

Predlog rešenja Map-Matching algoritma pri navigaciji vozila u urbanoj sredini

Goran Dikić

Vlada Sokolović

Univerzitet odbrane u Beogradu

Vojna akademija

Beograd, Srbija

goran.dikic@mod.gov.rs

vlada.sokolovic@va.mod.gov.rs

Goran Marković

Rade Stančić

Univerzitet u Beogradu

Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

gmarkovic@etf.rs

rstancic@gmail.com

Sažetak—U aplikacijama namenjenim za navigaciju objekata na zemlji pored GPS prijemnika mogu se koristiti i multisenzorski integrisani navigacijski sistemi kao što je INS/GPS i digitalne karte, naročito u urbanim sredinama gde je veoma česta pojava višestruka refleksija GPS signala i prekid praćenja GPS signala. U radu je prikazan predlog rešenja algoritma za sjedinjavanje informacija o poziciji, određenih pomoću višesenzorskog integrisanog navigacijskog sistema i podataka iz specifično definisane digitalne karte što omogućava dodatno povećanje tačnosti određivanja pozicije vozila. Ispitivanje predloženog rešenja realizovano je putem simulacije na računaru i eksperimenta na vozilu.

Ključne riječi—map-matching; navigacija; algoritam;

I. UVOD

Narastajući zahtevi u pogledu potreba za navigaciju objekata, ne samo u oblasti vojnih već i civilnih primena, uslovlili su porast interesovanja za istraživanja u ovoj oblasti. Kao najrasprostranjeniji navigacioni sistem u upotrebi jeste sistem globalnog pozicioniranja GPS, [1]. Iz komercijalnih razloga, posebna pažnja se poklanja navigaciji vozila u urbanim sredinama, gde usled interferencije, višestrukog prostiranja GPS signala itd. dolazi do pojave grešaka, koje mogu biti veće od 10 m, ili čak do gubitka informacija o poziciji i brzini korisnika, što je u određenim aplikacijama neprihvatljivo, [2]. Jedan od načina da se poveća tačnost određivanja pozicije korisnika u urbanim sredinama jeste i upotreba digitalne karte, formirane na osnovu prethodnog snimanja pomoću GPS prijemnika. Takve karte imaju veliki skup podataka. Predloženi model digitalne karte sadrži daleko manji skup podataka što olakšava pretraživanje i brzinu obrade podataka.

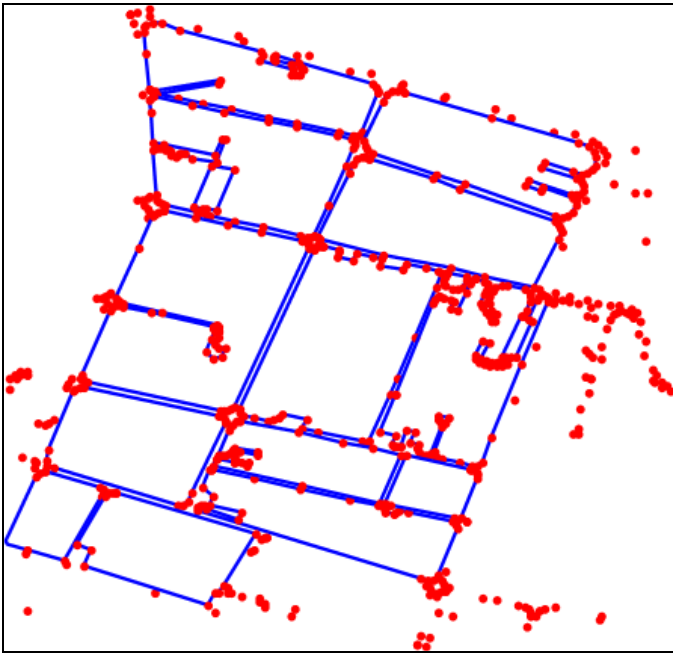
Do sada je razvijeno više algoritama za sjedinjenje navigacionih podataka određenih pomoću GPS prijemnika ili integrisanih navigacijskih sistema i podataka iz digitalne karte (Map-matching, MM), koji pored određivanja preciznije pozicije vozila, omogućavaju i bolju estimaciju grešaka inercijalnih senzora (INS) u okviru INS/GPS integrisanog navigacijskog sistema, [3], a takođe i uvezivanje sa sistemima za upravljanje parking servisima, [4]. Quddus et. al. [5], su

prikazali tri osnovna metoda u realizaciji MM algoritma, takozvani point-to-point, point-to-curve i curve-to-curve, koji se baziraju na geometrijskom rešenju položaja vozila. Primenom ovih metoda određivanje pozicije vozila na digitalnoj karti može biti nezavisno i zavisno od integrisanog navigacijskog sistema. U nezavisnom slučaju se informacija o poziciji vozila na izlazu INS/GPS direktno preslika na digitalnu kartu pomoću MM algoritma Quddus et. al. [6]. U zavisnom slučaju MM algoritam je direktno uveden u KF u kome se vrši estimacija položaja vozila, Chu et. al. [7]. Takođe je moguće najpre izvršiti korekciju položaja vozila određenu pomoću GPS prijemnika, a zatim se tako korigovana informacija uvodi u KF za korekciju grešaka INS, [8], [9]. Pored metoda u kojima se određivanje položaja vozila zasniva na geometrijskom rešenju, postoje i metode u kojima se MM algoritam bazira na fazi logici, kao što su prikazali Kim et. al. [10] i Wu et. al. [11], ili na nekoj funkciji verovatnoće Smaili et. al. [12]. U dosadašnjim istraživanjima, MM algoritmi rešavaju problem pridruživanja podataka sa izlaza navigacijskog sistema i podataka sa digitalne karte koja je definisana trajektorijom snimljenim pomoću GPS prijemnika. Na taj način su sve ulice, i moguće površine za kretanje vozila, definisane jednom linijom.

U ovom istraživanju, upotrebljena je digitalna karta, definisana pomoću skupa referentnih tačaka kojima su opisane prelazne ivice puta. Na taj način su sve ulice i moguće površine za kretanje vozila definisane u punom profilu, u dvodimenzionalnoj (2D) ravni. U radu je dat opis razvijenog MM algoritma, koji je dizajniran za specifičnu digitalnu kartu, pri čemu se verovatna pozicija vozila određuje pomoću funkcije verovatnoće u odnosu na referentne tačke kojima je definisana digitalna karta. Predloženo rešenje svakako doprinosi povećanju preciznosti određivanja pozicije vozila na putu, sto je i potvrđeno na osnovu simulacije.

II. DIGITALNA KARTA

Digitalna karta, koja je upotrebljena u ovom istraživanju, definisana je pomoću skupa referentnih tačaka. Jedan segment urbane sredine, predstavljen na digitalnoj karti, prikazan je na Sl. 1.



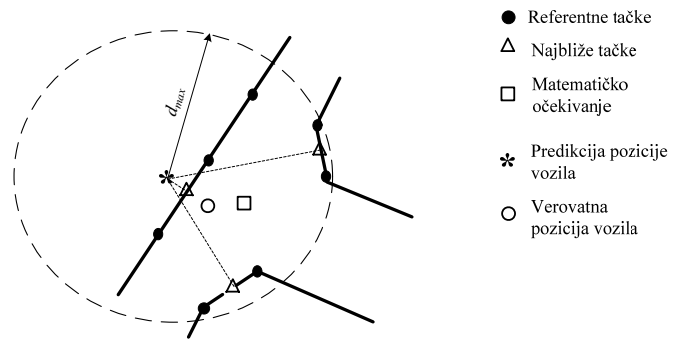
Slika 1. Segment urbane sredine na digitalnoj karti.

Sve ulice i površine za kretanje vozila definisane su pomoću referentnih tačaka, koje su označene crvenim tačkicama, i za koje su poznate sve tri koordinate. Profil svih ulica i površina gde je moguće kretanje vozila, radi vizuelizacije, prikazan je plavim linijama. Svaki deo ulice definisan je pomoću dva skupa tačaka, koje su definisane na osnovu karakteristika samih ulica i koje određuju levu odnosno desnu ivicu puta. Dve susedne tačke određuju dužinu i pravac svakog segmenta na graničnoj liniji puta, (kojima su definisane leva odnosno desna ivica puta). Ovako definisane ulice pomoću referentnih tačaka, omogućavaju određivanje najbliže tačke na ivici puta, u odnosu na trenutno procenjeno poziciju vozila.

III. MM ALGORITAM

Proces pridruživanja podataka u MM algoritmu, zasniva se na postojanju baze podataka, gde je svaka linija (ivica puta) definisana kao matrica $\mathbf{A}_{i(n_i, 3)}$, gde je n_i broj referentnih tačaka koji opisuje određenu ivicu puta (označenu kao lin), pri čemu je svaka od tih tačaka definisana svojim koordinatama u geografskom koordinatnom sistemu (x, y, z) (*latitude, longitude, height*, LLH). Sve matrice koje definišu ivice puta, deo su jedinstvene matrice \mathbf{A} , kojima je definisana digitalna karta, $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1 \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_M]^T$. Radi odgovarajućeg upravljanja podacima iz digitalne karte, broj vrsta n_i svake pod matrice \mathbf{A}_i je pridružen posebnoj matrici $\mathbf{D} = [n_1 \ n_2 \dots n_M]^T$.

Određivanje verovatne pozicije vozila, zasniva se na ideji prikazanoj na Sl. 2. Na ovoj slici, najbliže tačke na liniji puta, u okolini vozila, označene su trouglovima. Kvadrati predstavljaju matematičko očekivanje (x_m, y_m) njegovih koordinata $(x_{\min}(i), y_{\min}(i))$, a zvezdice predstavljaju trenutnu predikciju položaja vozila (x_p, y_p) . Verovatna pozicija vozila (x_c, y_c) , na slici je označena kružićima.



Slika 2. Medusobni odnos tačaka neophodnih za određivanje verovatne pozicije vozila.

U slučaju kada predikcija pozicije vozila pokazuje da se vozilo nalazi van puta, verovatna pozicija vozila izračunava se kao:

$$[x_c \ y_c] = \sum_{i=1}^n p_i [x_{\min}(i) \ y_{\min}(i)] \quad (1)$$

Težinski koeficijenti p_i se izračunavaju kao:

$$p_i = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r_{pi}}{d_{max}} \right)^2}}{\sum_{i=1}^n e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{r_{pi}}{d_{max}} \right)^2}}, \quad (2)$$

gde je r_{pi} rastojanje između predikcije položaja vozila i najbliže tačke na liniji (ivici puta) $(x_{\min}(i), y_{\min}(i))$, i može se izračunati na osnovu jednačine:

$$r_{pi} = \left((x_p - x_{\min}(i))^2 + (y_p - y_{\min}(i))^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3)$$

Veličina d_{max} je maksimalno rastojanje od vozila u kome se vrši određivanje najbliže tačke a c je konstanta koja određuje brzinu promene eksponencijalne funkcije u odnosu na rastojanje r_{pi} . U ovom radu su usvojene vrednosti $d_{max} = 25$ m i $c = 3$.

Usvajanje vrednosti za $d_{max} = 25$ m je urađeno u skladu sa pretpostavkom da nijedna širina ulice ne prevazilazi usvojenu vrednost, jer je za određivanje verovatnog položaja vozila neophodno da se obe linije puta nalaze unutar radijusa d_{max} . Ova veličina svakako bi trebala da bude adaptivna i da se menja u skladu sa trenutnom širinom puta.

Objašnjenje za usvajanje vrednosti koeficijenta c povezano je sa eksponencijalnim delom jednačine (2). Očigledno je da ovaj deo ima formu definisanu u skladu sa funkcijom gustine verovatnoće normalne raspodele, kada je matematičko očekivanje odgovarajuće promenljive jednako nuli. Usvajajući vrednost $c = 3$, standardna devijacija ove funkcije je određena sa $d_{max}/3$.

U skladu sa karakteristikom normalne raspodele, većina realizacija odgovarajuće promenljive nalaziće se u intervalu od $\pm 3\sigma$, u odnosu na matematičko očekivanje. Upravo na ovaj način definisana je verovatna pozicija vozila kada se predikcija njegove pozicije nalazi van puta, ali imajući u vidu da suma težinskih koeficijenata p_i mora biti jedan.

Na ovaj način određuje se verovatna pozicija vozila kada god postoji više od jedne linije lne , u okolini predikcije njegovog položaja (x_p, y_p) , i kada je minimalno rastojanje $(r_i)_{\min}$ najbliže tačke $(x_{\min}(i), y_{\min}(i))$ manje od rastojanja vozila r_p od matematičkog očekivanja (x_m, y_m) , označenog kvadratičima na Sl. 2.

Rastojanja r_p i r_i se izračunavaju kao:

$$r_i = \left((x_{\min}(i) - x_m)^2 + (y_{\min}(i) - y_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

$$r_p = \left((x_p - x_m)^2 + (y_p - y_m)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

U slučaju kada je minimalno rastojanje $(r_i)_{\min}$ veće od r_p , ili ukoliko postoji samo jedna linija u okolini trenutne pozicije vozila, trenutna predikcija položaja vozila je prihvaćena kao validna:

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p & y_p \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Proces određivanja verovatne pozicije vozila, započinje određivanjem najbliže tačke u odnosu na predikciju položaja vozila (x_p, y_p) , za svaku liniju. Pretpostavimo da najbliža tačka unutar svake linije lin ima i -tu poziciju i koordinate:

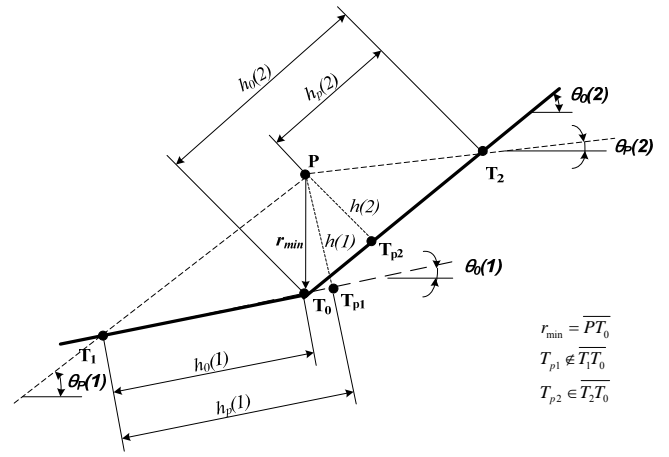
$$T_0 = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lin(i,1) \\ lin(i,2) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Međutim, tačna pozicija najbliže tačke mora biti određena na segmentu linije lin koji je definisan tačkom T_0 i još dvema tačkama na pozicijama $(i-1)$ i $(i+1)$, sa koordinatama:

$$T_1 = \begin{bmatrix} x(1) \\ y(1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lin(i-1,1) \\ lin(i-1,2) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} x(2) \\ y(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} lin(i+1,1) \\ lin(i+1,2) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Na Sl. 3, je prikazan karakteristični slučaj kada najbliža tačka pripada segmentu lne , definisanom pravim linijama $\overline{T_0T_1}$ i $\overline{T_0T_2}$. Trenutna predikcija pozicije vozila je označena sa P , a projekcije tačke P na pojedinim segmentima označene su sa T_{P1} i T_{P2} .



Slika 3. Geometrijski odnosi karakterističnih tačaka.

Na prethodnoj slici prikazane su oznake sa sledećim značenjem:

(x_0, y_0) i $(x(i), y(i))$ - koordinate tačaka T_0 , i T_1 , T_2 (u skladu sa i);

$\theta_0(i)$ - pravci segmenata $\overline{T_0T_1}$ i $\overline{T_0T_2}$;

$\theta_P(i)$ - pravci duži $\overline{PT_1}$ i $\overline{PT_2}$;

$h_0(i)$ - dužine segmenata $\overline{T_0T_1}$ i $\overline{T_0T_2}$;

$h(i)$ - najkraće rastojanje pozicije vozila P u odnosu na segmente $\overline{T_0T_1}$ i $\overline{T_0T_2}$;

$h_P(i)$ - projekcije $\overline{PT_1}$, $\overline{PT_2}$ na linije koje prolaze kroz T_0, T_1 i T_0, T_2 , respektivno;

$x_{\min}(i)$, $y_{\min}(i)$ - koordinate tačaka T_{P1} , T_{P2} .

Uzimajući u obzir sve elemente prikazane na Sl. 3, jasno je da je pozicija tačke T_{P1} izvan segmenta $\overline{T_0T_1}$ zbog čega se ne smatra elementom specifične linije. Iz tog razloga jasno je da $\overline{PT_{P2}}$ predstavlja najkraće rastojanje trenutne predikcije položaja vozila P u odnosu na specifičnu liniju.

Prvi korak je utvrđivanje da li postoji više od jedne linije u okolini predikcije pozicije vozila. Ukoliko ne postoji više od jedne linije, nema potrebe za izračunavanjem već se verovatna pozicija vozila određuje na osnovu jednačine (6). U suprotnom, neophodno je odrediti najbliže tačke na segmentima i njihovo matematičko očekivanje (x_m, y_m) , koje se izračunava na osnovu jednačine:

$$\begin{bmatrix} x_m & y_m \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} x_{\min}(i) & y_{\min}(i) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

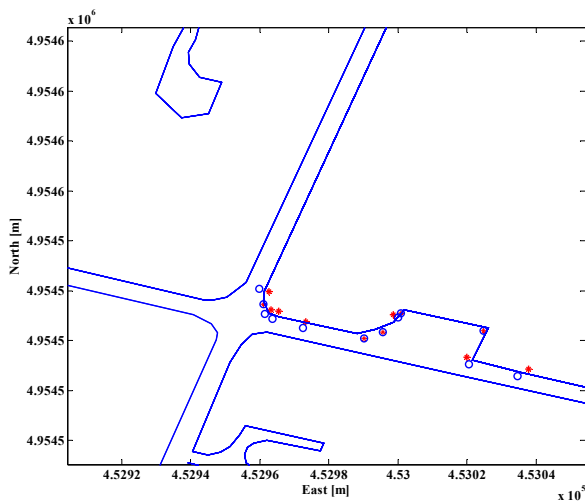
Nakon toga, moguće je odrediti rastojanja r_i i r_p , na osnovu jednačina (4) i (5). Konačno, ukoliko je minimalno rastojanje $(r_i)_{\min}$ do najbližih tačaka $(x_{\min}(i), y_{\min}(i))$, manje od r_p , verovatna pozicija vozila se izračunava na osnovu (1).

IV. ISPITIVANJE MM ALGORITMA

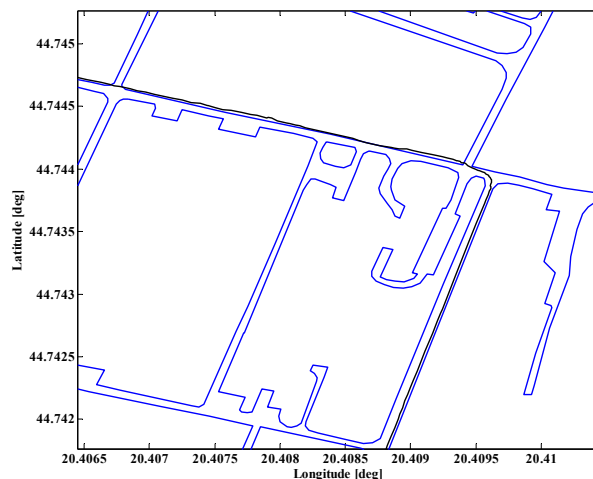
Određivanje pozicije vozila pomoću MM algoritma grafički je predstavljeno na Sl. 4, gde su ulice predstavljene u UTM koordinatama a verovatna pozicija vozila je određena pomoću simulacije. Na ovoj slici, plavi kružići predstavljaju verovatnu poziciju vozila određenu pomoću MM algoritma. Crvene zvezdice, predstavljaju tekuću predikciju pozicije vozila, a plave linije označavaju ivice puta. U slučaju kada tekuća estimacija pokazuje da je vozilo izvan puta i kada postoji dovoljan broj referentnih tačaka, MM algoritam određuje verovatnu poziciju vozila. U suprotnom, vozilo se nalazi na putu, i tada se estimacija i verovatna pozicija vozila poklapaju.

Testiranje MM algoritma realizovano je pomoću vozila koje se kretalo po tačno definisanoj putanji na digitalnoj karti. Podaci su prikupljeni pomoću INS senzora i GPS prijemnika koji su montirani na vozilo kao u [3], a zatim obrađeni u softverskoj aplikaciji integrisanog navigacijskog sistema, realizovanoj u MATLABu. Na Sl. 5, prikazan je deo trajektorije vozila kada nakon manevra INS/GPS navigacijski podaci pokazuju da se vozilo nalazi van puta.

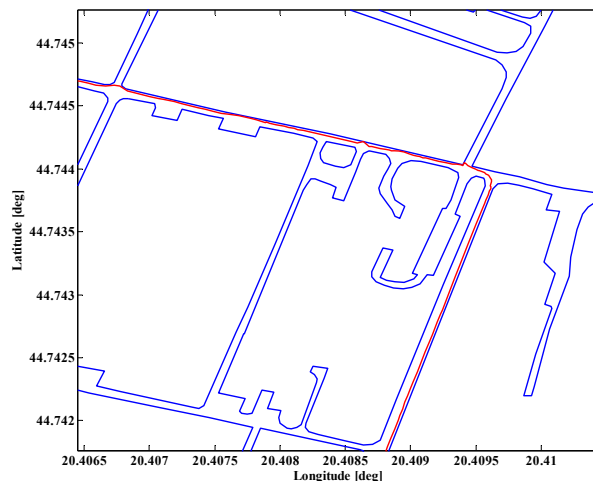
Na Sl. 6. zumiran je isti deo trajektorije vozila kao na prethodnoj slici, i na njoj je crvenom linijom prikazana pozicija vozila nakon korekcije pozicije. Na ovoj slici može se uočiti da i pored toga što vozilo u toku ispitivanja prolazi kroz tri raskrsnice i pored parkinga (čije su ivice takođe definisane referentnim tačkama), predloženi algoritam omogućava korektnu estimaciju verovatnog položaja vozila na putu.



Slika 4. Određivanje pozicije vozila na putu.



Slika 5. Zumirani deo trajektorije vozila bez korekcije pozicije.



Slika 6. Zumirani deo trajektorije vozila nakon korekcije pozicije.

V. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana osnovna ideja MM algoritma za sjedinjavanjem podataka iz integrisanog navigacijskog sistema i digitalne karte, čija specifičnost leži u načinu generisanja podataka na osnovu kojih je sama karta opisan. S obzirom da je digitalna karta definisana na osnovu skupa referentnih tačaka, jasno je da se radi o manjoj količini informacija koju je potrebno pretraživati u bazi podataka prilikom izvršavanja algoritma. Predloženo rešenje testirano je putem simulacije kao i putem eksperimeta na vozilu. Prikazani rezultati potvrđuju pretpostavku da je primenom predloženog rešenja MM algoritma moguće dodatno povećati preciznost određivanja pozicije vozila koje se kreće u urbanim sredinama. S obzirom da su radu data preliminarna istraživanja, nisu prikazani svi karakteristični slučajevi rada MM algoritma, kao i slučaj kada vozilo zaista izlazi van puta, što predstavlja naredni korak istraživanja u predmetnoj oblasti.

LITERATURA

- [1] S. Radojević, and J. Ćurčić, "Tačnost i modernizacija globalnog pozicionog sistema", *Military Technical Courier / Vojnotehnicki glasnik*, vol. 57, no. 4, pp. 108-131, November 2009.
- [2] V. Sokolović, G. Marković, and G. Dikić, "Improvement of signal synchronization in GPS software receiver", *Military Technical Courier / Vojnotehnicki glasnik*, vol. 63, no. 4, pp. 11-24, November 2015. DOI: 10.5937/vojtehg63-7395
- [3] V. Sokolovic, G. Dikic, G. Markovic, R. Stancic, and N. Lukic, "INS/GPS Navigation System Based on MEMS Technologies", *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering*. vol. 61, no. 7-8, pp. 448-458, July 2015. DOI:10.5545/sv-jme.2014.2372
- [4] Z. Nestic, L. Ljubic, M. Radojicic, and J. V. Vasovic, "Analysis of the Information Flow within the Information System of Car Parks", *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 12, no. (3), pp. 73-86, 2015.
- [5] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng, and R. B. Noland, "Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the art and future research directions" *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 15, no. 5, pp. 312-328, 2007.
- [6] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng, and R. B. Noland, "Integrity of map-matching algorithms", *Transport. Res. C-Emer.* vol. 14, pp. 283-302, 2006.
- [7] H. J. Chu, G. J. Tsai, K. W. Chiang, and T. T. Duong, "GPS/MEMS INS data fusion and map matching in urban areas", *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 11280-11288, 2013.
- [8] G. Taylor, C. Brunson, J. Li, A. Olden, D. Steup, and M. Winter, "GPS accuracy estimation using map matching techniques: Applied to vehicle positioning and odometer calibration", *Computers, environment and urban systems*, vol. 30, no. 6, 757-772, 2006.
- [9] G. R. Jagadeesh, T. Srikanthan, and X. D. Zhang, "A map matching method for GPS based real-time vehicle location", *Journal of Navigation*, vol. 57, pp. 429-440, 2004.
- [10] S. Kim, and J. H. Kim, "Adaptive fuzzy-network-based C-measure map-matching algorithm for car navigation system", *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 48, no. 2, pp. 432-441, 2001.
- [11] Q. Wu, X. Gu, J. Luo, P. Zhang, and X. Fang, "A Vehicle Map-matching Algorithm based on Measure Fuzzy Sorting", *Journal of Computers*, vol. 9, no. 5, pp. 1058-1065, 2014.
- [12] C. Smaili, M. E. B. El Najjar, and F. Charpillet, "A Hybrid Bayesian Framework for Map Matching: Formulation Using Switching Kalman Filter", *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 74, no. 3-4, pp. 725-743, 2014.

ABSTRACT

In applications designed for navigation of an object on the ground beside the GPS receivers, the multisensors integrated navigation systems and digital maps can be used, especially in urban areas where multipath of GPS signals propagation and signals tracking interruption are very common. This paper presents a solution for map-matching algorithm which is based on informations obtained with INS/GPS navigation system and data from specifically defined digital map which allows improvement the accuracy of a vehicle position. The tests of the proposed solution were realized by a computer simulation and experiment on vehicle.

THE PROPOSED SOLUTIONS FOR MAP-MATCHING ALGORITHM DURING NAVIGATION OF THE VEHICLES IN URBAN ENVIRONMENT

Goran Dikić, Vlada Sokolović, Goran Marković, Rade Stančić