

30 NOVEMBER 2023



PRECISIALANDBOUW

PRAKTIJKKENNIS VOOR VOEDSEL EN GROEN PROJECT

RAPPORTAGE WERKPAKKET 3 - ROBOTISERING

PreciSIAlandbouw

Praktijkkennis voor Voedsel en Groen project

Regieorgaan SIA kenmerk: PVG.DZ20.PK.001

Auteurs

Saxion

Mark Reiling

Ard Westerveld

Lectoraat Smart Mechatronics and Robotics

Contactpersoon:

Mark Reiling – m.reiling@saxion.nl



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



Dit onderzoek is medegefinancierd door Regieorgaan SIA, onderdeel van de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en het ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit in het programma 'Praktijkkennis voor Voedsel en Groen'.



Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-NietCommercieel-GelijkDelen 4.0 Internationaal-licentie.

Samenvatting

In de eerste fase van het project hebben we verkend wat de state-of-the-art is op het gebied van autonome navigatie, onkruidherkenning en precisiebestrijding en waar de uitdagingen liggen. Er is gekozen om in dit werkpakket de focus te leggen op detectie en plaatsbepaling van onkruid. Precisiebestrijding en autonome navigatie zijn ondergebracht in de projecten “Onkruidbeheersing met Robots: Onkruidvrij in de Rij” en “Autonomous Agricultural Navigation (AAN)”.

We hebben gekozen voor een modulaire benadering, waarbij deelsystemen van verschillende partijen kunnen worden gecombineerd voor een bepaalde toepassing. Goede externe interfacing is daarmee een essentieel onderdeel geworden. Er is verkend hoe een gestandaardiseerde interface er uit zou moeten zien en wat de eisen voor de verschillende modules (deelsystemen) moeten zijn.

Voor de plantherkenningsmodule zijn de eisen dat deze onderscheid moeten kunnen maken tussen gewas en onkruid en plantspecifieke kenmerken moeten kunnen onderscheiden en daarvan de posities moeten kunnen meten. De reden hiervoor is dat de onkruiden in de rij die dicht op de gewassen staan, met name in het zaailingen stadium, het grootste probleem vormen. Hierdoor is het nodig om onderscheid te kunnen maken tussen onkruid en het gewas omdat de tool het gewas niet mag beschadigen en zal daarom deze moeten kunnen ontwijken. Afhankelijk van de onkruidverwijderingstool is het voor het nauwkeurig bestrijden van onkruid ook nodig om de positie van plantspecifieke delen zoals het steeltje of het groeipunt te bepalen. Zo is er in het Onkruidvrij in de Rij project gekozen voor een hitte-element die vooral effectief is wanneer het groeipunt kan worden aangestipt zodat in korte tijd veel warmte-energie wordt overgedragen.

Uit de verkenning van de state of the art sensoroplossingen voor plantherkenning kwam naar voren dat er geen kant-en-klare oplossing is voor een plantherkenningsmodule. Beschikbare systemen die er zijn, zijn ofwel volledig gesloten systemen die onderdeel zijn van een complete oplossing (niet-modulair), ofwel camera systemen zonder specifieke detectiesoftware. Er is er gekozen om uit beschikbare deelcomponenten zelf een ‘proof of principle’ (PoP) te ontwikkelen voor een plantherkenningsmodule. Hiervoor is ook onderzoek gedaan naar welke meetprincipes relevant kunnen zijn voor plantherkenning.

Er is een werkend systeem ontwikkeld om te laten zien hoe een dergelijke modulaire plantherkenningsmodule opgebouwd zou kunnen worden. Met deze module is het goed mogelijk gebleken om 1) gewas en onkruid te onderscheiden, 2) locatie van plantdetails nauwkeurig te kunnen bepalen en dit 3) als module op te bouwen zodat het goed te integreren valt met andere modules voor bijvoorbeeld modules voor precisie-onkruidverwijdering.

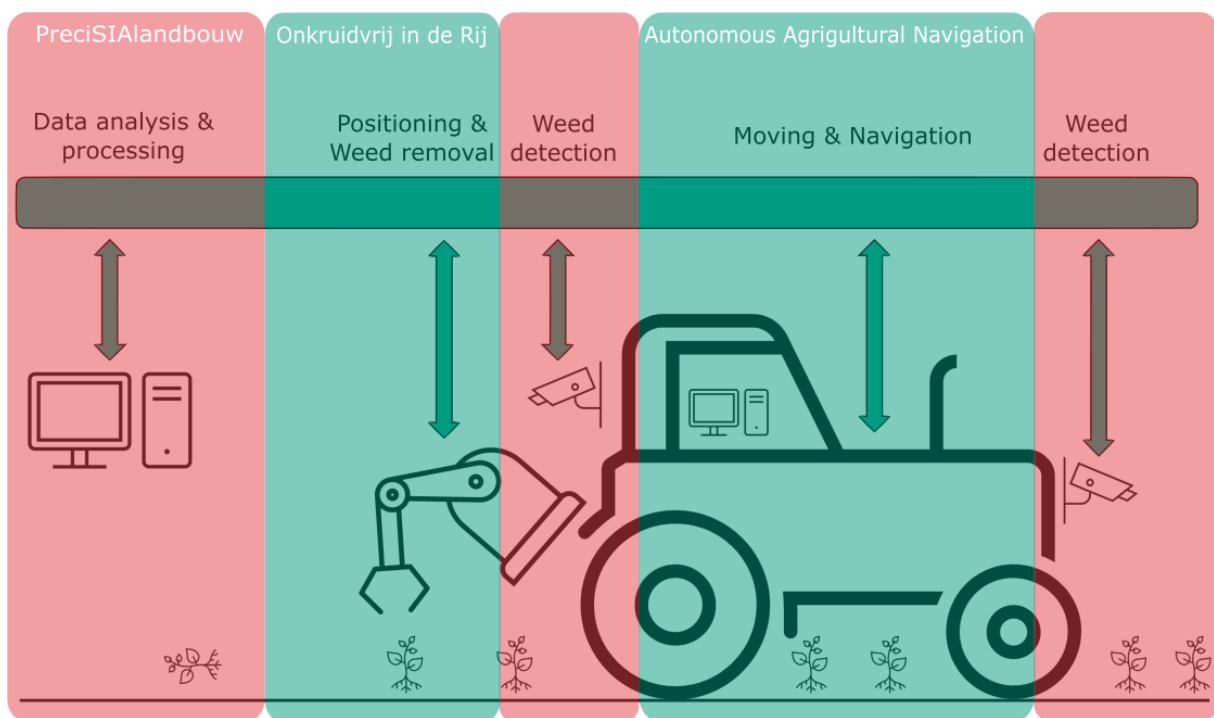
Uit dit onderzoek is gebleken dat het opbouwen van verschillende systemen in verschillende modules met goed gedefinieerde interfaces kan leiden tot een betere scheiding van functies en betere focus in verschillende projecten. Bovendien biedt dit de mogelijkheid om verschillende modules uit te wisselen en wordt het makkelijker om afhankelijk van een specifiek vraagstuk een agrarisch robot systeem op te bouwen uit verschillende, voor dat vraagstuk relevante modules.

Inhoud

Samenvatting	2
1. Inleiding.....	4
2. Modulaire benadering en interfacing	5
2.1 Werktuig- en sensorinterfaces van agrobots.....	5
3. Verkenning van state-of-the-art sensoroplossingen voor plantherkenning	8
3.1 Meetprincipes	8
3.1.1 NDVI	8
3.1.2 Multispectraal camera	8
3.1.3 3D meettechnieken.....	9
3.2 Geïntegreerde sensor oplossing voor plantherkenning en lokalisering	11
4. Ontwerp en realisatie van plantherkenningsmodule (PoP).....	13
4.1 Differentiatie tussen gewas en onkruid	13
4.2 Nauwkeurige plaatsbepaling op basis van plantdetails	14
4.3 Communicatie en bevestiging.....	15
5. Discussie.....	16
6. Conclusie en aanbevelingen	17
Literatuurlijst.....	18
Bijlage 1: Afstudeerverslag Sierd Waanders – The interfaces between the tool and an agrobot.....	19
Bijlage 2: Studentenverslag Project Mechatronisch Analyseren en Conceptualiseren (PMAC) – Vision & Manipulation for Precision Agriculture	62

1. Inleiding

Werkpakket 3 richt zich op de robotisering in dienst van kringlooplandbouw. In de eerste fase van het project hebben we verkend wat de state-of-the-art is op het gebied van autonome navigatie, onkruidherkenning en precisiebestrijding en waar de uitdagingen liggen. Op basis van deze verkenning hebben we in samenspraak met de stuurgroep besloten om ons te richten op onkruidherkenning. We hebben hiermee een heldere focus in dit werkpakket en hebben we een goede aansluiting met andere projecten die al lopen of in ontwikkeling zijn. In het RAAK-mkb project “Onkruidbeheersing met Robots: Onkruidvrij in de Rij” (NWO, 2020) wordt momenteel onderzoek gedaan naar precisiebestrijding. Er wordt daar een mechanische tool ontwikkeld om onkruid te verwijderen. Het rijden over de akker kwam ook als uitdaging naar voren. Om de focus binnen dit werkpakket beheersbaar te houden dit onderwerp ondergebracht in een separaat project “Autonomous Agricultural Navigation (AAN)” (NWO, 2022). In Figuur 1 zijn de verschillende functies van een robot voor agrarische toepassingen (agrobot) weergegeven in relatie tot de genoemde projecten.



Figuur 1 Schematisch overzicht van een autonome onkruidbestrijdingsrobot en de relatie tussen de onderzoeksprojecten.

Binnen werkpakket 3 richten we ons op detectie en plaatsbepaling van onkruid. Onkruidbestrijding in het zaailing stadium van het gewas is het belangrijkste. De onderzoeksvraag die we hebben opgesteld is:

Hoe kunnen we het beste (klein) onkruid detecteren en lokaliseren?

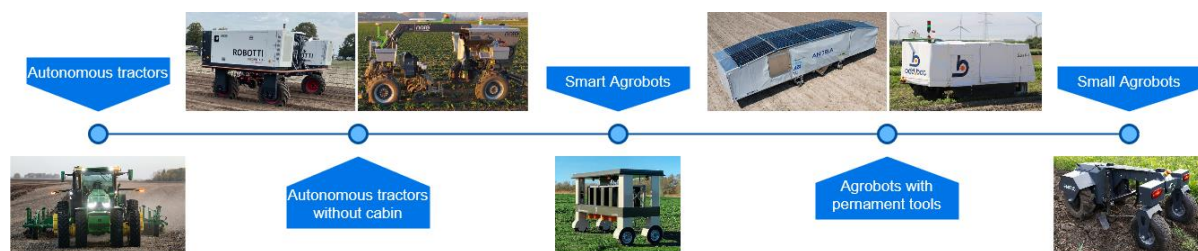
2. Modulaire benadering en interfacing

We hebben gekozen voor een modulaire benadering, waarbij deelsystemen van verschillende partijen kunnen worden gecombineerd voor een bepaalde toepassing. Op deze manier kunnen we de problemen van rijden, verwijderen en onkruiddetectie gescheiden houden en toch samen laten werken. Goede externe interfacing is daarmee een essentieel onderdeel geworden.

Het gaat dan om interfacing binnen een machine, bijvoorbeeld via ISOBUS/ISOXML, maar ook met externe systemen, zoals farmmanagement software en systemen zoals Akkerweb / Farmmaps. We hebben hiervoor sessies gehad met Agrirouter en Agroconnect. De conclusie daar was dat als we een commerciële oplossing kunnen vinden we echt naar de industriële standaarden en integratiemogelijkheden met externe systemen gaan kijken. Als we een prototype gaan ontwikkelen, dan wordt hier in eerste instantie minder nadruk op gelegd, omdat technieken als ISOBUS de ontwikkeling een lastiger kunnen maken.

2.1 Werktuig- en sensorinterfaces van agrobots.

Als eerste is er verkend wat de state-of-the-art in agrobots is en is er gekeken welke interfaces beschikbaar zijn voor werktuigen en sensoren. Het is mogelijk om deze agrobots te classificeren in 5 categorieën zoals weergegeven in Figuur 2.



Figuur 2 Agrobots onderverdeeld in categorieën. (bron: afstudeerverslag Sierd W. zie Bijlage 1)

De meeste agrobots zijn ontwikkeld om werktuigen uit te kunnen wisselen, alleen de agrobots in de categorie “Agrobots with permanent tools” zijn hiervoor niet geschikt. De mechanische interface voor de werktuigen zijn wel verschillend, de agrobots in de eerste 2 categorieën maken voornamelijk gebruik van een driepuntsophanging waarbij de andere categorieën voornamelijk een eigen ophangsysteem hebben ontwikkeld (zie Bijlage 1).

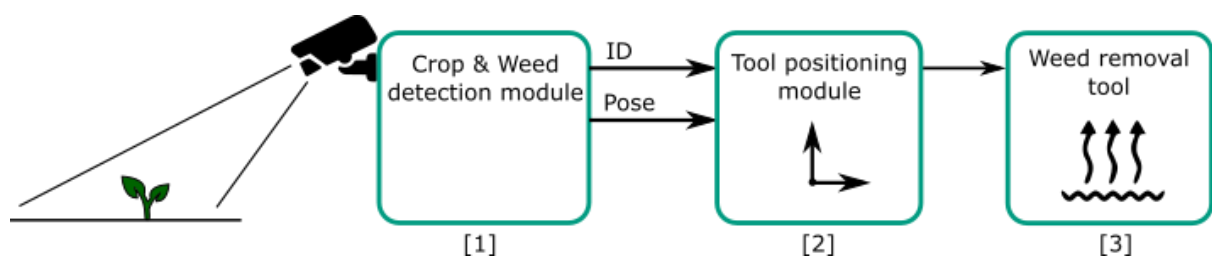
Voor het gebruik van precisie-onkruidbestrijding is onkruiddetectie nodig. In de verschillende categorieën zien we drie oplossingsrichtingen voor onkruiddetectie en onkruidverwijdering:

1. **Onkruiddetectie is onderdeel van het werktuig voor onkruidbestrijding.** Bij de Autonomous tractors, Autonomous tractors without cabin en de Small Agrobots zien we dat deze vooral werktuigdragers zijn en wordt de onkruiddetectie gezien als onderdeel van het werktuig.
2. **Onkruiddetectie en onkruidverwijdering zijn deelsystemen.** De categorie Smart Agrobots biedt niet alleen de functie van werktuigdrager maar data-uitwisseling tussen agrobot, sensoren en werktuig staat centraal.

3. **Werktuig (voor onkruidbestrijding) en agrobot als geïntegreerde oplossing.** Onkruiddetectie, onkruidverwijdering en agrobot zijn ontwikkeld als een geoptimaliseerd systeem voor een specifieke taak zoals onkruidbestrijding.

Voor de eerste oplossingsrichting waar bij de agrobot vooral een werktuigdrager is, zien we voordelen voor een gestandaardiseerde interface tussen sensor voor onkruiddetectie en onkruidverwijderingstool. De oplossingsrichting van een gestandaardiseerde interface is verkend in een HBO master opdracht (zie Bijlage 1). Hierdoor kunnen deelsystemen van verschillende partijen kunnen worden gecombineerd voor een bepaalde toepassing. Het uitwisselen van de verschillende tools zoals een spotsprayer of verschillende mechanische onkruidverwijderings tools wordt hierdoor ook mogelijk gemaakt.

In het project “Onkruidbeheersing met Robots: Onkruidvrij in de Rij” (NWO, 2020) wordt een mechanische onkruidverwijderingstool ontwikkeld waarbij ervan uitgegaan wordt dat de posities van gewassen en onkruiden door een externe module worden aangeleverd, zie Figuur 3.

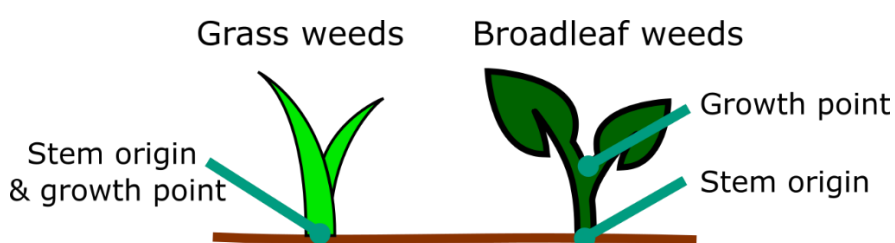


Figuur 3 Modulaire opbouw van het mechanische onkruidbestrijdingssysteem van Onkruidvrij in de Rij.

Het werktuig voor mechanische onkruidverwijdering is hier ook nog eens opgesplitst in 2 modules; De onkruidverwijderingstool en de positioneringsmodule. De positioneringsmodule brengt onkruidverwijderingstool naar het onkruid. Hierdoor kunnen er verschillende tools worden uitgewisseld om verschillende typen onkruid te bestrijden door middel van hitte, elektriciteit etc. (Reiling et al., 2023).

Het grootste probleem zijn de onkruiden in de rij die dicht op de gewassen staan. Hierdoor is het nodig om onderscheid te kunnen maken tussen onkruid en het gewas omdat de tool het gewas niet mag beschadigen en zal daarom deze moeten kunnen ontwijken.

Sommige methodes voor mechanische onkruidbestrijding vereisen grotere positioneringsnauwkeurigheid vergeleken met bijvoorbeeld spot sprayers. In het project Onkruidvrij in de Rij is gekozen voor een hitte-element die vooral effectief is wanneer het groeipunt kan worden aangestipt zodat in korte tijd veel warmte-energie wordt overgedragen. Voorbeelden van plant specifieke punten zijn weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4 Plantspecifieke punten die relevant kunnen zijn voor verschillende mechanische onkruidbestrijdingswerktuigen.

In het 'Onkruidvrij in de Rij' project zijn enkele praktijktesten geweest waarbij het werktuig voor mechanische onkruid verwijderings is geïntegreerd met de plantherkenningsmodule die onderdeel is van de RobotOne agrobot van PixelFarming (Smart Mechatronics and Robotics, 2023). In dit geval was zowel de RobotOne zowel de werktuigdrager-module als de plantherkenningsmodule.

De berekende posities van de plantherkenningsmodule van de RobotOne zijn gebaseerd op een bounding box om de gedetecteerde planten. Om het ontwikkelde werktuig effectiever te maken, zou een locatie van onkruid op specifieke details (bijvoorbeeld groeipunt of steeltje) van onkruiden noodzakelijk zijn. De plantherkenningsmodule zal dus onderscheid moeten kunnen maken tussen gewas en onkruid en zal plantspecifieke kenmerken moeten kunnen onderscheiden en daarvan de posities moeten kunnen meten.

3. Verkenning van state-of-the-art sensoroplossingen voor plantherkenning

Voor plantherkenning is in eerste instantie gezocht naar commerciële oplossingen op het gebied van onkruiddetectie, omdat dit het dichtst bij de praktijk staat. In dat geval zou er vooral nadruk komen te liggen op validatie en testen van het product in de praktijk. In dit hoofdstuk wordt een verkenning van deze mogelijkheden weergegeven. In principe kijken we heel breed. Het kunnen oplossingen zijn op basis van vision, multispectraal, near infrared, laser, NDVI, enz. Daarnaast is er contact geweest met distributeurs zoals Abemec (2023) en Kverneland (2023), maar ook met bedrijven als BBleap (2023) en Homburg Holland (2023). Om een overzicht te maken hebben we verschillende methoden gebruikt. In eerste instantie zijn we gestart met deskresearch. Uitgangspunten waren Groen Kennisnet (Groen. kennisnet, 2021) en het rapport Sensoren en gewasmodellen voor precisielandbouw : literatuuronderzoek disac deelproject e-pieper van de WUR (Kempenaar et al., 2018). Daarnaast hebben we naar overzichtsartikelen gezocht op het gebied van sensing in precisielandbouw. Voor de verwerking van de sensordata zien we dat er de laatste jaren een verschuiving is van traditionele beeldverwerkings algoritmes naar deep learning technieken. Vanaf 2010 is er een grote sprong geweest in de ontwikkeling van deep learning. Bij analyse van detectie algoritmes is het dan ook belangrijk om naar recente jaren (vanaf 2018) te kijken. Verschillende bedrijven (PixelFarming (2023), BBleap en Homburg Holland) hebben hun eigen (gesloten) systemen met camera's en (embedded) computers die geschikt zijn voor plaatsing op hun eigen voertuigen of werktuigen.

3.1 Meetprincipes

Op de wiki Precisielandbouw_van Groen Kennisnet_(Groen. kennisnet, 2021) wordt een overzicht bijgehouden van verschillende sensoren en robots. Deze wiki geeft een goed startpunt voor een verkenning van verschillende sensoren.

3.1.1 NDVI

Met behulp van meerdere kanalen/golflengtes kunnen allerlei indices worden bepaald zoals NDVI. Het principe van Normalized Difference Vegetation Index maakt gebruik van het feit dat planten zichtbaar licht gebruiken/absorberen en near infrared terugkaatsen. Deze methode is verder onderzocht in een studentenproject (zie Bijlage 2).

Dit soort meetprincipes wordt met name gebruik voor remote sensing. Hierbij wordt de sensor aan een drone bevestigd en vliegt de drone over een akker. (AgroCam, n.d.)

3.1.2 Multispectraal camera

Dit soort camera's meten de reflectie van licht in veel verschillende frequentiebanden. In de landbouw worden multispectraal camera's gebruikt om bijvoorbeeld de gezondheid of de stress van planten te meten. Deze camera heeft naast blauw (475 nm center, 32 nm bandwidth), groen (560 nm center, 27 nm bandwidth), red (668 nm center, 14 nm bandwidth), red edge (717 nm center, 12 nm bandwidth), near-IR (842 nm center, 57 nm bandwidth). (Plant-O-Meter, n.d.)



Figuur 5 Micasense Multispectraal Camera

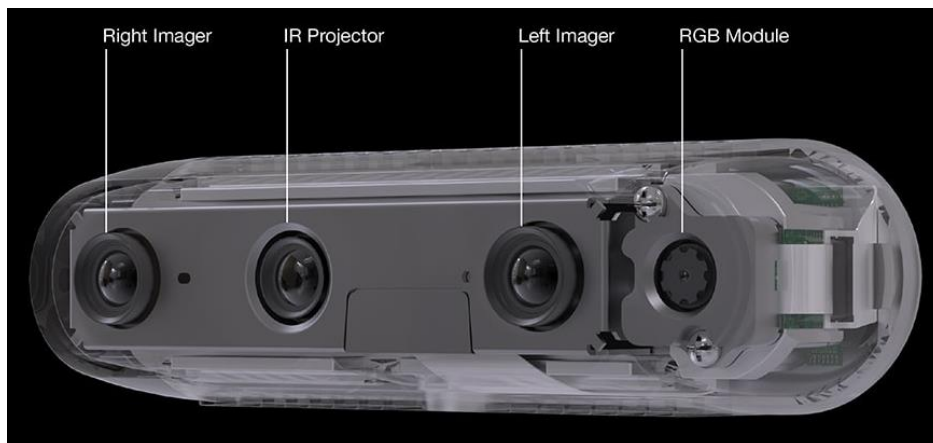
3.1.3 3D meettechnieken

Een van de concepten die interessant was om verder uit te zoeken waren 3D sensoren. Er zijn meerdere principes die kunnen worden gebruikt om een 3D data te krijgen.

1. Structured Light
2. Time of Flight camera
3. Stereo vision / stereoscopic
4. Structure from Motion

Stereo Vision

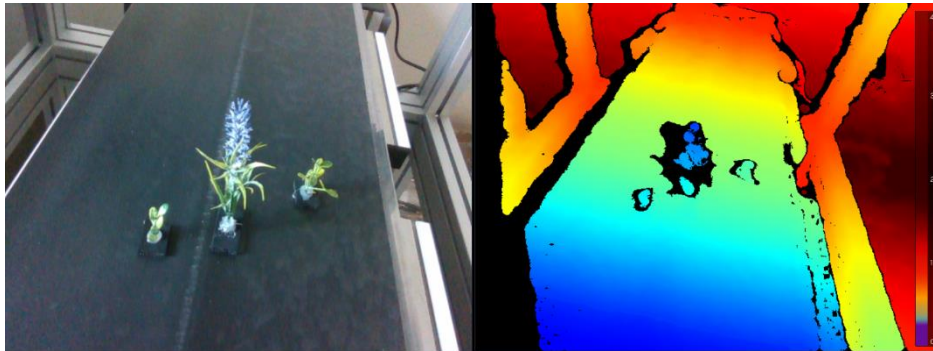
Bij stereo vision wordt gebruik gemaakt meerdere camera's die vanuit verschillende hoeken naar hetzelfde voorwerp kijken. Voorwerpen dichtbij hebben grotere verschillen (disparity) dan voorwerpen verder weg. Uit de verschillen tussen de beelden kan de diepte worden geschat. Dit principe gebruiken mensen ook om diepte in te schatten. Voorbeelden van commercieel beschikbare stereo vision camera's zijn de Intel Realsense camera (1000 euro), ZED 2 camera (500 euro) en de AOK-D (200 euro). Sommige stereo vision camera's, zoals bijvoorbeeld de Intel RealSense camera, zijn voorzien van een infrarood projector (IR Projector) die een patroon uitzend, zodat er meer informatie in de afbeeldingen zit. Dit is vooral handig voor de sensing bij egale vlakken en bij omstandigheden met weinig licht, waar de images normaal geen details in kunnen vinden.



Figuur 6 Intel RealSense D435 camera



Figuur 7 FRAMOS Industrial RealSense camera



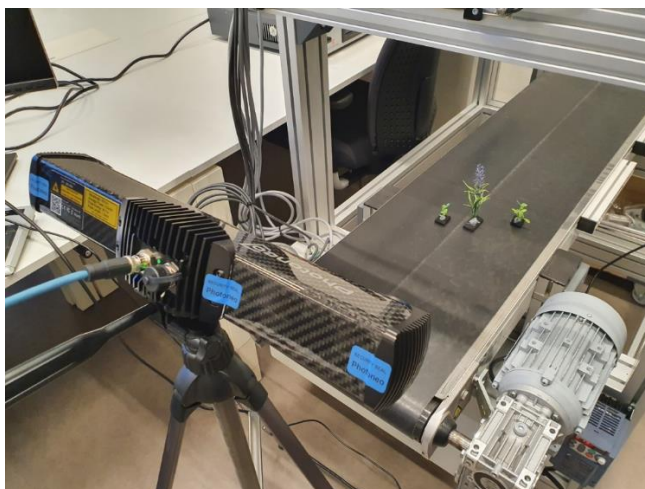
Figuur 8 Testafbeelding gemaakt met FRAMOS camera van kunstplanten. Links 2D beeld, rechts diepte view

Structured Light Vision

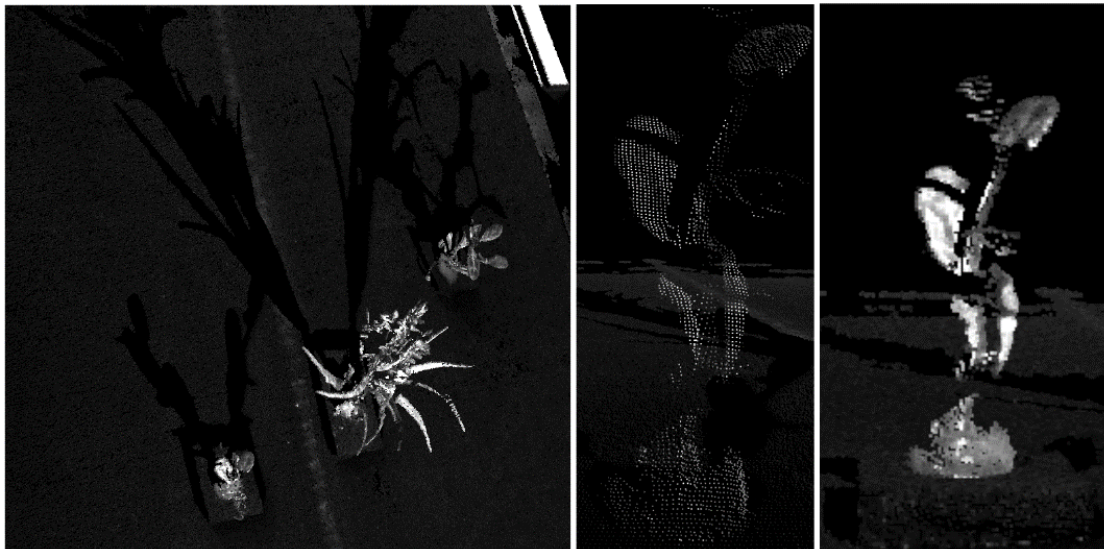
Bij structured light wordt een bekend lichtpatroon geprojecteerd. Dit zijn over het algemeen stippen of lijnen. Een of meerdere optische sensoren nemen het patroon waar en kunnen de diepte afleiden door hoe ze het patroon zien. Vaak wordt een infrarood of near infrared licht gebruikt, omdat we dit als mens niet zien. Het nadeel is deze techniek is dat je snel last hebt van invallend licht zoals zon licht.

PhoXi 3D scanner

De PhoXi sensor is een industriële 3D scanner op basis van structured light. Het maken van een scan duurt ongeveer een seconde. Het resultaat is dan een 3D point cloud van de scene. Deze scanner is een korte test gedaan op een testopstelling met kunstplanten, zie maar dan iets verder uitgezoomd.



Figuur 9 PhoXi scanner naast lopende band met kunstplanten



Figuur 10 Links: 3D scene van boven gezien. Achter de plantjes zie je de schaduw van de scanner. In het midden is ingezoomd op het kleine plantje links in beeld. Rechts is hetzelfde plantje.

Time of flight

Bij Time-of-Flight (ToF) camera's wordt gebruik gemaakt van de snelheid van licht. Bij deze sensor is er een lichtbron die knippert. De sensor meet per pixel hoe lang het duurt voor het licht weer terugkomt en kan daaruit de afstand schatten. Technisch is het een lastig probleem omdat de lichtsnelheid groot is. De sensor moet in staat zijn om korte intervallen te meten. Daarnaast kan de sensor niet meten terwijl de lichtbron aan staat. Er moet dus een korte lichtpuls kunnen worden gemaakt.

Structure from motion

Bij structure from motion kunnen verschoven beelden van eenzelfde object worden gereconstrueerd tot een 3D beeld. Uit de verschillen tussen de beelden kan de diepte worden geschat. Het reconstrueren van een 3D beeld gebeurt op vergelijkbare wijze als bij stereo vision.

3.2 Geïntegreerde sensor oplossing voor plantherkenning en lokalisering

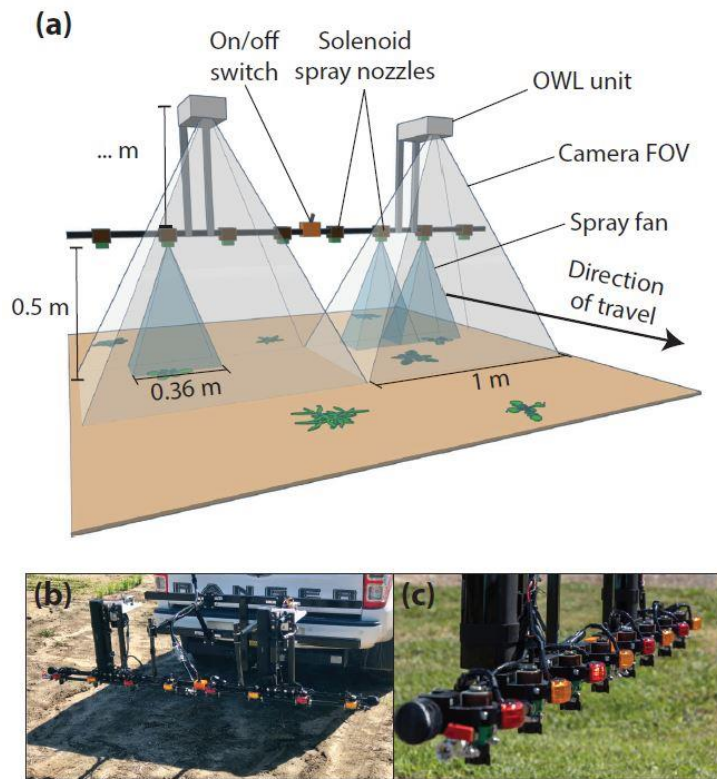
Zoals hierboven genoemd zijn er enkele partijen die een geïntegreerde sensor oplossing hebben voor hun eigen systemen. Daarnaast zijn er geen commercieel beschikbare systemen gevonden die toepasbaar zijn als een plantherkenningsmodule binnen dit project. Wel is er nog een 'Open Weed Locator' open source project gevonden (Coleman, 2022).

Open Weed Locator (OWL)

OWL is an open source project dat hardware en software ontwikkelt voor onkruiddetectie. Het project maakt gebruik van beschikbare, of-the-shelf, componenten, zoals een Raspberry Pi computer en een Raspberry Pi High Quality camera. Dit zijn allemaal tamelijk goedkope onderdelen. De richtprijs voor het aanschaffen van alle componenten is rond de 400 euro.

Het systeem kan bijvoorbeeld meerdere relais of solenoides aansturen. Op deze manier kan je een eigen precision sprayer maken, zoals in onderstaande afbeelding te zien is.

Het project gebruikt de MIT software licentie. Deze licentie staat zo goed als alles toe (kopieren, aanpassen, verspreiden, verkopen, etc.). Daarnaast mogen onderdelen van de software in proprietary software worden gebruikt.



Figuur 11 Mogelijke toepassing van een OWL unit met spot sprayers (bron: <https://github.com/geezacoleman/OpenWeedLocator>)

4. Ontwerp en realisatie van plantherkenningsmodule (PoP)

Uit de verkenning van de state of the art kwam naar voren dat er geen kant-en-klare oplossing is voor een plantherkenningsmodule. Beschikbare systemen die er zijn, zijn ofwel volledig gesloten systemen die onderdeel zijn van een complete oplossing (niet-modulair), ofwel camera systemen zonder specifieke detectiesoftware. Daarom is er gekozen om uit beschikbare deelcomponenten zelf een 'proof of principle' (PoP) te ontwikkelen voor een plantherkenningsmodule, om hierbij kennis op te doen hoe een dergelijke module opgebouwd zou kunnen worden. Dit is verder verkend in een HBO master opdracht door Kars Waanders en hieronder beknopt weergegeven.

Een van de belangrijkste eisen die naar voren kwam in het ontwerpproces is de eis dat specifieke onderdelen van de onkruidplantjes herkent dienen te worden zodat een precisie-gereedschap zoals bijvoorbeeld een hitte-element het onkruid nauwkeurig en effectief kan bestrijden. Daarnaast dient er onderscheid gemaakt te worden tussen gewas en onkruid, zodat de positie van gewassen gebruikt kan worden om hier omheen te bewegen en het gewas zelf niet te beschadigen. Tot slot is het van belang dat de detectiemodule geïntegreerd kan worden op een voertuig zodat detectie in het veld kan plaatsvinden en de gedetecteerde posities gecommuniceerd kunnen worden naar een extern systeem dat het onkruid uiteindelijk bestrijdt. Hiermee zijn de 3 belangrijkste functies van het systeem gedefinieerd:

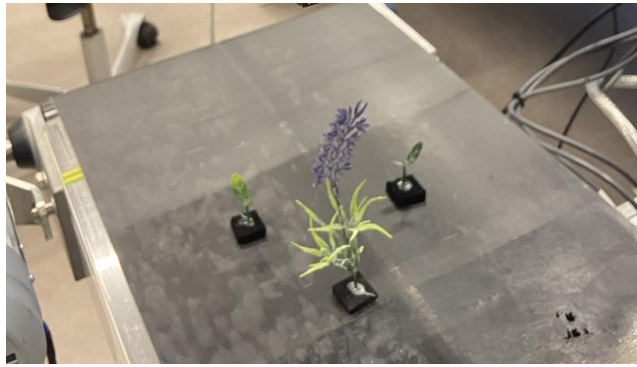
1. Differentiatie tussen gewas en onkruid
2. Nauwkeurige plaatsbepaling op basis van plantdetails
3. Bevestiging en communicatie interface

Het ontwerpproces heeft geleid tot een PoP systeem dat bovenstaande functies kan vervullen. Deze verschillende functies zullen hieronder verder toegelicht worden.

4.1 Differentiatie tussen gewas en onkruid

Voor het detecteren van planten wordt er gebruik gemaakt van een camerasysteem. Aangezien de plant locaties in 3 dimensies berekend moeten worden is er gekozen voor een 3D camera. Dit systeem is gebaseerd op een stereo vision camera (Stereolabs ZED 2) gecombineerd met een on-board computer (NVIDIA Jetson Xavier NX). Voor meer constante belichting is er gebruik gemaakt van een actieve lichtbron met LED verlichting. De on-board computer maakt gebruik van een Linux besturingssysteem (Ubuntu 20.04) met daarop het Robot Operating System (ROS 2) geïnstalleerd. Voor de detectie wordt er gebruik gemaakt van OpenCV als bibliotheek voor het verwerken van afbeeldingen en wordt er gebruik gemaakt van een neurale netwerk (YOLO v7). Voor de PoP opstelling is gebruik gemaakt van een testopstelling met kunstplanten op een lopende band. Een set afbeeldingen is handmatig gelabeld, waarbij in iedere afbeelding is aangegeven wat het 'gewas' is en

wat het 'onkruid' is. Deze data dataset is vervolgens gebruikt om het neurale netwerk te trainen om



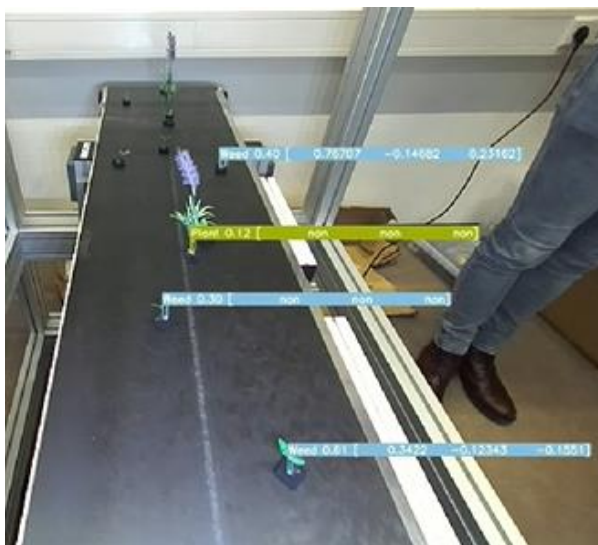
onderscheid te maken tussen planten en gewas.

Figuur 12 Testopstelling met kunstplanten op lopende band. De grotere plant met bloem is gebruikt als 'gewas' de kleinere als 'onkruid'

4.2 Nauwkeurige plaatsbepaling op basis van plantdetails

Conventionele algoritmes om uit gevonden objecten in een camerabeeld een locatie te berekenen, gebruiken in het algemeen een gemiddelde pixelwaarde van de regio waar een object gedetecteerd is als locatie. Voor het nauwkeurig bestrijden van onkruid is het nodig om hier een meer gedetailleerde positie uit te halen. Afhankelijk van het te gebruiken gereedschap kan dit bijvoorbeeld het groeipunt van de onkruidplant zijn of juist het steeltje waar deze uit de grond komt. In beide gevallen dient het systeem hier specifiek op ingericht te worden zodat er sprake kan zijn van een gedetailleerde detectie. Bij het ontwerp en realisatie van het systeem is er daarom rekening gehouden met deze gewenste nauwkeurigheid.

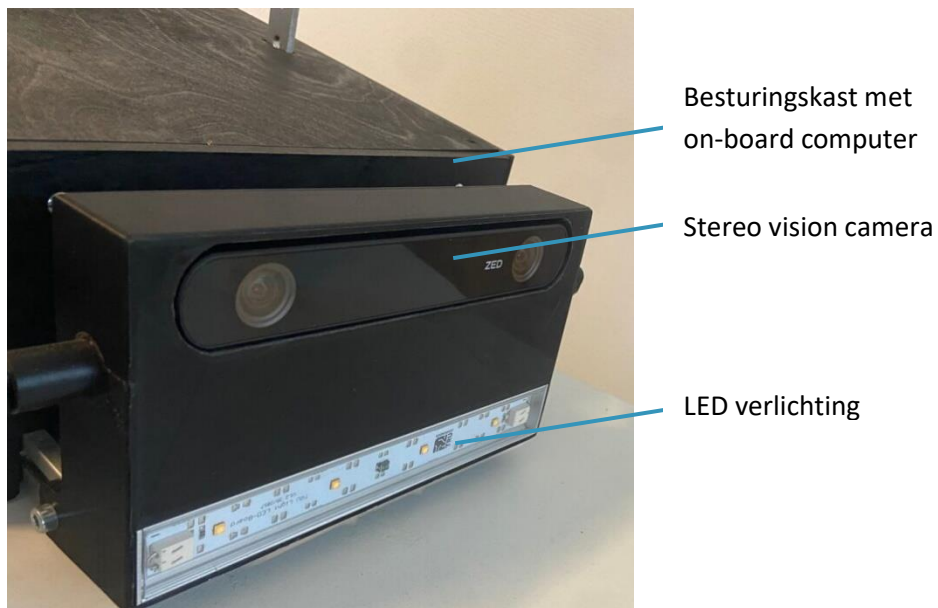
Voor het PoP systeem is de focus gelegd op het detecteren van het steeltje. Hiertoe is het neurale netwerk dusdanig getraind dat de pixels van het steeltje gebruikt worden voor het bepalen van de locatie. Deze 2D pixels worden vervolgens gekoppeld aan de 3D informatie die de stereo camera ook verschaft. Vervolgens wordt deze data per afbeelding gecombineerd in een lijst met daarin alle gewas- en onkruidposities in het actieve camerabeeld.



Figuur 13 Gedetecteerde planten en onkruiden in camera beeld met daaraan gekoppelde 3D posities

4.3 Communicatie en bevestiging

Het geheel is opgebouwd als een losse module (zie Figuur 14 die aangesloten kan worden op een 24V volt voeding en een netwerk interface heeft om gedetecteerde gewas- en onkruidposities te communiceren naar een ander systeem. Per plant wordt de gedetailleerde XYZ positie ten opzichte van de camera bepaald en gecommuniceerd om gebruikt te worden door een extern systeem. Voor de bevestiging is er gebruik gemaakt van standaard extrusieprofielen die veelal gebruikt worden bij ontwikkeling van prototypes, zodat het systeem eenvoudig op verschillende posities en testopstellingen bevestigd kan worden.



Figuur 14 Proof of principle plantherkenningsmodule

5. Discussie

Door het ontbreken van een kant-en-klare oplossing voor een plantherkenningsmodule is er een proof of principle (PoP) systeem ontwikkeld. Hiermee is er kennis opgedaan hoe zo'n systeem opgebouwd zou kunnen worden, maar ook hoe dat systeem vervolgens geïntegreerd kan worden met bijvoorbeeld een tool voor het bestrijden van onkruid.

Voor het systeem is een stereo camera gebruikt om ook de 3D locatie van de planten te kunnen bepalen. Het ontwikkelde systeem toont aan dat dit principe werkt met de huidige camera, echter zijn er uit de verkenning van de state of the art meerdere mogelijkheden gebleken om deze 3D informatie te bepalen. Op basis van een gefundeerde inschatting is gekozen voor de huidige camera, maar er heeft geen extensieve vergelijking plaatsgevonden tussen de verschillende mogelijkheden en daarmee is het niet uitgesloten dat er ook een werkend systeem te realiseren is met een van de andere oplossingen.

Aangezien het een PoP systeem betreft is er geen tijd gestoken in het optimaliseren van de detectiemodellen. Hoewel het systeem onderscheid tussen gewas en planten kan maken en de locaties daarvan kan berekenen, is de verwachting dat de robuustheid en betrouwbaarheid van het systeem een stuk verbeterd zou kunnen worden met een uitgebreidere training en optimalisatie van het gebruikte neurale netwerk.

Tot nu toe is het systeem uitsluitend getest in een lab setting met kunstplanten. Hierbij is het goed mogelijk gebleken om 'gewas' en 'onkruid' te onderscheiden, echter is het voor een toepassing in het veld goed niet ondenkbaar dat daarbij extra praktische problemen ontstaan die de detectie en het maken van onderscheid bemoeilijken. Om daarover uitsluitsel te geven, zijn praktijktesten noodzakelijk.

Op het gebied van interfacing en modulariteit zijn er wel enkele praktijktesten geweest tijdens de integratie van de een onkruid verwijderingsmodule met de plantherkenningsmodule die onderdeel is van de RobotOne agrobot van PixelFarming. Hierbij is gebleken dat dergelijke modules relatief eenvoudig samen te voegen zijn om tot een werkende totaaloplossing te komen.

6. Conclusie en aanbevelingen

Kant en klare plantherkenningsmodules zijn niet commercieel verkrijgbaar. Bovendien is er voor nauwkeurige aansturing van bepaalde werktuigen locatiebepaling van specifieke plantdetails vereist. Er is een werkend systeem ontwikkeld om te laten zien hoe een dergelijke modulaire plantherkenningsmodule opgebouwd zou kunnen worden. Met deze module is het goed mogelijk gebleken om 1) gewas en onkruid te onderscheiden, 2) locatie van plantdetails nauwkeurig te kunnen bepalen en dit 3) als module op te bouwen zodat het goed te integreren valt met andere modules voor bijvoorbeeld modules voor precisie-onkruidverwijdering.

Om het ontwikkelde systeem toepasbaar te maken in het veld, zal er aandacht besteed moeten worden aan de robuustheid en betrouwbaarheid van het detectiealgoritme. Hiertoe is met name meer goede trainingsdata benodigd. Daarnaast dient het geheel waterbestendig gemaakt te worden zodat het systeem geschikt wordt voor een buiten toepassing.

Uit dit onderzoek is gebleken dat het opbouwen van verschillende systemen in verschillende modules met goed gedefinieerde interfaces kan leiden tot een betere scheiding van functies en betere focus in verschillende projecten. Bovendien biedt dit de mogelijkheid om verschillende modules uit te wisselen en wordt het makkelijker om afhankelijk van een specifiek vraagstuk een agrarisch robot systeem op te bouwen uit verschillende, voor dat vraagstuk relevante modules. Voor de toekomst zou het nuttig kunnen zijn om deze module interface vast te leggen zodat modules van verschillende fabrikanten uitwisselbaar worden en gecombineerd kunnen, waardoor fabrikanten kunnen focussen op specifieke technologie in plaats van het complete probleem en akkerbouwers vervolgens kunnen putten uit een bibliotheek aan modules om hun specifieke case op te lossen.

Literatuurlijst

Abemec. (2023, November 27). Abemec - Mechanisatie op maat. <https://www.abemec.nl/>

AgroCam. (n.d.). NDVI Camera | DJI NDVI upgrade | NDVI image processing. <https://agrocarn.eu>

BBLeap. (2023, July 18). *Creating the leap in agriculture*. <https://bbleap.com/>

Coleman, G., Salter, W., & Walsh, M. (2021). OpenWeedLocator (OWL): An open-source, low-cost device for fallow weed detection. *agriRxiv*, 2021. <https://doi.org/10.31220/agrixiv.2021.00074>

Groen. kennisnet. (n.d.). Wiki Groen Kennisnet. Retrieved November 2021, from <https://wiki.groenkennisnet.nl/>

Groen. kennisnet. (n.d.). Wiki Precisielandbouw. Retrieved November 2021, from <https://www.wiki-precisielandbouw.nl/>

Homburg Holland. (2023, November 17). Precies wat nodig is! | Homburg Holland. <https://homburg-holland.com>

Kempenaar, C., Dijk, C., van Egmond, F., Goldbach, F., Polder, G., Pronk, A., & van Rheeën, H. (2018). *Sensoren en gewasmodellen voor precisielandbouw: Literatuuronderzoek DISAC deelproject E-pieper*. (Rapport / Wageningen Plant Research; No. WPR-75). Wageningen Plant Research. <https://doi.org/10.18174/498321>

Kverneland Group. (2023, 11). Kverneland Group Benelux BV - The Future of Farming. <https://nl.kvernelandgroup.com/>

NWO. (2020, September 1). *Onkruidbeheersing met robots: Onkruidvrij in de Rij*. <https://www.nwo.nl/projecten/raakmkb12015>

NWO. (2022, September 1). *Autonomous Agricultural Navigation*. <https://www.nwo.nl/projecten/raakmkb16016>

Pixelfarming Robotics. (2023, June 14). *Robot one — Pixelfarming robotics*. <https://pixelfarmingrobotics.com/robot-one/>

Plant-O-Meter. (n.d.). *Plant-O-Meter*. <https://www.plant-o-meter.com/>

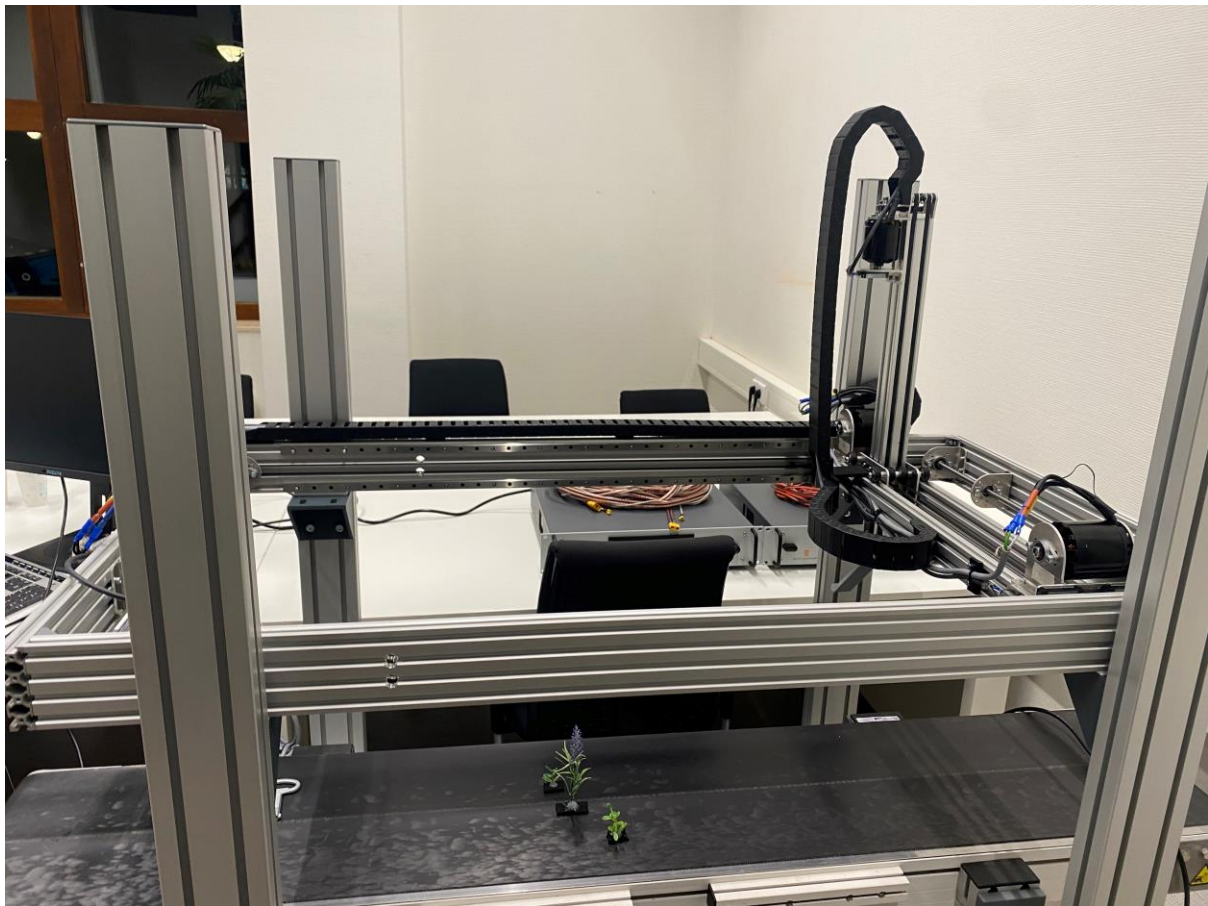
Reiling, M., Westerveld, A., Meijering, R. (2023). *Static Path Planning with Dynamic Motion Compensation*. DSPE Mikroniek, 63(5), 24-29.

Smart Mechatronics and Robotics. (2023). *Weed control application for agro-robots* [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=5UFjJVFv2Is>

Bijlage 1: Afstudeerverslag Sierd Waanders – The interfaces between the tool and an agrobot

The interfaces between the tool and an agrobot

Research document



Student: Sierd Waanders
Company: Mechatronics research group
Supervisor: Mark Reiling MSc.
Date: 24-11-2022
Version: 0.6

Summary

This research paper describes the design and implementation of a generic tool interface for smart farming. The purpose of the project "No Weeds in the Row" is to develop a weed removal tool for intra-row weeding, which is initiated by the Mechatronics research group. The three (sub)systems involved are the weed removal tool, the agrobot, and the weed detection system. The main focus of the research document is the interface between these three (sub)systems.

The agrobot will navigate through a crop field while providing 24 V or 48 V to the weed removal tool and sends its groundspeed and timestamp to the weed removal tool at a rate of 25 Hz. The weed detection system sends detections with a timestamp to the weed removal tool at a rate of 10 Hz. The weed removal tool processes the received data by transforming the detections into the desired coordinate frame, compensating for the groundspeed of the agrobot, filtering out plants that are detected multiple times, and rearranging the detections in the correct order. The weed removal tool then plans and executes a path and will exterminate the weeds with heat or vacuum, while avoiding the crops.

The detection protocol was developed using ROS2 and includes two types of messages: a speed message with a timestamp and a detection message with a list of multiple detections and a timestamp. The detection protocol could be used to communicate between different devices and performed as expected. The messages had a latency of 3 ms. However, the timestamps were not synchronized correctly, resulting in a time difference of 0.26 s instead of the expected 3 ms. The weed removal tool could process the received data. However, the filtering functionalities have not yet been added to the weed removal tool also the transforming coordinates node will need some additional work.

It is recommended to use CAN communication in the future to make the tool more generic and compatible with a wider range of agrobots. Clock synchronization should also be added to the detections protocol, as well as filtering functionality to the weed removal tool and improvements to the transforming frames node. The weed removal tool will be integrated in the future with Robot one using the communication protocol.

In conclusion, this research document presents the design and implementation of a generic tool interface for smart farming to develop a tool for intra-row weeding. The interface between the weed removal tool, the agrobot, and the weed detection system was the focus of the research, and the protocol was developed using ROS2 with limitations in clock synchronization.

Summary	20
Abbreviations	23
List of Figures	23
List of tables	24
1 Introduction	25
1.1 Weed removal tool	26
2 Current situation	27
2.1 What does a crop field look like?	27
2.2 How are weeds getting weeded?	28
3 What does the farmer want?	30
4 What interfaces does the tool need?	33
5 What do agrobots look like and what are the interfaces?	34
5.1 Which types of agrobots already exist?	34
5.2 What do agrobots have in common?	39
5.3 What are the interfaces that the agrobot can provide?	39
6 What are the interfaces of the weed detection system?	40
7 The interfaces between the tool, weed detection system and agrobot.	42
7.1 Generic tool interface	42
7.1.1 Mechanical interface	42
7.1.2 Electrical interface	42
7.1.3 Data interface	43
7.2 Robot one tool interface	46
7.2.1 Mechanical interface	47
1.1.1. Electrical interface	48
7.2.2 Data interface	48
8 Technical design tool interface	50
1.2. Communication architecture overview	50
8.1 Transforming coordinate frames	51
8.2 Filtering	53
8.3 Weeding sequence	53
9 Test result	54
9.1 Test 1: Functioning detection protocol	54
9.2 Test 2: The interface with the weed removal tool in a static environment	55
9.3 Test 3: The interface with a weed detection system	56

9.4	Test 4: The interface with the weed removal tool in a dynamic environment	56
9.5	Test 5: Simulation of optimal frequency message speed	56
10	Conclusion	58
11	Recommendations	59
12	Bibliography	60

Abbreviations

Abbreviation	Definition
RTK-GPS	real-time kinematic positioning global positioning system
CAN	controller area network
ISOBUS	CAN protocol commonly used in agriculture
TIME	CAN protocol for timestamps
EMCY	CAN protocol for emergency messages
NTP	Network Time Protocol
ROS2	Robot operating system
TF2	transform library for ROS2
C++	Programming language
Python	Programming language
NUC	Next Unit of Computing
PTO	power take-off
AI	artificial intelligence
CANopen	CAN protocol specialized for embedded systems

List of Figures

Figure 1-1: Overview of the system discussed in this report.....	25
Figure 1-2: Weed removal tool.....	26
Figure 2-1: Inter / intra row	27
Figure 2-2: How crops are grown	27
Figure 3-1: First comes first service	30
Figure 3-2: Weeds around the crops	31
Figure 3-3: Most weeds	31
Figure 3-4: Prioritise certain weeds	31
Figure 3-5: Prioritizing bigger weeds	32
Figure 4-1: Interface weed removal tool.....	33
Figure 5-1: From tractor to agrobots.....	35
Figure 5-2: John deere autonomous tractor [12].....	35
Figure 5-3: Robotti [14].....	36
Figure 5-4: Orio from Naïo [15]	36
Figure 5-5: Robot one from pixelfarming [16]	37
Figure 5-6: Odd.bot [17]	37
Figure 5-7: Aigro up [9].....	38
Figure 6-1: Intergated weed detection system	40
Figure 6-2: Weed detection system seperated from tool	41
Figure 6-3: Example of detections.....	41
Figure 7-1: Motion compensation.....	44
Figure 7-2: Generic tool interface.....	45
Figure 7-3: Coordinates frame	45
Figure 7-5: Dimentions Robot one with placement tool.....	47
Figure 7-5: Sketch of Robot one mount.....	47

Figure 7-7: Top view placement tool under Robot one	47
Figure 7-8: Trailer plug Pixelfarming.....	48
Figure 7-9: Robot one tool interface	49
Figure 8-1: Topic and node.....	50
Figure 8-2: Communication architecture overview	50
Figure 8-3: Topic speed	51
Figure 8-4: Topic detections	51
Figure 8-5: Weed removal tool and camera in TF2 world.....	51
Figure 8-6: Flowchart Transforming_coordinate_frames.....	52
Figure 8-7: Flowchart weeding sequence	53
Figure 9-1: Result ros2 topic hz /detections	54
Figure 9-2: Result ros2 topic bw /detections	54
Figure 9-3: Result ros2 topic hz /speed.....	54
Figure 9-4: Result ros2 topic bw /detections	54
Figure 9-5: TF2 world with the detections	54
Figure 9-6: Interfaces in a static enviroment	55
Figure 9-7: Timestamp difference tool and laptop	55
Figure 9-8: The interface with a weed detection system	56

List of tables

Table 2-1: Weeding by hand with a weedbed with carrots or onions [6]	28
Table 2-2: Labour hours per hectare [4]	29
Table 5-1: Agrobots from groenkennisnet [8]	34
Table 5-2: List of operational agrobot [4].....	34
Table 9-1: Results simulation	57

1 Introduction

This is a research document about a generic tool interface for smart farming. It is part of the project “No Weeds in the Row”, which has as its goal to design and realise a weed removal tool that can remove weeds in the intra-row. The project “No Weeds in the Row” consist of three (sub)systems: the weed removal tool, agrobot and weed detection system, see Figure 0-1. In the project “No Weeds in the Row” it was decided to focus on the weed removal tool. The realisation of an agrobot and a weed detection system is out of scope in this project.

The decision to focus on the tool fits in the current agriculture industry. Currently, there are separate tools, sensors and tractors manufacturers. For example, a tractor from company A uses an RTK-GPS (real-time kinematic positioning global positioning system) from company B with a seeder from company C. For smart farming, it is expected that the agriculture industry will follow the same direction. An agrobot from company A has a vision system from company B with a smart tool from company C.

In the agriculture industry, there are already plenty of agrobots with different technologies, sizes and shapes. In this research document these differences will be described. As mentioned, the weed detection system is separated from the weed removal tool. Vision systems are getting smarter and smarter. Some vision systems already have onboard processing and smart vision systems are getting cheaper. In future, it can be expected that companies will develop vision systems that can detect plants. These vision systems will be available or already integrated with the agrobots.

The main system is the agrobot, which can autonomously navigate through a crop field. On this agrobot, the weed removal tool and the weed detection system will be mounted. The agrobot will have a data interface with the weed removal tool and will provide power to the weed removal tool. The weed detection system will also provide data for the weed removal tool. In this document, these three (sub)systems have been analysed and will be described. At the end of this document, it will be clear what is on the arrows in Figure 0-1. The needs of the farmer and the current situation will also be described and analysed. During the research, the arcadia method was used to better visualize the interfaces between the three subsystems. Arcadia was applied by using the application Capella and creating a Capella model. This model will be added as a separate document together with a project plan and a test plan.

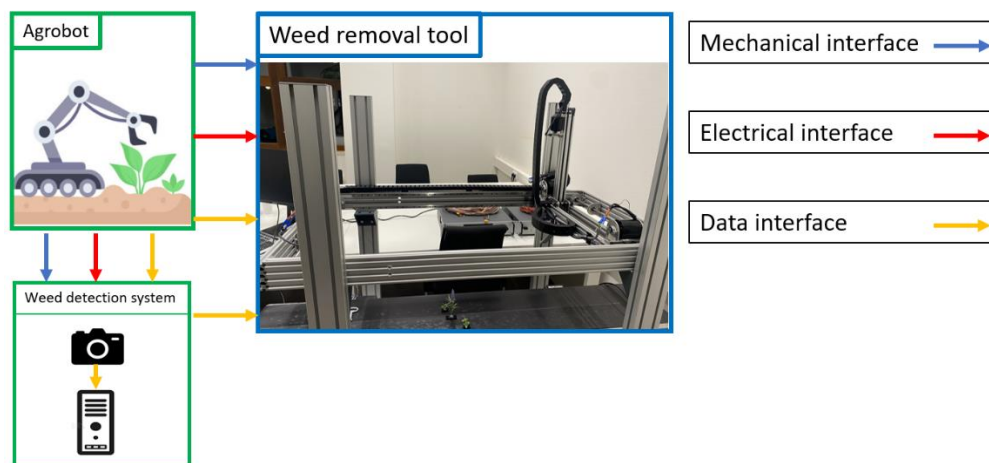


Figure 0-1: Overview of the system discussed in this report

1.1 Weed removal tool

The main focus of the project no weeds in the row is the weed removal tool. The weed removal tool has been realized, see Figure 1-2. The main function of the weed removal tool is to remove weeds in the row. For the tool to be able to do this, it should be able to plan a path to a weed. The path that the tool will follow should evade crops because these can not be damaged by the tool. The path planning has already been realised by another student. The weed removal tool has a requirement that it should position the end effector within 1 cm of the weeds. This requirement was already decided, by the student that realised the path planning. Once the end effector has been positioned, the weed removal tool will apply heat on the weed or vacuum the weed out of the soil. The Mechatronics Research Group did some tests to kill weeds with a heating element and with the use of a vacuum. The weed removal tool will need the interfaces that are displayed in Figure 0-1. These interfaces should be generic so that the tool can be mounted on different agrobots.

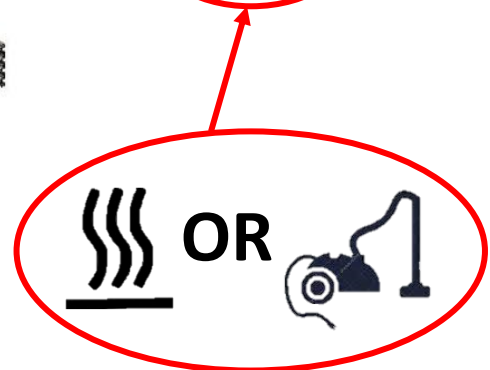
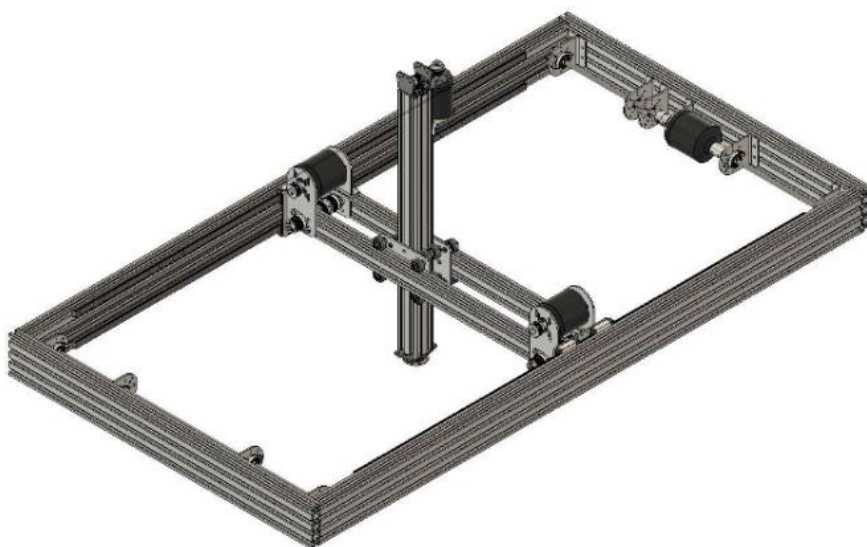
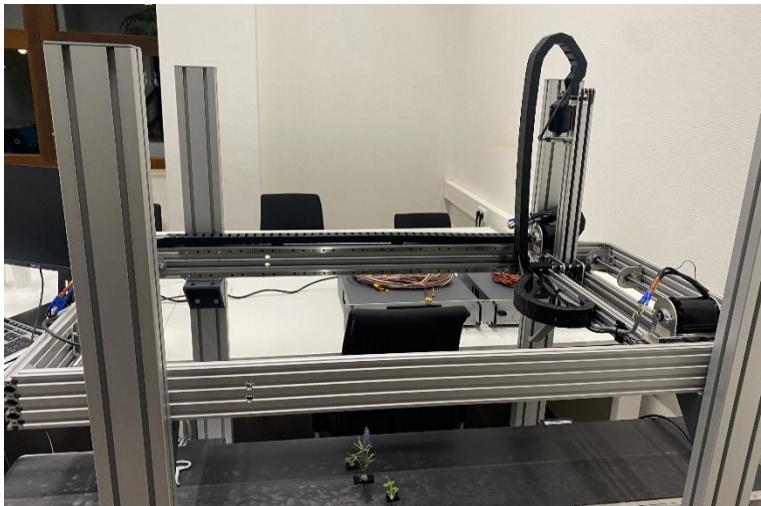


Figure 0-2: Weed removal tool

2 Current situation

2.1 What does a crop field look like?

A crop field exists out of crops, weeds and soil. A crop field is defined in rows, the inter-row and intra-row, see Figure 2-1. The inter-row and intra-row distances can vary. In Figure 0-4 there are four examples of different crops. All of them get planted in another way. Potatoes get planted every 30 cm in rows that are 70 cm apart (Plantaardig, n.d.). Lettuces are getting planted similarly to potatoes, however, the distances between the rows of crops and the crops are a bit smaller (Wikifarmer, n.d.). Carrots are getting planted a lot closer together: The plants are 6 cm apart and the rows are 30 cm apart (Akkerbouwbedrijf, Peen zaaien, n.d.). Onions are planted differently, as these are planted in beds instead of rows. The width of the beds can vary but the most common size for onion beds is around 180 to 225 cm (C.E. Westerdijk, 2021). The onions are planted 8 – 10 cm apart, thus about 80 onions per square meter (Akkerbouwbedrijf, Uien zaaien, n.d.).

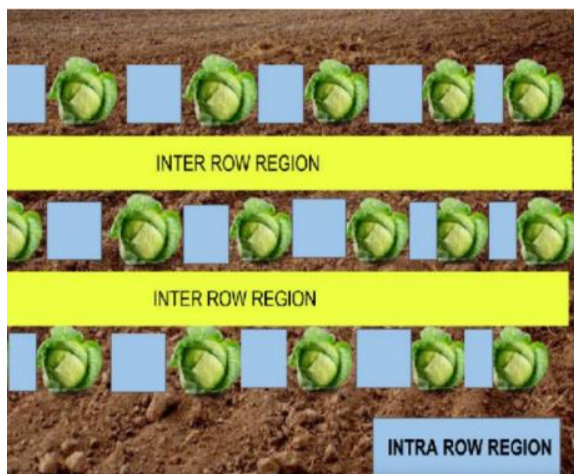


Figure 0-3: Inter / intra row

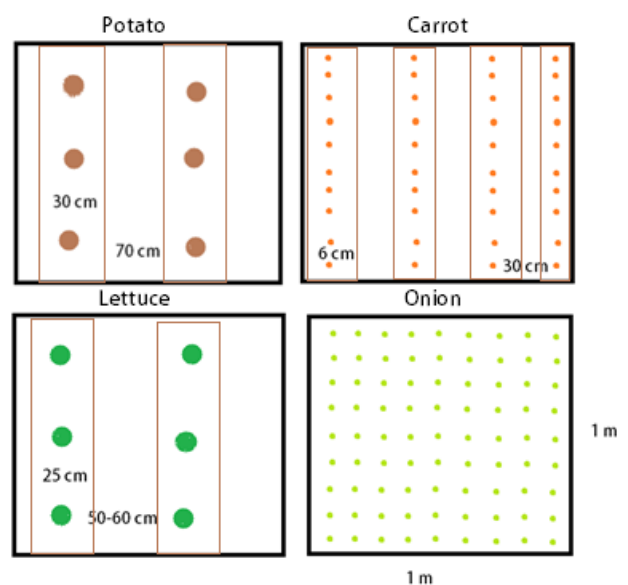


Figure 0-4: How crops are grown

Unfortunately, weeds grow in the row, between the crops. The types and quantity of weeds can vary, depending on several different parameters. This can be due to the type of soil, weather, type of crop and what has been planted before. Peaty and sandy soils harbour many weed seeds and have high weed density, with tens to hundreds of weeds per square meter. Whereas on clay soil, only a few weeds per square meter can be found (C.E. Westerdijk, 2021). When the weather is optimal, the crops will grow better, but this is also the case for weeds. With potatoes, there is a problem called potato storage (aardappelopslag). This is when some of the previous potatoes were not retrieved from the field. The potatoes from last year would start growing in the next season, but next season another crop is planted on the field like corn. The potatoes are then considered a weed and will harm the crops on the field.

2.2 How are weeds getting weeded?

There are multiple ways to weed a crop field, depending on whether the weeds are located in the inter- or intra-row region. When the weeds are located in the inter-row, the weeds mostly get weeded using hoes. Weeds that are located in the intra-row region are harder to remove. Here farmers use a sprayer that sprays pesticides over the crop field. This is a fast and relatively cheap way to kill weeds, but the problem is that it is bad for the environment. For this reason, the use of herbicides will be reduced by 50% in 2030. The other method to remove weeds is manual labour. Workers lay on a weeding bed or walk through the field and remove weeds by hand. This is done by hand because, in the intra-row, precision is required to not harm the crops. This method takes more time and money than spraying the field with pesticides.

The tasks that the weed removal tool executes are similar to bio farmers that use manual labour to remove weeds in the intra-row. Weed removal by hand weeding was researched to get a better understanding of the time it takes to weed and how accurate workers are. The time it takes to weed depends on the number of weeds per square meter. The data that is described below is from a crop field with onions or carrots. The way these types of crops are planted differs from other types of crops as shown in Figure 0-4.

Higher weed density:

- Longer weeding time per meter
- Less time per removed weed
- More removed weeds per meter

Lower weed density:

- Lower weeding time per meter
- More time per removed weed
- Less removed weeds per meter compared to higher density

In Table 0-1, driving speed per weed density and the time it would take to weed a hectare of a crop field are shown. As can be seen, the driving speed during hand weeding is low. When weeding by hand, the average accuracy is 71 %. A crop field of onions with a moderate weed density will be weeded around 3 times a year. Weeding one hectare of onions would take 50 hours, see the calculation on the other page. This means every year a hectare with onions would cost about 150 labour hours to weed (Looije, 2001).

Table 0-1: Weeding by hand with a weedbed with carrots or onions (Looije, 2001)

Weed density	Driving speed (m/h)	Driving speed (m/s)	Weeding time (h/ha)
Low (< 1 per/m)	800	0,22	25
Moderate (± 5 per/m)	400	0,11	50
High (± 10 per/m)	200	0,06	100

Workspace human = 0.5 m

Time to weed 100 m long field, $\frac{100}{400} = 15$ minutes

Times workspace fits in 100 m $\frac{100 \text{ m}}{0.5 \text{ m}} = 200$ times

*$200 * 15 = 3000$ minutes = 50 man hours*

Table 0-2: Labour hours per hectare (C.E. Westerdijk, 2021)

Crop	Time per ha (h)
Potatoes	35
Alfalfa	5
Onions	148
Carrots	109
Wheat	19
Peas	31

To weed a hectare of onions would take 150 hours, which is a long time. The reason for this is that onions are planted close to each other. Because the onions are close to each other it requires more precision and time to find weeds. For other crops like potatoes and peas, weed removal only takes 30 to 35 hours per hectare. In Table 0-2 different crops with the weeding time are noted. This is the weed removal time of biological farmers, where the weeding is done by hand.

3 What does the farmer want?

Farmers want that the crops to grow big and healthy, as this will result in the most profit. For crops to grow big and healthy, weeds must be removed. On a crop field, grow a lot of different types and sizes of weeds. The weeds can grow close to crops and far away. Weeds grow in the inter-row and in the intra-row. The weed removal tool will only focus on removing the weeds in the intra-row. The information that was used in this chapter is the knowledge obtained from the Delphy Robotiseringsdag (Waanders, 2022), the knowledge from the consortium and the internet.

During the interaction with the farmers, agrobot salesman and manufacturers at Delphy Robotiseringsdag and the consortium meeting, some questions came up. The questions are related to the needs of the farmer and some scenarios that could occur, the questions were asked to the farmers and the results are described in this chapter:

- What if it has been a rainy season and time is not on the farmer's side?
- Which weeds will be prioritized to be removed first?
- What settings would the farmer like to change on the weed removal tool?

For some farmers, the answer to the first question was: not removing all the weeds is not an option. These farmers would rather buy an extra robot than not remove all the weeds. For other farmers prioritizing what weeds will be removed first is interesting. The weed removal tool can take multiple paths to remove the detected weeds. The following settings might be interesting to implement in a future version of the weed removal tool:

First come first served. The weed that is close to leaving the workspace of the tool first will be removed first and after that the second, third etc. A possible path that the tool could take is shown in Figure 3-1. As seen in the image it starts at the end of the workspace and works towards the front of the workspace. When there is too little time, not every detected weed shall be removed. When this happens the agrobot shall keep driving even if not all the weeds are removed. In the future, it would be optimal if the tool could adjust the speed of the agrobot or send a stop signal.

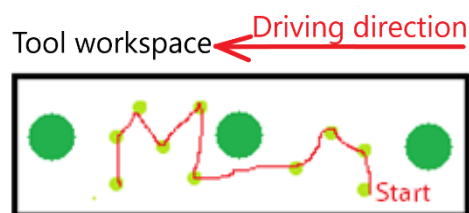


Figure 0-5: First comes first service

Weeds around crops will be removed. With this path, the tool will prioritize the weeds around the crops. Here the farmer can give the tool a minimum and maximum radius around the crop. For example a minimum of 1 cm around the crop and a maximum of 15 cm. The minimum radius is to prevent the tool from damaging the crop. In Figure 3-2 a possible path that the tool can take is drawn. The tool will only weed the weeds that are located between the inner and outer circles around the crop. This path could be used if there are too many weeds to weed in a certain amount of time. Then weeding the weeds that are located close to the crop will help the crop to grow without getting suppressed by the weeds.



Figure 0-6: Weeds around the crops

The most weeds in a certain time. The next possible path has as goal to weed as many weeds as possible in the given time. With this path, the weeds that are the closest together will be prioritized. This way, a lot of weeds will be removed in a short amount of time. The weeds that are not close enough will be left for the next time. In Figure 3-3 a possible path is shown, in this figure only the weeds that are close to each other are weeded.

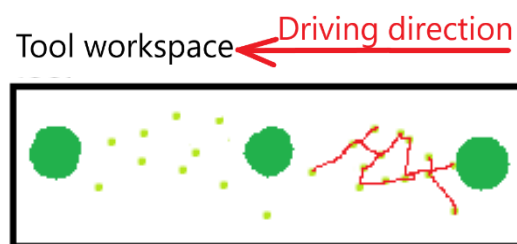


Figure 0-7: Most weeds

These were the possible paths that the tool could take. The other thing that a farmer could change is to prioritise a certain type or size of weed and there are some settings of the end effector that the farmer would want to change.

A certain type of weed has priority. This setting would be optimal if, for example, certain weeds damage the crop more than the other weeds, or one type of weed will grow faster than the other types. The weed with a higher risk of damage or suppression will be removed first. In Figure 3-4 the tool is only removing the orange weeds and leaves the rest of the weeds.

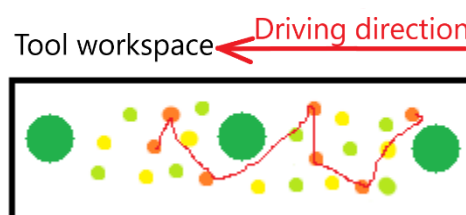


Figure 0-8: Prioritise certain weeds

The height/size of the weed. The other setting is prioritizing the bigger weeds. The bigger weeds will be removed first. This is to prevent the bigger weeds to grow even bigger and then overgrowing the crop. In Figure 3-5 the tool is only removing the bigger weeds and leaves the smaller weeds for next time.

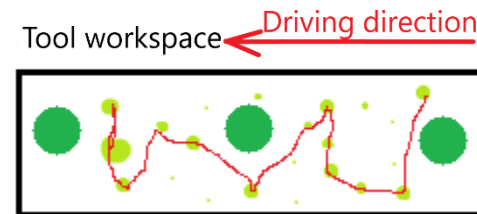
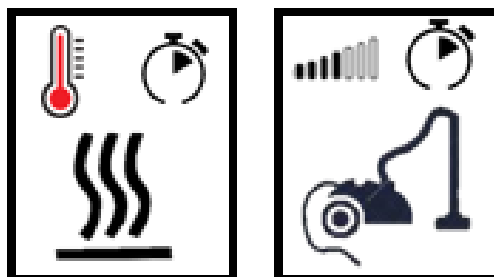


Figure 0-9: Prioritizing bigger weeds

End Effector settings. Finally, there might also be settings for the end effector. These settings are:

- **The temperature of the heating element.** Some weeds need might need a higher temperature to eliminate them, the outside temperature might be colder, or the weeds are wet.
- **The sucking power of the vacuum.** Some weeds are better rooted than other weeds or the soil is harder than normal.
- **The time the end effector is positioned on weed.** If increasing the temperature or the sucking power doesn't help, then positioning the end effector longer on the weed might help to kill the weed. However, if it takes more time to remove a single weed, then there might not be enough time to remove all the weeds or the weeding process will take longer.



4 What interfaces does the tool need?

Now that it is clear what a crop field looks like and what the wishes of the farmers are, the question is how the tool works and what the tool itself needs. What arrows are coming from the agrobot and the weed detection system in Figure 4-1? What functions are necessary so that the tool can use the data coming from the subsystems? To answer these questions, it is important to better understand the tool.

The main function of the tool is to position the end effector on the detected weeds. When the end effector is positioned a heating element will burn the weed. This will damage the weed, eventually killing it. To be able to position the end effector, a path-planning algorithm will create a path that evades crops and touches weeds. The tool needs a couple of things to be able to make these paths. The tool has to be mounted on the agrobot. The tool shall need power from the agrobot. The tool itself works on 24 V, so a voltage converter will be required if the agrobot works with a different voltage. For the tool to function, it will require knowing the ground speed of the agrobot. It will also require a list of poses of the weeds and crops from the weed detection system. For speed compensation, a timestamp of the detected weeds and crops is needed. With the timestamp and the speed, the displacement of the agrobot can be calculated.

The data that was mentioned in the paragraph above have to be obtained from the agrobot and the weed detection system. First, it has to become clear if the agrobot and the weed detection system can provide the information that is required by the tool. To figure this out the subsystems have to be analysed. Some functions are needed to make the data useful for the tool. These functions are currently under the question mark in Figure 4-1.

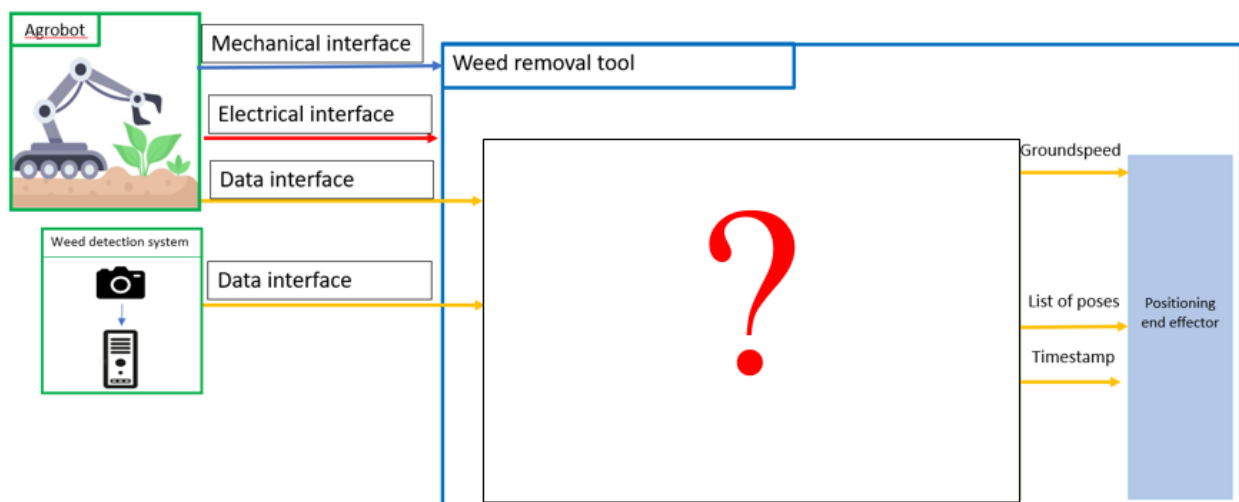


Figure 0-10: Interface weed removal tool

5 What do agrobots look like and what are the interfaces?

To answer this question the following resources were used: work package 1 from this project (C.E. Westerdijk, 2021), the internet in combination with the information from the wiki precisielandbouw (Precisielandbouw, n.d.), consortium and the delphy robotiseringsdag (Waanders, 2022). This research question will be answered in this chapter.

5.1 Which types of agrobots already exist?

There are already a lot of agrobots in different shapes and sizes. The level of intelligence among the agrobots varies significantly as well. Table 5-1 and Table 5-2 about 30 different agrobots are summed up.

Table 0-3: Agrobots from groenkennisnet (Precisielandbouw, n.d.)

Name	Weed removal	Changeable tool	Ai detection
BoniRob	Yes	Yes	Yes
Andela	Yes	No	Yes
Farming gt	Yes	No	Yes
Ecorobotix AVE	Yes	No	Yes
Ekobot	Yes	No	Yes
Xaver	No	No	No
RoboticsPlus	Yes	Yes	No
Sitia	Yes	Yes	No
Ztractor	Yes	Yes	No
Etrac	Yes	Yes	No
Ceol	Yes	Yes	No

Table 0-4: List of operational agrobot (C.E. Westerdijk, 2021)

Naam	Prijs	Operationeel	Onkruid
Agrointelligence Robotti	€ 175.000	12	nee
Agxeed	€ 249.500	1	nee
Carre Anatis	€ 100.000 - 140.000	10	nee
Directed Machines	\$ 14.800	small fleet	nee
Ecorobotics Avo	€ 90.000	5	ja
Ekobot gen-2	tbd	3	ja
Farmdroid FD20	€ 60.000	> 100	ja
Jacto 4000JAV	tbd	2	nee
Kilter AX-1	tbd	4	ja
Naio Oz	€ 9995 - € 30000	119	ja
Naio Dino*	€ 110.000	23	ja
Naio Ted	€ 125.000	19	ja
Odd.bot	tbd	1	ja
Raven Dot	\$ 700.000	11	nee
Farmwise Titan	ud	12	nee
Sitia Trektor	€ 200.000	u	nee
SwarmBot 5	\$ 4100 / m	10	nee
Vitibot	€ 125.000	u	ja
Vitrirover	€ 3000/ha/y	110	ja
* NijkAgro heeft Dino upgrade:		1	
- verstelbare spoorbreedte (180-225)			
- meer accu capaciteit			
- grafic camera schoffelsysteem			
Onkruid:			
ja = inclusief onkruidbestrijdingstechniek			
nee= exclusief onkruidbestrijdingstechniek			
bron: https://misset.com/field-robots/field-robots/		tbd = to be determined	
dec-2020		ud = undisclosed	
		u = unknown	

These agrobots can be divided into five categories, which are displayed in Figure 5-1. These categories are made with the interfaces in mind, which are mentioned in the previous chapter. In Figure 5-1, the agrobots are ordered from left to right from resembling a traditional tractor to barely resembling a traditional tractor. The weed removal tool could be mounted to categories 1, 2, 3 and 5. These four categories are built to hold different types of tools from different manufacturers. Category 4 is a bit different because these agrobots have permanent tools. On the next few pages, the interface of these 5 categories will be explained.

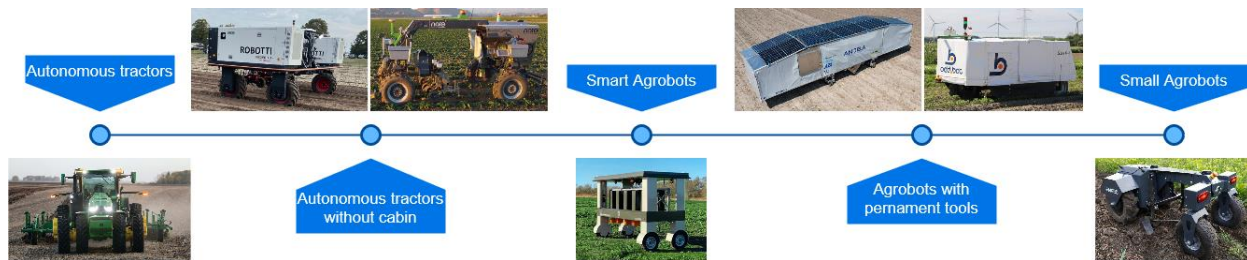


Figure 0-11: From tractor to agrobots



Figure 0-12: John deere autonomous tractor (John Deere, n.d.)

Currently, a lot of farmers use tractors with autonomous navigation. The tractors can autonomously navigate over crop fields. The tractors are being used to seed crops at a perfect distance in straight lines. With some tractors, the farmer only needs to steer to change rows. The autonomous tractor functions just as a normal tractor with some extra functionalities. For tractors, there are already a lot of tools. All these tools are being mounted using a 3-point hitch, and are being powered by a power take-off (PTO) from the tractor. An example of such a tractor is shown in Figure 5-2.

The second category is autonomous tractors without a cabin, which is an agrobot. The biggest difference between the agrobot and the tractor is that the cabin for the farmer is missing. An example of such an agrobot is the Robotti, see Figure 5-3. This agrobot can autonomously navigate through a crop field. Robotti has a diesel generator as a power source. The Robotti uses a 3-point hitch to mount its tools. The tools that can be mounted on the Robotti are the same as what tractors currently use.



Figure 0-13: Robotti (Agrobotelli, n.d.)

Another example of this category is the Orio. This agrobot is in between categories 2 and 3. This is because the Orio is a fully electrical agrobot. These agrobots are about the same size as typical tractors and use a battery pack as their power source. Some of these agrobots use a 3-point hitch to mount tools to the agrobots. Just like Orio from Naïo, see Figure 5-4. The Orio can hold tools in the centre as shown in the image. It can also hold an extra tool behind the agrobot. The system works on 48 V and can drive for 10 hours straight without a need to charge.



Figure 0-14: Orio from Naïo (Naïo , n.d.)

The third category of agrobots are agrobots that are fully electrical. In this category, the agrobots don't look like tractors anymore and use custom tools. An example from this category is the Robot one from Pixelfarming. This agrobot is a bit different from the Orio. The Robot one works on 48 V and is fully electrical. Robot one has 10 individual robot arms, the dark grey pillars in Figure 5-5. These robot arms can move sideways as well as move up and down. Tools can be mounted on these robot arms, using a custom mounting plate. There is also a data and power plug on these robot arms for the tools that are mounted on the robot arms. The robot can of course autonomously navigate through a crop field. The Robot one also has a weed detection system onboard. The weed removal tool will be integrated with the Robot one, this will happen in February 2023.



Figure 0-15: Robot one from pixelfarming (Pixelfarming robotics, n.d.)

The fourth category is the agrobots with a permanently mounted tool. The most important function of these agrobots is autonomous intra-row weeding. To execute this function the agrobot needs a weed detection system and a weed removal tool. In this category, the agrobot is built around the weeding tool. An example of such an agrobot is Odd.bot, shown in Figure 5-6. This agrobot has a weed detection system and a weed removal tool. The tool is a delta arm that pushes weeds into the ground.



Figure 0-16: Odd.bot (odd.bot, n.d.)

The last category of agrobots is agrobots which are a lot smaller than the previous two categories. Most of these agrobots are fully electrical. These smaller agrobots are mostly used for inter-row weeding or mowing. An example of such an agrobot is the Aigro up, see Figure 0-17. These smaller agrobots use custom mounting plates to mount tools. The tools of these agrobots are also all custom.



Figure 0-17: Aigro up (Aigro, n.d.)

5.2 What do agrobots have in common?

From the research on the agrobot, it is possible to find some commonalities. On a higher functional level, most of the agrobots are the same. In this paragraph, these commonalities will be described. Most agrobots have the following functionalities:

- A power source that supplies 24V or 48V
- Autonomous navigation using RTK-GPS
- Ability to drive over a crop field
- Possibility to mount different tools (except category 4)
- Safety sensors
- Human-machine interface

These are the functions that almost all agrobots have. Most of the agrobots do not have weed detection systems. One of the only agrobots that allows different tools and has a weed detection system is the Robot one from Pixelfarming. Other agrobots that have weed detection systems are the agrobots from category 4, which do not allow different types of tools. Some of the agrobots can communicate with the tools that are mounted to the agrobot. Most agrobots use a controller area network (CAN) as a communication protocol because CAN is a commonly used protocol in agriculture.

5.3 What are the interfaces that the agrobot can provide?

Now it is clear what the main functions and capabilities of an agrobot are, the research question “What are the interfaces that the agrobot can provide?” can be answered. In this paragraph, the interfaces between the tool and the weed detection system will not be covered. This will happen in chapter 6. This is because most of the agrobots do not have a weed detection system, so the weed detection system is considered a separate subsystem.

Some agrobots can provide more than other agrobots. An agrobot should at least provide the following things to the weed removal tool:

- Provide 24 V or 48 V to the weed removal tool
- The ground speed of the agrobot with a timestamp
- The agrobot must have an emergency protocol from the agrobot to the tool and back.

6 What are the interfaces of the weed detection system?

To answer this question the following resources were used: the internet in combination, consortium, the delphy robotiseringsdag (Waanders, 2022), researchers involved with project No weeds in the row and the researchers involved with the project PreciSIAlandbouw. PreciSIAlandbouw is a project from the mechatronics research group that is focused on detecting weeds and crops in a crop field.

A weed detection system is a crucial part of the system. The weed detection system shall detect the weeds and the crops on the crop field. The weed detection system does this by making a picture of the crop field. Then an artificial intelligence (AI) algorithm will detect the weeds and crops in this picture. The location of the weeds and crops will then be sent to the weed removal tool. The detection system from the project PreciSIAlandbouw will send its detection at a rate of 10 Hz.

The research group chose to separate the weed detection system from the weed removal tool. This was done so that the focus was purely on the weed removal tool. Another reason is that the tool can use other weed detection systems or agrobot with a weed detection system. This would make the tool cheaper and the farmer will not need a weed detection system for every tool the farmer has. The last reason why the weed detection system is not integrated with the tool is because of processing time. Figure 6-1 shows a sketch when the camera detects the weeds that are already in the workspace of the weed removal tool. In this scenario, the tool has little time to process the received data from the weed detection system. The tool needs this time to create a path from weed to weed and avoid the crops that are in between the weeds.

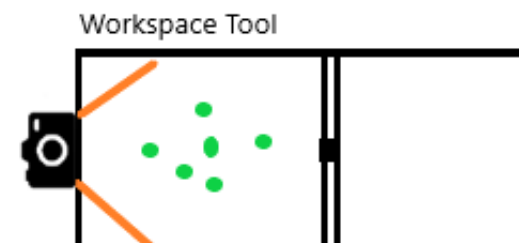


Figure 0-18: Integrated weed detection system

The other way is to place the weed detection system with an offset from the weed removal tool. The distance between the tool and the camera results in more processing time for the weed removal tool, see Figure 6-2. For example, the weed detection system is mounted one meter in front of the weed removal tool. The ground speed of the agrobot is 0.2 m/s. The processing time would then be around $1/0.2 = 5$ seconds.



Figure 0-19: Weed detection system separated from tool

For the weed removal tool to function properly a couple of things are needed from the weed detection system. How the tool and weed detection system would interface with each other was decided together with the researchers that are involved with the project PreciSIAlandbouw and No weeds in the row. The weed detection system will send the positions of the weeds and crops. With these poses, a timestamp will be provided. The timestamp will be necessary to compensate for the travelled distance.

The detection system will not filter double detections, this decision was made with PreciSIAlandbouw. The weed detection system simply sends all the positions of the weeds and crops to the tool. This would mean that certain plants will be sent multiple times. Figure 6-3 shows an example of three detections, in this image the light green dots are crops and the darker green dots, are weeds. The black box is the first picture, the yellow box the second and the grey one the last. In this scenario, the plants in the red box would be detected and sent 3 times. The weed detection system will not filter this to increase sending speed. Another reason is the weed detection system does not know what the limitations of the tool are, maybe the tool needs some detection 3 times.

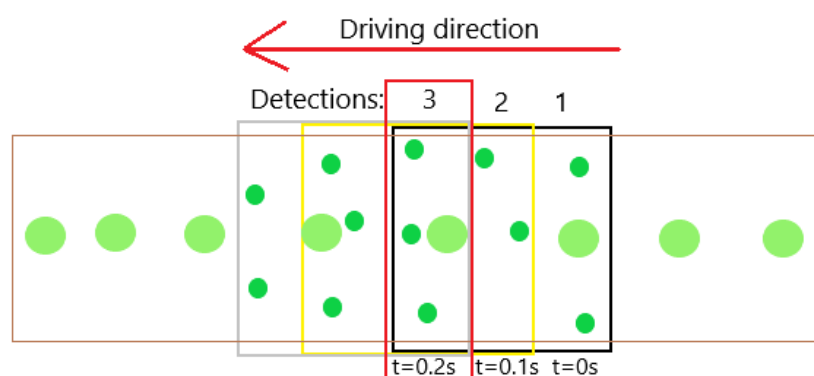


Figure 0-20: Example of detections

7 The interfaces between the tool, weed detection system and agrobot.

In the previous chapters, the agrobot, the weed detection system and the weed removal tool are analysed. In this chapter, the results of the analysis will be used to design a tool interface. The design in this chapter is on a functional level. The requirements that are defined in the previous chapter are kept in mind to design the interfaces. The focus of the design was on the data interface. This chapter is separated into two paragraphs.

The first paragraph is about the generic tool interface. In this design, the tool could be mounted on most agrobots and can communicate with the interfaces. The second paragraph is about the tool interface with the Robot one from Pixelfarming. The Robot one is smarter than most agrobots, meaning that the tool does not need to be that smart. Some functions of the weed removal tool will not be necessary. The weed removal tool will be integrated with the Robot one in the last week of February 2023. When designing the generic tool interfaces the integration with the Robot one was kept in mind.

7.1 Generic tool interface

The generic tool interface has to be adaptable to fit as many different agrobots. The interfaces have to encounter the different levels of smartness of the agrobots and the detection systems. In Figure 7-2 the functional architecture overview of the generic tool interface is shown. These interfaces will be explained in the paragraph.

7.1.1 Mechanical interface

The first interface is the mechanical tool mount. The tool mount of the agrobots differs a lot from each other. From 3-point hitch to custom mounts, the different mounts are covered in chapter 5. Defining one generic tool mount for all the different agrobots is not possible. The mounts of the agrobots just differ too much. The weed removal tool can be mounted to most of the agrobots as long as a custom mounting plate is designed. The mounting system will not be designed in this assignment. The focus will be on the data interface.

7.1.2 Electrical interface

The agrobot needs to power the weed removal tool and the weed detection system. There is no standard connector that agrobots use. Commonly used connector types are the ISOBUS connector, the CAN bus connector, the 13-pole connector and the 7-pole connector. The weed removal tool itself works on 24V. Most of the agrobots work on 24V or 48V. Because some agrobots work on 48 volts it will be necessary to have a voltage converter in the weed removal tool. The voltage converter should convert 48V to 24V. With the voltage converter, the weed removal tool will be able to work with more agrobots as well as the Robot one.

A weed detection system is necessary for the weed removal tool to remove weeds. However, most agrobots do not have a weed detection system. The agrobots without a weed detection system will need one. For example, the weed detection system from PreciSIAlandbouw. The weed detection system from PreciSIAlandbouw requires 24V to power this should be provided by the agrobot.

7.1.3 Data interface

Similarly to the electrical interface, there is no generic data connector that all the agrobots use. Commonly used connector data types are the ISOBUS connector, the CAN bus connector, the 13-pole connector, the 7-pole connector or a standard RJ45 ethernet plug. The connector should at least allow communication.

The communication protocol that will be used for the generic tool interface will be CAN. CAN is the most used communication protocol in agriculture and that is why most agrobot manufacturers also use CAN for their communication. CAN is used to communicate with components inside the agrobot and with subsystems or tools that are connected to the agrobot. The CAN protocol can send data at a rate of 0.5 – 1 Mbit/s. This will be enough for sending the groundspeed of the agrobot in real-time. However, if the detection system also uses CAN, it might overload the CAN network when sending the detections in real-time.

A test was done to determine how many bits are required to send a speed and detection message. These tests are mentioned in chapter 9. One speed message has a size of 68 bits and one detection message with 10 plants has a size of 420 bits. A message with 20 plants would have a size of 820 bits. In chapter 2 it was mentioned that in the worst case, there would be around 10 plants per meter per row of crops. The agrobot can drive over about 4 rows of crops and to be able to weed 4 rows it would require 4 weed removal tools and 4 weed detection messages. With the following calculations, an estimate of the size of the messages in the worst case was calculated.

- Detection message at 10 Hz $420 * 10 = 4200$ bit/s for 4 rows $4200 * 4 = 16800$ bit/s
- Speed message at 25 Hz $68 * 25 = 1700$ bit/s
- Total bits a second = $16800 + 1700 = 18500$ bit/s = 0.0185 Mbit/s

The messages are small enough that the CAN network will not overload as long as there is space for 0.0185 Mbit/s.

Something that will be crucial for communication over CAN is clock synchronisation. The clocks of the three subsystems have to be in sync. This is because the speed and the detection messages will have timestamps. The timestamps will be required for motion compensation when the agrobot is navigating through the field. An example of motion compensation is shown in Figure 7-1. The agrobot with the tool will drive in the negative x-axis with a velocity of 0.06 m/s. At $t = 0$ s the x-coordinate of the weed is 0.35 m. After 0.5 seconds the x-coordinate of the weed would be compensated to the new value of 0.38 m. The timestamp will be needed to figure out what the time difference is and also synchronise the tool with the messages of the detection system and agrobot. The CAN network has a protocol for time synchronisation which is TIME (Electronics, 2022). This is used to synchronise the clocks of the different subsystems.

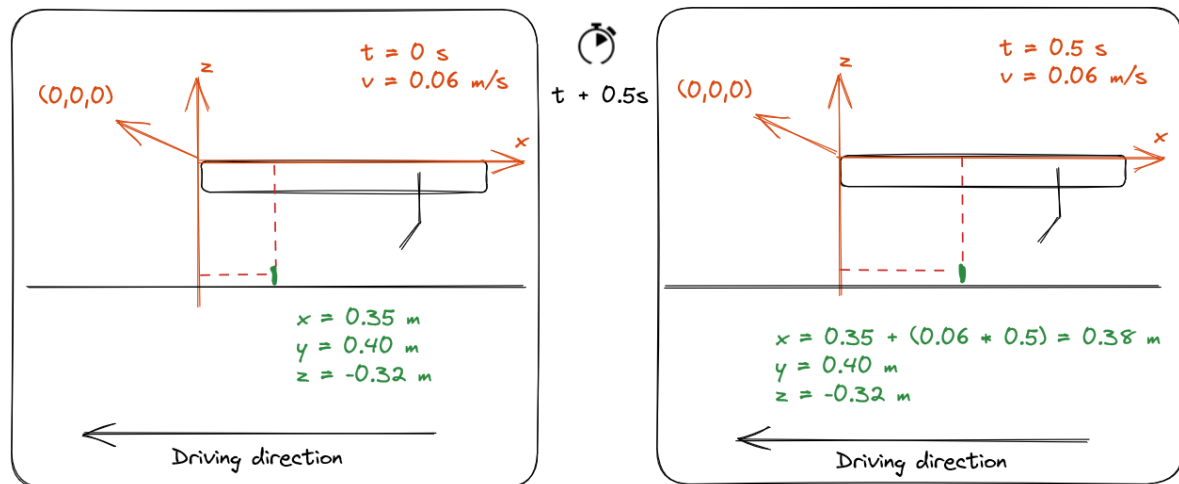


Figure 0-21: Motion compensation

Next, it must be determined what data will be communicated and by which subsystems. The generic interfaces are shown in Figure 7-2. As mentioned before, groundspeed is an important interface. If the groundspeed is not known it would be impossible to do motion compensation. The first choice would be to receive the speed from the agrobot. However, if this is not possible for some reason, there is the possibility to add a velocity-tracking wheel to the weed removal tool. This velocity-tracking wheel can be used to measure the ground speed of the agrobot.

There is one more interface between the tool and the agrobot: an emergency line. When the tool or the agrobot encounters itself in an emergency, the two subsystems should be able to communicate this to each other. In CAN there is a protocol EMCY (Electronics, 2022), this protocol is used to send emergency commands.

The weed detection system at least needs to send the positions of the weeds and crops. With these positions, a timestamp has to be provided for the motion compensation. This is what the tool at least needs from the weed detection system and the agrobot to function properly. As mentioned in chapter 3 there are some settings that the farmer could change. For example, only remove a certain type of weed. To accomplish this the tool will require some optional interfaces with the detection system. These optional interfaces would be different types of weeds and crops. Another optional interface is the certainty of the detections.

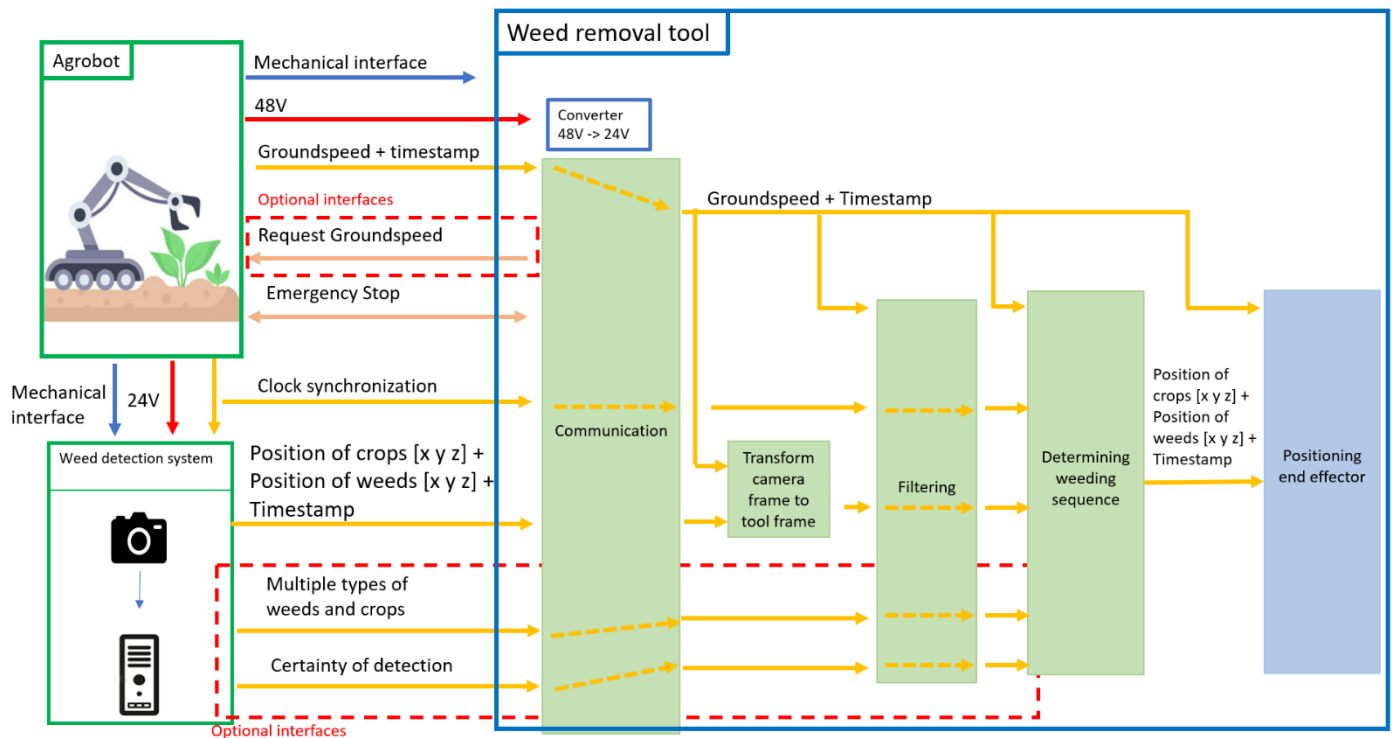


Figure 0-22: Generic tool interface

It is clear that the tool will receive from the agrobot and weed detection system, although it can not use this data yet. Making the data useful for the weed removal tool will require some extra functions. The first function block that is required is communication. This block will translate the CAN message to data that can be used in the Robotics operation system 2 (ROS2) environment where the weed removal tool is working. For ROS2 there is already a package that can be used to convert the messages from CANopen to ROS2. (Christoph Hellmann Santos, 2022)

The second function is transforming the coordinates of the detections from the camera frame to the tool frame. This function is placed second because this makes filtering the detections easier. When filtering the detections it is important to compensate for the speed. Compensating the speed is possible when the detections are in the tool frame. Then the axes of the detections are in the same orientation as the detections, see Figure 7-3. The agrobot drives in the direction of the x-axis.

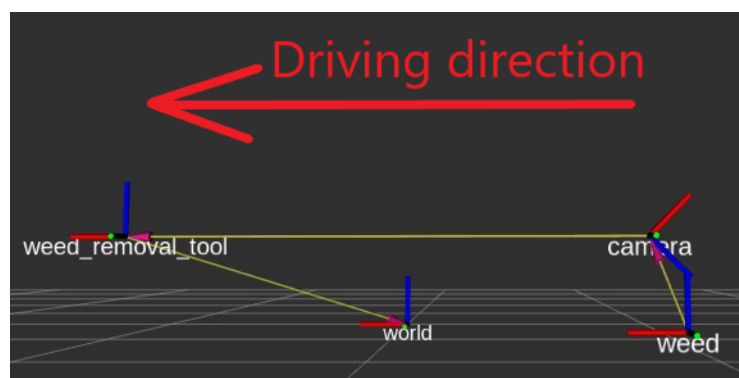


Figure 0-23: Coordinates frame

As mentioned before, it is necessary to filter the detections. In this function, detections that are detected multiple times will be filtered out. The reason why some plants will be detected multiple times is explained at the end of chapter 6. The double detections will be filtered out by compensating for the speed. The list of new detections will be compared with the old detections that are compensated with the speed. New detections that differentiate less than 0.5 cm from the old detections will be ignored because these will be double detections.

Furthermore, the weeding sequence must be determined. In this function, the detections will be filtered to fit a certain path that was explained in chapter 3. For example, ordering the list of detections so that the weed that is close to leaving the workspace of the tool first will be removed first and after that the second, third, etc.

The next function block is positioning the end effector. In this function block the path that the tool will take is created. The path will avoid the crops and will position the end effector for 0.5 seconds at the locations of the weeds. This function block is out of the scope of this research, this is created by another intern of the research group.

7.2 Robot one tool interface

This was the design of the generic tool interface, as mentioned before, the weed removal tool will be integrated with the Robot one. For the Robot one, the interfaces are a bit different than with the generic tool interface. In this paragraph, the functional design of the tool interface with the Robot one will be explained.

7.2.1 Mechanical interface

The Robot one from Pixelfarming has custom mounting plates for tools. Mounting the weed removal tool to the Robot one will require a custom mounting plate. Pixelfarming will design a mounting plate for the integration of the weed removal tool. For the design the placement of the tool is important. The weed removal tool has to be mounted behind a camera that detects the crops and the weeds. The red dots in Figure 7-5 represent the placements of the three cameras. The tool will be placed behind one of the cameras, for example, the first camera on the left. The tool will be mounted to two robot arms that are located in the back row of the robot arms, see Figure 7-7. Mounting the tool on the back row will increase the distance between the camera and the tool. With a bigger distance, there is more time for processing the data from the agrobot. To mount the tool to the robot arm a custom mounting plate is required. The engineers at Pixelfarming will design and fabricate the mounting plate. To give an idea, a rough sketch of the mounting plate is shown in Figure 0-25.

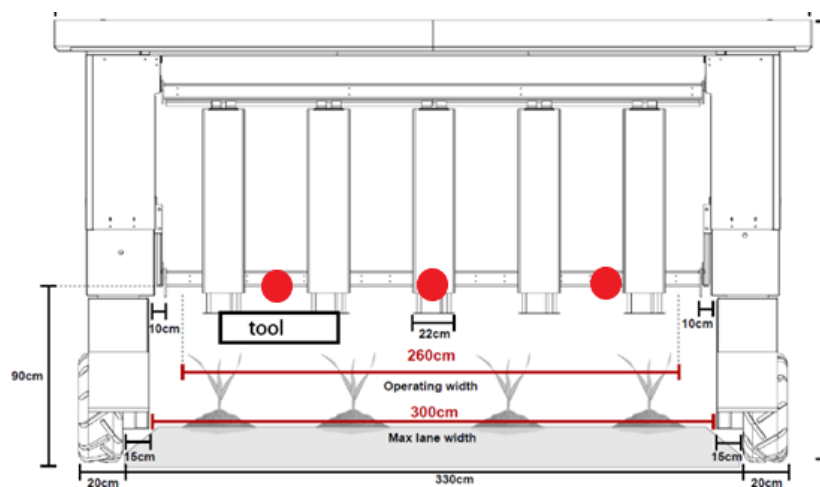


Figure 0-24: Dimensions Robot one with placement tool

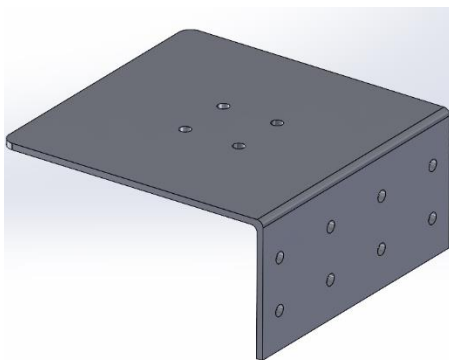


Figure 0-25: Sketch of Robot one mount

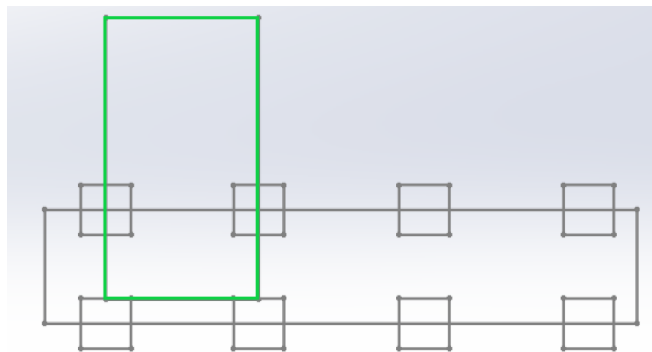


Figure 0-26: Top view placement tool under Robot one

1.1.1. Electrical interface

The connector of the Robot one is a 13-pole trailer plug. Through this plug, data and power go from the agrobot to the tools and robot arms. The pin layout of this plug is shown in Figure 7-8. This plug will be used for receiving power from the agrobot and for communication between the two systems. The Robot one from Pixelfarming works on 48V. The Robot one can supply 12V or 48V with the 13 pole plug that is meant for the tools, see Figure 7-8. The motors of the tool pull about 200 watts when accelerating. The 12V power might not be enough to provide the 200 watts. The 48 power supply is enough but this would mean that the weed removal tool needs a 48V to 24V converter. Furthermore, a 48V to 19V, for the Next Unit of Computing (NUC). The NUC is the brain of the weed removal tool.

7.2.2 Data interface

Pin	Colour	13p plug	Function
1	geel		CAN L
2	blauw		0V
3	wit		12V
4	groen		CAN H
5	bruin		POWER GND
6	rood		POWER 48V
7	zwart		POWER GND
8	rose		ethernet RX+
9	oranje		ethernet RX-
10	grijs		ethernet TX+
11	zwart/grijs		ethernet TX-
12	blauw/wit		<i>spare</i>
13	rood/wit		POWER 48V



Figure 0-27: Trailer plug Pixelfarming

The Robot one is smarter than other agrobots. The robot one has a weed detection system onboard. An overview of the Robot one interface is shown in Figure 7-9. The generic interfaces that are not needed are made transparent in Figure 7-9. The Robot One uses CANopen and ROS2 to communicate with its subsystems. For the integration of the weed removal tool, it was chosen to use ROS2 to communicate between the two systems. This was chosen because communication with ROS2 is easier to implement than with CAN. With ROS2 it is possible to create custom messages. The communication will go over the ethernet poles in the 13-pole plug, see Figure 7-8. ROS2 in combination with an ethernet connection was chosen because this is faster than using CAN protocol. The other reason is that both systems already use ROS2 so communication between the two subsystems is almost plug-and-play.

With the generic interface, it was important to have clock synchronisation. For the interface with the Robot one, it is also important to sync the clocks of the different subsystems. As mentioned before, both subsystems have Linux computers on board. Ethernet in combination with Linux computers also has a protocol for clock synchronisation (U, 2022). This protocol is Network Time Protocol (NTP) and can synchronize the clocks of the computers that are connected to the same network.

For the integration with Robot one, there will not be communication from the tool to the Robot one. This means that there will not be speed commands coming from the tool to the Robot one. To make the integration easier, it is chosen to leave the emergency stop out of the scope of this research. The detection system of Robot one already filters the detection before sending it to the weed removal tool. This means that the detection that the Robot one is sending will not have any double detections. That is why the filtering function block is transparent in Figure 7-9, as it is not necessary.

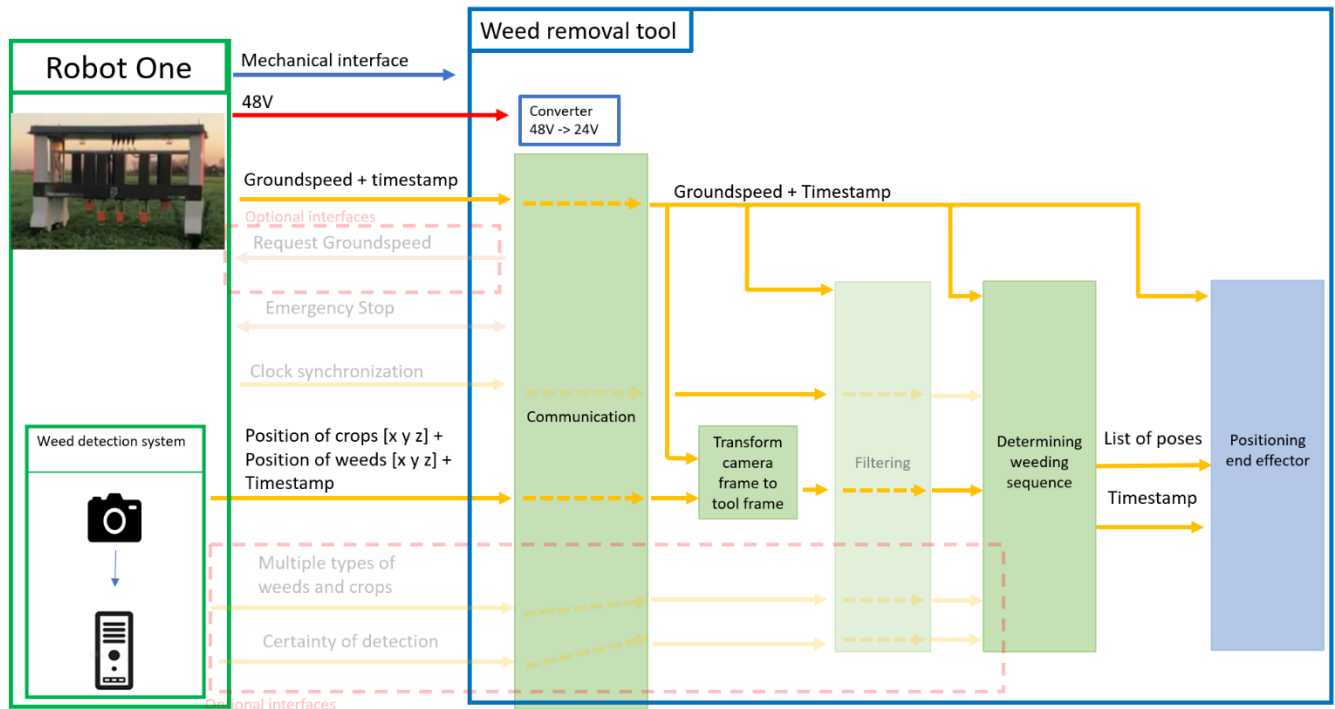


Figure 0-28: Robot one tool interface

8 Technical design tool interface

In this chapter, the technical design of the tool interface will be described. The technical design is focused on the communication interface between the Robot one and the tool. The technical design will solely be focused on the software interface between the Robot one and the weed removal tool. This chapter is divided into multiple paragraphs.

1.2. Communication architecture overview

In the functional design, it was determined to use ROS2 to communicate between the tool and the Robot one. ROS2 is a Robotics operating system. Devices with ROS2 can communicate with each other over ethernet. In ROS2 there are nodes and topics, see Figure 8-1. A node can be a publisher, subscriber or both. A publisher node publishes a topic, which can be any type of message. The subscriber node will subscribe to a topic and can use the data that was in the topic. A node can be a subscriber and a publisher at the same time. The nodes can be written with python and or c++. For the communication protocol, the main language will be python because this is more user-friendly than c++. The node `dynamic_motion_planning` and `static_motion_planning` are written in c++ by another student the reason behind this is that the path planning package `movit` only works with c++. This means that these two nodes will require a subscriber in c++.

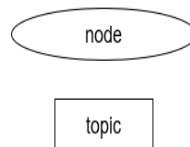


Figure 0-1: Topic and node

From the functional design in Figure 7-9 an architecture overview was designed, see Figure 8-2. The Robot one will need two extra publisher nodes. The first node will publish the topic `"/speed"`. The message in the topic speed is of the type `TwistStamped`. This message is shown in Figure 8-3. The topic will have the velocity of the Robot one in combination with a timestamp.

The second node will publish the topic `"/detections"`. The message in the topic detections is custom. This message is shown in Figure 0-4. This topic has a timestamp of when the detection took place and a list of detections. The detection has a type which can be anything for example weed or crop. The detection message has for every detection the coordinates. These two nodes are all that the Robot one needs to be able to communicate with the weed removal tool.

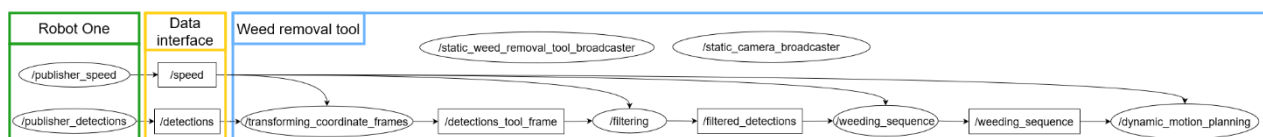


Figure 0-2: Communication architecture overview

```
Timestamp in nanoseconds: 1673254128353284116
Speed: 0.207068 m/s
```

Figure 0-3: Topic speed

```
header:
  stamp:
    sec: 1673274852
    nanosec: 202998684
  frame_id: ''
detected:
- type: crop
  position:
    x: -0.3794541738254604
    y: 0.05540161755193207
    z: 0.330812607535168
- type: weed
  position:
    x: -0.25501899973074055
    y: 0.3899693514918344
    z: 0.1847586276947773
```

Figure 0-4: Topic detections

The weed removal tool will have 5 additional nodes to the already existing node `dynamic_motion_planning`. The `dynamic_motion_planning` node has already been developed by another student. This node creates and executes the path that the end effector of the weed removal tool takes.

The weed removal tool will have the following additional nodes:

- `static_weed_removal_tool_broadcaster`
- `static_camera_broadcaster`
- `transforming_coordinate_frames`
- `filtering`
- `weeding_sequence`

The functionalities of these nodes will be explained in the next three paragraphs.

8.1 Transforming coordinate frames

The node `transforming_coordinate_frame` has as input the speed and detection message from the agrobot. This node will transform the coordinates of the plants from the camera or agrobot frame to the weed removal tool frame. It will also compensate for the travelled distance. The node will do this by using the TF2, which is the transform library for ROS2. It maintains the relationship between coordinate frames in a tree structure buffered in time and lets the user transform points between any two coordinate frames at any desired point in time.

For this node to function properly, the nodes `static_weed_removal_tool_broadcaster` and `static_camera_broadcaster` have to be launched beforehand. These two nodes place the camera and tool in a TF2 world, see Figure 8-5. This is necessary so that in the coming detections will be placed in the world in relation to the camera frame. The two nodes of the agrobot, speed and detections, should also be running for this node to function properly.

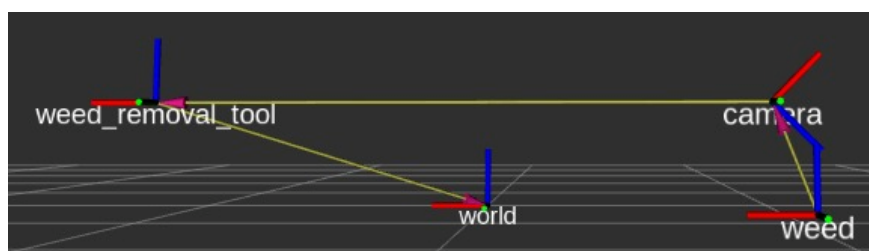


Figure 0-5: Weed removal tool and camera in TF2 world

The structure of the software in the node `transforming_coordinate_frames` is described in the flowchart in Figure 8-6. There are two flows in the node `transforming_coordinate_frames`. The first flow is related to the topic `speed`. This flow will loop every time a speed message is sent. The speed message will be saved in a list and the distance travelled gets calculated. The distance will be calculated in a similar way as in chapter 7. The list will be used by the function `compensate travelled distance`.

The second flow is related to the detection topic. This flow will loop every time a detection message is sent. The received detection message will be read out and saved in a list. Then the transformation from tool to camera frame will be read out from the TF2 world. With this transformation, the detections will be placed in the TF2 world with the correct orientation, as displayed in Figure 8-5. As shown in Figure 8-5 the weed is in the same orientation as the tool. Once the detections are placed in the TF2 world, the transformation from the weed removal tool to the detections can be read out using a TF2 function. With the transformation, the coordinates of the detections are known relative to the weed removal tool. There is still one thing to do and that is the function `compensate travelled distance`. The travelled distance will be calculated in a similar way as in chapter 7. Once the travelled distance is compensated the detections will be published to the topic `detections_tool_frame`. The topic `detections_tool_frame` is the same type of message as the topic `/detections`.

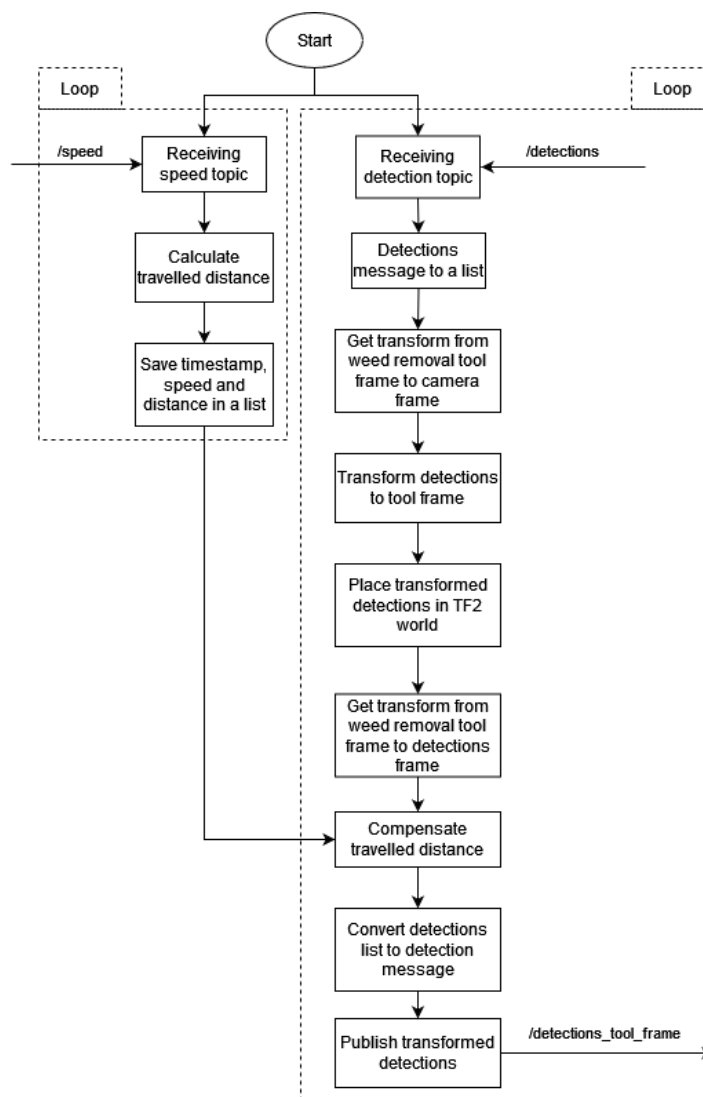


Figure 0-6: Flowchart `Transforming_coordinate_frames`

8.2 Filtering

The node filtering will not be designed or realised during this assignment. The reason behind this is time limitations and because Robot One already has this functionality in its weed detection system. That is why the node filtering in Figure 8-2 is empty. This node will now only receive the topic `/detections_tool_frame` and the topic `/speed`. This node will then publish the detections without changing anything to the data, the detections will be published to the topic `/filtered_detections`. This topic is the same type of message as the topic `/detections`. In the future, this node will filter out the double detections as mentioned in chapter 6.

8.3 Weeding sequence

The structure of the software in the weeding_sequence is described in the flowchart in Figure 8-7. Just as in the node transforming_coordinates_frames there are here also two flows. The first flow is related to the topic speed. The first flow loops every time a speed command is sent, but in the node weeding sequence the speed is not going to be used. In the future, the speed will be necessary to do motion compensation. The speed will also be necessary to filter out weeds once there are too many for the weed removal tool to remove. The path planner can only receive a certain number of weeds that it can kill, so not too many. This will not be implemented for the integration with Robot one because it was chosen to limit the number of weeds that the tool can handle.

The second flow is related to the topic `/filtered_detections`. This flow will loop every time detections get sent over the topic `/filtered_detections`. The detection message will be converted to a list. With the list, it will be possible to use the functions of python in the program. Once the detections are converted the list will be ordered from the highest x-axis value to the lowest x-axis value. This way the weeds to first leave the workspace of the tool will be removed first. The filtered list will be converted back to a detections message. This message will then be published to the topic `/weeding_sequence`. The node `dynamic_motion_planner` or `static_motion_planner` can subscribe to this topic.

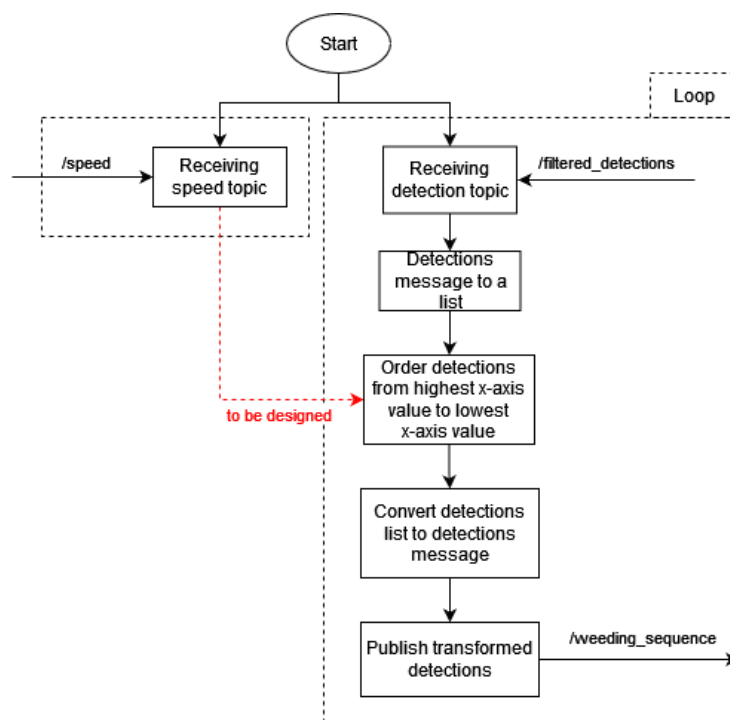


Figure 0-7: Flowchart weeding sequence

9 Test result

The realised communication protocol was tested using the test plan that is added in the appendix. In this chapter, the results from the test plan are summarized. A more detailed description of the results is described in the test plan. In total 5 tests were executed. The first four tests were to see what the properties of the messages were, such as delay and message size. These tests also demonstrated if it was possible to use the communication protocol to communicate on one device and between multiple devices. The last test was a simulation, in which the desired frequency of the message speed was tested.

9.1 Test 1: Functioning detection protocol

The protocol functions as expected. The message size of the message detections with 10 plants is 420 bits and can be sent with a maximum delay of 0.00017 seconds. The message speed has a size of 82 bits and a maximum delay of 0.00021 seconds. The results were obtained using `ros2 topic hz` and `ros2 topic bw`, see Figure 9-1, Figure 9-2, Figure 9-3 and Figure 9-4. The delays became after some time constant at these values. The message at these sizes will not result in any problems with communication over CAN and Ethernet.

```
min: 0.099s max: 0.101s std dev: 0.00018s
```

Figure 9-8: Result `ros2 topic hz /detections`

```
Message size mean: 0.42 KB min: 0.42 KB max: 0.42 KB
```

Figure 9-9: Result `ros2 topic bw /detections`

```
min: 0.098s max: 0.102s std dev: 0.00021s
```

Figure 9-10: Result `ros2 topic hz /speed`

```
Message size mean: 68 B min: 68 B max: 68 B
```

Figure 9-11: Result `ros2 topic bw /detections`

Currently, the node `transforming_coordinate_frames` is not functioning optimally. The transformation can only be read out once the node receives a new detection. This means that when the detections get sent at 10 Hz that the transformed detections get sent with a delay of at least 0.1 seconds. The transformation is working accordingly, Figure 9-5 shows a TF2 world with the detections placed in the correct orientation. This is because when using the ROS2 TF2 some functions weren't working as expected and there was not enough time and knowledge to fix this. When the detections are sent with a frequency of 10 Hz the delay is minimal and won't influence the weed removal process.

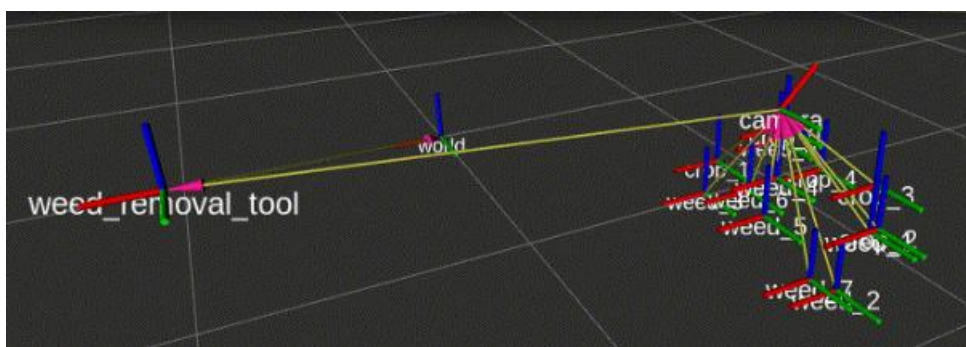


Figure 9-12: TF2 world with the detections

9.2 Test 2: The interface with the weed removal tool in a static environment

The weed removal tool can communicate with another device using the communication protocol that was realised. This was tested with the test setup shown in Figure 9-6, the laptop was communicating with the tool using an ethernet cable. It was not a problem that the ROS2 version on the laptop was different from the weed removal tool. The detections that were sent by the laptop could be read by the weed removal tool. With these detections, the tool made a path and executed the path and removed all the weeds, a demonstration video is added in the appendix. The only thing that did not go as expected is that the timestamp of the laptop and the weed removal were differentiating 0.283 seconds, see Figure 9-7. This was strange because in test 1 it was determined that with ROS2 it was possible to send messages with a max delay of 0.21 ms. It was suspected that this is because the timestamps of the two systems were not synchronising correctly. In test 3 this will be investigated further.



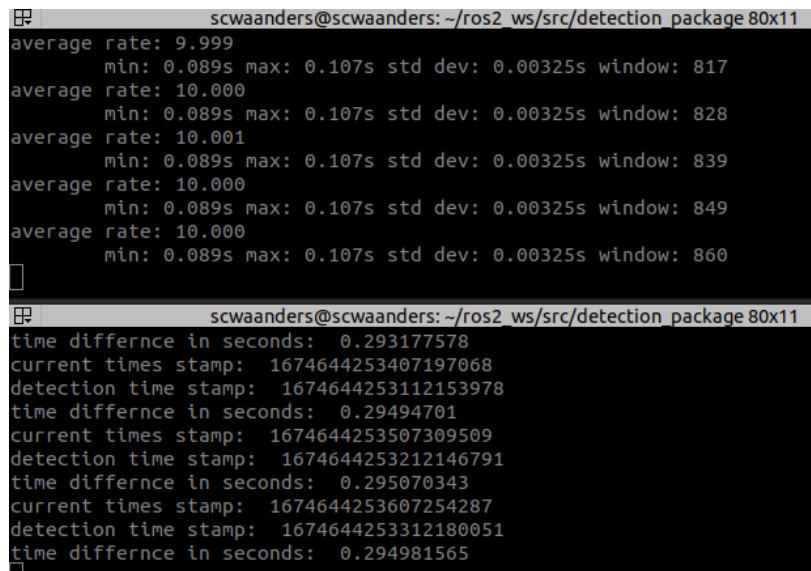
Figure 0-13: Interfaces in a static environment

```
ovidr-lectoraat@ovidrlecto
ffernce in seconds: 0.283898894
t times stamp: 1674561057274085017
ion time stamp: 1674561056990199701
ffernce in seconds: 0.283915111
t times stamp: 1674561058273837727
ion time stamp: 1674561057990084424
ffernce in seconds: 0.283787929
nt times stamp: 1674561059273995847
ion time stamp: 1674561058990120814
ffernce in seconds: 0.283904845
nt times stamp: 1674561060273257000
```

Figure 0-14: Timestamp difference tool and laptop

9.3 Test 3: The interface with a weed detection system

The communication with the weed detection system went as expected. It functioned the same as with the test that was described above. In this test, the detection system could send detections to the laptop. The problem with the timestamp also occurred in this test. In this test, the delay of the message detection was obtained in the same way as with test 1. This resulted in a delay of 0.0033 seconds, top section in Figure 9-8. This was better than the 0.295 seconds that were calculated using the timestamps, bottom section in Figure 9-8.



```

scwaanders@scwaanders: ~/ros2_ws/src/detection_package 80x11
average rate: 9.999
  min: 0.089s max: 0.107s std dev: 0.00325s window: 817
average rate: 10.000
  min: 0.089s max: 0.107s std dev: 0.00325s window: 828
average rate: 10.001
  min: 0.089s max: 0.107s std dev: 0.00325s window: 839
average rate: 10.000
  min: 0.089s max: 0.107s std dev: 0.00325s window: 849
average rate: 10.000
  min: 0.089s max: 0.107s std dev: 0.00325s window: 860

scwaanders@scwaanders: ~/ros2_ws/src/detection_package 80x11
time difference in seconds: 0.293177578
current times stamp: 1674644253407197068
detection time stamp: 1674644253112153978
time difference in seconds: 0.29494701
current times stamp: 1674644253507309509
detection time stamp: 1674644253212146791
time difference in seconds: 0.295070343
current times stamp: 1674644253607254287
detection time stamp: 1674644253312180051
time difference in seconds: 0.294981565

```

Figure 0-15: The interface with a weed detection system

After some further research, it became clear that the two systems are synchronizing their clocks separately with an NTP server. Both systems synchronize with a separate NTP server and this happens with some deviation in time, which causes the deviation in the timestamps. This problem can be fixed by making one device the NTP server and the other device the client. This was tried but because of the time limit, this was not yet succeeded. This will be a recommendation for the future.

9.4 Test 4: The interface with the weed removal tool in a dynamic environment

This test could partly demonstrate that the protocol can be used in a dynamic environment. In this test, the weed removal tool had to compensate for the speed of the convenient belt and “remove” the weeds. The speed had to be constant. It was not possible to have variable speed because the conveyor belt did not have an encoder. This means that it could not be tested that the effect is of a variable speed on the motion compensation. To be able to test, a simulation was made in Matlab. These results are described in paragraph 9.5.

In this test, it was demonstrated that the weed removal tool could receive a speed and a detection message. The data from these messages were used to create a path and compensate for the speed. A video of this test is added in the appendix.

9.5 Test 5: Simulation of optimal frequency message speed

As explained before, with the current tests it was not possible to determine the effects of a varying groundspeed of the agrobot on the motion compensation. Furthermore, it was not clear how fast the speed message should be sent. These questions were answered with this simulation. In the Matlab simulation, a vehicle was given a trajectory with a distance of 1.6 meters and a speed that varies $\pm 10\%$. In chapter 2, it was mentioned that with low weed density, the speed of the weed bed was 0.22 m/s and with high weed density 0.06 m/s. These two speeds will be used in the simulation. In the simulation, the

speed and time were sampled at 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz and 25 Hz. From the speed and time travelled distance was calculated by integrating the speed and time. The calculated travelled distance was compared to the actual distance. This would result in a deviation that is shown in Table 0-1.

Table 0-1: Results simulation

<i>Frequency</i>	<i>Deviation in meters at 0.22 m/s</i>	<i>Deviation in meters at 0.06 m/s,</i>
5 Hz	0.0439	0.0119
10 Hz	0.0218	0.0059
20 Hz	0.0108	0.0029
25 Hz	0.0086	0.0023

From the test, it became clear that with a variation of 10%, the calculated travelled distance can be off by a bit and this is a problem. Because the weed removal tool has as a requirement that the end effector should be able to position within a centimetre of the weed. This means that the calculated distance can maximum differ by 1 cm from the actual travelled distance otherwise the requirement can not be met. As the table shows that when an agrobot is driving at a speed of 0.22 m/s it is needed to send the speed with a frequency of 25 Hz. At this frequency, the deviation is less than 1 cm. For a lower speed of 0.06 m/s, the frequency can be lower. With a lower velocity is a frequency be 10 Hz enough to compensate for the movement, because then the deviation is 0.59 cm.

10 Conclusion

In conclusion, this research paper successfully achieved its goal of designing and realizing a generic tool interface between the weed removal tool, the agrobot, and the weed detection system to carry out the task of weeding efficiently. The communication protocol that was realised in ROS2, was found to be suitable for the generic tool interface, and the addition of a CAN protocol option would make the interface truly generic. The importance of clock synchronization among all the subsystems involved was emphasized to ensure the proper functioning of the generic tool interface.

The interface was designed to be generic so that the weed removal tool can work with a range of agrobots and handle communication between the weed detection system and the weed removal tool. The agrobot must provide 24 V or 48 V to the weed removal tool and weed detection system. Both the weed removal tool and the weed detection system should be mountable on the agrobot. This should be done by designing different custom mounts, one for every agrobot.

The agrobot must send the groundspeed of the agrobot with a timestamp at a rate of 25 Hz to minimize deviation in the travelled distance when the weed removal tool is compensating for the groundspeed of the agrobot. An emergency protocol between the agrobot and weed removal tool should be added to the detection protocol. It would be optimal if the weed removal tool can request a desired groundspeed of the agrobot. This would improve the weeding process.

The interface between the weed detection system and the weed removal tool was crucial in achieving the goals of this project. The weed detection system is responsible for sending detections with timestamps to the weed removal tool. The weed removal tool will filter for double detection and transform these detections into the weed removal tool coordinate frame. The weed removal tool will create the most optimal weeding sequence.

Overall, this research project successfully achieved its goal of developing a generic tool interface that would enable the weed removal tool, the agrobot, and the weed detection system to work together efficiently to accomplish the task of weeding. The designed interface is a good step into the future of smart tools in the agriculture sector.

11 Recommendations

In the conclusion, it was stated that the detection protocol is working accordingly. There are still some improvements and some things still have to be researched and tested. These recommendations will be described in this chapter.

CAN Protocol Implementation

It is recommended to implement a CAN communication module in the weed removal tool. Communication over CAN will allow the weed removal tool to be more generic. This will enable us to communicate with a bigger range of different agrobots. The weed removal tool will also need some additional software to be able to read the messages. ROS2 has some packages (Christoph Hellmann Santos, 2022) to be able to read and send a message over CAN.

Transforming Coordinates Frame

It is recommended to improve the node that transforms the coordinates frame from the weed detection system frame to the weed removal tool frame. Proper transformation of the coordinates frames is essential to ensure accurate weed removal and to avoid collisions between the end effector and the crops.

Timestamp Synchronization

It is recommended to synchronize the timestamps between the weed removal tool, weed detection system, and agrobot to be able to accurately compensate for the groundspeed of the weed removal tool.

Emergency Message

It is recommended to implement an emergency message in the interface between the weed removal tool, weed detection system and agrobot. An emergency message will allow the agrobot to respond quickly in case of any unexpected events, such as a damaged weed removal tool or weed detection system.

Filtering Node

It is recommended to implement a filtering node in the weed removal tool. This node will be needed when the weed detection system is sending a certain weed multiple times. The filtering node will remove double-detected weeds and crops.

Motion Compensation and Optimization

It is recommended to carry out more tests with motion compensation. Motion compensation still has to be added to the path planning part of the weed removal tool. Motion compensation will be crucial to correct the groundspeed of the agrobot during the weed removal process.

Implementation with different Agrobots

It is recommended to implement the weed removal tool with other agrobots than Robot one. According to the design it is possible to implement the tool with different agrobots. The implementation with other agrobots will determine how generic the interface is.

12 Bibliography

- [1] Plantaardig, „Aardappel handleiding,” [Online]. Available: https://www.plantaardig.com/groenteninfo/aardappel_handleiding.htm.
- [2] Wikifarmer, „Hoe sla te kweken,” [Online]. Available: <https://wikifarmer.com/nl/hoe-sla-te-kweken-sla-complete-kweekgids-van-zaaien-tot-oogsten/>.
- [3] Akkerbouwbedrijf, „Peen zaaien,” [Online]. Available: <https://www.akkerbouwbedrijf.nl/peen-zaaien/>.
- [4] A. M. K. P. A. P. C.E. Westerdijk, „Eisen aan een Agrobot,” AERES Hogeschool, Dronten, 2021.
- [5] Akkerbouwbedrijf, „Uien zaaien,” [Online]. Available: <https://www.akkerbouwbedrijf.nl/uien-zaaien/>.
- [6] T. H. & A. Looije, „Onkruidbestrijding met wiedbedden minder effectief,” *IMAG Wageningen*, p. 2, November 2001.
- [7] S. Waanders, „Delphy Robotiseringsdag,” Zeeland, 2022.
- [8] W. Precisielandbouw, „Groen kennisnet,” [Online]. Available: <https://www.wiki-precisielandbouw.nl/space/pl05/6258719/Robotica>.
- [9] „Aigro,” [Online]. Available: <https://www.aigro.nl/>.
- [10] C. Electronics, „CANopen Explained – A Simple Intro,” 2022. [Online]. Available: <https://www.csselectronics.com/pages/canopen-tutorial-simple-intro>.
- [11] H. D. Christoph Hellmann Santos, „Ros Industrial,” 2022. [Online]. Available: https://ros-industrial.github.io/ros2_canopen/manual/index.html.
- [12] S. U, „linuxhint,” 9 2022. [Online]. Available: <https://linuxhint.com/sync-time-ntp-server-linux/>.
- [13] „Moveit ros,” [Online]. Available: <https://moveit.ros.org/>.
- [14] R. Alves, „The Construct,” 22 04 2022. [Online]. Available: <https://www.theconstructsim.com/learn-tf2-ros2-concepts-in-practice/>.
- [15] „John Deere,” [Online]. Available: <https://www.deere.com/en/autonomous/>.
- [16] „Agrointelli,” [Online]. Available: <https://agrointelli.com/robotti/>.

[17] „Naïo,” [Online]. Available: <https://www.naio-technologies.com/en/orio/>.

[18] „Pixelfarming robotics,” [Online]. Available:
<https://pixelfarmingrobotics.com/robot-one/>.

[19] „odd.bot,” [Online]. Available: <https://www.odd.bot/>.

Bijlage 2: Studentenverslag Project Mechatronisch Analyseren en
Conceptualiseren (PMAC) – Vision & Manipulation for Precision Agriculture



Eindverslag

Vision & Manipulation for Precision Agriculture

Mechatronica

Enschede, 19 juni 2022

Versie 1.0

Opgesteld door:

**Roy Lentink
Lars Wildemors
Bram Meijerink
Sander Versteegh
Maarten Mol
Hans ten Voorde**

Inhoud

Inhoud 63

Introductie 64

Auteurs64

Afkortingen.....64

Woordenlijst.....64

Versiebeheer64

1. Samenvatting 65

2. Inleiding 66

3. Methode 67

4. Resultaten68

4.1. Bijzonderheden / opmerkingen69

5. Conclusie en aanbevelingen 70

Introductie

Auteurs

Naam	Functie
Roy Lentink	Voorzitter
Lars Wildemors	Notulist
Bram Meijerink	Kwaliteitsmanager
Hans ten Voorde	Klantcontact
Sander Versteegh	
Maarten Mol	

Afkorting

Afkorting	Beschrijving
SRD	Systems Requirements Document
CTQ	Critical to quality (Eisen die kritisch zijn voor de kwaliteit)
POE	Power over Ethernet
TAR	Test en analyserapport

Woordenlijst

Term	Betekenis
DALPA	Naam van het systeem dat wordt ontworpen in dit project.
CARRIER	Naam van het systeem waarop DALPA wordt bevestigd.

Versiebeheer

Datum	Versie	Auteur(s)	Aanpassingen t.o.v. vorige versie
25 mei, 2022	V0.1	Bram	Eerste opzet
31 mei, 2022	V0.2	Lars, Maarten, Roy en Bram	Samenvatting, inleiding en methode
25 mei, 2022	V0.3	Sander en Hans	Uitwerken software voor testen.
31 mei, 2022	V0.4	Complete team	Verwerken testresultaten
8 juni, 2022	V0.5	Complete team	Uitwerken resultaten
14 juni, 2022	V0.6	Sander, Bram en Lars	Inhoud controleren en verbeteren
15 juni, 2022	V0.8	Complete team	Eindcontrole

1. Samenvatting

Dit project wordt DALPA genoemd dit staat voor Detecting and localisation for precision agiculture. DALPA is een onderdeel van een groter project. Het doel van het overkoepelende project is om een robot te ontwerpen die onkruid uit een akker kan verwijderen. Het doel van DALPA-project is om een modulaire sensor te ontwikkelen die gebruikt kan worden om nauwkeurig de locatie van onkruid te detecteren zodat deze door andere systemen verwijderd kunnen worden.

Tijdens de ontwerpfase worden er met name gelet op de volgende aspecten: nauwkeurigheid, omgeving bestendigheid, modulariteit en snelheid. Hoe deze eisen specifiek gedefinieerd zijn staat in het SRD.

Echter was er niet genoeg tijd voor dit project en is er dus voor gekozen om een Proof of principle te maken van een lastigste subonderdeel i.p.v. het realiseren van een prototype. Hiervoor is gekozen voor het detectie en lokalisatie aspect van DALPA. Het idee is door middel van NDVI-imaging (Normalized Difference Vegetation Index) aan te tonen of er onkruid aanwezig is a.d.h.v. de detectie van fotosynthese. Het principe werkt als volgt, een levende plant weerkaatst meer infrarood dan de grond errond omheen, een NGB-camera (een camera met roodfilter i.p.v. infraroodfilter) kan gebruik worden om infraroodlicht te detecteren. In theorie zou dus de plant lichter op moeten lichten aangezien deze geen infraroodlicht weerkaatst.

Het Proof of principle is als volgt getest er is een test setup gemaakt waar foto's zijn genomen van verschillende planten op verschillende ondergronden door 2 verschillende camera's een NGB-camera en een standaard RGB-camera als referentie. Deze foto's worden eerst geanalyseerd op basis van contrast van plant tot ondergrond en vervolgens getest op nauwkeurigheid adv een vision algoritme. De locaties van de planten kan vergeleken worden met de meetlinten die aanwezig zijn op de test setup.

Het proof of principle voldoet aan de eisen want het heeft beide testen doorstaan, er is een aanzienlijk contrastwaarde tussen de plant en de ondergrond namelijk 319,7 i.p.v. 137,3 die de RGB-camera had. Wat betreft locatie bepaling is de nauwkeurigheid 1,012mm wat voldoet aan de eis van 5mm uit deze resultaten blijkt dat NDVI-imaging handige informatie bevat voor het detecteren van planten en in samenwerking met andere sensoren in veel verschillende situaties de locatie goed kan bepalen

Tot slot werden er tijdens testen gebruik gemaakt van veel verschillende berekeningen, er is nog veel onderzoek nodig om dit nog beter te laten presteren. Voor meer aanbevelingen kan er gekeken worden onder het kopje aanbevelingen in dit document

2. Inleiding

Dit project (DALPA) komt voort uit een opdracht gegeven door het lectoraat Mechatronica. Het lectoraat is bezig met het ontwikkelen van een robot die onkruid verwijderd, deze robot kan dan langs gewassen op het land rijden en onkruid herkennen waarna die deze verwijderd, zodat ze het gewas niet overgroeien. Nu wordt er vooral gif gebruikt om onkruid bij de gewassen te doden. De robot die onkruid verwijderd kan ervoor zorgen dat er geen gif meer gebruikt hoeft te worden wat weer beter is voor de omliggende natuur en de totale biodiversiteit.

DALPA gaat over de detectie en lokalisatie van onkruid ten opzichte van de grond. De locaties van de gewassen zijn bekend en dus hoeft er geen onderscheid gemaakt te worden tussen het onkruid en het gewas. Het grootste gedeelte van het project wordt er beziggehouden met de documentatie, het belangrijkste document hiervan is het System Requirements Document (SRD). Het SRD vormt de basis voor het realiseren van het systeem DALPA. Er is geen tijd om het gehele systeem DALPA te realiseren, dus wordt er een functie uitgekozen waarvan een POP (proof of principle) wordt uitgewerkt. Met de POP wordt er gekeken naar een detectie mogelijkheid om planten te herkennen ten op zichte van de ondergrond (akker).

Voor de POP wordt er gekeken of het verwijderen van het infrarood filter bij een standaard camera en het toevoegen van een kleurfilter het contrast tussen de planten en de omliggende ondergrond vergroot zodat dit beeld gebruikt kan worden voor het detecteren van planten. NDVI wordt gebruikt voor een duidelijke weergave van het beeld.

Er wordt een test setup gemaakt en een test en analyserapport (TAR), hiermee wordt het contrast tussen de plant en ondergrond gedocumenteerd en kan er op het einde een conclusie getrokken worden of de aanpassingen aan de standaard camera een positief effect heeft op de vergroting van het contrast.

Omdat er een nieuw meetapparaat wordt ontworpen voor iets wat nog geen standaard meet apparatuur heeft zijn er ook geen specificaties aan de uitkomende beelden gedeclareerd.

Ook zal er gecontroleerd worden of de camera een nauwkeurig beeld van de planten kan maken en of de planten door middel van een vision programma gelokaliseerd kunnen worden. Hier zal gekeken worden of deze lokalisering voldoet aan de maximale afwijkingen die zijn opgesteld in het SRD.

3. Methode

Voor het project wordt er gekeken naar wat uitgevoerd moet worden en welke documenten allemaal aangeleverd moesten worden. Als algemene richtlijn is hierbij gebruik gemaakt van het V-model, bestaande uit de volgende fases:

- Initiatiefase
- Definitiefase
- Ontwerpfase
- Testfase
- Afrondingsfase

In de 'initiatiefase' wordt er een projectplan gemaakt waarin de achtergrond van het project beschreven staat. In het projectplan wordt er ook beschreven wat het doel van het project is. Vervolgens worden er projectgrenzen vastgesteld, welke stappen tijdens het project genomen gaat worden en wat er aan documenten opgeleverd moet worden. In het projectplan wordt ook een planning en taakverdeling voor de rest van het project gemaakt.

In de 'definitiefase' worden de eisen van DALPA opgesteld, deze eisen komen in de vorm van een SRD (System Requirements Document) naar voren. Naast de eisen bevat de SRD de stakeholders, user scenario en welke eisen als meest belangrijk worden ervaren. Zodra beide de groep dat bezig is met het project en de klant het eens is met de eisen die vastgesteld staan in dit document, worden deze eisen vervolgens verwerkt in de 'ontwerpfase'.

In de 'ontwerpfase' wordt er een functioneel ontwerp gemaakt met de belangrijkste functies van het project. Aan de hand van deze functies worden vervolgens de beste oplossingen bedacht voor alle functies van DALPA, dit wordt gedaan d.m.v. een morfologisch overzicht. Vervolgens wordt er nog een overzicht gemaakt van alle domeinen van het systeem. (mechanisch, elektronisch, elektrisch en software).

In de 'testfase' wordt er een POP gemaakt over de eis wat als het meest interessant wordt ervaren. Vervolgens wordt deze POP op contrast en gedetecteerde locatie getest. Voor contrast worden er contrast waardes bepaald, bestaande uit het verschil tussen het referentiepunt en de filter zelf. Om de locatie te testen wordt er de gemeten locatie van de plantje door de sensor en handmatig bepaald, daaruit wordt het verschil bepaald. Uit de resultaten wordt er gekeken of de POP voldoet naar verwachting.

Tot slot wordt in de "afrondingsfase" een eindverslag over het gehele project geschreven (dit document). In dit verslag wordt er ook gereflecteerd over alle fases en gekeken wat er in toekomst beter kan. Verder wordt er ook een conclusie getrokken over de verkregen resultaten uit de POP, waarmee er nog aanbevelingen worden gedaan.

4. Resultaten

In de documentatie staan de resultaten voor het gehele project DALPA vernoemd en uitgeschreven. Aangezien er geen tijd was om het gehele project te maken is er 1 onderdeel gekozen om uit te werken, dit in de vorm van een POP. Voor de POP is er gekozen om de detectie van onkruid uit te werken.

De eerste resultaten zitten in de SRD. De SRD bevatten de eisen waar DALPA aan moet voldoen en welke van deze eisen als het meest belangrijk worden ervaren. Daarnaast zitten er resultaten in de FO. De FO bevat de ontwerpen van DALPA (elektrisch, elektronisch, mechanisch en software), en de oplossingen voor DALPA om aan de verschillende voor DALPA opgestelde functies te kunnen doen.

Uit de POP zelf is gebleken dat de blauwfilter het grootste/beste contrastverschil oplevert. Alle verkregen contrast waardes kan hieronder gezien worden.

	<i>Filter</i>	<i>Contrast waarde</i>
1	IR + blauw	319,7
2	IR + groen	309,9333
3	RGB zonder infrarood	216,7667
4	IR + geel	212,4
5	IR + rood	201,2333
6	RGB-referentie	137,2667

Hierbij wordt het duidelijk dat er een groot verschil is tussen de filters, maar elk filter presteert significant beter dan de RGB-referentiepunten

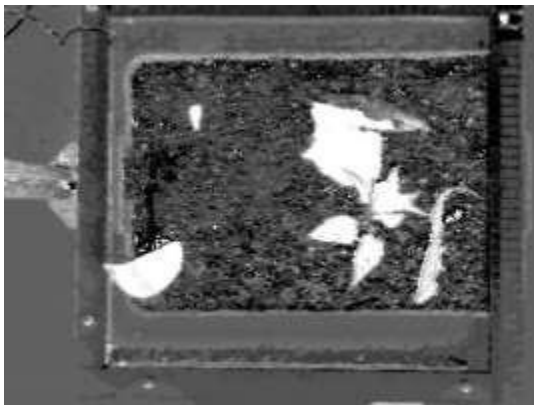
Daarnaast is uit de POP gebleken dat tijdens het detecteren er een gemiddelde afwijking van 1,012 mm wordt vastgesteld. Wat binnen de afwijking van 5mm zit. Met dat de resultaten ook nog verbeterd kan worden door onder andere meer pixels en metingen.

4.1. Bijzonderheden / opmerkingen

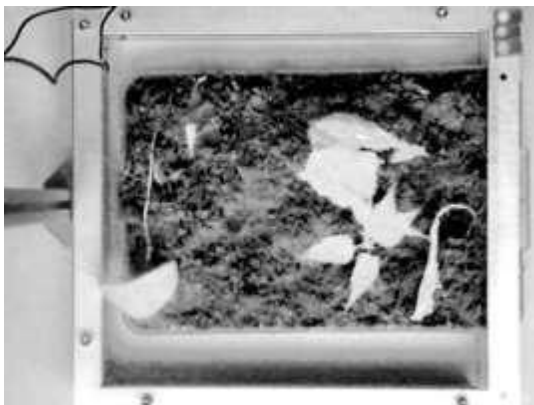
- Het hout van de opstelling ziet er geheel anders uit het tafelblad als ondergrond
- Geplukte plantjes werken als test object.
- TL-balken zijn geen goeie lichtbron deze filteren IR.
- Handmatig sluitertijden aanpassen en vaststellen is nodig.
- NDVI werkt beter in omgevingen met weinig licht (IR licht is nodig).
- Fluorescerend licht straalt weinig IR licht uit.
- Geplukte bladeren reflecteren nog voor een bepaalde tijd IR licht.
- Webcams passen zijn helderheid aan voor elk individueel kleur.

Hieronder zien we de foto's van de standaard camera en aangepaste camera zonder infrarood filter en met roodfilter ervoor. Hierop is de standaard NDVI-berekening losgelaten, (blauw-rood)/(blauw+rood).

RGB NDVI CONTRASTED



IR NDVI CONTRASTED (AANGEPAST)



5. Conclusie en aanbevelingen

Zoals er eerder in de inleiding genoemd was, is het heel belangrijk om het detecteren en lokaliseren van plantjes te automatiseren zodat de natuur minder erg beschadigd wordt. Hiervoor was er bedacht om een POP te creëren dat het detecteren van plantjes door middel van NDVI foto's test.

Uit de resultaten is het duidelijk geworden dat het gebruiken van een blauw filter met een contrast waarde van 319,7 het beste werkt. Daarnaast is uit de resultaten gekomen dat tijdens het bepalen van de positie van een plantje door de sensor het afwijking 1,012 mm is en daarmee binnen de geëiste 5mm valt. De verkregen resultaten kan als volgt samengevat worden:

Het ziet het ernaar uit dat de informatie verkregen uit de testen lijkt te bevestigen dat NDVI foto's het detecteren van plantjes verbeterd. Echter, gezien de beperkte beschikbare tijd voor het project, waren voor de testen op specifieke manieren en in specifieke omgevingen uitgevoerd. Om deze redenen worden er de volgende dingen aanbevolen:

- Betere/hogere kwaliteit camera: Hierdoor wordt de resolutie beter waardoor er minder ruis binnen komt, en dus accurater gemeten kan worden.
- Betere filters: Gezien filters nooit perfect zijn komt er altijd wat door. Dit betekent dat een goedkopere filter vaak meer van een gefilterde kleur doorlaat dan een duurdere filter en de prestaties van het gebruik van NDVI verbeterd.
- Buiten testen: Het testen was alleen mogelijk in een binnen omgeving i.v.m. regen, dit betekent dat er niet in een buitenomgeving getest is.

Dit project is mede mogelijk gemaakt door



Alm Regio 15 B.V.

Binn'ndieks

Maatschap M. & G.J. Oosterhuis



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit

