

Marek ŻABKA¹¹Katedra Matematyki, Politechnika Śląska, ul. Kaszubska 23, 44-100 Gliwice

Podstawowe modele zapisu koloru i ich zastosowania

Streszczenie.

Widzenie barwy przez człowieka ma charakter subiektywny, a z drugiej strony, w technice, a w szczególności w grafice komputerowej, niezbędny jest obiektywny zapis koloru. W artykule opisano wybrane modele tego zapisu: RGB, CMY, CMYK, HSV, HSL. Te dwa ostatnie, zwane są modelami intuicyjnymi, ponieważ używają pojęć: odcień, nasycenie i wartość lub jasność, chociaż w różny sposób. W każdym z tych modeli możemy użyć określonych wersji dokładności zapisu, uzyskując odpowiednią głębię koloru. Często przybliżamy barwę kolorami wybranej palety, np. dla zapisu w formacie GIF. Oczywiście, idee koloru są ostatecznie realizowane w konkretnych programach i językach programowania. W artykule pokazano, jakie są możliwości wyboru koloru w programach: GIMP, Pain.Net i XnView oraz w językach: $\text{\LaTeX}$ HTML z kaskadowymi arkuszami stylu. Na zakończenie, przedstawiono wzory pozwalające na przeliczanie wartości składowych kolorów między modelami.

Słowa kluczowe: kolor, rgb, cmy, cmyk, hsv, hsl.

1. Wstęp

Świat widzimy w kolorze dzięki falam elektromagnetycznym, o długości od około 380 nm do około 700 nm (por. [12]). Prawie zawsze oglądamy mieszanekę fal, o różnych długościach. Rozszczepienie światła na fale o ściśle określonej długości następuje przy pomocy pryzmatu oraz do pewnego stopnia w tęczy. Barwy uzyskane w ten sposób nazywamy tęcowymi (rys. 1). Kolor postrzegany jako biały jest kompozycją barw tęczy i odpowiada światłu słońca.

Nasze otoczenie najczęściej nie emituje własnego światła, lecz odbija promienie emitowane przez słońce, lampy, itp. Poszczególne źródła światła nie produkują identycznej kombinacji fal elektromagnetycznych, a odbicia są selektywne. Dopiero umysł interpretuje to, co widzi; w związku z tym, kolor zależy nie tylko od źródła, ale i od otoczenia. Obiektywnie inaczej wygląda kolor w słońcu, inaczej w cieniu, a jeszcze inaczej w świetle sztucznym. Bywają sytuacje gdy umysł nie potrafi sobie z tym problemem poradzić, przyjmując ukryte założenia (zależne np. od wcześniejszych doświadczeń). W 2015 roku przez Internet przetoczyła się dyskusja na temat barwy sukienki na zdjęciu, część obserwatorów widziała ją jako białą-żółtą, a część jako niebiesko-czarną (zob. [5, 17]). Powodem był brak tła na zdjęciu, które wyjaśniało by, jak ona była oświetlona.

Kolor i *barwa* są w języku polskim synonimami, aczkolwiek w podręcznikach dotyczących np. druku barwnego, częściej jest używane słowo *kolor* (por. [8]).



Rysunek 1. Zdjęcie tęczy (fot. M.Żabka) oraz idealizacja barw tęczy.

Ponieważ istnieje zmienność genetyczna, zakres widzenia oraz sposób widzenia barw różni się między ludźmi, jednak na podstawie badań, w szczególności osób z wadami widzenia kolorów, przyjmuje się, że człowiek ma dwa rodzaje komórek światłoczułych: pręciki i czopki. Pręciki są bardziej czułe, pozwalają widzieć przy słabym oświetleniu, natomiast przy dziennym świetle ważniejsze są czopki trzech¹ rodzajów. Jeden ma maksimum widzenia w zakresie barwy niebieskiej, następny w zakresie barwy zielonej i ostatni – czerwonej. Człowiek nie jest w stanie dokładnie wyróżnić długości fal składowych², stąd możliwość uzyskania niemal dowolnej barwy za pomocą trzech wyróżnionych barw podstawowych. Jest to wykorzystane w telewizji, filmie, druku barwnym, itd.

Aby poradzić sobie z różnicami między ludźmi oraz z problemem ograniczonej możliwości przekazywania informacji o kolorach przez ich nazwy³, opracowano matematyczne modele barw. Stosowane są również wzorniki kolorów, tam kolor uzyskuje numer w palecie.

W kolejnych rozdziałach pokażemy kilka modeli zapisu koloru, stosowanych w programach komputerowych, w monitorach i w druku. W szczególności omówione zostaną kolory w L^AT_EXu oraz w kaskadowych arkuszach stylu (CSS) na stronach internetowych. Na końcu zostaną podane wzory na przeliczenia między modelami. Oczywiście ten artykuł nie wyczerpuje tematyki, pokazuje tylko najważniejsze informacje.

2. Addytywny model barwy, RGB

Ten model wykorzystuje *dodawanie* kolorów podstawowych, stosowany tam, gdzie światło jest emitowane. Konieczne są 3 kolory składowe: czerwony, zielony i niebieski, zgodnie z maksimami czułości czopków. Po angielsku: **r**ed, **g**reen, **b**lue, stąd nazwa takiej przestrzeni barw: RGB. Oczywiście można użyć światła o ściśle określonej długości lub zwykłych filtrów przepuszczających szersze spektrum. Richard Feynman⁴ zauważył, że dobór kolorów podstawowych można przeprowadzić na wiele sposobów

¹Są doniesienia, że pewna wada genetyczna daje cztery rodzaje czopków, pozwalając na bogatsze wrażenia koloru (zob. [9, 15]).

²W odróżnieniu od ucha, które potrafi dokonać rozkładu fali dźwiękowej na poszczególne częstotliwości.

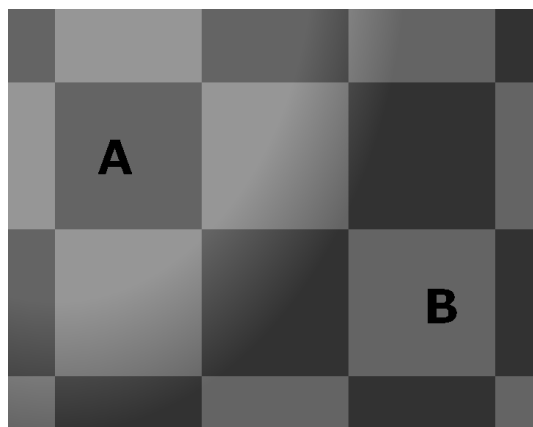
³Każdy spotkał się z sytuacją, kiedy nazwa koloru jakiejś rzeczy zależała od opisującej osoby.

⁴Fizyk zajmujący się głównie elektrodynamiką kwantową, twórca diagramów nazwanych jego nazwiskiem, ułatwiających złożone obliczenia kwantowe.

(por. [6]). Jeden z systemów kinowych 3d, wykorzystał to w ten sposób, że każde oko, dzięki filtrom w okularach, otrzymuje obraz złożony z trochę innych barw składowych ⁵ (zob. [10,13]).

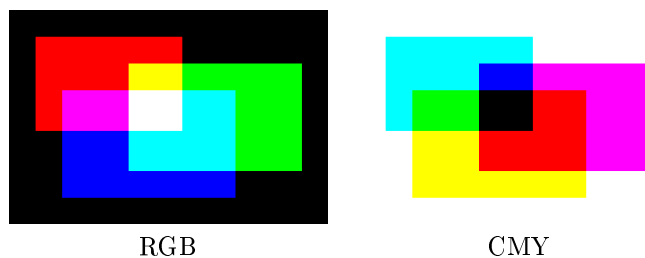
Czarny kolor jest uzyskany przez brak światła, a biały przez maksymalną jego wartość. Mamy więc pewien problem: w oświetlonym pokoju, telewizor musi pochłaniać wszelkie przychodzące światło, aby uzyskać czerń. Z drugiej strony, jak ustalić to maksymalne światło? Na szczęście umysł może dodać interpretację, gdzie jest czarno, a gdzie jest biało. To, że stopień szarości zależy od umysłu można zobaczyć na przykładach obrazów prezentujących pewne złudzenia wzrokowe, np. na rys. 2. w polach oznaczonych literami A i B tło ma ten sam odcień szarości. Istnieją inne podobne iluzje (np. zob. [18,20]).

Postrzeganie takich iluzji bywa przedmiotem badań biologów, np. Gilchrist, na podstawie ciekawej iluzji, analizuje sposób pracy umysłu przy rozkładzie widzianego obrazu na części składowe (zob. [7]).



Rysunek 2. Szachownica.

3. Subtraktywny model barwy, CMY, CMYK



Rysunek 3. Modele koloru.

W tej metodzie, używanej do druku, kartkę oświetlamy światłem, najlepiej białym. Zadrukowana kartka musi pochłoniąć część światła, a część odbić. To światło odbite widzimy jako barwę kartki. Ponieważ kolor końcowy powstaje przez odejmowanie pochłoniętych kolorów, model ma nazwę *subtraktywny*⁶.

⁵Konkurencyjne sposoby opierają się na polaryzacji światła lub na ugięciu światła w pryzmatach.

⁶Od pochodzącego z łaciny angielskiego słowa *subtraction* – odejmowanie.

Druk polega na naniesieniu małych kropek atramentu, który usunie odpowiednie kolory. Stosujemy na ogół kolory, zwane po angielsku: **c**yan, **m**agenta, **y**ellow. Po polsku są stosowane różne nazwy⁷: cyjan (nazywany też kolorem: zielononiebieskim, turkusowym lub czasem – błękitnym), magenta (nazywana też kolorem purpurowym, fuksją lub fioletem) oraz żółty (tu w użyciu jest tylko jedna nazwa).

Istnieje kilka powodów, dla których do kolorów CMY dodajemy atrament czarny. Jednym z nich jest trudność w uzyskaniu ciemnych kolorów. Ciemniejszy kolor wymaga więcej atramentu, stąd sterownik drukarki lub program drukujący, część różnych kolorów CMY zastępuje kolorem czarnym. Innym powodem jest trudność w uzyskaniu za pomocą mieszania barw, szarości i czerni, w szczególności, gdy brakuje któregoś z atramentów. Wydruk nawet tzw. czarno-biały nabierałby jakiegoś barwnego odcienia. Ponadto atramenty i tonery czarne są tańsze od kolorowych.

W języku angielskim słowo czarny to **black**, skąd litera **K**, w określeniu **CMYK**.

4. Głębia koloru

Wybór modelu koloru nie decyduje o tym, z jaką dokładnością zapisujemy każdą składową, czyli ilu bitów używamy do zapisu każdego piksela⁸. Najczęściej stosujemy dla każdej składowej liczbę ośmiobitową, czyli liczbę całkowitą w zakresie 0–255. Model RGB przy tej głębi koloru nazywamy sRGB (od angielskiego określenia: standardised Red, Green, Blue). Ponieważ mamy 3 składowe po 8 bitów, daje to 24 bity na piksel obrazu.



Rysunek 4. Palety pokazane przez program IrfanView

Czasem dla oszczędności pamięci stosujemy tzw. *paletę* kolorów, czyli listę wybranych kolorów, z których każdy jest zapisany jako kolor sRGB. Wymaga tego np. format zdjęć GIF. Programy często pozwalają na dowolną liczbę kolorów między 2 a 256, jednak nie oznacza to, że paleta uzyskuje taki rozmiar. Liczba kolorów w palecie może być równa⁹ 2, 16 lub 256, a część palety może być po prostu nie używana.

Na rys. 4. pokazane zostały cztery przykładowe palety dla tego samego zdjęcia, pokazane przez program IrfanView. Pierwsza ma chaotycznie dobrane kolory, druga ma je bardziej uporządkowane. Standardowe, uporządkowane palety są najczęściej używane przy metodzie Bayer’a ditheringu, co wyjaśnimy w następnym rozdziale. Trzecia paleta została uzyskana przy zmniejszeniu liczby kolorów do 64; czarne kwadraty to nieużywane pozycje tej palety, a ostatnia, zawierająca mniej pozycji, powstała przy zmniejszeniu liczby kolorów do 16.

⁷Nazwy wg słowników, programów graficznych i stron internetowych z atramentami do drukarek.

⁸Obraz w komputerze jest reprezentowany przez dwuwymiarową tablicę (macierz) małych kwadratów, zwanych pikselami.

⁹W teorii również 4, ale nie jest to spotykane w praktyce.

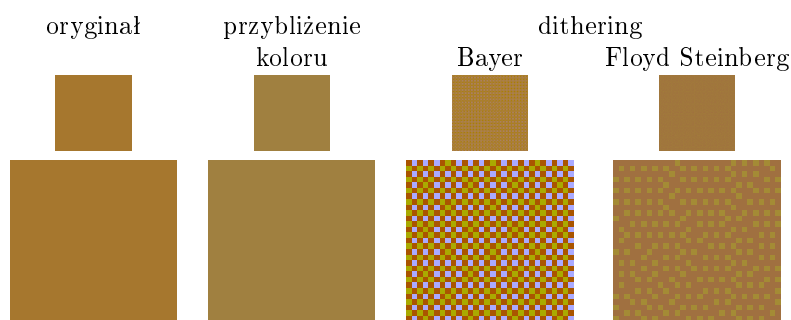
5. Przybliżanie koloru, dithering

Gdy używamy palety barw, mamy do dyspozycji ograniczoną liczbę kolorów. Kolory nie występujące w paletce możemy przybliżać kolorami z palety, jednak ciekawszą możliwością tworzy stosowanie mozaiki pikseli w kolorach z palety tak, że z pewnej odległości widać nowy kolor złożony.

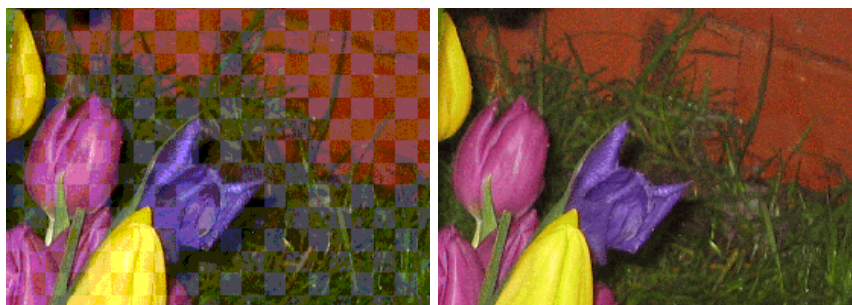
Na rys. 5. w pierwszym rzędzie mamy po kolei: kwadrat w pewnym kolorze, potem kwadrat o kolorze wziętym z pewnej palety, który ma przybliżać wyjściowy kolor, następnie kwadraty są uzyskane za pomocą dithering dwoma metodami: Bayer'a i Floyd Steinberga¹⁰. W dolnym rzędzie są powiększenia kwadratów z górnego rzędu¹¹.

Dithering polega na mieszaniu kolorów palety, dla uzyskania barwy pośredniej. Metoda Bayer'a stosuje powtarzalne standardowe wzorce tworzenia kolorów mieszanych i na ogół standardową paletę barw. W naszym przykładzie są użyte 3 kolory. Ubocznym skutkiem tej metody często jest tzw. efekt mory, czyli pozorne wzory uzyskiwane przy określonych powiększeniach obrazu, jak to widać na rys. 6., lewe zdjęcie.

Metoda Floyd Steinberga, zwana też metodą rozpraszania błędu, polega na pozornie chaotycznym rozmieszczeniu pikseli w różnych kolorach z palety, która jest dobrana do konkretnego obrazu. W naszym przykładzie kwadratu, mamy użyte tylko dwa kolory.



Rysunek 5. Przybliżanie koloru.



Rysunek 6. Efekt mory

Opisane tu metody muszą być stosowane w druku cyfrowym, ponieważ mamy do dyspozycji paletę ograniczoną liczbą atramentów w drukarce.

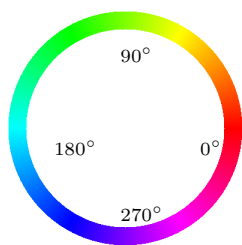
¹⁰Nazwy i działanie tych metod, wg programu XnView

¹¹Czytelnik wersji elektronicznej, może samodzielnie powiększyć dolne obrazy i ocenić, w którym momencie zobaczy kolory składowe.

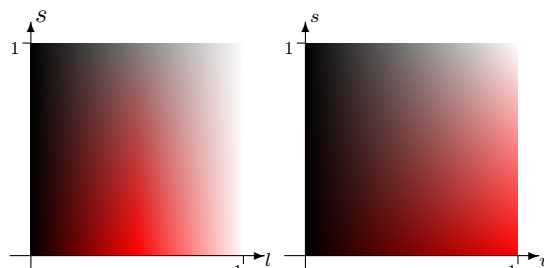
6. Modele koloru: HSV, HSL

Aby lepiej oddać psychologię koloru, opracowano dwa modele: HSV (inaczej HSB) i HSL.

Poszczególne litery oznaczają H – odcień (ang. hue), S – nasycenie (ang. saturation), V – wartość (value), L – jasność (lightness), B – jasność (brightness). Wartość H jest identyczna w obu modelach, natomiast wartość nasycenia zależy w pewnym stopniu od modelu.



Rysunek 7. Koło barw



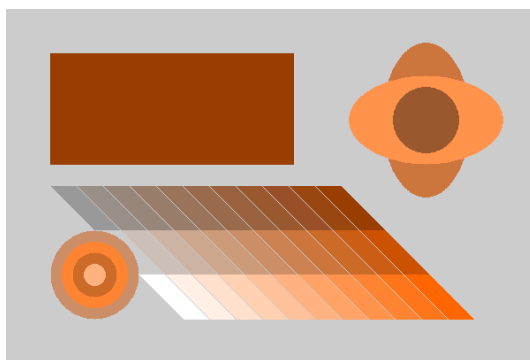
Rysunek 8. Wykresy nasycenia i jasności/wartości dla koloru czerwonego

Odcień H jest interpretowany jako kąt w kole barw. (rys. 7). Koło barw przypomina zwiniętą końcami tęgę. Kolory leżące naprzeciwko się dopełniają, co oznacza, że mieszając te barwy w modelu addytywnym uzyskujemy biel, a modelu subtraktywnym – czerni.

Pozostałe wartości: S, V, L są zazwyczaj podawane w zakresie przedziału domkniętego $[0, 1]$. W modelu HSV, V jest znormalizowaną maksymalną wartością RGB, stąd przy $V = 1$ mamy tzw. czyste kolory. Z kolei L jest średnią z wartości minimalnej i maksymalnej składowej RGB, stąd $L = 1$ daje kolor biały, a czyste kolory wymagają L równe około 0,5.

Na rys. 8. pokazane zostały wykresy koloru dla $H = 0$, względem SL oraz SV.

Na rys. 9. możemy zobaczyć przykładowy, abstrakcyjny, obraz skomponowany z 33 kolorów o tym samym odcieniu (24° w kole barw), ale o różnych nasyceniach i jasności.



Rysunek 9. Kompozycja w jednym odcieniu.

7. Zapis koloru

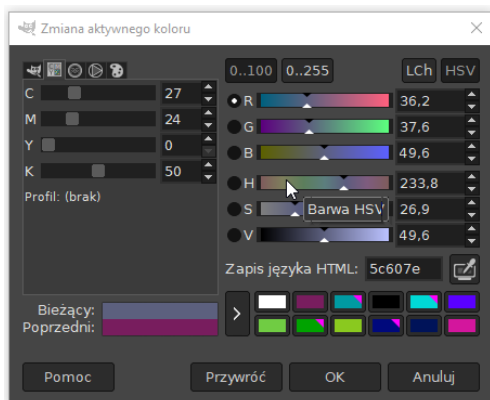
Czasem zapis koloru polega na podaniu nazwy. Jednak często możemy dokładniej ustalić kolor podając model oraz wartości liczbowe. Każdą składową koloru w danym modelu można zapisać liczbami naturalnymi z ustalonego zbioru lub liczbami rzeczywistymi z odpowiedniego przedziału. Prześledzimy ten sposób wyboru na przykładzie wybranych programów.

Zwróćmy uwagę, że są duże różnice w sposobie zapisu koloru, co utrudnia uzyskanie tej samej barwy za pomocą różnych programów i modeli. Zgodność można najłatwiej uzyskać stosując model RGB w opisanej nieco wcześniej, wersji sRGB.

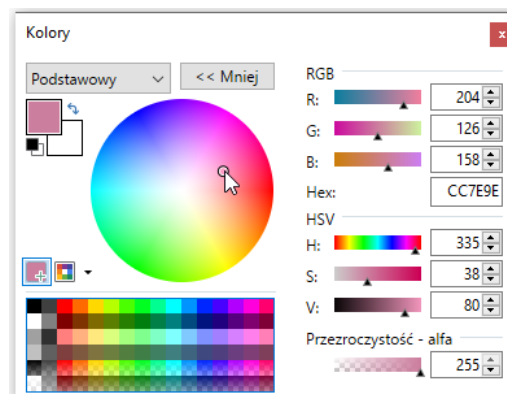
Gimp

Popularny program GIMP¹² dostępny jest na licencji GPL. Ma on duże możliwości wyboru modelu koloru oraz sposobu wyrażenia koloru w liczbach.

Na rys. 10. pokazano jedno z okien zmiany koloru, z pokazaniem stosowanych modeli: RGB, HSV, CMYK oraz tu nie opisanym LCh, który został dodany niedawno do Gimpa. Możemy wybrać zakresy liczb dla RGB 0.0–100.0 lub 0.0–255.0. Model CMYK ma zakres składowych: 0–100 (liczby całkowite), a z kolei model HSV ma zakres odcienia H:0.0–360.0, a nasycenie i wartość w zakresie: 0.0–100.0. Zwróćmy uwagę, na możliwość użycia ułamkowych wartości w większości zakresów, z dokładnością do jednego miejsca po przecinku.



Rysunek 10. Gimp – wybór koloru

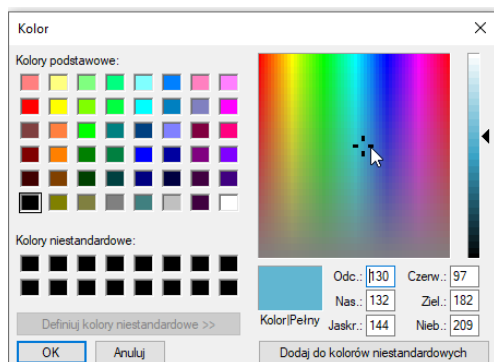


Rysunek 11. Paint.Net – wybór koloru

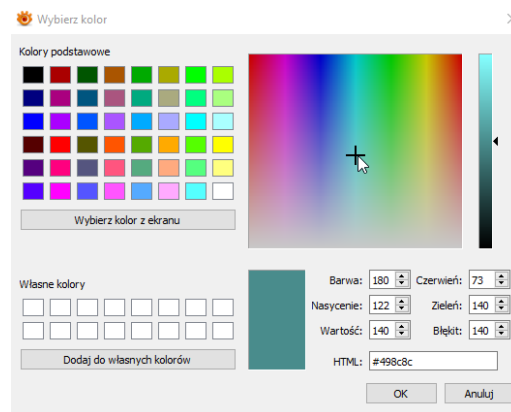
Paint.NET

Bardziej zaawansowanym zastępstwem domyślnego w MS.Windows programu Paint jest Paint.NET. Wybór koloru jest uboższy niż w Gimpie, obejmuje modele RGB oraz HSV. Zakres liczbowy dla RGB: 0–255, odcień H w zakresie 0–360, a nasycenie i wartość w zakresach 0–100, jak pokazano na rys. 11.

¹²Obecnie dostępny w wersji 2.10



Rysunek 12. MS.Windows



Rysunek 13. XnView

MS Windows

Wiele programów, w tym Panit, IrfanView, przeglądarki internetowe (przy wyborze koloru w formularzach), itd., używa standardowego okna wyboru koloru, jak na rys. 12. Używane są modele: RGB, HSL¹³. Zakres liczbowy dla RGB jest standardowy: 0–255, natomiast każda z wartości H,S,L ma dość nietypowe zakresy 0–240.

Warto zwrócić uwagę, że niektóre programy naśladują standardowe okno wyboru koloru, ale mają inne modele, np. XnView na rys. 13. – model HSV.

Programy MS.Office mają z kolei nieco inne okno wyboru, a zakresy HSL: 0–255.

L^AT_EX, pakiet xcolor

Duża część matematyków pisze prace oraz prezentacje stosując system składu T_EX, a dokładniej L^AT_EX. Do użycia koloru można użyć pakietu *xcolor*. Mamy w nim naprawdę dużo metod wybrania koloru. Wszystkie uzyskujemy podając komendę `\color` i odpowiednie opcje. Zainteresowanych szczegółami mechanizmu działania pakietu odsyłamy do [11].

Istnieje pewien predefiniowany zbiór nazwanych kolorów, ale nas w tym artykule interesuje możliwość użycia modeli liczbowych.

Pierwsza, ciekawa i niespotykana w innych programach, jest możliwość bezpośredniego podania długości fali: `\color[wave]{470}` (fiolet).

Pozostałe możliwości są zapisane w tabeli 1; są to różne wersje modeli RGB, CMY, CMYK oraz HSV (tu pod nazwą HSB), każdy przykład daje ten sam kolor¹⁴: (fiolet).

Pomijamy tu kilka sposobów opisu koloru nie związanych tak prosto z opisywanymi w artykule modelami, a mianowicie: tHsb, gray, Gray.

Oczywiście, ci co znają T_EXa nie będą zaskoczeni, że można przeddefiniować wartości używane w zakresach, czyli stałe reprezentujące liczby 240, 360 oraz 255. Można też zdefiniować własne nazwy kolorów oraz jest możliwość mieszania nazwanych kolorów (również własnych).

¹³Po polsku: odcień, nasycenie, jaskrawość.

¹⁴Dokładniej mówiąc, aby uzyskać ten sam kolor należy użyć jednej z opcji pakietu *xcolor*: rgb, RGB, hsb, HSB, HTML, cmy, cmyk.

Tabela 1. Zapisy koloru w pakiecie xcolor

Model	Zakres liczb	Przykład
RGB	$R, G, B \in \{0, 1, \dots, 255\}$	<code>\color{RGB}{128,77,179}</code>
rgb	$0 \leq r, g, b \leq 1$	<code>\color{rgb}{0.5,0.3,0.7}</code>
HTML	000000–FFFFFF	<code>\color{HTML}{804DB3}</code>
cmY	$0 \leq c, m, y \leq 1$	<code>\color{cmY}{0.5,0.7,0.3}</code>
cmYk	$0 \leq c, m, k, y \leq 1$	<code>\color{cmYk}{0.2,0.4,0,0.3}</code>
hsb	$0 \leq h, s, b \leq 1$	<code>\color{hsb}{0.75,0.57,0.7}</code>
HSB	$H, S, B \in \{0, 1, \dots, 240\}$	<code>\color{HSB}{180,136,168}</code>
Hsb	$H \in \{0, 1, \dots, 360\}, 0 \leq s, b \leq 1$	<code>\color{Hsb}{270,0.57,0.7}</code>

Język HTML z kaskadowymi arkuszami stylu CSS

Na stronach internetowych pisanych językiem HTML, kolory są najczęściej ustawiane kaskadowymi arkuszami stylu CSS. Obecnie możemy użyć dwóch modeli¹⁵: RGB oraz HSL (ale już nie HSV, jak np. w Gimpie lub L^AT_EXu).

W modelu RGB mamy możliwość użycia wartości procentowych (zamiast liczb z przedziału $[0, 1]$) lub wartości ze zbioru $\{0, 1, \dots, 255\}$ zapisywanych jako liczba dziesiętna lub heksadecymalna. W przypadku HSL, używamy tylko zapisu H jako kąt z przedziału $[0, 360)$, a pozostałe wartości są zapisywane procentowo.

Poniżej został zapisany ten sam kolor tła:

```
#A {background-color:rgb(100, 200, 150);}
#B {background-color:hsl(150, 48%, 59%);}
```

8. Przeliczanie między modelami

Przy próbie użycia różnych modeli koloru, jak RGB, HSV lub HSL itd. napotykamy problem przeliczania wartości. Zauważmy, że rzadko możemy w jednym programie używać obu modeli intuicyjnych. Powstaje konieczność przeliczania kolorów.

Dla przeliczeń przyjmujemy następujące założenia: wartości $r, g, b, s, v, l, c, m, y, k$ są liczbami rzeczywistymi z zakresu 0 do 1, a wartość odcienia h jest liczbą rzeczywistą z zakresu 0 do 360. Gdy potrzebne są inne zakresy należy przeskalać liczby. Wyniki obliczeń mogą nieznacznie różnić się od uzyskanych w programach, co wynika z różnic w zaokrągleniach wyników do liczb całkowitych.

RGB $\leftrightarrow$ CMY(K)

Wartości w modelu CMYK oznaczmy przez c_k, m_k, y_k . W teorii przeliczenie jest łatwe, najczęściej (np. na stronach [2, 3, 14] lub w programie Gimp) używane są wzory:

$$\begin{cases} c = 1 - r, \\ m = 1 - g, \\ y = 1 - b, \end{cases} \quad \begin{cases} c_k = (c - k)/(1 - k), \\ m_k = (m - k)/(1 - k), \\ y_k = (y - k)/(1 - k), \\ k = \min\{c, m, y\}. \end{cases} \quad (1)$$

¹⁵Pomijając nazwane kolory.

Wzory te sugerują pełną możliwość przeliczania z modelu RGB do CMY oraz CMYK. Jednak szereg źródeł (np. [4, 8, 16]) sugeruje, że przestrzeń CMYK używana w druku jest mniejsza od RGB.

W pakiecie L^AT_EXa XColor (zob. [11]), autor kierując się podręcznikiem Postscriptu¹⁶ [1] wprowadza inne wzory dla CMYK, zwracając uwagę na ich zależność od drukarki:

$$\begin{cases} c_k = (c - f_c(k)), \\ m_k = (m - f_m(k)), \\ y_k = (y - f_y(k)), \\ k_k = f_k(k), \end{cases} \quad \text{gdzie } k = \min\{c, m, y\}.$$

Domyślnie przyjmowane jest $f_c(k) = f_m(k) = f_y(k) = f_k(k) = k$. Jednym z powodów innego przeliczania kolorów jest fakt, że tonery lub atramenty mają nieco inną barwę niż teoretyczne Cyjan, Magenta, Yellow¹⁷.

Wzory odwrotne do (1) mają postać:

$$\begin{cases} r = 1 - c, \\ g = 1 - m, \\ b = 1 - y, \end{cases} \quad \begin{cases} r = (1 - c_k)(1 - k), \\ g = (1 - m_k)(1 - k), \\ b = (1 - y_k)(1 - k). \end{cases}$$

RGB $\longrightarrow$ HSV, HSL

Przy przeliczeniu do modeli HSV oraz HSL bierzemy pod uwagę, że odcień h jest w tych modelach identyczny, natomiast wartość nasycenia s nie. Ponadto, kolor czarny nie ma określonego nasycenia, a kolory szare ($r = g = b$) nie mają odcienia h .

Oznaczmy: $M = \max\{r, g, b\}$, $m = \min\{r, g, b\}$.

Odcień h jest nieokreślony, gdy $M = m$, czyli dla równych wartości $r = g = b$. Gdy natomiast $M \neq m$, odcień wyliczamy wzorem

$$h = \begin{cases} 60 \cdot \frac{g - b}{M - m}, & \text{gdzie } M = r \wedge g \geq b, \\ 360 - 60 \cdot \frac{b - g}{M - m}, & \text{gdzie } M = r \wedge g < b, \\ 120 + 60 \cdot \frac{b - r}{M - m}, & \text{gdzie } M \neq r \wedge M = g, \\ 240 + 60 \cdot \frac{r - g}{M - m}, & \text{w pozostałych przypadkach.} \end{cases}$$

Odrębnie dla modeli HSV, HSL wyznaczamy pozostałe wartości:

$$v = M \quad \text{oraz} \quad s_{\text{HSV}} = \begin{cases} \text{nieokreślona}, & \text{gdzie } M = 0, \\ \frac{M - m}{M}, & \text{gdzie } M \neq 0. \end{cases}$$

¹⁶Język druku cyfrowego firmy Adobe.

¹⁷Np. Wikipedia [19] podaje: cyjan: RGB=0,180,247, zamiast: 0,255,255, magenta: RGB=255,0,144, zamiast: 255,0,255 oraz żółty: RGB=255,239,0, zamiast: 255,255,0.

$$l = \frac{M+m}{2} \quad \text{oraz} \quad s_{\text{HSL}} = \begin{cases} \text{nieokreślona,} & \text{gd}y \ M = 0 \vee m = 1, \\ \frac{M-m}{M+m}, & \text{gd}y \ l < \frac{1}{2} \wedge M > 0, \\ \frac{M-m}{2-(M+m)}, & \text{gd}y \ l \geq \frac{1}{2} \wedge m < 1. \end{cases}$$

HSV $\longrightarrow$ RGB

$$(r, g, b) = \begin{cases} (v, z, x), & \text{gd}y \ E[h/60] = 0, \\ (y, v, x), & \text{gd}y \ E[h/60] = 1, \\ (x, v, z), & \text{gd}y \ E[h/60] = 2, \\ (x, y, v), & \text{gd}y \ E[h/60] = 3, \\ (z, x, v), & \text{gd}y \ E[h/60] = 4, \\ (v, x, y), & \text{gd}y \ E[h/60] = 5, \end{cases} \quad \text{gdzie} \quad \begin{cases} f = h - E[h/60], \\ x = v \cdot (1 - s), \\ y = v \cdot (1 - s \cdot f), \\ z = v \cdot (1 - s \cdot (1 - f)). \end{cases}$$

gdzie $E[u]$ oznacza część całkowitą z liczby u .

HSL $\longrightarrow$ RGB

Liczmy po kolei:

$$\begin{aligned} q &= \begin{cases} l \cdot (1 + s), & \text{gd}y \ l < 1/2, \\ l + s - s \cdot l, & \text{gd}y \ l \geq 1/2, \end{cases} \\ p &= 2 \cdot l - q, \\ d &= (q - p), \\ h_0 &= h/60, \\ (r, g, b) &= \begin{cases} (q, p + h_0 d, p), & \text{gd}y \ E[h_0] = 0, \\ (p + (2 - h_0)d, q, p), & \text{gd}y \ E[h_0] = 1, \\ (p, q, p + (h_0 - 2)d), & \text{gd}y \ E[h_0] = 2, \\ (p, p + (4 - h_0)d, q), & \text{gd}y \ E[h_0] = 3, \\ (p + (h_0 - 4)d, p, q), & \text{gd}y \ E[h_0] = 4, \\ (q, p, p + (6 - h_0)d), & \text{gd}y \ E[h_0] = 5. \end{cases} \end{aligned}$$

Podziękowania

Autor pragnie podziękować córce za pierwsze czytanie oraz recenzentom za trud włożony w recenzje.

Literatura

1. Adobe Systems Incorporated, *PostScript Language Reference Manual* Addison-Wesley, wydanie trzecie, 1999.
<https://www.adobe.com/content/dam/acom/en/devnet/actionscript/articles/PLRM.pdf>.
2. Code Beauty, Aplikacja internetowa, <https://codebeautify.org/rgb-to-cmyk-converter>.
3. ColorMine, Aplikacja internetowa, <http://colormine.org/convert/rgb-to-cmyk>.

4. Copy General, *Różnica pomiędzy przestrzenią kolorystyczną CMYK a RGB*,
<https://copygeneral.pl/article/roznica-pomiedzy-przestrzenia-kolorystyczna-cmyk-a-rgb>.
5. J. Corum, *Is That Dress White and Gold or Blue and Black?* The New York Times, (27.02.2015),
<https://www.nytimes.com/interactive/2015/02/28/science/white-or-blue-dress.html>.
6. R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, Tom 1.2, PWN, Warszawa 2001.
7. A. Gilchrist, *Lightness Perception: Seeing One Color through Another*, Current Biology Vol 15 No 9, Psychology Department, Rutgers University, Newark, New Jersey 07102, USA,
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.04.028>.
8. H. Johnson, *Drukowanie cyfrowe dla profesjonalistów*, Wydawnictwo RM, Warszawa 2005.
9. G. Jordan, S. Deeb, J. Bosten; J. Mollon, *The dimensionality of color vision in carriers of anomalous trichromacy*, Journal of Vision Volume 10, Issue 8, (2010),
https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2191517&fbclid=IwAR0CAFFPh69vVRaHpwybsCUfZg144foBu_GGTcjEM0dLvB-iAPJTfScAJkSw.
10. Helmut Jorke, Markus Fritz, *infitec - a new stereoscopic visualisation tool by wavelength multiplex imaging*, Journal of Three Dimensional Images, Volume 19, Number 3, (2005) str. 50-56.
11. U. Kern, *Extending LATEX's color facilities: the xcolor package*, Manual, v2.11, (21.01.2007)
<https://www.ctan.org/pkg/xcolor>.
12. M. Maroszyńska, *Fenomen ludzkiego oka*, Portal Biotechnologia.pl, (17.07.2013),
<https://biotechnologia.pl/biotechnologia/artykuly/fenomen-ludzkiego-oka,12617>.
13. NowoczesneKino.pl System 3D. http://www.nowoczesnekino.pl/kino-cyfrowe,15/system-3d,135/system-3d_,3452.html.
14. Rapid Tables, Aplikacja internetowa,
<https://www.rapidtables.com/convert/color/rgb-to-cmyk.html>.
15. T. Rożek, *Widzę więcej*, Gość Niedzielny, 21, (2017),
<https://www.gosc.pl/doc/4113748.Widze-wiecej>.
16. Signs.pl, *RGB-CMYK - zamieniać, czy nie?*, Serwis internetowy, ISSN 2657-4764, (15.10.2003),
<https://www.signs.pl/rgb-cmyk--zamieniać-czy-nie,1885,artykul.html>.
17. A. Stanisławska *Jakiego koloru jest sukienka?*, Portal Crazy Nauka, (19.05.2015),
<https://www.crazynauka.pl/jakiego-koloru-jest-sukienka-naukowcy-wyjasniaja-internetowy-problem>.
18. TechPedia, *Iluzja optyczna - niebieskie linie są równoległe*, Portal internetowy,
<https://www.techpedia.pl/index.php?str=tp&no=28798>.
19. Wikipedia, *Lista kolorów*, https://pl.wikipedia.org/wiki/Lista_kolorów.
20. Witrualna Polska, *Jaki kolor mają obie płytki?*, Portal internetowy,
<https://tech.wp.pl/iluzje-optyczne-jak-nasz-wlasny-mozg-nas-oszukuje-6035087212749953g/2>.