

Avtonomni mobilni robotski sistem za merjenje elektroprevodnosti prsti

Franci Ovčak, Sebastjan Šlajpah, Marko Munih, Matjaž Mihelj

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana
E-pošta: fo1946@student.uni-lj.si, sebastjan.slajpah@fe.uni-lj.si,
marko.munih@fe.uni-lj.si, matjaz.mihelj@fe.uni-lj.si

Autonomous mobile robotic system for measuring the electrical conductivity of soil

This paper presents an innovative application for optimizing and digitizing modern agriculture through the integration of advanced farming techniques and robotic solutions. The main focus lies in the development of a mobile platform equipped with sensors to measure soil electrical resistance, a key parameter for optimizing fertilizer application. The platform utilizes advanced localization and navigation techniques, enabling autonomous and precise data collection. The system efficiently determines optimal sampling points in the field, while avoiding obstacles and field boundaries. The results demonstrate the effectiveness of the proposed methodology in achieving precise and automated agricultural operations, facilitating sustainable and data-driven farming practices.

1 Uvod

Sodobno kmetijstvo stremi k optimizaciji in digitalizaciji. Precizno kmetovanje vključuje inovativne metode pridelave, ki temeljijo na zbranih podatkih. Robotske rešitve za kmetijstvo omogočajo avtomatizacijo zahtevnih kmetijskih operacij, kot so pobiranje, spravilo, zatiranje plevela, košnja, obrezovanje, sejanje, škropljenje, redčenje, fenotipizacija, monitoring, sortiranje in pakiranje. Na področju avtonomnega vzorčenja prsti v primerjavi z ročnim vzorčenjem obstaja že nekaj rešitev [1, 2]. V pogostih primerih pa so take platforme namenjene le eni analizi in te pogosto ne vsebujejo drugih sistemov za analizo prsti.

En izmed ključnih parametrov je sestava prsti, kar nam pomaga pri odločanju in optimizaciji nanosa gnojil, pesticidov, namakanja in gojenja rastlin. Električno upornost tal, kot bistveni kazalnik za določanje fizikalnih in kemijskih lastnosti (vlaga, slanost, organska snov, raven hranil), je mogoče meriti s senzorji nameščenimi na avtonomni robotski platformi. V ta namen smo na štirikolesno mobilno platformo namestili elektrode in merilnik upornosti tal. Platformo pa smo dodatno nadgradili z opremo potrebno za izvajanje avtonomnega vzorčenja. Z uporabo robotskega operacijskega sistema (ROS) smo implementirali algoritme za lokalizacijo in navigacijo. Za nadzor in prikaz podatkov v realnem času smo izdelali spletni uporabniški vmesnik oziroma HMI (ang. human machine interface).

2 Mobilna platforma

Mobilna platforma, prikazana na sliki 1, je štirikolesno vozilo z neodvisnim upravljanjem posameznih koles (hitrost in obračanje) – 4WAS. Na platformo smo namestili Asus miniPC, na katerem tečeta operacijski sistem Ubuntu in ROS, krmilnik Beckhoff za zaprtizančno vodenje posameznih prostostnih stopenj, mrežni usmerjevalnik za povezavo med moduli, sprejemnik signalov globalnega navigacijskega satelitskega sistema (GNSS), merilnik prevodnosti tal, inercialno merilno enoto (IME) in napajalni sistem.



Slika 1: Postavitev elementov na mobilni platformi.

2.1 Sprejemnik GNSS RTK

V večini primerov je natančnost lokalizacije z uporabo GNSS modula omejena na nekaj metrov zaradi atmosferskih pogojev, odbojev signala od okoliških predmetov in napake ure [3]. Za doseganje večje natančnosti določanja položaja se uporablja tehnologija GNSS v realnem času (RTK GNSS). Ta uporablja enake signale kot običajni GNSS, vendar s korekcijskimi podatki, kar omogoča natančnost nekaj centimetrov.

Mobilna platforma vključuje dva modula GNSS Mosaic-X5, kjer je vsak modul povezan s svojo večpasovno anteno (Slika 1). Anteni sta nameščeni na zadnji levi in desni strani platforme. Uporaba teh anten bistveno izboljša odpornost proti šumu in poveča največje število satelitov, ki jih lahko modul sprejema v danem trenutku, kar pripomore k izboljšanju konvergence in natančnosti določanja položaja [4].

2.2 Kolesni kodirniki položaja

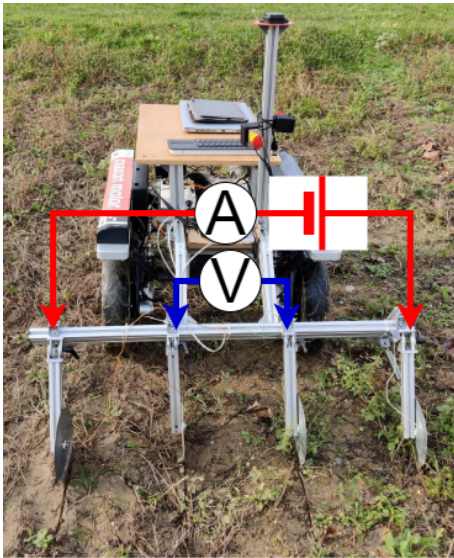
Vsak od štirih kolesnih motorjev je opremljen z dvokanalnim inkrementalnim kodirnikom. S kvadraturnim dekodiranjem lahko dosežemo ločljivost $N = 16000$ pulzov na obrat. Frekvenco vzorčenja kodirnikov smo nastavili na 50 Hz ($\Delta t = 0,02$ s). Za izračun hitrosti mobilne platforme vzamemo povprečno hitrost vseh štirih koles.

2.3 Inercialna merilna enota (IME)

Enota vsebuje 6-osni senzorski modul MPU-9250, ki vsebuje 3-osni žiroskop ter 3-osni merilnik pospeška, in magnetometer, ki omogoča merjenje absolutne orientacije z zaznavanjem zemeljskega magnetnega polja. Podatke iz senzorjev obdela vgrajeni mikrokrmilnik STM32, ki jih nato prek vmesnika USB pošlje v ciljno napravo.

2.4 Merilnik elektroprevodnosti prsti

Ena najučinkovitejših in najzanesljivejših metod za merjenje rodovitnosti tal je merjenje električne prevodnosti tal [5], saj je ta metoda hitra, dostopna in zanesljiva. V ta namen smo razvili vezje za merjenje specifične prevodnosti na podlagi odprtokodnega projekta *OhmPi* [6]. Merilni sistem je sestavljen iz merilnega vezja in elektrod, nameščenih na zadnji strani platforme. Slika 2 prikazuje konfiguracijo s štirimi enakomerno razporejenimi elektrodami, ki so pritrjene na odmičnih nosilcih.



Slika 2: Elektrode pritrjene na mobilno platformo.

Elektrode so med seboj izolirane, tako da tok med njimi teče le, ko so v stiku s prstjo. Zunanji elektrodi vsiljujeta tok, ustvarjena napetost pa se nato izmeri na notranjih dveh elektrodah. Za izračun specifične upornosti tal uporabimo enačbo

$$\rho_a \approx 2\pi a \frac{U}{I}, \quad (1)$$

kjer je a razdalja med elektrodami, I injiciran tok in U napetost med notranjima elektrodama.

Tla vsebuje lastni električni potencial, ki lahko povzroči netočne meritve. Težavo odpravljamo z metodo

dveh pulzov, kjer pravo napetost izračunamo kot povprečje dveh meritev

$$U = \frac{1}{2} (U_k + U_{k+1}). \quad (2)$$

2.5 Kinematika

Kinematični model predstavljene platforme smo povzeli po [7]. Avtorji v omenjenem članku poenostavijo kinematični model kot enotirni sistem s predpostavko čistega kotaljenja in majhnega kota krmiljenja.

Dodatno smo model poenostavili tako, da smo zanedarili vpliv kotov bočnega zdrsa ($\beta \approx 0$), saj se mobilna platforma premika z relativno majhnimi hitrostmi. Tako je kinematični model sledeče oblike

$$\dot{X} = v_m \cos(\varphi), \quad (3)$$

$$\dot{Y} = v_m \sin(\varphi), \quad (4)$$

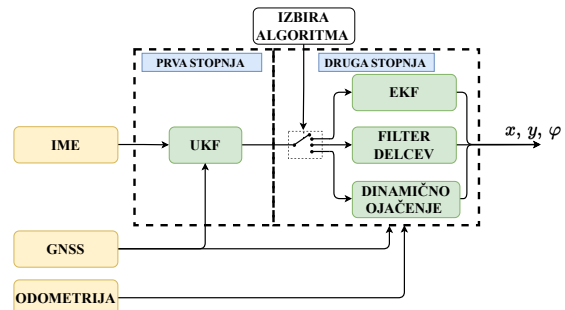
$$\dot{\varphi} = \frac{v_m}{L} (\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)), \quad (5)$$

kjer v enačbi predstavlja v_m hitrost platforme, φ orientacije platforme, δ_f kot sprednjega srednjega kolesa, δ_r kot zadnjega srednjega kolesa in L medosno razdaljo.

Za boljšo vodljivost smo izvedli način vodenja sprednjih in zadnjih koles v protifazi. To pomeni, da sta obe kolesi vedno usmerjeni pod nasprotnim kotom, $\delta_f = -\delta_r$.

3 Lokalizacija

Za lokalizacijo uporabljamo dvostopenjsko filtriranje, kot je prikazano na sliki 3. V prvi stopnji uporabljamo nepristranski Kalmanov filter (UKF, ang. *Unscented Kalman Filter*), ki združuje podatke iz IME, dveh GNSS senzorjev in po potrebi magnetometra, da pridobi natančno oceno orientacije mobilne platforme. V drugi stopnji uporabljamo orientacijo, pridobljeno iz UKF filtra, položaj, pridobljen iz dveh GNSS senzorjev, in odometrijo, ki jo izračunamo na podlagi spremembe položaja glede na prepotovano razdaljo in zasuk koles. Validirali smo tri metode združevanja podatkov: 1) razširjeni Kalmanov filter (EKF), 2) dinamično ojačenje in 3) filter delcev.

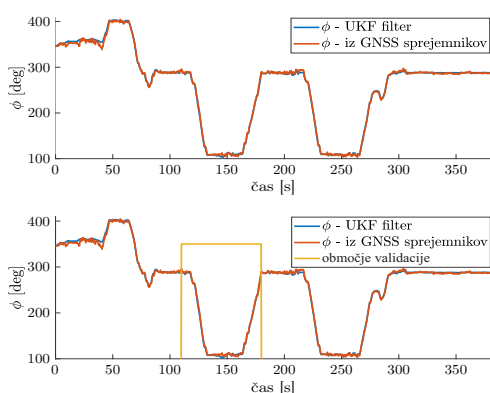


Slika 3: Blokovni diagram uporabe filtrov za namen lokalizacije.

3.1 Validacija lokalizacije

Algoritmne lokalizacije je težko učinkovito validirati v situacijah z visokimi kovariancami GNSS signalov, saj v takih situacijah ni na voljo absolutne referenčne točke za primerjavo algoritmov. Iz tega razloga smo se odločili za zbiranje podatkov na odprtem polju, kjer napaka položaja platforme ne presega 1 cm. Šum pa smo nato dodali naknadno.

Najprej smo preverili delovanje UKF. Ocenjeno orientacijo platforme smo primerjali z orientacijo, izračunano iz položajev dveh GNSS sprejemnikov. Ob normalnem delovanju filtra, z upoštevanjem korekcije je natančnost UKF filtra ustrezna, kar je prikazano na zgornjem grafu na sliki 4. Spodnji graf prikazuje delovanje UKF, pri katerem smo med časom $t = 110$ s in $t = 185$ s umetno nastavili kovarianco obeh GNSS na $R_{\text{gps}} = \text{diag}([1 \ 1 \ 1] \text{ m})$ in na GNSS signale dodali Gaussov šum z varianco 1 m.



Slika 4: Delovanje UKF filtra z upoštevanje korekcije.

Za validacijo druge stopnje smo uporabili dva načina testiranja. V prvem načinu smo vnesli Gaussov šum z $\sigma = 1 \text{ m}$, v drugem pa smo temu šumu dodali še enosmerno komponento (odmik) magnitude 0,3 m. Rezultate so prikazani v tabelah 1 in 2.

Tri metode uporabljene v drugi stopnji dosegajo ustrezne rezultate, signifikantno izboljšajo lokalizacijo v primerjavi z neposrednimi GNSS signali in so primerne za namen lokalizacije. EKF se je izkazal kot rahlo bolj natančen. Filter delcev pa je imel večjo napako pri oceni orientacije v primerjavi z ostalima dvema metodama.

Tabela 1: Korenska srednja kvadratna napaka položaja treh metod v 2. stopnji lokalizacije.

Metoda	Gauss šum položaj [m]	Gauss šum in odmik položaj [m]
EKF	0,11	0,17
Dinamično ojačenje	0,10	0,25
Filter delcev	0,10	0,20
GNSS levi	1,25	1,29
GNSS desni	1,24	1,31

4 Navigacija

Za navigacijo mobilne platforme uporabljamo algoritem *Teb Local Planner*, ki temelji na metodi *Time Elastic Band*

Tabela 2: Korenska srednja kvadratna napaka orientacije treh metod v 2. stopnji lokalizacije.

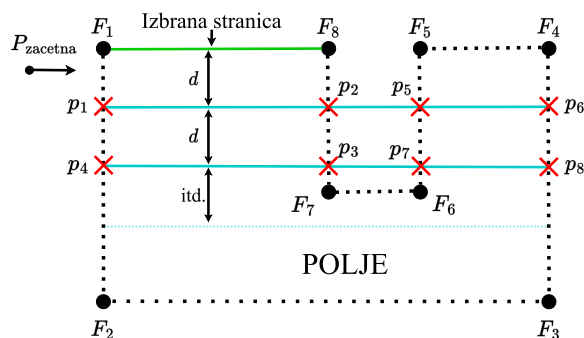
Metoda	Gauss šum	Gauss šum in odmik
	φ [deg]	φ [deg]
EKF	0,81	0,95
Dinamično ojačenje	0,83	0,83
Filter delcev	1,65	1,05
GNSS levi/desni	100,84	104,21

[8]. Ta pristop predstavlja naprednejšo različico algoritma *Elastic Band*, saj vključuje tudi časovno komponento, ki omogoča boljše upoštevanje dinamičnih ovir in zagotavljanje bolj gladke trajektorije.

Sprva je bil algoritem zasnovan za platforme, ki nimajo holonomskih omejitev, kot so platforme z diferencialnim pogonom. Vendar so avtorji kasneje prilagodili algoritem tudi za platforme podobne avtomobilom, ob upoštevanju njihovih kinodinamičnih omejitev [9]. Algoritem je implementiran kot vtičnik za ROS, kar omogoča njegovo enostavno integracijo v naš sistem.

4.1 Načrtovanje vzorčenja tal

Za merjenje elektroprevodnosti tal uporabljamo algoritem za določanje navigacijskih točk, med katerimi se premika mobilna platforma. Uporabnik najprej definira kmetijsko površino v uporabniškem vmesniku, nato pa izbere stranico polja, vzdolž katere naj se robot premika (zeleno črta na sliki 5).



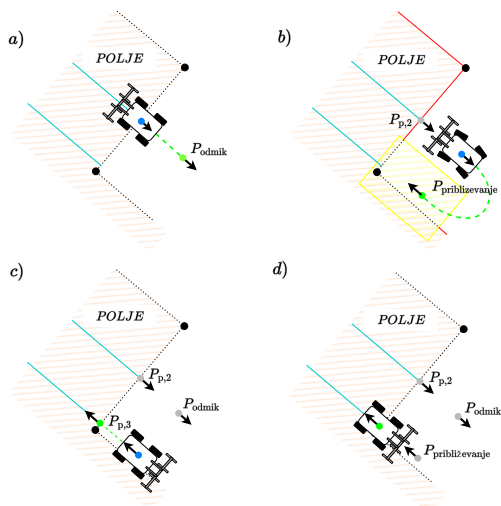
Slika 5: Primer določanja navigacijski točk polja. Črne pike predstavljajo meje polja, rdeči križi navigacijske točke, modre črte pa premaknjene daljice izbrane stranice.

Nato izbrano stranico uporabimo za izračun daljice, ki se premika za razdaljo d , ki predstavlja korak vzorčenja v smeri najbolj oddaljene točke od izbrane stranice v vsaki iteraciji. Iskanje se nadaljuje, dokler ne zmanjka presečišč. Ob uporabniški sprožitvi vzorčenja akcijski strežnik vzame nabor teh točk ter iz njih izračuna navigacijskih točke (upoštevaje orientacijo platforme v točki), te pa v ustreznem zaporedju podaja navigaciji.

Opazili smo, da pri premiku med končno točko in začetno točko naslednjega vzorčenja, mobilna platforma v nekaterih primerih prečka območje polja, kar ni optimalno. Da bi to odpravili, smo algoritem nadgradili z dodatnimi koraki: 1) dodajanje končnih točk ob zaključku vzorčenja, ki mobilno platformo odmaknejo od polja; 2)

meje polja definiramo in postavimo kot oviro, da nova pot ne prečka polja; 3) definiramo približevalno točko pred naslednjo točko vzorčenja in preverimo, ali je njena pot izvedljiva, če ni, odstranimo oviro okoli te točke; 4) sledimo do začetne točke naslednjega vzorčenja.

Primer je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Premik med vzorčnimi točkami tako, da ne prečkamo vzorčenega polja. Premiki platforme so označeni kot a, b, c in d. Rdeča črta simbolizira ovire za navigacijo, rumeno območje pa predstavlja območje, znotraj katerega odstranimo ovire.

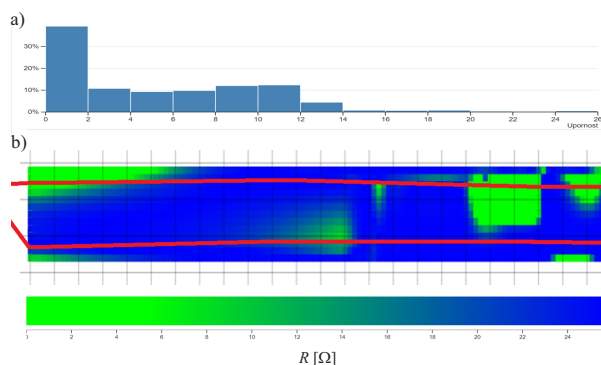
5 Meritev in analiza prevodnosti tal

Za združevanje in filtriranje večih meritev upornosti smo polje razdelili na segmente velikosti $0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$, nato pa vsako meritev dodelili najbližjemu segmentu. Vsak segment lahko tako vsebuje eno ali več meritev, pri čemer je električna prevodnost tal znotraj segmenta določena na podlagi mediane vseh meritev, ki jih segment vsebuje. Manjkajoče vrednosti med posameznimi segmenti smo napolnili z uporabo linearnega interpoliranja.

Vzorčenje smo izvajali na poljih Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani. Ker so bila tla mokra, so prevodnosti tal relativno visoke (Slika 7). Vzorčili smo dve vrsti dolžine 30 m. Pri tem smo maksimalno hitrost mobilne platforme med vzorčenjem omejili med $0,1\text{ m/s}$ in $0,5\text{ m/s}$. Med merjenjem nismo držali konstante hitrosti in občasno smo platformo ustavili, kar pomeni, da imajo nekateri odseki več meritev kot preostali. Elektrode so bile med testiranje v prst ustavljene približno dva do tri centimetre. Vzmeti nameščene na posameznem nosilcu so med vožnjo zagotovile konstanten stik elektrod s prstjo.

6 Zaključek

Raziskava je pokazala, da uporaba mobilne platforme opremljene s senzorji za merjenje električne prevodnosti tal omogoča natančno in avtomatizirano zbiranje podatkov v kmetijstvu. Integracija naprednih tehnologij za lokalizacijo in navigacijo omogoča učinkovito določanje opti-



Slika 7: Vzorcevanje polja na Biotehniške fakulteti, UL: a) histogram porazdelitve upornosti zemlje; b) upornosti zemlje (zeleno/modra polja) in pot vozila (rdeča črta), črni kvadrati predstavljajo $1\text{ m} \times 1\text{ m}$.

malnih vzorčnih točk na polju. Mobilna platforma je sposobna vzorčiti povprečno slovensko kmetijsko zemljišče velikosti $0,6\text{ ha}$ v približno 2 h s hitrostjo $0,5\text{ m/s}$ in razmikom 2 m med vzorčnimi točkami. Trenutna konfiguracija vrtljnika za vzorcevanje prsti dovoljuje shranjevanje zgolj enega vzorca hkrati, zaradi česar je po vsakem odvzemu potrebno vzorec ročno odstraniti, kar le minimalno pohitri delo operaterja. V prihodnje bo treba vrtljnik nadgraditi, da bo omogočal shranjevanje več vzorcev. Delo predstavlja pomemben korak v digitalizaciji kmetijstva in s tem podpira trajnostne in učinkovite kmetijske pristope.

Literatura

- [1] E. Våljaots, H. Lehiste, M. Kiik in T. Leemet, "Soil sampling automation using mobile robotic platform," v *Agronomy Research*, vol. 16, 2018.
- [2] D. Schumacher, "Autonomous robots enter fields to collect precise soil samples, help farmers improve yields, reduce environmental impact, save money," (August 2019).
- [3] E. G. Agency, *PPP-RTK market and technology report*. European GNSS Agency, 2019.
- [4] V. Hamza, B. Stopar in O. Sterle, "Testing the performance of multi-frequency low-cost GNSS receivers and antennas," vol. 21, no. 6, str. 2029.
- [5] D. Corwin in S. Lesch, "Application of soil electrical conductivity to precision agriculture," vol. 95.
- [6] R. Clement, Y. Fargier, V. Dubois, J. Gance, E. Gros in N. Forquet, "OhmPi: An open source data logger for dedicated applications of electrical resistivity imaging at the small and laboratory scale," vol. 8, str. e00122.
- [7] X. Tan, D. Liu in H. Xiong, "Optimal control method of path tracking for four-wheel steering vehicles," vol. 11, str. 61.
- [8] C. Rosmann, W. Feiten, T. Wosch, F. Hoffmann in T. Bertram, "Efficient trajectory optimization using a sparse model," v *2013 European Conference on Mobile Robots*, str. 138–143, IEEE.
- [9] C. Rosmann, F. Hoffmann in T. Bertram, "Kinodynamic trajectory optimization and control for car-like robots," v *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, str. 5681–5686, IEEE.