

ROBOTI ZA BERBU POVRTLARSKIH KULTURA

Perković, Luka

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

**Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek /
Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:151:843336>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

**Fakultet
agrobiotehničkih
znanosti Osijek**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Agrobiotechnical
Sciences Osijek - Repository of the Faculty of
Agrobiotechnical Sciences Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Luka Perković

Sveučilišni prijediplomski studij Poljoprivreda

Modul Mehanizacija

Roboti za berbu povrtlarskih kultura

Završni rad

Osijek, 2024.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET AGROBIOTEHNIČKIH ZNANOSTI OSIJEK

Luka Perković

Sveučilišni prijediplomski studij Poljoprivreda

Modul Mehanizacija

Roboti za berbu povrtnarskih kultura

Završni rad

Povjerenstvo za ocjenu završnog rada:

doc. dr. sc. Domagoj Zimmer, mentor

prof. dr. sc. Luka Šumanovac, član

prof. dr. sc. Mladen Jurišić, član

Osijek, 2024.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek
Sveučilišni prijediplomski studij, modul Mehanizacija

Luka Perković

Završni rad

ROBOTI ZA BERBU POVRTLARSKIH KULTURA

Sažetak: Roboti za berbu povrtnarskih kultura predstavljaju tehnološki napredak koji značajno mijenja poljoprivredu automatizacijom procesa berbe. Ovi roboti koriste napredne senzore i kamere za prepoznavanje zrelih plodova, što im omogućava da precizno i učinkovito ubiru povrće bez oštećenja. Time se smanjuje potreba za ručnim radom, povećava brzina berbe i smanjuju troškovi rada. Roboti se mogu prilagoditi različitim vrstama povrća, što omogućava njihovu upotrebu u različitim uvjetima.

Ključne riječi: poljoprivreda, berba, roboti, povrtnarske kulture
30 stranica, 13 slika, 16 literaturnih navoda

Završni rad je pohranjen u Knjižnici Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek i u digitalnom repozitoriju završnih i diplomskih radova Fakulteta agrobiotehničkih znanosti Osijek.

BASIC DOCUMENTATION CARD

Josip Juraj Strossmayer University in Osijek
Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek
Undergraduate university study Mechanization

Luka Perković

Graduate thesis

ROBOTS FOR HARVESTING VEGETABLE CULTURES

Summary: Robots for harvesting vegetable crops represent a technological advance that significantly changes agriculture by automating the harvesting process. These robots use advanced sensors and cameras to identify ripe fruits, which allows them to precisely and efficiently harvest vegetables without damage. This reduces the need for manual work, increases the speed of harvesting and reduces labor costs. The robots can be adapted to different types of vegetables, which enables their use in different conditions.

Keywords: agriculture, harvest, robots, vegetable crops
30 pages, 13 pictures, 16 literary references

The final thesis is stored in the Library of the Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek and in a digital repository final and graduate theses of the Faculty of Agrobiotechnical Sciences Osijek.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. RAZLOZI ZA UVOĐENJE ROBOTA U BERBU POVRTLARSKIH KULTURA... 2	
2.1. Učinkovitost i produktivnost.....	2
2.2. Smanjenje troškova.....	3
2.3. Kvaliteta proizvoda.....	4
3. ROBOTI ZA BERBU POVRTLARSKIH KULTURA.....	5
3.1. Roboti za berbu rajčica.....	5
3.2. Roboti za berbu paprike.....	6
3.3. Roboti za berbu krastavaca.....	7
3.4. Roboti za berbu zelene salate.....	10
3.5. Roboti za berbu brokule.....	12
3.6. Roboti za berbu bundeve.....	16
4. OSNOVE RADA LiDAR TEHNOLOGIJE.....	18
4.1. Načelo laserskoga skeniranja iz zraka.....	18
4.2. Obrada podataka izmjere.....	20
4.3. Modeliranje podataka.....	21
5. TROŠKOVI ROBOTA I ULOGA.....	22
6. ZAKLJUČAK.....	25
7. POPIS LITERATURE.....	26

1. UVOD

Robotizacija u poljoprivredi postaje sve prisutnija, donoseći sa sobom brojne inovacije koje transformiraju tradicionalne metode uzgoja, berbe i obrade povrća. S obzirom na rastuće izazove s kojima se suočava poljoprivredna industrija, kao što su nedostatak radne snage, povećani troškovi proizvodnje i potreba za održivim praksama, roboti za berbu povrtlarskih kultura predstavljaju rješenje koje može unaprijediti učinkovitost i produktivnost. Od radova u poljoprivrednoj proizvodnji berba povrtlarskih kultura je proces koji je najteže izvršiti mehanizirano odnosno strojno. Učinkovita berba sa malim gubicima predstavlja veliki problem u agronomiji, a na tržištu je vrlo malo opreme koja bi se mogla koristiti za izradu robota za berbu povrtlarskih kultura Jianqiao i sur. (2020.). Iako su roboti za berbu istraživani dugi niz godina, u posljednjih 30 godina nije postignut gotovo nikakav napredak u ovom području što otvara prostor za nova istraživanja i razvoj tehnologije robotske berbe navode Klein i sur. (2019.)

Rad istražuje različite aspekte robotizacije u berbi povrća, uključujući tehnologije, prednosti, izazove i buduće perspektive.

2. RAZLOZI ZA UVOĐENJE ROBOTA U BERBU POVRTLARSKIH KULTURA

2.1. Učinkovitost i produktivnost

Učinkovitost i produktivnost robota za berbu povrtnarskih kultura ključni su faktori za njihov uspjeh i primjenu u poljoprivrednoj industriji. Ove dvije komponente izravno utječu na ekonomsku održivost i prihvaćanje robota među poljoprivrednicima.

Učinkovitost robota za berbu povrća može se promatrati kroz nekoliko aspekata. Točnost berbe je jedna od najvažnijih prednosti jer roboti opremljeni naprednim senzorskim sustavima, kamerama i tehnologijama prepoznavanja slike mogu precizno identificirati zrelo povrće. To smanjuje gubitke i oštećenja plodova, čime se povećava ukupna kvaliteta proizvoda. Roboti mogu razlikovati zrele plodove od nezrelih ili oštećenih, osiguravajući da se samo najkvalitetniji plodovi beru (Jianqiao i sur.).

Drugi aspekt učinkovitosti je brzina berbe. Roboti mogu raditi neprekidno, 24 sata dnevno, bez potrebe za odmorom ili pauzama. Ova kontinuirana operativnost omogućava bržu berbu velikih površina poljoprivrednog zemljišta, što je osobito korisno tijekom vršnih sezona kada je vrijeme kritično. Brzina berbe izravno utječe na ukupnu količinu ubranog povrća i smanjuje rizik od gubitaka zbog vremenskih uvjeta ili propadanja usjeva navode Klein i sur. (2019.)

Osim toga, roboti mogu optimizirati resurse. Oni mogu raditi s većom preciznošću i učinkovitosti u usporedbi s ljudskim radnicima. Na primjer, mogu optimizirati putanje kretanja po polju, smanjujući nepotrebna kretanja i trošenje energije. Također, optimizacija resursa može uključivati precizno doziranje gnojiva i vode, čime se smanjuju troškovi i negativan utjecaj na okoliš (Stajanko, 2014).

Produktivnost robota za berbu povrća obuhvaća ukupnu količinu ubranih plodova u određenom vremenskom razdoblju, kao i učinkovitost u korištenju resursa i radnog vremena. Zahvaljujući svojoj sposobnosti za kontinuirani rad i visoku preciznost, roboti mogu ubrati veće količine povrća u kraćem vremenu u usporedbi s ljudskim radnicima. To povećava ukupnu produktivnost farme i smanjuje potrebu za velikim brojem sezonskih radnika. Produktivnost se dodatno povećava optimizacijom algoritama za berbu, što omogućava robotima da poboljšaju svoje karakteristike tijekom vremena.

Roboti mogu smanjiti gubitke tijekom berbe zahvaljujući svojoj preciznosti i sposobnosti prepoznavanja zrelih plodova. Smanjeni gubici izravno utječu na povećanje prihoda poljoprivrednika. Također, manje oštećenih plodova znači manje otpada i veći postotak prodajnog proizvoda.

Učinkovito korištenje radnog vremena je još jedan važan aspekt produktivnosti robota. Roboti eliminiraju potrebu za pauzama i odmorima, čime maksimiziraju iskorištenost radnog vremena. To omogućava poljoprivrednicima da postignu veće prinose u kraćem vremenskom razdoblju. Učinkovito korištenje radnog vremena također smanjuje rizik od vremenskih nepogoda koje mogu oštetiti usjeve prije berbe navode Díaz-Pérez i sur. (2007.).

2.2. Smanjenje troškova

Tradicionalna berba povrća zahtijeva veliki broj sezonskih radnika, što donosi značajne troškove plaća, beneficija i logistike. Roboti za berbu povrća eliminiraju potrebu za velikim brojem radnika, čime se smanjuju ukupni troškovi rada. Iako roboti zahtijevaju održavanje i povremene nadogradnje, ukupni troškovi su znatno niži u usporedbi s konstantnim troškovima ljudske radne snage. Također, roboti mogu raditi neprekidno, bez potrebe za odmorom ili pauzama, čime se povećava produktivnost bez dodatnih troškova za prekovremeni rad ili smjenski rad.

Roboti opremljeni naprednim senzorskim i AI tehnologijama mogu precizno prepoznati zrele plodove i izbjeći oštećenja tijekom berbe. To rezultira manjim brojem oštećenih ili odbačenih plodova, što smanjuje gubitke i povećava ukupni prihod. Manje otpada također znači manje troškova za zbrinjavanje i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš (Stajanko, 2014).

Roboti mogu raditi s većom preciznošću i optimizirati korištenje gnojiva, vode i drugih resursa. Na primjer, robotski sustavi mogu precizno dozirati gnojivo i vodu samo tamo gdje je to potrebno, čime se smanjuju troškovi za te resurse i minimizira negativan utjecaj na okoliš. Precizna poljoprivreda koju omogućuju roboti doprinosi održivijem korištenju resursa i smanjuje nepotrebne troškove. Ljudski radnici mogu biti podložni umoru, što može dovesti do grešaka, oštećenja plodova ili neefikasnosti. Roboti rade s konstantnom preciznošću i dosljednošću, smanjujući rizik od grešaka i osiguravajući veću pouzdanost u

procesu berbe. Smanjeni rizik od grešaka znači manje troškove za ispravke i povećanu kvalitetu konačnog proizvoda navode Zhang i sur. (2018.).

2.3. Kvaliteta proizvoda

Roboti za berbu povrća koriste sofisticirane senzorske sustave i tehnologije prepoznavanja slike kako bi precizno identificirali zrele plodove. Ovi sustavi omogućuju robotima da razlikuju zrelo povrće od nezrelog ili oštećenog, osiguravajući da se beru samo najkvalitetniji plodovi. Točnost i preciznost ovih tehnologija smanjuju rizik od berbe nezrelih ili prezrelih plodova, čime se osigurava bolja kvaliteta konačnog proizvoda.

Mehaničke ruke i manipulatori koje koriste roboti dizajnirani su da pažljivo beru plodove bez oštećenja. Tradicionalne metode berbe koje uključuju ljudsku radnu snagu često dovode do oštećenja plodova zbog nepažljivog rukovanja. Roboti mogu obavljati berbu s većom delikatnošću i preciznošću, smanjujući fizička oštećenja plodova. To rezultira proizvodima koji su vizualno privlačniji i imaju duži rok trajanja, što je važno za tržišnu prodaju i zadovoljstvo potrošača navode Klein i sur. (2019.)

Roboti mogu obavljati berbu kontinuirano i u optimalnim uvjetima, neovisno o vanjskim čimbenicima poput vremenskih uvjeta ili radnog vremena. Kontinuirana berba omogućava pravovremeno ubiranje plodova u njihovom optimalnom stanju zrelosti, što dodatno poboljšava kvalitetu proizvoda. Mogućnost robota da rade bez prekida također smanjuje rizik od gubitaka uslijed vremenskih nepogoda ili propadanja usjeva navode Zhang i sur. (2018.).

3. ROBOTI ZA BERBU POVRTLARSKIH KULTURA

3.1. Roboti za berbu rajčica

Prije nego što započne berba, roboti se pripremaju za rad. To uključuje provjeru i kalibraciju senzora, punjenje baterija i postavljanje algoritama za prepoznavanje plodova. Roboti se također postavljaju na početne pozicije na polju ili u stakleniku. Roboti su opremljeni navigacijskim sustavima koji im omogućuju kretanje po polju ili stakleniku. Koristeći GPS, LIDAR, kamere i druge senzore, roboti mapiraju područje i planiraju optimalne putanje kako bi pokrili cijelu površinu i pristupili svim biljkama. Ključni dio procesa je prepoznavanje zrelih plodova. Roboti koriste kamere visoke rezolucije i senzore u kombinaciji s algoritmima za prepoznavanje slike kako bi identificirali zrele rajčice. Algoritmi analiziraju boju, veličinu i oblik plodova kako bi utvrdili njihov stupanj zrelosti. Nakon prepoznavanja zrele rajčice, robot se pozicionira tako da može dohvatiti plod. Mehaničke ruke i manipulatori su dizajnirani da se mogu precizno pomaknuti u odgovarajući položaj bez oštećenja biljke ili drugih plodova. Mehaničke ruke koriste različite metode za branje rajčica, ovisno o dizajnu robota. Neki roboti koriste usisne čaše za nježno povlačenje ploda s biljke, dok drugi koriste pincete ili škare za rezanje stabljike. U svakom slučaju, cilj je pažljivo odvojiti plod bez oštećenja navode Díaz-Pérez i sur. (2007.).

Nakon branja, rajčice se transportiraju do skladišnog prostora unutar robota. Ovdje se plodovi pažljivo slažu kako bi se spriječila oštećenja tijekom transporta. Neki roboti koriste pokretne trake ili druge mehanizme za prijenos plodova do spremnika. Roboti mogu raditi neprekidno, čak i tijekom noći ili u nepovoljnim vremenskim uvjetima. To osigurava da se sve zrele rajčice uberu na vrijeme, smanjujući rizik od propadanja usjeva. Roboti se također mogu programirati za rad u smjenama kako bi maksimalno iskoristili radno vrijeme. Tijekom berbe, roboti se kontinuirano nadziru i održavaju kako bi se osigurala njihova ispravnost i učinkovitost. To uključuje punjenje baterija, provjeru senzora i sustava, te eventualne popravke. Moderni roboti također mogu prenositi podatke u stvarnom vremenu, omogućujući daljinski nadzor i upravljanje. (<https://www.agroklub.com/povrcarstvo/robot-berac-rajcice-stedi-50-troskova-radne-snage-i-prikuplja-korisne-informacije/43474/>)



Slika.1 Stroj za berbu rajčica

(Izvor: <https://gospodarski.hr/rubrike/mehanizacija/roboti-u-poljoprivredi/>)

3.2. Roboti za berbu paprike

SWEEPER robot je prvi robot za berbu zrele žute paprike u komercijalnom stakleniku. Namijenjen je za rad u sustavu gdje su biljke pojedinačno posađene u redove. Tijekom same berbe robot ne može istovremeno obavljati i kalibraciju plodova, dakle s pretpostavkom da plodovi budu gotovo podjednake veličine.

Ruka robota opremljena je s 3D sustavom kamera, LED lampom, vibrirajućim nožem za rezanje i košarom. Preliminarni rezultati istraživanja su pokazali da robot može brati plod brzinom od 24 sekunde s točnošću od 62 %, tj. da u roku od 24s robot uoči papriku te je tada s jednim nožićem odreže i potom odloži u košaru. Dakle ipak skoro 40 % zrelih paprika robot ne uočava jer bi u suprotnom uništio biljke.

Koliko je ovaj sustav pametan pokazuje već činjenica da robot reže peteljku paprike na točno određenom mjestu. Integrirana 3D kamera raspoznaje boju i oblik paprike. Problematici su pak listovi s kojima je pojedina paprika prekrivena i koji nisu dostupni ruci robota. S obzirom na dobivene rezultate, konzorcij Sweepersa očekuje da će u roku do 4 do 5 godina dobiti značajna poboljšanja te praktičnu primjenu. Dobiveni rezultati i saznanja bi će primjenjivi i za 'robotizirano' branje ostalih usjeva. Istraživanja u smislu poboljšanja će ići najviše u smjeru poboljšanja brzine branja te ubiranja zrelih plodova. Isto tako laboratoriji za oplemenjivanje bilja trebaju razviti kultivare koji su prikladniji za berbu s robotima. (<https://gospodarski.hr/rubrike/robot-za-berbu-paprike/>)



Slika 2. Robot za berbu paprike

(Izvor: <https://gospodarski.hr/rubrike/robot-za-berbu-paprike/>)

Osim SWEEPER robota, postoje i ostali roboti za berbu paprike koji koriste naprednu tehnologiju, uključujući umjetnu inteligenciju i računalni vid, kako bi prepoznali zrele plodove i pažljivo ih ubrali bez oštećenja biljke ili plodova. Opremljeni kamerama i sensorima, roboti mogu razlikovati zrelu papriku od nezrelih plodova i lišća, dok mehaničke ruke s prilagodljivim hvataljkama omogućuju preciznu berbu. Njihova sposobnost rada bez prestanka značajno ubrzava proces u usporedbi s ručnim radom, smanjujući troškove i povećavajući produktivnost. Roboti za berbu paprike mogu raditi u različitim uvjetima, uključujući staklenike i otvorena polja, te se mogu prilagoditi različitim sortama paprike. Ovi sustavi pomažu u smanjenju potrebe za radnom snagom, što je posebno važno zbog sve većeg nedostatka sezonskih radnika u poljoprivredi. Iako donose brojne prednosti poput povećane produktivnosti, konzistentne kvalitete berbe i smanjenja otpada, roboti za berbu paprike također dolaze s izazovima, poput visokih početnih troškova i tehničke složenosti. Unatoč tome, oni predstavljaju budućnost poljoprivrede, omogućujući veću učinkovitost i smanjenje troškova, s tim da će njihov uspjeh uvelike ovisiti o daljnjem razvoju tehnologije i smanjenju troškova implementacije navode Ringdahl i sur. (2019.)

3.3. Roboti za berbu krastavaca

U Njemačkoj, krastavci namijenjeni kiseljenju dobivaju se ručno uz pomoć “letača krastavaca” ili eng. “cucumber flyers”- poljoprivrednih vozila s priključcima koji izgledaju poput krila. Sezonski radnici leže na truhu na “krilima vozila” i beru zrele krastavce. Ovaj mukotrpan i iscrpljujući ručni rad berbe postao je ekonomski neisplativ. Osim toga, uvedeni su troškovi ubiranja po jedinici proizvoda te se mnoge od

poljoprivrednih regija susreću s neizvjesnom budućnošću te izmještaju svoju proizvodnju u istočnu Europu i Indiju.

Postoji hitna potreba za poboljšanim tehnologijama berbe kako bi se održala ekonomska održivost uzgoja krastavca u Njemačkoj. Stručnjaci iz Fraunhofer IPK u Berlinu, zajedno s ostalim njemačkim i španjolskim istraživačima, proučavaju potencijal za automatizaciju berbe krastavaca u okviru EU projekta CATCH, što je kratica za „Cucumber Gathering – Greenfield experiment”. Partneri u projektu su Institut iz Leibniza za poljoprivredno inženjerstvo i bioekonomiju u Njemačkoj te CSIC-UPM Centar za automatizaciju i robotiku (CAR) u Španjolskoj Ringdahl i sur. (2019.)

CATCH istraživači žele razviti i testirati robotski sustav s dva kraka koji se sastoji od jeftinih i laganih modula. Krajnji cilj: ovaj sustav može se koristiti za automatizirani uzgoj krastavca i druge poljoprivredne aplikacije. Robotski berač za skupljanje bi trebao biti ekonomičan, visokih performansi i pouzdan. Čak i u nepovoljnim vremenskim uvjetima, on bi trebao biti u stanju prepoznati zrele krastavce, nježno ih ubrati s dvije hvataljke te ih pohraniti (<https://gospodarski.hr/rubrike/mehanizacija/roboti-za-berbu-krastavaca/>)



Slika 3. Robot za berbu krastavaca

(Izvor: <https://gospodarski.hr/rubrike/mehanizacija/roboti-za-berbu-krastavaca/>)

U tu svrhu, najsuvremenije upravljačke metode opremaju robote s taktilnim percepcijom i omogućuju joj prilagodbu uvjetima okoline. Ove metode omogućuju dvostruki robotski sustav da oponaša ljudske pokrete. Istraživači žele osigurati da roboti ne štete usjevima ili da povuku i korijenje iz tla. Ali to nije sve. Automatizirani berač mora biti barem jednako učinkovit kao ljudski rad, to jest biti ekvivalent ljudskom radu te postići brzinu berbe od 13 krastavaca u minuti.

Velik je izazov oblikovati autonomne sustave sposobne za prepoznavanje i procjenu: robot mora identificirati zelene predmete maskirane zelenim okolišem. Osim toga, krastavci su nasumično raspoređeni po polju, a neki su prikriveni vegetacijom. Različiti uvjeti svjetla čine ovu misiju još težom. Moglo bi biti moguće koristiti višenamjenske kamere i inteligentnu obradu slike kako bi se pronašli krastavci i navodile robotske hvatalice da ih beru. Ovaj dio projekta CATCH nadgleda CSIC-UPM, španjolski projektni partner. Specijalna kamera osigurava da roboti uočavaju i lociraju oko 95 posto krastavaca, što je impresivna stopa uspjeha. Cilj je, naravno, unaprijediti tehnologiju tako da robot odabere sve zrele krastavce kako bi potaknuo rast novih navode Yang, L. i sur.(2020.)

U potrazi za inspiracijom nalik na ljudsku aktivnost projektni stručnjaci Fraunhofer IPK imaju zadatak razviti tri Gripper prototipa: hvataljku na temelju vakuumske tehnologije, set bionic Gripper čeljusti (Fin Ray ®) i prilagođene „krastavac ruke” koje potječu od OpenBionics ruku robota.

Oni se oslanjaju na uvide stečene tijekom prethodnog europskog istraživačkog projekta u kojem su razvili sustav kontrole robota (učinkovito programiranje zadataka za Workerbot I – humanoidni robot koji je sposoban za industrijsku proizvodnju). Ovi unaprijed programirani obrasci ponašanja omogućuju pretraživanje poput ljudskog, što znači da robot može tražiti krastavce kao i čovjek. Dr. Dragoljub Surdilović, znanstvenik Fraunhofera IPK, objašnjava: “Robot može, na primjer, gurati lišće na stranu pomoću simetričnih ili asimetričnih pokreta. Kao rezultat toga, može automatski promijeniti smjernice za pristup i zatim uhvatiti krastavac“. Cilj istraživača je stvoriti inteligentni sustav kontrole koji može donositi odluke: dodjeljivanje određenih zadataka za određenu hvataljku, praćenje krastavaca, branje i rješavanje iznimaka (<https://gospodarski.hr/rubrike/mehanizacija/roboti-za-berbu-krastavaca/>).

3.4. Roboti za berbu zelene salate

Zelena salata, zbog svoje krhke i osjetljive prirode, predstavlja izazov u procesu berbe. Berba ove kulture zahtijeva pažljiv pristup kako bi se spriječila oštećenja nježnih listova i ostatka biljke. Roboti koji su razvijeni za berbu zelene salate moraju biti opremljeni mekim hvataljkama koje omogućuju nježno rukovanje kako bi se očuvala kvaliteta plodova. Također, zbog kompaktne prirode glavica salate, roboti moraju biti izuzetno precizni u svojoj operaciji kako bi obavili berbu bez oštećenja drugih biljaka u blizini. Brzina i efikasnost su također ključni, budući da se salata često uzgaja u velikim količinama, što zahtijeva robote sposobne za brzu i učinkovitu berbu.

Razvoj robota za berbu zelene salate oslanja se na nekoliko naprednih tehnologija kako bi se prevladali specifični izazovi povezani s ovom kulturom. Računalni vid igra ključnu ulogu u prepoznavanju zrelih glavica salate, koristeći senzore i kamere za procjenu boje, veličine i stanja biljaka. Ovi sustavi omogućuju robotima da precizno identificiraju koje glavice su spremne za berbu. Uz to, roboti koriste sofisticirane algoritme za analizu podataka prikupljenih iz računarskog vida, što im pomaže da optimiziraju postupak berbe i minimiziraju oštećenja. Mehanički sustavi robota, uključujući prilagodljive hvataljke i rezače, dizajnirani su da obavljaju zadatak bez oštećenja nježnih listova, osiguravajući da se salata bere s maksimalnom pažnjom navode Arad i sur. (2019.).

Učinkovitost i ekonomičnost automatizirane berbe

Automatizirana berba zelene salate pruža značajne prednosti u smislu učinkovitosti i smanjenja troškova rada. Roboti mogu raditi kontinuirano i brže od ljudskih radnika, što povećava ukupnu produktivnost i smanjuje vrijeme potrebno za berbu. Osim toga, korištenje robota pomaže u smanjenju radne snage potrebne za obavljanje ovog posla, što može rezultirati značajnim uštedama u troškovima rada. Automatizacija također osigurava dosljednost u kvaliteti berbe, jer roboti mogu provoditi precizne i ponovljive operacije bez varijacija koje se mogu pojaviti kod ljudskih radnika. U konačnici, iako početni troškovi za nabavu i implementaciju robota mogu biti visoki, dugoročne uštede i poboljšana efikasnost čine automatiziranu berbu zelene salate ekonomski isplativom opcijom navode Birrell, i sur. (2019.)



Slika 4. Ubranje zelene salate

(Izvor: <https://www.agroklub.com/pretraga/?query=Robot%20bera%C4%8D>)

Jedan od najpoznatijih robota za berbu zelene salate je Vegebot koji prvo identificira 'ciljani' usjev unutar svog vidnog polja, zatim utvrđuje je li određena salata zdrava i spremna za berbu, i na kraju odsijeca salatu od ostatka biljke bez drobljenja kako bi bila 'spremna za supermarket'. "Za čovjeka, cijeli proces traje nekoliko sekundi, ali to je stvarno izazovan problem za robota", rekla je koautorica Josie Hughes.

Vegebot ima dvije glavne komponente: sustav računalnog vida i sustav rezanja. Gornja kamera na Vegebotu snima polje salate i prvo identificira sve salate na slici, a zatim za svaku salatu klasificira treba li je brati ili ne. Salata može biti odbijena jer još nije zrela ili možda ima bolest koja bi se mogla proširiti na druge salate u berbi.

Istraživači su razvili i uvježbali algoritam strojnog učenja na primjerima slika salate. Nakon što je Vegebot mogao prepoznati zdrave salate u laboratoriju, zatim je treniran na terenu, u različitim vremenskim uvjetima, na tisućama pravih salata.

Druga kamera na Vegebotu postavljena je u blizini rezne oštrice i pomaže u osiguravanju glatkog rezanja. Istraživači su također mogli podesiti pritisak u ruci robota za držanje tako da drži zelenu salatu dovoljno čvrsto da je ne ispusti, ali ne toliko da je zgnječi. Snaga stiska može se prilagoditi za druge usjeve (<https://www.cam.ac.uk/research/news/robot-uses-machine-learning-to-harvest-lettuce>)



Slika 5. Vegebot

(Izvor: <https://www.agroklub.com/povrcarstvo/na-cambridgeu-napravili-vegebot-robota-za-berbu-salate/52497/>)

3.5. Roboti za berbu brokule

Polje puno brokule ne raste ravnomjerno. Različitost u oblicima i veličinama znači da poljoprivrednik mora selektivno žeti, berući svaki put samo zrele biljke. Roboti mogu preuzeti taj posao - sve dok mogu uočiti zrelu brokulu. Pieter Blok im je u tome pomogao u svom istraživanju za doktorat (cum laude).

Ogromno crveno vozilo polako vozi poljem. Kombajn za brokulu američke tvrtke s kojim je radio Pieter Blok (Agrosystems Research & Farm Technology Group) kreće se nešto manje od jednog kilometra na sat. 'To je sporo, ali ljudi beru brzinom od oko pola kilometra na sat', kaže Blok. 'Dakle, ovo je brže i štedite na radu.' Brokula je idealno povrće za robotsku berbu, kaže agrotehnolog. 'To je relativno izložen i lako prepoznatljiv usjev, tako da je prilično dobar za duboko učenje.'

Diljem svijeta brokula se obično bere selektivno. 'Mlade brokule dolaze iz rasadnika u takozvanim ukorijenjenim čepovima i sade se strojem', kaže Blok. 'Jedna biljka može odmah početi rasti, dok je drugoj potrebno više vremena da se ukorijeni. Ako ih ubereš sve odjednom, protratit ćeš one male.' Uz 40 do 50 eurocenti po grlu brokule, to znači značajne gubitke za poljoprivrednike. Većina selektivne berbe trenutno se obavlja ručno (<https://www.resource-online.nl/index.php/2023/02/17/broccoli-in-full-focus/?lang=en>).



Slika 6. Računalno upravljani kombajn za brokulu

(Izvor: <https://www.resource-online.nl/index.php/2023/02/17/broccoli-in-full-focus/?lang=en>)

Prije nego što natjerate robota da bere brokule, morate proći nekoliko prepreka. 'Postoje dva glavna izazova u obradi slike', počinje Gert Kootstra iz Farm Technology Group, koji je bio uključen u projekt kao su-nadzornik. 'Prvi je varijacija: robot mora moći prepoznati brokulu unatoč razlikama u polju, tipu tla i svjetlu.' Blok dodaje: 'Također postoje varijacije u veličini, boji i teksturi između pojedinih biljaka i kultivara.' Tako je Blok istrenirao računalni sustav koristeći slike brokule u svim oblicima i varijacijama. Ponekad je te slike činio crvenijima ili plavijima ili ih je povećavao ili smanjivao. Ovo je naučilo sustav da prepozna povrće pri različitim svjetlima i u različitim veličinama.

Na slikama treninga istraživači sami određuju lokaciju brokule – što zahtijeva vrijeme i novac. Tako je Blok natjerao računalo da istraživaču postavlja pitanja kako bi se usredotočio i ubrzao svoje učenje. 'Sustav ne samo da daje ishod, već također ukazuje na razinu sigurnosti u vezi s tim', kaže susupervizor Kootstra. »I Pieter je smanjio stupanj neizvjesnosti. Tada bismo mogli testirati sustav koji je uvježbao na milijunima slika.'

Nakon što su ga uvježbali s 50 do 100 slika, istraživači su dobili sustav za lociranje zrele brokule na 14.000 neoznačenih slika. 'Tada smo odabrali slike u koje je sustav bio najmanje siguran. Tu je vjerojatno pogriješio.' Istraživači su označili 50 ovih slika i dodali

ih postojećem skupu za obuku. 'Sustav je sada sigurniji u vezi s nekim slikama za koje prije nije bio siguran, jer je učio iz sličnih primjera.'

Drugi izazov za robota brokule je okluzija: kada nešto drugo, poput lišća, prekrije glavicu brokule. Kako robot može znati je li brokula spremna za berbu ako je ne vidi ili jedva vidi? Kako bi to riješio, Blok je snimio dvije fotografije: jednu s okluzijom i jednu bez. Na fotografiji bez okluzije precizno je označio mjesto i veličinu brokule. Zatim je istrenirao sustav sa slikom pokrivene brokule, ali s etiketama. 'Tada sustav predviđa ono što ne može vidjeti', kaže Kootstra. I dobro funkcionira: 'Margina pogreške je niska, čak i kada je brokula više od pola pokrivena.'

Nakon prvog ispitivanja u Americi bilo je jasno da je Blokov sustav dovoljno robustan, prisjeća se: 'Razvili smo i uvježbavali sustav samo s nizozemskim slikama. Još nije vidio američke brokule, ali je odmah djelovao.' Američki kupac je vrlo zadovoljan. Pet komercijalnih kombajna za berbu brokule sada se koristi u SAD-u.

Robot za brokulu zamjenjuje 15-ak radnika koji bi inače ručno brali povrće. Bit će potreban samo jedan operater koji će sjediti za komandama i nadgledati cijeli proces. Je li zabrinjavajuće da će roboti preuzeti ovakve poslove? 'Ne mislim da nas roboti ostavljaju bez posla', odgovara Kootstra. 'Ipak će promijeniti vrstu poslova koja se radi, vjerojatno na bolje. Ovakva žetva nije lijep posao, a ljudi to rade samo zbog novca. Robot za žetvu stvara nove vrste poslova: za tehnički kvalificirane ljude koji razvijaju, pokreću i popravljaju sustav. (<https://www.resource-online.nl/index.php/2023/02/17/broccoli-in-full-focus/?lang=en>)

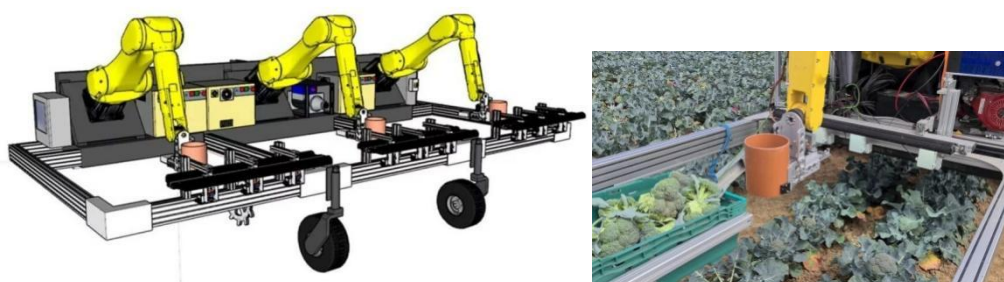
RoboVeg

RoboVeg je autonomni kombajn za brokulu iz Ujedinjenog Kraljevstva. Ovo revolucionarno rješenje za žetvu, u kombinaciji s autonomnim vozilom Robotti iz Danske, donosi nove perspektive uzgajivačima brokule.

Sustav vida integriran u RV opseg skenira polje dok se stroj kreće naprijed, locirajući glavice brokule i precizno šaljući koordinate robotima. Novi rezni alat za berbu brokule dizajniran je posebno za ovaj novi kombajn, omogućavajući precizno rezanje stabljika brokule po duljini. Standardno, roboti bacaju glavice brokule u kutije koje se nalaze na kraju kombajna, ali na ove kombajne mogu se primijeniti druga rješenja za sakupljanje.

Kontrola i analiza podataka

Uzgajivač može biti specifičan u pogledu uputa za rezanje. Raspon veličina može se odrediti do nekoliko milimetara. Budući da RoboVeg prikuplja i prenosi podatke u stvarnom vremenu dok prolazi kroz polja, i operater i osoblje ureda na farmi moći će pratiti napredak prema ciljevima, kao i donositi komercijalno povoljne odluke i procjene na licu mjesta (<https://world-agritech.com/2021/10/25/roboveg-unveils-autonomous-broccoli-harvester/>)



Slika 7. Senzori detektiraju položaj biljke brokule, nakon čega uređaj za rezanje na ruci robota odsiječe povrće

(Izvor: <https://world-agritech.com/2021/10/25/roboveg-unveils-autonomous-broccoli-harvester/>)

RoboVeg ima potencijal ponuditi funkcije mapiranja prinosa u stvarnom vremenu i također omogućiti pristup povijesnim podacima i kartama. Električni generator, bilo hidraulički ili na gorivo, opskrbljuje energiju potrebnu za napajanje kamp prikolice. Prikolica s niskim utovarivačem može se dobiti kao dodatna oprema za lakši prijevoz do/od polja. Također se mogu sklopiti ugovori o održavanju kako bi se osiguralo trajno dobro stanje kampera.

Zajedno ove tehnologije nude poljoprivrednicima mogućnost berbe 24 sata dnevno, s kapacitetom od više od 2400 glavica brokule na sat, bez ikakvog ljudskog vozača ili operatera. Razvijen tijekom posljednjeg desetljeća, vjeruje se da je RoboVeg napredno selektivno, automatizirano rješenje za berbu brokule, s potencijalom da pokrije širok raspon žetve povrća. Uz značajne prednosti za uzgajivače brokule, RoboVeg će smanjiti troškove rada pri žetvi, poboljšati kontrolu proizvodnje i dati bolje informacije o upravljanju (<https://world-agritech.com/2021/10/25/roboveg-unveils-autonomous-broccoli-harvester/>).



Slika 8. RoboVeg za branje brokula

(Izvor: <https://world-agritech.com/2021/10/25/roboveg-unveils-autonomous-broccoli-harvester/>)

3.6. Roboti za berbu bundeve

Uz veliku udaljenost između, bundeve su usjevi u ranoj fazi laki za brigu. A to možete još lakše posijati u rešetku. Kako roboti mogu pomoći?

Plijevljenje bundeve zahtijeva nekoliko ponavljanja, što mogu učiniti roboti. Osim toga, ako plijevite korov u rešetki, dvaput ćete se voziti preko polja s traktorom. Možete uštedjeti značajnu količinu vremena obavljanjem ovog plijevljenja pomoću robota.

Još jedan jasan slučaj je sijanje bundeva pomoću robota. Sjetva bundeva s poljoprivrednim robotom također je moguća u rešetku. Na primjer, nizozemska tvrtka Doorgrond koristi Agrobot s Kverneland Optima sadilicom za sjetvu bundeva u rešetku na polju.

Poljoprivredni roboti za bundeve mogu biti ključni za povećanje vremenske učinkovitosti. Čak i ako se ne čini golemim, možda već danas niste tako daleko od potpune automatizacije.

Ako sijete ili plijevite korov u mrežu s traktorom s automatskim upravljanjem (ne vožnjom) na RTK GPS-u i možda sustavom korekcije kamere na motici, vaš će ključni zadatak biti praćenje i okretanje na uvratini.

Povrh toga, pripremu tla za sjetvu bundeva mogu obavljati i roboti. (<https://www.ducksize.com/robots-for-pumpkins?Category=Weeding>)



Slika 9. Robot za berbu bundeva

(Izvor: <https://www.ducksize.com/robots-for-pumpkins>)

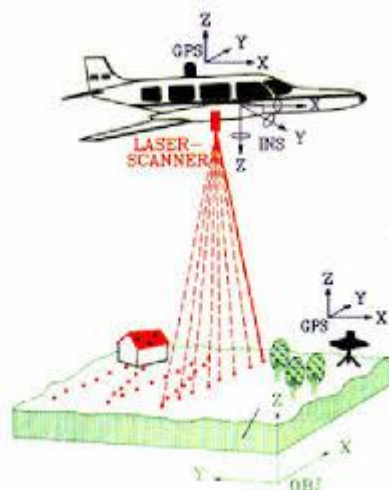
4. OSNOVE RADA LiDAR TEHNOLOGIJE

LiDAR (Light Detection And Ranging) pripada skupini metoda kojima se prikupljaju i interpretiraju podaci o udaljenim objektima bez fizičkoga dodira s njima, tzv. metodama daljinskih istraživanja. Sustav se temelji na detekciji i određivanju udaljenosti objekata uz pomoć svjetlosnih valova te ima vrlo široku primjenu u brojnim zadacima poput detekcije promjena u urbanim sredinama (npr. ilegalna izgradnja), 3D modeliranja gradova i cesta, detekcije arheoloških nalazišta, detekcije promjena nakon velikih potresa i poplava, određivanja visina građevinskih objekata ili izrade podloga za projektiranje plinovoda, naftovoda, autocesta, željezničkih pruga. Općenito, sustavi koji se temelje na integraciji različitih mjernih senzora omogućavaju dobivanje raznovrsnih podataka na temelju kojih je moguća i detekcija potencijalnih opasnosti. Vezano uz sigurnost željezničkoga prometa, iz dobivenog 3D modela područja snimanja moguće je, na primjer, detektirati zadiranje nedopuštenih predmeta u slobodni profil pruge. Lasersko skeniranje LiDAR-om može se izvoditi iz statičnoga položaja ili s pokretne platforme kao što su automobil, helikopter, zrakoplov ili, u novije vrijeme, bespilotna letjelica. Kada je riječ o izmjeri terena na kojemu se nalazi željeznička infrastruktura, pogotovo kada se radi o terenu velike površine ili teško pristupačnome terenu, geodetski stručnjak nerijetko će odabrati metodu laserskoga skeniranja iz zraka. Prilikom geodetske izmjere snima se tzv. obuhvat zahvata (koridor), koji može uključivati prostor lijevo i desno od osi postojeće pruge odnosno prostor definiran u skladu s važećim dokumentima prostornoga uređenja. Prije početka radova potrebno je zatražiti odobrenje za snimanje iz zraka od Državne geodetske uprave i Ministarstva obrane RH te obaviti kalibraciju LiDAR sustava. Kalibracijom sustava reducira se utjecaj sistematskih pogrešaka mjerenja i komponenti sustava na podatke mjerenja navodi Baraba S. (2020.).

4.1. Načelo laserskoga skeniranja iz zraka

Područje izmjere ili koridor snimanja nadlijeće se zrakoplovom na čijoj je donjoj strani montiran LiDAR sustav. Ovisno o visini leta zrakoplova i vidnome kutu skenera, tijekom jednoga preleta moguće je izmjeriti jedan niz ili u nekoliko preleta više nizova, a ostavljanjem preklopa između nizova postiže se obuhvat cijeloga područja izmjere. Koordinate točaka terena određuju se po načelu polarne metode mjerenja. U tu svrhu potrebno je poznavati udaljenosti između točaka terena i laserskoga skenera kao i kutove

pod kojima se laserska zraka odašilje prema terenu prilikom skeniranja. Laserski skener dio je LiDAR sustava i sastoji se od nekoliko senzora koji omogućavaju izmjeru i određivanje navedenih veličina. Laserski odašiljač odašilje impuls prema objektu snimanja koji se reflektira i vraća nazad u prijamni senzor. Za potrebe snimanja topografije Zemlje obično se koristi blisko infracrveno lasersko područje. Udaljenost skenera od objekta snimanja (D) određuje se na temelju mjerenja vremena koje je potrebno da laserski impuls stigne do objekta snimanja i reflektira se nazad prema izrazu, Slika 10. Integracija osnovnih komponenata LiDAR sustava [4] $D = c \cdot t / 2$ [m] gdje su: c – brzina svjetlosti koja iznosi $\sim 300\,000\,000$ m/s t – vrijeme putovanja laserskog impulsa [s]. To koliko će detaljno određeno područje biti snimljeno LiDAR sustavom ovisi o gustoći točaka koja se izražava brojem snimljenih točaka po jedinici površine (npr. 10 točaka/m²). LiDAR sustav sastoji se od triju osnovnih komponenata: GNSS-a (globalni navigacijski satelitski sustav), IMU-a (engl. Inertial Measuring Unit) i laserskog skenera (slika 10.) U cilju određivanja prostornoga položaja točaka terena potrebno je poznavati točnu poziciju skenera u referentnome koordinatnom sustavu koja se određuje GNSS mjerenjima te orijentaciju laserskoga skenera u prostoru koju određuje inercijalni mjerni sustav (IMU). Pored osnovnih komponenata LIDAR sadržava i ostale dijelove poput računala i pokretnoga čvrstog diska na koji se pohranjuju podaci mjerenja. Određeni proizvođači LiDAR sustava nude i digitalnu kameru kojom se usporedo izvodi snimanje terena, što olakšava posao obrade i identifikacije izmjerenih podataka navodi Sharma S. (2022.).



Slika 10. Integracija osnovnih komponenata LiDAR sustava

(Izvor: Baraba, 2020.)

Nakon što je odaslana prema tlu, laserska se zraka može reflektirati od raznih površina, raspršiti po vegetaciji i ostalim objektima te reflektirati od površine tla. Drugim riječima, na temelju jednoga odaslanog impulsa senzor može zabilježiti nekoliko povratnih impulsa. LiDAR sustav omogućava i primanje informacije o intenzitetu reflektiranoga zračenja objekata. Objekti od materijala koji imaju različita reflektivna svojstva reflektiraju lasersku zraku različitim intenzitetom. Tako svjetliji objekti imaju bolja reflektivna svojstva (na primjer, snijeg, bijeli zid, listopadna šuma), dok tamniji objekti apsorbiraju veći dio spektra (na primjer, betonske površine, svježi asfalt) pa je i povratni signal slab zbog gubitka dijela energije, a točnost mjerenja opterećena pogreškama. S obzirom na to da je željeznička pruga metalna konstrukcija podložna utjecaju korozije, tračnice pruge imaju slabiji intenzitet refleksije od objekata u njezinu okružju. Nedostatak LiDAR zračnoga laserskog skeniranja jest i nemogućnost izmjere dijela željezničke pruge u tunelu. Zbog toga je prije početka radova vrlo važno izvesti rekognosciranje terena kako bi se napravio dobar plan mjerenja i odabrala optimalna metoda za određeno područje navodi Sharma S. (2022.).

4.2. Obrada podataka izmjere

Računalna obrada podataka obavlja se nakon snimanja i puno je zahtjevnija od terenske izmjere. Prije početka postupka obrade podataka prikupljenih LiDAR sustavom snimke je potrebno dostaviti Državnoj geodetskoj upravi i zatražiti odobrenje za uporabu zračnih snimaka. LiDAR prikuplja podatke o izmjeri tijekom leta u tzv. sirovome formatu sa svake od svojih komponenti i zato je vrlo važna njihova međusobna vremenska sinkroniziranost. Rezultat laserskoga skeniranja terena jest velika količina neobrađenih podataka predstavljena u obliku skupine točaka pod nazivom „oblak točaka“ (engl. point cloud). Svaka točka u oblaku točaka ima svoje trodimenzionalne Kartezijeve XYZ koordinate u državnome koordinatnom sustavu, za Republiku Hrvatsku u sustavu HTRS96 (Hrvatski terestrički referentni sustav za epohu 1995.55). Obrada podataka obuhvaća postupke izravnoga georeferenciranja mjerenih podataka, izjednačenja nizova i kalibracije sustava, segmentacije oblaka točaka, klasifikacije i filtriranja te prorjeđivanja podataka. U nastavku izdvojeni su postupci klasifikacije i filtriranja te prorjeđivanja podataka. Filtriranjem podataka korisne se informacije odvajaju od neželjenih (šumova), a klasifikacijom se korisne informacije razvrstavaju u razrede (klase). Najčešće se koriste tri klase: vegetacija, građevine i teren. Klasifikacija podataka jest automatski postupak unutar korištenoga

programa za obradu podataka. Kvaliteta izrade digitalnih modela terena ovisi i o kvaliteti klasifikacije podataka i zato je često potrebna i dodatna reklasifikacija podataka koju provodi čovjek. Zadaća prorjeđivanja podataka jest zadržavanje minimalnoga skupa podataka koji još uvijek mogu opisati predmet izmjere zadovoljavajućom kvalitetom. Rezultat obrade podataka jest georeferenciran, filtriran i klasificiran oblak točaka koji se nadalje koristi i primjenjuje za dobivanje 3D modela područja snimanja navodi Novak, Z. (2007.).

4.3. Modeliranje podataka

LiDAR sustava Klasificirani oblak točaka omogućava izradu 3D modela prostora odnosno snimljenoga područja Zemljine površine poput digitalnoga modela reljefa (DMR) i digitalnoga modela površine (DMP). 3D modeli jesu matematički prikazi trodimenzionalnoga prostora, a svrha njihove izrade jest što vjernija aproksimacija postojećega stanja prostora kako bi se omogućilo projektiranje, na primjer, novoga pružnog kolosijeka. Geodetskom izmjerom prikupljeni su i izračunani podaci o reljefu Zemlje (visinski podaci) na izmjerenim (uzorkovanim) točkama poznatih x, y koordinata. Da bi se iz tih podataka izradio model, potrebno je procijeniti visinske vrijednosti na neuzorkovanim područjima, koristeći određenu metodu interpolacije. Za potrebe prikaza u digitalnome obliku visinski podaci mogu se prikazati u strukturi pravilne mreže točaka (engl. grid) ili nepravilne mreže trokuta (engl. TIN – Triangulated Irregular Network). TIN je metoda interpolacije koja povezuje točke uzoraka u nizove trokuta po načelu Delaunayeve triangulacije te određenim algoritmom procjenjuje vrijednosti nepoznatih točaka [8]. Digitalni model reljefa i digitalni model površine prikazani u ovome radu izrađeni su računalno primjenom LAsTools programa [9]. Program sadržava skup alata za klasifikaciju, konvertiranje i filtriranje podataka LiDAR te za izradu digitalnih modela podataka koje je moguće prikazati, oblikovati i uređivati u nekome GIS (geoinformacijski sustav) programu. Programski alat iz oblaka točaka generira „privremeni“ TIN vektorski model koji se potom prevodi u rasterski oblik. Pravilna mreža točaka jest mreža kvadrata jednakih površina, odnosno piksela navodi Novak, Z. (2007.).

5. TROŠKOVI ROBOTA I ULOGA

Početni troškovi nabave robota za berbu povrtlarskih kultura mogu biti značajni. Cijene robota variraju ovisno o složenosti modela, vrsti povrća za koje su dizajnirani, te tehnologiji koju koriste. Osnovni modeli robota mogu se kretati od nekoliko desetaka tisuća dolara, dok napredniji modeli s visokom razinom automatizacije i sofisticiranim tehnologijama mogu koštati i više od stotinu tisuća dolara. U ove troškove često su uključeni i troškovi instalacije i početnog podešavanja opreme.

Održavanje robota uključuje redovito servisiranje i popravke kako bi se osigurala njihova dugovječnost i ispravan rad. Troškovi održavanja ovise o složenosti robota i učestalosti servisiranja, a mogu uključivati kontrolu i kalibraciju senzora, zamjenu trošenih dijelova te ažuriranje softverskih sustava. Godišnji troškovi održavanja mogu se kretati od nekoliko tisuća do desetaka tisuća dolara, ovisno o vrsti robota navodi Knežević (2023.).

Troškovi operacije robota obuhvaćaju potrošnju energije, potrošne materijale i obuku osoblja za rad s robotima. Iako roboti mogu smanjiti potrebu za ljudskom radnom snagom, potrebno je ulaganje u obuku radnika za upravljanje i održavanje robota. Troškovi energije za rad robota obično su manji u usporedbi s troškovima ljudskog rada, ali su i dalje značajan faktor.

Implementacija robota može uključivati troškove prilagodbe postojećih poljoprivrednih operacija, poput modifikacije infrastrukture, kao što su staze za robotiku i skladišni prostori. Također, troškovi mogu obuhvatiti prilagodbu tehnologije specifičnim potrebama usjeva i uvjetima polja, što može zahtijevati dodatne investicije u prilagodbu i integraciju robota s postojećim sustavima.

Iako početni troškovi robota mogu biti visoki, dugoročni troškovi i uštede često opravdavaju investiciju. Automatizacija može značajno smanjiti troškove radne snage, povećati produktivnost i poboljšati kvalitetu proizvoda. Uštede na radu i smanjeni troškovi oštećenja usjeva mogu kompenzirati početne investicije i troškove održavanja. Dugoročna ekonomska isplativost robota često zavisi od njihove učinkovitosti, trajnosti i sposobnosti da se prilagode promjenjivim uvjetima poljoprivrede.

Za napredne robote, troškovi istraživanja i razvoja mogu biti značajan dio ukupnih troškova. Tvrtke koje razvijaju napredne robote ulažu u istraživanje novih tehnologija i

rješenja kako bi poboljšale performanse robota. Ovi troškovi mogu se odraziti na cijenu robota, ali često omogućuju razvoj robota s boljim performansama i većom dugovječnošću.

Sve ove komponente troškova znače važnu ulogu u ukupnoj ekonomskoj analizi robota za berbu povrtlarskih kultura. Važno je uzeti u obzir sve aspekte troškova prilikom donošenja odluke o investiranju u robotiku u današnju suvremenu poljoprivredu (<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/agricultural-robot-market>)

Analizirajući dva slijedeća proizvoda: Agrobot SW6010 i AGSHydro. Proizvodi ih poduzeće: Agrobot, Huelva, Španjolska. Nadalje, analiziraju se cijena, dostupnost i funkcija Agrobot SW6010 i AGSHydro, s tim da su izgled i funkcija Agrobot harvester prikazana na slici 11., dok je na slici 12. prikazan sustav hidroponskog uzgoja uz pomoć Agrobota (Knežević, 2023.).



Slika 11. Agrobot harvester

(Izvor: <https://www.producegrower.com/article/harvest-more-profits/>)



Slika 12. Sustav hidroponskog uzgoja uz pomoć Agrobota

(Izvor: <https://vutropedija.com/hidroponski-uzgoj/>)

Proizvodi Agrobot SW6010 i AGSHydro koriste se za berbu jagoda. Robot je korišten za berbu jagoda u Oxnardu, Kaliforniji, u 2020. godini. Radilo se ispitivanje odnosno završno testiranje berbe jagoda u siječnju 2019. godine. Planira se provesti sezonsko testiranje u sljedećim godinama, počevši od 2020. godine. U nastavku slijedi analiza robota Wall-Ye 1000 koji se koristi vinogradima s ciljem obrezivanje vinove loze. Poduzeće za proizvodnju robota Wall-Ye 1000 nalazi se u Maconu, Francuska. Slikovni prikaz robota Wall-Ye 1000, u vinogradima Francuske (Knežević, 2023.).



Slika 13. Wall-Ye 1000 Pruning Robot

(Izvor: <https://agrowebsystem.com/en/wall-ye-1000-pruning-robot/>)

Robot Wall-Ye 1000 kao što je već navedeno, koristi se za obrezivanje vinove loze. Praktična primjena odrađena je u vinogradima Francuske, ali samo uz funkciju koja označava autonomno obrezivanje. Ispitivanje za rad robota Wall-Ye 1000 odrađeno je u 2013. godine i poslije je pušteno u prodaju. Dostupno je za prodaju ali može se koristiti kao usluga, bez kupnje. Cijena je visoka, po robotu, iznosi 30.000 američkih dolara (Knežević, 2023.).

6. ZAKLJUČAK

Roboti za berbu povrtlarskih kultura predstavljaju značajan tehnološki napredak u modernizaciji poljoprivrede, s potencijalom da transformiraju način na koji se obavlja berba u različitim vrstama usjeva. Ovi roboti nude brojne prednosti, uključujući povećanu efikasnost, smanjenje troškova rada, i poboljšanu dosljednost u kvaliteti berbe. Automatizacija procesa berbe omogućava rad u kontinuitetu bez umora, što može značajno povećati produktivnost i smanjiti vrijeme potrebno za obavljanje berbe. Međutim, investicija u robote za berbu također nosi sa sobom značajne troškove, uključujući početnu nabavu, održavanje, operaciju, te prilagodbu postojećih infrastruktura i tehnologija. Iako su početni troškovi visoki, dugoročne uštede i poboljšana učinkovitost često mogu opravdati ovu investiciju. Automatizacija može dovesti do smanjenja troškova radne snage i smanjiti potrebu za fizički napornim radom, što može unaprijediti radne uvjete i smanjiti rizik od ozljeda. S obzirom na specifičnosti različitih povrtlarskih kultura, roboti moraju biti prilagođeni specifičnim potrebama svake vrste usjeva. Izazovi poput različitih veličina plodova, njihove krhkosti i raznih uvjeta rasta zahtijevaju napredne tehnologije i precizno inženjersko rješenje kako bi roboti mogli uspješno obavljati posao. Budućnost robota za berbu povrtlarskih kultura izgledna je, uz stalna unapređenja u tehnologiji, integraciju s IoT rješenjima i razvoj pametnijih sustava za upravljanje i analizu podataka. To će omogućiti još veću fleksibilnost, prilagodljivost i efikasnost u poljoprivredi. Zaključno, roboti za berbu povrtlarskih kultura nude značajne koristi za modernu poljoprivredu, ali je važno pažljivo razmotriti sve aspekte troškova i koristi prije donošenja odluka o investiranju u ovu tehnologiju. Daljnja istraživanja i razvoj u ovom području bit će ključni za optimizaciju performansi robota i njihovu prilagodbu sve složenijim zahtjevima poljoprivredne industrije.

7. POPIS LITERATURE

1. Birrell, S.; Hughes, J.; Cai, J. Y.; Iida, F. (2019.): A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce, *Journal of Field Robotics* 37.
2. Baraba S. (2020.). Primjena LiDAR sustava za potrebe projektiranja željezničkih pruga
3. Chansareewittaya, S. (2019.). Automatic Hydroponic Harvesting Robot *Journal of Field Robotics*.
4. Díaz-Pérez, J. C.; Muy-Rangel, M. D. i Mascorro, A. G. (2007): Fruit size and stage of ripeness affect postharvest water loss in bell pepper fruit (*Capsicum annuum L.*). *Journal of the Science of Food and Agriculture*.
5. Gajski, D. (2007.). Osnove laserskog skeniranja iz zraka, Ekscentar.
6. Jianqiao, W.; Shengzhe, F.; Liang, G.; Jin, Y.; Qiang, Z.; Chengliang, L. (2020.): Research Status and Development Direction of Design and Control Technology of Fruit and Vegetable Picking Robot System. *Smart Agriculture*.
7. Novak, Z. (2007.). Optech LiDAR, Ekscentar.
8. Oktarina, Y., Dewi, T., Risma, P. i Nawawi, M. (2020): Tomato harvesting arm robot manipulator; a pilot project, *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing.
9. Pawelitsch K. (2018.). Robot za berbu paprike, SWEEPER, *Gospodarski List*.
10. Ringdahl, O.; Kurtser, P., Edan, Y. (2019.): Evaluation of approach strategies for harvesting robots: Case study of sweet pepper harvesting, *Journal of Intelligent & Robotic Systems*.
11. Sharma S. (2022.). What is LiDAR technology and how does it work? *Geospatial world*.
12. Stajanko, D. (2014.). Strojevi za pomoć u berbi jabuka - stanje i perspektive. *Glasnik Zaštite Bilja*.
13. Yang, L.; Tian, R.; Wang, Q.; Hoshino, Y.; Yang, S. i Cao, Y. (2020.): Optimal design and simulation of a robot hand for a robot pumpkin harvesting system, *International Robotics & Automation Journal*.
14. Zhang, J. (2019.): A review of recurrent neural networks: LSTM cells and network architectures. *Neural computation*
15. Zimmer, D. Jurišić M., Plaščak, Radočaj D. (2020.). Primjena robota i robotskih sustava u poljoprivrednoj praksi, *Fakultet agrobiotehničkih znanosti Osijek, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek*.
16. Zimmer D. (2021.). Roboti u poljoprivredi, *Gospodarski List*.