koja okuplja vodeće stručnjake i znanstvenike te pruža izvrsnu platformu za povezivanje znanosti, gospodarstva i tehnološkog razvoja.

2 Istraživački problem i doktorski istraživački okvir

Iako se u praksi razvijaju sve napredniji sustavi za pregled željezničke infrastrukture, velik dio postojećih rješenja i dalje je usmjeren na pojedine elemente sustava. Najčešće se zasebno promatraju geometrija kolosijeka, stanje tračnica, stanje pragova, stanje zastora ili pojedini geotehnički pokazatelji donjeg ustroja. Takav pristup omogućuje detaljnu analizu pojedinih komponenti, ali ne daje uvijek cjelovitu sliku ponašanja pruge kao složenog sustava. S geotehničkog stajališta posebno je važno pitanje kako iz podataka prikupljenih s površine pruge prepoznati promjene koje se razvijaju u donjem ustroju. Degradacija zastora, povećanje vlažnosti, slabljenje podloge, lokalna slijeganja ili promjene krutosti mogu postupno utjecati na geometriju kolosijeka i dugoročnu uporabljivost pruge, iako nisu odmah vidljivi tijekom standardnog pregleda.

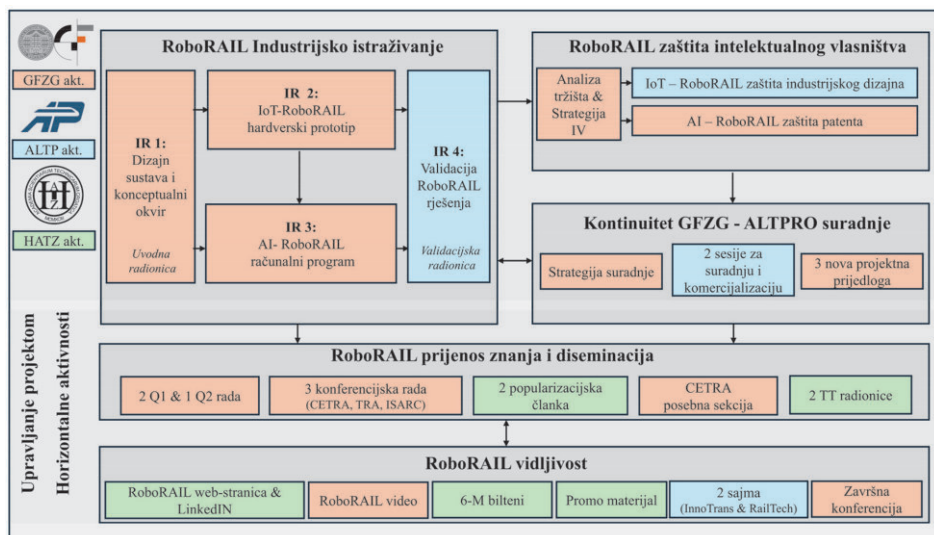
Doktorski istraživački prostor unutar projekta RoboRAIL nalazi se u razvoju metodologije za integraciju heterogenih višesenzorskih podataka prikupljenih robotskom platformom. Pritom se očekuje povezivanje podataka različite prirode: prostornih podataka dobivenih LiDAR SLAM tehnologijom, geofizičkih podataka dobivenih višekanalnim georadarom, položajnih podataka, podataka o kretanju platforme te dodatnih okolišnih i senzorskih mjerenja.

Poseban izazov proizlazi iz činjenice da ti podaci nemaju istu prostornu rezoluciju, dubinu zahvata, točnost ni osjetljivost na pojedine tipove oštećenja. LiDAR i vizualno-prostorni podaci prikazuju površinsko stanje i geometriju, dok georadar daje informacije o unutarnjoj strukturi zastora i podloge. Zbog toga znanstveni izazov nije samo u prikupljanju podataka, nego u njihovoj zajedničkoj interpretaciji.

3 Koncept RoboRAIL sustava

RoboRAIL se sastoji od dvije osnovne cjeline. Prva je IoT-RoboRAIL, odnosno hardverska robotska platforma opremljena senzorskim, komunikacijskim i energetske modulima. Druga je AI-RoboRAIL, softverska platforma namijenjena obradi, integraciji i interpretaciji prikupljenih podataka. Hardverski dio sustava prikuplja podatke na pruzi, dok softverski dio omogućuje njihovu analizu, izdvajanje pokazatelja stanja i detekciju anomalija. Povezanost tih cjelina s ostalim projektnim aktivnostima prikazana je na slici 1.

Senzorski dio sustava planira se razviti kao višesenzorska konfiguracija. LiDAR SLAM tehnologija koristit će se za prostorno mapiranje i lokalizaciju robotske platforme, dok će višekanalni georadar omogućiti prikupljanje podataka o unutarnjoj strukturi zastora, podzastornog sloja i podloge. Uz to se predviđa uporaba ultrazvučnih senzora, inercijske mjerne jedinice i RTK-GNSS sustava za dodatno praćenje položaja, geometrije i kretanja platforme.



Slika 1. PERT dijagram projekta

Komunikacijski modul omogućit će prijenos podataka prema računalnom okruženju za obradu i prikaz rezultata. Razmatra se uporaba različitih komunikacijskih tehnologija, uključujući WiFi, LoRa i mobilne mreže, ovisno o količini podataka, dostupnosti signala i uvjetima primjene. Važan dio istraživanja bit će uspostava pouzdane komunikacijske arhitekture i vremenske sinkronizacije mjerenja.

AI-RoboRAIL platforma razvijat će se za obradu višesenzorskih podataka i izdvajanje informacija korisnih za procjenu stanja infrastrukture. Planira se primjena metoda strojnog i dubokog učenja za predobradu podataka, detekciju anomalija, klasifikaciju mogućih oštećenja i analizu trendova degradacije, uz naglasak na povezivanju rezultata s inženjerski razumljivim pokazateljima.

4 Metodologija razvoja i validacije

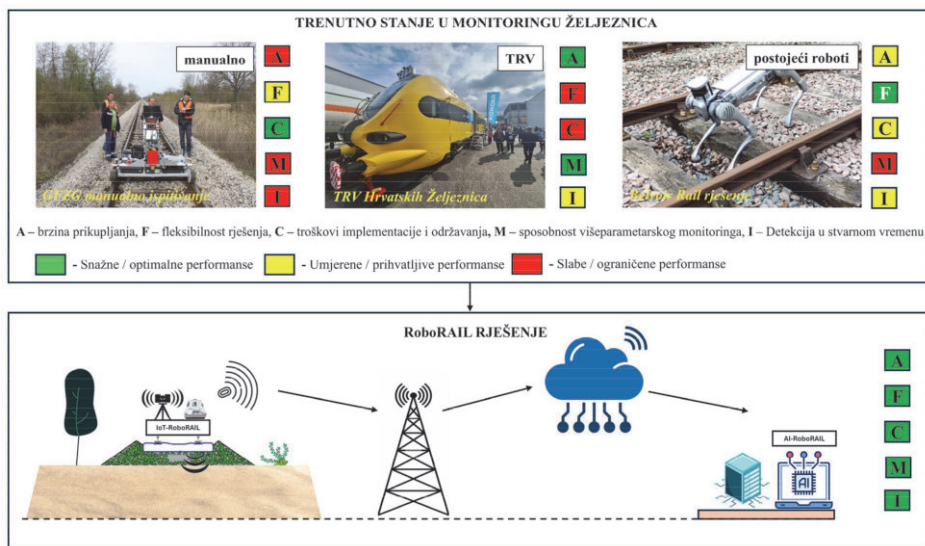
Metodologija razvoja RoboRAIL sustava temelji se na postupnom povezivanju projektiranja, izrade prototipa, razvoja algoritama i validacije u relevantnom okruženju. Takav pristup je važan jer se ne razvija samo pojedinačni mjerni uređaj, nego integrirani sustav koji mora zadovoljiti zahtjeve robotskog kretanja, višesenzorskog prikupljanja podataka, bežične komunikacije, računalne obrade i inženjerske interpretacije rezultata.

Prva faza obuhvaća pregled postojećih rješenja i definiranje zahtjeva sustava. Analizirat će se mjerni vlakovi, ručni i poluautomatski sustavi, mobilne mjerne platforme te eksperimentalna robotska rješenja. Cilj je izdvojiti tehnološka i metodološka ograničenja koja RoboRAIL treba adresirati, posebno nedostatak integriranih rješenja za istodobni nadzor gornjeg i donjeg ustroja.

Druga faza odnosi se na razvoj hardverskog prototipa IoT-RoboRAIL sustava. Razvoj obuhvaća mehaničku platformu, senzorski modul, komunikacijski modul i sustav napajanja. Senzori će se najprije ispitivati i kalibrirati zasebno, a zatim integrirati u jedinstvenu mjernu platformu. Za doktorsko istraživanje posebno je važno usklađivanje podataka različitih senzora jer taj korak određuje mogućnost kasnije geotehničke interpretacije.

Treća faza usmjerena je na razvoj AI-RoboRAIL softverskog rješenja. Ona uključuje prikupljanje i strukturiranje podataka, predobradu, vremensko i prostorno usklađivanje, izdvajanje značajki te razvoj algoritama za detekciju anomalija i analizu trendova degradacije. Budući da se u početnim fazama ne može očekivati velik broj označenih primjera svih mogućih oštećenja, važan istraživački smjer bit će razvoj postupaka koji mogu raditi i u uvjetima ograničenih skupova za učenje. Četvrta faza obuhvaća integraciju i validaciju sustava. Najprije će se provjeravati funkcionalnost senzorskih, komunikacijskih i energetske modula, a zatim rad cjelovitog prototipa. U laboratorijskim uvjetima analizirat će se stabilnost mjerenja, sinkronizacija podataka i pouzdanost prijenosa prema AI-RoboRAIL platformi. Nakon toga predviđena je validacija u relevantnom industrijskom okruženju, uključujući klimatsko-mehanička ispitivanja i testiranje na 1:1 željezničkoj dionici partnera u projektu.

Položaj RoboRAIL sustava u odnosu na postojeća rješenja prikazan je na slici 2. Slika pokazuje da se inovacijski potencijal projekta ne temelji na jednom izdvojenom senzoru ili pojedinoj tehnologiji, nego na integraciji robotske platforme, višesenzorskog nadzora gornjeg i donjeg ustroja, IoT prijenosa podataka i AI analitike. Upravo ta integracija čini znanstveni prostor doktorskog istraživanja.



Slika 2. Inovacijski potencijal RoboRAIL sustava u odnosu na postojeća rješenja

Cilj validacije nije prikaz završnog proizvoda, nego potvrda da se robotsko prikupljanje podataka, višesenzorska analiza i AI interpretacija mogu povezati u funkcionalan istraživački prototip za nadzor željezničke infrastrukture.

5 Očekivani znanstveni i praktični doprinos

Očekivani znanstveni doprinos rada povezan je s razvojem metodologije za integraciju heterogenih podataka prikupljenih robotskom platformom. U geotehničkom smislu poseban je izazov povezati površinske pokazatelje stanja pruge s informacijama o zastoru, podzastornom sloju, nasipu i podlozi. Takva integracija može omogućiti bolje razumijevanje odnosa između izmjerenih anomalija, promjena u geometriji kolosijeka i mogućih procesa degradacije u donjem ustroju.

Drugi važan doprinos odnosi se na primjenu algoritama umjetne inteligencije u uvjetima ograničenih i heterogenih skupova podataka. Kod željezničke infrastrukture oštećenja i nepovoljna stanja često su prostorno promjenjiva, rijetka i nedovoljno dokumentirana. Zbog toga je potrebno razvijati postupke koji kombiniraju inženjersku interpretaciju, statističku analizu, nenadzirano učenje i postupno učenje na temelju novih mjerenja.

Praktični doprinos očekuje se kroz razvoj istraživačkog prototipa koji može poduprijeti češći, objektivniji i sigurniji nadzor željezničke infrastrukture. Sustav bi mogao pomoći u ranom prepoznavanju sumnjivih zona, boljem usmjeravanju detaljnih pregleda i učinkovitijem planiranju održavanja. Time se otvara mogućnost prijelaza s pretežno reaktivnog održavanja prema podatkovno utemeljenom i prediktivnom pristupu.

6 Zaključak

U radu je prikazan RoboRAIL kao istraživački okvir za razvoj robotskog IoT sustava za nadzor stanja željezničke infrastrukture. Naglasak nije stavljen samo na razvoj tehničkog rješenja, nego na oblikovanje metodologije kojom se višesenzorski podaci mogu povezati s procjenom stanja gornjeg i donjeg ustroja pruge. Time se projekt izravno povezuje s doktorskim istraživanjem usmjerenim na geotehničku interpretaciju podataka prikupljenih autonomnom robotskom platformom.

Predloženi pristup temelji se na integraciji robotske platforme, višesenzorskog prikupljanja podataka, bežične komunikacije i algoritama umjetne inteligencije. Takva kombinacija omogućuje istodobno prikupljanje površinskih i podzemnih pokazatelja stanja pruge, što je posebno važno za rano prepoznavanje degradacijskih procesa koji se ne mogu pouzdano uočiti samo vizualnim pregledom.

Budući da je projekt u početnoj fazi provedbe, u radu nisu prikazani rezultati mjerenja, nego istraživački problem, planirana arhitektura sustava i metodologija raz-

voja i validacije. Očekuje se da će daljnji razvoj RoboRAIL sustava omogućiti znanstvenu provjeru postupaka višesenzorske fuzije podataka i detekcije anomalija, uz praktičan doprinos podatkovno utemeljenom održavanju pruga.

Zahvala

Ovaj rad izrađen je u okviru projekta RoboRAIL – Pametni autonomni robotski sustav za IoT nadzor stanja gornjeg i donjeg ustroja željezničke infrastrukture, oznaka PK.1.1.13.0018, financiranog kroz poziv Kolaborativna znanstvena istraživanja.

Literatura

- [1] Vranešić, K., Haladin, I., Burnać, K.: Influence of climate changes on railway superstructure, GRAĐEVINAR, 77 (2025) 1, pp. 43–67, doi: 10.14256/JCE.4123.2024.
- [2] Wang, H., Berkers, J., van den Hurk, N.: Study of an innovative method for track geometry inspection using a mobile inspection system, Transportation Research Board 99th Annual Meeting, Washington, D.C., 2020.
- [3] Kovačević, M.S., Bačić, M., Stipanović, I., Gavin, K.: Categorization of the Condition of Railway Embankments Using a Multi-Attribute Utility Theory, Applied Sciences, 9 (2019) 23, 5089, doi: 10.3390/app9235089.
- [4] Jing, G., Qin, X., et al.: Developments, Challenges, and Perspectives of Railway Inspection Robots, Automation in Construction, 138 (2022), 104242, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104242.