

Tomasz Pirowski*, Regina Tokarczyk*

BADANIE PRZESTRZENI BARWNEJ
CYFROWEGO APARATU FOTOGRAFICZNEGO
NA PRZYKŁADZIE MINOLTY DYNAX 5D**

1. Wprowadzenie

Segmentacja obrazu na podstawie barwy jest metodą automatyzacji pomiaru markerów punktów ciała w fotogrametrycznym systemie pomiarowym na potrzeby rehabilitacji leczniczej, opracowanym w Zakładzie Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej WGGiŚ AGH [4]. W metodzie tej wykorzystuje się parametry barwy w modelu HSI wyznaczone na podstawie kalibracji dowolnego markera na dowolnym obrazie cyfrowym do poszukiwania pikseli odpowiadających tym parametrom na innych obrazach.

Wybrana metoda automatycznej detekcji bazuje zatem na założeniu, że parametry barw markerów są stałe przynajmniej dla serii zdjęć jednego pacjenta, wykonanej przy tym samym oświetleniu. Istotne wobec tego jest zbadanie, jak stabilnie oddaje barwy urządzenie rejestrujące, czyli cyfrowy aparat fotograficzny.

Badania dotyczące tego zjawiska przeprowadzono dla wybranego aparatu fotograficznego – Minolta Dynax 5D.

2. Wybrane definicje terminów związanych z rejestracją barw

Barwą nazywamy pewien zakres promieniowania elektromagnetycznego, który poddaje się percepcji oka ludzkiego. Światło widzialne, o długości fal z zakresu 380 nm do 780 nm,

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Zakład Fotogrametrii i Informatyki Teledetekcyjnej

** Opracowanie wykonano w ramach grantu KBN nr 4 T12E 05227

przedstawiane jest za pomocą matematycznych modeli w postaci trójwymiarowych przestrzeni barw. Najważniejsze przestrzenie barw ujęto w normach międzynarodowych. Stosuje się je w różnych dziedzinach przemysłu: farbiarskim, drukarskim, odzieżowym, spożywczym, fotografii itd. Najważniejsze modele przestrzeni barw to: RGB, CMYK, CIEL*a*b, CIEXYZ, HSI, HLS, HSB, HSV. Możemy je rozumieć jako języki, których używają różne urządzenia do opisu kolorów.

Cyfrowe aparaty fotograficzne rejestrują obrazy barwne, które mogą być następnie wyświetlane na ekranie monitora, a w końcu drukowane. Chcemy, aby końcowy efekt – kolorowy wydruk obrazu – oddawał rzeczywiste barwy fotografowanego obiektu. Przekazywanie obrazu z urządzenia do urządzenia wymaga istnienia języka barw przez nie rozumianego. Utworzono więc międzynarodowy język, który służy tylko do opisywania kolorów, jest nim obecnie CIEL*a*b. Każde z urządzeń posługujących się obrazami barwnymi posiada swój profil barwny, zwany profilem ICC, który zawiera analityczną formułę, w jaki sposób barwę zapisaną w przestrzeni danego urządzenia (gamutu) odwzorować w przestrzeni CIEL*a*b i na odwrót.

Większość aparatów fotograficznych zapisuje obrazy w odmianie modelu RGB, tak zwanym sRGB (*standardised Red, Green, Blue*), lub za pomocą modelu Adobe RGB. Nie dotyczy to obrazów w formacie RAW, dla których przestrzeń barw jest definiowana dopiero przy konwersji na inny format. Sterowanie barwami w aparacie odbywa się poprzez balans bieli (*white balance*), który jest procesem kompensacji barw obrazu zarejestrowanego przez matrycę dla temperatury barwowej oświetlenia, jakie towarzyszyło rejestracji obrazu. Ta funkcja pozwala na zarejestrowanie rzeczywistych kolorów, bez dominant barwy oświetlenia. Bez użycia balansu bieli obiekty sfotografowane, na przykład przy oświetleniu jarzeniowym, mają zabarwienie niebieskozielone. Aparaty cyfrowe mają zazwyczaj kilka rodzajów nastawień balansu bieli: automatyczny, w którym korekta barw jest dokonywana na podstawie analizy obrazu przez program aparatu, predefiniowany, kalibrowany, oraz zależny od rodzaju oświetlenia.

3. Charakterystyka aparatu cyfrowego Minolta Dynax 5D

Zakupiona do badań nad automatyzacją cyfrowego fotogrametrycznego systemu do pomiaru ciała ludzkiego dla celów rehabilitacji leczniczej Minolta Dynax 5D jest lustrzanką cyfrową o następujących wybranych parametrach technicznych:

- przetwornik CCD – 6,3 mln ($23,5 \times 15,7$ mm); z wybieraniem międzyliniowym i filtrem barw podstawowych, skanowanie międzyliniowe;
- przetwarzanie A/D – 12-bitowe;
- anti-shake – mechanizm przesuwania matrycy CCD;
- system AF – system detekcji fazowej TTL; dziewięć czujników CCD (osiem liniowych i jeden krzyżowy);
- zakres czułości systemu AF – od -1 EV do $+18$ EV (ISO 100);

- tryby autofokusa – AF-A / AF-C / AF-S / DMF przewidywanie położenia obiektu poruszającego się w dowolnym kierunku, wskazywanie aktywnego czujnika śledzącego ruch obiektu;
- tryby naświetlania – pełny program, program elastyczny (P), automatyka czasu (A), automatyka przysłony (S), ręczny (M);
- pomiar światła – wewnętrzny pomiar TTL, 14-segmentowy pomiar analizujący o wzorze plastra miodu, pomiar skoncentrowany, pomiar punktowy;
- zakres pomiaru światła – od +1 EV (+4 EV przy pomiarze punktowym) do 20 EV (ISO 100), obiektyw f/1,4;
- czułość – auto, ISO 100 / 200 / 400 / 800 / 1600 / 3200;
- migawka – elektronicznie sterowana migawka szczelinowa o przebiegu pionowym, 1/4000 s – 30 s, dostępny czas B;
- sterowanie balansu bieli – automatyczne, ręczne (światło dzienne, cień, pochmurno, żarowe, fluorescencyjne i błysk), definiowalne oraz liczbowe określanie temperatury barwowej (2500÷9900 K, 19-stopniowa korekcja purpury i zieleni);
- redukcja szumu – dostępna przy czasie naświetlania dłuższym od 1 sekundy;
- tryby i przestrzenie barwne – Natural, Natural Plus, Portret, Krajobraz, Zachód Słońca, Nocny widok, Nocny portret, czarno-biały, Adobe RGB, Adobe RGB z profilem; z wyjątkiem trybów Adobe RGB, wszystkie pozostałe tryby wykorzystują przestrzeń barwną RGB;
- korekcja obrazu – kontrast / nasycenie / ostrość; 5 stopni: +2, -1, +/-0, +1, +2;
- formaty plików – JPEG, RAW, RAW+JPEG (zgodne z DCF 2.0 / DPOF 1.1/ Exif 2.21);
- tryby jakości obrazu – Standard, Fine, Extra-Fine, RAW, RAW+JPG;
- rejestrowane rozdzielczości – L: 3008 × 2000, M: 2256 × 1496, S: 1504 × 1000.

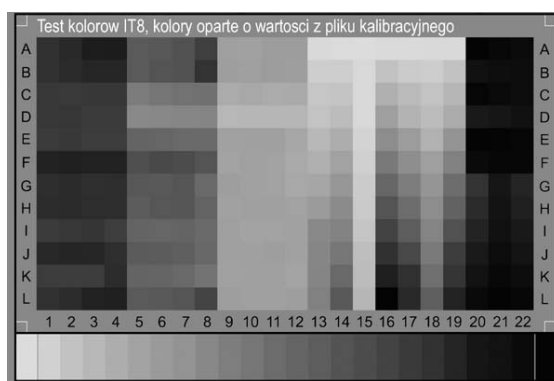
Tak jak w większości aparatów cyfrowych, obraz barwny powstaje tu przez interpolację barw piksela środkowego z pikselami otaczającymi na matrycy po przejściu przez filtr mozaikowy Bayera, zatem niewątpliwie następuje tu strata informacji o rzeczywistej barwie obiektu. Duża ilość trybów barwnych i funkcji balansu bieli pozwala na sterowanie przestrzenią barw aparatu, a więc zapewne ma wpływ na możliwości użycia segmentacji obrazu według barwy.

4. Opis przeprowadzonych badań i ich wyniki

Celem wykonanych badań było uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania dotyczące cyfrowego aparatu Minolta Dynax 5D:

- Jakie barwy i jakie składowe w największym stopniu ulegają zniekształceniu?
- Na ile jest stabilne odwzorowanie barw w podobnych warunkach oświetleniowych i tych samych nastawieniach ekspozycji i jakie ustawienia dają największą stabilność?
- W jakim stopniu szumy wpływają na rozróżnianie gęstości optycznej?

Dla oceny odwzorowania kolorów posłużono się testem IT8.7 firmy LaserSoft Imaging sporządzonym na materiale pozytywowym Kodak Ektachrome Professional (rys. 1).



Rys. 1. Test IT8.7

Dla każdego z pól testu znane są wartości w przestrzeni barw CIEL*a*b. Na potrzeby oceny balansu kolorów przeliczono je na wartości RGB.

Transparentny test był fotografowany przy oświetleniu światłem naturalnym (równomiernie rozproszonym), z różnicowaniem rodzaju balansu bieli oraz czułości detektorów matrycy. Dla zbadania stabilności oddawania kolorów wykonywano po trzy zdjęcia dla tych samych nastawień balansu bieli i parametrów ekspozycji, zapewniając niezmienną orientację zdjęć i warunków oświetleniowych.

Wykonano po trzy zdjęcia testu dla następujących nastawień:

- wariant 1 (W1): balans bieli automatyczny, czas naświetlania 1/60 s, przysłona f: 5,6, ISO dobierane automatycznie;
- wariant 2 (W2): balans bieli ustawiony na światło dzienne, czas naświetlania 1/160 s, f: 5,6, ISO dobierane automatycznie;
- wariant 3 (W3): balans bieli kalibrowany na światło dzienne, czas naświetlania 1/160 s, f: 5,6, ISO dobierane automatycznie;
- wariant 4 (W4): balans bieli automatyczny, czas naświetlania i przysłona automatyczne, ISO 100;
- wariant 5 (W5): balans bieli automatyczny, czas naświetlania i przysłona automatyczne, ISO 800.

Zarejestrowane obrazy zapisywano w formacie RAW, a następnie dokonywano konwersji na format TIF.

Do obliczania parametrów statystycznych obrazów testu wykorzystano program Idri-si32, sporządzając wzornik „wycinający” z poszczególnych pól barwnych testu kwadraty

o wielkości 42×42 piksele i traktując je jako reprezentatywne. Wzornik ten posłużył również do sporządzenia sztucznie wygenerowanych obrazów zastępczych oryginalnych zdjęć (na podstawie średnich wartości jasności na każdym odwzorowanym polu testu, w każdym kanale). Obrazy zastępcze oraz odtworzony na podstawie pliku kalibracyjnego tekst IT8.7 posłużyły do sporządzenia i wizualizacji obliczanych wielkości.

Dla poszczególnych pól testu od wartości RGB obrazów otrzymanych z aparatu odjęto wartości teoretyczne uzyskane na podstawie pliku kalibracyjnego testu IT8.7. Określano takie parametry statystyczne obrazów różnic, jak (tab. 1):

- średni poziom jasności pikseli na obrazie różnic w poszczególnych kanałach,
- odchylenie standardowe poziomu jasności pikseli na obrazie różnic,
- średni błąd kwadratowy (RMS) oraz maksymalne wartości różnic (*in plus* i *in minus*),
- wskaźnik Walda.

Ostatni parametr określano dla syntetycznej oceny obrazów (ujmującej wielkość zniekształceń we wszystkich trzech kanałach). Zastosowano uproszczoną postać wskaźnika nQ [5]. Jest to względna wartość średniego błędu kwadratowego poziomu jasności wszystkich pikseli ze wszystkich trzech kanałów R, G i B w stosunku do średniej jasności obrazu wzorcowego

$$nQ_{\%} = 100 \cdot \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{b=1}^k \frac{\text{RMS}(b)^2}{\text{MS}_{sr}(b)^2}} \quad (1)$$

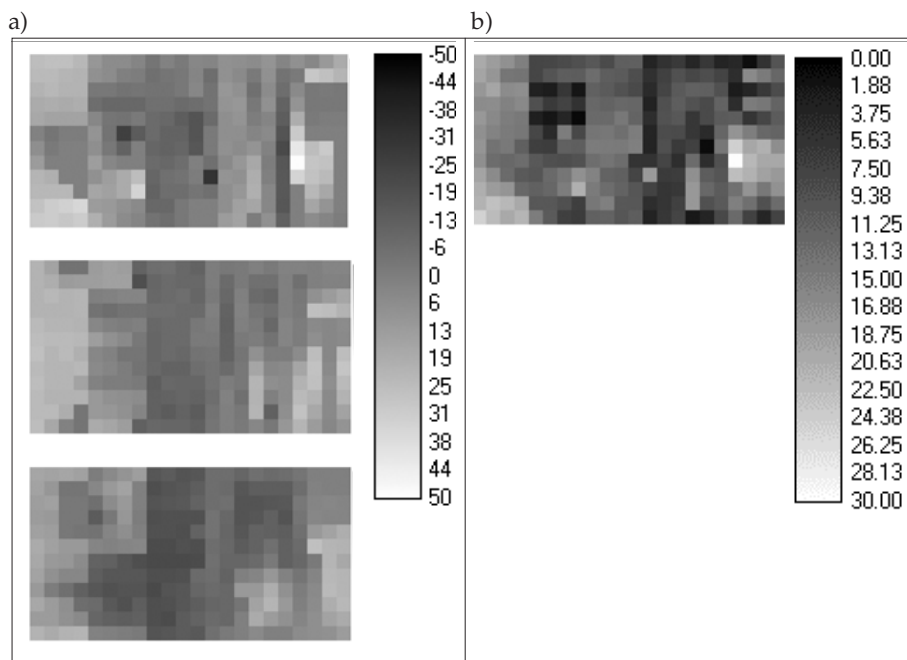
Operowanie miarą nQ wynika z potrzeby przyjęcia jednej wartości opisującej syntetycznie jakość zarejestrowanych obrazów, gdyż analiza szeregu otrzymywanych parametrów z pojedynczych kanałów jest żmudna, a wyniki trudno uogólnić lub porównać. Wielkość nQ jest wyrażana w procentach, dzięki czemu jest niezależna od jednostek i ogólnej jasności obrazu, a także uniwersalna, gdyż można ją stosować dla dowolnej liczby kanałów.

Z zamieszczonych w tabeli parametrów wynika, że:

- we wszystkich trzech przypadkach nastawiania balansu bieli zauważa się podobny poziom zniekształcania barw (wartości wskaźnika nQ od około 10,5% do 12,0%);
- składowa czerwona w największym stopniu zniekształca barwę poprzez największe rozbieżności wartości jasności w tym kanale od danych wzorcowych, potwierdzają to wartości maksymalnych różnic (*in plus* i *in minus*), wyraźnie większe niż w pozostałych kanałach;
- kalibracja balansu bieli na światło naturalne daje zbyt ciemny obraz, przy czym jest to zjawisko konsekwentnie występujące we wszystkich kanałach;
- w przypadku rezygnacji z automatycznego ustawienia balansu wyraźnie najlepiej odwzorowują się barwy w kanale niebieskim.

Tabela 1. Zestawienie parametrów statystycznych odzwierciedlających zniekształcanie barw

Wariant	Kanał	Średnia różnica jasności	Odchylenie od średniej	Maks, różnica <i>in minus</i>	Maks, różnica <i>in plus</i>	RMS	<i>nQ</i> [%]
W 1	Zdjęcie 147						
	R	4,45	12,48	-30	+49	13,25	
	G	3,66	11,56	-19	+27	12,13	11,83%
	B	-2,78	11,97	-21	25	12,29	
	Zdjęcie 148						
	R	3,96	12,52	-31	48	13,13	
	G	3,11	11,65	-19	27	12,06	11,86%
	B	-3,29	12,14	-22	25	12,58	
	Zdjęcie 149						
	R	6,02	12,21	-31	50	13,61	
	G	5,37	10,99	-18	28	12,23	11,74%
	B	-1,07	11,4	-19	26	11,45	
W 2	150						
	R	-2,47	13,63	-48	37	13,85	
	G	2,5	10,79	-21	26	11,08	11,12%
	B	2,86	9,72	-15	30	10,13	
	151						
	R	2,78	12,65	-45	39	12,95	
	G	7,5	9,6	-18	29	12,18	11,52%
	B	7,67	8,62	-8	32	11,54	
	152						
	R	-3,42	13,16	-53	35	13,60	
	G	1,57	10,59	-22	25	10,71	10,84%
	B	1,69	9,67	-18	29	9,82	
W 3	153						
	R	2,38	12,21	-41	37	12,44	
	G	4,34	10,36	-17	24	11,23	10,55%
	B	3,19	9,21	-13	27	9,75	
	154						
	R	3,78	11,97	-39	38	12,55	
	G	5,82	10,02	-17	25	11,59	10,75%
	B	4,66	8,8	-11	28	9,96	
	155						
	R	5,84	11,81	-40	40	13,18	
	G	8,16	9,72	-16	27	12,69	11,56%
	B	6,97	8,31	-9	28	10,85	



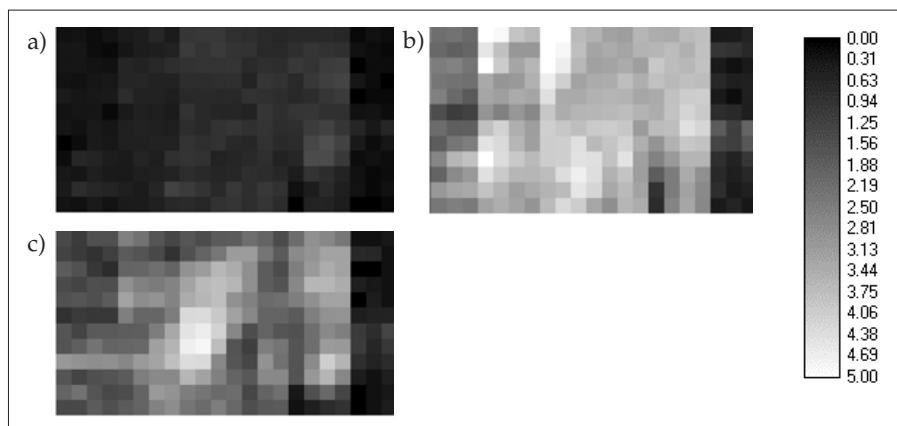
Rys. 2. Obrazy różnic w poszczególnych kanałach RGB (a) oraz średnich błędów różnic (b).
Przykład dla zdjęcia 147 (wariant 1)

Analizując sporządzone obrazy różnic, których przykładem jest wybrana grupa przedstawiona na rysunku 2, można stwierdzić, że:

- w wariacie 1 najgorzej odwzorowały się barwy niebieskie, wada ta spowodowana jest głównie przekłamaniami w kanale czerwonym;
- w wariacie 2 i wariacie 3 najgorzej odwzorowały się barwy cyjanowe, wada ta spowodowana jest głównie przekłamaniami w kanale czerwonym;
- barwy jasne (kolumny 9–11 testu IT8.7) odwzorowały się najlepiej w wariacie 3;
- barwy ciemne (kolumny 1–4 testu IT8.7) odwzorowały się najlepiej w wariacie 2, najgorzej – w wariacie 3.

Do określenia stabilności rejestracji w obrębie poszczególnych wariantów nastawiania balansu bieli posłużono się zobrazowanymi błędami RMS obliczonymi z trzech zdjęć w każdym z kanałów i sumarycznymi dla wszystkich kanałów. Na rysunku 3 przedstawiono tylko sumaryczne RMS dla RGB dla każdej z trzech wersji balansu bieli.

Łatwo zauważyć, że najbardziej stabilnie oddaje barwę aparat nastawiony na automatyczny balans bieli. Zjawisko to szczególnie wyraźne jest w wypadku barw ciemnych (kolumny 1–4 testu IT8.7) i najciemniejszych (kolumny 20–22 testu IT8.7). Można to wytłumaczyć elastycznym dostosowywaniem się automatycznego balansu bieli do zmieniających się warunków oświetleniowych w obrębie wykonanych w ciągu kilku sekund sekwencji trzech zdjęć.



Rys. 3. Obrazy RMS dla trzech kanałów, sporządzone na podstawie trzech zdjęć dla każdej wersji balansu bieli: a) wariant 1; b) wariant 2; c) wariant 3

Natomiast w wypadku sztywnego ustawienia balansu bieli (wersje 2 i 3) bardzo niestabilna jest rejestracja barw jasnych – pastelowych (kolumny 9–11, wiersze F, G, H, I testu IT8.7). Relatywnie najwyższą stabilność w każdym przypadku zanotowano dla barw najciemniejszych (kolumny 20–22).

Do określenia maksymalnej rozróżnianej gęstości optycznej oraz balansu kolorów posłużono się paskiem szarości zamieszczonym na teście IT8.7 (rys. 1). Również i w tym przypadku wykorzystano wzornik „wycinający” z poszczególnych pól klina szarości kwadraty o wielkości 42×42 piksele. Dla każdego pola wzornika obliczono średnią jasność oraz odchylenie standardowe w każdym kanale.

Obliczone parametry pozwoliły na ocenę szumów, której miarą jest wzór [2]:

$$\begin{aligned} M_i &> M_{i+1} + SD_i + SD_{i+1} \\ M_i &< M_{i-1} - SD_{i-1} - SD_i \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

M – średnia jasność pola wzornika,
 SD – odchylenie standardowe.

Gdy powyższe warunki nie są spełnione, określone pole na klinie szarości nie jest już odróżnialne (z punktu widzenia formalnego/statystycznego) od pól sąsiednich. Tego typu wadę zanotowano w wypadku najciemniejszych pól paska szarości.

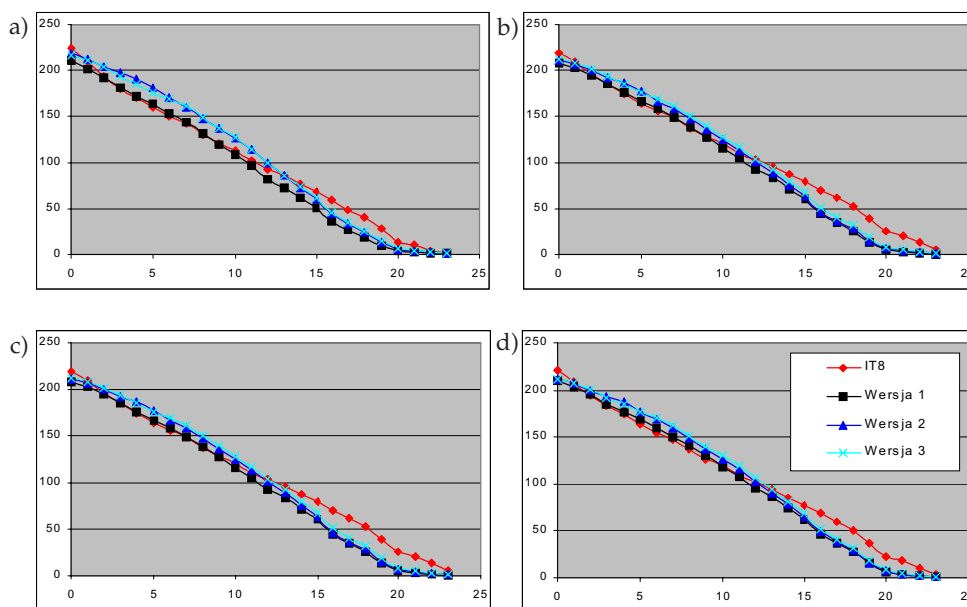
Odpowiednio dla kanałów R, G, B nierozróżnialne są następujące liczby pól:

- w wariacie 1: 3, 2, 0;
- w wariacie 2: 2, 2, 0;
- w wariacie 3: 2, 1, 0;
- w wariacie 4: 0, 1, 0;
- w wariacie 5: 3, 3, 3.

W tabeli 2 zestawiono przykładowe wartości liczbowe uzyskane dla wariantu 4 (ISO 100) i wariantu 5 (ISO 800) w kanale R. Wyniki formalne potwierdzają zjawisko znane już z fotografii analogowej, gdzie wyższa wartość ISO powoduje większe ziarno, a co za tym idzie – wyższe szумы.

Tabela 2. Zestawienie parametrów statystycznych dla paska szarości.
Kanał czerwony, wariant 4 i wariant 5

Numer pola		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
W4	M	201	195	189	181	176	169	163	154	144	134	124	115
	SD	1,4	1,3	1,3	1,7	1,8	1,8	1,5	1,5	1,4	1,5	1,9	2,0
W5	M	207	204	199	190	183	171	159	152	141	133	124	118
	SD	1,6	2,2	1,5	1,8	1,8	2,3	2,4	2,2	2,9	3,3	3,3	3,7
Numer pola		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
W4	M	106	97	84	72	57	46	36	21	10	6,1	3,1	1,4
	SD	1,5	1,3	1,7	1,7	1,7	1,6	1,3	1,3	0,9	0,8	0,7	0,6
W5	M	108	96	85	75	59	49	39	22	11	5,6	3,1	1,9
	SD	3,2	3,4	3,0	3,7	4,0	4,7	3,9	4,1	3,8	3,1	2,1	2,3



Rys. 4. Przenoszenie gęstości optycznej: a) kanał R; b) kanał G; c) kanał B; d) średnia jasność RGB.
Oś x – pola klina szarości, oś y – średnie wartości jasności pikseli

Do przeprowadzenia oceny balansu kolorów posłużono się średnimi jasnościami obliczonymi na poszczególnych polach klina szarości. Zestawiono w postaci wykresów wartości teoretyczne (z pliku kalibracyjnego) z wartościami empirycznymi uzyskanymi ze zdjęć testu (rys. 4).

Z wykresów wynika, że aparat odwzorowuje zbyt jasno tony jasne i odwrotnie – zbyt ciemno tony ciemne. Największą różnicę zanotowano dla pól 15–20 klina szarości. Największe zbliżenie wartości teoretycznych z wzorca z zarejestrowanymi występuje dla średnich jasności, dla pól 9–13 paska szarości. Natomiast na końcu wykresów krzywe ponownie się zbliżają. Jest to korzystne zjawisko, gdyż oznacza to, że aparat nie usuwa poza zakres 0–255 skrajnych tonów. Uogólniając rozbieżności, można powiedzieć, że aparat rejestruje obraz z większym kontrastem niż kontrast rzeczywisty.

Analizując poszczególne warianty, można zauważyć, że najwyższa zgodność w tonach jasnych występuje dla wariantu 1, w tym szczególnie w kanałach R i G. Natomiast w tonach ciemnych lepsze wyniki uzyskują wariant 2 i wariant 3, z tym że różnica na ich korzyść jest minimalna.

5. Podsumowanie

Badanie przestrzeni barwnej aparatu cyfrowego Minolta Dynax 5D pozwala na sformułowanie kilku wniosków, które powinny być brane pod uwagę w przypadku wykorzystywania zdjęć wykonanych tym aparatem do automatycznego pomiaru markerów w oparciu o detekcję barwy:

- stabilność oddawania barwy jest najlepsza przy automatycznym balansie bieli, stosując inne nastawienia należałoby unikać stosowania jasnych markerów;
- przy stosowaniu ciemnych markerów zaleca się używanie ISO nie wyższej niż 100;
- ogólnie rzecz biorąc, aparat dobrze oddaje barwy, o czym świadczy współczynnik Walda, dużo niższy niż notowany w badaniach przestrzeni barwnej skanerów PhotoScan TD i DeltaScan [1];
- podobne badanie należy wykonać dla oświetlenia sztucznego;
- metodyka badań przestrzeni barwnej Minolty powinna dać się zastosować do badania innych aparatów cyfrowych, ponieważ urządzenia te charakteryzuje podobny sposób tworzenia barwnego obrazu;
- zaproponowana metodyka może służyć do opracowania rankingu jakości pozyskiwanych barw różnymi aparatami cyfrowymi oraz innymi przyrządami rejestrującymi obrazy barwne.

Literatura

- [1] Drzewiecki W., Pirowski T.: *Sprawozdanie z oceny skanera DeltaScan*. Ocena egzemplarza testowego w Winnicy (Ukraina), Kraków, 2004 (niepublikowana ekspertyza)
- [2] Haering S., Kersten Th., Dam A., Baltsavias E.P.: *Quality Analysis of the LH Systems DSW300 Roll Film Scanner*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, Part 1, 1998

-
- [3] Instrukcja obsługi aparatu cyfrowego Minolta Dynax 5D
 - [4] Mikrut S., Tokarczyk R.: *Fotogrametryczny system cyfrowy bliskiego zasięgu do pomiarów ciała ludzkiego dla potrzeb rehabilitacji leczniczej*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 9, 1999
 - [5] Wald L.: *Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion?* Fusion of Earth Data, Sophia Anipolis, France, 2000