

Porównanie dokładności reprodukcji barw dla wybranych systemów kalibracji kolorymetrycznej monitorów LCD

Streszczenie. Dokładne odwzorowanie barw odgrywa ważną rolę w wielu dziedzinach ludzkiej działalności. W przypadku, gdy obrazy są analizowane przez ludzi, kluczowe znaczenie ma prawidłowa reprodukcja barw przez monitory. Celem badań przedstawionych w niniejszym artykule było obiektywne sprawdzenie wpływu zastosowanego typu monitora oraz systemu do jego kalibracji na jakość odwzorowania barw. Przeprowadzone badania wykazały występowanie znacznych różnic w jakości reprodukcji barw w zależności od zastosowanego zestawu monitor-system kalibracji.

Abstract. Accurate colour reproduction plays an important role in many areas of human activity. In cases when the images are analysed by an expert the correct colour reproduction by monitors is crucial. The aim of the research presented in this article was an objective evaluation of the influence of the used type of the monitor and the calibration system on the quality of colour reproduction. The study revealed considerable differences in the quality of colour reproduction depending on the used set of monitor-calibration system.

(Comparison of the colour reproduction accuracy of selected systems for LCD monitor colour calibration)

Słowa kluczowe: reprodukcja barw, zarządzanie barwą, monitory LCD, kalibracja monitorów

Keywords: colour reproduction, colour management, LCD monitor, monitor calibration

Wprowadzenie

Obecnie informacja obrazowa odgrywa niezwykle ważną rolę i coraz częściej jest ona wykorzystywana jako podstawowe źródło danych w wielu procesach technicznych, w badaniach naukowych oraz w diagnostyce medycznej. Z wykorzystaniem informacji obrazowej, a zwłaszcza gdy ma być ona analizowana przez ludzi, wiąże się konieczność reprodukcji obrazów [1]. Zazwyczaj w tym celu stosowane są monitory komputerowe; obecnie zwykle są to monitory LCD.

W niektórych zastosowaniach krytyczne znaczenie ma dokładność z jaką reprodukowane są barwy analizowanych obrazów. Przykłady takich zastosowań to m.in.: projektowanie wykorzystujące systemy CAD (ang. *Computer-Aided Design*), proces składu publikacji przy zastosowaniu systemów DTP (ang. *DeskTop Publishing*) oraz diagnostyka radiologiczna (np. [2–4, 10, 11]). Innymi przykładami zastosowań, w których wymagana jest prawidłowa reprodukcja barw są m.in.: stanowiska wielomonitorowe, przemysł rozrywkowy, reklama i wystawiennictwo oraz systemy rozproszone (m.in. [5–7]). Wielość stosowanych konfiguracji sprzętu komputerowego, systemów operacyjnych oraz wykorzystywanych programów powoduje, że bez dodatkowych rozwiązań ta sama barwa — rozumiana jako zapisana w obrazie uporządkowana trójka składowych R , G i B w przestrzeni barw RGB — przez różne systemy będzie wyświetlana inaczej, tzn. będzie wywoływać u obserwatora inne wrażenia barwne. Co więcej nawet zastosowanie takiej samej konfiguracji sprzętowej oraz takiego samego i identycznie skonfigurowanego oprogramowania na poszczególnych stanowiskach nie zapewnia identycznej reprodukcji barw — wynika to z naturalnie występujących różnic parametrów poszczególnych, nominalnie identycznych, konfiguracji sprzętowych.

Sposobem na rozwiązanie tego problemu jest zastosowanie systemu zarządzania barwą (ang. *Color Management System*, CMS). Obecnie najczęściej stosowanym rodzajem CMS są tzw. otwarte systemy zarządzania barwą [8]. Takim rodzajem systemu jest m.in. ColorSync wprowadzony przez Apple Inc. oraz ICC Color Management rozwijany przez Międzynarodowe Konsorcjum Kolorystyczne (ang. *International Color Consortium*, ICC). Warto zauważyć, że system opracowany przez ICC jest standardem zatwierdzonym przez Międzynarodową Organizację Normalizacyjną w postaci normy ISO 15076-1 [14, 15].

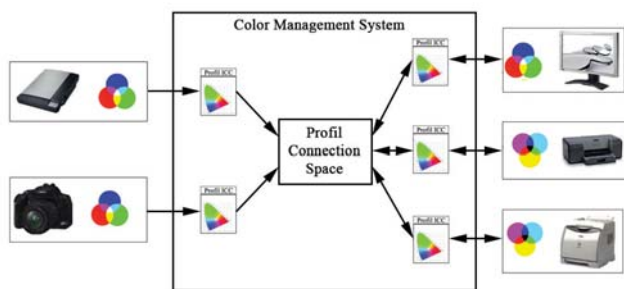
Zastosowanie CMS nie gwarantuje jednak uzyskania idealnej reprodukcji barw. Wynik działania tego systemu zależy m.in. od: zastosowanego urządzenia reprodukującego obraz, sposobu w jaki przeprowadzony został proces jego kalibracji kolorymetrycznej oraz jakości zastosowanego w tym procesie urządzenia pomiarowego. Zazwyczaj do kalibracji kolorymetrycznej stosowane są gotowe, komercyjnie dostępne, systemy. W niniejszej pracy skupiono się na zagadnieniu obiektywnej oceny jakości działania wybranych systemów kalibracji kolorymetrycznej monitorów. Jakość kalibracji oceniano na podstawie dokładności reprodukcji barw przez kilka typów monitorów LCD po ich kalibracji kolorymetrycznej za pomocą badanych systemów.

Otwarty system zarządzania barwą — zarys podejścia

Z każdym urządzeniem pozyskującym lub reprodukującym obrazy związana jest pewna przestrzeń barw oraz zakres barw, tzw. *gamut*, który może być odwzorowany przez to urządzenie. Zarówno przestrzeń barw jak i gamut urządzenia zależą od wielu czynników w tym także od tak zmiennych jak np. aktualne ustawienia urządzenia. Ponieważ przestrzenie barw oraz gamuty poszczególnych urządzeń nie są ze sobą zgodne, w celu zapewnienia zgodności odwzorowania barw przez poszczególne urządzenia, konieczne jest przeliczenie współrzędnych poszczególnych barw między przestrzeniami barw \mathcal{P}_i związanymi z tymi urządzeniami — zadanie to realizowane jest przez CMS.

W przypadku otwartych systemów zarządzania barwą do transformacji współrzędnych barw między przestrzeniami \mathcal{P}_i wykorzystywana jest pewna wspólna, pośrednia dla wszystkich przeliczeń, przestrzeń barw (ang. *Profile Connection Space*, PCS). W rozwiązaniu tym współrzędne barw określone w przestrzeni \mathcal{P}_j są najpierw przeliczane do PCS, a dopiero potem z PCS przeliczane są do docelowej przestrzeni \mathcal{P}_k (rys. 1). Taki sposób realizacji przeliczeń współrzędnych barw między przestrzeniami \mathcal{P}_i jest cechą wspólną otwartych systemów zarządzania barwą.

To rozwiązanie, pomimo swojego większego skomplikowania w stosunku do realizacji bezpośrednich przeliczeń między przestrzeniami \mathcal{P}_i , ma jednak wiele zalet. Przykładowo dodanie nowego urządzenia do systemu — co można utożsamiać z dodaniem nowej przestrzeni \mathcal{P}_n — wymaga tylko wyznaczenia transformacji między tą przestrzenią a PCS. W przypadku systemów nie stosujących PCS konieczne jest w takim przypadku wyznaczenie transformacji między przestrzenią \mathcal{P}_n i wszystkimi przestrze-



Rys. 1. Schemat działania otwartego systemu zarządzania barwą

niami \mathcal{P}_i stosowanymi do tej pory w danym systemie. Ponadto każda zmiana parametrów dowolnej przestrzeni \mathcal{P}_j zarejestrowanej w systemie (np. w wyniku zmiany ustawień urządzenia reprezentowanego przez \mathcal{P}_j) powoduje konieczność ponownego wyznaczenia transformacji między \mathcal{P}_j a pozostałymi przestrzeniami \mathcal{P}_i . W przypadku wykorzystania PCS taka zmiana \mathcal{P}_j wymaga wyznaczenia tylko jednej transformacji, tzn. między \mathcal{P}_j a PCS.

Przestrzeń PCS musi być niezależna od stosowanych urządzeń a także nie może ograniczać zakresu przetwarzanych barw. W przypadku rozwiązania proponowanego przez ICC jako PCS może być stosowana np. przestrzeń CIE XYZ lub CIE Lab. Wszystkie przeliczenia współrzędnych barw między przestrzeniami barw urządzeń odbywają się za pośrednictwem PCS w module zarządzania barwą (ang. *Color Management Module*, CMM). Do realizacji tych przekształceń konieczna jest znajomość zależności między przestrzeniami barw urządzenia a PCS (rys. 1).

W rozwiązaniu opracowanym przez ICC cel ten realizowany jest poprzez przypisanie do każdego urządzenia, zarówno pozyskującego jak i reprodukcującego obrazy, profilu opisującego zależności zachodzące między położeniem tej samej barwy w PCS i we własnej przestrzeni barw danego urządzenia. Profil urządzenia wyznaczany jest w wyniku przeprowadzenia *kalibracji kolorymetrycznej*.

Kalibracja kolorymetryczna monitorów

Proces kalibracji kolorymetrycznej monitorów można podzielić na następujące trzy etapy:

- *adiustacja* — to etap w wyniku którego ustawienia monitora, takie jak np. luminancja, temperatura barwowa punktu bieli, doprowadzane są do pewnych określonych wartości zależnych od przyjętego celu kalibracji kolorymetrycznej; etap ten przez niektórych autorów określany jest także terminem *kalibracja*,
- *charakteryzacja* — etap, którego celem jest ustalenie dla przyjętych ustawień monitora relacji między PCS a własną przestrzenią barw monitora; realizacja tego zadania polega na pomiarze odpowiednimi przyrządami pomiarowymi sekwencji barw rzeczywiście wyświetlanych przez monitor i porównania ich z wzorcowymi barwami określonymi w PCS,
- *profilowanie* — wynikiem tego etapu jest utworzenie pliku z profilem danego monitora; w dużym uproszczeniu, plik ten zawiera informacje wymagane do wyznaczenia poprawek jakie muszą być wprowadzone, aby wyświetlane na monitorze barwy były zgodne z barwami odpowiadającymi im w PCS.

Ze względu na bardzo dużą liczbę możliwych do wyświetlenia barw (przykładowo przy 8-bitowym kodowaniu każdego z kanałów R, G, B możliwe jest uzyskanie ponad $16,7 \cdot 10^6$ barw) w praktyce nie jest możliwe przeprowadzenie charakteryzacji monitora dla każdej barwy. Z tego powodu charak-

teryzacja przeprowadzana jest dla pewnej ograniczonej liczby barw (w zależności od implementacji jest to od kilkunastu do ponad tysiąca barw), a wyniki charakteryzacji dla tych barw są podstawą do wyznaczenia, np. poprzez interpolację, odpowiedzi monitora dla pozostałych barw.

Niektórzy charakteryzację i profilowanie postrzegają jako jeden etap. Uzasadnieniem takiego podejścia może być fakt, że w niektórych programach do kalibracji kolorymetrycznej proces wyznaczania profilu jest realizowany iteracyjnie, tzn. wykonywanych jest przynajmniej kilka następujących po sobie etapów charakteryzacji i profilowania monitora. W przypadku takiej realizacji tych etapów wybór barw, dla których w danej iteracji wykonywana jest charakteryzacja, uzależniony jest od wyników profilowania uzyskanych w toku wcześniejszych iteracji.

Wyznaczony profil monitora jest ważny tylko dla ustalonych na etapie adiustacji ustawień monitora, a każda ich zmiana powinna być połączona z wyznaczeniem nowego profilu urządzenia. Typowym przykładem zmiany parametrów jest dostosowanie luminancji ekranu do zmieniających się warunków oświetleniowych panujących w otoczeniu monitora wynikających np. z dobowej zmiany natężenia oświetlenia. Nawet jeżeli ustawienia monitora nie są zmieniane to ze względu na następujące wraz z czasem zmiany jego parametrów, które są wynikiem naturalnego procesu starzenia się elementów, konieczne jest okresowe przeprowadzanie testów poprawności wykorzystywanych profili. Gdy wyznaczone w toku takiej procedury błędy odwzorowania barw są za duże należy wyznaczyć nowy profil uwzględniający zaistniałe zmiany.

Dla każdego monitora może zostać wyznaczonych wiele różnych profili odpowiadających różnym potrzebom wynikającym m.in. z docelowej metody reprodukcji obrazów (np. prezentacja treści w Internecie, soft proofing w systemach DTP, standard DICOM przy ocenie zdjęć radiologicznych). Należy zaznaczyć, że dla tych samych ustawień monitora i tego samego celu kalibracji kolorymetrycznej istnieje możliwość utworzenia wielu profili monitora. Różnice te mogą wynikać np.: z zastosowania różnych programów do kalibracji kolorymetrycznej, różnych ustawień samego programu, wykorzystania programowej i/lub sprzętowej korekty barw monitora. Różnice te przekładają się oczywiście na dokładność z jaką na monitorze reprodukowane będą poszczególne barwy.

Dokładność odwzorowania barw uzależniona jest jednak nie tylko od stosowanego profilu, ale także (choć w mniejszym stopniu) od zastosowanego CMM. Większość obecnie stosowanych systemów operacyjnych dla komputerów osobistych (Microsoft Windows, Apple OS i wiele dystrybucji Linuksa) posiada CMM wbudowany w system operacyjny. Moduł ten zawiera algorytmy odpowiedzialne za dokonanie korekt barw na podstawie danych zawartych w profilach. W jednym systemie komputerowym może być (choć nie jednocześnie) stosowanych wiele CMM dostarczanych np. wraz z systemem operacyjnym lub oprogramowaniem. Stosowanie CMM dotyczy programowej realizacji kalibracji kolorymetrycznej monitora.

Jednak tak jak wcześniej wspomniano istnieje również możliwość sprzętowej kalibracji kolorymetrycznej monitora. Rozwiązanie to zapewnia najlepszą dokładność reprodukcji barw, jednak stosowane jest jedynie w wysokiej klasy monitorach przeznaczonych do wykorzystania w zastosowaniach wymagających bardzo dokładnego odwzorowania barw.

W dalszej części pracy proces kalibracji kolorymetrycznej monitora będzie traktowany jako jedna całość i dla

skrótowa nazwa zamiast terminu *kalibracja kolorymetryczna* będzie stosowany termin *kalibracja*.

Cel badań i przyjęte założenia

Tak jak zaasygnowano to we wprowadzeniu celem przedstawionych w niniejszej pracy badań było obiektywne sprawdzenie wpływu zastosowanego rodzaju monitora oraz systemu do jego kalibracji na jakość odwzorowania barw. Takie podejście jest rozszerzeniem zakresu badań prezentowanych wcześniej w literaturze (np. [9, 12]), w których skupiono się na pomiarze parametrów monitorów w różnych warunkach jednak bez uwzględnienia roli kalibracji w procesie kształtowania obrazu wyświetlanego na monitorze. Uwzględnienie wpływu procesu kalibracji na jakość obrazu wyświetlanego na monitorze zbliża warunki w jakich dokonane są pomiary do warunków w jakich dokonywana jest ocena monitorów przez ich użytkowników.

Ocena jakości kalibracji dla każdej badanej pary monitor-system kalibracji polegała na pomiarze kolorymetrem o dużej dokładności barw reprodukowanych przez monitor po jego kalibracji danym systemem i porównaniu ich z odpowiadającymi im barwami wzorcowymi. Tego typu problem, a więc problem wyboru monitora i systemu kalibracji zapewniających wymaganą jakość odwzorowania barw, jest często spotykany zarówno w zastosowaniach komercyjnych jak również w badaniach naukowych. W artykule założono, że badania powinny odzwierciedlać warunki pracy (tj. m.in. ustawienia parametrów monitora, oświetlenie stanowiska pracy) jakie są typowe dla dużej grupy komercyjnych zastosowań monitorów takich jak np.: edycja tekstu, CAD/CAM, projektowanie stron WWW. W artykule nie uwzględniono natomiast wymagań występujących w przypadku profesjonalnych prac związanych z obrazem (np.: DTP, tworzenie grafiki, edycja zdjęć, analiza zdjęć radiologicznych), które wymagają bardzo specyficznych i często znacznie różniących się od siebie warunków pracy (np. [10, 16–19]).

W celu jak najlepszego przybliżenia warunków badań do warunków spotykanych w praktyce do badań wykorzystano cztery monitory różniące się parametrami i należące do różnych klas sprzętu, tj.: dobrej klasy monitor do zastosowań domowych z matrycą TN (Benq XL2420T), monitor do pracy biurowej z tańszym rodzajem matrycy IPS (Dell UltraSharp U2412M), monitor do pracy biurowej z matrycą IPS (Dell UltraSharp U2410) oraz wysokiej klasy monitor do prac graficznych z matrycą IPS (NEC SpectraView 241). Zestawienie wybranych parametrów tych monitorów zawiera tabela 1. Została ona opracowana na podstawie danych udostępnionych przez producentów monitorów oraz na podstawie specjalistycznych serwisów internetowych Prad (www.prad.de) i TFT Central (www.tftcentral.co.uk).

Istotne znaczenie dla poprawności uzyskanych wyników i sformułowanych na ich podstawie wniosków mają założenia dotyczące warunków pomiarów. Ze względu na to, że badane monitory mają różne zakresy barw możliwych do odwzorowania (*gamut*) zdecydowano, że pomiary dotyczyć będą oceny jakości odwzorowania barw w ramach przestrzeni sRGB (IEC 61966-2-1). W przypadku monitorów przestrzeń ta jest podstawową przestrzenią barw jaką powinny odwzorować monitory stosowane do prac graficznych. Ponadto zgodnie z decyzją World Wide Web Consortium (W3C) jest to też standardowa przestrzeń barw stosowana do opisu barw na stronach internetowych. Przestrzeń sRGB jest również domyślną przestrzenią barw stosowaną w systemie operacyjnym Microsoft Windows. Te właśnie przyczyny powodują,

Tabela 1. Podstawowe parametry testowanych monitorów

Producent	BenQ	Dell	Dell	NEC
Model	XL2420T	UltraSharp U2412M	UltraSharp U2410	SpectraView 241
Przekątna ekranu	24"	24" (60.96 cm)	24" (60.96 cm)	24" (61.1 cm)
Rozdzielczość i format ekranu	1920×1080 16 : 9	1920×1200 16 : 10	1920×1200 16 : 10	1920×1200 16 : 10
Kontrast statyczny monitora*	1000 : 1	1000 : 1	1000 : 1	1000 : 1
Głębokość barw monitora*	8-bit/kanal	8-bit/kanal	10-bit/kanal	10-bit/kanal
Rodzaj panelu	TN	e-IPS	H-IPS	H-IPS
Producent i model panelu	AU Optronics M24HW01 V8	LG Display LM240WU8-SLA2	LG Display LM240WU8-SLA2	LG Display LM240WU4-SLB1
Podświetlenie panelu	W-LED	W-LED	CCFL	CCFL
Głębokość barw panelu‡	6-bit + + H-FRC	6-bit + + A-FRC	8-bit + + A-FRC	8-bit + + Hi-FRC
Pokrycie gamutu sRGB i AdobeRGB† ‡	93,6% 72,4%	95% 74%	100% 98,1%	100% 98,1%

* Wartość deklarowana przez producenta monitora.

† Na podstawie serwisu www.prad.de.

‡ Na podstawie serwisu www.tftcentral.co.uk.

że prawidłowe odwzorowanie barw z przestrzeni sRGB jest minimalnym wymaganiem odnośnie reprodukcji barw jakie musi spełnić monitor stosowany do, nawet podstawowych, prac graficznych.

Konsekwencją wyboru przestrzeni sRGB jest wybór punktu bieli monitora jako punktu o temperaturze barwowej $T_b = 6500$ K, co odpowiada współrzędnym położenia punktu chromatyczności $x = 0,3127$ i $y = 0,3290$ w przestrzeni CIE xyY. Warto zaznaczyć, że jest to typowa wartość punktu bieli zalecana do wielu zastosowań, w tym także do profesjonalnych prac graficznych. Zgodnie ze standardem przestrzeni sRGB luminancja barwy białej powinna być równa 80 cd/m^2 , jednak taka wartość luminancji jest za niska w przypadku, gdy monitor jest elementem typowego stanowiska pracy oświetlonego światłem dziennym. Z tego względu na potrzeby badań zdecydowano się, że luminancja barwy białej zostanie ustalona na 120 cd/m^2 . Wybór takiej wartości luminancji wynika z faktu, że jest największa docelowa wartość luminancji monitora jaka podawana jest w zaleceniach i normach dotyczących kalibracji monitorów eksploatowanych w warunkach zbliżonych do warunków przyjętych w niniejszej pracy.

Do kalibracji monitorów wykorzystano trzy komercyjnie dostępne zestawy do kalibracji kolorymetrycznej w postaci urządzenia pomiarowego, tzw. kalibratora (rys. 2) wraz z oprogramowaniem do kalibracji — podstawowe dane zastosowanych zestawów przedstawiono w tabelicy 2.

Jak to już wcześniej zaznaczono utworzony profil monitora zależy w znacznym stopniu od ustawień wybranych w programie do kalibracji. Ustawienia te mogą różnić się w zależności od tego jaki monitor jest w danym przypadku kalibrowany — wynika to m.in. z różnych typów



(a) Datacolor Spyder4ELITE



(b) X-Rite i1 Display Pro



(c) X-Rite i1Photo Pro 2

Rys. 2. Urządzenia pomiarowe wykorzystane do kalibracji

Tablica 2. Podstawowe dane badanych systemów kalibracji

System			
Producent	Datacolor		X-Rite
Model	Spyder4ELITE	i1 Display Pro	i1Photo Pro 2
Urządzenie pomiarowe			
Rodzaj urządzenia pomiarowego (kalibratora)	kolorymetr 7-kanalowy	kolorymetr	spektrometr
Uwagi	—	—	w zestawie certyfikat kalibracji przyrządu
Oprogramowanie			
Producent	Datacolor		X-Rite
Nazwa	Spyder4ELITE		i1 Profiler
Wersja	4.5.0		1.5.6

podświetleń matryc poszczególnych monitorów oraz ich różnych gamutów. Ze względu na wielość możliwych ustawień, zdecydowano się na taki ich dobór, aby dla każdego testowanego zestawu uzyskać najlepszy wynik kalibracji każdego z monitorów. Typowe ustawienie obejmowało wybór: rodzaju monitora, punktu bieli ($T_b = 6500\text{ K}$, $x = 0,3127$ i $y = 0,3290$), luminancji barwy białej (120 cd/m^2), luminancji barwy czarnej (wybierano minimalną luminancję czerni monitora), współczynnika $\gamma = 2,2$, typu profilu (jeżeli było to możliwe wybierano profile wykorzystujące LUT) oraz liczby barw na podstawie których tworzony był profil (wybierano zawsze największą dostępną w danym programie liczbę barw). Aby uniknąć ewentualnych zakłóceń dla wszystkich kalibracji wyłączona została funkcja adaptacji profilu do zmieniających się warunków oświetleniowych w otoczeniu monitora. Pomimo tego, że monitor firmy NEC pozwala na jego kalibrację sprzętową w badaniach ograniczono się jedynie do kalibracji programowej, ponieważ żaden z systemów do kalibracji nie oferował opcji kalibracji sprzętowej. W tablicy 3 przedstawiono ustawienia jakie zostały zastosowane podczas badań.

Warunki realizacji badań

Badania zostały wykonane w ciemni należącej do Laboratorium Obrazowania i Pomiarów Radiometrycznych, które działa w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej (rys. 3). Wykorzystanie ciemni pozwoliło wyeliminować wpływ oświetlenia zastanego na wynik pomiarów — średni poziom

Tablica 3. Zastosowane ustawienia testowanych systemów kalibracji; zachowano oryginalne nazwy ustawień programów

	Datacolor Spyder4ELITE	X-Rite i1 Display Pro	X-Rite i1Photo Pro 2
Ustawienia dotyczące profilu i jego utworzenia			
Luminancja czerni	0 cd/m^2	—	—
Luminancja bieli	120 cd/m^2	120 cd/m^2	120 cd/m^2
Wymagany współczynnik kontrastu	—	—	natywny
Punkt bieli	6500 K	iluminant CIE D65	iluminant CIE D65
Współczynnik γ	2.2	2.2	2.2
Liczba barw testowych	—	—	462
Inne ustawienia zależne od programu	Ambient Light Compensation — nie Gray Balance Calibration — tak	—	Flare Correct — nie Ambient Light Smart Control — nie
Typ profilu	macierzowy nie może być zmieniony	—	tablicowy
Wersja profilu ICC	4	—	4
Metoda adaptacji chromatycznej	Bradforda	—	Bradforda
Automatic Display Control	—	—	tak, z odpowiednimi monitorami
Ustawienia związane z kalibrowanym monitorem			
BenQ XL2420T	Normal gamut White LED	White LED	brak możliwości wyboru ze względu na rodzaj urządzenia pomiarowego
Dell Ultrasharp U2412M	—	—	—
Dell Ultrasharp U2410	Wide Gamut Fluorescent (CCFL)	Wide Gamut CCFL	—
NEC Spectraview 241	—	—	—

natężenia oświetlenia w ciemni podczas pomiarów wynosił mniej niż 1 lx . W ciemni kontrolowana była również temperatura powietrza, która wynosiła 23°C — w takiej samej temperaturze przechowywane były również wszystkie kalibratory i monitory wykorzystane do testów. Kalibracja i późniejsze pomiary monitorów prowadzone były zawsze po ich uprzednim rozgrzaniu przez co najmniej 40 min.

Stanowisko pomiarowe składało się z komputera osobistego z systemem MS Windows 7 Professional 64-bit wyposażonego w kartę grafiki NVIDIA Quadro NVS 450. Monitory z komputerem były łączone poprzez złącze DVI-D. Każda kalibracja monitora i następujące po niej pomiary poprzedzone były przywróceniem domyślnych ustawień systemu operacyjnego oraz ustawień fabrycznych monitora.

Do pomiaru barw reprodukowanych przez monitory zastosowano profesjonalny kolorymetr Konica Minolta CA-310 z uniwersalną głowicą pomiarową CA-PU32/35 (rys. 4), który charakteryzuje się wysoką dokładnością i stabilnością pomiarów. Zgodnie z zaleceniem producenta przed rozpoczęciem pomiarów kolorymetr był włączony przez nie mniej niż 30 min.

Pomiar jakości reprodukcji barw był realizowany poprzez pomiar ponad 100 barw wyświetlanych sekwencyjnie na mierzonym monitorze. W celu automatyzacji tych pomiarów wykorzystano oprogramowanie CalMAN ColorChecker v. 5.4.0.1833 firmy SpectraCal. Dla każdego badanego monitora taka procedura pomiarowa była powtarzana 4-krotnie, tj. po kalibracji danego monitora każdym z badanych systemów do kalibracji oraz dodatkowo po wyborze fabrycznego ustawienia sRGB monitora. Ze względu na to, że monitor Dell U2412M nie ma zdefiniowanego ustawienia sRGB zastąpiono go wyborem ustawienia temperatury barwowej na 6500 K. Efektem takiej procedury było otrzymanie łącznie 16 zestawów wyników pomiarów.

W przypadku pomiarów dla ustawień sRGB monitorów, ze względu na bardzo wysoką domyślną luminancję ($>250 \text{ cd/m}^2$) obu monitorów firmy Dell i monitora BenQ, zdecydowano się poprzedzić pomiar dokładności reprodukcji barw ustawieniem luminancji monitora na 120 cd/m^2 . Dla tych monitorów wartość ta była ustawiana na podstawie pomiaru rzeczywistej wartości luminancji monitora wykonanej kolorymetrem Konica Minolta. W przypadku monitora firmy NEC jasność dla fabrycznego ustawienia sRGB ustawiano na podstawie wartości luminancji podawanej przez oprogramowanie monitora. W przypadku kalibracji monitorów za pomocą badanych systemów kalibracji przeprowadzenie takiej operacji nie było konieczne, ponieważ ustawienie luminancji jest integralną częścią procedury kalibracji realizowanej przez każdy z testowanych systemów.

Podczas kalibracji i pomiarów mierzony był zawsze centralny obszar monitora. Przy każdej zamianie przyrządu pomiarowego (tj. zarówno kalibratorów jak i kolorymetru KM CA-310) sprawdzano, czy jest on umieszczony na powierzchni ekranu zgodnie z zaleceniami producenta. Wymagane podczas kalibracji położenie poszczególnych kalibratorów było każdorazowo podawane przez oprogramowanie współpracujące z danym kalibratorem. Do dokładnego ustawienia głowicy kolorymetru KM CA-310 względem monitora zastosowano specjalnie przygotowany obraz wzorcowy (rys. 4, obraz prawy). Ze względu na to, że wszystkie przyrządy pomiarowe wykorzystywane w prezentowanych badaniach są podczas pomiaru przyłożone do powierzchni ekranu wyniki pomiaru nie są obciążone błędem wynikającym z ustawienia niewłaściwej odległości przyrządu pomiarowego od ekranu.

Wymagany zakres udziału użytkownika w procesie kalibracji był różny i uzależniony był od testowanego systemu kalibracji i kalibrowanego monitora. W przypadku wszystkich testowanych systemów użytkownik musi podłączyć kalibrator i odpowiednio go ustawić na powierzchni ekranu monitora — prawidłowość wykonania tych czynności jest weryfikowana przez każdy z testowanych systemów kalibracji.



Rys. 3. Stanowisko laboratoryjne, na którym prowadzono badania; w celu wykonania zdjęcia stanowisko zostało dodatkowo oświetlone



Rys. 4. Kolorymetr Konica Minolta CA-310: jednostka sterująca wraz z głowicą pomiarową (obraz lewy), głowica pomiarowa w trakcie jej pozycjonowania na monitorze (obraz prawy)

Realizacja kolejnych etapów procesu kalibracji dla części badanych zestawów monitor-system kalibracji wymagała dalszych działań ze strony użytkownika. Działania te sprowadzają się do ustawienia właściwej luminancji monitora oraz dokonania ustawień związanych z jego punktem bieli. Regulacja tych ustawień prowadzona była niezależnie dla każdej kalibracji na podstawie wyników pomiarów dostarczanych przez badany system kalibracji. Regulacja monitorów polegała na zmianie maksymalnej luminancji wyświetlanego obrazu (parametr „Brightness” monitorów) oraz na zmianie wzmocnienia dla kanałów R , G i B . W przypadku zastosowania systemów kalibracji firmy X-Rite do kalibracji monitorów BenQ XL2420T i Dell U2412M proces kalibracji przebiegał automatycznie dzięki wykorzystaniu standardu VESA Display Data Channel i funkcji Automatic Display Calibration, dokonujących tych ustawień za użytkownika.

Wyniki pomiarów

Do analizy wyników pomiarów wykorzystano miarę ΔE_{94}^* [13], która opisuje różnicę między dwiema barwami w przestrzeni CIE Lab w sposób zbliżony do tego jaki tę różnicę postrzeżałby człowiek z prawidłowym widzeniem barwnym. Należy zaznaczyć, że miara ΔE_{94}^* nie jest idealnym przybliżeniem ludzkiej percepcji barw. Ponadto opisuje ona postrzeganie różnicy barw dla ściśle określonych warunków. Pomimo tych wad jest ona jednak, wraz z pozostałymi jej wariantami (tzn. ΔE_{ab}^* , ΔE_{CMC}^* , ΔE_{00}^*) powszechnie stosowana do oceny różnicy barw.

W tabelicy 4 przedstawione zostały zagregowane wyniki pomiarów jakości reprodukcji barw wykorzystujące miarę ΔE_{94}^* . W każdej komórce tabelicy przedstawiono, od góry do dołu, następujące estymatory błędu reprodukcji barw:

- (1) $\Delta \check{E}_{94}^* = \min_{i=1, \dots, i_{max}} (\Delta E_{94}^*(i)),$
- (2) $\Delta \tilde{E}_{94}^* = \text{median}(\{\Delta E_{94}^*\}),$
- (3) $\Delta \bar{E}_{94}^* = \frac{1}{i_{max}} \sum_{i=1}^{i_{max}} \Delta E_{94}^*(i),$
- (4) $\Delta \hat{E}_{94}^* = \max_{i=1, \dots, i_{max}} (\Delta E_{94}^*(i)),$

gdzie

$$\{\Delta E_{94}^*\} = \{\Delta E_{94}^*(1), \dots, \Delta E_{94}^*(i), \dots, \Delta E_{94}^*(i_{max})\},$$

a $\Delta E_{94}^*(i)$ jest różnicą między i -tą barwą zdefiniowaną w PCS (barwa wzorcową), spośród zbioru wszystkich sprawdzanych i_{max} barw, a jej reprodukcją na monitorze (barwa rzeczywista). Do wyznaczenia tej różnicy wykorzystuje się współrzędne i -tej barwy wzorcowej określone w PCS i wynik pomiaru barwy rzeczywistej będącej reprodukcją analizowanej i -tej barwy wzorcowej uzyskaną poprzez jej wyświetlenie na monitorze.

Aby ułatwić analizę wyników przedstawionych w tabelicy 4 została ona uzupełniona o pozycję (wartości w nawiasach)

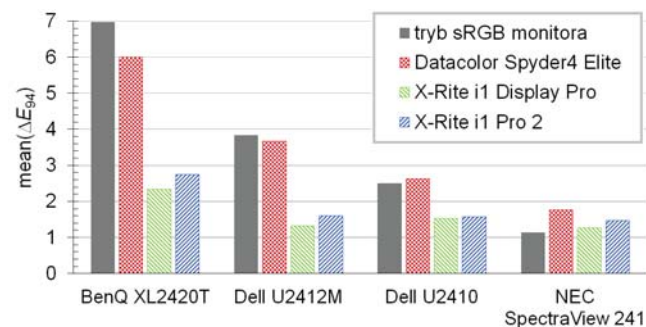
Tablica 4. Porównanie wartości estymatorów błędu reprodukcji barwy dla badanych konfiguracji monitor-metoda kalibracji; dla każdej konfiguracji podano, od góry do dołu, wartości: $\Delta\bar{E}_{94}^*$, $\Delta\hat{E}_{94}^*$, $\Delta\bar{E}_{94}^*$, $\Delta\hat{E}_{94}^*$; dokładny opis tabeli zawarto w tekście

	BenQ XL2420T	Dell Ultrasharp U2412M	Dell Ultrasharp U2410	NEC SpectraView 241
tryb sRGB monitora	1,73 (4) 6,04 (3) 6,96 (4) 16,51 (4)	0,65 (3) 3,83 (3) 3,83 (4) 5,96 (3)	0,84 (4) 2,44 (3) 2,50 (3) 3,77 (1)	0,32 (2) 1,07 (1) 1,13 (1) 2,46 (1)
Datacolor Spyder4 ELITE	1,04 (3) 6,37 (4) 6,01 (3) 10,77 (3)	0,90 (4) 4,74 (4) 3,67 (3) 8,10 (4)	0,71 (2) 2,50 (4) 2,63 (4) 6,37 (4)	0,59 (4) 1,76 (4) 1,76 (4) 3,57 (4)
X-Rite i1 Display Pro	0,51 (1) 2,37 (1) 2,33 (1) 4,30 (1)	0,26 (1) 1,28 (1) 1,33 (1) 2,62 (1)	0,40 (1) 1,36 (1) 1,53 (1) 5,89 (2)	0,14 (1) 1,13 (2) 1,26 (2) 2,91 (2)
X-Rite i1Photo Pro 2	0,95 (2) 2,86 (2) 2,75 (2) 4,95 (2)	0,29 (2) 1,56 (2) 1,60 (2) 3,51 (2)	0,71 (2) 1,41 (2) 1,57 (2) 6,08 (3)	0,54 (3) 1,40 (3) 1,47 (3) 3,21 (3)

jąką po posortowaniu od najlepszego do najgorszego wyniku, odrębnie dla każdego monitora, mają wartości estymatorów (1)–(4). Dodatkowo pogrubieniem wyróżniono, odrębnie dla każdej ze sprawdzanych metod kalibracji (tj. fabrycznego trybu sRGB monitorów oraz wszystkich badanych systemów kalibracji), najlepsze wyniki uzyskane dla tych estymatorów. Pismem pochylonym zapisano wyniki dla tych par monitor-metoda kalibracji, których kalibracja nie spełnia warunków:

$$(5) \quad \Delta\bar{E}_{94}^* \leq 3 \text{ i } \Delta\hat{E}_{94}^* \leq 5.$$

Warunki te w niniejszej pracy, podobnie jak w niektórych programach nadzorujących kalibrację, zostały przyjęte jako warunki konieczne dobrej kalibracji. Dodatkowo na rysunku 5 przedstawiono wykres wartości $\Delta\bar{E}_{94}^*$.



Rys. 5. Wartości estymatora błędu kalibracji $\Delta\bar{E}_{94}^*$

W tabelicy 5 przedstawiono zmierzone wartości $(x, y)_{CIE_{xyY}}$ punktu bieli każdej z badanych konfiguracji monitor-metoda kalibracji. Docelowym punktem bieli, zgodnie z tym co wcześniej podano, jest punkt chromatyczności o współrzędnych $x=0,3127$ i $y=0,3290$ w przestrzeni CIE_{xyY}, a to odpowiada temperaturze barwowej 6500 K. Błąd ustawienia T_b punktu bieli monitora jest jednym z ważniejszych kryteriów oceny jakości kalibracji monitora i jest on zdefiniowany jako

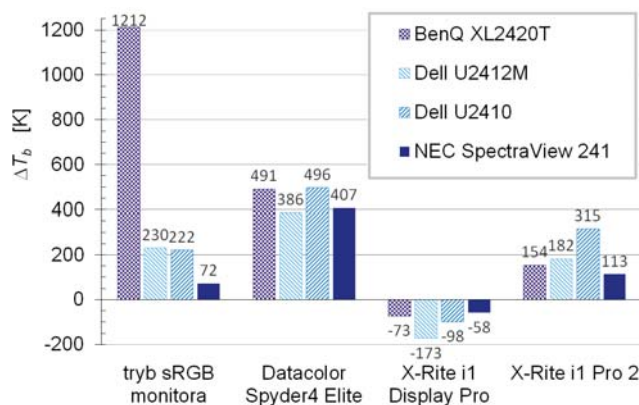
$$(6) \quad \Delta T_b = T_b - 6500 \text{ K},$$

a jednym z celów kalibracji jest minimalizacja wartości $|\Delta T_b|$.

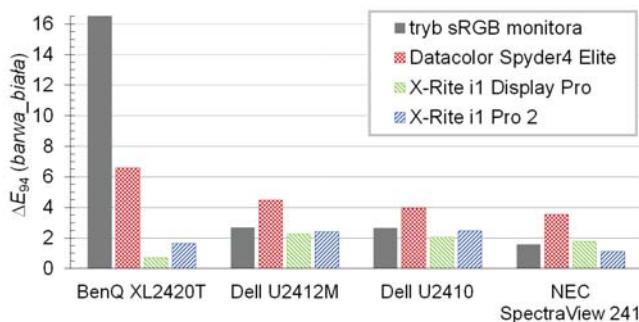
Uzyskane wartości ΔT_b przedstawiono na rysunku 6, natomiast dla porównania na rysunku 7 przedstawiono wykres wartości ΔE_{94}^* dla punktu bieli monitora.

Tablica 5. Błędy odwzorowania punktu bieli dla badanych konfiguracji monitor-metoda kalibracji; w każdej konfiguracji podano (od góry): zmierzone współrzędne $(x, y)_{CIE_{xyY}}$ i T_b punktu bieli; pogrubiono wartości T_b , dla których $\Delta T_b \leq 150$ K

	BenQ XL2420T	Dell Ultrasharp U2412M	Dell Ultrasharp U2410	NEC SpectraView 241
tryb sRGB monitora	0,3002 0,2998 7712 K	0,3085 0,3297 6730 K	0,3086 0,3298 6722 K	0,3119 0,3262 6572 K
Datacolor Spyder4 ELITE	0,3064 0,3169 6991 K	0,3074 0,3207 6886 K	0,3045 0,3261 6996 K	0,3058 0,3276 6907 K
X-Rite i1 Display Pro	0,3140 0,3302 6427 K	0,3161 0,3281 6327 K	0,3141 0,3327 6402 K	0,3135 0,3321 6442 K
X-Rite i1Photo Pro 2	0,3104 0,3260 6654 K	0,3102 0,3246 6682 K	0,3077 0,3255 6815 K	0,3107 0,3290 6613 K



Rys. 6. Wartości błędów ustawienia T_b



Rys. 7. Błąd ΔE_{94}^* reprodukcji barwy białej

W tabelicy 6 zestawiono wartości luminancji punktu czerni L_b i bieli L_w oraz wyliczone na ich podstawie wartości kontrastu statycznego monitorów $C = L_w/L_b$ po ich kalibracji poszczególnymi metodami. Najlepsze wartości L_b , L_w oraz C uzyskane dla każdego z testowanych monitorów zostały zapisane pismem pogrubionym — wartości te spełniają następujące warunki:

$$(7) \quad \hat{L}_b = \min_{\forall L_b} (L_b),$$

$$(8) \quad \hat{L}_w = \min_{\forall L_w} (|L_w - 120 \text{ cd/m}^2|),$$

$$(9) \quad \hat{C} = \max_{\forall C} (C).$$

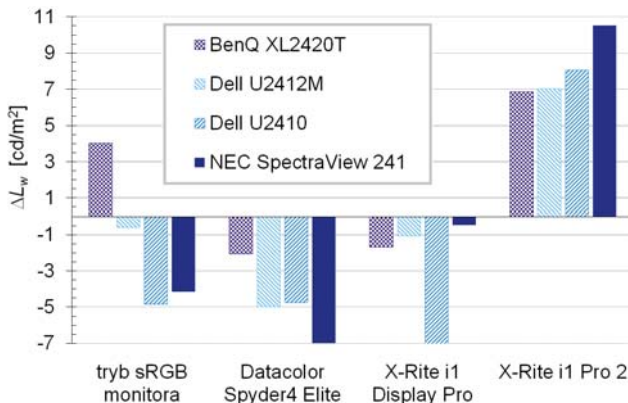
Na rysunku 8 przedstawiono błąd ustawienia luminancji punktu bieli L_w , tj.

$$(10) \quad \Delta L_w = L_w - 120 \text{ cd/m}^2,$$

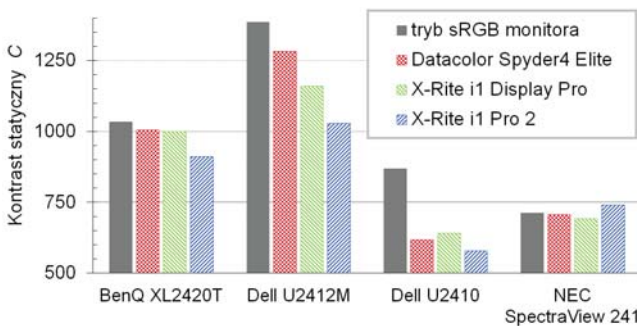
dla poszczególnych monitorów w zależności od zastosowanej metody kalibracji. Rysunek 9 przedstawia zaś wykres zmierzonych wartości kontrastu statycznego C dla poszczególnych konfiguracji monitor–metoda kalibracji.

Tablica 6. Wartości luminancji czerni L_{black} , luminancji bieli L_{white} (obie wielkości w cd/m^2) i kontrastu statycznego C dla testowanych zestawów monitor–metoda kalibracji; najlepsze wartości tych parametrów dla poszczególnych monitorów zostały pogrubione

	BenQ XL2420T	Dell Ultrasharp U2412M	Dell Ultrasharp U2410	NEC SpectraView 241
tryb sRGB monitora	0,12	0,09	0,13	0,16
	124,03	119,41	115,16	115,86
	1032,8	1385,7	868,9	711,4
Datacolor Spyder4 ELITE	0,12	0,09	0,19	0,16
	118,00	115,00	115,26	113,01
	1004,9	1283,0	616,8	706,7
X-Rite i1 Display Pro	0,12	0,10	0,17	0,17
	118,32	118,93	107,67	119,54
	999,3	1159,3	640,6	692,3
X-Rite i1Photo Pro 2	0,14	0,12	0,22	0,18
	126,85	127,03	128,07	130,54
	910,8	1027,9	577,7	740,9



Rys. 8. Błąd ΔL_w ustawienia luminancji punktów bieli monitorów



Rys. 9. Wartości kontrastu statycznego C badanych monitorów

Tablica 7 zawiera porównanie wielkości gamutów \mathcal{G} dla badanych konfiguracji monitor–metoda kalibracji z gamutem przestrzeni sRGB \mathcal{G}_{sRGB} . Dla każdej konfiguracji podano, od góry do dołu, jako procent powierzchni \mathcal{G}_{sRGB} wielkości:

Tablica 7. Porównanie wielkości gamutów badanych konfiguracji monitor–metoda kalibracji z gamutem przestrzeni sRGB — dla każdej konfiguracji podano, od góry do dołu, wartości: ρ_{\cap} , ρ_{\setminus} , $\rho_{\mathcal{G}}$; pogrubieniem zaznaczono największe wartości ρ_{\cap} dla każdego monitora

	BenQ XL2420T	Dell Ultrasharp U2412M	Dell Ultrasharp U2410	NEC SpectraView 241
tryb sRGB monitora	94,39%	97,17%	95,47%	99,50%
	10,90%	5,12%	1,72%	1,98%
	105,29%	102,29%	97,19%	101,49%
Datacolor Spyder4 ELITE	78,48%	74,25%	88,33%	97,36%
	3,31%	0,04%	0,17%	1,52%
	81,79%	74,29%	88,51%	98,89%
X-Rite i1 Display Pro	93,58%	97,14%	98,95%	99,73%
	1,93%	4,85%	1,98%	2,17%
	95,51%	101,99%	100,93%	101,90%
X-Rite i1Photo Pro 2	93,40%	94,61%	99,26%	99,98%
	2,50%	0,31%	1,66%	3,39%
	95,90%	94,93%	100,91%	103,37%

części wspólnej $\mathcal{G} \cap \mathcal{G}_{sRGB}$

$$(11) \quad \rho_{\cap} = \frac{\text{area}(\mathcal{G} \cap \mathcal{G}_{sRGB})}{\text{area}(\mathcal{G}_{sRGB})} \cdot 100\%,$$

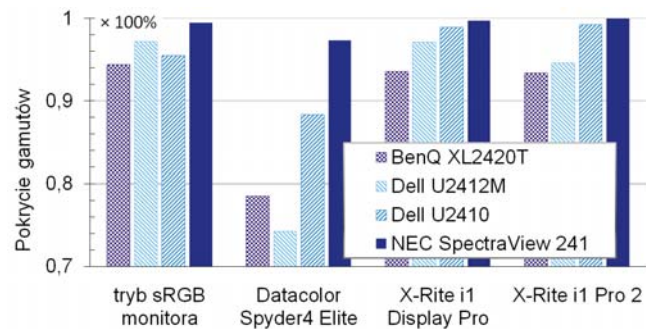
części \mathcal{G} wychodzącej poza \mathcal{G}_{sRGB}

$$(12) \quad \rho_{\setminus} = \frac{\text{area}(\mathcal{G} \setminus \mathcal{G}_{sRGB})}{\text{area}(\mathcal{G}_{sRGB})} \cdot 100\%$$

oraz całego \mathcal{G}

$$(13) \quad \rho_{\mathcal{G}} = \frac{\text{area}(\mathcal{G})}{\text{area}(\mathcal{G}_{sRGB})} \cdot 100\%,$$

gdzie funkcja $\text{area}(\mathcal{G})$ reprezentuje pole powierzchni gamutu \mathcal{G} na płaszczyźnie xy w przestrzeni CIE xyY . Dodatkowo w tablicy 7, osobno dla każdego badanego monitora, pogrubieniem zaznaczono wyniki, dla których uzyskano największe pokrycie ρ_{\cap} . Rysunek 10 przedstawia natomiast porównanie uzyskanych wartości ρ_{\cap} .

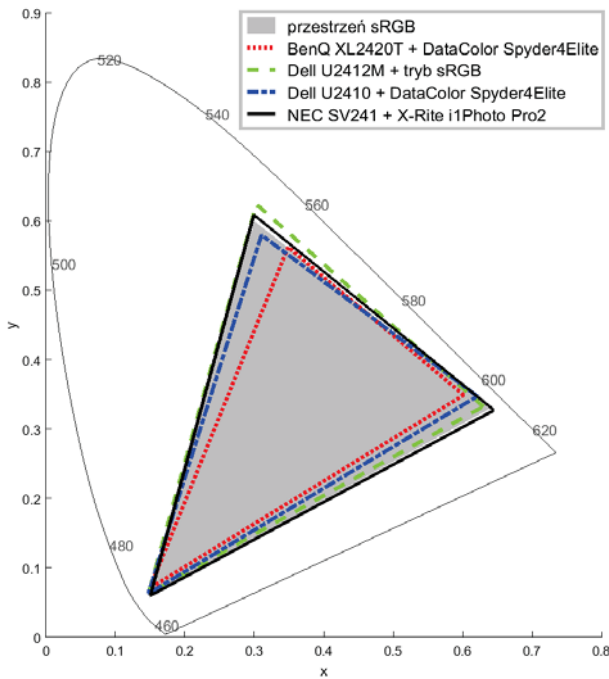


Rys. 10. Porównanie wartości ρ_{\cap}

Dla lepszej ilustracji na rysunku 11 przedstawiono na płaszczyźnie xy przestrzeni CIE xyY gamuty dla najlepszych i najgorszych konfiguracji, osobno dla monitorów normalnogamutowych (BenQ XL2420T i Dell U2412M) i szerokogamutowych (Dell U2410 i NEC SV 241), w sensie spełnienia kryterium

$$(14) \quad \hat{\mathcal{G}} = \min_{\mathcal{G}} |\rho_{\cap} - 100\%|.$$

W celu lepszego przedstawienia błędów związanych z odwzorowaniem gamutu sRGB w tablicy 8 zaprezentowano błędy $\Delta E_{94}^*(s)$, gdzie $s \in \{R, G, B\}$ jest składową



Rys. 11. Porównanie gamutów wybranych konfiguracji monitorów – metoda kalibracji z gamutem przestrzeni sRGB

przestrzeni sRGB. W tablicy wartości $\Delta E_{94}^*(s) \geq 5$ zostały wyróżnione pismem pochylonym, a wartości $\Delta E_{94}^*(s) \leq 1,5$ zapisano pismem pogrubionym.

Tablica 8. Błędy odwzorowania podstawowych barw przestrzeni sRGB — dla każdej konfiguracji podano (od góry do dołu) wartości: $\Delta E_{94}^*(R)$, $\Delta E_{94}^*(G)$ i $\Delta E_{94}^*(B)$; opis wyróżnień zawarto w tekście

	BenQ XL2420T	Dell Ultrasharp U2412M	Dell Ultrasharp U2410	NEC Spec- traView 241
tryb sRGB monitora	10,08	4,40	2,34	1,02
	2,33	3,80	2,27	1,23
	5,76	3,65	2,43	1,20
Datacolor Spyder4 ELITE	6,67	3,77	1,81	2,11
	5,54	2,80	0,75	1,28
	3,83	1,80	2,63	1,46
X-Rite i1 Display Pro	1,46	1,39	0,94	0,41
	3,16	0,26	2,31	2,03
	2,68	1,29	0,67	1,03
X-Rite i1Photo Pro 2	1,86	0,78	0,94	0,56
	3,53	1,85	2,39	1,56
	2,82	1,44	1,41	1,60

Analiza uzyskanych wyników

Analiza uzyskanych wyników, a szczególnie wartości błędów ΔE_{94}^* (tab. 4 oraz rys. 5), pozwala stwierdzić, że najgorsze wyniki kalibracji spośród badanych systemów daje system Datacolor Spyder4 ELITE. System ten aż dla trzech monitorów nie zapewnił dobrej kalibracji w sensie kryterium (5). Ponadto uzyskane dla tego systemu wyniki kalibracji, w stosunku do pozostałych badanych systemów, cechują się: największym średnim błędem ustawienia punktu bieli (rys. 6), największym błędem ΔE_{94}^* reprodukcji barwy białej (rys. 7), największymi błędami odwzorowania barw podstawowych przestrzeni sRGB (tab. 8), a także najmniejszymi stopniami pokrycia uzyskanych gamutów z gamutem przestrzeni sRGB (tab. 7 oraz rys. 10).

Znacznie lepsze wyniki kalibracji uzyskano przy wykorzystaniu systemów firmy X-Rite, a zwłaszcza systemu i1 Display Pro. System ten dla każdego z testowanych

monitorów pozwolił na uzyskanie, dla każdego z kryteriów (1)–(4), najlepszego lub drugiego w kolejności wyniku (tab. 4, wartości w nawiasach). Biorąc natomiast pod uwagę tylko wartości ΔE_{94}^* system i1 Display Pro dla wszystkich monitorów dał najlepsze wyniki kalibracji spośród badanych systemów. Ponadto system ten dla każdego testowanego monitora pozwolił na otrzymanie wartości temperatury barwowej najbardziej zbliżonej do wymaganej wartości 6500 K (tab. 5 i rys. 6).

Słabe wyniki uzyskane systemem Datacolor Spyder4 ELITE mogą po części wynikać z faktu, że w procesie kalibracji system ten nie wymagał od użytkownika takiego dostrojenia monitora, aby uzyskać punkt bieli o wymaganych współrzędnych. Jedynym zastosowanym w tym systemie sposobem ustawienia punktu bieli jest informacja dla użytkownika by ustawił na monitorze wymaganą temperaturę barwową, przy czym nie został zaimplementowany żaden system interakcji z użytkownikiem informujący o prawidłowości danego ustawienia np. poprzez informację o różnicy między wartością rzeczywistą a wymaganą.

Należy także zwrócić uwagę na to, że system firmy Datacolor w procesie kalibracji nie wykorzystuje profili tablicowych, a jedynie macierzowe (tab.3) oraz, być może, stosowana jest zbyt mała liczba barw wzorcowych w procesie charakteryzacji monitora. Przyjęcie takich rozwiązań wpływa negatywnie na jakość procesu kalibracji.

W przypadku pozostałych systemów zwraca uwagę duży błąd ustawienia luminancji punktu bieli L_w (rys. 8) występujący w przypadku stosowania systemu X-Rite i1 Pro.

Wśród monitorów uwagę zwracają wyniki osiągnięte przez monitor NEC SpectraView 241. Pomiary przeprowadzone dla tego monitora po wybraniu jego fabrycznego profilu sRGB wykazały, że profil ten spełnia warunki dobrej kalibracji (5), a uzyskane dla tego ustawienia wartości ΔE_{94}^* i $\Delta \tilde{E}_{94}^*$ były najmniejsze spośród wszystkich wyników danego typu uzyskanych w trakcie badań (tab. 4 oraz rys. 5). Inną cechą wyróżniającą ten monitor jest największa stałość kontrastu statycznego (tab. 6 oraz rys. 9) spośród wszystkich badanych monitorów, a także najmniejsze błędy ustawienia punktu bieli (tab. 5 oraz rys. 7) oraz reprodukcji barw podstawowych (tab. 8). Ponadto monitor ten, w porównaniu do pozostałych badanych monitorów, dla każdej metody kalibracji pozwala na uzyskanie gamutu o największym stopniu pokrycia z gamutem przestrzeni sRGB (tab. 7).

Również w przypadku monitora Dell U2410 pomiary fabrycznie ustawionego profilu sRGB potwierdziły, że spełnia on przyjęte warunki dobrej kalibracji (5). Spełnienie tych warunków przez oba wymienione monitory ma niewątpliwie związek z faktem przeprowadzenia certyfikacji tych monitorów przez ich producentów w zakresie dokładności reprodukowanych przez nie barw. Należy jednak zaznaczyć, że również monitor Dell U2412M dla ustawienia 6500 K (monitor ten nie ma fabrycznie zdefiniowanego profilu sRGB) był bliski spełnienia warunków dobrej kalibracji. Na tle pozostałych monitorów najgorsze wyniki pomiarów fabrycznego ustawienia sRGB osiągnął monitor BenQ XL2420T. W jego przypadku wartość $\Delta \tilde{E}_{94}^*$ wyniosła 6,04 (tab. 4), a to oznacza, że ponad połowa barw zostałaby zinterpretowana przez obserwatora jako inna barwa niż barwa wymagana. Również po kalibracji monitor ten odstawał wynikami od pozostałych testowanych monitorów (tab. 4 i tab. 8).

Podsumowanie

Przeprowadzone badania pokazały, że jakość reprodukcji barw przez monitor zależy w znacznym stopniu od

systemu wykorzystanego do jego kalibracji. Zastosowanie dobrze działającego systemu takiego jak np. X-Rite i1 Display Pro pozwala na uzyskanie dobrej, w sensie kryterium (5), jakości reprodukcji barw nawet na monitorze nie zaprojektowanym do prac graficznych — wśród testowanych monitorów przykładem takiego monitora jest m.in. monitor BenQ XL2420T. Uzyskane wyniki pokazują także, że w przypadku gdy realizowana praca wymaga dużej dokładności reprodukcji barw, w celu otrzymania odpowiednich wyników, oprócz zastosowania dobrego systemu kalibracji konieczne jest użycie monitora przeznaczonego do profesjonalnych prac graficznych; w przypadku prowadzonych badań takim monitorem był NEC SpectraView 241.

Analizując otrzymane wyniki kalibracji stwierdzono, że najlepsze wyniki uzyskano, wśród badanych monitorów normalnogamutowych dla zestawu Dell U2412M i X-Rite i1 Display Pro ($\Delta \hat{E}_{94}^* = 1,33$, $\Delta \hat{E}_{94}^* = 2,62$, $\rho_{\Gamma} = 97,14\%$), a dla badanych monitorów szerokogamutowych dla zestawu NEC SpectraView 241 i X-Rite i1 Display Pro ($\Delta \hat{E}_{94}^* = 1,26$, $\Delta \hat{E}_{94}^* = 2,91$, $\rho_{\Gamma} = 99,73\%$). Wyniki te pokazują, że wybór zestawu monitor–system kalibracji powinien być poprzedzony testami uwzględniającymi rzeczywiste warunki w jakich ten system będzie eksploatowany. W przeciwnym przypadku uzyskana jakość reprodukcji barw może nie spełnić stawianych wymagań.

W trakcie badań zwrócono również uwagę na kilka zjawisk mogących wpływać na uzyskiwane wyniki kalibracji. Przykładem takiego zjawiska jest np. długi czas stabilizacji parametrów obrazów po zmianie ustawień monitora (w trakcie badań były to luminancja oraz wzmocnienie poszczególnych kanałów R , G , B) — problem ten był szczególnie widoczny w przypadku monitora Dell U2410. Kolejnym przykładem takiego zjawiska jest stosunkowo duży błąd ustawienia luminancji bieli L_w otrzymywany w wyniku kalibracji monitorów systemem X-Rite i1 Photo Pro 2 (tab. 6 i rys. 8). Innym problemem oczekującym na wyjaśnienie jest określenie przyczyn słabych wyników kalibracji uzyskiwanych przy zastosowaniu systemu Datacolor Spyder4 ELITE. Interesującym zagadnieniem jest również sprawdzenie własności metrologicznych, a w szczególności dokładności i powtarzalności, stosowanych kalibratorów oraz określenie wpływu oprogramowania na wyniki kalibracji. Te zagadnienia będą jednym z kierunków przyszłych badań.

Praca częściowo finansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej w 2015 roku. Prezentowane w pracy badania zostały wykonane w Laboratorium Obrazowania i Pomiarów Radiometrycznych Instytutu Automatyki Politechniki Śląskiej.

LITERATURA

- [1] Hunt R. W. G.: The Reproduction of Colour, ed. 6 Wiley-IS & T Series in Imaging Science and Technology, John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [2] Dams F. E. M., Leung K. Y. E., van der Valk P. H. M., Kock M. C. J. M., Bosman J., Niehof S. P.: Technical and Radiological Image Quality Comparison of Different Liquid Crystal Displays for Radiology, Medical Devices (Auckland, N.Z.), 7, pp. 371–377, 2014.
- [3] Fetterly K. A., Blume H. R., Flynn M. J., Samei E.: Introduction to Grayscale Calibration and Related Aspects of Medical Imaging Grade Liquid Crystal Displays, J Digit Imaging, 21(2), pp. 193–207, 2008.
- [4] Lowe J. M., Brennan P. C., Evanoff M. G., McEntee F.: Variations in Performance of LCDs Are Still Evident After DICOM Gray-Scale Standard Display Calibration, American Journal of Roentgenology, 195(1), pp. 181–187, 2010.

- [5] Krupinski E. A., Silverstein L. D., Hashmi S. F., Graham A. R., Weinstein R. S., Roehrig H.: Observer Performance Using Virtual Pathology Slides: Impact of LCD Color Reproduction Accuracy, J Digit Imaging, 25(6), pp. 738–743, 2012.
- [6] Liu S., Ruan Q., Li X.: The Color Calibration across Multi-Projector Display, Journal of Signal and Information Processing, 2(2), pp. 53–58, 2011.
- [7] MacDonald L.: Digital Heritage: Applying Digital Imaging to Cultural Heritage, Elsevier, 2006.
- [8] Sharma A.: Zrozumieć Color Management, Ergo BTL, 2006.
- [9] Siemion Z., Czech E., Fryc I.: Badania kolorymetryczne monitorów ekranowych, Przegląd Elektrotechniczny, 80(5), pp. 459–460, 2004.
- [10] Skrzyński W.: Metody oceny monitorów przeznaczonych do prezentacji obrazów medycznych, Inżynier i Fizyk Medyczny, 1(2), pp. 43–53, 2012.
- [11] Wachta H.: Wskazania potrzeby aktualizacji zaleceń obejmujących zagadnienia oświetlenia iluminacyjnego, Przegląd Elektrotechniczny, 83(2), pp. 75–81, 2007.
- [12] Zajkowski M.: Właściwości fotometryczne wyświetlaczy LCD, Przegląd Elektrotechniczny, 84(4), pp. 210–213, 2008.
- [13] CIE, Industrial color—difference evaluation, Tech. Rep.116, Bureau Central CIE, Vienna, 1995.
- [14] Image technology color management — Architecture, profile format and data structure — Part 1: Based on ICC.1:2004-10, ISO 15076-1:2005.
- [15] Image technology colour management — Architecture, profile format and data structure — Part 1: Based on ICC.1:2010, ISO 15076-1:2010.
- [16] Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) Part 14: Grayscale Standard Display Function, PS 3.14-2004, National Electrical Manufacturers Association, 2004.
- [17] DICOM PS3.14 2015c — Grayscale Standard Display Function, National Electrical Manufacturers Association, 2004.
- [18] ISO 3664:2009 Graphic technology and photography – Viewing conditions. International Organization for Standardization, 2009.
- [19] ISO 12646:2015 Graphic technology – Displays for colour proofing – Characteristics. International Organization for Standardization, 2015.

Autorzy: dr inż. Artur Bał, dr inż. Andrzej Kordecki, dr hab. inż. Henryk Palus, dr inż. Mariusz Frackiewicz, Instytut Automatyki, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Politechnika Śląska, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, Polska, email: artur.bal@polsl.pl, andrzej.kordecki@polsl.pl, henryk.palus@polsl.pl, mariusz.frackiewicz@polsl.pl