

dr inż. Joanna Janicka<sup>1\*)</sup>

ORCID: 0000-0001-6098-2921

dr hab. inż. Wioleta Błaszczak-Bąk<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-6169-1579

dr inż. Renata Pelc-Mieczkowska<sup>1)</sup>

ORCID: 0000-0001-7064-6745

prof. dr hab. inż. Miłostawa Rutkowska<sup>2)</sup>

ORCID: 0000-0002-7345-9889

# Fuzja chmur punktów pozyskanych TLS oraz smartfonem z sensorem LiDAR do przygotowania pełnego zbioru danych na potrzeby inwentaryzacji

*Fusion of point clouds obtained with TLS and a smartphone with a LiDAR sensor to prepare a completed data set for the inventory*

DOI: 10.15199/33.2023.12.11

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki integracji chmur punktów pozyskanych z wykorzystaniem naziemnego skanera laserowego oraz smartfona z sensorem LiDAR. Kompletny zbiór danych posłużył do inwentaryzacji ściany obiektu zabytkowego klasztoru Franciszkanów. W 2019 r. na wniosek upoważnionej osoby dokonano pomiarów obiektu ze względu na zaobserwowane odchylenie ściany budynku spowodowane osiadaniem fundamentów budowli i rozpoczęto prace rewitalizacyjne polegające na wzmocnieniu gruntu pod fundamentami kościoła. Przeprowadzono wiele prac mających na celu zatrzymanie osiadania fundamentów, a także dobudowano i uzupełniono brakujące fragmenty ściany, które miały znaczny wpływ na stabilność obiektu. W 2023 r. powtórzono pomiar, wykorzystując naziemny skaner laserowy i smartfon iPhone 12Pro, aby sprawdzić, czy wykonane prace przyniosły pożądany efekt i zahamowały dalsze odchylenia ścian. Kompletny, zintegrowany zbiór danych posłużył również do wizualizacji ściany po zabiegach konserwatorskich.  
**Słowa kluczowe:** TLS; smartfon z LiDAR; integracja danych; zabytek.

**Abstract.** The article presents the results of the integration of point clouds obtained using a terrestrial laser scanner and a smartphone with a LiDAR sensor. The complete data set was used to inventory the wall of the historic Franciscan Monastery. In 2019, at the request of the parish priest, the building was measured due to the observed deviation of the building walls caused by the subsidence of the foundations of the building and revitalization works began, consisting in strengthening the ground under the foundations of the church. A number of works were carried out to stop the process of settling the foundations of the monastery, and the missing fragments of the wall were added and supplemented, which had a significant impact on the stability of the building. In 2023, the measurement was repeated using terrestrial laser scanner and iPhone 12Pro to check whether the applied works had the desired effect and inhibited further deviations of the walls. A complete, integrated data set was also used to visualize the wall after conservation treatments.

**Keywords:** TLS; smartphone with LiDAR; data integration; heritage object.

Obiekty historyczne wymagają monitoringu stanu technicznego. Inwentaryzacje przeprowadzane są w stałych, określonych odstępach czasu lub na wniosek administratora obiektu w sytuacji zaobserwowanych zmian w konstrukcji budowli. Polegają na wykonaniu wielu pomiarów, zdjęć i rysunków, na podstawie których możliwa będzie ocena stanu technicznego obiektu oraz jego elementów. W przypadku pomiarów obecnie dostępnych jest wiele różnych metod i technologii. Nieinwazyjnym rozwiązaniem jest wykorzystanie naziemnego skanera laserowego (ang. *Terrestrial Laser Scanning – TLS*) oraz smartfonów z wbudowanym sensorem LiDAR (*Light Detection and Ranging*) stosowanych w celu uzupełnienia pomiarów w miejscach trudno dostępnych ze względu na gabaryty sprzętu [1, 2]. Naziemne skanery laserowe i ich zalety w inwentaryzacjach architektonicznych są już dobrze przebadane i udokumentowane [3]. Pozwalają w krótkim czasie pozyskać zbiory danych w postaci chmur punktów, które wykorzystywane są do różnego rodzaju ana-

liz. Wykorzystane w iPhone 12Pro rozwiązanie (wbudowany sensor LiDAR) również umożliwia pozyskanie chmury punktów 3D [4 ÷ 6], ale zasięg pomiarów ograniczony jest do 5 m. Skanowanie z użyciem iPhone'a 12Pro z czujnikiem LiDAR realizowane jest z aplikacji dostępnych w AppStore. Wybór jest duży, a spośród najbardziej popularnych można wymienić: 3D Scanner App, Polycam, SiteScape, LiDAR Scanner 3D, Scany Pro [7]. W przypadku inwentaryzacji klasztoru w Barczewie wykorzystano 3D Scanner App [8]. Jest to produkt bezpłatny, który umożliwia przetwarzanie zdjęć i filmów w czasie rzeczywistym, w celu tworzenia modeli 3D w wysokiej rozdzielczości i jakości tekstu. Obsługiwane w aplikacji formaty eksportu danych to: XYZ color, PLY, PTS, LAS, LAS Geo-Referenced, E57, PCD. Wykonując skanowanie z wykorzystaniem wspomnianej aplikacji, należy poruszać się wzdłuż mierzonego obiektu i powołać przesuwacze urządzenie w celu zebrania danych w postaci chmury punktów. Następnie dane pomiarowe eksportuje się, wykorzystując: AirDrop, e-mail, WhatsApp lub inne aplikacje.

W celu gromadzenia precyzyjnych i kompletnych danych geoprzestrzennych można integrować chmury punktów pozyskiwane z różnych źródeł [9]. Wymaga to rejestracji chmur

<sup>1)</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geoinżynierii

<sup>2)</sup> Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji

\*) Adres do korespondencji: joanna.janicka@uwm.edu.pl

punktów w jednym układzie współrzędnych. Zazwyczaj chmury punktów TLS przyjmuje się jako dane referencyjne i to do nich dołączane są chmury punktów pomierzone smartfonem. W związku z tym, że smartfon nie jest typowym urządzeniem pomiarowym, testuje się różne metody łączenia chmur punktów pod względem ich przydatności do: modelowania obiektów [10], gromadzenia dokumentacji technicznej obiektów zabytkowych [11] oraz uaktualniania przechowywanych danych pomiarowych.

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych z wykorzystaniem TLS oraz smartfona z czujnikiem LiDAR. Pozyskane dane pomiarowe zostały zintegrowane w celu zgromadzenia pełnej chmury punktów klasztoru Franciszkanów, w przypadku którego stwierdzono duże odchylenie od pionu ściany prezbiterium. Pomiar TLS wykonany został w dwóch epokach pomiarowych (2019 i 2023 r.), natomiast pomiar smartfonem z sensorem LiDAR został wykonany w jednej epoce (2023 r.) w celu uzupełnienia danych dotyczących nowo wybudowanych fragmentów ścian budowli. Dwie epoki pomiarowe posłużyły do monitoringu zmian, natomiast chmury punktów pozyskane smartfonem potwierdzają, że można uzupełniać pomiary TLS (wykonywane dużo wcześniej niż pomiar smartfonem), wykorzystując telefon.

Proponowaną w artykule metodę stworzenia pełnego zbioru danych przygotowano na podstawie klasztoru Franciszkanów w Barczewie.

## Obiekt badań

Klasztor Franciszkanów w Barczewie (fotografia 1) wzniesiono w XIV w. Na przestrzeni kilku wieków losy jego były różne, a właściciel nie zawsze dbał o jego stan techniczny, np. na początku XIX w. zamiast funkcji sakralnej spełniał rolę więzienia. W ostatnich latach zaobserwowano znaczne odchylenie od pionu wschodniej ściany kościoła. W XIV w. zaprojektowano fundamenty obiektu na głębokości 1,8 – 2,0 m. Do ich wykonania wykorzystano głązy narzutowe, które posadowiono w warunkach gruntów nasypowych pochodzenia antropogenicznego. W efekcie nierównomiernego osiadania obiektu wystąpiły zarysowania murów oraz sklepienia kościoła, a ściana szczytowa prezbiterium wykazuje znaczne przemieszczenia poziome na zewnątrz, w kierunku rzeki. Na podstawie specjalistycznych ekspertyz i wielu badań wykazano konieczność wzmocnienia podłoża pod fun-



Fot. 1. Klasztor Franciszkanów w Barczewie [12]  
Photo 1. Franciscan Monastery in Barczewo [12]

damentami kościoła. Jako optymalne rozwiązanie wybrano metodę iniekcji strumieniowej (*jet grouting*). Przed wzmocnieniem gruntu zabezpieczono ściany prezbiterium (za pomocą stalowego ściągu) i ściany kościoła. Wykonano także odkrywkę fundamentów. Trzeba było również odpowiednio przygotować wnętrze kościoła. Zdemonstrowano wszystkie boczne ołtarze w nawie głównej i w kaplicy św. Antoniego, wyniesiono ławki oraz duże elementy, jak stalle, a konfesjonały przesunięto na środek kościoła, by móc wykonać badania archeologiczne wzdłuż wszystkich ścian wewnętrznych prezbiterium i nawy głównej. Na fotografii 2 przedstawiono roboty mające na celu wzmocnienie fundamentów.



Fot. 2. Prace mające na celu wzmocnienie fundamentów [13]  
Photo 2. Works aimed at strengthening the foundations [13]

W przypadku zastosowania iniekcji *jet grouting* wykorzystuje się wysokoenergetyczny strumień płynu w celu scementowania gruntu. Proces ten zaczyna się od wkręcenia monitora iniekcji wysokociśnieniowej na zaprojektowaną głębokość. Pod dużym ciśnieniem (400 atmosfer) wydostaje się zaczyn cementowy przez dysze w monitorze, który wycina i miesza grunt w trakcie wyciągania oraz obracania monitora. W ten sposób powstają kolumny, które każdorazowo projektuje się na określoną wytrzymałość. W Barczewie wykonano łącznie 184 kolumny podtrzymujące fundamenty kościoła z zewnątrz i od wewnątrz. Łączna długość wiercenia wyniosła 1459,33 m i wykonano 1280,02 m kolumn iniekcyjnych pod fundamentami wzmocnianego obiektu. Prace pochłonęły ok. 1200 t cementu.

Poza ścianą prezbiterium, od zewnętrznej strony wykonano wzmocnienie ścian fundamentowych kaplicy św. Antoniego i krypty, ponieważ okazało się, że nie mają tak mocnych fundamentów jak inne ściany kościoła. Trzeba było wzmocnić grunt zaporami i prowadzić prace tak, by nie uszkodzić ścian krypty. W tym przypadku zdecydowano, że najpierw wzmocnione zostaną przypory krypty, a następnie ściany po przygotowaniu zabezpieczenia. Projekt zabezpieczenia ścian krypty przygotował **dr hab. inż. Robert Wójcik, prof. UWM** [14, 15]. Następnie rozpoczęto prace wewnątrz kościoła. Po specjalnie przygotowanej platformie wprowadzono do świątyni sprzęt wiertniczy do tworzenia kolumn. Wiertnica połączona została z całym zapleczem znajdującym się na placu klasztorным długimi wężami, którymi wprowadzano mieszankę betonową pod fundament kościoła. Wszystkie prace prowadzono do 10 października 2019 r.

**Metoda badań**

Po przeprowadzeniu wszystkich prac naprawczych postanowiono wykonać pomiary kontrolne, a także uzupełniające. Pomiary kontrolne zaplanowane na 2023 r. miały ponownie określić wartość wychylenia ściany szczytowej prezbiterium. Po wzmocnieniu fundamentów kościoła przeprowadzono także prace naprawcze polegające na uzupełnieniu ubytków w murach otaczających obiekt. Miały one na celu poprawę architektury obiektu, ale też wzmocnienie konstrukcji i zabezpieczenie przed dalszą dewastacją klasztoru. Pomiary dobudowanych fragmentów murów i ścian wykonano z wykorzystaniem smartfona z czujnikiem LiDAR. Kolejnym krokiem była fuzja danych w postaci chmury punktów pozyskanej smartfonem z chmurą punktów TLS z 2019 r. Plan badań przedstawiono na rysunku 1. Prace obejmują **etap 1**, czyli przygotowanie danych pozyskanych w 2019 r. za pomocą TLS (CP2019\_TLS) oraz danych z 2023 r. z pomiaru smartfonem z sensorem LiDAR (CP2023\_iPhone) w formatach odpowiednich dla wykorzystanego urządzenia pomiarowego. **Etap 2** to import przygotowanych chmur punktów do specjalistycznego oprogramowania w celu integracji chmur punktów i otrzymania jednego, pełnego zbioru danych CP. W **etapie 3** następuje wizualizacja chmury punktów CP, a także analiza monitoringu zmian z dwóch epok CP2019\_TLS oraz CP2023\_TLS.

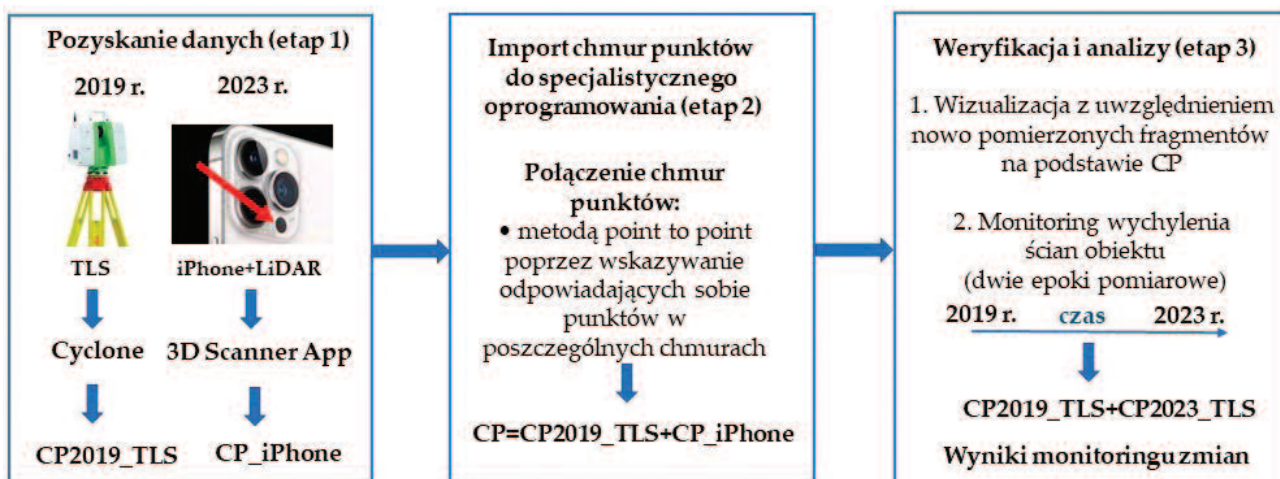


Rys. 2. Chmura punktów CP2019\_TLS

Fig. 2. CP2019\_TLS point cloud

śląjące wychylenie od pionu ściany wschodniej kościoła, które wynosiło ponad 20 cm. Ścianę, która zagrażała bezpieczeństwu konstrukcji kościoła, zaprezentowano na rysunku 3.

**Wyniki pomiarów, epoka 2023.** Umacnianie fundamentów zakończono jesienią 2019 r. W 2022 r. zakończono prace rewitalizacyjne dotyczące osuszania gruntu wokół kościoła oraz wiele innych prac remontowych, a w 2023 r. wykonano ponowny pomiar ściany prezbiterium oraz nowo pobudowanych fragmentów ściany, wykorzystując naziemny skaner laserowy Leica ScanStation C10 oraz smartfon iPhone 12Pro z sensorem LiDAR (fotografia 3).



Rys. 1. Metoda badań

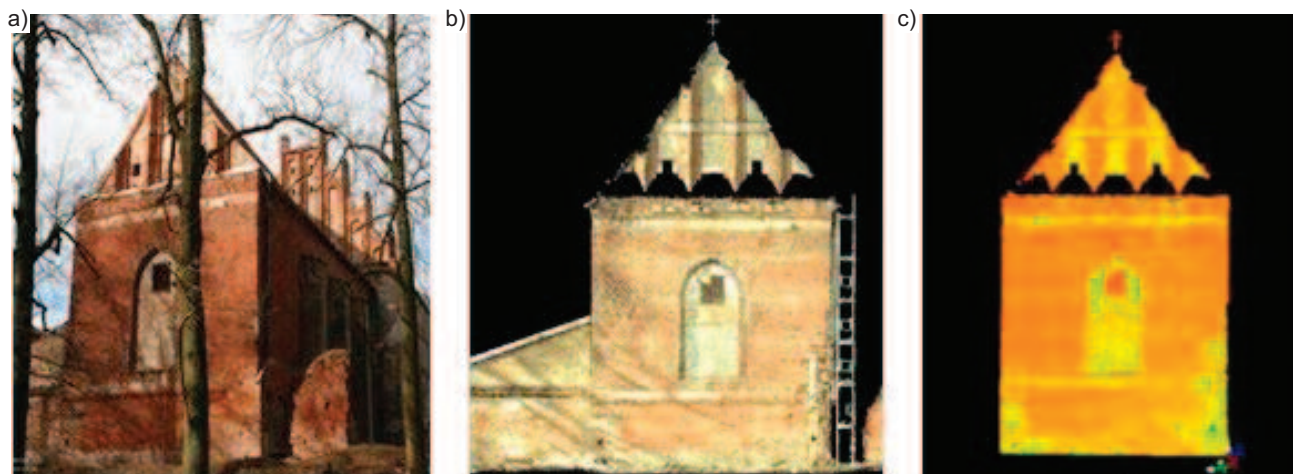
Fig. 1. Research method

**Pomiar TLS i smartfonem z sensorem LiDAR**

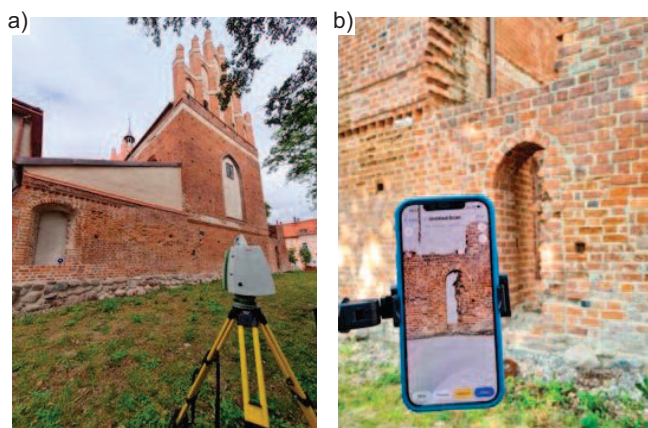
**Wyniki pomiarów, epoka 2019.** Zanim przystąpiono do prac rewitalizacyjnych mających na celu zatrzymanie odchylania się od pionu ściany szczytowej prezbiterium niezbędne było przeprowadzenie pomiarów inwentaryzacyjnych. Aby określić wielkość wychylenia, w 2019 r. wykonano pomiary geodezyjne z wykorzystaniem naziemnego skanera laserowego Leica ScanStation C10. Na rysunku 2 zaprezentowano chmurę punktów CP2019\_TLS z programu Cyclone zawierającą 20 529 218 punktów. Analizując ją, można zaobserwować ubytki w murze po lewej stronie ściany prezbiterium. Podobna sytuacja widoczna jest w części centralnej i po prawej stronie ściany kościoła (czerwona linia). Wykorzystując pozyskaną chmurę punktów TLS, przeprowadzono badania okre-

Idęą pomiaru było zweryfikowanie, czy smartfon z sensorem LiDAR może być dobrym narzędziem do uzupełnienia zbioru danych na potrzeby inwentaryzacji. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość szybkiego, niskonakładowego pozyskania chmury punktów bez konieczności wykorzystania specjalistycznego naziemnego skanera laserowego. Pozyskane w trakcie pomiarów chmury punktów CP1\_iPhone, CP2\_iPhone oraz CP3\_iPhone (łącznie CP2023\_iPhone) i ich odpowiedniki w postaci zdjęć zaprezentowano na fotografiach 4 – 6. Kolorem czerwonym zaznaczono obszar, który był objęty pomiarem – dobudowane fragmenty ścian.

Przed pracami remontowymi istniały liczne duże i małe ubytki w strukturze muru i kościoła od strony prezbiterium. Chmura CP2019\_TLS jest zatem niekompletna i nieaktualna.



Rys. 3. Ściana budynku objęta pomiarem: a) widok; b) chmura punktów z RGB; c) chmura punktów z natężeniem promieniowania  
 Fig. 3. Building wall covered by the measurement: a) view; b) point cloud with RGB; c) point cloud with intensity



Fot. 3. Pomiary 2023 r.: a) TLS z wykorzystaniem Leica ScanStation C10; b) iPhone z LiDAR  
 Photo 3. Measurements in 2023: a) TLS using Leica ScanStation C10; b) iPhone with LiDAR

### Połączenie chmur punktów

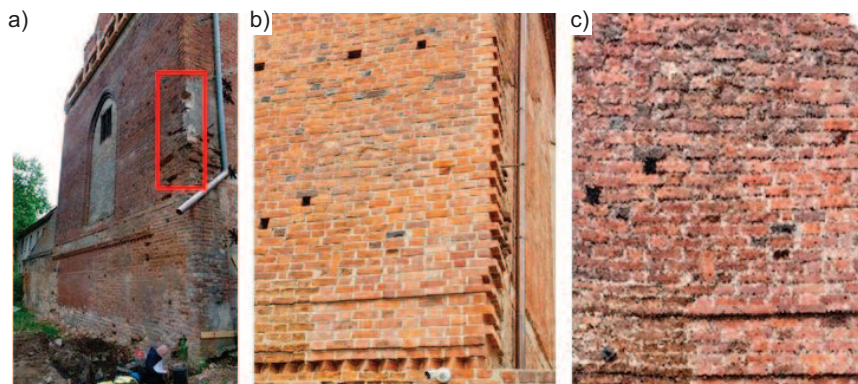
W etapie 2 proponowanej metody badań połączono chmury CP1\_iPhone, CP2\_iPhone, CP3\_iPhone oraz CP2019\_TLS. Zintegrowaną chmurę przedstawiono na rysunku 5. Integrację chmur punktów wykonano w oprogramowaniu CloudCompare v. 2.12 przez łączenie chmur metodą point-to-point. Wskazywano na nich punkty tożsame, a następnie wykonano automatyczne łączenie chmur punktów. Analizując rysunki 2, 3 i 4, można stwierdzić, że wariant chmury punktów CP = CP2019\_TLS + CP1\_iPhone + CP2\_iPhone + CP3\_iPhone pokazany na rysunku 5 może stanowić alternatywę dla ponownego pomiaru całego obiektu za pomocą TLS (rysunek 4). Fuzja danych pomiarowych z iPhone'a 12Pro z danymi z naziemnego skaningu laserowego jest możliwa, dokładna i w wystarczający sposób uzupełnia pomiary inwentaryzacyjne. Statystyki związane z etapem łączenia chmury punktów CP2019\_TLS z chmurą z pomiaru smartfonem z LiDAR zaprezentowano w tabeli 1. Dokładność połączenia chmur punktów pozyskanych za pomocą smartfona z sensorem LiDAR obliczana jest automatycznie w programie CloudCompare na podstawie zaimplementowanego algorytmu ICP (*Iterative Closest Point*). Łącząc dwie chmury punktów metodą point-to-point, należy wskazać na dwóch skanach co najmniej 4 punkty wspólne dla obu chmur punktów. Algorytm ICP iteracyjnie dopasowuje punkty pochodzące z dwóch różnych chmur, minimalizując odległości pomiędzy nimi. Proces kończy się, gdy zostanie uzyskana najmniejsza wartość RMS.



Fot. 4. Łuk: a) fragment ściany przed remontem; b) fragment ściany po remoncie; c) chmura punktów CP1\_iPhone (429 989 punktów)  
 Photo 4. The arch: a) the wall fragment before renovation; b) the wall fragment after renovation; c) CP1\_iPhone point cloud (429 989 points)

Przygotowanie chmur punktów CP1\_iPhone, CP2\_iPhone oraz CP3\_iPhone pozwoliło na uzupełnienie braków w chmurze i uaktualnienie zbioru danych. Pozyskaną dla całej mierzonej ściany wraz z kamiennym murem chmurę punktów z pomiaru TLS (CP2023TLS) zaprezentowano na rysunku 4.

Wartość RMS wskazuje na dokładność integracji chmur punktów i w dużym stopniu zależy od dokładnego wskazania punktów tożsamych na łączonych chmurach. W tabeli 1 zestawiono wartości RMS dla trzech chmur punktów CP1\_iPhone, CP2\_iPhone i CP3\_iPhone dołączanych do chmury punktów z TLS. Na obiekcie CP3\_iPhone najtrudniej było znaleźć



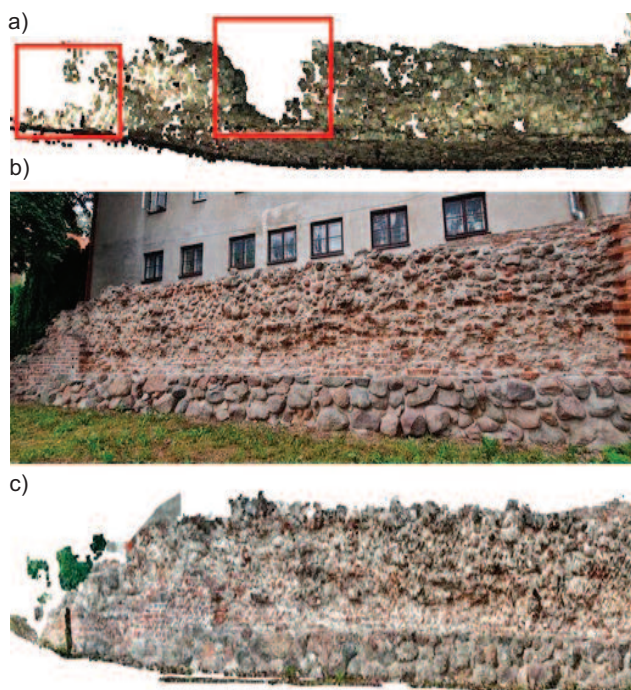
Fot. 5. Narożnik ściany: a) przed remontem; b) po remoncie; c) chmura punktów CP2\_iPhone (516 978 punktów)  
 Photo 5. The wall corner: a) before renovation; b) after renovation; c) CP2\_iPhone point cloud (516 978 points)

punkty charakterystyczne, ponieważ są to głównie obłe kamienie, stąd wartość RMS jest największa.

Tabela 1. Statystyki dotyczące chmur punktów

Table 1: Point clouds statistics

Nazwa chmury punktów	Liczba punktów w chmurze	RMS [m]	Rozdzielczość pomiaru [m]
CP2019_TLS	20 529 218	–	0,005
CP1_iPhone	429 989	0,03	0,01
CP2_iPhone	516 978	0,04	0,01
CP3_iPhone	1 182 450	0,06	0,01



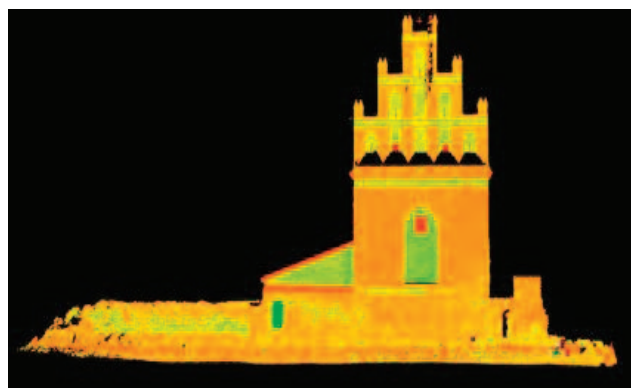
Fot. 6. Mur kamienny: a) TLS\_2019; b) aktualny stan; c) CP3\_iPhone (1 182 450 punktów)  
 Photo 6. Stone wall: a) TLS\_2019; b) the current state; c) CP3\_iPhone (1 182 450 points)



Rys. 5. Chmura punktów CP  
 Fig. 5. CP cloud point

### Weryfikacja wyników i analizy

W etapie 3 wykonano wizualizację chmury punktów ze wskazaniem miejsc uzupełnionych pomiarem smartfonem z sensorem LiDAR (rysunek 6). Kolejnym krokiem było wykonanie przekrojów pionowych wzdłuż mierzonej ściany kościoła w celu określenia wartości wychylenia. Do tego celu wykorzystano zintegrowane chmury punktów z dwóch epok CP2019\_TLS oraz CP2023\_TLS. Statystyki związane z etapem łączenia chmur punktów z pomiaru CP2019\_TLS oraz CP2023\_TLS zaprezentowano w tabeli 2. Wartość RMS pokazuje dokładność integracji chmur punktów pozyskanych z TLS w dwóch epokach pomiarowych. Następnie zdefiniowano układ współrzędnych na badanym obiekcie, wybierając dwa punkty na ścianie leżące w linii prostej, utworzono płaszczyznę odniesienia i wpasowano ją w zdefiniowany układ współrzędnych. Badanie wychylenia od pionu można przeprowadzić, wy-



Rys. 4. Chmura punktów CP2023\_TLS  
 Fig. 4. CP2023\_TLS point cloud



Rys. 6. Chmura punktów CP z uwzględnieniem nowo wybudowanych fragmentów  
 Fig. 6. CP point cloud including newly built fragments

**Tabela 2. Statystyki integracji chmur punktów z TLS**

*Table 2. Statistics for integration TLS point clouds*

Nazwa chmury punktów	Liczba punktów w chmurze	RMS [m]	Rozdzielczość pomiaru [m]
CP2019_TLS	20 529 218	0,03	0,005
CP2023_TLS	19 565 501		0,005

bierając na powierzchni ściany przekroje pionowe w dowolnych punktach. W tabeli 3 przedstawiono wartości odchyłek od pionowej płaszczyzny odniesienia, które odczytano na przekrojach pionowych wykonanych na wysokości 12 m.

Na podstawie analizowanych danych stwierdzono, że podczas prac remontowych oraz w okresie czterech lat od ich zakończenia wychylenie pionowe na wysokości 12 m nie zmieniło się i wynosi średnio 22 cm. Przekroje wykonano na całej długości ściany w odstępach co 1 m, otrzymując 10 przekrojów. Różnice w wartości wychylenia od pionu pomiędzy epoką 2019 a 2023 r. były bliskie zeru. Można zatem stwierdzić, że prace związane z umacnianiem fundamentów nie wpłynęły na wartość wychylenia, a ich wykonanie pozwoliło zatrzymać proces wychylania się ściany prezbiterium.

**Tabela 3. Wartość odchyłek od pionowej płaszczyzny odniesienia**

*Table 3. Value of deviations from the vertical reference plane*

Nr przekroju	Odchyłki [m]		Różnice odchyłek od pionowości [m]
	Epoka 2019	Epoka 2023	
1	0,208	0,206	0,002
2	0,206	0,205	-0,001
3	0,203	0,200	0,003
4	0,211	0,213	-0,002
5	0,213	0,210	0,003
6	0,215	0,217	-0,002
7	0,218	0,220	-0,002
8	0,220	0,218	0,002
9	0,221	0,224	-0,003

**Podsumowanie i wnioski**

Wyniki prezentowanych badań z integracji chmur punktów uzyskanych za pomocą smartfona z sensorem LiDAR oraz TLS potwierdzają korzyści wynikające z wykorzystania kompletnej chmury punktów do monitoringu zmian pracy obiektów budowlanych. Wśród nich należy wymienić przede wszystkim:

- wysoką rozdzielczość i dokładność, ponieważ integracja chmur punktów pozwala na uzyskanie danych bardzo dobrej jakości i dokładności. Błąd rejestracji chmur punktów z pomiarów TLS i smartfonem z sensorem LiDAR wynosił 0,03 – 0,06 m;
- mobilność i ergonomię smartfona oraz precyzję TLS. Smartfon jest przenośnym urządzeniem, co umożliwia zbieranie danych w trudno dostępnych miejscach i uzupełnionych ubytkach ścian. W badaniach posłużył do pozyskania chmur punktów, które uzupełniły pomiar z epoki 2019. TLS oferuje doskonałą precyzję w pomiarach (w wykonanym pomiarze 5 mm), co jest kluczowe w zadaniach wymagających dużej dokładności;
- uzupełnienie informacji bez konieczności ponownego pomiaru TLS. W ramach przeprowadzonych badań potwierdzono, że skanowanie tylko obszarów, które zostały odbudowane, a następnie integracja chmur punktów reprezentujących te fragmenty obiektu do wcześniej pozyskanej chmury TLS jest rozwiązaniem możliwym i dokładnym, co potwierdzają wyniki w tabeli 1;
- oszczędność czasu w terenie i kosztów związanych z zakupem sprzętu pomiarowego.

Podsumowując zaprezentowaną koncepcję fuzji chmur punktów pozyskanych TLS oraz smartfonem z sensorem LiDAR

(na przykładzie klasztoru Franciszkanów w Barczewie), można uznać za dobre rozwiązanie, zwłaszcza w przypadku obiektów, które są w procesie zmian. Przed rozpoczęciem prac remontowo-rewitalizacyjnych obiekt został pomierzony naziemnym skanerem laserowym, uzyskując w ten sposób bardzo dokładny zbiór danych o rozdzielczości kilku mm. Na przestrzeni kilku lat i trwających prac obiekt zmieniał wygląd. Odbudowano pewne fragmenty murów i ścian, wpływając tym samym na stan techniczny budowli oraz walory architektoniczno-historyczne. Tego typu zmiany, podczas trwających prac, mogą być na bieżąco dokumentowane z wykorzystaniem współczesnych rozwiązań technologicznych, np. smartfona z LiDAR. Urządzenie jest małe, poręczne, a zastosowane rozwiązania technologiczne pozwalają pozyskać chmurę punktów o rozdzielczości ok. 3 cm.

Chmura punktów pozyskana iPhone’em 12Pro LiDAR może być dołączona do chmur punktów z innych urządzeń pomiarowych w np. oprogramowaniu CloudCompare. Podczas łączenia chmur metodą point-to-point operator ma cały czas wpływ na to, czy dokładność połączenia jest zadowalająca. Przed ostatecznym zaakceptowaniem procesu oprogramowanie wyświetla charakterystykę dokładnościową w postaci RMS umożliwiając przeprowadzenie procesu ponownie, jeżeli wartość RMS nie mieści się w przedziale założonym przez operatora.

**Literatura**

[1] Razali MI, Idris AN, Razali MH, Syafuan WM. Quality Assessment of 3D Point Clouds on the Different Surface Materials Generated from iPhone LiDAR Sensor. *International Journal of Geoinformatics*. 2022; DOI: 10.52939/ijg.v18i4.2259.

[2] Błaszczak-Bąk W, Suchocki C, Kozakiewicz T, Janicka, J. Measurement Methodology for Surface Defects Inventory of Building Wall Using Smartphone with Light Detection and Ranging Sensor. *Measurement (Lond)* 2023; DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113286.

[3] Nowak R, Orłowicz R, Rutkowski R. Use of TLS (LiDAR) for Building Diagnostics with the Example of a Historic Building in Karlino. *Buildings*. 2020; DOI: 10.3390/buildings10020024.

[4] Aslan İ, Polat N. Availability of Iphone 13 Pro Laser Data in 3D Modeling. *Advanced LiDAR* 2022, 2.

[5] Teppati Losè L, Spreafico A, Chiabrando F, Giulio Tonolo F. Apple LiDAR Sensor for 3D Surveying: Tests and Results in the Cultural Heritage Domain. *Remote Sens (Basel)* 2022; DOI: 10.3390/rs14174157.

[6] Żaczek-Peplińska J, Kowalska ME. Pomiary Inwentaryzacyjne z Wykorzystaniem Apple iPhone 13 Pro i Zintegrowanej Technologii LiDAR. *Przegląd Geodezyjny*. 2023; DOI: 10.15199/50.2023.02.1.

[7] Vacca G. 3D Survey with Apple LiDAR Sensor – Test and Assessment for Architectural and Cultural Heritage. 2023; DOI: 10.3390/heritage6020080.

[8] www.3dscannerapp.com dostęp: 15 sierpnia 2023.

[9] Kedzierski M, Fryskowska A. Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling. *Measurement*. 2015; DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.015.

[10] Fabris M, Fontana Granotto P, Monego M. Expeditious low-cost SfM photogrammetry and a TLS survey for the structural analysis of Illasi Castle (Italy). *Drones*. 2023; DOI: 10.3390/drones7020101.

[11] Błaszczak-Bąk W, Janicka J, Dumalski A, Masiero A. Integration of Terrestrial Laser Scanning and Smartphone Lidar: the Case Study of Lidzbark Castle. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2023; doi: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-51-2023.

[12] www.google.pl/maps dostęp: 10 sierpnia 2023.

[13] www.barczewo.franciszkanie.net/galeria-zdjec-2019 dostęp: 23 sierpnia 2023.

[14] Wójcik R. Osuszanie Zabytkowych Murów Fundamentowych Metodą Drenażu Dwufunkcyjnego. *Materiały Budowlane*. 2022; DOI: 10.15199/33.2022.03.03.

[15] Wójcik R. Monitoring Zawartości Wilgoci w Murach Ceglanych Metodą Rezystancyjną – Dobór Skali Kalibracji Czujników. *Materiały Budowlane*. 2023; DOI: 10.15199/33.2023.03.09.

*Przyjęto do druku: 28.11.2023 r.*