
2 Problem barwy i koloru.

Jeżeli nie interesuje nas wierne oddanie barw, to informacje zawarte w poprzednim rozdziale powinny być wystarczające i spokojnie można przejść do czytania rozdziału trzeciego. Jeśli jednak zależy nam na jak najlepszym odwzorowaniu barw niezależnie od urządzenia, na którym prezentujemy obraz to naszą wiedzę na temat barw musimy zdecydowanie pogłębić.

2.1 Podstawy teorii koloru

Uwaga osobista

W języku polskim natrafiamy na szereg problemów wynikających z potocznej równoważności określeń barwa i kolor. Nawet nauka zajmująca się tym zagadnieniem zamiast zwać się **Teorią barwy** w języku polskim została nazwana **Teorią koloru**. W języku angielskim problem ten w ogóle nie występuje. Nasza **barwa** to po prostu **color**, a nasz **kolor (odcień)** to **hue**. Osobiście skłaniałbym się do utrzymania równoważności słów barwa - kolor i używania słowa odcień jako odpowiednika hue. W literaturze polskiej przyjęło się jednak inaczej.

Pojęcie barwy odnosi się do dwóch zagadnień:

- do wrażenia zmysłowego jakie odbiera człowiek czy zwierzę, gdy do jego oka trafia mieszanina fal elektromagnetycznych z zakresu widzialnego,
- oraz do wielkości, która z założenia w sposób obiektywny, ma być miarą wrażenia opisanego powyżej.

W dalszej części interesować będziemy się tylko tym drugim znaczeniem. Nauka zajmująca się próbą stworzenia obiektywnego opisu wrażeń barwnych zwana jest *teorią koloru*. Choć jej początki sięgają XIX stulecia, to swój niezwykle rozwój w ostatnich kilkudziesięciu latach zawdzięcza głównie rosnącym potrzebom poligrafii i elektronicznych technik obrazowania.

Zanim przejdziemy do bardziej precyzyjnego opisu barw, przypomnijmy podstawowe

fakty dotyczące ich postrzegania przez człowieka.

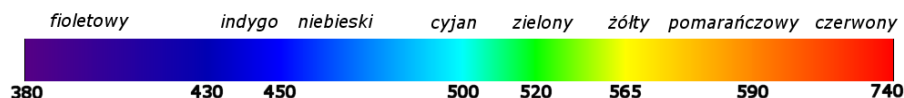
Ciekawostka

Przyjęło się potocznie mówić o czopkach reagujących na kolor czerwony, zielony i niebieski, stąd czasami na ich określenie używa się liter RGB (u podstaw teorii widzenia, czopki nazywane są S M L od *Short, Medium and Long wavelengths*).

- Oko reaguje na fale świetlne w zakresie od ok. 400nm do ok. 700nm.
- Oko posiada dwa rodzaje elementów światłoczułych pręciki (reagujące tylko na natężenie światła) i czopki (reagujące również na długość fali).
- Czopki dzielą się na trzy grupy w zależności od widma fal na jakie reagują.
- Wrażenie barwy odbieranej przez człowieka zależy od składu widmowego światła wpadającego do oka.
- Fale o różnych długościach zmieszane w różnych proporcjach mogą dawać takie samo wrażenie barwy.
- Ze złożenia wszystkich możliwych fal świetlnych w jednakowych proporcjach powstaje światło białe.
- Światło białe można rozszczepić na przykład w pryzmacie, uzyskując rozseparowane fale świetlne o różnych długościach fali.

Rysunek 2.1

Widmo światła białego.



- Wrażenia barwne odbierane przez człowieka zależą w pewnym stopniu również od czynników psychofizycznych (nastrój, gorączka, spożywane leki, brak witamin). W szczególności widzenie barw zmienia się z wiekiem. Im jesteśmy starsi tym gorzej widzimy barwy niebieskie i zielone, tymczasem widzenie barw czerwonych i żółtych pozostaje praktycznie nie upośledzone.
- Postrzeganie barwy zależy również od kontekstu otoczenia.

2.1.1 Prawa Grassmanna.

Prawa Grassmanna Prawa Grassmanna stwierdzają, że:

- przy dowolnej ciągłej zmianie widma fal świetlnych barwa zmienia się w sposób ciągły
- przy składaniu promieniowań, barwa sumy nie zależy od składu widmowego składników a jedynie od ich barwy

- dowolną barwę da się przedstawić jako sumę trzech liniowo niezależnych¹ barw

Uwaga: twierdzenie odwrotne nie jest prawdziwe! Z dowolnie wybranych trzech, niezależnych liniowo barw, nie da się utworzyć wszystkich możliwych barw.

Uwaga osobista

Dzięki temu, że wrażenia barwne spełniają prawa Grassmana do ich matematycznego opisu możemy stosować narzędzia algebry liniowej. To wspaniałe uproszczenie!

Ostatnie dwa stwierdzenia rodzą bardzo ważną konsekwencję, mianowicie jeśli pewien rodzaj światła daje wrażenia $R1, G1, B1$, a inny rodzaj światła daje wrażenia $R2, G2, B2$, to po zmieszaniu tych światel, nasze wrażenia będziemy mogli opisać jako $R1+R2, G1+G2, B1+B2$.

barwy podstawowe Dowolne trzy liniowo niezależne barwy nazywamy **barwami podstawowymi**.

barwy dopełniające Dwie barwy, których zmieszanie daje światło białe, określa się jako **barwy dopełniające**.

2.1.2 Prawo Helmholza.

Dowolną mieszaninę światel monochromatycznych można zastąpić światłem białym zmieszanym z innym światłem monochromatycznym (lub światłem purpurowym, które jak się później okaże jest złożeniem fal monochromatycznych).

2.2 Definicja barwy i co z niej wynika?

barwa Pojęcie barwy ma dwa znaczenia. Z jednej strony **barwa** jest psychofizyczną cechą percepcji wzrokowej [1] i jako taka pozostaje jedynie w sferze doznań subiektywnych. Z drugiej strony, jest wielkością próbującą zobiektywizować i usystematyzować opis tych wrażeń. W teorii koloru wyróżnia się trzy atrybuty barwy, które pozwalają na jej jednoznaczną identyfikację.

Są to: odcień (*hue*), nasycenie (*saturation*) i jasność (*brightness*).

1) Liniowo niezależnych czyli takich, że żadnej z nich nie da się przedstawić jako sumy w dowolnych proporcjach dwóch pozostałych.

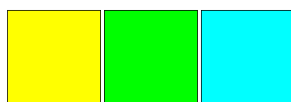
Rysunek 2.2 a)

Przykład barw różniących się:

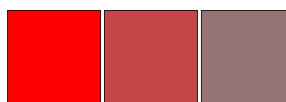
a) kolorami

b) nasyceniem

c) jasnością



b)



c)



Najczęściej używanym modelem barw jest ciągle model RGB. Jest on także, dzięki przyzwyczajeniu i powszechności zastosowań, dość intuicyjny. Omówimy więc trzy podstawowe cechy barwy odwołując się do ich reprezentacji w modelu RGB.

2.2.1 Odcień (*hue*).

Słowniki tłumaczą angielskie określenie *hue* na język polski jako *odcień* lub *barwa*. Z drugiej strony w języku angielskim synonimem *hue* jest *colour*, który tłumaczony jest jako *kolor*. Encyklopedia PWN używa słowa *odcień*. Podobnie postępuje Ilustrowana Encyklopedia Fizyki (Wyd. Naukowo-Techniczne). W poligrafii mówi się często o *walorze barwy*. A w języku potocznym o barwach różniących się jedynie wartością *hue* ludzie mówią, że różnią się *kolorem*. Również książka [1] stosuje słowo *kolor* na określenie *hue*. Opierając się na renomie PWN i WNT w dalszej części tekstu będę również używał słowa *odcień*.

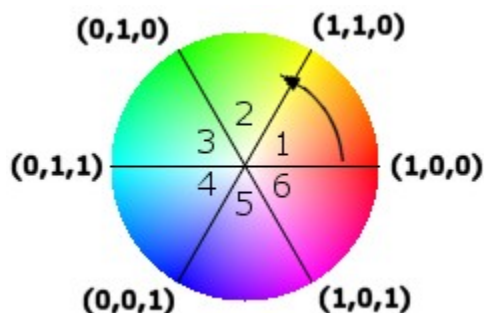
W wielu źródłach można znaleźć informację, że parametr barwy zwany odcieniem można określić przypisując danej barwie długość fali światła monochromatycznego, które daje takie samo wrażenie barwne. Nie jest to do końca prawdą. Przypomnijmy sobie wygląd tęczy lub spektrum białego światła rozszczerzonego pryzmatem. A teraz przypomnijmy sobie głęboko purpurową różę. Choćbyśmy przyciemniali barwy tęczy aż do granic możliwości nie uda nam się odnaleźć w niej koloru purpurowej róży. Wyjaśnienie jest proste. Różne odcienie purpury uzyskujemy mieszając światło niebieskie ze światłem czerwonym w różnych proporcjach. I tylko takie mieszanki dają wrażenie koloru purpurowego. Nie da się znaleźć pojedynczej fali świetlnej, którą odbieralibyśmy tak samo. Tak więc większości wrażeń barwnych można przyporządkować pojedynczą długość fali świetlnej, z wyjątkiem wszystkich odcieni purpury. Wrócimy do tego tematu w paragrafach 2.1.1 i 2.5.2.

Niemniej, każda barwa, również purpurowa ma określony swój odcień. Czym więc tak naprawdę jest odcień? Odpowiedź najprostsza: kątem określającym położenie barwy na kole kolorów (patrz rozdz. 1.7). Przypomnijmy sobie konstrukcję koła kolorów.

Popatrzmy na poniższy rysunek. Umowny początek koła kolorów znajduje się w miejscu

Rysunek 2.3

Konstrukcja koła kolorów.



odpowiadającemu czystej czerwieni, czyli w modelu RGB kolor ten zapiszemy $(1,0,0)^2$. Kolor czerwony ma zatem odcień równy zero ($H=0$). Czysty kolor zielony $(0,1,0)$ znajduje się na linii ustawionej pod kątem 120° do kierunku czerwonego, więc odcień zieleni jest równy 120 ($H=120$). Kolor niebieski $(0,0,1)$ natomiast ulokowany jest pod kątem 240° stopni do czerwieni, więc jego odcień to 240. Pełne koło barw możemy podzielić na sześć wycinków. Każdy obszar ma pewne cechy charakterystyczne wymienimy je po kolei:

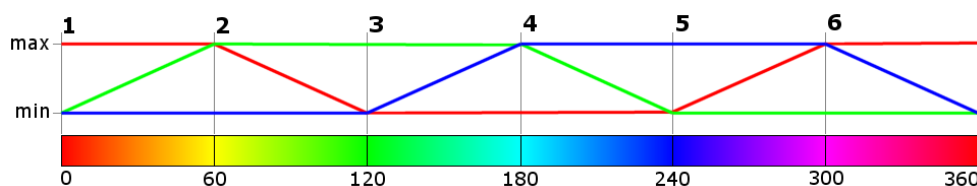
- w obszarach 1 i 6 wartość składowej czerwonej jest maksymalna,
- w obszarach 2 i 3 wartość składowej zielonej jest maksymalna,
- a w obszarach 4 i 5 maksymalne wartości przyjmuje składowa niebieska,
- w obszarze 1 składowa zielona rośnie od wartości minimalnej do maksymalnej,
- w obszarze 2 składowa czerwona maleje od wartości maksymalnej do minimalnej
- w obszarze 3 składowa niebieska rośnie od wartości minimalnej do maksymalnej
- w obszarze 4 składowa niebieska maleje od wartości maksymalnej do minimalnej
- w obszarze 5 składowa czerwona rośnie od wartości minimalnej do maksymalnej

2) Często zależności dla barw przedstawia się we współrzędnych znormalizowanych do przedziału $(0,1)$. Obliczenia można prowadzić albo od razu w ostatecznej reprezentacji koloru albo w zakresie $(0,1)$ i dopiero przed wyświetleniem, zależnie od rozdzielczości bitowej urządzenia, przemnożyć współrzędne przez konkretną wartość (najczęściej 255, dla ośmiobitowej reprezentacji koloru).

- w obszarze 6 składowa niebieska maleje od wartości maksymalnej do minimalnej.

Popatrzmy na rysunek 2.4. Przedstawia on "rozwinięcie" koła kolorów z zaznaczonymi wartościami odcienia oraz zachowaniem poszczególnych składowych w poszczególnych obszarach.

Rysunek 2.4
Zależność pomiędzy składowymi RGB od wartości odcienia.



zamiana RGB na H (odcień)

Właściwie powyższy rysunek wyjaśnia zamianę składowych RGB na wartość odcienia. Ogólny algorytm postępowania jest następujący:

1. Znajdź najmniejszą i największą wartość spośród składowych RGB.
2. Na podstawie tych wartości określ obszar, w którym znajduje się dany kolor.
3. Wartość odcienia wyliczamy z proporcji udziału trzeciej (pozostałej) składowej w porównaniu z pozostałymi dwoma

$$\frac{\text{trzecia} - \text{najmniejsza}}{\text{największa} - \text{najmniejsza}} = \frac{\text{nieznany odcień} - \text{początek przedziału}}{\text{koniec przedziału} - \text{początek przedziału}}$$

Rada

Jeśli wszystkie trzy składowe RGB mają jednakowe wartości, to wartość odcienia staje się nieokreślona. Najczęściej, dla wygody, przypisuje się jej wartość zero.

Oto przykład. Dany jest kolor o współrzędnych RGB(69,198,147). Postępujemy zgodnie z algorytmem. Najmniejsza wartość $\text{min}=69$ dla koloru czerwonego, największa wartość $\text{max}=198$ dla koloru zielonego. Z rysunku 2.4 wynika, że taka kombinacja wartości najmniejszej i największej występuje w obszarze trzecim, a więc poszukiwana wartość odcienia będzie leżeć gdzieś pomiędzy 120 a 180. Wartość odcienia wyliczymy z proporcji:

$$\frac{147 - 69}{198 - 69} = \frac{H - 120}{180 - 120}$$

Po przekształceniu obliczymy nieznaną wartość odcienia, otrzymując $H=156$. Jeśli porównamy rysunki 2.1 i 2.4 to zobaczymy, że tylko obszary od 1 do 4 z koła kolorów występują w widmie światła białego. Kolorom z obszarów 5 i 6 nie da się

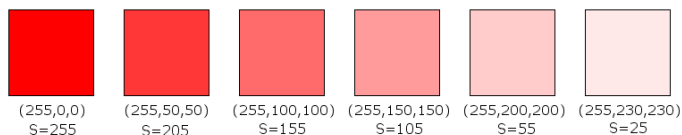
przyporządkować pojedynczej długości fali, a mimo to mają swoją liczbę określającą ich odcień. Odcień z zakresu od 0 do 240 opisuje kolory występujące w widmie światła białego. Są to tzw. **barwy proste** (monochromatyczne, widmowe). Kolory z zakresu 240 do 360 można uzyskać jedynie przez mieszanie w różnych proporcjach światła niebieskiego (ew. fioletowego) i czerwonego. Barwy te, razem z barwami prostymi nazywane są **barwami zasadniczymi** (czystymi).

2.2.2 Nasycenie (*saturation*).

Dowolną barwę zasadniczą możemy zmieszać ze światłem białym. Im więcej światła białego, tym barwa staje się bledsza. Przy bardzo dużym udziale światła białego, przestajemy zauważać odcień i pozostaje jedynie wrażenie światła białego. Jeżeli na przykład do czystej czerwieni będziemy dodawać światła białego to najpierw barwa stanie się czerwono różowa, później różowa, następnie bladoróżowa, aż w końcu będzie biała.

Rysunek 2.5

Barwy różniące się nasyceniem.



Światło białe to takie, w którym wszystkie składowe RGB mają jednakowe maksymalne wartości. W dowolnej barwie udział światła białego określony jest jednoznacznie przez wartość najmniejszej składowej. Na przykład barwę (238,156,124) możemy przedstawić jako sumę dwóch barw: barwy (124,124,124), która reprezentuje udział światła białego oraz barwy (114,32,0). Dla dowolnej barwy możemy zapisać:

$$(R,G,B) = (R-m,G-m,B-m) + (m,m,m) \text{ , gdzie } m=\min(R,G,B)$$

Pierwszy składnik w powyższym równaniu nazywamy składnikiem chromatycznym barwy, drugi achromatycznym.

barwy chromatyczne i achromatyczne

Wszystkie barwy posiadające tylko drugi składnik, nazywamy **barwami achromatycznymi**. Używając potocznego języka, są to odcienie szarości od czerni do bieli. Wszystkie barwy, w których można wyróżnić pierwszy składnik nazywane są

barwami chromatycznymi.

Nasycenie, możemy zatem potraktować, jako miarę udziału czynnika chromatycznego w barwie. Barwy achromatyczne mają nasycenie równe zero.

zamiana RGB na nasycenie S Nasycenie obliczamy jako:

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)}$$

Dla wspomnianej we wcześniejszym przykładzie barwy (238,156,124) najmniejsza wartość składowych RGB to 124, największa to 238. Nasycenie wynosi:

$$S = \frac{238 - 124}{238} \approx 0.479$$

Wynik jest zawsze znormalizowany do jedynki, należy więc go jeszcze przemnożyć przez wartość wynikającą z maksymalnej rozdzielczości koloru. W typowym przypadku jest to 255 i wartość nasycenia byłaby równa $S=122$.

2.2.3 Jaskrawość (*brightness*).

**jaskrawość a jasność
(brightness vs.
lightness)**

Jaskrawość (*brightness, value*) często bywa mylona z jasnością (*lightness*). W kolorymetrii są to jednak dwie różne wielkości. "Jaskrawość" określa zmianę jasności barwy, która nie pociąga za sobą zmiany nasycenia. Zerowa jaskrawość odpowiada więc czerni, a maksymalna jaskrawość w pełni nasyconym kolorom. "Jasność" natomiast to również zmiana jasności, ale taka, przy której nasycenie ulega zmianom. Zerowa jasność także odpowiada czerni, ale maksymalna jasność odpowiada bieli. Dla uniknięcia nieporozumień, czasami zamiast słowa "jasność" używa się sformułowania "średnie światło". Ma to swoje uzasadnienie w sposobie wyznaczania jasności L (średniego światła):

**zamiana RGB na jasność
L (lightness)**

$$L = \frac{\max(R, G, B) + \min(R, G, B)}{2}$$

Jaskrawość odpowiada wielkości fizycznej zwanej luminancją, która określa natężenie

światła wysyłanego lub przechodzącego przez daną powierzchnię. Luminancję wyraża się w cd/m^2 (kandela na metr kwadratowy). W dowolnym modelu barw nie sposób wyznaczyć fizycznej (bezwzględnej) wartości luminancji. Wartość taką można zmierzyć dla konkretnego urządzenia, na przykład dla monitora. W modelu RGB za wartość luminancji, a zatem i jaskrawości, przyjmuje się wartość największej składowej RGB.

zamiana RGB na jaskrawość B (*brightness*)

$$B = \max(R, G, B)$$

Uwaga

Regulując jasność monitora tak naprawdę zmieniamy jego jaskrawość. Z kolei w wielu programach graficznych (np. PSP) nawet jeśli coś się nazywa *brightness* to i tak oznacza zmianę jasności, a nie jaskrawości. Nie dziwmy się więc, że programowe przyciemnienie i jednocześnie sprzętowe rozjaśnienie w tym samym stopniu nie zachowa poprawnej kolorystyki obrazu.

Jeżeli przykładowa barwa opisana jest trójką liczb (131,214,58) to jej jaskrawość (luminancja) będzie równa 214. Jeżeli dla monitora, na którym ten kolor jest wyświetlany, maksymalna luminancja wynosi np. 300cd/m^2 to rzeczywista luminancja Y^3 tego koloru będzie równa⁴:

$$Y = \frac{214}{255} 300 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2} \approx 252 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$$

2.3 Modele barw zależne od urządzenia.

W poprzednim rozdziale omówiłem kilka podstawowych modeli barw. Były to: model RGB, model CMY i CMYK, model HSV (lub HSB) oraz HSL. W bieżącym rozdziale wyjaśniło się nieco dokładniej czym są wielkości składowe dwóch ostatnich wymienionych modeli. Istnieje jeszcze kilka innych modeli, których z racji małego pożytku dla grafiki komputerowej omawiać nie będę. Wszystkie omówione dotychczas modele mają jednak jedną podstawową wadę. Reprezentacja dowolnej barwy, w każdym z nich, zależy od urządzenia, na którym barwa będzie wyświetlana (lub reprodukowana w przypadku drukarki). Łatwo sobie wyobrazić, że charakterystyka luminoforu w dwóch różnych monitorach może być nieco inna i zupełnie różna od charakterystyki nemetyków w panelach LCD. W takiej sytuacji, czerwony kwadrat wypełniony kolorem (255,0,0) na każdym monitorze może wyglądać inaczej. Z uwagi na tę cechę modele takie nazywane

modele barw zależne od urządzenia

- 3) Rzeczywistą luminancję przedmiotów często oznacza się dużą literą Y .
4) Przy założeniu, że trójka liczb RGB opisuje barwę po korekcji gamma.

są **modelami barw zależnymi od urządzenia** (*device dependent models*).

2.4 Modele barw niezależne od urządzenia.

Już na początku XX wieku zorientowano się, że istnieje potrzeba stworzenia modelu barw, który byłby niezależny od urządzenia. Model taki opracowano na zlecenie "Commission Internationale de l'Eclairage" (Międzynarodowej Komisji do spraw Oświetlenia). Model został opublikowany w 1931 roku i właściwie obowiązuje do dziś. W międzyczasie powstało kilka nowszych modeli, wszystkie jednak bazują na tym pierwszym. Model ów nazwano CIE XYZ 1931. Podstawą do budowy modelu stworzyło przebadanie grupy około dwudziestu osób prawidłowo rozróżniających kolory. Osobom tym prezentowano w bardzo wąskim polu widzenia (2°) różne barwy i proszono o ich różnicowanie. Na podstawie statystycznej analizy odpowiedzi opracowano model standardowego obserwatora (*standard observer*), który reprezentuje uśrednione możliwości percepcji barw przez człowieka (np. czułość, zakres długości fal, rozdzielczość itp.). Model standardowego obserwatora stał się podstawą do opracowania pierwszego niezależnego od urządzenia modelu barw.

2.5 Model CIE XYZ 1931.

Powstanie modelu poprzedził szereg badań prowadzonych niezależnie przez Davida Wrighta i Johna Guilda w latach dwudziestych XX wieku. Badanym prezentowano plamę światła monochromatycznego o jakiejś barwie, nazwijmy ją C, a tuż obok plamę powstałą ze złożenia trzech światel o barwach podstawowych (R,G,B): czerwonej (700nm), zielonej (546.1nm) i niebieskiej (435.8nm). Zmieniając udziały składowych R, G i B starano się doprowadzić do sytuacji, w której badani przestawali widzieć różnicę, czyli zachodziła równość:

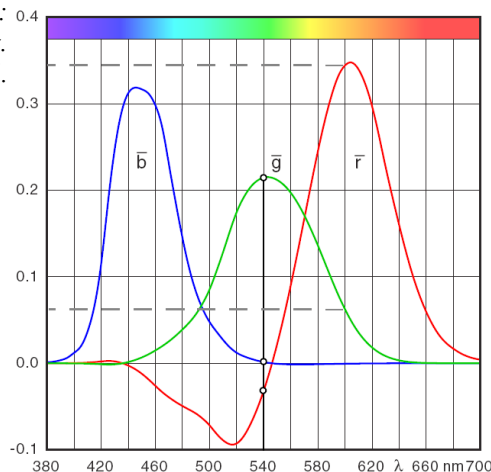
$$C = rR + gG + bB ,$$

gdzie małe litery r,g,b stanowią udziały barw podstawowych.

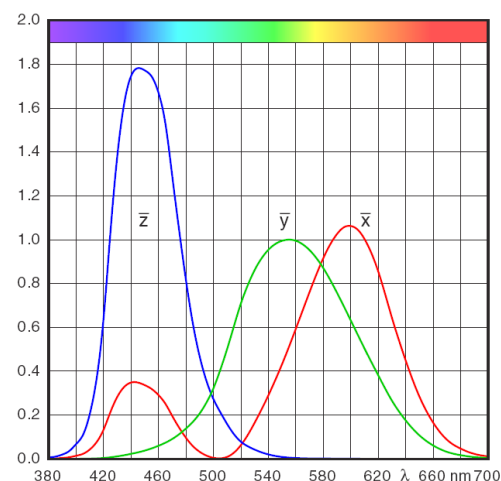
Uśredniając wyniki, skonstruowano tzw. funkcje dopasowujące⁵ (*color matching functions*).

Rysunek 2.6a)

Funkcje dopasowujące:
a) rgb i b) xyz.
Oba rysunki pochodzą z [2].



b)



Rysunek 2.6a należy rozumieć następująco: jeśli zmieszamy światło zielone ze światłem czerwonym w proporcjach około 1 do 5 (odpowiednie wartości na osiach 0.07 i 0.35) to odniesiemy wrażenie, jak gdyby do oka dotarła fala monochromatyczna o długości 600nm, czyli zobaczymy kolor pomarańczowy.

Niestety, w eksperymencie znaleziono takie barwy monochromatyczne, że nie dało się uzyskać identycznego wrażenia barwnego, mieszając trzy podstawowe światła RGB. Trzeba było przenieść czerwone światło i mieszać je ze światłem wzorcowym, czyli jak gdyby odjąć je od mieszaniny:

$$C - rR = gG + bB \quad \rightarrow \quad C = (-rR) + gG + bB$$

stąd ujemne wartości funkcji dopasowującej r.

W 1931 roku komisja CIE zdecydowała na bazie otrzymanych przez Wrighta i Guilda

5) Niestety nie mogę znaleźć polskiego odpowiednika, jeśli ktoś zna, proszę o maila.

funkcji skonstruować nowe funkcje⁶, które nie przyjmowałyby wartości ujemnych (rys.2.6b). Nowe funkcje odpowiadają reakcji hipotetycznych receptorów nazwanych XYZ, które z dobrym przybliżeniem możemy nadal traktować, jako receptory barw podstawowych RGB (z tym drobnym zastrzeżeniem, że X "reaguje" również w zakresie niebieskiej części widma).

W ten sposób uzyskano możliwość opisu dowolnej barwy poprzez podanie trzech liczb dodatnich X Y Z. Zobaczmy, co z tego wynika. Przestrzeń barw sprowadzono do trójwymiarowej przestrzeni Euklidesowej, gdzie każdej barwie odpowiada jakiś wektor w przestrzeni. Co więcej, dzięki prawom Grassmanna wiemy, że sumowanie barw jest równoważne sumowaniu składowych. W przestrzeni XYZ oznacza to, że mieszanie barw będzie tożsame z dodawaniem reprezentujących je wektorów. Zauważmy ponadto, że za odcień i nasycenie barwy, które wynikają jedynie z proporcji pomiędzy barwami podstawowymi, odpowiada kierunek wektora, a za intensywność światła jego długość.

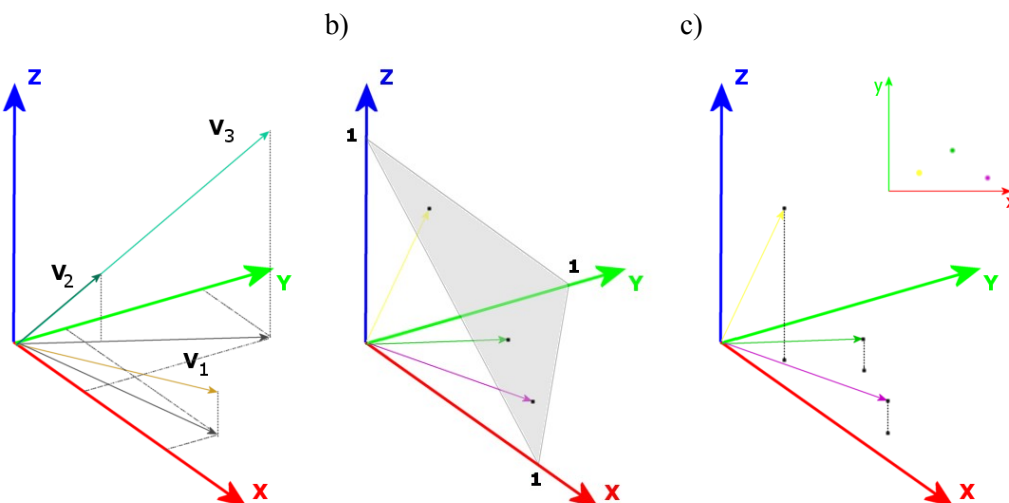
Rysunek 2.7a)

Wektory reprezentujące barwy.

a) V_1 i V_2 reprezentują barwy o różnych odcieniach. V_2 i V_3 reprezentują barwy o tym samym odcieniu lecz różnych jaskrawościach.

b) Płaszczyzna na której znajdują się końce wektorów po przekształceniu.

c) Końce wektorów rzutowane na płaszczyznę xy.



To jednak nie koniec konstrukcji modelu.

Funkcje dopasowujące opracowano w taki sposób (znormalizowano), żeby składowa Y zawsze odpowiadała jaskrawości barwy (*brightness*). Zdecydowano wprowadzić nowe,

6) Formalnie rzecz biorąc, zmieniono bazę przestrzeni wektorowej, przy okazji ją ortogonalizując. Dla zainteresowanych macierz przejścia wyglądała następująco:
$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49 & 0.31 & 0.20 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00 & 0.01 & 0.99 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

przeskalowane współrzędne:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad \text{oraz} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

Z powyższych wyrażeń wynika, że trzecia współrzędna musi być równa: $z = 1 - x - y$, nie ma więc sensu jej podawać, bo zawsze może zostać wyliczona. Z matematycznego punktu widzenia, całą przestrzeń ograniczono jedynie do wektorów, których końce leżą na płaszczyźnie przechodzącej przez wartość "1" na każdej z osi (rys.2.7b). Współrzędne xy w pełni informują o kierunku wektora czyli para liczb (x,y) zawiera w sobie kompletną informację o odcieniu i nasyceniu barwy. Straciliśmy natomiast informację o jaskrawości. Jeśli jednak znamy wartość Y równą luminancji barwy, to możemy odtworzyć pozostałe dwie składowe barwy:

$$X = \frac{Y}{y} x \quad Z = \frac{Y}{y} (1 - x - y)$$

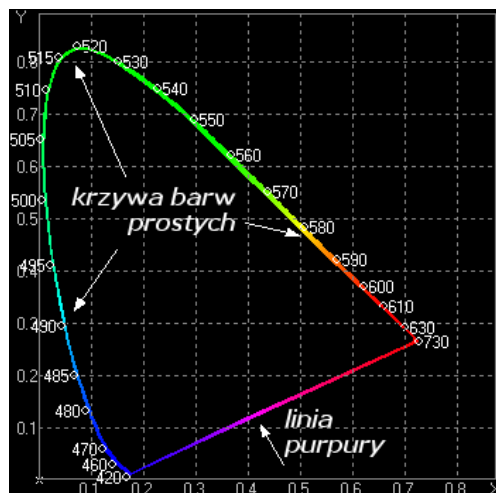
W ten właśnie sposób powstała przestrzeń barw CIE XYZ 1931.

2.5.1 Wykres CIE xyY .

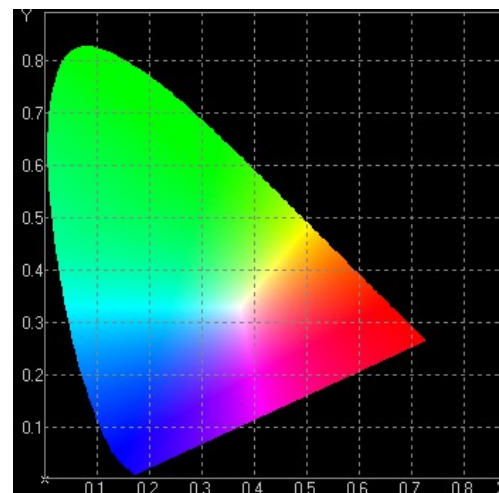
Ze sposobu zdefiniowania zmiennych x i y wynika, że ich wartości nie mogą przekroczyć jedynki. Dlatego cała przestrzeń barw zmieści się na wykresie xy , w kwadracie o jednostkowych długościach boków. Matematycznie, odpowiada to rzutowaniu końców wektorów na płaszczyznę xy (rys.2.7c). W kwadracie tym, wystąpią jednak punkty, które nie odpowiadają żadnemu wrażeniu barwnemu. Na przykład para $(x;y)=(0.9;0.1)$ nie ma odpowiednika w żadnej rejestrowanej przez człowieka barwie. Dlatego na wykresie rysuje się najpierw krzywą odpowiadającą barwom prostym (monochromatycznym), a następnie łączy jej końce linią prostą. Punkty z tej prostej odpowiadają barwom powstałym ze zmieszania barw monochromatycznych występujących na krańcach widma **linia purpury** (fiolet i czerwień) i dlatego linia ta nazywana jest **linią purpury** (rys.2.8a). Wnętrze tak powstałego obszaru zawiera punkty odpowiadające wszystkim możliwym do zaobserwowania przez człowieka barwom, a sam wykres nosi nazwę wykresu chromatyczności CIE xyY (rys.2.8b).

Rysunek 2.8a)

Wykres CIE xyY.
a) linia barw prostych oraz
linia purpury
b) wykres chromatyczności



b)



Należy pamiętać, że na wszystkich wykresach chromatyczności: w książkach, w Internecie i gdziekolwiek je spotkamy, kolory są wyłącznie umowną, poglądową reprezentacją prawdziwych barw. Po prostu, nie istnieje medium, które dysponowałoby możliwością reprodukcji wszystkich barw widzianych przez człowieka.

2.5.2 Własności wykresu CIE xyY.

Wykres CIE xyY posiada szereg interesujących własności.

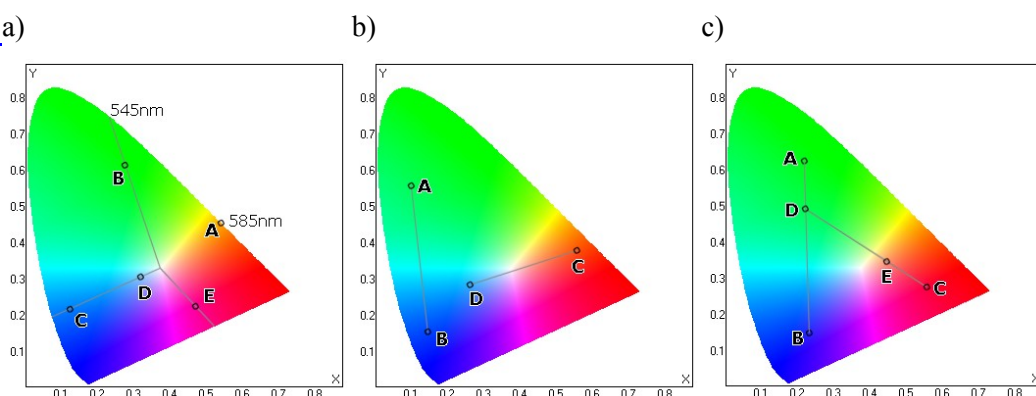
- Wszystkie barwy, które człowiek może dostrzec znajdują się wewnątrz podkowiatego pokolorowanego obszaru.
- Wszystkie barwy monochromatyczne o pełnym nasyceniu znajdują się na zakrzywionej linii ograniczającej obszar widzialnych barw (rys.2.9a - barwa A).
- Wszystkie możliwe fiolety i purpury o pełnym nasyceniu znajdują się na linii purpury.
- Szczególną rolę na wykresie xyY odgrywa centralny punkt o współrzędnych

(0.33...;0.33...). Jest to punkt odpowiadający barwie światła powstałego ze zmieszania fal świetlnych z całego zakresu widzialnego, przy czym energie wszystkich fal są jednakowe. W optyce mówimy o widmie równomiernym energetycznie. Punkt ten odpowiada światłu białemu i będziemy go nazywać punktem bieli. Dokładna definicja tego pojęcia pojawi się w następnym paragrafie.

- Większości barw można przypisać odpowiadającą im długość fali monochromatycznej (rys.2.9a - barwa **B**). W tym celu przez punkt reprezentujący barwę i punkt bieli prowadzimy prostą. Punkt przecięcia prostej z zakrzywioną krawędzią wykresu wyznaczy w pełni nasyconą barwę monochromatyczną odpowiadającą danej barwie.
- Dwie barwy leżące na wspólnej prostej z punktem bieli i leżące po jednej stronie względem tego punktu (rys.2.9a - barwa **C** i **D**) mają ten sam odcień, a różnią się nasyceniem. Im barwa leży bliżej punktu bieli tym ma mniejsze nasycenie. Im barwa znajduje się bliżej krawędzi tym jest bardziej nasycona.
- Pewnym barwom nie da się przypisać pojedynczej długości fali. Są to barwy (rys.2.9a - barwa **E**), dla których prosta wyznaczona przez punkt danej barwy i punkt bieli przecina linię purpury. Takim barwom można przypisać jedynie mieszaninę barwy czerwonej i niebieskiej.

Rysunek 2.9a)

Własności wykresu CIE xyY.



- Jeśli zmieszamy dwa światła o barwie **A** i **B** (rys.2.9b) to wynikowa barwa będzie

Ciekawostka

Często uważa się, że do uzyskania światła białego konieczne jest zmieszanie trzech światel. Nie musi tak być. Dwa światła o odpowiednio dobranych barwach i natężeniach, w wyniku mieszania również mogą dać światło białe.

leżeć na odcinku łączącym punkty **A** i **B**. Dokładne położenie barwy wynikowej zależy od intensywności poszczególnych światel.

- Jeżeli barwy odpowiadające dwóm światłom leżą na jednej prostej z punktem bieli i znajdują się po jego przeciwnych stronach (rys.2.9b - barwy **C** i **D**), to można dobrać takie ich intensywności, że w wyniku zmieszania tych światel uzyskamy światło białe.
- Mieszanie trzech światel o różnych barwach jest równoważne, dwukrotnemu mieszaniiu dwóch światel. Na przykład (rys.2.9c) jeśli chcemy mieszać barwy **A**, **B** i **C**, to najpierw mieszamy **A** z **B**, w wyniku dostaniemy powiedzmy barwę **D**. Następnie, barwę **D** mieszamy z trzecią barwą **C**. Barwa wynikowa będzie leżeć gdzieś na odcinku **CD**.

2.6 Przestrzeń barw.

W paragrafie 1.1 wspomniałem, że dowolną barwę można przedstawić jako sumę trzech barw podstawowych. Odwróćmy zatem sytuację. Jeśli mamy trzy barwy podstawowe, to mieszając je w różnych proporcjach możemy stworzyć wiele nowych barw, choć nie wszystkie możliwe. Z konstrukcji mieszania barw przedstawionej na rysunku 2.9c wynika, że wszystkie barwy możliwe do otrzymania wskutek mieszania trzech barw podstawowych, muszą znajdować się wewnątrz trójkąta, którego wierzchołki

Trójkąt Maxwella

wyznaczone są przez barwy podstawowe. Trójkąt taki nazywamy **Trójkątem Maxwella**. Prawie wszystkie urządzenia wyświetlające barwy (monitory komputerowe, rzutniki, telewizory) tworzą obraz poprzez składanie światła trzech podstawowych barw: czerwonej, zielonej i niebieskiej (RGB). Oczywiście jest, że różne urządzenia będą miały nieco inne barwy podstawowe. Światło czerwone z konkretnego monitora, będzie nieco inne niż światło czerwone z telewizora lub innego monitora. Jeśli więc dla danego urządzenia zmierzmy każdą z barw podstawowych, a odpowiednie współrzędne $R(x;y)$, $G(x;y)$, $B(x;y)$ naniesiemy na wykres CIE xyY , to otrzymamy trójkąt zawierający

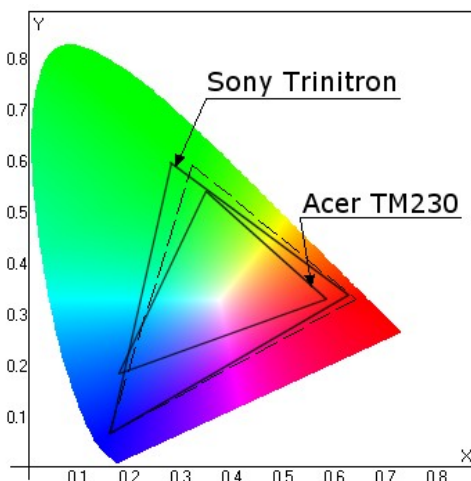
wszystkie barwy możliwe do wyświetlenia na danym urządzeniu (rys.2.10a). Obszar barw możliwy do wyświetlenia, reprodukowania lub rejestracji na danym urządzeniu **gamut urządzenia** nazywamy jego **gamutem**.

Rysunek 2.10a)

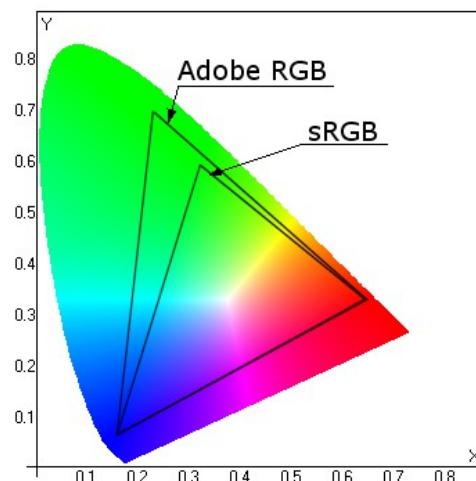
Gamut.

a) Porównanie barw dostępnych w laptopie i na monitorze. Linia przerywaną zaznaczono przestrzeń sRGB.

b) Porównanie przestrzeni sRGB i AdobeRGB.



b)



2.6.1 Punkt bieli.

Mając do dyspozycji trzy barwy podstawowe, światło białe uzyskamy jedynie w przypadku zmieszania ich w jednakowych proporcjach energetycznych. W większości urządzeń wyświetlających obraz maksymalne natężenia światła barw podstawowych są różne. Na przykład w monitorach komputerowych luminofor niebieski świeci znacznie intensywniej niż dwa pozostałe. Dlatego światło barwy RGB(255,255,255) nie będzie miało barwy białej. Podobnie ma się sprawa z innymi źródłami światła. Wyobraźmy sobie, że światło z dowolnego źródła (żarówka, monitor, światło zza okna) kierujemy na białą kartkę papieru i obserwujemy światło od niej odbite. Światło takie często nazywa się światłem białym⁷, a jego barwa określona jest poprzez tzw. **punkt bieli** (*white point*), który zwyczajowo podaje się w postaci współrzędnych x,y albo jako tzw. temperaturę **temperatura barwowa** barwową. **Temperatura barwowa** to wyrażona w Kelwinach temperatura ciała

Uwaga

Przez **białą kartkę papieru** rozumiemy kartkę, która w jednakowym stopniu odbija wszystkie długości fali. W praktyce trudno znaleźć idealnie białą kartkę.

punkt bieli

temperatura barwowa

7) W fizyce pojęcie światła białego zarezerwowane jest dla światła o równomiernym widmie energetycznym. W teorii koloru przez światło białe rozumie się światło, które człowiek postrzega jako białe.

doskonale czarnego⁸, którego widmo promieniowania, wyznaczone zgodnie z teorią Plancka najbardziej przypomina widmo opisywanego światła. W praktyce przemysłowej **iluminaty** stosuje się wzorce światła zwane **iluminatami**. Są to lampy, różnej konstrukcji, wytwarzające światło o składzie widmowym zbliżonym do promieniowania ciała doskonale czarnego, dla danej temperatury barwowej. Poniższa tabela zbiera informacje na temat najpopularniejszych iluminatów.

Iluminat	Temp.	CIE XYZ 1931		opis
		x	y	
A	2856 K	0,44757	0,40744	światło żarówki wolframowej
B	4874 K	0,34840	0,35160	bezpośrednie słońce w południe
C	6774 K	0,31006	0,31615	światło dzienne nieba północnego (wycofane)
D50	5000 K	0,34567	0,35850	światło dzienne, wzorzec dla materiałów drukowanych
D55	5500 K	0,33242	0,34743	światło dzienne, wzorzec dla filmów fotograficznych
D65	6504 K	0,31273	0,32902	światło dzienne nieba północnego (poprawione)
D75	7500 K	0,29902	0,31485	światło dzienne
9300K	9300 K	0,28480	0,29320	światło nieskorygowanego monitora komputerowego
E	5400 K	0,33333	0,33333	światło z równomiernym widmem energetycznym
F2	4200 K	0,37207	0,37512	światło białe fluorescencyjne
F7	6500 K	0,31285	0,32918	szerokopasmowa świetlówka fluorescencyjna
F11	4000 K	0,38054	0,37691	wąskopasmowa świetlówka fluorescencyjna

2.6.2 Zestawienie przestrzeni barwnych.

W celu normalizacji i jednoznacznego określenia zestawu dostępnych barw, wprowadzono pojęcia przestrzeni barwnych definiowanych poprzez podanie trzech barw podstawowych, punktu bieli oraz korekcji gamma. Do najpopularniejszych przestrzeni barwnych należą: sRGB, AdobeRGB, Apple RGB, CIE RGB, PAL/SECAM, Wide Gamut. Gamuty przestrzeni sRGB i AdobeRGB pokazano na rys.2.10b. Poniższe

8) Ciało doskonale czarne to abstrakcyjny obiekt fizyczny, modelujący ciało o doskonałej zdolności emisyjnej i absorpcyjnej. Określenie "czarne" nie ma tutaj związku z jego bezpośrednim wyglądem. Wbrew pozorom jest to pojęcie niesłychanie użyteczne i znalazło wiele praktycznych zastosowań.

zestawienie przestrzeni barw oparte jest częściowo na publikacji [3].

Rada

Kiedy używać przestrzeni sRGB:
- kiedy zależy nam, żeby na dowolnym komputerze mieć takie same barwy,
- kiedy odwzorowanie barw w ogóle nas nie interesuje,
- kiedy zamierzamy oddać zdjęcie do fotolabu, a nic o nim nie wiemy
- kiedy chcemy drukować zdjęcie na drukarce korzystając ze standardowych sterowników.

Przestrzeń sRGB.

Jest to najpopularniejsza przestrzeń barw. Opracowano ją w celu ujednolicenia wyświetlania kolorów na wszystkich możliwych monitorach komputerowych, dlatego zakres dostępnych w niej barw nie przekracza możliwości najsłabszego monitora. Jest to najmniejsza z omawianych przestrzeni. Przestrzeń sRGB jest z założenia podstawową przestrzenią obrazów prezentowanych w Internecie.

	x	y	z
czerwony	0,6400	0,3300	0,0300
zielony	0,3000	0,6000	0,1000
niebieski	0,1500	0,0600	0,7900
punkt bieli	0,3127	0,3290	0,3583

gamma=2.20

Rada

Kiedy używać przestrzeni AdobeRGB:
- kiedy zdjęcia zamierzamy poddawać złożonej obróbce,
- kiedy chcemy drukować korzystając ze specjalistycznych sterowników, wykorzystujących wszystkie możliwości barwne drukarki.

Przestrzeń Adobe RGB.

Znana również pod nazwą SMPTE-240M. Przestrzeń obejmuje nieco więcej kolorów niż sRGB. Niektóre współczesne monitory potrafią już wyświetlać całą przestrzeń AdobeRGB.

	x	y	z
czerwony	0,6400	0,3300	0,0300
zielony	0,2100	0,7100	0,0800
niebieski	0,1500	0,0600	0,7900
punkt bieli	0,3127	0,3290	0,3583

gamma=2.20

Przestrzeń Apple RGB.

Standardowa przestrzeń komputerów firmy Apple. Często wykorzystywana w zastosowaniach typu *Desktop Publishing*.

	x	y	z
czerwony	0,6250	0,3400	0,0350
zielony	0,2800	0,5950	0,1250
niebieski	0,1550	0,0700	0,7750
punkt bieli	0,3127	0,3290	0,3583

gamma=1.80

Przestrzeń CIE RGB.

Jest to dość duża przestrzeń oparta na trzech barwach monochromatycznych wykorzystanych do stworzenia w 1931 roku modelu CIE. Są to światła monochromatyczne o długościach fal: 435.8nm, 546.1nm i 700nm. Przestrzeń tą najczęściej wykorzystuje się przy programowaniu. W obróbce grafiki mało użyteczna.

	x	y	z
czerwony	0,7350	0,2650	0,0000
zielony	0,2740	0,7170	0,0090
niebieski	0,1670	0,0090	0,8240
punkt bieli	0,3333	0,3333	0,3333

gamma=2.20

Przestrzeń PAL/SECAM.

Standardowa przestrzeń używana w telewizji PAL/SECAM.

	x	y	z
czerwony	0,6400	0,3300	0,0300
zielony	0,2900	0,6000	0,1100
niebieski	0,1500	0,0600	0,7900
punkt bieli	0,3127	0,3290	0,3583

gamma=1.95

Przestrzeń Wide Gamut.

Najszerza możliwa do zrealizowania w praktyce przestrzeń barw. Do wytworzenia barw z tej przestrzeni wykorzystuje się światło laserowe o długościach fal: 450nm, 525nm i 700nm.

	x	y	z
czerwony	0,7347	0,2653	0,0000
zielony	0,1152	0,8264	0,0177
niebieski	0,1566	0,0177	0,8257
punkt bieli	0,3457	0,3585	0,2958

gamma=1.20

Przestrzeń Chrome 2000 D65

Bardzo obszerna przestrzeń, choć nie tak bardzo jak Wide Gamut. Przestrzeń ta obejmuje wszystkie barwy możliwe do zarejestrowania i reprodukcji w tradycyjnej fotografii. Przestrzeń ta występuje w dwóch wersjach z punktem bieli w D50 i w D65.

	x	y	z
czerwony	0,6732	0,3070	0,0099
zielony	0,2190	0,6761	0,0571
niebieski	0,0720	0,0169	0,7579
punkt bieli	0,3127	0,3290	0,3583

gamma=1.20

2.6.3 Macierze Bradforda.

W przypadku obrazu drukowanego problem barwy dodatkowo komplikuje się, w porównaniu do obrazu wyświetlanego na monitorze. Barwy postrzegane na wydruku zależą nie tylko od przestrzeni barw dostępnych w urządzeniu drukującym, ale również od oświetlenia, w którym wydruk będzie oglądany. W optymalnej sytuacji punkt bieli przestrzeni, w której obraz był drukowany powinien być zgodny z punktem bieli światła, w którym wydruk będzie oglądany. Jeśli dysponujemy współrzędnymi barw oświetlonych jednym rodzajem iluminatu, to korzystając z macierzy Bradforda możemy wyliczyć współrzędne barw po oświetleniu innym iluminatem. Oto przykład konwersji z iluminatu D65 do iluminatu D50.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}_{D50} = \begin{bmatrix} 1,0478 & 0,0229 & -0,0501 \\ 0,0295 & 0,9905 & -0,0171 \\ -0,0092 & 0,0150 & 0,7521 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_{D65}$$

Macierze Bradforda dla innych konwersji zamieszczone są w pliku *conversions.h* oraz w Dodatku A na końcu skryptu.

2.7 Modele wywodzące się z modelu CIE XYZ.

Model XYZ i związany z nim wykres xyY są niezwykle użyteczne i mimo swojego wieku (to już prawie 80 lat) ciągle powszechnie używane. Model ten ma jednak pewną wadę. Mianowicie, odległości pomiędzy barwami nie odpowiadają subiektywnemu odczuciu różnic jakie odnosi człowiek oglądając porównywane barwy. W szczególności dotyczy to wszelkich rodzajów zieleni. Dwa punkty leżące w niewielkiej od siebie odległości w okolicach niebieskiego czy czerwonego będą odbierane jako dwie różne barwy, natomiast punkty w tej samej odległości w okolicach zieleni mogą być odebrane jako nie różniące się barwą. Aby zaradzić tej niedogodności opracowano kilka nowych modeli, z których dwa najważniejsze opisuję poniżej.

2.7.1 Modele CIE LUV i CIE LU'V'.

W 1960 roku przekształcono zmienne xy w zmienne uv , które miały lepiej oddawać różnice pomiędzy kolorami. Wykonano to poprzez prostą transformację:

$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v = \frac{6y}{-2x + 12y + 3} \quad .$$

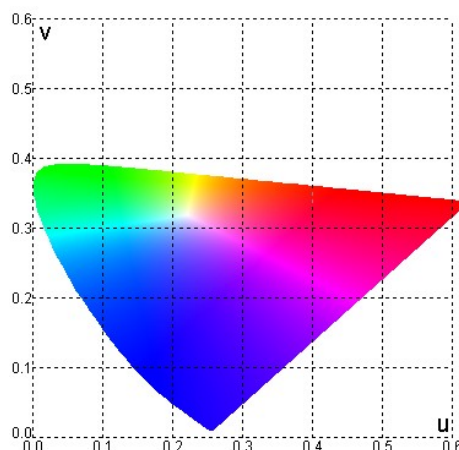
Niestety szybko okazało się, że również ten zestaw zmiennych nie jest najlepszy ponieważ silnie zawężił obszary w okolicach żółci, pomarańczy i brązów, a wszystkie te barwy są bardzo istotne w malarstwie olejnym, obrazach żywności i zdjęciach natury. W 1976 roku wykonano więc kolejną transformację. Tym razem zmienne nazwano u' i v' :

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \quad .$$

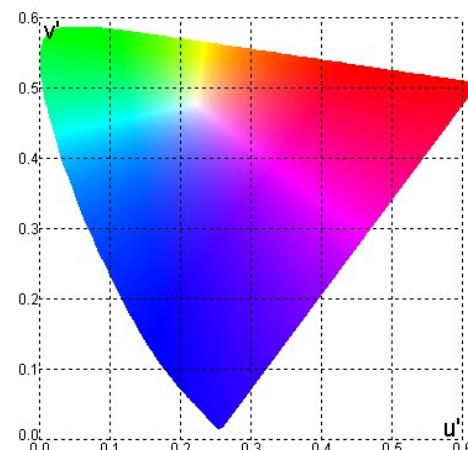
W wyniku obu tych transformacji otrzymano reprezentacje przestrzeni barw pokazane na rysunku 2.11. Poza specjalnymi zastosowaniami, w powszechnym użyciu pozostaje jednak model z 1931 roku. Litera "L" w nazwie modeli pochodzi od słowa "lightness" i pełni analogiczną rolę jak "Y" w modelu xyY.

Rysunek 2.11 a)

a) Wykres CIE uv 1960.
 b) Wykres CIE u'v' 1976.



b)



2.7.2 Model L*a*b*.

W tym samym roku co CIE LU'V' powstał jeszcze jeden model barw model L*a*b*. Jest to drugi po CIE XYZ najczęściej używany model barw niezależny od urządzenia. Tym razem transformacja była nieco bardziej złożona:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - 16 \quad \text{gdy} \quad \frac{Y}{Y_R} > 0,008856$$

$$L^* = 903,3 \frac{Y}{Y_R} \quad \text{gdy} \quad \frac{Y}{Y_R} \leq 0,008856$$

$$a^* = 500 \left[\sqrt[3]{\frac{X}{X_R}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} \right] \quad b^* = 200 \left[\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_R}} \right]$$

Wartości $X_R=94.81, Y_R=100.0, Z_R=107.3$ są parametrami wzorcowego (referencyjnego) punktu bieli, dla której modelowa przestrzeń jest tworzona. Parametr L^* odpowiadający za jasność barwy obliczany jest na dwa sposoby. Jeśli stosunek Y do Y_R jest bardzo mały (czyli barwa jest ciemna) L^* związane jest z luminancją relacją liniową, w przeciwnym

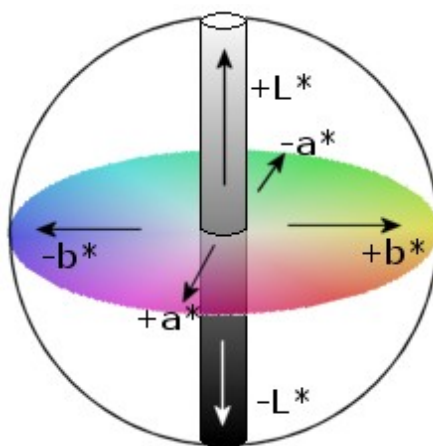
razie relacją potęgową. Zróznicowanie to ma zapewnić dokładniejszy opis barw ciemnych, które są przez oko słabiej rozróżnialne. Parametr a^* z grubsza opisuje odchylenie barwy w stronę czerwonego⁹ (wartości dodatnie) lub zielonego (wartości ujemne). Parametr b^* natomiast charakteryzuje odchylenie barwy w stronę żółtego (dodatnie) i niebieskiego (ujemne).

Rysunek 2.12 a)

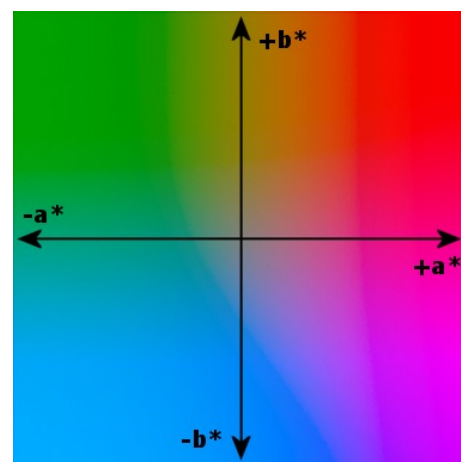
Model barw $L^*a^*b^*$.

a) Reprezentacja trójwymiarowa.

b) Reprezentacja płaska



b)



Model $L^*a^*b^*$ jest szczególnie użyteczny wtedy, gdy chcemy pracować niezależnie na kanale jasności L^* i na kanałach chromatyczności a^* i b^* . Najważniejszą jednak zaletą tego modelu jest łatwość porównywania barw. Różnicę pomiędzy dwoma barwami określonymi parametrami $B_1(L_1^*;a_1^*;b_1^*)$ i $B_2(L_2^*;a_2^*;b_2^*)$ obliczamy jak zwykłą odległość w przestrzeni Euklidesowej:

$$\Delta B = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2}$$

Statystycznie przyjmuje się, że:

- barwy się nie różnią, gdy $\Delta B < 1$,
- gdy $1 < \Delta B < 2$ różnicę zauważa tylko doświadczony obserwator,
- gdy $2 < \Delta B < 3.5$ różnicę zauważa przeciętny obserwator,
- gdy $3.5 < \Delta B < 5.0$ zauważa się wyraźną różnicę barw,
- gdy $\Delta B > 5$ barwy odbiera się jako zupełnie różne.

⁹ Chcąc być bardziej precyzyjnym należałoby powiedzieć magenty.

2.8 System zarządzania barwą.

System Zarządzania Barwą CMS

profile barwne profile urządzenia

Jak to już zostało pokazane na rysunku 2.10a, różne urządzenia potrafią wyświetlać różny obszar barw spośród wszystkich widzianych przez człowieka. Naturalną tego konsekwencją są problemy przy przenoszeniu obrazów z jednego urządzenia na inne. W celu jak najlepszego odwzorowania barw na różnych urządzeniach *Internationa Color Consortium* opracowało **System Zarządzania Barwą (CMS - Color Management System)**. Już system operacyjny Windows 95 dysponował podstawowymi możliwościami zarządzania barwą. Jednak dopiero po wprowadzeniu ICM 2.0 (*Image Color Management*) w Windows 98, system ten stał się prawdziwym standardem¹⁰. Podstawą funkcjonowania każdego systemu CMS są **profile barwne** (albo **profile urządzenia**).

2.8.1 Profile barwne.

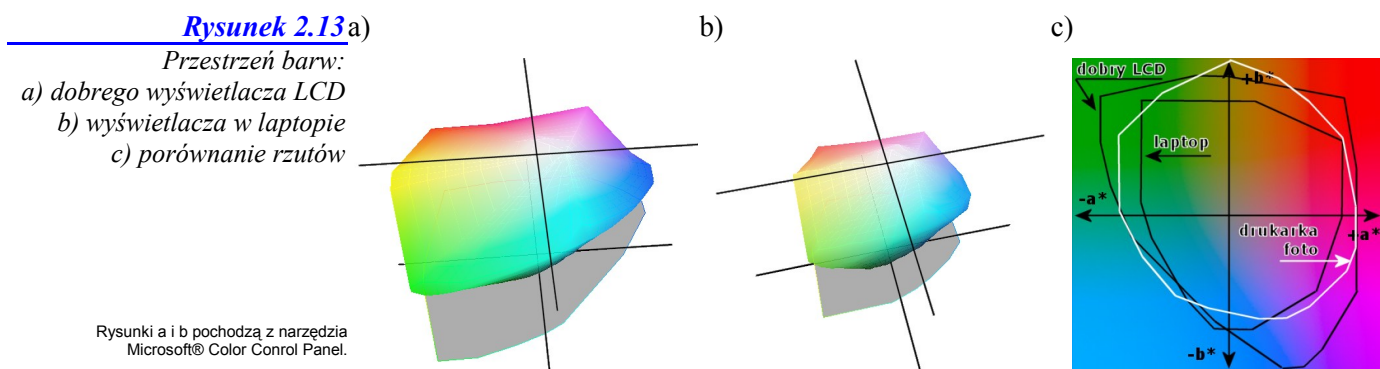
Profil urządzenia to plik zawierający kompletną informację o przestrzeni barw dostępnych dla danego urządzenia wraz z informacją o sposobie przeliczania danych z (do) urządzenia do (z) przestrzeni barw niezależnej od urządzenia.

Poprzez barwy dostępne dla urządzenia należy rozumieć barwy, które na przykład monitor może wyświetlić, drukarka wydrukować, ale również barwy, które skaner lub aparat fotograficzny mogą zarejestrować.

Profil barwny to coś więcej niż tylko wykres chromatyczności dla danego urządzenia. Z wykresu xyY możemy wyczytać informację o wszystkich dostępnych w urządzeniu odcieniach barw i ich nasyceniu, ale nie wiemy nic o intensywnościach (luminancji). Oznacza to, że pewne barwy mogą nie być widoczne jednocześnie. Na przykład soczysta czerwień może być widoczna tylko przy niewielkiej luminancji, a jaskrawa żółć tylko dla barw bardzo jasnych. Wykres xyY nie rozróżnia tych sytuacji. Pełną wiedzę na temat

10) Systemy zarządzania barwą istniały zanim jeszcze pojawiły się komputery osobiste. W tamtych czasach był to jednak problem, który interesował jedynie przemysł poligraficzny. Prawdę powiedziawszy dopiero technika cyfrowa dała możliwość tak precyzyjnego kontrolowania procesów barwnych.

dostępnych barw, uzyskamy analizując trójwymiarowy wykres xyY , gdzie na trzeciej osi zaznaczona będzie luminancja. W praktyce zamiast wykresów xyY często używa się wykresu $L^*a^*b^*$. Przestrzeń barw urządzenia, przedstawiona na takim wykresie, będzie miała postać nieregularnej bryły (rys.2.13 a i b), która zrzutowana na płaszczyznę a^*b^* da wykres chromatyczności (rys.2.13c). Dla porównania na trzecim rysunku umieszczono



rzut przestrzeni barw dobrej drukarki fotograficznej. Z porównania kształtów jasno wynika, że pewnych barw możliwych do odtworzenia na monitorze nie da się wydrukować na drukarce. Sytuacja odwrotna również ma miejsce, choć w znacznie mniejszym stopniu. Dotyczy głównie obszarów turkusowego i żółtego, czyli tych, które w drukarce są "naturalne" z uwagi na model CMYK, a na monitorze muszą powstawać wskutek mieszania światła (model RGB).

PCS - przestrzeń powiązana z profilem

Profile barwne pozwalają na przeliczanie przestrzeni barw urządzenia na jedną z przestrzeni niezależnych od urządzenia i odwrotnie. Mówi się wówczas, że jest to przestrzeń powiązana z profilem i oznacza jako **PCS** (*profile connection space*). Najczęściej jako PCS stosuje się $L^*a^*b^*$, można również spotkać profile powiązane z Lu^*v^* i XYZ. Z teoretycznego punktu widzenia nie ma to znaczenia, ponieważ przejścia między nimi są jednoznaczne. Z praktycznego zaś, jest to pewne utrudnienie, ponieważ w programie musimy być przygotowani na każdą z nich.

profile wejściowe i wyjściowe

Profile konwertujące z przestrzeni urządzenia do przestrzeni niezależnej od urządzenia nazywane są **profilami wejściowymi**. Profile konwertujące z przestrzeni niezależnej do przestrzeni urządzenia **profilami wyjściowymi**. Profile barwne zapisywane są w plikach z rozszerzeniem *.icc (*International Color Consortium*) lub *.icm (*Image Color*

Matching).

2.8.2 Przetwarzanie obrazów oparte na CMS.

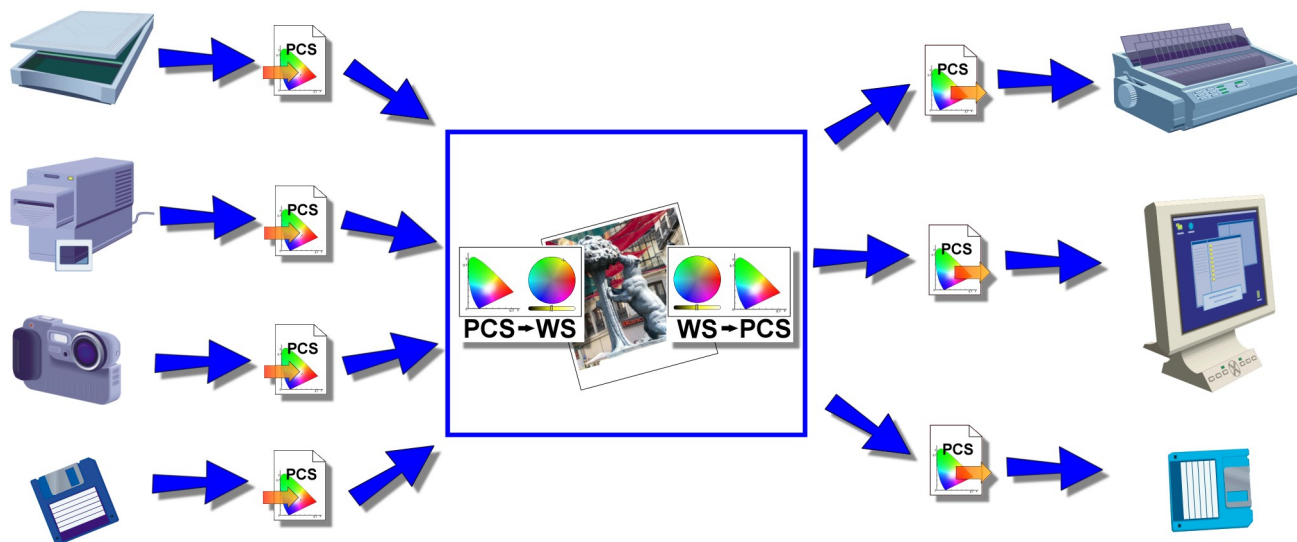
System zarządzania barwą wymaga, aby na każdym etapie obróbki, z obrazem była związana konkretna przestrzeń barw. Ogólny schemat przetwarzania obrazu można przedstawić następująco (rys.2.14):

- Surowe dane na temat obrazu pochodzące prosto z urządzenia (skaner, skaner slajdów, aparat cyfrowy itp.) lub też wczytywane z pliku poddawane są, z wykorzystaniem stosownego PCS, przetworzeniu do przestrzeni barw niezależnej od urządzenia.

Rysunek 2.14

Ogólny schemat przetwarzania obrazów zgodnie z zasadami CMS.

Uwaga! Poniższy rysunek nie uwzględnia korekcji gamma (patrz rozdz. 1.10). Odpowiednie korekcje wykonywane są na wejściu i wyjściu urządzeń zewnętrznych.



WS - robocza przestrzeń barw

- W ramach programu dane konwertowane są z PCS do **roboczej przestrzeni barw** (WS - *working space*), w której będą się odbywały wszystkie operacje w programie.
- W programie obraz cały czas przechowywany jest w przestrzeni roboczej.
- Następnie obraz konwertowany jest z przestrzeni roboczej do przestrzeni

związanej z profilem urządzenia wyjściowego lub pliku do którego obraz będzie zapisywany.

- Obraz konwertowany jest z PCS do przestrzeni barw charakterystycznej dla danego urządzenia.

Rada

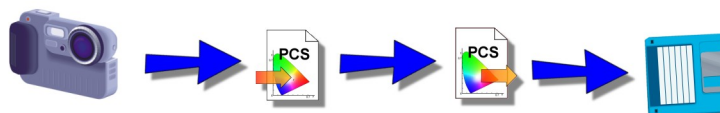
Profil barwny bez problemu osadzi-
my w plikach JPG czy TIFF. W przy-
padku BMP jest to możliwe tylko w
plikach zgodnych ze specyfikacją w
wersji 5.0.

W przypadku pliku z obrazem nie ma fizycznych ograniczeń na obszar dostępnych barw. W związku z tym przestrzeń barw w pliku zależy od decyzji użytkownika. Wiele formatów plików pozwala zawrzeć w pliku (osadzić) profil barwny w jakim zapisano dane.

Oczywiście przy wczytywaniu zdjęć z aparatu lub ze skanera możliwe jest skrócenie toru do postaci przedstawionej na rysunku 2.15.

Rysunek 2.15

*Bezpośredni zapis zdjęcia z
aparatu do pliku.*



Uwaga

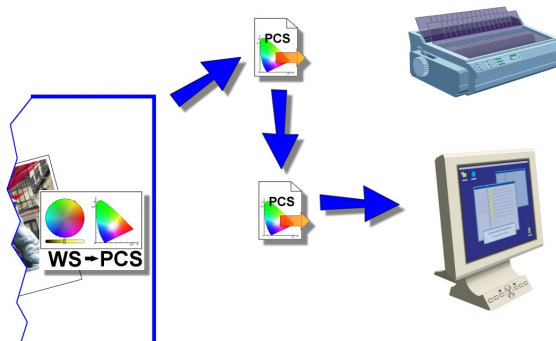
Sterowniki Twain do skanerów nie
obsługują profili barwnych. Jeśli więc
zależy nam na ich wykorzystaniu na-
leży używać oprogramowania dostar-
czonego przez producenta skanera.

W takim przypadku obraz z wewnętrznej reprezentacji w aparacie zamieniany jest do PCS, a następnie bezpośrednio z PCS do przestrzeni w jakiej zostanie zapisany do pliku. Najczęściej jest to sRGB lub AdobeRGB. Czynność ta zachodzi również w aparacie, jeśli zdjęcia zapisujemy w formacie JPG.

proofing Często spotykaną potrzebą jest tzw. **proofing**, czyli symulacja wyglądu obrazu na pewnym urządzeniu (na przykład monitorze) tak jak prawdopodobnie będzie wyglądał na innym urządzeniu (na przykład na drukarce). Wówczas kolejność przetwarzania obrazu jest zgodna z poniższym rysunkiem.

Rysunek 2.16

Proofing.



Obraz z przestrzeni roboczej konwertowany jest do PCS skojarzonej z drukarką, a następnie do PCS skojarzonej z monitorem i dopiero wówczas jest wyświetlany.

2.8.3 Konwersja przestrzeni barw.

Ponieważ przestrzenie barw różnych urządzeń różnią się od siebie konieczne jest stosowanie konwersji. Przestrzenie różnią się nie tylko liczbą barw, ale również ich rozmieszczeniem w pełnej przestrzeni postrzeganych przez człowieka barw. Oznacza to, że pewne barwy możliwe do uzyskania na jednym urządzeniu (obecne w jego przestrzeni) nie będą możliwe do otrzymania w innym urządzeniu, którego przestrzeń ich nie obejmuje. Nie istnieje jedna ogólna i poprawna metoda takiej konwersji. W praktyce stosuje się cztery metody **renderownia¹¹ obrazu** (*rendering intents*) z jednej przestrzeni do drugiej.

renderowanie obrazu
(rendering intents)

maintain full gamut
picture intent
perceptual intent

Metoda zachowująca pełen gamut (obrazowa, percepcyjna).

Gamut jednej przestrzeni jest kompresowany lub rozciągany tak, aby całkowicie wypełnić drugą przestrzeń. W metodzie tej barwy nie zawsze są zachowane. Im większe różnice przestrzeni, tym potencjalnie większe różnice w barwach. Za to w każdej przestrzeni wykorzystujemy jej pełne możliwości.

preserve saturation

Metoda zachowująca nasycenia (graficzna).

W metodzie tej priorytetem jest zachowanie właściwego nasycenia, nawet kosztem zmiany w odcieniach barw.

11) Tak, wiem, że takie słowo w języku polskim nie istnieje i edytor podkreśla mi go po dwakroć. Nie wiem jakim słowem go zastąpić. Póki co wszystkie polskie odpowiedniki brzmią kiepsko w porównaniu do coraz popularniejszego spolszczenia "renderować". Zresztą słowo to w dziedzinie *raytracingu* weszło już do normalnego obiegu. Nazwy metod renderowania też zresztą nie mają ustalonych polskich tłumaczeń.

**match intent
absolute colorimetric**

Metoda zachowująca barwy (dopasowująca, bezwzględnie kolorymetryczna).

Wszystkie barwy występujące w przestrzeni docelowej pozostają zachowane bez zmian. Barwy obecne w przestrzeni wyjściowej, a nie istniejące w docelowej są zamieniane na im najbliższe.

**proof intent
relative colorimetric**

Metoda zachowująca barwy oraz punkt biele (proof, względnie kolorymetryczna).

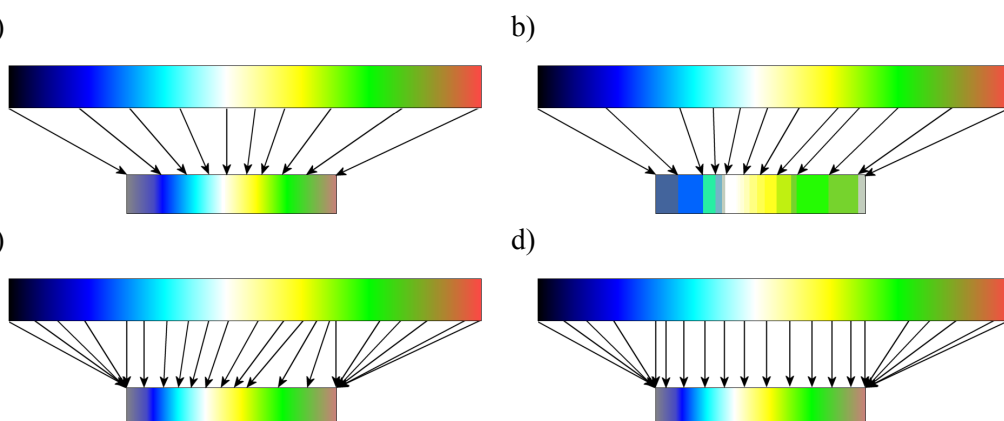
Wszystkie barwy obecne w obu przestrzeniach pozostają zachowane, ale mogą ulec delikatnym przesunięciom. Zmiany te są podyktowane chęcią zachowania nie zmienionego punktu biele obrazu w obu przestrzeniach. Barwy wykraczające poza gamut przestrzeni docelowej przybliżane są barwą najbliższą.

Rysunek 2.17a)

Różne metody renderowania:

- a) percepcyjna
- b) graficzna
- c) względnie kolorymetryczna
- d) bezwzględnie kolorymetryczna.

Uwaga: kolory mają jedynie znaczenie symboliczne i nie odzwierciedlają prawdziwych zmian barw.



Rada

Przed wyborem metody renderowania zawsze warto się przyjrzeć obrazowi, który ma być konwertowany. Jeśli obraz przedstawia na przykład delikatny, pastelowy zamglony poranek nad jeziorem, może się okazać, że obszar barw obecnych w obrazie jest tak mały, że bez problemu mieści się w każdej przestrzeni. Wówczas można z powodzeniem stosować metodę względnie kolorymetryczną.

Do celów fotografii cyfrowej najlepiej używać metody percepcyjnej. Jeśli zależy nam szczególnie na zachowaniu zgodności barw to możemy użyć metody względnie kolorymetrycznej. Metodę zachowującą nasycenie stosuje się wyłącznie w przypadku obrazów przedstawiających wykresy, schematy blokowe itp. Innymi słowy tam, gdzie barak płynnych przejść tonalnych i delikatnych odcieni.

2.9 Często zadawane pytania.

Czy przestrzeń większa jest lepsza ?

Teoretycznie - tak, zawiera więcej barw. Praktycznie - to zależy od rozdzielczości koloru jakim dysponujemy. Dla przykładu, jeśli rozdzielczość jest ośmiobitowa, to na każdy kanał przypada 256 wartości. Przy dużej przestrzeni, efekt kwantyzacji koloru będzie zbyt silny i może prowadzić do posteryzacji. Jeśli dysponujemy rozdzielczością 16 bitów, to efekt ten będzie pomijalny. Pracując z obrazami ośmiobitowymi nie warto wychodzić poza sRGB lub AdobeRGB.

Jakiej przestrzeni używać ?

Zależy od potrzeb, możliwości i trochę od przyzwyczajeń. Osobiście stosuję następującą praktykę:

- Jeśli obraz ma być jedynie wyświetlany na monitorze albo oddany do fotolabu, którego profilu nie znam to używam **sRGB**.
- Jeśli obraz ma rozdzielczość ośmiu bitów na kolor i zamierzam drukować go na dobrej drukarce fotograficznej to używam przestrzeni **AdobeRGB**.
- Jeśli obraz ma rozdzielczość 16 bitów na kolor i zamierzam poddać go złożonej obróbce, zwłaszcza z przenoszeniem pomiędzy programami, to używam przestrzeni **Chrome2000 D65**.
- I zasada naczelna, nie związana za bardzo z tematem, wszystkie oryginały i tak trzymam w RAW-ach, które nie mają własnej przestrzeni barw. Przestrzeń barw jest im przydzielana dopiero na etapie konwersji.

Rada

Obrazy pomiędzy programami należy przenosić poprzez zapisywanie ich do pliku. Schowek Windows nie obsługuje profili barwnych.

Co to jest balans bieli ?

Balans bieli polega na pomiarze barwy na zdjęciu w obszarze, który powinien być neutralnie szary, a następnie takim przesunięciu barw, aby obszar ten rzeczywiście miał zerową wartość odcienia. Dla przykładu jeżeli punkt, który powinien być szary, ma składowe RGB(164,162,198) to oznacza, że obraz jest zaniebieszczony i należy tego

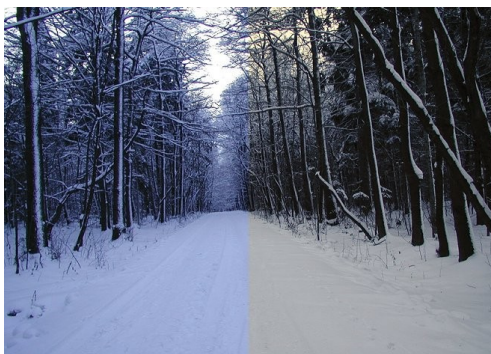
koloru ująć.

Czy zawsze należy balansować biel na zdjęciach ?

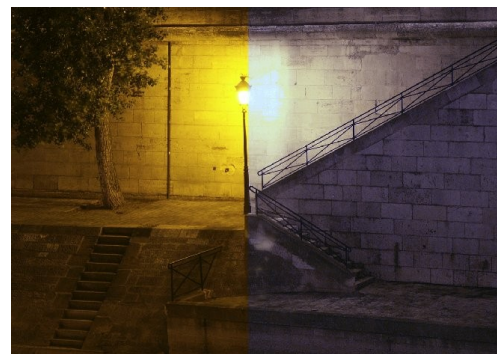
Najczęściej tak, ale nie zawsze. W większości sytuacji zależy nam na jak najwierniejszym oddaniu barw. Żadna panna młoda nie przyjmie tłumaczenia, że ładnie jej w różowym jeśli naprawdę była w białej sukni. Z drugiej strony są sytuacje, w których charakterystyczny klimat zdjęcia budowany jest właśnie przez specyficzne oświetlenie. W takim przypadku balansowanie bieli nie ma sensu.

Rysunek 2.18a)

Przykład udanego (a) i nie udanego (b) zastosowania balansu bieli.



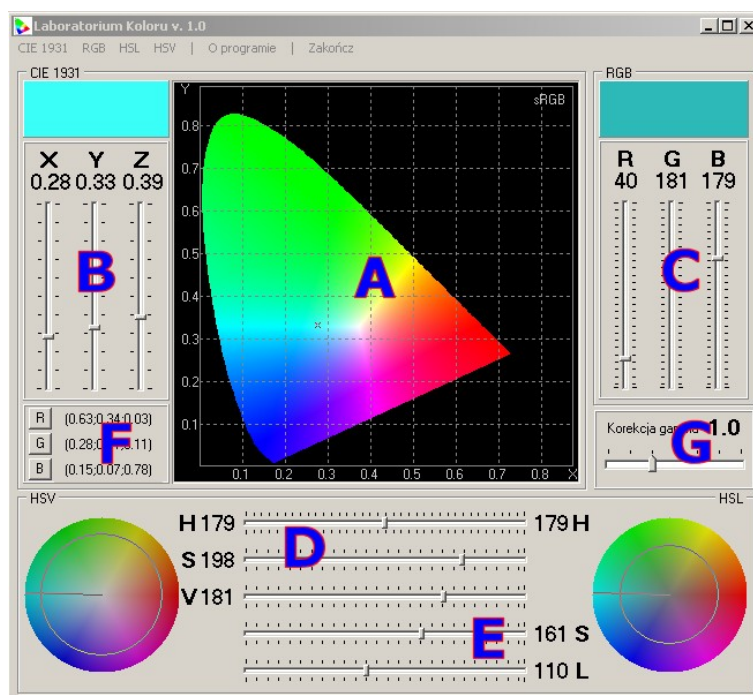
b)



2.10 Kody źródłowe i programy.

W materiałach do skryptu dostępny jest w wersji źródłowej i skompilowanej program **Laboratorium Koloru**. Program umożliwia konwersję barw pomiędzy modelami RGB,

Rysunek 2.19
*Ekran roboczy programu
Laboratorium Koloru.*



HSL, HSV oraz CIE 1931. Główną część okna programu (A) zajmuje wykres chromatyczności xyY. Zmieniając położenie suwaków (B) x i y obserwujemy położenie punktu barwy na wykresie, a suwaki w pozostałych modelach automatycznie aktualizują swoje położenia, w obszarze C dla modelu RGB, w obszarze D dla HSV i w obszarze E dla HSL. Suwak odcienia H jest wspólny dla obu modeli. Korzystając z przycisków w obszarze F możemy zdefiniować własny gamut. W tym celu należy ustawić suwaki x i y na pozycji opisującej barwę czerwoną i wcisnąć przycisk [R], następnie czynności należy powtórzyć dla barwy zielonej [G] i niebieskiej [B]. Suwakiem w obszarze G można również zmieniać korekcję gamma dla modelu RGB, jednak z uwagi na ograniczone możliwości monitora efekty na wykresie xyY będą słabo widoczne. W menu programu można dodatkowo zmieniać parametry wyświetlania wykresu chromatyczności, zaznaczać pozycję standardowych iluminatów na wykresie oraz wybierać różne przestrzenie barwne.

2.10.1 Pliki źródłowe.

Każdy model posiada swoje własne okno, którego kod obsługi znajduje się w pliku z nazwą modelu (modele HSV i HSL połączyłem w jednym pliku): *cie.cpp*, *hsvl.cpp*,

Info

Obsługa plików ICC, ICM oraz renderowanie przestrzeni barwnych zostaną omówione w jednym z następnych rozdziałów przy okazji opisu biblioteki LittleCMS.
--

rgb.cpp. Główne okno programu znajduje się w pliku *main.cpp*, a program główny oraz projekt noszą nazwy *barwa.cpp* i *barwa.bpr*.

Najważniejszym plikiem programu (*conversions.cpp*) jest moduł zawierający wszystkie konwersje pomiędzy poszczególnymi modelami. W pliku tym umieściłem również dziesiątki danych dotyczących parametrów różnych przestrzeni i modeli, charakterystyki widmowe, punkty bieli dla iluminatów, macierze Bradforda i jeszcze parę dodatków.

2.11 Bibliografia.

- [1] Barwa w grafice komputerowej, W. Pastuszak, PWN, Warszawa 2000
- [2] CIE Color Space, G. Hoffmann
www.fho-emden.de/~hoffmann
- [3] A Review of RGB Color Spaces, D. Pascale
www.babelcolor.com/main_level/tutorials.htm
- [4] INTERNATIONAL COLOR CONSORTIUM

<http://www.color.org/>
- [5] COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE

<http://www.cie.co.at/cie/>

Niniejszy tekst jest fragmentem skryptu do wykładu:

Praktyczne wprowadzenie do grafiki komputerowej

Skrypt ten w całości podlega licencji Creative Commons. Szczegółowy opis licencji znajduje się w przedmowie, dostępnej wraz z najnowszą wersją skryptu na stronie:

<http://novell.ftj.agh.edu.pl/~tarasiuk/dydaktyka/gfk/gfk.html>

