

Een GROTE toekomst VOOR KLEINE robots IN open teelten

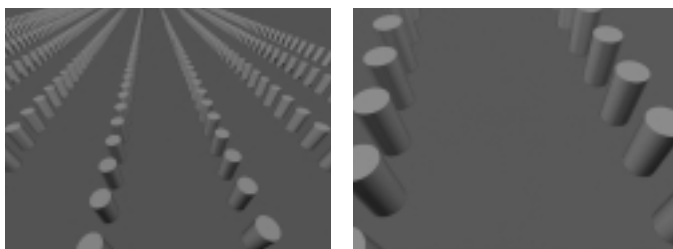
Frits van Evert¹, Arjan Lamaker², Kelley van Evert, Gerie van der Heijden¹, Arjan de Jong², Jasper Lamaker, Bert Lotz¹, Jacques Neeteson¹ and Tom Schut¹

¹ (frits.vanevert, gerie.vanderheijden, bert.lotz, jacques.neeteson, tom.schut)@wur.nl, Plant Research International, Wageningen, Netherlands (www.plant.wur.nl/projects/fieldrobot/)

² (arjan.lamaker, arjan2.dejong)@wur.nl, WISL, Wageningen, Netherlands (www.wisl.nl)

Onze eerste kennismaking met landbouwrobots vond plaats tijdens het eerste Field Robot Event (FRE2003) (Müller et al., 2003). Dit Event was een wedstrijd met als doel het bouwen van robots die autonoom een rij volgen in een maïsveld en aan het eind van de rij omkeren en de volgende rij nemen. We gingen erheen met hoge verwachtingen. Buiten de landbouw zijn er al jaren wedstrijden waarbij robots het tegen elkaar opnemen op onderdelen als ontsnappen uit een doolhof (TNO, 2003), stofzuigen en ramen wassen (IROS, 2002) en punten scoren in een heuse voetbalwedstrijd (Robocup, 2004). Maar landbouwrobots zijn ook niet meer helemaal nieuw: er bestaan wiede-robots voor bloemkool (Tillett et al., 1998) en suikerbieten (Åstrand and Baerveldt, 2002), er is een autonome combine (Carnegie Mellon University, 2003; Pilarski et al., 2002) en een autonome spuitmachine (John Deere, 2004). Niet autonoom, maar wel automatisch is de wiede-eg die zich oriënteert op de rijen van het gewas (Garford, 2004) en de landbouwspuit die onkruiden herkent (Gerhards and Christensen, 2003). Op een iets ander vlak is er de robot-schaapherdershond (Vaughan et al., 2000). Verder zijn veel nieuwe auto's nu uitgerust met een zogenaamd "lane departure warning system" dat begint te piepen als je van de rijbaan afwijkt (Iteris, 2004) – technologie die niet ver afdijkt van wat nodig is om tussen twee rijen maïsplanten te blijven. Een uitgebreid overzicht van robotisering in de landbouw is beschikbaar (Kondo and Ting, 1998).

Alle reden dus om een spetterende voorstelling te verwach-



Figuur 2. Scènes gemaakt met POV-Ray.

ten tijdens FRE2003, maar die kwam niet. De vijf deelnemende robots gingen allemaal al in de fout bij de eerste opdracht, namelijk het tussen twee rijen maïsplantjes doorrijden – sommigen al binnen een meter. Aan de tweede opdracht – omdraaien aan het eind van de rij en doorgaan met de volgende – kwamen ze geen van allen toe. Het resultaat was dus ongeveer gelijk aan dat van de recente woestijnrace voor autonome voertuigen, waar ook geen enkele van de deelnemende robots aan de minimum eisen voldeed (DARPA, 2004).

Waarom ging het zo slecht? Natuurlijk hadden de robots last van sensoren die vies worden (Van Straten, 2004), maar dat lijkt ons toch niet de kern van het probleem te zijn. Als wij mensen in een veld met jonge maïsplanten staan, hebben we geen probleem met het herkennen van de rijen (Fig. 1) en we kunnen dan ook moeiteloos door een veld lopen zonder de planten te raken. Maar als je je hoofd op de grond legt en dan nog eens rond kijkt zie je niets dan groen en kun je je niet meer oriënteren. Op basis van dit inzicht zou een robot gebruik kunnen maken van een camera die hoog genoeg boven het gewas staat, zodat de rijenstructuur van het gewas goed is waar te nemen. Zo'n robot zou afstand nemen van de FRE2003 robots die (op één na) geen camera's, maar infrarood- of ultrasoon-nabijheidssensoren gebruikten. Zo begonnen we na te denken over het bouwen van een robot voor Field Robot Event 2004. In deze bijdrage doen we verslag van de bouw, vermelden we het resultaat, geven we informatie over de andere deelnemende robots, en werpen we een blik op de toekomst.

Sietse: een robot met zicht

Op het moment dat de eerste paal van een nieuw gebouw de grond ingaat, zijn er al maquettes en tekeningen gemaakt waarmee duidelijk gemaakt wordt hoe het gebouw er uit



Figuur 1. Een maïsveld waarin de rijenstructuur makkelijk te herkennen is – voor mensen, niet voor robots.



Figuur 3. Sietse: laptop op wieltjes, met een webcam bovenin de mast.

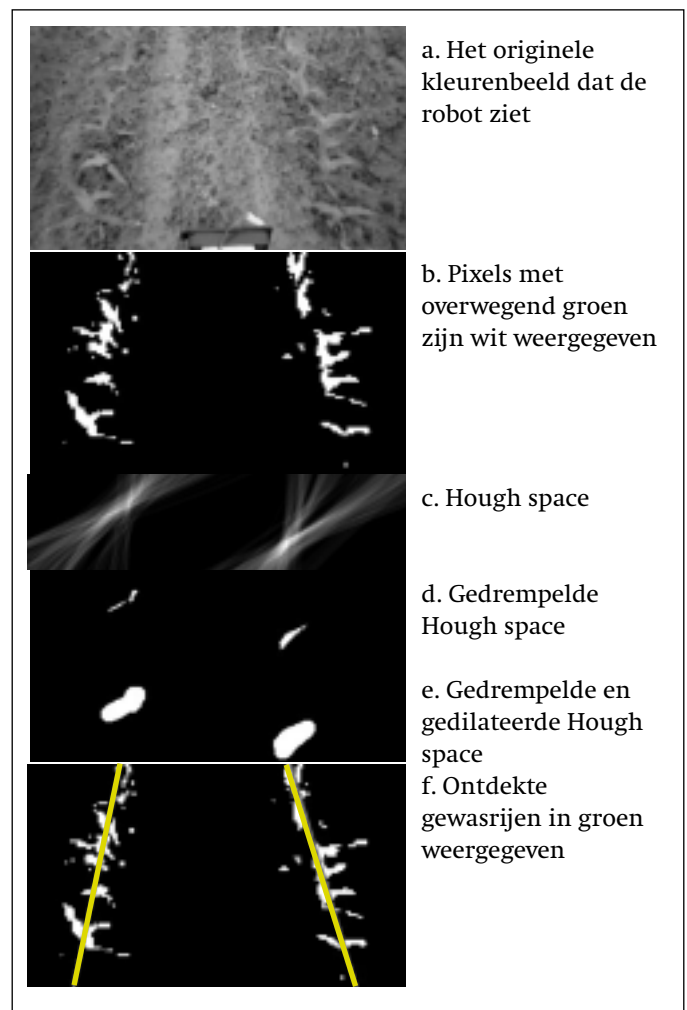
gaat zien. Wij hebben een virtuele maquette gebouwd van een maïsveld en daarnaar gekeken met een virtuele camera. In eerste instantie hebben we daarvoor OpenGL (OpenGL, 2004) gebruikt omdat deze bibliotheek het eenvoudig maakt om in een dynamisch simulatiemodel het genereren van scènes op te nemen. De scènes in Fig. 2 zijn echter gemaakt met POV-Ray (POV-Ray, 2004). In ieder geval konden we zo precies vaststellen wat het effect van de hoogte van de camera, de beeldhoek en het richtpunt is op het beeld. Uit deze exercitie trokken we de conclusie dat de camera een beeldhoek moest hebben van minimaal 60° en geplaatst moest worden op een hoogte van 75 cm of meer. Dat betekent dat een sub-canopy robot onder deze randvoorwaarden in principe met behulp van een camera kan navigeren.

Een belangrijk deel van een autonome robot is het platform, d.w.z. het rijdende deel. FRE2003 liet een aantal verschillende benaderingswijzen zien: er was een robot van Lego, één die werd aangedreven door ruitenwissermotoren, en één gebaseerd op een bouw pakket, met rupsbanden. Wij hebben uiteindelijk gekozen voor een bouw pakket van een radiografisch-bestuurde "monster truck", namelijk de Tamiya TXT-1. Ten eerste is dit model gemaakt voor ruig terrein en ten tweede is het een vrij groot en zwaar model (5 kg) dat, naar we hoopten, stabiel genoeg zou zijn voor de camera-mast en sterk genoeg om de computer te vervoeren die we nodig hebben voor beeldverwerking. De naam die wij aan onze robot gegeven hebben, Sietse, geeft aan waarin hij zich van de andere FRE deelnemers onderscheidt: hij "ziet ze" (Fig. 3) (Sietse Team, 2004).

Een autonome landbouwrobot die zijn koers bepaalt m.b.v. een camera en beeldverwerking werd beschreven door Tillet et al. (1998). Hun robot was ongeveer 2 bij 3 meter groot en gebruikte een zwart/wit camera. Zij richtten zich op bloemkool in een plantverband van 50 x 50 cm en hun beeldverwerking was gericht op deze wat moeilijk te herkennen gewasstructuur. Voor FRE2004 verwachtten we een veel eenvoudiger gewasstructuur, namelijk duidelijk herkenbare, doorlopende rijen maïs. De Hough transformatie (Hough, 1962) is een standaard methode om rechte lijnen in een beeld te herkennen, maar heeft als nadeel dat zij enorm

veel rekentijd vergt. Wij hebben uiteindelijk een verkorte versie van de Hough gebruikt die we hieronder beschrijven.

We gebruiken de formule 2G-R-B om plant materiaal in het originele kleurenbeeld te vinden (Fig. 4a). Het histogram van het grijsbeeld dat dan ontstaat heeft slechts één piek, die overeenkomt met de achtergrond. We nemen daarom aan dat het gewas voldoende duidelijk weergegeven wordt door de 5% meest heldere pixels (Fig. 4b). Dan trekken we een groot aantal denkbeeldige lijnen over het beeld en tellen het aantal witte (gewas) pixels onder elke lijn. Vervolgens wordt elke lijn weergegeven in een zogenaamde Hough-ruimte, waarbij de hoek van de denkbeeldige lijn met de verticaal uitgezet wordt op de verticale as en het intercept van de denkbeeldige lijn met de horizontaal op de horizontale as. De helderheid van elke pixel komt overeen met het aantal witte (gewas) pixels dat wordt bedekt door de denkbeeldige lijn. (Fig. 4c). Dit beeld wordt gedrempeld: we beschouwen alleen die pixels (denkbeeldige lijnen) die een helderheid hebben van 70% van het helderste pixel of meer. Dit levert het beeld in Fig. 4d op: twee groepen van pixels, die dus overeenkomen met twee groepen denkbeeldige lijnen door het originele beeld. Na een krachtig "openen" (erosie gevolgd door een dilatie) blijven twee "blobs" over (Fig. 4e). De centrale punten geven de hellingshoek en het intercept aan van de lijnen die voor een groot deel over groen materiaal lig-



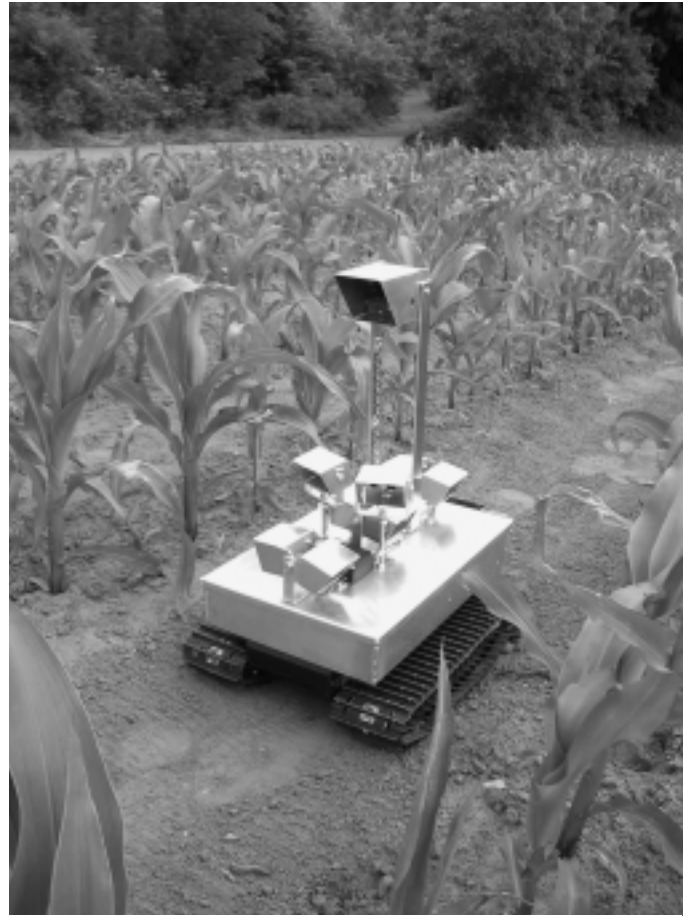
Figuur 4. De stappen in de beeldverwerking die wordt uitgevoerd door Sietse.



Figuur 5. CropScout

gen. Dit kunnen er meer dan twee zijn en we verdelen ze in groepen: lijnen die links van de robot onderaan uit het beeld lopen, en lijnen die dat ter rechterzijde van de robot doen. Van de lijnen links nemen we de meest rechtse; van de lijnen rechts, de meest linkse (Fig. 4f). Het midden van deze twee lijnen, aan de bovenkant van het beeld, is het punt waar we de robot naar toe sturen. Het stuursignaal is proportioneel met de afstand tussen dit punt en het midden van het beeld. Als slechts één gewaslijn vastgesteld kan worden, sturen we naar een punt links (of rechts) van die lijn. Wat betreft de software: componenten van DSPack (Progdi-gy, 2004) worden gebruikt om de beelden van de camera te halen; beeldverwerking wordt gedaan in C++ met behulp van de VXL image processing library (VXL, 2004).

En dat brengt ons bij de software die de robot bestuurt. Het hart van dat programma is een “state machine”, d.w.z. een programma dat een vastgesteld aantal toestanden onderscheidt waarin de robot zich kan bevinden, en in elk van die toestanden een bepaald gedrag aanstuurt. De belangrijkste toestand is “volg de rij”, waarin zo snel mogelijk beelden worden opgenomen en verwerkt om de gewenste rijrichting te bepalen, waarna de stuurmotoren geactiveerd worden om het gewenste effect te bereiken. Als er gedurende een bepaalde tijd geen rijen meer worden gezien, gaat de robot naar de toestand “draaien”. Er wordt dan een blinde draai gemaakt –volledig naar links sturen en 80 cm rijden; stuur recht en 50 cm achterwaarts rijden; nogmaals naar links sturen en 80 cm rijden- en als alles goed is gegaan staat de robot nu aan het begin van een nieuwe rij. Dan begint de



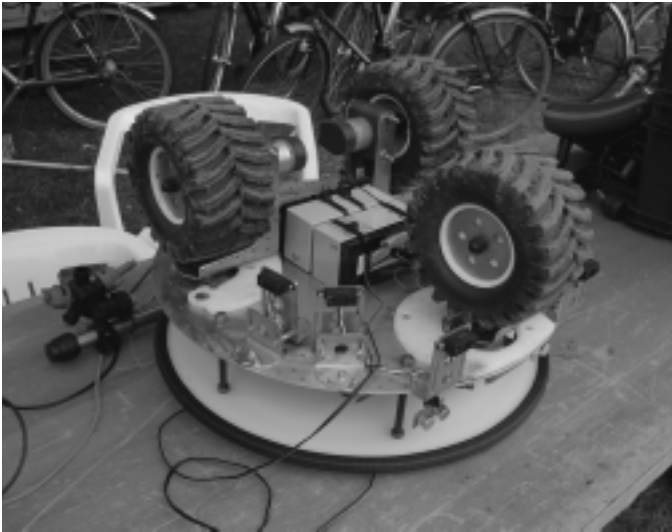
Figuur 6. Eyemaize.

toestand “zoek rij” waarin voorzichtig naar voren wordt gereden tot er een rij gevonden wordt – waarna de toestand “volg de rij” intreedt. Deze software is geschreven met behulp van Delphi (Borland Inc., Scotts Valley, CA, USA).

Field Robot Event 2004

Onze robot werkte goed tijdens FRE2004 en behaalde de tweede plaats. De hoge plaatsing was voornamelijk te danken aan het feit dat de camera bijna twee meter naar voren keek; dit integrale beeld maakte een hoge snelheid (0.6 m/s) mogelijk. Dat de eerste plaats aan onze neus voorbij is gegaan lag aan teleurstellend werk aan het eind van de rij: bochten naar rechts gingen goed, bij bochten naar links moest handmatig ingegrepen worden. Pas enkele weken na de wedstrijd kwamen we er achter dat de TXT mechanisch niet symmetrisch is. Bij bochten naar rechts wordt aan de stuurstang getrokken en dat levert een herhaalbaar resultaat op. Bij bochten naar links wordt tegen de stuurstang gedruwd, waarbij het (plastic) stuurarmpje niet altijd evenveel vervormt. We hebben inmiddels het betreffende onderdeel versterkt met een plaatje aluminium en nu zijn de linkerbochten net zo mooi als de bochten naar rechts. Volgend jaar nummer één!

Hoewel - de competitie is sterk en verschillende robots hebben in FRE2004 laten zien dat ze sterke punten hebben. CropScout (CropScout Team, 2004) won de wedstrijd dankzij het superieure omkeren aan het eind van de rij. Deze robot gebruikte een gyroscoop om de hoeksnelheid van de draai-



Figuur 7. Gudrun

ing te meten en dat bleek zeer nauwkeurig te zijn. Voor het volgen van de rijen gebruikt CropScout een algoritme dat informatie van meerdere sensors (waaronder een camera) “middelt” om te komen tot het uiteindelijke stuursignaal. EyeMaize (Eye-Maize Team, 2004), evenals CropScout uitgerust met rupsbanden, behaalde de derde plaats en stuurde met behulp van infrarood en ultrasone sensors. Andere robots met opmerkelijke eigenschappen waren Gudrun (Fig. 7), op een rond platform met drie wielen, in staat om op zijn plek een draai te maken; Agbo (Fig. 8), uitgerust met een SICK laser die zo goed was dat hij vanuit het ene veldje mais de rijen in het volgende veldje kon herkennen en dus “vergat” om te keren; Challenger (Fig. 9) en Harvester (Fig. 10).

FRE2004 heeft duidelijk gemaakt dat er in één jaar veel kan veranderen: dit jaar waren vrijwel alle robots in staat om de rijen te volgen, en ongeveer de helft slaagde er in om heel behoorlijk te keren. Het was wel opvallend dat de hoogste klasseringen toch voor de teams met een institutionele inbreng waren. Teams die enkele honderden euro's uit konden geven aan een bouw pakket en andere hardware, waren duidelijk in het voordeel ten opzichte van teams die het van ruitwismotoren moeten hebben. Ook is het zo dat bij het bouwen van een robot deskundigheid op een vrij groot



Figuur 8. Agbo

aantal terreinen wordt gevraagd: mechanica voor de voortbeweging, electronica voor de sensoren, systeem- en regeltechniek voor de integratie van sensoren en motoren, eventueel beeldverwerking, en tenslotte het schrijven van software om alles aan elkaar te knopen. Dit alles betekent dat een team zorgvuldig samengesteld moet worden om kans van slagen te hebben.

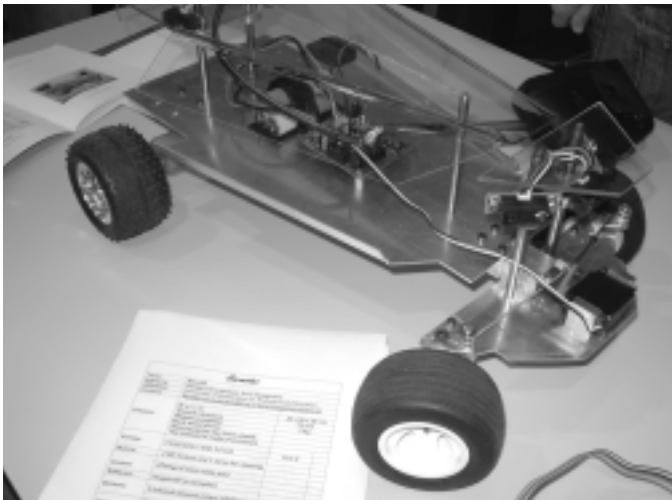
Robotisering in open teelten – wat nu?

Met zoveel vooruitgang in één jaar op het gebied van kleine landbouwrobots dringt zich de vraag op wat er nog meer mogelijk is. Waar gaat het naar toe met de robotisering in de landbouw?

Eén trend lijkt duidelijk: de mechanisering van de landbouw die eerder door paardekracht voortbewogen zelfbindende maaiers en door stoom aangedreven dorsmachines heeft opgeleverd, zet zich nu voort als automatisering en robotisering en zal binnen afzienbare tijd apparaten opleveren die tal van teelthandelingen zelfstandig verrichten. Deze apparaten lijken vaak sterk op bestaande werktuigen en ze zullen veelal van GPS gebruik maken om hun weg te vinden tijdens het schoffelen (Scheele, 2004), spuiten (John Deere, 2004) of oogsten (Carnegie Mellon University, 2003). Het belangrijkste effect van deze ontwikkeling is een verdergaande arbeidsbesparing, en daardoor schaalvergroting en kostenbesparing. In principe is het ook mogelijk autonome apparaten selectiever en vaker in te zetten, maar dat krijgt op dit moment niet veel aandacht.



Figuur 9. Challenger



Figuur 10. Harvester

Naast de grote robots zien wij ook duidelijke toepassingsmogelijkheden voor kleinere (sub-canopy) landbouwrobots, dus ongeveer van het formaat dat we gezien hebben tijdens de Field Robot Events. Het grote voordeel van kleine robots is dat ze veel minder zullen kosten, veel minder aanleiding geven tot zorgen over veiligheid (wel eens een op hol geslagen 200-pk trekker met een kieper vol bieten gezien?) en vrijwel altijd ingezet kunnen worden: in een gesloten gewas rijden ze gewoon onder het bladerdek door, en zelfs na weken van regen heeft de bodem nog wel voldoende draagkracht voor een apparaatje van misschien maar 10 of 20 kg. Een nadeel van zo'n klein apparaatje is natuurlijk wel dat het weinig kracht heeft en dat het verrichten van teeltwerkzaamheden moeilijk zal zijn; zelfs het meedragen van een krachtbron voor voortbeweging is al een uitdaging. Een mini-robot kan zeer selectief ingezet worden en zou bijvoorbeeld goed op jacht kunnen gaan naar hardnekkige, schadelijke onkruiden en opslag (aardappelopslag; knolcyperus in bollenteelt) en plaatselijk voorkomende ziektes (Van der Lee, 2004). Bestrijding van geconstateerde problemen kan plaats vinden door toediening van een geringe hoeveelheid van een systemisch herbicide.

Maar de grootste potentie van kleine landbouwrobots is misschien wel als platform voor sensors waarmee zó veel en zó vaak gemeten kan worden dat een complete beheersing van de teelt mogelijk wordt. Bij fabrieksmatige productie wordt de kwaliteit bewaakt door nauwkeurig te meten en te regelen – bijvoorbeeld bier dankt zijn konstante en hoge kwaliteit aan de nauwkeurige handhaving van de juiste temperatuur van het brouwsel. In de glastuinbouw worden nu al het klimaat en de samenstelling van het groeimedium voortdurend aangepast aan de toestand van het gewas en de eisen die aan kwantiteit en kwaliteit van het produkt worden gesteld. Modellen leggen hierbij vaak de link tussen handelen en effect. In de open teelten wordt ook gestreefd naar een nauwkeurig volgen van het groeiproces en het gericht beïnvloeden daarvan. De CropScan (CROPSCAN Inc., 2004) is een apparaat waarmee de N-toestand van het gewas vastgesteld kan worden; dit stelt de teler in staat om gericht bij te mesten tijdens de groeiperiode. Meten met de CropScan is echter tijdrovend en zou wellicht net zo goed – en vaker – door een robotje gedaan kunnen worden. Wat voor

bemesten geldt, geldt ook voor irrigatie (meet de vochttoestand van de bodem of van het gewas) en voor bestrijding van ziekten en plagen (meet de aanwezigheid van een ziekte of een insectensoort optisch of met chemische receptoren).

Als het verloop van de toestand van het gewas in de tijd bekend is, komt oogstplanning in zicht, zowel kwalitatief als kwantitatief. De Nederlandse suikerindustrie gebruikt het model SUMO (Spitters et al., 1990; Van Swaaij, 2004) om de start van de bietencampagne af te stemmen op de fysieke opbrengst van suikerbieten. Dit model maakt tevens een prognose van het winbare suikergehalte en het gehalte aminozuren. Het model gebruikt nu vrijwel alleen weersgegevens en het is goed voorstelbaar dat automatisch verzamelde gegevens (LAI, N-gehalte) omtrent de stand van het bietengewas tot betere voorspellingen kunnen leiden.

Conclusie

Robotisering in de landbouw staat aan het begin van een sterke ontwikkeling, waarbij verschillende rollen weggelegd lijken te zijn voor grote robots (formaat trekker en combine) en kleine robots (formaat flinke schoendoos tot kleine koelkast). Grote robots kunnen teelthandelingen zoals zaaien, spuiten en oogsten geheel of gedeeltelijk zelfstandig uitvoeren. Kleine robots lijken vooral nuttig te zijn voor het selectief en pleksgewijs bestrijden van ziekten, plagen en onkruiden. Ook kunnen ze waarnemingen doen aan de toestand van gewas en bodem ten behoeve van de real-time toepassing van gewasgroeimodellen. Hierbij kunnen ontwikkelingen in gewasgroeimodellen, sensoren en waarnemingsplatformen (robots) elkaar versterken. Daarbij liggen de grootste kansen voor de combinatie van veelvuldige waarnemingen en een model in gewassen met een grote toegevoegde waarde, risico op grote schade door ziekten en plagen, of een sterk stuurbare gewasopbrengst of kwaliteit.

Literatuur

- Åstrand, B., and A.-J. Baerveldt. 2002. An agricultural mobile robot with vision-based perception for mechanical weed control. *Autonomous robots* 13:21-35.
- Carnegie Mellon University. 2003. Carnegie Mellon University: Demeter [Online] <http://www.rec.ri.cmu.edu/projects/demeter/> (bezoekt 21 oktober 2004).
- CROPSCAN Inc. 2004. Multispectral radiometers [Online] <http://www.cropscan.com/>.
- CropScout Team. 2004. [Online] www.cropscout.nl (bezoekt 20 oktober 2004).
- DARPA. 2004. The 2004 Grand Challenge [Online] <http://www.darpa.mil/grandchallenge04/index.htm> (bezoekt 21 oktober 2004).
- Eye-Maize Team. 2004. [Online] <http://home.edvsz.fh-osnabrueck.de/%7Estd8914/> (bezoekt 20 oktober 2004).
- Garford. 2004. Robocrop [Online] <http://www.garford.com/Robocrop.htm> (bezoekt 21 oktober 2004).
- Gerhards, R., and S. Christensen. 2003. Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugarbeet, winter wheat and winter barley. *Weed Research* 43:385-392.
- Hough, P.V.C. 1962. Method and means for recognizing complex patterns. USA Patent 3069654 1962.
- IROS. 2002. IEEE/RSJ International Conference on

- Intelligent Robots and Systems [Online] <http://iros02.epfl.ch/contest.php> (bezocht 21 Oktober 2004).
- Iteris. 2004. The AutoVue lane departure warning system [Online] <http://www.iteris.com/av/passenger.html> (bezocht 21 oktober 2004).
- John Deere. 2004. [Online] http://www.deere.com/en_US/careers/mid-career_jobs/field_robotics.html (bezocht 25 Oktober 2004).
- Kondo, N., and K.C. Ting. 1998. Robotics for bioproduction systems. ASAE, St. Joseph, Michigan.
- Van der Lee, H. 2004. Ziekzoeken met camera's en licht. Oogst : Tuinbouw 17:36.
- Müller, J., J. Smit, J.W. Hofstee, and D. Goense. 2003. Student design contests promote hands-on learning and innovation in precision agriculture. *Agro-Informatica*:20-23.
- OpenGL. 2004. OpenGL: The industry standard for high-performance graphics [Online] <http://www.opengl.org/> (bezocht 21 oktober 2004).
- Pilarski, T., M. Happold, H. Pangels, M. Ollis, K. Fitzpatrick, and A. Stentz. 2002. The Demeter system for automated harvesting. *Autonomous Robots* 13:9-20.
- POV-Ray. 2004. The Persistence of Vision Raytracer [Online] <http://www.povray.org/> (bezocht 21 oktober 2004).
- Progdigy. 2004. DSPack multimedia components for Delphi [Online] www.progdigy.com (bezocht 21 oktober 2004).
- Robocup. 2004. Robocup [Online] <http://robocup.org/> (bezocht 20 oktober 2004).
- Scheele, T. 2004. Schoffelen met GPS tot op de centimeter : automatisering in de landbouw komt eraan. *Geo-Info* 1:4-8.
- Sietse Team. 2004. Field Robot "Sietse" [Online] www.plant.wur.nl/projects/fieldrobot/ (bezocht 25 oktober 2004).
- Spitters, C.J.T., B. Kiewiet, and T. Schiphouwer. 1990. A weather-based yield-forecasting model for sugar-beet. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 38:731-735.
- Van Straten, G. 2004. Field Robot Event, Wageningen, 5-6 June 2003. *Computers and Electronics in Agriculture* 42:51-58.
- Van Swaaij, N. 2004. Betatip - Opbrengstprognose [Online] Van Swaaij, N., 2004. <http://www.irs.nl/ccmsupload/ccmsdoc/7-2%20Opbrengstprognose.pdf>.
- Tillett, N.D., T. Hague, and J.A. Marchant. 1998. A robotic system for plant-scale husbandry. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69:169-178.
- TNO. 2003. TNO Robotcompetitie [Online] <http://www.tno.nl/instit/fel/felnews/nl/robotcompetitie.html> (bezocht 20 oktober 2004).
- Vaughan, R., N. Sumpter, H. Jane, F. Andy, and C. Stephen. 2000. Experiments in automatic flock control. *ROBOTICS AND AUTONOMOUS SYSTEMS* 31:109-117.
- VXL. 2004. VXL: C++ libraries for computer vision [Online] <http://vxl.sourceforge.net/> (bezocht 21 oktober 2004).