

## POSTĘP I NOWE KONCEPCJE W ROLNICTWIE PRECYZYJNYM

Grzegorz Doruchowski

*Zakład Agrotechnologii, Instytut Sadownictwa i Kwiaciarnictwa w Skierniewicach*

**Streszczenie.** Rolnictwo precyzyjne jest ważnym elementem rolnictwa zrównoważonego. W ostatnich latach istotny postęp dokonał się w dziedzinie nawigacji satelitarnej, zmiennego dawkowania nawozów i mapowania plonów. Rozwiązania wymagają zagadnienia związane z pozyskiwaniem informacji, szczególnie służące do identyfikacji agrofagów w celu lokalnego dawkowania środków ochrony roślin w czasie rzeczywistym. Wśród metod pozyskiwania informacji o charakterze i stanie obiektów ekosystemu rolniczego szczególne zainteresowanie budzi analiza spektralna promieniowania elektromagnetycznego odbitego od obiektów. Ekonomiczna opłacalność rolnictwa precyzyjnego jest wciąż trudna do udowodnienia.

**Słowa kluczowe:** nawigacja satelitarna, pozyskiwanie informacji, identyfikacja obiektów, analiza spektralna

### Wstęp

Rolnictwo precyzyjne, jako koncepcja technologiczna podlega bardzo dynamicznemu rozwojowi. Będąc odpowiedzią na potrzebę realizacji zrównoważonego rozwoju, jest jego ważnym elementem, wymagającym specjalnych kwalifikacji od jego użytkownika. Bez tych kwalifikacji niemożliwe jest osiągnięcie korzyści z rolnictwa precyzyjnego, którego istotą jest wykorzystanie zaawansowanych technologii nawigacyjnych i informatycznych oraz metod pozyskiwania i przetwarzania danych o charakterze przestrzennym do efektywnego zarządzania procesami produkcyjnymi. Biorąc pod uwagę specyfikę materiału i środowiska rolniczego zarządzanie procesami produkcji sprowadza się w dużej mierze do zarządzania zmiennością: (a) przestrzenną, obejmującą zróżnicowanie cech roślin i ich statusu, środowiska i warunków zewnętrznych w obrębie pola, gospodarstwa, kompleksu lub regionu; (b) czasową, uwzględniającą zmiany tych cech i uwarunkowań w czasie – z minuty na minutę, z dnia na dzień, z roku na rok.

Aby móc efektywnie zarządzać zmiennością to opisujące ją cechy muszą być mierzalne, a dane pozyskane w wyniku pomiarów zrozumiałe (interpretowalne) i przetwarzalne na informacje. Zasadniczy postęp dokonuje się właśnie w dziedzinie technik pozyskiwania danych. W dużej mierze od ich dokładności i efektywności oraz sposobu ich użycia zależy ilość i jakość uzyskanych informacji. Aby informacje te można było wykorzystać do sterowania urządzeniami wykonawczymi lub szerzej do budowania spójnych strategii i procedur w procesie produkcji muszą być one wiarygodne i dokładne oraz, co szczególnie ważne z punktu widzenia precyzji, aktualne i lokalne. Ostateczny efekt wszelkich operacji i pro-

cedur zależy także od precyzji urzędów wykonawczych. Ich doskonalenie jest kolejnym obszarem postępu.

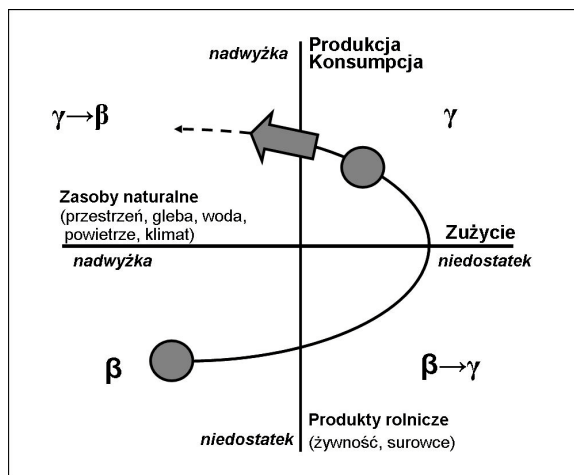
Stwarzając ogromne możliwości intensyfikacji oraz podnoszenia efektywności, bezpieczeństwa i jakości produkcji rolnictwo precyzyjne stawia określone wymagania mogące stanowić dla niektórych trudną do pokonania barierę w jego wdrażaniu. Na te aspekty rolnictwa precyzyjnego zwracał uwagę Zalewski [2000] już na progu obecnego wieku i mimo postępu jaki dokonał się w ciągu ostatnich lat problemy związane z praktycznym jego stosowaniem pozostają wciąż aktualne. Jednym z nich, budzącym najwięcej nadziei jest opłacalność. Postrzegana jest ona jako główne wyzwanie stojące przed rolnictwem precyzyjnym. Zdaniem ekspertów największe szanse na uzyskanie efektów finansowych stają przed precyzyjną ochroną upraw o wysokiej wartości, takich jak warzywa i owoce.

Celem niniejszego opracowania jest przybliżenie nowych koncepcji dla rolnictwa precyzyjnego oraz postępu jaki dokonał się w ostatnim okresie w technologiach już stosowanych. Skupiono się szczególnie na zagadnieniach związanych z ochroną roślin oraz na uprawach o wysokiej wartości ponieważ te obszary leżą w centrum zainteresowania rolnictwa precyzyjnego.

### **Rolnictwo precyzyjne jako narzędzie zrównoważonego rozwoju**

Rozwój współczesnego rolnictwa następuje przede wszystkim w oparciu o nauki biologiczne, techniczne i społeczne. O ile w dobie zielonej rewolucji w rozwoju tym dominowały nauki biologiczne, to obecnie obserwuje się wyraźny zwrot ku zdobyciom techniki. Wynika to z drogi, jaką przeszło rolnictwo w ostatnich latach oraz miejsca w jakim się teraz znajduje. Drogę tę trafnie nakreślili Bertschinger i in. [2006] zauważając, że rozwój rolnictwa zatoczył hiperbolę: od punktu, w którym dostatkowi zasobów (przestrzeń, klimat, gleba, woda, siła robocza) towarzyszył niedostatek żywności, poprzez punkt równowagi między popytem a produkcją przy niebezpiecznie uszczuplonych zasobach, do obecnej sytuacji, w której potencjał rolnictwa pozwala na uzyskanie nadwyżek żywności przy wzroście konsumpcji i jednoczesnym zachowaniu, lub nawet odtwarzaniu zasobów (rys. 1). Celem dalszego rozwoju jest oczywiście utrzymanie tempa wzrostu produkcji rolniczej, pozwalającego na wyżywienie ludności świata przy pełnym odtworzeniu zasobów. Ten model rozwoju jest znany pod nazwą rozwoju zrównoważonego.

Orientacja rolnictwa na postęp techniczny uzasadnia postawione na wstępie stwierdzenie, że rolnictwo precyzyjne, którego istotą jest wykorzystanie zaawansowanej technologii jest lokomotywą i nieodzownym warunkiem rozwoju zrównoważonego. Biorąc pod uwagę zadania stawiane przed rolnictwem precyzyjnym, takie jak: minimalizacja nakładów, poszanowanie środowiska, ochrona zasobów naturalnych i ludzkich oraz dbałość o godne i bezpieczne warunki pracy, a następnie dostrzegając ich zbieżność z ogólnym celem rozwoju zrównoważonego należy uznać, że rolnictwo precyzyjne jest ważnym, jeśli nie najważniejszym, narzędziem gwarantującym ten rozwój. Jeśli zatem rozwój zrównoważony jest ideą to precyzyjne rolnictwo jest narzędziem wdrażania i upowszechniania tej idei.



Rys. 1. Rozwój rolnictwa w czasie w relacji do postępu w naukach technicznych ( $\beta$ ) i społecznych ( $\gamma$ ) [Bertschinger i in. 2006]

Fig. 1. Development of agriculture in function of time in relation to the progress in technical ( $\beta$ ) and social ( $\gamma$ ) sciences [Bertschinger i in. 2006]

### Podstawowe obszary postępu

Podczas swojej 25-letniej historii precyzyjne rolnictwo odnotowało spektakularne osiągnięcia w satelitarnej nawigacji maszyn i urządzeń, mapowaniu plonu, właściwości gleby i roślin, precyzyjnym prowadzeniu maszyn oraz zróżnicowanym dawkowaniu nawozów. Wszystkie te rozwiązania są już komercyjnie dostępne i na niewielką skalę stosowane w praktyce. Jednym z wielkich zadań do rozwiązania praktycznego jest identyfikacja kondycji roślin w czasie rzeczywistym oraz zróżnicowane stosowanie środków ochrony roślin do lokalnego i selektywnego zwalczania chwastów, chorób i szkodników. Ogromny postęp dokonuje się w dziedzinie pozyskiwania informacji i ich interpretacji, a główne wyzwania stoją przed rozwiązaniem urządzeń wykonawczych.

### Nawigacja

Początek dwudziestego pierwszego wieku zaznaczył się niezwyklejnym rozwojem i upowszechnieniem nawigacji w oparciu o systemy satelitarne. Amerykański GPS-NAVSTAR (*Global Positioning System- NAVigation Signal Timing And Ranging*) nie jest już jedynym działającym systemem, choć jak na razie jedynym działającym globalnie i kompleksowo. Poza nim w ograniczonym zakresie pracują także rosyjski GLONASS i chiński BEIDOU, a w na etapie tworzenia są: europejski GALILEO, chiński COMPASS, indyjski IRNSS i japoński QZSS.

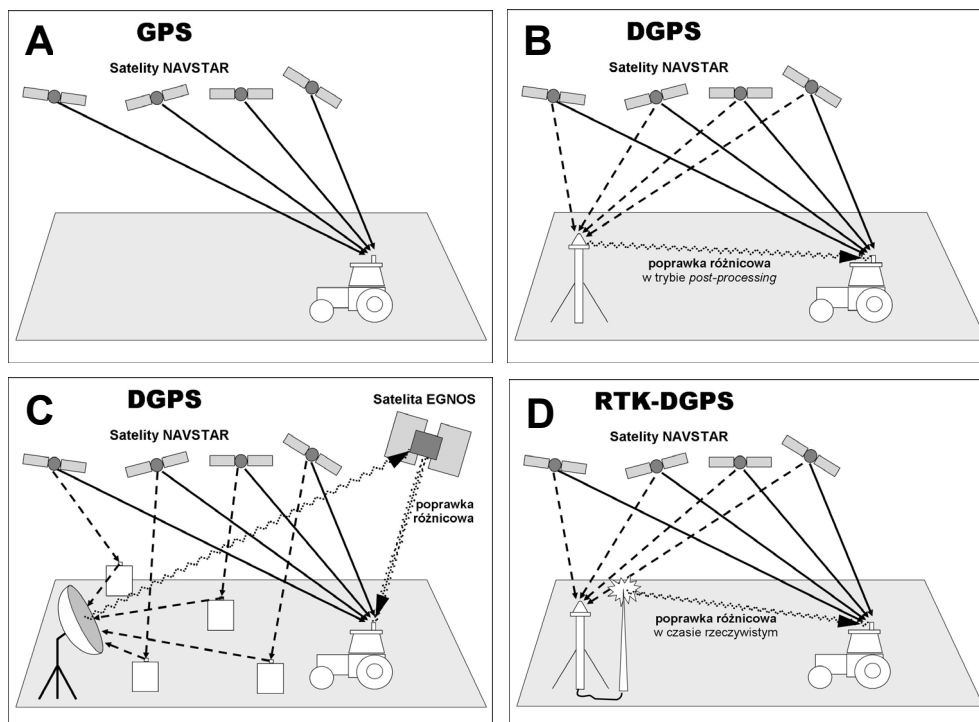
Powszechne zastosowanie nawigacji satelitarnej w oparciu o system GPS stało się możliwe dopiero w roku 2000, kiedy Departament Obrony Stanów Zjednoczonych wyłączył moduł SA (*Selective Availability*), którego zadaniem było celowe zakłócanie sygnałów z 24 satelitów NAVSTAR. Umożliwiło to cywilnym użytkownikom, nie dysponującym

systemami korekcyjnymi, lokalizację obiektów na ziemi z dokładnością od 3 do 12 m. Dokładność taka pozwala na nawigację w transporcie lądowym i morskim, a w rolnictwie jedynie na dokumentowanie prac polowych i logistykę, w tym zarządzanie flotą maszyn i środków transportowych. Wiarygodne mapowanie plonu oraz cech gleb lub upraw zaczyna się od dokładności pozycjonowania rzędu 1 m, a automatyczne sterowanie maszynami rolniczymi wymaga dokładności co najmniej submetrych. Uzyskanie takiej dokładności w nawigacji wymaga korygowania sygnałów GPS przez zewnętrzne systemy wspomagające, zwane systemami różnicowymi DGPS (*Differential GPS*). Systemy te były stosowane przez ośrodki badawcze i rozwojowe już w latach 90-tych ubiegłego wieku w celu wyznaczania pozycji z submetrywą dokładnością mimo działania modułu zakłócania SA. Systemy DGPS wysyłają do odbiorcy własne sygnały, które zawierają poprawki różnicowe, korygujące błąd obliczenia pozycji, wynikający z przekłamania sygnałów odbieranych z poszczególnych satelitów GPS. Przekłamania powodowane są przez opóźnienia jonosferyczne i troposferyczne (załamania sygnału w atmosferze), błędy efemeryd (odchylenia trajektorii satelitów od ich bieżni teoretycznej), błędy zegarów satelitów i odbiorników oraz błędy i zaokrąglenia w obliczeniach. W systemach DGPS poprawki różnicowe wysyłane są przez naziemne stacje bazowe (referencyjne) o dokładnie znanym położeniu (rys. 2B) lub przez satelity geostacjonarne (rys. 2C). W pierwszym przypadku zasięg sygnałów korygujących jest ograniczony do kilku lub kilkunastu kilometrów, w zależności od mocy nadajnika stacji bazowej. O wiele większe, bo także globalne możliwości daje kombinacja stacji naziemnych i satelitów geostacjonarnych, tworzących zintegrowany system różnicowy, wspomagający satelitarne systemy nawigacji. Obecnie na świecie funkcjonuje 5 satelitarnych systemów różnicowych, korygujących sygnały GPS: WAAS – obejmuje obszar Ameryki Północnej; EGNOS – pokrywa zasięgiem Europę wspomagając także rosyjski system GLONASS; MSAS – obejmuje Japonię; globalne systemy płatne OmniSTAR i StarFire (sieć korekcyjna firmy JohnDeere). W budowie są: kanadyjski GPS-C oraz indyjski GAGAN.

Standardowe systemy DGPS wysyłają poprawki różnicowe w trybie „postprocessing”, a więc z pewnym opóźnieniem, wynikającym z konieczności przetworzenia danych. Dokładność pozycjonowania tak działających jednokanałowych systemów DGPS (EGNOS, WAAS, OmniSTAR-VBS, StarFire-1) wynosi 0,5–1,0 m. Systemy dwukanałowe (OmniSTAR-HP, StarFire-2), gdzie sygnał emitowany jest w dwóch zakresach częstotliwości oraz systemy wykorzystujące naziemne stacje referencyjne zwiększają dokładność pozycjonowania do 10-15 cm. W najbardziej zaawansowanych systemach RTK-DGPS (*Real Time Kinematic DGPS*) sygnały korygujące odbierane są ze stacji referencyjnej w czasie rzeczywistym, a więc bez opóźnień, umożliwiając nawigację z dokładnością 1-3 cm (rys. 2D). Jeśli dodatkowo system korygujący uwzględnia cały kompleks wspomnianych wyżej obiektywnych błędów przekłamujących sygnał GPS oraz eliminuje błędy subiektywne (np. interferencja fal VHF, odbicia sygnałów od obiektów naziemnych) to istnieje już możliwość wyznaczania pozycji z precyzją subcentymetrową.

Efektorem dokonującego się postępu w dokładności pozycjonowania jest niemal powszechna dostępność do technologii. Wyposażenie potrzebne do super dokładnej nawigacji, choć wciąż kosztowne, jest komercyjnie dostępne. Pogoń za precyzją nawigacji ma swój cel, a osiągnięcia na tym polu dają nowe możliwości. Jedną z nich jest zastosowanie precyzyjnej nawigacji w koncepcji indywidualnego podejścia do roślin (*plant-scale*

*husbandry*) lub pojedynczych liści roślin (*leaf-scale-husbandry*). Superprecyzyjne pozycjonowanie roślin zaczyna się na etapie siewu lub sadzenia, a następnie wykorzystywane jest w precyzyjnych zabiegach pielęgnacyjnych (zwalczanie chwastów, mikropryskiwanie) oraz przy zbiorze plodów.



Rys. 2. Systemy nawigacji satelitarnej  
Fig. 2. Satellite navigation systems

Oprócz systemów satelitarnych do nawigacji stosowane są systemy lokalnego pozycjonowania LPS (*Local Positioning System*). Najbardziej godne uwagi są systemy autonomiczne, które poza wyposażeniem instalowanym w maszynie (ciągniku) nie wymagają żadnego dodatkowego oprzyrządowania zewnętrznego. Do systemów takich należą systemy wizyjne, wykorzystujące do prowadzenia maszyny kamerę stereoskopową, która skanuje obszar przed maszyną i wyszukuje element o ciągłej strukturze na powierzchni ziemi. Może to być rząd roślin, ścieżka technologiczna w zbożu, redlina, bruzda albo ślad znacznika lub koła maszyny na glebie. Dokładność prowadzenia maszyn przez systemy wizyjne wynosi od 3 do 5 cm. Rozwiązania takie są komercyjnie dostępne i oferowane jako pakiet do zamontowania na maszynie przez użytkownika we własnym zakresie.

## Pozyskiwanie informacji

Wykorzystywane w rolnictwie precyzyjnym informacje o przestrzennej i czasowej zmienności cech roślin i środowiska oraz parametrów określających warunki zewnętrzne najczęściej zapisywane jest w formie mapy. Ten wypróbowany przez stulecia nośnik informacji daje możliwość powiązania każdej wartości parametru z określonym przez współrzędne punktem w przestrzeni. Ponadto mapa jest łatwo interpretowana przez systemy informatyczne oraz umożliwia czytelną i zrozumiałą dla użytkownika wizualizację sytuacji. Różne cechy dotyczące określonego obszaru zapisywane są na nakładanych na siebie poziomach mapy. Zmienność czasową cech rejestruje się w obrębie poziomów na kolejnych warstwach mapy. W ten sposób dla wybranego terenu można stworzyć nieograniczoną liczbę poziomów i warstw budując bazę informacji zwaną GIS (*Geographic Information System*).

W odniesieniu do rolnictwa GIS może zawierać informacje o : (a) właściwościach gleb (odeczyn pH, zasobność w składniki pokarmowe, zawartość frakcji i materiału organicznego, wilgotność, transpiracja); (b) właściwościach roślin (gatunek, kondycja, faza rozwojowa, dojrzałość); (c) agrofagach (chwasty, szkodniki, patogeny); (d) plonie (uzyskany, szacowany); (e) parametrach meteorologicznych (temperatura, wilgotność, opady, nasłonecznienie, prędkość wiatru). Informacje pozyskiwane są na drodze lustracji pól, pobierania prób oraz bezpośrednich lub zdalnych pomiarów przy użyciu standardowych czujników lub skomplikowanych systemów optycznych, ultradźwiękowych czy wizyjnych.

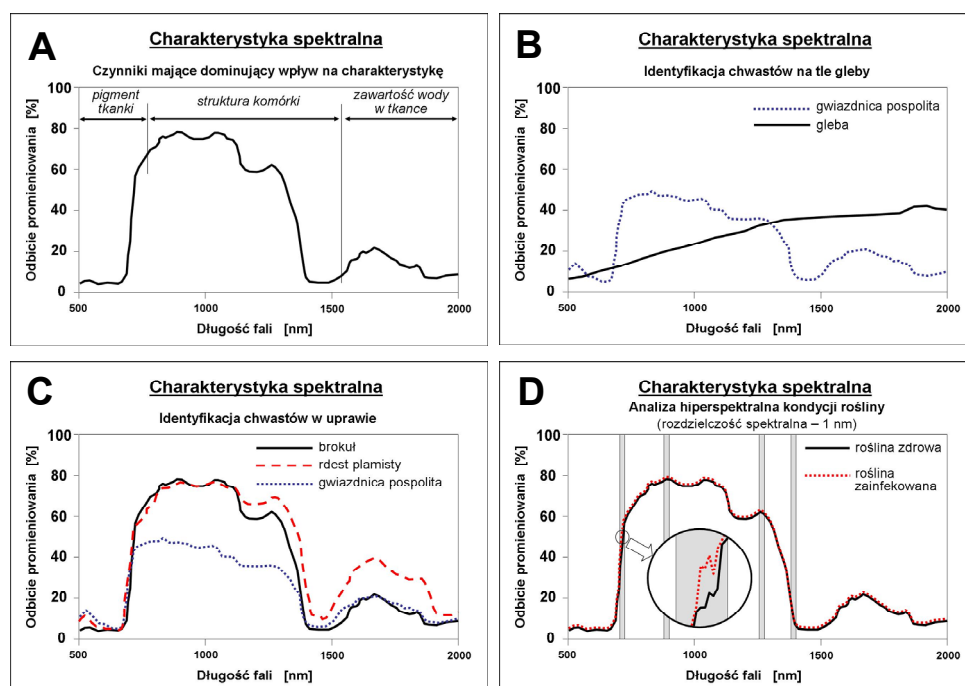
Mapy GIS stosowane są do celów dokumentacyjnych, w zarządzaniu procesami produkcji oraz jako wytyczne dla urzędzeń wykonawczych podczas zabiegów polowych. Przeprowadzanie zabiegów polowych w oparciu o mapy jest działaniem dwuetapowym. W pierwszym etapie pozyskiwane są informacje i tworzona jest mapa, a dopiero w etapie drugim informacje z mapy wykorzystywane są do precyzyjnego wykonania zabiegu. Pierwszy etap jest często bardzo pracochłonny i tworzenie mapy może zabrać stosunkowo dużo czasu. Tymczasem są zabiegi, dla których czas jest czynnikiem krytycznym. Aby zapewnić pożądany efekt przeprowadzane są one w czasie rzeczywistym, co oznacza, że pomiar określonej cechy (lub zespołu cech) w polu, przetworzenie danych na informację i reakcja urzędzenia wykonawczego zachodzą w czasie mierzonym w skali subsekundowej. Taki tryb pracy pożądany jest szczególnie w zabiegach pielęgnacyjnych. Przykładem praktycznego zastosowania jest urządzenie N-Sensor do określania deficytu azotu w zbożach, rzepakach, kukurydzy, ziemniakach czy burakach cukrowych oraz urządzenie CROP-Meter do pomiaru biomasy (gęstości ładu) upraw zwartych. N-Sensor podczas jazdy ciągnika z rozsiewaczem nawozów skanuje obszar przed i w otoczeniu ciągnika i przeprowadza uproszczoną analizę spektralną promieniowania odbitego od roślin. Deficyt azotu powoduje spadek poziomu chlorofilu w roślinach zmieniając ich charakterystykę spektralną. N-Sensor identyfikuje zmianę charakterystyki i przelicza informację o stanie chlorofilu na wymaganą dla danego obszaru dawkę nawozu, umożliwiając odpowiednią regulację rozsiewacza w czasie rzeczywistym. Lowenberg-DeBoer [2004] podsumowując efekty lokalnego dawkowania azotu przy użyciu technologii N-Sensor w kilku krajach donosi o zwiększonych plonach zbóż o 3-13% i oszczędności nawozów średnio o 14%. W urządzeniu CROP-Meter gęstość biomasy określana jest poprzez pomiar wychylenia wahadła przemieszczanego w łanie uprawy. Uzyskane informacje służą do określania potrzeb nawozowych i do lokalnego dawkowania środków ochrony roślin. Dammer [2007] donosi, że

w ciągu 5-letnich badań, w których na 50 hektarach pszenicy ozimej stosowano zróżnicowane dawki fungicydów w zależności od gęstości biomasy oszczędności środków ochrony roślin wyniosły ponad 23%. Mniejsze zużycie fungicydów nie spowodowało ani obniżki plonu ani wzrostu poziomu infekcji roślin przez choroby. Zauważono ponadto, że mapa gęstość biomasy zbóż doskonale pokrywa się z mapą plonu, dając możliwość wczesnego prognozowania plonu.

Prognozowanie plonu, jako kluczowy element zarządzania gospodarstwem budzi obecnie wiele zainteresowania. Pozwala na podejmowanie właściwych decyzji dotyczących zabiegów agrotechnicznych, organizacji zbioru, logistyki, inwestycji i ubezpieczenia upraw. Lee i Ehsani [2008] zauważyli, że biomasa drzew pomarańczowych już we wczesnej fazie rozwoju jest dobrze skorelowana z plonem owoców. Przedstawili metodę określania biomasy poprzez pomiar wielkości i gęstości koron drzew przy użyciu dwóch laserowych skanerów typu LIDAR. Schuman i Hostler [2008] zaproponowali szacowanie plonu pomarańczy na podstawie indeksu plonu. Do jego obliczenia potrzebna jest informacja o objętości koron drzew, mierzonych czujnikiem ultradźwiękowym oraz o udziale owoców w obrazie cyfrowym drzew, określanym metodą analizy obrazu. Analizę obrazu stosowano także do precyzyjnego szacowania plonu czarnych jagód [Zaman i in. 2008] i daktyli [Al-Yahyai i Al-Kharusi, 2008].

Precyzyjna ochrona roślin polega na stosowaniu środków ochrony roślin tylko wtedy kiedy jest to konieczne, tylko tam gdzie niezbędne i tylko w wymaganej ilości. Aby zrealizować to zadanie konieczna jest identyfikacja zdrowotnego statusu roślin oraz położenia i charakterystyki obiektów. Jest ona realizowana przy użyciu systemów optycznych, w tym także laserowych, i ultradźwiękowych, które umożliwiają określenie położenia, wielkości, pokroju i gęstości roślin oraz systemów spektralnych i wizyjnych pozwalających na różnicowanie gatunków roślin. Możliwości tych systemów są już stosunkowo dobrze poznane, a w polskiej literaturze ich przeglądu dokonali Hołownicki [2004] i Doruchowski [2005]. Podstawowym wyzwaniem w precyzyjnej ochronie roślin pozostaje jednak określanie zdrowotnego statusu roślin poprzez identyfikację stresu powodowanego oddziaływaniem patogenów lub szkodników. Jest to problem o znaczeniu zasadniczym ponieważ zależy od niego decyzja o zastosowaniu lub nie zastosowaniu środka ochrony roślin w konkretnym miejscu pola oraz ewentualnie o wymaganej do zwalczania agrofaga dawce środka. Prace rozwojowe w tym zakresie koncentrują się na technikach związanych z analizą interakcji jaka zachodzi między promieniowaniem elektromagnetycznym trafiającym na ziemię a obiektami ekosystemu rolniczego (organizmy, gleba, woda). Część energii promieniowania jest absorbowana i transmitowana wewnątrz obiektów, podczas gdy większość ulega odbiciu lub zostaje zużyta do wzbudzenia promieniowania emitowanego przez objekty. Do analizy promieniowania odbitego stosuje się spektrometrię, a do emitowanego fluorometrię. Szczególne zainteresowanie budzi identyfikowanie cech badanych obiektów lub obszarów poprzez analizę ich charakterystyk spektralnych czyli wykresów natężenia odbitego promieniowania w funkcji długości fal. Charakterystyki te w zakresie długości fal 500–2000 nm, obejmującym światło widzialne i bliską podczerwień, dostarczają wielu informacji o właściwościach roślin i gleby (rys. 3A). Coppin [2008] wymienia następujące czynniki wpływające na przebieg charakterystyki spektralnej, pokazując tym samym mnogość cech, które mogą być identyfikowane podczas jej analizy: (a) morfologia roślin - taksonomia, układ łanu/korony, masa liści, rodzaj i orientacja liści, kąt iluminacji; (b) faza

rozwojowa roślin -dojrzałość, wybarwienie; (c) uwodnienie roślin; (d) stres – deficyt składników pokarmowych, deficyt wody, patogen, szkodnik; (e) skład i zasobność gleby – frakcje gliniaste, zawartość azotu, żelaza i wapnia; (f) właściwości powierzchni gleby – kolor, ciągliwość; (g) wilgotność gleby. Identyfikacja określonego rodzaju obiektów w kontrastującym otoczeniu lub wśród innych pokrewnych obiektów możliwa jest na podstawie analiz multispektralnych, tzn. w oparciu o charakterystyki wyznaczone dla szerokiego zakresu długości fal, ponieważ różnice między charakterystykami tych obiektów są ewidentne i pozwalają na jednoznaczne określenie punktów dyskryminacyjnych. Analizy multispektralne wykorzystywane są między innymi do identyfikacji chwastów na tle gleby lub wśród roślin uprawnych oraz do rozróżniania poszczególnych gatunków, a nawet odmian roślin (rys. 3B-C). Rozróżnianie stanów określonych gatunków lub odmian roślin (np. faz fenologicznych) lub ich kondycji (np. stresów powodowanych oddziaływaniem agrofagów) wymaga stosowania analizy hiperspektralnej z użyciem charakterystyki o bardzo dużej rozdzielczości spektralnej, wynoszącej 1-2 nm. Dopiero taka rozdzielczość daje możliwość identyfikacji subtelnych różnic między charakterystykami opisującymi różne stany roślin. Ponieważ ze wzrostem rozdzielczości znacznie wzrasta ilość danych podlegających analizie to najczęściej analiza ogranicza się do badania charakterystyk w kilku lub kilkunastu wąskich pasmach widma (ok. 10 nm) wybranych dla charakterystycznych punktów (rys. 3D).



Rys. 3. Charakterystyka spektralna promieniowania elektromagnetycznego odbitego od obiektów ekosystemu rolniczego wykorzystywana do identyfikacji charakteru i statusu obiektów

Fig. 3. Spectral characteristics of electromagnetic radiation reflected from agricultural ecosystem elements, used to identify the character and status of these elements



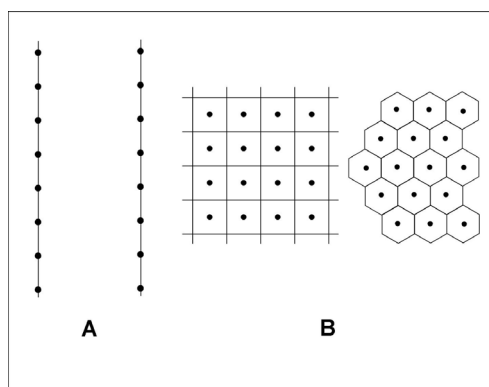
Analiza spektralna umożliwia określanie poziomu chlorofilu i śledzenie przebiegu procesu fotosyntezy w roślinach. Dzięki temu można przy jej użyciu wyznaczać indeks fenologiczny NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dla poszczególnych roślin lub obszarów i tworzyć mapy dojrzałości służące do selektywnego zbioru płodów [Perry i in. 2008]. Ponadto można identyfikować czynniki zakłócające fotosyntezę i powodujące stres rośliny, takie jak oddziaływanie szkodników lub wczesne fazy infekcji chorób [Franke 2007]. Identyfikacja tak dyskretnych, niewidocznych dla ludzkiego oka stanów roślin pozwala na wczesne i precyzyjne co do miejsca reagowanie na problem przy minimalnym nakładzie środków.

Dane do analiz spektralnych pozyskiwane są przy użyciu kamer pobierających obrazy obiektów lub terenu w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Mapy sytuacyjne tworzone są z reguły na podstawie zdjęć satelitarnych lub lotniczych. Rozdzielczość zdjęć satelitarnych oferowanych przez satelitę IKONOS wynosi 1m/piksel, a lotniczych ok. 0,4 m/piksel. Jest to rozdzielczość pozwalająca już na identyfikację skupisk chwastów lub ognisk chorób i na lokalne dawkowanie herbicydów i fungicydów w uprawach polowych. Zmienne dawkowanie środków ochrony roślin w sadach w czasie rzeczywistym wymaga jednak innego rozwiązania. Problem jest przedmiotem europejskiego projektu ISAFRUIT [Doruchowski i in. 2008], którego zadaniem jest opracowanie precyzyjnej techniki ochrony sadów. Budowany w ramach projektu opryskiwacz wykorzystuje kamery spektralne do identyfikacji wczesnej fazy infekcji parcha jabłoni (*Venturia inaequalis*) oraz czujniki ultradźwiękowe do identyfikacji wielkości i gęstości drzew, a następnie w czasie rzeczywistym stosuje środki ochrony roślin tylko w miejscu stwierdzonej infekcji oraz w ilości wynikającej z rzeczywistych potrzeb roślin.

### **Urządzenia wykonawcze**

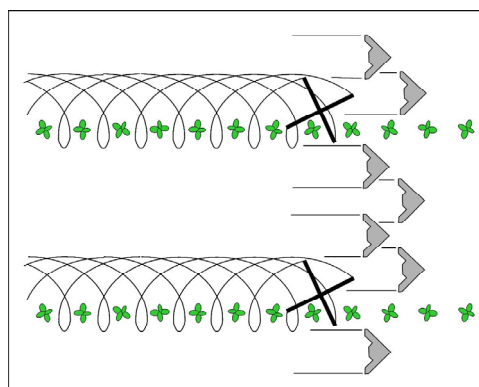
Główny kierunek prac nad urządzeniami wykonawczymi w rolnictwie precyzyjnym koncentruje się na układach wpisujących się w koncepcję indywidualnego podejścia do roślin (*plant-scale-husbandry*). Na urządzeniach tego typu oparto pomysł dotyczący autonomicznego systemu zabiegowego, który mógłby realizować nową filozofię przeprowadzania operacji polowych przy użyciu małogabarytowych, inteligentnych robotów [Blackmore i in. 2006]. Filozofia ta zakłada, że wydajność maszyn można zwiększać nie tylko poprzez zwiększanie ich mocy i gabarytów lecz także poprzez poprawianie ich inteligencji. W toku dotychczasowego rozwoju środowisko rolnicze zmieniano starając się je ujednolicić i zuniformizować, dopasowując do możliwości i wymagań maszyn. Nowe podejście polega na opracowaniu maszyn które są wystarczająco inteligentne aby radzić sobie z występującą w środowisku zmiennością. W założeniach autorów tej koncepcji maszyny powinny mieć małą masę i niewielkie gabaryty, oraz być autonomiczne operacyjnie, obliczeniowo i energetycznie. Do wykonania poszczególnych operacji proponowane są określone rozwiązania. I tak na przykład precyzyjny siew w lokalnie spulchnianą glebę (tylko w obrębie lokalizacji nasion) przebiegałby z zapisaniem pozycji każdego nasiona

przy użyciu systemu RTK-DGPS, co w efekcie daje mapę rozkładu nasion (*seed map*). W celu optymalnego wykorzystania powierzchni oraz stworzenia każdej roślinie takich samych warunków rozwoju siew należałoby wykonać w oparciu o siatkę kwadratową lub sześciokątną (rys. 4). Po wschodach roślin, przy użyciu systemu wizyjnego i RTK-DGPS, tworzona by była mapa rozkładu roślin (*crop map*) oraz mapa rozkładu chwastów (*weed map*). Mapa rozkładu roślin uwzględniałaby odchylenia pozycji roślin od pozycji nasion, wynikające z uwarunkowań kiełkowania i wschodu, umożliwiając wyznaczenie dla każdej rośliny na mapie obszaru okolicy roślinnego (*close-to-crop area*). Dysponując mapą lokalizacji chwastów można przeprowadzić ich selektywne zwalczanie nanosząc herbicyd przy użyciu mikrorozpylaczy [Giles i in. 2004] tylko na liście wschodzących chwastów. Tak precyzyjna technika pozwoliłaby na skuteczne zwalczanie chwastów dawką glifosatu na poziomie 1 g/ha [Graglia 2004]. Alternatywnie w uprawach rzędowych można zwalczać chwasty mechanicznie z użyciem kombinacji klasycznego opielacza międzyrzędowego (*inter-row*) i precyzyjnego opielacza cykloidalnego [Gabor i Schulze 2008] (rys. 5), działającego także w obszarze rzędów roślin (*intra-row*). W przypadku upraw sianych w oparciu o siatkę równoboczną można zastosować opielacz rotacyjny spulchniający glebę indywidualnie wokół każdej rośliny. Zwalczanie chorób i szkodników można przeprowadzać selektywnie przy użyciu tych samych mikrorozpylaczy co w przypadku stosowania herbicydów z tą różnicą, że obiektem opryskiwania byłyby teraz rośliny uprawne których lokalizacja zapisana jest na mapie rozkładu roślin. Selektywny zbiór płodów w oparciu o spektralną analizę dojrzałości (NDVI) przeprowadzić można z wykorzystaniem systemów wizyjnych do identyfikacji zbieranych obiektów.



Rys. 4. Rodzaje siewu: A – rzędowy, B – w oparciu o siatkę kwadratową lub sześciokątną

Fig. 4. Sowing types: A – drilling; B – based on square or hexagonal grid



Rys. 5. Mechaniczne zwalczanie chwastów przy użyciu cykloidalnego opielacza do spulchniania gleby w rzędach roślin

Fig. 5. Mechanical weed control using cycloidal inter-plant hoe for soil opening in plant rows

Zaproponowana koncepcja autonomicznego systemu zabiegowego łączy w sobie wiele rozwiązań będących na różnym etapie rozwoju. Według jej autorów jej techniczna realizacja jest już możliwa, a w przyszłości może być warunkiem uzyskania ekonomicznej konkurencyjności w zrównoważonej produkcji roślinnej [Blackmore i in. 2008].

### Sukcesy i wyzwania

Zmarły w 2003 roku Pierre Robert – uznany ojciec rolnictwa precyzyjnego stwierdził: „Rolnictwo precyzyjne jest holistycznym podejściem do zarządzania procesami produkcji rolniczej i stopniowo staje się jasne, że nadal brakuje wielu elementów całego systemu” [Stafford 2004]. W wymiarze praktycznym rolnictwo precyzyjne ma na swoim koncie niezaprzeczone sukcesy, takie jak: precyzyjna nawigacja maszyn, zmienne dawki nawozów w oparciu o mapy glebowe czy mapowanie plonów. Mimo ogromnego postępu i rozpoznania problemów od strony badawczej na swoje zastosowanie praktyczne wciąż czekają kluczowe elementy rolnictwa precyzyjnego: identyfikacja agrofagów, lokalne dawki środków ochrony roślin w czasie rzeczywistym oraz precyzyjne prognozowanie plonów.

Z punktu widzenia producentów rolnych oraz producentów środków produkcji największym wyzwaniem stojącym przed rolnictwem precyzyjnym jest doprowadzenie do uzyskania jej opłacalności. Według Stafforda [2007] ekonomiczna opłacalność rolnictwa precyzyjnego jest trudna do udowodnienia, choć korzyści dla środowiska są oczywiste. Jest ono mile widziane przez polityków lecz przemysł zainwestuje w nie tylko pod warunkiem osiągnięcia zysku. Gaultney [2008] zauważył, że rozwiązanie problemów technicznych i technologicznych nie oznacza ekonomicznej opłacalności, a stosowanie zaawansowanej technologii nie zastępuje wiedzy i nie jest gwarantem sukcesu w rękach nieświadomego użytkownika. Wdrażanie rolnictwa precyzyjnego wymaga znajomości przedmiotu, systematyzacji własnej wiedzy i ciągłego jej wzbogacania, krytycznej oceny własnych działań oraz uczenia się na błędach. Warunkiem sukcesu jest zatem duży wysiłek intelektualny oraz zaangażowanie użytkownika tej technologii.

### Bibliografia

- Al-Yahyai R, i Al-Kharusi L.** 2008. Potential use of digital image to predict fruit growth and yields of date palm. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Bertschinger L., Callesen O., Costa G., Doruchowski G. i Zurcher M.** 2006. Sustainability of the Pre-Harvest Management Chain of Apple (*Malus domestica* Borkh.) and Peach (*Prunus persica* L.) Crops by the ISAFRUIT European Project – Conceptual View, Research Focus and Expected Innovations. Prezentacja S04-129. International Horticultural Congress. Seoul. 17.08.2006.
- Blackmore B.S., Griepentrog H.W., Fountas S.** 2006. Autonomous System for European Agriculture. Conference on Automation Technology for Off-Road Equipment. Bonn. 1-2.09.2006.

- Blackmore B.S., Griepentrog H.W., Fountas S. i Gemtos T.A.** 2008. A specification for an autonomous crop production mechanization system. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Coppin P.** 2008. Eyes above to monitor plant production system below. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Doruchowski G.** 2005. Elementy rolnictwa precyzyjnego w ochronie roślin. Inżynieria Rolnicza. Nr 6(66). Kraków. s. 131-138.
- Doruchowski G., Balsari P. i Van de Zande J.** 2008. Development of a Crop Adapted Spray Application system for sustainable plant protection in fruit growing, Acta Horticulturae (w druku).
- Franke J.** 2007. Comparison of multi- and hyperspectral remote sensing data for early disease detection. Book of Abstracts: 2<sup>nd</sup> Conference on Precision Crop Protection. Bonn. 10-12.10.2007.
- Gaultney L.** 2008. Economic and environmental benefits of precision agriculture in fruit and vegetable production. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Giles D.K., Slaughter D.C., Downey D., Brevis-Acuna J.C. i Lanini W.T.** 2004. Application design for machine vision guided selective spraying of weed in high value crops. Aspects of Applied Biology. 71. s. 75-81.
- Graglia E.** 2004. Importance of herbicide concentration, number of droplets, and droplet size on growth of *Solanum Nigrum* L. using droplet application of glyphosate. XII Colloque International sur la Biologie des Mauvaises Herbes. Dijon. s. 527-533.
- Hammer K.-H.** 2007. Sensing Plant Parameters and Variable Rate Fungicide and Herbicide Spraying in Real Time. Book of Abstracts: 2<sup>nd</sup> Conference on Precision Crop Protection. Bonn. 10-12.10.2007.
- Holownicki R.** 2004. Perspektywy zastosowania koncepcji rolnictwa precyzyjnego w ochronie roślin. Postępy w Ochronie Roślin. Nr 44(1). s. 104-113.
- Lee K.-H. i Ehsani R.** 2008. A measurement system for quantifying biomass of citrus foliage. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Lowenberg-DeBoer J.** 2004. The Management Time Economics of On-the-go Sensing for Nitrogen Application. SSMC Newsletter.
- Perry E., Davenport J., Smithyman J. i Pierce F.** 2008. Comparing active optical and airborne measurements of grape canopies. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Schuman A.W. i Hostler K.H.** 2008. Yield monitoring of citrus using color photography and ultrasonic sensor. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.
- Stafford J.** 2004. Appreciation of Pierre Robert (1941-2003). Precision Agriculture, 5(1): 5-6.
- Stafford J.** 2007. A Brief History of Precision Agriculture. Book of Abstracts: 2<sup>nd</sup> Conference on Precision Crop Protection. Bonn. 10-12.10.2007.
- Zalewski P.** 2000. Problemy rolnictwa precyzyjnego. Inżynieria Rolnicza. Nr 8(19). Kraków. s. 15-23.
- Zaman Q.U., Schumann A.W., Percival D.C i Gordon R.J.** 2008. Estimation of wild blueberry fruit yield using digital imagery. Book of Abstracts: International Symposium – Precision Agriculture for Fruits and Vegetables. Orlando. 6-9.01.2008.

## **PROGRESS AND NEW CONCEPTS IN PRECISION AGRICULTURE**

**Abstract.** Precision agriculture is an important element of sustainable agriculture. In recent years we have been observing substantial progress in the field of satellite navigation, variable dosing of fertilizers and mapping of crops. The issues that require to be solved involve acquiring of information, in particular used to identify pests for the purposes of local dosing of pesticides in real time. Spectral analysis of electromagnetic radiation reflected from agricultural ecosystem elements is particularly interesting among the methods used to acquire information concerning the character and condition of these elements. The economic profitability of precision agriculture is still hard to prove.

**Key words:** satellite navigation, acquiring of information, identification of elements, spectral analysis

**Adres do korespondencji:**

Grzegorz Doruchowski; e-mail: grzegorz.doruchowski@insad.pl  
Instytut Sadownictwa i Kwiaciarstwa w Skierniewicach  
ul. Pomologiczna 18  
96-100 Skierniewice