



Wrażenia barwne – jak je mierzyć?

Janusz Jaglarz

Politechnika Krakowska

1. Widzenie barwne jako proces psychofizyczny

Barwy w życiu człowieka odgrywają niezwykle istotną rolę, związaną nie tylko z czysto fizycznym rozpoznawaniem i rozróżnianiem otaczających nas przedmiotów i zjawisk, ale wpływają także na naszą psychikę czy nastrój poprzez odpowiednio dobrane kompozycje barwne. Widzenie barwne jest właściwie procesem zarówno fizycznym jak i fizjologicznym oraz psychicznym. W warstwie fizycznej następuje rejestracja promieniowania świetlnego na siatkówce oka. Siatkówkę oka można przyrównać do pewnego rodzaju światłoczułej matrycy, na której znajdują się receptory widzenia barwnego, zwane czopkami, reagujące na światło o określonej barwie.

Oprócz czopków w siatkówce znajdują się również pręciki, które rejestrują jedynie natężenie światła, bez możliwości jego analizy barwnej. Pod wpływem padającego na siatkówkę promieniowania, w wyniku reakcji fotochemicznej, którą w największym uproszczeniu można nazwać fizjologią procesu widzenia barwnego, substancje białkowe zawarte w czopkach, zwane opsynami, reagują na światło absorbując poszczególne składowe promieniowania barwnego.

Istnieją trzy rodzaje opsyn: absorbujące światło niebieskie, zielone i czerwone. Umożliwiają one barwne widzenie dzienne. Brak jednej z opsyn (np. czerwonej lub zielonej) powoduje niezdolność rozróżniania pewnych barw. Nie jest to jednak całkowita ślepotą barwną. Świat barw człowieka dotkniętego tą wadą jest uboższy niż ludzi posiadających trzy substancje światłoczułe. Osoby reagujące prawidłowo na trzy podstawowe barwy (czerwień, zieleń i barwę niebieską) nazywa się trichromatami (ich oczy reagują na trzy kolory podstawowe), osoby reagujące jedynie na dwie podstawowe barwy nazywamy dichromatami (ich oczy rozróżniają dwa kolory podstawowe – koty też są dichromatami, ponieważ posiadają tylko dwa rodzaje czopków reagujących na barwy podstawowe). Świat dichromatów nie jest aż tak bardzo ubogi we wrażenia barwne, czego przykładem może być wielu malarzy (nawet kolorystów) tworzących swe dzieła w niezwyklej tonacji barwnej dostępnej ich percepcji. Trzecią warstwą procesu widzenia jest nie mniej ważny, psychiczny odbiór barwy, związany z oddziaływaniem produktów rozkładu opsyn z nerwem wzrokowym i przesłaniem sygnału do płatu mózgowego odpowiedzialnego za rejestrację procesu widzenia. Analiza psychiczna barwy przez mózg prowadzi dalej do estetycznej oceny barwy – zależnej od indywidualnej wrażliwości danej osoby na kolor.

2. Barwy proste i złożone

Barwa, jej istota, pochodzenie a także jej pomiar były od wieków przedmiotem dysput naukowych i filozoficznych, zwłaszcza od czasów, gdy Newtonowi udało się rozszczepić światło białe za pomocą pryzmatu. Wielu wybitnych fizyków, jak choćby wspomniany Newton, Helmholtz, Maxwell, a nawet wielki poeta Goethe, próbowało stworzyć teorię barw, i w sposób mniej lub bardziej naukowy opisać wielość barw w przyrodzie. Kolejne odkrycia przybliżyły nas do rozumienia natury światła.

To, co oko ludzkie odbiera jako różnobarwne światło, jest w rzeczywistości falą elektromagnetyczną pochodzącą z wąskiego pasma długości fal świetlnych, między 400 a 760 nanometrami, dając w efekcie widmo sięgające od fioletu (fale najkrótsze) do czerwieni (fale najdłuższe). Jest to bardzo wąski wycinek w ogromnym zakresie widma promieniowania elektromagnetycznego, które rozciąga się od fal gamma o długości rzędu 10^{-15} m aż do fal radiowych mierzonych w dziesiątkach kilometrów. W związku z powyższym naturalnym może się wydać pytanie: dlaczego akurat na takie promieniowanie, z tak wąskiego zakresu widma elektromagnetycznego i w takim a nie innym przedziale reaguje nasze oko? Odpowiedź jest bardzo prosta: słońce jako źródło promieniowania świetlnego emituje ponad 50% energii promieniowania w zakresie fal 400–760 nm, podczas gdy np. w zakresie fal ultrafioletowych tylko 5%. Narząd widzenia człowieka oraz innych istot żyjących w wyniku ewolucji dostosował się więc do odbioru tych fal świetlnych, których dostępność na Ziemi jest największa. Chociaż i tutaj istnieją pewne różnice w percepcji fal świetlnych, np. owady widzą fale nadfioletowe krótsze niż 400 nm, podczas gdy absolutnie niewidoczna jest dla nich czerwien widmowa, odpowiadająca falam dłuższym niż 700 nm, barwę monochromatyczną, wyróżnioną z widma światła Newton nazwał barwą czystą albo barwą prostą, której – jak pisał – „nic nie może zmienić”. Do barw czystych zaliczamy np. barwy tęczy oraz barwy otrzymane przez rozszczepienie pryzmatem światła białego.

Większość barw występujących w przyrodzie to jednak barwy złożone, powstałe ze zmieszania wielu barw prostych.

3. Atrybuty barw

Każdą barwę można zdefiniować za pomocą trzech atrybutów:

- koloru (odcienia),
- nasycenia,
- jasności.

Dowolna barwa złożona powstać może poprzez tzw. addytywne mieszanie barw prostych. Z takim sposobem tworzenia barw spotkać można się w technice telewizyjnej i kinowej, na ekranach monitorów CRT i laptopów. Mieszanie addytywne polega na tym, że działamy na oko dwoma lub trzema monochromatycznymi wiązkami różnych barw, otrzymując nową barwę złożoną. Bardzo istotny

jest fakt, że to samo wrażenie barwne można uzyskać w rozmaity sposób, a właściwie na nieskończenie wiele sposobów. Oko zachowuje się w zupełnie inny sposób niż ucho, które potrafi przeprowadzić analizę dźwięku na tony składowe. Ten brak analizy koloru oznacza, że nie można stworzyć barwnego odpowiednika utworu muzycznego. Dlatego częste w poezji zwroty np.: „symfonia barw” nie mają żadnego odniesienia w naturze.

4. System RGB

Do opisu barwy otrzymanej przez mieszanie addytywne najbardziej naturalnym systemem okazał się system RGB (od angielskich nazw kolorów *Red* – czerwony, *Green* – zielony, *Blue* – niebieski). W systemie tym wykorzystano fakt, że oko ludzkie odbiera kolor dzięki stymulacji opsyn w stożkach (czopkach) siatkówki. Każda z nich reaguje na inną barwę: pierwsza reaguje na światło czerwone o długości około 630 nm, druga na barwę zieloną o długości 530 nm, trzecia odbiera fale niebieskie o długości 450 nm. W addywnym mieszanii barw barwy widmowe o takim samym natężeniu odpowiadające tym długościom fali dają barwę białą.

Można wyobrazić sobie każdą barwę występującą w przyrodzie jako wektor reprezentowany w trójwymiarowej przestrzeni barw podstawowych i zapisać ją w postaci równania liniowego:

$$\vec{F} = r\vec{R} + g\vec{G} + b\vec{B}$$

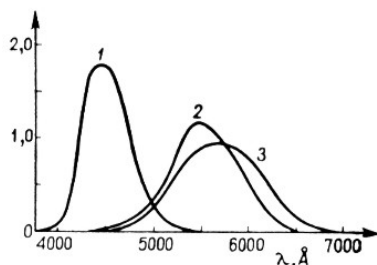
gdzie:

R – wektor barwy podstawowej czerwonej

G – wektor barwy podstawowej zielonej

B – wektor barwy podstawowej niebieskiej

r, g, b – natężenia barw podstawowych



Rys. 1. Krzywe czułości widmowej czopków dla światła o barwie 1 – niebieskiej, 2 – zielonej, 3 – czerwonej (na podstawie *Feynmana wykłady z fizyki*, t. 1, cz. 2)

5. Substraktywne mieszanie barw – system CMYK

Większość barw złożonych obserwowanych przez nas w otaczającym świecie wcale nie powstaje w wyniku dodawania barw (mieszania addytywnego). Obserwowane przez nas odcienie barwne, jeśli powstają w wyniku odbicia światła np. słonecznego czy światła żarówki, stanowią wynik tzw. substraktywnego (pochłaniającego pewne kolory) mieszania barw podstawowych. Istotną rolę w tym procesie odgrywa pochłanianie światła mające charakter selektywny. Promienie padające na ciała mogą ulec odbiciu, rozproszeniu (które też jest formą odbicia) lub pochłonięciu. Zabarwienie przez pochłanianie zdarza się w przyrodzie bardzo często. Przykładem najbardziej powszechnym, którego doświadcza każdy uczeń na lekcjach plastyki, jest mieszanie pędzlem farby żółtej i niebieskiej. Farba żółta pochłania światło czerwone i niebieskie. Z kolei farba niebieska pochłania światło żółte i czerwone. Obie farby odbijają światło zielone, które możemy obserwować w różnych odcieniach w zależności od proporcji użytych składników. Taki sposób uzyskiwania kolorów i ich głębi stosowała większość malarzy od zarania sztuki malarskiej.

Do opisu barwy złożonej otrzymanej przez substraktywne mieszanie barw najbardziej przydatny okazał się system CMYK, standardowo używany w technice drukarskiej. CMYK to skrót od pierwszych liter nazw kolorów (*Cyan* – morski), (*Magenta* – turkusowy), (*Yellow* – żółty), oraz (*black* – czarny; litera B jest zajęta przez *Blue*), użyty przede wszystkim dla podniesienia kontrastu obrazu drukowanego na kolorowej drukarce. Różnicę między addytywnym a substraktywnym sposobem uzyskiwania barw złożonych najłatwiej zauważyć wtedy, gdy mieszając trzy barwy podstawowe metodą substraktywną, otrzymujemy czerń, podczas gdy addytywne mieszanie tych samych barw podstawowych daje światło białe.

Niezależnie od sposobów otrzymywania barwy w końcowym efekcie otrzymujemy barwę złożoną o określonych współrzędnych barw podstawowych, czyli jako wektor barwny.

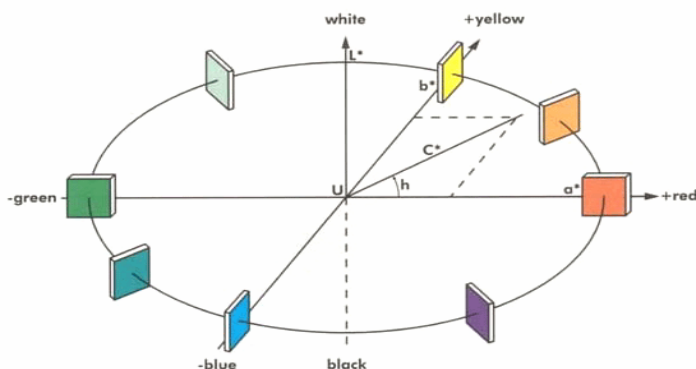
Jednak przedstawianie barwy w trójwymiarowej przestrzeni wydawało się dość uciążliwe, podobnie jak wykorzystanie globusa w wakacyjnych wędrówkach. Dlatego kolorysty, idąc za przykładem kartografów, stworzyli mapy barwności, a dokładniej tzw. trójkąty barwne, które odwzorowywały, przez zrzutowanie na płaszczyznę, wartości odcieni i nasycień barw występujących w przyrodzie. Powstało wiele doskonałych przez lata i zatwierdzanych przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE – akronim od pełnej francuskiej nazwy komisji oświetleniowej – *Comission Internationale de l'Eclairage*) tzw. trójkątów barw, np. trójkąta CIE XYZ 1932 czy CIE XYZ 1964. Mimo wielu zalet nie uwzględniają one jednak jaskrawości barwy złożonej, a przy tym wymagają pewnego doświadczenia ze strony obserwatora oceniającego odcień i nasycenie koloru.

Ważnym krokiem w opisie barw okazało się wprowadzenie nowego systemu łączącego sposoby subtraktywnego i addytywnego otrzymywania barw, a trójkąty barwne stały się wyłączną domeną wąskiej grupy ludzi doskonale orientujących się w szacowaniu barwności próbek.

System $L^*a^*b^*$

W 1976 roku grupa kolorystów – matematyków i fizyków – zaproponowała nowy model klasyfikacji kolorymetrycznej, tzw. model $L^*a^*b^*$. W założeniu jest to model niezależny od sprzętu emitującego lub odbijającego światło, co oznacza, że można określić barwę bez względu na rodzaj urządzenia, dla którego barwa jest definiowana (monitora, drukarki, skanera itp.).

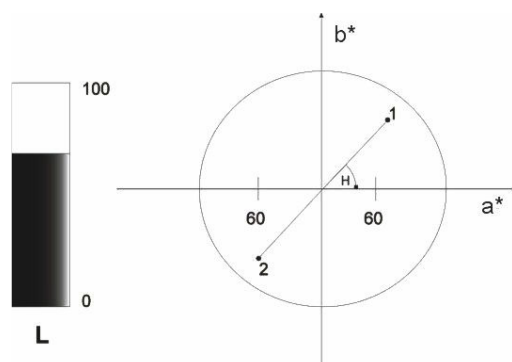
W systemie $L^*a^*b^*$, w sposób prosty i zrozumiały określono współrzędne barwy. L – określa luminancję (jasność lub jaskrawość obrazu). Wartość parametru L mieści się w zakresie od 0 do 100, przy czym 0 oznacza „zerową” luminancję, czyli *de facto* kolor czarny. 100 – to jaskrawość barwy widmowej, czyli barwy prostej. Wartości parametrów a i b określają chromatyczność barwy. Parametry a i b przyjmują wartości z zakresu od -120 do 120 i oznaczają odpowiednio przejście od zieleni do czerwieni (oś zielono-czerwona – a) oraz od barwy niebieskiej do żółtej (oś niebiesko-żółta – b).



Rys. 2. Przestrzenny obraz współrzędnych $L^*a^*b^*$

Rysunek 2 przedstawia schemat trójwymiarowego układu $L^*a^*b^*$, w którym każda barwa zawarta jest wewnątrz elipsoidy obrotowej o osiach $a = 120$, $b = 120$, $L = 100$.

Taka trójwymiarowa reprezentacja barw jest jednak mało wygodna. Dlatego też w osobnym słupku przedstawia się luminancję (jaskrawość) barwy, a parametry a oraz b osobno w układzie współrzędnych kartezjańskich (rys. 3).



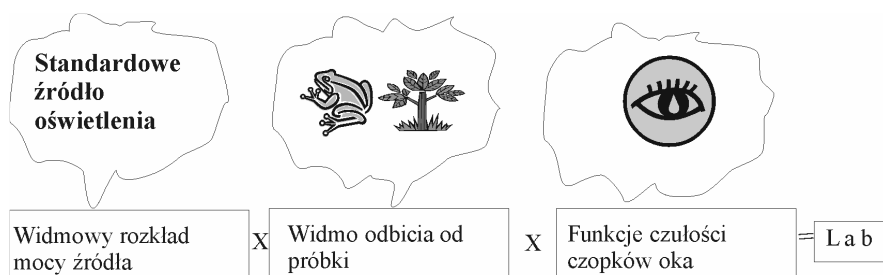
Rys. 3. Prezentacja parametrów barwnych próbki w układzie współrzędnych kartezjańskich a^* , b^*

Punkty znajdujące się na okręgu o promieniu 120 w pierwszych trzech ćwiartkach układu przedstawiają czyste barwy widmowe. Niezwykłe własności ludzkiego zmysłu widzenia umożliwiają widzenie również nieistniejących w naturze, tzw. barw niewidmowych, czyli wszelkich kombinacji barw purpurowych, które znajdują się w czwartej ćwiartce układu. Barwa biała jest przedstawiona jako punkt w środku układu współrzędnych i luminancji (jasności, jaskrawości) $L = 100$. Barwa czarna to również ten sam punkt środka układu, ale o luminancji $L = 0$. Wszystkie barwy szare znajdują się w środku układu współrzędnych a^* , b^* i różnią się jedynie wartością jaskrawości w przedziale od 0 do 100. Barwom szarym nie można przypisać odcienia barwnego, dlatego często nazywamy je barwami niekolorowymi. Punkt o numerze 1 reprezentuje barwę z pierwszej ćwiartki układu. Większość z nas określiłaby ten kolor jako pomarańczowy. Jednak taka informacja nie wystarcza malarzowi czy lakiernikowi do uzyskania dokładnie takiego samego odcienia barwnego (czyż nie zgodzimy się z twierdzeniem, że barwa pomarańczy może być bliższa żółci lub czerwieni?). Odległość tego punktu od środka układu określa nasycenie barwą widmową. Im bliżej okręgu, tym barwa jest głębsza i czystsza. Z drugiej strony, im bliżej początku układu współrzędnych położony jest punkt określający barwę, tym bardziej błada staje się barwa (wyblakła). Barwy o niewielkim nasyceniu nazywamy barwami pastelowymi. Natomiast kąt H , jaki tworzy odcinek łączący punkt 1 reprezentujący barwę z osią a^* , określa odcień barwy, czyli jej kolor. Korzystając z systemu $L^*a^*b^*$, można łatwo zdefiniować pojęcie barwy dopełniającej. Barwa jest barwą dopełniającą, jeżeli po addytywnym zmieszaniu z barwą wyjściową i przy jednakowej jaskrawości obu barw dają one jako efekt końcowy barwę białą. Dla punktu 1 barwą dopełniającą jest punkt 2, leżący w trzeciej ćwiartce wykresu w tej samej odległości od środka układu współrzędnych i tworzący te same kąty z osią a^* .

Każdy, kto odbiera wrażenia barwne, z pewnością zauważył istotne różnice w percepcji barwnej, gdy obserwuje się je przy różnym oświetleniu. Oświetlenie ma ogromny wpływ na nasz sposób postrzegania barw. Wystarczy podać tutaj przykład odbioru odcieni barwnych w czasie zmierzchu. Barwy czerwone jasne i nasycone stają się ciemne, natomiast barwy niebieskie wydają się znacznie jaśniejsze. To zjawisko, nazywane czasem zjawiskiem Purkiniego, związane jest z przejmowaniem roli czopków w procesie widzenia przez pręciki, które specjalizują się w widzeniu nocnym.

6. Obliczanie parametrów barwnych

Nawet wytrawne oko kolorysty nie przypisze wszystkich atrybutów barwy choćby z przeciętną dokładnością. Dlatego do pomiarów barw wybrano kolorymetry obiektywne (niezależne od percepcji człowieka). W pomiarach kolorymetrycznych należy najpierw wybrać źródło oświetlenia, które jest zalecane przez komisję oświetleniową (może to być światło słoneczne lub lampa halogenowa), a następnie zbadać natężenie światła odbitego od próbki. Znając widmowy rozkład mocy, źródła światła należy pomnożyć go przez widmowy współczynnik odbicia, a następnie ponownie pomnożyć przez wartości czułości czopków siatkówki dla tzw. obserwatora normalnego (statystycznego). Poniższy schemat przedstawia algorytm otrzymywania parametrów barwnych kolorów dla źródeł oświetlenia tzw. illuminantu A oraz dla światła dziennego – illuminantu D55. Różnice mogą wydać się istotne, niemniej jednak nauką płynącą z tego sposobu obliczania barw jest fakt, że barwa każdej powierzchni nie jest na stałe utrwaloną wartością, lecz zmienia się wraz z możliwościami percepcyjnymi obserwatora.



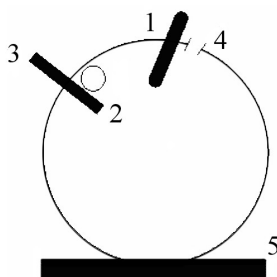
Rys. 4. Sposób obliczania parametrów barwnych obiektu

7. Metodyka pomiaru koloru badanej powierzchni

Widzenie kolorowe stanowi jedną z metod postrzegania świata za pomocą zmysłu wzroku. Aby je obiektywnie mierzyć lub szacować, należy przeprowadzić analizę

odbicia światła od badanej powierzchni przy znanym źródle oświetlającym próbkę i znanych rozkładach widmowych czułości ludzkiego oka. Ponieważ barwa analizowanego obiektu jest związana z rozproszeniem światła (tzw. odbiciem dyfuzyjnym, gdy światło rozprasza się we wszystkie strony) należy zastosować układ pomiarowy, który takie odbicie dyfuzyjne byłby w stanie zmierzyć.

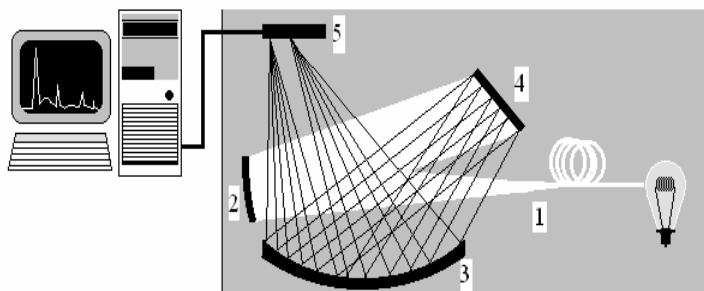
Pomiary barwy wykonuje się przy pomocy urządzenia nazywanego kulą Ulbrichta lub sferą integrującą (rys. 5) rejestrującą całkowitą energię świetlną odbitą lub wychodzącą z badanej próbki. Wewnętrzne ściany kuli są pokryte materiałem o bardzo dużym współczynniku odbicia dyfuzyjnego. Wbudowana w sferę lampa halogenowo-wolframowa oświetla ściany kuli. Światło odbite dyfuzyjnie od ścian kuli oświetla następnie próbkę. W sferze znajduje się otwór, do którego podłączony jest światłowód wyprowadzający strumień świetlny do spektrofotometru. Pomiar wykonywane są w zakresie widzialnym (380–780 nm).



Rys. 5. Schemat zintegrowanej sfery odbiciowej typu $d/0^\circ$: 1, 3 – przesłony umożliwiające dyfuzyjne oświetlenie próbki, 2 – źródło światła, 4 – otwór wyprowadzający strumień świetlny do spektrofotometru, 5 – mierzona próbka

Dzięki miniaturyzacji elementów optycznych i elektronicznych oraz szybkiemu rozwojowi techniki światłowodowej i spektrometrii optycznej nastąpiły rewolucyjne zmiany. Przy znikomej absorpcji w światłowodzie, światło jest przesyłane ze sfery integrującej do spektrofotometru. Podstawowymi elementami spektrofotometru są: miniaturowa ława optyczna, wyposażona w specjalną końcówkę, która umożliwia przyłączenie światłowodu, dwa wklęsłe lustra, lustrzana siatka dyfrakcyjna oraz detektor siatkowy CCD 2048 pikseli. Spektrofotometr analizuje widmo światła rozproszonego od próbki i przesyła informacje o rozkładzie spektralnym poprzez konwerter analogowo-cyfrowy do komputera. Odpowiednie oprogramowanie oblicza parametry barwne badanej próbki według schematu przedstawionego na rys. 4 i wizualizuje go w układzie współrzędnych L^*a^*b . Dzięki zastosowaniu sfery integrującej oraz spektrofotometru można wykonać kilkadziesiąt pomiarów w ciągu godziny. Na tym właśnie polega komputerowy dobór barw, o którym

słyszał zapewne każdy kierowca próbujący dobrać odpowiedni lakier do uszkodzonej karoserii.



Rys. 6. Schemat spektrofotometru PC2000 (1 – światłowód, 2, 3 – lustra, 4 – odbiciowa siatka dyfrakcyjna, 5 – detektor CCD)

Nawet najbardziej wyrafinowany słowny opis barwy, jej odcienia lub nasycenia, nie jest w stanie precyzyjnie jej określić. Dlatego barwy w sposób obiektywny, niezależny od obserwatora, można obliczyć, i to z dużą dokładnością, metodami spektrofotometrycznymi, a otrzymane współrzędne barwy skatalogować według odpowiednich kryteriów, np. w atlasach barwnych. Poza sferą pomiarów pozostaje oczywiście estetyczna percepcja barw, dotycząca np. ubioru czy wystroju wnętrz, na którą w znacznym stopniu wpływają zakodowane w mózgu znaczenia barw, różne u różnych ludzi.