

EKSPERIMENTALNE METODE ZA ODREĐIVANJE GRANIČNIH KRIVIH PROHODNOSTI VOZILA

Istraživač-saradnik Vladan Ilić¹, master inž. građ

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, vilic@grf.bg.ac.rs

V. prof. dr Dejan Gavran, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, gavran@eunet.rs

Doc. dr Sanja Fric, dipl. građ. inž.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, sfric@grf.bg.ac.rs

Asis. Filip Trpčevski, master inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, ftprcevski@grf.bg.ac.rs

Asis. Stefan Vranjevac, master inž. građ.

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73/I, svranjevac@grf.bg.ac.rs

Rezime: Projektovanje površinskih raskrsnica, parkinga, autobuskih stajališta i drugih objekata putne infrastrukture danas je praktično neizvodljivo bez korišćenja modernih softvera za kontrolu prohodnosti vozila. Trenutno je na tržištu dostupan veliki broj softverskih alata, baziranih na različitim matematičkim modelima, za simulaciju kretanja svih kategorija vozila u CAD okruženju. Međutim, da bi se ocenila realna tačnost komercijalnih softverskih aplikacija, neophodno je pripremiti i obaviti testove pouzdanosti poređenjem krivih prohodnosti dobijenih iz softvera sa snimljenim graničnim trajektorijama vozila. Da bi se na osnovu stvarnog ponašanja vozila izmerile njegove granične trajektorije organizuju se eksperimentalne vožnje izabranih testnih vozila na specijalno pripremljenim poligonima. U ovom radu biće razmatrane i međusobno upoređene najzastupljenije eksperimentalne metode za određivanje graničnih krivih prohodnosti realnih vozila. Pored tačnosti snimljenih trajektorija najisturenijih tačaka na karoseriji vozila, veoma bitni parametri su brzina obrade snimljenih rezultata, potrebno vreme za montažu odgovarajuće opreme na testna vozila, kao i priprema poligona za eksperimentalne vožnje. Na kraju rada date su i važne preporuke za izbor odgovarajuće eksperimentalne metode za ocenu pouzdanosti softverskih rešenja.

Ključne reči: granične krive prohodnosti, offtracking, GNSS, GPS, frekvencija merenja, tačnost pozicioniranja.

EXPERIMENTAL METHODS FOR SETTING ROAD VEHICLE MOVEMENT TRAJECTORIES

Summary: Nowadays, the design of at-grade intersections, parking lots, bus stations and other road infrastructure facilities is practically unfeasible without the use of modern computer programs for vehicle swept path analysis. Currently a large number of software tools, based on different mathematical models, for movement simulations of various vehicle types in CAD environment are available on the market. However, in order to assess the real accuracy of commercial software applications, it is necessary to prepare and conduct the reliability tests by comparing the swept path envelopes obtained from the software with the vehicle movement trajectories recorded on the field. To record critical vehicle movement trajectories, based on the vehicle behavior in real traffic conditions, experimental runs of the selected test vehicles on specially prepared polygons are organized. In this paper, the most commonly used experimental methods for setting critical movement trajectories of the real vehicles will be discussed and compared. In addition to the accuracy of the recorded trajectories of the most prominent points on the vehicle body, very important parameters are the processing speed of the recorded results, the time required for mounting appropriate equipment on test vehicles, as well as the preparation of test polygon for experimental runs. At the end of the paper, important recommendations for selecting proper experimental method for the assessment of the reliability of software solutions were given.

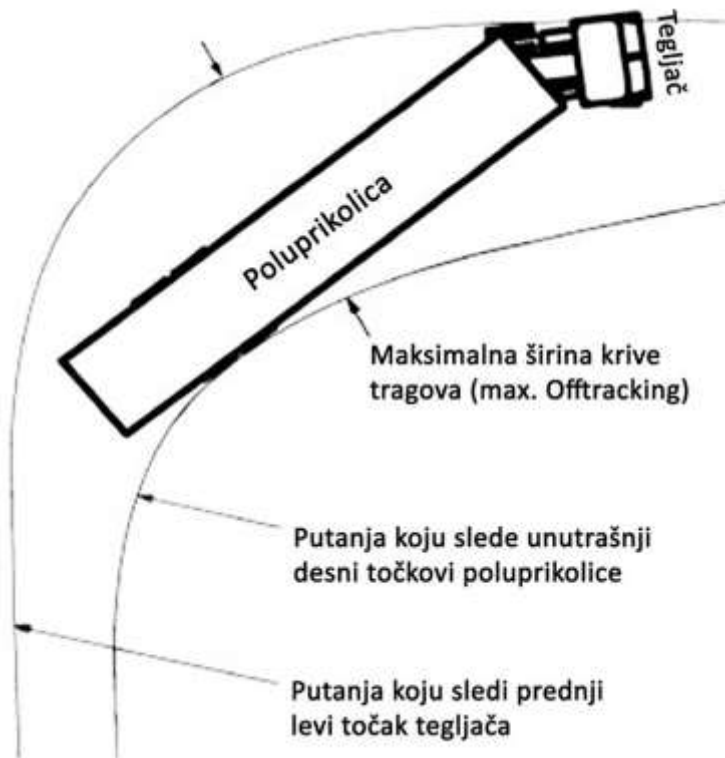
Key words: critical vehicle movement trajectories, offtracking, GNSS, GPS, recording frequency, positioning accuracy.

¹ Vladan Ilić: vilic@grf.bg.ac.rs

1. UVOD

Pri skretanju vozila malim brzinama zadnji točkovi vozila ne prate trajektorije kretanja prednjih, nego se sve više zanoše ka unutrašnjosti krivine kako vozilo napreduje prema kraju krivine. Ovo postepeno zanošenje zadnjih točkova ka unutrašnjosti krivine najčešće se definiše u literaturi kao "Offtracking" fenomen, koji se najočiglednije ispoljava prilikom skretanja autobusa, kamiona, i drugih dugačkih vozila. Za oblikovanje elemenata ivične geometrije na površinskim raskrscima, parkinzima, prilaznim putevima i drugim saobraćajnim površinama dominantan uticaj ima fenomen "Low-speed offtracking-a" [1], odnosno, pojava offtracking-a pri kretanju malim brzinama ($V \leq 15.00$ km/h).

Za proračun vrednosti offtracking-a koriste se različite metode i matematički modeli u zavisnosti od geometrije vodeće putanje koju prati vozilo. Kada je vodeća putanja proizvoljne geometrije, mogu se koristiti samo numeričke i grafičke metode. Ako je vodeća putanja sastavljena isključivo od kružnih lukova i tangentnih pravaca, pored numeričkih i grafičkih, za proračun offtracking-a mogu se primeniti i analitičke metode. Od tačnosti proračuna offtracking-a zavisi oblik graničnih trajektorija, a posredno i valjanost celog postupka kontrole minimalne prohodnosti vozila. Najveća "slabost" postojećih matematičkih modela za proračun offtracking-a jeste nepreciznost pri određivanju tačnog položaja vozila u kojem se dostiže najveće rastojanje između graničnih trajektorija vozila, ili na engleskom "Maximum offtracking problem" (Slika 1).



Slika 1. Najveće rastojanje između graničnih trajektorija vozila - Maximum offtracking problem

Razvojem računarske tehnike početkom 1980-ih godina i njenom sve širom primenom u projektovanju puteva stvorile su se nove mogućnosti za efikasniji proračun vrednosti offtracking-a, odnosno, za bržu konstrukciju krivih minimalne prohodnosti. Veliki broj istraživanja iz ove oblasti sproveden je na Saobraćajnom institutu Univerziteta u Mičigenu (University of Michigan Transportation Research Institute - UMTRI). Među istraživačima sa navedenog instituta, naročito se ističe rad Sayers-a [2,3] koji je razvio novu numeričku metodu za konstrukciju krivih minimalne prohodnosti i proračun offtracking-a za proizvoljno vozilo (ili kombinaciju vučnog i različitih priključnih vozila), i proizvoljnu veličinu skretnog ugla i radijusa kružne putanje kretanja. Takođe, njegov algoritam, prvobitno razvijen za proračun i iscrtavanje krivih prohodnosti izabranog vozila na drugoj generaciji PC računara u SAD (Apple II computer), kasnije je dodatno unapređen u kompjuterski program AUTOSIM, napisan u Fortran-u, za simulaciju kretanja vozila duž putanje proizvoljne geometrije [4].

Kontrola minimalne prohodnosti vozila i proračun offtracking-a prilikom projektovanja površinskih raskrscima, naročito su detaljno razmatrani u zemljama poput Kanade, Australije i SAD, gde se tradicionalno najveći deo

transporta robe i tereta odvija drumskim saobraćajem, odnosno, teškim teretnim vozilima i vučnim vozovima. Zato se i najveći broj ranih verzija kompjuterskih programa za proračun i iscrtavanje krivih tragova na PC računarima, kao što su Truck Offtracking Model (TOM) [5], VEHICLE/PATH [6] i PathTracker [7], prvi put razvio i počeo intenzivnije primenjivati u praksi upravo u pomenutim zemljama.

Početakom 1990-ih, tačnije od 1991. do 1993. god., dolazi do naglog razvoja kompjuterski podržanog projektovanja (Computer-Aided-Drafting and Design / CADD), kojeg istovremeno prate intenzivna poboljšanja performansi hardverskih komponenti PC računara, u prvom redu procesorskih jedinica i grafičkih kartica. Već posle 1995. god. postaje evidentno da će u budućnosti projektovanje saobraćajne infrastrukture najvećim delom biti oslonjeno na kompjuterske programe koji koriste AutoCAD ili Microstation platformu. U tom periodu nastala su i tri najpopularnija softvera za simulaciju kretanja vozila i kontrolu prohodnosti (AutoTRACK, AutoPATH i AutoTURN), koja su mogla biti instalirana na platformi PC računara. Trenutno, u evropskoj i srpskoj putarskoj praksi, najzastupljeniji softveri za proveru prohodnosti vozila su: AutoTURN [8], Vehicle Tracking [9], CARD/1 [10]; RIB - Stratis [11], Autopath [12], i GCM++ [13].

Da bi projektanti puteva bili sigurni u pouzdanost komercijalnih softverskih alata za proveru prohodnosti vozila, proizvođači pomenutih softvera moraju potvrditi, odnosno, verifikovati tačnost njihovih proizvoda. Verifikacija valjanosti i pouzdanosti bilo kojeg softverskog rešenja za simulaciju kretanja vozila ogleda se isključivo u međusobnom poređenju realno snimljenih krivih prohodnosti vozila na testnom poligonu sa krivama dobijenim simulacijom na računaru posle primene navedenog softvera. Generalno posmatrano, postoje dva različita tehnološka pristupa za precizno merenje prostora (širine traga vozila) obuhvaćenog graničnim trajektorijama vozila pri izvođenju realnih manevara:

- 1) tehnologije ili sistemi koji koriste vozila opremljena specijalnim uređajima za detektovanje njihovog položaja (GNSS merni sistemi);
- 2) sistemi koji ne zahtevaju nikakve unapred instalirane instrumente u vozilu (klasične tahimetrijske i metode bazirane na obradi video i foto snimaka).

U nastavku rada biće analizirane ključne prednosti i mane klasične tahimetrijske, zatim metoda baziranih na primeni video i foto tehnike i moderne GNSS tehnologije.

2. KLASIČNE TAHIMETRIJSKE METODE

U skladu sa istorijskim razvojem merne tehnike i instrumenata, tahimetrijske ili klasične metode počele su najranije da se primenjuju za određivanje položaja graničnih trajektorija vozila. Sa razvojem optičkih uređaja, a naročito sa uvođenjem elektronike i računarske tehnike, klasične geodetske instrumente poput tedolita i nivelira uspešno su tokom 1990-tih zamenile totalne stanice i drugi još efikasniji merni instrumenti.

Kod klasičnih metoda, prilikom izvođenja eksperimentalnih vožnji na testna vozila privremeno se ugrađuju mali rezervoari sa vodom ili drugom tečnošću. Rezervoari se obično postavljaju na mestima najisturenijih tačaka na karoseriji vozila kako bi tečnost koja izlazi iz njih što realnije opisala granične trajektorije (**Slika 2**).

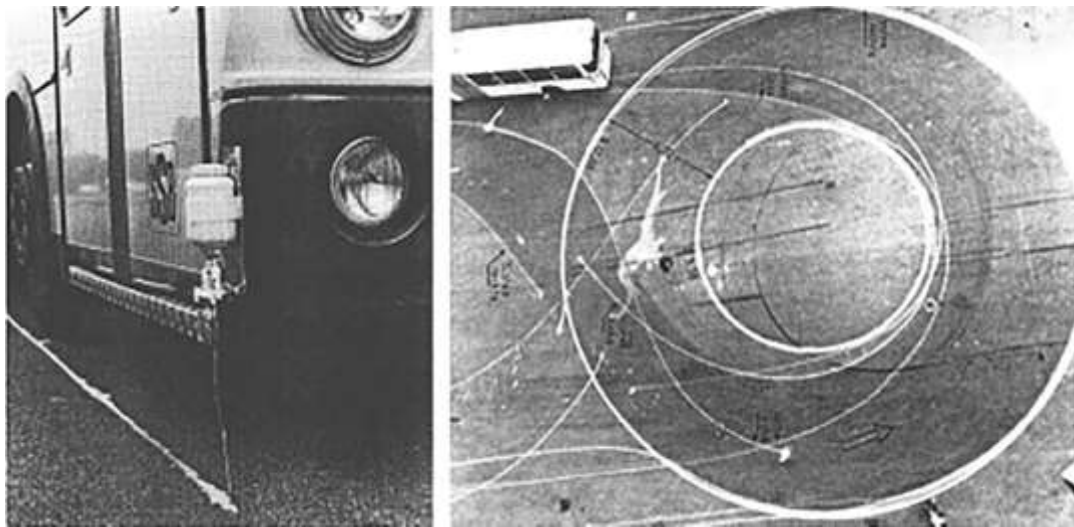


Slika 2. Postavljanje rezervoara sa vodom na mestima najisturenijih tačaka na vozilu [14]

Pre izvođenja eksperimenta na testnom poligonu obeležavaju se vodeće linije ili koridori koje moraju da prate izabrana testna vozila. Na početku izvođenja manevara odvrnu se slavine ili ventili na rezervoarima i pusti se da tečnost polako curi direktno na suhu površinu kolovoza poligona. Zatim se, primenom standardnih tahimetrijskih geodetskih metoda, u odnosu na prethodno definisane i georeferencirane (fiksne)

tačke, brzo snime sve koordinate duž mokrog traga koji je nastao curenjem tečnosti pri kretanju vozila. Često se zbog tačnosti i pouzdanosti rezultata merenja duž planirane putanje kretanja vozila razvije poseban poligonski vlak sa vidno markiranim tačkama na kolovozu.

Umesto vode, čiji trag se relativno brzo osuši i postaje nevidljiv na kolovozu, u rezervoare se često sipaju i različite vrste boje, a najčešće bela ili žuta (**Slika 3**). Međutim, kao i kod rezervoara sa vodom, problem nastaje ako je potrebno istovremeno označiti granične trajektorije dve ili više najisturenijih tačaka na vozilu. U takvom slučaju preporučuje se sipanje različitih vrsta boja u rezervoare na različitim delovima vozila. Još jedan problem predstavlja "broj ponavljanja" testnih vožnji pri ovakvoj postavci eksperimenta, jer dok se prethodni tragovi od boje dobro ne očiste sa površine kolovoza, nema smisla ponavljati već izvedeni manevar sa istim testnim vozilom. Iako primena nekoliko vrsta različitih boja ima nesumnjive prednosti u odnosu na korišćenje rezervoara sa vodom, treba imati na umu da testni poligon posle završetka eksperimenta treba vratiti u prvobitno stanje. Shodno tome, primenjene boje moraju biti takvog sastava da se mogu lako očistiti ili brzo oprati sa površine kolovoza na poligonu.



Slika 3. Curenje boje iz rezervoara montiranog na prednjem desnom uglu autobusa i izgled poligona posle završetka testne vožnje [15]

Bez obzira na vrstu tečnosti koja je sipana u rezervoare na vozilu, merenje tragova na kolovoznoj površini zahteva angažovanje većeg broja geodetskih inženjera i tehničara uz pažljivu koordinaciju njihovog rada. Greška pri merenjima i obradi rezultata je reda veličine do 1.00 cm, i većinom zavisi od spretnosti i obučenosti angažovanih geodetskih profesionalaca. Zbog ograničenih mogućnosti za ponavljanje testnih vožnji, pre svega za vozila opremljena rezervoarima u koje je sipana boja, neposredno pre odvrtnja ventila za ispuštanje tečnosti i početka planiranog eksperimenta, testni vozači moraju obaviti po nekoliko serija probnih vožnji duž obeleženih vodećih putanja. Zapravo na ovaj vačin, vozači trebaju dobro uvežbati sve manevre skretanja za koje će kasnije biti merene granične trajektorije testnog vozila.

Iako su postignuta tačnost i pouzdanost rezultata merenja visoki, klasične tahimetrijske metode zahtevaju veliko fizičko angažovanje svih učesnika eksperimenta. Samim tim, uzimajući u obzir obim terenskog posla, teško je postići visoku detaljnost merenja u smislu broja, odnosno razmaka, snimljenih tačaka duž markiranih tragova vozila na površini testnog poligona. Takođe, potreban je dodatni rad da bi se snimljeni rezultati u digitalnom obliku "prebacili" u formate fajlova (dwg, dxf, txt), pogodne za dalju obradu u nekom softveru za projektovanje puteva koji radi u CAD okruženju. Premda se koristi relativno jednostavna geodetska merna tehnika bez ikakvih dodatnih uređaja montiranih na vozilu, zbog većeg angažovanja ljudstva i količine utrošenih radnih sati, posledično i ukupna cena izvođenja eksperimenta je visoka. Imajući u vidu sve navedeno, klasične tahimetrijske metode sve ređe se koriste za eksperimentalno određivanje graničnih trajektorija vozila, osim u slučajevima kada se kombinuju sa nekim savremenijim metodama merenja (GPS, aerofotogrametrija i 3D foto tehnika).

3. ODREĐIVANJE GRANIČNIH TRAJEKTORIJA NA OSNOVU VIDEO I FOTO SNIMAKA

Još od 60-tih godina 19. veka i razvoja prvih fotoaparata, inženjeri su uvideli veliki potencijal fotografije kao medija za lakše snimanje i prikupljanje raznovrsnih podataka sa terena. Upotreba fotografije naročito dolazi

do izražaja za vreme Prvog svetskog rata i pripreme namenskih karata za vojno-taktičke i odbrambene svrhe. Tada započinje i razvoj fotogrametrije kao posebne oblasti geodezije za prikupljanje podataka i izradu karata na osnovu fotografskih snimaka. Sa razvojem avijacije i kamera veće rezolucije primat preuzima aerosnimanje, da bi se posle Drugog svetskog rata, opet kao posledica napretka vojne tehnike, intenzivno razvila aerofotogrametrija. Idući u korak sa stepenom razvoja prateće tehnologije, instrumenti za restituciju materijala iz fotogrametrijskih snimaka u početku su bili analogni, da bi kasnije sa razvojem PC računara, primat preuzela analitička, i na kraju digitalna fotogrametrija. Početkom 80-tih godina 20. veka na tržištu počinju da se prodaju i prve digitajzerske table (digitajzeri) za digitalizaciju planova i karata. Danas, novi softverski alati u digitalnoj fotogrametriji omogućavaju da se snimljeni sadržaj digitalnih fotografija, automatizovanim postupkom restitucije, prevede u vektorski i/ili rasterski digitalni format pogodan za dalju obradu.

Digitajzer, kao periferni računarski uređaj, na svojoj radnoj površini (ploči) obezbeđuje određivanje pozicija (koordinata) diskretnih tačaka i njihov prenos ka računarskom sistemu. Iako se najviše koriste za digitalizaciju planova i karata, digitajzeri se uspešno mogu primeniti i za restituciju položaja bilo koje zakrivljene linije sa perspektivnog fotografskog snimka, uključujući i granične trajektorije vozila. Da bi se dobili korektni rezultati u postupku restitucije, digitajzerska tabla se pre upotrebe mora kalibrisati. Za kalibraciju se koriste tačke sa poznatim koordinatama koje se nalaze na fotografiji ili planu.

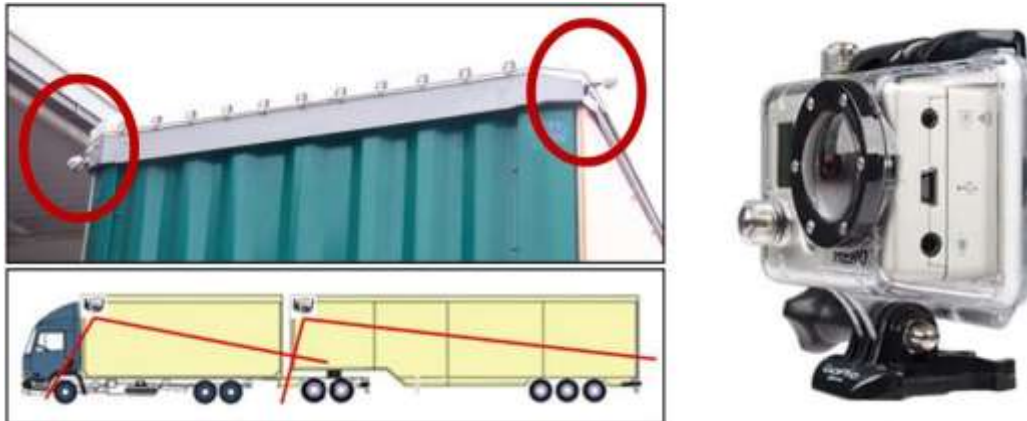
U protekloj deceniji, kada je digitalna fotografija postala opšteprihvaćena u svakodnevnom životu, na tržištu je plasiran veći broj softvera, koji na osnovu amaterskih fotografija snimljenih običnim fotoaparatom, mogu generisati 3D model nekog objekta ili prostorne celine. Štaviše, ako je na snimljenim fotografijama prisutan dovoljan broj georeferenciranih tačaka, kreirani modeli objekata lako se kalibrišu i referenciraju prema koordinatama poznatih tačaka. Sa povećanjem kvaliteta (rezolucije) snimljenih fotografija, raste i tačnost generisanih 3D modela. Pomenuti softveri mogu se uspešno primeniti za rekonstrukciju 3D položaja vozila na osnovu sukcesivno snimljenih fotografija ako su snimcima obuhvaćene i georeferencirane tačke. Pre snimanja na najisturenijim delovima karoserije testnog vozila postavljaju se jarko obojeni markeri kao vizuelne determinante, da bi se što lakše, prateći položaje markera, modelirale granične trajektorije vozila u 3D prostoru. Mussone i ost. [16] razvili su i testirali novi softver VeTRA-Vehicle Tracking for Roundabout Analysis za procesiranje sukcesivno snimljenih fotografija sa terena, kako bi rekonstruisali putanje kretanja vozila, odnosno njihove trajektorije, pri prolasku kroz kružne raskrsnice.

Rekonstrukcija položaja vozila u raskrsnici moguća je na osnovu snimaka sa stacionarnih kamera postavljenih na nekoj uzvišenoj koti u neposrednoj blizini raskrsnice, ili na osnovu snimaka sa pokretnih kamera montiranih na nekom vozilu. U doktorskoj disertaciji Barth-a [17] razvijena je nova metodologija za detekciju položaja vozila koje se kreće kroz raskrsnicu pomoću snimaka iz drugog pokretnog vozila. Praćenjem odabranih 3D tačaka na površini karoserije posmatračnog vozila, osim njegovog tačnog položaja i oblika, dobijeni su i precizni podaci o brzini i ubrzanju tog vozila.

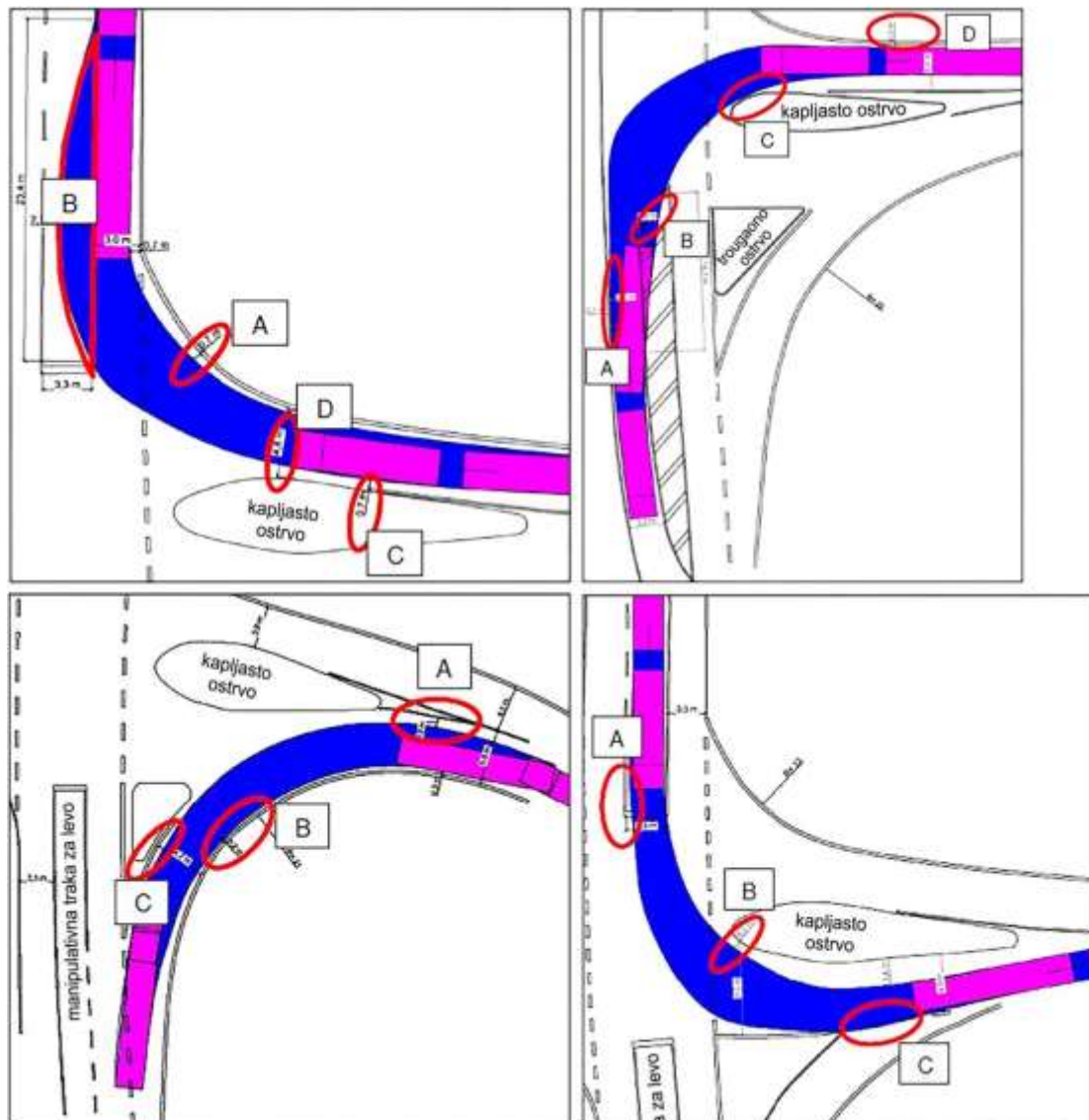
Cheng i Huang [18] izveli su obiman eksperiment i odredili realne granične trajektorije autobusa i kamiona sa poluprikolicom koristeći video kamere prosečnih performansi. Na testnom poligonu prvo su klasičnim geodetskim (tahimetrijskim) metodama označili geometriju vodećih putanja za oba testna vozila. Zatim su na svakih metar rastojanja duž obeleženih putanja nacrtali pomoćne linije upravne na te putanje. Sve pomoćne linije posle su ručno graduirali sa centimetarskom podelom. Tokom kretanja vozila malom brzinom duž obeleženih putanja, video kamerama snimali su kako točkovi vozila prelaze preko pomoćnih linija. Na osnovu snimljenog materijala i graduiranih skala na svakoj od pomoćnih linija, naknadno su odredili tačno rastojanje između spoljašnjih i unutrašnjih graničnih trajektorija testnih vozila. Takođe, posebna kamera postavljena je u kabini vozila iznad upravljača, tako da je paralelno snimano okretanje upravljača pri izvođenju zadatih manevara. Pri svakom polasku vozila iz mesta i prelasku preko neke od detaljnih tačaka duž vodećih putanja (početak i kraj kružne krivine, početak i kraj prelaznice, kraj izlazne tangente, itd.) korišćeni su zvučni signali, odnosno, pištaljke da bi se koordinisale aktivnosti svih učesnika eksperimenta. Pored toga, snimci sa video kamera uperenih prema točkovima vozila tokom testnih vožnji i snimak kamere iznad upravljača sinhronizovani su vođenjem precizne evidencije o vremenu kada je svaki od manevara skretanja izveden. Na kraju eksperimenta granične trajektorije vozila dobijene iz video snimaka upoređenje su sa graničnim trajektorijama sračunatim primenom novog matematičkog modela kojeg su razvili isti autori.

Lippold i Schemmel [19] su na veoma praktičan način koristili video tehnologiju i fotogrametriju kako bi ustanovili realne trajektorije kretanja dugačkih teretnih vozila na površinskim raskrsnicama na putnoj mreži Nemačke. U njihovom eksperimentu analizirane su granične trajektorije za pet tipova (kombinacija) dugačkih teških teretnih vozila (vučnih vozova), čija ukupna dužina ne prelazi 25.25 m. Tokom testnih vožnji na

najvišim bočnim delovima karoserija vučnih vozova montirane su akcione kamere. Ugao snimanja podešen je tako da snimkom budu pokriveni točkovi vozila (**Slika 4**). Sve kamere sinhronizovano su snimale putanje točkova, a snimci su kasnije obrađeni u specijalnim softverima za restituciju video snimaka i fotografija.



Slika 4. Dispozicija montiranja akcionih kamera na bočnim stranama karoserije vučnog voza sa prikazom obuhvata snimka [19]



Slika 5. Lokacije potencijalnih "uskih grla" na situacionom planu površinske raskrsnice gde je ugrožena prohodnost testiranih vozila pri manevrima levih i desnih skretanja [19]

Pored snimljenog video materijala, za precizno određivanje graničnih trajektorija autori su koristili i laserski skener koji je snimao koordinate tačaka duž ivica vučnih vozova u lokalnom koordinatnom sistemu. Sve snimljene tačke posle su "uvezene" u CAD softver. Na osnovu njih definisane su trajektorije najjšturenijih tačaka testnih vozila i označen prostor omeđen graničnim trajektorijama tokom izvođenja različitih manevara. S obzirom da su testne vožnje izvedene na realnoj putnoj mreži, bez remećenja ostalih učesnika u saobraćaju, rezultati eksperimenta pokazali su stvaran potencijal postojeće geometrije na površinskim raskrscnicama da se prilagodi saobraćaju dugačkih vučnih vozova. Poseban akcenat pri kontroli minimalne prohodnosti bio je na identifikaciji "uskih grla" na situacionim planovima površinskih raskrscnica. Označena su sva mesta na kojima je potencijalno ugrožena prohodnost za testirane tipove vozila (**Slika 5**).

Poslednjih godina sve učestalija je primena dronova (PhotoModeler Technologies) [20], opremljenih sa kamerama i foroaparatom, koji lete neposredno iznad testnog poligona snimajući sve manevre koje izvode testna vozila. Pošto su u dronovima najčešće ugrađeni i GPS prijemnici njihov položaj je poznat, pa preciznost merenja, odnosno tačnost realno snimljenih graničnih trajektorija, najviše zavisi od kvaliteta snimljenih fotografija ili video zapisa.

S obzirom da se najveći broj eksperimentalnih testova za merenje graničnih trajektorija vozila organizuje na specijalno pripremljenim poligonima na otvorenom prostoru, na kvalitet snimljenih fotografija dodatno utiču i klimatski parametri kao što su vetar, osunčanost, pojava magle, veće oblačnosti ili kiše. Iako već postoje razvijeni softverski alati koji mogu da "poprave" kvalitet snimljenih fotografija, granične trajektorije, dobijene na osnovu ovako popraavljenih snimaka, odstupaju od realnih za više od 10.0 cm. Dosadašnji eksperimenti na terenu potvrdili su da se najpouzdaniji rezultati, koji garantuju veoma mala odstupanja graničnih od realnih trajektorija vozila, dobijaju kombinovanjem video i foto tehnike sa drugim savremenim metodama snimanja kao što su GNSS tehnologije i LiDAR (light detection and ranging) 3D lasersko skeniranje.

4. ODREĐIVANJE POLOŽAJA VOZILA POMOĆU GNSS TEHNOLOGIJE

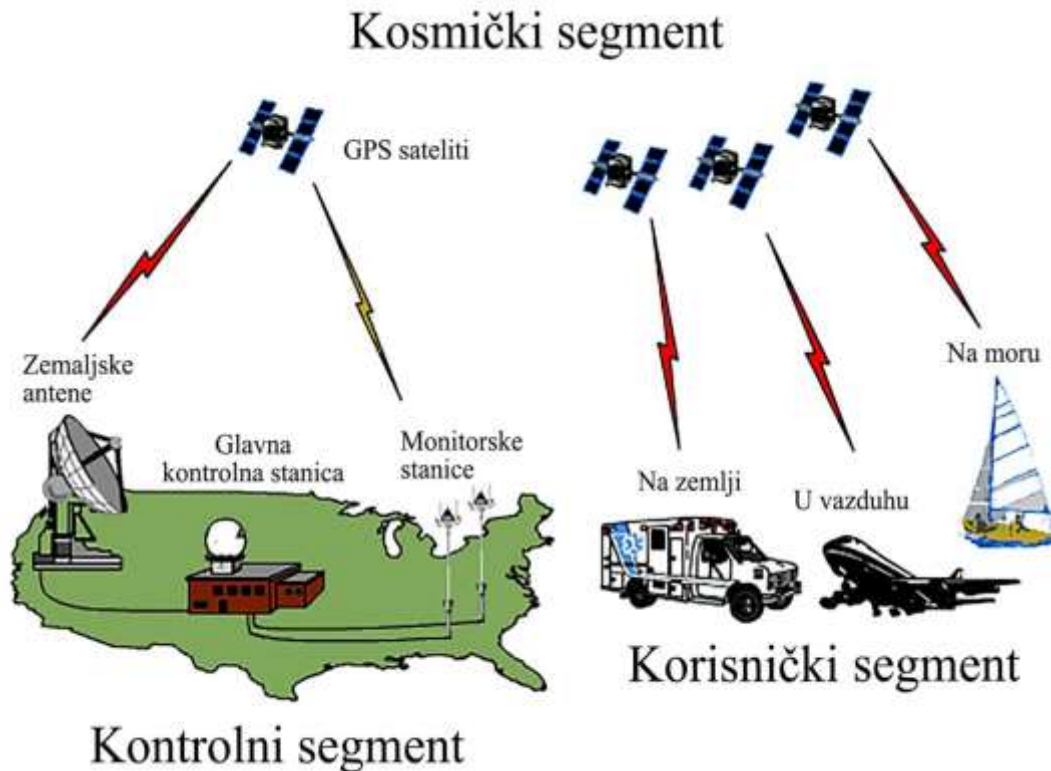
Globalni navigacioni satelitski sistemi (GNSS) predstavljaju trenutno tehnološki najrazvijenije sisteme za određivanje tačnog položaja, odnosno, realnih koordinata vozila ili nekog njegovog dela. Skraćenica GNSS predstavlja zapravo "zajedničko ime" za sve globalne navigacione sisteme kao što su: GPS, GLONASS (na ruskom: ГЛОНАСС), Galileo, Compas, itd. S obzirom da je prvi put zvanično lansiran 1978. god. od strane Ministarstva odbrane SAD, posle prelaska sa NAVSTAR-a (NAVigation Satellite Timing And Ranging), GPS je danas najčešće korišćen sistem za navigaciju u svetu. Takođe, GPS je prvi sistem koji je dostigao puni operativni kapacitet 1995. god., i pored ruskog GLONASS-a, jedini obezbeđuje pokrivenost cele površine Zemlje. Upravo zahvaljujući "ranoj otvorenosti" prema civilnim korisnicima (već od 1994. god.), GPS ima vodeću komercijalnu ulogu na tržištu. Na **Slici 6** prikazani su osnovni segmenti GPS sistema. Kosmički segment čine 24 operativna satelita ravnomerno raspoređena u odnosu na Zemlju. Sateliti se kreću u 6 orbitalnih ravni (po 4 satelita u svakoj) poluprečnika 26560.00 km, koje zaklapaju ugao od 55° u odnosu na ekvatorijalnu ravan [21]. Ovakva konstelacija i ovako projektovane orbite satelite omogućavaju da se u bilo kom trenutku i na bilo kojoj tački na Zemlji mogu primiti signali sa 4 satelita.

Kontrolni segment obuhvata pet zemaljskih stanica raspoređenih tako da je glavna smeštena u vazduhoplovnoj bazi Schriever (ranije Falcon) u Koloradi Springsu, a ostale četiri se nalaze na ostrvima u okeanima (Hawaii, Ascension Islands, Diego Garcia i Kwajalein) u zoni ekvatorijalnog pojasa [21]. U korisnički segment sistema spadaju razni prijemnici, bilo kao zasebni instrumenti, ili kao delovi drugih mernih instrumenata ili digitalnih uređaja različite namene.

Određivanje položaja pomoću GPS bazira se na trilateraciji GPS satelita, odnosno na metodi prostornog lučnog preseka. Na četiri GPS satelita mere se vremena potrebna da elektromagnetni signali sa satelita dospeju do prijemnika na Zemlji. Koordinate satelita kao referentnih tačaka unapred su poznate. Od presudne važnosti za tačnost izmerenih dužina (vremena) je sinhronizacija časovnika na satelitima i na prijemniku. Jednoznačno pozicioniranje tačke na mestu prijemnika obavlja se rešavanjem prostornog lučnog preseka za tu tačku tako što se izmere dužine od prijemnika (tačke) do tri GPS satelita. Usled grešaka pri sinhronizaciji časovnika na satelitima i prijemniku na Zemlji, meri se i nepoznata dužina od prijemnika do četvrtog satelita kako bi se korigovale ove greške.

Za pozicioniranje tačaka na Zemlji primenom GPS tehnologije koriste se dve metode:

- metoda apsolutnog pozicioniranja;
- metoda relativnog (diferencijalnog) pozicioniranja (DGPS).



Slika 6. Osnovni segmenti GPS sistema [22]

Za razliku od apsolutnog pozicioniranja gde se koristi jedan prijemnik, kod diferencijalnog pozicioniranja potrebna su dva prijemnika za simultano registrovanje signala sa satelita. U inženjerskim disciplinama, kao i za potrebe različitih eksperimentalnih istraživanja na otvorenom prostoru, mnogo češće se primenjuje diferencijalno pozicioniranje, jer omogućava veću tačnost pozicioniranja. Kod ove metode jedan prijemnik lociran je na tački sa poznatim koordinatama (bazna stanica), dok se drugi prijemnik (rover) postavlja na tačku čiju poziciju je potrebno odrediti. Na ovaj način se, korelacijom merenja između dva prijemnika, u značajnoj meri redukuje uticaj sistematskih grešaka [21].

U navigaciji se za određivanje položaja vozila koristi metoda apsolutnog pozicioniranja sa tačnošću reda veličine nekoliko metara. S druge strane, određivanje položaja vozila u cilju definisanja njegovih graničnih trajektorija obavlja se pomoću kinematičke tehnike merenja, zasnovane na diferencijalnom pozicioniranju. Kod ove tehnike (metode), prijemnik (rover) montira se na vozilo u pokretu, dok je bazna stanica postavljena na nekoj fiksnoj tački sa ranije određenim koordinatama. Pri upotrebi kinematičke metode razlikuju se dva režima rada:

- sa naknadnim procesiranjem korekcija sa bazne stanice (na engleskom: Post-Processing Kinematic-PPK);
- sa procesiranjem korekcija u realnom vremenu (na engleskom: Real-Time Kinematic-RTK), gde se sve korekcije sa bazne stanice očitavaju tokom rada na terenu, pod uslovom da postoji radio veza ili neka druga "wireless" konekcija između prijemnika.

U RTK režimu rada kinematičke metode, prijemnici (bazna stanica i rover) moraju istovremeno "hvatati" signal sa najmanje pet satelita. Opravdanje za "angažovanje" povećanog broja satelita leži u potrebi da se uvek ima u "rezervi" najmanje jedan, kako bi sa apsolutnom sigurnošću u svakom trenutku imali trilateraciju GPS satelita. Na poznatoj tački, gde je postavljena bazna stanica, nalazi se i radio antena povezana sa tom stanicom. Preko te antene radio predajnik šalje ispravke korekcija prema pokretnom roveru (Slika 7). Rastojanja između bazne tačke i rovera obično su reda veličine od 10.0 do 20.0 km, što je značajno kraće u odnosu na efektivan opseg diferencijalnog GPS pozicioniranja. Primenom "state-of-the-art" tehnologije pri izradi GNSS prijemnika, a posebno pri izradi mobilnih GNSS antena (Leica Viva GS16, Trimble R8s GNSS receiver), RTK metoda za horizontalno pozicioniranje u realnim uslovima može obezbediti centimetarsku tačnost reda veličine ± 2.0 cm. Imajući u vidu brzinu određivanja položaja vozila i postignuti nivo tačnosti, RTK metoda nametnula se kao skoro idealna merna tehnika za snimanje graničnih trajektorija vozila koja se kreću malim brzinama.

Kinematička metoda u realnom vremenu (RTK)

Tačnost pozicioniranja ± 2.0 cm

*Ista konstelacija satelita

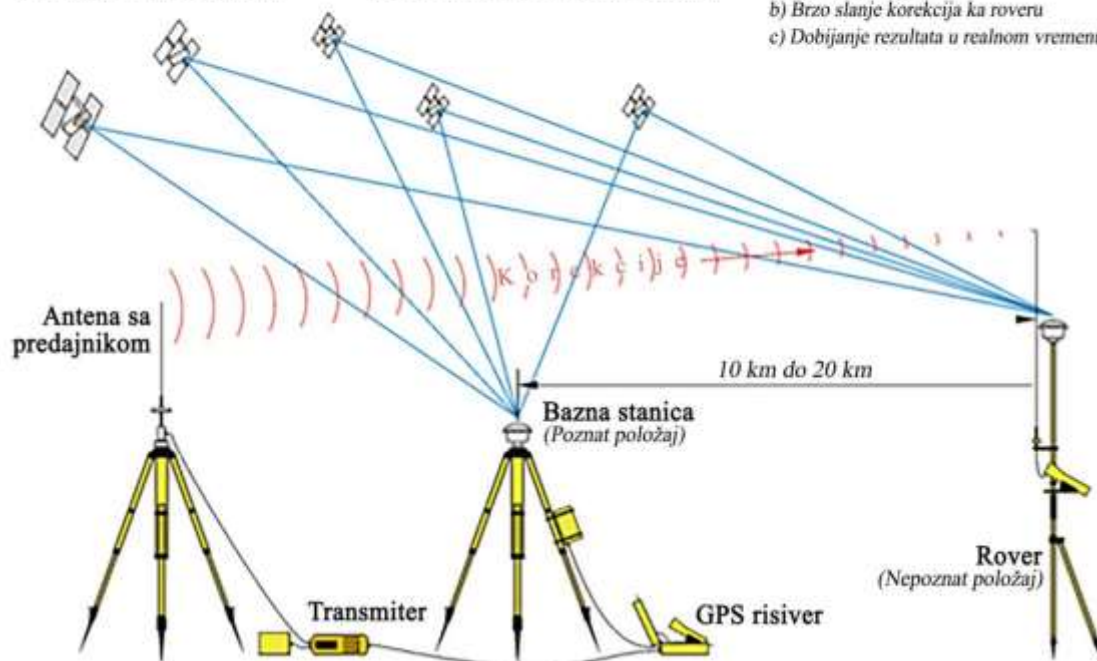
(Bazna stanica - rover/ili roveri)

*Carrier Phase

(Prati se minimum 5 satelita istovremeno)

*Radio veza

- Više informacija
- Brzo slanje korekcija ka roveru
- Dobijanje rezultata u realnom vremenu



Slika 7. Princip rada kinematičke metode sa procesiranjem korekcija u realnom vremenu (RTK) [23]

Kao četvrti segment GNSS-a (GPS-a), u mnogim zemljama sveta razvijene su posebne nacionalne mreže permanentnih stanica (prijemnika), koje zamenjuju potrebu za postavljanjem baznih stanica. Razvijanjem ovakvih mreža znatno se olakšava diferencijalno pozicioniranje pri izvođenju različitih geodetskih i drugih inženjerskih radova. Korišćenjem mreže permanentnih stanica, tačno RTK pozicioniranje unutar prostora pokrivenog tom mrežom može se obaviti pomoću samo jednog prijemnika [21]. Mreža permanentnih stanica na teritoriji Srbije naziva se Aktivna geodetska referentna osnova Srbije (AGROS). Ova mreža je u funkciji od 2005. god, a njome upravlja i održava je Republički geodetski zavod iz dva kontrolna centra. Ukupno 29 permanentnih stanica raspoređeno je na teritoriji Republike Srbije na prosečnom međusobnom rastojanju od 70.00 km [21]. AGROS mreža takođe pruža korisnicima u Srbiji servis kinematičkog pozicioniranja u realnom vremenu (RTK). Prenos podataka između permanentnih stanica i prijemnika (rovera) obavlja se putem mobilnog GPRS interneta. Tačnost koja se postiže u realnom vremenu je od 1.00 cm do 3.00 cm [24].

Pecchini i Giuliani [25] snimali su položaj tegljača sa poluprikolicom (šlepera), koji se kretao kroz kružnu raskrsnicu. Za određivanje položaja šlepera koristili su diferencijalno pozicioniranje, odnosno, kinematičku metodu sa naknadnom obradom korekcija sa bazne GPS stanice. U njihovom eksperimentu, po dva GPS rovera bila su montirana na tegljač i poluprikolicu da bi se dobile trajektorije najisturenijih tačaka na karoseriji šlepera (Slika 8). Posle procesiranja snimljenih GPS koordinata dobijene su realne krive prohodnosti šlepera. Zatim je za iste realno izvedene manevre simulirano kretanje šlepera pomoću AutoTURN-a [8]. Granične trajektorije dobijene simulacijom upoređene su sa realnim krivama prohodnosti snimljenim na terenu, kako bi se verifikovala pouzdanost primenjenog AutoTURN softvera. U ovoj eksperimentalnoj studiji nivo preciznosti, obezbeđen primenom opisane GPS tehnike pozicioniranja, bio je ograničen na 10.00 cm.

Pošto se vozila na koja su montirani GPS roveri kreću malim brzinama ($V \leq 20$ km/h), i učestalost, odnosno, frekvencija očitavanja GPS koordinata mora da bude veća u odnosu na uobičajenu primenu kinematičke metode za brzo pozicioniranje neke statične tačke ili objekta. Takođe, frekvencija očitavanja GPS koordinata u direktnoj je vezi sa "gustinom", odnosno, međusobnim rastojanjem snimljenih tačaka na terenu iz kojih se kasnije trebaju rekonstruisati granične trajektorije testnih vozila. Na osnovu ranije sprovedenih eksperimentalnih istraživanja [14], preporučuje se da frekvencija očitavanja GPS koordinata na prijemnicima, montiranim na testnim vozilima, bude podešena na 10 Hz. To praktično znači da, ako se testno vozilo kreće brzinom od 10 km/h pri izvođenju planiranog manevra, na svakih 10.00 cm pređenog puta dobija se jedno očitavanje trenutnog položaja vozila, tj. koordinate GPS rovera.



Slika 8. Položaj GPS rovera na kabini tegljača (levo), i manevar šlepera na izlasku iz kružnog toka posle skretanja pod uglom od 180° (desno) [25]

Za kombinovana vozila sastavljena od više slogova, na svako pojedinačno vozilo ili segment mora da se postavi dovoljan broj GPS rovera da bi se mogao precizno definisati položaj vozila. Ako se svaki slog vozila posmatra kao apsolutno kruto i nedeforabilno telo, dovoljno je postaviti dva GPS rovera na karoseriju da bi položaj vozila bio jednoznačno određen u horizontalnoj projekciji. Izuzetak od ovog pravila čine pomoćni osovinski sklopovi kao što su podvosci sa sedlom za vuču poluprikolice (na engleskom: dolly), na koje je dovoljno postaviti jedan GPS rover. Poseban problem predstavlja precizno određivanje položaja GPS rovera u odnosu na karoseriju testnog vozila, s obzirom da danas većina modernih tegljača i drugih teških teretnih vozila ima zaobljene aerodinamične karoserije. Tačno pozicioniranje GPS rovera u odnosu na karoseriju vozila moguće je postavljanjem rovera na specijalno izrađene nosače, ili laserskim merenjem svih dimenzija karoserije vozila pre eksperimenta u posebno akreditovanim laboratorijama za ispitivanje vozila. Pecchini i Giuliani [25] su položaje GPS rovera, postavljenih na vrh kabine modernog tegljača, određivali merenjem relativnih rastojanja u odnosu na glavčine točkova prednje i zadnje osovine tegljača. Iako je ovakav postupak metodološki ispravan, imajući u vidu činjenicu da je kabina tegljača elastično oslonjena na njegovu šasiju, postavlja se pitanje da li su izmerena rastojanja dovoljno tačna, ako se uzme u obzir blago naginjanje kabine tegljača u odnosu na šasiju prilikom skretanja ili izvođenja nekog drugog manevara.

Tokom poslednje decenije, koristeći modernu GNSS tehnologiju, softverska kompanija "Transoft Solutions" organizovala je i izvela niz testova na terenu sa realnim vozilima da proveri tačnost krivih prohodnosti dobijenih korišćenjem njihovog softvera AutoTURN-a [8]. U sprovedenim testovima, naročita pažnja posvećena je dugačkim vozilima nestandardne konfiguracije za prevoz specijalnih tereta kao što su turbine vetrogeneratora. Za ovaj tip vozila u literaturi na engleskom jeziku često se vezuje termin "oversized /overweight vehicles - OSOW". Za određivanje položaja "OSOW" vozila korišćena je RTK kinematička metoda, pri čemu su GPS roveri bili postavljeni na krovu tegljača, kao i iznad prednjih i zadnjih osovine specijalnih prikolica za prevoz vetrogeneratora [26]. Flores i ost. [27] takođe su koristili RTK metodu i GPS rovere da dobiju granične trajektorije "OSOW" vozila za prevoz vetrogeneratora na specijalnom poligonu. Kasnije su granične trajektorije sa testnog poligona uporedili sa trajektorijama dobijenim simulacijom istih manevara kretanja u AutoTURN-u [8]. Ustanovili su da je jedan od glavnih uzroka neslaganja između graničnih trajektorija, dobijenih eksperimentalnim putem i simulacijom, u potencijalno netačno određenim položajima GPS rovera u odnosu na karoseriju testiranog "OSOW" vozila.

Prilikom određivanja koordinata GPS rovera mogu se javiti različite greške kao posledica "nesigurnosti rada" celokupnog GPS navigacionog sistema. Izvori grešaka pri radu GPS mogu se grupisati kao [21]:

- greške časovnika, odnosno, razlika između vremena izmerenih na časovnicima u satelitima i u GPS prijemnicima na Zemlji;
- kašnjenje GPS signala prilikom prolaska kroz jonosferski i troposferski pojas;
- višestruka refleksija ili interferencija osnovnog signala sa reflektovanim signalima sa susednih objekata ili sa nekih glatkih površina;
- loša geometrija ili nepovoljan raspored satelita (na engleskom: Dilution of Precision - DOP).

5. ZAKLJUČAK

Klasične tahimetrijske metode, pored visoke tačnosti i pouzdanosti merenja zahtevaju veliko fizičko angažovanje svih učesnika eksperimenta. Samim tim, uzimajući u obzir obim terenskog posla, primenom ovih metoda teško je postići visoku detaljnost (gustinu) merenja, zbog čega se sve ređe koriste.

Primena video i foto tehnike za određivanje graničnih trajektorija vozila daje najbolje rezultate ako se video i foto snimci kombinuju sa drugim savremenim metodama snimanja kao što su GNSS tehnologije i LiDAR (Light Detection and Ranging) 3D lasersko skeniranje.

GPS kinematička metoda pozicioniranja sa procesiranjem korekcija sa bazne stanice u realnom vremenu (Real-Time Kinematic-RTK), uzimajući u obzir postignuti nivo tačnosti i brzinu određivanja položaja vozila, predstavlja skoro idealnu mernu tehniku za određivanje graničnih trajektorija vozila. Da bi se dobile dovoljno "gusto" snimljene tačke, iz kojih se posle precizno mogu rekonstruisati granične trajektorije testnih vozila, frekvencija očitavanja koordinata na GPS prijemnicima, montiranim na testnim vozilima, treba da bude podešena na 10 Hz. Za merenje graničnih trajektorija dugačkih kombinovanih vozila, sastavljenih iz više slogova, na svako pojedinačno vozilo (slog) mora se postaviti dovoljan broj GPS rovera kako bi se mogao precizno definisati položaj čitavog vozila.

U svim prethodno analiziranim eksperimentalnim testovima, gde je primenjena moderna GPS tehnologija pozicioniranja, nije uzeta u obzir specifična morfologija, odnosno, nivelacione karakteristike kolovozne površine na testnom poligonu. Položaji GPS rovera, montiranih na testna vozila, najčešće su bili određeni samo jednostavnim merenjem relativnih rastojanja rovera od ivica kabine vozila ili glavčina pojedinih točkova, što predstavlja značajan izvor dodatnih grešaka pri definisanju tačnog položaja vozila.

Veliki nedostatak i prepreka za masovnu upotrebu GPS tehnologije, odnosno RTK metode, za merenje graničnih trajektorija vozila je veoma visoka cena GPS opreme i instrumenata. Jedan savremeni GPS prijemnik, koji ima mogućnost podešavanja frekvencije očitavanja izmerenih GPS koordinata, sa pratećim softverom košta u proseku 9000 eura pa naviše. Imajući u vidu broj potrebnih prijemnika za jednoznačno definisanje položaja karoserije testnog vozila (najmanje dva po jednom vozilu), kao i potrebu za angažovanjem dodatne bazne stanice, ukupna cena izvođenja eksperimentalnih testova sa dugačkim kombinovanim vozilima može dostići i nekoliko desetina hiljada eura.

Tačno merenje graničnih trajektorija na terenu u realnim uslovima, za vozila različite konfiguracije, od velikog je interesa za sve kompanije koje se bave razvojem softvera za projektovanje puteva i raskrsnica. Ovim kompanijama zapravo su potrebne pouzdane i efikasne metode kako bi testirale tačnost njihovih novorazvijenih softverskih rešenja za kontrolu prohodnosti vozila.

Literatura

- [1] Cheng, J.F.; Huang, H.C. (2011). Effects of Roadway Geometric Features on Low-Speed Turning Maneuvers of Large Vehicles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(6): 373-383.
- [2] Sayers, M.W. (1986). Vehicle Offtracking Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., No. 1052: 53-62.
- [3] Sayers, M.W. (1990). *Symbolic Computer Methods to Automatically Formulate Vehicle Simulation Codes*. Doctoral dissertation, The University of Michigan, USA.
- [4] Sayers, M.W. (1991). Exact Equations for Tractrix Curves Associated with Vehicle Offtracking. *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, Taylor&Francis Group, 20 (3): 297-308.
- [5] Division of Transportation Planning. (1985). *Truck Offtracking Model (TOM)*. Program Documentation and User's Guide, California Department of Transportation - Caltrans, USA.
- [6] Department of Transport and Main Roads. (1988). *VEHICLE/PATH*. Operating procedures, Users Instructions and Installation Guide, Queensland Government, Australia.
- [7] Garlick, G.S., Kanga, D.N., Miller, G.G. (1993). Vehicle Offtracking: A Globally Stable Solution. *ITE Journal*, Institute of Transportation Engineers - ITE, 63(3): 17-21.
- [8] Transoft Solutions. (2018). *AutoTURN 10.2*, Product Brochure, Richmond, British Columbia, Canada. (on-line) available at: <http://www.transoftsolutions.com/vehicle-swept-path/autoturn-select/> (15.02.2018)

- [9] AUTODESK. (2018). *Vehicle Tracking*. Integrated Swept Path Analysis Software, Product Brochure, San Rafael, CA., USA. (on-line) available at: <http://www.autodesk.com/products/vehicle-tracking/overview> (15.02.2018)
- [10] CARD/1. (2018). *Swept Turning Path*. Swept Turning Path Calculation Software, Product Brochure, Hamburg, Germany. (on-line) available at: <http://www.card-1.com/en/product/card1-tours/swept-turning-path/> (15.02.2018)
- [11] RIB-Stratis. (2018). *Design Alignment Module, Road Planning, Design of Intersections, Tractrix calculation*. Product Brochure, RIB Software SE, Stuttgart, Germany. (on-line) available at: <https://www.rib-software.com/en/main/rib-solutions/rib-stratis/design-alignment.html> (15.02.2018)
- [12] CGS Labs. (2018). *Autopath PRO*. Swept path analysis and vehicle turning simulation software, Product Brochure, CGS Labs d.o.o., Ljubljana, Slovenia. (on-line) available at: <http://www.cgsplus.com/Software/Plateia.aspx> (15.02.2018)
- [13] Gavran, D. (2013). *User Manual - GCM++*. Gavran Civil Modeller, Belgrade, Serbia. (on-line) available at: <http://www.gcm-gavran.com/gavran-gcm-preview.htm> (15.02.2018)
- [14] Glabsch, J., Heunecke, O., Schuhbäck, S., Wirth., W. (2012). Swept path determination by means of PDGNSS. *Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Control & Guidance - MCG*, 27-29 March 2012, Stuttgart, Germany. (on-line) available at: <http://www.uni-stuttgart.de/ingeo/mcg2012/proceedings.htm> (20.03.2018)
- [15] Bonz, M., Schmid, C.H. (1980). Untersuchung des Flächenbedarfs von Bussen in der Kurvenfahrt an Haltestellen. *Straßenverkehrstechnik*, Nr. 6: 197-201.
- [16] Mussone, L., Matteucci, M., Bassani, M., Rizzi, D. (2011). An innovative method for the analysis of vehicle movements in roundabouts based on image processing. *Journal of Advanced Transportation*, 47(6): 581-594.
- [17] Barth, A. (2010). *Vehicle Tracking and Motion Estimation Based on Stereo Vision Sequences*. Doctoral Dissertation, Landwirtschaftliche Fakultät, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- [18] Cheng, J.F., Huang, H.C. (2011). Effects of Roadway Geometric Features on Low-Speed Turning Maneuvers of Large Vehicles. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(6): 373-383.
- [19] Lippold, C., Schemmel, A. (2014). *Befahrbarkeit plangleicher Knotenpunkte mit Lang-Lkw*. Forschungsprojekt FE 09.0284/2013/CRB, Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Lehrstuhl für Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, Institut für Verkehrsanlagen, Technische Universität Dresden, Deutschland. (on-line) available at: <http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/...lang-lkw/.../890284.pdf> (9.02.2018)
- [20] PhotoModeler Technologies. (2018). *PhotoModeler for Unmanned Aircraft Systems - PhotoModeler UAS*. PhotoModeler Technologies - Eos Systems Inc., Vancouver, BC, Canada. (on-line) available at: <http://www.photomodeler.com/applications/UAS/default.html> (20.03.2018)
- [21] Bajat, B., Ašanin, S. (2015). *Primena geodezije u saobraćajnicama*. Akademski misao, Srbija. 170 str.
- [22] GIS Resources. (2018). *Fundamentals of GPS Signal and Data*. A Knowledge Archive. (on-line) available at: http://www.gisresources.com/fundamentals-of-gps-signal-and-data_2/ (24.02.2018)
- [23] PennState. (2018). *GPS and GNSS for Geospatial Professionals*. Department of Geography, College of Earth and Mineral Sciences, The Pennsylvania State University, University Park, PA, USA. (on-line) available at: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845> (27.02.2018)
- [24] AGROS. (2018). *Servisi Kontrolnog centra AGROS GNSS mreže - RTK servis*. Aktivna Geodetska Referentna Osnova Srbije, Republički geodetski zavod (RGZ), Beograd. (on-line) available at: <http://agros.rgz.gov.rs/agros/servisi.php> (7.03.2018)
- [25] Pecchini, D., Giuliani, F. (2013). Experimental Test of an Articulated Lorry Swept Path. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, 139(12): 1174-1183.
- [26] Frost, M. (2014). Improving the Modeling of OSOW Movements through Field Test Studies. *Presented at Rapid City - 2014th Joint Western/Midwestern ITE District Annual Meeting*, Session 1D - Oversized Trucks in Roundabouts, Institute of Transportation Engineers - ITE, 29 June - 1 July 2014, South Dakota, USA. (on-line) available at: https://www.westernite.org/annualmeetings/14_Rapid_City/Presentations/1D-Frost.pdf (20.03.2018)
- [27] Flores, J., Chan, S., Homola, D. (2015). A Field Test and Computer Simulation Study on the Wind Blade Trailer. *Proceedings of the 5th International Symposium on Highway Geometric Design*, Transportation Research Board (TRB), Compendium of papers, 22 - 24 June 2015, Vancouver, Canada, CD-ROM, 17p.