

**TECHNICZNE, ORGANIZACYJNE I EKONOMICZNE UWARUNKOWANIA
WPROWADZENIA LOTNICZEJ KAMERY CYFROWEJ DO PRODUKCJI**

**TECHNICAL, ORGANISATIONAL AND ECONOMICAL IMPACT OF
INTRODUCTION OF DIGITAL AERIAL CAMERA INTO PRODUCTION**

Zdzisław Kurczyński

Politechnika Warszawska

SŁOWA KLUCZOWE: kamera cyfrowa, błędy systematyczne, aerotriangulacja, parametry dodatkowe, dokładność

STRESZCZENIE: Wejście kamer cyfrowych do produkcji stało się faktem. Nadal jednak to przejście jest dla firm wyzwaniem nie tylko finansowym, ale również technicznym i organizacyjnym. Referat jest przeglądem ostatnich doniesień na ten temat. W przypadku kamer kadrowych, dla zwiększenia ich rozdzielczości, zdjęcia w zakresie panchromatycznym wykonuje się 4 głowicami optycznymi (czterema sprzężonymi kamerami). Oceniając właściwości pomiarowe kadrowej kamery cyfrowej należy zwrócić uwagę na prostokątny kształt kadru, krótsza jego strona jest zwrócona w kierunku lotu. Oznacza to zwiększony zasięg poprzeczny zdjęć ale i mniejszy stosunek bazowy w porównaniu z kamerami tradycyjnymi, skutkujący gorszą wyznaczalnością wysokości. Dość bogate już doświadczenie opracowania bloków aerotriangulacji pokazuje, że osiągnięcie dokładności na poziomie wyższym niż $2\div 3 \mu\text{m}$ napotyka na trudności. Analiza szczątkowych błędów w obrębie pojedynczego zdjęcia wykazuje pozostałość systematycznych deformacji spowodowanych błędami dopasowania poszczególnych składowych zdjęć (4 dla kamery DMC i 9 dla kamery UltraCAM-D). Szczątkowe błędy zdjęć można wyeliminować poprzez włączenie do procesu aerotriangulacji parametrów dodatkowych (tzw. samokalibracja), różnych dla kamer DMC i UltraCAM-D. Badania jednoznacznie dowodzą, że przestrzenna zdolność rozdzielcza zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi jest około 1,5-2 razy wyższa od zdjęć analogowych skanowanych z pikselem $15 \mu\text{m}$.

1. WSTĘP

Tempo postępu technologicznego w zakresie opracowań fotogrametrycznych jest imponujące. Przejście z epoki fotogrametrii analogowej do analitycznej trwało około 25 lat (od prototypu autografu analitycznego w połowie lat 50. do pełnej akceptacji w produkcji przed 1980 r). Kolejna zmiana i przejście do fotogrametrii cyfrowej trwało już tylko 10 lat (pierwsze stacje cyfrowe i skanery fotogrametryczne na początku lat 90., przewaga w produkcji 10 lat później, na przełomie wieków, w krajowej produkcji pod koniec lat 90.). Jedynym, ale istotnym wyłomem w tym opisie rzeczywistości jest analogowa lotnicza kamera na film zwojowy. Zdjęcia muszą być obrobione a następnie zeskanowane, aby dalej mogły być opracowane w ciągu zorientowanym cyfrowo. W roku 2000 nastąpił przełom, na Kongresie ISPRS w Amsterdamie zostały zaprezentowane pierwsze komercyjne kamery cyfrowe, tak naprawdę osiągalne na rynku $2\div 3$ lata później. Wkrótce pojawiły się pierwsze doniesienia o wynikach, głównie opracowań eksperymentalnych. Przystawienie produkcji na opracowania z kamer cyfrowych wiąże się z poważnymi kosztami i wyzwaniami

technicznymi i organizacyjnymi. Szeroko rozumiane środowisko geoinformacyjne, a szczególnie produkcyjne, jest zainteresowane faktycznym potencjałem pomiarowym i interpretacyjnym zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi, oraz skutkami technicznymi i organizacyjnymi zamiany kamery analogowej kamerą cyfrową.

Otwartą pozostaje kwestia projektowania zdjęć wykonywanych kamerą cyfrową dla wytworzenia standaryzowanych produktów kartograficznych. Kluczowy w projektowaniu zdjęć lotniczych parametr skali zdjęć, decydujący o jakości i kosztach wytworzenia produktu, w przypadku użycia kamery cyfrowej przestaje mieć zastosowanie. Tu operuje się pojęciem terenowej odległości próbkowania (GSD – *Ground Sampling Distance*), pozostaje jednak pytanie o relacje między GSD a parametrami jakościowymi produktu.

W zeszłym roku po raz pierwszy w kraju wykorzystano kamerę cyfrową produkcyjnie, a obecnie taka kamera została zakupiona.

W minionych 2÷3 latach pojawiły się dość liczne relacje dotyczące analizy wyników opracowania w warunkach produkcyjnych zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi. Autorzy wskazują na potencjał ale i na występujące problemy i podkreślają, że użycie kamery cyfrowej nadal pozostaje wyzwaniem. Poniższy tekst jest przeglądem ostatnich doniesień w zakresie przedmiotu.

2. KAMERY CYFROWE NA RYNKU

Obecnie na rynku występują 3 wysokorozdzielcze kamery cyfrowe (określane również jako „wielkoformatowe”). Są to:

- ADS40 (Leica), kamera typu skaner elektrooptyczny,
- DMC (Intergraph), kamera typu kadrowego,
- UltraCAM-D, oraz UltraCAM-X (Vexcel) - kamery typu kadrowego.

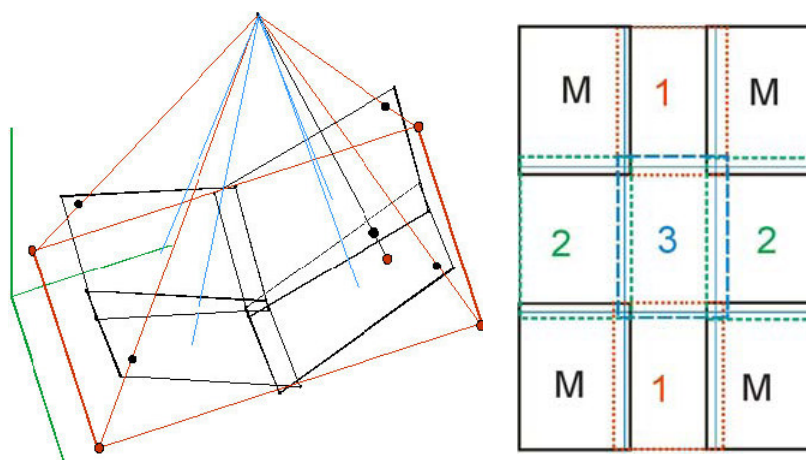
W przypadku kamer kadrowych, dla zwiększenia ich rozdzielczości, zdjęcia w zakresie panchromatycznym wykonuje się 4 głowicami optycznymi (czterema sprzężonymi kamerami), dającymi – po wstępnym przetworzeniu – wynikowe zdjęcie oraz 4 głowicami wielospektralnymi, rejestrującymi w zakresach RGB i CIR (tabela 1).

Pola widzenia głowic panchromatycznych kamery DMC są nieco rozbieżne, z niewielkim wzajemnym pokryciem (rys. 1). Na etapie wstępnego przetworzenia uzyskane zdjęcia łączy się z wykorzystaniem technik dopasowania obrazów (*image matching*), oraz generuje jedno wirtualne zdjęcie o geometrii zgodnej z rzutem środkowym.

Nieco inne rozwiązanie przyjęto w kamerze UltraCAM-D i UltraCAM-X. Tu również są 4 głowice panchromatyczne, ale o identycznym polu widzenia. Inna jest jedynie aranżacja matryc CCD w płaszczyźnie tłowej każdej z nich; występują odpowiednio 4, 2, 2 i 1 matryca, łącznie wypełniające cały kadr. Wynikowe zdjęcie wirtualne jest więc mozaiką 9 zdjęć fizycznych (rys. 1b). Ostatnio wprowadzona na rynek kamera UltraCAM-X różni się od modelu „D” zastosowaniem elementów CCD o wyższej rozdzielczości.

Tab 1. Parametry kamer cyfrowych typu kadrowego

Parametr	DMC	UltraCAM-D	UltraCAM-X
Moduł panchromatyczny:			
Ogniskowa obiektywu	120 mm	100 mm	100 mm
Jasność obiektywu	1:4	1:5.6	1:5.6
Wymiar ramki tłowej		103.5 x 67.5 mm	103.9 x 67.8 mm
wymiar piksela	12 μm	9 μm	7.2 μm
Rozdzielczość obrazu wirtualnego	13500 x 8000 piks.	11500 x 7500 piks.	14430 x 9420 piks.
Pole widzenia	74° / 44°	55° / 37°	55° / 37°
Stosunek bazowy B/H (dla p=60%)	1:3.26	1:3.5	1:3.5
Moduł wielospektralny:			
Ogniskowa obiektywu	25 mm	28 mm	33 mm
Jasność obiektywu	1:4	1:4	1:4
Wymiar CCD	36 x 24 mm	36.1 x 24.0 mm	34.7 x 23.9 mm
wymiar piksela	12 μm	9 μm	7.2 μm
Rozdzielczość obrazu	3000 x 2000 piks.	4008 x 2672 piks.	4992 x 3328 piks.
Pole widzenia	72° / 50°	65° / 46°	55° / 40°



Rys. 1. Idea geometrii zdjęcia wirtualnego tworzonego ze zdjęć fizycznych:
a - kamera DMC, b – kamera UltraCAM-D

Na etapie generowania wirtualnych zdjęć, wprowadza się dodatkowo korekcje geometryczne i radiometryczne z danych kalibracji kamery. Zdjęcia takie pod względem geometrii i formy zapisu nie różnią się od zeskanowanych zdjęć analogowych i mogą być wprowadzane do istniejącego ciągu produkcyjnego natychmiast, bez jego modyfikacji.

Oceniając właściwości pomiarowe kadrowej kamery cyfrowej należy zwrócić uwagę na prostokątny kształt kadru, krótsza jego strona jest zwrócona w kierunku lotu. Oznacza to zwiększony zasięg zdjęć ale i mniejszy stosunek bazowy w porównaniu z kamerami tradycyjnymi, skutkujący gorszą wyznaczalnością wysokości.

W przypadku kamery ADS40 mamy do czynienia z obrazem dynamicznym, z ciągłą rejestracją elementów orientacji zewnętrznej z wykorzystaniem zintegrowanych systemów GPS/INS. Geometria takiego obrazu jest różna od rzutu środkowego, co stanowi pewną przeszkodę w szybkim przestawieniu produkcji na opracowanie takich obrazów. Nieuniknione błędy w pomiarach GPS/INS powodują, że na etapie opracowania trudno jest uzyskać dokładności wyższe od 0.15 m (Jacobsen, 2007). Z drugiej strony kamera ta pozwala uzyskać obrazy barwne w barwach rzeczywistych i podczerwieni o lepszej reprodukcji barw niż możliwe do uzyskania kamerami kadrowymi (wynika to z różnej konstrukcji, patrz (Kurczyński, 2006)). Kamera ta lepiej sprawdza się w zastosowaniach interpretacyjnych oraz produkcji cyfrowych ortofotomap o średniej rozdzielczości. Praktyka ostatnich lat pokazuje, że dla opracowań wielkoskalowych preferowane są kamery kadrowe. To rozróżnienie jeszcze 3÷4 lata temu nie było tak wyraźnie postrzegane (Jacobsen, 2007).

3. UWARUNKOWANIE ORGANIZACYJNE I EKONOMICZNE WPROWADZENIA KAMERY CYFROWEJ DO PRODUKCJI

Ciekawe doświadczenia z wdrożenia kamery cyfrowej DMC do produkcji w firmie Hansa Luftbild przedstawia R.W. Schroth (Schroth, 2007). Zakup kamery cyfrowej, jakkolwiek kosztowny, stanowi tylko część kosztów jej wprowadzenia do rutynowej produkcji. Pozostałe składowe kosztów to „otoczenie” kamery dla wstępnego przetwarzania i archiwizacji zdjęć. Na to otoczenie składają się komputery, szybka sieć, software itp. Trzecia składowa to koszty szkoleń. Proporcje tych składowych ocenia się jak 7:2:1. Praktyka pokazuje, że wstępne przetwarzanie 2000 zdjęć trwa 80 godz. (lub 3 dni) co jest nadal krótsze niż wywołanie i skanowanie filmu.

Specyfiką branży fotolotniczej jest stałość wielu składowych kosztów. Ocenia się, że dopiero wykorzystanie kamery cyfrowej przez 150 godz. rocznie pozwala zbilansować koszty i zyski na zero. Powyżej tego czasu wykonywanie zdjęć przynosi dochód (Schroth, 2007).

Doświadczenie tej dużej firmy wskazuje, że 80% zdjęć wykonuje się dla zewnętrznych klientów, w większości dla produkcji ortofotomap w kombinacji z automatycznym NMT. Tylko 10% zdjęć podlega stereodigitalizacji. Ten asortyment produkcji wykazuje dalszą tendencję niżkową. Jeszcze kilka lat temu te proporcje były inne. Produkcja ortofotomap pozwala lepiej wykorzystać zalety kamery cyfrowej.

Łatwość pozyskania kamerami cyfrowymi zdjęć o zwiększonym pokryciu (podłużnym do 80% i poprzecznym do 60%) bez dodatkowych kosztów, lub niewielkim nakładem środków, może istotnie wpłynąć na zmianę podejścia. Dotychczas zwiększenie liczby zdjęć wiązało się z proporcjonalnym wzrostem kosztów (lot, film, obróbka,

skanowanie, opracowanie). Kamera cyfrowa pozwala na inne widzenie problemu. Wzrost pokrycia pozwala na pełniejszą automatyzację procesów technologicznych. Takie produkty jak aerotriangulacja, NMT czy ortofoto, już znacznie zautomatyzowane, mogą podlegać dalszej automatyzacji dzięki wzrostowi niezawodności procesów osiąganey przy większych pokryciach zdjęć. Ortofoto zbliży się do „prawdziwego” ortofoto bez dodatkowych zabiegów. F. Leberl analizując składowe kosztów wykonania zdjęć cyfrowych i ich opracowania ocenia, że przy przerobie 20 tys. zdjęć rocznie będzie można o połowę zmniejszyć koszty opracowania. Zakłada się przy tym dalszą eliminację prac manualnych o połowę, na korzyść automatyzacji możliwej przy zwiększonym pokryciu zdjęć (Leberl *et al.*, 2004).

4. POTENCJAŁ POMIAROWY KAMER CYFROWYCH

Dokładność opracowania fotogrametrycznego jest w pierwszym rzędzie pochodną parametrów zdjęć. Oczekiwana dokładność pomiaru sytuacyjnego jest wprost proporcjonalna do skali zdjęć i dokładności pomiaru współrzędnych tłowych. Dokładność tą często wyraża się w skali zdjęcia.

Dokładność pomiaru wysokościowego jest wprost proporcjonalna do stosunku bazowego (B/H) oraz dokładności pomiaru paralaksy podłużnej. Błąd opracowania wysokościowego jest więc dla danych zdjęć wprost proporcjonalny do wysokości lotu, co często wyraża się w promilach wysokości lotu.

Porównując oczekiwane dokładności opracowania zdjęć analogowych i cyfrowych uderzają dwie różnice:

1. Wyższa dokładność pomiaru współrzędnych tłowych zdjęć cyfrowych. Wynika to z:
 - braku etapu skanowania i wynikających z tego błędów,
 - braku deformacji filmu,
 - lepszej jakości radiometrycznej (brak „ziarna” emulsji, zadrapań itp. defektów), co znacznie poprawia dokładność pomiaru zdjęć, szczególnie pomiaru automatycznego (lepsze warunki dopasowania obrazów).
2. Około dwukrotnie mniejszy stosunek bazowy kamer cyfrowych w porównaniu z analogowymi kamerami szerokokątnymi. Wynika to z prostokątnego formatu kadru kamer cyfrowych i krótszej bazy. Oznacza to, że geometria kamer cyfrowych pod tym względem nie jest korzystna (odpowiada w przybliżeniu geometrii analogowej kamery normalnokątnej, tj. $ck=305$ mm). Ten niekorzystny efekt jest kompensowany przez dokładniejszy pomiar paralaksy.

Zdjęcia z kamer cyfrowych mają znacznie lepszą radiometrię (12 bitów zamiast 6÷8 dla zdjęć analogowych). Można byłoby oczekiwać wynikającego z tego powodu lepszego dopasowania obrazów i wzrostu dokładności pomiaru. Doświadczenia praktyczne nie potwierdzają jednak wzrostu jakości dopasowania obrazów o rozdzielczości radiometrycznej 12 bitów w porównaniu z tymi samymi obrazami zdegradowanymi do 8 bitów (Madani *et al.*, 2004).

Wyniki aerotriangulacji uzyskane w warunkach produkcyjnych potwierdzają oczekiwaną dokładność opracowania sytuacyjnego zdjęć z kamer cyfrowych na poziomie 2÷3 μ m (tj. 0.2÷0.3 piksela) osiąganą w warunkach produkcyjnych (wobec 5 μ m dla kamer analogowych) (Madani *et al.*, 2004). W opracowaniach eksperymentalnych ta dokładność

może być nawet lepsza od 2 μm . Oznacza to dokładność pomiaru współrzędnych tłowych lepszą około 3 razy dla pomiaru automatycznego i 1.3 razy dla pomiaru manualnego, w porównaniu z dokładnością pomiaru zdjęć analogowych skanowanych z pikselem 15 μm (Alamús *et al.*, 2005).

W zakresie dokładności opracowania wysokościowego autorzy zgodnie donoszą, że dwukrotnie gorszy stosunek bazowy kamer cyfrowych jest w pełni kompensowany wzrostem dokładności automatycznego pomiaru na zdjęciach, co oznacza, że dokładność opracowania wysokościowego jest porównywalna, a nawet nieco wyższa od osiągananej szerokokątną kamerą analogową i wynosi około 0,05‰ H (Dörstel, 2003; Jacobsen, 2007).

Autorzy przestrzegają równocześnie przed wyolbrzymianiem znaczenia wskaźników dokładności w aerotriangulacji (σ_0). Wskaźnik ten jest miarą wewnętrznej (wzajemnej) zgodności. Ocena dokładności wyprowadzona na tej podstawie zwykle jest zbyt optymistyczna i nie bierze pod uwagę błędów systematycznych (Jacobsen, 2007).

Powszechna jest opinia, że osiągnięcie potencjału pomiarowego zdjęć cyfrowych na poziomie cytowanym powyżej (a nawet wyższym) jest możliwe, o ile zostaną uwzględnione szcztkowe błędy systematyczne pozostające w blokach aerotriangulacji po wyrównaniu. Błędy te wynikają ze specyfiki kamer cyfrowych, gdzie wynikowe zdjęcie jest generowane z 4 (DMC) lub 9 (UltraCAM-D) zdjęć fizycznych, co może pozostawiać błędy szcztkowe o charakterze systematycznym. Błędy te objawiają się deformacjami wysokościowymi pojedynczych modeli na etapie opracowania NMT. Stwierdzone błędy wysokości są większe od oczekiwanych (Alamús *et al.*, 2005; Alamús *et al.*, 2007; Baz, 2007; Jacobsen, 2007).

5. BŁĘDY SYSTEMATYCZNE CYFROWYCH ZDJĘĆ WIRTUALNYCH. AEROTRIANGULACJA Z PARAMETRAMI DODATKOWYMI

Zdjęcia pozyskane kamerami cyfrowymi, poddane dalszemu opracowaniu, są zdjęciami wirtualnymi (kompozytami), złożonymi ze zdjęć pozyskanych z 4 głowic optycznych. Wirtualne zdjęcia są składane z wykorzystaniem danych z kalibracji kamery. Teoretycznie więc, zdjęcia te są wolne od błędów geometrycznych. Aby tak było, muszą być jednak spełnione warunki:

- zdjęcia wyjściowe muszą być pozyskane synchronicznie,
- błędy perspektywiczne związane z fizyczną odległością głowic panchromatycznych muszą być zaniedbywalne,
- wzajemna orientacja głowic optycznych musi być stabilna,
- parametry optyczne poszczególnych obiektywów i położenie tablic CCD w płaszczyznach tłowych muszą być stabilne w czasie i zgodne z warunkami kalibracji kamery.

Dokładność automatycznego dopasowania zdjęć jest imponująca i może osiągać 0.1 piksela. Aby ten potencjał wykorzystać, powyższe warunki muszą być spełnione na odpowiednio wysokim poziomie. Dość bogate już doświadczenie opracowania bloków aerotriangulacji o zróżnicowanej konfiguracji i pokryciach (większych od standardowych) pokazuje, że osiągnięcie dokładności na poziomie wyższym niż 2÷3 μm napotyka na trudności (Alamús *et al.*, 2007; Baz *et al.*, 2007; Jacobsen, 2007; Smith *et al.*, 2007; Spreckels *et al.*, 2007). Analiza szcztkowych błędów w obrębie pojedynczego zdjęcia wirtualnego wykazuje systematyczne składowe wskazujące na niezgodności dopasowania

poszczególnych składowych zdjęcia wirtualnego (4 dla kamery DMC i 9 dla kamery UltraCAM-D).

Rysunek 2a i 3a prezentują przykłady takich rozkładów w obrębie jednego zdjęcia, odpowiednio dla kamery DMC i UltraCAM-D. Te szcążkowe zniekształcenia otrzymano uśredniając (w obrębie zdjęcia) odchyłki na wszystkich punktach przejściowych, występujących w bloku aerotriangulacji (dla przypadku jak na rys. 2 takich punktów wystąpiło ponad 100 tys.). Lokalne uśrednienie odchyłek pozwala wyodrębnić z nich składowe systematyczne. Ta systematyka jest wyraźnie widoczna w obu przypadkach, a co jeszcze istotniejsze, daje się wyraźnie wyodrębnić rozkład zniekształceń systematycznych, przynależny do poszczególnych składowych zdjęcia wirtualnego. Świadczy to o pozostałych, niewyeliminowanych dystorsjach, których źródłem mogą być błędy kalibracji kamer, lub zmiany geometrii w wyniku ich eksploatacji. Wielkość systematycznych zniekształceń jest na poziomie $1\div 2\ \mu\text{m}$ lub niewiele więcej. Może się wydawać, że to niewiele. Należy jednak mieć na uwadze, że są to zniekształcenia systematyczne, których wpływ „przenosi się” w bloku zdjęć, dając w efekcie znać o sobie szczególnie w postaci deformacji wysokościowych.

Szcążkowe błędy zdjęć można wyeliminować poprzez włączenie do procesu aerotriangulacji tzw. parametrów dodatkowych. Parametry te opisują deformacje zdjęć spowodowane dystorsją radialną, dystorsją tangencjalną, czy zniekształceniami afinicznymi. Parametry te w procesie wyrównania traktowane są jak niewiadome. Proces ten określany jest jako „samokalibracja” (bo poprawia parametry kalibracji kamery). Większość dostępnych na rynku pakietów aerotriangulacji daje takie możliwości. Na przykład w programie BLUH jest dostępnych 12 takich parametrów. Model korekcji tymi parametrami nie jest jednak dostatecznie adekwatny dla deformacji zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi. W tym bowiem przypadku mamy do czynienia ze zniekształceniami kilku (4 lub 9) zdjęć składowych, każde o sobie właściwym rozkładzie zniekształceń. Dla aerotriangulacji zdjęć cyfrowych opracowano więc dodatkowe parametry, opisujące szcążkowe deformacje, inne dla kamer DMC i inne dla UltraCAM-D.

Dla kamery DMC są to:

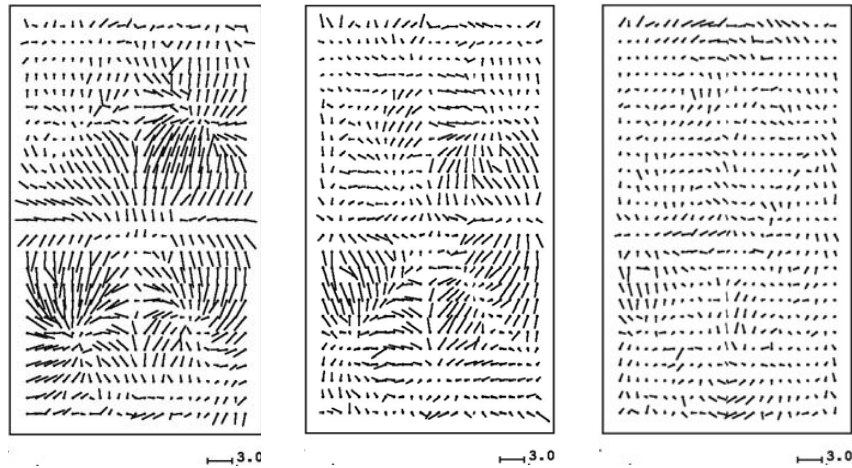
- błędy synchronizacji migawek głowic optycznych,
- indywidualne zniekształcenia perspektywiczne zdjęć składowych,
- indywidualna dystorsja radialna (r^3) zdjęć składowych,
- wpływ zmiany pola widzenia wspólny dla wszystkich zdjęć składowych, spowodowany przez odległość obrazową,
- wpływ dystorsji radialnej wspólny dla wszystkich zdjęć składowych.

Dla kamery UltraCAM-D dla każdego z 8 składowych zdjęć względem składowej centralnej (nr 3 na rys. 1b) odpowiednio:

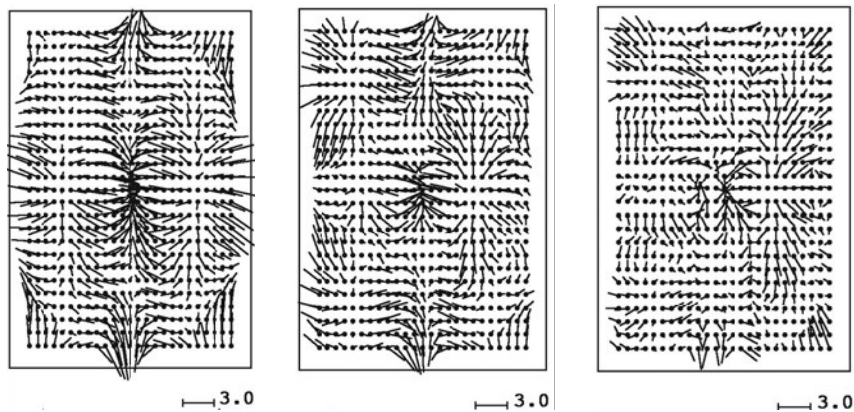
- parametr skali,
- przesunięcie w kierunku x,
- przesunięcie w kierunku y,
- obrót.

Uzmiennienie w procesie wyrównawczym tak wielu parametrów nie jest pożądane. Nieumiejętne stosowanie parametrów może przynieść efekt odwrotny do zamierzonego: zamiast poprawy może zdestabilizować proces wyrównawczy. Program BLUH ma wbudowane narzędzia statystyczne pozwalające badać stopień istotności każdego

z parametrów. Faktycznie uzmiennia się tylko te, które są istotne i nie korelują silnie z innymi niewidomymi.



Rys. 2. Szczątkowe zniekształcenia po aerotriangulacji w obrębie zdjęcia (kamera DMC, blok Ghent, skala 1:6440, GSD=7,7 cm, pokrycia $p=80\%$, $q=60\%$, program BLUH): a - bez parametrów dodatkowych (śr. zniekształcenia $m_x=0,8 \mu\text{m}$ i $m_y=1,2 \mu\text{m}$), b - z parametrami standardowymi (śr. zniekształcenia $m_x=0,6 \mu\text{m}$ i $m_y=0,8 \mu\text{m}$), c - z parametrami standardowymi i specjalnymi (śr. zniekształcenia $m_x=0,3 \mu\text{m}$ i $m_y=0,4 \mu\text{m}$) (Jacobsen, 2007)



Rys. 3. Szczątkowe zniekształcenia po aerotriangulacji w obrębie zdjęcia (kamera UltraCAM-D, blok DSK-Saar, skala 1:10046, GSD=9 cm, pokrycia $p=80\%$, $q=40\%$, program BLUH): a - bez parametrów dodatkowych, b - z parametrami standardowymi, c - z parametrami standardowymi i specjalnymi (Jacobsen, 2007; Spreckels et al., 2007)

Rysunek 2b pokazuje przykładowy rozkład szczytkowych zniekształceń po wyrównaniu z zastosowaniem standardowych parametrów dodatkowych, a rys. 2c z zastosowaniem również dodatkowych parametrów specjalnych dla kamery DMC. Rys. 3b i 3c pokazują zniekształcenia po wyrównaniu odpowiednio dla kamery UltraCAM-D.

Alamús i inni w bloku zdjęć DMC również wykorzystali parametry standardowe, ale do opisu niezależnie każdej ćwiartki obrazu. Autorzy potwierdzają duże błędy wysokościowe w bloku (ujawniające się przy zwiększonych pokryciach zdjęć i braku lub słabych współrzędnych środków rzutów GPS). Samokalibracja istotnie poprawia tę sytuację (Alamús *et al.*, 2007).

Smith i inni dla bloku zdjęć UltraCAM-D wykorzystali oprogramowanie ORIMA (Leica) z podstawowymi parametrami dodatkowymi. Autorzy sygnalizują małą skuteczność samokalibracji (Smith *et al.*, 2007).

Cytowane (i inne) doświadczenia w zakresie aerotriangulacji zdjęć cyfrowych pozwalają na sformułowanie szeregu uogólnień;

1. Autorzy wskazują na wysoką dokładność aerotriangulacji ze zdjęć z kamer cyfrowych. V. Spreckels uzyskał w warunkach operacyjnych (Spreckels *et al.*, 2007):
 - dla kamery DMC: odchylenie standardowe: $\sigma_0 \approx 0.15$ piksela
błąd syt. na p. kontrolnych: ok. 0.25 GSD
 - dla kamery UltraCAM-D: odchylenie standardowe: $\sigma_0 \approx 0.25$ piksela
błąd syt. na p. kontrolnych: ok. 0.33 GSD,
2. W blokach zdjęć pozyskanych kamerami cyfrowymi występują szczytkowe zniekształcenia o charakterze systematycznym.
3. W rozkładzie tych zniekształceń widać błędy wynikające ze specyfiki budowy kamer cyfrowych, gdzie zdjęcie wynikowe jest agregatem kilku zdjęć fizycznych. Do opisu takich zniekształceń przydatność modeli zniekształceń stosowanych w aerotriangulacji zdjęć analogowych jest ograniczona. Konieczne są specyficzne modele, adekwatne dla konstrukcji kamer cyfrowych (różne dla DMC i UltraCAM-D).
4. Zwiększone pokrycia zdjęć (podłużne do 80% i poprzeczne do 60%) nie powoduje proporcjonalnej poprawy stabilności i zmniejszenia deformacji w bloku. W takim bloku (tj. bloku w którym liczba punktów jest wielokrotnie mniejsza od liczby ich odwzorowań) wyraźniej widać systematyczny charakter rozkładu w obrębie zdjęcia. Wynika to z tego, że przy mniejszych pokryciach błędy systematyczne są kompensowane (wchłaniane) przez elementy orientacji zewnętrznej (Dörstel, 2003). Ważne jest również adekwatne wagowanie obserwacji, szczególnie obserwacji na zdjęciach; ich przewagowanie spowoduje zanik obrazu deformacji systematycznych, których efekt zostanie „wchłonięty” przez inne wyznaczone parametry. Stwierdzonym pozytywnym efektem zwiększonego pokrycia jest mniejsze zapotrzebowanie na osnowę połową (Jacobsen, 2007).
5. Praktyka wskazuje na ograniczoną skuteczność stosowanych parametrów dodatkowych. Poziom zniekształceń zmniejsza się, ale nie jest eliminowany całkowicie.

6. Tylko część parametrów dodatkowych okazuje się znacząca. Z parametrów ogólnych są to parametry opisujące dystorsję radialną i tangencjalną, oraz wybrane parametry specjalne kamery UltraCAM-D (Baz *et al.*, 2007).
7. Stosowanie parametrów dodatkowych nie przekłada się widocznie na zmniejszenie błędów w bloku. Widać to na punktach kontrolnych, odchyłki sytuacyjne na nich nie ulegają widocznemu zmniejszeniu. Pozytywnym efektem są zmniejszające się błędy wysokościowe, stwierdzane na punktach kontrolnych.

Wyniki na podobnym poziomie potwierdzają inni autorzy (np. (Baz *et al.*, 2007)). Są to wyniki lepsze od uzyskiwanych z kamer analogowych. Autorzy wskazują na pozostające w bloku znaczne błędy wysokościowe.

Latem br. zakończył się trwający ponad 3 lata europejski projekt badawczy, realizowany przez EuroSDR (dawniej OEEPE), dotyczący oceny kamer cyfrowych. W projekcie uczestniczyło kilkanaście ośrodków badających zdjęcia z pól testowych, pozyskane cyfrowymi kamerami wielkoformatowymi. Uczestnicy potwierdzają obecność systematycznych deformacji w kadrowych zdjęciach cyfrowych, właściwych dla poszczególnych składowych wynikowych zdjęć wirtualnych. Charakter tych zniekształceń wymaga indywidualnej parametryzacji w procesie samokalibracji. Opracowanie z samokalibracją pozwala osiągnąć dokładności na poziomie (Cramer, 2007):

- dla kamery ADS: sytuacyjnie 1/5 piksela, wysokościowo 0.04‰ wys. lotu,
- dla kamery DMC: sytuacyjnie 1/4÷1/5 piksela, wysokościowo 0.05÷0.1‰ wys. lotu,
- dla kamery UltraCAMD: sytuacyjnie 1/4÷1/2 piksela, wysokościowo 0.03‰ wys. lotu.

Autorzy wskazują na ważność właściwego wagowania obserwacji.

Część autorów zauważa, że wektory zniekształceń systematycznych tworzą „zawierania” niezbyt skutecznie modelowane przez „tradycyjne” zestawy parametrów kalibracyjnych. Skuteczniejsze okazuje się wygenerowanie dla danej kamery siatki korekcyjnej, opisującej powierzchniowy rozkład zniekształceń w formie korekt w węzłach regularnej siatki, wykorzystywane w dalszym procesie opracowania do interpolacji poprawek do obserwacji w danym punkcie (Dörstel, 2007; Saile, 2007).

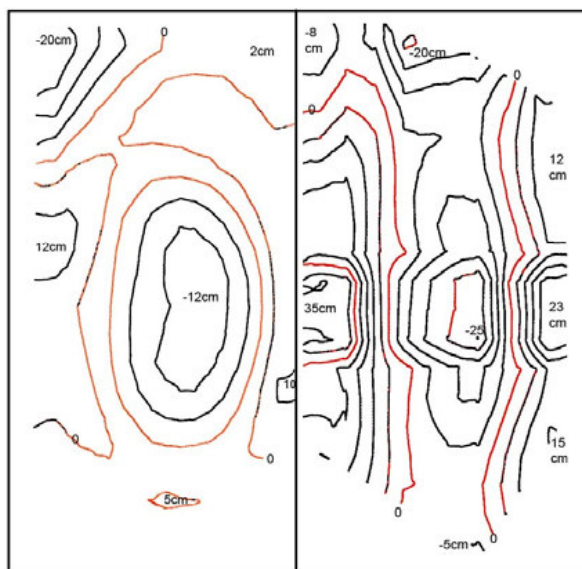
Autorzy podkreślają, że trwają dalsze prace nad oceną potencjału pomiarowego kamer cyfrowych. Potencjał ten jest wyższy niż dla kamer analogowych. Uzyskane wyniki nie są jednak jednoznaczne i na obecnym etapie nie pozwalają na wyciąganie zbyt daleko idących uogólnień. Prace są w toku.

Uzyskanymi wynikami bardzo są zainteresowani producenci kamer. Dostawcy podjęli prace nad nowym podejściem do problemu kalibracji kamer. Jest przygotowywane nowe oprogramowanie do wstępnej obróbki zdjęć. Należy oczekiwać, że również nowe edycje pakietów do aerotriangulacji umożliwią modelowanie błędów specyficznych dla poszczególnych kamer cyfrowych.

6. DEFORMACJE WYSOKOŚCIOWE MODELU

Deformacje systematyczne zdjęć można uwzględnić w procesie aerotriangulacji z parametrami dodatkowymi. Problem pojawia się jednak przy dalszym opracowaniu poszczególnych stereogramów. Błędy sytuacyjne są na tyle małe, że w opracowaniu mogą być ignorowane. Inaczej przy opracowaniu wysokościowym. Wynika to z gorszego stosunku bazowego kamer cyfrowych, oraz błędów wysokościowych w obrębie zdjęcia. Jeśli przyjąć np. zdjęcia UltraCAM-D z GSD=9 cm i pokryciu p=60% (blok DSK-Saar),

oraz założyć błąd pomiaru paralaksy równy 0.25 piksela (odpowiadający sigma0 osiągalnemu w warunkach operacyjnych), to spodziewana dokładność wysokościowa wyniesie 9.2 cm. Tymczasem praktyka wykazuje błędy około 3 krotnie wyższe (Jacobsen, 2007; Spreckels *et al.*, 2007). Opracowania NMT realizowane w różnych warunkach (porównanie zdjęć cyfrowych 60% i 80%, również opracowania zdjęć analogowych RMK Top15 z pokryciem 60% i 80%) wskazały na przyczyny tkwiące w kamerze cyfrowej, a konkretnie w systematycznych deformacjach w obrębie zdjęć. Rysunek 4 pokazuje deformacje wysokościowe modelu spowodowane błędami zdjęć, wyznaczonymi w aerotriangulacji. Błędy zdjęć zostały wymodelowane (i uwzględnione) w procesie aerotriangulacji, same błędy jednak w zdjęciach pozostały i ujawniają się w opracowaniu pojedynczych stereogramów. Podobny problem występuje w przypadku kamer DMC, choć jest nieco łagodniejszy (Jacobsen, 2007; Spreckels *et al.*, 2007). Należy zaznaczyć, że problem nie jest nowy, podobne efekty występują w opracowaniach zdjęć analogowych (choć nie tak silnie), są jednak zwykle ignorowane. Uwzględnienie deformacji zdjęć na etapie opracowania wysokościowego pojedynczego stereogramu nie jest standardem na stacjach cyfrowych. Pozostaje korekcja *a'posteriori* pomierzonego modelu. Może taka możliwość pojawi się jako standardowa opcja w kolejnych edycjach komercyjnych stacji cyfrowych?



Rys. 4. Deformacje wysokościowe modelu spowodowane systematycznymi błędami zdjęć wyznaczonymi w procesie aerotriangulacji z parametrami dodatkowymi (kamera UltraCAM-D, blok DSK-Saar, skala 1:10046, GSD=9 cm, pokrycie $p=66\%$, $B/H=1:4.4$, warstwice co 5 cm): a - parametry podstawowe, b - parametry podstawowe i specjalne (Jacobsen, 2007; Spreckels *et al.*, 2007)

7. ZAWARTOŚĆ TREŚCI OBRAZÓW CYFROWYCH

Zawartość treści zdjęć określa, jakie obiekty mogą być wykryte, rozpoznane i pomierzone na zdjęciach i jest uwarunkowana ich przestrzenną rozdzielczością. W tradycyjnym podejściu w zakresie skal średnich to właśnie ograniczone możliwości interpretacyjne w pierwszym rzędzie stanowią o relacji skali mapy i skali zdjęć, z których dana mapa może być opracowana. Badania jednoznacznie dowodzą, że przestrzenna zdolność rozdzielcza zdjęć wykonanych kamerami cyfrowymi jest wyższa od zdjęć analogowych.

R. Alamús relacjonuje wyniki badania rozdzielczości w warunkach lotu poprzez fotografowanie testów kamerami DMC i RC30. Stwierdza, że zdolność rozdzielcza zdjęć DMC jest około 2 razy wyższa od zdjęć analogowych skanowanych z pikselem 15 μm i jest zachowana jej stałość w całym polu widzenia (Alamús, 2005).

K. Jacobsen relacjonuje szeroko zakrojone badania możliwości tworzenia map wektorowych ze zdjęć cyfrowych i analogowych w różnych skalach. Stwierdzono, że ten sam zasób treści map osiąga się ze zdjęć cyfrowych o pikselu 1.5÷2.0 razy większym od zdjęć analogowych skanowanych z pikselem 20 μm . Oznacza to, że wielkoformatowa kamera 23 x 23 cm daje ten sam zasób treści co obraz cyfrowy o rozdzielczości w zakresie 5750 x 5750÷7700 x 7700 pikseli (Jacobsen, 2007).

Jakość radiometryczna jest szczególnie ważna przy produkcji ortofotomap. Kamera cyfrowa ma tu do zaoferowania kompozycje barwne w barwach rzeczywistych (RGB) i w podczerwieni (CIR), pozyskiwane w jednym przelocie, o jakości wyższej od osiąganey na filmach. Pod tym względem kamera cyfrowa zastępuje wszystkie stosowane filmy w kamerach analogowych.

8. PODSUMOWANIE

Wejście kamer cyfrowych do produkcji stało się faktem. Tempo przejścia z kamer analogowych na cyfrowe jest większe niż oczekiwano jeszcze kilka lat temu. Od etapu opracowań eksperymentalnych firmy produkcyjne przechodzą do rutynowych prac. Nadal jednak to przejście jest dla firm wyzwaniem nie tylko finansowym, ale również technicznym i organizacyjnym.

Potencjał pomiarowy kamer cyfrowych jest wyższy od potencjału kamer analogowych, choć nie brak problemów, szczególnie w zakresie opracowań wysokościowych.

Potencjał interpretacyjny kamer cyfrowych jest zdecydowanie wyższy od kamer analogowych. Wynika to ze zdecydowanie wyższej rozdzielczości przestrzennej zdjęć. Ta sytuacja może prowadzić do zmiany dotychczas stosowanych relacji między parametrami zdjęć a parametrami produktów, z ekonomicznymi skutkami tej zmiany. Są w tym kierunku idące wskazania, choć obecnie brak jeszcze jednoznacznych odpowiedzi technologicznych, o wiarygodności zadawalającej wymagania produkcji.

9. LITERATURA

- Alamús R., Kornus W., Palf V., Pérez F., Arbiol R., Bonet R., Costa J., Hernández J., Marimon J., Ortiz M.A., Palma E., Pla M., Racero S., Talaya J., 2005. Validation Process of the ICC Digital Camera. *ISPRS Hannover Workshop 2005*
- Alamús R., Kornus W., Riesinger I., 2007. DMC Geometric Performance Analysis. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Arias a B., Gomez J., 2007. Stereoscopic Accuracy. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Baz I., Buyuksalih G., Jacobsen K., 2007. Bundle Block Adjustment With High Resolution UltraCAM-D Images. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Cramer M., 2007. The EuroSDR Performance Test for Digital Aerial Camera Systems. *Photogrammetric Week. 2007, Stuttgart (Germany)*
- Dörstel Ch., 2003. DMC - Practical Experiences and Photogrammetric System Performance. *Photogrammetric Week. 2003, Stuttgart (Germany)*
- Dörstel Ch., 2007. DMC-(R)evolution on Geometric Accuracy. *Photogrammetric Week. 2007, Stuttgart (Germany)*
- Dörstel Ch, Traub S., Wuescher D., 2005. Towards Fully Automated Processing of DMC Images. *ISPRS Hannover Workshop 2005*
- Gruber M., 2007. UltraCamX, the new Digital Aerial Camera System by Microsoft Photogrammetry. *Photogrammetric Week. 2007, Stuttgart (Germany)*
- Jacobsen K., 2007. Geometry and Information Contents of Large Size Digital Frame Cameras. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Kurczyński Z., 2006. *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej
- Leberl F., Thurgood J., 2004. The Promise of Softcopy Photogrammetry Revisited. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul (Turkey)*
- Madani M., Dörstel C., Heipke C., Jacobsen K., 2004. DMC Practical Experience and Accuracy Assessment. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul (Turkey)*
- Perko R., Klaus A., Gruber M., 2004. Quality Comparison of Digital and Film-Based Images for Photogrammetric Purposes. *Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul (Turkey)*
- Saile J., 2007. INPHO GmbH – Ready for the Future. *Photogrammetric Week. 2007, Stuttgart (Germany)*
- Schroth R. W., 2007. The Digital Mapping Camera DMC and Its Application Potential. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Smith M., Kokkas N., Qtaishat K.S., 2007. Investigation Into Self-Calibration Methods for the Vexcel UltraCAM-D Digital Aerial Camera. *ISPRS Hannover Workshop 2007*
- Spreckels V., Fischer C., Schlienkamp A., Syrek L., 2005. Photogrammetric Stereoplotting Capabilities of Vexcel UltraCAM-D Digital Aerial Imagery. *ISPRS Hannover Workshop 2005*
- Spreckels V., Schlienkamp A., Jacobsen K., 2007. Model Deformation – Accuracy of Digital Frame Cameras. *ISPRS Hannover Workshop 2007*

**TECHNICAL, ORGANISATIONAL AND ECONOMICAL IMPACT OF
INTRODUCTION OF DIGITAL AERIAL CAMERA INTO PRODUCTION**

KEY WORDS: digital camera, systematic distortions, aerotriangulation, additional parameters, accuracy

SUMMARY: The introduction of digital cameras into production environment become a fact, but for companies, to switch over to digital camera is still not only the financial but also technical and organisational challenge. In case of frame cameras, for the resolution improvement, photos in panchromatic range are taken by 4 optical heads (4 coupled cameras). While assessing the measurement capabilities of digital frame cameras, attention should be drawn to the rectangular shape of a virtual image, with shorter side oriented in flight direction. That means greater coverage, but smaller base to high ratio in comparison to analog cameras, leading to worse high measurement capabilities. Broad experiences in aerotriangulation show that it is difficult to achieve accuracy above $2\div 3 \mu\text{m}$. An analysis of residuals within a single photo proves indicates systematic deformations caused by the disagreement between the components of a virtual image (4 for DMC camera and 9 for UltraCAM-D camera). This residuals can be removed by introducing in the aerotriangulation adjustment so called "additional parameters", individual for DMC and UltraCAM-D. Investigation of spatial resolution clearly shows that the resolution of digital pictures is 1.5-2 times higher than that of the analog ones scanned with $15 \mu\text{m}$ pixel.

dr hab. inż. Zdzisław Kurczyński
e-mail: kurczynski@wp.pl
telefon: 501 081 550
tel./fax: (022) 251 44 34