

DARIUSZ PSZENNY

Możliwości wykorzystania BSP i ortofotomozaik do analizy stanu i rozmieszczenia szlaków operacyjnych*

Possibilities of using UAV and orthophotomosaics to analyze the condition and distribution of operational routes

ABSTRACT

Pszenny D. 2020. Możliwości wykorzystania BSP i ortofotomozaik do analizy stanu i rozmieszczenia szlaków operacyjnych. Sylwan 164 (11): 913-919. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020103>.

The development of technology and the increasing availability of unmanned aerial vehicles (UAV) on the civil market, along with the growing offer of open-source software for modeling based on aerial photos open new possibilities for conducting analyzes of felling area. The research aims to present the use of UAVs in the analysis of the harvesting area, especially the distribution and condition of the network of skidding trails. The research covered 6 logging areas in the Gidle Forest District in south part of Poland. Flights and photo recording were made by using the DJI Phantom 4 Advanced UAV. The analysis was performed with the use of Open Drone maps and QGIS software. The research was based on the analysis of orthophotomosaics. Analyzing the obtained data, the real area of the clear-cuts was determined. The obtained values were compared with the values declared at the cutting planning stage. The area and location of the machine routes were determined. The obtained data were statistically analyzed in order to determine the significance of the differences. Also the correlation between the size of soil damage and the parameters of the analyzed area was tested. The differences between the area planned to be cut and actually cut were found, but they turned not to be significant. It was determined that the average length of skidding trails per 1 ha of the studied area is 0.89 km, while the distances between the trails varies from 4.04 to 24.44 m. On the tested clear-cuts there was a minimal presence of places where the soil was damaged in such a way that the mineral soil layer was exposed.

KEY WORDS

UAV, ortofotomozaiki, felling area, skid trails

ADDRESSES

Dariusz Pszenny – e-mail: dariusz_pszenny@sggw.edu.pl

Katedra Użytkowania Lasu, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP), potocznie nazywane dronami, cieszą się niesłabnącą popularnością i użytecznością również w leśnictwie [Szymański 2013]. Znajdują one zastosowanie w monitorowaniu stanu zdrowotnego i sanitarnego lasu [Zmarz i in. 2012; Robaszkiewicz i in. 2014; Szymański i in. 2014; Wolinowski, Będkowski 2015; Brovkina i in. 2018; Dash i in. 2018;

*Badania w projekcie TECH4EFFECT, dofinansowanym ze wspólnego przedsięwzięcia Bio Based Industries w ramach programu badań naukowych i innowacji UE „Horyzont 2020” (grant nr 720757).

Otsu i in. 2018], lokalizowaniu pożarów [Merino i in. 2006; Gałąj, Łazorko 2013; Zhang i in. 2015], w ocenie cech dendrometrycznych drzew [Stereficzak, Będkowski 2013], szacowaniu liczebności zwierzyny [Chamoso i in. 2014; van Gemert i in. 2015] oraz w badaniach fenologicznych [Będkowski, Stereficzak 2013; Łoziński, Będkowski 2016]. Wraz z popularyzacją BSP pojawiło się na rynku wiele programów pozwalających na przetwarzanie zdjęć pozyskanych za pomocą dronów i dokonywanie rozbudowanych analiz. Zdjęcia wykonane w trakcie nalotu mogą zostać przekształcone w ortofotomozaikę, będącą warstwą rastrową przedstawiającą fotografowany teren w rzucie ortogonalnym w nawiązaniu do określonego układu odniesienia geograficznego.

W oparciu o zdjęcia i odpowiednie oprogramowanie istnieje możliwość tworzenia trójwymiarowych modeli terenu o wysokiej rozdzielczości. Modele te mogą dostarczyć informacji na temat zasobności drzewostanów [Rahlf i in. 2014; Giannetti i in. 2018] czy stanu dróg i sieci szlaków zrywkowych [Hrůza i in. 2016; Talbot i in. 2018]. Do uzyskania wiarygodnych i użytecznych danych nie jest niezbędny dostęp do drogiego, komercyjnego oprogramowania umożliwiającego tworzenie złożonych modeli terenu. Mając dostęp do BSP z możliwością rejestracji zdjęć, możemy wykonać proste analizy, korzystając z oprogramowania open source. Zdecydowana większość dostępnych programów pozwala na stworzenie modeli terenu na podstawie zdjęć zarówno lotniczych, jak i naziemnych. Jakość modeli terenu jest zależna od wykorzystanego oprogramowania [Pierzchała i in. 2016; Probst i in. 2018; Brach i in. 2019].

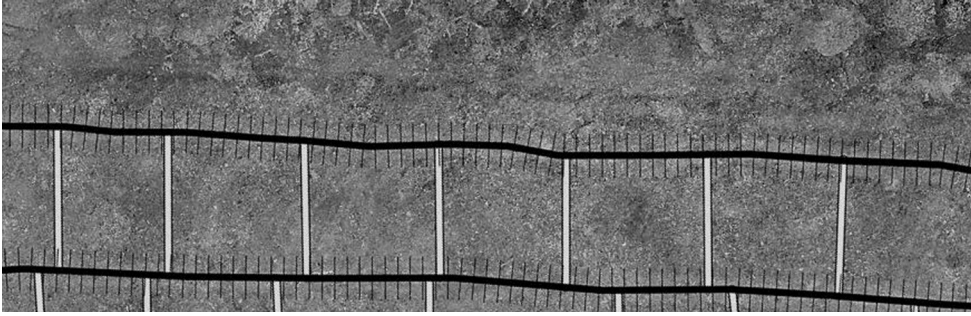
Celem przeprowadzonych badań było dokonanie analizy stanu i rozmieszczenia szlaków operacyjnych, po których poruszały się maszyny na powierzchni zrębowej.

Materiał i metody

Badania przeprowadzono w sierpniu i wrześniu 2019 roku na terenie Nadleśnictwa Gidle. Wykorzystując bezzałogowy statek powietrzny DJI Phantom Advanced, dokonano nalołów nad powierzchniami zrębowymi. Dron wyposażony jest w kamerę z matrycą CMOS o rozdzielczości 20 megapikseli, co pozwala na wykonywanie zdjęć w rozdzielczości 5472×3078 pikseli. Przelot i rejestracja zdjęć były programowane za pomocą aplikacji DJI Ground Station. Nalot wykonano z pułapu 30 metrów. Zdjęcia były rejestrowane w taki sposób, aby współczynnik pokrycia wynosił 80% – zarówno prostopadłe, jak i podłużnie do kierunku lotu. Nalołów dokonano po zakończeniu wszystkich prac na zrębach, łącznie z uprzątnięciem pozostałości pozrębowych. W trakcie badań zarejestrowano 1185 zdjęć w wysokiej rozdzielczości. Badaniami objęto 6 powierzchni zrębowych znajdujących się na terenie 8 wydzieł leśnych. Na wszystkich badanych powierzchniach prace wykonane były przez tych samych operatorów harwestera i forwardera. Powierzchnie zrębowe objęte badaniami miały kształt podłużny, a szlaki zrywkowe w zdecydowanej większości biegnęły równoległe do dłuższego boku zrębu, co umożliwiało określenie odległości między nimi (ryc. 1).

Na podstawie uzyskanych zdjęć wykonano ortofotomozaiki, wykorzystując oprogramowanie open source Open Drone Maps. Program ten przy przyjętych parametrach lotu pozwolił uzyskać warstwę rastrową, gdzie pojedynczy piksel reprezentuje kwadrat o boku 1,5 cm w terenie. Stworzone warstwy eksportowano do programu QGIS, w którym wrysowano na nich warstwy obrazujące powierzchnię zrębów, przebieg szlaków zrywkowych oraz miejsca występowania uszkodzeń gleby. Stworzono również osobną warstwę, na której widoczne jest naruszenie gleby odsłaniające poziom mineralny gleby.

Dokonano analizy rozmieszczenia i zagęszczenia szlaków operacyjnych na badanych powierzchniach. Dane uzyskane na temat powierzchni porównano z danymi z nadleśnictwa zestawionymi na szkieletach zrębowych. Do analiz statystycznych wykorzystano program R Studio.



Ryc. 1.

Ortofotomozaik z przebiegiem szlaków zrywkowych (czarne linie) i miejscami pomiaru odległości (białe linie)
 Orthophotomosaic with skidding trails (black lines) and distance measurements (white lines)

Za pomocą testu Studenta sprawdzono, czy różnica między powierzchnią deklarowaną w szkicu zrębowym a powierzchnią uzyskaną z pomiarów jest statystycznie istotna. W celu określenia, czy odległość między szlakami na poszczególnych powierzchniach badawczych różni się istotnie, użyto testu Kruskala-Wallisa, ponieważ rozkład badanej cechy nie był zgodny z rozkładem normalnym (co sprawdzono testem Shapiro-Wilka). Obliczając współczynnik korelacji rang Spearmana, oceniono, czy istnieje zależność między rozmieszczeniem szlaków oraz liczbą uszkodzeń gleby do warstwy mineralnej.

Wyniki

Stwierdzono różnice między powierzchnią zadeklarowaną w szkicach zrębowych a pomierzoną na podstawie ortofotomozaik (tab.). Różnice te były statystycznie nieistotne ($p=0,8029$). Na badanych wydzieleniach dochodziło do pozyskania drewna na większej powierzchni, niż zakładano to na etapie planowania cięć. Odległość między szlakami zrywkowymi wynosiła 4,04-24,44 m, średnio 13,4 m. Wartości średnie dla poszczególnych powierzchni różniły się istotnie ($p<0,0001$; ryc. 2). Na 1 hektar badanego zrębu przypadało średnio 0,89 km szlaków zrywkowych. Wartość ta zawiera się w zakresie 0,69-1,03 km/ha (tab.). Określono powierzchnię, jaką zajmują szlaki operacyjne, na której można spodziewać się odkształcenia i uszkodzenia struktury gleby, spowodowanej przejazdami maszyn. Ponadto określono miejsca, w których przejazdy maszyn spowodowały odkrycie mineralnej warstwy gleby (tab.). Stwierdzono nieistotną zależność między rozmieszczeniem szlaków oraz uszkodzeniami gleby do warstwy mineralnej (r Spearmana= $0,5429$; $p=0,2972$).

Dyskusja

Pozyskanie i zrywka drewna są procesem silnie oddziałującym na środowisko leśne. Wielokrotnie przejazdy maszyn silnie wpływają na krajobraz leśny [Pszenny 2020].

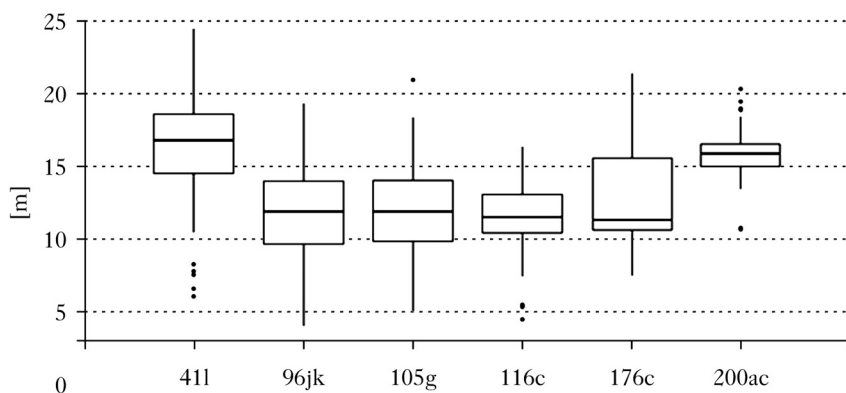
Wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych rejestrujących obraz w trakcie przelotu wraz z wsparciem stosownego oprogramowania pozwala uzyskać dobrej jakości materiał pozwalający na analizę stanu powierzchni pozrębowych oraz ocenę skutków procesu pozyskania i zrywki drewna (ryc. 3).

Wykorzystanie BSP i oprogramowania do analizy wpływu pracy maszyn leśnych na środowisko leśne jest coraz częstszym zjawiskiem [Pierzchała i in. 2014]. W przeprowadzonych badaniach wykazano różnice między polem powierzchni zrębu deklarowanym w szkicach zrębowych a stwierdzonym na podstawie ortofotomozaik. Przyczyny występowania tych różnic mogą wyni-

Tabela.

Wyniki dokonanej analizy w oparciu o stworzone ortofotomozaiki
Results of the analysis based on the orthophotomosaics created

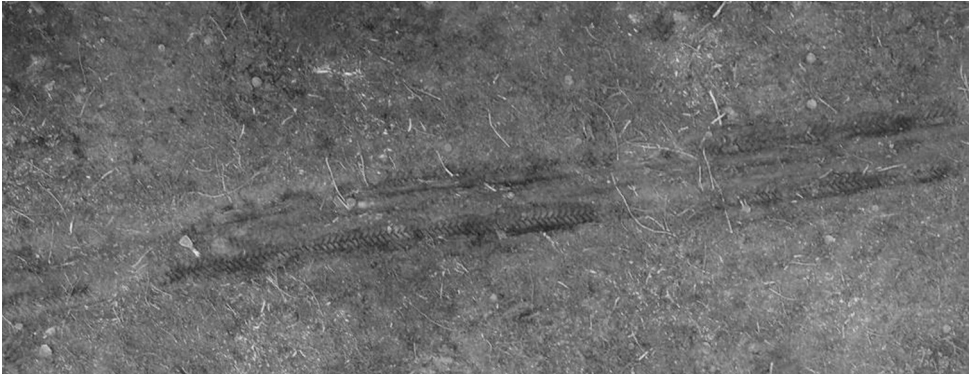
	411	96jk	105g	116c	176c	200ac	Razem In total
Powierzchnia w szkicu zrębowym [ha] Declared area	2,39	1,35	1,21	1,29	1,84	1,91	9,99
Powierzchnia pomierzona [ha] Measured area	2,58	1,47	1,35	1,23	1,75	2,04	10,42
Różnica w powierzchni [ha] Difference in area	0,19	0,12	0,14	-0,06	-0,09	0,13	0,43
Różnica w powierzchni [%] Difference in area	0,08	0,09	0,11	-0,05	-0,05	0,07	0,04
Sumaryczna długość szlaków [km] Total length of the trails	1,80	1,51	1,35	1,23	1,69	1,38	8,96
Długość szlaków [km/ha zrębu] Trails length [km/ha of clear-cut]	0,70	1,03	1,00	1,00	0,97	0,67	0,89
Sumaryczna powierzchnia uszkodzeń do warstwy mineralnej [ha] Area of total damage to the mineral layer	0,02	0,01	0,05	0,01	0,05	0,06	0,19
Uszkodzenia w odniesieniu do udziału w obszarze szlaków [%] Damage in relation to share in the trails area	0,03	0,01	0,10	0,02	0,08	0,10	0,06
Uszkodzenia w odniesieniu do udziału pomierzonej powierzchni zrębowej [%] Damage in relation to measured area	0,74	0,32	3,92	0,57	2,85	2,70	1,81



Ryc. 2.

Odległości [m] pomierzone między szlakami na poszczególnych powierzchniach zrębowych
Distances [m] measured between trails on particular clear-cuts

kać z szeregu czynników. W przypadku wyznaczania w terenie obszaru do cięć nie jest możliwe zachowanie pełnej precyzji. Jak zauważają Brach i Stereńczak [2006], dokładność modułów GPS, którymi posługuje się służba leśna, jest rzędu kilku metrów. Należy dodatkowo pamiętać o tym, że okap drzewostanu zawsze będzie przyczyniał się do zmniejszenia dokładności pomiarów GPS [Bakula i in. 2006; Brach 2012]. Różnice w wielkości pól powierzchni mogą również wynikać z pomyłek ludzkich, np. błędów operatora harwestera, na którego efektywność pracy



Ryc. 3.

Zdjęcie wykonane BSP z widocznym silnym uszkodzeniem gleby w obrębie szlaku UAV photo with visible strong soil damage within the skid trail area

wpływa szereg czynników, takich jak stres czy przemęczenie [Spinelli i in. 2020]. Badane obszary nie cechowały się dużą powierzchnią, jednak miały kształt wydłużonego prostokąta. Nawet niewielkie przekroczenie granic zrębu o takim kształcie może generować zauważalny błąd procentowy.

Średnia odległość między szlakami na badanych obszarach nie była mocno zróżnicowana (ryc. 2). Różnice w wartościach odległości między szlakami mogą wynikać z szeregu czynników, takich jak ukształtowanie terenu czy rodzaj pozyskiwanych sortymentów. Nie oznacza to, że maszyny w trakcie prac poruszały się jedynie po szlakach operacyjnych. Na etapie wycinania drzewostanu operator harwestera porusza się po powierzchni zrębowej w sposób zdecydowanie mniej schematyczny i powtarzalny niż w przypadku forwardera.

Prowadząc badania, przyjęto założenie, że jeżeli doszło do odsłonięcia mineralnej warstwy gleby, to można założyć, że uszkodzenia w tym obszarze są znaczne. Podobne założenia przedstawiali Dyrness [1965], Giefing [1999] czy Kulak [2014]. Z pomocą ortofotomozaik można określić miejsca z najbardziej ewidentnym zaburzeniem struktury glebowej oraz określić ich powierzchnię. Jednak w przypadku chęci wykonania dokładnej analizy odkształcenia gleby zalecane jest wykorzystanie programów do tworzenia modeli trójwymiarowych, takich jak Agisoft Metashape.

Niewielki udział fragmentów, gdzie doszło do odsłonięcia warstwy mineralnej gleby, może być związany z faktem, że badania prowadzono w okresie suszy, kiedy praktycznie nie występowały opady. Suma opadów w czasie prowadzenia badań wynosiła 46,2 mm w sierpniu i 94,6 mm we wrześniu. Na nośność gleby silnie wpływa stan jej uwilgotnienia [Han-Sup i in. 2006; Bułiński, Sergiel 2011].

Ortofotomozaiki mogą być wykorzystywane przy określaniu wyciętej powierzchni leśnej, przebiegu szlaków operacyjnych, jak i lokalizowaniu uszkodzeń gleby. Możliwe jest zautomatyzowanie tego procesu przy pomocy odpowiednich algorytmów i technik uczenia maszynowego, tak jak ma to już miejsce w przypadku określania podatności drzewostanów na uszkodzenia gleby [Pohjankukka i in. 2016; Shabani 2020].

Wnioski

✦ Stwierdzono występowanie różnic między faktyczną a deklarowaną w szkicach zrębowych powierzchnią zrębów.

- ✦ Średnia odległość między szlakami na badanych powierzchniach wynosiła 13,40 m, a zagęszczenie szlaków operacyjnych na badanych zrębach – 0,89 km/ha. Średni udział powierzchniowy szlaków, po których poruszały się maszyny leśne na badanych terenach objętych cięciami, wynosił 32,73%.
- ✦ Na badanych powierzchniach stwierdzono występowanie uszkodzeń gleby odsłaniających warstwę mineralną gleby, jednakże stanowiły one 1,81% badanej powierzchni zrębów.
- ✦ Nie stwierdzono korelacji między udziałem zagęszczenia szlaków operacyjnych a występowaniem uszkodzeń gleby do warstwy mineralnej.

Literatura

- Bakula M., Oszczak S., Pelc-Mieczkowska R., Suchocki M., Chrostowska M., Rudziński M. 2006. Analiza precyzji i dokładności pomiarów GPS w warunkach leśnych. Roczniki Geomatyki 4 (3).
- Będkowski K., Stereńczak K. 2013. Sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.) trees variability according to an analysis of multispectral images taken from UAV – first results. Ecological Questions 17: 25-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.12775/ecoq-2013-0013>.
- Brach M. 2012. Analiza dokładności wyznaczania współrzędnych wybranymi odbiornikami GNSS w środowisku leśnym. Sylwan 156 (1): 47-56. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2011083>.
- Brach M., Cheung-Wai Chan J., Szymański P. 2019. Accuracy assessment of different photogrammetric software for processing data from low-cost UAV platforms in forest conditions. iForest – Biogeosciences and Forestry 12 (5): 435-441. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer2986-012>.
- Brach M., Stereńczak K. 2006. Wykorzystanie technologii GPS oraz ręcznego dalmierza laserowego do aktualizacji leśnej mapy numerycznej. Geoinformacja w dydaktyce i gospodarce. XXI Konferencja Katedr i Zakładów Geodezji na Wydziałach Niegodezcyjnych. Częstochowa – Poraj, 27-29 września 2006. 50-57.
- Brovkina O., Cienciala E., Surový P., Janata P. 2018. Unmanned aerial vehicles (UAV) for assessment of qualitative classification of Norway spruce in temperate forest stands. Geo-spatial Information Science 21 (1): 12-20. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1416994>.
- Buliński J., Sergiel L. 2011. Wpływ wilgotności gleby na jej zagęszczenie kółem ciągnika. Inżynieria Rolnicza 8 (133): 45-51.
- Chamoso P., Raveane W., Parra V., González A. 2014. UAVs Applied to the Counting and Monitoring of Animals. Advances in Intelligent Systems and Computing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07596-9_8.
- Dash J., Pearse G., Watt M. 2018. UAV Multispectral Imagery can complement satellite data for monitoring forest health. Remote Sensing 10: 12-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10081216>.
- Dyrness C. 1965. Soil surface condition following tractor and high-lead logging in the Oregon Cascades. Journal of Forestry 63: 272-275.
- Gałąj J., Łazorko T. 2013. Ogólna koncepcja wykorzystania samolotu bezzałogowego do ochrony przeciwpożarowej lasów w Polsce. TTS Technika Transportu Szybowego 20 (10): 231-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016>.
- van Gemert J., Verschoor C., Mettes P., Epema K., Koh L., Wich S. 2015. Nature Conservation Drones for Automatic Localization and Counting of Animals. ECCV 2014 Workshops: 255-270. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-16178-517>.
- Giannetti F., Chirici G., Gobakken T., Nésset E., Travaglini D., Puliti S. 2018. A new approach with DTM-independent metrics for forest growing stock prediction using UAV photogrammetric data. Remote Sensing of Environment 213: 195-205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.05.016>.
- Giefing D. 1999. Wpływ pozyskania drewna w czyszczeniach późnych drzewostanów sosnowych na środowisko. Część 2. Gleby. Sylwan 143 (6): 91-100.
- Han-Sup H., Page-Dumroese D., Sang-Kyun H., Tirocke J. 2006. Effects of Slash, Machine Passes, and Soil Moisture on Penetration Resistance in a Cut-to-length Harvesting, International Journal of Forest Engineering 17 (2): 11-24. DOI: <https://doi.org/10.1080/14942119.2006.10702532>.
- Hrůza P., Mikita T., Janata P. 2016. Monitoring of forest hauling roads wearing course damage using unmanned aerial systems. Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis 64 (5): 1537-1546. DOI: <https://doi.org/10.11118/actaun201664051537>.
- Kulak D. 2014. Porównanie metod szacowania pozyskaniowych szkód glebowych na przykładzie rębnego drzewostanu bukowego. Leś. Pr. Bad. 75 (3): 245-251. DOI: <https://doi.org/10.2478/frp-2014-0024>.
- Łoziński A., Będkowski K. 2016. Rozpoznawanie jesiennych faz fenologicznych dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* Liebl.) na ortomozajkach zdjęć lotniczych uzyskanych z wykorzystaniem drona. Teledetekcja Środowiska 55: 5-14.
- Merino L., Caballero F., Martinez de Dios J., Ferruz J., Ollero A. 2006. A cooperative perception system for multiple UAVs: application to automatic detection of forest fires. Journal of Field Robotics 23 (3/4): 165-184. DOI: <https://doi.org/10.1002/rob.20108>.

- Otsu K., Pla M., Vayreda J., Brotons L. 2018. Calibrating the Severity of Forest Defoliation by Pine Processionary Moth with Landsat and UAV Imagery. *Sensors* 18: 32-78. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18103278>.
- Pierzchała M., Talbot B., Astrup R. 2014. Estimating soil displacement from timber extraction trails in steep terrain: application of an unmanned aircraft for 3D modelling. *Forests*. 5 (6): 1212-1223. DOI: <https://doi.org/10.3390/f5061212>.
- Pierzchała M., Talbot B., Astrup R. 2016. Measuring wheel ruts with close range photogrammetry. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 89 (4): 383-391. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpw009>.
- Pohjankukka J., Riihimäki H., Nevalainen P., Pahikkala T., Ala-Ilomäki J., Hyvönen E., Varjo J., Heikkonen J. 2016. Predictability of boreal forest soil bearing capacity by machine learning. *Journal of Terramechanics*. 68: 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2016.09.001>.
- Probst A., Gatzolis D., Strigul N. 2018. Intercomparison of photogrammetry software for three-dimensional vegetation modelling. *Royal Society Open Science* 5: 172-192. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsos.172192>.
- Pszenny D. 2020. Wpływ zrywki drewna forwarderem Ponsse Gazelle na zwiążłość gleby. *Sylwan* 164 (8): 643-650. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2020054>.
- Rahlf J., Breidenbach J., Solberg S., Næsset E., Astrup R. 2014. Comparison of four types of 3D data for timber volume estimation. *Remote Sensing of Environment* 155: 325-333. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.08.036>.
- Robaszkiewicz A., Będkowski K., Buraczyk W., Szymański P., Kwaśny Ł. 2014. Pilotażowe badania nad wykorzystaniem zdjęć lotniczych z bsp do oceny stanu zdrowotnego świerka *Picea abies* Karst. *Studia i Materiały CEPL* 41: 346-355.
- Shabani S., Pourghasemi H., Blaschke T. 2020. Forest stand susceptibility mapping during harvesting using logistic regression and boosted regression tree machine learning models. *Global Ecology and Conservation* 22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00974>.
- Spinelli R., Magagnotti N., Labelle E. 2020. The Effect of New Silvicultural Trends on the Mental Workload of Harvester Operators. *Croatian Journal of Forest Engineering* 41 (2). DOI: <https://doi.org/10.5552/crojfe.2020.747>.
- Stereńczak K., Będkowski K. 2013. Assessment of the Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) crowns density based on multi-spectral images obtained by unmanned aerial vehicle. *Ecological Questions* 17: 89-99. DOI: <http://dx.doi.org/10.12775/ecoq-2013-0019>.
- Szymański P. 2013. Kierunki zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w leśnictwie i ochronie przyrody. *Roczniki Geomatyki* 1 (63): 117-127.
- Szymański P., Robaszkiewicz A., Będkowski K., Brach M., Kwaśny Ł. 2014. Fotogrametryczny monitoring drzewostanu dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* Liebl.) w rezerwacie „Zimna Woda” w Rogowie. *Studia i Materiały CEPL* 41: 335-345.
- Talbot B., Rahlf J., Astrup R. 2018. An operational UAV-based approach for stand-level assessment of soil disturbance after forest harvesting. *Scandinavian Journal of Forest Research*. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2017.1418421>.
- Wolinowski P., Będkowski K. 2015. Ocena stanu zdrowotnego świerka pospolitego (*Picea abies* Karst.) na podstawie zdjęć lotniczych wykonanych z niskiej wysokości w okresie intensywnego wiosennego wzrostu drzew. *Teledetekcja Środowiska* 53: 5-14
- Zhang L., Wang B., Peng W., Li C., Lu Z., Guo Y. 2015. A Method for Forest Fire Detection Using UAV. *Advanced Science and Technology Letters* 81: 69-74. DOI: <https://doi.org/10.14257/astl.2015.81.1>.
- Zmarz A., Będkowski K., Miścicki S., Plutecki W. 2012. Ocena stanu zdrowotnego świerka na podstawie analizy zdjęć wielospektralnych wykonanych fotograficznymi aparatami cyfrowymi przenoszonymi przez bezzałogowy statek latający. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* 23: 541-550.