



METODY TELEDETEKCYJNE I FOTOGRAMETRYCZNE W OCHRONIE, KONSERWACJI I INWENTARYZACJI ZAMKÓW W RUINIE

Michał Kędzierski, Rafał Zapłata**, Anna Fryškowska*,
Michalina Wilińska*, Paulina Deliś**

Wstęp

Technologie fotogrametryczne oraz teledetekcyjne stanowią obecnie zestaw komponentów uzupełniający warsztat współczesnych działań na rzecz ochrony, konserwacji oraz dokumentacji dziedzictwa kulturowego, a zwłaszcza dziedzictwa historycznego, architektonicznego i archeologicznego. Metody cyfrowe stały się narzędziem w ręku specjalistów, wpisując w praktykę badawczą szereg nowych form rozpoznawania, dokumentowania, a zarazem analizowania obiektów zabytkowych.

Elementem towarzyszącym zachodzącym zmianom jakościowym oraz technologicznym we współczesnych badaniach dziedzictwa oraz konserwatorstwie, są rysujące się potrzeby oraz konieczność przeformułowania dotychczasowego podejścia do klasycznych form inwentaryzacji, jak również do zasobów dziedzictwa kulturowego. Koniecznym wydaje się zmiana standardów dokumentowania i inwentaryzowania, a zarazem kształcenia przyszłych specjalistów. Niezbędnym elementem w kontekście szeroko stosowanych technologii cyfrowych jest również umiejętność generowania zasobów cyfrowych na potrzeby naukowo-badawcze i konserwatorskie, jak również umiejętność sięgania po istniejące zasoby cyfrowe, a powstające poza środowiskami i instytucjami naukowo-konserwatorskimi (np. projekt ISOK – Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami – szerzej <http://isok.imgw.pl/>).

Poniższy artykuł poświęcony jest metodzie fotogrametrycznej w inwentaryzacji obiektów zabytkowych¹ – ruin zamków, a także przeglądowej charakterystyce zarysowanych we wstępie zagadnień, które stanowią nieodzowny oraz kompleksowy element współczesnych działań na rzecz ochrony, konserwacji i inwentaryzacji dziedzictwa kulturowego, a którego częścią są zamki w ruinie.

Metody teledetekcyjne i fotogrametryczne

Metody teledetekcyjne to najogólniej metody zdalnego, bezdotykowego pozyskiwania informacji o obiektach i zjawiskach, w którym badany obiekt nie wchodzi w bezpośredni kontakt z badającym

* Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie.

** Uniwersytet Kardynała Sterana Wyszyńskiego w Warszawie.

¹ Kędzierski M., Wilińska M., Fryškowska A., 2010, *Opracowanie ortofoto obiektu zabytkowego metodami fotogrametrii bliskiego zasięgu z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Sympozjum naukowe Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji; Gładki M., Czajkowski K., 2004, *Zastosowanie cyfrowej fotogrametrii naziemnej w dokumentacji archeologicznej i architektonicznej*, (w:) Monument. Studia i Materiały Krajowego Ośrodka Badań i Dokumentacji Zabytków, Warszawa, s. 37-57.

sensorem. Wyróżnia się dwa typy technik teledetekcyjnych: pasywne i aktywne. Technika pasywna dotyczy rejestracji promieniowania emitowanego, w tym odbitego, przez źródła zewnętrzne – obiekty, natomiast technika aktywna związana jest z wysyłaniem promieniowania elektromagnetycznego przez sensor, a następnie rejestracją fal odbitych. Do obrazowych danych teledetekcyjnych, pozyskanych w wyniku zastosowania technik pasywnych zaliczamy: zobrazowania panchromatyczne, wielospektralne czy hemisferyczne. Natomiast dane pozyskiwane w wyniku zastosowania technik aktywnych to m. in. zobrazowania radarowe (Radar – ang. *Radio Detection and Ranging*) oraz dane lidarowe (akronim LIDAR – ang. *Light Detection and Ranging*).²

Lotniczy skaniny laserowy, określany również akronimem ALS (ang. *Airborne Laser Scanning*), to metoda polegająca na pomiarze czasu powrotu wiązki laserowej, a następnie określeniu odległości pomiędzy sensorem a innymi obiektami w przestrzeni. Na podstawie bardzo precyzyjnie obliczonej chwilowej pozycji aparatury rejestrującej możliwe jest określenie pozycji skanowanych obiektów z dużą, sięgającą pojedynczych centymetrów dokładnością, co m. in. pozwala na dokumentację powierzchni terenu (Numeryczny Model Terenu) – np. otoczenia zamku, z dokładnością kilku centymetrów, umożliwiając tym samym rejestrację pozostałości zniszczonych zespołów zabytkowych i ich elementów. Technologie skaniny laserowego w literaturze przedmiotu dzielone są ogólnie na: lotniczy skaniny laserowy, (akronim ALS od ang. *Airborne Laser Scanning*), satelitarny skaniny laserowy (akronim SLS od ang. *Satellite Laser Scanning*) oraz naziemny skaniny laserowy (akronim TLS od ang. *Terrestrial Laser Scanning*).³ Podstawową zaletą skanowania LIDAR jest możliwość opracowania danych dla terenów trudno dostępnych, zalesionych i pokrytych szatą roślinną, która w znacznym stopniu utrudnia bezpośrednią obserwację powierzchni terenu, a tym samym obserwację obiektów zabytkowych.

Elementem komplementarnym współczesnej dokumentacji są głównie dane pozyskiwane z pułapu lotniczego, w tym: cyfrowe zdjęcia lotnicze, pozwalające m. in. na szerokie, nieinwazyjne rozpoznanie kontekstu obiektów zabytkowych, a także na nowoczesne rozwiązania kartograficzne w oparciu o fotogrametrię dalekiego zasięgu (szerzej na ten temat Nowakowski J., Prinke A., Rączkowski W. 2005; Rączkowski 2002).

Kompleksowe zastosowanie technologii teledetekcyjnych

W podejściu do zamków w ruinie wraz z najbliższym otoczeniem, konieczne wydaje się uwzględnienie potencjału, jaki niosą ze sobą wyżej wymienione techniki, które łącznie mogą stanowić kompleksowy system rozpoznawania, dokumentowania oraz analizowania dziedzictwa historycznego. Wsparcie się wysokorozdzielczymi zobrazowaniami satelitarnymi, zarówno panchromatycznymi jak i wielospektralnym, umożliwia obecnie rozpoznanie otoczenia oraz okolicy założeń architektonicznych, wraz z nieinwazyjnym dokumentowaniem wziemnych obiektów zabytkowych, składających się na kontekst samego zamku czy założeń architektonicznych z przeszłości.

Natomiast lotnicza dokumentacja fotograficzna, wraz z lotniczym skanowaniem laserowym, stanowią z jednej strony wsparcie dla interpretacji danych satelitarnych, a zarazem są kolejnym źródłem informacji na temat najbliższego otoczenia zamków, wraz z dokładnym, metrycznym rozpoznaniem terenu, na którym znajduje się obiekt zabytkowy. Zwłaszcza lotniczy skaniny laserowy, stanowi współ-

² Sławik Ł., Zapłata R., LIDAR w archeologii – zagadnienia wprowadzające, (w:) Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego – wybrane zagadnienia, red. R. Zapłata, Lublin 2011, s. 207-232. <http://wiedzaiedukacja.eu/archives/55353> [dostęp 01.02.2012].

³ Wężyk P., Wprowadzenie do technologii skaniny laserowego w leśnictwie, Rocznik Geomatyki, t. IV, z. 4, 2006, s. 119-132.

czesne narzędzie, umożliwiające przede wszystkim dokumentację za pomocą nieinwazyjnego pomiaru terenów zalesionych, co sprzyja wykonaniu uzupełniającej dokumentacji licznych obiektów zabytkowych, które znajdują się na terenach zalesionych lub też pokrytych gęsto szatą roślinną. Przykładem zastosowania lotniczego skaningu laserowego mogą być pomiary wykonane w Ilży, które stanowią podstawę zadokumentowania stanu zachowania wzniesienia, na którym znajdują się ruiny zamku. Pomiar został wykonany z dokładnością 12 punktów na m², stanowiąc tym samym podstawę do wygenerowania modelu powierzchni terenu, celem zintegrowania tych danych z naziemnym skanowaniem laserowym oraz uzyskania szczegółowej dokumentacji obiektu zabytkowego wraz z otoczeniem. Powyższy przykład to również próba podjęcia się rejestracji i analizy procesów osuwiskowych, stanowiących realne zagrożenie dla samego obiektu oraz jego otoczenia.

Naziemny skanowanie laserowe, to kolejna technika, która wpisuje w praktykę naukowo-badawczą i konserwatorską narzędzie generujące dokładny, bezdotykowy pomiar, a zarazem wyznacza nową jakość inwentaryzacji obiektów zabytkowych. Przykładem tego typu działań są m.in. pomiary wykonane dla ruin zamku w Ilży (szerzej w tym tomie: Kędzierski Michał, Zapłata Rafał, Fryškowska Anna, Wilińska Michalina, Deliś Paulina).

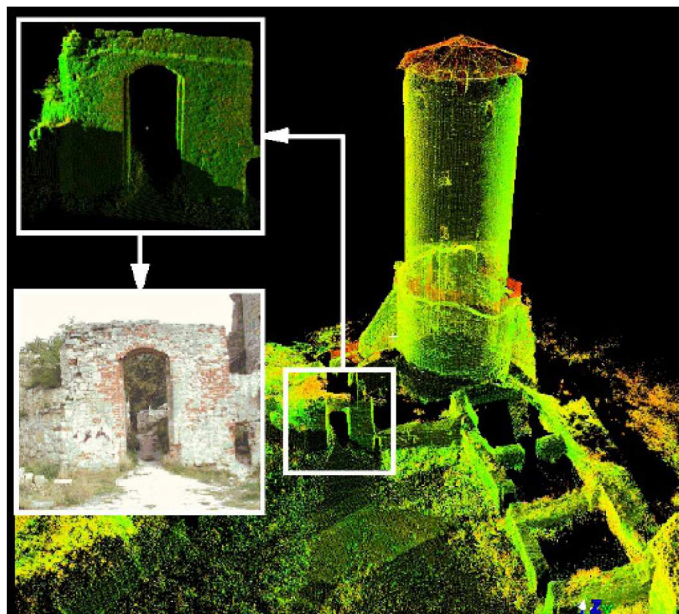
Fotogrametria – runiny zamku w ilży

Wyżej opisane nieinwazyjne naziemne pomiary laserowe uzupełnia równolegle tradycyjna technika fotogrametryczna, stanowiąca element komplementarny w całościowym systemie dokumentowania ruin zamku wraz z otoczeniem. W 2011 r. w wyniku podjętych działań ze strony Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie oraz Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie, wykonane zostały pomiary ruin zamku w Ilży i otoczenia (stan. 6, AZP 79-68/8, woj. mazowieckie – obiekt wpisany do rejestru zabytków (nr rej.: 23 z 24.03.1974, 156 z 23.06.1967 oraz 96/A z 18.03.1981 – szerzej w tym tomie: Kędzierski Michał, Zapłata Rafał, Fryškowska Anna, Wilińska Michalina, Deliś Paulina) – pomiary nieinwazyjne w celu przeprowadzenia inwentaryzacji oraz analiz archeologiczno-architektonicznych. Na podstawie wyników pomiarów dokonano opracowania fotogrametrycznego wybranych fragmentów obiektu zabytkowego.

Wysokorozdzielcza dokumentacja fotogrametryczna ruin zamku w Ilży, to z jednej strony metoda pozyskiwania obrazów cyfrowych obiektów zabytkowych, a także niezależna metoda inwentaryzacji, pozwalająca uzyskać dokumentację 3D oraz 2D wraz z fotoplanami cyfrowymi.⁴

Obiekt ruin zamku zeskanowano z wykorzystaniem naziemnego skanera laserowego *Leica ScanStation 2* z siedmiu stanowisk pomiarowych, z rozdzielczością 10 mm. Do opracowania przyjęto chmurę punktów przedstawiającą fragment obiektu zabytkowego – przejście prowadzące z dziedzińca zamku do klatki schodowej wieży zamku (rys. 1).

⁴ Beraldin, J. A., *Integration of Laser Scanning and Close range Photogrammetry – the Last Decade and Beyond*. Proceedings of the XXIth ISPRS Congress, Commission VII, Istanbul, Turkey, 2004, s. 972-983.



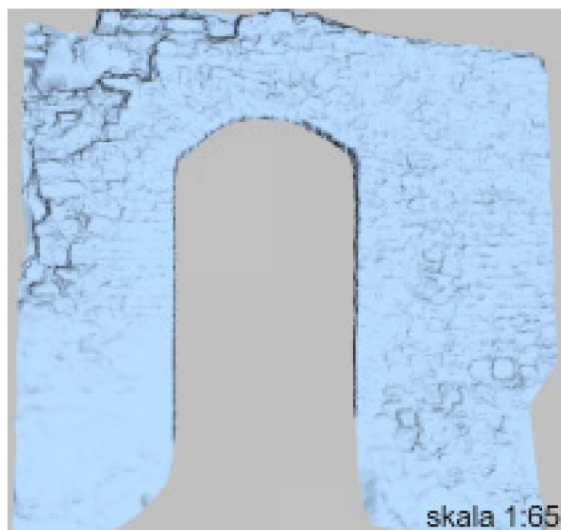
Rys. 1. Wizualizacja pozyskanej chmury punktów wraz z fragmentem obiektu zabytkowego – element wybranym do opracowania fotogrametrycznego.

Zdjęcia obiektu wykonane zostały kamerą cyfrową *Kodak DCS 14n Pro* z matrycą o rozdzielczości 13.5 miliona pikseli i wymiarach 36 mm × 24 mm, obiektywem *Nikon AF Nikkor* o ogniskowej 24 mm. Kamera umieszczona została na statywie, a zdjęcia wykonane zostały z dwóch stanowisk oddalonych od siebie o 1.85 m. Do opracowania przyjęto stereoparę pozyskaną z odległości 15 metrów od obiektu.

W pierwszej kolejności wykonana została rejestracja chmur punktów, czyli ich transformacja do jednego wspólnego układu współrzędnych.⁵ Została ona wykonana w pełni automatycznie, dzięki skanom specjalnych tarcz celowniczych. Błąd średni rejestracji wszystkich chmur punktów wyniósł ± 3 mm. Utworzone w ten sposób zbiory punktów ze względu na ich nałożenie się na siebie charakteryzowały się rozdzielczością równą około 5 mm.

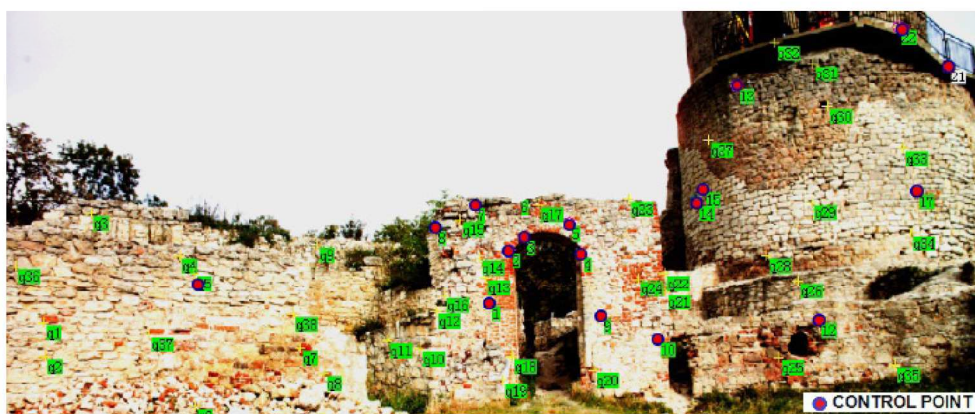
Tak połączone ze sobą chmury punktów stanowiły podstawę do utworzenia numerycznego modelu powierzchni obiektu, który wykorzystany został do procesu ortorektyfikacji. Ze względu na nieregularny kształt budowli, składającej się z cegieł, piaskowca i wapienno-pisakowych wypełnień między nimi, konieczne było zamodelowanie powierzchni obiektu z wykorzystaniem poligonów siatki TIN (ang. *Triangulated Irregular Network*). Siatka TIN została utworzona w oprogramowaniu *Topcon Image Master 2.0*. na podstawie chmur punktów o rozdzielczości 5 mm. Model wykonany na podstawie chmur punktów przedstawiony został na rysunku 2.

⁵ Rusinkiewicz S., Levoy M., *Efficient variant of the ICP algorithm*. Proceedings of 3-D Digital Imaging and Modelling.



Rys. 2. Model TIN wygenerowany na podstawie chmury punktów.

Kolejnym etapem opracowania była terratriangulacja pozyskanych zdjęć cyfrowych. Wykonana została również w oprogramowaniu *Topcon Image Master 2.0*. Osnowę fotogrametryczną stanowiły fotopunkty, których współrzędne pozyskane zostały z zarejestrowanych chmur punktów. Zlokalizowano je na szczegółach terenowych zeskanowanych z rozdzielczością poniżej 1 mm. Ostatecznie do opracowania wybrano 16 fotopunktów zlokalizowanych jak na rysunku 3. Wyrównanie przeprowadzono metodą niezależnych wiązek.



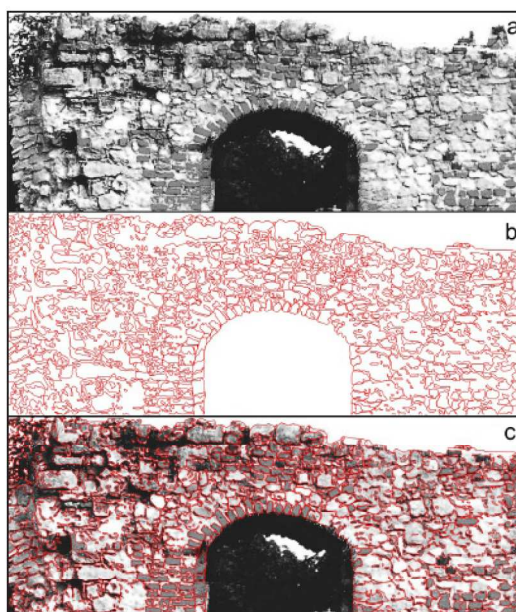
Rys. 3. Rozmieszczenie fotopunktów i punktów wiążących.

Po zakończeniu terratriangulacji przystąpiono do generowania ortoobrazów. W etapie tym wykorzystano modele wektorowe w postaci siatek TIN. Wymiar piksela ortoobrazów ustalono na 1 mm. Do generowania ortoobrazu wykorzystano lewe zdjęcie stereopary oraz zastosowano funkcję wyrównania tonalnego obrazu. Finalny ortoobraz został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Wygenerowany ortoobraz.

Następnie, na bazie tak powstałego ortoobrazu, utworzono rysunek wektorowy wybranego fragmentu ruin zamku – przejście z dziedzińca do klatki schodowej, prowadzącej na wieże zamku (Rys. 5). Tak utworzony szkic obiektu może stanowić komplementarną część dokumentacji architektonicznej.



Rys. 5. a) Fragment ortoobrazu; b) Rysunek wektorowy; c) Rysunek hybrydowy.

Podsumowanie

Poza omówionym wyżej zastosowaniem danych cyfrowych, które służą m.in. do rozpoznawania dziedzictwa kulturowego oraz generowania dokumentacji architektonicznej czy archeologicznej, należy dodać, że dane cyfrowe stanowią podstawę dalszych analiz obiektów oraz substancji zabytkowej. Przykładem może być m.in. rozpoznawanie zniszczeń oraz ubytków obiektów zabytkowych, poprzez analizę dokładnych pomiarów laserowych (dalekiego zasięgu, a zwłaszcza bliskiego zasięgu) czy fotogrametrycznych. Nową informację o substancji zabytkowej wprowadza również analiza danych pomiarowych, pozyskanych w wyniku przeprowadzenia naziemnego skaningu laserowego, który rejestruje również natężenie powracającego sygnału, umożliwiając tym samym dokumentację zróżnicowanych surowców i wypełnisk zabytkowych.

Odnosząc się do zaproponowanych przez Polski Komitet Narodowy ICOMOS „Zasadach ochrony ruin historycznych”⁶, gdzie czytamy, iż „Ochrona ruin historycznych powinna mieć charakter kompleksowy – powinna obejmować zachowane mury, formy ziemne (będące relikami dawnych umocnień), nawarstwienia gruzowe oraz krajobraz (którego elementem są ruiny), a zarazem sięgając do istniejących zaleceń w zakresie digitalizacji obiektów zabytkowych⁷, proponujemy nowoczesne oraz komplementarne podejście do rozpoznania, rejestracji oraz analizy historycznych ruin, wraz z ich otoczeniem, poprzez włączenie do działań naukowo-badawczych i konserwatorskich szerokiego wachlarza metod teledetekcyjnych.

Podsumowując, warto również dodać, że cyfrowa replika zabytku – forma zdigitalizowana, to podstawy współczesnej wizualizacji, a co z tym związane, fundament nowoczesnej popularyzacji i prezentacji dziedzictwa narodowego. Kompleksowe zastosowanie metod teledetekcyjnych, to również skierowanie działań w stronę „cyfryzacji przestrzeni otwartych”⁸, a więc całych zespołów zabytkowych, wraz z otoczeniem.

Literatura

- Gładki M., Czajkowski K., 2004, *Zastosowanie cyfrowej fotogrametrii naziemnej w dokumentacji archeologicznej i architektonicznej*, (w:) Monument. Studia i Materiały Krajowego Ośrodka Badań i Dokumentacji Zabytków, Warszawa, s. 37 – 57.
- Kędzierski M., Wilińska M., Fryškowska A., 2010, *Opracowanie ortofoto obiektu zabytkowego metodami fotogrametrii bliskiego zasięgu z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Sympozjum naukowe Polskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji.
- Nowakowski J., Prinke A., Rączkowski W. (red.), 2005, *Biskupin... i co dalej? Zdjęcia lotnicze w polskiej archeologii*, Poznań.

⁶ Zasady ochrony ruin historycznych zaaprobowane przez uczestników konferencji w Ciechanowcu 22-24.10.2009 r. „Zamki, grody, ruiny – waloryzacja i ochrona”, 2009, Warszawa: Polski Komitet Narodowy ICOMOS.

⁷ Zalecenia dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie, Zespół ekspertów powołany przez Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów: Eryk Bunsch, Piotr Jamski, Tomasz Kalota, Lidia Karecka, Marcin Kłos, dr Jacek Marciniak, dr Cezary Mazurek, dr hab. Robert Sitnik, Marcin Szala, Marcin Werla, dr Tomasz Zaucha ze strony NIMOZ: Anna Kuśmidrowicz-Król, Redakcja: Daniela Galas, Warszawa 2011: Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów.

⁸ Markiewicz W., 2011, *Cyfryzacja przestrzeni otwartych*, (w:) *Problemy cyfryzacji zasobów muzeów, bibliotek i archiwów*, Warszawa, s. 148-152.

- Płoszajski G. (red.), 2008, *Standardy w procesie digitalizacji obiektów dziedzictwa kulturowego*, Warszawa.
- Rączkowski W., 2002, *Archeologia lotnicza – metoda wobec teorii*, Poznań.
- Sławik Ł., Zapłata R., 2011, *LIDAR w archeologii – zagadnienia wprowadzające*, (w:) *Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego – wybrane zagadnienia*, red. R. Zapłata, Lublin, s. 207-232. <http://wiedza-iedukacja.eu/archives/55353> [dostęp 01.02.2012].
- Standardy metodyczne i dokumentacyjne badań archeologicznych i opracowań ich wyników. Wytyczne opracowane przez KOBiDZ w konsultacji z Kolegium Doradczym ds. archeologii przy Dyrektora KOBiDZ, „Kurier Konserwatorski”, nr 6, 2010, s. 40-49.*
- Wężyk P., 2006, *Wprowadzenie do technologii skaningu laserowego w leśnictwie*, *Rocznik Geomatyki*, t. IV, z. 4, s. 119-132.
- Zalecenia dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie, Zespół ekspertów powołany przez Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów: Eryk Bunsch, Piotr Jamski, Tomasz Kalota, Lidia Karecka, Marcin Kłós, dr Jacek Marciniak, dr Cezary Mazurek, dr hab. Robert Sitnik, Marcin Szala, Marcin Werla, dr Tomasz Zaucha ze strony NIMOZ: Anna Kuśmidrowicz-Król, Redakcja: Daniela Galas, Warszawa 2011: Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów.*
- Beraldin, J. A., *Integration of Laser Scanning and Close range Photogrammetry – the Last Decade and Beyond*. Proceedings of the XXIth ISPRS Congress, Commission VII, Istanbul, Turcja, 2004, s. 972-983
- Rusinkiewicz S., Levoy M., *Efficient variant of the ICP algorithm*. Proceedings of 3-D Digital Imaging and Modelling.



DOKUMENTACJA I MODELOWANIE 3D RUIN ZAMKU W IŁŻY

Michał Kędzierski, Rafał Zapłata**, Anna Fryśkowska*,
Michalina Wilińska*, Paulina Deliś**

1. Wstęp

Nawiązując m.in. do zaproponowanych przez Polski Komitet Narodowy ICOMOS „Zasad ochrony ruin historycznych”¹ włączenie technologii cyfrowych do działań konserwatorskich oraz naukowo-badawczych wydaje się sprawą oczywistą, gdyż zgodnie z zapisami ww. zasad, nowoczesne metody stwarzają szereg nowych możliwości w zakresie dokumentowania oraz analizowania substancji zabytkowej. Cyfrowe dokumentacje trójwymiarowe to współcześnie również element szeroko rozumianego procesu inwentaryzowania, utrwalania oraz zabezpieczania „historycznej substancji przed procesami niszczącymi”, wychodzący poza metody analogowe. Cyfrowe modele narodowego zasobu zabytków to również nowoczesna forma udostępniania i promowania dziedzictwa kulturowego². M.in. powyższe spostrzeżenia stoją u podstaw podjętych działań nieinwazyjnych, mających na celu wdrażanie oraz stosowanie w badaniu i ochronie zabytków technologii teledetekcyjnych, przede wszystkim skanowania laserowego oraz fotogrametrii.

W 2011 r. zespół z Uniwersytetu Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie oraz Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie podjął wspólne działania o charakterze prac nieinwazyjnych (archeologiczno-architektonicznych) – pomiarów teledetekcyjnych ruiny zamku w Iłży (stan. 6, AZP 79-68/8, woj. mazowieckie), obiektu wpisanego do rejestru zabytków (nr rej.: 23 z 24.03.1974, 156 z 23.06.1967 oraz 96/A z 18.03.1981).

Zastosowanie ww. metod dokumentowania oraz modelowania obiektu zabytkowego jest zagadnieniem istotnym m.in. z perspektywy badań archeologicznych, architektonicznych czy działań współczesnego konserwatorstwa. Pozwalający się zarejestrować i zaobserwować stan obiektu m.in. w wyniku dokładnego pomiaru laserowego, wraz z jego najbliższym otoczeniem, a zarazem nawarstwieniami, stanowi punkt wyjścia do dalszych prac o charakterze oceny procesów destrukcyjnych omawianego obiektu, jak również procesów depozycyjnych i podepozycyjnych substancji zabytkowej, a także analizy nawarstwień.

* Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego w Warszawie.

** Uniwersytet Kardynała Sterana Wyszyńskiego w Warszawie.

¹ Zasady ochrony ruin historycznych zaaprobowane przez uczestników konferencji w Ciechanowcu 22-24.10.2009 r. „Zamki, grody, ruiny – waloryzacja i ochrona”, 2009, Warszawa: Polski Komitet Narodowy ICOMOS.

² Zapłata R., 2011, Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego – wybrane zagadnienia. Wprowadzenie, (w:) Digitalizacja dziedzictwa archeologicznego – wybrane zagadnienia, red. R. Zapłata, Lublin, s. 8-43. <http://wiedzaiedukacja.eu/archives/55353> [dostęp 01.02.2012].

Poniżej prezentujemy wybrane oraz wstępne wyniki działań, stanowiących rezultat bezdotykowych pomiarów teledetekcyjnych ruin zamku w Iłży, a także prac odnoszących się do projektu naukowego „Zastosowanie skaningu laserowego oraz teledetekcji w ochronie, badaniu i inwentaryzacji dziedzictwa kulturowego. Opracowanie nieinwazyjnych, cyfrowych metod dokumentacji i rozpoznawania zasobów dziedzictwa architektonicznego i archeologicznego” w ramach Narodowego Programu Rozwoju Humanistyki.

2. Zamek i ruiny zamku

Zamek w Iłży to obiekt, którego budowę rozpoczęto ok. 1340 r. z inicjatywy biskupa krakowskiego Jana Grota, pełniący rolę rezydencji obronnej biskupów krakowskich, a zarazem centrum administracyjnym klucza majątkowego. Obiekt wzniesiono przede wszystkim z łamanego kamienia, układanego warstwami połączonymi zaprawą wapienną. Zamek zajmujący ok. 1500 m² wzniesiono na stromym wzgórzu, na planie nieregularnego owalu. Całość składała się z wieży obronnej, połączonej z obwodem murów i domu mieszkalnego (od strony północno-zachodniej). Ok. 1370 roku zamek został rozbudowany przez biskupa Floriana z Mokrska. Kolejne przebudowy i zmiany wiążą się z XV w., kiedy wzmocniono bramę wjazdową, a także z I poł. XVI w., kiedy Jan Konarski zajął się odbudową zamku po pożarze. Ok. 1560 roku ma miejsce rozbudowa zamku przez Filipa Padniewskiego, który ostatecznie za sprawą Marcina Szyszkowskiego (ok. 1618 r.) zmienia się w renesansową rezydencję obronną. W I poł. XVII wieku pojawia się kolejny element obronny – beluard, z kurtyną północną i basteją północno-zachodnią. Po potopie szwedzkim zamek jest odbudowany w 1670 roku, a następnie kilkakrotnie remontowany i przebudowywany, aż do ok. 1782 r. – za czasów ostatniego właściciela Iłży Kajetana Sołtyka. Od 1789 roku zamek przeszedł w ręce państwa, pełniąc m.in. w XIX w. funkcję szpitala wojskowego, popadając stopniowo w ruinę³.

Obecnie obiekt składa się z dwóch głównych elementów: zamku górnego oraz dolnego. Pozostałości zamku górnego to: wieża na planie kolistym znajdująca się we wschodnim narożu i mur obwodowy, o przebiegu zbliżonym do trójkąta z zaokrąglonymi narożnikami; zespół bramny (od strony zachodniej) z przejazdową wieżą na planie czworoboku, którą poprzedzał pierwotnie most wspierający się na filarach; cokoły wieży bramnej, które posiadają oblicowania z czworokątnych płyt; częściowo zachowana zabudowa wewnętrzna, która przylega do obwodu murów – są to pomieszczenia na planie czworokąta, w jednoraktowym układzie; dwie piwnice sklepionych kolebkami (południowa strona dawnego wjazdu); mury nowożytnego klatki schodowej (przy przejeździe bramnym), która prowadziła na poziom nieistniejącego obecnie piętra; pozostałości zabudowy z dawnym przejściem do schodów na wieżę (południowa strona dawnego wjazdu) oraz dziedziniec zamkowy brukowany kamieniem, z zachowanym zabytkowym brukiem (część południowa)⁴.

Zamek wzniesiony został z jasnobieżowego i szarozielonego piaskowca oraz wapienia o charakterze muszlowca, a także wapienia marglistego, spojenych zaprawą wapienno-piaskową. Mur obwodowy oblicowany jest ciosami ułożonymi warstwami o jednorodnym układzie horyzontalnym, zdarzają się też

³ Lechowicz Z., 2011, *Zamek górny w Iłży w świetle konserwatorskich badań architektoniczno-archeologicznych wykonanych w 2009 roku*, (w:) *Iłża miasto biskupów krakowskich na tle regionu. Materiały z sesji naukowej poświęconej dziejom regionu iłżeckiego pod tytułem „Przeszłość w służbie przyszłości”*, Iłża, s. 35-76; Lewicki J., 1997, *Dzieje i architektura zamku w Iłży* [w:] *Siedziby Biskupów Krakowskich na terenie dawnego województwa krakowskiego*, red. L. Kajzer, Kielce, s. 57-71.

⁴ Salm J., 2011, *Problematyka konserwatorska dawnego zamku biskupów krakowskich w Iłży*, (w:) *Iłża miasto biskupów krakowskich na tle regionu. Materiały z sesji naukowej poświęconej dziejom regionu iłżeckiego pod tytułem „Przeszłość w służbie przyszłości”*, Iłża, s. 127-140.

fragmenty o nieregularnym układzie. Tak samo jest w wypadku murów zabudowy. Oprócz kamienia użyto również cegły, bądź wtórnie wykorzystanej lub też użytej do modernizacji zamku. W skrzydle południowym i północno-zachodnim odnotowano obecność historycznych tynków, posadzek ceramicznych, kamiennych bruków. „In situ” przetrwała także kamieniarka dolnych partii ościeży otworów, łączących się z pomieszczeniami w przyziemiu skrzydła południowego⁵.

Wieżę zamkową, a także mury obwodowe zamku górnego zbudowano z wapienia marglistego, muszlowego, oolitowo-muszlowego, drobnodziarnistego⁶. Do ich łączenia użyto zaprawy wapienno-piaskowej, która zawiera niewielkie okruchy wapienia marglistego, co świadczy przede wszystkim o tym, że wapno także wypalano ze złoża wapieni miejscowych⁷. Jak pisze Z. Lechowicz „W najstarszej fazie średniowiecznego zamku (wieża, mury obwodowe) użyto wyłącznie kamienia wapiennego, brak jest natomiast cegły ceramicznej. Przy wznoszeniu muru obwodowego zastosowano *opus emplectum* zbliżoną do *opus incertum* (kamień układany warstwami, staranne oblicowanie, środek – kamień nie poddany obróbce). Dla utrzymania poziomów warstw stosowano mniejsze płyty wapienne. Do łączenia użyto dużej ilości zaprawy wapiennej”⁸.

Kolejne rozbudowy, odbudowy oraz przebudowy zamku to widoczne gołym okiem odmienne od wcześniejszych, a zarazem różnorodne techniki wznoszenia ścian, powstałych m.in. w oparciu o materiał rozbiórkowy, a także budowanych z cegły, która prawdopodobnie była używana już we wczesnych etapach budowy zamku⁹.

Obecny stan zachowania obiektu skłania do podejmowania wszelkich działań na rzecz ochrony zabytku¹⁰, a zarazem dostosowania metod teledetekcyjnych, celem stworzenia cyfrowej inwentaryzacji oraz rozpoznania procesów destrukcji, mogących zapobiec dalszej degradacji ruin zamku. Poniżej przedstawiamy wybrane zagadnienia zastosowania bezdotykowych metod pomiarowych, a zwłaszcza pewne aspekty dokumentacji i modelowania 3D obiektu zabytkowego, wraz z wstępną analizą ubytków oraz analizą wartości intensywności powracającego sygnału, która stwarza nowe możliwości poznawcze tego typu obiektów w badaniach archeologiczno-architektonicznych, kierując pracę w stronę nowoczesnej stratygrafii obiektów zabytkowych – stratygrafii struktur stojących¹¹.

⁵ Salm J., 2011, *Problematyka konserwatorska dawnego zamku biskupów krakowskich w Ilży*, (w:) *Ilża miasto biskupów krakowskich na tle regionu. Materiały z sesji naukowej poświęconej dziejom regionu iłżeckiego pod tytułem „Przeszłość w służbie przyszłości”*, Ilża, s. 127-140 (131).

⁶ Krystek M., 2011, *Petrografia surowców skalnych na zamku w Ilży i na zamku w Radomiu. Przyczynek do poznania surowców skalnych zamków w Ilży i Radomiu*, (w:) *Ilża miasto biskupów krakowskich na tle regionu. Materiały z sesji naukowej poświęconej dziejom regionu iłżeckiego pod tytułem „Przeszłość w służbie przyszłości”*, Ilża, s. 17-34.

⁷ Fijałkowska E., Fijałkowski J., 1973, *Surowce skalne użyte przy budowie zamku w Ilży*, „Zeszyty Przyrodnicze Muzeum Świętokrzyskiego w Kielcach”, nr 1, s. 1-22.

⁸ Lechowicz Z., 2011, *Zamek górny w Ilży w świetle konserwatorskich badań architektoniczno-archeologicznych wykonanych w 2009 roku*, (w:) *Ilża miasto biskupów krakowskich na tle regionu. Materiały z sesji naukowej poświęconej dziejom regionu iłżeckiego pod tytułem „Przeszłość w służbie przyszłości”*, Ilża, s. 35-76.

⁹ Fijałkowska E., Fijałkowski J., 1973, *Surowce skalne użyte przy budowie zamku w Ilży*, „Zeszyty Przyrodnicze Muzeum Świętokrzyskiego w Kielcach”, nr 1, s. 1-22.

¹⁰ Lewicki J., 2009, *Aktualne problemy konserwatorskie zamków biskupów krakowskich*, (w:) *Zamki, grody, ruiny. Waloryzacja i ochrona*, red. M. A. Lewicka, Warszawa-Białystok, s. 171-187.

¹¹ Davies M., 1993, *The application of the Harris Matrix to the recording of standing structures*, (w:) *Practices of archaeological stratigraphy*, E. R. Harris, M. R. Brown, G. J. Brown (red.), London, s. 167-180.

3. Pozyskanie danych teledetekcyjnych i fotogrametrycznych

Naziemny Skanining Laserowy (akronim NSL) jest technologią, która umożliwia wykonanie w pełni automatycznego bezdotykowego pomiaru obiektu przestrzennego poprzez skanowanie jego powierzchni. W wyniku pomiaru otrzymuje się zbiór punktów o znanych współrzędnych XYZ, tzw. „chmurę punktów” wraz z informacją o intensywności powracającego sygnału. W oparciu o tak dużą liczbę punktów możliwe jest odtworzenie geometrii obiektu w postaci trójwymiarowych modeli, rysunków wektorowych, czy przekrojów. Opracowane na podstawie danych z NSL produkty charakteryzują się dużą szczegółowością i dokładnością, sięgającą do kilku milimetrów. Szczególnie istotny z punktu widzenia historyków architektury, architektów czy konserwatorów jest fakt, że zarówno wyżej wymienione produkty jak i nieprzetworzone dane z NSL mogą być eksportowane do plików systemów typu CAD („*.dxf”, „*.dgn” itp.).

Produkty NSL mogą być wykorzystane przez architektów i konserwatorów zabytków, np. do odtworzenia stanu faktycznego obiektu sprzed renowacji czy wizualizacji geometrii obiektu¹². Ponadto, informacja o intensywności odbicia wiązki lasera umożliwia przeprowadzenie złożonych analiz budowy i składu materiału, z jakiego wykonany jest obiekt¹³.

Naziemny Skanining Laserowy zamku górnego w Iłży, wraz z wieżą został wykonany w 2011 roku. Zasadnicze prace oraz pomiary zostały przeprowadzone na tzw. zamku górnym, a obiektami pomiarów były: wieża zamku górnego; ramiona muru obwodowego; pozostałości zamku górnego: dziedziniec wraz z zachowanym, oryginalnym brukiem kamiennym w części południowej oraz w części zrekonstruowanym; fragmentarycznie zachowane pomieszczenia znajdujące się przy murze obwodowym.

W pomiarach wykorzystano skaner laserowy Leica ScanStation2. Jest to skaner impulsowy, dla którego maksymalny zasięg pomiaru wynosi 300 m. Skaner ten posiada pełne poziome (360°) i pionowe (270°) pole widzenia. Urządzenie umożliwia pozyskanie chmury punktów o gęstości mniejszej od 1 mm. Maksymalna szybkość skanowania wynosi 50 000 punktów na sekundę. Skaner osiąga dokładność wyznaczenia położenia punktu do 6 milimetrów i odległości do 4 milimetrów, co jest szczególnie przydatne przy precyzyjnych pomiarach niewielkich elementów architektonicznych. Skaner posiada również wbudowaną kamerę cyfrową o rozdzielczości 6,4 mln pikseli.

Pomiary zamku górnego zostały wykonane z 7 stanowisk pomiarowych skanera (rys. 1).

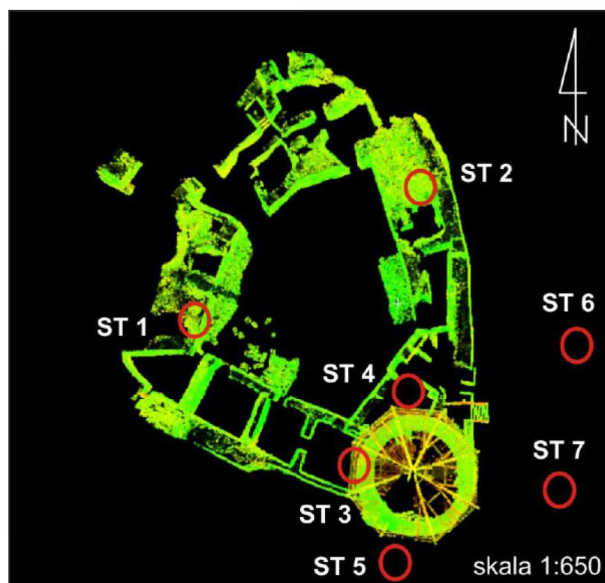
W celu stworzenia jak najdokładniejszej dokumentacji obiektu zabytkowego, stanowiska pomiarowe skanera powinny być rozmieszczone wokół obiektu podlegającego pomiarom, z zapewnieniem możliwości pozyskania jak największej ilości danych¹⁴. Planując rozmieszczenie stanowisk należy pamiętać również o zapewnieniu odpowiedniego pokrycia pomiędzy poszczególnymi chmurami punktów. Wraz z obiektem, zeskanowano także grupę odpowiednio rozmieszczonych na obiekcie tarcz celowniczych HDS. Stanowią one charakterystyczne punkty, które są widoczne jednocześnie z kilku stanowisk skanera. Chmura punktów z każdego stanowiska powinna zawierać co najmniej trzy pomierzone tarcze HDS. Pozwala to na połączenie chmur punktów i sprowadzenie ich do jednego układu współrzędnych, co odbywa się w tzw. procesie rejestracji chmur punktów, stanowiącym pierwszy etap obróbki danych

¹² A. Fryškowska, M. Kędzierski, P. Walczykowski, J. Sanecki, *Laser scanning of cultural heritage objects*, Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 17 No. 1C, str. 27-30, 2008

¹³ M. Kędzierski, A. Fryškowska, R. Dąbrowski, M. Wilińska, *Naziemne skanowanie laserowe w technologii HDS obiektów sakralnych*, Wiadomości Konserwatorskie 2009,

¹⁴ *Zalecenia dotyczące planowania i realizacji projektów digitalizacyjnych w muzealnictwie*, Zespół ekspertów powołany przez Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów: Eryk Bunsch, Piotr Jamski, Tomasz Kalota, Lidia Karecka, Marcin Kłos, dr Jacek Marciniak, dr Cezary Mazurek, dr hab. Robert Sitnik, Marcin Szala, Marcin Werla, dr Tomasz Zaucha ze strony NIMOZ: Anna Kuśmidrowicz-Król, Redakcja: Daniela Galas, Warszawa 2011: Narodowy Instytut Muzealnictwa i Ochrony Zbiorów.

z NSL. Dodatkowo, w celu zapewnienia jak największej dokładności pomiarów, odległość skanera od obiektu nie powinna przekraczać 200 m.



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk naziemnego skanera laserowego.

Uzupełnienie danych ze skaningu laserowego stanowią fotogrametryczne zdjęcia cyfrowe¹⁵. Zdjęcia cyfrowe o rozdzielczości 4500x3000 pikseli zostały wykonane kamerą cyfrową KODAK DSC 14N Pro z matrycą o wymiarach (36mm × 24mm), z wykorzystaniem stałoogniskowego obiektywu szerokokątnego o ogniskowej 24 mm. Wykonane zdjęcia posłużyły do teksturowania m.in. trójwymiarowego modelu wieży zamku, jak również stanowią one poglądową dokumentację fotograficzną (szerzej w tym tomie: Kędzierski Michał, Zapłata Rafał, Fryśkowska Anna, Wilińska Michalina, Deliś Paulina).

4. Opracowanie danych cyfrowych

Opracowanie danych fotogrametrycznych obejmowało następujące etapy: rejestracja chmur punktów, filtracja chmury punktów, wygenerowanie trójwymiarowego modelu obiektu (np.: wieży zamku) wraz z nałożoną teksturą ze zdjęć cyfrowych (dokumentacja 3D), opracowanie rysunków wektorowych fragmentów murów (dokumentacja 2D)¹⁶.

Rejestracja chmur punktów pozyskanych z różnych stanowisk skanera została wykonana w oparciu o tarcze HDS, stanowiące charakterystyczne punkty pomierzone z kilku stanowisk skanera. Błąd całkowity rejestracji, tj. błąd dopasowania do siebie skanów tarcz celowniczych wyniósł 0,002 m.

¹⁵ M. Kędzierski, P. Walczykowski, A. Fryśkowska *Application of fisheye lens and terrestrial laser scanning in architectural documentation of hand-to-reach of cultural heritage objects*, Proceedings ASPRS 2009 Annual Conference, Baltimore, USA 2009.

¹⁶ M. Kędzierski, P. Walczykowski, A. Fryśkowska, *Wybrane aspekty opracowania dokumentacji architektonicznej obiektów zabytkowych*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji vol. 18a, Międzyzdroje 2008r.

Pozyskane metodą naziemnego skaningu laserowego dane w postaci chmur punktów zawierają oprócz ruin zamku, również obiekty niepożądane, np. roślinność, ludzie itp. (rys. 2a). W celu wyselekcjonowania interesujących informacji przeprowadzono proces filtracji danych. Polega on na usunięciu wszystkich punktów w chmurze, które nie przedstawiają badanego obiektu. Czas trwania procesu filtracji jest wprost proporcjonalny do liczby danych w chmurze punktów. W efekcie końcowym uzyskano pomiar składający się z ok. 15 mln punktów, przy błędzie pomiaru ± 4 mm i gęstości punktów 0,01 m. Rysunek 2 przedstawia surową chmurę punktów oraz chmury punktów po filtracji.



Rys. 2. Chmury punktów przed filtracją (a) i po filtracji: w barwach wyrażających intensywność odbicia wiązki lasera (b), z nałożoną teksturą ze zdjęć wykonanych skanerem (c).

Z punktu widzenia opracowań architektonicznych oraz wysokich walorów jakościowych dokumentacji, w ostatnich latach popularne stały się trójwymiarowe modele obiektów oraz wygenerowane na bazie pomiarów fotogrametrycznych rysunki wektorowe.

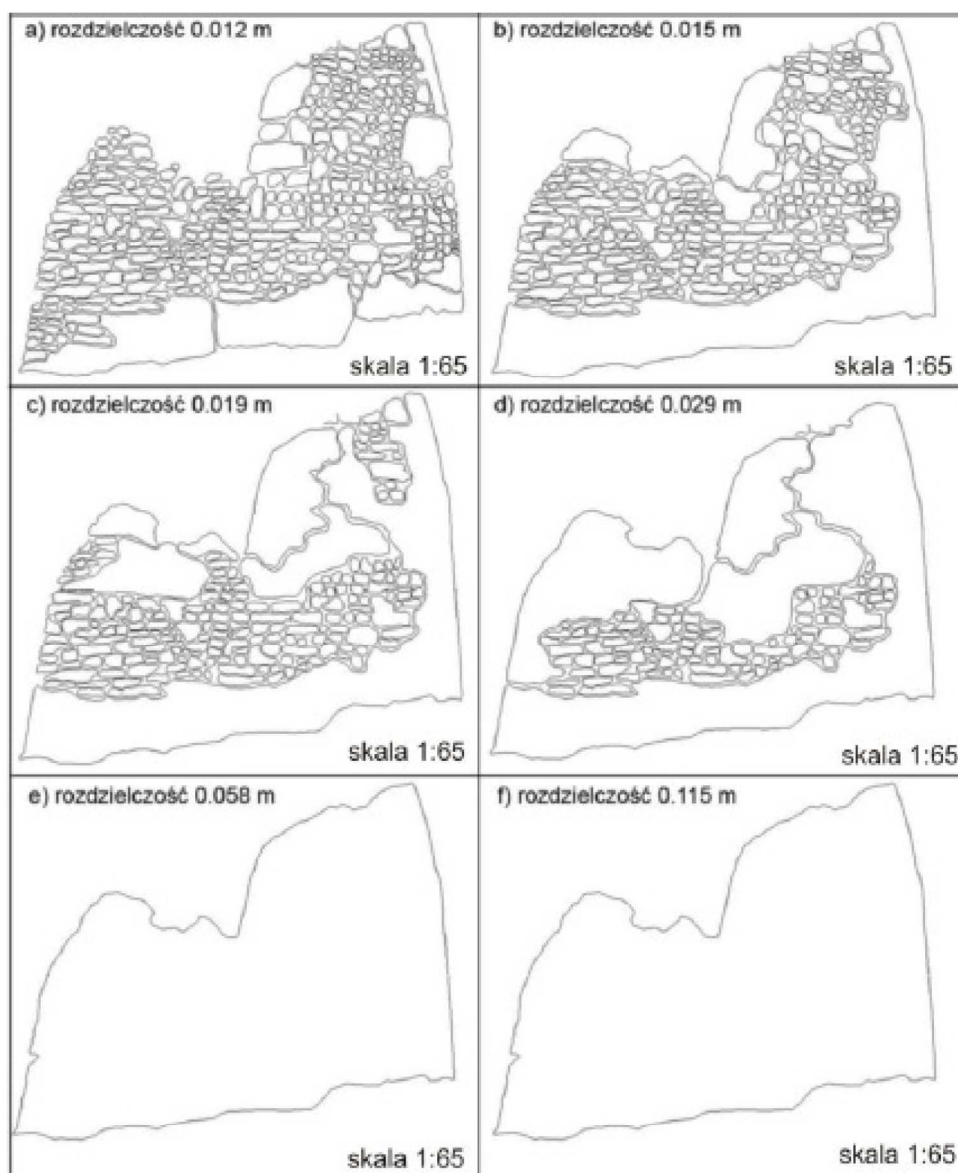
Jedną z najczęściej stosowanych metod generowania modeli trójwymiarowych jest triangulacja. Metoda ta wykorzystuje siatkę trójkątów o dokładności i wielkości zależnej od liczby punktów oraz od złożoności obiektu. Jednakże w przypadku modelowania kształtów i powierzchni nieregularnych, technika ta staje się dość problematyczna. Inna, równie często stosowana metoda polega na modelowaniu za pomocą brył geometrycznych (ang. *Constructive Solid Geometry*), wykorzystując przy tym proste figury geometryczne, takie jak: stożki, prostopadłościany, walce, kule itp. Metoda ta cechuje się wysokim stopniem generalizacji oraz wymaga późniejszej weryfikacji ze strony operatora. Ze względu na regularny kształt wieży, do opracowania trójwymiarowego modelu wieży zamku w Iłży wykorzystano metodę triangulacji.

Rysunek wektorowy może być utworzony manualnie, półautomatycznie lub automatycznie. Pierwsze dwie metody polegają na rysowaniu „szkieletu” konstrukcji lub poszczególnych elementów i detali architektonicznych, poprzez zdefiniowanie przez operatora przebiegu linii, krawędzi oraz węzłów łączących poszczególne elementy z zachowaniem topologii obiektu. W metodzie automatycznej, do wygenerowania rysunku wektorowego wykorzystuje się zbudowany wcześniej trójwymiarowy model 3D obiektu¹⁷.

Wektoryzacji poddane zostały wybrane fragmenty muru wieży zamku. W celu zapewnienia wysokiej dokładności produktu oraz uniknięcia błędów spowodowanych automatyzacją procesu ze względu na dość nieregularny kształt kamieni, rysunek wektorowy muru wieży wykonano metodą manualną.

¹⁷ Pfeifer N., Dorninger P., Nothegger C., *Surveying Structures and Buildings with Laser Scanning – Future Areas of Application*, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, TUV, 2007.

Rysunek 3 przedstawia wyniki wektoryzacji chmury punktów fragmentu wieży. Każdy z rysunków wektorowych został utworzony na podstawie chmur punktów o różnym stopniu redukcji punktów. Zaznaczone, większe fragmenty ściany oznaczają chmury punktów, na których, ze względu na przysłonięcie przez roślinność, niemożliwe było rozpoznanie poszczególnych kamieni. Zestawienie rozdzielczości danych z naziemnego skanera laserowego i wykonanych na ich podstawie rysunków wektorowych przedstawia tabela nr 1.



Rys. 3. Rysunki wektorowe fragmentu wieży wykonane przy różnych rozdzielczościach chmur punktów.

Tab. 1. Rozdzielczości chmur punktów, na podstawie których tworzone były rysunki wektorowe fragmentu wieży

Numer rysunku wektorowego	Rozdzielczość chmury punktów [m]
4 a	0.012
4 b	0.015
4 c	0.019
4 d	0.029
4 e	0.058
4 f	0.115

Rysunek 3b przedstawia wektor chmury punktów o rozdzielczości zmniejszonej o 25% w porównaniu do rozdzielczości oryginalnej. Mimo zwiększenia średniej odległości między punktami, z 0.012 m do 0.015 m, wyniki wektoryzacji chmury punktów są zbliżone, charakteryzują się przy tym dużą dokładnością i szczegółowością. Redukcja rozdzielczości chmury punktów do 0.019 m powoduje, że około 40% danych jest nieczytelnych. Nieczytelność jest rozumiana jako brak możliwości identyfikacji krawędzi poszczególnych kamieni. Wynik wektoryzacji chmury punktów o rozdzielczości 0.029 m informuje o tym, iż tylko 30% danych było czytelnych. Widoczny jest coraz większy wpływ redukcji liczby punktów, a zwektoryzowana chmura punktów przedstawia jedynie ogólny zarys i kształt fragmentu wieży.

Ostatnie dwa produkty wektoryzacji, (Rysunki 3e i 3f) wykonane na bazie chmury punktów o rozdzielczości zredukowanej do 0.058 m i 0.115 m, przedstawiają tylko linię poprowadzoną po końcowych punktach danych. Warto także zauważyć, że pomimo dwukrotnie zwiększonej odległości między punktami chmury, pole powierzchni zwektoryzowanego fragmentu jest niezmiennie. W obu przypadkach wynosi ono 38.71 m².

Na podstawie wykonanych badań, można wyciągnąć wniosek, że na stopień trudności wektoryzacji chmury punktów mają wpływ następujące czynniki: rozdzielczość chmury punktów, odległość między sąsiednimi elementami konstrukcji muru oraz ich wypukłość.

5. Analiza zniszczeń

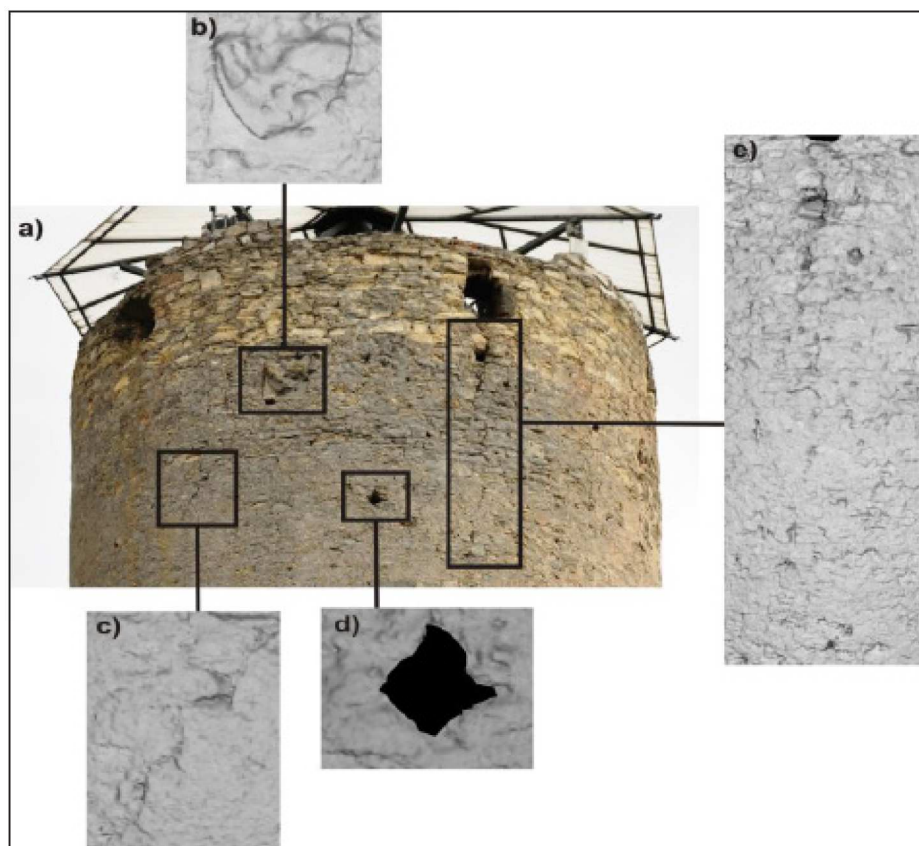
Na podstawie wykonanych pomiarów, dokonano również rejestracji oraz wstępnej analizy zniszczeń substancji zabytkowej obiektu. Zachowane fragmenty zamku posiadają liczne ubytki wynikające przede wszystkim z działalności człowieka w przeszłości (np. celowa rozbiórka murów), czy też z przeciążeń konstrukcji, uszkodzeń związanych z właściwościami użytych materiałów, zmian stateczności konstrukcji, a także wpływów dynamicznych. W odniesieniu do ruin zamku w Hłży, przyjęta została klasyfikacja uszkodzeń ze względu na ich rodzaj: zarysowania, spękania, zawilgocenie, niekorzystny wpływ ujemnych i dodatnich temperatur, naturalne zużycie materiału oraz uszkodzenia w wyniku np. pożaru. W wyniku rejestracji teledetekcyjnej obiektu (quasi-ciągłego pomiaru), na bazie wygenerowanych numerycznych modeli powierzchni obiektu oraz klasyfikacji chmury punktów uzyskano podstawy do analizy stanu odkształceń i zniszczeń ścian i murów.

Pośród zróżnicowanych form destrukcji substancji zabytkowej należy zaliczyć spękania oraz ubytki w obiekcie, zwłaszcza na jego powierzchniach. Ubytki dotyczą braku dużych fragmentów obiektu, jak również braku mniejszych elementów konstrukcji murów (np. cegła, kamień, zaprawa, warstwa wykończeniowa) oraz najmniejszych, niewidocznych gołym okiem, zwłaszcza w partiach trudnodostępnych. W wyniku zastosowania dokładnego pomiaru laserowego zarejestrowano przede wszystkim spękania

w murach (inwentaryzacja rys na ścianach zewnętrznych i wewnętrznych), a następnie wykonano analizę stanu zarysowań konstrukcji. Przyjęta klasyfikacja zarysowań to: rysa – widoczna na elemencie nieciągłość o niewielkiej zwykle długości i rozwartości do 0,5 mm; szczelina – rysa o rozwartości większej od 0,5 mm (rys. 4c); pęknięcie – szczelina skrośna o znacznej długości, np. przez całą długość ściany (rys. 4e).¹⁸

Tab. 2. Analiza ilościowa zniszczeń przedstawionych na rysunku 4

parametry zniszczeń	przykład zniszczeń			herb (b)
	ubytek (d)	szczelina (c)	pęknięcie (e)	
długość	0.32m	1.01m	2.22m	0.57m
szerokość	0.25m	0.02m	0.03m	0.57m
głębokość	0.16m	0.02m	0.02m	-
powierzchnia	0.07m ²	-	-	-



Rys. 4. (a) Zdjęcie cyfrowe przedstawiające rodzaje zniszczeń oraz zarejestrowanych na wieży zamku, (b)-(e) Fragmenty modelu 3D wieży, w tym zachowane fragmenty 3D zniszczonego herbu, znajdującego się na wieży zamkowej (b).

¹⁸ Banaszak J., Halicka A., 2011, *Kompleksowa ocena techniczna budynku zabytkowego na przykładzie plebanii w Wojsławicach*, „Budownictwo i Architektura”, 9, s. 51-68.

W oparciu o rejestrację cyfrową analiza jest wykonywana etapowo. W pierwszej kolejności ma miejsce segmentacja szczelin – rejestracja wszystkich szczelin znajdujących się w obiekcie, a stanowiących efekt procesów destrukcyjnych, niezamierzonych. Kolejny etap stanowiła analiza ilościowa i jakościowa szczelin w obiekcie. Bazowano na kilku zasadniczych parametrach jak: długość, głębokość, szerokość oraz ukierunkowanie. W zależności od surowca w jakim odnotowano szczeliny, dokonano podziału na spękania w warstwie tynku, w zaprawie oraz budulcu (np. piaskowiec, wapień czy cegła). Analiza ubytków oraz zniekształceń i spękań obiektu kieruje się w stronę rejestracji zniszczeń, docelowo stanowiąc podstawę dalszych działań konserwatorskich przy obiekcie.

Przykładem przywołanych zniszczeń są ubytki oraz szczeliny i pęknięcia występujące na wieży zamkowej, które zostały rozpoznane w wielu miejscach analizowanego obiektu (rys. 4).

Kolejnym krokiem w ramach prowadzonych badań, będzie szczegółowa i kompleksowa analiza zniszczeń, w oparciu o wykonane pomiary teledetekcyjne. Celem dalszych działań i badań z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych winno być określenie przyczyn poszczególnych zniekształceń oraz zapobieganie ich rozwojowi. Poza tym określenie stopnia zniszczenia, a tym samym ubytku substancji zabytkowej, jest podstawą do dalszych prac nad procesami depozycyjnymi i powstawaniem warstw zabytkowych przy samym obiekcie.

6. Analiza intensywności odbitego sygnału lasera

Podczas pomiarów metodą NSL, oprócz współrzędnych punktów, pozyskuje się również wartość intensywności sygnału odbitego. Intensywność sygnału, inaczej albedo, jest to stosunek mocy sygnału powracającego do mocy sygnału wysłanego. Intensywność odbicia podaje się w jednostkach niemianowanych i może ona przyjmować wartości od 0 do 1. Autorzy publikacji przeprowadzili badania dotyczące wpływu kąta skanowania i odległości skanowania na ilość i jakość powracającego sygnału odbitego od różnego rodzaju struktur.¹⁹ W badaniach tych wykorzystano m.in. próbki materiałów z jakich najczęściej zbudowane są obiekty zabytkowe, tj. cegła, drewno, szkło witrażowe, beton, różnego typu skały, tynk. Badania wykazały, że na odbijanie i rozpraszanie wiązki laserowej ma wpływ rodzaj materiału z jakiego wykonany jest obiekt. Fakt ten pozwala na przeprowadzenie, na podstawie analizy albedo sygnału ze skanera laserowego (tj.), analizy jakościowej materiałów, z których zbudowany jest obiekt architektoniczny. Prowadzone uprzednio badania wykazały również, że wartość intensywności odbicia maleje wraz ze wzrostem odległości do obiektu oraz kąta nachylenia wiązki. Dlatego też, dokonując analizy składu materiałów z jakich zbudowany jest obiekt, starano się wybrać takie chmury punktów, dla których kąt padania wiązki lasera był jak najmniejszy, a odległość nie przekraczała 30 m.

Analiza intensywności odbicia sygnału ze skanera laserowego podczas pomiaru wieży zamku w Iłży pozwoliła na wyróżnienie następujących materiałów (tab. 3).

Analiza jakościowa materiałów wykazała, że na podstawie średniej intensywności odbicia, dane z NSL pozwoliły na wyróżnienie, a zarazem potwierdzenie występowania takich materiałów, jak: piaskowiec, wapień muszlowy, wapień marglisty, tynk oraz zaprawa wapienno-piaskowa.

Największą intensywnością odbicia charakteryzuje się piaskowiec oraz wapień muszlowy, a najmniejszą tynk. Co ciekawe, skaner laserowy zarejestrował ślady współczesnej, a zarazem niszczącej substancję zabytkową działalności człowieka, w formie wykonanego sprayem rysunku (Rysunek 5c), dla którego intensywność odbicia jest znacznie niższa niż dla tła.

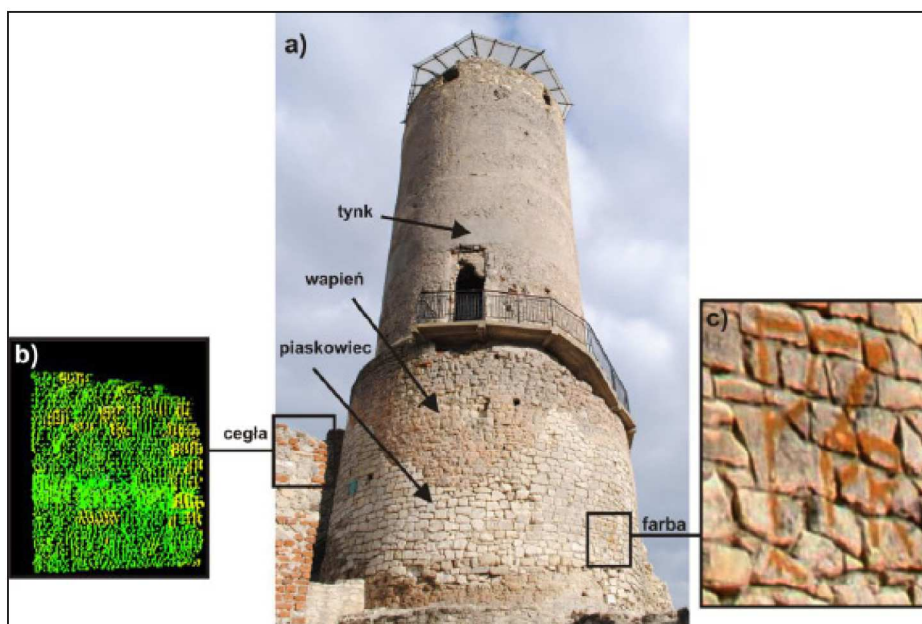
¹⁹ Kędzierski M., Walczykowski P., Fryškowska A., *Application of terrestrial laser scanning in assessment of hydro-technic objects condition*, Warszawa 2008.

Tab. 3. Intensywność odbicia wiązki lasera w zależności od rodzaju materiału

rodzaj materiału	odległość skanowania	intensywność odbicia	
		przedział	średnia
piaskowiec	25m	0.39-0.52	0.47
	30m	0.38-0.50	0.44
wapień marglisty silnie zerodowany	25m	0.32-0.49	0.42
	30m	0.34-0.48	0.40
warstwa wykończeniowa – tynk	30m	0.28-0.46	0.39
spray	25m	0.33-0.35	0.34

Badania surowców i materiałów muru wieży zamku potwierdziły przeprowadzone wcześniej analizy. Mianowicie, intensywność odbicia wiązki zależy od barwy tworzywa (lepsze rezultaty dają pomiary celów koloru białego), a także od powierzchni. Obiekty o gładkiej powierzchni charakteryzują się bowiem wyższym stopniem odbicia. Przykładem obiektu jasnego o gładkiej powierzchni jest piaskowiec jasnobieżowy oraz piaskowiec szarozielony. Obiekty o powierzchniach niejednorodnych oraz ziarnistych, np. powierzchnie betonowe, murowane, zarówno tynkowane, jak i nietynkowane, powodują prawie dwukrotne zmniejszenie zasięgu – tym znaczniejsze, im większe są nierówności materiału (np. wapień marglisty). Potwierdzają to przeprowadzone badania intensywności odbicia takich materiałów muru wieży, jak warstwy wykończeniowe – tynk czy silnie zerodowany wapień marglisty.

Rejestracja intensywności odbicia powracającego sygnału stanowi krok w stronę nowoczesnej stratygrafii budowli, która zarówno w archeologii, jak i w badaniach zabytkowej architektury, stwarza możliwość dodatkowego dokumentowania, analizowania oraz interpretowania obiektów zabytkowych (rys. 5b).



Rys. 5. (a) Surowce i materiały, tworzące mur wieży zamku, (b) wizualizacja intensywności odbić wiązki lasera (cegła – piaskowiec), (c) Spray niszczący substancję zabytkową i zakłócający pomiar.

7. Podsumowanie

W artykule Autorzy poruszyli najważniejsze aspekty pozyskiwania i opracowania danych z Nziemnego Skaningu Laserowego w celu wykonania cyfrowej dokumentacji ruin zamku w Iłży oraz jego najbliższego otoczenia. Na podstawie sporządzonej dokumentacji przeprowadzono rejestrację i analizę ubytków wieży zamku. Ponadto, opierając się na wnioskach wyciągniętych z wcześniej prowadzonych badań, mówiących o tym, że rodzaj materiału z jakiego wykonany jest obiekt ma wpływ na intensywność odbicia sygnału ze skanera laserowego, wykonano analizę jakościową materiałów tworzących mur wieży zamku.

Zaproponowana metoda inwentaryzacji oraz analizy obiektu zabytkowego, zastosowana w odniesieniu do ruin zamku w Iłży, stanowi obecnie rozwiązanie standardowe dla tego typu działań, a zarazem pierwsze tego typu rozwiązanie inwentaryzacyjne w odniesieniu do omawianego obiektu, odchodzące od klasycznej – analogowej formy metrycznej dokumentacji zabytków. Połączenie technologii fotogrametrycznej z naziemnym skanowaniem laserowym daje podstawy do najlepszego i optymalnego rozwiązania systemowego w zakresie sporządzania dokumentacji tego typu obiektu zabytkowego.

Natomiast włączenie do analiz rejestracji natężenia wartości powracającego sygnału, czy też dokumentacja zniszczeń i ubytków, to znaczące dla poznania obiektu i jego otoczenia elementy pochodne pozyskanego oraz przetworzonego zasobu cyfrowego.