

# Technologische ontwikkelingen voor het monitoren van ziektes en plagen in de kas

Achtergronddocument

## Algemene achtergrond

Tijdige detectie van ziektes en plagen in de kas is essentieel om gericht in te kunnen grijpen en schade aan het gewas te minimaliseren. Des te eerder een de ziekte of plaag wordt gedetecteerd, des te kleiner de kans op grootschalige verspreiding, des te kleiner het opbrengstverlies en des te kleiner het benodigde gebruik van bestrijdingsmiddelen. Met een getraind oog kunnen de meeste ziektes en plagen wel worden waargenomen, maar dit kan typisch pas in een later stadium van de infectie of infestatie. Daarnaast is voor het voor vroegtijdige detectie van een uitbraak en het mogelijk maken van lokale bestrijding essentieel om zo regelmatig mogelijk zo veel mogelijk planten te kunnen beoordelen. Zonder hulp van technologie zijn de mogelijkheden hiertoe beperkt door de kosten en beschikbaarheid van arbeid.

Digitale detectiemethoden maken gebruik van sensoren om de ziektes of plagen direct waar te nemen, of de reactie van de plant hierop te detecteren. Deze methoden hebben de innovatieve belofte om vaker, eerder en/of nauwkeuriger ziektes en plagen te kunnen detecteren. Op de factsheets die zijn samengesteld door de WUR en Glastuinbouw Nederland is een overzicht gegeven van de technologische ontwikkelingen waar momenteel aan wordt gewerkt. Dit betreft ontwikkelingen die plaatsvinden bij (of in samenwerking met) de WUR, maar ook ontwikkelingen die voortkomen uit het bedrijfsleven of verschillende binnen- en buitenlandse universiteiten.

Er is voor gekozen om de factsheets op te splitsen langs drie hoofdthema's:

- detectie van visuele symptomen van infectieziektes
- detectie van sporen en metabolieten ter indicatie van infectieziektes
- detectie van luizen, mijten en andere plagen

Veel van de ontwikkelingen die genoemd worden hebben betrekking op toepassingen in de kas, maar er zijn ook onderzoeken en projecten meegenomen waar de technologieën in eerste instantie in het open veld of in de boomgaard zijn toegepast. In die gevallen schatten wij in dat de gebruikte technologie—met bepaalde aanpassingen—ook gebruikt zou kunnen worden in een kasomgeving op typische kasgewassen.

De technologieën die hier omschreven worden bieden verschillende voordelen ten opzicht van traditionele scoutingsmethoden. Een belangrijk voordeel dat geldt voor alle hier omschreven technologieën is dat ze non-destructief en (hoofdzakelijk) non-invasief zijn. Dat wil zeggen dat er geen monsters van de planten genomen hoeven te worden en dat contact met de planten in de meeste gevallen zelfs niet nodig is. Dit kan bereikt worden omdat er geen gebruik gemaakt wordt van laboratoriumanalyses, maar gekozen is voor sensoren die in de teeltomgeving kunnen functioneren. De verdere voordelen die voorzien worden t.o.v. de traditionele manier van scouten staan hieronder voor alle omschreven technologieën opgesomd. Deze variëren van het eerder kunnen detecteren van de symptomen (met name met spectrale camera's) en het halen van een hogere beoordelingsnauwkeurigheid\*, tot het drastisch verhogen van de beoordelingscapaciteit en de mogelijke integratie met bestrijding (in het geval van mobiele platforms). Daarnaast zijn sommige digitale

*\*De in dit document genoemde studies en ontwikkelingen zijn vaak (nog) niet ontworpen om de symptomen eerder en nauwkeuriger te herkennen dan een expert dat kan, omdat ze werken middels machine learning modellen die getraind zijn op basis van data die door eenzelfde expert is beoordeeld. Een andere aanpak is echter mogelijk waarbij de modellen potentieel wel kan worden aangeleerd om symptomen in een vroeger stadium te detecteren.*

scoutingstechnieken ontworpen om het beoordelingsvermogen van een getraind expert voor een hierin ongetrainde teeltmedewerker beschikbaar te maken.

Na de voorziene voordelen staat ook steeds een voorziene tijdlijn genoemd, die in lijn is met de plaats van de ontwikkeling op de factsheets. Hier wordt het aantal jaar genoemd waarbinnen wij inschatten dat een functionele applicatie ontwikkeld zou kunnen worden, mits er actief onderzoek plaatsvindt en mits er geen fundamentele limieten blijken te zitten op de meetbaarheid. Daaronder staat ook voor iedere technologie een voorziene investering. Dit heeft betrekking op de investering die telers naar verwachting zouden moeten doen om één doorontwikkeld systeem aan te schaffen. Hierbij wordt ook rekening gehouden met de eventuele bijscholing van medewerkers. Een exact getal kan hier meestal niet aan gekoppeld worden, dus is gekozen voor een onderverdeling in *laag*: €0-3,000, *substantieel*: €3,000-20,000, *hoog*: €20,000-100,000, en *zeer hoog*: >€100,000. Hierbij moet er rekening mee worden gehouden dat de capaciteit van de technologie—in termen van het gemonitorde teeltoppervlak—enigszins uiteenloopt. Bij projecten waarbij de WUR een rol heeft (gehad) staat ook een contactpersoon vermeld.

## Infectieziektes: detectie van visuele symptomen

### Context

De mogelijkheden tot detectie van visuele symptomen van infectieziektes heeft de afgelopen jaren een vlucht genomen door de ontwikkeling van computeralgoritmes die zeer efficiënt objecten en structuren in foto's kunnen herkennen. Deze algoritmes werken volgens de principes van *deep learning*, waarbij de computer zelf een model kan aanleren op basis van grote hoeveelheden door experts beoordeelde data. Parallele ontwikkelingen maken het eveneens mogelijk om steeds betere camera's en steeds meer rekenkracht in steeds kleinere apparaten (incl. smartphones) te plaatsen. Dit maakt het steeds vaker mogelijk om detectiesystemen op een kostenefficiënte manier de kas in te brengen.

Wanneer de symptomen niet duidelijk herkenbaar zijn met het blote oog kan er soms ook gebruik gemaakt worden van zogenaamde spectrale camera's. In tegenstelling tot een gewone kleurencamera meten spectrale camera's per pixel niet alleen een rood-groen-blauw kleurenwaarde, maar meten ze de reflectiewaardes bij soms wel honderden specifieke golflengtes, die zelfs tot in het infrarood kunnen reiken. Al deze extra informatie kan soms gebruikt worden om infectieziektes op te sporen die met een gewone kleurencamera niet goed onderscheiden kunnen worden. Aangezien voor deze camera's (nog) geen massaproductie plaatsvindt, zijn ze momenteel vrij duur (>€10,000). Deze prijs kan in theorie veel lager uitvallen als er op grote schaal worden toegepast.

Op de factsheet zijn de volgende technologische ontwikkelingen opgenomen:

### Identificatie van symptomen met smartphones



Bron linkerafbeelding:

"PlantVillage Nuru app identificeert symptomen in cassava", 2021,  
<https://farmersreviewafrica.com/plantvillage-develops-phone-app-to-detect-crop-diseases/>

Bron rechterafbeelding:

"Dream Team", <https://plantvillage.psu.edu/>

Zoals hiervoor beschreven bieden smartphones en *deep learning* algoritmes interessante mogelijkheden voor de detectie van symptomen van infectieziektes. Het dichtst bij praktische toepasbaarheid staat het identificeren van visuele symptomen door middel van een smartphone applicatie. In een dergelijke toepassing neemt een teeltmedewerker de symptomen waar, maar gebruikt een smartphone applicatie om—op basis van een genomen foto—deze symptomen aan een ziekte te koppelen. Dit principe is onder andere gedemonstreerd door de ontwikkeling van de PlantVillage Nuru app (Mrisho et al., 2020). Deze applicatie is in eerste instantie speciaal ontwikkeld voor cassaveboeren in ontwikkelingslanden om de identificatie van *cassava brown streak virus disease (CBSD)* en *cassava mosaic virus disease (CMD)* te vergemakkelijken. De gerapporteerde nauwkeurigheid is relatief laag (65%), maar hoger dan die van experts (~50%) en van de cassaveboeren zelf (~25%). Vergelijkbare apps met een meer generieke aanpak zijn ook reeds beschikbaar, maar de wetenschappelijke onderbouwing in termen van nauwkeurigheid ontbreekt nog. Recent onderzoek laat ook zien dat er specifieke mogelijkheden zijn voor komkommer en tomaat (Zhang et al., 2020, Liu et al., 2020, Hidayatuloh et al., 2018).

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Het primaire voordeel van deze technologie zou zijn om het beoordelingsvermogen van een getraind expert voor iedereen beschikbaar te maken. De mogelijkheden tot het eerder detecteren van symptomen zijn in de huidige vorm beperkt.

**Voorziene tijdslijn:** De eerste applicaties zijn reeds in omloop, ontwikkeltijd voor andere ziektes in andere gewassen of een betrouwbare generieke applicatie ~2-4 jaar.

**Voorziene investering:** Laag. Wanneer de teler of medewerker al een smartphone heeft is er alleen een kleine investering nodig voor training en de eventuele kosten voor de software (PlantVillage Nuru is voorlopig nog gratis, alternatieve apps kosten enkele tientjes).

## Detectie schimmelinfecties in de kas



Bron: "Echte meeldauw in roos", 2021, <https://www.glastuinbouwnederland.nl/nieuws/onderzoek-naar-natuurlijke-weerbaarheid-tegen-echte-meeldauw-in-gerbera-en-roos/>

Echte meeldauw is een schimmelziekte met duidelijk herkenbare symptomen. Dit maakt dat detectie met kleurencamera's een realistische mogelijkheid is op relatief korte termijn. Momenteel wordt er binnen de PPS Intelligent Crop Protection gewerkt aan de ontwikkeling van *deep learning* algoritmes die dit mogelijk moeten maken voor de rozenproductie in kassen. De eerste resultaten zijn veelbelovend, met informatie over de locatie maar ook de mate van infectie. Maar het onderscheid tussen levende en afgestorven meeldauw moet nog worden gemaakt. Gezien de typische symptomen van echte meeldauw, zouden de ontwikkelde modellen mogelijk kunnen worden uitgebreid naar andere gewassen.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Afhankelijk van het platform vanaf waar de foto's worden opgenomen (handheld, overhead railsysteem, stationaire camera's, autonoom voertuig) kan de beoordelingscapaciteit in verschillende maten worden vergroot. Ook vroegere detectie behoort in potentie tot de mogelijkheden, mits er voor een gepaste ontwikkelingsmethode wordt gekozen.

**Voorziene tijdlijn:** Het onderzoek loopt nog, maar een eerste functioneel prototype voor roos zou kunnen worden voorzien binnen 2-3 jaar. Een algemenere applicatie voor echte meeldauw in andere kasgewassen zou een voorzien ontwikkeltraject kennen van nog eens 2-3 jaar.

**Voorziene investering:** Afhankelijk van mate van autonomie: laag voor smartphone applicatie, substantieel tot hoog voor bevestiging aan (autonoom) voertuig of railsysteem.

**Contactpersoon:** Kirsten Leiss (kirsten.leiss@wur.nl)

## Detectie bacteriële infecties vanaf mobiele platforms



Bron: Afonso et al., 2019

Voor de detectie van bacteriële infecties gelden veel van de punten eerder genoemd met betrekking tot de detectie van virusinfecties. Onderzoek is tot nu toe vooral uitgevoerd op veldgewassen. Zo is er in het PPS Smart Ziekzoeker ook gekeken naar de detectie van aardappelplanten die aan zwartbenigheid lijden ten gevolge van een infectie met *Pectobacterium carotovorum subsp. Brasiliense* (Afonso et al., 2019). Hieruit bleek echter dat zelfs een opstelling met kleurencamera's voldoende was om met relatief hoge nauwkeurigheid (>90%) de symptomatische planten te onderscheiden van de gezonde planten. Het is waarschijnlijk dat een vergelijkbaar principe ook zou kunnen werken voor de detectie van bacteriële infecties in andere gewassen in de kas.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Ook de symptomen van bacteriële infecties zijn vaak lastig te herkennen, zeker in de eerste dagen van de infectie. Ook hier geldt dat—mits de ontwikkeling van de techniek erop is toegespitst (zie voetnoot op pagina 2)—deze technieken potentieel het voordeel hebben om de geïnfecteerde planten eerder en nauwkeuriger op te sporen dan een expert dit kan. Daarvoor zullen kleurencamera's echter naar verwachting niet toereikend zijn en een duurder type spectraalcamera benodigd zijn. Met een werkend herkenningmodel kan vervolgens de beoordelingscapaciteit drastisch worden verhoogd en kan tevens integratie met bestrijding van de zieke planten worden gerealiseerd.

**Voorziene tijdlijn:** Autonome detectiesystemen voor het herkennen van visueel onderscheidbare symptomen van bacteriële infecties met kleurencamera's in de kas hebben een voorzien ontwikkeltraject van 4-8 jaar. Voor volledige integratie met bestrijding voorzien we nog eens 3-5 jaar extra ontwikkelingstijd.

**Voorziene investering:** Substantieel voor een semiautonoom systeem bevestigd aan bijvoorbeeld een oogstkar, tot hoog voor een volledig autonoom rondrijdend systeem.

**Contactpersoon:** Gerrit Polder (gerrit.polder@wur.nl)

## Detectie schimmelinfecties vanaf mobiele platforms



Bron: "Digitale scouting in de boomgaard", 2021, <https://www.wur.nl/en/Research-Results/Projects-and-programmes/Agro-Food-Robotics/show-agrofoodrobotics/Camera-on-tractor-sees-whether-biological-crop-protection-is-necessary.htm>

Voor schimmelinfecties anders dan echte meeldauw is het doorgaans uitdagend om betrouwbare detectie te doen enkel op basis van een kleurenbeeld. Om die reden zijn er meerdere onderzoeken uitgevoerd om voor deze taak spectrale camera's in te zetten, waarbij ook direct is gewerkt aan de integratie met mobiele platforms. In het project *De Gezonde Kas* (2011-2014) is bijvoorbeeld onderzocht of *Botrytis* gedetecteerd en gescoord kan worden in Cyclamen door gebruik te maken van een gemobiliseerde spectrale camera. De resultaten waren veelbelovend, maar het is niet tot een commerciële toepassing gekomen (Polder et al., 2013). Het onderzoek wordt echter voortgezet in het nieuwe project *Phenotyping4Profit* (2021-2025), waarin o.a. wordt gekeken naar detectie van *Botrytis* in tomaat d.m.v. spectrale beeldvorming.

In het EU project *OPTIMA* (2018-2022) is op een vergelijkbare manier gekeken naar de mogelijkheden tot detectie van schurft in appel en valse meeldauw in wijnranken. Beide ziektes zijn moeilijk te herkennen op basis van kleurenfoto's en daarom is ook hier gekozen voor het gebruik van spectrale camera's. Een functioneel prototype van een mobiel platform is gedemonstreerd (zie bovenstaande foto), waarbij zelfs detectie met een kleurencamera succesvol bleek. Er wordt voorzien dat een zeer vergelijkbaar systeem waarschijnlijk ook ontwikkeld kan worden voor detectie van schimmelziektes op (andere) gewassen in de kas, mits de symptomen ongeveer van dezelfde aard zijn als die van de hier besproken ziektes.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Het primaire voordeel van deze methode is het drastisch vergroten van de beoordelingscapaciteit en de mogelijke integratie met directe bestrijding. Ook vroegere detectie behoort in potentie tot de mogelijkheden, mits er voor een gepaste ontwikkelingsmethode wordt gekozen.

**Voorziene tijdlijn:** Een compleet ontwikkelingstraject zal waarschijnlijk 4-7 jaar in beslag nemen.

**Voorziene investering:** Afhankelijk van mate van autonomie: laag voor smartphone applicatie, substantieel tot hoog voor bevestiging aan (autonoom) voertuig of railsysteem.

**Contactpersoon:** Gerrit Polder (gerrit.polder@wur.nl)

## Detectie virussymptomen vanaf mobiele platforms



Wanneer een grote monitoringscapaciteit vereist is, bieden smartphones vaak geen uitkomst. In dergelijke gevallen dienen de cameratechnieken geïntegreerd te worden in een mobiel platform. Op die manier kunnen in principe meerdere planten per seconde worden geanalyseerd. Meerdere virusziektes in meerdere gewassen zijn de laatste jaren onderzocht, zoals *tulip breaking virus* (TBV, Polder et al., 2019a) en *tulip virus X* (TVX) op de bladeren van tulpen (PPS *Bollenrevolutie 4.0*) en *potato virus Y* (PVY) in aardappel (Polder et al., 2019b). Hieruit bleek dat zowel spectrale camera's als kleurencamera's potentie hebben, maar dat spectrale beeldvorming een duidelijk voordeel biedt om de planten met visueel moeilijk te onderscheiden symptomen er toch uit te pikken.

Ondanks dat tot dusverre het meeste onderzoek is gedaan naar virussymptomen in veldgewassen, kunnen dergelijke systemen ook vertaald worden naar andere gewassen in een kasomgeving. Voor toepassing in de praktijk zijn er reeds mobiele platforms ontwikkeld die autonoom door de kas kunnen rijden en camera's kunnen transporteren.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** De symptomen van virusinfecties zijn vaak lastig te onderscheiden, al helemaal in een vroeg stadium. Mits de ontwikkeling van de techniek erop is toegespitst (zie voetnoot op pagina 2), hebben deze technieken potentieel het voordeel om de geïnfecteerde planten eerder en nauwkeuriger op te sporen dan een expert dit kan. Daarnaast kan—met dank aan de integratie op een mobiel platform—de beoordelingscapaciteit drastisch worden verhoogd en integratie met directe bestrijding worden gerealiseerd.

**Voorziene tijdlijn:** Ontwikkeltijd hangt sterk af van de benodigde cameratechniek. Autonome detectiesystemen voor het herkennen van visueel waarneembare symptomen met kleurencamera's in de kas hebben een voorzien ontwikkeltraject van 4-8 jaar. Detectiesystemen voor vroege detectie en detectie van moeilijker te onderscheiden symptomen met spectrale camera's hebben een voorzien ontwikkeltraject van zeker 6-10 jaar. Voor volledige integratie met bestrijding voorzien we nog eens 3-5 jaar extra ontwikkelingstijd.

**Voorziene investering:** Afhankelijk van type camera en mate van autonomie: substantieel voor een systeem op basis van kleurencamera bevestigd aan bijvoorbeeld oogstkarren tot zeer hoog voor een systeem op basis van spectrale camera's bevestigd aan autonome voortuigen.

**Contactpersoon:** Selwin Hageraats (selwin.hageraats@wur.nl)



## Identificatie ziektes met augmented reality



Bron: "AR bril in gerberateelt", 2021, <https://www.wur.nl/en/newsarticle/ar-glasses-also-work-in-a-greenhouse-without-wifi.htm>

Wanneer er computeralgoritmen worden ontwikkeld die infectiesymptomen kunnen herkennen op basis van een kleurenfoto, kunnen deze algoritmen ook worden gebruikt op augmented reality (AR)-brillen. Deze bril kan video en afbeeldingen opnemen vanuit het perspectief van de drager, waardoor scouting mogelijk is op locaties die moeilijk te bereiken zijn met robotica. De bril kan ook feedback geven vanuit computers die op nabijgelegen servers data verwerken. Op deze manier kunnen kasmedewerkers – zonder de camera vast te houden – direct feedback krijgen over eventuele besmettingen van de planten waar ze momenteel naar kijken. De ontwikkeling van AR-brillen heeft op bepaalde punten al een lange weg afgelegd, maar is mogelijk nog onvoldoende voor de integratie van een veelvoud aan toepassingen.

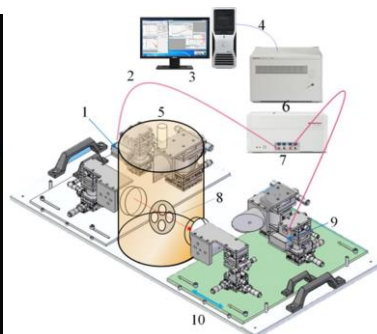
**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Het primaire voordeel van AR brillen is dat ze de drager de symptomen kunnen laten zien op de manier dat een expert deze normaal zou herkennen. Hierdoor kan het beoordelingsvermogen van een expert direct worden overgedragen op medewerkers die ongetraind zijn in het ziekzoeken. Wanneer modellen worden ontwikkeld die ook de vroege symptomen kunnen herkennen of die een hogere nauwkeurigheid halen, dan zal deze aanpak ook de experts kunnen helpen in hun beoordelingen.

**Voorziene tijdlijn:** Simultane ontwikkeling van hardware en software vereist. Ontwikkelingstraject zal waarschijnlijk 6-10 jaar in beslag nemen.

**Voorziene investering:** Substantieel: €4,000 – 5,000 per werknemer.

**Contactpersoon:** Joseph Peller ([joseph.peller@wur.nl](mailto:joseph.peller@wur.nl))

## In kaart brengen infecties met nieuwe stralingsbronnen



Bron: Zhang et al., 2023

Alle tot nu toe besproken technologieën werken op basis van zichtbaar licht, waarbij een enkele techniek ook gebruik maakt van infrarood licht. Hierbij werkt detectie doordat symptomatisch plantweefsel op een andere manier het licht reflecteert dan het gezonde weefsel. Echter, in sommige gevallen zijn symptomen niet goed te onderscheiden in het zichtbare- en infrarood licht. In dat geval kunnen andere stralingsbronnen uitkomst

bieden. Zo is heel recent onderzoek gepubliceerd dat laat zien dat beeldvorming door middel van terahertz (THz) straling gebruikt kan worden om de mate van aantasting van tomatenblad door valse meeldauw te kwantificeren (Zhang et al., 2023). Deze methode lijkt hierin zelfs geschikt om met hoge nauwkeurigheid bladeren met de laagste aantastingsgraad te herkennen, terwijl dit voor het ongetrainde oog erg lastig is. Ondanks de veelbelovende resultaten moet er rekening mee worden gehouden dat dergelijke exotische stralingsbronnen (en bijbehorende detectoren) vaak in een vrij vroeg stadium van ontwikkeling zitten en dat er dus nog jaren onderzoek nodig zijn om de benodigde hardware geschikt te maken voor applicaties in de kas.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** De ontwikkeling van detectiemethodes gebaseerd op nieuwe stralingsbronnen is er primair op gericht om eerder de ziektes te kunnen herkennen dan een expert. Door gebruik te maken van soorten straling die het menselijk oog niet kan zien, kunnen potentieel symptomen of fysiologische veranderingen worden waargenomen die voor een mens niet detecteerbaar zijn.

**Voorziene tijdlijn:** Minstens 15 jaar zal nodig zijn om commercieel toepasbare detectietechnieken te ontwikkelen die werken op basis van iets anders dan zichtbaar, nabij-infrarood, of nabij-ultraviolet licht.

**Voorziene investering:** Lastig in te schatten vanwege de lange ontwikkelingstijd. Waarschijnlijk in eerste instantie hoog.

**Contactpersoon:** Selwin Hageraats (selwin.hageraats@wur.nl)

### Monitoren vanaf een drone



Bron: "Flapper Drone in gerberakas", 2021, <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/drones/tiny-flapper-drone-takes-flight-in-greenhouse/>

De ontwikkelingen aan drones gaan snel en de inzet voor landbouwtoepassingen neemt snel toe. Toch lijken drones niet direct geschikt voor toepassingen in de kas. Er is beperkte vliegruimte, een veelvoud aan obstakels en de mogelijkheid om het gewas te beschadigen. Miniaturdrones met vliegbewegingen als insecten lijken een mogelijke oplossing te bieden. Deze drones zijn klein, zeer licht en zijn al meermaals gedemonstreerd in een kasomgeving. Wanneer deze worden uitgerust met kleurencamera's, de mogelijkheid om data te verzenden, en een locatietracker zouden ze kunnen functioneren als een mobiel monitoringsplatform. De breedte van de mogelijke toepassingen wordt dan bepaald door de computeralgoritmes die kunnen worden ontwikkeld voor de detectie van de infectiesymptomen.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** De miniaturdrones zelf fungeren alleen als een platform voor sensoren en zullen dus alleen de beoordelingscapaciteit kunnen verhogen. In combinatie met daarvoor geschikte computeralgoritmes voor beeldverwerking zou ook vroegere detectie gerealiseerd kunnen worden.



**Voorziene tijdlijn:** Aangezien de huidige prototypes nog niet voldoen aan het eerder vermelde eisenlijstje is er eerst nog een aanzienlijke ontwikkelingsperiode nodig. Gezien de zeer strikte gewichtsbependingen die dergelijke drones met zich meebrengen voorzien we een ontwikkelingsperiode van minstens 12 jaar.

**Voorziene investering:** De drones zullen uiteindelijk gebruik maken van geminiaturiseerde elektronica, welke—gezien hun rol in consumentenelektronica—waarschijnlijk op den duur relatief goedkoop zullen worden. Echter, om autonoom te functioneren moeten ook laadstations en computer hardware worden geïnstalleerd. Al met al voorzien we een substantiële tot hoge investering.

## Infectieziektes: detectie van sporen en uitgescheiden gassen

### Context

Naast de visuele aspecten van ziektes en plagen kan bij detectietechnieken ook worden ingespeeld op andere aspecten, zoals de vluchtige stoffen die een plant uitscheidt of de sporen die schimmels verspreiden in de lucht. De analyse van vluchtige stoffen en de genetische identificatie van sporen vereist momenteel nog veelal dure apparatuur die moeilijk autonoom in een kasomgeving ingezet kan worden. Echter, ook hier gaan ontwikkelingen zeer snel, waardoor het formaat en de kosten van apparatuur potentieel ver omlaag gebracht kan worden en de mate van autonomie ver omhoog. Het potentiële voordeel ten opzichte van traditionele scoutingmethoden is vooral vroegere detectie; door in te springen op factoren die vaak niet (betrouwbaar) door mensen gedetecteerd kunnen worden is er de mogelijkheid om een voorsprong te nemen op de menselijke waarnemer.

Op de factsheet zijn de volgende technologische ontwikkelingen opgenomen:

### Detectie bacteriële- en schimmelinfecties met een e-nose



Een e-nose is een sensor die werkt volgens het principe van een echte neus. Het is een combinatie van meerdere chemische sensoren die gevoelig zijn voor specifieke vluchtige stoffen. Het idee achter het inzetten van een e-nose voor de detectie van infecties is dat het profiel van de stoffen die planten uitscheiden verandert onder invloed van de infectie. Een e-nose die gevoelig is voor één of meerdere van die stoffen kan dan “ruiken” of er in dat deel van de kas geïnfecteerde planten aanwezig zijn. Tot nu zijn studies kleinschalig geweest en alleen gericht op gewassen die typisch niet in de kas verbouwd worden (appel, peer en kiwi). De gerapporteerde resultaten zijn echter veelbelovend (Cellini et al., 2016, Spinelli et al., 2010). Verkennende studies voor het herkennen van echte meeldauw in kastomaat hebben eerste geurmerkers opgeleverd.

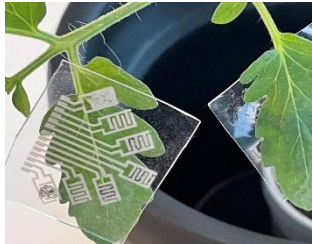
**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingmethoden:** E-noses hebben vooral als potentieel voordeel dat ze infecties eerder zouden kunnen detecteren.

**Voorziene tijdlijn:** Minstens 5 jaar zal nodig zijn om exploratief onderzoek te doen en gepaste hardware te ontwikkelen. Om tot detectie te komen in een vroeger stadium dan een expert dat kan zal mogelijk nog eens 3-5 jaar onderzoek en ontwikkeling nodig zijn.

**Voorziene investering:** Vermoedelijk laag tot substantieel voor een handheld apparaat, substantieel tot hoog voor een autonoom functionerend monitoringssysteem.

**Contactpersoon:** Kirsten Leiss (kirsten.leiss@wur.nl)

### Vroege detectie infecties met sensorstickers op het blad



Bron: Lee et al., 2023

Naast vluchtige stoffen kan ook het lokale klimaat rondom een plant een indicatie zijn voor de waarschijnlijke ontwikkeling van een infectie. Voor het volledig in kaart brengen van al deze factoren zijn recent sensorstickers ontwikkeld. Deze stickers kunnen direct op het blad van een plant geplakt worden en meten bladtemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, vochtigheid van het bladoppervlak, en verschillende groepen vluchtige stoffen die via de huidmondjes worden uitgescheiden (Lee et al., 2023). Er is laten zien dat door middel van deze sensorstickers infecties in tomaat met tomatenbronsvlekkenvirus en alternaria al enkele dagen na infectie gedetecteerd konden worden. Het is waarschijnlijk dat deze aanpak ook kan werken voor andere gewassen en ziektes, maar hiervoor is meer onderzoek nodig.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** De sensorstickers hebben de potentie om al in een vroeg stadium infecties te detecteren. Dit is ook al in de geciteerde studie gedemonstreerd.

**Voorziene tijdlijn:** Minstens 5 jaar zal nodig zijn om exploratief onderzoek te doen en gepaste hardware te ontwikkelen.

**Voorziene investering:** Gezien de typen sensoren die gebruikt worden is vermoedelijk slechts een lage investering nodig per plant. De investeringen voor een grootschalige monitoringssysteem zal substantieel tot hoog zijn.

### Detectie van specifieke sporen van schimmels in de kas



Schimmels vermenigvuldigen zich door sporen te verspreiden. Deze sporen zijn slechts microscopisch groot, maar kunnen een goede indicatie zijn voor de aanwezigheid van bepaalde schimmels in de kas. Er zijn opvangsystemen ontwikkeld die effectief zijn in het opvangen, concentreren en opslaan van schimmelsporen uit de lucht. Door deze systemen in de kas te plaatsen en regelmatig de opgevangen sporen naar het lab te sturen voor genetische identificatie (en mogelijk ook kwantificatie) kan een beeld gevormd worden van welke

schimmels aanwezig zijn en in welke hoeveelheid deze zijn opgevangen. Om tot een volledig autonoom systeem te komen kan deze laatste stap in theorie ook direct in of naast de sporenvanger plaats vinden. Systemen hiervoor zijn nog niet volledig doorontwikkeld, maar zijn in theorie mogelijk. Zo is recent al gedemonstreerd dat een veelgebruikte methode voor de identificatie van sporen (ELISA) volledig automatisch op een chip uitgevoerd kan worden (Shin et al., 2022).

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Deze methodologie is zeer specifiek erop gericht om infecties eerder te detecteren dan een expert dat kan. Er is zelfs in theorie de potentie om schimmelsporen al te detecteren vóórdat ze de planten in de kas hebben geïnfecteerd.

**Voorziene tijdlijn:** Binnen enkele jaren is mogelijk al een methode ontwikkeld waarbij de sporen automatisch worden opgevangen, maar de analyse nog in het lab plaatsvindt. Een volledige autonome oplossing vereist waarschijnlijk een ontwikkelingstraject van 8-12 jaar.

**Voorziene investering:** Substantieel.

**Contactpersoon:** Selwin Hageraats (selwin.hageraats@wur.nl)

### Detectie infecties met miniatuur gaschromatografie



*Bron: "Researcher holding micro gas chromatograph", 2014, <https://news.gatech.edu/news/2014/05/28/miniature-gas-chromatograph-could-help-farmers-detect-crop-diseases-earlier>*

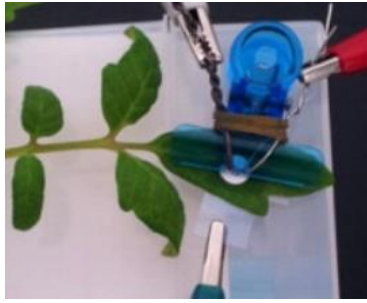
Deze methode is gebaseerd op hetzelfde fenomeen als de e-nose en de sensorstickers: namelijk het analyseren van de vluchtige stoffen rondom een plant die karakteristiek zijn voor een bepaalde infectie. Een gaschromatograaf scheidt al deze gassen van elkaar en identificeert ze op basis van hun mobiliteit in een stationair medium. Een reguliere gas chromatograaf is groot, duur en ongeschikt voor het langdurig monitoren van vluchtige stoffen in de kas. Echter, recente ontwikkelingen in de miniaturisering van deze apparaten zouden het potentieel mogelijk maken om dit meetprincipe ook toe te passen in de kas.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Net als de e-nose is detectie middels gas chromatografie er ook voornamelijk op gericht om infecties in een vroeger stadium op te sporen.

**Voorziene tijdlijn:** Dit type sensor is nog niet op de markt verkrijgbaar. Samenwerkend onderzoek met de sensorontwikkelaar is dus mogelijk nodig om de hardware geschikt te maken voor dit specifieke doel. We voorzien dat dit traject 8-12 jaar zou kunnen duren.

**Voorziene investering:** De kosten van een losse sensor zijn mogelijk relatief laag, maar de investering voor een autonoom functionerend netwerk van sensoren voor analyse van grote teeloppervlakken is waarschijnlijk hoog.

## Detectie infecties met elektrochemische sensoren op de plant



Bron: Sun et al., 2014

Wanneer een plant wordt geïnfecteerd met een bacterie, virus, of schimmel zet deze typisch een verdedigingsmechanisme in gang. Hierbij worden bepaalde planthormonen, zoals salicylzuur, in grote mate aangemaakt. Bij bepaalde infecties hoopt dit salicylzuur zich op in de bladeren, waar het gemeten kan worden. Onderzoek heeft aangetoond dat het salicylzuurgehalte op de bladeren gemonitord kan worden door middel van elektrochemische sensoren die in contact worden gebracht met het blad (Sun et al., 2014). Dit type sensor is op zichzelfstaand zeer veelbelovend om de algemene plantgezondheid te monitoren, maar zal gecombineerd moeten worden met andere sensoren om specifieke infecties te kunnen detecteren.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingmethoden:** Dergelijke sensoren hebben de potentie om—door het heel gericht meten van de plantrespons—al in een zeer vroeg stadium infecties te detecteren.

**Voorziene tijdlijn:** Het huidige onderzoek is nog sterk academisch van aard. We voorzien een ontwikkelingstraject van minstens 10 jaar om deze sensor in een breder sensorsysteem in te kunnen zetten voor specifieke ziektedetectie in kasgewassen.

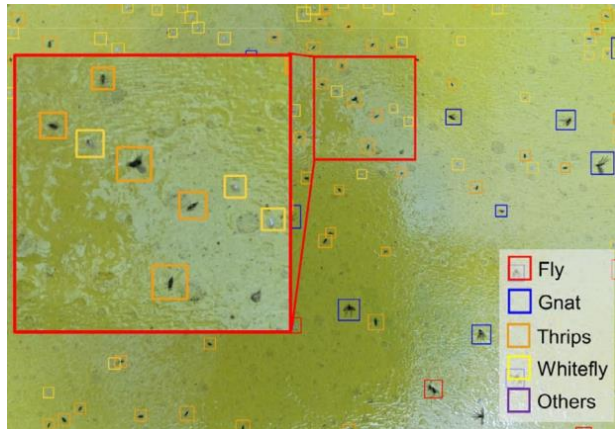
**Voorziene investering:** De kosten van een losse sensor zijn mogelijk relatief laag, maar de investering voor een autonoom functionerend netwerk van sensoren voor analyse van grote teeloppervlakken is waarschijnlijk hoog.

## Detectie van luizen, mijten en andere plagen

### Context

Ook bij de detectie van plagen zijn de mogelijkheden voor digitale monitoringstechnieken de afgelopen jaren rap toegenomen. Dit eveneens door de ontwikkeling van *deep learning* algoritmes die zeer krachtig zijn voor het detecteren én het identificeren van kleine insecten. Om die reden zijn de meeste van de hier genoemde ontwikkelingen gebaseerd op cameratechnologie in combinatie met de eerder genoemde *deep learning* modellen. Daarnaast zijn er ook niet-visuele factoren op basis waarvan detectie uitgevoerd kan worden, zoals akoestische signalen en de respons van de plant.

## Determinatie plagen op vangplaten



Bron: Rustia et al., 2020

Vangplaten worden al langer ingezet om de vliegende insecten in een kas op te vangen, waarna ze door een expert beoordeeld kunnen worden. De recente ontwikkelingen op het gebied van *deep learning* maken het steeds beter mogelijk om—op basis van een foto—de insecten te detecteren en vervolgens te determineren. Meerdere bedrijven werken al aan volledig autonome oplossingen, waarbij een camera op een vast tijdsinterval een foto maakt, de foto algoritmisch wordt geanalyseerd, en de resultaten digitaal inzichtelijk gemaakt kunnen worden (Nieuwenhuizen et al., 2018, Rustia et al., 2020).

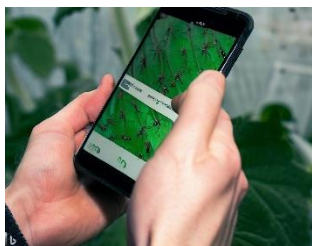
**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Één van de belangrijkste voordelen is dat het vermogen van een getraind expert om allerlei verschillende insecten te determineren hiermee voor iedere teler beschikbaar is. Daarnaast kunnen er ook eenvoudig, zonder meerwerk, kwantitatieve analyses worden gegeven, zoals de aantallen van de verschillende insecten, de trends over de tijd en eventueel ook de distributie over verschillende delen van de kas.

**Voorziene tijdlijn:** Enkele commerciële oplossingen zijn al beschikbaar, en deze zouden zonder al te veel aanvullende ontwikkeling kunnen worden uitgebreid naar andere soorten plagen.

**Voorziene investering:** Substantieel.

**Contactpersoon:** Dan Rustia (dan.rustia@wur.nl)

## Diagnostisering infestaties met smartphone



Net als de smartphone applicaties die zijn ontwikkeld voor het detecteren van bepaalde infectieziektes, zijn er ook applicaties ontwikkeld voor het detecteren en identificeren insecten. Deze applicaties zijn reeds commercieel verkrijgbaar, maar de werking voor het onderscheiden van plagen in typische kasgewassen is nog niet uitgebreid getest. Een andere aanpak is ook al gedemonstreerd met de PlantVillage Nuru app. Deze applicatie kan de schade van de groene cassavemijt identificeren. Het is denkbaar dat middels deze aanpak



ook applicaties zouden kunnen worden ontwikkeld voor de identificatie van schade van veelvoorkomende plagen in de kas.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingmethoden:** Het primaire voordeel is het beschikbaar stellen van het beoordelingsvermogen van een getraind expert voor iedere teeltmedewerker.

**Voorziene tijdslijn:** Enkele commerciële oplossingen zijn al beschikbaar, maar niet specifiek voor plagen in typische kasgewassen. De ontwikkeling van een brede applicatie voor de identificatie van verschillende soorten schade duurt naar verwachting 3-4 jaar.

**Voorziene investering:** Laag.

**Contactpersoon:** Dan Rustia (dan.rustia@wur.nl)

### Detectie van schade door mijten



*Bron: Nieuwenhuizen et al., 2020*

Directe detectie van mijten is uitdagend door hun zeer kleine formaat en hun neiging om zich aan de onderkant van bladeren te begeven. Een alternatieve aanpak is het detecteren van de schade van de mijten. De werking van deze aanpak is recent aangetoond door gebruik te maken van hoge-resolutie kleurencamera's (Nieuwenhuizen et al., 2020).

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingmethoden:** Deze systemen hebben de belofte om de mijteninfestaties al in een relatief vroeg stadium te detecteren. Het vroegste stadium waarin dit mogelijk is moet in vervolgonderzoek nog vastgesteld worden.

**Voorziene tijdslijn:** Een eerste prototype is reeds gedemonstreerd. Om tot een robuuste autonome oplossing te komen voor vroege detectie voorzien we een ontwikkelingstraject van 4-8 jaar.

**Voorziene investering:** Afhankelijk van de mate van autonomie; substantieel tot hoog.

**Contactpersoon:** Jochen Hemming (jochen.hemming@wur.nl)

## Detectie van luizen in het gewas



Luizen kunnen aanzienlijke schade aanrichten wanneer hun populaties niet onder controle worden gehouden. Vroegtijdige detectie van luizen in de kas is echter uitdagend, omdat ze in dat stadium maar in beperkte mate verspreiden en op vangplaten terecht komen. Om die reden wordt er nu gewerkt aan detectiesystemen om de luizen direct in het gewas waar te nemen. De twee belangrijkste uitdagingen in dit onderzoek zijn het kleine formaat van de luizen en het lage kleurencontrast met het plantmateriaal waarop ze zich begeven. Wanneer deze aanpak werkt is het aannemelijk dat deze ook—in aangepaste vorm—ingezet kan worden voor de detectie van bijvoorbeeld witte vlieg.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Deze systemen hebben de belofte om de luizeninfestaties al in een zeer vroeg stadium te detecteren.

**Voorziene tijdslijn:** De ontwikkelingen zijn pas recent opgestart. Een eerste prototype zal naar schatting 3-5 aan onderzoek en ontwikkeling kosten. Om tot een robuuste autonome oplossing te komen voorzien we een ontwikkelingstijd van 5-8 jaar.

**Voorziene investering:** Afhankelijk van de mate van autonomie; substantieel tot hoog.

**Contactpersoon:** Jos Ruizendaal (jos.ruizendaal@wur.nl)

## Detectie op basis van elektrofyysiologische plantsignalen



Wanneer een plant aangevallen wordt door plagen zal de fysiologie van de plant veranderen. Het meten van elektrofyysiologische signalen kan daarom een indicatie geven van een schadelijke infestatie. De werking van dit principe is reeds aangetoond voor de detectie van spintmijten in tomatenplanten (Najdenovska et al., 2020). Het is onduidelijk of elektrofyysiologische signalen specifiek genoeg zijn om het type infestatie te bepalen, maar ze kunnen mogelijk wel fungeren als een vroeg waarschuwingssignaal voor bepaalde delen van

de kas. Naast de mogelijkheid tot het detecteren van infestaties, suggereert recent onderzoek dat ook infecties de elektrofysiologische plantsignalen beïnvloeden en mogelijk dus mogelijk op basis hiervan gedetecteerd kunnen worden.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Een dergelijk sensorsysteem kan voornamelijk meerwaarde bieden voor het vroegtijdig detecteren van infestaties.

**Voorziene tijdlijn:** Er is reeds een commercieel systeem in omloop waarmee plantstress in het algemeen wordt gemonitord. Echter, voor een systeem waarmee tevens ook onderscheid gemaakt kan worden tussen abiotische stress, verschillende soorten infestaties en infecties is mogelijk 5-8 jaar aan aanvullend onderzoek nodig.

**Voorziene investering:** Substantieel.

**Contactpersoon:** Kirsten Leiss (kirsten.leiss@wur.nl)

### Volgen van roofinsecten d.m.v. microtrackers



Bron: Hamer et al., 2018

Roofinsecten kunnen worden ingezet als biologische bestrijding tegen plagen. Sommige van de grotere roofinsecten kunnen worden voorzien van zeer kleine trackers die werken op basis van *radio frequency identification* (RFID) transmitters. Wanneer de locatie en bewegingen van deze roofinsecten in kaart worden gebracht kan dit mogelijk informatie opleveren over de locatie van een plagenpopulatie in vroeg stadium. Het onderzoek naar vluchtpatronen van insecten voorziet momenteel nog geen dergelijke toepassing, maar is vooral gericht op het vergaren van fundamentele kennis over het gedrag van de insecten zelf. Voor toepassing in de kas moeten nog stappen worden gezet in het verder miniaturiseren van de transmitters, de bevestiging aan geschikte roofinsecten, en het correct interpreteren van gedrag met betrekking tot de locatie van de plagenpopulaties.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Het volgen van roofinsecten heeft voornamelijk het doel om uitbraken van plagen in een zeer vroeg stadium op te sporen.

**Voorziene tijdlijn:** Het concept van het volgen van insecten met radiotransmitters is zeker niet nieuw. Zo stammen sommige publicaties over dit onderwerp al uit de jaren '80, waarbij transmitters van 185 mg zijn gebruikt (Hayashi et al., 1989). Toch zijn er tot dusverre nog geen onderzoeken gerapporteerd waarbij transmitters succesvol zijn gebruikt die lichter zijn dan 80 mg (~4x het gewicht van een lieveheersbeestje, Shearwood et al., 2021). Een verdere miniaturisatiestap is dus nog nodig, maar kan nog gepaard gaan met significante ontwikkelingstijd. Ook de robuuste interpretatie van bewegingspatronen vergt nog een substantieel onderzoekstraject. We voorzien een ontwikkelingstraject van 5-10 jaar, maar voorzien tevens een vertraging op deze tijdlijn door de afhankelijkheid van micro- of nanotechnologie die nog niet commercieel beschikbaar lijkt te zijn.

**Voorziene investering:** Substantieel tot hoog, met de noodzaak tot het regelmatig taggen van nieuwe insecten.

## Identificatie van insecten op basis van vleugelfrequentie



Veel van de problematische plagen in de glastuinbouw zijn vliegende insecten. Ieder vliegend insect heeft zo zijn karakteristieke vleugelbewegingen en vleugelfrequentie. Dit kan potentieel gebruikt worden ter detectie en identificatie van plagen. In studies is aangetoond dat de vleugelbewegingen van insecten te meten zijn door middel van radar (Wang et al., 2017). Door gebruik te maken van *deep learning* algoritmes kunnen deze signalen potentieel fungeren om deze insecten te classificeren.

**Voorziene voordelen t.o.v. traditionele scoutingsmethoden:** Wanneer de sensoren op een strategische plaats worden ingezet is de voorziene meerwaarde voornamelijk vroegere detectie van de plagen.

**Voorziene tijdlijn:** Ondanks dat het meetprincipe al is aangetoond zal er nog aanzienlijk onderzoek gedaan moeten worden voordat de systemen geschikt zijn voor het continu monitoren op enige afstand. Bovendien is veel data nodig om de identificatie en het tellen robuust te maken. Geschat wordt een ontwikkeltraject van 10-15 jaar.

**Voorziene investering:** Substantieel tot hoog.

## Referenties

L. M. Mrisho, N. A. Mbilinyi, M. Ndalaha, A. M. Ramcharan, A. K. Kehs, P. C. McCloskey, H. Murithi, D. P. Hughes, and J. P. Legg. Accuracy of a Smartphone-Based Object Detection Model, PlantVillage Nuru, in Identifying the Foliar Symptoms of the Viral Diseases of Cassava—CMD and CBSD. *Frontiers in Plant Science*, 11, 2020. doi: 10.3389/fpls.2020.590889

P. Zhang, L. Yang, and D. Li. EfficientNet-B4-Ranger: A Novel Method for Cucumber Disease Recognition under Natural Complex Environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 176: 105652, 2020. doi: 10.1016/j.compag.2020.105652

J. Liu, and X. Wang. Early Recognition of Tomato Gray Leaf Spot Disease Based on MobileNetv2-YOLOv3 Model. *Plant Methods*. 16:38, 2020. doi: 10.1186/s13007-020-00624-2

A. Hidayatuloh, M Nursalman, and E. Nugraha. Identification of Tomato Plant Diseases by Leaf Image Using Squeezenet Model. In: *International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)*. 199-204, 2018. doi: 10.1109/icitsi.2018.8696087

M. Afonso, P. M. Blok, G. Polder, J. M. van der Wolf, and J. Kamp. Blackleg Detection in Potato Plants Using Convolutional Neural Networks. *IFAC PapersOnLine*, 52(30): 6-11, 2019. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.481

- G. Polder, E. J. Pekkeriet, and M. Snickers. A Spectral Imaging System for Detection of Botrytis in Greenhouses. In: Proceedings of the EFITA-WCCA-CIGR Conference "Sustainable Agriculture through ICT Innovation", Turin, Italy, 24–27 June 2013.
- G. Polder, N. van de Westeringh, J. Kool, H. A. Khan, G. Kootstra, and A. Nieuwenhuizen. Automatic Detection of Tulip Breaking Virus (TBV) Using a Deep Convolutional Neural Network. *IFAC-PapersOnLine*, 52(30): 12-17, 2019b. doi: 10.1016/j.ifacol.2019.12.482
- G. Polder, P. M. Blok, H. A. C. de Villiers, J. M. van der Wolf, and J. Kamp. Potato Virus Y Detection in Seed Potatoes Using Deep Learning on Hyperspectral Images. *Frontiers in Plant Science*. 10, 209, 2019b. doi: 10.3389/fpls.2019.00209
- X. Zhang, Y. Wang, Z. Zhou, Y. Zhang, and X. Wang. Detection Method for Tomato Leaf Mildew Based on Hyperspectral Fusion Terahertz Technology. *Foods*, 12, 535, 2023. doi: 10.3390/foods12030535
- A. Cellini, E. Biondi, S. Blasioli, L. Rocchi, B. Farneti, I. Braschi, S. Savioli, M. Rodriguez-Estrada, F. Biasioli, and F. Spinelli. Early Detection of Bacterial Diseases in Apple Plants by Analysis of Volatile Organic Compounds Profiles and Use of Electronic Nose. *Annals of Applied Biology*, 168(3):409–420, 2016. doi: 10.1111/aab.12272
- F. Spinelli, M. Noferini, J. L. Vanneste, and G. Costa. Potential of the Electronic-Nose for the Diagnosis of Bacterial and Fungal Diseases in Fruit Trees. *EPPO Bulletin*, 40(1):59–67, 2010. doi: 10.1111/j.1365-2338.2009.02355.x
- G. Lee, O. Hossain, S. Jamalzadegan, Y. Liu, H. Wang, A. C. Saville, T. Shymanovich, R. Paul, D. Rotenberg, A. E. Whitfield, J. B. Ristaino, Y. Zhu, and Q. Wei. Abaxial Leaf Surface-Mounted Multimodal Wearable Sensor for Continuous Plant Physiology Monitoring. *Science Advances*, 9, eade2232, 2023. doi: 10.1126/sciadv.ade2232
- Y. S. Shin, N. Fomina, C. Johnson, T. Rocznik, H. Ahmad, R. P. A. Staley, J. Weller, and C. Lang. Toward Rapid and Automated Immunoassays: Using Localized Electrochemical pH Modulation Platform to Perform a Single-Step Immunoassay. *Analytical Chemistry*, 94:13171-13180, 2022. doi: 10.1021/acs.analchem.2c02686
- L. J. Sun, Q. M. Feng, Y. F. Yan, Z. Q. Pan, X. H. Li, F. M. Song, H. Yang, J. J. Xu, N. Bao, and H. Y. Gu. Paper-Based Electroanalytical Device for *in situ* Determination of Salicylic Acid in Living Tomato Leaves. *Biosensors and Bioelectronics*. 60:154-160, 2014. doi: 10.1016/j.bios.2014.04.021
- D. J. A. Rustia, C. E. Lin, J. Y. Chung, Y. J. Zhuang, J. C. Hsu, T. T. Lin. Automatic Greenhouse Insect Pest Detection and Recognition Based on a Cascaded Deep Learning Classification Method. *Journal of Applied Entomology*, 23(1): 17-28, 2020. doi: 10.1111/jen.12834
- A. T. Nieuwenhuizen, J. Hemming, and H. Shuh. Detection and Classification of Insects on Stick-Traps in a Tomato Crop Using Faster R-CNN. In: Proceedings of the Netherlands Conference on Computer Vision, Eindhoven, The Netherlands, 26-27 September 2018, pp. 1-4.
- A. T. Nieuwenhuizen, J. Kool, H. K. Shuh, and J. Hemming. Automated Spider Mite Damage Detection on Tomato Leaves in Greenhouses. *Acta Horticulturae*, 1268: 165-172, 2020. doi: 10.17660/ActaHortic.2020.1268.21
- E. Najdenovska, F. Dutoit, D. Tran, C. Plummer, N. Wallbridge, C. Camps, and L. E. Raileanu. Classification of Plant Electrophysiology Signals for Detection of Spider Mites Infestation in Tomatoes. *Applied Sciences*, 11: 1414, 2020. doi: 10.3390/app11041414



G. L. Hamer, J. R. Bejcek, E. A. Valdez, R. Curtis-Robles, and S. A. Hamer. A Pilot Radio Telemetry Field Study of Triatomine Vectors (Hemiptera: Reduviidae) of the Chagas Disease Parasite. *Journal of Medical Entomology*, 55(6): 1380-1385, 2018. doi: 10.1093/jme/tjy094

F. Hiyashi and M. Nakane. Radio Tracking and Activity Monitoring of the Dobsonfly Larva, *Protohermes Grandis* (Megaloptera: Corydalidae). *Oecologia*, 78, 468-472, 1989. doi: 10.1007/BF00378735

J. Shearwood, N. Aldabashi, A. Eltokhy, E. Franklin, N. Raine, C. Zhang, E. Palmer, P. Cross, and C. Palego. C-Band Telemetry of Insect Pollinators Using a Miniature Transmitter and a Self-Piloted Drone. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 69(1): 938-946, 2021. doi: 10.1109/TMTT.2020.3034323

R. Wang, C. Hu, X. Fu, T. Long, and T. Zeng. Micro-Doppler Measurements of Insect Wing-Beat Frequencies With W-Band Coherent Radar. *Scientific Reports*. 7: 1369, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-01616-4