

Razvoj hibridne osebno prilagojene učne poti s pomočjo umetne inteligence za poklicno izobraževanje in usposabljanje za inovacije v kmetijstvu



Co-funded by
the European Union

Modul: Robotika v kmetijstvu

Razvoj vsebine lekcije/enote/teme

Financirano s strani Evropske unije. Izražena stališča in mnenja so izključno stališča in mnenja avtorja(-ev) in ne odražajo nujno stališč in mnenj Evropske unije ali Evropske izvajalske agencije za izobraževanje in kulturo (EACEA). Niti Evropska unija niti EACEA ne odgovarjata zanje.



ENOTA 1 – PRECIZNO KMETIJSTVO (PK) IN ROBOTIKA V KONTEKSTU PA

Uvod

Precizno kmetijstvo (PK) predstavlja celovit pristop k upravljanju kmetije, ki vključuje digitalne tehnologije za optimizacijo kmetijskih vložkov in povečanje produktivnosti ob hkratnem zmanjšanju vplivov na okolje. Uporablja metode, ki temeljijo na podatkih, da **se zagotovi prava obdelava na pravem mestu ob pravem času** [Ref.1].

Robotika ima v tem okviru ključno vlogo: robotske sisteme lahko obravnavamo kot najnaprednejšo aplikacijo PK z „avtonomnimi“ tehnologijami za kompleksne kmetijske naloge, s čimer prispevajo k gospodarski in okoljski trajnosti.

Uvod v precizno kmetijstvo

PK je opredeljeno kot strategija, ki uporablja informacijsko tehnologijo – vključno z **GNSS (Global Navigation Satellite Systems) pozicioniranjem, daljinskim in bližnjim zaznavanjem** ter **digitalnimi podatkovnimi orodji** – za spremljanje in opisovanje spremenljivosti na terenu ter podporo pri odločanju. Glavni cilj je izboljšati **produktivnost in učinkovitost rabe virov**, hkrati pa zmanjšati **vpliv na okolje** [Ref.1].

Cilji PK vključujejo:

- **Optimizacijo uporabe vložkov**, kot so voda, gnojila in energija;
- **povečanje donosa** z odločitvami, ki temeljijo na podatkih;
- **zmanjšanje odpadkov** z usmerjanjem vložkov v prostoru in času [Ref.1].

Za doseganje teh ciljev se PK opira na več **ključnih tehnoloških komponent** [Ref.1]:

- **Osnovni elektronski sistemi**: orodja za pridobivanje podatkov in operativni nadzor;
- **Tehnologije geolokacije**: GNSS in geografski informacijski sistemi (GIS);
- **Strojne tehnologije**: računalništvo, vizualizacija podatkov, komunikacijska omrežja;
- **Programske tehnologije**: shranjevanje in obdelava podatkov ter uporabniku prijazni vmesniki.

Tehnologije PK lahko razdelimo v tri kategorije:

- **Sistemi za vodenje**, vključno s **pomočjo vozniku, avtomatskim krmiljenjem in nadzorovanim prometom v kmetijstvu (CTF)**, ki omejujejo gibanje strojev na vnaprej določene pasove, da se zmanjša utrjevanje tal, ohrani zdravje tal, zmanjša stroški in izboljša donos;



- **Orodja za snemanje in kartiranje**, ki uporabljajo **senzorje**, nameščene na **satelitih, dronih, traktorjih** ali **zemeljskih postajah**, za zbiranje podatkov o stanju tal in pridelkov. Meritve na podlagi senzorjev so lahko **oddaljene ali bližnje**. Bližnje meritve se izvajajo na višini 1–2 m, z neposrednim stikom s tlemi/pridelkom, s prenosno opremo ali s senzorji, nameščenimi na traktorju ali strojih. Meritve na podlagi senzorjev se lahko pozneje predelajo v **georeferenčne karte** s postopkom, ki vključuje združevanje podatkov in dodelitev lažne barve vsaki razred podatkov [Error! Reference source not found.];
- **Reaktivne tehnologije** naj bi uporabljale podatke, ki jih proizvajajo sistemi za snemanje, in zmanjšale vse vložke (semena, gnojila, pesticide, vodo ...) na optimalno količino, ki jo pridelek potrebuje za rast (**kmetijsko upravljanje, prilagojeno posameznemu območju**), pri čemer upoštevajo spremenljivost polja, opisano na zemljevidu (**tehnologija spremenljive stopnje, VRT**).



Slika 1 : Zemljevid koruznega polja na podlagi meritev s senzorji (vir: Univerza v Perugii)

Robotika v kontekstu PK

Kmetijska robotika (KR) predstavlja visoko napredno uporabo PK, saj omogoča **avtomatizacijo** različnih kmetijskih dejavnosti. Glede na svojo funkcijo lahko roboti služijo kot **navigacijski sistemi, snemalne enote** ali **reaktivne naprave**. Na primer, **avtonomni traktorji** se lahko sami usmerjajo z uporabo GPS, **droni** zbirajo podatke kot snemalne naprave, **robotski razpršilniki** pa nanašajo sredstva na podlagi zaznanih sprememb [Ref.1].

KR obravnava več ključnih izzivov, zlasti potrebo po **trajnostnih kmetijskih praksah** in vse večje **pomanjkanje ročne delovne sile**. Z avtomatizacijo ponavljajočih se ali delovno intenzivnih nalog robotika podpira dosledno in visoko učinkovito delovanje tudi v zahtevnih pogojih [Ref.1].

Ključna področja uporabe robotike

Robotske sisteme se uporablja v vseh fazah kmetijske proizvodnje [Ref.2 ;Ref.3 ;Ref.4 ;Ref.5 ;Ref.6]:



- **Priprava zemlje:** roboti samostojno obdelujejo zemljo in nanašajo gnojila;
- **Saditev in setev:** robotsko sejanje in razporeditev semen z droni;
- **Spremljanje pridelka in fenotipizacija:** droni in zemeljski roboti, opremljeni s kamerami in senzorji, ocenjujejo strukturo krošnje, vlažnost in zdravje rastlin;
- **Pletje in škropljenje:** roboti z vizualnim vodenjem zaznavajo in odstranjujejo plevel ali natančno nanašajo pesticide;
- **Žetev:** od robotskih žetvenikov za žitne kulture do selektivnih robotskih pobiralcev za sadje in zelenjavo, ki uporabljajo umetno inteligenco in vizualne sisteme;
- **Upravljanje rastlin:** robotski sistemi opravljajo naloge, kot so obrezovanje in vezanje vrvi;
- **Upravljanje tal in vode:** roboti upravljajo namakanje in zbirajo vzorce tal za usmerjanje gnojenja;
- **Večnamenski sistemi:** modularni ali integrirani roboti, ki opravljajo več funkcij;
- **Govedoreja:** roboti avtomatizirajo molžo, krmljenje in zbiranje jajc, pogosto s funkcijami za spremljanje zdravja;
- **Rastlinjaki in vertikalno kmetijstvo:** roboti upravljajo sajenje, pregledovanje, škropljenje, obrezovanje in žetev.

Ključne tehnologije v kmetijski robotiki

Uporaba KR je odvisna od več podpornih tehnologij [Ref.1]:

- **GNSS in RTK (Real-Time Kinematic) navigacija** za visoko natančno avtonomno mobilnost;
- **Senzorji** za zbiranje podatkov o okolju, tleh in pridelkih;
- **Računalniški vid** za odkrivanje pridelkov, škodljivcev in bolezni;
- **Brezpilotna letala (UAV)** in zemeljske platforme za zaznavanje in izvajanje nalog;
- **Aktuatorji in robotske roke** za izvajanje mehanskih operacij, kot so žetev ali škropljenje;
- **Internet stvari (IoT)** za povezljivost v realnem času, integracijo podatkov senzorjev in daljinsko upravljanje;
- **Umetna inteligenca (UI)** za interpretacijo podatkov, sprejemanje odločitev in izboljšanje natančnosti avtomatizacije.



ENOTA 2 – TEHNOLOGIJE, VKLJUČENE V KMETIJSKO ROBOTIKO I: GPS, RTK NAVIGACIJA IN SENZORJI

Uvod

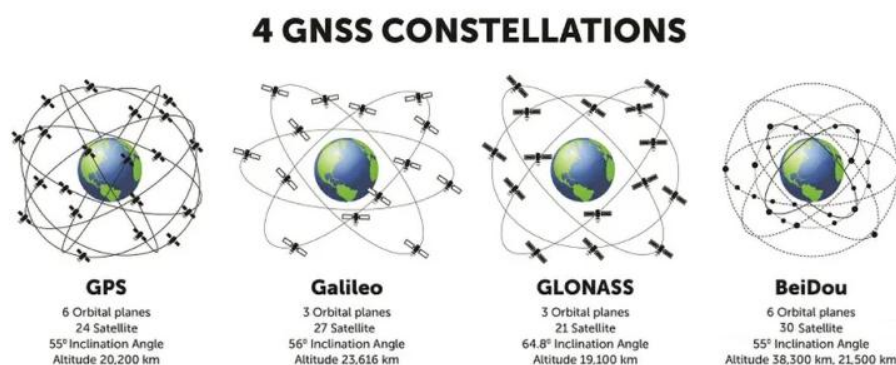
Robotski sistemi v kmetijstvu so odvisni od natančne geolokacije in bogatih podatkov o okolju. V vsebini te enote preučujemo ključne podporne tehnologije, vključno s satelitskimi navigacijskimi sistemi (GPS in RTK) za pozicioniranje in široko paleto senzorjev za spremljanje parametrov tal, pridelkov in okoljskih pogojev. Te tehnologije tvorijo hrbtenico avtonomnih kmetijskih operacij in odločanja.

Tehnologije geolokacije

Satelitski navigacijski sistemi omogočajo avtonomno geolokacijo prek signalov, ki jih oddajajo sateliti. Ti sistemi, skupaj znani kot **Globalni navigacijski satelitski sistemi (GNSS)**, vključujejo:

- **GPS** (Global Positioning System – iz ZDA);
- **GLONASS** (GLObal NAVigation Satellite System – iz Rusije);
- **BeiDou** (iz Kitajske);
- **Galileo** (iz Evropske unije).

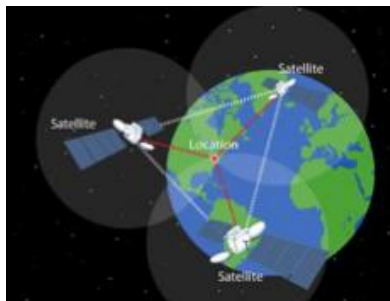
Vsak GNSS ima specifične parametre (**Error! Reference source not found.**), kot so število satelitov, višina orbite in frekvenca signalov, ki vplivajo na natančnost pozicioniranja. Za kmetijske aplikacije, ki zahtevajo visoko natančnost, se pogosto kombinirajo signali iz več GNSS omrežij (npr. GPS + GLONASS).



Slika 2 : Štiri GNSS konstelacije (vir:Ref.7)



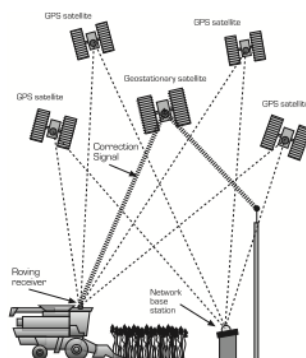
Triangulacija (Slika 3) je metoda, s katero GNSS sprejemnik določi položaj z izračunom razdalj od več satelitov. Vendar pa lahko standardne GPS-odčitke zaradi atmosferskih razmer ali zamikov signala prizadenejo napake v obsegu od 2 do 10 metrov.



Slika 3 : Triangulacijski postopek, ki ga uporablja GNSS (vir:Ref.8)

Za popravljanje teh napak in povečanje natančnosti se običajno uporabljata dva **korekcijska sistema**:

- **Diferencialni GPS (DGPS)**: doseže natančnost 0,1–1 m z uporabo korekcijskih podatkov iz bazne postaje (Slika 4);
- **Real-Time Kinematic (RTK)**: naprednejša oblika DGPS, ki zagotavlja natančnost 1–2,5 cm – idealna za robotske naloge, ki zahtevajo natančno pozicioniranje [Ref.10].



Slika 4 : Diferencialni GPS sistemi (Vir:Ref.9)

Avtonomna navigacija v kmetijstvu temelji na natančni geolokaciji. Obsega načrtovanje in izvajanje gibanj, tako da lahko robotske sisteme v celoti pokrijejo pridelke na določenem območju [Ref.11]. Ta proces vključuje:

- **Načrtovanje razporeditve polja** – oblikovanje prostorske strukture vrst pridelkov;
- **Načrtovanje poti** – optimizacija poti vozil in sodelovanje;
- **Načrtovanje gibanja** – določanje hitrosti in manevrskih poti;
- **Avtomatsko vodenje** – izvajanje kontrolnih sistemov za natančno gibanje.



Senzorji

Senzorji omogočajo kmetijskim robotom, da zaznavajo okolje in se nanj odzivajo [Ref.12 ;Ref.13 ;Ref.14]. Merijo **optične, akustične, elektromagnetne, dielektrične, mehanske in elektromehanske** lastnosti za **spremljanje okolja** (npr. vsebnost vode v tleh, fizikalne lastnosti tal, hrapavost površine, vsebnost organskih snovi v tleh...) ali **spremljanje pridelka in fenotipiranje** (npr. biomasa, indeks listne površine, vitalnost krošnje, stanje vode/hranil, pojav bolezni, napad plevela, donos, ...).

Najpogosteje uporabljeni senzorji v kmetijski robotiki so:

1. **Senzorji električne prevodnosti:** merijo navidezno električno prevodnost (ECa), ki je povezana s ključnimi lastnostmi tal, kot so tekstura, vsebnost vode, organska snov in slanost.
2. **LIDAR (Light Detection and Ranging):** z uporabo laserskih impulzov LiDAR ustvarja natančne 3D modele struktur pridelkov in polj. Uporablja se za oceno rasti pridelkov, odkrivanje bolezni in plevela, oceno zdravja rastlin, kartiranje vlažnosti tal in hranil, napovedovanje pridelka, podporo avtonomnemu žetju.
3. **Senzorji odbojnosti:** ti zaznavajo svetlobo, ki se odbija na različnih valovnih dolžinah od tal in vegetacije, da ocenijo biomaso rastlin in površino listov, stopnjo razvoja (fenologijo), simptome bolezni ali stresa, stanje hranil/vode v tleh in rastlinah.

Meritve odbojnosti temeljijo predvsem na valovnih dolžinah svetlobe v vidnem spektru (npr. modra, B; zelena, G; rdeča, R), rdečem robu in bližnjem infrardečem spektru (NIR).

Za oceno značilnosti rastlin se lahko kombinacije valovnih dolžin vključijo v **vegetacijski indeks (VI)**, tj. kombinacije valovnih dolžin, povezane z določeno biofizikalno značilnostjo [Ref.15].

Obstajata **dve vrsti senzorjev odbojnosti:**

- **Večspektralni** senzorji običajno merijo od 3 do 10 spektralnih pasov v vsakem pikslju slike, ki jo proizvajajo. Primeri teh pasov v takih senzorjih vključujejo zeleno (G), rdečo (R), modro (B), bližnjo infrardečo (NIR) itd.
 - **Hiper spektralni** senzorji lahko vsebujejo ≥ 200 neprekinjenih spektralnih pasov (na splošno med 400 in 2500 nm). Slike, ki jih proizvajajo, vsebujejo veliko več podatkov kot slike iz multispektralnih senzorjev in imajo večji potencial za zaznavanje razlik v značilnostih vegetacije ali tal (npr. kartiranje vrst, bolezni listov ...), vendar zahtevajo kompleksno analizo in interpretacijo podatkov, kar je lahko zahtevno.
4. **Toplotni senzorji:** ti zaznavajo infrardeče sevanje za oceno temperature, ki je tesno povezana s stanjem vode v rastlinah ali tleh. Uporabljajo se za zaznavanje vodnega stresa pridelkov in merjenje vsebnosti vode v tleh [Ref.16 ;Ref.17]. Meritve se lahko izvajajo z



infrardečimi termometri ali toplotnimi kamerami (tj. tehnologijo, ki sprejema infrardeče sevanje z infrardečimi detektorji in ga s sistemom za obdelavo signalov pretvori v video toplotne slike).

Indeksi vegetacije (VI)

Indeksi vegetacije so numerični kazalniki, pridobljeni iz podatkov senzorjev, ki se uporabljajo za oceno različnih pogojev rastlin ali tal.

VI na podlagi odbojnosti

Senzorji odbojnosti merijo odbojnost pridelka na več valovnih dolžinah, kar se uporablja za izračun indeksov vegetacije [Ref.15].

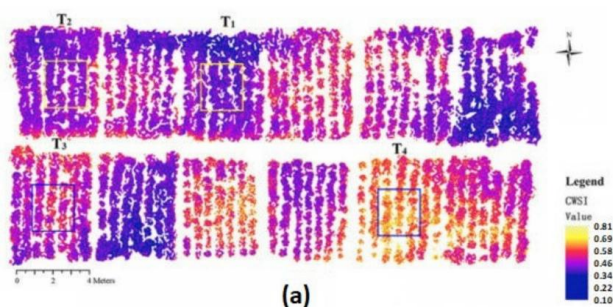
Najpogosteje uporabljeni vegetacijski indeksi in njihove formule so predstavljeni v Tabela 1 .

Dana značilnost ali stanje pridelka/tal ni povezano z nobenim VI, vendar so vegetacijski indeksi povezani s kompleksno interakcijo biofizikalnih značilnosti rastlin/tal.

Na primer, odbojnost tal lahko moti meritve odbojnosti, npr. pri meritvah od zgoraj navzdol. Kadar je to lahko problem, obstajajo indeksi, ki ločujejo odbojnost vegetacije od odbojnosti tal (npr. SAVI je boljši od NDVI).

VI na podlagi toplotnih meritev

Toplotni indeksi temeljijo na korelaciji med temperaturo rastlin in vodnim stresom. Najbolj razširjen je **indeks vodnega stresa pridelka (CWSI)**, ki oceni stanje vode v pridelku na podlagi temperature krošnje – običajno pridobljene s toplotnimi infrardečimi (TIR) kamerami, nameščenimi na brezpilotnih letalih [Ref.16 ;Ref.17].



Slika 5 : Zemljevid CWSI bombažnega polja, ki so ocenjeni na podlagi temperature krošnje bombaža, izmerjene s TIR kamero na dronu (vir:Ref.17).



Tabela 1 : Indeksi vegetacije na podlagi meritev odbojnosti [vir:Ref.15 ; spremenjeno]

VI Family	Index	Wavebands
Plant biophysical indices	Difference Indices	$R_{800} - R_{680}$
		$R_{800} - R_{650}$
		R_{550}
		R_{700}^{-1}
		$\log(1/R_{737})$
	Simple Ratio	$R = R_{NIR}/R_{red}$
	Ratio Vegetation Index	$RVI = R_{red}/R_{NIR}$
	Difference Vegetation Index	$DVI = m \times R_{NIR} - R_{red}$
	Weighted Difference Vegetation Index	$WDVI = R_{NIR} - m \times R_{red}$
	Photochemical Reflectance Index	$PRI = (R_{531} - R_{570})/(R_{531} + R_{570})$
	Pigment-specific normalized difference	$PSNDc = (R_{800} - R_{470})/(R_{800} + R_{470})$
	Normalised Ratio Vegetation Index	$NRVI = (RVI - 1)/(RVI + 1)$
	Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + R_{red})$
	Green NDVI	$GNDVI = (R_{NIR} - R_{green})/(R_{NIR} + R_{green})$
	Red Edge NDVI	$NDRE = (R_{NIR} - R_{red\ edge})/(R_{NIR} + R_{red\ edge})$
	Corrected NDVI	$NDVIC = NDVI \times (1 - ((R_{MIR} - R_{MIR\ min})/(R_{MIR\ max} - R_{MIR\ min})))$
	Transformed Vegetation Index	$TVI = (NDVI + 0.5)^{1/2}$
	Corrected Transformed Vegetation Index	$CTVI = [(NDVI + 0.5)/(NDVI + 0.5)]^m (NDVI + 0.5)^{1/2}$
	Perpendicular Vegetative Index	$PVI = (R_{NIR} - aR_{red} - b)/(1 + a^2)^{1/2}$
	Wide Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = (0.1R_{NIR} - R_{red})/(0.1R_{NIR} + R_{red})$
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = (R_{NIR} - R_{red})(1 + L)/(R_{NIR} + R_{red} + L)$	
Modified Soil Adjusted Vegetation Index	$MSAVI = (2 \times (R_{NIR} + 1) - ((2 \times R_{NIR} + 1)^2 - 8 \times (R_{NIR} - R_{red})))^{1/2}/2$	
Transformed Soil Adjusted Vegetative Index	$TSAVI = a(R_{NIR} - aR_{red} - b)/(R_{red} + aR_{NIR} - ab)$	
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5(R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + 6R_{red} - 7.5R_{blue} + 1)$	
VI Family	Index	Wavebands
Plant biophysical indices	Two-band Enhanced Vegetation Index	$EVI2 = 2.5(R_{NIR} - R_{red})/(R_{NIR} + 2.4 \times R_{red} + 1)$
	Triangular Vegetative Index	$TVI = 0.5[120(R_{750} - T_{550}) - 200(R_{670} - R_{550})]$
	Specific Leaf Area Vegetation Index	$SLAVI = R_{NIR}/(R_{red} + R_{MIR})$
	Global Environmental Monitoring Index	$GEMI = \eta \times (1 - \eta \times 0.25) - [(R_{red} - 0.125)/(1 - R_{red})]$ $\eta = (2 \times (R_{NIR}^2 - R_{red}^2) + 1.5 \times R_{NIR} + 0.5 \times R_{red})/(R_{NIR} + R_{red} + 0.5)$
	Canopy Structure Index	$CSI = 2sSR - sSR^2 + sWI^2$ $sSR = (R_{800}/R_{680} - 1)/(R_{800}/R_{680} - 1)_{max}$ $sWI = (R_{900}/R_{1180} - 1)/(R_{900}/R_{1180} - 1)$
	Visible Atmospherically Resistant Indices	$VARI_{green} = (R_{green} - R_{red})/(R_{green} + R_{red})$ $VARI_{red\ edge} = (R_{red\ edge} - R_{red})/(R_{red\ edge} + R_{red})$
	Plant Senescence Reflectance Index	$PSRI = (R_{690} - R_{400})/R_{750}$
Leaf or canopy chlorophyll indices	Chlorophyll Indices	$CI_{green} = (R_{NIR}/R_{green}) - 1$ $CI_{red\ edge} = (R_{NIR}/R_{red\ edge}) - 1$
	Normalized Pigment Chlorophyll Ratio Index	$NPCI = (R_{660} - R_{460})/(R_{660} + R_{460})$ $NPCI = (R_{680} - R_{430})/(R_{680} + R_{430})$
	Modified Chlorophyll and Reflectance Index	$MCARI = [(R_{700} - R_{470}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})] \times (R_{700}/R_{670})$
Water Content Indices	Water Balance Index	$WBI = R_{770}/R_{900}$ or R_{905}/R_{980}
	Normalized Difference Water Content	$NDWI = (R_{800} - R_{660})/(R_{800} + R_{660})$
	Shortwave Infrared Water Stress Index	$SIWSI = (R_{1628} \text{ to } R_{1652}) - (R_{841} \text{ to } R_{876})/(R_{1628} \text{ to } R_{1652}) + (R_{841} \text{ to } R_{876})$
	Relative Water Content	$RWC = R_{1483}/R_{1600}$ $RWC = R_{1100}/R_{1430}$

R = odbojnost pri različnih valovnih dolžinah ali valovnih pasovih; Rred, Rgreen, Rblue = odbojnost v vidnem rdečem, zelenem in modrem valovnem pasu; RNIR, RMIR = odbojnost v bližnjem in srednjem infrardečem valovnem pasu; m = naklon črte gola tla.



ENOTA 3 – TEHNOLOGIJE, POVEZANE S KMETIJSKO ROBOTIKO II: SISTEMI STROJNEGA VIDA IN BREZPILOTNA LETALA

Uvod

Sistemi za strojno vid (MVS) in brezpilotna letala (UAV) so temeljne tehnologije v kmetijski robotiki. MVS omogočajo robotom zaznavanje in interpretacijo okolja, medtem ko UAV zagotavljajo zračne platforme za opazovanje in posredovanje. Ta orodja podpirajo natančno kmetijstvo, saj omogočajo natančno zbiranje podatkov in ciljno usmerjeno delovanje.

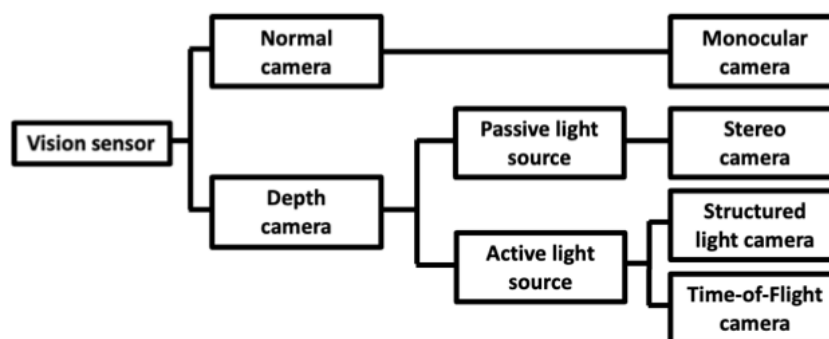
Sistemi za strojni vid (MVS)

MVS je sposobnost računalnika, da zazna okolje podobno kot človeško oko. Človeško oko je omejeno v svoji sposobnosti zaznavanja svetlobe, saj ima odzivni razpon od 390 nm do 770 nm. Kamere pa lahko zaznavajo širši razpon valovnih dolžin, vključno z infrardečimi in rentgenskimi žarki.

V kmetijstvu lahko MVS podpira številne procese, vključno z **odstranjevanjem plevla, odkrivanjem bolezni, nanašanjem pesticidov, spremljanjem stanja vode/hranil, žetvijo, sortiranjem, štetjem, ocenjevanjem pridelka, klasifikacijo tal in navigacijo robotov** [Ref.18].

MVS se lahko razčleni na 3 korake:

- **Pridobivanje slik**, ki vključuje zbiranje podatkov visoke ločljivosti z uporabo RGB kamer, infrardečih senzorjev ali strukturiranih virov svetlobe (Slika 6);
- **Obdelava slik**, ki pretvarja in izboljšuje surove podatke z zmanjšanjem šuma, tehnikami popraviljanja in predobdelavo;
- **Razvrščanje slik**, kjer se podatki analizirajo z algoritmi strojnega učenja ali globokega učenja, da se pridobijo uporabne informacije.

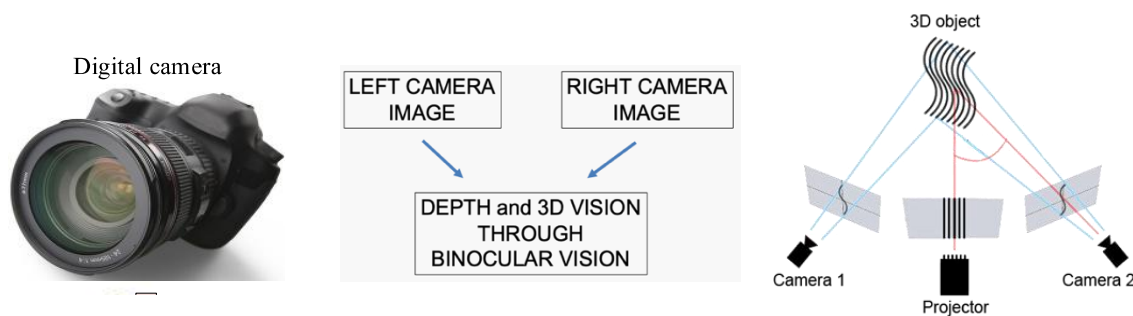


Slika 6 : Razvrstitev sistemov za strojni vid (Vir:Ref.19)



Vrste senzorjev za vid

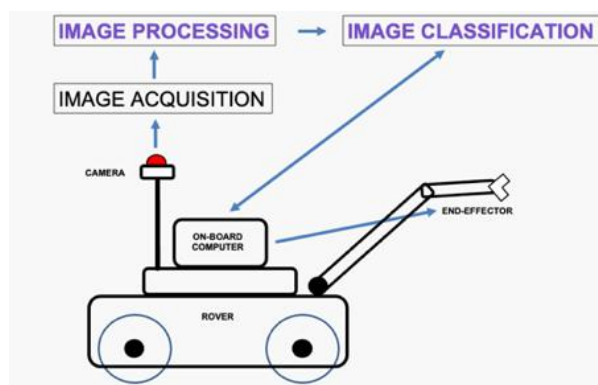
- **Monokularne kamere** zajemajo slike v vidnem spektru (RGB). So poceni in kompaktne, vendar imajo omejeno zaznavanje globine in so neučinkovite v okoljih s slabo osvetlitvijo (Slika 7 a);
- **Stereo kamere** uporabljajo dva objektivna za simulacijo zaznavanja globine prek razlike v sliki. Zagotavljajo boljše informacije o globini kot monokularni sistemi, vendar so občutljive na spremembe teksture in zahtevajo več računalniške moči (Slika 7 b);
- **Kamere s strukturirano svetlobo** projicirajo znane vzorce na predmete in uporabijo njihovo deformacijo za izračun globine (Slika 7 c). So učinkovitejše na površinah z nizko teksturo, vendar manj zanesljive na prostem zaradi motenj sončne svetlobe ali odbojnih s površin;
- **Kamere Time-of-Flight (ToF)** oddajajo infrardečo svetlobo in merijo čas vrnitve, da ustvarijo globinske zemljevide. Kombinirajo zaznavanje globine v realnem času z 2D-slikanjem, vendar so drage in manj natančne v svetlih zunanjih okoljih.



Slika 7 : Vrste vizualnih senzorjev. a) digitalna kamera; b) struktura stereo kamere; c) kamere s strukturirano svetlobo (Vir:Ref.19)

Dodatne tehnologije slikanja, integrirane v MVS, vključujejo multispektralne in hiperspektralne kamere (obravnavane v enoti 2), termično slikanje, rentgenske žarke, slikanje s teraherčnimi valovi in nastavljive filtre s tekočimi kristali. Ta orodja izboljšujejo sposobnost sistema za zaznavanje subtilnih sprememb v zdravju rastlin, vlažnosti ali notranjih napakah [Ref.18].

Programske komponente v MVS obdelujejo analizo slik, klasifikacijo in komunikacijo z robotskimi aktuatorji za odzivne ukrepe na terenu (Slika 8).



Slika 8 : Primer osnovnega sistema strojnega vida nad robotom (primer z monokularno kamero)

Brepilotna letala (UAV)

UAV-ji, splošno znani kot **droni**, so avtonomna ali daljinsko vodena letala, ki se v kmetijstvu uporabljajo za nadzor in aktivne operacije [Ref.20].

Uporaba v kmetijstvu

- **Kartiranje/merjenje:** 3D-modeliranje polj;
- **Spremljanje pridelka:** spremljanje zdravja, stresa in rasti;
- **Natančno škropljenje:** ciljno nanašanje kemikalij;
- **Upravljanje namakanja:** prepoznavanje območij s pomanjkanjem vode [Ref.21 ;Ref.22 ;Ref.23 ;Ref.24].

Ključne značilnosti UAV

Konfiguracija letalske konstrukcije:

- **Večrotorski droni:** kvadrokopterji, heksakopterji, oktokopterji – primerni za podrobne inšpekcije;
- **Droni s fiksnimi krili:** boljši za dolge razdalje in kartiranje velikih površin;
- **Hibridni VTOL:** združujejo prednosti vertikalnega vzleta in fiksnih kril.

Izbira konfiguracije je odvisna od konkretne kmetijske naloge: majhne kmetije ali vinogradi lahko dajejo prednost večrotorjem za podrobne preglede, medtem ko velike kmetije, ki pridelujejo poljščine, pogosto dajejo prednost dronom s fiksnimi krili ali hibridnim dronom za kartiranje in spremljanje velikih površin [Ref.20].

Materiali in struktura:

- **Lahki kompoziti** za vzdržljivost leta;
- **Odpornost na vremenske vplive** za težke razmere na terenu;
- **Modularna zasnova** za enostavno zamenjavo tovara.

Lahki kompoziti: Večina kmetijskih brezpilotnih letal uporablja ogljikova vlakna, stekleno vlakno ali napredne polimerne kompozite za svoje okvire, da zmanjšajo težo in hkrati ohranijo strukturno togost. Lahki materiali omogočajo daljše letenje in boljšo manevrsko sposobnost.



Robustnost in odpornost proti vremenskim vplivom: Ker se kmetijske dejavnosti pogosto izvajajo v prašnih, vlažnih in včasih deževnih razmerah, so okvirji zaščiteni pred vlago in prahom. Robustni okvirji in zaščitna ohišja pomagajo zagotoviti zanesljivo delovanje tudi v manj idealnih vremenskih razmerah.

Modularnost: Kmetijski UAV-ji so pogosto zasnovani z modularnimi komponentami, tako da se lahko tovor (kamere, senzorji, razpršilni sistemi) enostavno pritrdi, zamenja ali nadgradi. Hitro snemljiva pritrčila in standardizirani prostori za tovor pospešijo vzdrževanje in ponovno konfiguracijo.

Pogon in pristajanje:

- **Električni motorji** z litijevimi baterijami;
- **Motorji na gorivo** (redki, vendar se uporabljajo za visoko vzdržljivost);
- **Pristajalno podvozje:** fiksno, zložljivo ali zaščiteno.

Večina kmetijskih dronov, zlasti večrotornih, uporablja visoko učinkovite brezkrtačne elektromotorje (BLDC) v kombinaciji z litij-polimernimi (Li-Po) ali litij-ionskimi baterijami. Ti zagotavljajo zadostno moč in hkrati zmanjšujejo potrebo po vzdrževanju. Kmetijski droni običajno dajejo prednost trajanju leta in stabilni oskrbi z energijo, da lahko nosijo težje tovore (npr. multispektralne kamere ali škropilne posode).

Večrotorji: Pogosto uporabljajo preproste drsne noge ali pristajalno podvozje, ki zagotavljajo dovolj prostora za kamere in tovor. Nekateri imajo zložljive noge, ki omogočajo 360° vrtenje kamere brez ovir.

Zaščitne strukture: Zaradi občutljivih senzorjev na krovu okvirji pogosto vključujejo blažilce udarcev ali vibracij, ki ščitijo notranjo elektroniko med vzletu, pristanku ali nepričakovanimi udarci.

Integracija in namestitvev tovora:

- **Senzorji;**
- **Razpršilni sistemi;**
- **Dozatorji zrnatega materiala.**

Upravljanje z energijo in namestitvev elektronike:

- **Ohišje elektronike;**
- **Upravljanje kablov;**
- **Porazdelitev teže.**

Ohišje elektronike: Letalski krmilniki, GPS-enote, inercialne merilne enote (IMU), procesorji in komunikacijski moduli so pogosto nameščeni v zaščitnih, klimatiziranih oddelkih. Zaščita pred elektromagnetnimi motnjami in okoljska tesnitev (npr. konformni premaz na tiskanih vezjih) izboljšujejo zanesljivost.



Značilnosti prekomernosti, varnosti in zanesljivosti:

- **Več motorjev/rokov v večrotorjih;**
- **Dvojni GPS, več IMU in redundantni letalski krmilniki;**
- **Izogibanje trkom in zaznavanje objektov.**

Ergonomija in uporabnost na terenu:

- **Enostavna zamenjava baterij in dostop za vzdrževanje;**
- **Prevoz in shranjevanje.**

Standardi in skladnost:

- **Skladnost z letalskimi predpisi;**
- **Trajnost in upoštevanje življenjskega cikla.**



ENOTA 4 – TEHNOLOGIJE, KI SE UPORABLJAJO V KMETIJSKI ROBOTIKI III: PLATFORME, ROKE, INTERNET STVARI, UMETNA INTELIGENCA IN PROGRAMSKA OPREMA

Uvod

Kmetijski roboti delujejo s kombinacijo mehanske strojne opreme, inteligentne obdelave in povezljivosti podatkov. Ta enota proučuje strukturne platforme, ki podpirajo robotske sisteme, mehanske roke in končne efektorje, ki so v neposrednem stiku s pridelki, ter podporne digitalne tehnologije: internet stvari (IoT), umetno inteligenco (AI) in robotsko programsko opremo.

Robotske platforme

Robotske platforme so mobilne ali stacionarne osnove, ki podpirajo avtomatizacijo kmetijstva. V odprtem poljedelstvu se morajo platforme prilagajati neenakomernemu terenu, ohranjati stabilnost in zmanjševati zbitost tal. Med njimi so: **mobilni roboti** za delovanje na polju (Slika 9 a) in **stacionarne platforme** za rastlinjake ali vertikalne kmetije v zaprtih prostorih (Slika 9 b). V zaprtih prostorih so platforme pogosto stacionarne, zasnovane za omejene in nadzorovane prostore [Ref.23].



Slika 9 : a) Mobilni robot za delovanje na polju (vir: Ref. 25); b) stacionarni robot zaprtem prostoru (vir: freepik.com)

Ključne značilnosti kmetijskih platform so:

- **prilagodljivost terenu:** platforme morajo biti zasnovane z ustrezno oddaljenostjo od tal, vzmetenjem in vleko, da ohranijo mobilnost in stabilnost;
- **avtonomna navigacija:** mnogi kmetijski roboti za navigacijo z minimalnim človeškim posredovanjem uporabljajo GPS, senzorje, kamere in programsko opremo;
- **upravljanje z energijo:** platforme potrebujejo učinkovite vire energije in upravljanje (baterije, zamenljive ali s polnjenjem na sončno energijo; motorji z notranjim zgorevanjem ali hibridni sistemi);
- **odpornost na vremenske vplive;**



- **modularna zasnova ohišja:** za opravljanje več nalog;
- **velikost in odtis:** dimenzije in teža morajo omogočati učinkovito gibanje med vrstami pridelkov/sadovnjakov, hkrati pa zmanjševati utrjevanje tal in poškodbe pridelkov.

Vzbujevalniki

Vzbujevalniki so naprave, ki pretvarjajo energijo v mehansko gibanje. V kmetijski robotiki so vzbujevalniki bistveni za pogon komponent, kot so kolesa, roke in orodja.

Glavni tipi uporabljenih vzbujevalnikov so:

- **Električni vzbujevalniki** – znani po visoki natančnosti, hitrem odzivu in majhnih vzdrževalnih potrebah;
- **Hidravlični vzbujevalniki** – zmožni zagotavljati visoko moč, primerni za težka opravila, kot so oranje ali dvigovanje velikih bremen;
- **Pnevmatska pogonska naprava** – lahka in stroškovno učinkovita, običajno se uporablja za manjša, ponavljajoča se gibanja.

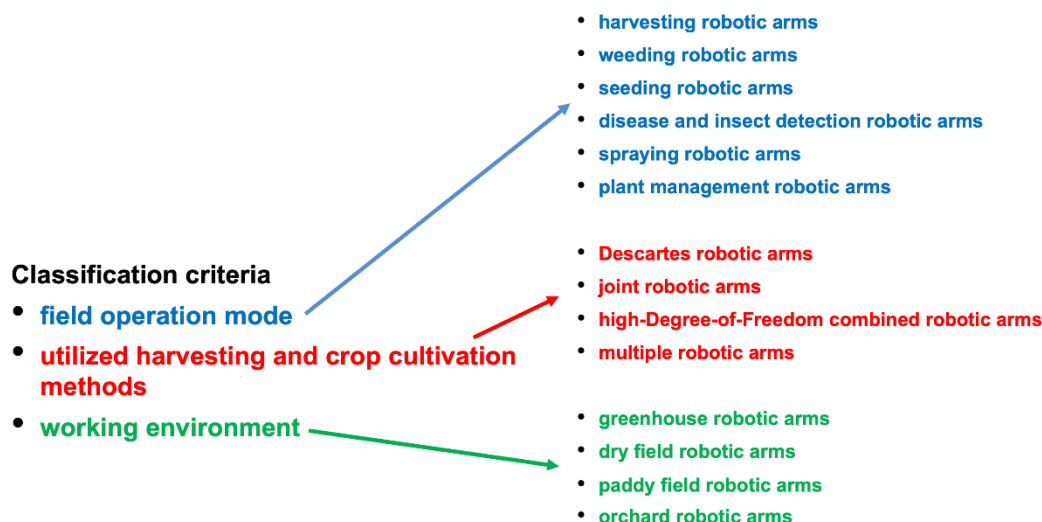
Ključne lastnosti vzbujevalnikov:

- **Trajnost in mehanska trdnost;**
- **Gladko in stabilno gibanje;**
- **Vgrajeni sistemi povratnih informacij**, kot so kodirniki ali senzorji tlaka, ki robotu pomagajo prilagajati gibanje v realnem času;
- **Energetska učinkovitost;**
- **Združljivost z mikroprocesorskim krmiljenjem**, ki omogoča avtomatizacijo in koordinacijo z drugimi robotskimi komponentami [Ref.26 ;Ref.27].



Robotske roke

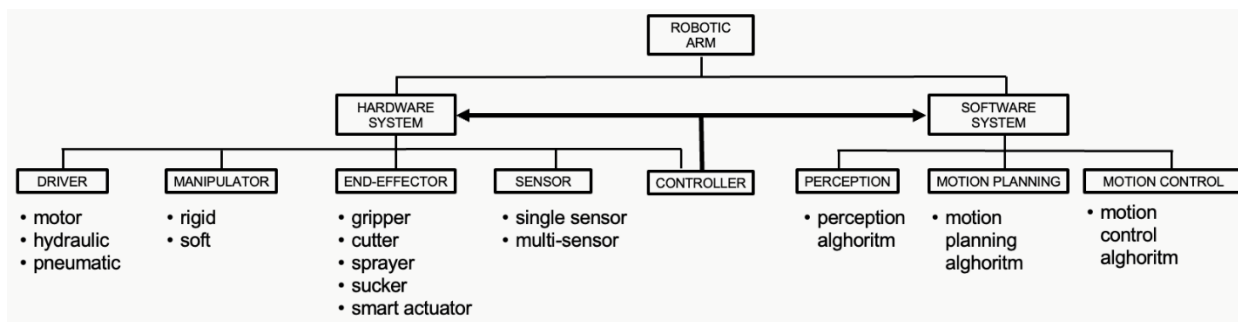
Robotske roke posnemajo gibanje človeških rok in se uporabljajo za nadomestitev ročnega dela v kmetijstvu. Razvrstitev robotskih rok je prikazana v Sliki 10 .



Slika 10 : Klasifikacijski kriteriji za robotske roke

Tipična robotska roka je sestavljena iz treh glavnih komponent (Slika 11):

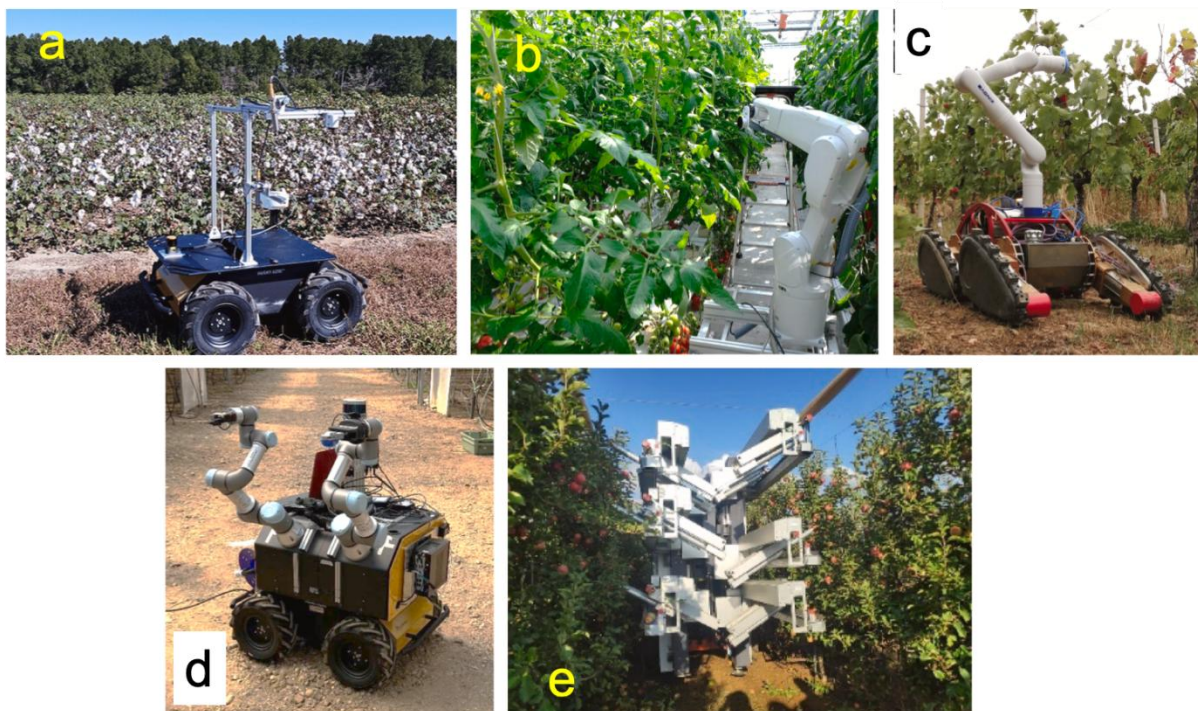
- **Pogon:** vzbujevalnik, ki poganja gibanje;
- **Manipulator:** premična struktura, podobna človeški roki;
- **Končni efektor:** orodje, ki fizično deluje na pridelke.



Slika 11: Komponente robotske roke (vir:Ref.27 ; spremenjeno)

Manipulatorji so lahko:

- **Trdni**, sestavljeni iz sklepov in povezav v konfiguracijah. Ti omogočajo strukturirano gibanje za posebne naloge pozicioniranja in usmerjanja (Slika 12);
- **Mehki**, izdelani iz prožnih materialov. Ti omogočajo večjo prilagodljivost in so idealni za občutljive operacije. Posebej so primerni za pobiranje krhkih pridelkov, kot so paradižniki, jagode ali solata, kjer je ohranjanje celovitosti ključnega pomena (Slika13).



Slika 12 : Vrste togih manipulatorjev. a) kartezijanski (Vir:Ref.28); b) artikuliran (Vir:Ref.29); c) cilindričen (Vir:Ref.30); d) dvojno cilindričen (Vir:Ref.31); e) večkratno cilindričen (Vir:Ref.32)



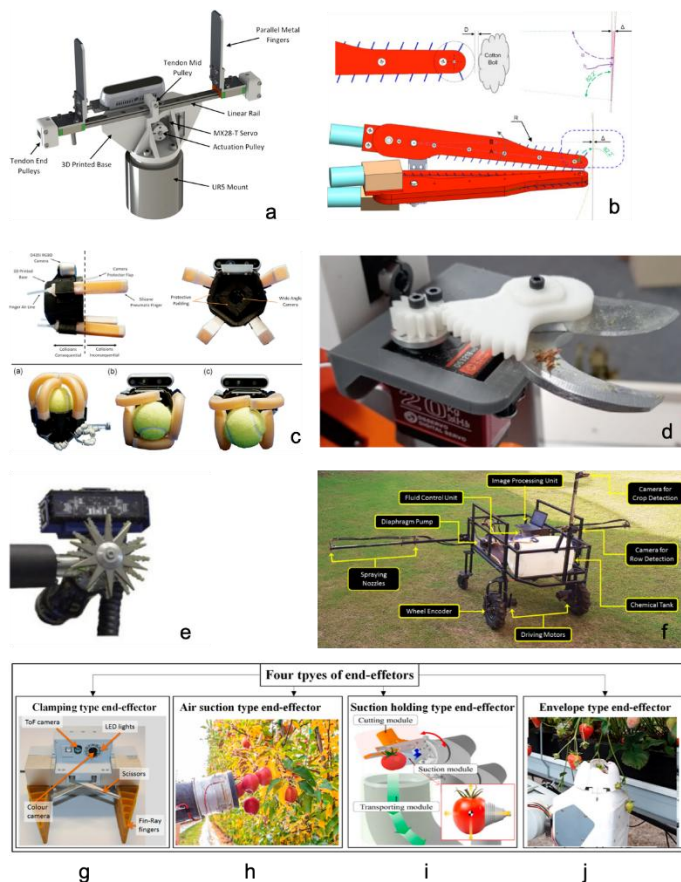
Slika13 : Primer mehkega manipulatorja (vir:Ref.33)

Končna orodja (Slika14) so nameščeni na koncu robotskih rok in vključujejo [Ref.27 ;Ref.28 ;Ref.29 ;Ref.30 ;Ref.31 ;Ref.32 ;Ref.33 ;Ref.34]:

- **prijemala:** odlikujejo jih premični prsti in nastavljiva sila prijemanja, so izjemno primerna za nežno prijemanje in prevoz pridelkov;
- **rezalniki:** opremljeni so z rezilnimi noži ali škarjami, odlični so za natančno obrezovanje vej rastlin ali pobiranje pridelkov;
- **škropilniki:** opremljeni so s specializiranimi šobami in naprednimi krmilnimi sistemi, uporabljamo jih za natančno pršenje in oprasovanje;



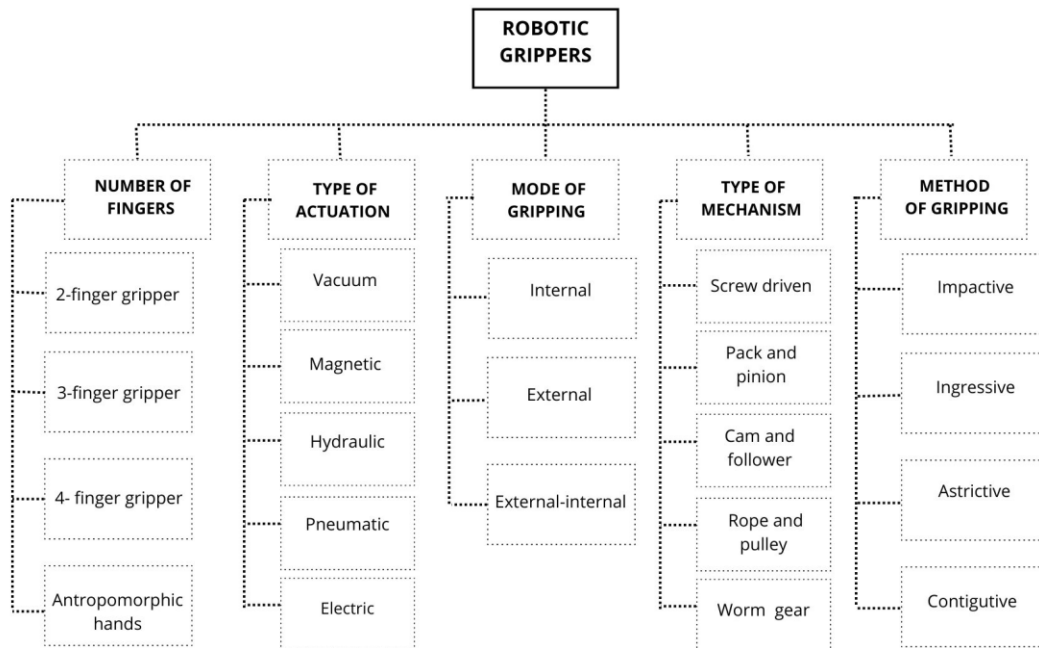
- **sesalniki:** delujejo na principu vakuumske podtlake in so še posebej učinkoviti za ravnanje z gladkim in lahkim sadjem in zelenjavo;
- **pametni vzbujevalniki:** so visoko prilagodljivi in občutljiva končna orodja, ki uporabljajo najsodobnejše materiale, na primer zlitine s spominsko obliko, in principe iz mehke robotike. Sposobni so se prilagoditi različnim oblikam in teksturam z minimalnim tveganjem poškodovanja izdelka (sadja, zelenjave, idr.).



Slika 14 : Končna orodja, oblika in tipi. a) trdi prijemalec z vzporednimi prstnimi tetivami (vir:Ref.35); b) trdi prijemalec z zatiči in prsti (vir:Ref.36); c) mehki prijemalec s silikonskimi pnevmatskimi prsti (vir:Ref.35); d) rezalnik s škarjami (vir:Ref.37); e) rezalnik z vrtljivim rezilom (vir:Ref.38); f) škropilnik s kamerami (vir:Ref.39); g) sponka (vir:Ref.40); h) sesalnik zraka (vir:Ref.40); i) končno orodje tipa sesalno-držalo (vir:Ref.40); j) ovojni tip (vir:Ref.40).



Končna orodja: prijemala (Slika 15)



Slika 15: Razvrstitev prijemal po različnih strategijah razvrščanja (Vir:Ref.41 ; spremenjeno)

Robotske roke: ključne značilnosti [Ref.27]

- **lahki materiali:** ogljikova vlakna, aluminijeve zlitine, močno trdne plastike;
- **optimalne prostostne stopnje (DoF):** manipulatorji v kmetijstvu pogosto potrebujejo 4–7 DoF za fleksibilnost. Več DoF lahko izboljša manevriranje okoli listja, plodov in kompleksnih rastlinskih struktur, kar omogoča dostop do težko dostopnih območij;
- **visoka pozicijska natančnost:** natančnost je bistvena, da se prepreči poškodovanje pridelkov, plodov ...;
- **integrirana končna orodja:** končna efektorja (prijemala, rezila...) morajo biti nežni, a varni. Pogosto vključujejo senzorje sile, taktilne senzorje ali vizualno povratno informacijo, da se med ravnanjem ne poškoduje kakovost pridelkov;
- **enostavno čiščenje in vzdrževanje;**
- **odpornost proti koroziji in UV-žarkom;**
- **vgrajen sistem za vidno zaznavanje in umetna inteligenca** za natančno prepoznavanje, izbiranje in ravnanje s pridelki.



Senzorji [Ref.27]

- Senzorji so naprave, ki zaznavajo in merijo različne informacije v zvezi z gibanjem, položajem, silo, navorom in temperaturo kmetijskih robotskih rok;
- Senzorji so običajno nameščeni na različnih sklepih ali končnih orodjih robotskega roka;
- Nekateri so nameščeni tudi neodvisno, da nadzorujejo in krmilijo gibanje in delovanje roke.
- Podatki iz teh senzorjev se lahko integrirajo v krmilni sistem robotskega roka, da se doseže natančno krmiljenje gibanja, avtonomna navigacija in interakcija z zunanjim okoljem.

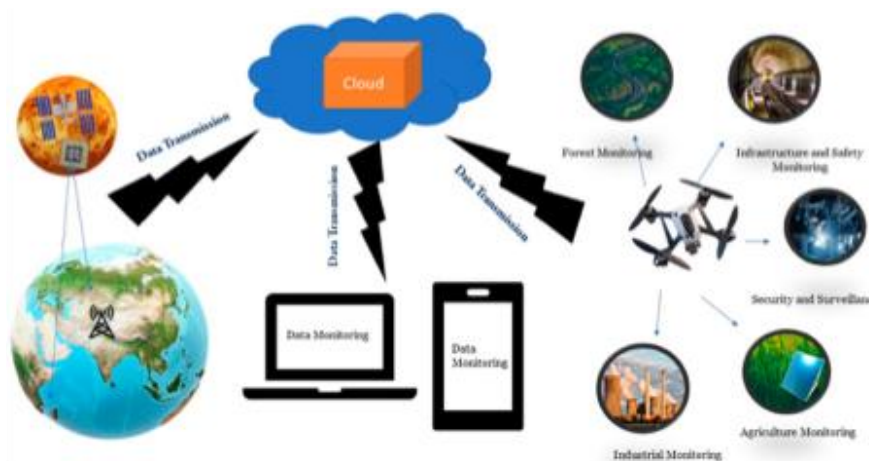
Krmilniki [Ref.27]

Krmilniki se uporabljajo za upravljanje računalniških zahtev za zaznavanje, načrtovanje gibanja in krmiljenje.

Internet stvari (IoT)

IoT povezuje kmetijske robotske naprave prek interneta ali lokalnih omrežij (Slika16), kar omogoča izmenjavo podatkov v realnem času, daljinsko spremljanje in usklajevanje sistemov. V kmetijski robotiki IoT olajšuje komunikacijo senzorjev, sledenje strojev in integracijo s programsko opremo za upravljanje kmetij [Ref.11] [Ref.27].

IoT izboljšuje operativno učinkovitost, podpira sledljivost in skladnost s standardi varnosti hrane ter omogoča informirano odločanje s povezovanjem robotov z oblaknimi platformami, vremenskimi storitvami in podatki s terena.



Slika16 : IoT v robotiki (Vir:Ref.42)



Umetna inteligenca (UI)

Opredelitev: zmožnost računalnikov ali drugih strojev, da kažejo ali simulirajo inteligentno vedenje; področje študija, ki se ukvarja s tem. V kasnejši rabi tudi: programska oprema, ki se uporablja za opravljanje nalog ali proizvodnjo rezultatov, za katere se je prej menilo, da zahtevajo človeško inteligenco, zlasti z uporabo strojnega učenja za ekstrapolacijo iz velikih zbirk podatkov (vir: Oxford English Dictionary).

Vloga UI v kmetijski robotiki

UI omogoča strojem, da opravljajo naloge, za katere je bila tradicionalno potrebna človeška inteligenca, z uporabo algoritmov, usposobljenih na velikih zbirkah podatkov. V kmetijstvu UI izboljšuje odločanje, zaznavanje in nadzor [Ref.43].

Modeli strojnega učenja in globoke nevronske mreže omogočajo robotom prepoznavanje predmetov (npr. sadja, plevela, bolezni), načrtovanje poti in prilagajanje njihovega vedenja glede na okoljske razmere. UI omogoča tudi analitiko za napovedovanje donosa in zmanjševanje tveganja. Koordinacija več robotov, inteligenca množice (swarm intelligence) in neprekinjeno učenje so trendi v kmetijskih sistemih, ki temeljijo na UI.

Programski sistemi v kmetijski robotiki

Programska oprema je operativna hrbtenica kmetijske robotike. Podpira vse vidike delovanja robota – od nizko ravninskega nadzora gibanja do visoko ravninskega upravljanja kmetije.

Robotske platforme običajno vključujejo:

- **Robotske operacijske sisteme (ROS)** za upravljanje strojne opreme in vmesne programske opreme;
- **Programsko opremo za zaznavanje** za interpretacijo podatkov senzorjev in vizualnih podatkov;
- **Platforme umetne inteligence in strojnega učenja** za sprejemanje odločitev;
- **Orodja za navigacijo in načrtovanje poti;**
- **Vzbujevalnike in krmilne sisteme;**
- **Analitiko v oblaku in shranjevanje podatkov;**
- **GIS in orodja za kartiranje** za prostorsko načrtovanje;
- **Programsko opremo za upravljanje kmetij** za integracijo z operativno logistiko;
- **Simulacijska orodja** za testiranje in optimizacijo zmogljivosti pred uvedbo.



ENOTA 5 – PREDNOSTI, IZZIVI IN PRIHODNJI TRENDI V KMETIJSKI ROBOTIKI

Uvod

Kmetijska robotika (KR) hitro spreminja kmetijstvo z večjo učinkovitostjo in natančnostjo, hkrati pa prinaša gospodarske, etične in tehnične izzive. Ta enota preučuje trenutne prednosti in omejitve KR, poudarja dokaze iz dejanskih poskusov in predstavlja ključne tehnološke trende, ki oblikujejo njeno prihodnjo evolucijo.

Prednosti kmetijske robotike

KR prinaša številne prednosti za kmetijske dejavnosti [Ref.44 ;Ref.45]:

- **večja učinkovitost:** večja hitrost in natančnost pri delovanju;
- **zmanjšanje stroškov:** manjša odvisnost od delovne sile in optimizirana raba virov;
- **okoljske koristi:** optimizirana raba in zmanjšana poraba vode, gnojil in pesticidov; zmanjšana zbitost tal;
- **večje dobro počutje živali v intenzivnih živinorejskih obratih:** prilagojeni režimi krmljenja in napajanja posameznih živali, hitrejše prepoznavanje bolnih živali, hitrejše in individualizirano dajanje zdravil, bolj humani veterinarski postopki;
- **izboljššan donos, produktivnost in donosnost:** učinkovitejša raba vložkov, zmanjšani stroški dela;
- **delo 24 ur na dan in v različnih pogojih:** omogoča bolj dosledne in intenzivne kmetijske prakse;
- **celoletna proizvodnja:** v kmetijskih sistemih z nadzorovanim okoljem avtomatizacija podpira celoletno proizvodnjo, kar pomaga stabilizirati preskrbo s hrano in cene.

Dokazi iz eksperimentalnih študij primerov

- **Eksperimentalni rezultati** na pravih kmetijah so pokazali naslednje **prednosti uporabe robotike:**
 - Povečanje donosa (1,7–50 %);
 - Prihranek pesticidov (9,9–95 %);



- Prihranek vode (14–75 %);
 - Prihranek dela (37,75–62 %);
 - Povprečna prihranek stroškov (17–40 %);
 - Prihranek goriva (22,15–55 %).
- Tako te študije primerov kažejo znatno zmanjšanje stroškov pridelave in izboljšano okoljsko učinkovitost [Ref.46].

Pomanjkljivosti in izzivi kmetijske robotike

Kljub svojemu potencialu se KR sooča z znatnimi ovirami [Ref.45]:

- Visoka začetna naložba;
- Omejena prilagodljivost;
- Tehnična zapletenost in vzdrževanje;
- Pomanjkanje človeške intuicije;
- Potreba po specializiranem usposabljanju;
- Vpliv na zaposlovanje;
- Odvisnost od tehnologije;

Širši izzivi

KR se sooča z več izzivi [Ref.44]

Gospodarski: Kapitalsko intenzivne tehnologije KR lahko ovirajo dostop malih kmetov in omejujejo inovacije na področju nekonvencionalnih pridelkov ali živalskih proizvodov. Države z manjšo tehnološko zmogljivostjo se lahko soočajo tudi s konkurenčnimi slabostmi.

Politični: Uvedba tehnologije bi lahko prenesla moč na kapitalsko močne kmete, kar bi povečalo neenakost in spremenilo politično dinamiko na podeželju. Prav tako bi lahko spremenila vpliv ponudnikov storitev in odnose med kmeti in dobavitelji.

Socialno in kulturno: Zmanjšano povpraševanje po ročnem delu lahko zmanjša možnosti na podeželju, kar vodi do socialne izključenosti ali podzaposlenosti. Hkrati lahko avtomatizacija prinese spremembe v načinu življenja, kot so več časa za družino, prožnost dela in manj fizičnega napora. Spremenijo se lahko tudi kulturne percepcije hrane in narave.

Varnost: Robotski sistemi so ranljivi za vdore, sabotažo in vohunjenje, kar vzbuja zaskrbljenost glede kibernetike odpornosti v kmetijstvu.

Etični: Pojavljajo se razprave o odtujenosti ljudi od naravnega sveta, pravičnosti pri porazdelitvi dela in vlogi družbe pri zagotavljanju zaposlitvenih možnosti. Hkrati lahko KR odpravi “3D delovna mesta” (dolgčasna, umazana, nevarna), kar izboljša varnost in dostojanstvo v kmetijstvu.



Politika: Obstaja nujna potreba po regulativnih okvirih, ki usmerjajo uvajanje KR, obravnavajo izgubo delovnih mest in pojasnjujejo odgovornosti na področjih, kot so odgovornost, lastništvo podatkov in odprtostni standardi.

Prihodnji trendi v kmetijski robotiki

Trendi oblikujejo naslednjo generacijo kmetijske robotike, ki združuje inženirske dosežke s cilji trajnosti [Ref.46 ;Ref.47 ;Ref.48]:

Popolna avtomatizacija kmetije: Kmetije prihodnosti bodo morda popolnoma avtomatizirane, roboti pa bodo opravljali pripravo tal, sajenje, pletje, spremljanje, žetev in še več.

Modularni roboti: Kmetije bodo verjetno vlagali v centralni robotski sistem z zamenljivimi moduli za opravila, kot so setev, obrezovanje in žetev, kar bo povečalo stroškovno učinkovitost in prilagodljivost.

Natančno sajenje: Roboti prihodnosti bodo izboljšali natančnost sejanja, saj bodo dinamično prilagajali poti glede na vrsto tal in neravnine površine.

Napredna umetna inteligenca in analitika: Roboti, integrirani s prediktivno umetno inteligenco, bodo izboljšali odkrivanje bolezni, napovedovanje pridelka in pravočasne intervencije, s čimer bodo povečali produktivnost in trajnost.

Mehka in biološko navdihnjena robotika: Mehki prijemaalniki in prilagodljivi mehanizmi, navdihnjeni z organizmi, kot so deževniki ali rastlinske vitice, bodo omogočali nežno ravnanje s pridelki. Ti modeli ponujajo prednosti v smislu varnosti, prilagodljivosti in nežnega ravnanja.

Trajnostna robotika: Prihodnji sistemi bodo podpirali regenerativno kmetijstvo in podnebju prijazne prakse, pri čemer bodo združevali tehnologije z majhnim vplivom na okolje in visoko natančne podatke.

Kooperativna robotika in pristopi množičnosti

Namesto da bi se zanašali na velike, drage stroje, je prihodnost morda v **množici majhnih, cenovno dostopnih robotov**, ki sodelujejo pri opravljanju nalog – s čimer se izboljšuje prilagodljivost, odpornost in dostopnost za manjše kmetije [Ref.49].

Vrste kooperativne robotike [Ref.48]:

- Sodelovanje med človekom in robotom (človek-robot);
- Kooperativna brezpilotna letala (multi-UAV);
- Kooperativna brezpilotna kopenska vozila (multi-UGV);
- Hibridne ekipe brezpilotnih letalnih in brezpilotnih kopenskih vozil (UAV/UGV);
- Sodelovanje pri manipulaciji z večrokovnimi sistemi.



Sodelovanje med človekom in robotom: Roboti pomagajo pri opravilih, kot so škropljenje, žetev, prepoznavanje ciljev, prevoz. Strategije sodelovanja vključujejo: potrditev strojnega vida s strani uporabnika; sodelovanje z izogibanjem tveganjem; vmesnik za prenos znanja; koordinacija gibanja; prepoznavanje dejavnosti; varnostna vprašanja.

Multi-UAV sistemi: Skupine dronov (**Error! Reference source not found.**) izvajajo nadzor namakanja, kartiranje plevela, spremljanje polj, zatiranje škodljivcev, odkrivanje bolezni, pregledovanje zdravstvenega stanja pridelkov. Centralizirani ali porazdeljeni sistemi upravljanja optimizirajo dodeljevanje nalog in uporabo baterij. Strategije sodelovanja vključujejo: nadzor pokritosti; posamezne naključne naloge; centralni sistem upravljanja robotov; porazdeljeno načrtovanje misij; centralizirano načrtovanje poti; nadzor formacije.

Večnamenski sistemi UGV: Kopenska vozila delujejo v ekipah za setev, presaditev, žetev, upravljanje plevela in spremljanje. Sestavljena so iz vozila MASTER, ki sprejema odločitve in pošilja ukaze vozilu SLAVE, ki sledi vozilu master in oddaja njegov status. Strategije sodelovanja vključujejo: vodja-sledilec; master-slave; centralni sistem upravljanja robotov; načrtovanje poti; uporaba informacij, shranjenih na kontrolnih točkah; nadzor formacije.

Hibridni sistemi UAV/UGV: Brezпилotni letalniki opravljajo nadzor, medtem ko kopenski roboti delujejo na podlagi zbranih podatkov (

Slika 18). Sodelujejo prek združevanja zemljevidov, podpore navigaciji in usklajenih ukrepov za odkrivanje bolezni, gnojenje, zatiranje škodljivcev, kartiranje, upravljanje pridelkov in stanje pridelkov. Strategije sodelovanja vključujejo: obisk lokacij, ki jih je identificiral UAV, s strani UGV; združevanje podatkov zemljevidov; prevoz UAV s strani UGV; združevanje podatkov o pridelkih; vodja-sledilec; nadzor formacije.

Sodelovalno upravljanje: Robotske roke, nameščene na istih ali ločenih platformah, sodelujejo v realnem času pri opravljanju nalog, kot so žetev, sajenje ali namakanje, z uporabo usklajenih gibalnih vzorcev in specializiranih konfiguracij (npr. zrcalne ali večkratne nastavitve DoF).

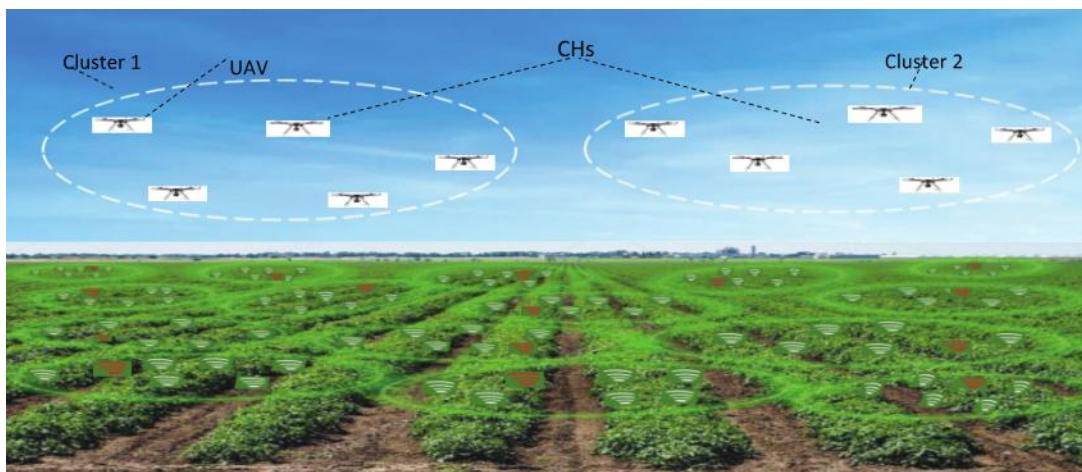
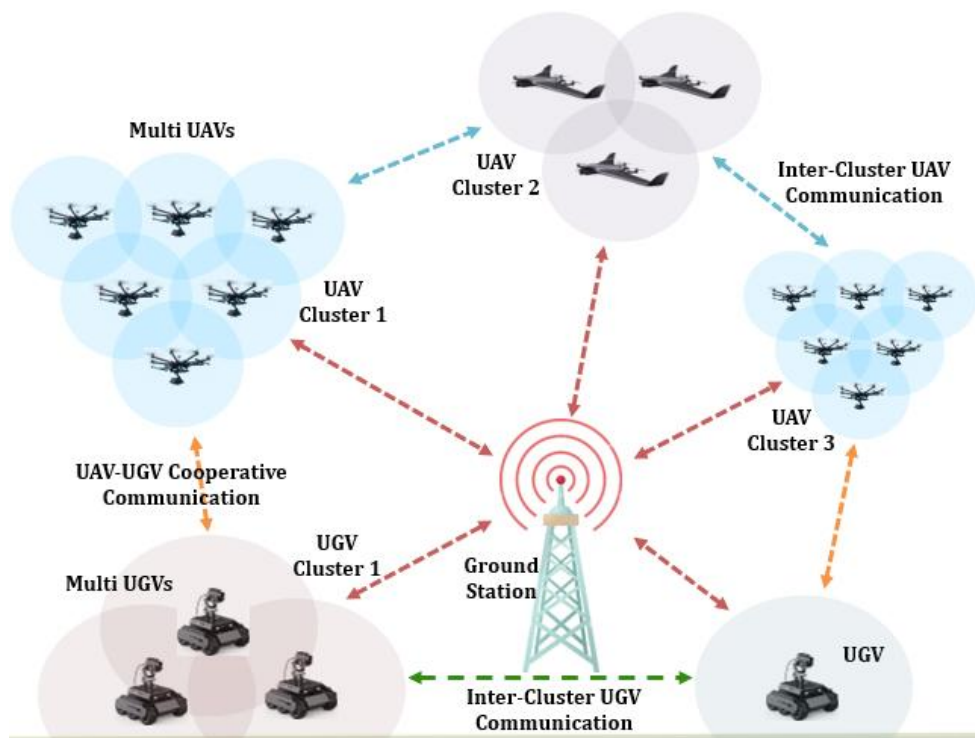


Figure 17: Multi-UAV: več UAV v vsakem sklopu izmenjuje informacije z glavnim UAV (CH) (Vir: Ref. 50)



Slika 18: Komunikacijski okvir za sodelovalne sisteme z več UAV in več UGV (vir:Ref.51)

SWOT analiza sodelovalne robotike

Naslednja analiza opisuje prednosti, slabosti, priložnosti in nevarnosti, povezane s kooperativnimi robotskimi sistemi v kmetijstvu [Ref.49]:

- **Prednosti:** prilagodljivost, fleksibilnost nalog, energetska učinkovitost, odpornost na napake;
- **Slabosti:** kompleksnost koordinacije, vhodni stroški in odvisnost od programske opreme;
- **Priložnosti:** izboljššan dostop za majhne kmetije, trajnostna integracija in nadomestitev delovne sile v okoljih, izpostavljenih tveganjem;
- **Nevarnosti:** tveganja za kibernetiko varnost, regulativne vrzeli in sprejemljivost za javnost.

Te inovacije utirajo pot k bolj prilagodljivim, inteligentnim in vključujočim kmetijskim sistemom.



ENOTA 6 – KLJUČNI GOSPODARSKI DEJAVNIKI, KI VPLIVAJO NA SPREJEMANJE KMETIJSKE ROBOTIKE

Uvod

Uporaba kmetijske robotike (KR) ni odvisna le od tehnične izvedljivosti, temveč tudi od gospodarskih in organizacijskih modelov. Ta enota raziskuje različne poslovne modele za uporabo, ključne gospodarske dejavnike pri naložbah in delovanju ter praktične elemente, ki vplivajo na odločanje pri sprejemanju robotike v kmetijstvu.

Modeli za sprejetje KR

Obstajajo štiri glavni modeli za sprejemanje tehnologij AR [Ref.52]:

- **Izdelava robota:** ta model je običajno omejen na raziskovalne ustanove ali komercialne razvijalce in za večino kmetov ni izvedljiv;
- **Neposredni nakup:** kmetje kupujejo komercialne kmetijske robote (CAR) neposredno od proizvajalcev. Ta model se pogosto sooča z izzivi, kot so visoki stroški, omejeno znanje uporabnikov o vzdrževanju in slaba prepoznavnost blagovne znamke za nova podjetja;
- **Najem:** kmetom omogoča, da tehnologijo kratkoročno preizkusijo in prilagodijo pogodbe sezonskim potrebam. Običajno ga uporabljajo podjetja s specializiranimi, preizkušenimi izdelki;
- **Naročnina:** model, ki temelji na storitvah in je osredotočen na dolgoročne odnose in skupno uporabo robotov med kmetijami. Kmetje se lahko odjavijo, če storitve ne izpolnjuje njihovih potreb.

Vsak model prinaša različna gospodarska tveganja, ovire za naložbe in zahteve po podpori, kot so subvencije za zmanjšanje stroškov.

Ključni elementi, upoštevani v ekonomski oceni

Za temeljito ekonomsko analizo AR je treba oceniti [Ref.53]:

- **Kapitalski izdatki:** začetni nakupi ali stroški naročnine, namestitvev, podpora infrastruktura in specializirana orodja za vzdrževanje;
- **Operativni izdatki:** tekoči stroški, kot so poraba energije, usposobljena delovna sila, vzdrževanje, usposabljanje, zavarovanje in logistika;
- **Vir prihodkov:** izboljšana produktivnost, zmanjšanje odpadkov in nižji stroški dela;
- **Viri financiranja:** državne subvencije, programi EU (npr. SKP, Obzorje Evropa) ali zasebne naložbe;
- **Tržni dejavniki:** povpraševanje po izdelkih, izboljšanih z robotiko, in konkurenčnost cen;
- **Upravljanje tveganj:** obravnavanje tehničnih napak, vrzeli v usposabljanju in nestabilnosti trga.



Ocena izvedljivosti uvedbe

Ocena izvedljivosti vključitve robotskih rešitev v kmetijske sisteme zahteva uravnoteženje tehničnih, gospodarskih in organizacijskih dejavnikov [Ref.54].

S **tehničnega** vidika je treba pri oceni upoštevati, ali je razpoložljiva infrastruktura primerna za podporo robotskih tehnologij, na primer potrebo po stabilni oskrbi z električno energijo, digitalni poveztljivosti in integraciji senzorjev. Pomembno je tudi upoštevati, ali je delovna sila sposobna – ali se lahko usposobi – za upravljanje in vzdrževanje teh sistemov.

Z **gospodarskega** vidika so ključni elementi začetna naložba (kapitalski izdatki), ponavljajoči se stroški (operativni izdatki), pričakovani prihodki od produktivnosti in razpoložljivost finančne podpore, kot so programi lizinga ali javne subvencije.

Z **organizacijskega** vidika lahko uvedba robotike zahteva spremembe v rutini kmetije, strukturi delovne sile in postopkih odločanja. Odpor do novih tehnologij, pomanjkanje digitalnih veščin ali negotovost glede dolgoročnih koristi lahko omejijo izvedljivost.

Celovita ocena, ki združuje te tri razsežnosti, bo pomagala zagotoviti, da izbrana robotska rešitev ni le tehnično izvedljiva, ampak tudi gospodarsko trajnostna in operativno realistična za konkretne razmere na kmetiji.

Dejavniki, ki vplivajo na sprejetje KR

Na sprejemanje lahko vplivajo različni dejavniki (Slika 19), vključno s socioekonomskim ozadjem, ravno izobrazbe, zaznano uporabnostjo, enostavnostjo uporabe, velikostjo kmetije, razpoložljivostjo delovne sile, kulturnimi odnosi in digitalnimi veščinami [Ref.55]. Ovine, kot so pomanjkanje ozaveščenosti, strah pred izgubo delovnega mesta in negotovost glede donosa naložbe, lahko upočasnijo sprejemanje, tudi če je tehnologija na voljo.

Razumevanje in obravnavanje teh dejavnikov lahko izboljša sprejemanje in integracijo robotike v kmetijske sisteme.

Internal factors	Effect	External factors	Effect
• Farmer age	-	• Cooperation with neighbours	+
• Income	+	• Extension contacts	+
• Education	+	• Negative public opinion	-
• Agricultural experience	+		
• Full-time farming	+	• Price	-
• Technology awareness, interest	+	• Availability of technology	+
• Labour costs	+	• Availability of technical assistance	+
		• Compatibility with other equipments/software	+
• Farm size	+	• Labour scarcity	+
• Current use of other technologies	+	• Liability issues	-
• Renting out land	-	• Safety concerns	-
• Cooperative membership	+	• Ethical concerns	-
• Land ownership	+	• Concerns regarding data protection	-
		• Subsidies	+

+ positive
- negative

Slika 19: Dejavniki, ki vplivajo na sprejemanje AR (Vir:Ref.55)



SKLICI

- Ref.1 Botta, A., Cavallone, P., Baglieri, L., Colucci G., Tagliavini, L., Quaglia G.A. (2022). Pregled robotov, zaznavanja in nalog v natančnem kmetijstvu. *Appl. Mech.*, 3, 830–854. <https://www.mdpi.com/2673-3161/3/3/49>
- Ref.2 Cheng, C., Fu, J., Su, H., Ren, L. (2022). Nedavni napredek na področju kmetijskih robotov: prednosti in izzivi. *Machines* 11, 48. <https://doi.org/10.3390/machines11010048>
- Ref.3 Interesting Engineering (2024, 14. september). Kako lahko kmetijski roboti z umetno inteligenco izboljšajo kmetijstvo [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=aVcQp-WQbF0>
- Ref.4 Steven the Engineer (3. februar 2024). Agri-Robots: The Rise of Automation in Farming. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=X5D30XQOy2o>
- Ref.5 Global Tribune (29. avgust 2024). So roboti prihodnost kmetijstva? Kaj to pomeni za kmetijstvo. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=QJ41s13C7Qw>
- Ref.6 Fakulteta za inženirstvo, Univerza v Sidneyju (16. avgust 2023). Kmetijstvo z roboti. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=q7tFDw5SAAU>
- Ref.7 GNSS konstelacije. <https://mettatec.com/how-many-channels-does-a-gnss-receiver-need/>
- Ref.8 Oliveira, L.B., Zapella, M., Hunt, R. (2018). GPS in GLONASS Constellation za boljšo zanesljivost sinhronizacije časa. *The Journal of Engineering*, 15.
- Ref.9 Grisso, R., Alley, M., Heatwole, C. (2009). Orodja za natančno kmetijstvo. Globalni sistem za določanje položaja (GPS). Virginia Polytechnic Institute and State University, publikacija 442- 503.
- Ref.10 Kinematično pozicioniranje v realnem času. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Real-time_kinematic_positioning.
- Ref.11 Vougioukas, S.G. (2019). Kmetijska robotika. *Annu. Rev. Control Robot. Auton. Syst.*, 2, 365–392. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023617>
- Ref.12 Fountas, S., Mylonas, N., Malounas, I., Rodias, E., Santos, C.H., Pekkeriet, E. (2020). Kmetijska robotika za delo na polju. *Sensors*, 20, 2672. <https://doi.org/10.3390/s20092672M>
- Ref.13 Shaikh, F.K., Karim, S., Zeadally, S., Nebhen, J. (2022). Nedavni trendi v tehnologijah senzorjev, ki omogočajo internet stvari za pametno kmetijstvo. *IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL*, 9, 23, 23583-23598. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2022.3210154>.
- Ref.14 Incredible Agriculture (6. april 2023). NEPREGLEDNO! Kako SENSORJI v tehnologiji oblikujejo PAMETNO KMETIJSTVO: To morate videti! [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=v-8V0ZWkQkQ>



- Ref.15 Hatfield, J.L., Prueger, J.H., Sauer, T.J., Dold, C., O'Brien, P., & Wacha, K. (2019). Uporaba vegetativnih indeksov iz daljinskega zaznavanja v kmetijstvu: preteklost in prihodnost. *Izumi*, 4 (4), 71. <https://doi.org/10.3390/inventions4040071>
- Ref.16 Jackson, R.D., Idso, S.B., Reginato, R.J., Pinter, P.J. Jr. (1981). Temperatura krošnje kot indikator vodnega stresa pridelkov. *Water Res. Res.*, 17, 1133–1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>
- Ref.17 Quemada, C., Pérez-Escudero, J.M., Gonzalo, R., Ederra, I., Santesteban, L.G., Torres, N., Iriarte, J.C. (2021). Daljinsko zaznavanje za spremljanje vsebnosti vode v rastlinah: pregled. *Remote Sens.* 2021, 13, 2088. <https://doi.org/10.3390/rs13112088>.
- Ref.18 Thakur, A., Venu, S., Gurusamy, M. (2023). Obsežen pregled kmetijskih robotov s poudarkom na njihovih sistemih zaznavanja. *Računalniki in elektronika v kmetijstvu*, 212, 108146. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108146>.
- Ref.19 Wang, T., Chen, B., Zhang, Z., Li, H., Zhang, M. (2022). Uporaba strojnega vida v navigaciji kmetijskih robotov: pregled. *Računalniki in elektronika v kmetijstvu*, 198, 107085. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107085>
- Ref.20 Guebsi, R., Mami, S., Chokmani, K. (2024). Droni v natančnem kmetijstvu: celovit pregled uporabe, tehnologij in izzivov. *Droni*, 8, 686. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
- Ref.21 AFP News Agency (2023, 28. junij). Izrael za kmetijstvo prihodnosti uporablja drone, umetno inteligenco in velike podatkovne zbirke | AFP. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=lzaaSIEDg7s>
- Ref.22 Freethink (27. oktober 2022). Robot Sniper obdela 500.000 rastlin na uro z 95 % manj kemikalij | Challengers [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=sV0cR_Nhac0
- Ref.23 Billy Li (22. junij 2021). Sodelovalna robotska roka za obiranje grozdja – Start the Smart Orchard [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=hVvs6_Wx2HM
- Ref.24 Vision+Robotics (2. november 2020). Robot za pobiranje paprike Sweeper. [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=k-HX8ISpG4k>
- Ref.25 Coxworth, B. (2016). Kmetijski robot bi lahko bil izjemen na svojem področju. <https://newatlas.com/thorvald-agricultural-robot/46039/>
- Ref.26 Xie, D., Chen, L., Liu, L., Chen, L., Wang, H. (2022). Aktuatorji in senzorji za uporabo v kmetijskih robotih: pregled. *Machines*, 10, 913. <https://doi.org/10.3390/machines10100913>
- Ref.27 Jin, T., Han, X. (2024). Robotske roke v natančnem kmetijstvu: Celovit pregled tehnologij, uporab, izzivov in prihodnjih možnosti. *Računalniki in elektronika v kmetijstvu*, 221, 108938. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108938>.



- Ref.28 Fue, K.G., Porter, W.M., Barnes, E.M., Rains, G.C. (2020). Obsežen pregled mobilne kmetijske robotike za delo na polju: poudarek na pobiranju bombaža. *AgriEng.*, 2 (1), 150-174; <https://doi.org/10.3390/agriengineering2010010>
- Ref.29 Rapado-Rincón, D., van Henten, E.J., Kootstra, G. (2023). Razvoj in evalvacija avtomatizirane lokalizacije in rekonstrukcije vseh plodov na paradižnikovih rastlinah v rastlinjaku na podlagi večvidnega zaznavanja in 3D sledenja več objektov. *Biosyst. Eng.*, 231, 78-91; <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.06.003>
- Ref.30 Vatauvuk, I., Vasiljević, G., Kovačić Z. (2022). Prediktivno krmiljenje modela delovnega prostora za škropjenje vinogradov z mobilnim manipulatorjem. *Kmetijstvo*, 12 (3), 381; ; <https://doi.org/10.3390/agriculture12030381>
- Ref.31 Wang, F., Urquizo, R.C., Roberts, P., Mohan, V., Newenham, C., Ivanov, A., Dowling R. (2023). Biološko navdihnjeno robotsko zaznavanje in delovanje za pobiranje mehkega sadja v vertikalnih rastnih okoljih. *Precis. Agric.*, 24 (3), 1072-1096; <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10000-4>
- Ref.32 Li, Y., Feng, Q., Li, T., Xie, F., Liu, C., Xiong Z. (2022). Napredek tehnologije pridobivanja ciljnih vizualnih informacij za robotsko pobiranje svežega sadja: pregled. *Agronomy*, 12 (6), 1336; <https://doi.org/10.3390/agronomy12061336>
- Ref.33 SoftGrippers za žetvene robote v kmetijstvu: prednosti in uporaba. <https://softgripping.com/discover/softgrippers-for-harvesting-robots-in-agriculture-benefits-and-applications/>
- Ref.34 Li, Y., Guo, Z., Shuang, F., Zhang, M., Li, X. (2022). Ključne tehnologije strojnega vida za robote za pletje: pregled in primerjava. *Računalniki in elektronika v kmetijstvu*, 196, 106880. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106880>
- Ref.35 Brown, J., Sukkarieh, S. (2021). Oblikovanje in ocena modularnega robotskega sistema za obiranje sliv z uporabo mehkih komponent, *J. Field Robot.*, 38 (2), 289-306; <https://doi.org/10.1002/rob.21987>
- Ref.36 Gharakhani, H., Thomasson, J.A., LU, Y. (2022). Končni efektor za robotsko pobiranje bombaža. *Smart Agric. Technol.*, 2, 100043; <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100043>
- Ref.37 Masood, M.U., Haghshenas-Jaryani, M. (2021). Študija o izvedljivosti robotskega pobiranja čilija. *Robotics*, 10 (3), 94; <https://doi.org/10.3390/robotics10030094>
- Ref.38 Van Marrewijk, B.M., Vroegindeweij, B.A., Gené-Mola, J., Mencarelli, A., Hemming, J., Mayer, N., Wenger, M., Kootstra G. (2022). Ocena robota za obrezovanje buksusa. *Biosyst. Eng.*, 214, 11-27; <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.12.001>
- Ref.39 Alam, M.S., Alam, M., Tufail, M., Khan, M.U., Güneş, A., Salah, B., Nasir, F.E., Saleem, W., Khan, M.T. (2022). TobSet: nov niz podatkov o tobaku in plevelu ter njegova uporaba za razprševanje



s pomočjo kmetijskih robotov na podlagi vizualnega zaznavanja. *Appl. Sci.*, 12, 1308; <https://doi.org/10.3390/app12031308>

Ref.40 Han, C., Lv, J., Dong, C.; Li, J.; Luo, Y., Wu, W., Abdeen, M.A. (2024), Klasifikacija, napredne tehnologije in tipične aplikacije končnega efektorja za robote za pobiranje sadja in zelenjave. *Kmetijstvo*, 14, 1310; <https://doi.org/10.3390/agriculture14081310>

Ref.41 Zhang, B., Xie, Y., Zhou, J., Wang, K., Zhang, Z. (2020). Najsodobnejši robotski prijemalniki, strategije prijemanja in krmiljenja ter njihove aplikacije v kmetijskih robotih: pregled. *Računalniki in elektronika v kmetijstvu*, 177, 105694. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694>

Ref.42 Ullo, S.L., Sinha, G.R. (2021). Napredek na področju IoT in pametnih senzorjev za daljinsko zaznavanje in kmetijske aplikacije. *Daljinsko zaznavanje*, 13, 2585. <https://doi.org/10.3390/rs13132585>

Ref.43 Wakchaure, M., Patle, B.K., Mahindrakar, A.K. (2023). Uporaba tehnik umetne inteligence in robotike v kmetijstvu: pregled. *Artificial Intelligence in the Life Sciences*, 3, 100057. <https://doi.org/10.1016/j.aillsci.2023.100057>.

Ref.44 Sparrow, R., Howard, M. (2021). Roboti v kmetijstvu: perspektive, vplivi, etika in politika. *Natančno kmetijstvo*, 22, 818–833. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09757-9>.

Ref.45 Bazargani, K. Deemyad, T. (2024). Vpliv avtomatizacije na kmetijstvo: priložnosti, izzivi in gospodarski učinki. *Robotics*, 13, 33. <https://doi.org/10.3390/robotics13020033>

Ref.46 Papadopoulos, G., Arduini, S., Uyar, H., Psiroukis, V., Kasimati, A., Fountas, S., (2024). Gospodarske in okoljske koristi digitalnih kmetijskih tehnologij v pridelavi poljščin: pregled. *Pametna kmetijska tehnologija* 8, 100441. doi: [10.1016/j.atech.2024.100441](https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100441)

Ref.47 Mahmud, M. S. A., Zainal Abidin, M. S., Abiodun Emmanuel, A., & Hasan, H. S. (2020). Robotika in avtomatizacija v kmetijstvu: sedanje in prihodnje uporabe. *Uporabe modeliranja in simulacije*, 4, 130–140. Pridobljeno iz http://arqiiipubl.com/ojs/index.php/AMS_Journal/article/view/130.

Ref.48 Armanini C., Junge, K., Johnson, P., Whitfield, C., Renda, F., Calsiti, M., Hughes, J. (2024). Mehka robotika od kmetije do vilic: uporabe v kmetijstvu in poljedelstvu. *Bioinspir. Biomim.*, 19, 021002. <https://doi.org/10.1088/1748-3190/ad2084>

Ref.49 Lytridis, C., Kaburlasos, V.G., Pachidis, T., Manios, M., Vrochidou, E., Kalampokas, T., Chatzistamatis, S. (2021). Pregled sodelovalne robotike v kmetijstvu. *Agronomija*, 11, 1818. <https://doi.org/10.3390/agronomy11091818>

Ref.50 Salam, A., Javaid, Q., Ahmad, M. (2021). Bio-navdihnjena identifikacija optimalnih ciljev na podlagi grozdov z uporabo več brezpilotnih letal v pametnem natančnem kmetijstvu. *International*



Journal of Distributed Sensor Networks, vol. 17 (7), 15501477211;
<https://doi.org/10.1177/15501477211034071>

Ref.51 Munasinghe, I., Perera, A.G., Deo, R.C. (2024). Celovit pregled sodelovanja med UAV in UGV: napredek in izzivi. *Journal of Sensor and Actuator Networks (JSAN)* 13(6), 81;
<https://doi.org/10.3390/jsan13060081>

Ref.52 Gil, G., Casagrande, D.E., Cortés, L.P., Verschae, R. (2023). Zakaj je uporaba robotike na kmetijah tako redka? Izzivi za uvedbo komercialnih kmetijskih robotov. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100069. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100069>

Ref.53 Lowenberg-DeBoer (2024). *Ekonomika kmetijske robotike*. V: *Napredek v kmetijsko-živilski robotiki* (van Henten, E. in Edan, Y., ur.), Burleigh Dodds Science Publishing, Cambridge, Združeno kraljestvo, <http://dx.doi.org/10.19103/AS.2023.0124.19>

Ref.54 Pedersen, S.M., Fountas, S., Have, H., Blackmore, B.S. (2006). Kmetijski roboti – sistemska analiza in ekonomska izvedljivost. *Precision Agriculture*, 7(4), 295–308.
<https://doi.org/10.1007/s11119-006-9014-9>

Ref.55 Degieter, M., De Steur, H., Tran, D., Gellynck, X., & Schouteten, J. J. (2023). Sprejemanje robotike in brezpilotnih letalnih naprav s strani kmetov: sistematični pregled. *Agronomy Journal*, 115, 2159–2173. <https://doi.org/10.1002/agj2.21427>