Modularna vsesmerna mobilna robotska platforma za spremljanje rastlin in plodov v rastlinjaku

Helena Domajnko[1], Franci Ovčak[1], Aleksandar Stefanov[1], Domen Težak[1], Silvia Dovečer[2], Sebastjan Šlajpah[1], Marko Munih[1], Matjaž Mihelj[1]

[1]*Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana;*
[2]*Paradajz d.o.o., Renkovci 57c, 9224 Turnišče*
E-pošta: hd2150@student.uni-lj.si, matjaz.mihelj@fe.uni-lj.si

Modular Omnidirectional Mobile Robotic Platform for Greenhouse Plant and Fruit Monitoring

The paper presents the design of a modular omnidirectional mobile robotic platform for greenhouse plant and fruit monitoring. The platform is conceived as a carrier for repeatable acquisition of spatially referenced RGB-D data along plant rows and as a basis for later integration of manipulation modules. The mobile base uses four omnidirectional wheels, enabling planar holonomic motion required for alignment in narrow greenhouse corridors. The paper introduces the kinematic model of the mobile base, outlines the control and safety architecture, and specifies a vertical perception module based on four ZED X Mini stereo depth cameras. Each camera is paired with intensity-controlled panel illumination to improve repeatability under variable greenhouse lighting. The proposed architecture links mobility, perception and data management into a reconfigurable platform for plant monitoring, fruit detection, yield estimation and further robotic operations.

1 Uvod

Pridelava v rastlinjakih je tehnološko intenzivna oblika kmetijske proizvodnje, pri kateri nadzorovani pogoji omogočajo visoke donose, hkrati pa zahtevajo stalno spremljanje rastlin, plodov in pridelovalnih pogojev. Pri visokih rastlinah, kot so paradižnik in podobne kulture, je za ocenjevanje pridelka in stanja rastlin potrebna prostorsko ponovljiva zaznava po celotni višini rastline. Ročno spremljanje je zamudno, podatkovno neenotno in slabo ponovljivo, zato je smiselna uporaba mobilnih robotskih sistemov, ki združujejo navigacijo, zaznavo in podatkovno obdelavo.

Razvoj robotskih sistemov za hortikulturne naloge poteka v več smereh. Glavne omejitve pri avtomatizaciji povzročajo pogoji delne zakritosti, spreminjajoča se osvetlitev, geometrijska raznolikost rastlin in nezadostna hitrost manipulacije [1]. Pri obiranju paprike so raziskovalci na primeru robotskega sistema SWEEPER pokazali, da delovanje v rastlinjaku zahteva tesno povezavo med zaznavo, načrtovanjem gibanja in mehansko prilagoditvijo delovnega prostora [2]. Tsiakas in sod. so razvili vsesmerno platformo za omejena kmetijska okolja, kjer za navigacijo uporabljajo strukture rastlinjaka [3]. Ren in sod. so implementirali mobilno platformo za časovno-prostorsko spremljanje pridelka jagod v notranji pridelavi [4]. V zadnjih letih so bile za zaznavo in štetje plodov pogosto uporabljene kombinacije barvnih in globinskih podatkov, saj globinska informacija zmanjšuje vpliv ozadja in omogoča boljše ločevanje plodov v delno zakritih prizorih [5].

Obstoječi sistemi so praviloma optimizirani za posamezno nalogo, kulturo ali izvedbo rastlinjaka [6]. Za univerzalno uporabo je zato pomembna modularna zasnova, pri kateri so mobilnost, zaznava, podatkovni sloj in manipulacijski moduli ločeni, vendar povezani prek standardiziranih mehanskih, električnih in programskih vmesnikov. Takšna zasnova omogoča uporabo iste mobilne osnove za različne naloge, kot so sistematično zajemanje podatkov, ocenjevanje pridelka, zaznavanje sprememb na rastlinah ter manipulacijo rastlin in plodov.

Prispevek obravnava zasnovo modularne vsesmerne mobilne platforme za rastlinjak. Osredotoča se na tri elemente: kinematično zasnovo, senzorski modul za lokalizacijo in zajem podatkov po celotni višini rastlin ter arhitekturo vodenja, ki podpira ponovljiv zajem podatkov in povezavo z algoritmi zaznave.

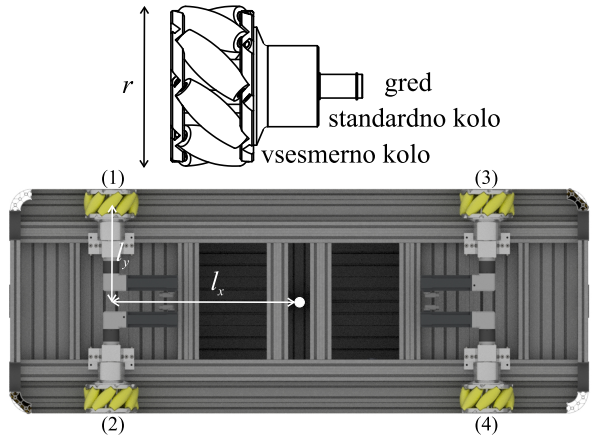
2 Zahteve in arhitektura sistema

Sistem je zasnovan za delovanje v vrstah rastlin ter na prehodih med vrstami, kjer mora platforma zagotavljati ponovljivo poravnavo s tirnicami, vožnjo z želeno hitrostjo vzdolž tirnic, natančno poravnavo senzorjev glede na rastline in varno delovanje v bližini delavcev. Osnovni funkcionalni sklopi so mobilna osnova, vertikalni senzorski nosilec, sistem vodenja in varnostni sloj, uporabniški vmesnik ter podatkovni sloj za shranjevanje prostorsko in časovno označenih meritev. Takšna struktura omogoča kasnejšo uporabo podatkov v digitalnem dvojčku rastlinjaka, kjer so opazovanja obravnavana kot prostorsko umeščene meritve fizičnega sistema.

3 Mobilna platforma in kinematika

Za mobilno platformo je izbrana konfiguracija s štirimi vsesmernimi kolesi, ki so nadgrajena s standardnimi kolesi za vožnjo vzdolž tirnic (Slika 1).

Kombinacija štirih vsesmernih koles omogoča neodvisno vodenje vzdolžne hitrosti v_x, prečne hitrosti v_y



Slika 1: Sklop vsesmernega in standardnega kolesa ter vsesmerna platforma.

in kotne hitrosti ω_z platforme. Pri vsesmernih kolesih z valjčki pod kotom $45°$ se rotacijski prispevek po projekciji na kinematično smer kolesa izrazi s členom $a = l_x + l_y$. Za izbrano orientacijo koles velja inverzna kinematika

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{r}(v_x - v_y - a\omega_z), \\ \omega_2 &= \frac{1}{r}(v_x + v_y + a\omega_z), \\ \omega_3 &= \frac{1}{r}(v_x + v_y - a\omega_z), \\ \omega_4 &= \frac{1}{r}(v_x - v_y + a\omega_z). \end{aligned} \tag{1}$$

Direktna kinematika je

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{r}{4}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4), \\ v_y &= \frac{r}{4}(-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4), \\ \omega_z &= \frac{r}{4a}(-\omega_1 + \omega_2 - \omega_3 + \omega_4). \end{aligned} \tag{2}$$

Vsesmerna kinematika je v rastlinjaku pomembna predvsem pri prehodih med vrstami, saj omogoča prečne premike brez spreminjanja orientacije platforme.

4 Senzorski modul za lokalizacijo in varnost

Senzorski modul za zaznavanje neposredne okolice platforme, lokalizacijo in varnost temelji na štirih globinskih kamerah ter dveh laserskih skenerjih. Na vsaki od štirih stranic mobilne platforme je v spodnjem delu nameščena globinska kamera Luxonis. Kamere so namenjene zaznavanju okolice in določanju relativne lege platforme glede na geometrijske elemente rastlinjaka, robove prehodov in strukturo vrst, zato dopolnjujejo odometrijo vsesmernega pogona.

4.1 Varnost

Varnostni sistem temelji na dveh laserskih skenerjih SICK nanoScan3, nameščenih na vogalih platforme. Skenerja zagotavljata zaznavanje oseb in ovir v zaščitnih poljih ter omogočata omejevanje hitrosti oziroma varno zaustavitev platforme. Njuni podatki se lahko dodatno uporabijo tudi kot vir geometrijskih informacij za lokalizacijo.

Na vsaki stranici platforme je nameščena tipka za zasilno zaustavitev, dodatno pa je implementirana tudi oddaljena tipka, ki s platformo komunicira prek ESP-NOW. Vsi varnostni signali se obdelujejo v varnostnem sistemu, ki ob zaznani nevarnosti ali izgubi komunikacije sproži varno stanje.

Ob sprožitvi katerekoli varnostne funkcije se pogoni platforme varno ustavijo prek varnostne logike krmilnika Beckhoff. Ponovni zagon je mogoč šele po ponastavitvi in potrditvi.

5 Senzorski modul za spremljanje rastlin in plodov

Senzorski modul je zasnovan kot vertikalni nosilec s štirimi stereo globinskimi kamerami ZED X Mini proizvajalca Stereolabs. Kamera omogoča globalni zaklop, ločljivost 2 × 1920 px × 1200 px pri 60 slikah/s, globinsko območje 0,1 m – 8 m za 2,2 mm objektiv, IP67 ohišje in možnost strojne sinhronizacije več kamer. Kamere so razporejene vzdolž nosilca tako, da njihova vidna polja pokrivajo celotno višino rastlin v rastlinjaku ($h = 4$ m).

Vsaka kamera je opremljena s panelno osvetlitvijo z regulacijo jakosti svetlobe. Namen osvetlitve je izboljšanje ponovljivosti zajema za računalniški vid. Posebej pomembna je pri primerjavi zaporednih obhodov, saj se algoritmi za detekcijo plodov, segmentacijo in ocenjevanje zrelosti občutljivo odzivajo na spremembe osvetlitve. Svetlobni paneli so bili namensko zasnovani in izdelani za integracijo na mobilno platformo. Pri načrtovanju je bil poudarek na kakovosti in stabilnosti osvetlitve, zato uporabljene LED-diode zagotavljajo visok indeks barvne reprodukcije CRI 95, visoko svetlobno jakost in barvno temperaturo 6500 K. Vsak panel je sestavljen iz dveh neodvisno krmiljenih kanalov z nazivno močjo 42 W na kanal. LED-diode so napajane prek gonilnikov s konstantnim tokom, kar omogoča regulacijo jakosti osvetlitve ter neposredno priključitev panelov na baterijski sistem brez dodatnih enosmernih pretvornikov.

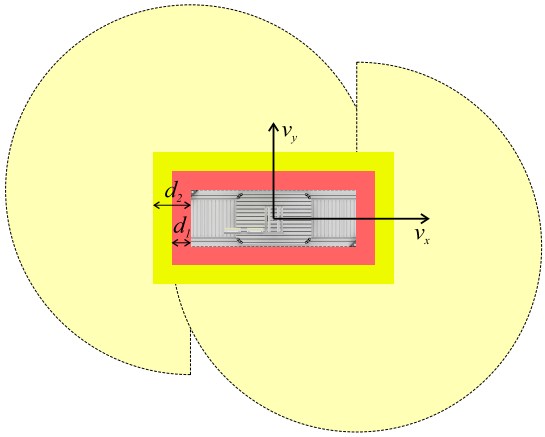
Vertikalna konfiguracija s štirimi kamerami zmanjšuje potrebo po mehanskem premikanju senzorjev po višini, omogoča zajem več razvojnih etaž rastline v enem prehodu platforme in, ob upoštevanju vzdolžnih premikov platforme, zagotavlja več pogledov na rastlino, kar je pomembno zaradi delne zakritosti plodov z listi in drugimi plodovi. Za združevanje podatkov je bila izvedena notranja kalibracija posameznih stereo kamer, zunanja kalibracija kamer glede na nosilec ter časovna sinhronizacija zajema. Rezultat zajema je množica barvnih slik, globinskih slik in točkovnih oblakov, ki so povezani z lego platforme vzdolž vrste.

6 Vodenje, varnost in podatkovni tok

Arhitektura vodenja je zasnovana hierarhično. Nizkonivojsko vodenje je izvedeno na industrijskem krmilniku



Slika 2: Avtonomni mobilni sistem v rastlinjaku.



Slika 3: Varnostne cone mobilnega robotskega sistema.

Beckhoff v okolju TwinCAT. Na tem nivoju se izvajajo regulacija pogonov, generiranje referenc hitrosti posameznih koles, pretvorba referenc v ukaze pogonom ter osnovne varnostne in nadzorne funkcije. Visokonivojsko vodenje je izvedeno v okolju ROS2, kjer se oblikujejo referenčne hitrosti platforme, izvaja končni avtomat stanj, obravnavajo podatki zaznave ter upravlja sinhronizacija zajema. Komunikacija med visokonivojskim vodenjem v ROS2 in nizkonivojskim krmilnikom je izvedena prek protokola ADS, ki v okolju TwinCAT omogoča izmenjavo podatkov in dostop do spremenljivk krmilnika. S tem je programska arhitektura razdeljena na realnočasovni regulacijski sloj, robotski aplikacijski sloj in zaznavno-podatkovni sloj. Takšna razmejitev omogoča, da se časovno kritične naloge izvajajo na determinističnem regulacijskem nivoju, medtem ko se računsko zahtevnejše in bolj kontekstno odvisne funkcije izvajajo na višjem nivoju.

Osnovna naloga platforme je vožnja vzdolž vrste z nadzorovano hitrostjo in hkratnim zajemanjem podatkov. Končni avtomat vsebuje stanja mirovanja, priprave, avtonomne vožnje, premora in zaustavitve. Takšna formalizacija preprečuje nedovoljena zaporedja ukazov in omogoča jasno povezavo med dogodki v uporabniškem vmesniku, pogonskim sistemom in zajemom slik. Operater mora ohraniti možnost ročnega posega, saj so rastlinjaki delovna okolja z ljudmi, orodji, rastlinskimi ostanki in spremenljivimi prehodi.

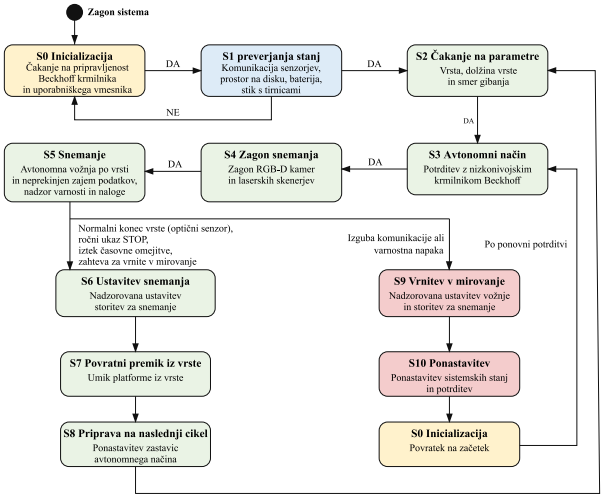
Varnostni sloj vključuje zaznavanje ovir v okolici platforme in omejevanje referenčne hitrosti (Slika 3). Programsko omejevanje hitrosti lahko opišemo z odsekoma definirano funkcijo

$$v_{\max} = \begin{cases} 0, & d < d_1, \\ v_s, & d_1 \le d < d_2, \\ v_n, & d \ge d_2, \end{cases} \tag{3}$$

pri čemer je d najmanjša zaznana razdalja do ovire, d_1 meja za ustavitev, d_2 meja opozorilnega območja, v_s zmanjšana hitrost in v_n nominalna hitrost. Enačba (3) opisuje nadzor referenc v programski arhitekturi, pri čemer morajo biti varnostno kritične funkcije izvedene neodvisno od aplikacijskega programa.

6.1 Visokonivojski avtomat stanj

Delovanje mobilne platforme je koordinirano z visokonivojskim končnim avtomatom stanj (Slika 4), izvedenim v okolju ROS2. Končni avtomat predstavlja glavni nadzornik sistemskega poteka ter povezuje uporabniški vmesnik, nizkonivojski krmilnik Beckhoff, varnostni sistem, zaznavne module in logiko za shranjevanje podatkov. Njegova naloga je zagotoviti vnaprej določeno in varno zaporedje izvajanja, tako da se avtonomna vožnja in zajem podatkov lahko začneta šele, ko so vsi zahtevani podsistemi dosegljivi in je platforma v ustreznem obratovalnem stanju.



Slika 4: Visokonivojski avtomat stanj mobilnega robotskega sistema.

Ob zagonu sistem ostane v inicializacijskem stanju, dokler pripravljenosti ne potrdita industrijski krmilnik in uporabniški vmesnik. Nato končni avtomat izvede zaporedje predobratovalnih preverjanj. Ta vključujejo preverjanje komunikacijskih signalov oziroma periodičnih sporočil ključnih senzorjev, razpoložljivega prostora na disku za shranjevanje meritev, stanja baterije in stanja induktivnih senzorjev, s katerimi se preveri mehanski stik platforme s tirnicami v rastlinjaku. Če katero od preverjanj ni uspešno, se sistem vrne v inicializacijsko stanje

ali preide v namensko servisno stanje. Na ta način so napake, kot so pomanjkanje pomnilniškega prostora, prenizko stanje baterije ali izpad komunikacije s senzorji, zaznane pred omogočanjem avtonomnega delovanja.

Ko je platforma pripravljena, končni avtomat počaka na vsebinske parametre iz uporabniškega vmesnika, na primer izbrano vrsto, dolžino vrste in smer gibanja. Po prejemu veljavnih parametrov sistem prek potrditvenega mehanizma z nizkonivojskim krmilnim sistemom omogoči avtonomni način delovanja. Šele po tej potrditvi se sprožijo storitve za zajem podatkov z RGB-D kamerami in laserskimi skenerji. Po zagonu snemanja se izvede še dodatno preverjanje periodičnih sporočil senzorjev, s čimer se zagotovi, da so vse zaznavne linije aktivne pred začetkom avtonomnega zajema podatkov.

Med snemanjem končni avtomat neprekinjeno spremlja varnostne pogoje in delovanje trenutno izvajajoče se naloge. Faza snemanja se lahko zaključi zaradi sprožitve optičnega senzorja za zaznavo konca vrste (normalno obratovanje), ročnega ukaza za zaustavitev, izteka časovne omejitve, eksplicitne zahteve za vrnitev v mirovanje ali izgube zahtevanih komunikacijskih signalov. V vseh primerih sistem najprej nadzorovano ustavi storitve za snemanje podatkov. Če je bil zajem zaključen normalno, platforma izvede povratni premik iz vrste, ponastavi zastavice avtonomnega načina in se pripravi na naslednji cikel zajema. Če pride do varnostne ali komunikacijske napake, sistem preide neposredno v zaporedje vrnitve v mirovanje in ponastavitve.

6.2 Podatkovni tok

Podatkovni tok je strukturiran okoli dogodkov zajema. Za vsako meritev se shranijo identifikacija vrste, položaj platforme, časovni žig, identifikator kamere, parametri osvetlitve, barvna slika, globinska slika in izpeljani točkovni oblak. Takšna struktura omogoča kasnejše povezovanje opazovanj z digitalnim dvojčkom, s čimer so meritve uporabne za ocenjevanje zrelosti, števila plodov, volumna pridelka in sprememb v času. Primer zajema barvnih slik, ki se potem uporablja za različne ocene, je predstavljen na Sliki 5.

7 Zaključek

Predlagana zasnova naslavlja vrzel med namensko senzorsko platformo in robotskim sistemom za širši nabor nalog v rastlinjaku. Vsesmerna mobilna platforma omogoča ponovljivo umeščanje senzorskega modula v prostor, vertikalni sistem globinskih kamer pa zagotavlja podatke za celotno višino rastlin brez mehanskega skeniranja po navpični osi. S tem se zmanjšata kompleksnost merilnega postopka in čas zajema na posamezno vrsto.

Ključna značilnost sistema je ločitev mobilnosti, zaznave in podatkovnega sloja, kar omogoča uporabo platforme kot ponovljive merilne osnove in kot nosilca za nadaljnjo integracijo robotskih modulov za manipulacijo rastlin in plodov. Nadaljnje delo bo usmerjeno v zbiranje podatkov za izvedbo napovednega modela pridelka in razvoj robotskih sistemov za manipulacijo rastlin in plodov.



Slika 5: Primer barvnih slik paradižnikov, zajetih s kamerami, nameščenimi na različnih etažah robotskega sistema. Sliki (1)–(4) zaporedoma prikazujejo pogled kamere s prve, druge, tretje in četrte etaže.

Zahvala

Raziskavo sta sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost (ARIS) in Ministrstvo za kmetijstvo Republike Slovenije v okviru projekta “Prilagodljiv robotski sistem podprt z umetno inteligenco za upravljanje rastlin in pridelkov” (evidenčna št. raziskovalnega projekta L2-60143) in programa P2-0228 ter intervencije IRP38 iz Skupne kmetijske politike 2023–2027 (projekt “Robot4Plants”, št. pogodbe 33126-1/2025/18).

Literatura

[1] L. Droukas, Z. Doulgeri, N. L. Tsakiridis, D. Triantafyllou, I. Kleitsiotis, I. Mariolis, D. Giakoumis, D. Tzovaras, D. Kateris in D. Bochtis, “A survey of robotic harvesting systems and enabling technologies,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 107, no. 21, 2023.

[2] B. Arad, J. Balendonck, R. Barth, O. Ben-Shahar, Y. Edan, T. Hellström, J. Hemming, P. Kurtser, O. Ringdahl, T. Tielen in B. van Tuijl, “Development of a sweet pepper harvesting robot,” *Journal of Field Robotics*, vol. 37, no. 6, str. 1027-1039, 2020.

[3] K. Tsiakas, A. Papadimitriou, E. M. Pechlivani, D. Giakoumis, N. Frangakis, A. Gasteratos in D. Tzovaras, “An autonomous navigation framework for holonomic mobile robots in confined agricultural environments,” *Robotics*, vol. 12, no. 6, 146, 2023.

[4] G. Ren, H. Wu, A. Bao, T. Lin, K.-C. Ting in Y. Ying, “Mobile robotics platform for strawberry temporal-spatial yield monitoring within precision indoor farming systems,” *Frontiers in Plant Science*, vol. 14, 2023.

[5] Y. Lu, Y. Huang, S. Li, X. Zhang in C. Zhao, “Tomato cluster detection and counting using improved YOLOv5 based on RGB-D fusion,” *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 207, 107721, 2023.

[6] J. Gimpelj, M. Semolič, M. Munih, S. Šlajpah in M. Mihelj, “Navigation of a mobile platform in a greenhouse,” v: *Advances in Service and Industrial Robotics*, RAAD 2023, str. 393-400, 2023.