

Primjena robota za suzbijanje korova u ratarskoj proizvodnji

Sažetak

Suzbijanje korova jedan je od najvažnijih čimbenika u svim poljoprivrednim biljnim proizvodnjama, a osobito u ratarskoj proizvodnji zbog velikih površina na kojima se ona odvija. Nakon otkrića visoko učinkovitih herbicida suzbijanje korova u poljoprivredi godinama se provodilo gotovo isključivo kemijskim metodama, ali intenzivna uporaba kemijskih sredstava je rezultirala značajnim negativnim učincima na okoliš i ljudsko zdravlje. Veliki napredak u elektronici i računalnim tehnologijama te razvoj sustava za navođenje vozila zajedno s uvođenjem precizne poljoprivrede su otvorili mogućnost korištenja robota u suzbijanju korova. Posljednjih godina su razvijeni robotski sustavi s različitim metodama suzbijanja korova kao što su selektivna kemijska aplikacija, mehaničko uklanjanje korova, korištenje plamena, pare, električnog pražnjenja i lasera. U radu su navedeni primjeri različitih izvedbi robota za suzbijanje korova.

KLjučne riječi: robotika, korovi, herbicidi, selektivna kemijska aplikacija, mehaničko uklanjanje korova, laser

Uvod

Suzbijanje korova jedan je od najvažnijih čimbenika u svim poljoprivrednim biljnim proizvodnjama, ali osobito u ratarskoj proizvodnji zbog velikih površina na kojima se ona odvija. Korovi su neželjene biljke koje se javljaju na mjestima gdje se uzgajaju željene kulture, lišavajući ih vlage, hranjivih tvari i sunčeve svjetlosti i mogu imati značajan negativan utjecaj na prinos usjeva (Slaughter i sur., 2008). Do sredine dvadeset stoljeća korovi su se uklanjali isključivo mehaničkim putem, ali nakon razvoja sintetski aktivnih sastojaka u 1940-ima, primjena herbicida je postala dominantni način suzbijanja korova (Vats, 2015; Thompson i Chauhan, 2022). Glavni poticaj za uvođenje herbicida bio je gubitak radne snage za ručno uklanjanje korova i povećanje troškova ljudskog rada u poljoprivredi u razdoblju nakon Drugoga svjetskog rata. Uvođenje herbicida uvelike je smanjilo troškove poljoprivredne proizvodnje, a pridonijelo je i povećanju prinosa usjeva. To je dovelo do revolucije u suzbijanju korova na temelju konvencionalnih herbicida tijekom 1960-ih i 1970-ih, nakon čega je uslijedilo uvođenje herbicida na bazi glifosata tijekom 1990-ih i ranih 2000-ih rata (Duke, 2012; Fennimore i sur., 2016). Nakon otkrića visoko učinkovitih herbicida suzbijanje korova u poljoprivredi, a posebno u ratarskoj proizvodnji, godinama se provodilo gotovo isključivo kemijskim metodama, ali intenzivna uporaba kemijskih sredstava je rezultirala značajnim negativnim učincima na okoliš i zdravlje ljudi (Ustuner i sur., 2020). Osim toga, kontinuirano korištenje istih herbicida odnosno herbicida istih mehanizama djelovanja neizbježno dovodi do selekcije populacija korova koji postaju otporni na te herbicide (Shaner, 2014). Prema Westwoodu i sur. (2018), zbog sve strožih zakonskih ograničenja i velikih troškova razvoja novih herbicida, još od 1980-ih nisu komercijalizirani herbicidi novih mehanizama djelovanja, a populacije korova otporne na herbicide su u stalnom porastu.

Prepoznajući negativne učinke kemijskih metoda na okoliš i zdravlje ljudi, znanstvenici i izumitelji već dulje vrijeme pokušavaju pronaći i usvojiti alternativne metode suzbijanja korova koje zahtijevaju minimalne količine herbicida ili su potpuno izvedive bez njihove primjene (Sharma and Gauttam, 2014). Tehnologija automatiziranog uklanjanja korova pomoću robot-

¹ prof.dr.sc. Dubravko Filipović, prof. dr. sc. Stjepan Plietić, izv. prof. dr. sc. Ante Galić, izv. prof. dr. sc. Igor Kovačev, doc. dr. sc. Krešimir Čopec, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, 10000 Zagreb, Hrvatska
Autor za korespondenciju: dfilipovic@agr.hr

skih sustava prihvatljiva je alternativna metoda suzbijanja korova koja može smanjiti ovisnost poljoprivrednih proizvođača o kemijskim sredstvima i ručnom uklanjanju korova. U posljednje vrijeme osniva se sve veći broj novih tvrtki koje zapošljavaju stručnjake iz područja automatike, mehatronike, robotike i strojnog vida s ciljem pronalaženja odgovarajućih rješenja u tehnologiji automatiziranog uklanjanja korova. Vjerojatnost da će se ovaj trend nastaviti je velika, budući da troškovi razvoja opreme za automatizirano uklanjanje korova mogu biti znatno jeftiniji od razvoja novih herbicida (Fennimore i sur., 2016).

Brzi napredak u elektronici, računalima i računalnim tehnologijama te razvoj sustava za navođenje vozila zajedno s uvođenjem precizne poljoprivrede otvorili su mogućnost korištenja robotskih sustava u poljoprivredi, te se broj robotskih sustava koji se koriste u poljoprivredi svake godine povećava (Bechar i Vigneault, 2016). Razvojem robotskih sustava za suzbijanja korova pojavila se moguća alternativa tradicionalnim pristupima primjene herbicida za širok raspon usjeva i sustava uzgoja koja je ostvariva s obzirom na stalni tehnološki napredak. Tijekom prošlog desetljeća bilo je značajnih ulaganja u istraživanje i razvoj robotskih tehnologija za automatizirano uklanjanje korova, ali je dosta njih ostalo u istraživačkom okruženju i nisu postali komercijalno dostupni (Pandey i sur., 2020).

Glavne komponente robotskog sustava

Prilikom razvoja robota za suzbijanje korova potrebno je naći rješenje za tri glavne komponente robotskog sustava: sustav za kretanje, lociranje i navođenje robota, sustav za otkrivanje i prepoznavanje korova, te sustav za suzbijanje korova (Shanmugam i sur., 2020).

Sustav za kretanje, lociranje i navođenje robota

Uređaj za kretanje robota mora omogućiti lako kretanje unutar različitih usjeva, a prilikom odabira izvedbe uređaja za kretanje treba uzeti u obzir sposobnost manevriranja u ograničenom prostoru i stabilnost na neravnom terenu (Bawden i sur., 2017). Dvije osnovne izvedbe uređaja za kretanje robota su izvedbe s kotačima i s gusjenicama. Iako gusjenice imaju bolju vuču i manje zbijaju tlo, većina konstruktora se odlučuje za izvedbu s kotačima. Prema Bakkeru i sur. (2010), izvedba sa četiri pogonska i upravljačka kotača omogućuje bolju upravljivost vozila duž redova usjeva i na uvratinama u odnosu na druga rješenja. Izvedbe s tri kotača dizajna nisu uobičajene, ali prema Utstumu i sur. (2018), projektiranjem sustava s asimetričnim konfiguracijom u tri točke postiže se minimalna konfiguracija kotača uz održavanje prikladnosti sustava za rad u redovitim usjevima i dobiva vrlo isplativ robot s minimalnim brojem pokretnih dijelova uz dobre sposobnosti rukovanja i stabilnosti.

Kao izvor energije za pogon robota može se koristiti motor s unutarnjim izgaranjem (benzinski ili dizel), ali s obzirom na zagađenje okoliša ispušnim plinovima, prednost se daje opskrbi robota energijom preko baterija koje je moguće puniti tijekom rada putem solarnih panela. Međutim, prema Utstumu i sur. (2018), robot bi trebao moći raditi gotovo neprekidno, pa su zahtjevi za napajanje često izvan onoga što se može isporučiti solarnim panelima na raspoloživoj površini, te je potrebna dodatna infrastruktura za njegovo djelovanje. Kao moguće rješenje predlažu hibridni pogon s ugrađenim generatorom pogonjenim četverotaktnim motorom koji će proizvoditi potrebnu struju za punjenje baterija.

Za prijenos pogona na kotače ili gusjenice može se primijeniti standardni mehanički prijenos kakav se koristi u konvencionalnim traktorima, ali također i kontinuirano varijabilni prijenosi poput onih uvedenih u novijim modelima traktora. Hidrostatski prijenosi imaju nižu energetska učinkovitost od navedenih, ali su dokazani koncept koji se primjenjuje na mnogim poljoprivrednim strojevima (Bakker i sur., 2010).

Da bi robot mogao funkcionirati kao autonomno vozilo potrebni su mu sustavi za lociranje i navođenje. Osnovni sustav za određivanje lokacije robota temelji se na globalnom navigacijskom satelitskom sustavu (GNSS) koji omogućuje pouzdano pozicioniranje i navigaciju korisni-

cima širom svijeta, a obuhvaća nekoliko sustava satelitskog pozicioniranja od kojih se najviše koristi GPS (Global Positioning System). GPS sustav je stekao popularnost zahvaljujući jednostavnosti korištenja, radu u svim vremenskim uvjetima i visokoj točnosti određivanja položaja, a pokazao se kao vrlo uspješan alat za preciznu poljoprivredu. GPS sustav emitira signale koji omogućuju GPS prijateljima da odrede položaj u realnom vremenu, što znači da se tijekom kretanja pružaju kontinuirane informacije o položaju (Stombaugh, 2018). Pomoću GPS sustava može se u svakom trenutku pouzdano ustanoviti nalazi li se robot unutar ili izvan parcele na kojoj treba suzbijati korov (Bakker i sur., 2010). Zbog male veličine usjeva u optimalno vrijeme za suzbijanje korova, preciznost navođenja robota je ključni preduvjet uspješnosti automatiziranih sustava za suzbijanje korova (Lamm i sur., 2002). Najčešće korištena tehnologija za precizno navođenje robota unutar usjeva pomoću GPS sustava je kinematika u stvarnom vremenu RTK (Real-time Kinematic) koja eliminira pogreške u najvećoj mogućoj mjeri kako bi pružila poboljšane podatke o položaju s mogućnošću pogreške manjom od jednog centimetra. Za uspješno navođenje robota uz primjenu RTK-GPS sustava potrebna je GPS bazna stanica na udaljenosti manjoj od 5 km od područja rada (Slaughter i sur., 2008). Druga vrsta tehnologije koja se koristi za navođenje automatiziranih sustava za suzbijanje korova temelji se na strojnom vidu praćenja reda usjeva. Algoritmi strojnog vida mogu otkriti redove usjeva u stvarnom vremenu, a relativni položaj i orijentacija robota u redu mogu se koristiti za praćenje reda usjeva (Bakker i sur., 2010). U uvjetima niske do umjerene razine zaraženosti korovom, navođenje sustavom strojnog vida po točnosti može nadmašiti RTK-GPS sustave navođenja, ali kod velike zakorovljenosti usjeva, sustav strojnog vida može postati nepouzdan.



Slika 1. Primjer primjene taktilnog senzora za orijentaciju prema usjevu

Figure 1. An example of tactile sensor application for the orientation towards crop

Izvor/Source: <https://www.reichhardt.com/us/all-products/psr/#tac>

Pogodnost posjedovanja jednog sustava navođenja za sve poljoprivredne operacije (npr. obrada tla, sadnja, žetva) i neovisnost performansi RTK-GPS sustava prema gustoći i veličini korova daje prednost RTK-GPS sustavu za precizno navođenje robota za suzbijanje korova (Fennimore i sur., 2016). Uz ta dva najčešće korištena sustava za navođenje robota unutar usjeva, mogu se koristiti i druge tehnologije. Taktilni senzori vođeni redom usjeva mogu se koristiti

za označavanje relativnog položaja i orijentacije robota prema usjevu (Slika 1). Ultrazvučni i optički senzori mogu mjeriti udaljenost robota od reda usjeva, a ugradnjom više ultrazvučnih ili optičkih senzora ili kombiniranjem informacija tih senzora s računanjem relativnog položaja i orijentaciji robota može se odrediti red usjeva (Bakker i sur., 2010). Navedeni sustavi omogućavaju i okretanje robota na uvratinama, ali za smanjenje potrebnog vremena za okretanje i eliminaciju mogućih problema uslijed nekih prepreka, Xue i Grift (2011) predlažu da se uz te sustave na robot ugradi i kamera varijabilnog vidnog polja koja se pokazala uspješnom za implementaciju okretanja robota na uvratinama u poljima kukuruza.

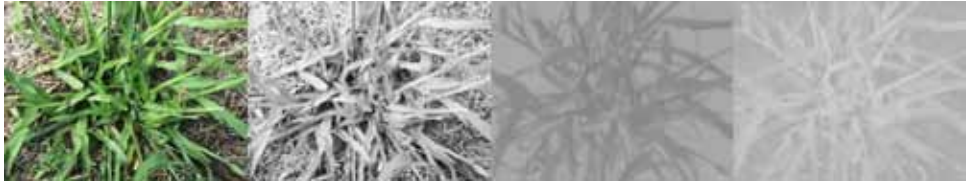
Sustav za otkrivanje i prepoznavanje korova

Postoje dva različita pristupa otkrivanju i prepoznavanje korova, putem mapiranja lokacije korova ili biljaka usjeva i prepoznavanje korova i biljaka usjeva u stvarnom vremenu. U pristupu mapiranja lokacije korova se prvo mapiraju, a zatim se koriste informacije o prostornoj distribuciji korova uz odgovarajuću metodu kontrole. Mapiranje korova se provodi prije stvarnih radnji suzbijanja korova, a karte korova se kasnije koriste za primjenu odgovarajuće metode suzbijanja korova. Pri tome se koristi GPS sustav mjerenja položaja u aplikacijama za mapiranje korova (Shanmugam i sur., 2020). Mapiranje biljaka usjeva se izvodi tako da se tijekom sjetve RTK-GPS sustavom odredi položaj sjemena i kasnije robot sve biljke izvan tog položaja tretira kao korov. Nedostatak tog sustava je što se biljke izrasle iz sjemena tijekom rasta u pravilu više ili manje pomaknu s tog položaja. Griepentrog i sur. (2005) su utvrdili da srednje odstupanje između procijenjenog položaja sjemena i stvarnog položaja biljke iznosi 16-43 mm, što znači da je za ciljanje korova u blizini usjeva potrebno koristiti dodatne senzore. Kod usjeva koji imaju približno jednake unutar redne razmake, usjevne biljke se mogu identificirati na temelju ove pravilnosti, ali kvaliteta detekcije se smanjuje sa smanjenjem udaljenosti između biljaka, većim brojem korova po jedinici površine i smanjenjem širine redova usjeva (Bakker i sur., 2010).

Pristup prepoznavanja korova i biljaka u stvarnom vremenu zahtijeva znatno veću snagu procesora, a metode suzbijanja korova je potrebno primijeniti gotovo odmah nakon otkrivanja korova i postoji ograničeno vrijeme za analizu mjerenja. Najveća prednost pristupa u stvarnom vremenu u odnosu na pristup mapiranja je ušteda vremena i energije jer se otkrivanje i suzbijanje korova obavljaju istovremeno (Shanmugam i sur., 2020). Metode prepoznavanja korova i biljaka u stvarnom vremenu gotovo uvijek uključuju neku vrstu optičkog sustava koji će omogućiti dobivanje digitalne slike korova pomiješanog s usjevima. Naknadna obrada slike ima za cilj precizno odrediti lokaciju korova, tako da sustav može brzo i precizno voditi sustav za suzbijanje korova (Pandey i sur., 2020).

Za raspoznavanje korova u usjevu koriste se različite metode obrade digitalnih slika koje se temelje na razlici u boji, obliku i teksturi listova korovnih i usjevnih biljaka (Golzarian i Frick, 2011). Prikupljanje crveno-zeleno-plavih (RGB) slika najekonomičnija je i često proučavana metoda za otkrivanje korova. Slike se mogu dobiti pomoću kamere postavljene na robot (Gonzalez-de-Santos i sur. 2017). U slučaju otkrivanja korova, cilj je pomoću RGB slika segmentirati piksele korova, a usjev i tlo smatrati kao pozadinu, međutim, korov i usjevi imaju spektralna svojstva koja se u većini slučajeva ne mogu razlikovati, posebno kada su biljke mlade. Prema tome, algoritmi za razlikovanje korova obično su prvi segment svih vegetacijskih piksela, nakon čega slijedi klasifikacija segmentiranih piksela na usjev i korov. Osnovno spektralno svojstvo koje se može iskoristiti je zelenilo vegetacije. Zeleni kanal u RGB prostoru boja ne može se izravno koristiti za tu svrhu budući da su vrijednosti intenziteta u RGB prostoru boja u korelaciji s osvjetljenjem. Stoga se za dobivanje boje moraju koristiti indeksi boja prikladni za segmentaciju vegetacije kroz različite razine osvjetljenja (Pandey i sur., 2020). Među nekoliko indeksa boja koji su korišteni za segmentaciju vegetacije često se koristi Indeks viška zelene boje (Exce-

ss Green Indeks - ExG). Hamuda i sur. (2016) su dali detaljan opis ExG i drugih indeksa boja u svom pregledu metoda segmentacije biljaka na terenskim slikama. Uz korištenje indeksa boja izvedenih iz RGB kanala, neke metode detekcije korova pretvaraju RGB slike u prostore boja kao što je YCrCb (Tang i sur., 2016). Primjer pretvaranja RGB slike korova u YCrCb prostor boja prikazan je na slici 2. Sujaritha i sur. (2017) su koristili umjetnu rasvjetu na terenu kako bi stvorili jednoliku rasvjetu po cijeloj površini slike.

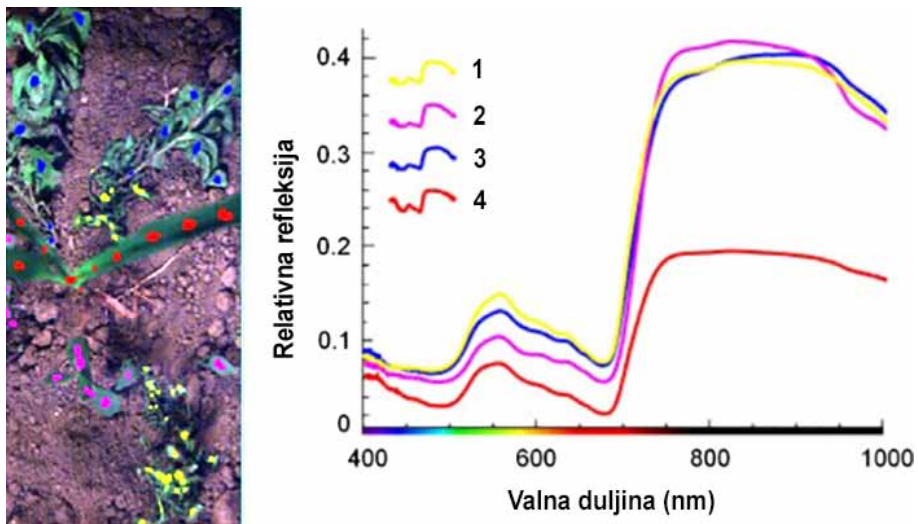


Slika 2. Primjer pretvaranja RGB slike korova u YCrCb prostor boja

Figure 2. An example of converting RGB image to YCrCb color space

Izvor/Source: <https://wemakedirtlookgood.com/2016/08/weed-opedia-crabgrass/>

Kao dodatak spektralnim informacijama sadržanim u slikama u boji, često se koriste i informacije o refleksiji vegetacije izvan vidljivog raspona obećavaju alat za razlikovanje korova i vrsta usjeva (Slaughter, 2014). Diao i sur. (2022) su proveli istraživanje koristeći hiperspektralno snimanje za razlikovanje lišća kukuruza od lišća korova i rezultati istraživanja su pokazali da je prosječna točnost prepoznavanja bila 98.58% (Slika 3). Lin i sur. (2017) su proveli laboratorijsko istraživanje koristeći hiperspektralno snimanje i zaključili da su spektralne značajke i značajke oblika najvažnije za klasifikaciju vrsta, dok su značajke teksture korisne u smanjenju stope pogreške u svrstavanju među korovske vrste.



Slika 3. Primjer hiperspektralnog snimanja za razlikovanje lišća korova (1-3) od lišća kukuruza (4)

Figure 3. An example of hyperspectral imaging to distinguish weed leaves (1-3) from corn leaves (4)

Izvor/Source: Diao i sur. (2022)

Aktivni modeli oblika (Active Shape Models - ASM) se također koriste za identifikaciju usjeva i vrsta korova. U ASM metodi oblik biljke je predstavljen s konačnim brojem točaka na rubovima listova. Slike pojedinačnih korova pohranjuju se u bazu podataka i koriste u procesu izrade modela, te se aktivni modeli oblika izrađuju za svaku vrstu korova na temelju skupa slika iz baze podataka. Na temelju rezultata ASM analize razvijen je algoritam za lociranje i identifikaciju korova (Persson i Astrand, 2008). Westwood i sur. (2018) smatraju da proizvođači opreme moraju i dalje razvijati napredne metode za raspoznavanje značajki svih važnih vrsta usjeva i korova u različitim okruženjima kako bi postigli komercijalni uspjeh.

Sustav za suzbijanje korova

Do danas su razvijeni mnogi robotski sustavi za suzbijanje korova s različitim metodama suzbijanja korova od koji su najčešće selektivna kemijska aplikacija (Rajesh Kanna i Vikram, 2020) i mehaničko uklanjanje korova (Raja i sur., 2020). Kod nekih robotskih sustava uništavanje korova se vrši pomoću plamena (Datta i Knežević, 2013), električnog pražnjenja (Vigneault i Benoit, 2001), vodene pare (Melander, 2011), a u posljednje vrijeme se koristi i laserska tehnologija (Xiong i sur., 2017). Neki proizvođači robotskih sustava za suzbijanje korova koriste kombinaciju metoda kako bi poboljšali učinak suzbijanja korova (Wu i sur., 2020). Iako još uvijek ne u potpunosti komercijalizirane, razne obećavajuće tehnologije za primjenu robota za suzbijanje korova su uvedene i implementirane tijekom proteklih 10 godina kao rezultat interdisciplinarnih suradničkih projekata između različite međunarodnih istraživačkih grupa i tvrtki (Shamshiri i sur., 2018).

Selektivna kemijska aplikacija kao najčešća metoda suzbijanja korova pomoću robota je pokazala prihvatljive rezultate i smanjena je uporaba herbicida na samo 5-10% u usporedbi s klasičnim apliciranjem (Young i Giles, 2014). Kod selektivnog kemijskog apliciranja male količine herbicidnog spreja se precizno usmjeravaju na listove korova. Sklopovi preciznog apliciranja su spojeni sa sustavom strojnog vida za oblikovanje automatiziranog sustava za aplikaciju herbicida. Kako bi precizni sustavi prskanja bili učinkoviti, potrebni su visoka razina raspoznavanja usjeva i korova, točna receptura herbicidnog spreja, poznavanje položaja vrha mlaznice u odnosu na ciljanu lokaciju korova i kontrola drifta odnosno zanošenja kapljica u slučaju vjetra (Fennimore i sur., 2016). Nakon što sustav selektivne primjene kemijskog sredstva uoči postojanja korova, herbicid se primjenjuje samo na područje korova i ne primjenjuje se na područjima gdje nema korovskih biljaka. Ova strategija primjene selektivno uključuje i isključuje mlaznice na temelju prisutnosti ili odsutnosti korova (Steward i sur., 2019). Prednost ovog sustava je da u slučaju pogreške kod prepoznavanja korova neće nastati nikakve direktne štete za usjev, a nedostatak da se, iako u znatno smanjenoj količini, ipak koriste kemijska sredstva. Švicarska tvrtka EcoRobotix razvila je robot za selektivno kemijsko apliciranje na solarni pogon pod nazivom Avo čiji sustav strojnog vida selektivno otkriva korov među usjevima i uništava ih aplikacijom mikrodoze herbicida koristeći 95% manje kemikalija (Slika 4). Robot Avo za autonomno navođenje kroz redove usjeva koristi GPS i senzore strojnog vida za praćenje redova usjeva. Ovaj robot detektira biljke korova, a zatim koristi robotske ruke delta oblika za postavljanje dviju mlaznica iznad korovskih biljaka i selektivnu primjenu herbicida izravno na otkrivene korovske biljke (Fennimore i Cutulle, 2019).



Slika 4. Robot za suzbijanje korova selektivnom kemijskom aplikacijom EcoRobotix Avo
Figure 4. Robot for weed control by selective chemical application EcoRobotix Avo
 Izvor/Source: <https://ecorobotix.com/en/avo>

Uz selektivnu kemijsku aplikaciju, roboti za suzbijanje korova najčešće koriste mehaničke sustave za uklanjanje korova koji mogu imati pasivne alate koji se automatski vode kroz redove usjeva ili aktivne alate za uklanjanje korova u redu i između redova usjeva (Steward i sur., 2019). Nedostatak robota s pasivnim alatima za uklanjanje korova je da mehanički uklanjaju samo korove koji se nalaze između redova usjeva, ali ne i one unutar redova. Robotski sustavi koji primjenjuju aktivno upravljanje mehaničkim alatima za uklanjanje korova koriste informacije o lokaciji korova perceptivnog sustava i aktivno pomiču alat u i izvan reda usjeva, ovisno o tome gdje se korovne biljke nalaze. Kao alati za uklanjanje korova se koriste horizontalni noževi, motičice s oštricom ili rotirajući naoštreni diskovi koji se pomiču u red usjeva i u međuprostorima između biljaka usjeva vrše odrezivanje korovskih biljaka. O'Dogherty i sur. (2007) su istraživali kinematiku horizontalno postavljenog diska koji je plitko uvučen ispod tla za unutar redno uklanjanje korova. Unutar reda usjeva disk je rotiran do položaja biljke usjeva ostavljajući je nesmetanom dok je korov između biljaka bio odrezan. Terenska ispitivanja diskosnog alata za uklanjanje korova sa sustavom računalnog vida za detekciju usjeva su pokazala da su razine oštećenja usjeva niske i ovu tehnologiju je kasnije komercijalizirala britanska tvrtka Garford Farm Machinery Ltd pod trgovačkim imenom Robocrop. Postoje i drugi primjeri novih alata za uklanjanje korova unutar reda usjeva kao što je cikloidna motičica koja se sastoji od osam zubaca koji rotiraju oko vertikalne osi (Norremark i sur., 2012). Mehanizam motičice dizajniran je tako da pojedinačni zupci ulaze u red gdje nema usjevne biljke, a povlače se kada je biljka uočena. Kao primjer drugog mehanizma, Langsenkamp i sur. (2014) su razvili alat u obliku rotirajućeg klipa koji je postavljen na delta robotsku ruku koja postavlja alat iznad otkrivenih korovnih biljaka. Kako bi uništio korovnu biljku, alat prodire 47 mm u tlo uz rotaciju i tako uništava korov. Prednosti mehaničkih sustava su ekološka prihvatljivost i relativno mala potrošnja energije, a nedostaci inercija mehanike koja ograničava kapacitet robota i u slučaju pogreške kod prepoznavanja korova mogu nepovratno oštetiti usjev. Danska tvrtka FarmDroid ApS razvila je robot pod oznakom FD20 koji obavlja kontinuirano selektivno uklanjanje korova u redu i između redova ratarskih kultura isključivo mehanički. Na taj način ovaj robot nudi učinkovitu kontrolu korova koja je prihvatljiva i za organsku poljoprivredu (Slika 5).



Slika 5. Robot za mehaničko suzbijanje korova FarmDroid FD20

Figure 5. Robot for mechanical weed control FarmDroid FD20

Izvor/Source: <https://farmdroid.dk/en/product>

Neki roboti imaju mogućnost uklanjanja korova i kemijskim i mehaničkim sustavom. Integrirani višenamjenski robot za primjenu u poljoprivredi pod nazivom BoniRob razvijen je kao zajednički projekt Sveučilišta Osnabruck, razvojne tvrtke DeepField Robotics, tehnološke tvrtke Bosch i proizvođača poljoprivrednih strojeva Amazone (Slika 6).



Slika 6. Integrirani višenamjenski robot za primjenu u poljoprivredi BoniRob

Figure 6. Integrated multi-purpose robot for application in agriculture BoniRob

Izvor/Source: <https://www.bosch-presse.de>

BoniRob može nositi nekoliko autonomnih i automatskih modula koji uključuju niz uređaja za mjerenje tla, precizne uređaje za aplikaciju herbicida, mehaničke alate za uništavanje korova i druge aplikacije. Pomoću ugrađenih kamera BoniRob može razlikovati usjeve i korov na teme-

lju parametara kao što su boja, oblik i veličina lišća. Kada BoniRob identificira korov u usjevu, precizno nanese malu dozu herbicida ili koristi rotacijsku mehaničku sondu kojom pritisne i uništi korov, ovisno o odabranoj aplikaciji (Shamshiri i sur., 2018).

Kod sustava za suzbijanje korova plamenom, tkiva korovnih biljaka se izlažu djelovanju plamena koji nastaje izgaranjem plina u odgovarajućem plameniku. U tu svrhu se kao plin najviše koristi propan jer temperatura koja nastaje izgaranjem propan plina može doseći i do 1900 °C, a djelovanjem tako visokih temperatura brzo dolazi do razaranja biljnih membrana, što dovodi do gubitka funkcije stanica i umiranja korovnih biljaka. Dok plamenik prelazi preko korova, sustav strojnog vida uključuje plamenike tako da će određeni korov biti izložen plamenu visoke temperature. Sustav strojnog vida gasi plamen dok prelazi preko usjeva. Prednost suzbijanja korova plamenom je da je prihvatljiva opcija suzbijanja korova i u organskim i u konvencionalnim sustavima proizvodnje, a nedostaci niska energetska učinkovitost, rizik od požara i smanjene performanse u vjetrovitim uvjetima (Merfield i sur., 2009). Iz tih razloga je potrebno odrediti odgovarajuće doze propana kako bi se najniža učinkovita doza propana mogla primijeniti za učinkovitu kontrolu korova u glavnim ratarskim usjevima, čime se štedi energija i smanjuju troškovi proizvodnje. Ovisno o željenoj razini kontrole korova ili podnošljivoj razini oštećenja usjeva, doza propana može se odabrati za suzbijanje korova ili smanjenje njegove konkurentske sposobnosti usjevu (Datta i Knežević, 2013). Robot za suzbijanje korova plamenom kanadske tvrtke Dave's Armoury Ltd. Ultimate Weed Killing Robot (Slika 7) za kretanje koristi gusjenice, a za određivanje položaja plamenika koristi robotsku ruku sa šest osi Kinova Robots Gen 3 postavljenu na bazu Agile-X Robotics Bunker. Pomoću ugrađene kamere na ruci i korištenjem neuronske mreže postiže se detekcija korova, a robotska ruka zatim pomiče plamenik iznad korova i plamenom ga uništava.



Slika 7. Robot za suzbijanje korova plamenom Ultimate Weed Killing Robot

Figure 7. Robot for weed control by flame Ultimate Weed Killing Robot

Izvor/Source: <https://hackaday.io/project/181763-ai-powered-weed-killing-robot>

Sustav za suzbijanje korova vodenom parom koristi paru dobivenu zagrijavanjem vode do ključanja za uništavanje korova visokom temperaturom. Prednosti tog sustava su ekološka prihvatljivost i nema opasnosti od požara povezanih s korištenjem plamena za istu svrhu, a nedo-

statak veliki utrošak energije koja je potrebna za zagrijavanje vode (Slaughter i sur., 2008). Glavne komponente ovog sustava su spremnik za vodu, crpka za vodu, parni kotao, generator pare i mlaznice za usmjeravanje pare. Sustav djeluje tako da nakon što sustav strojnog vida prepozna korov, pokretna ruka postavlja mlaznicu iznad korovske biljke i ispušta određenu količinu vodene pare na biljku. Giles i sur. (2005) modificirali su sustav preciznog apliciranja koji su razvili Lee i sur. (1999) za primjenu tekućina zagrijanih do 200 °C. Sustav je dizajniran za robotsku kontrolu korova korištenjem precizne primjene grijanih organska ulja za uništavanje korova s uljima na različitim temperaturama. Korištenjem ulja temperature 177 °C gotovo svi korovi bili su uništeni, dok se učinkovitost smanjila sa smanjenjem temperature i utvrđeno je da je minimalna temperatura pri kojoj je učinkovitost sustava bila pouzdana 150 °C. Uspjeh primjene vodene pare za uništavanje korova ovisi o građi korova i visini stabljike. Vruća para izvrsno je sredstvo za uništavanje širokolisnih korova različitih veličina, dok je nešto slabije djelovanje na travne korove i višegodišnje korove (Leskošek i sur., 2003). Za poboljšanje učinkovitosti, sustav za suzbijanje korova vodenom parom se može kombinirati s nekim drugim sustavom, pa je tako argentinska tvrtka Mapplics razvila robota GBOT koji je uz sustav za suzbijanje korova vodenom parom opremljen i laserskim uređajem za suzbijanje korova (Slika 8).



Slika 8. Robot za suzbijanje korova vodenom parom i laserskim uređajem Mapplics GBOT

Figure 8. Robot for weed control by steam and laser device Mapplics GBOT

Izvor/Source: <https://maquinac.com/empresas/mapplics>

Sustavi za suzbijanje korova električnim pražnjenjem koriste visokonaponske impulse kratkog trajanja za propuštanje električne struje kroz biljku čime se prekida životna aktivnost korova (Sahin i Yalinkilic, 2017). Prednosti ovog sustava su da je ekološki prihvatljiv jer ne ostavlja kemijske ostatke u okolišu i ne narušava površinu tla, a nedostaci pitanje električne sigurnosti ljudi i opreme, kao i moguća opasnost od požara zbog iskrenja u suhim uvjetima (Vigneault i Benoit, 2001). Ova metoda zahtijeva da električna sonda dodirne biljku ili bude u njejoj neposrednoj blizini kako bi bio učinkovita. Precizna kontrola položaja sonde bitna je i da bi se izbjeglo izravno uzemljenje tla ili kratki spoj sonde u slučaju nailaska robota na izbočine u tlu. Aktivacija električnog pražnjenja je puno brža od drugih metoda suzbijanja ako se zanemari vrijeme potrebno za postavljanje sonde. Učinkovitost ove metode suzbijanja korova varira od

ispod 50 do iznad 90%, a razlike između eksperimenata mogu djelomično objasniti varijacije u svojstvima različitih vrsta korova, naponu i metodama tretiranja, te vlažnosti tla (Slaughter i sur., 2008). Blasco i sur. (2002) su primijenili električno pražnjenje napona 15 kV i jačine struje 30 mA u trajanju od 200 ms i taj sustav je bio u stanju eliminirati 100% malih korova, ali kod većih biljaka su samo zahvaćeni listovi pokazali neku vrstu štete. Britanska tvrtka Small Robot Company konstruirala je robot za suzbijanje korova u ratarskim usjevima električnim pražnjenjem koji uništava širokolisne korove identificirane pomoću prepoznavanja uzoraka, a pokreću ga baterije američkog proizvođača Tesla (Slika 9). Radi sigurnosti robot ima laserske senzore za otkrivanje prepreka i isključuje se u slučaju da naiđe na nešto neočekivano. Kada njegov sustav strojnog vida otkrije korov u usjevu, približi mu elektrodu i električnim udarom od 8000 V ga uništava.



Slika 9. Robot za suzbijanje korova električnim pražnjenjem Dick tvrtke Small Robot Company

Figure 9. Robot for weed control by electric discharge Dick from Small Robot Company
Izvor/Source: <https://www.smallrobotcompany.com>

Sustav za suzbijanje korova pomoću laserske tehnologije koristi laser kao uređaj za rezanje stabljike korova ili za zaustavljanje ili odgađanje rasta korova. Uz to što je ekološki prihvatljiv i također ne narušava površinu tla, prednost ovog sustava u odnosu na električno pražnjenje je znatno manja potrebna električna energija, a nedostaci da laser ne može rezati ispod površine zemlje i stoga ima manji učinak na određene vrste korova i za postizanje dobrih rezultata potreban je laser velike snage što uključuje visoke troškove. Mathiassen i sur. (2006) proučavali su potencijal komercijalno dostupnih laserskih sustava za suzbijanje tri različite vrste korova. Učinkovitost suzbijanja korova značajno je varirala ovisno o vrsti korova, valnoj duljini, vremenu izlaganja, veličini laserske točke i snazi lasera. Od testiranih sustava samo je laser snage 5 W s konfiguracijom veličine točke od 1.8 mm učinkovito djelovao na sve vrste korova. Kod toga se potrebna energija kretala od 1.3 do 9.9 J, a odgovarajuće vrijeme ekspozicije od 250 do 2000 ms. Autori su zaključili da su potrebna daljnja istraživanja kako bi se utvrdila učinkovitost djelovanja lasera na širi spektar korovskih vrsta. Kaielerle i sur. (2013) su istraživali primjenu lasera na različitim valnim duljinama (10600, 1908, 940 i 532 nm) za suzbijanje oštrodlakavog šćira

(*Amaranthus retroflexus* L.) u fazi rasta prvog lista. Primijenjena su tri različita položaja lasera i tri veličini laserske točke 3.0, 4.2 i 6.0 mm. Istraživanja su pokazala da se minimalna energija potrebna za uništavanje korova kretala od 10 do 71 J po korovu, a utvrdili su važnost preciznog pozicioniranja lasera, budući da je model oštećenja pokazao potrebno povećanje energije od 1.3 J za svakih 1% gubitka u točnosti pozicioniranja. Američka robotička tvrtka Carbon Robotics razvila je svoju treću generaciju autonomnog robota koji koristi robotiku, umjetnu inteligenciju i lasersku tehnologiju velike snage za precizno kretanje kroz usjeve te za prepoznavanje i uklanjanje korova (Slika 10). Kamere visoke razlučivosti prenose slike u stvarnom vremenu na ugrađeno superračunalo koje pokreće modele strojnog vida za prepoznavanje usjeva i korova. Lasersko uklanjanje korova može se provoditi danju i noću u svim vremenskim uvjetima.



Slika 10. Robot za suzbijanje korova pomoću lasera tvrtke Carbon Robotics

Figure 10. Robot for weed control by laser from Carbon Robotics

Izvor/Source: <http://carbonrobotics.com/laserweeder>

Zaključak

S obzirom na sve strože propise i zahtjeve za smanjenjem korištenja kemijskih sredstava za suzbijanje korova u ratarskoj proizvodnji, problem nedostatka radne snage i povećanje troškova ljudskog rada u poljoprivredi, potrebno je naći nova tehnološka rješenja za suzbijanje korova. Kako se poljoprivredna robotika posljednjih godina ubrzano razvija i već se primjenjuje u mnogim granama poljoprivrede, primjena robota za suzbijanje korova čini se kao moguće rješenje tih problema i postoji veliki potencijal za njihovu primjenu, posebno u sustavima ekološke proizvodnje. Tijekom proteklog desetljeća uložena su značajna sredstva u istraživanje i razvoj robota za suzbijanje korova s različitim metodama rada i pronađena su zadovoljavajuća rješenja. Iako su do sada male inovativne tvrtke bile primarni izvor novih tehnologija za robotizirano suzbijanje korova, i neki od vodećih proizvođača poljoprivrednih strojeva u suradnji s tehnološkim tvrtkama su razvili robote za tu svrhu. Razvoj robotiziranih sustava za suzbijanje korova nudi održivu alternativu tradicionalnim pristupima primjene herbicida za širok raspon usjeva i sustava proizvodnje s obzirom na ubrzani tehnološki napredak i razvoj umjetne inteligencije.

Literatura

- Bakker, T., van Asselt, K., Bontsema, J., Muller, J., van Straten, G. (2010) Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *Journal of Terramechanics*, 47 (2), 63-73. DOI:10.1016/j.tterra.2009.06.002
- Bawden, O., Kulk, J., Russell, R., McCool, C., English, A., Dayoub, F., Lehnert, C., Perez, T. (2017) Robot for weed species plant-specific management. *Journal of Field Robotics*, 34 (6), 1179-1199. DOI:10.1002/rob.21727
- Bechar, A., Vigneault, C. (2016) Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94-111. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2016.06.014
- Blasco, J., Aleixos, N., Roger, J.M., Rabatel, G., Molto, E. (2002) Robotic weed control using machine vision. *Biosystems Engineering*, 83 (2), 149-157. DOI:10.1006/bioe.2002.0109
- Datta, A., Knezevic, S.Z. (2013) Flaming as an alternative weed control method for conventional and organic agronomic crop production systems: A review. *Advances in Agronomy*, 118, 399-428. DOI:10.1016/B978-0-12-405942-9.00006-2
- Diao, Z., Yan, J., He, Z., Zhao, S., Guo, P. (2022) Corn seedling recognition algorithm based on hyperspectral image and lightweight-3D-CNN. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, 107343. DOI:10.1016/j.compag.2022.107343
- Duke, S.O. (2012) Why have no new herbicide modes of action appeared in recent years? *Pest Management Science*, 68 (4), 505-512. DOI:10.1002/ps.2333
- Fennimore, S.A., Cutulle, M. (2019) Robotic weeders can improve weed control options for specialty crops. *Pest Management Science*, 75 (7), 1767-1774. DOI:10.1002/ps.5337
- Fennimore, S.A., Slaughter, D.C., Siemens, M.C., Leon, R.G., Saber, M.N. (2016) Technology for automation of weed control in specialty crops. *Weed Technology*, 30 (4), 823-837. DOI:10.1614/WT-D-16-00070.1
- Giles, D.K., Lanini, W.T., Slaughter, D.C. (2005) Precision weed control for organic and conventional specialty crops. Specialty Crops Block Grant Program Final Report. Sacramento: California Department of Food and Agriculture.
- Golzarian, M.R., Frick, R.A. (2011) Classification of images of wheat, ryegrass and brome grass species at early growth stages using principal component analysis. *Plant Methods*, 7 (1), 28. DOI:10.1186/1746-4811-7-28
- Gonzalez-de-Santos, P., Ribeiro, A., Fernandez-Quintanilla, C., Lopez-Granados, F., Brandstoeetter, M., Tomic, S., Pedrazzi, S., Peruzzi, A., Pajares, G., Kaplanis, G., Perez-Ruiz, M., Valero, C., del Cerro, J., Vieri, M., Rabatel, G., Debilde, B. (2017) Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture. *Precision Agriculture*, 18 (4), 574-614. DOI:10.1007/s11119-016-9476-3
- Griepentrog, H.W., Norremark, M., Nielsen, H., Blackmore, B.S. (2005) Seed mapping of sugar beet. *Precision Agriculture*, 6 (2), 157-165. DOI:10.1007/s11119-005-1032-5
- Hamuda, E., Glavin, M., Jones, E. (2016) A survey of image processing techniques for plant extraction and segmentation in the field. *Computers and Electronics in Agriculture*, 125, 184-199. DOI:10.1016/j.compag.2016.04.024
- Kaierle, S., Marx, C., Rath, T., Hustedt, M. (2013) Find and irradiate - lasers used for weed control. *Laser Technik Journal*, 10 (3), 44-47. DOI:10.1002/latj.201390038
- Lamm, R.D., Slaughter, D.C., Giles, D.K. (2002) Precision weed control system for cotton. *Transactions of the ASAE*, 45 (1), 231-238. DOI:10.13031/2013.7861
- Langsenkamp, F., Sellmann, F., Kohlbrecher, M., Kielhorn, A., Strothmann, W., Michaels, A., Ruckelshausen, A., Kielhorn, A. (2014) Tube stamp for mechanical intra-row individual plant weed control. U: Zhang, L., ur. *Proceedings of 18th World Congress of CIGR. Beijing, 16-19.09.2014*. Gapporo: International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering, 1-11.
- Lee, W.S., Slaughter, D.C., Giles, D.K. (1999) Robotic weed control system for tomatoes. *Precision Agriculture*, 1 (1), 95-113. DOI:10.1023/A:1009977903204
- Leskošek, G., Marčič, M., Simončič, A., Avsec, J. (2003) Uporaba pare kot okolju prijazen ukrep za zatiranje plevelov. U: Maček, J., ur. *Zbornik predavanj in referatov 6. slovenskega posvetovanja o varstvu rastlin. Zreče, 04-06.03.2003*. Ljubljana: Društvo za varstvo rastlin Slovenije, 511-513.
- Lin, F., Zhang, D., Huang, Y., Wang, X., Chen, X. (2017) Detection of corn and weed species by the combination of spectral, shape and textural features. *Sustainability*, 9 (8), 1335. DOI:10.3390/su9081335
- Mathiassen, S.K., Bak, T., Christensen, S., Kudsk, P. (2006) The effect of laser treatment as a weed control method. *Biosystems Engineering*, 95 (4), 497-505. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.08.010
- Melander, B. (2011) Mechanical, thermal and robotic weeding for minimising laborious hand-weeding in row crops. U: Neuhooff, D., Sohn, S.M., Ssekya, C., Halberg, N., Rasmussen, I.A., Hermansen, J., ur. *Proceedings of the Third Scientific Conference of the International Society of Organic Agriculture Research, Namyangju, 28.09-01.10.2011*. Westerau: International Society of Organic Agriculture Research, 688-691.
- Merfield, C.N., Hampton, J.G., Wratten, S.D. (2009) A direct-fired steam weeder. *Weed Research*, 49 (6), 553-556. DOI:10.1111/j.1365-3180.2009.00733.x
- Norremark, M., Griepentrog, H.W., Nielsen, J., Sogaard, H.T. (2012) Evaluation of an autonomous GPS-based system for intra-row weed control by assessing the tilled area. *Precision Agriculture*, 13 (2), 149-162. DOI:10.1007/s11119-011-9234-5
- O'Dogherty, M.J., Godwin, R.J., Dedousis, A.P., Brighton, J.L., Tillett, N.D. (2007) A mathematical model of the kinematics of a rotating disc for inter and intra-row hoeing. *Biosystems Engineering*, 96 (2), 169-179. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2006.10.008
- Pandey, P., Dakshinamurthy, H.N., Young, S. (2020) A literature review of nonherbicide, robotic weeding: A decade of progress. *Cotton Incorporated, Biological and Agricultural Engineering*. Raleigh: North Carolina State University.
- Persson, M., Astrand, B. (2008) Classification of crops and weeds extracted by active shape models. *Biosystems Engineering*, 100 (4), 484-497. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2008.05.003
- Raja, R., Nguyen, T.T., Slaughter, D.C., Fennimore, S.A. (2020) Real-time robotic weed knife control system for tomato and lettuce based on geometric appearance of plant labels. *Biosystems Engineering*, 194, 152-164. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2020.03.022
- Rajesh Kanna, P., Vikram, R. (2020) Agricultural robot - A pesticide spraying device. *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 13 (1), 150-160.
- Sahin, H., Yalinkilic, M. (2017) Using electric current as a weed control method. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2 (6), 59-64. DOI:10.24018/ejeng.2017.2.6.379

- Shamshiri, R.R., Weltzien, C., Hameed, I.A., Yule, I.J., Grift, T.E., Balasundram, S.K., Pitonakova, L., Ahmad, D., Chowdhary, G. (2018) Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11 (4), 1-14. DOI:10.25165/ij.ijabe.20181104.4278
- Shaner, D.L. (2014) Lessons learned from the history of herbicide resistance. *Weed Science*, 62 (2), 427-431. DOI:10.1614/WS-D-13-00109.1
- Shanmugam, S., Assuncao, E., Mesquita, R., Veiros, A., Gaspar, P.D. (2020) Automated weed detection systems: A review. *KnE Engineering*, 5 (6), 271-284. DOI:10.18502/keg.v5i6.704
- Sharma, A., Gauttam, P. (2014) Review on herbicides, weed control practices and management. *International Journal of Agricultural Science and Research*, 4 (3), 125-136.
- Slaughter, D.C. (2014) The biological engineer: Sensing the difference between crops and weeds. U: S.L. Young, F.J. Pierce, ur. *Automation: The future of weed control in cropping systems*. Dordrecht: Springer. DOI:10.1007/978-94-007-7512-1_5
- Slaughter, D.C., Giles, D.K., Downey, D. (2008) Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61 (1), 63-78. DOI:10.1016/j.compag.2007.05.008
- Steward, B., Gai, J., Tang, L. (2019) The use of agricultural robots in weed management and control. U: J. Billingsley, ur. *Robotics and automation for improving agriculture*. Cambridge: Burleigh Dodds Science Publishing.
- Stombaugh, T. (2018) Satellite-based positioning systems for precision agriculture. U: D.K. Shannon, D.E. Clay, N.R. Kitchen, ur. *Precision Agriculture Basics*. Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America and Soil Science Society of America.
- Sujaritha, M., Annadurai, S., Satheeshkumar, J., Sharan, S.K., Mahesh, L. (2017) Weed detecting robot in sugarcane fields using fuzzy real time classifier. *Computers and Electronics in Agriculture*, 134, 160-171. DOI:10.1016/j.compag.2017.01.008
- Tang, J.L., Chen, X.Q., Miao, R.H., Wang, D. (2016) Weed detection using image processing under different illumination for site-specific areas spraying. *Computers and Electronics in Agriculture*, 122, 103-111. DOI:10.1016/j.compag.2015.12.016
- Thompson M, Chauhan B.S. (2022) History and perspective of herbicide use in Australia and New Zealand. *Advances in Weed Science*, 40 (Spec1), e20210075. DOI:10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five002
- Ustuner, T., Al Sakran, M., Almhemed, K. (2020) Effect of herbicides on living organisms in the ecosystem and available alternative control methods. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 10 (8), 633-641. DOI:10.29322/IJ-SRP.10.08.2020.p10480
- Utstumo, T., Urdal, F., Brevik, A., Dorum, J., Netland, J., Overskeid, O., Berge, T.W., Gravdahl, J.T. (2018) Robotic in-row weed control in vegetables. *Computers and Electronics in Agriculture*, 154, 36-45. DOI:10.1016/j.compag.2018.08.043
- Vats, S. (2015) Herbicides: History, classification and genetic manipulation of plants for herbicide resistance. U: E. Lichtfose, ur. *Sustainable Agriculture Reviews, Vol. 15*. Cham: Springer. DOI:10.1007/978-3-319-09132-7_3
- Vigneault, C., Benoit, D.L. (2001) Electrical weed control: Theory and applications. U: C. Vincent, B. Panneton, F. Fleurat-Lessard, ur. *Physical control methods in plant protection*. Berlin: Springer. DOI:10.1007/978-3-662-04584-8_12
- Westwood, J.H., Charudattan, R., Duke, S.O., Fennimore, S.A., Marrone, P., Slaughter, D.C., Zollinger, R. (2018) Weed management in 2050: Perspectives on the future of weed science. *Weed Science*, 66 (3), 275-285. DOI:10.1017/wsc.2017.78
- Wu, X.L., Aravecchia, S., Lottes, P., Stachniss, C., Pradalier, C. (2020) Robotic weed control using automated weed and crop classification. *Journal of Field Robotics*, 37 (2), 322-340. DOI:10.1002/rob.21938
- Xiong, Y., Ge, Y.Y., Liang, Y.L., Blackmore, S. (2017) Development of a prototype robot and fast path-planning algorithm for static laser weeding. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 494-503. DOI:10.1016/j.compag.2017.11.023
- Xue, J.L., Grift, T.E. (2011) Agricultural robot turning in the headland of corn fields. *Applied Mechanics and Materials*, 63-64, 780-784. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.63-64.780
- Young, S.L., Giles, D.K. (2014) Targeted and microdose chemical applications. U: S.L. Young, F.J. Pierce, ur. *Automation: The future of weed control in cropping systems*. Dordrecht: Springer. DOI:10.1007/978-94-007-7512-1_8

Prispjelo/Received: 21.7.2022.

Prihvaćeno/Accepted: 22.9.2022.

Review paper

Application of robots for weed control in arable production

Abstract

Weed control is one of the most important factors in all agricultural plant productions, but especially in arable production due to the large areas where it takes place. After the discovery of highly effective herbicides, weed control in agriculture has been carried out for years almost exclusively by chemical methods, but the intensive use of herbicides has resulted with the serious negative effects on the environment and human health. Rapid advances in electronics, computers and computer technologies and the development of vehicle guidance systems together with the introduction of precision agriculture have opened the possibility of using robotic systems in weed control. In recent years, many robotic weed control systems have been developed with different weed control methods such as selective chemical application, mechanical weed removal, using flame, steam electric discharge and laser. Examples of different versions of robots for weed control are presented in this paper.

Keywords: robotics, weeds, herbicides, selective chemical application, mechanical weeding, laser