



**Jakub
Curyło**

Rekonstrukcja miejsca zdarzenia drogowego w oparciu o dane geoprzestrzenne Geoportalu Krajowego

Streszczenie

Celem artykułu jest analiza możliwości wykorzystania darmowych danych przestrzennych dostępnych w Geoportalu Krajowym¹ do wspomaganie rekonstrukcji wypadków drogowych. Badania koncentrują się na możliwościach i ograniczeniach stosowania danych pomiarowych LiDAR² i ortofotomap lotniczych w zakresie obejmującym rekonstrukcję miejsc wypadków drogowych. Wykorzystano metodologię porównawczą, obejmującą analizę danych geoprzestrzennych w odniesieniu do klasycznych technik pomiarowych na przykładzie analizy rzeczywistego zdarzenia drogowego w programie PC-Crash. Główne wyniki badań wskazują na wysoką precyzję ortofotomap oraz danych LiDAR w odtwarzaniu rzeczywistego ukształtowania terenu i elementów infrastruktury drogowej. Analiza przeprowadzona na modelu 3D utworzonym z danych LiDAR wykazała, że nowoczesne techniki pomiarowe pozwalają na dokładniejsze odtworzenie przebiegu wypadku oraz ocenę warunków widoczności na drodze. Integracja tych danych z tradycyjnymi metodami pomiarowymi może znacząco podnieść standardy pracy biegłych sądowych, przyczyniając się do zwiększenia dokładności ustalania przebiegu wypadku, a w ujęciu ogólnym także do lepszego zrozumienia przyczyn wypadków.

Słowa kluczowe

Rekonstrukcja miejsca zdarzenia, Geoportal Krajowy, dane pomiarowe LiDAR.

Otrzymano 6 września 2024 r., zatwierdzono do druku 23 września 2024 r.

DOI 10.4467/15053520PnD.24.007.20263

1. Wstęp

Ogłędziny to czynność procesowa, która polega na szczegółowej obserwacji (wykrywanie i zabezpieczanie śladów kryminalistycznych) miejsca, osoby, rzeczy oraz zwłok, przeprowadzanej przez człowieka za pomocą zmysłów i z wykorzysta-

Mgr inż. Jakub Curyło, biegły sądowy, PointLab, Kraków.

¹ www.geoportal.gov.pl

² LiDAR – ang. akronim od wyrażenia *Light Detection and Ranging*, metoda pomiaru odległości poprzez oświetlanie celu światłem laserowym i pomiar odbicia za pomocą czujnika.

niem środków technicznych, w celu wyjaśnienia charakteru i okoliczności powstałego zdarzenia oraz ustalenia jego sprawcy [1]. Celem tych działań jest wyjaśnienie okoliczności zdarzenia poprzez identyfikację, zabezpieczenie, dokumentację oraz pomiar śladów kryminalistycznych, które są kluczowe dla dalszego przebiegu śledztwa. Zatem w wielu przypadkach w postępowaniu przygotowawczym oględziny odgrywają decydującą rolę w ustaleniu przyczyn zaistniałego zdarzenia [2].

W kontekście zdarzeń drogowych, oględziny stanowią podstawę do sporządzenia protokołu, który może zostać uzupełniony fakultatywnie szkicem kryminalistycznym oraz dokumentacją fotograficzną miejsca wypadku. Dokumentacja ta powinna zawierać dokładny opis oraz przedstawiać położenie wszystkich kluczowych elementów, takich jak ujawnione ślady kryminalistyczne, przeszkody terenowe oraz wszelkie szczegóły istotne z punktu widzenia wyjaśnienia okoliczności zdarzenia. Warto tutaj zaznaczyć, iż same informacje o ujawnionych śladach są niewystarczające dla wykonania rzetelnej rekonstrukcji wypadku. Istotną rolę odgrywają również czynności związane z prawidłowym zwymiarowaniem tych śladów, gdyż dopiero wtedy mają one pełną wartość dowodową. Pomiar śladów ujawnionych na miejscu wypadku powinien być realizowany nieodłącznie z mapowaniem topografii fragmentu terenu w zasięgu obejmującym zdarzenie. Prawidłowe odtworzenie topografii terenu miejsca zdarzenia umożliwia rzeczywiste usytuowanie śladów powypadkowych względem istniejących szczegółów terenowych.

Rekonstrukcja miejsc zdarzeń drogowych jest procesem kluczowym w dochodzeniach powypadkowych, umożliwiającym dokładne odtworzenie przebiegu zdarzenia oraz ustalenie jego przyczyn. Dokładna i rzetelna rekonstrukcja ma więc bezpośredni wpływ na przebieg postępowania wyjaśniającego okoliczności zdarzenia. Umożliwia to nie tylko prawidłowe przeprowadzenie postępowania wyjaśniającego, ale również może wpływać na decyzje dotyczące roszczeń odszkodowawczych, ewentualnych sankcji dla sprawcy oraz działań zapobiegawczych. Rzetelna rekonstrukcja pomaga także w identyfikacji ewentualnych błędów w infrastrukturze drogowej czy procedurach bezpieczeństwa, co może prowadzić do wprowadzenia niezbędnych zmian mających na celu poprawę bezpieczeństwa na drogach.

W rzeczywistości dokładność odtworzenia śladów powypadkowych jest ściśle związana z dokładnością pomiarów topografii miejsca wypadku, która jest zakłócana przez takie czynniki jak urozmaicone ukształtowanie terenu, błędne odczyty drogomierza kołowego, generalizacja szczegółów terenowych (np. łuk drogi traktowany jako odcinek prosty), niepoprawnie przyjęty punkt odniesienia SPO czy choćby nieczytelnie sporządzony protokół oraz szkic roboczy z miejsca wypadku, uniemożliwiający wykonanie prawidłowej interpretacji danych. Dokumentacja sporządzona na miejscu zdarzenia często bywa niekompletna lub obciążona błędami, co dodatkowo komplikuje proces rekonstrukcji zdarzeń. Plan sytuacyjny jest zazwyczaj sporządzony w wymiarze 2D, co oznacza pominięcie nachylenia drogi

oraz rzeczywistego ukształtowania terenu, wpływając bezpośrednio na ograniczenia związane z analizą przebiegu wypadku. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że podczas obsługi zdarzeń drogowych często występuje problem z obecnością tymczasowych przeszkód terenowych w postaci pojazdów służb ratunkowych, świadków zdarzenia lub osób postronnych, które zasłaniają istotne elementy infrastruktury drogowej oraz ograniczają ich widoczność w trakcie wykonywania pomiarów. W konsekwencji prowadzi to do utrudnień w precyzyjnym wymiarowaniu śladów powypadkowych oraz topografii terenu, zwłaszcza przy stosowaniu klasycznych metod, takich jak pomiar drogomierzem kołowym lub taśmą mierniczą.

Nowoczesne techniki pomiarowe, takie jak tachimetry elektroniczne, odbiorniki GNSS RTK³, skanery laserowe oraz bezzałogowe statki powietrzne (drony), znacząco poprawiają dokładność pomiarów miejsc zdarzeń drogowych oraz ujawnionych śladów kryminalistycznych. Te zaawansowane instrumenty cechują się wysoką precyzją oraz szybkością pozyskiwania dużych zbiorów danych, co jest kluczowe przy dynamicznej obsłudze miejsca wypadku drogowego. Jednakże stosowanie tych technologii wiąże się z wysokimi kosztami zakupu i cyklicznej kalibracji instrumentów oraz znacznymi nakładami finansowymi na szkolenia odpowiednich służb w zakresie ich obsługi. Ponadto biegli sądowi często rezygnują z takich rozwiązań również z powodu wysokich kosztów, opierając rekonstrukcję wypadku drogowego na materiałach dowodowych sporządzonych przez policję.

Alternatywą dla przedstawionych problemów może być wykorzystanie publicznych danych geoprzestrzennych, dostępnych w Geoportalu Krajowym⁴. Portal zawiera bogaty zasób danych w postaci map topograficznych, ortofotomap lotniczych (standardowych oraz w wysokiej rozdzielczości), chmur punktów (danych pomiarowych LiDAR) oraz obiektów topograficznych. Wykorzystanie danych cyfrowych umożliwi bardziej precyzyjne odtworzenie miejsca zdarzenia, eliminując wiele ograniczeń, którymi obarczone są tradycyjne metody wymiarowania miejsca zdarzenia. Integracja danych geoprzestrzennych z klasycznymi technikami pomiarowymi może prowadzić do rzetelniejszych analiz, ułatwiając tym samym postępowanie wyjaśniające okoliczności zdarzenia.

Niniejszy artykuł stanowi wkład w rozwój metodologii rekonstrukcji miejsc zdarzeń drogowych, proponując innowacyjne podejścia, które mogą przyczynić się do podniesienia standardów pracy biegłych sądowych i skutecznego określenia przyczyn wypadków drogowych. W publikacji przedstawiono charakterystykę wybranych danych geoprzestrzennych oraz określono ich zalety i ograniczenia na przykładzie rekonstrukcji zaistniałego zdarzenia drogowego wykonanej przy użyciu programu PC-Crash.

³ GNSS – ang. *Global Navigation Satellite Systems*, globalny system nawigacji satelitarnej, RTK – ang. *Real Time Kinematic*, kinematyka w czasie rzeczywistym. GNSS RTK to sposób uzyskiwania w czasie rzeczywistym bardzo dokładnych informacji z satelitów o lokalizacji badanego obiektu.

⁴ Dalej także jako geoportal.

2. Charakterystyka Geoportalu Krajowego

2.1. Podstawowe informacje na temat serwisu

Geoportal Krajowy powstał na przełomie 2004 i 2005 roku w ramach Sektorowego Programu Operacyjnego Wzrost Konkurencyjności Przedsiębiorstw 2004–2005, realizowanego przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii, który pełni rolę operatora serwisu. Głównym celem serwisu jest udostępnianie obywatelom, przedsiębiorcom oraz administracji publicznej informacji przestrzennej pochodzącej z urzędowych rejestrów, które gwarantują jej odpowiednią jakość, aktualność i wiarygodność [4].

Przystąpienie Polski do Unii Europejskiej wiązało się z dostosowaniem prawa polskiego do prawa unijnego. Wobec tego Dyrektywy 2007/2/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 14 marca 2007 r. ustanawiające infrastrukturę informacji przestrzennej we Wspólnocie Europejskiej (INSPIRE), nałożyły na kraje Unii Europejskiej konieczność opracowania i systematycznego wdrażania infrastruktury informacji przestrzennej, jako jednego z elementów infrastruktury informacji przestrzennej Unii Europejskiej. Zgodnie z tą dyrektywą działania państw członkowskich UE powinny zapewnić zgodność infrastruktury informacji przestrzennej stworzonej przez państwa członkowskie i możliwość jej stosowania w kontekście wspólnotowym i transgranicznym [4]. W konsekwencji w 2010 roku upubliczniono internetową ewidencję zbiorów i usług danych przestrzennych pod nazwą GEOPORTAL 2. Projekt ten został zrealizowany z wypracowanym przez Radę do spraw implementacji INSPIRE ramowym programem tworzenia infrastruktury informacji przestrzennej w latach 2009–2010, zgodnie z założeniami Dyrektywy wraz z przepisami wykonawczymi oraz ustawą z dnia 4 marca 2010 r. *o infrastrukturze informacji przestrzennej* [4]. Głównym celem projektu jest przybliżenie usług informacji przestrzennej w zakresie danych o środowisku geograficznym oraz danych o obiektach i zjawiskach w całej przestrzeni otaczającej człowieka. Dostęp do aktualnych baz danych przestrzennych posiada istotne znaczenie w rozwoju państwa, gospodarki oraz jego obywateli [4].

Serwis internetowy GEOPORTAL 2 to bogaty zbiór danych, w skład których wchodzi m.in.: ortofotomapy, numeryczne modele terenu i numeryczne modele pokrycia terenu, chmury punktów ALS (dane pomiarowe LiDAR), modele siatkowe, ewidencja gruntów i budynków, mapy topograficzne i wiele innych. Warto podkreślić, że informacje publikowane w serwisie zgodnie z art. 4 ust. 2 ustawy *o prawie autorskim i prawach pokrewnych* (Dz. U. z 1994 r. poz. 83 ze zm.) nie podlegają ochronie przewidzianej ww. ustawą. Publikacja materiałów z serwisu jest dozwolona pod warunkiem umieszczenia informacji o źródle pochodzenia [5].

Ze względu na ciągły i dynamiczny rozwój serwisu internetowego oraz regularne pozyskiwanie wiarygodnych i dokładnych danych przestrzennych wraz z im-

plementacją zawansowanych i różnorodnych narzędzi do ich obsługi, GEOPORTAL 2 stanowi cenne źródło informacji m.in. w zakresie wspomagania rekonstrukcji miejsc zdarzeń drogowych.

2.2. Ortofotomapa (ORTO)

Ortofotomapa reprezentuje rastrowy obraz powierzchni terenu, powstały w wyniku przetworzenia zdjęć lotniczych lub satelitarnych. W Polsce na mocy ustawy *Prawo geodezyjne i kartograficzne* organem odpowiedzialnym za prowadzenie bazy danych obejmujących ortofotomapy jest Główny Geodeta Kraju. Większość ortofotomap dostępnych w geoportalu jest generowana w rozdzielczości 25×25 cm, natomiast na terenach miast w standardzie 10×10 cm oraz 5×5 cm. Obszary miejskie aktualizowane są co dwa lata (jednego roku zachodnia, a drugiego wschodnia część Polski), natomiast obszary pozamiejskie aktualizowane są co 4–5 lat. Dodatkowo serwis udostępnia prawdziwą ortofotomapę (tzw. *true ortho*), która różni się od ortofotomapy standardowej pod względem geometrycznym tj. na obrazie cyfrowym usunięte są przesunięcia radialne obiektów wystających ponad powierzchnię terenu. Oznacza to, że obiekty pionowe przedstawione są w rzucie ortogonalnym [5].

Projekt GEOPORTAL 2 udostępnia możliwość przeglądania ortofotomap poprzez wykorzystanie usług WMS i WMTS, które można podłączyć w dowolnym oprogramowaniu pracującym w tych standardach. W rezultacie w programach istnieje możliwość bezpośredniego zaimportowania fragmentu ortofotomapy na podstawie zdefiniowanego zasięgu przy pomocy współrzędnych geograficznych, bez konieczności pobierania ortofotomapy na dysk. Geoportal umożliwia także pobranie w pełnej rozdzielczości (bez utraty jakości danych) całej sekcji lub fragmentu ortofotomapy za pomocą odpowiednich narzędzi. Dodatkowo serwis wyposażony jest w opcję przeglądania danych archiwalnych (tzw. panel porównawczy) w celu pobrania obrazu rastrowego dla określonego okresu czasowego, przed zmianami w topografii terenu (np. przebudowa skrzyżowania lub zdarzenie drogowe w trakcie prowadzonych robót drogowych).

Za sprawą wysokiej rozdzielczości, ortofotomapy stanowią potężny nośnik informacji, oferując niezwykle szczegółowe i precyzyjne obrazowanie terenu. Dostarczają one dane z dokładnością nawet do kilku centymetrów na piksel, co umożliwia bardzo dokładne odwzorowanie układu dróg wraz z ich infrastrukturą oraz ustalenie prawidłowej lokalizacji śladów kryminalistycznych w oparciu o sporządzoną dokumentację z miejsca zdarzenia. Ponadto dostępność danych archiwalnych pozwala na odtworzenie miejsca wypadku drogowego przed wprowadzeniem zmian w infrastrukturze drogowej lub organizacji ruchu drogowego, przyczyniając się jednocześnie do identyfikacji potencjalnych przyczyn wypadku związanych z aktualnym układem drogi lub jej otoczeniem na dzień zaistniałego zdarzenia. W przeciwieństwie do ortofotomap, szkice kryminalistyczne mają ograniczenia

wynikające z większej podatności na błędy ludzkie (nieprawidłowy odczyt wartości z drogomierza kołowego, nieczytelnie sporządzony szkic lub protokół, błędy podczas zapisu wyników pomiaru, pominięcie rzeczywistej geometrii drogi podczas wymiarowania itp.) oraz charakteryzują się wysokim stopniem generalizacji szczegółów. Natomiast do ograniczeń związanych z użytkowaniem podkładów w postaci ortofotomap zaliczyć należy: dwuwymiarowy obraz terenu (brak informacji 3D), ograniczoną aktualność danych (aktualizacja w określonych odstępach czasowych), zróżnicowaną rozdzielczość przestrzenną na terenie całego kraju, zależność od warunków atmosferycznych i oświetlenia (zdarzają się ortofotomapy o wysokim wskaźniku jasności pikseli) oraz występowanie zniekształceń geometrycznych na ortofotomapach standardowych.

2.3. Dane pomiarowe LiDAR

Dane pomiarowe LiDAR zarejestrowane podczas lotniczego skanowania laserowego ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*) stanowią szczegółową reprezentację terenu wraz z jego pokryciem w postaci chmury punktów o określonych współrzędnych w państwowym systemie odniesień przestrzennych (X, Y, H). Zbiory danych przechowywane są w formacie LAS, który oprócz informacji o położeniu punktów, zawiera również takie dane jak klasa danego punktu oraz intensywność odbicia sygnału [5]. Punkty pomiarowe mogą również posiadać przypisane wartości z palety barw RGB (odpowiadające kolorom czerwonemu, zielonemu i niebieskiemu), które są pozyskiwane bezpośrednio ze zdjęć lotniczych (punktowi przypisuje się kolor RGB zgodnie z odpowiadającym mu punktem na obrazie rastrowym w tym samym układzie odniesienia). W różnych regionach Polski chmura punktów może zawierać zarówno punkty z przypisaną barwą, jak i punkty bez takich danych, które są wizualizowane w odcieniach szarości na podstawie intensywności odbicia sygnału. Każdy punkt ma przypisany odpowiedni atrybut związany z obiektem, na którym nastąpiło odbicie promienia lasera. Na podstawie tych informacji dane pomiarowe LiDAR podzielone są na kilka klas punktów (tab. 1).

Chmura punktów ALS pokrywa obszar całego kraju z gęstością punktów od 4 pkt/m² do nawet 25 pkt/m² w miastach. Dokładność określenia położenia sytuacyjnego i wysokościowego punktów zależy od dokładności dalmierza laserowego, inercjalnego systemu laserowego INS oraz systemu GNSS [6]. Po uwzględnieniu tych błędów i wyeliminowaniu błędów systematycznych, dokładność wysokościowa (H) wynosi od 0,08 m do 0,15 m, natomiast dokładność sytuacyjna (X, Y) od 0,20 m do 0,50 m.

Tabela 1. Klasyfikacja chmury punktów LiDAR [6].

Wartość klasyfikacji	Klasa ⁵	Opis
0	<i>Created, never classified</i>	punkty utworzone, nigdy nie klasyfikowane
1	<i>Unclassified</i>	punkty niesklasyfikowane
2	<i>Ground</i>	punkty leżące na gruncie
3	<i>Low Vegetation</i>	punkty reprezentujące niską roślinność
4	<i>Medium Vegetation</i>	punkty reprezentujące średnią roślinność
5	<i>High Vegetation</i>	punkty reprezentujące wysoką roślinność
6	<i>Building</i>	punkty reprezentujące budynki
7	<i>Low Point (noise)</i>	szумы (punkty omyłkowe)
8	<i>Water</i>	punkty reprezentujące obszary pod wodą
12	<i>Overlap Points</i>	punkty z obszarów wielokrotnego pokrycia

W kontekście rekonstrukcji miejsc zdarzeń drogowych największą zaletą danych LiDAR jest trójwymiarowa reprezentacja terenu. Chmura punktów stanowi bogate źródło informacji, wspomagając analizę wypadków drogowych poprzez uwzględnienie rzeczywistego ukształtowania terenu, nachylenia drogi, a także odtworzenie istniejącej infrastruktury drogowej (np. skarpy, rowy, nasypy) oraz otoczenia (budynki, budowle, obiekty inżynierskie). Punkty pomiarowe ALS umożliwiają wyodrębnienie poszczególnych klas, co jest pomocne w symulacji przebiegu zdarzenia drogowego. Na przykład, gdy pojazd po kolizji zjeżdża z drogi na przyległy teren, dane LiDAR z klasy nr 2 umożliwiają dokładne odwzorowanie toru ruchu pojazdu na obszarze pozbawionym roślinności, uwzględniając realne warunki terenowe. Jest to możliwe, ponieważ wiązka lasera skanera lotniczego odbija się zarówno od szaty roślinnej jak i bezpośrednio od powierzchni gruntu.

Mimo wielu zalet, dane LiDAR posiadają też swoje ograniczenia. Jednym z nich jest zróżnicowana gęstość punktów na metr kwadratowy, co może utrudniać identyfikację drobnych szczegółów infrastruktury drogowej i prowadzić do większej generalizacji odtwarzanej topografii terenu, wpływając na jakość wizualizacji 3D rekonstruowanego miejsca zdarzenia. LiDAR o niskiej gęstości może również obniżać dokładność wyznaczenia pozycji kolizyjnych i powypadkowych pojazdów oraz ograniczać możliwości analizy widoczności pojazdów poprzez niedokładne modelowanie przeszkód terenowych. Istotnym ograniczeniem z punktu widzenia badania przebiegu wypadków drogowych jest także wpływ dokładności wysoko-

⁵ W praktyce przyjmuje się angielskie nazwy i dlatego takie zachowano w tabeli. Można je jednak przetłumaczyć jako: 0 – utworzona, niesklasyfikowana, 1 – niesklasyfikowana, 2 – powierzchnia terenu, 3 – niska roślinność, 4 – średnia roślinność, 5 – wysoka roślinność, 6 – zabudowa, 7 – punkty poniżej powierzchni (szумы), 8 – woda, 9 – punkty pokrywane się.

ściowej punktów (H) na modelowanie powierzchni drogi pod realizację symulacji ruchu pojazdów. Punkty sąsiednie mogą charakteryzować się zmienną dokładnością wysokościową. Różnice w wysokościach pomiędzy sąsiednimi punktami wynikają z precyzji urządzenia skanującego i zazwyczaj nie przekraczają kilku centymetrów. Przy tworzeniu szczegółowej powierzchni nachylonej drogi w programach do analizy wypadków drogowych, powierzchnia ta nie jest regularna, co może mieć wpływ na parametry ruchu pojazdów (zachowanie się pojazdów przed i w trakcie wypadku). Aby uniknąć tego zjawiska, powierzchnia reprezentowana przez punkty pomiarowe może być wygładzona poprzez usunięcie punktów o największych różnicach wysokości względem sąsiednich punktów (filtracja danych) lub przez zastosowanie większych odległości w triangulacji tworzącej powierzchnię nachyloną.

Ograniczenia te można zniwelować, stosując ortofotomapę lotniczą (ryc. 1) jako teksturę (ryc. 3) nałożoną na nachyloną powierzchnię (ryc. 2), zachowując jej ciągłość i nadając ortofotomapie trzeci wymiar (H). Drobne szczegóły infrastruktury drogowej można uzupełnić modelami 3D dostępnymi w bazie oprogramowania do analizy wypadków drogowych lub pobranymi z portali internetowych (ryc. 4). Integracja różnych metod pozwala na uzyskanie kompletnego, szczegółowego środowiska 3D do przeprowadzenia pełnej i rzetelnej rekonstrukcji wypadku drogowego.



Ryc. 1. Zdjęcie obszaru testowego wykonane z drona.



Ryc. 2. Dane pomiarowe LiDAR (widok 3D).



Ryc. 3. Chmura punktów z nałożoną teksturą.



Ryc. 4. Chmura punktów z nałożoną teksturą, uzupełniona o modele 3D obiektów.

2.4. Obiekty topograficzne (BDOT500)

Ostatnim formatem danych, na który warto zwrócić uwagę podczas wykonywania rekonstrukcji miejsca zdarzenia, są obiekty topograficzne zgromadzone w bazach BDOT500. Baza Danych Obiektów Topograficznych to zbiór danych przestrzennych, stanowiący punkt odniesienia dla różnorodnych opracowań tematycznych. Liczba „500” oznacza, że szczegółowość bazy danych przestrzennych odpowiada mapie zasadniczej w skali 1:500. Serwis ten umożliwia generowanie zapytań do serwera, które zwracają obraz cyfrowy zawierający dane topograficzne, wyświetlany na monitorze komputera lub pobierany na nośnik. Alternatywną metodą pozyskiwania danych BDOT500 jest korzystanie z usług WMS (ang. *Web Map Service*) w oprogramowaniu kompatybilnym z tą technologią, podobnie jak w przypadku ortofotomap lotniczych.

Zaletą stosowania bazy BDOT500 w rekonstrukcji zdarzeń drogowych jest wysoka szczegółowość i precyzja odwzorowania obiektów topograficznych. Dane te obejmują m.in. budynki, drogi, infrastrukturę techniczną oraz naturalne elementy krajobrazu. Dzięki nim możliwe jest dokładne odtworzenie szczegółów, które nie są widoczne na ortofotomapie ani w danych LiDAR, na przykład obiekty zasłonięte przez korony drzew lub przesunięcie radialne wysokich obiektów. Różnica pomiędzy ortofotomapą a bazą BDOT500 widoczna jest w sposobie przedstawienia obiektów wysokich na podkładzie 2D. Ortofotomapa reprezentuje wszystkie szczegóły, które zostały zarejestrowane przez sensor wizyjny. Oznacza to, że na obrazie cyfrowym znajdują się wyłącznie obiekty, które usytuowane są w bezpośrednim polu widzenia kamery, a więc dachy budynków, korony drzew, natomiast szczegóły przysłonięte przez te obiekty pozostają niezarejestrowane. W przypadku bazy BDOT500, szczegóły terenowe tworzone są w oparciu o różnorodne źródła danych, takie jak pomiary terenowe, ortofotomapy, dane LiDAR oraz inne materiały kartograficzne. Dlatego w wielu przypadkach widoczne są zarówno obiekty wysokie, jak i szczegóły znajdujące się bezpośrednio pod nimi.

Ograniczeniem tego rodzaju danych jest duży stopień generalizacji topografii terenu oraz ich reprezentacja w formacie 2D. Ponadto BDOT500 może nie zawierać wszystkich elementów infrastruktury drogowej, takich jak znaki drogowe, bariery ochronne czy inne drobne szczegóły, które mogą być kluczowe dla rekonstrukcji wypadków (ryc. 5).

Jednakże ortofotomapa wzbogacona o dane z BDOT500 stanowi cenne źródło informacji o terenie, które w przeciwieństwie do tradycyjnych szkiców kryminalistycznych, znacząco zwiększa dokładność i wiarygodność prowadzonych analiz na podstawie topografii terenu (ryc. 6).



Ryc. 5. Podkład BDOT500.



Ryc. 6. Ortofotomapa z BDOT500.

3. Analiza dokładności wysokościowej danych pomiarowych LiDAR w oparciu o przeprowadzone badania terenowe

Celem prezentowanego badania jest weryfikacja dokładności wysokościowej (H) danych pomiarowych LiDAR w oparciu o wykonane pomiary terenowe. Badanie polegało na porównaniu zgodności wysokości chmury punktów ALS z chmurą punktów wygenerowaną przy użyciu fotogrametrii. Pomiary przeprowadzono dla 100-metrowego odcinka drogi asfaltowej o nachyleniu wynoszącym 8%. Skanowanie fotogrametryczne zostało zrealizowane dronem Phantom 4 RTK na wysokości 25–35 m nad powierzchnią terenu. Przed przystąpieniem do realizacji lotu, na asfaltowej nawierzchni rozmieszczono pięć fotopunktów oraz cztery punkty kontrolne, które zmierzono odbiornikiem GPS RTK firmy Leica GS07. Fotopunkty, czyli punkty o znanych współrzędnych terenowych (X, Y, H), były usytuowane w sposób regularny w odległościach ok. 30 m względem siebie, natomiast punkty kontrolne stanowiły istniejące szczegóły terenowe, takie jak włazy studzienek kanalizacyjnych (a dokładniej ich środki geometryczne). Na potrzeby pomiaru przyjęto państwowy układ odniesienia 2000 strefa 7, ponieważ w tym układzie opisane są współrzędne najaktualniejszych danych pomiarowych LiDAR udostępnianych w Geoportalu Krajowym dla analizowanego obszaru testowego.

W trakcie dokumentacji fotograficznej bezzałogowym statkiem powietrznym zarejestrowano zarówno zdjęcia poziome jak i ukośne względem skanowanego terenu. Zdjęcia poziome umożliwiają prawidłową rekonstrukcję powierzchni terenu natomiast zdjęcia ukośne są kluczowe dla odtworzenia 3D obiektów pionowych. Łącznie pozyskano 120 obrazów cyfrowych. Zdjęcia zostały przetworzone w programie Agisoft Metashape Professional do wersji 3D w postaci chmury punktów w technologii zwanej *Structure from Motion (SfM)*. Jest to technika fotogrametryczna używana do rekonstrukcji 3D na bazie serii zdjęć cyfrowych wykonanych pod różnym kątem względem terenu lub obiektu poddanego dokumentacji. Algorytm identyfikuje charakterystyczne punkty lub cechy na zdjęciach, następnie porównuje je i dopasowuje do sąsiednich zdjęć w celu określenia, czy wytypowane punkty lub cechy reprezentują ten sam punkt w przestrzeni 3D. W dalszej części procesu odtwarzane są pozycje i orientacje zdjęć w momencie ich wykonania. Na końcu realizowana jest rekonstrukcja 3D zeskanowanego miejsca lub obiektu na

podstawie uzyskanych informacji o odtworzonych pozycjach zdjęć i dopasowanych punktach/cechach między zdjęciami, w wyniku czego powstaje kolorowa chmura punktów w rzeczywistych barwach.

Po wykonaniu optymalizacji danych, średni błąd kwadratowy dla fotopunktów wyniósł 12 mm, natomiast dla punktów kontrolnych 25 mm. Błąd RMSE dla fotopunktów i punktów kontrolnych jest obliczony poprzez różnice pomiędzy rzeczywistymi współrzędnymi fotopunktów pomierzonych w terenie a ich przewidywanymi pozycjami obliczonymi przez algorytm programu na podstawie zdjęć. Niskie wartości RMSE dla fotopunktów i punktów kontrolnych świadczą o wysokiej dokładności dopasowania modelu fotogrametrycznego do rzeczywistych danych terenowych.

Na potrzeby badania pobrano dane pomiarowe LiDAR z zasobu Geoportalu Krajowego, których rozdzielczość przestrzenna wynosi 12 pkt/m². W metadanych pobranego pliku podano, że średni błąd wysokości punktów (współrzędne H) wynosi 10 cm. Chmurę punktów ALS zaimportowano do programu Agisoft, w którym przeprowadzono szczegółowe badanie zgodności obu formatów danych.

Poniżej przedstawiono widoki 3D obszaru testowego reprezentowanego przez dane pomiarowe LiDAR (ryc. 7) oraz chmurę punktów wygenerowaną techniką fotogrametryczną (ryc. 8). Dla obu plików cyfrowych przyjęto rozmiar wyświetlanego punktu wynoszący 2 piksele. W lewym górnym rogu każdej ryciny znajduje się rzut prostopadły (widok z góry) fragmentu drogi asfaltowej obrazujący rozdzielczość przestrzenną plików.



Ryc. 7. Chmura punktów ALS (12 pkt/m²).



Ryc. 8. Chmura punktów uzyskana techniką fotogrametryczną (ok. 7500 pkt/m²).

Analiza dokładności wysokościowych danych pomiarowych LiDAR opierała się na porównaniu chmury punktów ALS z chmurą punktów uzyskaną z zdjęć cyfrowych. Dane zostały przetworzone do formatu rastrów DEM (ang. *Digital Elevation Model*) w celu obliczenia różnic wysokości między tymi zbiorami. Plik rastra DEM jest cyfrowym modelem wysokościowym przedstawiającym powierzchnię terenu, gdzie wysokość każdego punktu jest przechowywana w siatce regularnych pikseli (tzw. siatce *grid*). W tym modelu każdy piksel zawiera informację o wysokości terenu, jednak nie uwzględnia złożonych form terenu, w przeciwieństwie do pełnych modeli 3D.

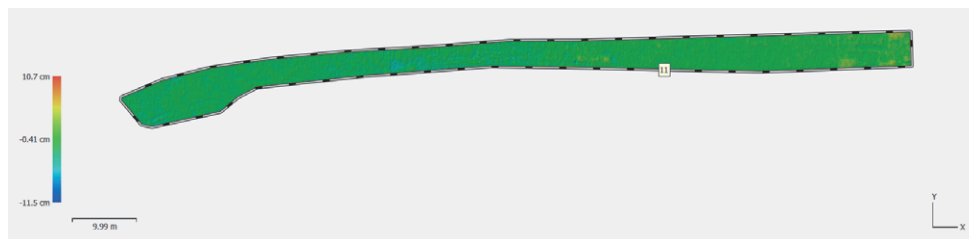
Oba rastry zostały utworzone na podstawie punktów reprezentujących wyłącznie grunt, bez pokrycia terenu. Ze względu na większą stabilność w czasie nawierzchni asfaltowej w porównaniu do nawierzchni trawiastej lub gruntowej, analizę przeprowadzono wyłącznie na 100-metrowym odcinku drogi, co przedstawiono na ryc. 9.



Ryc. 9. Fragment obszaru testowego poddanej analizie.

Obliczenie różnicy wysokości pomiędzy cyfrowymi modelami terenu, opartymi na danych LiDAR oraz fotogrametrii, zostało przeprowadzone przy użyciu programu Agisoft. Jako podkład referencyjny przyjęto raster DEM utworzony z chmury punktów wygenerowanej na bazie zdjęć cyfrowych. Wyniki różnicy między rastrami, reprezentującymi modele terenowe, zostały przedstawione jako mapa różnicowa, obrazująca odchylenia wysokości punktów w zakresie od -10 cm do

+10 cm. Kolor zielony oznacza, że odchylenia na współrzędnych H dla większości obszaru poddanemu analizie nie przekraczały 1 cm. Lokalnie występowały różnice wynoszące ok. 10 cm, mieszczące się w zakresie średniego błędu wysokości danych LiDAR (ryc. 10).



Ryc. 10. Mapa różnicowa obrazująca rozbieżności wysokościowe między dwoma rastrami DEM (LiDAR oraz fotogrametria).

Przeprowadzona analiza potwierdziła zgodność między modelami terenowymi uzyskanymi z danych LiDAR i fotogrametrii, wykazując jedynie lokalne odchylenia w granicach ± 10 cm. Wyniki te wskazują na wysoką precyzję danych LiDAR, co potwierdza ich przydatność w szczegółowych analizach terenowych, a tym bardziej w rekonstrukcji miejsc zdarzeń drogowych, w których występuje zróżnicowane ukształtowanie terenu.

4. Rekonstrukcja rzeczywistego wypadku drogowego w oparciu o dane przestrzenne dostępne w Geoportalu Krajowym

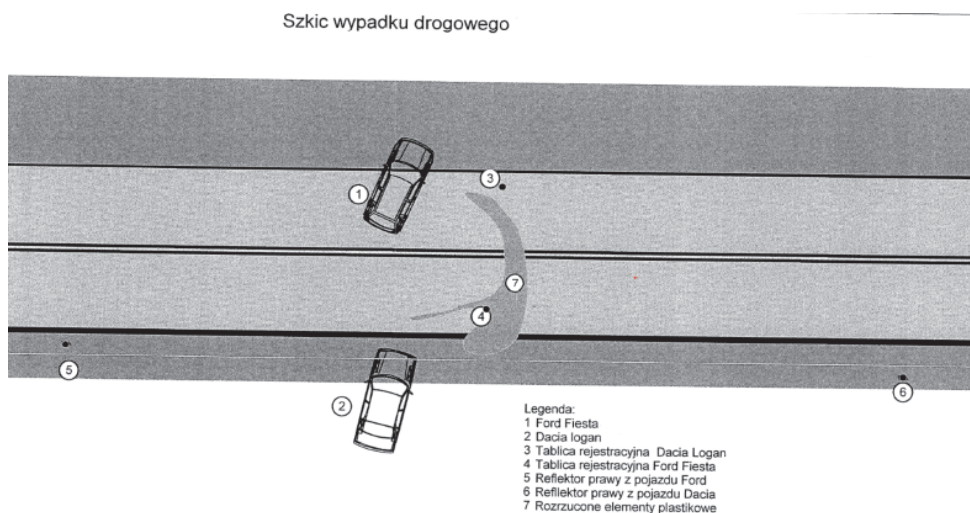
Przykładem będzie rekonstrukcja rzeczywistego wypadku drogowego, który miał miejsce na drodze powiatowej w leśnym obszarze województwa śląskiego.

Analizowane zdarzenie drogowe miało miejsce w terenie niezabudowanym na drodze jednojezdniowej, która posiadała dwa pasy ruchu, przeznaczone do jazdy w przeciwnych kierunkach. Odcinek zarówno przed jak i za miejscem wypadku był prosty. Obowiązujące ograniczenie prędkości wynosiło 90 km/h. Droga publiczna przebiegała przez obszar leśny o zróżnicowanej rzeźbie terenu. Po obu stronach drogi znajdowało się pobocze gruntowe o szerokości ok. 1,5 m, a następnie usytuowane były skarpy o wysokościach od 1,5 m do 2,0 m. Gałęzie drzew rosnących w odległości około 0,5 m od krawędzi jezdni znajdowały się na wysokości minimum 6,5 m nad jezdnią asfaltową (ograniczona przestrzeń w wymiarze H).

W zdarzeniu brały udział dwa pojazdy osobowe. Pojazd marki Ford zjechał na przeciwny pas ruchu i zderzył się z poruszającym się prawidłowo pojazdem marki Dacia. Do zderzenia doszło na odcinku drogi o nachyleniu około 5%. Na miejscu zdarzenia znajdowało się oznakowanie poziome P-4 „linia podwójna cią-

gła”. Warunki atmosferyczne w dniu zdarzenia były dobre (brak opadów, temperatura powietrza: +13°C), podobnie jak warunki oświetleniowe (1650 lux). Nawierzchnia drogi była sucha, czysta i gładka.

W czasie oględzin za stały punkt odniesienia SPO przyjęło betonowy słupek działki leśnej, a za stałą linię odniesienia SLO2 prawą krawędź jezdni, zgodnie z kierunkiem jazdy pojazdu marki Dacia. Miejsce zdarzenia oraz ujawnione ślady kryminalistyczne zostały zwymiarowane za pomocą drogomierza kołowego. W protokole z oględzin miejsca wypadku drogowego zawarto informację o spadku terenu, jednak nie podano stopnia nachylenia odcinka ani dokładnego miejsca początku nachylenia podłużnego. Szkic wypadku drogowego został wykonany w programie PLAN (ryc. 11).



Ryc. 11. Szkic wypadku drogowego wykonany w programie PLAN. Dane wrażliwe zostały usunięte.

Pojazd marki Dacia po zderzeniu z pojazdem marki Ford przemieścił się w kierunku prawego pobocza gruntowego, a następnie stoczył się ze skarpy i uderzył tyłem nadwozia w drzewo (skarpa przydrożna oraz drzewo nie zostały naniesione na plan). Pojazd marki Ford po zderzeniu wykonał obrót i zatrzymał się w pozycji, w której przód pojazdu był zwrócony w stronę lewego pobocza (lewe przednie koło znajdowało się na poboczu gruntowym). Pozycje końcowe obu pojazdów znajdowały się w odległości ponad 30 m za punktem załamania profilu drogi. Poniżej przedstawiono zdjęcie miejsca zdarzenia umieszczone na portalu *Dziennik Zachodni* (ryc. 12) oraz zdjęcie nachylenia drogi wykonane podczas osobistych oględzin (ryc. 13).



Ryc. 12. Zdjęcie wykonane w dniu zdarzenia przez portal Dziennik Zachodni.



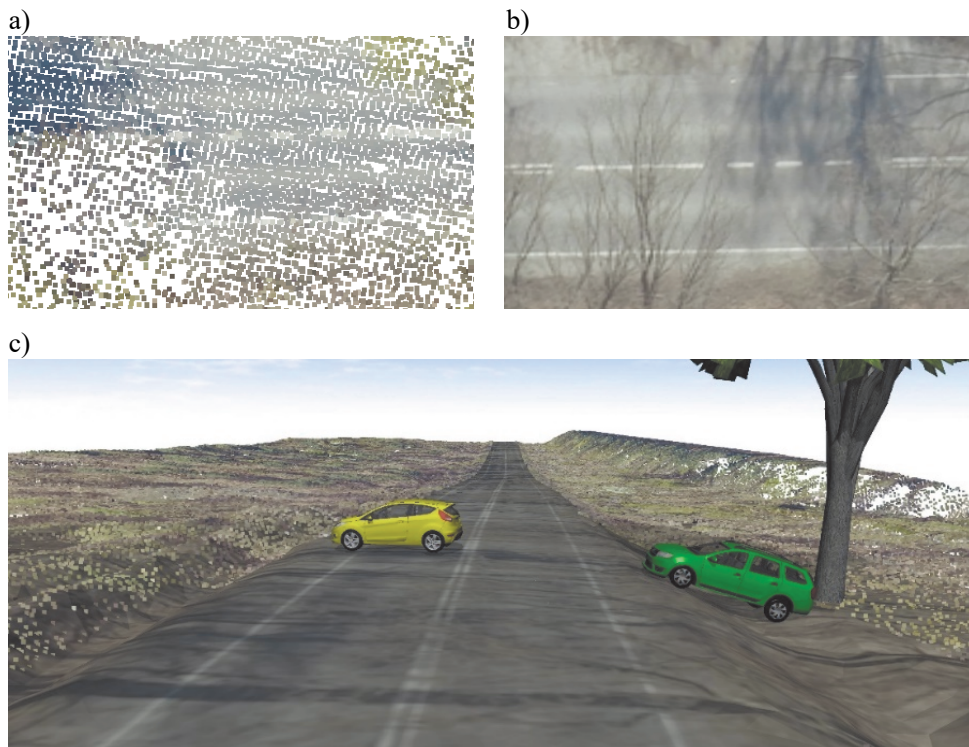
Ryc. 13. Zdjęcie nachylenia drogi wykonane podczas osobistych oględzin.

Ze względu na brak danych dotyczących punktu załamania profilu drogi, wartości nachylenia podłużnego oraz parametrów skarpy przydrożnej w protokole z oględzin wypadku drogowego oraz na szkicu, wykonanie dokładnej rekonstrukcji miejsca zdarzenia było niemożliwe. W takim przypadku odtworzenie rzeczywistego środowiska 3D wspomagającego wykonanie symulacji przebiegu wypadku drogowego jest osiągalne poprzez przeprowadzenie terenowych oględzin miejsca zdarzenia wraz z pomiarem w układzie 3D lub wykorzystanie danych geoprzestrzennych dostępnych w geoportalu.

W omawianym przykładzie wykorzystano dane pomiarowe LiDAR o rozdzielczości 25 pkt/1m² oraz ortofotomapę lotniczą o rozdzielczości 5 cm na 1 piksel obrazu. Chmurę punktów ALS zweryfikowano za pomocą pomiaru tachimetrycznego przeprowadzonego na miejscu zdarzenia (przekroje poprzeczne drogi w odstępach około 20 metrów umieszczono w tym samym układzie 2D co dane LiDAR). Zgodnie z metadanymi pliku cyfrowego, błąd średni wysokości punktów wynosił 8 cm.

Dane przestrzenne dostępne na platformie GEOPORTAL 2 umożliwiły odtworzenie rzeczywistego ukształtowania miejsca zdarzenia drogowego, natomiast ortofotomapa lotnicza pełniła funkcję wysokorozdzielczej tekstury nakładanej na powierzchnię nachyloną terenu (siatkę wektorową TIN). Wykorzystanie ortofotomapy jako tekstury modelu 3D ma dwie główne zalety: przedstawia szczegóły terenowe w wyższej rozdzielczości niż sama chmura punktów ALS oraz stanowi ciągłą powierzchnię modelu terenu (ryc. 14b), w przeciwieństwie do punktów LiDAR, które są rozmieszczone w określonych odstępach (ryc. 14a). Wykorzystując właściwości danych LiDAR, w których każdy punkt posiada przypisaną odpowiednią klasę, dokonano filtracji chmury punktów, tworząc zbiór danych, w którym punkty reprezentują wyłącznie numeryczny model terenu (leżą bezpośrednio na powierzchni gruntu). Gotowe pliki zostały wgrane do programu PC-Crash, w którym przeprowadzono rekonstrukcję 3D miejsca zdarzenia drogowego. Ślady ujawnione

na miejscu wypadku oraz pozycje końcowe pojazdów wprowadzono na plan sytuacyjny, bazując na informacjach zawartych w protokole oględzin miejsca wypadku oraz zdjęciach cyfrowych załączonych do akt sprawy. W efekcie otrzymano trójwymiarowy model miejsca zdarzenia, na którym widoczne jest rzeczywiste nachylenie drogi wraz z przydrożnymi skarpami (ryc. 14c).



Ryc. 14. Widok fragmentu odcinka drogi reprezentowanego przez dane LiDAR (a) oraz z nałożoną ortofotomapą lotniczą na model 3D (b), a także odtworzone miejsce zdarzenia wraz z pozycjami końcowymi pojazdów w oparciu o dane pobrane z Geoportalu Krajowego (c).

Przeprowadzono również kontrolę dokładności modelu wysokościowego utworzonego na podstawie danych pomiarowych LiDAR. Podczas oględzin wykonano pomiar 17 linii przekrojów poprzecznych w odległościach około 20 metrów na odcinku o długości 240 m (120 m w obie strony od miejsca kolizji pojazdów). Pomiar przeprowadzono przy użyciu tachimetru elektronicznego, którego dokładność pomiarowa punktu wynosi 2–3 mm na odległości do 200 m (dokładność w ustalaniu współrzędnych XYZ). Pomierzone poprzeczki w układzie lokalnym tachimetru zostały przetransformowane do tego samego układu odniesienia, który został przyjęty w programie PC-Crash (SLO1/SLO2/SPO).

Rozbieżność pomiędzy pomiarem tachymetrycznym a danymi pomiarowymi LiDAR nie przekraczała 8 cm w układzie pionowym (H) i mieściła się w zakresie

błędu średniego wysokości chmury punktów LiDAR, jak podano w metadanych pliku. Przeprowadzona analiza potwierdza, że dokładność wysokościowa publikowanych danych przestrzennych w geoportalu jest zgodna z oczekiwaniami i spełnia normy jakościowe ustalone dla pomiarów LiDAR.

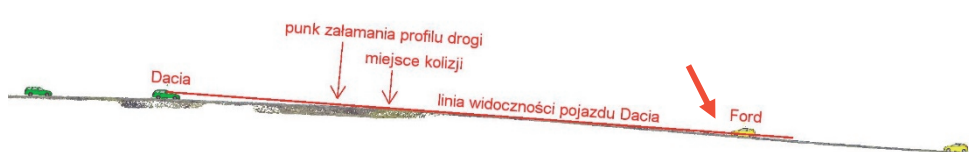
Rekonstrukcja 3D miejsca zdarzenia umożliwiła przeprowadzenie szczegółowej analizy przebiegu wypadku drogowego, w tym ocenę widoczności pojazdów uczestniczących w zdarzeniu przed kolizją. Dzięki trójwymiarowemu modelowi możliwe było przeprowadzenie symulacji, która dokładnie odwzorowuje warunki panujące na drodze w czasie zdarzenia. Analiza widoczności pozwala określić, w jakim miejscu znajdowały się pojazdy uczestniczące w zdarzeniu, z którego kierowcy mogli zauważyć nadjeżdżający z naprzeciwka pojazd (ryc. 15–18). Tego typu analiza jest kluczowa dla ustalenia, jakie były realne możliwości uniknięcia kolizji. Dodatkowo w symulacji uwzględniane jest rzeczywiste ukształtowanie drogi oraz jej otoczenia, które ma istotny wpływ na określanie torów ruchu pojazdów oraz na ich parametry ruchowe (ryc. 19).



Ryc. 15. Linia widoczności poprowadzona od zagłówka przedniego fotela samochodu Dacia przez najwyższy punkt załamania profilu drogi. Odległość pojazdu Dacia od miejsca kolizji wynosi ok. 50 m. Pojazd marki Ford znajduje się poza polem widzenia kierowcy pojazdu marki Dacia.



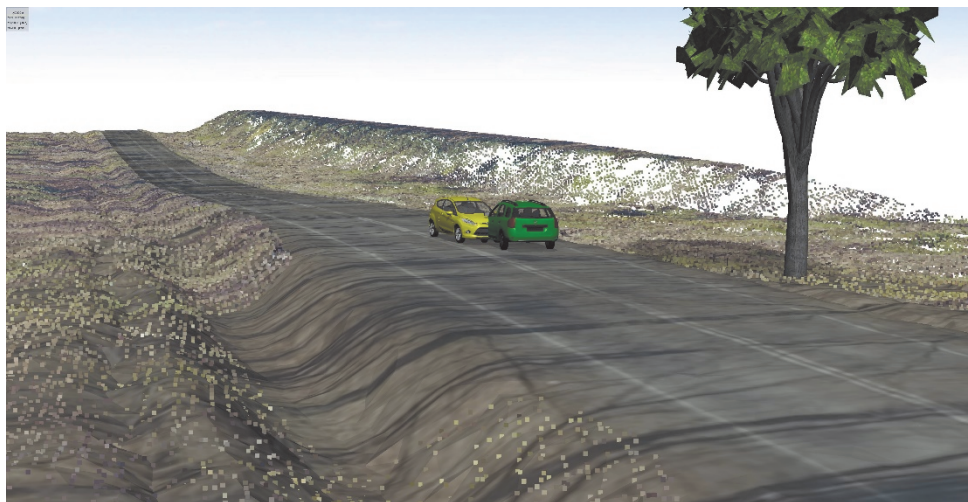
Ryc. 16. Widoczność z pozycji kierowcy pojazdu Dacia w widoku 3D (odległość 50 m).



Ryc. 17. Linia widoczności wyznaczona dla pozycji samochodu Dacia w odległości ok. 30 m od miejsca kolizji.



Ryc. 18. Widoczność z pozycji kierowcy pojazdu Dacia w widoku 3D (odległość 30 m).



Ryc. 19. Pozycja kolizyjna ustalona na podkładzie modelu 3D wykonanym na bazie danych geoprzestrzennych.

5. Konkluzje

Zastosowanie danych geoprzestrzennych dostępnych w Geoportalu Krajowym ma istotny wpływ na jakość rekonstrukcji miejsc zdarzeń drogowych. Bogaty zasób danych portalu, w tym ortofotomapy lotnicze, chmury punktów ALS, numeryczne modele terenu oraz baza danych topograficznych, oferują znacznie większą precyzję i szczegółowość w porównaniu do tradycyjnych metod pomiarowych stosowanych przez Policję. W szczególności integracja różnorodnych formatów danych umożliwia dokładną identyfikację elementów infrastruktury drogowej oraz odtworzenie rzeczywistej topografii terenu, co jest kluczowe w analizie zdarzeń drogowych, zwłaszcza w trudnych warunkach terenowych, takich jak między innymi obszary leśne lub tereny o znacznej deniwelacji.

Powszechnym problemem występującym w rekonstrukcjach wypadków drogowych jest wysoki stopień generalizacji topografii terenu, który wpływa na zmniejszenie dokładności lub błędne określenie położenia istotnych śladów kryminalistycznych, ujawnionych po zdarzeniu. Rekonstrukcja miejsc zdarzeń drogowych oparta na danych pomiarowych LiDAR pozwala na utworzenie dokładnych modeli 3D, które odzwierciedlają rzeczywiste ukształtowanie terenu oraz geometrię drogi. Daje to możliwość naniesienia śladów kryminalistycznych bazując na zdjęciach cyfrowych wykonanych w dniu zdarzenia oraz wykonanej rekonstrukcji 3D miejsca wypadku. Publicznie dostępne dane geoprzestrzenne z geoportalu oferują łatwy dostęp do wysokiej jakości informacji, co może stanowić istotne wsparcie dla biegłych sądowych w procesie analizy i rekonstrukcji zdarzeń drogowych. Wykorzystanie tych danych może przyczynić się do lepszego zrozumienia przyczyn wypadków oraz wspomóc w ustaleniu przebiegu zdarzenia drogowego.

Bibliografia

1. Koźmiński, L., Miś, W., Szplit, L. (2015). *Podstawowe czynności techniczokryminalistyczne podczas oględzin miejsca zdarzenia*. Wydawnictwo Szkoły Policji w Pile.
2. Koźmiński, L., Brzozowska, M., Kościuk, J., Kubisz, W. (2010). Wykorzystanie możliwości nowoczesnego skanowania 3D w oględzinach miejsca zdarzenia i ich dokumentowania. *Problemy Kryminalistyki*, (267), 47–56.
3. ProGea Consulting. (2014). *Opracowanie danych pochodzących z lotniczego skanowania laserowego*. Szkolenia z wykorzystania Produktów LiDAR.

Internet

1. www.gisplay.pl
2. www.geoportal360.pl
3. www.geoportal.gov.pl

* * *

Reconstruction of a road accident scene based on geospatial data from the National Geoportal

Abstract

The purpose of the article is to analyze the potential use of free spatial data available in the National Geoportal to support traffic accident reconstruction. The research focuses on the capabilities and limitations of using LiDAR and orthophotomaps data in the context of reconstructing traffic accident scenes. A comparative methodology was employed, involving the analysis of geospatial data in relation to traditional surveying techniques, exemplified by a real traffic accident analysis using the PC-Crash soft-ware. The main findings of the research indicate high precision of orthophotos and LiDAR data in reproducing the actual topography and elements of road infrastructure. The analysis conducted on a 3D model created from LiDAR data showed that modern measurement techniques allow a more accurate reconstruction of the accident's trajectory and assessment of road visibility conditions. Integrating these data with traditional measurement methods can significantly enhance the standards of forensic experts' work, contributing to an increased accuracy in determining accident scenarios and, more broadly, to a better understanding of accident causes.

Key words

Reconstruction of a traffic accident scene, National Geoportal, LiDAR.