

**BADANIE JAKOŚCI RADIOMETRYCZNEJ ORTOFOTOGRAMÓW  
SPORZĄDZONYCH NA DRODZE INTEGRACJI  
FOTOGRAMETRII BLISKIEGO ZASIĘGU I SKANINGU LASEROWEGO**

**ANALYSIS OF THE RADIOMETRIC QUALITY  
OF ORTHOPHOTOGRAMS GENERATED BY THE INTEGRATION  
OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING**

**Krystian Pyka, Antoni Rzonca**

Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej,  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

**SŁOWA KLUCZOWE:** ortofotogram, integracja, skaning laserowy, jakość radiometryczna, transformacja falkowa

**STRESZCZENIE:** Przedmiotem pracy jest ocena jakości radiometrycznej trzech ortofotogramów sporządzonych: metodą klasyczną opartą o dane fotogrametryczne oraz dwiema metodami wykorzystującymi dane 3D z naziemnego skaningu laserowego. Do ilościowego wyrażania powstających w procesie ortorektyfikacji zniekształceń radiometrycznych zastosowano parametry wyliczane na podstawie transformat falkowych obrazów. Parametry falkowe, w szczególności wariancja komponentów falkowych i ich kurtoza (współczynniki skupienia rozkładu) wykazały, że najwyższą jakość radiometryczną, niewiele odbiegającą od jakości fotogramu źródłowego, ma ortofotogram uzyskany metodą klasyczną. Niższą, ale akceptowalną jakość ma ortofotogram otrzymany metodą, w której zastosowano dane 3D z pomiaru laserowego w roli numerycznego modelu powierzchni. Najniższą jakość radiometryczną wykazano dla ortofotogramu powstałego na drodze rzutowania chmury punktów (w pracy scharakteryzowano istotę tej eksperymentalnej metody). Przeprowadzone badania udowodniły techniczną możliwość integracji danych fotogrametrycznych z pomiarami uzyskanymi ze skanowania laserowego. Dane 3D z lasera stanowią atrakcyjną alternatywę dla pomiaru stereoskopowego na zdjęciach. Bardzo interesująca jest metoda rzutowania chmury punktów, lecz wymaga ona pewnych udoskonaleń zasugerowanych w podsumowaniu pracy.

## **1. WPROWADZENIE**

W inwentaryzacji architektonicznej coraz częściej, w coraz szerszym zakresie stosuje się technikę skaningu laserowego. Technika ta jest dla niektórych zadań alternatywą dla techniki fotogrametrycznej, przy czym opracowanie ortofotoplanów pozostaje dalej domeną fotogrametrii.

Niniejsza praca demonstruje możliwości integracji danych fotogrametrycznych i pozyskanych na drodze skanowania laserowego dla potrzeb opracowania ortofotoplanów.

Posiłkując się parametrami opartymi o transformacje falkową obrazów dokonano oceny jakości radiometrycznej uzyskanych produktów. Badaniom poddawano ortofotogramy, a nie docelowe ortofotoplany, co ogranicza listę czynników wpływających na jakość radiometryczną.

W rozdziale 2 omówiono syntetycznie trzy metody opracowania ortofotogramów a w rozdziale 4 podano warunki praktycznego wykonania ortofotogramów (przedmiotem obrazowania był zabytkowy nagrobek). Rozdział 3 poświęcono krótkiej charakterystyce falkowych wskaźników zmian radiometrycznych, a ich zastosowanie do badania wykonanych ortofotogramów opisano w rozdziale 5.

## **2. METODY OPRACOWANIA ORTOFOTOGRAMÓW**

Do opracowania ortofotogramu są konieczne: zdjęcie pomiarowe o znanych elementach orientacji zewnętrznej oraz numeryczny model powierzchni obiektu. W przypadku obiektów, których powierzchnia ma złożony kształt, źródłem modelu jest zwykle pomiar fotogrametryczny wykonany na podstawie zdjęć stereoskopowych. W procesie ortorektyfikacji jako dane do budowy modelu powierzchni obiektu można zastosować chmurę punktów uzyskiwaną na drodze skaningu laserowego. Ponadto wyobrażalne jest rozwiązanie, w którym chmurze punktów nadaje się atrybut barwy pochodzący ze zdjęć fotogrametrycznych.

### **2.1. Klasyczna metoda fotogrametryczna**

Metoda klasyczna generowania ortofotogramów cyfrowych polega na dyskretnym przetworzeniu fotogramów tworzących blok zdjęć. Po określeniu elementów orientacji zewnętrznej zdjęć na drodze terratriangulacji (metodą niezależnych wiązek) następuje pomiar numerycznego modelu powierzchni (NMP). Stereodigitalizacja obejmują linie szkieletowe i regularną lub nieregularną siatkę punktów, wykonuje się ją na fotogrametrycznych stacjach cyfrowych. Następnie jest uruchamiany proces ortorektyfikacji w oparciu o NMP, zorientowane fotogramy, przy wskazaniu ostatecznej rozdzielczości terenowej oraz punktów definiujących płaszczyznę rzutowania.

### **2.2. Wykorzystanie chmury punktów jako modelu powierzchni**

Metoda ta wymaga użycia skanera laserowego oraz posiadania odpowiedniego oprogramowania do obróbki chmur punktów, będącej wynikiem skanowania. Metoda tym różni się od klasycznej, że funkcję danych do budowy NMP pełni chmura punktów. Pomiar skanerem odbywa się z odpowiedniej liczby stanowisk wybranych w taki sposób, aby ostateczna chmura pokrywała cały front obiektu. (Georgopoulos *et al.*, 2004).

Na wstępie opracowania chmura punktów nie stanowi gładkiej reprezentacji obiektu. Wymaga więc odpowiedniego przygotowania (przycinanie, filtrowanie) do celów ortorektyfikacji. Ponadto pojawia się problem zeskanowanych dalszych planów, które powodują poważne błędy numerycznego modelu. Model powierzchni stosowany przy

tworzeniu ortofotogramów musi zawierać treść leżącą w pierwszym planie, patrząc w kierunku normalnym do płaszczyzny ortofotogramu (Rzonca, 2006).

### 2.3. Metoda generowania ortogonalnych widoków chmury punktów

Pomysł generowania ortogonalnych widoków chmury punktów wywodzi się z możliwości, jaką posiadają niektóre ze skanerów laserowych 3D. W trakcie pomiaru, skaner poza współrzędnymi XYZ, dla każdego punktu chmury zapisuje moc sygnału powracającego do obiektywu lasera. Jest to wypadkowa kilku czynników: kąta padania wiązki, rodzaju materiału, jego barwy oraz stopnia, w jakim ten materiał pochłania i odbija promieniowanie. Na skutek pomiaru powstaje obraz w skali szarości, na którym gradacja jasności jest funkcją barwy, materiału i innych czynników wpływających na moc odbitego impulsu laserowego. Zapis refleksyjności pozwala generować czarnobiałe widoki chmur punktów, już wysoko cenione przez konserwatorów, na co dzień wykorzystujących skaningowe podkłady mapowe (Baranowski *et al.*, 2005). Widoki te są obrazami o rozdzielczości zbliżonej do rozdzielczości chmury punktów, *de facto* odpowiednio wygenerowanymi i mozaikowanymi kopiami widoków ekranowych przygotowanych przy pomocy programu służącego do obróbki chmur punktów, np. DEPHOS Mapper.

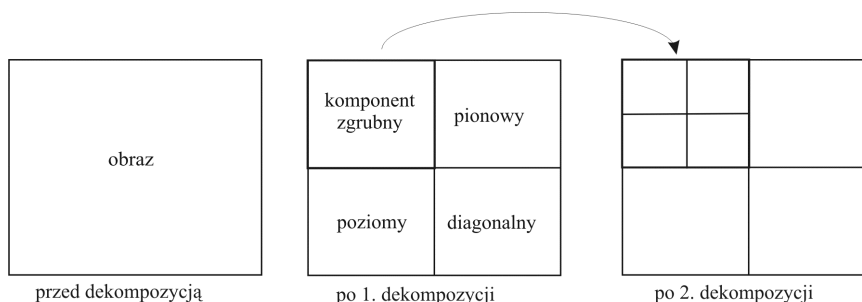
Wobec zainteresowania, jakim cieszą się czarnobiałe widoki chmur punktów, wykonano próbę przypisania każdemu z punktów chmury składowych RGB. Do tego celu wykorzystano odpowiednio zmodyfikowany program służący do ortorektyfikacji, który korzystając z typowego algorytmu do generowania ortofotogramów, dla każdego punktu chmury, wzdłuż odtworzonego promienia kolinearności, pobiera kolor z odpowiedniego obszaru fotogramu, o wyznaczonych, na drodze terratriangulacji, elementach orientacji zewnętrznej. Wynikiem takiego przyporządkowania jest plik chmury punktów o przypisanych sześciu składowych: X, Y, Z, R, G, B. Analogicznie, jak w przypadku widoków w skali szarości, produkt ostateczny to widok odpowiednio wyświetlonej chmury punktów.

## 3. FALKOWE WSKAŹNIKI ZMIAN RADIOMETRYCZNYCH ZACHODZĄCYCH W PROCESIE ORTOREKTYFIKACJI

### 3.1. Transformacja falkowa

Transformacja falkowa sygnału (w tym obrazu jako dyskretnego sygnału dwuwymiarowego) polega na przekształceniu sygnału do postaci, w której jest on wyrażony jako suma ważona pewnej funkcji zwanej falką podstawową (Mallat, 1998; Białasiewicz, 2000). Postać ta nazywana jest transformatą falkową lub falkowym rozwinięciem sygnału. Stosuje się wiele falek podstawowych, w dużym uproszczeniu można stwierdzić, że są to funkcje przypominające kształtem odcinek sinusoidy ograniczony do jednego okresu. Aby dokonać transformacji falkowej, należy wyznaczyć współczynniki falkowe, które pełnią rolę wag przy rekonstrukcji sygnału poprzez sumowanie falki podstawowej (uprzednio wybranej). Zagadnienie jest w ogólności dosyć złożone, jednakże w przypadku transformacji falkowej obrazów w sukurs przychodzi tzw. algorytm Mallata.

Istota algorytmu Mallata polega na wyznaczaniu rozwinięć falkowych na drodze wielostopniowej dekompozycji obrazu wykorzystującej filtry jednowymiarowe, aplikowane osobno dla wierszy i kolumn obrazu (Mallat, 1989). Skutkiem takiej pojedynczej dekompozycji jest zbiór czterech komponentów falkowych – zgrubnego i trzech detalicznych, które można interpretować jak sub-obrazy o dwukrotnie mniejszej (liniowo) rozdzielczości w stosunku do obrazu dekomponowanego. Dekompozycja może być dalej kontynuowana, jedna ze strategii przyjmuje, że kolejna dekompozycja dotyczy komponentu zgrubnego z poprzedniej (Sayood, 2002). Proces ten został przedstawiony schematycznie na rysunku 1.



Rys.1. Rozwinięcia falkowe w algorytmie Mallata

Powstająca w wyniku zastosowania takiego algorytmu wielorozdzielcza reprezentacja obrazu ma szereg zalet, pozwala analizować właściwości radiometryczne obrazu nie tracąc kontroli nad ich lokalizacją, co ma miejsce przy transformacie Fouriera. Właściwości te zostały wykorzystane w pracy (Pyka, 2005) do sformułowania wskaźników (parametrów) zniekształceń radiometrycznych powstających podczas opracowania ortofotomapy. Parametry są obliczane zarówno dla obrazów źródłowym jak i przetworzonych, a następnie, na drodze analizy ich zmian, są wyciągane wnioski o wariancji obrazu, poziomie szumów i kontraście. Przykład takiej analizy znajduje się w dalszej części pracy, przy czym ograniczono się do badania zmian wariancji i kurtozy komponentów falkowych, gdyż pozwalało to już na wnioskowanie o jakości radiometrycznej.

### 3.2. Wariancja komponentów falkowych

Istotną cechą transformacji falkowej jest zachowanie wariancji dekomponowanego obrazu, tzn. wariancja obrazu jest równa sumie wariancji komponentów jego transformaty falkowej. Podczas przetwarzania geometrycznego (ortorektyfikacja) należy oczekiwać, że wariancja nie zmieni się więcej jak 10 % i jednocześnie zostaną zachowane proporcje pomiędzy wariancjami komponentów falkowych (dotyczy to sytuacji, gdy układ zapisu obrazu jest podobnie zorientowany przestrzennie jak układ zapisu ortofotogramu). Analiza wariancji komponentów falkowych tworzy znacznie szersze pole wnioskowania aniżeli wariancja obrazu liczona w sposób konwencjonalny.

### **3.3. Kurtoza rozkładu statystycznego komponentów detalicznych**

Badany jest kształt rozkładów statystycznych komponentów falkowych na pierwszym poziomie rozdzielczości, reprezentowany przez parametr zwany kurtozą (współczynnik skupienia). Stwierdzono, że kurtozę można traktować jako wskaźnik poziomu szumów radiometrycznych. Zmiany kurtozy podczas ortorektyfikacji opisują stopień wygładzenia obrazu, jaki następuje wskutek interpolacji jasności przy powtórnych próbkowaniu (Pyka, 2005).

Dla obrazów przetworzonych geometrycznie (w niniejszej pracy - ortofotogramów) są oczekiwane:

- nieznaczne (do 10 %) zwiększenie kurtozy komponentów detalicznych świadczące o wygładzającym wpływie interpolacji podczas powtórznego próbkowania obrazu,
- zachowanie proporcji pomiędzy kurtozami detali przed i po przetworzeniu.

## **4. WYKONANIE TESTOWYCH ORTOFOGRAMÓW**

Dla wybranego obiektu architektury sakralnej wykonano ortofotogramy trzema metodami opisanymi w rozdziale 2. W eksperymencie ograniczono się do wykonania pojedynczego przetworzenia, a nie zmontowanego ortofotoplanu, przez co ograniczono listę czynników degradujących jakość radiometryczną.

Oprogramowanie do wygenerowania wszystkich ortoobrazów i dane projektowe zostały udostępnione przez firmę DEPHOS Ltd. na potrzeby eksperymentów prowadzonych dla potrzeb niniejszej pracy.

### **4.1. Obiekt testowy i prace terenowe**

Pole testowe stanowi nagrobek Anny Jagiellonki znajdujący się w Kaplicy Zygmuntowskiej na Wawelu. Wykonany z czerwonego marmuru, przedstawia leżącą postać Królowej, która spoczywa ponad łacińskim epitafium. Wymiary nagrobka: szerokość około 200 cm, wysokość 120 cm. Epitafium wysunięte jest do przodu w stosunku do postaci o około 20 cm. Ogólnie różnice głębokości, patrząc od frontu, dochodzą do 40 cm. Do celów eksperymentu wybrano dwa obszary: pierwszy to fragment postaci, drugi – fragment epitafium.

Zdjęcia zostały wykonane cyfrową kamerą semimetryczną Canon EOS 300D wyposażoną w obiektyw 50 mm. Pole testowe obejmował blok 12 zdjęć, po 6 w 2 szeregach. Przy odległości fotografowania około 1.5 m otrzymano terenową wielkość piksela około 1mm (różną wobec znacznej głębokości obiektu). Pomiar osnowy fotogrametrycznej wykonano metodą biegunową przy pomocy tachimetru bezlusterowego Trimble 3305 DR. Dokładność wyznaczonych współrzędnych wyniosła ok. 1 mm.

Skanowanie laserowe 3D wykonano przy pomocy skanera Z+F LARA 53500. Jest to skaner laserowy osiągający dokładność wyznaczenia położenia punktu, przy krótkich odległościach, w granicach 1÷2 mm. Znaczna rozdzielczość kątowna, w poziomie - 0.01°, w pionie - 0.018°, pozwala na pomiar gęstych chmur. W przypadku opisywanego pola

testowego wykonano pomiar z dwóch stanowisk, w celu wygaszenia wszelkich cieni, które pojawiły się na pojedynczych chmurach, z przyczyny znacznego skomplikowania geometrycznego obiektu. Z racji małej odległości skanowania (około 2 m) i zapisu współrzędnych z dokładnością do 1mm, w większości przypadków chmura posiadała gęstość maksymalną.

#### **4.2. Opracowanie ortofotogramu metodą klasyczną**

Prace kameralne wykonano przy użyciu oprogramowania DEPHOS. Najpierw wyznaczono elementy orientacji zewnętrznej zdjęć (moduł DEPHOS External Orientation). Uzyskano błędy wyrównania na punktach kontrolnych ok. 1 mm. Następnie wykonano pomiar modelu powierzchni za pomocą fotogrametrycznej stacji cyfrowej DEPHOS Mapper. W celu pełnego oddania skomplikowanej geometrii obiektu model został pomierzony przy pomocy linii szkieletowych oraz nieregularnej siatki punktów. Do wygenerowania ortofotogramów wykorzystano moduł DEPHOS Ortho. Rozdzielczość ortofotogramu ustalono na 1mm, płaszczyzna ortofotogramu zdefiniowano jako pionową, równoległą do frontu nagrobka.

#### **4.3. Opracowanie ortofotogramu z wykorzystaniem chmury punktów**

Kameralne opracowanie obejmowało wstępne, standardowe filtrowanie programem firmy Z+F (LR Viewer), następnie pomiar znaczków osnowy fotogrametrycznej – dla celów orientacji bezwzględnej chmur punktów. Uzyskane wyniki wpasowania obu chmur oscylują w zakresie 1mm. Najważniejszym etapem przygotowania chmur punktów do wykorzystania ich przy generowaniu ortofotogramów jest specjalne filtrowanie właśnie pod kątem tego zastosowania (Rzonca, 2006). Liczne testy przeprowadzane na niefiltrowanych chmurach dawały efekty dalekie od oczekiwań. Obraz ortofotogramów był poszarpany, rozmyty i nie zawsze przedstawiał treść pierwszego planu, którego dotyczy opracowanie. Te wady naturalnie wynikają z wad modelu 3D, który w surowej postaci powoduje błędne, z punktu widzenia ortorektyfikacji, generowanie siatki TIN. Aby przygotować chmurę do potrzeb tworzenia ortofotogramów należy usunąć z chmury dwa typy punktów. Pierwszy to takie punkty, które leżą w dalszych planach, a patrząc wzdłuż normalnej do płaszczyzny ortofotogramu, są niewidoczne, zasłonięte przez pierwszy plan. Generowanie siatki TIN z uwzględnieniem tych punktów powoduje tworzenie trójkątów pomiędzy planami, co w wyniku ortorektyfikacji daje efekt dziurawienia obrazu wyjściowego. Natomiast istnienie drugiego rodzaju punktów wynika z błędów działania skanera. W powiększeniu, przekrój chmury punktów ma postać dywaniku, który posiada pewną grubość i nie jest gładki. Wobec tego konieczne jest wygładzenie chmury punktów. W przeciwnym razie uzyskany ortofotogram nie będzie ostry i będzie zawierał dużo zakłóceń geometrycznych.

Oba te filtry zostały zaprogramowane według pomysłu autora i stanowią integralną część oprogramowania do obróbki danych skaningowych DEPHOS Scanview. Po ich zastosowaniu i zapisie chmury punktów w formacie pliku wektorowego systemu DEPHOS, wygenerowanie ortofotogramu następuje, jak opisano w odniesieniu do ortofotogramów klasycznych.

#### 4.4. Ortofotogram w postaci barwnej chmury punktów

Uzyskanie obrazu, który jest kolorowym widokiem chmury punktów, przebiegło dwuetapowo. W pierwszym etapie, przy pomocy specjalnie do tego celu zmodyfikowanego programu DEPHOS Ortho, przypisano każdemu punktowi chmury w formacie ASC składowe RGB, pobrane z fotogramów bloku.

W efekcie uzyskano kolorową chmurę punktów o średniej gęstości w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny ortofotogramu wynoszącej 1 mm. Drugi etap polegał na frontalnym ustawieniu kolorowej chmury w oknie widoku programu DEPHOS Mapper. Ponieważ wygenerowanie widoku takiej chmury przebiega na zasadzie serii zrzutów ekranowych, konieczne jest odpowiednie ustawienie „wielkości” punktu tak, aby powstała struktura rastrowa. Widok chmury punktów, jako zrzut ekranowy w formacie BMP, zapisywany jest przy wielkości punktu 3 na 3 lub 5 na 5 pikseli ekranowych. Zrzut ten przeprowadza funkcja *tiledcreenshot*, której jednym z ustawianych parametrów jest terenowa rozdzielczość obrazu. Funkcja ta działa na zasadzie tworzenia serii mniejszych obrazów, z których każdy obejmuje fragment widoku. Posiadają wzajemne pokrycie, toteż można je później automatycznie mozaikować do postaci pełnego ortofotoplanu.

### 5. OCENA JAKOŚCI RADIOMETRYCZNEJ ORTOFOTOGRAMÓW

Badano zniekształcenia radiometryczne trzech ortofotogramów w stosunku do fotogramu źródłowego. Dostosowując się do uwarunkowań narzędzia informatycznego obliczającego falkowe wskaźniki jakości radiometrycznej (Pyka, 2005) wybrano na fotogramie fragment o rozmiarach 1024×1024 pikseli i odpowiadający mu fragment na trzech ortofotogramach. Wybrany obszar podzielono na dwa podobszary: w jednym znajduje się postać Anny Jagiellonki, a w drugim epitafium.

W dalszej części stosowano następujące umowne określenia:

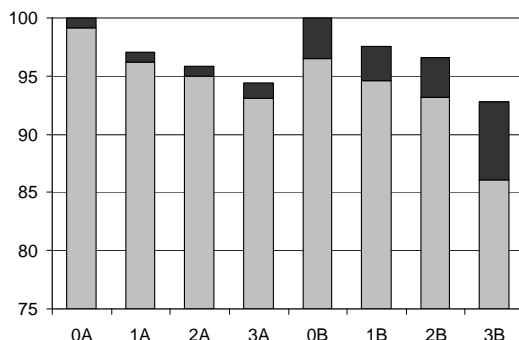
- 0 – fotogram źródłowy poddawany ortorektyfikacji (nie dotyczy metody barwnej chmury punktów),
- 1 – ortofotogram opracowany metoda klasyczną,
- 2 – ortofotogram opracowany z wykorzystaniem chmury jako NMP,
- 3 – widok barwnej chmury punktów,
- A – podobszar obejmujący postać Anny Jagiellonki,
- B – podobszar obejmujący epitafium.

Następnie obliczano falkowe parametry opisane w rozdziale 3 dla każdego ortofotogramu (osobno dla podobszarów A i B) i porównywano z parametrami obliczonymi dla fotogramu źródłowego.

#### 5.1. Analiza wariancji komponentów falkowych

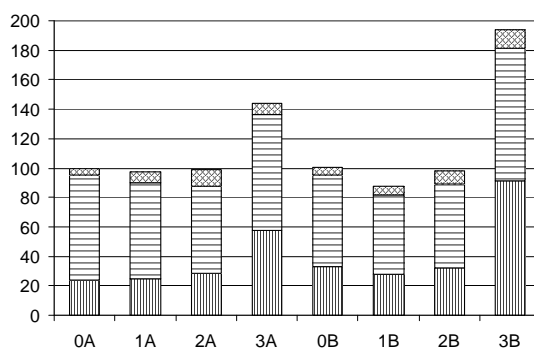
Na rysunkach 2 i 3 zestawiono wariancje komponentów falkowych, przy czym uczyniono to na dwa sposoby: na rysunku pokazano wariancję komponentu zgrubnego i sumę wariancji detali a na rysunku 3 rozpatrując wariancje poszczególnych detali. Taka podwójna analiza podyktowana jest tym, że wariancja komponentu zgrubnego jest o kilka

rzędów większa od wariacji detali. Dokumentuje to rysunek 2, w którym jasne słupki odpowiadają wariacjom komponentu zgrubnego a ciemne przedstawiają sumę wariacji detali.



Rys. 2. Zestawienie wariacji z wydzieleniem komponentu zgrubnego i sumy detali

Jak wynika z rysunku 2 wszystkie ortofotogramy, zarówno w podobszarze A jak i B, mają mniejszą wariację całkowitą (suma słupka jasnego i ciemnego) od fotogramu źródłowego, dla którego wartość wariacji przyjęto jako 100 %. Zmniejszenie wariacji sumarycznej jest zjawiskiem oczekiwanym: w procesie ortorektyfikacji następuje wygładzenie obrazu spowodowane interpolacją jasności podczas powtórnego próbkowania. Należy jednak zwrócić uwagę jak kształtuje się relacja pomiędzy komponentem zgrubnym, a sumą detalicznych, przy czym trzeba rozpatrywać oddzielnie podobszary A i B. Widoczny jest stopniowy wzrost udziału wariacji detali, zwłaszcza dla przypadków 3A, 2B i 3B. Drastyczny wzrost wariacji detali, jaki ma miejsce dla przypadku 3B, jest sygnałem o naruszeniu proporcji pomiędzy energią obrazu (wyrażoną przez wariację) zgromadzoną w komponentcie zgrubnym i komponentach detalicznych.



Rys. 3. Zestawienie wariacji poszczególnych komponentów detalicznych

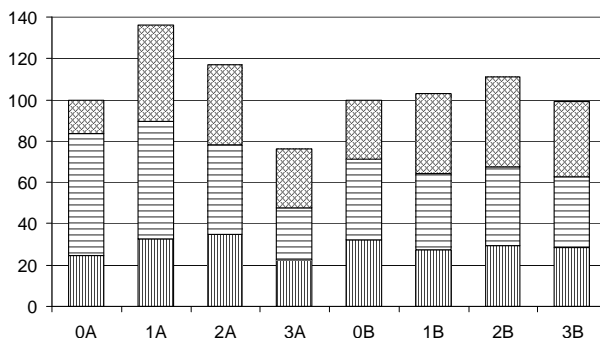
Rysunek 3 pokazuje jak rozkłada się wariacja poszczególnych detali – pionowego, poziomego i diagonalnego (do typu detalu dostosowano szrafurę). Wariacje dla ortofotogramu 1 są nieco mniejsze od wariacji fotogramu źródłowego, ale nie dotyczy to



komponentu detalicznego – wariancja tego komponentu lekko wzrasta. Problem z komponentem diagonalnym ostrzej rysuje się dla ortofotogramu 2, widać już bardzo wyraźny jego przyrost, co powoduje zachwianie proporcji pomiędzy wariancjami detali w stosunku do obrazu źródłowego. Natomiast dla ortofotogramu 3 następuje bardzo mocne zachwianie proporcji – obok jeszcze większego przyrostu wariancji detalu diagonalnego nadmiernie silne stają się przyrosty wariancji detalu pionowego.

## 5.2. Analiza kurtozy komponentów falkowych

Na rysunku 4 zestawiono wartości współczynników kurtozy dla komponentów falkowych, przy czym ze względu na (uzasadniony) brak zróżnicowania kurtozy komponentu zgrubnego badanych obrazów - ograniczono się do analizy tego współczynnika dla detali. Z kolei ze względu na specyfikę struktury obrazu w podobszarze B (epitafium) w dalszej części wyniki są komentowane wyłącznie dla podobszaru A (postać Anny Jagiellonki).



Rys. 4. Zestawienie współczynników kurtozy poszczególnych komponentów detalicznych

Ortofotogram 1, w porównaniu z fotogramem wzorcowym, wykazuje znaczny wzrost kurtozy detalu diagonalnego oraz mniejsze zmiany kurtozy pozostałych detali. Sytuacja taka świadczy o większym udziale fragmentów homogenicznych, w których nie następuje zmiana jasności przy jednoczesnym przytłumieniu silniejszych kontrastów. Dla ortofotogramu 2 sytuacja jest ogólnie podobna, jednak niepokojące jest silne zachwianie relacji – ubyło energii w detalu poziomym, a przybyło w diagonalnym. To może świadczyć o występowaniu artefaktów.

Wyniki uzyskane dla ortofotogramu 3 odbiegają od oczekiwań w stosunku do obrazów powstałych w wyniku ortorektyfikacji. Mniejsze wartości kurtozy detalu poziomego i pionowego przy większym współczynniku dla detalu diagonalnego wskazują na duże odstępstwa radiometryczne od fotogramu referencyjnego. Są one tak duże, że obraz ten musi zawierać inne układy przestrzenne pikseli, których nie ma w fotogramie referencyjnym (należy przypomnieć, że dla metody, którą opracowano ten ortofotogram, trudno mówić o obrazie *de facto* źródłowym).

### 5.3. Wnioski z analizy parametrów falkowych

Spośród trzech badanych ortofotogramów tylko produkt uzyskany metodą klasyczną spełnia kryteria opisane w podrozdziałach 3.1 i 3.2. Ortofotogram 1 został wykonany poprawnie, co potwierdzają także inne parametry falkowe, nie dokumentowane w niniejszej publikacji (Pyka, 2005). Ortofotogram 2 nie spełnia wszystkich oczekiwań, charakteryzuje się zachwianiem proporcji parametrów falkowych, co sugeruje występowanie nienaturalnych (czyli nie występujących w fotogramie źródłowym) układów pikseli. W istocie dokładna analiza wizualna potwierdza występowanie artefaktów, zwłaszcza na krawędziach bryły na licu, której znajduje się epitafium.

Ortofotogram 3 został oceniony negatywnie – jego parametry falkowe nie spełniają żadnego z oczekiwanych warunków. Jakość radiometryczna tego obrazu jest tak niska, że bez kłopotu można było wysnuć podobny wniosek na podstawie oceny wizualnej (w obrazie jest bardzo dużo szumów). Bez trudu, zwłaszcza na powierzchni postaci, można wskazać liczne artefakty, szczególnie łatwo dostrzegalne w podobszarze A (postać), ponadto napisy są mało wyraziste i często „poszarpane”.

## 6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania jakości radiometrycznej mają charakter porównawczy – parametry falkowe ortofotogramów są odnoszone do parametrów fotogramu źródłowego. Ważną cechą zastosowanej metody badania zniekształceń radiometrycznych jest możliwość jej aplikowania dla obrazów o wzajemnie zmienionej geometrii.

Parametry falkowe, w szczególności wariancja komponentów falkowych i ich kurtoza (współczynnik skupienia rozkładu) wykazały, że najwyższą jakość radiometryczną, niewiele odbiegającą od jakości fotogramu źródłowego, ma ortofotogram uzyskany metodą klasyczną. Niższą, ale akceptowalną jakość ma ortofotogram 2 otrzymany metodą, w której wykorzystano dane 3D z pomiaru laserowego w roli numerycznego modelu powierzchni. Natomiast ortofotogram powstały na drodze rzutowania chmury punktów został oceniony negatywnie.

Ocena jakości radiometrycznej może być prowadzona na drodze wizualnej. Nie jest ona wtedy zawsze obiektywna, m.in. z powodu zależności od warunków wizualizacji poszczególnych obrazów. W przypadku ortofotogramu 3 nie była potrzebna analiza falkowa, aby orzec o jego złej jakości radiometrycznej. Jednakże uwzględnienie tego eksperymentalnego ortofotogramu w badaniach falkowych pozwoliło przetestować czułość analizy falkowej w ekstremalnych warunkach.

W pracy udowodniono techniczną możliwość integracji danych fotogrametrycznych z pomiarami uzyskanymi ze skanowania laserowego. Dane 3D z lasera stanowią atrakcyjną alternatywę dla pomiaru stereoskopowego na zdjęciach. Bardzo interesująca jest trzecia metoda, lecz wymaga ona pewnych zmian. Należy zastosować efektywniejsze wygładzanie chmury punktów, a w miejsce rzutów ekranowych wprowadzić numeryczne generowanie struktury rastrowej odpowiadającej rzutowi na wybraną płaszczyznę.

## 7. LITERATURA

Baranowski P., Czajkowski K., Gładki M., Morysiński T., Rzonca A., Szambelan R., 2005. Polish experience with advanced digital heritage recording methodology, including 3D laser scanning, CAD and GIS application, as the most accurate and flexible response for archeology and conservation needs at Jan III Sobieski's Residence in Wilanów (Warsaw), VI International Congress on Lasers in the Conservation of Artworks, Wiedeń 2005.

Białasiewicz J.T., 2000. *Falki i aproksymacje*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne Warszawa.

Georgopoulos A., Tsakiri M., Ioannidis C., Kakli A., 2004. Large Scale Orthophotography Using DTM from Terrestrial Laser Scanning. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXV, Part B5, Istanbuł 2004.

Mallat S., 1989. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 11, s. 674-693.

Mallat S., 1998. *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press.

Pyka K., 2005. Falkowe wskaźniki zmian radiometrycznych zachodzących w procesie opracowania ortofotomapy. *AGH UWND, seria rozprawy, monografie*, nr 152.

Rzonca A., 2006. Integracja wyników skanowania laserowego i pomiarów fotogrametrycznych na przykładzie inwentaryzacji nagrobka Anny Jagiellonki w Katedrze wawelskiej. *Zeszyty Naukowe AGH Geodezja*, nr 2/2.

Praca została wykonana w ramach badań statutowych AGH nr.11.11.150.459 i grantu promotorskiego nr 4 T12E 016 30.

### ANALYSIS OF THE RADIOMETRIC QUALITY OF ORTHOPHOTOGRAMS GENERATED BY THE INTEGRATION OF CLOSE RANGE PHOTOGRAMMETRY AND LASER SCANNING

KEY WORDS: orthophotogram, data integration, laser scanning, radiometric quality, wavelet transformation

#### Summary

This paper evaluated the radiometric quality of orthophotograms generated by three different methods: the classical method based on photogrammetric data and two methods based on laser scanning data. Parameters based on image wave transforms were used in order to quantitatively express the radiometric distortions of the orthorectification process. These parameters were shortly characterized in the background of the properties of wave transformation.

For this study, orthophotograms of the monument of Queen Anna Jagiellonka (Wawel Castle Cathedral) were generated. Terrain works included: measurement of the control points, taking photos and laser scanning. In the computer laboratory, the orthophotograms were generated by three methods – the classical photogrammetric method and two based on laser scanning data.

The first of these new (laser) methods used a point cloud as a digital surface model for orthorectification of the photos. In the second method, the use of laser scanning is even more essential. The cloud of points was projected orthogonally on the plane of orthophotogram. The photos were used only for adding color attributes to the particular points of the cloud.

The analysis of the radiometric quality was comparative – the wavelets parameters of orthophotograms were balanced with parameters of the basic, non-rectified photogram. The results of the radiometric distortion investigation are discussed in the paper. The variability of parameters for each of the orthorectification products is presented in diagrams.

Wavelet parameters, especially variance of wavelets components and their kurtosis (distribution concentration ratio) showed that the classical orthophotogram has the highest radiometric quality. The orthophotogram generated by laser scanning data as a digital surface model had a lower, but also acceptable quality. The wavelet parameters of the orthophotogram created as an orthogonal projection of a color point cloud gave the biggest differences compared with the parameters of the original photo. They are of the lowest radiometric quality.

The paper showed the technical possibility of integration of photogrammetric and laser scanning data. 3D scanning data are an attractive alternative for stereoscopic measurements of the photo pares. The third method is the most interesting, but it demands some innovations, including more effective smoothing of the point cloud.

Dr hab. inż. Krystian Pyka  
krisfoto@agh.edu.pl  
tel. +12 6172302

Mgr inż. Antoni Rzonca  
arz@agh.edu.pl  
tel. +12 6172302