

# Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie

## Application of unmanned aerial vehicles in construction industry



**Mariusz Szóstak**

Dr inż.

Katedra Budownictwa Ogólnego,  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego, Politechnika  
Wrocławska

mariusz.szostak@pwr.edu.pl



**Tomasz Nowobilski**

Mgr inż.

Katedra Inżynierii Materiałów  
i Procesów Budowlanych,  
Wydział Budownictwa Lądowego  
i Wodnego, Politechnika  
Wrocławska

tomasz.nowobilski@pwr.edu.pl

**Streszczenie:** Bezzałogowe statki powietrzne, potocznie nazywane dronami, są szeroko stosowane w wielu sektorach gospodarki, m.in. w: górnictwie, rolnictwie, medycynie, ekologii, transporcie. Na podstawie wykonanego systematycznego przeglądu literatury wynika, że drony mają również szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. w: inspekcjach budowlanych, ocenie zniszczeń (szkód, uszkodzeń), pomiarach terenu (inwentaryzacje, mapowanie terenu), inspekcjach stanu bezpieczeństwa, monitorowaniu postępów prac, konserwacji budynków, a także badaniach termowizyjnych.

**Słowa kluczowe:** Bezzałogowy statek powietrzny; Dron; Przegląd literatury; Budownictwo; Bezpieczeństwo pracy

**Abstract:** Unmanned aerial vehicles, commonly known as drones, are widely used in many sectors of the economy, including in: mining, agriculture, medicine, ecology, transport. The systematic literature review shows that drones are also widely used in construction, including: construction inspections, damage assessment, area measurements (inventory, area mapping), safety inspections, monitoring of the work progress, maintenance buildings, as well as thermographic researches

**Keywords:** Unmanned aerial vehicles; drone; Literature review, Construction industry; Occupational health and safety

### Wprowadzenie

Era wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych (UAV - the unmanned aerial vehicles), tzw. dronów wyłącznie do celów wojskowych to już historia. W ciągu ostatniej dekady bezzałogowe statki powietrzne były wykorzystywane w szerokim zakresie w sektorze cywilnym i komercyjnym.

Obecnie drony są szeroko stosowane w wielu sektorach gospodarki, m.in. w: górnictwie, rolnictwie, medycynie, ekologii, transporcie. Bezzałogowe systemy powietrzne mają również szerokie zastosowanie w budownictwie, m.in. w: inspekcjach budowlanych [1,2], ocenie zniszczeń (szkód, uszkodzeń), pomiarach terenu (inwentaryzacje, mapowanie terenu), inspekcjach stanu bezpieczeństwa, monitorowaniu postępów prac [3],

konserwacji budynków, a także badaniach termowizyjnych [4].

Należy być świadomym, że bezzałogowe statki powietrzne stwarzają nowe, dotychczas niewystępujące zagrożenia w budownictwie. Nowe zagrożenia związane są z nieustannym rozwojem nowych technologii, a także ciągłej automatyzacji i robotyzacji branży budowlanej. Chociaż istnieją badania na temat korzyści jakie nowe technologie, w tym drony, przyniosą branży budowlanej to w dalszym ciągu brakuje ilościowych badań analizujących wpływ użytkowania bezzałogowych statków powietrznych na zdrowie i bezpieczeństwo pracowników. Analiza czynników wpływających na bezpieczeństwo wykonywania operacji z użyciem bezzałogowych statków powietrznych wskazuje, że głównymi przyczynami wypadków są błędy ludzkie oraz pro-

blemy techniczne.

Stosowanie bezzałogowych systemów powietrznych (UAS - the unmanned aerial system) pozwala na osiągnięcie kilku istotnych korzyści w zakresie bezpieczeństwa w budownictwie. Po pierwsze drony mogą poruszać się szybciej niż ludzie, a także mogą docierać do niedostępnych lub trudno dostępnych dla człowieka miejsc – np. zlokalizowanych na wysokości z brakiem możliwości wejścia [5]. Zastosowanie dronów może znacznie poprawić bezpieczeństwo pracy m.in. w pobliżu poruszających się pojazdów na placu budowy, w strefie pracy żurawia/dźwigu budowlanego, w pobliżu niezabezpieczonych krawędzi i otworów, a także w obszarze tzw. „martwego pola” podczas użytkowania ciężkiego sprzętu budowlanego.

## Systematyczny przegląd literatury

Dokonano systematycznego przeglądu dostępnej literatury. W przeglądzie literatury uwzględniono tylko artykuły występujące w bazie Web of Science z ostatniej dekady (od stycznia 2011 do grudnia 2021), aby zapewnić, że informacje zawarte w artykułach są aktualne. Do wykonania przeglądu literatury wybrano następujące słowa kluczowe, które mogły występować w tytule, streszczeniu pracy lub w słowach kluczowych, a mianowicie: „drone”, „unmanned aerial vehicle”, „construction”. Aby ocenić trafność wybranych prac, ustalono zestaw kryteriów wykluczających publikacje na podstawie ich treści i typu publikacji. Po pierwsze, zidentyfikowano i wykluczono te prace, które nie przedstawiały bezpośrednio badań lub analiz dotyczących zastosowań bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie. Następnie weryfikacji podlegał rodzaj pracy, aby upewnić się, że publikacje pochodzą z recenzowanych czasopism lub materiałów konferencyjnych. Na koniec dokonano przeglądu manuskryptów, aby upewnić się, że w treści artykułu omówiono przynajmniej jedno ze słów kluczowych tego badania. Po ocenie przyrostowej uzyskano 40 publikacji. Zakres tematyczny artykułów dotyczył 5 głównych obszarów:

1. artykuły przeglądowe (12 artykułów),
2. klasyfikacja dronów (8 artykułów),
3. planowanie lotu (4 artykuły),
4. bezpieczeństwo pracy (8 artykułów),
5. analizy studiów przypadku (8 artykułów).

W sytuacji, w której artykuł podejmował kilka z wyżej wymienionych obszarów tematycznych, został on zakwalifikowany tylko do jednego, wiążącego obszaru.

## Artykuły przeglądowe

W tej grupie artykułów znalazły się prace, które przedstawiają aktualny stan wiedzy w zakresie zastosowania

bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie lub omawiają obowiązujące przepisy prawne, które regulują zasady poruszania się dronów w powietrzu [6,7]. Artykuły te omawiają dotychczasowe wyniki oryginalnych badań naukowych m.in. w zakresie analizy obecnego stanu badań nad zastosowaniem dronów w USA [8], a także w Indiach [9]. W analizowanych pracach przedstawiono możliwości zastosowania bezzałogowych statków powietrznych do zarządzania placem budowy, a w szczególności do monitorowania postępu prac i inspekcji budowlanych, poprawy logistyki w miejscu pracy, oceny warunków bezpieczeństwa pracy i szkód powstał w wyniku katastrof [10,11].

Drugim występującym w literaturze zastosowaniem dronów w budownictwie, poza zarządzaniem na placu budowy, jest możliwość wykonywania pomiarów fotogrametrycznych, za pomocą zdjęć wykonywanych na placu budowy. Zdjęcia wykonane przy pomocy drona pozwalają na opracowanie m.in. ortofotomap i numerycznych modeli terenu [12]. Zastosowanie odpowiedniego oprogramowania fotogrametrycznego pozwala na integrację zgromadzonych i opracowanych danych z modelami informacji o budynku wspierającymi technologie BIM [13] i może być wykorzystane do oceny postępu projektu [14], a także sprawdzenia zgodności geometrycznych w modelu projektowym [15]. Bezzałogowe statki powietrzne wyposażone odpowiednio w kamerę termowizyjną mogą mieć zastosowanie również w termografii budowlanej [16], a po odpowiednim przygotowaniu mogą być również wykorzystywane do inspekcji budynków w pomieszczeniach zamkniętych [17].

## Klasyfikacja dronów

W budownictwie powszechnie stosowane są dwa typy bezzałogowych statków powietrznych: wiropląt i stałopłat. Urządzenia z obrotowymi wirnikami (wiropląt) charakteryzują się zdolnością do zawisu, pionowego

startu i lądowania [18]. W zależności od liczby wirników mogą to być śmigłowce lub wielowirnikowce [19]. Zasada wytwarzania siły nośnej przez wirnikowce czyni je potencjalnie lepszą platformą dla małych i średnich projektów lub pionowych typów konstrukcji. Urządzenia zdalnie sterowane w formie stało płatowca (przypominające swoim kształtem samoloty i latające skrzydła) charakteryzują się zdolnością do długotrwałego utrzymania się w powietrzu bez potrzeby lądowania. Przekłada się to bezpośrednio na możliwość wykonywania nalotów na dużych obszarach. Takie możliwości sprawiają, że są one lepszą platformą do dużych projektów, w szczególności liniowych [20]. Głównymi ograniczeniami stałopłatów wynikającymi z ich konstrukcji są: niezdolność do wykonywania zawisu i potrzeba stosowania dużej przestrzeni do startu i lądowania [21]. Poza standardowymi stosowanymi dotychczas typami bezzałogowych statków powietrznych projektuje się nowe, innowacyjne rozwiązania, nierzadko łączące korzyści płynące z obu typów. Dodatkowo, podczas projektowania i konstruowania nowych konstrukcji bierze się pod uwagę możliwość: wykorzystania dotychczas niestosowanych do ich budowy materiałów [22], analizuje się możliwość dodania dodatkowych urządzeń [23] lub modyfikuje się dotychczasową konstrukcję, poprzez dodanie dodatkowych wirników [24]. Do ich budowy wykorzystuje się innowacyjne materiały i techniki, np. elementy wykonane przy użyciu technologii druku 3D [25].

## Planowanie lotu

Niezależnie od rodzaju stosowanego sprzętu, istotne jest prawidłowe zaplanowanie przebiegu lotu jeszcze przed jego startem. Celem prowadzonych badań w tym zakresie jest m.in. optymalizacja trajektorii lotu, po której porusza się dron w trakcie monitorowania postępu prac [26]. Ważnym zagadnieniem jest również prawidłowe zaplanowanie lotu dla grupy dronów (tzw. „roju”) poruszających się nad ob-

szarami zurbanizowanymi, gdzie istnieją przeszkody o różnej wysokości. Celem prowadzonych badań jest znalezienie najlepszych trajektorii przy jednoczesnym zapewnieniu bezkolizyjnej nawigacji [27]. Kolejnym celem prowadzonych badań jest optymalizacja prędkości lotu, która zapewni, że dron spędzi najefektywniej czas na monitorowanie placu budowy, a także ukończy trasę w określonym czasie i bez wyczerpania baterii [28]. Z kolei wykonując pomiary fotogrametryczne ważny jest stopień szczegółowości gromadzonych danych, która pozwala na rozpoznanie elementów konstrukcyjnych oraz wewnętrzną spójność i precyzję pomiarów [29].

## Bezpieczeństwo pracy

Bezzałogowe statki powietrzne skutecznie wykorzystuje się, aby poprawić stan bezpieczeństwa i higieny pracy na stanowiska pracy. Stosowanie bezzałogowych statków powietrznych pozwala m.in. wyeliminować potrzebę przebywania pracowników w strefach niebezpiecznych, wchodzenia do zamkniętych przestrzeni lub wykonywania pracy na wysokości. Należy jednak pamiętać, że bezzałogowe statki powietrzne mogą stwarzać nowe, dotychczas niewystępujące na placu budowy zagrożenia [30]. Możliwe zagrożenia i sytuacje potencjalnie wypadkowe należy zidentyfikować, ocenić ich ryzyko i podjąć niezbędne działania profilaktyczne, mające na celu przeciwdziałanie ich powstawaniu [31]. Jest to niezbędne, aby zapewnić bezpieczeństwo pracownikom wykonujących pracę w ich otoczeniu. Kluczową rolę odgrywa tutaj identyfikacja stosowanych rozwiązań, praktyk bezpieczeństwa i obowiązujących wymagań technicznych przy użyciu systemów powietrznych [32]. Niestabilne warunki lotu, błędy operatora i awarie sprzętu mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla pracujących w pobliżu pracowników [33]. Źle dobrana trajektoria lotu bezzałogowego statku powietrznego może doprowadzić do kolizji, która może spowodować obrażenia u ludzi

lub zwierząt, znaczne uszkodzenie sprzętu lub nawet utratę urządzenia [34]. Należy również zwrócić uwagę, że bezzałogowe statki powietrzne są urządzeniami zasilanymi energią elektryczną, które z kolei mogą stanowić potencjalnie źródło zapłonu dla materiałów łatwopalnych i pyłów palnych [35]. Dodatkowo bezzałogowe statki powietrzne na placu budowy mogą rozpraszać uwagę pracowników, a to może pogorszyć ogólne wyniki w zakresie bezpieczeństwa pracowników, zwiększając przy tym liczbę wypadków przy pracy bez bezpośredniego udziału drona [36]. Dotychczasowe badania pokazują również, że stres i zmęczenie użytkownika/pilota drona są głównymi przyczynami wypadków tych urządzeń [37].

## Studium przypadków

Głównym celem prac należących do tej grupy artykułów jest przedstawienie praktycznego zastosowania bezzałogowych statków powietrznych w rzeczywistych warunkach eksploatacji i zastosowaniach. I tak na przykład bezzałogowy statek powietrzny został zastosowany do weryfikacji jakości gromadzonych danych i otrzymanej trójwymiarowej chmury punktów przez interesariuszy, o różnych stopniu doświadczenia, dla części ściany osłonowej dużej placówki opieki zdrowotnej zlokalizowanej w południowo-wschodnich Stanach Zjednoczonych [38]. Ciekawym zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych było np. zbadanie możliwości monitorowania deformacji powierzchni na budowach dróg ekspresowych w Korei. Dzięki zastosowaniu fotogrametrii niskiego pułapu opracowano ortofotomapę, cyfrowy model powierzchni terenu i model informacji topograficznej 3D placu budowy [39]. Za pomocą obrazów i fotogrametrii możliwe jest np. wykrycie i określenie liczby pojazdów pracujących na placu budowy [40]. Nietypowym przykładem było wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych do montażu przewodów elektrycznych i uziemiających ze światłowodami. W przytoczonej

pracy opisano zastosowaną metodę rozwijania liny (przewodu) podczas budowanej wysokonapięciowej 400 kV linii Ostrołęka-Olsztyn Matki [41].

Nie mniej jednak jednym z najczęściej opisywanych w literatury praktycznych zastosowań bezzałogowych statków powietrznych jest wykorzystanie ich do inspekcji budowlanych dla wszystkich rodzajów obiektów budowlanych, w tym również historycznych. I tak np. celem przeprowadzonej inspekcji budynku w historycznej rezydencji Tan Swee Hoe była ocena ogólnego stanu technicznego budynku. Innowacyjnym rozwiązaniem było wykonanie inspekcji wspomaganą obrazem uzyskanym przy pomocy bezzałogowego statku powietrznego [42]. Podobne techniki mają zastosowanie również w inżynierii lądowej, a w szczególności podczas inspekcji obiektów mostowych [43], np. trójprzęsłowego dźwigara z drewna klejonego warstwowo z kompozytowym pokładem położonym w pobliżu miasta Keystone w stanie Dakota Południowa [44] lub mostu w Skodsborg, o długości 140-m, wykonanego z betonu sprężonego, w okręgu Viken we wschodniej Norwegii [45]. Jak wiadomo mosty są krytycznym elementem infrastruktury w sieci systemu transportu drogowego i kolejowego. Znaczna część mostów w Europie osiąga obecnie projektowany okres eksploatacji, dlatego regularne przeglądy i konserwacje mają kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa ich dalszej eksploatacji. Tradycyjne procedury kontrolne i wymagane zasoby są czasochłonne i kosztowne. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych pozwala na skrócenie czasu i kosztów inspekcji tego typu konstrukcji, przyczyniając się równocześnie do minimalizacji ryzyka prowadzenia prac na wysokości i w trudno dostępnych dla człowieka miejscach.

## Podsumowanie przeglądu literatury

Największą liczbę artykułów stanowiły prace przeglądowe, które stanowiły

30% wszystkich analizowanych publikacji. Często poruszonymi zagadnieniami, o tej samej liczbie wystąpień (8 artykułów) stanowiły prace przedstawiające klasyfikację bezzałogowych statków powietrznych, zagadnienia bezpieczeństwa pracy oraz analizy przypadków. Najmniejsza liczba artykułów, wynosząca zaledwie 4 artykuły (10% wszystkich prac), zajmowała się zagadnieniami związanymi z prawidłowym zaplanowaniem operacji lotniczej oraz bezpieczną pracą/lotem drona.

Pierwsza część analizowanego okresu (2015-2017) przedstawia niewielką liczbę artykułów. W 2018 r. liczba publikacji wzrosła prawie dwukrotnie w stosunku do roku poprzedniego (7 publikacji). W kolejnych latach liczba artykułów stale rośnie i w 2021 roku osiągnęła już wartość 10 publikacji. Zauważalny jest wyraźny trend wzrostowy i rosnące zainteresowanie zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie.

Najwięcej wyników badań pochodzi ze Stanów Zjednoczonych. Artykuły te stanowią 45% wszystkich analizowanych prac. Kolejnymi państwami publikującymi artykuły w tym obszarze są: Korea Południowa, Wielka Brytania, Polska, Australia i Malesja (państwa, które opublikowały min. 2 artykuły) stanowią one 45% wszystkich artykułów. Pozostałe 10% artykułów to pojedyncze prace z pozostałych części świata.

## Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych w budownictwie

Bezzałogowe statki powietrzne już od wielu lat z powodzeniem wykorzystywane są w budownictwie. W zależności od docelowego przeznaczenia stosuje się drony o różnej konstrukcji i wadze. Urządzenia te mogą być wyposażone m.in. w kamery o wysokiej rozdzielczości, kamery termowizyjne, skanery laserowe i urządzenia odbiorcze GNSS. Dzięki takiemu wyposażeniu drony mają zastosowanie w:

- kontroli obiektów budowlanych do których dostęp jest utrudnio-

ny, np. mostów, kominów, dachów,

- ocenie stanu technicznego konstrukcji i ich elementów. Na obrazie transmitowanym przez kamery z drona można znaleźć pęknięcia i inne defekty zagrażające bezpieczeństwu konstrukcji.
- monitorowaniu postępów prac budowlanych. Nadzór z powietrza pozwala na większą kontrolę przebiegu prac na budowie dzięki możliwości wykonywania zdjęć i filmów z realizacji inwestycji,
- termowizyjnych badaniach obiektów budowlanych. Dzięki zastosowaniu kamer termowizyjnych możliwe jest dokonywanie pomiarów i identyfikowanie źródeł utraty ciepła w budynku,
- monitorowaniu i kontroli środowiska pracy, identyfikacji zagrożeń w realizacji obiektów, dzięki czemu zmniejszane jest ryzyko wypadków, a tym samym zwiększone bezpieczeństwo pracy,
- pozyskiwaniu zobrazowań do wyznaczania geometrii 3D obiektów przestrzennych, określaniu wymiarów przestrzennych (odległość, powierzchnia, objętość), tworzenia ortofotomapy, a także inwentaryzacji atrybutów obiektów.

## Podsumowanie

Bezzałogowy statek powietrzny to nie tylko popularny gadżet wykorzystywany coraz częściej przez amatorów i hobbystów w celach prywatnych, lecz także nowoczesny system mający zastosowanie w wielu dziedzinach życia, w tym budownictwie, a także w prowadzonych badaniach naukowych. Zastosowanie dronów w budownictwie ma duże spektrum działania, począwszy od inspekcji budowlanych, oceny zniszczeń, pomiarów terenu, monitorowania postępów prac po inspekcje stanu bezpieczeństwa. Bezzałogowe statki powietrzne pozwalają na wykonanie nie tylko zdjęć z powietrza, lecz także dostarczają trójwymiarowych modeli czy ortofotomap. Pozyskana w ten sposób dokumentacja

pozwała z dużą dokładnością zbadać topografię terenu przeznaczonego pod inwestycję, a także zweryfikować zakres planowanych robót ziemnych, np. oszacować objętość wykopów, wymiary fundamentów czy głębokość osadzenia rurociągu. Sprzyja to dokładniejszemu planowaniu tempa prac i czasu trwania projektu inwestycyjno-budowlanego, ułatwia kontrolę postępów, a w rezultacie zapobiega opóźnieniom na budowie.

Wykorzystanie dronów w budownictwie może podnieść stopień bezpieczeństwa na budowie, pamiętać należy jednak, że bezzałogowe statki powietrzne mogą stwarzać również nowe, dotychczas niewystępujące na placu budowy zagrożenia. Niestabilne warunki lotu, błędy operatora i awarie sprzętu mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla pracujących w pobliżu pracowników. Źle dobrana trajektoria lotu bezzałogowego statku powietrznego może doprowadzić do kolizji, która może spowodować obrażenia u ludzi lub zwierząt, znaczne uszkodzenie sprzętu lub nawet utratę urządzenia.

Edukacja w zakresie bezpiecznego użytkowania bezzałogowych statków powietrznych, ale także właściwe użytkowanie dronów mają szansę poprawić bezpieczeństwo pracy z tymi urządzeniami. Szczególnie że zastosowanie dronów w budownictwie, o czym wcześniej wspomniano, niesie ze sobą wiele korzyści. Tego, że użycie bezzałogowych statków latających w szybkim tempie poszerza swój zakres zastosowań, są świadome także środowiska akademickie. Wychodząc naprzeciw najnowocześniejszym trendom, realizowany jest międzynarodowy projekt „Virtual reality immersive safety training environment for robotised and automated construction sites” przez konsorcjum: University of the West of England (UWE) Bristol, (United Kingdom); CTM -Centro Tecnológico del Marmol Piedra y Materiales (Spain); Bildungszentren des Baugewerbes e.V. (Germany); Wrocław University of Science and Technology (Poland). Głównym celem projektu jest opracowanie bardzo innowacyj-

nego, bezpiecznego i interaktywnego środowiska szkoleniowego opartego na technologii wirtualnej rzeczywistości (VR) w zakresie nowoczesnych technologii, w tym bezzałogowych statków powietrznych, aby przekazać pracownikom budowlanym niezbędne umiejętności i edukację w zakresie interakcji z maszynami i materiałami.

## Podziękowania

Praca jest wynikiem realizacji przez autorów projektu badawczego nr 2020-1-UK01-KA202-079176 „Virtual reality immersive safety training environment for robotised and automated construction sites” finansowanego przez europejski program Erasmus+ (<https://safecrobot.pwr.edu.pl>). ◀

## Materiały źródłowe

- [1] T. Nowobilski, M. Sawicki, M. Szóstak. Drony w ocenie stanu rusztowań, *Builder*, 2020, 24(1), 40-41
- [2] T. Nowobilski, M. Sawicki, M. Szóstak. Analiza rusztowań budowlanych z wykorzystaniem nowych technologii, *Builder*, 2020, 24(7), 32-34
- [3] I. Rybka, T. Nowobilski, M. Stolarz. Nowoczesne technologie monitorowania robót ziemnych: praktyczne wdrożenie na przykładzie budowy Kwatery Południowej OUOW Żelazny Most, *Builder*, 2020, 24(5), 44-47
- [4] P. Noszczyk. Zastosowania dronów w działaniach PSP, *W Akcji*, 2018, 6, 42-48
- [5] T. Nowobilski. Bezzałogowe statki powietrzne w kontroli obiektów budowlanych, *Builder*, 2020, 24(2), 18-20
- [6] M. Herrmann. Unmanned Aerial Vehicles in Construction: An Overview of Current and Proposed Rules, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, 2016, 588-596. doi:10.1061/9780784479827.060
- [7] J. Łukasiewicz. Unmanned aerial vehicle as a device supporting the physical protection system of critical infrastructure facilities: Nuclear power plant as a case in point, *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2020, 108, 121-131. doi:10.20858/SJSUTST.2020.108.11
- [8] S. Zhou, M. Gheisari. Unmanned aerial system applications in construction: a systematic review, *Construction Innovation*, 2018, 18(4), 453-468. doi:10.1108/CI-02-2018-0010
- [9] C. Rao, K. Krishna, K. Rachanajali, V. Sravani. Unmanned flying vehicles for various applications and their future scope in India, *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 2019, 14(6), 747-760. doi:10.26782/JMCMS.2019.12.00055
- [10] J. Irizarry, D. Costa. Exploratory Study of Potential Applications of Unmanned Aerial Systems for Construction Management Tasks, *Journal of Management in Engineering*, 2016, 32(3), 05016001. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000422
- [11] M. Freeman, M. Kashani, P. Vardanega, "Aerial robotic technologies for civil engineering: established and emerging practice," *Journal Of Unmanned Vehicle Systems*, 2021, 9(2), 75-91.
- [12] D. Han, S. Lee, M. Song, J. Cho. Change Detection in Unmanned Aerial Vehicle Images for Progress Monitoring of Road Construction, *Buildings*, 2021, 11(4), doi:10.3390/BUILDINGS11040150
- [13] M. Tatum, J. Liu. Unmanned Aircraft System Applications in Construction, *Procedia Engineering*, 2017, 196, 167-175. doi:10.1016/J.PROENG.2017.07.187
- [14] K. Julge, A. Ellmann, R. Köök. Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthworks, *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2019, 14(1), 1-17. doi:10.7250/BJRBE.2019-14.430
- [15] F. Elghaish, S. Matarneh, S. Talebi, M. Kagioglou, M. R. Hosseini, S. Abrishami. Toward digitalization in the construction industry with immersive and drones technologies: a critical literature review, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2020, doi:10.1108/SASBE-06-2020-0077
- [16] A. Entrop, A. Vasenev. Infrared drones in the construction industry: Designing a protocol for building thermography procedures, *Energy Procedia*, 2017, 132, 63-68. doi:10.1016/J.EGYPRO.2017.09.636
- [17] R. Eiris, G. Albeaino, M. Gheisari, W. Benda, R. Faris. InDrone: a 2D-based drone flight behavior visualization platform for indoor building inspection, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2021, doi:10.1108/SASBE-03-2021-0036
- [18] H. Yang, Y. Lee, S. Jeon, D. Lee. Multi-rotor drone tutorial: systems, mechanics, control and state estimation, *Intelligent Service Robotics*, 2017, 10(2), 79-93. doi:10.1007/S11370-017-0224-Y
- [19] Y. Li, C. Liu. Applications of multirotor drone technologies in construction management, *International Journal of Construction Management*, 2018. 19(5), 401-412. doi:10.1080/15623599.2018.1452101
- [20] S. Kim, S. Kim. Opportunities for site monitoring by adopting first person view (FPV) of a drone, *Smart Structures and Systems*, 2018, 21(2), 139-149. doi:10.12989/SSS.2018.21.2.139
- [21] G. Albeaino, M. Gheisari. Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: A survey study in the united states, *Journal of Information Technology in Construction*, 2021, 26, 84-111. doi:10.36680/J.ITCON.2021.006
- [22] D. Höche, W. Weber, E. Gazenbiller, S. Gavras, N. Hort, H. Dieringa. Novel Magnesium Based Materials: Are They Reliable Drone Construction Materials? A Mini Review, *Frontiers in Materials*, 2021, 8. doi:10.3389/FMATS.2021.575530
- [23] M. Sagraera, V. Tuyare, G. Compa-

- gnone, R. Sotelo. Design, construction and manually or autonomously control of an unmanned aerial vehicle, *Memoria-Investigaciones en Ingenieria*, 2015, 14
- [24] J. Hu, A. Lanzon. An innovative tri-rotor drone and associated distributed aerial drone swarm control, *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 103, 162–174. doi:10.1016/J.ROBOT.2018.02.019
- [25] P. Szywalski, A. Waindok. Practical Aspects of Design and Testing Unmanned Aerial Vehicles, *Acta Mechanica et Automatica*, 2020, 14(1), 50–58. doi:10.2478/AMA-2020-0008
- [26] A. Keyvanfar, A. Shafaghat, M. Awanghamat. Optimization and Trajectory Analysis of Drone's Flying and Environmental Variables for 3D Modelling the Construction Progress Monitoring, *International Journal of Civil Engineering*, 2021, doi:10.1007/S40999-021-00665-1
- [27] A. Bahabry, X. Wan, H. Ghazai, H. Menouar, G. Vesonder, Y. Massoud. Low-Altitude Navigation for Multi-Rotor Drones in Urban Areas," *IEEE Access*, 2019, 7, 87716–87731. doi:10.1109/ACCESS.2019.2925531
- [28] W. Yi, M. Sutrisna. Drone scheduling for construction site surveillance, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2021, 36(1), 3–13. doi:10.1111/MICE.12593
- [29] J. Siwiec. Comparison of Airborne Laser Scanning of Low and High Above Ground Level for Selected Infrastructure Objects, *Journal of Applied Engineering Sciences*, 2018, 8(2), 89–96. doi:10.2478/JAES-2018-0023
- [30] I. Jeelani, M. Gheisari. Safety challenges of UAV integration in construction: Conceptual analysis and future research roadmap, *Safety Science*, 2021, 144, 105473. doi:10.1016/J.SSCI.2021.105473
- [31] H. Izadi Moud, I. Flood, X. Zhang, B. Abbasnejad, P. Rahgozar, M. McIntyre. Quantitative Assessment of Proximity Risks Associated with Unmanned Aerial Vehicles in Construction, *Journal of Management in Engineering*, 2021, 37(1), 04020095. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000852
- [32] M. Gheisari, B. Esmaeili. Unmanned Aerial Systems (UAS) for Construction Safety Applications, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, CRC 2016, 2016, 2642–2650. doi:10.1061/9780784479827.263
- [33] J. Howard, V. Murashov, C. Branche. Unmanned aerial vehicles in construction and worker safety, *American Journal of Industrial Medicine*, 2018, 61(1), 3–10. doi:10.1002/AJIM.22782
- [34] V. Nguyen, K. Jung, T. Dang. DroneVR: A web virtual reality simulator for drone operator, in: *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality*, AIVR 2019, 2019, 257–262. doi:10.1109/AIVR46125.2019.00060
- [35] K. Kas, G. Johnson. Using unmanned aerial vehicles and robotics in hazardous locations safely, *Process Safety Progress*, 200, 39(1). doi: 10.1002/PRS.12066
- [36] M. Namian, M. Khalid, G. Wang, and Y. Turkan, "Revealing Safety Risks of Unmanned Aerial Vehicles in Construction" *Transportation Research Record*, 2021, 2675(11), 334-347. doi 10.1177/03611981211017134
- [37] M. N. Sakib, T. Chaspari, A. Behzadan. A feedforward neural network for drone accident prediction from physiological signals, *Smart and Sustainable Built Environment*, 2021, doi:10.1108/SASBE-12-2020-0181
- [38] J. Liu, M. Jenness, P. Holley. Utilizing Light Unmanned Aerial Vehicles for the Inspection of Curtain Walls: A Case Study, in: *Construction Research Congress 2016: Old and New Construction Technologies Converge in Historic San Juan - Proceedings of the 2016 Construction Research Congress*, CRC 2016, 2016, 2651–2659. doi:10.1061/9780784479827.264
- [39] S. Lee, M. Song, S. Kim, J. Won. Change monitoring at expressway infrastructure construction sites using drone, *Sensors and Materials*, 2020, 32(11), 3923–3933. doi:10.18494/SAM.2020.2971
- [40] W. Li, H. Li, Q. Wu, X. Chen, K. Ngan. Simultaneously detecting and counting dense vehicles from drone images, in: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(12), 9651–9662. doi:10.1109/TIE.2019.2899548
- [41] K. Pawlak, D. Serek. High Voltage Transmission Line Stringing Operation. Usage of Unmanned Aerial Vehicles for Installation of Conductor and Grounding Wires with Optical Fibers, in: *15th International Conference On Electrical Machines, Drives And Power Systems (ELMA)*, 2017, 32–37
- [42] H. Yusof, M. Ahmad, A. Abdullah. Historical building inspection using the unmanned aerial vehicle (UAV), *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 2020, 11(3), 12–20. doi:10.30880/IJ-SCET.2020.11.03.002
- [43] H. Jung, J. Lee, I. Kim. Challenging issues and solutions of bridge inspection technology using unmanned aerial vehicles, in: *Proceedings. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2018*, 2018, 1. doi:10.1117/12.2300957
- [44] J. Seo, L. Duque, J. Wacker. Drone-enabled bridge inspection methodology and application, *Automation in Construction*, 2018, 94, 112–126. doi:10.1016/J.AUTCON.2018.06.006
- [45] Y. Ayele, M. Aliyari, D. Griffiths, E. Droguett. Automatic crack segmentation for uav-assisted bridge inspection, *Energies*, 2020, 13(23). doi:10.3390/EN13236250