

Pomiary zapotrzebowania nawozowego kukurydzy za pomocą aktywnego czujnika azotu

Katarzyna Kubiak-Siwińska, Jan Kotlarz

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa, Centrum Technologii Bezzałogowych, Dział Teledetekcji, Al. Krakowska 110/112, 02-256 Warszawa

Streszczenie: Azot jest ważnym makroskładnikiem biomasy, ponieważ odgrywa istotną rolę w procesach metabolicznych, produkcji białek, syntezie aminokwasów, enzymów, hormonów oraz jest składnikiem chlorofilu. Ocena jego niedoborów w uprawach kukurydzy jest przedmiotem badań naukowych. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych wskaźników teledetekcyjnych kukurydzy uprawianej w wariantach nawożenia 0–150 kg-N/ha. Zaproponowana metoda oceny niedoboru azotu z wykorzystaniem sensora Crop Circle pozwala na autonomiczne sterowanie precyzyjnym nawożeniem doglebowym w projektowanym rozwiązaniu robota polowego.

Słowa kluczowe: nawożenie azotem, robot polowy, NDVI, NDRE, biomasa

1. Wprowadzenie

Azot (N) jest jednym z najważniejszych makroskładników pokarmowych roślin. Właściwe gospodarowanie azotem jest istotnym czynnikiem warunkującym skuteczność i użyteczność metod stosowanych w nowoczesnym rolnictwie. Zawartość azotu w biomase uprawy może się znacznie różnić w zależności od rodzaju uprawy, gatunku roślin, rodzaju gleby i warunków środowiskowych. Większość rodzajów biomasy uprawy zawiera 0,5–5 % azotu (w stosunku do masy suchej) i może zostać zwiększona przez dostarczanie nawozów azotowych [1]. Zawartość azotu wpływa na właściwości rozpraszania światła przez liście, ponieważ odbicie, pochłanianie i rozproszenie fal elektromagnetycznych padających na biomasę jest definiowane przez pojedyncze wiązania C–O, O–H, C–H i właśnie N–H [2].

Pojedyncze wiązania azotu z wodorem absorbują światło o szczególnych długościach fali. Należy wyróżnić przede wszystkim następujące składniki biomasy, w których zachodzi to zjawisko: absorpcja światła 1020 nm powodująca rozciągnięcie wiązania w białkach, analogiczny proces zachodzi również dla fotonów 1510 nm, jednak tutaj dodatkowo poza rozciągnięciem wiązania absorpcja powoduje drgania w pierwszym overtone. Fotony o falach długości większej niż 2000 nm powodują rozciąganie wiązań, obrót cząsteczek w białkach [3].

Azot w biomase jest obecny w wielu związkach chemicznych, z których najważniejsze to: rubisko – powszechny enzym

katalizujący przyłączanie cząsteczek dwutlenku węgla w tzw. ciemnej fazie fotosyntezy, chlorofile, białka otoczek i rybosomów, kwasy nukleinowe oraz RNA [4]. Właściwości absorpcji azotu oraz jego powszechna obecność w najważniejszych komponentach biomasy pozwalają na oszacowanie jego zawartości wykorzystując techniki lotnicze [5] i satelitarne. Szczególnie wartościowych danych w systemach informacji o nawożeniu dostarczają obecnie trzy urządzenia satelitarne obrazujące w zakresach widzialnym i podczerwonym. Są to satelity PRISMA (włoski satelita hiperspektralny obrazujący w zakresie 400–2500 nm z rozdzielczością przestrzenną 30 m) [6], japoński HISUI o podobnych do swojego włoskiego odpowiednika parametrach [7] oraz niemiecki EnMAP [8]. Również ogólnodostępne dane konstelacji satelitarnych LANDSAT [9] oraz SENTINEL [10] są wykorzystywane w modelach służących do oszacowania zawartości azotu. Należy jednak zauważyć, że w satelitarnym obrazowaniu zapotrzebowania na azot lepsze efekty otrzymuje się wykorzystując zobrazowania hiperspektralne o kanałach optycznych szerokości spektralnej do 6 nm, niż używając zobrazowań wielospektralnych o szerokości kanałów powyżej 10–15 nm [1].

Chociaż współczesne maszyny rolnicze wykorzystują dane satelitarne w nawigacji [11] i ocenie stanu gleb i upraw [12], to na rynku dostępnych jest szereg sensorów umożliwiających mapowanie parametrów z wysoką rozdzielczością. W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki badań nad oszacowaniem stopnia nawożenia kukurydzy przy użyciu sensora Crop Circle. Ten sensor był już wcześniej stosowany w badaniach nad zawartością azotu w uprawach ryżu [13] i innych zbóż [14]. Poniżej opisano eksperyment przeprowadzony na sadzonkach kukurydzy (*Zea mays*, L.) w warunkach laboratoryjnych. Celem eksperymentu było pozyskanie danych referencyjnych dla operacyjnego zastosowania sensora podczas prac polowych z użyciem zbudowanego w konsorcjum Poznańskiego Instytutu Technologicznego (Łukasiewicz – PIT), Instytutu Lotnictwa (Łukasiewicz – ILOT) oraz firmy Unia sp. z o.o. autonomicznego robota przeznaczonego do upraw kukurydzy.

Autor korespondujący:

Jan Kotlarz, Jan.Kotlarz@ilot.lukasiewicz.gov.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 26.01.2023 r., przyjęty do druku 21.07.2023 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

2. Metodyka badawcza

W celu określenia zawartości azotu w biomase uprawy kukurydzy oraz precyzyjnego i dostosowanego do potrzeb rośliny dozowania nawozów azotowych przez robota polowego, wykorzystany został sensor optyczny Crop Circle ASC-435 firmy Holland Scientific Inc, Lincoln, NE, USA. Crop Circle ASC-435 jest czujnikiem aktywnym (wyposażony jest we własne źródło światła) i zawiera trzy optyczne kanały pomiarowe umożliwiające jednoczesny pomiar odbicia spektralnego upraw/gleby przy 670 nm, 730 nm i 780 nm (rys. 1 A).

Czujnik rejestruje obraz w polu widzenia 40° ~10°, na wysokości 25–250 cm od celu. ASC-435 generuje wartości wskaźników vegetacji NDVI (ang. *Normalized Difference Vegetation Index*)

chlorofile (670 nm), odbicia przez tkankę miękkiszową w liściach (780 nm) oraz w kanale pośrednim odpowiadającym tzw. „red edge”, czyli przedziałowi długości fali światła w którym następuje skokowa zmiana odbicia (730 nm). Kanały optyczne wykorzystywane przez urządzenie naniesiono na typowy wzorzec reflektancji liści kukurydzy na rys 2.

W ramach eksperymentu przygotowano donice z sadzonkami kukurydzy we wczesnym stadium rozwojowym, które nawożono dogłębowo nawozem azotowym. Sposób nawożenia dla poszczególnych grup sadzonek przedstawiono w tabeli 1.

Sadzonki w kuwetach umieszczono na dedykowanym stole z ruchomą taśmą pozwalającą na kontrolowany ruch sadzonek względem sensora Crop Circle z prędkością 0,5 m/s. Stół z poruszającą się taśmą o ustalonej, kontrolowanej prędkości



Rys. 1. A – zakupiony sensor azotu Crop Circle ASC-435, Holland Scientific Inc, USA; B – sposób pomiaru zawartości azotu dla pojedynczej sadzonki kukurydzy w warunkach polowych; C – warstwa wizualizacji oprogramowania z zaimplementowanym processingiem, klasyfikacją i interpretacją danych z sensora Crop Circle

Fig. 1. A – Crop Circle ASC-435 nitrogen sensor by Holland Scientific Inc, USA; B – method of measuring nitrogen content for a single maize seedling in field conditions; C – software visualization layer with implemented processing, classification and interpretation of data from the Crop Circle sensor

oraz NDRE (ang. *Normalized Difference Red Edge Index*) wg poniższych wzorów:

$$NDVI = \frac{r_{780} - r_{670}}{r_{780} + r_{670}}$$

$$NDRE = \frac{r_{780} - r_{730}}{r_{780} + r_{730}}$$

gdzie r odpowiada strumieniowi światła odbitego w danym kanale optycznym: 670 nm, 730 nm i 780 nm.

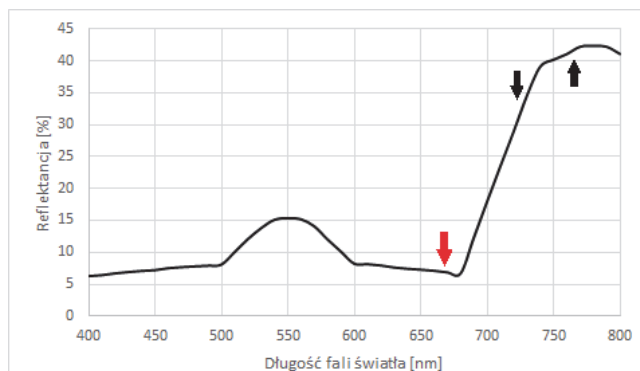
Wybór trzech w/w kanałów optycznych opiera się na porównaniu wielkości reflektancji w kanałach absorpcji światła przez

i ustawionymi na nim roślinami kukurydzy w donicach pozwolił na symulacje zachowania robota polowego poruszającego się po polu uprawnym. Sensor umieszczono 40 cm nad najwyższymi położonymi liśćmi kukurydzy zgodnie z przygotowaną przez producenta metodyką akwizycji danych (rys. 3). Po uruchomieniu sensora wykonano akwizycję danych wskaźników NDVI i NDRE dziesięciokrotnie dla każdej grupy sadzonek. Otrzymano w ten sposób zbiór zarejestrowanych wskaźników dla: a) tła (taśmy), b) gleby, c) sadzonek kukurydzy w poszczególnych kategoriach nawożenia. W processingu danych dla donic z sadzonkami założono, że sensor zarejestrował dane dla sadzonek kukurydzy oraz dla gleby i na podstawie wyników porównanych dla grupy G ze zbiorów danych 0–D usunięto dane odpowiadające glebie.

Tabela 1. Grupy sadzonek kukurydzy (*Zea mays* L.) wykorzystane w eksperymencie laboratoryjnym i sposób ich nawożenia

Table 1. Groups of maize seedlings (*Zea mays* L.) used in the laboratory experiment and the method of their fertilization

Grupa	Opis	Nawożenie [kg N ha ⁻¹]
G	Gleba, brak sadzonek, brak nawożenia	0
0	Sadzonki kukurydzy, brak nawożenia	0
A	Nawożone sadzonki kukurydzy	50
B		100
C		125
D		150



Rys. 2. Kanały optyczne wykorzystywane przez sensor „Crop Circle” naniesione na typowy wzorzec reflektancji liści kukurydzy. Źródło wzorca: rys. 2 w [15]

Fig. 2. Optical channels used by the “Crop Circle” sensor plotted on a typical corn leaf reflectance pattern. Standard source: Fig. 2 in [15]



Rys. 3. Stół z ruchomą taśmą do testowania sensorów optycznych w monitoringu roślin (Łukasiewicz – ILOT, Warszawa)

Fig. 3. A table with a moving belt for testing optical sensors in plant monitoring (Łukasiewicz – ILOT, Warsaw)

Dla każdego poziomu nawożenia obliczono średnie wskaźniki NDVI i NDRE oraz ich odchylenia standardowe. Otrzymane wartości naniesiono na wykres o osiach odpowiadającym wskaźnikom. Dla każdej grupy sadzonek za pomocą testu t-Studenta określono czy otrzymane średnie różnicują się ze względu na poziom nawożenia ($p < 0,05$).

Na podstawie otrzymanych wyników opracowano tabelę klasyfikacji danych z sensora Crop Circle pozwalającą na określenie bieżącego nawożenia oraz potrzeby dodatkowego nawożenia dogłębowego przy założeniu optymalnego poziomu nawożenia wynoszącego 150 kgN/ha.

3. Wyniki

Wartości wskaźników tła (materii nieożywionej) oszacowano na $0,0156 \pm 0,0091$ dla NDVI oraz na $0,0116 \pm 0,0208$ dla NDRE. Wartości dla gleby wynosiły $0,083 \pm 0,013$ dla NDVI oraz $0,034 \pm 0,014$ dla NDRE. Wartości graniczne pomiędzy klasą materii nieożywionej a biomasą ustalono wg wartości dziesiątego decyła wartości dla materii nieożywionej, tj. $NDVI_{gr} = 0,106$ oraz $NDRE_{gr} = 0,062$.

Przykładowy fragment danych surowych dla klasy nawożenia 150 kg N/ha wraz z interpretacją danych prezentuje wykres na rysunku 4.

Średnie wartości pomiarów laboratoryjnych NDVI i NDRE oraz ich odchylenia standardowe dla poszczególnych klas nawożenia przedstawiają tabela 2 i rysunek 5.

Wskaźniki odpowiadające glebie różnią się od wskaźników dla wszystkich innych grup dla poziomu istotności 0,005 testu t-Studenta dla prób niezależnych. Wskaźniki odpowiadające sadzonkom różnią się od wskaźników dla wszystkich innych grup odpowiadającym sadzonkom o innych stopniach nawożenia na poziomie istotności 0,05 z następującymi wyjątkami:

- średnie wskaźniki NDVI między grupami B i C różniły się na poziomie istotności 0,08,
- średnie wskaźniki NDVI między grupami C i D nie różniły się,
- średnie wskaźniki NDRE między grupami C i D różniły się na poziomie istotności 0,15.

Tab. 2. Wartości średnie wskaźników NDVI i NDRE dla poszczególnych klas nawożenia

Tab. 2. Average values of NDVI and NDRE indices for individual classes of fertilization

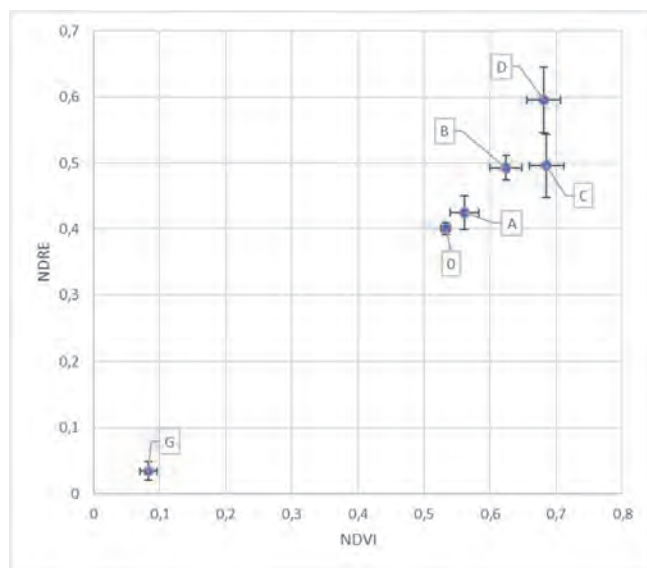
Klasa nawożenia kukurydzy [kgN/ha]	NDVI	NDRE
0 (0)	0,533 \pm 0,007	0,401 \pm 0,009
50 (A)	0,561 \pm 0,022	0,425 \pm 0,026
100 (B)	0,624 \pm 0,024	0,493 \pm 0,019
125 (C)	0,685 \pm 0,026	0,496 \pm 0,048
150 (D)	0,681 \pm 0,026	0,596 \pm 0,050

	D										C/D												
	B	D	D	D	D	D	D	D	D	D	B	D	D	A	D	B	C						
NDVI	0,61	0,52	0,66	0,76	0,78	0,90	0,89	0,92	0,83	0,58	0,46	0,51	0,56	0,53	0,58	0,66	0,77	0,76	0,62	0,73	0,64	0,67	0,52
NDRE	0,41	0,37	0,45	0,54	0,58	0,83	0,82	0,86	0,76	0,52	0,40	0,41	0,43	0,42	0,45	0,55	0,66	0,66	0,44	0,62	0,44	0,46	0,39

	D					D																	
	C	D	D	D	D	B	D	D	D	D	D	D											
NDVI	0,45	0,38	0,41	0,51	0,53	0,58	0,69	0,80	0,92	0,88	0,70	0,51	0,44	0,48	0,55	0,60	0,66	0,76	0,86	0,82	0,75	0,69	0,44
NDRE	0,35	0,30	0,33	0,37	0,37	0,40	0,48	0,64	0,82	0,78	0,60	0,44	0,38	0,39	0,42	0,46	0,54	0,65	0,67	0,57	0,52	0,51	0,33

Rys. 4. Dane surowe sensora Crop Circle dla donic z nawożeniem 150 kgN/ha. Czarnymi ramkami zaznaczono fragmenty danych odpowiadającym poszczególnym sadzonkom kukurydzy. Interpretację klasy nawożenia dla pojedynczych pomiarów zaznaczono literą nad pomiarem, interpretację klasy nawożenia dla całej sadzonki zaznaczono literą nad całym fragmentem danych. Litery odpowiadają nazwom grup w tabeli 1

Fig. 4. Crop Circle sensor raw data for pots with fertilization of 150 kgN/ha. Fragments of data corresponding to individual maize seedlings are marked with black frames. The interpretation of the fertilization class for individual measurements was marked with a letter above the measurement, the interpretation of the fertilization class for the entire seedling was marked with a letter above the entire data fragment. The letters correspond to the group names in table 1



Rys. 5. Wartości średnie wskaźników NDVI i NDRE wraz z odchyleniami standardowym dla poszczególnych klas nawożenia
 Fig. 5. Average values of NDVI and NDRE indicators with standard deviations for individual classes of fertilization

4. Dyskusja wyników

Azot jest ważnym makroskładnikiem biomasy, ponieważ odgrywa istotną rolę w procesach metabolicznych. Jest używany do produkcji białek roślin. Ponadto azot jest niezbędny do biosyntezy aminokwasów, które są konieczne do wzrostu komórek, tworzenia nowych i regeneracji uszkodzonych tkanek. Azot jest również używany do produkcji wielu enzymów i hormonów, które są ważne w prawidłowej pracy organizmu. Jest również składnikiem chlorofilu, który jest miejscem wykonywania procesu fotosyntezy.

Detekcja zapotrzebowania na ten makroskładnik przy wykorzystaniu wskaźników NDVI i NDRE jest często spotykana w literaturze, np. przy monitoringu upraw ryżu z użyciem bezzałogowych statków powietrznych (UAV) [17] lub upraw kukurydzy [18, 19]. Sam sensor wykorzystywany w urządzeniu Crop Circle również jest wykorzystywany w mapowaniu zapotrzebowania na azot, głównie jednak na uprawach ryżu [13, 20]. Nieliczne aplikacje tego urządzenia w uprawach kukurydzy są również jednak spotykane, głównie w Stanach Zjednoczonych [14, 21].

Pomiary przeprowadzono z użyciem aktywnego sensora azotu Crop Circle wyposażonego we własne źródło światła: modułowaną polichromatyczną matrycę LED (moc świetlna pojedynczej

diody LED jest rzędu 10 W, strumień promieniowania wyniósł zatem dla trzech diod i wysokości 60 cm 6,6 W/m²) a pole widzenia wynosiło: ~40° na ~10°. Strumień światła dla wysokości w tego typu sensorach natężenie światła emitowane przez źródło umieszczone na czujniku jest równe dla wszystkich długości fal świetlnych, których reflektancję mierzy sensor. Według [22], aby jak najdokładniej odzwierciedlić współczynnik odbicia roślinności, uznał że rozkład natężenia światła źródłowego musi być jednolity. Jeżeli natężenie światła w obszarze napromieniania źródła światła nie jest jednorodne, sygnał pomiarowy spektrometru odbiciowego nie będzie w stanie skutecznie uzyskać średnich charakterystyk odbicia w obszarze mierzonym, co doprowadzi do niedokładnych wskaźników wegetacji i parametrów agronomicznych. Co więcej, gdy rozkład natężenia światła aktywnego czujnika nie będzie równomierny, zmierzona wartość współczynników nie będzie odpowiednia do charakterystyki grupowej obiektu [22]. Porównując wyniki z czujników aktywnych i pasywnych (gdzie źródłem oświetlenia jest Słońce) [23], wyniki z aktywnego czujnika są traktowane jako obiecujące, pokazując, że NDVI, a zwłaszcza SAVI, mają znacznie bardziej liniowe zależności z cechami upraw i dają nadzieję na bardziej niezawodny pomiar niż czujniki pasywne. Autor twierdzi, że bardziej liniowe zależności obserwowane z aktywnym czujnikiem prowadzą do hipotezy, że wewnętrzne źródło światła pozwala czujnikowi zredukować efekt własnego cieniowania i usunąć niektóre nieliniowe interakcje. Przedstawione wartości NDVI z czujników pasywnych były wyższe niż z czujnika aktywnego, co spowodowane było efektem zacienienia, które zostało wyeliminowane w czujnikach aktywnych [23].

W literaturze brakuje jednak ujednoliconej metody oceny wpływu źródła światła na dane spektralne, co ogranicza doskonałenie spektrometru odbiciowego rośliny/łanu uprawnego. Należy podkreślić, że stosując stałe źródło światła w pomiarach wszystkich próbek ewentualny błąd pomiaru jest identyczny dla całego zestawu pomiarowego i nie ma on wpływu na zastosowane później metody klasyfikacji danych. W przeprowadzonych badaniach, odchylenia wartości wyznaczonych współczynników wegetacji mogły wynikać z parametrów niezależnych od źródła światła, jego natężenia oraz równomierności. Różnice prawdopodobnie wynikały z wielkości, kształtu, wyglądu roślin (np. kąt i kierunek nachylenia liści, gęstość liści, wysokość rośliny), co dotyczyło roślin tej samej odmiany, sianych w tym samym czasie i uprawianych w ten sam sposób. Współczynnik odbicia mógł różnić się u roślin wyższych/nieższych, charakteryzujących się większą/mniejszą liczbą liści, skierowanych bardziej/mniej prostopadle do źródła światła, mimo uprawy w tych samych warunkach nawożenia. Zauważalne jest, że większe odchylenia były obserwowane przy wyższych wariantach nawożenia azoto-

Tab. 3. Macierz sterująca doglebowym dozowaniem nawozu na podstawie średnich wartości wskaźników NDVI i NDRE dla sadzonki kukurydzy wykonanych przy prędkości 0,5 m/s za pomocą urządzenia Crop Circle. Wartości liczbowe podane w kg N/ha. W przypadku niezgodnych wartości NDVI i NDRE klasę oznaczono jako „nie – biomasa” (NB)

Tab. 3. Matrix controlling soil fertilizer dosing based on the average values of NDVI and NDRE indices for maize seedlings made at a speed of 0.5 m/s using the Crop Circle device. Figures given in kg N/ha. In case of inconsistent NDVI and NDRE values, the class was marked as "non-biomass" (NB)

		NDVI				
		< 0,106	0,106–0,547	0,548–0,593	0,594–0,654	> 0,655
NDRE	< 0,062	NB	NB	NB	NB	NB
	0,062–0,412	NB	150	125	NB	NB
	0,413–0,459	NB	125	100	75	NB
	0,460–0,546	NB	NB	75	50	25
	> 0,546	NB	NB	50	25	0

wego. Jest to oczekiwane i typowe zjawisko dla badań z użyciem sensora Crop Circle.

Oświadczony eksperyment przeprowadzono w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych, stosując aktywny sensor azotu, co pozwoliło uniknąć niepewności wynikających z nierównomiernego oświetlenia sadzonek, zróżnicowania warunków wynikających z dostępu do wody, zmienności typu gleby itp. W takich warunkach separacja wskaźników mierzonych przez sensor poprzez różnicowanie nawożenia dogłębowego pozwalała na powiązanie NDVI i NDRE z konkretnym wariantem nawożenia. Należy zauważyć przede wszystkim, że wzrostowi NDVI towarzyszył wzrost NDRE (współczynnik korelacji Pearsona = +0,98). Wyjątkiem był tu zakres poziomu nawożenia 125–150 kg · N/ha. Wskaźnik NDVI osiągnął maksimum już dla poziomu nawożenia 125 kg · N/ha (NDVI = 0,685), podczas gdy wskaźnik NDRE po wzroście do wartości 0,493–0,496 dla poziomu nawożenia 100–125 kg · N/ha wzrósł ponownie dla poziomu nawożenia 150 kg · N/ha do +0,596. Wynik ten pokazuje, że dla poprawnego oszacowania braku nawożenia w zakresie do 50 kg · N/ha wymagane są pomiary obu tych wskaźników. Dla braków do 25 kg · N/ha decydującą wartość ma wskaźnik NDRE, dla braków 25–50 kg · N/ha decydująca jest wartość NDVI, dla braków powyżej 50 kg · N/ha wskazania obu wskaźników odzwierciedlają ten niedobór.

Otrzymany wynik pozwala na opracowanie wstępnej wersji macierzy precyzyjnego dozowania nawozu przez robot polowy. Struktura ta może być zastosowana w oprogramowaniu sterującym robotem pozwalając na odpowiednie dozowanie w czasie rzeczywistym. Opracowana macierz dozowania przedstawiona jest w postaci tabeli 3.

Kolejnym krokiem badań będzie przetestowanie proponowanego rozwiązania w warunkach zbliżonych do operacyjnych. W tym celu przygotowane będzie pole doświadczalne z pięcioma rzędami sadzonek kukurydzy dla każdego wariantu nawożenia, każdy rząd o długości 50 m.

Bibliografia

- Berger K., Verrelst J., Feret J. B., Wang Z., Woche M., Strathmann M., Danner M., Mauser W., Hank T., *Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions*. "Remote Sensing of Environment", Vol. 242, 2020, DOI: 10.1016/j.rse.2020.111758.
- Kokaly R.F., Clark R.N., *Spectroscopic determination of leaf biochemistry using band-depth analysis of absorption features and stepwise multiple linear regression*. "Remote Sensing of Environment", Vol. 67, No. 3, 1999, 267–287, DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00084-4.
- Fourty T., Baret F., Jacquemoud S., Schmuck G., Verdebout J., *Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: direct and inverse problems*. "Remote Sensing of Environment", Vol. 56, No. 2, 1996, 104–117, DOI: 10.1016/0034-4257(95)00234-0.
- Chapin F.S., Bloom A.J., Field C.B., Waring R.H., *Plant responses to multiple environmental factors*. "BioScience", Vol. 37, No. 1, 1987, 49–57, DOI: 10.2307/1310177.
- Kotlarz J., Siwiński J., Spiralski M., Kubiak K., (2022). *Monitoring Effects of Drought on Nitrogen and Phosphorus in Temperate Oak Forests Using Machine Learning Techniques*. "Polish Journal of Environmental Studies", Vol. 31, No. 2, 2022, 1137–1151, DOI: 10.15244/pjoes/141306.
- Loizzo R., Daraio M., Guarini R., Longo F., Lorusso R., Dini L., Lopinto E., *Prisma mission status and perspective*. [In:] IGARSS 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4503–4506, DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899272.
- Matsunaga T., Iwasaki A., Tsuchida S., Iwao K., Tanii J., Kashimura O., Nakamura R., Yamamoto H., Kato S., Obata K., Mouri K., Tachikawa T. (2017, July). *Current status of hyperspectral imager suite (HISUI) onboard International Space Station (ISS)*. [In:] 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 443–446, DOI: 10.1109/IGARSS.2017.8126989. IEEE.
- Guanter L., Kaufmann H., Segl K., Foerster S., Rogass C., Chabrilat S., ... & Sang B., *The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation*. "Remote Sensing", Vol. 7, No. 7, 2015, 8830–8857, DOI: 10.3390/rs70708830.
- Croft H., Arabian J., Chen J.M., Shang J., Liu J., *Mapping within-field leaf chlorophyll content in agricultural crops for nitrogen management using Landsat-8 imagery*. "Precision Agriculture", Vol. 21, No. 4, 2020, 856–880, DOI: 10.1007/s11119-019-09698-y.
- Sharifi A., *Using sentinel-2 data to predict nitrogen uptake in maize crop*. "IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing", Vol. 13, 2020, 2656–2662, DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2998638.
- Santos L.C., Aguiar A.S., Santos F.N., Valente A., Petry M., *Occupancy grid and topological maps extraction from satellite images for path planning in agricultural robots*. "Robotics", Vol. 9, No. 4, 2020, DOI: 10.3390/robotics9040077.
- Krishna K.R., *Push button agriculture: Robotics, drones, satellite-guided soil and crop management*. CRC Press, 2017.
- Cao Q., Miao Y., Wang H., Huang S., Cheng S., Khosla R., Jiang R., *Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor*. "Field Crops Research", Vol. 154, 2013, 133–144, DOI: 10.1016/j.fcr.2013.08.005.
- Cummings C., Miao Y., Paiao G.D., Kang S., Fernández F.G., *Corn nitrogen status diagnosis with an innovative multi-parameter crop circle phenom sensing system*. "Remote Sensing", Vol. 13, No. 3, 2021, DOI: 10.3390/rs13030401.
- McMurtrey III J.E., Chappelle E.W., Kim M.S., Meisinger J.J., Corp L.A., *Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (Zea mays L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements*. "Remote Sensing of Environment", Vol. 47, No. 1, 1994, 36–44, DOI: 10.1016/0034-4257(94)90125-2.
- Księżak J., *Ekspertyza dotycząca nawożenia kukurydzy z wykorzystaniem badawczego modelu robota polowego*, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, PIB, 2022, (materiał niepublikowany).
- Jiang R., Sanchez-Azofeifa A., Laakso K., Wang P., Xu Y., Zhou Z., Luo X., Lan Y., Zhao G., Chen X., *UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency*. "Journal of Cleaner Production", Vol. 289, 2021, DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125705.
- Scott D.A., Johnson J.M., Gesch R.W., *Cover crop and nitrogen rate management practices influence corn NDVI and nitrogen content*. "Agronomy Journal", Vol. 114, No. 4, 2022, 2473–2483, DOI: 10.1002/agj2.21085.
- Edalat M., Naderi R., Egan T.P., *Corn nitrogen management using NDVI and SPAD sensor-based data under conventional vs. reduced tillage systems*. "Journal of Plant Nutrition", Vol. 42, No. 18, 2019, 2310–2322, DOI: 10.1080/01904167.2019.1648686.
- Shen J., Miao Y., Cao Q., Wang H., Yu W., Hu S., Wu H., Lu J., Hu X., Yang W., Liu F., *Estimating rice nitrogen status using active canopy sensor crop circle 430 in North-east China*. [In:] The Third International Conference on Agro-Geoinformatics, 2014, IEEE, DOI: 10.1109/Agro-Geoinformatics.2014.6910584.

21. Solari F., Shanahan J., Ferguson R., Schepers J., Gitelson A., *Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential*. "Agronomy Journal", Vol. 100, No. 3, 2008, 571–579, DOI: 10.2134/agronj2007.0244.
22. Yu H., Ding Y., Xu H., Dou X., *Influence of light intensity distribution characteristics of light source on measurement results of canopy reflectance spectrometers*. "Plant Methods", Vol. 17, 2021, DOI: 10.1186/s13007-021-00804-8.
23. Fitzgerald G.J., *Characterizing vegetation indices derived from active and passive sensors*. "International Journal of Remote Sensing", Vol. 31, No. 16, 2010, 4335–4348, DOI: 10.1080/01431160903258217.

Fertilization of Maize Crops Using Active Sensor

Abstract: Nitrogen is an important macronutrient of biomass because it plays an important role in metabolic processes, protein production, amino acid synthesis, enzymes, hormones and is a component of chlorophyll. The assessment of its deficiencies in maize crops is the subject of scientific research. The article presents the results of measurements in controlled laboratory conditions of remote sensing indices of maize cultivated in fertilization variants of 0–150 kg · N/ha. The proposed method of assessing nitrogen deficiency using the Crop Circle sensor allows for autonomous control of precise soil fertilization in the designed solution of a field robot.

Keywords: nitrogen fertilization, field robot, NDVI, NDRE, biomass

dr Katarzyna Kubiak-Siwińska

Katarzyna.Kubiak@ilot.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0002-4156-3139

Absolwentka kierunku Biologia (SGGW) oraz kierunku Ochrona Środowiska na Wydziale Biologii Uniwersytetu Warszawskiego. Od 2015 r. pracownik Zakładu Teledetekcji w Instytucie Lotnictwa w Warszawie. Główne zainteresowania naukowe to optymalizacja konfiguracji sensorów optycznych kamer wielospektralnych do obrazowania biomasy oraz elementów przyrodniczych.



mgr Jan Kotlarz

Jan.Kotlarz@ilot.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0002-8212-7798

Absolwent kierunku astronomia na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego oraz Zarządanie w Wyższej Szkole Bankowej w Poznaniu. Od 2012 r. pracownik Instytutu Lotnictwa. Doktorant na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu.

