

**DOKUMENTACJA FOTOGRAMTRYCZNA STANOWISK
ARCHEOLOGICZNYCH W TERENIE MIEJSKIM NA PRZYKŁADZIE KUTAISI,
GRUZJA**

**PHOTOGRAMMETRIC DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL SITES IN
AN URBAN ENVIRONMENT: THE CASE STUDY OF KUTAISI, GEORGIA**

Jakub Markiewicz¹, Michał Kowalczyk¹, Jacek Hamburg², Rafał Bieńkowski³

¹ Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej,
Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska

² Instytut Archeologii, Wydział Historyczny, Uniwersytet Warszawski

³ Instytut Badań Systemowych, Polska Akademia Nauk

SŁOWA KLUCZOWE: analiza dokładności, Agisoft PhotoScan, aerotriangulacja, Bagrati, błąd reprojekcji, niskobudżetowy BSL, Gruzja, Kutaisi, SfM

STRESZCZENIE: W artykule przedstawione zostały zagadnienia związane z przetwarzaniem i analizą zdjęć, pozyskanych niskobudżetowymi sensorami naziemnymi i Bezzałogowym Systemem Latającym (BSL), miejskich stanowisk archeologicznych zlokalizowanych na terenie Kutaisi w Gruzji. Przedstawiono problematykę przeprowadzania badań archeologicznych na obszarze miejskim oraz przybliżono problem braku danych źródłowych dla badanego terenu. W celu wygenerowania dokumentacji fotogrametrycznej dla stanowiska Bagrati, zdecydowano się na wykorzystanie niskobudżetowego BSL *DJI Phantom 3* oraz kamery *Pentax*. Ze względu na jakość geometryczną i radiometryczną wykorzystywanych sensorów niezbędne było zaproponowanie rozszerzonej metodyki przetwarzania danych z BSL i zdjęć naziemnych w oprogramowaniu *Agisoft PhotoScan*. W tym celu wykorzystano interfejs programistyczny *API* (ang. *Application Programming Interface*), pozwalający na wykorzystanie funkcji oprogramowania niedostępnych w podstawowej wersji aplikacji oraz autorski skrypt stworzony w *MatLab*. Zaproponowano sposób przetwarzania, filtracji, usuwania oraz wagi obserwacji. W wyniku przeprowadzonych prac i sposobu filtracji danych poprawiono dokładność procesu aerotriangulacji o rząd wielkości w porównaniu do obserwacji surowych, jak również rozszerzono analizę statystyczną danych.

**1. PROBLEMY ARCHEOLOGII NA TERENACH MIEJSKICH
I CHARAKTERYSTYKA STANOWISK W KUTAISI**

Badania wykopaliskowe na terenie współczesnych miast są niezwykle trudnym przedsięwzięciem ze względów organizacyjnych, jak i z punktu widzenia metodyki pracy archeologów. W sytuacji idealnej archeolog dysponuje nielimitowanym okresem czasu oraz ma dostęp do całego obszaru stanowiska archeologicznego, które nie zostało współcześnie zabudowane ani naruszone. Jest to jednak sytuacja idealna i niestety rzadko spotykana w praktyce. Podstawowym celem wykopalisk jest zarejestrowanie zabytków znajdujących się w ziemi oraz ich wzajemnych relacji przestrzennych w zależności od warstw

i pozostałości konstrukcji. Wszystko to składa się na tzw. kontekst znalezisk, który jest kluczowym źródłem informacji dla archeologów. Kontekst ten musi zostać precyzyjnie zarejestrowany, ponieważ w trakcie wykopalisk ulega on bezpowrotnie zniszczeniu.

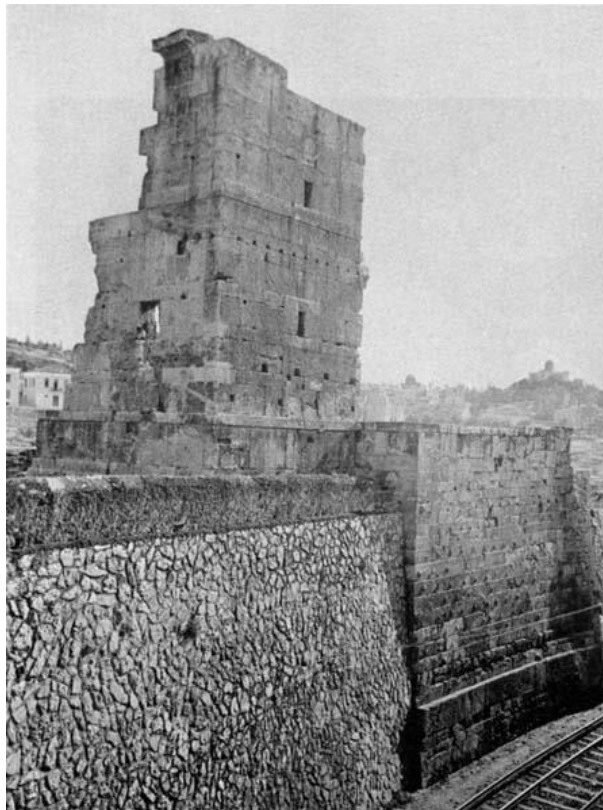
Badania archeologiczne na terenach miast są zazwyczaj związane z planowanymi inwestycjami i bardzo często mają charakter ratunkowy. Oznacza to, że wszystkie znaleziska archeologiczne muszą zostać usunięte przed rozpoczęciem planowanej budowy, inaczej zostaną zniszczone w wyniku prac budowlanych. Badania ratownicze nie zawsze można zaplanować, ponieważ często przed rozpoczęciem prac nikt nie był świadom obecności stanowiska lub znalezisk. Przykładem takich prac są krótkoterminowe kampanie wykopaliskowe prowadzone przy okazji prac nad budową II linii metra w Warszawie czy badania przy ulicy Stradomskiej w Krakowie.

W przypadku badań ratowniczych, archeolodzy muszą dopasować się do często napiętego harmonogramu inwestycji. To przekłada się na bardzo krótkie terminy które narzuca się archeologom na wykonanie prac. Ponieważ badania wykopaliskowe wymagają zastosowania rygorystycznej metodyki oraz szczegółowej dokumentacji, ograniczony czas prac skutkuje często niepełnymi lub chaotycznymi informacjami, które są nie do odtworzenia, ze względu na zniszczenie kontekstu. Nawet jeśli archeolodzy będą mieli odpowiednią ilość czasu na przeprowadzenie wykopalisk, muszą liczyć się z faktem że po zakończeniu badań stanowisko zostanie zniszczone, a zatem prowadzone badania są jedyną okazją do zebrania informacji. Przykładem takich sytuacji był program badań archeologicznych na terenach przeznaczonych pod budowę autostrad w 2007 i 2008 roku, jednak te badania odbywały się głównie poza obszarem miejskim.

Kolejnym problemem, z którym muszą się zmierzyć archeolodzy w trakcie pracy w mieście jest ograniczona przestrzeń w której mogą pracować. Ze względu na istniejące budynki, fundamenty i konstrukcje (rury, kable, studzienki kanalizacyjne) konieczne jest ograniczenie obszaru wykopalisk do terenów dostępnych. Często prowadzenie prac w terenie miejskim wiąże się również z koniecznością uzyskania zgody właściciela terenu. Taka sytuacja skutkuje bardzo fragmentarycznymi danymi, które można uzyskać w wyniku takich prac, co z kolei przekłada się na niepełny obraz historii zasiedlenia i użytkowania stanowiska. Przykładem takiej sytuacji mogą być badania w Kutaisi prowadzone w sezonie jesiennym 2017 roku w dwóch sektorach o oznaczeniach TS 24 oraz TS 39 (Hamburg, Isakadze 2018: 150–151), a także publikowane obecnie badania fosy obronnej z sierpnia 2018 roku (Hamburg *et al.*, 2019). Wykopy w ramach sektorów TS24 i TS39 ulokowane były na terenie przylegającym do prywatnych domów. Przeprowadzenie badań na tych działkach motywowane było licznymi luźnymi i przypadkowymi znaleziskami oraz planowanymi przez właścicieli działek inwestycjami w niedalekiej przyszłości. Do rozpoczęcia badań konieczne było, ze względu na obowiązujące prawo, uzyskanie zgody właściciela terenu. Obszar, na którym odkryto fosę należy zaś częściowo do diecezji, a częściowo do jednego z duchownych. W tym miejscu ma również miejsce budowa nowej świątyni. Także tutaj wymagane były odpowiednie pozwolenia od właścicieli gruntu zanim można było wejść na działkę, a zarazem teren budowy, aby rozpocząć badania ratunkowe.

Prawie każde stanowisko archeologiczne, znajdujące się obecnie na terenie miejskim jest silnie zniszczone przez przekształcenia terenu, budynki i infrastrukturę miejską (kanalizacja, kable, linie metra, patrz np. Thompson, 1992: 17). Te przekształcenia znacząco

wpływają na jakość informacji, które możemy uzyskać w wyniku badań wykopaliskowych. Najbardziej jaskrawym przykładem jest sytuacja starożytnej agory ateńskiej oraz ateńskiego metra, które przechodzi przez wszystkie warstwy archeologiczne, niszcząc je oraz dzieląc stanowisko na dwie części (Rys. 1).

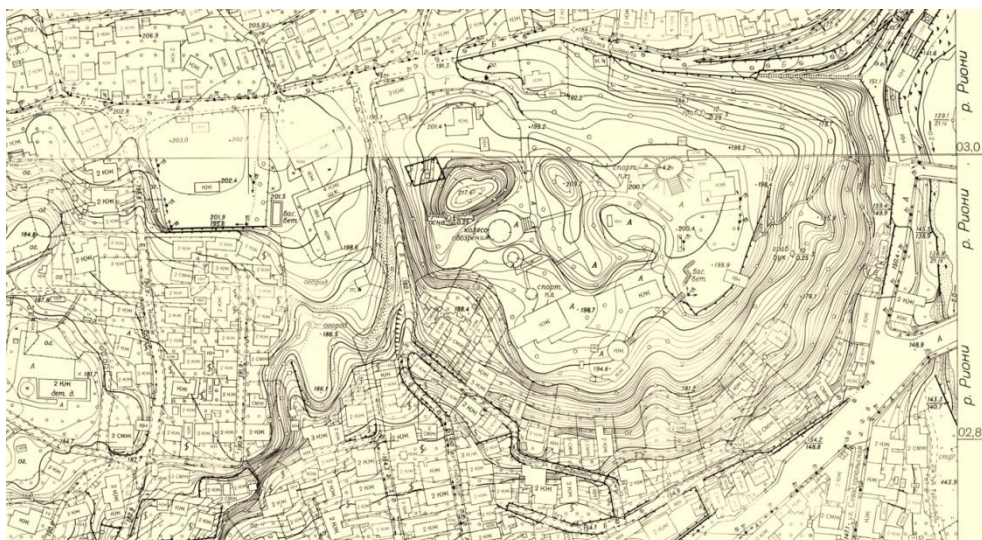


Rys. 1. Metro przy agorze ateńskiej (Thompson, 1992: 17)

Kutaisi jako trzecie co do wielkości miasto Gruzji, stawia przed archeologami liczne, opisane powyżej problemy, które zostaną jeszcze szerzej przedstawione poniżej. Wymusza to na badaczach konieczność wykonywania jak najbardziej precyzyjnej dokumentacji w jak najkrótszym czasie, oraz łączenie, często bardzo fragmentarycznych informacji, w całościowy obraz historii obszaru dzisiejszego Kutaisi.

Kolejną trudnością związaną z prowadzeniem badań w Kutaisi jest dostęp do danych źródłowych, w tym historycznych, np. dostępność do wyników wcześniejszych badań archeologicznych, zdjęć czy dokumentacji rysunkowej. Podobnie wygląda sprawa dostępu do map z oznaczeniami punktów wysokościowych, geodezyjnych oraz planów przestrzennego zagospodarowania terenu. Jedynymi dostępnymi mapami są mapy radzieckie (Rys. 2). Mapy te pozwalają na lokalizację niektórych miejsc i w związku z tym były pomocne w określeniu części lokalizacji, ważnych z punktu widzenia prac geodezyjnych oraz wybrania terenu pod badania georadarowe czy archeologiczne. Należy jednak

zaznaczyć, iż rozwój miasta spowodował wiele zmian i w kilku przypadkach mapa okazywała się już nieaktualna.



Rys. 2. Przykład radzieckiej mapy wykorzystywanej podczas polsko-gruzińskich badań na terenie miasta Kutaisi (Archiwum Państwowego Muzeum Historycznego w Kutaisi)

Dostęp do materiału archeologicznego (zabytki, próbki pobrane w starych wykopach) jest w pełni zadowalający dzięki uprzejmości dyrektora Państwowego Muzeum Historycznego w Kutaisi prof. Omara Lanchavy. W muzeum tym zabytki pochodzące z badań archeologicznych są odpowiednio katalogowane i składowane. Obecnie dokumentacja tych zabytków została poszerzona o dodatkową dokumentację fotograficzną z wykorzystaniem aparatu cyfrowego, cyfrowe modele trójwymiarowe najważniejszych z nich oraz część opisową (wymiary, opis cech charakterystycznych) wykonaną również przez członków polskiej części ekspedycji w 2017 roku.

Brak dostępu do dokumentacji archeologicznej, lub w wielu przypadkach brak danych źródłowych czy raportów, jest bardzo uciążliwy podczas wykopalisk wykonywanych w obrębie miejsc, wcześniej badanych przez specjalistów. Stanowisko Gabashvili jest praktycznie całkowicie zniszczone przez elementy parku rozrywki i znajdujące się na wzgórzu obiekty gastronomiczne. W tym miejscu spotkano się z sytuacją, kiedy objęty wykopami obszar za jedną z restauracji okazał się być już wcześniej badany, co oczywiście prowadzi do straty czasu, cennego i limitowanego podczas badań ratunkowych. Okazało się bowiem, że dokumentacja archeologiczna dla stanowiska na wzgórzu Gabashvili istnieje – jest jednak niedostępna z powodu trwającego od niedawna remontu jednego z archiwów w stolicy Gruzji - Tbilisi, w którym zgromadzone zostały wyniki kilkuletnich badań z lat 80. XX w. Część materiału w postaci kopii została znaleziona w archiwach Państwowego Muzeum Historycznego w Kutaisi, dzięki czemu udało się określić, m. in. położenie trzech starych wykopów. Prace geodezyjne miały m. in. na celu znalezienie miejsc wcześniejszych wykopalisk. Do ich lokalizacji posłużyły mapy archiwalne ze wspomnianych powyżej badań, które należało odpowiednio połączyć z punktami charakterystycznymi w terenie.



Rys. 3. Wzgórze Dateshidze – obecnie teren szkoły, widoczne: budynek szkoły, sala gimnastyczna i obszar dawnego boiska szkolnego

Innym przykładem problemów z dostępem do dokumentacji ważniejszych prac miejskich oraz znacznym przekształceniem terenu spotkać się można było na stanowisku Dateshidze. Jest to obecnie obszar zajęty przez budynki szkolne oraz drogi dojazdowe i chodniki kryte asfaltem lub betonem (Rys. 3). Teren stanowiska był często przekształcany przez człowieka, odkąd powstał główny budynek szkoły, a następnie sala gimnastyczna. W 2014 roku, na zachód od szkoły została wzniesiona nowa oczyszczalnia ścieków. Jest to główna oczyszczalnia miasta, a część rur została położona nawet 7 metrów pod obecnym poziomem terenu. Niestety nie są dostępne żadne plany instalacji wodno-kanalizacyjnej zarówno oczyszczalni, jak i szkoły. Co interesujące, nawet interwencja w miejskim pogotowiu wodno-kanalizacyjnym niewiele pomogła, gdyż osoby przybyłe na miejsce badań, wskazywały jedynie obszary przebiegu instalacji z pamięci i nie dysponowały żadnymi szczegółowymi planami. Dopiero pomocne okazały się badania georadarowe, prowadzone przez zespół geofizyków, które z dość dużą dokładnością określiły rozkład rur i instalacji elektrycznej związanych z budynkiem szkolnym (Rys. 4). Niestety wszelkie obiekty tego typu, znajdujące się głębiej niż 1 metr poniżej poziomu gruntu, nie mogły zostać oznaczone z powodu zakłóceń odczytów radaru podczas wykonywania skanowania na terenie miasta. Zakłócenia te wynikały między innymi z powodu 2-metrowych nawarstwień z XX wieku, składających się z trzech warstw betonu oraz asfaltu, które zostały zlokalizowane w wyniku prac wykopaliskowych. Takiego rodzaju trudności prowadzą do spowolnienia prac archeologicznych, związanego z możliwością uszkodzenia rur, które mogłyby spowodować duże problemy dla całego miasta. Na stanowisku Dateshidze także prowadzono już wcześniej badania archeologiczne. Według informacji przekazanej ustnie, prawie wszystkie wykopy zlokalizowano tak, iż znajdują się one obecnie pod budynkiem szkolnym. Jednakże, brak jakichkolwiek planów, zdjęć czy rysunków sytuacyjnych (szkiców) nie pozwala mieć co do tego całkowitej pewności.



Rys. 4. Wzgórze Dateshidze – otwarty teren znajdujący się pomiędzy szkołą a oczyszczalnią. W tym miejscu przeprowadzono badania georadarowe, które odkryły płytko znajdujące się rury i instalację elektryczną przebiegające przez stanowisko archeologiczne

Ogromnym problemem na stanowisku Dateshidze okazał się również teren wewnętrznego dziedzińca (dawniej boiska szkolnego). Okazało się, że podczas prac ziemnych i budowlanych duża część wzgórza została zniwelowana by poszerzyć i wyrównać miejsce pod budowę budynków szkolnych i boiska, co oczywiście doprowadziło do całkowitego zniszczenia tej części stanowiska. Informacja ta została przekazana archeologom po fakcie przez jednego z mieszkańców, który uczestniczył w tych pracach kilkadziesiąt lat wcześniej. Pomimo wykonania standardowej kwerendy nie udało się uniknąć takiej sytuacji. Dane te zostały zweryfikowane i wykazały, że faktycznie w tym miejscu doszło do bezpowrotnego zniszczenia stanowiska (Lanchava *et al.*, 2018: 137–143).

Kolejnym stanowiskiem zlokalizowanym we współczesnym Kutaisi, na którym prowadzone były badania, jest położona w sercu miasta twierdza Bagrati. Twierdza ta jest jednym z najważniejszych stanowisk archeologicznych w regionie Imeretii. Na jej terenie znajduje się Katedra, od której całe założenie bierze swoją nazwę. Sama katedra jest jednym z najlepszych przykładów architektury sakralnej wczesnośredniowiecznej Gruzji. Duży obszar twierdzy wraz z Katedrą został zrekonstruowany podczas serii projektów rekonstrukcyjnych przeprowadzonych w latach 1952-2011, mających na celu rewitalizację wzgórza katedralnego i obszaru Cytadeli. Prace te poprzedziły ratownicze wykopaliska archeologiczne. Dzisiejszy kształt architektoniczny Katedry przypomina jej formę z początku XI wieku, kiedy Kutaisi zostało stolicą zjednoczonego Królestwa Gruzji. Stanowisko Bagrati stawiało przed badaczami inne problemy. Dobrej jakości dokumentacja z wcześniejszych wykopalisk (m. in. raport Państwowego Muzeum Historycznego w Kutaisi z 2012 roku oraz wcześniejsze) pozwoliła specjalistom określić miejsca dawnych wykopów a nawet wyznaczyć lokalizację niektórych obiektów archeologicznych w terenie (pracownia, piec, jamy po wyeksplorowanych przez archeologów gruzińskich grobach średniowiecznych). Jeden ze starych wykopów został nawet zabezpieczony poprzez przykrycie dachem. Niestety nie pozwoliło to na całkowite zabezpieczenie wykopu. Dach zapewniał dobre zabezpieczenie przed warunkami atmosferycznymi, ale nie przed aktami

wandalizmu. Ponadto, stał się składnikiem dla lokalnej społeczności, jak również miejscem zabaw dla dzieci. Wykop dosyć silnie na tym ucierpiał, jednakże dobrze widoczny w terenie mógł zostać przez archeologów oczyszczony. Badania na jego terenie zostały dokończone a ich efekty zadokumentowane za pomocą metod fotogrametrycznych. Była to jedyna możliwość uratowania ostatnich informacji dotyczących tego miejsca.

Zupełnie innego rodzaju przeszkodą jest dostępność do części terenu interesujących archeologów. Bez odpowiednich pozwoleń badania obszarów znajdujących się w obrębie wewnętrznych murów Cytadeli nie są możliwe. Aby prace archeologiczne na tym terenie mogły się odbyć w przyszłości potrzebne są na to odpowiednie zgody.

W sezonie 2018 wykonano na obszarze m. in. takich stanowisk jak Bagrati, Gabashvili czy Dateshidze w rejonie Kutaisi szereg prac geodezyjnych i fotogrametrycznych, które wsparły proces inwentaryzacji zabytkowego otoczenia. Dokumentacja fotogrametryczna wykorzystywała zarówno zdjęcia pochodzące z Bezzałogowego Systemu Latającego (BSL) oraz fotografii naziemnej. Sposób opracowania tych danych oraz wyniki opracowań zostały szczegółowo omówione w dalszej części niniejszego artykułu.

2. METODYKA PRZETWARZANIA I OPRACOWYWANIA DANYCH

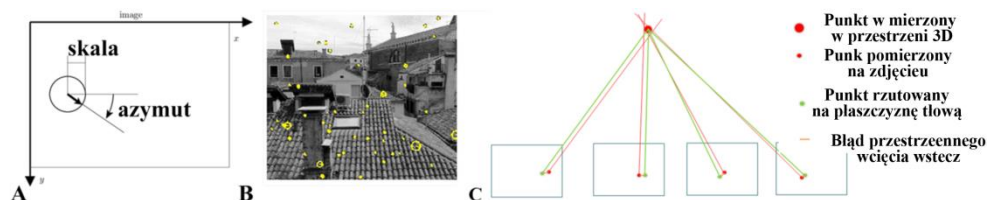
Współczesne oprogramowanie fotogrametryczne służące do przetwarzania zdjęć opiera się na algorytmach bazujących na połączeniu metod powszechnie stosowanych w widzeniu maszynowym oraz algorytmów wykorzystywanych w klasycznych opracowaniach fotogrametrycznych. Połączenie obu podejść pozwala na orientowanie i przetwarzanie danych w sposób w pełni automatyczny. W przypadku porównywania dwóch podejść służących do automatycznej orientacji zdjęć, czyli metod fotogrametrycznych i widzenia maszynowego należy pamiętać, że nie stanowią one dwóch oddzielnych i nie powiązanych ze sobą działów nauki. Definicje stosowane w obu dziedzinach są do siebie bardzo podobne – te same zależności są opisywane w różny sposób. Znacząca różnica pomiędzy podejściem fotogrametrycznym a widzeniem maszynowym polega na innych zastosowaniach aplikacyjnych (ang. *application – driven*), a nie na samym rozwijaniu algorytmów czy metodyki przetwarzania danych (ang. *methods – driven*). Metody widzenia maszynowego znajdują szerokie zastosowanie w definiowaniu, wykrywaniu i wyodrębnianiu cech charakterystycznych na obrazach, co jest wykorzystywane w fotogrametrii (Bujakiewicz *et al.*, 2014). Obecnie zarówno komercyjne oprogramowania stosowane do przetwarzania zdjęć naziemnych oraz lotniczych, tj. np. *Agisoft Photo Scan* (2018), *Pix4D* (2016) czy *Bentley Contex Capture* (2016), jak i bezpłatne – *Visual SfM* (Morgan, Brogan 2016) czy *MicMac* (Friedt, 2014) bazują na podejściu łączącym obie dziedziny.

Obecnie stosowane oprogramowanie do orientacji zdjęć naziemnych zazwyczaj wykorzystuje algorytmy *Feature-based Matching* (FBM) zaimplementowane w podejściu *Structure-from-Motion* (SfM), bazujące na wykrywaniu cech charakterystycznych obrazu. Obecnie algorytmy *Area-based Matching* (ABM) stosowane są głównie do generowania gęstych chmur punktów na podstawie sieci zdjęć. W odróżnieniu do metody ABM, gdzie wykorzystywane jest okno poszukiwawcze, w metodzie FBM analizowany jest obszar całego zdjęcia, na którym to dopasowywane są do siebie jedynie wybrane fragmenty, charakteryzujące się zbliżonymi cechami. Przyjmuje się zatem następujące założenia

definiujące dany punkt jako punkt charakterystyczny (Tuytelaars, Mikolajczyk 2008; Mikolajczyk, Schmid 2010; Weinmann 2013): (1) jednoznaczność punktów wykrywanych przez algorytmy FBM – wykrywane punkty muszą odróżniać się od najbliższych sąsiadów. Wskazane jest, aby wykrywane punkty były wysoce kontrastowe, co wyróżniałoby je w lokalnym otoczeniu; (2) niezmienność – punkt powinien być wykryty niezależnie od zmian w dystorsji radiometrycznej czy geometrycznej. Warunek ten w największym stopniu wpływa na dokładność, poprawność i niezawodność procesu dopasowywania punktów charakterystycznych; (3) stabilność – punkty powinny być wykrywane zawsze jednakowo niezależnie od warunków otoczenia (np. zmian oświetlenia czy skali); (4) interpretowalność – podział wykrywanych cech według typu (np. krawędź czy narożnik); (5) unikalność – elementy wykrywane na zdjęciach powinny charakteryzować się unikalnością, umożliwiającą ich jednoznaczne wyodrębnienie na podstawie pewnych cech charakterystycznych. Właściwość ta jest szczególnie istotna dla obrazów zawierających powtarzalną teksturę.

W metodzie SfM cechy charakterystyczne wykrywane są pojedynczo dla każdego opracowywanego zdjęcia, a ich wzajemne dopasowanie odbywa się w kolejnym etapie. Mogą one obejmować punkty, krawędzie, linie lub nawet całe regiony – w ten sposób tworzą grupę tzw. cech lokalnych, a kilka lub kilkanaście cech lokalnych stanowi tzw. strukturę globalną.

Wyszukiwanie punktów wiążących jest procesem trzyetapowym. Początkowo, przy użyciu detektorów, wykrywane są obszary odniesienia według zadanego klucza. Dla każdego punktu oprócz jego położenia na zdjęciu przypisywana jest skala oraz azymut (Lowe 2004), co jest pokazane na rysunku 5.



Rys. 5. Przykłady: A) wyznaczenia gradientu (skali) i orientacji dla pojedynczego punktu kluczowego, B) wyznaczonych parametrów zależnych od najbliższego otoczenia badanego punktu, dla różnych punktów kluczowych (VFleat 2017), C) błędu reprojekcji (Pix4d 2018)

Następnie za pomocą deskryptorów opisywane są ich cechy charakterystyczne. Finalne dopasowanie punktu dokonywane jest w oparciu o metody statystycznego dopasowania cech (Moussa 2006; Urban, Weinmann 2015; Markiewicz 2016). Do opisu cech wykrytych punktów charakterystycznych stosuje się deskryptory (Lowe 2004). Wyznaczane są cechy niezmiennicze, które są podstawą do porównywania punktów na różnych zdjęciach. Wykrycie i opisanie cech dla każdego punktu charakterystycznego jest ważnym elementem procesu wykrywania punktów homologicznych na obrazach cyfrowych. Ostatecznie zakwalifikowanie punktów jako punkty wiążące w procesie orientacji danych obrazowych

odbywa się poprzez ich wzajemne dopasowanie. W ostatnim etapie wykonywany jest proces wyrównania metodą niezależnej wiązki w procesie *bundle adjustment*.

3. ANALIZA DOKŁADNOŚCI PROCESU ORIENTACJI ZDJĘĆ W OPROGRAMOWANIU AGISOFT PHOTOSCAN

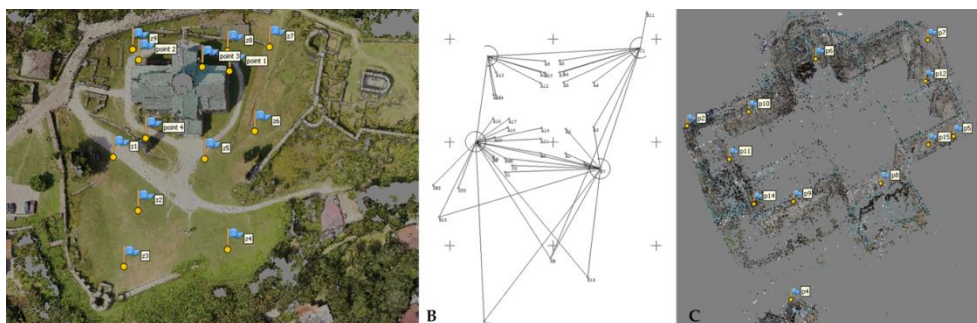
Powszechnie stosowanym oprogramowaniem do przetwarzania zdjęć naziemnych i lotniczych jest program *Agisoft PhotoScan*, umożliwiający orientację zdjęć pozyskanych z różnych pułapów, z różną rozdzielczością, z różną geometrią i o różnej jakości geometrycznej. Proces orientacji zdjęć oparty jest na podejściu *SfM*, a do wyszukiwania punktów charakterystycznych wykorzystywana jest przetworzona wersja algorytmu SIFT, która umożliwia uzyskiwanie wyższej dokładności orientacji (Markiewicz *et al.*, 2019).

Analiza dokładności zaimplementowana w oprogramowaniu *Agisoft PhotoScan* nie umożliwia rozszerzonej oceny dokładności przeprowadzanego procesu orientacji danych. Informacje, które zapisywane są w raportach, dotyczą m.in.: (1) maksymalnej i liniowej wartości RMSE błędu przestrzennego wcięcia wstecz (w widzeniu maszynowym definiowany jako błąd reprojekcji, *ang. reprojection error*, którego wartości określane są w pikselach i odniesione do skali) punktu charakterystycznego oraz liczby punktów wiązek, (2) wartości błędów na punktach osnowy i kontrolnych (dla współrzędnej X, Y i Z) oraz liczby punktów na zdjęciach. *Agisoft PhotoScan* nie pozwala w bezpośredni sposób na sprawdzenie dokładności pomiaru na punktach osnowy i kontrolnych na poszczególnych zdjęciach oraz wykonanie analizy jakości procesu orientacji wzajemnej sieci zdjęć. Dlatego zaproponowana została metodyka szczegółowej analizy procesu orientacji danych. W tym celu wykorzystano interfejs programistyczny aplikacji *API*, i przeanalizowano: (1) liczbę punktów wykrytych na zdjęciach, (2) wielkość skali wykrytych punktów charakterystycznych, (3) zależność między wartością błędu reprojekcji a skalą wykrytych punktów, (4) wpływ liczby zdjęć na wartość błędu reprojekcji, (5) wartości RMSE na punktach osnowy i kontrolnych, (6) wpływ filtracji błędu wyznaczenia położenia punktu na zdjęciu na dokładność orientacji zdjęć.

3.1. Opis danych źródłowych

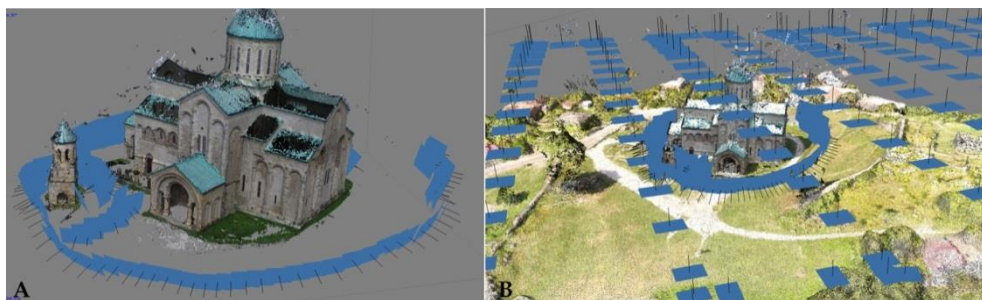
W celu analizy wymienionych we wcześniejszych częściach czynników zdecydowano się na orientację dwóch zbiorów danych pozyskanych podczas nalotów nad twierdzą Bagrati z dwóch pułapów za pomocą niskobudżetowego Bezzałogowego Statku Latającego *DJI Phantom 3* z kamerą (CMOS 1/2.3": 6.17 x 4.55 mm, 4000 x 3000, $f = 3.43$ mm, ekwiwalent 20 mm dla 36 x 24 mm) oraz kamery *Pentax k-50* (CMOS APS-C: 23.7 x 15.7 mm, 4928 x 3264) z obiektywem *DAL 18-55 WR* (ustawionym na $f = 18$ mm, ekwiwalent 27 mm dla 36 x 24 mm). Nalot fotogrametryczny wykonany został z wysokości około 84 m, z przybliżonym GSD około 5 cm. Wykonano 210 zdjęć z pokryciem podłużnym i poprzecznym 80%. Na rysunku 7a przedstawiony został schemat rozmieszczenia zdjęć. Zdjęcia naziemne wykonano z odległości około 70 m od badanego obiektu z GSD około 2 cm. Łącznie wykonano 178 zdjęć ze średnim pokryciem około 90% poziomic i 70 % w pionie (Rys. 7a).

W ramach pomiarów geodezyjnych założono osnowę fotogrametryczną wykorzystywaną do orientacji zdjęć pozyskiwanych z pułapu lotniczego (Rys. 6a). W celu sygnalizacji punktów osnowy wykorzystano czarno-białe szachownice. Punkty mierzone były metodą GNSS RTK przy wykorzystaniu odbiornika *Topcon Hiper Pro*. W celu uzyskania poprawek do mierzonych współrzędnych punktów wykorzystano sieć stacji VRS GEO-CORS.



Rys. 6. Szkic: a) rozmieszczenia punktów osnowy wykorzystywanej do orientacji zdjęć z BSL, b) sieci geodezyjnej wraz z zaznaczonymi punktami na obiekcie wykorzystywanymi w procesie analizy dokładności orientacji zdjęć naziemnych, c) punktów wiążących pomiędzy zdjęciami naziemnymi a pozyskanymi z BSL

Problemem, który pojawił się podczas inwentaryzacji Katedry w Bagrati, był brak możliwości rozmieszczenia punktów sygnalizowanych na badanym obiekcie. Stąd też niezbędne było wykonanie pomiarów sytuacyjnych przyziemia katedry, które posłużyły następnie jako dane referencyjne do oceny dokładności orientacji zewnętrznej zdjęć naziemnych. Dodatkowo pomierzono również wysokości wybranych punktów metodą tachimetryczną (Rys. 6b).



Rys. 7. Schemat rozmieszczenia zdjęć: a) naziemnych, b) pozyskanych z BSL na tle katedry Bagrati

3.2. Przetwarzanie i analiza danych źródłowych

Proces orientacji danych wykonany został trzyetapowo w oprogramowaniu *Agisoft PhotoScan* i *MatLab*. Na początku zostały zorientowane zdjęcia, pochodzące z rejestracji systemem BSL, a cały układ został wpasowany w układ odniesienia określony przez sygnalizowane punkty terenowe, których współrzędne geodezyjne wyznaczono pomiarem GNSS RTK. Orientacja wewnętrzna wyznaczona była w łącznym procesie orientacji i wyrównania zdjęć poprzez samokalibrację.

Następnie pozyskano współrzędne punktów reprezentujących obiekt i stanowiących osnowę wtórną, przeznaczoną do wpasowania układu zdjęć naziemnych. Punkty te były wybierane w miejscach dobrze widocznych zarówno z ziemi jak i z powietrza. Z powodu różniącej się orientacji przestrzennej zdjęć naziemnych względem lotniczych, otoczenie punktów było widoczne pod innymi kątami, wpłynęło to na obniżenie dokładności identyfikacji i lokalizacji.

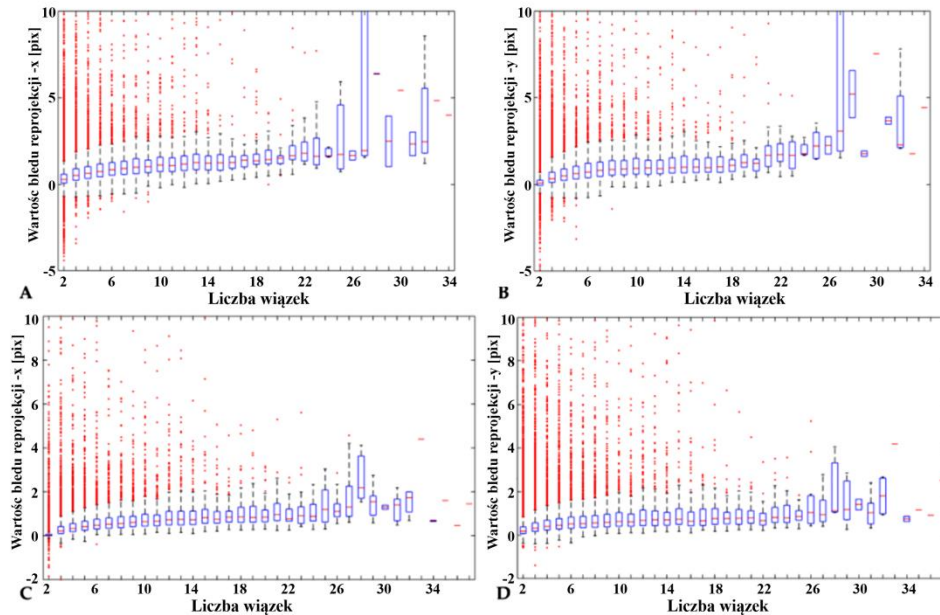
3.3. Analiza zależności wartości błędu przestrzennego wcięcia wstecz od liczby wiązek

Istniejące zależności wartości błędu reprojektacji od liczby wiązek przedstawiono za pomocą wykresów skrzynkowych (Rys. 8.), na których czerwonymi punktami zaznaczono obserwacje odstające, czerwone linie wewnątrz prostokątów odnoszą się do mediany, wysokość prostokąta odpowiada rozstępowi międzykwartylowemu, a przedziały (zaznaczone za pomocą poziomych kresiek) odpowiadają najmniejszej i największej wartości.

Obserwacje wykonane na podstawie zdjęć naziemnych dają możliwość zdefiniowania błędu *a priori* na poziomie 0.5 piksela, dla zdjęć z pułapu lotniczego kształtuje się to na poziomie 1.0 piksela. Przyczyną innej wielkości błędu jest inny średni wymiar próbki terenowej dla obu zbiorów obrazów. Również konfiguracja ustawienia stanowisk kamery znacznie różni dla tych dwóch przypadków (Rys. 7.).

Z analizy wartości przedstawionych na rysunku 7 wynika, że dla liczby powyżej 24 obserwacji punktu na obrazach dochodzi do większego rozrzutu obserwacji - wypłaszczonego przebiegu krzywej Gaussa. Dochodzi do tego zarówno dla zdjęć naziemnych jak i wykonanych z BSL. Spowodowane jest to dołączeniem do procesu wyrównania obrazów, dla których stanowisko kamery miało parametry orientacji zewnętrznej znacznie różniące się od reszty wykorzystanych stanowisk. Wtedy dla wielu obserwacji dochodzi do systematycznego przesunięcia lokalizacji punktu. W sytuacji, gdzie występuje niewielka liczba promieni homologicznych, pojawiają się obserwacje odstające, ale szerokość zasadniczej części rozkładu błędu pozostaje niewielka.

Z tego też powodu zdecydowano się na usunięcie obserwacji odstających poprzez filtrację. Najlepsza wyznaczalność położenia obiektów jest osiągnięta dla około od 15 do 20 promieni homologicznych, wskazujących na pojedynczy element rejestrowanej sceny.



Rys. 8. Wykresy skrzynkowe zależności wartości błędów przestrzennego wcięcia wstecz od liczby wiązek na zdjęciach: a) zdjęcia z BSL (błąd po współrzędnej x), b) zdjęcia z BSL (błąd po współrzędnej y), c) zdjęcia naziemne (błąd po współrzędnej x), d) zdjęcia naziemne (błąd po współrzędnej y). Czerwonymi krzyżykami zaznaczono obserwacje odstające, czerwone linie wewnątrz prostokąta odnoszą się do mediany, szerokość prostokąta odpowiada rozstępowi międzykwartylowemu, a przedziały zaznaczone za pomocą poziomych kresek odpowiadają najmniejszej i największej wartości.

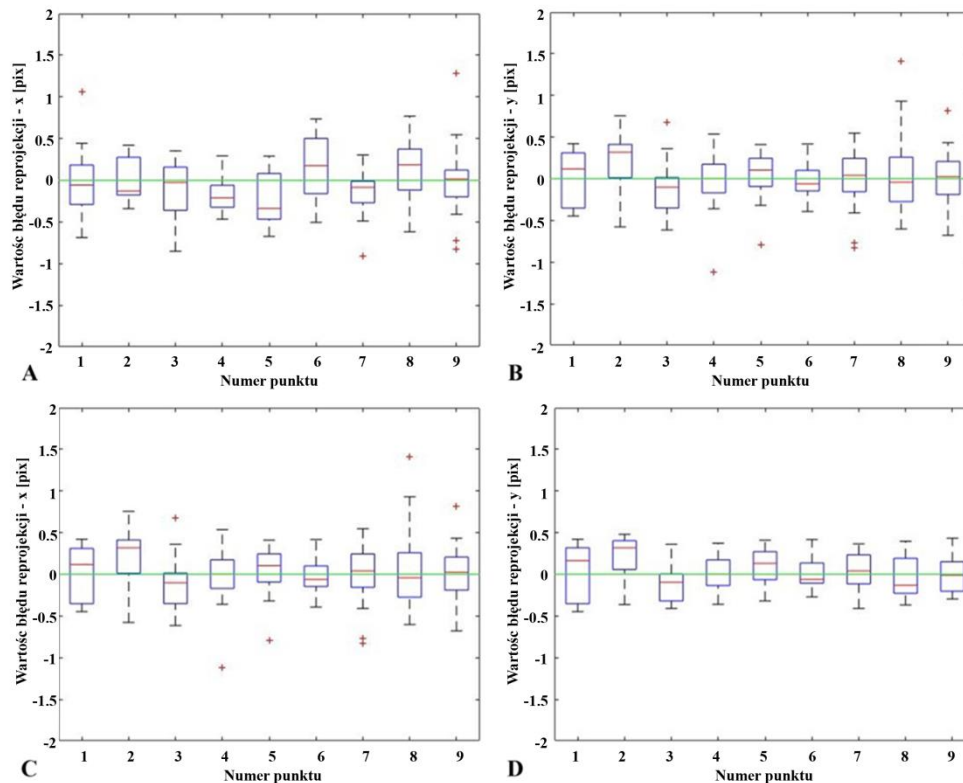
3.4. Analiza dokładności orientacji zewnętrznej zdjęć z BSL

Badanie dokładności wpasowania obrazów pochodzących ze zdjęć naziemnych oraz z BSL wskazuje na lepsze wpasowanie w układ terenowy obrazów z pułapu lotniczego. Przyczyną takiego rezultatu jest lepsza identyfikowalność sygnalizacji osnowy na zdjęciach pochodzących ze statku zdalnie sterowanego. Znaki te są ustawione swoją powierzchnią w położeniu w przybliżeniu prostopadłym do kierunku obserwacji kamery.

Ze względu na brak bezpośredniego dostępu do błędów reprojektacji punktów dla poszczególnych zdjęć w programie *Agisoft PhotoScan* (jedynie możliwość wyświetlenia błędu liniowego RMSE), został stworzony skrypt w języku *Python* umożliwiający zbadanie odchyłek w konkretnych obrazach dla składowej x , y . Dodatkowo zaproponowano skrypt w języku *Matlab*, umożliwiający wykonanie filtracji w sposób automatyczny. Skrypt ten pozwala na usunięcie obserwacji przekraczających założony próg (przyjęto 2 piksele).

Ocena wpasowania bloku zdjęć w zewnętrzny układ referencyjny odbyła się na podstawie analizy odchyłek dla punktów kontrolnych. Stanowiły one zbiór położony wewnątrz obrysu zaznaczonego przez punkty wpasowania. Wykresy 9a oraz 9b pokazują rozkłady odchyłek projekcji względem lokalizacji obserwacji na płaszczyznach tłowych

kamery dla punktów referencyjnych (1, 3, 4, 7, 9) oraz przeznaczonych do kontroli (2, 5, 6, 8). Rezultat odfiltrowania obserwacji odstających jest przedstawiony na wykresach 9c oraz 9d. Analizy przeprowadzono w oparciu o zdjęcia wykonane przez system BSL.



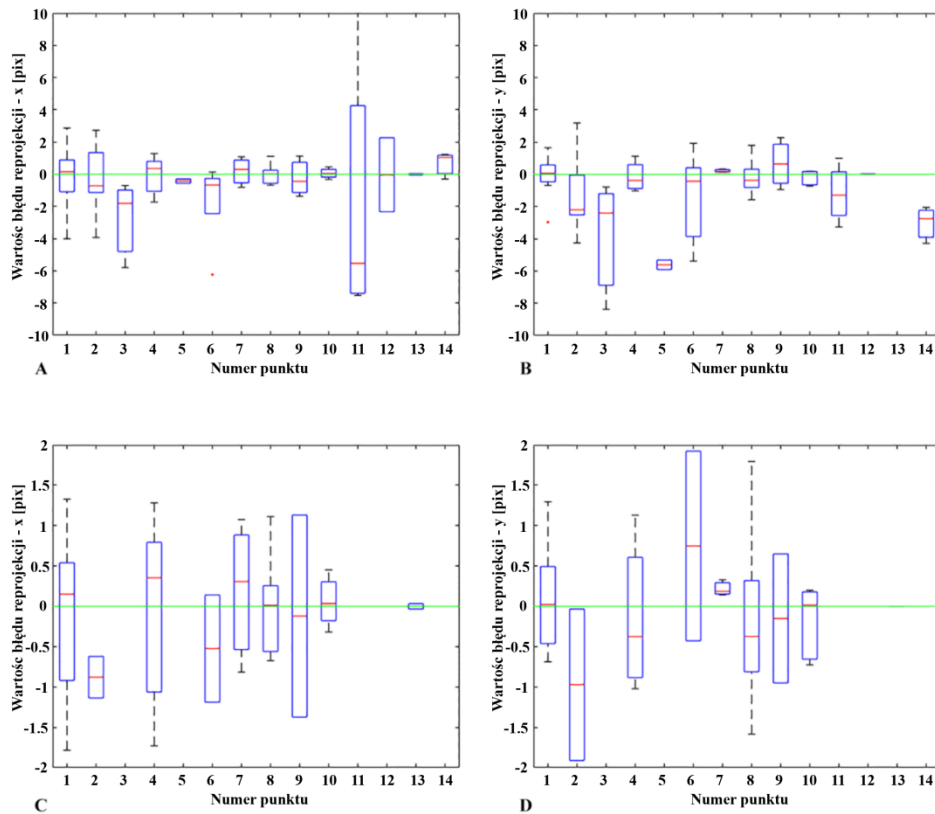
Rys. 9. Odchyłki w płaszczyźnie tłowej dla punktów osnowy. Zdjęcia z BSL przed filtracją x i y (a/b) oraz zdjęcia z BSL po filtracji x i y (c/d).

Wyniki filtrowania należy ocenić pozytywnie, ponieważ wartości błędów uległy redukcji, a szerokość rozkładu wyraźnie zmniejszyła się, poprawiając jednoznaczność wyznaczenia lokalizacji stanowisk kamery.

3.5. Analiza dokładności orientacji wzajemnej zdjęć naziemnych i z BSL

W ramach inwentaryzacji Katedry w Bagrati, wykonano zdjęcia jedynie z BSL w przypadku normalnym, co skutkowało brakiem możliwości wykonania automatycznej orientacji wzajemnej zdjęć pozyskanych z dwóch pułapów. Drugim czynnikiem ograniczającym możliwości wzajemnej orientacji dwóch zbiorów danych, była różna jakość geometryczna i radiometryczna przetwarzanych zdjęć.

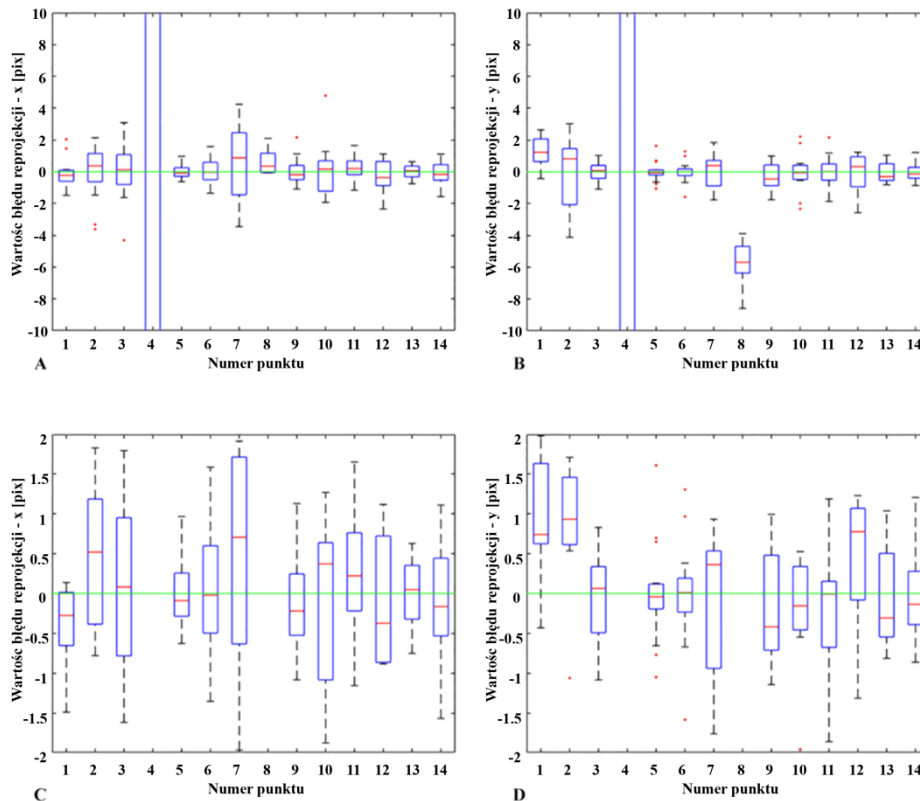
W pierwszym etapie do orientacji wykorzystano metodę ICP (Besl, McKay 1992) zaimplementowaną w *CloudCompare*. Niestety ze względu na jakość geometryczną gęstych chmur punktów oraz małe wspólne pokrycie pomiędzy dwoma zbiorami danych, proces orientacji nie powiódł się. Dlatego też, zdecydowano się na wzajemne łączenie dwóch zbiorów danych na podstawie 15 punktów wiążących zlokalizowanych na różnych wysokościach i ścianach katedry Bagrati (Rys. 6c).



Rys. 10. Wykresy skrzynkowe wartości błędów przestrzennego wcięcia wstecz dla punktów wiążących pomierzonych na danych z BSL dla współrzędnej x i y przed (a/b) i po (c/d) filtracji.

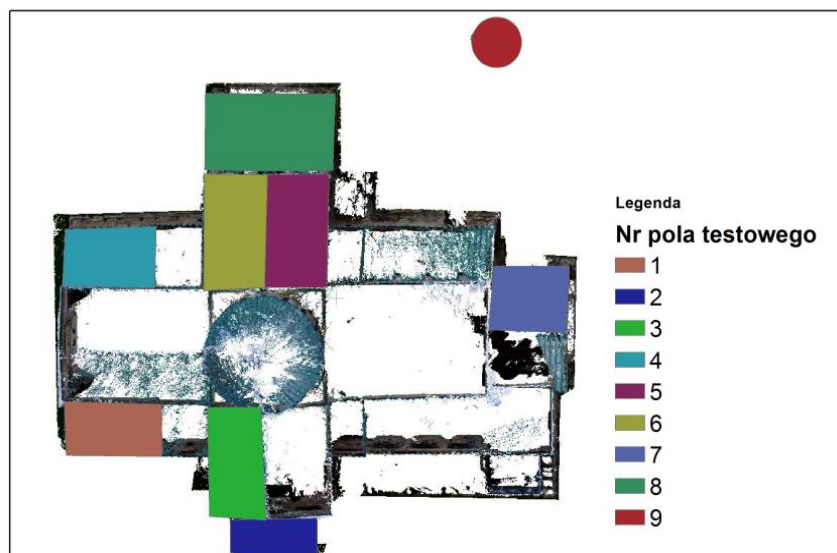
Jakość geometryczna, rozdzielczość oraz występujące na zdjęciach z BSL skróty perspektywiczne spowodowały, że mierzone punkty niesygnalizowane obarczone były znaczącymi błędami, przez co niezbędne było usunięcie na poszczególnych obrazach pomiarów odstających, z zachowaniem tej samej procedury, jaką zastosowano do filtracji obserwacji odstających na punktach osnowy. Na rysunkach 10 i 11 przedstawiono wyniki przeprowadzonego procesu.

Z analizy wyników przedstawionych na rysunkach 10 i 11 wynika, że usunięcie obserwacji odstających spowodowało znaczną poprawę wyznaczalności punktów i doprowadziło do przesunięcia położenia mediany wartości błędów w kierunku minimum. Efektem filtracji jest większa stabilizacja określenia położenia punktów zarówno służących do wpasowania w układ referencyjny jak i tych przeznaczonych do kontroli procesu wyrównawczego.

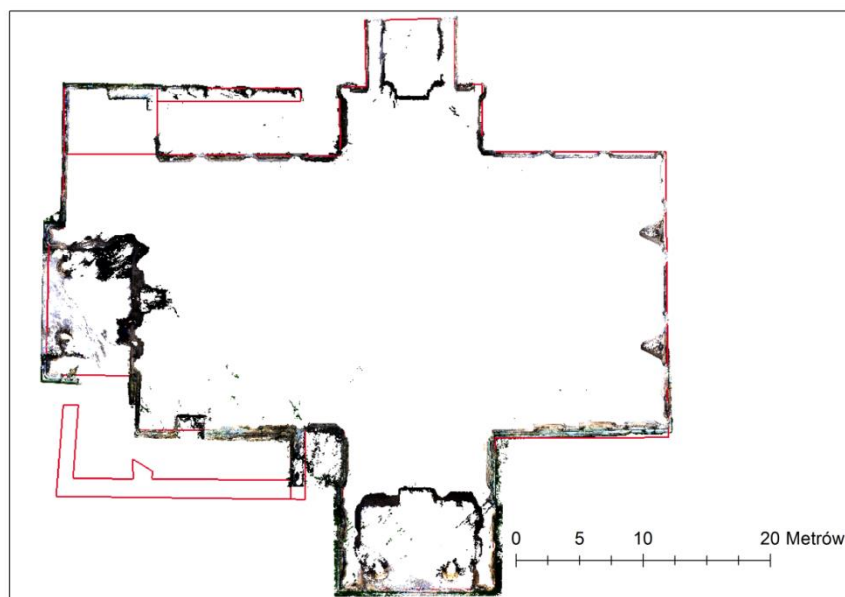


Rys. 11. Wykresy skrzynkowe wartości błędów przestrzennego wcięcia wstecz dla punktów wiążących pomierzonych na zdjęciach naziemnych dla współrzędnej x i y przed (a/b) i po (c/d) filtracją.

W celu wykonania niezależnej kontroli przeanalizowano odstępstwa pomiędzy gęstymi chmurami punktów oraz sprawdzono dokładność horyzontalną chmury punktów względem danych geodezyjnych. Przesunięcie wzajemne, wyznaczeń gęstej chmury punktów z BSL oraz zdjęć wykonanych z powierzchni ziemi, zostało sprawdzone za pomocą pól testowych, zlokalizowanych na dachu katedry (Rys.12). Na rysunku 13 pokazano usytuowanie chmury punktów względem obrysu pozyskanego z pomiarów geodezyjnych.



Rys. 12. Lokalizacja pól testowych do porównania położenia wygenerowanych chmur punktów z pomiaru zdjęć naziemnych oraz pozyskanych z pułapu lotniczego.



Rys. 13. Wzajemne usytuowanie chmury punktów (elementy ciemniejsze) oraz obrysu pozyskanego z pomiarów geodezyjnych (linie czerwone).

Analizując uzyskane wyniki przedstawione na rysunku 13, można zauważyć, że istnieją niewielkie odchyłki między wygenerowaną chmurą punktów a przeprowadzonym standardowym pomiarem tachimetrycznym. W tabeli 1, przedstawiono statystykę odstępstw pomiędzy gęstymi chmurami punktów, pozyskanymi na podstawie zdjęć naziemnych oraz wykonanych za pomocą systemu BSL. Wielkości te nie przekraczają pojedynczych centymetrów i są zbliżone do rozmiarów próbki obrazu na obiekcie. Wartości odstępstw zbliżone są do dokładności orientacji zdjęć z BSL.

Tab. 1. Statystyka odstępstw pomiędzy gęstymi chmurami punktów

Pole testowe	Mediana	<2σ	Mediana	<2σ	Mediana	<2σ
	X [m]		Y [m]		Z [m]	
1	-0.001	(-0.089.0.087)	-0.004	(-0.126.0.118)	0.016	(-0.090.0.122)
2	0.034	(-0.054.0.122)	-0.002	(-0.086.0.082)	-0.016	(-0.138.0.106)
3	0.043	(-0.027.0.113)	0.009	(-0.063.0.081)	0.061	(-0.009.0.131)
4	0.008	(-0.106.0.122)	0.002	(-0.124.0.128)	0.026	(-0.102.0.154)
5	-0.019	(-0.099.0.061)	0.001	(-0.077.0.079)	0.012	(-0.086.0.110)
6	-0.002	(-0.110.0.106)	-0.010	(-0.106.0.086)	-0.011	(-0.105.0.083)
7	0.006	(-0.114.0.126)	0.001	(-0.103.0.105)	-0.002	(-0.114.0.110)
8	-0.015	(-0.093.0.063)	0.000	(-0.072.0.072)	0.014	(-0.082.0.110)
9	-0.022	(-0.0156.0.112)	0.009	(-0.131.0.149)	-0.013	(-0.199.0.173)
Mediana	-0.001		0.001		0.009	
Średnia	0.012		0.004		0.019	
Max	0.043		0.009		0.061	
Min	-0.022		-0.010		-0.016	

4. PODSUMOWANIE

Poprawne wagowanie i filtracja obserwacji odstających pozwala na poprawę dokładności procesu aerotriangulacji zdjęć z BSL. W artykule przedstawiono sposób doboru wartości błędów *a priori*, filtracji punktów odstających na poszczególnych zdjęciach, możliwości wykorzystania *API Agisoft PhotoScan* do rozszerzenia funkcjonalności samego oprogramowania oraz analizy dokładności procesu. Przeanalizowano wpływ filtracji danych przy następujących założeniach (Tab. 2): (1) filtracja obserwacji odstających na

poszczególnych zdjęciach - punkty osnowy i kontrolnych, (2) usunięcie punktów wiążących, dla których błąd reprojekcji był większy niż ± 2.5 piksela, (3) usunięcie punktów wiążących, dla których błąd reprojekcji był większy niż ± 1.5 piksela, (4) wagowanie obserwacji przy założeniu wartości błędów *a priori*: (a) punkty wiążące ± 1.5 piksela, (b) dokładność pomiaru na zdjęciu punktu sygnalizowanego 0.3 piksela i dokładność pomiaru punktu w terenie ± 5 cm. Wszystkie wartości zostały ustalone na podstawie cząstkowych analiz dokładności.

Tab. 2. Wpływ zastosowania filtracji punktów odstających na odchyłki po stronie obiektu (X, Y, Z) oraz w płaszczyźnie tłowej (RAW - wyznaczenia na podstawie nieodfiltrowanych danych, Fltods. - efekt odfiltrowania odstających obserwacji, Rep 2.5 - ograniczenie wielkości residuum tłowego do 2.5 piksela, Rep 1.5 - ograniczenie wielkości residuum tłowego do 1.5 piksela, Mrk - zastosowanie wagowania *a priori*: dokładność sygnalizacji markera osnowy w terenie ± 5 cm, na obrazie ± 0.3 piksela, dokładność punktu wiążącego ± 1.5 piksela)

Wariant	Punkty osnowy (control)				Punkty kontrolne (check)			
	X [m]	Y [m]	Z [m]	Rep [pix]	X [m]	Y [m]	Z [m]	Rep [pix]
RAW	0.158	0.123	0.385	16.2	0.121	0.08	1.368	14.2
Fltods.	0.082	0.079	0.103	1.6	0.047	0.055	0.854	1.5
Rep 2.5	0.052	0.044	0.064	1.0	0.052	0.071	0.486	1.0
Rep 1.5	0.036	0.048	0.013	0.6	0.054	0.072	0.02	0.7
Mrk	0.061	0.076	0.025	0.4	0.058	0.071	0.039	0.5

Rezultaty odpowiedniego filtrowania punktów z wyrównania zostały zaprezentowane w Tab. 2. Widoczne jest znaczne poprawienie wielkości błędów zarówno dla punktów wpasowania jak i przeznaczonych do kontroli procesu wyrównawczego. Jak wynika z zamieszczonych efektów filtracji obserwacji odstających, zasadne jest poprawne przeprowadzenie procesu wyrównawczego obserwacji fotogrametrycznych z uwzględnieniem przesłanek dokładnościowych *a priori*. Daje to znaczną redukcję niepewności wyznaczalności stanowisk kamery i co za tym idzie wyznaczalności punktów obiektu, podlegającego pomiarowi. Wyniki przeprowadzonych badań pomiarowych potwierdzają wysoką użyteczność niskobudżetowych sensorów optycznych w inwentaryzacji obiektów zabytkowych oraz stanowisk archeologicznych.

5. INFORMACJE DODATKOWE

Badania w Kutaisi są realizowane w ramach wspólnego projektu (współfinansowanego przez Polską Fundację Narodową) prowadzonego przez Uniwersytet Warszawski oraz Narodową Agencję Ochrony Dziedzictwa Kulturowego Gruzji i przy współpracy z Interdyscyplinarnym Centrum Naukowym im. Krukowskiego. W prace i dokumentację zaangażowani są też naukowcy z innych ośrodków, m.in. Politechniki Warszawskiej. Odpowiedzialnymi za część fotogrametryczną niniejszego opracowania są Jakub Markiewicz oraz Michał Kowalczyk, zaś autorami archeologicznej części artykułu są Jacek Hamburg oraz Rafał Bieńkowski.

LITERATURA

- Besl P., McKay N., 1992. A Method for Registration of 3-D Shapes, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. doi: 10.1109/34.121791.
- Bujakiewicz A., Markiewicz J., Bakula K., Zawieska D., 2014. Diversity of photogrammetric approaches for multi-purpose applications. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 96, 9–19, <http://dx.doi.org/10.2478/rgg-2014-0002>.
- Friedt J.-M., 2014. Photogrammetric 3D structure reconstruction using MicMac. Dostępna: http://jmfriedt.free.fr/lm_sfm_eng.pdf
- Hamburg J., Isakadze R., 2018. Preliminary Report of 2017 Polish-Georgian Archaeological Expedition at Gabashvili Hill and its surrounding area (Kutaisi, Western Georgia). *Pro Georgia. Journal of Kartvelological Studies* 28, 137–155.
- Hamburg J., Badura M., Skrzyński G., Kaliszewska A., Bieńkowski R., 2019, Preliminary results of archaeological and archaeobotanical investigation of the defensive moat found in Kutaisi (Western Georgia). *Pro Georgia. Journal of Kartvelological Studies* 29. (in press)
- Lanchava O., Isakadze R., Hamburg J., Karasiewicz-Szczypiorski R., Buadze Sh., Pawłowska K., Kaliszewska A., Bieńkowski R., 2018. ქუთაისის ქართულ-პოლონური ექსპედიციის 2017 წლის არქეოლოგიური სამუშაოების ანგარიში, 2017. *წელს ჩატარებული არქეოლოგიური გათხრების მოკლე ანგარიშების კრებული*, Tbilisi, 137–143.
- Lowe D. G., 2004. Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *International Journal of Computer Vision*, 60 (2), 91–110. doi: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.
- Markiewicz J., 2016. The use of computer vision algorithms for automatic orientation of terrestrial laser scanning data, *ISPRS Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41, 315–322. doi: 10.5194/isprsarchives-XLI-B3-315-2016.
- Markiewicz J., Pilarska M., Łapiński S., Kaliszewska A., Bieńkowski R., Cenad A., 2019. Quality assessment of the use of a medium format camera in the investigation of wall paintings: an image-based approach, *Measurement*, 132, 224–237. (in press)
- Mikołajczyk K., Schmid, C., 2010. Indexing based on scale invariant interest points, *Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001*, 1, 525–531, doi: 10.1109/ICCV.2001.937561.
- Morgan J. A., Brogan D. J., 2019. How to VisualSFM, https://d32ogoqmya1dw8.cloudfront.net/files/getsi/teaching_materials/high-rez-topo/visual_sfm_tutorial.pdf
- Moussa W., 2006. Integration of Digital Photogrammetry and Laser Scanning for Cultural Heritage Data Recording, https://elib.unistuttgart.de/bitstream/11682/3960/1/Diss_w.wassim_Uni_FINAL.pdf
- Thompson H. A. B., 1992. The Stoa of Attalos II in Athens, *Excavations of the Athenian Agora Picture Book No. 2*, 17.
- Tuvtelaars T., Mikołajczyk K., 2008, Local Invariant Feature Detectors: A Survey, *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*: 3(3), 177-280. <http://dx.doi.org/10.1561/06000000017>.
- Urban S., Weinmann M., 2015, Finding a Good Feature Detector-Descriptor Combination for the 2D Keypoint-Based Registration of TLS Point Clouds, *ISPRS Annals of Photogrammetry*,

Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5, 121–128.
doi: 10.5194/isprsannals-II-3-W5-121-2015.

Weinmann, M. (2013) *Visual Features—From Early Concepts to Modern Computer Vision, Advances in Computer Vision and Pattern Recognition*. doi: 10.1007/978-1-4471-5520-1.

Agisoft PhotoScan (2018). Dostępne na: <http://www.agisoft.com/>.

VFleat (2017). Dostępne na: <http://www.vlfeat.org/>.

Pix4D (2016). Dostępne na: <https://pix4d.com/>.

PHOTOGRAMMETRIC DOCUMENTATION OF ARCHAEOLOGICAL SITES IN AN URBAN ENVIRONMENT: THE CASE STUDY OF KUTAISI (GEORGIA)

Summary

KEY WORDS: quality assessment, API Agisoft PhotoScan, bundle adjustment, Bagrati, Georgia, Kutaisi, reprojection error, SfM, low-cost UAV

In this research, the issues related to processing and analysis of the images, acquired by the low-cost terrestrial sensors and an unmanned aerial vehicle (UAV) of the archaeological sites in an urban environment placed in area of Kutaisi, Georgia, have been considered. Taking into account generation of the Bagrati site photogrammetric documentation, the low-cost UAV DJI Phantom 3 and Pentax SLR camera, were chosen. Due to the geometrical and radiometric parameters of the chosen sensors, an extended methodology of UAV and terrestrial data processing in Agisoft PhotoScan was proposed. This task solution was enabled by application programming interface API (which allowed taking advantage of software functions - not available in the basic version of the program) and additionally the script written in MatLab software by authors. The method of processing, filtrating, eliminating and weighting of the measurement observations in the bundle adjustment process was proposed. As a result of performed works, the accuracy of the results of the bundle adjustment, increased significantly in comparison to the raw data. Furthermore, statistical data analysis had been expanded.

Dane autorów /Authors details:

dr inż. Jakub Markiewicz
e-mail: jakub.markiewicz@pw.edu.pl
telefon: 22-234-5764

mgr Jacek Hamburg
e-mail: jacek.hamburg@gmail.com

dr inż. Michał Kowalczyk
e-mail: michal.kowalczyk@pw.edu.pl
telefon: 22-234-5764

mgr Rafał Bieńkowski
e-mail: rafal.bienkowski@ibspan.waw.pl

Przesłano / Submitted 17.12.2018
Zaakceptowano / Accepted 31.12.2018