

Danuta Miedzińska*

Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego

ORCID: 0000-0003-2503-6600

Przegląd zastosowań metod inżynierii odwrotnej do katalogowania i rekonstrukcji dóbr kultury

Overview of applications of reverse engineering methods
for cataloging and restoration of cultural property

Wstęp

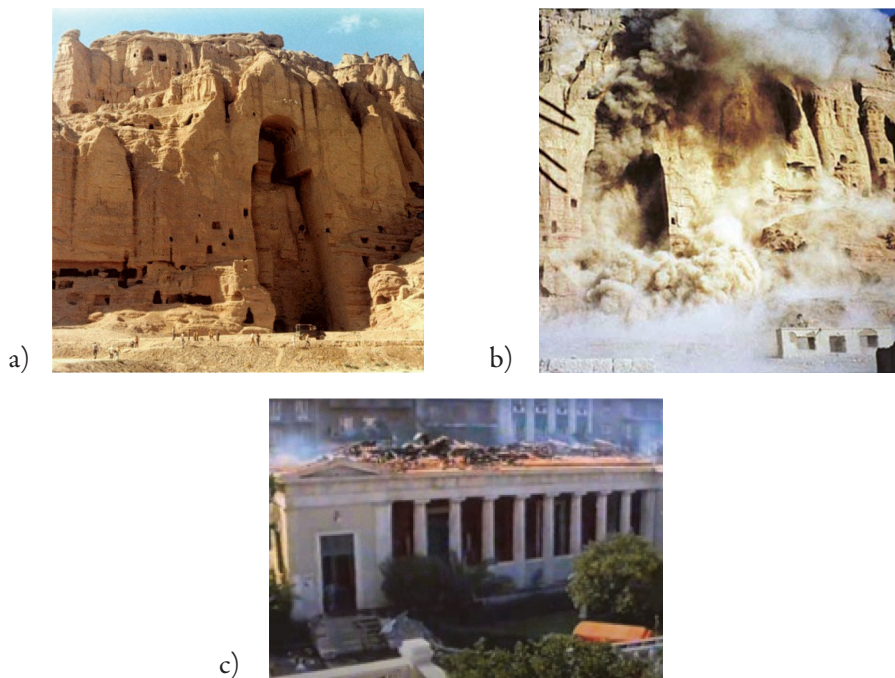
Jednym z najistotniejszych elementów kształtowania się poczucia wspólnoty w ramach narodu, patriotyzmu i szacunku dla swojego pochodzenia jest poznanie historii, zarówno własnego kraju, narodu, jak i własnej rodziny. Cele takie można osiągnąć przez naukę w szkole, czytanie książek tematycznych, jednak w obecnych czasach intensywnego rozwoju technik cyfrowych i internetu – poprzez możliwość zwiedzania i poznawania obiektów historycznych, zarówno w muzeach, jak i w środowisku wirtualnym.

Niezwykle istotna jest także konieczność katalogowania zbiorów, nie tylko obiektów o stosunkowo niewielkich rozmiarach, ale także budynków czy pomników. Są one niszczone przez zmieniający się klimat (Sesana, Gagnon, Ciantelli, Cassar i Hughes, 2021), działania wojenne. Spektakularnymi przy-

* **Danuta Miedzińska:** dr hab. inż., prof. uczelni, Instytut Mechaniki i Inżynierii Obliczeniowej Zakład Wytrzymałości Materiałów i Badań Eksperymentalnych, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, e-mail: danuta.miedzinska@wat.edu.pl

kładami takich sytuacji są: wysadzenie posągów Buddy z Bamianu w marcu 2001 roku przez talibów (Tacik, 2007) – ilustracja 1a), czy pożar National Technical University of Athens w październiku 1991 roku, w którym znajdowały się antyczne greckie posągi (Sargentisi in., 2022) – ilustracja 1b).

II. 1. Przykłady zniszczeń dóbr kultury: a) posągi Buddy z Bamianu (przed i po wysadzeniu w 2001 roku, b) pożar National Technical University of Athens (1991 rok)



Źródło: a) *Wysadzone przez talibów posągi buddy będą odbudowane*, Ł. Tacik, 26 sierpnia 2007 (<https://tvn24.pl/swiat/wysadzone-przez-talibow-posagi-buddy-beda-odbudowane-ra-26093-3598996>); b) „3D scanning/printing: A technological stride in sculpture”, G. F. Sargentis, E., Frangedaki, M., Chiotinis, D., Koutsoyiannis, S., Camarinopoulos, A., Camarinopoulos i N. D. Lagaros, 2022, *Technologies*, 10(9) (doi.org/10.3390/technologies10010009).

Rozwój nowoczesnych metod komputerowych, w tym analizy cyfrowej obrazu 2D 3D z użyciem metod tzw. inżynierii odwrotnej umożliwia obecnie katalogowanie w zasadzie każdej wielkości budynków, przedmiotów, tworzenie wirtualnych muzeów. Natomiast rozwój nowoczesnych technologii wy-

tworzenia, przede wszystkim druku 3D, umożliwił prostą rekonstrukcję czy naprawę obiektów historycznych, skatalogowanych metodami optycznymi.

Dziedzictwo kulturowe jest także bardzo ważne jako środek do generowania zysków dla państwa i samorządów. Dlatego konieczne jest ciągłe utrzymywanie oryginalnej formy dziedzictwa kulturowego poprzez wiarygodne dokumentowanie historyczne, badania, naprawy i restaurację (Cho i Kang, 2019).

Celem niniejszego przeglądu jest przedstawienie przykładów zastosowania wybranych technik obrazowania stosowanych w inżynierii odwrotnej do ochrony światowych dóbr kultury.

Dobra kultury

W Polsce dobra kultury zostały określone w Ustawie z dnia 15 lutego 1962 r. o ochronie dóbr kultury. Dobrem kultury w rozumieniu tejże ustawy jest „każdy przedmiot ruchomy lub nieruchomy, dawny lub współczesny, mający znaczenie dla dziedzictwa i rozwoju kulturalnego ze względu na jego wartość historyczną, naukową lub artystyczną”. Ustawa określa również cel ochrony tych dóbr jako „ich zachowanie, należyte utrzymanie oraz społecznie celowe wykorzystanie i udostępnienie dla celów naukowych, dydaktycznych i wychowawczych, tak aby służyły nauce oraz popularyzacji wiedzy i sztuki, stanowiły trwałe element rozwoju kultury i były czynnym składnikiem życia współczesnego społeczeństwa”. Natomiast „ochrona dóbr kultury polega na zabezpieczeniu ich przed zniszczeniem, uszkodzeniem, dewastacją, zaginięciem lub wywozem za granicę, na zapewnieniu im warunków trwałego zachowania, na opracowaniu dokumentacji naukowej, ewidencji i rejestracji oraz na ich konserwacji, restauracji lub odbudowie, opartych na zasadach naukowych”.

Wyżej wskazane stwierdzenia pokazują, że zastosowanie coraz nowocześniejszych metod komputerowych jest niezbędne do realizacji celów ochrony.

Wspomnieć należy również, że istnieje lista światowego dziedzictwa UNESCO (Polski Komitet ds. UNESCO, 2020), na której znajduje się 17 polskich obiektów wymagających szczególnej ochrony. Są to m.in. Stare Miasto w Krakowie (ilustracja 2a), Auschwitz-Birkenau – niemiecki nazistowski

obóz koncentracyjny i zagłady (1940–1945; ilustracja 2b) czy Hala Stulecia we Wrocławiu (ilustracja 2c).

II. 2. Obiekty polskie wpisane na listę światowego dziedzictwa UNESCO: a) Stare Miasto w Krakowie, b) Auschwitz-Birkenau – niemiecki nazistowski obóz koncentracyjny i zagłady (1940–1945), c) Hala Stulecia we Wrocławiu

a)



b)



c)



Źródło: a) *Stare Miasto w Krakowie*, S. Mierzwa, 12 maja 2019 (<https://chasingunesco.com/stare-miasto-w-krakowie>); b) *Why we work at Auschwitz* [film], A. Compton, 2022 (<https://www.auschwitz.org/muzeum/aktualnosci/w-tym-szczegolnym-miejscu-czlowiek-musi-spotkac-czlowieka-dokument-o-przewodnikach-miejsca-pamieci-,2275.html>); c) *O Hali*, A. Worsztynowicz, 2022 (<https://halastulecia.pl/o-hali/#pid=1>).

Inżynieria odwrotna i druk 3D

W procesach produkcyjnych inżynieria odwrotna, czasami nazywana inżynierią wsteczną, jest procesem, w którym maszyny, konstrukcje architektoniczne i inne obiekty są dekonstruowane w celu wyodrębnienia z nich informacji projektowych. Proces ten umożliwia określenie, w jaki sposób część została zaprojektowana, aby można było ją odtworzyć. Firmy często stosują to podejście, gdy zakup części zamiennej od producenta oryginalnego sprzętu nie wchodzi w grę.

Proces inżynierii odwrotnej jest tak nazwany, ponieważ obejmuje przechodzenie wstecz przez oryginalny proces projektowania. Jednak często inżynier ma ograniczoną wiedzę na temat metod inżynieryjnych, które zostały wykorzystane do stworzenia produktu (technik wytwarzania czy obróbki materiału). Dlatego wyzwaniem jest zdobycie praktycznej wiedzy na temat oryginalnego projektu poprzez demontaż produktu kawałek po kawałku lub warstwa po warstwie.

Obecnie, ze względu na gwałtowny rozwój mocy obliczeniowych klastrów obliczeniowych, powstała możliwość zaawansowanej obróbki obrazu pozyskiwanego metodami skanowania 3D, a więc metodami nieniszczącymi i bezdotykowymi, które często nie wymagają przygotowania powierzchni obiektu, jedynie odpowiednich znaczników i oświetlenia. Tymi metodami można uzyskać obraz w postaci chmury punktów powierzchni zewnętrznej.

Podstawową techniką stosowaną w inżynierii odwrotnej jest skanowanie 3D, za pomocą którego cyfrowo odtwarza się informacje o rzeczywistych elementach w środowisku wirtualnym, zachowując ich dokładne wymiary.

Istnieje kilka metod pomiaru przedmiotów metodami skanowania 3D. Są to techniki wykorzystujące skanery laserowe, skanery świetlne, współrzędnościowe maszyny pomiarowe i skanery tomografii komputerowej (CT – *computed tomography*). Technologie skanowania 3D zazwyczaj gromadzą surowe dane jako informacje o chmurze punktów i przekształcają je w formaty, takie jak model CAD. Przy tworzeniu produktu lub przygotowaniu budowy i eksploatacji instalacji skanowanie 3D jest wykorzystywane przez inżynierów

projektantów i technologów, aby ułatwić i przyspieszyć podejmowanie decyzji projektowych (Javaid, Haleem, Singh i Suman, 2021).

Kontaktowe systemy pomiarowe, takie jak współrzędnościowa maszyna pomiarowa, przyrządy ręczne i konwencjonalne urządzenia monitorujące, mierzą jednocześnie tylko jeden punkt danych, co czyni je czasochłonnymi i powtarzalnymi. Z drugiej strony w skanach laserowych laser porusza się po powierzchni celu, zbierając dane, a skany można szybko ukończyć w ciągu godzin lub dni, w zależności od rozmiaru badanego obiektu (Dombroski, Balsdon i Froats, 2014).

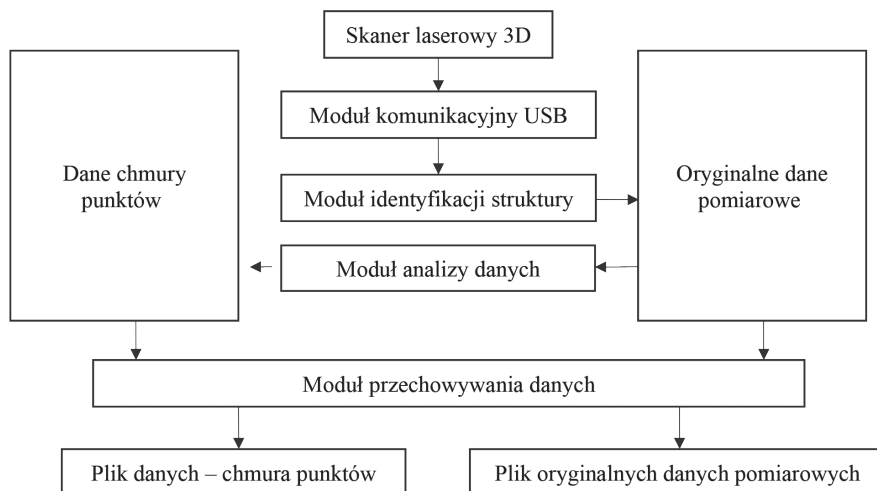
Skanery 3D mierzą najdrobniejsze szczegóły obiektu, wychwytyują dowolne formy i tworzą dokumentację w postaci chmury punktów dla złożonej geometrii i obiektów powierzchniowych (Kang i in., 2012).

Najnowsze skanery 3D charakteryzują się bardzo wysoką precyzją i dokładnością. Z tego względu zaczęto ich używać w muzeach, aby chronić najbardziej rozpoznawalne obiekty na całym świecie. Zalety skanowania są wykorzystywane w wielu zastosowaniach, przede wszystkim produkcyjnych. Dzięki rozdzielczości na poziomie milimetrów, lub czasami mikrometrów, możliwe jest monitorowanie spójności projektu, rozmiaru i stabilności komponentu, ale także dokładne odwzorowanie jego powierzchni.

Skaner laserowy jest rodzajem czujnika odległości opartego na zasadzie optycznej. Specyficzną zasadą działania jest odwzorowanie pomiaru laserowego punkтового w całej trójwymiarowej przestrzeni poprzez dodanie wielu stopni swobody, tak aby uzyskać trójwymiarową chmurę punktów laserowych. Technologia służy do skanowania kształtu, struktury i koloru przestrzeni obiektu dla uzyskania współrzędnych przestrzennych powierzchni obiektu.

Skaner laserowy pracuje zgodnie z ustawionymi wartościami parametrów. Wynikiem akwizycji danych jest przechowywanie odczytanych i zidentyfikowanych danych w bazie danych systemu. Przebieg akwizycji danych przedstawiono na ilustracji 3.

II. 3. Akwizycja danych w skanowaniu laserowym 3D



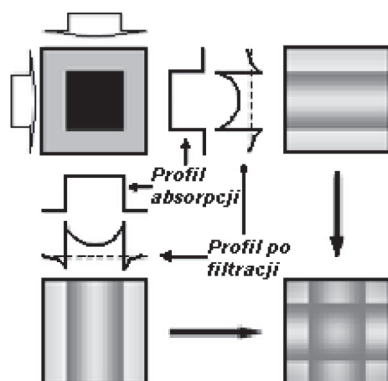
Źródło: „Virtual reconstruction system of building spatial structure based on laser 3D scanning under multivariate big data fusion”. Y. Liang i M. Woźniak, 2022, *Networks and Applications*, 27, s. 611 (<https://doi.org/10.1007/s11036-021-01825-2>).

Drugą techniką istotną z punktu widzenia badania i katalogowania niewazyjnego dóbr kultury jest tomografia komputerowa, która jest rodzajem tomografii rentgenowskiej, metodą diagnostyczną pozwalającą na uzyskanie obrazów tomograficznych (przekrojów) badanego obiektu. Wykorzystuje ona złożenie projekcji obiektu wykonanych z różnych kierunków do utworzenia obrazów przekrojowych (2D) i przestrzennych (3D). Tomografia komputerowa jest szeroko wykorzystywana w medycynie i technice (Miedzińska, Niezgoda i Gieleta, 2012). Metody analityczne do uzyskania obrazu (tomogramu) struktury są używane w niemal wszystkich współczesnych tomografach (ilustracja 4). Dają one najlepsze wyniki, ale wymagają większych mocy obliczeniowych. Najpopularniejszymi z nich są:

- dwuwymiarowa analiza Fourierska – wykorzystuje ona transformę Fouriera do opisanie otrzymanych profili pochłaniania. Transformacie poddaje się każdą z projekcji i dzięki temu uzyskuje się współczynniki pochłaniania w każdym z voxelu,

- metoda sumacyjna z filtrowaniem – podobna do zwykłej metody sumacyjnej, z tym że obraz jest filtrowany (modyfikowany) w celu przeciwdziałania efektom powodowanym przez nagłe zmiany gęstości w badanym obiekcie, a które pogarszają jakość obrazu w metodzie sumacyjnej (patrz ilustracja 4).

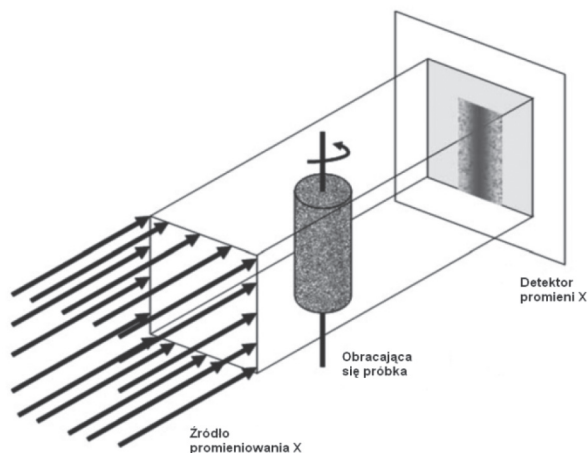
II. 4. Rekonstrukcja tomogramu metodą analityczną – sumacyjną z filtrowaniem



Źródło: opracowanie własne.

Działanie tomografu polega na tym, że mikroźródło promieniowania X oświetla badaną próbkę, a detektor promieni X zbiera i rejestruje wytworzone obrazy (ilustracja 5). Na podstawie wielu takich obrazów, wykonanych dla obracającej się próbki pod różnymi kątami, komputer generuje zestaw wirtualnych obrazów warstw przekrojów poprzecznych próbki. Na tej podstawie można zwizualizować strukturę materiału i przedstawić ją np. w formacie pliku STL, czyli obiektu zbudowanego z trójkątnych powierzchni. Tomograf umożliwia także pomiar parametrów badanej próbki, takich jak porowatość, średni rozmiar ziarna, gęstość (Miedzińska, 2010).

II. 5. Zasada działania tomografu komputerowego



Źródło: opracowanie własne.

Dodatkowo do rekonstrukcji lub napraw obiektów historycznych używa się obecnie druku 3D.

Druk 3D to technika wytwarzania przyrostowego (AM – *additive manufacturing*) służąca do wytwarzania szerokiej gamy struktur i złożonych geometrii na podstawie danych modelu trójwymiarowego (3D). Proces polega na drukowaniu kolejnych warstw materiałów, które powstają jedna na drugiej. Technologia ta została opracowana przez Charlesa Hulla w 1986 roku w procesie znanym jako stereolitografia (SLA), po którym nastąpiły kolejne odkrycia, takie jak druk metodą FDM – *fused deposition modeling* (tworzywa termoplastyczne), PBF – *powder bed fusion* (metale). Druk 3D, który obejmuje różne metody, materiały i urządzenia, ewoluował na przestrzeni lat i powoduje ewolucję procesów produkcyjnych i logistycznych. Wytwarzanie przyrostowe jest szeroko stosowane w różnych gałęziach przemysłu, w tym w budownictwie, prototypowaniu i biomechanice. W branży budowlanej upowszechnienie druku 3D było bardzo powolne i ograniczone, mimo jego zalet, takich jak m.in. niskoodpadowość, swoboda projektowania i automatyzacji.

Obecnie można zaobserwować, że ciągle pojawiają się nowe zastosowania druku 3D, ponieważ intensywnie rozwijane są nowe materiały i metody

AM. Jednym z głównych czynników zwiększających dostępność tej technologii jest wygaśnięcie wcześniejszych patentów, co dało producentom możliwość opracowywania nowych urządzeń do druku 3D. Ostatnie rozwiązania technologiczne obniżyły koszty drukarek 3D, rozszerzając w ten sposób obszar ich zastosowania w szkołach, domach, bibliotekach i laboratoriach. Początkowo druk 3D był szeroko stosowany przez architektów i projektantów do tworzenia estetycznych i funkcjonalnych prototypów ze względu na uzyskiwaną szybkość i cenę prototypowania. Zastosowanie druku 3D zminimalizowało dodatkowe wydatki, które są ponoszone w procesie rozwoju produktu. Jednak dopiero w ciągu ostatnich kilku lat druk 3D został w pełni wykorzystany w różnych branżach, od prototypów po produkty (Ngo, Kashani, Imbalzano, Nguyen i Hui, 2018).

Przykłady użycia inżynierii odwrotnej i druku 3D w ochronie wybranych dóbr kultury

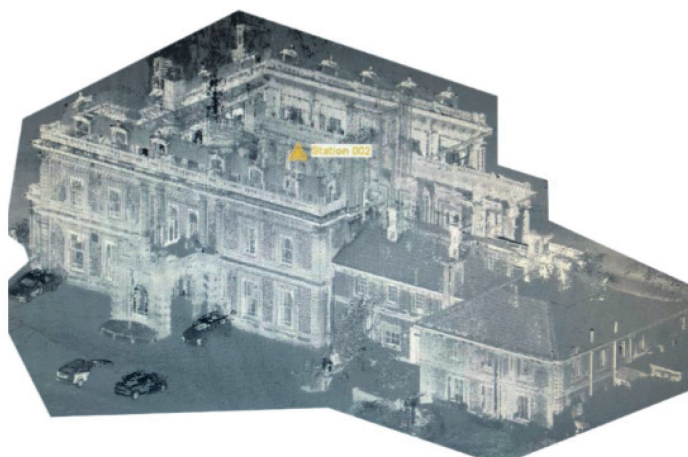
W poniższym rozdziale przedstawione zostaną wybrane przykłady zastosowania technik obrazowania 3D do ochrony dóbr kultury: architektury, rzeźb i skamielin, jak również rekonstrukcji z użyciem drukarek 3D.

Skanowanie budynków jest technologią często używaną obecnie w architekturze i budownictwie. Pilna potrzeba poprawy wydajności w branży budowlanej doprowadziła do wprowadzenia w niej wielu innowacyjnych technologii. Skanery laserowe 3D należą do wiodących technologii wykorzystywanych do przechwytywania i przetwarzania zasobów lub danych projektów budowlanych do różnych zastosowań, np. analizy surowych danych projektu budowlanego. W tym podejściu jakość danych, potocznie określanych jako dane chmury punktów, jest nadal istotnym problemem, ponieważ zależy od odległości między obiektem docelowym a stacją skanera laserowego 3D. Ponadto jakość danych nadal w dużym stopniu zależy od rozmiarów plików danych i mocy obliczeniowej maszyny przetwarzającej.

Opracowywanie dokumentacji powykonawczej przy użyciu konwencjonalnych metod geodezyjnych, takich jak tachimetr czy taśma miernicza, jest pracochłonne, kosztowne i podatne na błędy. Co więcej tylko część elemen-

tów obiektu może być monitorowana, ponieważ przy użyciu tradycyjnych instrumentów można prowadzić tylko pomiary punktowe. Jednak w ciągu ostatniej dekady w branży budowlanej opracowano kilka nowych systemów pomiarowych odzwierciedlających różne cykle życia projektu. Przykładem takich metod jest skanowanie laserowe 3D. Model w postaci chmury punktów budynku Headington Hill Hall pokazano na ilustracji 6.

II. 6. Model w postaci chmury punktów budynku Headington Hill Hall uzyskany za pomocą skanowania 3D



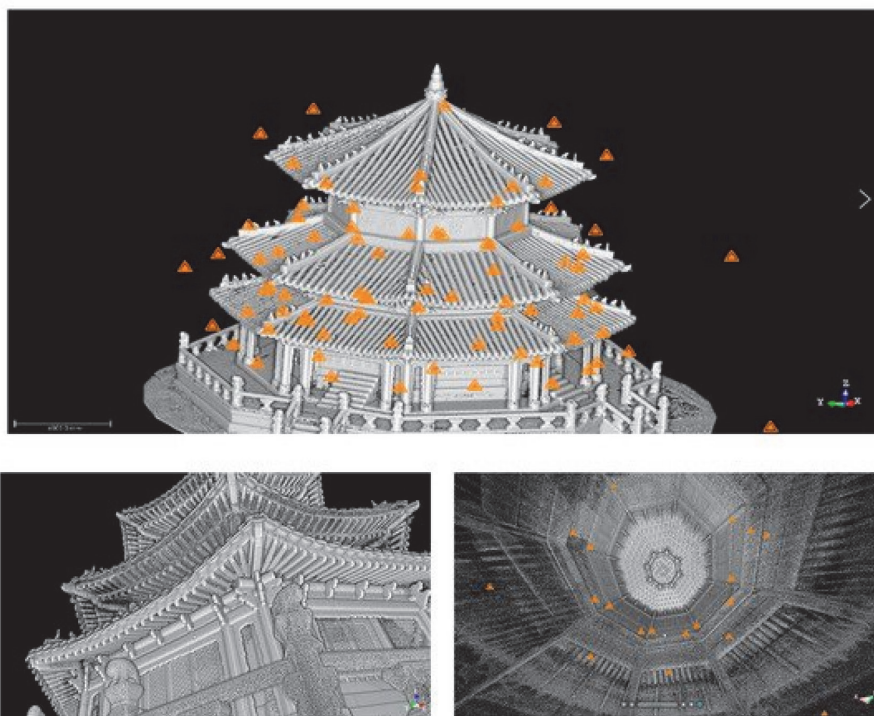
Źródło: „Reality capture of buildings using 3D laser scanners”, A. Almkhtar, Z. O. Saeed, H. Abanda, J. H. M. Tah, 2021, *CivilEng*, 2(1), s. 227 (<https://doi.org/10.3390/civileng2010012>).

Na podstawie udanych wyników użycia technologii skanowania 3D w budownictwie komercyjnym naukowcy zastosowali tę technikę do ochrony niszczących zabytków.

Przykładem takiego wykorzystania jest praca Ham, Bae i Yuh (2020), w której zaproponowano wieloetapową technikę z wykorzystaniem inżynierii odwrotnej do tworzenia archiwów dziedzictwa kulturowego przy użyciu skanowania laserowego i modelu informacji o budynku (BIM). Etapy te obejmowały akwizycję danych w postaci chmury punktów przez skanowanie lasero-

we, ich obróbkę i archiwizację. Opracowano także standard tworzenia danych BIM przez analizę porównawczą istniejących archiwów i danych chmury punktów oraz zaproponowano metodę budowania wartościowych danych BIM jako modelu informacyjnego. Dane, takie jak dane twórców, rysunki konstrukcyjne, można wyodrębnić z danych BIM zbudowanych jako model informacyjny. Dodatkowo przedstawiono scenariusz wykorzystania archiwum dziedzictwa kulturowego składającego się z zapisów historycznych, danych chmury punktów oraz danych BIM. Przykład uzyskanej proponowaną metodą chmury punktów pokazano na ilustracji 7.

II. 7. Obrazy z różnych widoków danych chmury punktów uzyskanych w pracy



Źródło: „Phased reverse engineering framework for sustainable cultural heritage archives using laser scanning and BIM: The case of the Hwanggungwoo (Seoul, Korea)”, N. Ham, B. I. Bae i O. K. Yuh, 2020, *Sustainability*, 12, artykuł 8108 (<https://doi.org/10.3390/su12198108>).

Spektakularnym przykładem zastosowania skanowania laserowego 3D jest projekt Uniwersytetu Kalifornijskiego z Los Angeles (UCLA), w ramach którego, używając lasera 3D i oprogramowania graficznego Geomagic, stworzono wirtualne muzeum architektury i rękodzieła kultury starożytnych Majów. Przyczyną opracowania projektu był fakt, iż mimo że w Belize starożytne świątynie Majów można zobaczyć wszędzie, kulturowe artefakty cywilizacji nie były dostępne dla rdzennych mieszkańców. W celu zmiany tej sytuacji zaproponowano dwie innowacje: stworzono muzeum narodowe, aby pokazać tysiące artefaktów wykopanych przez archeologów, oraz we współpracy z Instytutem Archeologii Cotsena na UCLA stworzono „wirtualne muzeum” starożytnych artefaktów, które szkoły, mieszkańcy Belize i archeolodzy mogą zwiedzać i poznawać oraz analizować. Cywilizacja Majów powstała na Jukatanie około 2600 roku p.n.e. i rozwijała się w południowym Meksyku, Gwatemali, północnym Belize i zachodnim Hondurasie. Kultura słynie z wykorzystywania astronomii, systemów kalendarzowych, pisma hieroglificznego oraz wyszukanej i bogato zdobionej architektury ceremonialnej i artefaktów.

Pierwszym krokiem w procesie tworzenia wirtualnego muzeum było skanowanie obiektu za pomocą skanera światła białego LightScribe firmy Geomatrix. Następnie z danych skanowania generowano chmurę punktów 3D. Wynikowy plik był eksportowany do oprogramowania Geomagic Wrap w celu oczyszczenia danych chmury punktów i dokładnego wyrównania tekstur modelu 3D z dokładnością do 0,010 cala oryginalnego obiektu. Przykład obiektu zeskanowanego w ten sposób pokazano na ilustracji 8 (3D Systems, 2019).

II. 8. Przykłady rękodzieła kultury Majów skanowanych laserowo

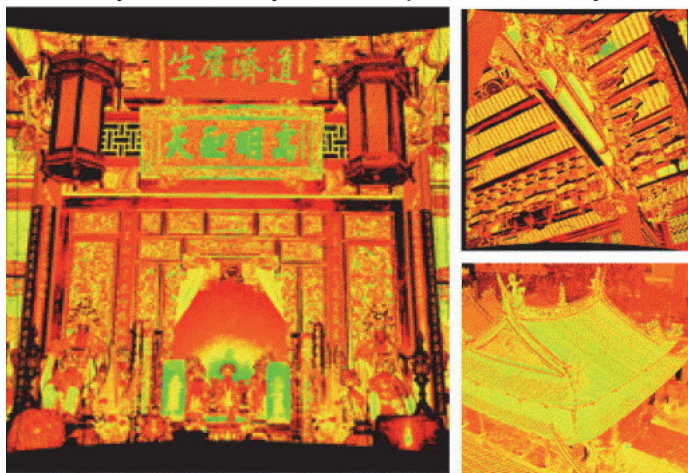


Źródło: *3D reverse engineering software helps UCLA Lab create virtual museum,*

3D Systems, 2019 (<https://www.3dsystems.com/customer-stories/3d-reverse-engineering-software-helps-ucla-lab-create-virtual-museum-ancient-maya>).

Technologia ta jest również używana na Tajwanie. W opracowaniu Shih, Wang, Lin i Liao (2007) przedstawiono prace związane z archiwizacją chińskiej architektury za pomocą skanera laserowego 3D dalekiego zasięgu. Historyczna architektura, główna sala świątyni Pao-An, została zachowana w formacie cyfrowym, a kształty architektoniczne odwzorowano dokładniej, niż przy użyciu tradycyjnych pomiarów ręcznych. W trakcie prac napotkano trudności w pomiarze form i krzywizn niewielkich w porównaniu do wielkości budynku. W badaniu zidentyfikowano najbardziej podatne na błędy pomiary wykonane tradycyjnym podejściem, porównując oryginalne rysunki z ostatecznymi modelami, które powstały na podstawie wykonanych 1958 skanów i podskanów. Przykład wykonanego skanu pokazano na ilustracji 9.

II. 9. Skan zewnętrznej i wewnętrznej części świątyni Pao-An na Tajwanie



Źródło: „3D scan for the digital preservation of a historical temple in Taiwan”, N. J. Shih, H. J. Wang, Ch. Y. Lin, Ch. Y. Liao, 2007, *Advances in Engineering Software*, 38(7), s. 501–512 (doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.09.014).

Skanowanie laserowe 3D może również służyć do dokumentowania mniejszych obiektów, jak rzeźby czy przedmioty użytkowe. Ważną częścią tych prac jest archiwizacja oraz rekonstrukcja broni zabytkowej. Dzięki metodom tym można poznać konstrukcję broni i ją odtwarzać.

W badaniach Fikusa, Paszkowskiego i Płatka (2018) zastosowano metodę bezkontaktowego, aktywnego skanowania, opartą na triangulacji. W ramach tej metody wykorzystuje się generalnie dwa rodzaje skanerów 3D: laserowe i światła strukturalnego. W pierwszej grupie pomiar polega na skierowaniu wiązki laserowej na model, a następnie na czujnik wyposażony w kamerę CCD wykrywający kąty odbicia i odległości. Generowana jest trójwymiarowa mapa (chmura) punktów modelu. W drugiej grupie skanerów niespójne światło jest rzutowane na obszar modelu, wyświetlając wzory (linie, paski) na powierzchni modelu. Detektor, co najmniej jedna kamera, obserwuje przemieszczenie każdego wzoru i oblicza pozycję (X, Y, Z) powierzchni modelu. Istnieje kilka zastosowań skanerów wykorzystujących kolor biały, zielony i niebieski światła – należy wziąć pod uwagę długość fali, ze względu na dokładność i interferencje ze światłem dziennym. W omawianej pracy zeskanowano elementy pistoletu pokryte specjalną warstwą antyrefleksyjną, co pokazano na ilustracji 10.

II. 10. Przygotowanie elementu broni palnej do skanowania

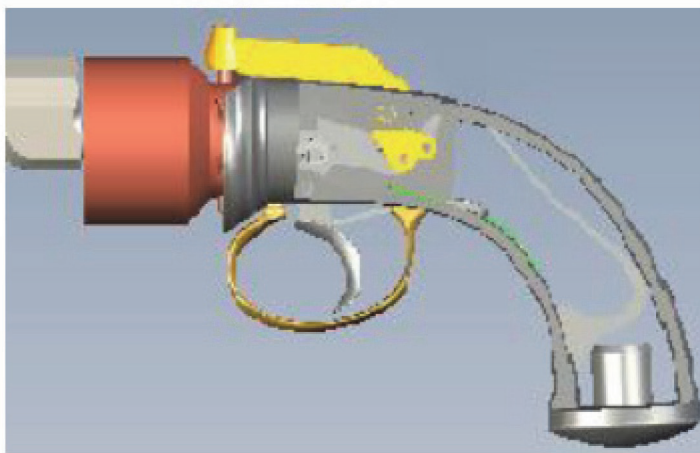


Źródło: „Application of 3D scanning technology for evaluation of virtual model of gun geometry”, B. Fikus, R. Paszkowski, Płatek P., 2018, *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, 9(1), s. 108 (doi.org/10.5604/01.3001.0011.7183).

II. 11. Porównanie częściowo zdemontowanego pistoletu i modelu komputerowego: a) widok z usuniętymi drewnianymi uchwytami, b) model komputerowy – wynik skanowania



(a)



(b)

Źródło: „A functional analysis of two 3D-scanned antique pistols from New Zealand”, J. LaRocco, D. G. Paeng, 2020, *Virtual Archaeology Review*, 11(22), s. 88 (doi.org/10.4995/var.2020.12676).

Ochrona broni historycznej wymaga stałej i starannej konserwacji. Cyfrowe skanowanie trójwymiarowe (3D) może pomóc w jej zachowaniu i analizie poprzez wygenerowanie komputerowego modelu 3D. W Nowej Zelandii przykładowo istnieją szczególne przesłanki do badań nad bronią historyczną, ze względu to, że tuż po jej odkryciu w Europie została szybko importowana do kultury, która wcześniej nie stosowała obróbki metali. Doprowadziło to, wraz z kolonizacją brytyjską, do wstrząsów i wojny. Najbardziej intensywny konflikt między siłami brytyjskimi i maoryskimi miał miejsce w nowozelandzkich wojnach lądowych w połowie XIX wieku. Główną ręczną bronią palną używaną w tym okresie były ładowane odprzodowo karabiny czarnoprochowe, a różnorodność uzbrojonych frakcji biorących udział w wojnie zawoocowała dużym zróżnicowaniem używanej broni. W pracy LaRocco i Paenga (2020) przedstawiono zeskanowane dwa zabytkowe pistolety ładowane przez lufę z tego okresu i dokonano ich analizy. Dzięki temu poznano historię dwulufowych pistoletów ładowanych przez lufę i rewolwerów przejściowych. Ustalono, że pistolet dwulufowy był pistoletem skałkowym z wieku przed wojnami lądowymi, później przekształconym w pistolet kapiszonowy. Rewolwer przejściowy był pośrednim krokiem między wielolufowym pistoletem pepperbox a „prawdziwym” rewolwerem, ale pozostawał w użyciu przez całą epokę wiktoriańską. Oba rodzaje broni palnej były praktycznie przestarzałe w innych częściach świata do czasu wojen lądowych, ale konflikt stworzył zapotrzebowanie na różnorodną broń. Przykład przeprowadzonych badań pokazano na ilustracji 11.

Skanowanie laserowe 3D pozwala na zebranie danych na temat geometrii powierzchni badanego obiektu. Jednak są sytuacje, kiedy pojawia się potrzeba bezinwazyjnego „zajrzenia do środka” obiektu. Najbardziej chyba znanym przykładem takich zabiegów prowadzonych w celu poznania i ochrony dóbr kultury są badania mumii egipskich. W 1896 roku, zaledwie rok po wynalezieniu promieni rentgenowskich, poddano ocenie tą nową techniką pierwszą mumię. W 1977 roku, 10 lat po wynalezieniu technologii CT, mumia została zobrazowana z użyciem tej technologii DC. Była to mumia dziecka pokazana na ilustracji 12 (Harwood-Nash, 1979).



II. 12. *Fotografia zabandażowanej starożytnej egipskiej mumii dziecięcej z Muzeum Historii Naturalnej Senckenberg we Frankfurcie – pierwszy obiekt badany metodą tomografii komputerowej*

Źródło: „Computed tomography of ancient Egyptian mummies”, D. C. Harwood-Nash, 1979, *Journal of Computer Assisted Tomography*, 3(6), 768–773.

II. 13. *Obrazy tomografii komputerowej stawów krzyżowo-biodrowych i kręgosłupa z mumifikowanego króla Ramzesa II (1279–1213 p.n.e.)*



Źródło: „Ankylosing spondylitis or diffuse idiopathic skeletal hyperostosis in royal Egyptian mummies of 18th – 20th Dynasties? CT and archaeology studies”, S. N., Saleem, Z. Hawass, 2014, *Arthritis & Rheumatology*, 66(12), s. 3313 (<https://doi.org/10.1002/art.38864>).

Badania te są kontynuowane do dzisiaj. Naukowcy szukają oznak chorób, na które zapadali starożytni (Cramer, Brix, Matin, Rühli i Hussein, 2018; Saleem i Hawass, 2014) lub innych przyczyn śmierci, a także usiłują poznać rytuały pogrzebowe. Przykład badań schorzeń układu kostnego pokazano na ilustracji 13.

Ciekawe jest, że pierwsza wykonana tomografia mumii została powtórzona na nowoczesnym sprzęcie w celu porównania najwcześniejszych i najnowszych technologii obrazowania (ilustracja 14), oszacowania zachowania, wieku w chwili śmierci, płci, cech anatomicznych, odkryć paleopatologicznych, mumifikacji, balsamowania i bandażowania mumii dziecka ze starożytnego Egiptu. Datowanie radiowęglowe posłużyło do określenia wieku mumii i określenia okresu życia dziecka w chronologii egipskiej (Zeschi in., 2016).

Il. 14. *Tomografia mumii wykonana w celu porównania najwcześniejszych i najnowszych technologii obrazowania*

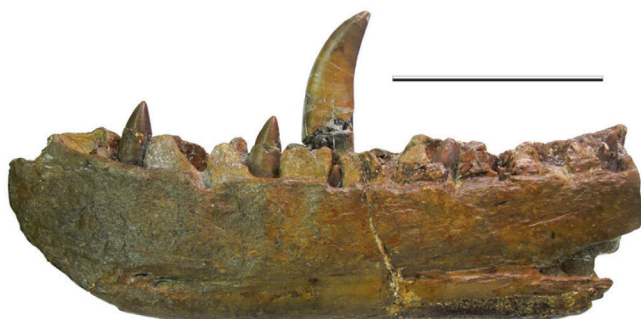


Źródło: „From first to latest imaging technology: Revisiting the first mummy investigated with X-ray in 1896 by using dual-source computed tomography”, S. Zesch, S. Panzer, W. Rosendahl, J. W. Nance, S. O. Schönberg, T. Henzler, 2016, *European Journal of Radiology Open*, 3, s. 176 (doi.org/10.1016/j.ejro.2016. 07.002).

Technologia tomografii komputerowej jest stosowana również w badaniu kości, na przykład dinozaurów.

Badania prawego zębника dinozaura z gatunku *Megalosaurus bucklandii*, zrealizowane w Muzeum Historii Naturalnej Uniwersytetu Oksfordzkiego, są jednym z takich przykładów. Ta szczęka reprezentuje pierwszego naukowo opisanego dinozaura, pierwszy okaz skamieniałości rozpoznany jako należący do jeszcze nieznannej grupy zwierząt (ilustracja 15). Opisanie tego dinozaura przez wielbego Williama Bucklanda w 1824 roku, a następnie włączenie go do pierwszego opisu „Dinosauria”, wraz z jego kuzynami – *Iguanodonem* i *Hylaeosaurusem*, przez Richarda Owena w 1842 roku, zapoczątkowały intensywny rozwój badań dinozaurów w wiktoriańskiej Anglii. Mimo to zaskakująco niewiele wiadomo o samym okazie. Dokumenty muzealne jego dotyczące są skąpe. Wiadomo, że został zakupiony w 1797 roku, ale wydaje się, że niewiele jest informacji na temat tego, co faktycznie wydarzyło się w czasie od jego opisu do dnia dzisiejszego. Obrazy okazu, które istnieją, przybierają formę wyidealizowanych lub niedokładnych litografii. Okaz wykazuje znaczne dowody odbudowy w tynku. Kiedy doszło do uszkodzenia i wymiany, nie jest pewne, chociaż zapisy wydają się sugerować, że coś mogło się wydarzyć, gdy okaz po raz pierwszy pojawił się na wystawie na początku XX wieku. Nie jest jednak jasne, co zostało wykonane w obiekcie. Proces konserwacji uszkodzeń oraz degradacji obiektu muzealnego wymaga wiedzy o tym, co wcześniej z obiektem zrobiono. Brak tych informacji sprawia, że przyszłe wysiłki konserwatorskie są trudne i ryzykowne. Aby rozwiązać ten problem, podjęto próbę odtworzenia historii konserwacji okazu, wykorzystując najnowocześniejsze techniki obrazowania. Badano okaz przy użyciu urządzeń rentgenowskiej tomografii komputerowej. Proces ten ujawnił obecność dwóch oddzielnych plastrów użytych do naprawy okazu. Dzięki temu uzyskano przydatne informacje, w tym lokalizację całego odtworzonego materiału, co scharakteryzowano w 3D, oraz rozpoznano strukturę użytych tynków. Projekt ten przyniósł również pewne korzyści dla muzeum. Za pomocą druku 3D powstały repliki legendarnej szczęki, które pozwalają odwiedzającym po raz pierwszy zapoznać się z okazem (Wilson i in., 2018).

II. 15. *Widok prawego zębniaka dinozaura z gatunku Megalosaurus bucklandii badanego metodą tomografii komputerowej*



Źródło: „X-ray computed tomography (XCT) and chemical analysis (EDX and XRF) used in conjunction for cultural conservation: the case of the earliest scientifically described dinosaur *Megalosaurus bucklandii*”. P. F. Wilson, M. P. Smith, J. Hay, J. M. Warnett, A. Attridge i M. A. Williams, 2018, *Heritage Science*, 6, artykuł 58 (doi.org/10.1186/s40494-018-0223-0).

Także inne obiekty badane są z użyciem CT. Przykładem są tu badania masek Pigorini, pokazane na ilustracji 16 (Albertin, Bettuzzi, Brancaccio, Morigi i Casali, 2019).

II. 16. *Tomografia komputerowa a) kolekcji masek teatru japońskiego w Muzeum L. Pigorini, b) kolekcji Statue Vestite w Muzeum Diecezjalnym w Massie (Massa, Włochy)*

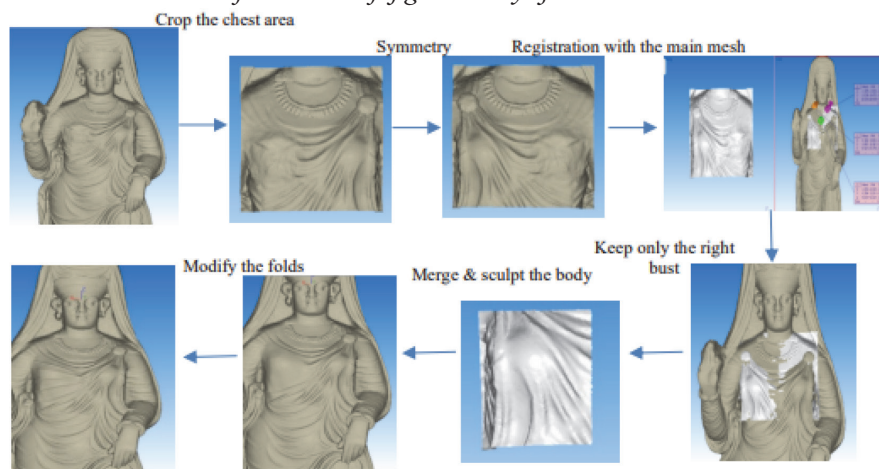


Źródło: „X-ray Computed Tomography in situ: An opportunity for museums and restoration laboratories”, F. Albertin, M. Bettuzzi, R. Brancaccio, M. P. Morigi, F. Casali, 2019, *Heritage*, 2(3), s. 2030 (doi.org/10.3390/heritage2030122).

Skanowanie laserowe stało się obecnie popularną techniką pozyskiwania modeli cyfrowych w dziedzinie konserwacji i restauracji dziedzictwa kulturo-

wego. Wiele stanowisk archeologicznych zostało utraconych, uszkodzonych lub wyblakło i nie przekazano ich przyszłym pokoleniom z powodu wielu zagrożeń naturalnych lub ludzkich. Dokładne stworzenie cyfrowego i fizycznego modelu brakujących części obiektów dziedzictwa kulturowego oraz odтворzenie zniszczonych artefaktów wciąż stanowi wyzwanie. Typowa ręczna renowacja może stać się żmudnym i podatnym na błędy procesem; może również spowodować wtórne uszkodzenie reliktyw. Dlatego w artykule Thamir i Abed (2020) przedstawiono proces automatycznego cyfrowego zastosowania laserowego modelowania 3D artefaktów w wirtualnej rekonstrukcji w oparciu o techniki inżynierii odwrotnej oraz druku 3D – ilustracja 17.

II. 17. Proces wirtualnej rekonstrukcji figurki Lady of Hatra



Źródło: „How geometric reverse engineering techniques can conserve our heritage; a case study in Iraq using 3D laser scanning”, S. Z., Thamir i F. M. Abed, 2020, *IOP Conference Series: Materials Science Engineering*, 737 (doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012231).

Podsumowanie

Dzisiejsze muzea są „domem” dla ogromnej liczby obiektów historycznych, od reliktyw dawnych kultur i społeczeństw po pozostałości starożytnych bożków, które wymykają się współczesnemu rozumieniu. Wśród tych niezliczonych obiektów jest część o dużym znaczeniu kulturowym lub naukowym.

Ich znaczenie dla ludzkiego zrozumienia przeszłości sprawia, że pozostają ukryte w zbiorach muzealnych, bezpiecznie przechowywane ze świadomością, że ich wymowa została już w pełni zbadana. Możliwość ich obejrzenia w wirtualnej przestrzeni jest niezwykle istotna dla ich poznania i zrozumienia przez kolejne pokolenia. Jest to możliwe obecnie z wykorzystaniem nowoczesnych technologii inżynierii odwrotnej.

Oczywiste jest, że dobór technologii obrazowania musi zależeć od wymaganego efektu końcowego, ale także od cech badanego obiektu i jego otoczenia. Istotne są takie elementy jak rozmiary obiektu, wymagana rozdzielczość do odwzorowania detali, oświetlenie czy możliwość dostępu. Oczywiście także same technologie skanowania 3D mają swoje ograniczenia, jak choćby wielkość i obszar badawczy urządzeń.

Można jednak stwierdzić, że proces inżynierii odwrotnej i zaawansowana technologia (w tym druku 3D) otworzyły nową drogę w dziedzinie konserwacji i restauracji oraz katalogowania, ochrony i poznawania dziedzictwa kulturowego.

Streszczenie: Dobra kultury stanowią bezcenny majątek każdej społeczności, narodu, a nawet ludzkości, który pozwala zrozumieć tożsamość i korzenie człowieka. Ochrona tych dóbr jest niezwykle istotna, szczególnie ze względu na zmieniający się gwałtownie klimat czy działania ludzkie, takie jak konflikty zbrojne. W artykule przedstawiono przykłady zastosowania bezinwazyjnych metod inżynierii odwrotnej do katalogowania, konserwacji, renowacji dzieł architektury i sztuki oraz tworzenia wirtualnych muzeów.

Abstract: Heritage is invaluable assets of any community, nation or even humanity, which allows us to understand human identity and roots. Protection of these assets is extremely important, especially due to the rapidly changing climate or human activities such as armed conflicts. The article presents examples of the application of non-invasive reverse engineering methods for cataloging, conservation, restoration of architectural and art works and creation of virtual museums.

Słowa kluczowe: skanowanie 3D, katalogowanie, rekonstrukcja, inżynieria odwrotna

Keywords: 3D scanning, cataloging, reconstruction, reverse engineering

Bibliografia

- 3D Systems (2019). *3D reverse engineering software helps UCLA Lab create virtual museum*. <https://www.3dsystems.com/customer-stories/3d-reverse-engineering-software-helps-ucla-lab-create-virtual-museum-ancient-maya>.
- Albertin, F., Bettuzzi, M., Brancaccio, R., Morigi, M. P., Casali, F. (2019). X-ray Computed Tomography in situ: An opportunity for museums and restoration laboratories. *Heritage*, 2(3), 2028–2038. doi.org/10.3390/heritage2030122.

- Almukhtar, A., Saeed, Z. O., Abanda, H., Tah, J. H. M. (2021). Reality capture of buildings using 3D laser scanners. *CivilEng*, 2(1), 214–235. <https://doi.org/10.3390/civileng2010012>.
- Cho, H. G., Kang, Y. J. (2019). Study on the order status of the cultural properties repair works in Seoul. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture*, 47(1), 10–25. doi.org/10.9715/KILA.2019.47.1.010.
- Compton, A. (2022). *Why we work at Auschwitz* [film]. <https://www.auschwitz.org/muzeum/aktualnosci/w-tym-szczegolnym-miejscu-czlowiek-musi-spotkac-czlowieka-dokument-o-przewodnikach-miejsca-pamieci-,2275.html>.
- Cramer, L., Brix, A., Matin, E., Rühli, F., Hussein, K. (2018). Computed tomography–detected paleopathologies in ancient Egyptian mummies. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, 47(4), 225–232. doi.org/10.1067/j.cpradiol.2017.06.012.
- Dombroski, C. E., Balsdon, M. E., Froats, A. (2014). The use of a low-cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: a preliminary study. *BMC Research Notes*, 7, artykuł 443,1. doi.org/10.1186/1756-0500-7-443.
- Fikus, B., Paszkowski, R., Płatek, P. (2018). Application of 3D scanning technology for evaluation of virtual model of gun geometry. *Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa*, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej, 9(1), 105–114. doi.org/10.5604/01.3001.0011.7183.
- Ham, N., Bae, B. I., Yuh, O. K. (2020). Phased reverse engineering framework for sustainable cultural heritage archives using laser scanning and BIM: The case of the Hwanggungwoo (Seoul, Korea). *Sustainability*, 12, artykuł 8108. <https://doi.org/10.3390/su12198108>.
- Harwood-Nash, D. C. (1979). Computed tomography of ancient Egyptian mummies. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 3(6), 768–773.
- Javaid, M., Haleem, A., Singh, R. P., Suman, R. (2021). Industrial perspectives of 3D scanning: Features, roles and its analytical applications. *Sensors International*, 2, artykuł 100114. doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100114.
- Kang, K. W., Pereda, M. D., Canafoglia, M. E., Bilmes, P., Llorente, C., Bonetto, R. (2012). Uncertainty studies of topographical measurements on steel surface corrosion by 3D scanning electron microscopy. *Micron*, 43(2–3), 387–395. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2011.10.005>.

- LaRocco, J., Paeng, D. G. (2020). A functional analysis of two 3D-scanned antique pistols from New Zealand. *Virtual Archaeology Review*, 11(22), 85–94. doi.org/10.4995/var.2020.12676.
- Liang, Y., Woźniak, M. (2022). Virtual reconstruction system of building spatial structure based on laser 3D scanning under multivariate big data fusion. *Mobile Networks and Applications*, 27, 607–616. <https://doi.org/10.1007/s11036-021-01825-2>.
- Miedzińska, D. (2010). Tomografia komputerowa w modelowaniu materiałów. XXIX Seminarium Koła Naukowego Mechaników, 324–329.
- Miedzińska, D., Niezgoda, T., Gieleta, R. (2012). Numerical and experimental aluminum foam microstructure testing with the use of computed tomography. *Computational Materials Science*, 64, 90–95, doi.org/10.1016/j.commatsci.2012.02.021.
- Mierzwa, S. (12 maja 2019). *Stare Miasto w Krakowie*. <https://chasingunesco.com/stare-miasto-w-krakowie>.
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 143, 172–196, doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- Polski Komitet ds. UNESCO (2020). *Polskie obiekty na Liście Światowego Dziedzictwa*. <https://www.unesco.pl/kultura/dziedzictwo-kulturowe/swiatowe-dziedzictwo/polskie-obiekty>.
- Saleem, S. N., Hawass, Z. (2014). Ankylosing spondylitis or diffuse idiopathic skeletal hyperostosis in royal Egyptian mummies of 18th – 20th Dynasties? CT and archaeology studies. *Arthritis & Rheumatology*, 66(12), 3311–3316. <https://doi.org/10.1002/art.38864>.
- Sargentis, G. F., Frangedaki, E., Chiotinis, M., Koutsoyiannis, D., Camarinopoulos, S., Camarinopoulos, A., Lagaros, N. D. (2022). 3D scanning/printing: A technological stride in sculpture. *Technologies*, 10(9). doi.org/10.3390/technologies10010009.
- Sesana, E., Gagnon, A. S., Ciantelli, Ch., Cassar, J., Hughes, J. J. (2021). Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *WIREs Climate Change*, 12(4), e710, doi.org/10.1002/wcc.710.

- Shih, N. J., Wang, H. J., Lin, Ch. Y., Liao, Ch. Y. (2007). 3D scan for the digital preservation of a historical temple in Taiwan. *Advances in Engineering Software*, 38(7), 501–512, doi.org/10.1016/j.advengsoft.2006.09.014.
- Tacik, Ł. (26 sierpnia 2007). *Wysadzone przez talibów posągi buddy będą odbudowane*. <https://tvn24.pl/swiat/wysadzone-przez-talibow-posagi-buddy-beda-odbudowane-ra26093-3598996>.
- Thamir, S. Z., Abed, F. M. (2020). How geometric reverse engineering techniques can conserve our heritage; a case study in Iraq using 3D laser scanning. *IOP Conference Series: Materials Science Engineering*, 737. doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012231.
- Wilson, P. F., Smith, M. P., Hay, J., Warnett, J. M., Attridge, A., Williams, M. A. (2018). X-ray computed tomography (XCT) and chemical analysis (EDX and XRF) used in conjunction for cultural conservation: the case of the earliest scientifically described dinosaur *Megalosaurus bucklandii*. *Heritage Science*, 6, artykuł 58. doi.org/10.1186/s40494-018-0223-0.
- Worsztynowicz, A. (2022). *O Hali*. <https://halastulecia.pl/o-hali/#pid=1>.
- Zesch, S., Panzer, S., Rosendahl, W., Nance, J. W., Schönberg, S. O., Henzler, T. (2016). From first to latest imaging technology: Revisiting the first mummy investigated with X-ray in 1896 by using dual-source computed tomography. *European Journal of Radiology Open*, 3, 172–181, doi.org/10.1016/j.ejro.2016.07.002.