



Politechnika Wrocławska

Wydział Podstawowych Problemów Techniki

Kierunek: Optyka

Specjalność: Inżynieria Optyczna i Fotoniczna

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

**Porównanie metod oceny jakości oddawania barw przez
komercyjne źródła światła**

Paweł Redman

**Promotor
dr hab. inż. Władysław Woźniak**

Wrocław 2019

Spis treści

Cel, motywacja i zakres pracy	3
1 Podstawy kolorymetrii	4
1.1 Rozkład spektralny	4
1.2 Widzenie barwne	7
1.3 Opis ilościowy barw	9
1.4 Przestrzeń CIE 1931	10
1.5 Przestrzeń CIE 1960	13
1.6 Przestrzeń CIE 1964	15
1.7 Skorelowana temperatura barwowa	16
2 Metody oceny jakości oddawania barw	17
2.1 CIE R_a	17
2.2 CIE $R_9 - R_{14}$	20
2.3 GAI	20
2.4 CQS	21
2.5 FSI i FSCI	21
3 Sprawdzenie poprawności programu	23
3.1 Testy jednostkowe	23
3.2 Porównanie z literaturą	23
3.3 Pomiary źródeł komercyjnych	25
3.4 Wyniki	27
4 Wnioski	30
4.1 Błędy numeryczne	31
4.2 Wady układu pomiarowego	31
A Spis wzorów	32
A.1 Iluminanty serii D	32
A.2 Przejścia pomiędzy przestrzeniami barw	33
A.3 Transformacja von Kriesa do wyznaczania R_a	35
Spis rysunków	36
Bibliografia	37

Cel, motywacja i zakres pracy

Dwudziesty wiek przyniósł rewolucję w technologii oświetleniowej. Wynaleziono źródła światła mogące z łatwością wyprzeć dominujące wtedy lampy żarowe. Większa trwałość i niezawodność w stosunku do lamp z delikatnym żarnikiem oraz wyższe skuteczności – a zatem mniejszy pobór mocy przy takiej samej jasności – obiecywały ogromne oszczędności dla przemysłu i konsumentów.

Poza względami ekonomicznymi, po raz pierwszy pojawiła się możliwość stworzenia sztucznego oświetlenia przypominającego światło dzienne. Żarówki, ograniczone temperaturą parowania wolframu, nie były w stanie rozgrzać się do takiego stopnia, aby w widmie emisyjnym przestała przeważać czerwień. Neutralną biel udało się uzyskać dopiero poprzez zastosowanie lamp fluorescencyjnych. Wykorzystanie zjawiska elektroluminescencji w luminoforach, pobudzanych przez promieniowanie ultrafioletowe z lamp wyładowczych, pozwoliło stworzyć źródła światła o dowolnej barwie, nieograniczonej przez właściwości fizyczne materiałów.

Kolejnym przełomem było wynalezienie białych diod elektroluminescencyjnych (WLED, od ang. *white light emitting diode*). W porównaniu do świetlówek, obiecywały znacznie mniejszy pobór mocy elektrycznej i jednocześnie większą trwałość.

Niestety, wszystkie te innowacyjne źródła mają jedną, zasadniczą wadę. Ponieważ mechanizmy wytwarzania światła znacząco różnią się od żarówek, inne są również widma emisyjne. Konsekwencją tego jest to, że barwy oświetlanych przez nie przedmiotów mogą się różnić i wydawać nienaturalne. Pojawiła się potrzeba *oceny jakości oddawania barw*.

Celem pracy jest zestawienie i porównanie najpowszechniej stosowanych w przemyśle i technice świetlnej metod oceny jakości oddawania barw. Nie jest to temat szczególnie twórczy czy oryginalny. Istnieje wiele książek, opracowań i artykułów poruszających te zagadnienia [1–6]. Motywacją do napisania tej pracy była moja opinia, że żadne z istniejących opracowań – przynajmniej tych, które udało mi się znaleźć – nie wyczerpuje tematu. Brakuje szczegółowej i kompletnej instrukcji, pozwalającej nie tylko wyznaczać wszelakie współczynniki oddawania barw (przede wszystkim najpowszechniej stosowany współczynnik CRI R_a) ale też zrozumieć ten proces i dlaczego został tak skonstruowany.

Zakres pracy, poza rozwiązaniem powyższego problemu, obejmuje również napisanie biblioteki programistycznej, pozwalającej na szybkie i efektywne przeprowadzanie obliczeń kolorymetrycznych, oraz jej weryfikację. Po przetestowaniu kodu standardowymi technikami inżynierii oprogramowania, wyniki porównałem z danymi literaturowymi oraz ze specyfikacją producentów zmierzonych przeze mnie komercyjnych opraw.



Rys. 1. Nowoczesna biała dioda w postaci COB (chip-on-board).

Rozdział 1

Podstawy kolorymetrii

Kolorymetria to dziedzina nauki, zajmująca się *widzeniem barwnym* u człowieka. Znajdując się na przecięciu optyki oraz psychofizyki, stara się znajdować i opisywać zależności pomiędzy obiektywnymi wielkościami fizycznymi – mocy promieniowania elektromagnetycznego, jej rozkładów przestrzennych i spektralnych – a subiektywnymi *wrażeniami*, wywoływanymi przez postrzegane światło.

1.1 Rozkład spektralny

W kolorymetrii najbardziej uniwersalnym opisem światła jest *rozkład spektralny mocy*. Znając ten rozkład przewidzieć można nie tylko barwę światła postrzeganego bezpośrednio przez oko ludzkie, ale też jego barwę po odbiciu od powierzchni lub po przepuszczeniu przez filtr. Poprzez rozkład spektralny mocy można rozumieć co najmniej kilka wielkości fizycznych:

- rozkład spektralny strumienia promieniowania Φ_λ ,
- rozkład spektralny natężenia promieniowania I_λ ,
- radiancję spektralną L_λ ,
- irradiancję spektralną E_λ .

Chciałbym podkreślić, że są to wielkości *radiometryczne*. Dla wielkości *fotometryczne* nie definiuje się rozkładów spektralnych, ponieważ opisują całkowitą postrzeganą jasność źródeł, światła odbitego, itp.

W praktyce spotyka się prawie wyłącznie źródła światła o rozkładach spektralnych mocy niezależnych (z dokładnością do stałej) od wyboru punktu na źródle lub detektorze czy kąta emisji lub padania na detektor. Oczywistymi wyjątkami są przykładowo ekrany komputerowe czy projektory. Nie są to jednak źródła interesujące w zagadnieniach dotyczących oświetlenia. Wszystkie wyżej wymienione wielkości fizyczne są zatem równoważne i opisują ten sam *względny rozkład spektralny mocy* źródła.

Dla uproszczenia, zamiast używać konkretnych wielkości radiometrycznych, wprowadzę pojęcie *rozkładu ilości światła* n_λ , nieujemnej wielkości proporcjonalnej do wszystkich wymienionych w liście powyżej. Formalnie, dla każdego możliwego ustawienia detektora i odbiornika istnieją takie nietrywialne (niezerowe) czynniki $C_1, C_2, \dots$ niezależne od λ , że

$$n_\lambda(\lambda) = C_1\Phi_\lambda(\lambda) = C_2I_\lambda(\lambda) = C_3L_\lambda(\lambda) = C_4E_\lambda(\lambda) \quad (1.1)$$

Również dla prostoty ilość światła jest bezwymiarowa, a więc jej rozkład spektralny ma wymiar odwrotności długości.

W kolorymetrii zawsze stosuje się źródła odniesienia lub normuje rozkłady w inny sposób, dlatego wartości powyższych współczynników nie są istotne.

1.1.1 Rozkłady źródeł monochromatycznych

Najprostszymi rozkładami są *rozkłady źródeł monochromatycznych*, w których cała moc promieniowania przypada na dokładnie jedną długość fali λ_0 . Do opisu takich rozkładów stosuje się *deltę Diraca* $\delta(x)$, uogólnioną funkcję zdefiniowaną w poprzez poniższe właściwości:

$$\int_{\mathbb{R}} \delta(x) dx = 1 \quad (1.2)$$

oraz

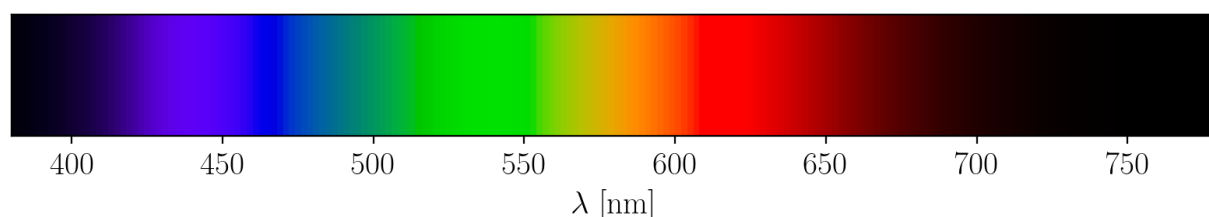
$$\int_{\mathbb{R}} f(x) \delta(x - x_0) dx = f(x_0) \quad (1.3)$$

dla dowolnej funkcji $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$.

Rozkład spektralny źródła idealnie monochromatycznego, emitującego światło o długości fali λ_0 , można zatem zapisać jako

$$n_\lambda(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_0) \quad (1.4)$$

Na rys. 1.1 przedstawiono jak w przybliżeniu wyglądają *barwy spektralne*, czyli barwy źródeł monochromatycznych. Potocznie nazywa się je barwami tęczy.



Rys. 1.1. Przybliżone barwy źródeł monochromatycznych o różnych długościach fali (tzw. barwy tęczy).

W praktyce, oczywiście, takich rozkładów się nie spotyka. Nawet najdoskonalsze lasery emitują światło w bardzo wąskim, ale skończonym, zakresie długości fal. Niemniej jednak, rozkłady te, dzięki swojej prostocie i wygodnym właściwościach, znajdują zastosowanie w rozważaniach teoretycznych.

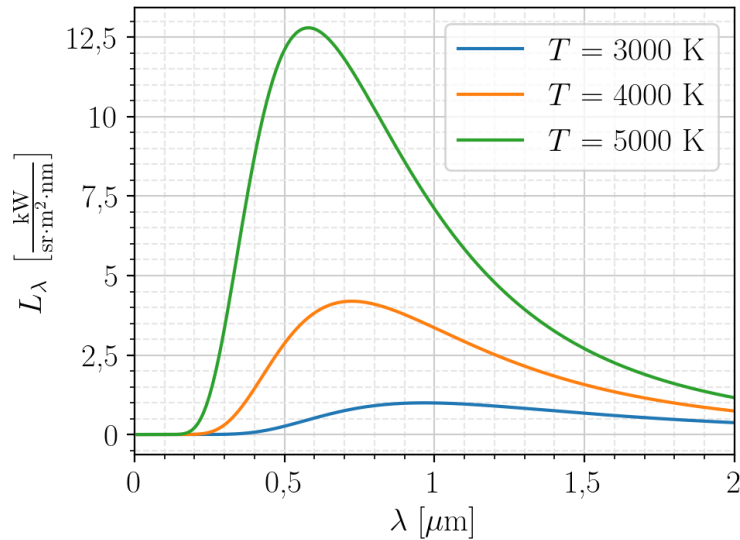
1.1.2 Rozkłady promieniowania ciał doskonale czarnych

Wymienić można kilka ważnych, charakterystycznych rozkładów. Najbardziej znanym jest *rozkład promieniowania ciała doskonale czarnego* (w skrócie CDC), zwane również rozkładem Plancka,

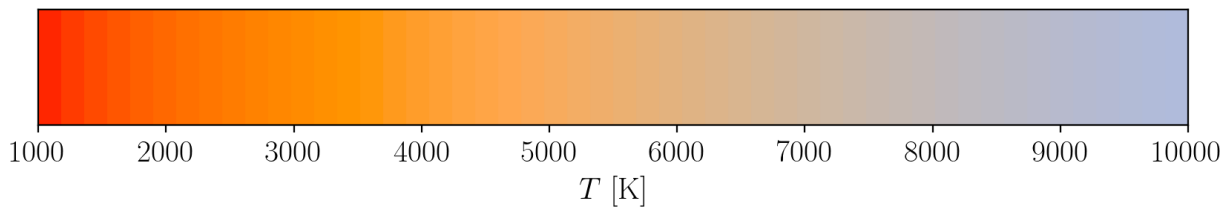
$$L_\lambda(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} \quad (1.5)$$

gdzie T to temperatura ciała, h to stała Plancka, k_B to stała Boltzmanna, a c to prędkość światła. Na rys. 1.2 przedstawiono wykresy rozkładów CDC dla kilku wybranych temperatur. Na rys. 1.3 można zobaczyć *barwy CDC*.

Rozkłady te mają duże znaczenie w kolorymetrii, ponieważ opisują światło emitowane przez żarówki, które są uznawane za doskonałe pod względem oddawania barw,



Rys. 1.2. Wykresy rozkładów Plancka dla różnych temperatur.



Rys. 1.3. Przybliżone barwy CDC o różnych temperaturach, unormowane do jednakowej jasności.

głównie w przypadku „ciepłego” światła, czyli stosunkowo niskich temperatur barwowych (w przypadku CRI Ra jest to 5000 K).

1.1.3 Standardowe iluminanty

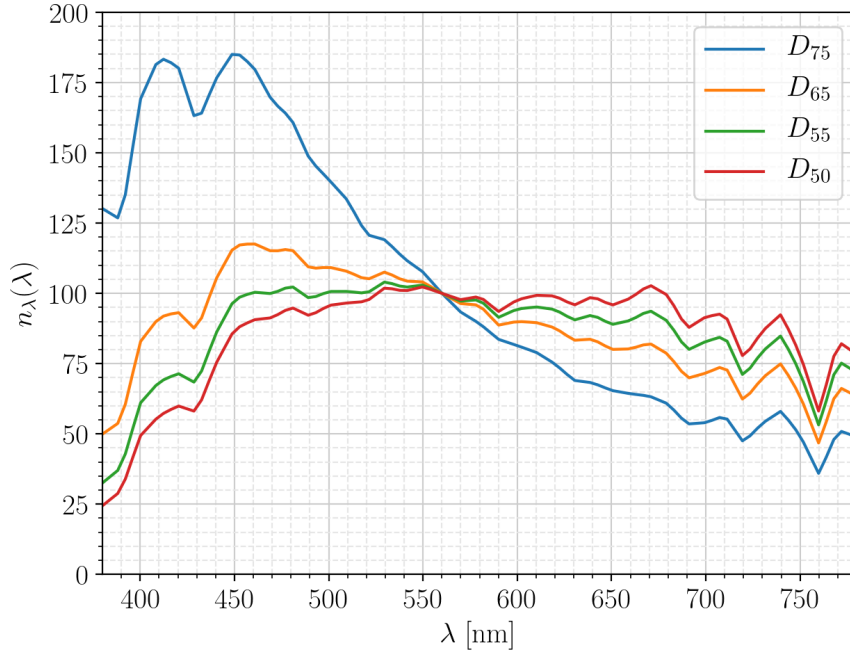
Komitet CIE ustandaryzował kilka wzorców źródeł światła, zwanych *standardowymi iluminantami*. Są one nazywane kolejnymi literami alfabetu.

- Iluminant A, zdefiniowany jako źródło światła o rozkładzie ciała doskonale czarnego.
- Iluminanty serii D, czyli model matematyczny światła dziennego w różnych porach dnia, określanych temperaturą barwową. W szczególności, rozkład dla temperatury 6500 K, zwany iluminantem D_{65} , jest często stosowanym wzorcem światła białego (np. w sRGB). Model jest opisany szczegółowo w dodatku A.1. Wybrane rozkłady wykreślono na rys. 1.4.
- Iluminant E, zdefiniowany jako źródło o jednorodnym rozkładzie spektralnym.
- Iluminanty serii F, będące wzorami źródeł fluorescencyjnych (tzw. jarzeniówek).

Iluminanty serii B i C są przestarzałe i już się ich nie stosuje.

1.1.4 Światło odbite

Na co dzień bardzo rzadko patrzymy na światło pochodzące bezpośrednio ze źródła. (Oddawanie barw przez wszechobecne ekrany to temat na osobną pracę.) Nikt raczej nie



Rys. 1.4. Rozkłady spektralne kilku iluminantów D: D_{50} (5000 K), D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K), D_{75} (7500 K).

patrzy prosto w słońce czy na oprawę oświetleniową – nie jest to ani przyjemne, ani potrzebne. Praktycznie całe docierające do nas światło to *światło odbite*.

Światło padające na powierzchnię ulega odbiciu, tracąc część mocy. W przypadku powierzchni nieprzeźroczystych, moc ta jest pochłaniana przez materiał i zamieniana w ciepło. Materiały, które pochłaniają światło, a następnie wypromieniowują światło o innej długości fali nazywane są luminoforami. Mają ogromne znaczenie w nowoczesnym oświetleniu, ale są raczej niespotykane poza oprawami świetlnymi. Część odbitą nazywa się *reflektancją* i w ogólności zależy od długości fali padającego światła:

$$R_{\lambda}(\lambda) = \frac{n_{r,\lambda}(\lambda)}{n_{i,\lambda}(\lambda)} \quad (1.6)$$

gdzie $n_{r,\lambda}(\lambda)$ to rozkład światła odbitego, a $n_{i,\lambda}(\lambda)$ padającego. Reflektancja jest właściwością powierzchni. Znając ją, można przy pomocy powyższej zależności obliczyć rozkład światła odbitego dla dowolnego źródła.

Podobnie zdefiniować można *transmitancję*,

$$T_{\lambda}(\lambda) = \frac{n_{t,\lambda}(\lambda)}{n_{i,\lambda}(\lambda)} \quad (1.7)$$

gdzie $n_{t,\lambda}(\lambda)$ to rozkład transmitowanego światła.

1.2 Widzenie barwne

Mając za sobą fizyczny opis światła, można przejść do rozważań na temat *wrażeń*, jakie wywołuje światło o różnych rozkładach. Wrażenia te nazywa się *barwami*.

Za widzenie barwne odpowiadają *czopki*, światłoczułe komórki na siatkówce oka. Ponieważ u człowieka występują trzy typy czopków o różnych czułościach spektralnych,

jesteśmy w stanie wyróżnić trzy cechy każdej barwy. Istnieje pewna dowolność co do wyboru tych cech. Poniżej opisałem najczęściej wymieniane i najbardziej intuicyjne cechy barwy.

1. Jasność – całkowita ilość światła. Źródła światła o barwach różniących się tylko jasnością mają identyczny względny rozkład ilości światła.
2. Odcień – barwa podstawowa, do której opisywana barwa jest najbardziej podobna. Przez barwy podstawowe należy rozumieć barwy spektralne: czerwony, żółty, zielony, niebieski, fioletowy (i barwy pośrednie) oraz jeszcze fuksję. Fuksja nie jest barwą spektralną – żadne źródło monochromatyczne nie wywoła takiego wrażenia barwnego. Znaczenie tej barwy jako barwy podstawowej zostanie wyjaśnione dalej.
3. Nasycenie – definiowane jako „ilość składnika chromatycznego w mieszaninie z achromatycznym”. Innymi słowy, stopień podobieństwa do wyżej opisanej barwy podstawowej. Barwy o minimalnym nasyceniu nazywa się stopniami szarości lub, po prostu, szarymi. W szczególności, bardzo jasną szarą barwę nazywa się bielą.

Ostatnie dwie cechy nazywa się razem *chromatycznością*. Warto zauważyć, że czerń – całkowity brak światła – nie ma określonej chromatyczności (tj. nie ma odcienia ani nasycenia).

Pełne widzenie barwne możliwe jest w warunkach *widzenia fotopowego*. Przy odpowiednio niskiej ilości światła, czułość czopków staje się niedostateczna i przestają one brać udział w widzeniu. Wtedy człowiek może polegać wyłącznie na jeszcze jednym rodzaju komórek światłoczułych w oku, pręcikach, co nazywane jest *widzeniem skotopowym*. Ponieważ wszystkie pręciki mają identyczną odpowiedź spektralną, w ciemności nie jesteśmy w stanie odróżniać barw. Istnieje też pewien zakres ilości światła, w którym człowiek doświadcza *widzenia mezopowego*, czyli częściowej utraty widzenia barwnego.

1.2.1 Zaburzenia rozpoznawania barw

Widzenie barwne mogą utrudnić lub uniemożliwić również mogą pewne *zaburzenia rozpoznawania barw*, występujące u części ludzi, zwane ogólnie daltonizmem lub ślepotą barw. Ta praca, jak i znacząca większość rozważań z dziedziny kolorymetrii, zajmuje się wyłącznie przypadkami, w których widzenie barwne jest w pełni możliwe i dotyczy postrzegania przez ludzi, u których nie występują wyżej wspomniane zaburzenia.

1.2.2 Adaptacja chromatyczna

Zdolność człowieka do rozpoznawania barw jest w zaskakująco dużej mierze niezależna od barwy oświetlenia. Nie zauważamy różnic w wyglądzie otaczających nas rzeczy i ludzi po wyjściu z pomieszczenia oświetlonego ciepłym światłem (np. z żarówek) na zewnątrz w słoneczny dzień. Nawet, jeżeli zwrócimy uwagę, że w pomieszczeniu wszystko wydaje się bardziej żółte niż powinno, nie przeszkodzi nam to w rozpoznawaniu obiektów. Pomarańcze nadal będą pomarańczowe, banany żółte i tak dalej. Jest to zasługa *adaptacji chromatycznej*.

Na rys. 1.5 przedstawiono cztery zdjęcia koszyka owoców. W lewym górnym rogu umieszczono oryginalne zdjęcie, a pozostałe zostały poddane obróbce komputerowej. Pomimo znacznych różnic w barwach, na prawie wszystkich zdjęciach owoce wyglądają dość

naturalnie. Można je dość łatwo rozpoznać nawet patrząc przez niebieski filtr. Na ostatnim zdjęciu (w prawym dolnym rogu) jednak od razu rzucają się w oczy nienaturalnie wyglądające cytryny. Można byłoby je nawet pomylić z limonkami, ponieważ wydają się wyraźnie zielone. Wszystko to pomimo tego, że zostały one skopiowane bez zmian ze zdjęcia powyżej.



Rys. 1.5. Dlaczego cytryny wyglądają dziwnie tylko na ostatnim zdjęciu (prawy dolny róg)? Ilustracja na podstawie [7].

Oznacza to, że adaptacja chromatyczna działa dobrze tylko przy równomiernym oświetleniu i nie jest w stanie zniwelować odbarwień pojedynczych obiektów, niepasujących do otoczenia. Stąd właśnie motywacja do badań jakości oddawania barw.

1.3 Opis ilościowy barw

Do tej pory opisywałem barwy w sposób subiektywny, powołując się na pojęcia takie jak „czerwony” czy „nasycony”, znane (prawie) wszystkim ludziom w sposób intuicyjny. Nie są to jednak opisy szczególnie przydatne w kolorymetrii ze względu na ich nieprecyzyjność i brak obiektywizmu.

1.3.1 Obserwator standardowy

Najstarszy ilościowy opis barw został ustandaryzowany przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE, od fr. Commission Internationale de l’Eclairage) w 1931 r. Opiera się na przeliczeniu rozkładu ilości światła na trzy *współrzędne chromatyczne*, nazwane kolejno X , Y , Z , zdefiniowane jako następujące całki, formalnie iloczyny skalarne w prze-

strzeni długości fal:

$$\begin{aligned}X &= C \int n(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\Y &= C \int n(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\Z &= C \int n(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda\end{aligned}\tag{1.8}$$

gdzie C to stała wynikająca z (1.1). a $\bar{x}$, $\bar{y}$ i $\bar{z}$ to *funkcje dopasowywania barw* (ang. *color matching functions*). Funkcje te **nie są** spektralnymi czułościami trzech rodzajów czopków, choć są do nich podobne (rys. 1.6). Komisja CIE dobrała je tak, aby $\bar{y}(\lambda)$ odpowiadała krzywej *skuteczności świetlnej* ludzkiego oka, używanej w fotometrii. Rzeczywiście, współrzędna Y odpowiada wielkościom fotometrycznym, takim jak strumień świetlny czy światłość

Ponieważ rozmieszczenie czopków na siatkówce nie jest równomierne i postrzeganie barw zależy od pola widzenia, ustandaryzowano dwa zestawy tych funkcji dla różnych warunków obserwacji.

- Funkcje dopasowywania barw *standardowego obserwatora kolorymetrycznego CIE 1931*, opisujące widzenie barwne dla kątów widzenia od 1° do 4° , często nazywanego skrótowo *obserwatorem 2°*.
- Funkcje *uzupełniającego standardowego obserwatora kolorymetrycznego CIE 1964*, dla kątów obserwacji większych niż 4° , nazywanego *obserwatorem 10°*, a funkcje opisywane przypisem dolnym „10”.

Na rys. 1.6 przedstawiono wykresy wszystkich tych funkcji.

Funkcje dopasowywania barw nie przyjmują ujemnych wartości, dlatego współrzędne X , Y , Z też nie będą nigdy ujemne. Dodatkowo, nie przyjmują niezerowych wartości poza przedziałem 380 – – 780 nm, więc tylko w takim zakresie całkować w 1.8.

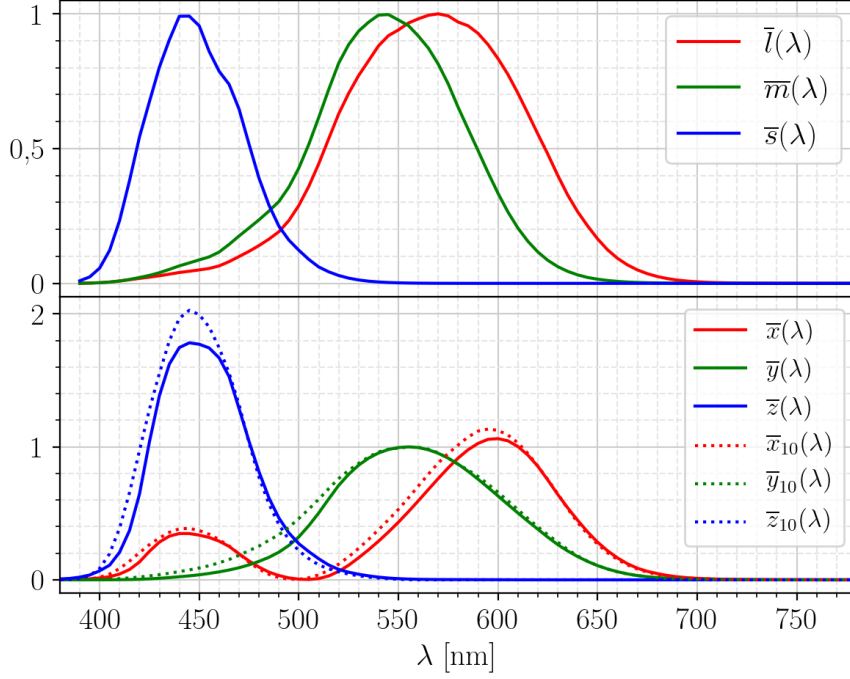
1.3.2 Metameryzm

Ponieważ przejście do współrzędnych chromatycznych sprowadza cały rozkład spektralny (często setki lub tysiące punktów pomiarowych) do zaledwie trzech liczb, nie jest ona odwracalna. Oznacza to również, że dokładnie te same współrzędne, a więc identyczne wrażenia barwowe, można otrzymać z wielu różnych rozkładów. Zjawisko to nazywane jest *metameryzmem*, a identyczne barwy, powstałe z różnych rozkładów *metamerami*.

1.4 Przestrzeń CIE 1931

Współrzędne zdefiniowane przez (1.8) tworzą *przestrzeń barw*, czyli matematyczny opis wszystkich możliwych wrażeń barwnych. Ponieważ, przeciętny człowiek jest w stanie określić trzy różne cechy barwy, przestrzeń ta jest trójwymiarowa.

Warto zauważyć, że współrzędne (X, Y, Z) są liniowe względem rozkładu ilości światła. Zwiększenie (lub zmniejszenie) ilości światła, przy zachowaniu jego względnego rozkładu, spowoduje zmianę współrzędnych dokładnie o ten sam czynnik. Co więcej, dodanie dwóch rozkładów do siebie da barwę, której współrzędne będą sumami odpowiednich współrzędnych barw tych rozkładów.



Rys. 1.6. Czułości spektralne czopków ($\bar{l}$, $\bar{m}$, $\bar{s}$) oraz funkcje dopasowywania barw obserwatora 2° ($\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$) i 10° ($\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$, $\bar{z}_{10}$).

W najogólniejszej postaci, wiążącej dowolną liniową kombinację rozkładów n_i z liniową kombinacją odpowiadających im współrzędnych X_i ,

$$\sum_i a_i X_i = \int \left[\sum_i a_i n_i(\lambda) \right] \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1.9)$$

dla dowolnych współczynników a_i . Analogiczne równości można zapisać dla pozostałych współrzędnych.

Ponieważ w kolorymetrii najistotniejsza jest chromatyczność, postanowiono stworzyć drugą przestrzeń barw, w której współrzędne składające się na chromatyczność są niezależne od jasności. Poprzez unormowanie współrzędnych (X, Y, Z) otrzymuje się współrzędne (x, y, z) :

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Warto zauważyć, że jedna z tych współrzędnych jest nadmiarowa – ich suma jest zawsze równa jedności

$$x + y + z = 1 \quad (1.11)$$

więc trzecią można zawsze obliczyć znając pozostałe dwie. Przyjęło się podawać współrzędną Y zamiast z , tworząc przestrzeń, w której współrzędne x i y opisują chromatyczność barwy, a Y jej jasność, niezależnie od siebie. Przejście odwrotne opisują równania (A.7).

1.4.1 Przestrzeń sRGB

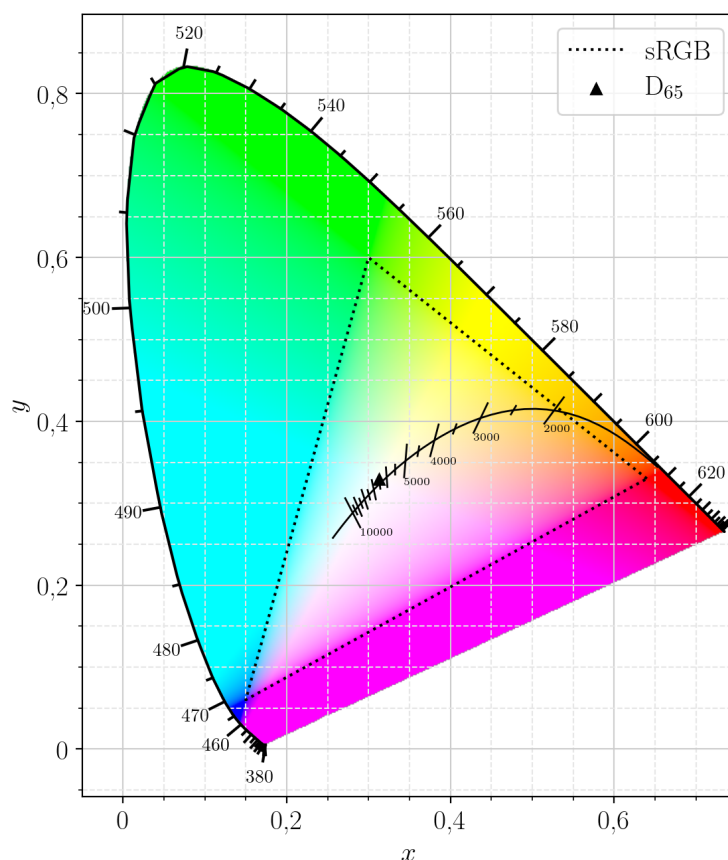
Przestrzeń sRGB (od ang. *standardized Red, Green, Blue*) jest powszechnie używana w monitorach, drukarkach, skanerach i cyfrowych aparatach fotograficznych. Została standaryzowana przez IEC [8], bazując na standardzie ITU-R BT.709 [9].

Praktycznie każdy może wyświetlać i drukować obrazy zapisane w przestrzeni sRGB. Z tego powodu, wszystkie ilustracje w tej pracy są w niej stworzone. Kosztem uniwersalności jest jednak możliwość przedstawienia jedynie stosunkowo niewielkiej części dostrzegalnych barw.

Przejścia z przestrzeni CIE 1931 (X, Y, Z) do sRGB i z powrotem opisują równania (A.15–A.18). Przy korzystaniu z nich należy mieć na uwadze, że zostały napisane przy założeniu, że jasności $Y = 1$ odpowiada biel.

1.4.2 Diagramy chromatyczności

Na rys. 1.7 narysowano przekrój (płaszczyzną $Y = Y_n$) przestrzeni CIE 1931 (x, y, Y), który nazywany jest *diagramem chromatyczności* lub trójkątem barw, ze względu na charakterystyczny kształt. Przedstawia on wszystkie możliwe chromatyczności – wszystkie odcienie i nasycenia, jakie człowiek może postrzec. Innymi słowy, nie istnieje żaden rozkład spektralny światła, którego barwa miałaby współrzędne spoza tego obszaru. W praktyce czasami się spotyka niefizyczne rozkłady o ujemnych wartościach (wynikających z błędów pomiarowych), które mogą mieć niemożliwe chromatyczności.



Rys. 1.7. Diagram chromatyczności w przestrzeni CIE 1931 (x, y, Y) dla $Y = Y_n$.

Aby zrozumieć rysunek, należy przyjrzeć się jak w tej przestrzeni działa sumowanie barw. Nie jest to już prosta, liniowa operacja. Aby wyznaczyć sumę barw, należy najpierw

przejsć z (x, y, Y) do (X, Y, Z) , tam zastosować (1.9), a następnie przekształcić wynik z powrotem do (x, y, Y) . Obowiązuje jednak prosta i bardzo przydatna zasada: suma barw nigdy nie będzie na zewnątrz otoczki wypukłej,¹ tworzonej przez te barwy. W prostszych słowach:

- Suma dwóch barw leży na odcinku łączącym je.
- Suma trzech barw leży w trójkącie, którego są wierzchołkami.
- Suma czterech barw leży na czworokącie (lub trójkącie, jeżeli jedna z barw jest „pomiędzy” pozostałymi) i tak dalej.

Na wyżej wspomnianym rysunku należy najpierw zwrócić na *linię barw spektralnych* – barw odpowiadającym światłu monochromatycznemu – z zaznaczonymi wybranymi długościami fal w nanometrach (380, 460, 470, ...). Nie jest to linia zamknięta. Obwód zbioru możliwych barw dokańcza odcinek, łączący końce linii barw spektralnych, nazywany *linią purpur*. Na obwodzie leżą barwy najbardziej nasycone, a wszystkie barwy wewnątrz są mieszaninami (sumami) co najmniej dwóch z tych nasyconych barw. W szczególności, w samym środku można barwę białą.

Trójkąt narysowany kropkowaną linią to granice przestrzeni sRGB. Wierzchołkami są trzy podstawowe barwy tej przestrzeni: czerwona, zielona i niebieska. Z wcześniej opisanych przyczyn technicznych, nie mogę przedstawić barw poza tym trójkątem, a jedynie przybliżyć (najbliższymi barwami w sRGB).

Łuk po środku rysunku odpowiada barwom ciała doskonale czarnego. Dla wybranych temperatur (co 500 K) narysowano linie stałych temperatur barwowych, zwane *izotermami*. Zostaną one dokładniej opisane dalej w pracy.

1.5 Przestrzeń CIE 1960

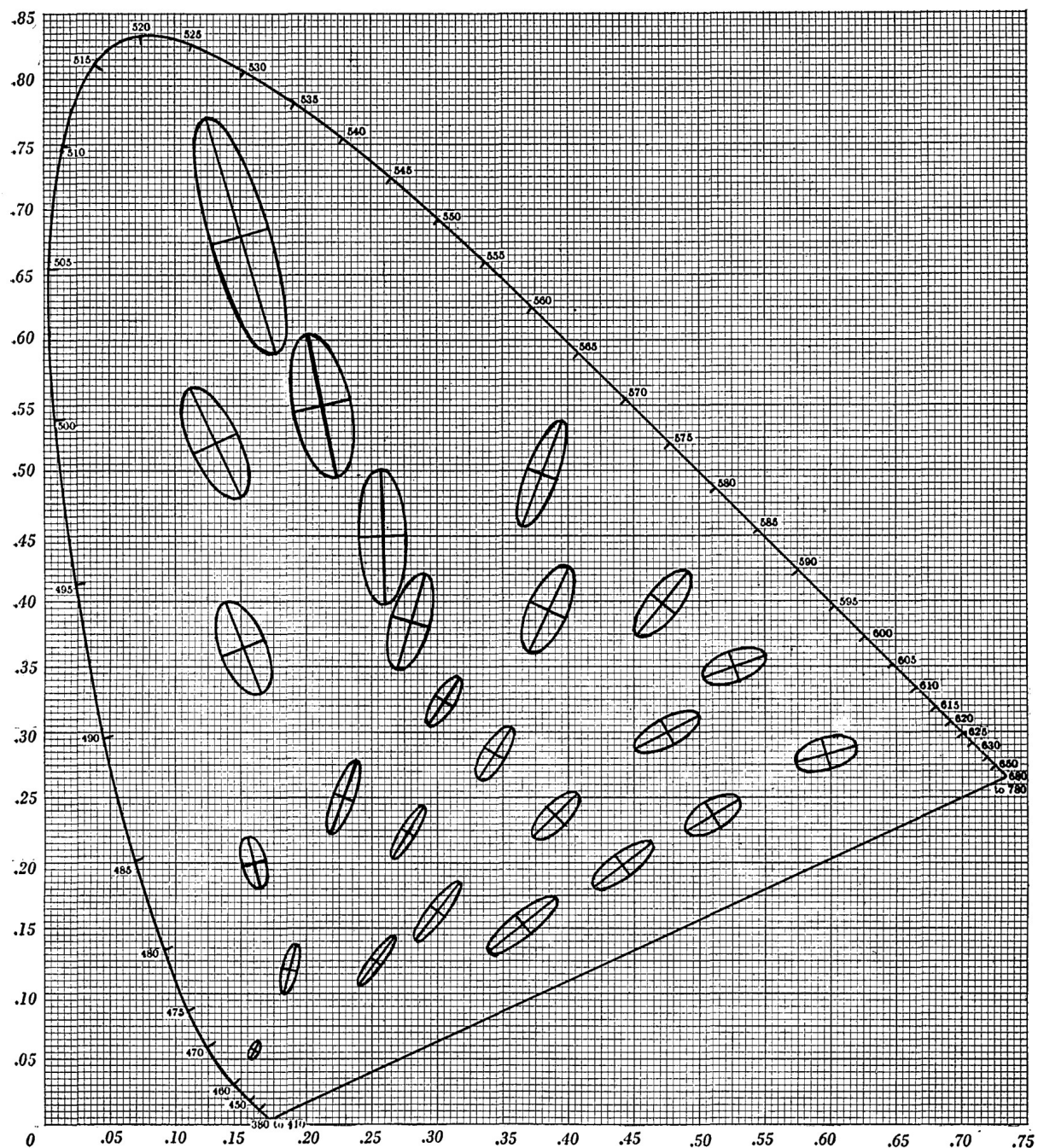
W 1942 r. David MacAdam opublikował wyniki badań wrażliwości człowieka na różnice barw [10]. Na rys. 1.8 znajduje się jedna z ilustracji z jego publikacji, przedstawiająca *elipsy MacAdama*. Chromatyczności zawierające się wewnątrz danej elipsy są prawie nierozróżnialne. Łatwo zauważyć, zatem, że przestrzeń CIE 1931 (x, y, Y) nie odwzorowuje dobrze różnic pomiędzy barwami. Postanowiono zatem stworzyć nowe przestrzenie, nie-mające tego problemu, zwane *równomiernymi przestrzeniami barw* (ang. *uniform color space* lub UCS).

Przestrzeń CIE 1960 (U, V, W) jest wynikiem prostego, liniowego przekształcenia przestrzeni CIE 1931 (X, Y, Z) , a przestrzeń CIE 1960 (u, v, Y) jest zdefiniowana analogicznie do CIE 1931 (x, y, Y) . Przekształcenia opisane są przez równania (A.8–A.12).

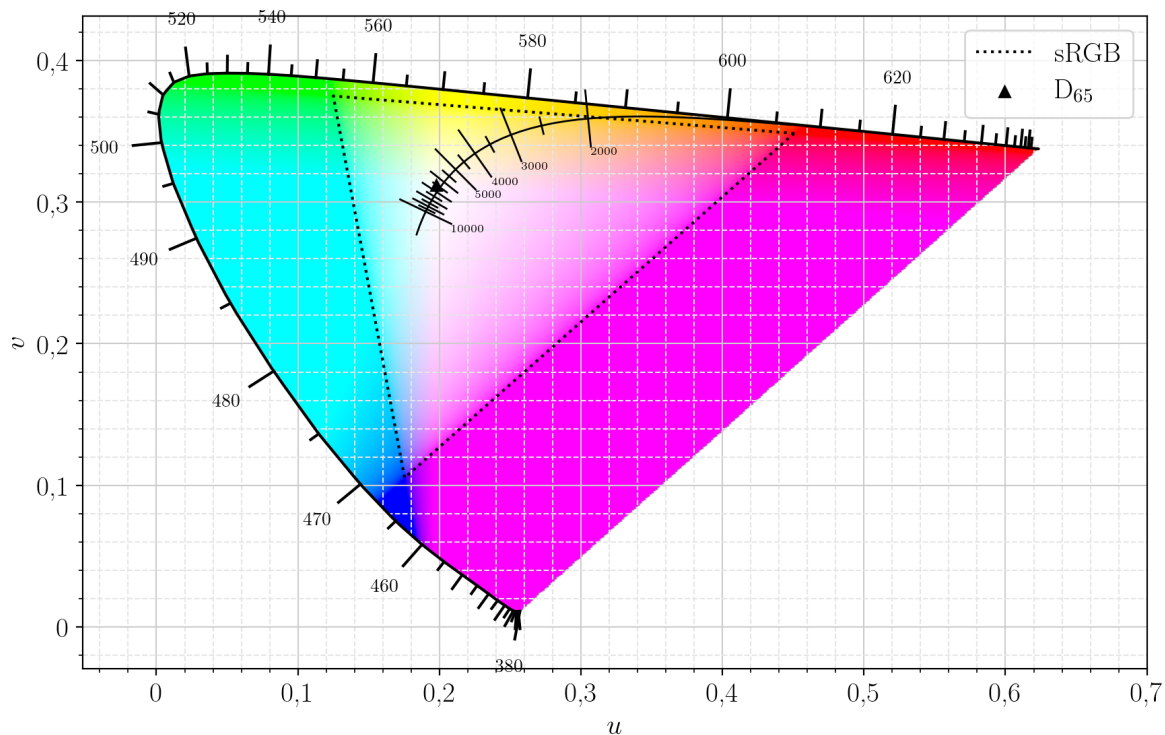
Na rys. 1.9 wykreślono diagram chromatyczności we współrzędnych (u, v) . Przedstawia on dwie kluczowe zalety przestrzeni (u, v, Y) :

- Poprawiona równomierność. Barwy zielone, dla których elipsy MacAdama były największe, zajmują znacznie mniejszą powierzchnię wykresu i odwrotnie dla barw niebieskich.
- Izotermy są dokładnie prostopadłe do linii barw ciała doskonale czarnego. Pozwala to na stosunkowo łatwe wyznaczanie temperatury barwowej, o czym dalej.

¹Otoczka wypukła punktów to najmniejszy zbiór wypukły zawierający te punkty.



Rys. 1.8. „Odchylenia standardowe chromatyczności od zaznaczonych standardów, przedstawione w dziesięciokrotnym powiększeniu na wykresie wg. standardu CIE 1931, obserwator: PGN.” Ilustracja z pracy MacAdama [10]. (PGN to inicjały Perleya G. Nuttinga Jra., obserwatora w eksperymentach MacAdama.)



Rys. 1.9. Diagram chromaticzności w przestrzeni CIE 1960 (u, v, Y) dla $Y = Y_n$.

1.6 Przestrzeń CIE 1964

W 1963 r. Günter Wyszecki opublikował artykuł, w którym zaproponował nową przestrzeń barw [11], opartą o przestrzeń CIE 1960 (u, v, Y) . Wprowadził on kilka bardzo istotnych innowacji w stosunku do istniejących wtedy standardów CIE.

Bezpośrednio w równaniach, opisujących przejście z (u, v, Y) , zawarł *transformację adaptacji chromatycznej* (CAT, od ang. *chromatic adaptation transform*), w tym przypadku typu Judda.. Współrzędne (u, v) są najpierw przesuwane tak, aby punkt $u = 0, v = 0$ odpowiadał chromaticzności oświetlenia, co ma w założeniu uniezależnić wyniki od rodzaju oświetlenia.

Wprowadził mocno nieliniową współrzędną jasności, modelując prawo Stevensa oraz wziął pod uwagę efekt Hunta, wprowadzając bezpośrednią zależność chromatyczności od jasności. Dzięki temu w tej przestrzeni można porównywać barwy o różnych jasnościach.

Przestrzeń została ustandaryzowana w następnym roku jako CIE 1964 (U^*, V^*, W^*) . Odpowiednie przejścia są opisane równaniami (A.13–A.14). Ponieważ przestrzeń jest trójwymiarowa, diagramy chromaticzności rysować będą w poniższych współrzędnych:

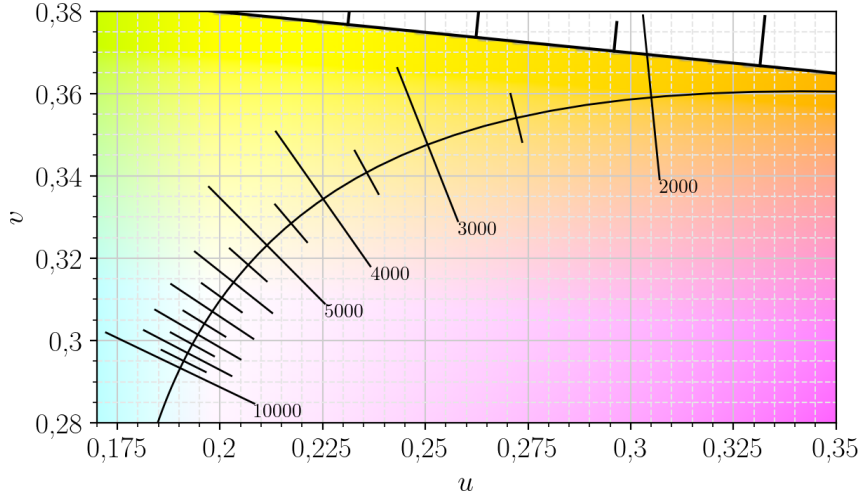
$$\left(\frac{U^*}{W^*}, \frac{V^*}{W^*}, W^* \right) \quad (1.12)$$

Taki diagram można zobaczyć przykładowo na rys. 2.2.

Adaptacja chromatyczna wymaga wprowadzenia pojęcia *źródła odniesienia*, dającego światło uznawane za białe. Za biel najczęściej przyjmuje się jedną z barw CDC, ponieważ uznawane są za najbardziej naturalne. Współrzędne chromatyczne tego źródła to *punkt bieli* i w tej pracy oznaczane są przez literę „n” w przypisie dolnym.

1.7 Skorelowana temperatura barwowa

Ponieważ praktycznie zawsze za biel przyjmuje się jedną z barw CDC, barwy źródeł światła często podaje się poprzez *skorelowaną temperaturę barwową* *skorelowana temperatura barwowa* (CCT, od ang. *correlated color temperature*). Jest to taka temperatura, dla której promieniowanie CDC ma barwę najbardziej zbliżoną do badanej, gdzie podobieństwo określa przez geometryczną odległość na diagramie chromatyczności CIE 1960 (u, v, Y) (rys. 1.10).



Rys. 1.10. Zbliżenie na rys. 1.9, przedstawiające dokładniej linię barw CDC.

Formalnie, jeżeli (u, v) to współrzędne badanej barwy, a $(u_{\text{CDC}}(T), v_{\text{CDC}}(T))$ to współrzędne barwy CDC o temperaturze T , CCT można zdefiniować jako

$$T_{\text{CCT}} = \arg \min_T \Delta_{uv}(T) = \arg \min_T \sqrt{(u - u_{\text{CDC}}(T))^2 + (v - v_{\text{CDC}}(T))^2} \quad (1.13)$$

Określanie CCT sprowadza się zatem w praktyce do znalezienia minimum funkcji metodami numerycznymi i jest stosunkowo proste. Należy zauważyć, że dla niektórych barw można znaleźć więcej niż jedną CCT. Wystarczy wydłużyć narysowane przeze mnie izotermie na rys. 1.9 lub 1.10 tak, aby się przecięły – punkty przecięcia będą w jednakowej odległości od linii barw CDC. Z tego powodu zwykle przyjmuje się największą dopuszczalną wartość Δ_{uv} , powyżej której CCT uznaje się za nieokreślone. CIE rekomenduje [1, s. 67] przyjęcie

$$\Delta_{uv} \leq 5 \times 10^{-2} \quad (1.14)$$

za warunek istnienia CCT.

Rozdział 2

Metody oceny jakości oddawania barw

Problem dobrego oddawania barw jest wynikiem istnienia zjawiska metameryzmu. Dwie powierzchnie, mające identyczną barwę przy oświetleniu jednym źródłem światła, mogą zacząć różnić się przy innym oświetleniu. Ponieważ człowiek jest najbardziej przyzwyczajony do światła słonecznego i tradycyjnego oświetlenia żarowego, za najbardziej naturalne uznaje się barwy przedmiotów przy właśnie takim oświetleniu, a wszelkie odstępstwa za niepożądane.

Wraz z rozwojem nowoczesnej techniki świetlnej, pojawiła się potrzeba na obiektywny, ilościowy opis jakości oddawania barw. Spośród bardzo wielu, opublikowanych na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat, wybrałem kilka najczęściej stosowanych i najbardziej interesujących metod.

Zdecydowanie najczęściej podawanymi parametrami, opisującymi oddawanie barw lampy, są *współczynniki oddawania barw* (CRI, ang. *color rendering index*). Na rys. 2.1 można zobaczyć opakowanie lampy LED, której wysoki współczynnik CRI jest bardzo wyraźnie przez producenta podkreślony, wraz ze informacją, że jest to źródło „światła wysokiej jakości”.¹



Rys. 2.1. Opakowanie lampy LED z wyraźnie zaznaczoną wysoką wartością CRI (CIE R_a).

2.1 CIE R_a

Najpowszechniej stosowanym CRI jest ustandaryzowany przez komisję CIE współczynnik R_a . Istotnie, jest tak powszechny, że „CRI” i „ R_a ” są stosowane zupełnie wymiennie, pomimo, że CRI formalnie jest pojęciem ogólnym.

Obliczanie współczynnika CIE R_a przebiega według poniższego algorytmu. Wszystkie współrzędne są wyznaczane na podstawie funkcji dopasowywania barw standardowego obserwatora CIE 1931 (2°).

1. Obliczenie CCT źródła badanego i wybór źródła odniesienia na jej podstawie:

¹Nie przypadkiem za tę lampę musiałem zapłacić dwukrotnie więcej niż za modele o „zwykłym” CRI.

- Dla CCT mniejszej od 5000 K, CDC o temperaturze takiej samej, jak CCT.
- W przeciwnym wypadku, iluminant serii D o takiej samej CCT.

W przypadku, gdy źródło badane nie spełnia warunku (1.14), współczynnik R_a jest **niezdefiniowany**.

2. Unormowanie obu rozkładów spektralnych tak, aby $Y = 100$. W tym celu należy obliczyć współrzędną Y , a następnie (korzystając z właściwości liniowości przestrzeni (X, Y, Z)) przemnożyć wszystkie punkty rozkładu przez czynnik $\frac{100}{Y}$.
3. Obliczenie rozkładów światła odbitego od próbki o reflektancji $R_i(\lambda)$ po oświetleniu źródłem badanym $n'_{\lambda,b}(\lambda)$ i odniesienia $n'_{\lambda,0}(\lambda)$, stosując (1.6).
4. Obliczenie współrzędnych powyższych rozkładów w przestrzeni CIE 1931 (X, Y, Z) , zgodnie z (1.8).
5. Przeliczenie współrzędnych źródła odniesienia do przestrzeni CIE 1964 (U^*, V^*, W^*) , zgodnie z (A.12) i (A.13). Jako punkt bieli należy przyjąć to samo źródło.
6. Przeliczenie współrzędnych źródła badanego do przestrzeni CIE 1960 (u, v, Y) i zastosowanie CAT opisanej w A.3.
7. Przejście do współrzędnych (U^*, V^*, W^*) , tak samo jak w kroku 5. (tj. zakładając ten sam punkt bieli).
8. Wyznaczenie euklidesowej odległości między punktami opisywanymi przez powyższe dwa zestawy współrzędnych (U^*, V^*, W^*) (źródła badanego i odniesienia):

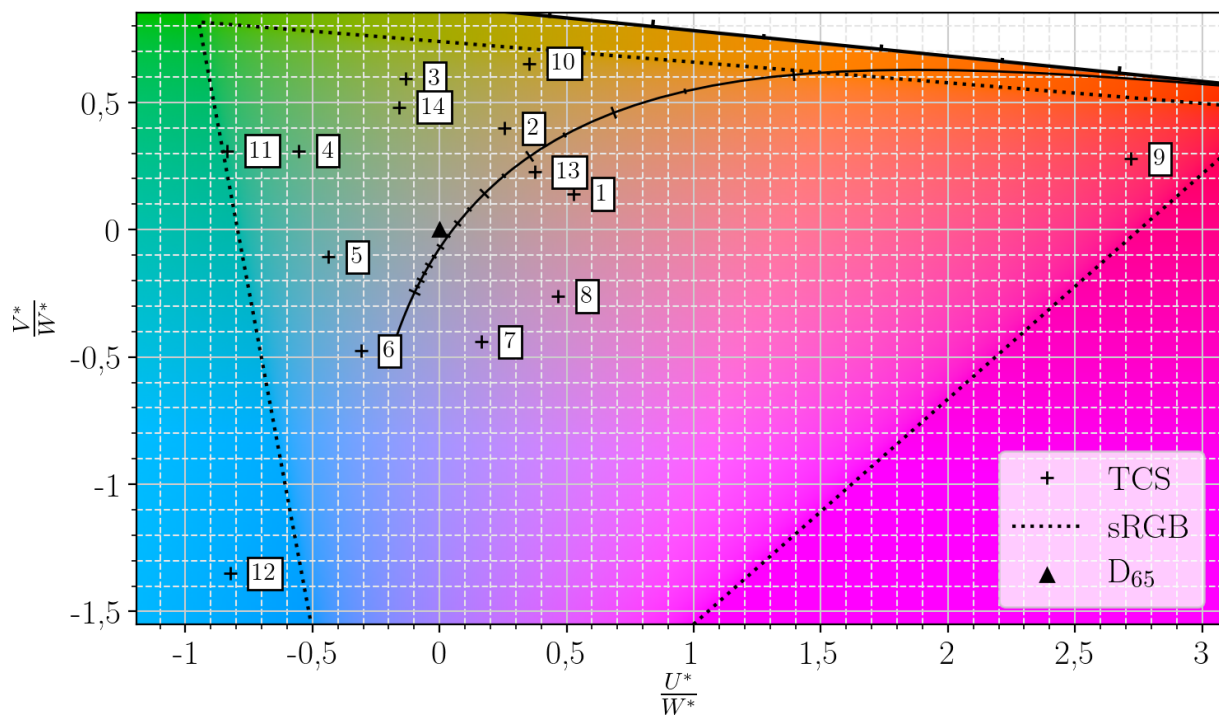
$$\Delta E = \sqrt{(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2} \quad (2.1)$$

9. Obliczenie SCRI (*szczególny współczynnik oddawania barw*, ang. *special color rendering index*) zgodnie z poniższym wzorem:

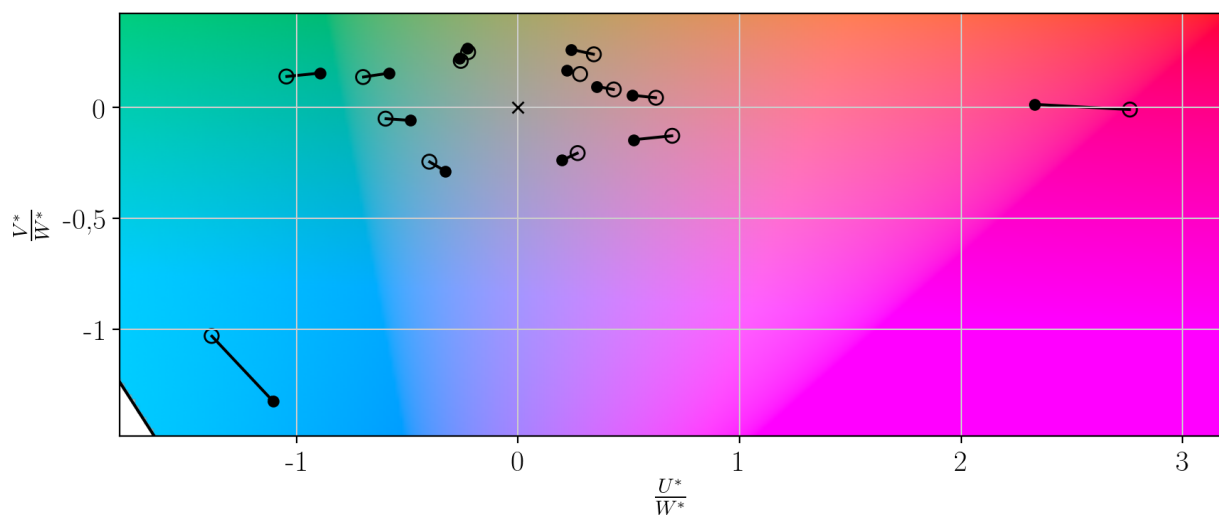
$$R_i = 100 - 4,6\Delta E \quad (2.2)$$

gdzie i to numer próbki. Współczynnik został dobrany tak, aby dla iluminantu F4 $R_a = 51$.

Procedura jest powtarzana dla każdej z pierwszych ośmiu *próbek barw testowych* (TCS, od ang. *test color sample*). Barwy tych próbek (w świetle wzorca D_{65}) zostały zaznaczone na rys. 2.2. Średnia arytmetyczna wynikających SCRI to współczynnik CRI R_a . Rys. 2.3 przedstawia graficznie błędy w oddawaniu barw jednego ze zmierzonych źródeł.



Rys. 2.2. Czternaście próbek testowych do obliczania współczynnika R_a , oświetlonych wzorcem D_{65} i przedstawionych w układzie CIE 1964.



Rys. 2.3. Ilustracja idei współczynników R_i – błędy w oddawaniu barw czternastu próbek testowych na przykładzie lampy LA.

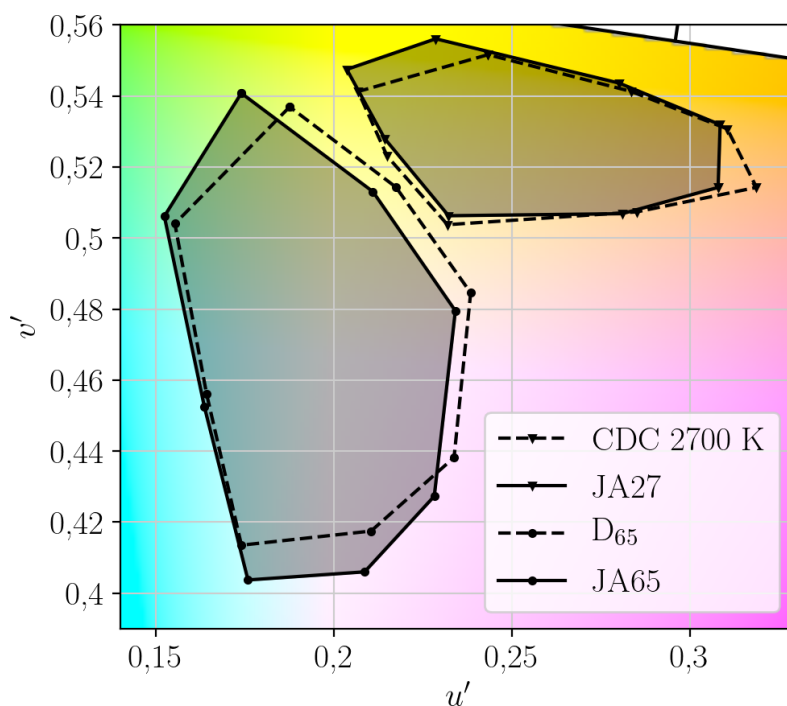
2.2 CIE $R_9 - R_{14}$

Współczynników SCRI, tak samo jak standardowych próbek barw testowych, jest czternaście. Średnia arytmetyczna wszystkich jest czasem nazywana *rozszerzonym CRI* (extended CRI) i ma symbol R_e . W szczególności, producenci często podają współczynnik R_9 , ponieważ odpowiada on bardzo nasyconej czerwonej barwie, którą trudno dobrze oddać.

2.3 GAI

Współczynnik powierzchni gamy (GAI, ang. *gamut area index*) pozwala opisać jakość oddawania barw źródła w inny sposób, niż współczynniki oparte o różnice w barwach oświetlanych próbek względem danego wzorca.

Powierzchnia gamy źródła to powierzchnia wielokąta, utworzonego z barw oświetlonych próbek na diagramie chromatyczności (rys. 2.4). W przypadku GAI jest to ośmiokąt – wykorzystuje się ten sam zestaw ośmiu próbek, co w CRI R_a – wykreślany w przestrzeni CIE 1976 (u', v'). Im bardziej nasycone są te barwy, tym większy jest tworzony przez nie wielokąt. Wyższy współczynnik GAI przekładać się będzie w praktyce na wrażenie żywszych, naturalniejszych kolorów oraz lepszą zdolność do odróżniania podobnych barw [3].



Rys. 2.4. Powierzchnie gam dwóch zmierzonych jarzeniówek oraz odpowiadających im źródeł standardowych; należy zwrócić uwagę, że niskie temperatury barwowe mają tendencję do zmniejszania tych powierzchni.

Istnieje wiele współczynników związanych z powierzchnią gamy [5], ale ten jest najczęściej spotykany. Razem ze współczynnikiem R_a , dobrze sprawdza się w ocenianiu jakości oddawania barw [3].

Algorytm obliczenia GAI, według [12], przebiega następująco:

1. Obliczenie rozkładu światła odbitego dla każdej z ośmiu próbek używanych do obliczenia CRI R_a , oświetlonych badanym źródłem.

2. Obliczenie współrzędnych tych rozkładów w przestrzeni CIE 1974 (u', v').
3. Wyznaczenie wypukłego ośmiokąta, którego wierzchołkami są punkty o powyższych współrzędnych. Jeżeli takiego nie ma (nie byłby wypukły lub miałby mniej wierzchołków), GAI nie jest określony.²
4. Obliczenie powierzchni S ośmiokąta. Współczynnik GAI dany jest przez

$$\text{GAI} = \frac{100}{0,007351717} S \quad (2.3)$$

Współczynnik został dobrany tak, aby iluminant E miał $\text{GAI} = 100$.³

2.4 CQS

Pomimo dużej popularności i szerokiego przyjęcia w środowisku projektantów oświetlenia, współczynnik R_a spotkał się falą krytyki. Twórcy *skali jakości kolorów* (CQS, ang. color quality scale) [13] zaproponowali nową metodę oceniania jakości oddawania barw, unikającą problemów ustandaryzowanej przez komisję CIE. Najważniejsze wady CRI R_a można podsumować w kilku punktach:

- Użyta transformacja von Kriesa (dodatek A.3) nie przetrwała próby czasu i została zastąpiona nowocześniejszą i bliżej zgodną z badaniami psychofizycznymi transformacją CMCCAT2000.
- Próbki testowe, wybrane do obliczeń współczynnika R_a nie są zbyt nasycone; ponadto, jest ich tylko osiem. Aby utrudnić producentom projektowanie źródeł światła maksymalizujących ten współczynnik (bez przykuwania uwagi do rzeczywistej, praktycznej jakości oddawania barw), wybrano piętnaście nasyconych próbek.
- Przestrzeń CIE 1964 (U^*, V^*, W^*) nie jest tak równomierna jak CIE 1976 (L^*, a^*, b^*).
- Brana pod uwagę powinna być powierzchnia gamy. Współczynnik CQS jest odpowiednio niższy dla źródeł o niskim GAI, aby oddawać różnice w możliwości rozróżniania nieznacznych różnic barwach.

2.5 FSI i FSCI

Warto wspomnieć o jeszcze jednym pomysle na ocenę źródeł pod względem oddawania barw, polegającym na badaniu „pełni” widma emisyjnego. Podstawą jest założenie, że naturalne światło powinno składać się z promieniowania o wszystkich (widzialnych) długościach fali, a nierówne widma (np. lamp fluorescencyjnych) są niepożądane. Niestety, w praktyce taki opis okazuje się nieprzydatny w przewidywaniu jakości oddawania barw przez źródła [14, 15].

²W literaturze nikt nie wspomina, co zrobić w takiej sytuacji. Najprawdopodobniej to się po prostu nie zdarza w praktyce.

³Współczynnik w mianowniku to zatem powierzchnia ośmiokąta dla tego iluminantu.

Celem współczynnika FSI (full-spectrum index) jest zdefiniowanie wyżej wspomnianej „pełni” widma źródła światła w sposób umożliwiający jej obiektywny pomiar. Wartość FSI wyznaczana jest w sposób czysto matematyczny, przez potrójną całkę badanego widma emisyjnego [4]

$$\text{FSI} = \frac{1}{350} \int_0^{350} dw \int_{380+w}^{730+w} d\lambda_C \left[\int_{380+w}^{\lambda_C} n_{\lambda,P}(\lambda) d\lambda - \frac{\lambda_C - w - 380}{350} \right]^2 \quad (2.4)$$

gdzie $n_{\lambda,P}$ to okresowa funkcja na bazie rozkładu ilości światła źródła n_λ , spełniająca

$$(\forall \lambda : 380 \leq \lambda < 730)(n_{\lambda,P}(\lambda) = n_\lambda(\lambda)) \quad (2.5)$$

oraz

$$(\forall \lambda)(n_{\lambda,P}(\lambda) = n_{\lambda,P}(\lambda + 350)) \quad (2.6)$$

Dla zwięzłości pominięto symbol nanometrów w powyższych wzorach, który powinien stać za wszystkimi stałymi.

Algorytm wyznaczania FSI przedstawia się następująco:

1. Przeprobkowanie rozkładu ilości światła, tak, aby próbki były rozmieszczone równomiernie co $\Delta\lambda$ w przedziale od 380 do 730 nm. Zgodnie z [4], przyjmuję $\Delta\lambda = 1$ nm. Niech $n[\lambda]$ oznacza wynikowy sygnał dyskretny, a N ilość próbek.
2. Unormowanie $n[i]$ tak, aby $\sum n[i] = 1$.
3. Wykonanie poniższych kroków dokładnie N razy.

(a) Niech C oznacza sumę kumulatywną n .

$$C[i] = \sum_{j=0}^i n[j] \quad (2.7)$$

(b) Niech D oznacza różnice kwadratów C i C_{EE} , sumy kumulatywnej rozkładu równomiernego.

$$D[i] = (C[i] - C_{EE}[i])^2 \quad (2.8)$$

$$C_{EE}[i] = \frac{i - 380}{350} \quad (2.9)$$

(c) Obliczenie I dla tego

$$I = \sum D[i] \Delta\lambda \quad (2.10)$$

(d) Przesunięcie cykliczne $n[i]$ o jedną próbkę w prawo. (Ostatni element staje się pierwszy, a wszystkie pozostałe przesunięte są o jedną pozycję.)

4. FSI jest równy średniej arytmetycznej wartości I ze wszystkich powtórzeń kroku 3.

Współczynnik FSCI (full-spectrum color index) jest prostym przekształceniem współczynnika FSI.

$$\text{FSCI} = 100 - 5,1 \cdot \text{FSI} \quad (2.11)$$

Podobnie zatem jak R_a , FSCI przyjmuje największą wartość 100 i spada wraz z „pogarszaniem” się mierzonej przez niego właściwości.

Rozdział 3

Sprawdzenie poprawności programu

Całość powyższych rozważań teoretycznych byłaby zupełnie niepotrzebna, jeżeli nie byłaby zgodna z ogólnie przyjętymi normami. Aby upewnić się, że nie popełniłem błędów w rozumieniu oraz we wdrażaniu (w postaci programu komputerowego) badanych metod oceny jakości oddawania barw, przeprowadziłem obszerną

3.1 Testy jednostkowe

Najprostsze opierają się na śledzeniu tak zwanych *invariantów*, czyli wielkości, które nie zależą od sposobu ich opisu. Najlepszym i najbardziej intuicyjnym przykładem jest barwa. Nieważne, w jakiej postaci przedstawione jest to wrażenie – czy jako słowny opis, bądź zestaw współrzędnych w wybranej matematycznej przestrzeni – doznanie jest dokładnie takie same. Czerwony jest czerwony niezależnie od tego, z jakiej abstrakcji skorzystamy do jego opisu.

Dokładnie tej samej własności należy spodziewać się od współrzędnych chromatycznych. Przejścia pomiędzy przestrzeniami powinny zachowywać barwy i być idealnie odwracalne. Wszelkie naruszenia tej zasady muszą zatem być wynikiem błędu. Szeroko stosowaną metodologią programistyczną, stworzoną do detekcji tego typu błędów jest *testowanie jednostkowe*, polegającą na wyodrębnieniu i zbadaniu prostych elementów programu.

Testowanie rozpocząłem od sprawdzenia, czy zaprogramowane przeze mnie przejścia między przestrzeniami barw są rzeczywiście odwracalne oraz spójne ze sobą. W tym celu, dla kilkuset losowo wybranych współrzędnych w przestrzeni CIE 1931 (X, Y, Z), sprawdziłem odwracalność przejść do wszystkich innych, wdrożonych przestrzeni. Sprawdzanie było zautomatyzowane i było przeprowadzane po każdej zmianie, aby zminimalizować ryzyko wprowadzenia błędu do kodu.

W taki sam sposób upewniłem się, że napisany przeze mnie program poprawnie generował rozkłady promieniowania CDC i iluminantów serii D (o zadanej CCT) oraz wyznaczał temperaturę barwową.

3.2 Porównanie z literaturą

Niestety, wyżej opisane testy są w stanie wykryć jedynie niespójności w samym programie. Nie można w ten sposób dostrzec niezgodności ze standardami, wynikającymi, przykładowo, ze złego zrozumienia używanych metod. Aby zapobiec błędom tego rodzaju, należy własne wyniki porównać z opublikowanymi w odpowiednich standardach lub w szeroko

przyjętej literaturze. Przykładowo, współczynnik CRI R_a jest zdefiniowany w taki sposób, aby dla wzorca F4 przyjmował wartość 51, przy zaokrągleniu do najbliższej liczby całkowitej.

W [3] autorzy opublikowali wykresy widm emisyjnych ośmiu źródeł wraz z obliczoną CCT, współczynnikami R_a , GAI i FSCI. Za pomocą wolnego programu *Plot Digitizer* [16] odtworzyłem dane bezpośrednio z wykresów. Proces nie jest idealnie dokładny, należy więc spodziewać się niewielkich błędów w wynikach. Tabela 3.1 porównuje obliczone przeze mnie wyniki z opublikowanymi. Nazwy lamp pochodzą od ich temperatur barwowych – „cool white” (zimna biel) i ”warm white” (ciepła biel).

Lampa	CCT [K]		R_a		GAI		FSCI	
	pub.	wł.	pub.	wł.	pub.	wł.	pub.	wł.
CW1	5137	5080	75	74,8	65	64,2	60	59,9
CW2	6682	6744	78	78,2	97	94,9	74	73,1
CW3	6126	6126	71	71,0	81	79,6	64	63,6
CW4	5854	5630	94	93,4	99	92,4	74	72,6
WW1	3174	3180	95	94,6	55	52,4	67	66,8
WW2	3443	3428	80	79,7	64	62,0	68	68,6
WW3b	3732	3718	81	81,0	74	71,0	72	71,9
WW4	3261	3283	91	91,4	93	90,5	77	77,6

Tab. 3.1. Porównanie obliczonych parametrów źródeł, opublikowanych w [3] (pub.) z obliczonymi przeze mnie (wł.).

3.3 Pomiary źródeł komercyjnych

Najbardziej miarodajnymi okazały się pomiary widm emisyjnych kilkunastu komercyjnych źródeł, wymienionych i opisanych w tabeli 3.2.

Symbol	Typ	Producent i model	CCT [K]	R_a
Ż	żarówka ¹	HELIOS HEAVY DUTY LAMP	2700	100
JA27	światłówka	OSRAM DULUX STICK	2700	≥ 80
JA65	światłówka	OSRAM DULUX TWIST	6500	≥ 80
JB27	światłówka	OSRAM DULUXSTAR Mini Twist	2700	≥ 80
LA	LED	OSS LED	3000	≥ 80
LB30	LED	OSRAM LED	3000	80
LB40	LED	OSRAM LED	4000	80
LB65	LED	OSRAM LED	6500	80
LC1–LC5 ²	LED	Bridgelux M0502	4000	≥ 72
T28	LED	Track Light L2	2800	95
T30	LED	Track Light L2	3000	95
T32	LED	Track Light B2	3200	95
T40	LED	Track Light B2	4000	96

Tab. 3.2. Wykaz zmierzonych lamp.

Wykorzystany spektrometr *Ocean Optics USB4000-VIS-NIR* (rys. 3.2) jest obsługiwany przez oprogramowanie *SpectraSuite*, które oferuje możliwość wyznaczania (w czasie rzeczywistym) wielkości kolorymetrycznych, w szczególności interesujących mnie czteremastu współczynników R_i (oraz, oczywiście, R_a). Dzięki temu, wyniki własnych obliczeń mogłem porównać nie tylko z danymi producenta, ale też z wynikami wiarygodnego programu, stworzonego przez ekspertów w dziedzinie.

3.3.1 Układ pomiarowy

Układ pomiarowy jest stosunkowo prosty i składa się z badanego źródła światła oraz spektrofotometru, mierzącego rozkład spektralny emitowanego przez nie promieniowania (rys. 3.3).

Urządzenie pomiarowe cechuje się bardzo dużą kierunkowością detekcji. Zmniejsza ona podatność na światło otoczenia (pochodzące głównie z ekranu komputera, obsługującego spektrometr) oraz eliminuje problemy związane z różnicami w kątach padania na optykę.

Aby uniknąć problemów związanych z migotaniem, związanym z niewystarczającym filtrowaniem napięcia przemiennego sieci elektrycznej czas naświetlania detektora ustawiony był przeze mnie na wielokrotność okresu tego napięcia. Dotyczy to przede wszystkim żarówek, które polegają wyłącznie na masie termicznej żarnika, aby zachować w przybliżeniu stałą jasność. Niestety,



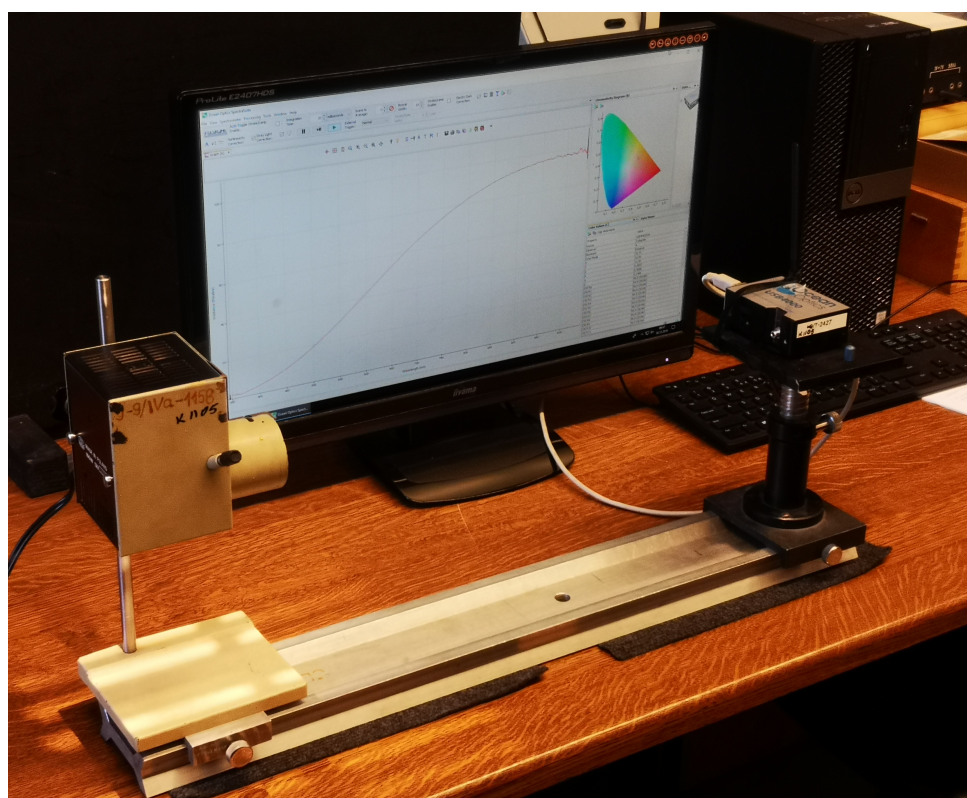
Rys. 3.1. Jedno ze zmierzonych źródeł światła: komercyjna, łatwo dostępna jarzeniówka firmy OSRAM (JA65).

¹Lampa żarowa z żarnikiem wolframowym.

²Do testów wykorzystano pięć opraw tego samego modelu.



Rys. 3.2. Spektrometr Ocean Optics USB4000-VIS-NIR.



Rys. 3.3. Układ pomiarowy przy włączonym świetle i monitorze komputerowym. Widoczna łąwa optyczna ze źródłem kalibracyjnym (z lewej) i spektrometrem (z prawej). Za łąwą komputer z uruchomionym programem SpectraSuite.

można się z nim spotkać również podczas korzystania z nowoczesnych opraw, nawet LED, ponieważ stosowane prostowniki i filtry mogą być niskiej jakości. Zastosowana matówka, wstawiona przed detektorem, służyła zatem do zmniejszania natężenia światła padającego na detektor.

3.3.2 Przebieg pomiarów

Przed każdą serią pomiarów spektrometr był przeze mnie kalibrowany. Proces składał się z dwóch części: kompensacji prądu ciemnego oraz rejestracji widma odniesienia. Pierwsza polegała na pomiarze w warunkach całkowitego zasłonięcia szczeliny wejściowej, aby stały szum³, wynikający z budowy elementu światłoczułego, mógł zostać odjęty od właściwych pomiarów.

Widmem odniesienia był pomiar żarówki wolframowej o dokładnie znanym rozkładzie promieniowania, modelowanym rozkładem promieniowania ciała doskonale czarnego o temperaturze 2700 K. Wprowadzenie takiego pomiaru do *SpectraSuite* umożliwiło kompensację nierównomiernej spektralnej czułości fotodetektorów.

3.4 Wyniki

W tabelach 3.3, 3.4 i 3.5 przedstawiłem wyniki podawane przez oprogramowanie *SpectraSuite* wraz z własnymi. Dla czytelności powtórzyłem też dane producentów (tab. 3.2), jeżeli były znane.

Lampa	CCT [K]			R_a			R_e	GAI	FSCI
	prod.	S.S.	wł.	prod.	S.S.	wł.	wł.	wł.	wł.
Ż	2700	2699	2701	100	99,9	100,0	100,0	48,6	69,9
JA27	2700	3047	2753	≥ 80	81,5	83,3	72,0	49,1	44,5
JA65	6500	10553	7074	≥ 80	80,9	76,0	73,2	102,8	71,4
JB27	2700	3023	2689	≥ 80	80,9	82,8	71,7	51,2	47,1
LA	3000	2974	2976	≥ 80	72,7	72,6	63,9	53,0	52,7
LB30	3000	3046	3046	80	81,5	81,4	75,6	53,3	56,5
LB40	4000	4018	4017	80	82,6	82,5	76,2	75,8	70,0
LB65	6500	6157	6110	80	84,8	84,5	77,9	89,2	72,1
LB97	4000	4084	4083	97	95,1	95,0	92,3	76,7	79,9
LC1	4000	4079	4083	≥ 72	82,6	82,5	75,7	71,9	67,4
LC2	4000	4029	4030	≥ 72	82,4	82,3	75,4	70,1	66,2
LC3	4000	4041	4038	≥ 72	82,4	82,4	75,4	70,4	66,5
LC4	4000	4059	4043	≥ 72	82,6	82,5	75,6	70,5	66,7
LC5	4000	4075	4077	≥ 72	82,8	82,7	75,9	71,1	67,1
T28	2800	2741	2719	95	94,4	94,6	93,4	65,4	68,6
T30	3000	3126	3125	95	91,7	91,7	89,1	68,6	80,6
T32	3200	3284	3284	95	95,8	95,9	95,5	79,4	78,0
T40	4000	4189	4187	96	95,0	95,1	93,6	91,4	85,6

Tab. 3.3. Temperatury barwowe i współczynniki oddawania barw badanych lamp; „prod.” – wartość podawana przez producenta, „S.S.” – wartość obliczona przez *SpectraSuite*, „wł.” – obliczenia własne).

³Stały w znaczeniu niezależności od czasu. Matryce światłoczułe mają tendencję do wykazywania (przestrzennej) nierównomierności w czułości.

Lampa	R_1		R_2		R_3		R_4		R_5		R_6		R_7		R_8	
	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.
Ż	99,9	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
JA27	93,0	96,9	95,4	96,7	45,9	51,4	80,8	89,7	92,0	90,1	86,1	85,1	83,8	89,3	75,4	67,3
JA65	95,5	90,1	89,0	85,8	46,5	30,4	79,2	79,5	94,7	95,4	79,1	71,0	80,1	75,7	83,3	80,1
JB27	92,0	97,0	95,1	96,3	46,1	52,5	78,2	87,5	91,9	90,1	87,2	86,1	82,0	87,6	74,7	65,4
LA	69,3	69,3	83,1	83,0	93,8	93,7	67,7	67,8	68,1	68,1	76,1	76,0	77,9	77,9	45,2	45,1
LB30	79,6	79,4	90,3	90,1	96,1	96,2	79,2	79,3	79,8	79,8	88,2	88,1	82,0	82,0	56,4	56,3
LB40	81,2	81,2	87,5	87,5	92,8	92,8	83,1	83,1	81,8	81,7	83,4	83,4	85,6	85,6	65,2	65,1
LB65	83,6	83,3	88,4	88,0	90,7	90,4	85,4	85,2	84,1	83,9	83,0	82,6	89,2	89,1	73,8	73,5
LB97	96,1	96,0	98,0	97,8	96,9	96,7	93,4	93,4	93,8	93,7	94,8	94,6	95,7	95,8	92,0	92,0
LC1	80,5	80,4	88,5	88,4	94,9	94,8	81,9	81,9	80,8	80,7	84,4	84,3	86,2	86,2	63,6	63,6
LC2	80,2	80,1	87,9	87,8	94,8	94,7	82,1	82,2	80,4	80,4	83,9	83,8	86,4	86,4	63,4	63,4
LC3	80,2	80,1	88,2	88,0	94,9	94,8	81,9	81,9	80,5	80,4	84,2	84,0	86,3	86,3	63,3	63,3
LC4	80,5	80,3	88,7	88,3	95,2	95,0	81,7	82,0	80,7	80,6	84,6	84,3	86,2	86,3	63,5	63,5
LC5	80,7	80,6	88,9	88,8	95,4	95,3	81,7	81,7	80,8	80,8	84,9	84,8	86,3	86,2	63,7	63,6
T28	93,2	93,8	93,6	94,0	97,1	97,3	94,9	95,1	92,7	93,1	89,2	89,5	95,7	95,6	98,6	98,8
T30	93,8	93,7	93,7	93,6	90,8	90,7	91,4	91,4	92,3	92,2	91,0	90,9	92,5	92,5	88,3	88,3
T32	96,5	96,7	97,7	97,8	94,7	94,7	93,2	93,2	96,8	96,9	95,8	96,0	95,4	95,6	96,5	96,7
T40	97,5	97,7	97,6	97,5	91,2	91,2	92,8	92,9	98,6	98,7	94,3	94,3	94,5	94,6	93,9	94,0

Tab. 3.4. Kontynuacja tabeli 3.3 – współczynniki $R_1 - R_8$ zmierzonych źródeł.

Lampa	R_9		R_{10}		R_{11}		R_{12}		R_{13}		R_{14}	
	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.	S.S.	wł.
Ż	100,0	100,0	99,9	100,0	99,9	100,0	99,8	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0
JA27	24,9	-1,3	54,0	53,9	82,6	81,9	50,5	49,6	89,6	92,2	62,6	65,9
JA65	87,1	88,3	45,0	31,1	86,0	95,4	68,9	49,0	96,8	96,6	66,0	56,3
JB27	25,7	-4,1	55,3	54,9	83,8	83,7	48,3	48,2	88,7	92,3	62,6	66,5
LA	-27,4	-27,5	60,4	60,2	61,8	61,8	51,1	51,0	71,9	71,8	96,5	96,5
LB30	0,2	0,0	78,0	77,7	78,5	78,5	70,4	70,1	82,1	81,9	98,5	98,5
LB40	8,1	7,9	70,9	70,8	82,9	83,0	66,1	65,9	82,4	82,4	96,0	96,0
LB65	20,1	19,1	71,7	70,9	84,9	84,8	60,2	60,0	85,0	84,6	95,1	94,9
LB97	81,7	81,3	92,5	92,1	93,3	93,3	71,7	71,3	97,0	96,8	97,7	97,6
LC1	4,1	4,1	73,0	72,8	81,1	81,1	61,8	61,6	82,5	82,3	97,3	97,3
LC2	3,0	3,0	71,9	71,8	81,6	81,6	61,4	61,4	81,9	81,8	97,2	97,2
LC3	3,3	3,2	72,4	72,2	81,1	81,2	61,4	61,2	82,1	81,9	97,3	97,3
LC4	4,0	3,8	73,4	72,7	80,9	81,2	61,6	61,4	82,5	82,2	97,5	97,4
LC5	4,7	4,5	73,9	73,7	80,9	80,9	61,6	61,4	82,7	82,6	97,6	97,6
T28	93,9	95,2	88,2	89,1	91,1	91,4	81,6	82,2	92,3	92,9	99,0	99,0
T30	71,8	71,6	83,0	82,8	91,6	91,6	81,0	80,7	93,4	93,3	93,8	93,7
T32	95,9	96,3	96,7	96,7	91,6	91,6	92,7	92,6	96,6	96,8	96,1	96,1
T40	89,4	89,8	93,3	93,0	91,5	91,6	82,2	82,1	98,4	98,6	94,4	94,4

Tab. 3.5. Kontynuacja tabeli 3.3 – współczynniki $R_9 - R_{14}$ zmierzonych źródeł.

Rozdział 4

Wnioski

Znalezienie i zestawienie informacji na temat metod oceny oddawania barw było procesem czasochłonnym. Swoją pracę musiałem jednocześnie opierać o literaturę z zakresu kolorymetrii oraz kodów źródłowych istniejących programów. Dopiero połączenie przejrzystych, jakościowych wyjaśnień z precyzyjnymi formalnymi opisami algorytmów daje możliwość zrozumienia i zastosowania tych metod. Ważne okazały się też zagadnienia techniki cyfrowego przetwarzania obrazów. W dobie informatyzacji, wiedza na temat tego, jak komputery, ekrany komputerowe czy drukarki kodują i przetwarzają dane o barwach jest niezbędna do poprawnego przedstawienia wyników w postaci graficznej, na diagramach chromatyczności.

Porównania wyników z literaturą (tab. 3.1) wykazują zgodność zastosowanych przeze mnie metod ze stosowanymi przez autorów publikacji. Niewielkie różnice są można wyjaśnić niedokładnościami w odtwarzaniu danych z wykresów rozkładów spektralnych źródeł. Dużą zaletą korzystania z takich publikacji jest nieograniczanie się do wyłącznie najczęściej spotykanego współczynnika R_a . Znaczna większość producentów oświetlenia nie podaje innych współczynników.

Pomiary źródeł komercyjnych pozwoliły na porównanie nie tylko ze specyfikacjami produktów, ale też z wyliczeniami wiarygodnego, komercyjnego oprogramowania, obsługującego wykorzystany w pomiarach spektrometr. W prawie wszystkich przypadkach można zauważyć niemal idealną zgodność mojego programu ze *SpectraSuite*. Różnice we współczynnikach R_a i R_i są rzędu ostatniej cyfry znaczącej, a CCT poniżej 1%. Istotnymi wyjątkami są jarzeniówki, w przypadku których oprogramowanie spektrometru w znacznym stopniu zawyżyło temperaturę barwową. Porównania wizualne i specyfikacje sugerują, że bardziej wiarygodne są wartości podawane przez mój program. Przyczyną jest najprawdopodobniej nieciągła natura widm emisyjnych tego typu lamp, mogąca powodować błędy numeryczne.

Jednocześnie, wyniki znacząco rozmiągają się z danymi producentów. Wbrew moim oczekiwaniom, można zauważyć tendencję do zaniżania R_a . Tylko oprawa LA miała ten współczynnik znacznie niższy w rzeczywistości, niż podany na opakowaniu. W pozostałych przypadkach różnice były mniejsze niż 5 punktów, co jest uznawane próg zauważalności [17].

Z tego wszystkiego wnioskuję, że cel, którym było napisanie programu stosującego metody oceny jakości oddawania barw zgodnie z literaturą i przemysłem został osiągnięty. Jednocześnie to potwierdza, że zawarte w tej pracy informacje są prawdziwe, kompletne i mogą stanowić solidny fundament dla czytelników, którzy również chcieliby te metody wdrażać. Ponieważ praca obejmuje nie tylko popularny CRI R_a , ale praktycznie wszystkie

stosowane w przemyśle metody, tytułowy cel pracy również uznają za spełniony w satysfakcjonującym stopniu.

4.1 Błędy numeryczne

Przyczyną rozbieżności między programami mogą być błędy numeryczne, czyli – w tym przypadku – błędy wynikające z zaokrągleń i całkowania numerycznego. Wiele obliczeń korzysta z funkcji, które zostały wyznaczone eksperymentalnie i są dostępne jedynie w formie tabel (funkcje dopasowywania barw, barwy testowe, itd.). Pomiedzy różnymi źródłami mogą zatem wystąpić drobne różnice w dokładności, zaokrąglaniu czy rozdzielczości.

Wyżej wspomniane funkcje występują w całkach, mnożąc rozkłady ilości światła, np. przy obliczaniu współrzędnych trójkromatycznych (równania 1.8). W przypadku bardzo częstej w praktyce sytuacji, w której rozdzielczość spektralna danych pomiarowych przewyższa dokładność tabel, pojawia się konieczność zrównania tych rozdzielczości. Przeprobkować można serię danych pomiarowych, serię danych z tabeli lub obie. Istnieje też duża dowolność w samym procesie przepróbkowania. Niewłaściwy dobór metody całkowania numerycznego lub jej parametrów może doprowadzić do znaczących błędów, szczególnie w przypadku widm nieciągłych (np. widm emisyjnych lamp jarzeniowych).

4.2 Wady układu pomiarowego

Powodów stosunkowo dużych rozbieżności między wynikami pomiarów (obliczonych zarówno przez oprogramowanie spektrometru i mój program), a danymi podawanymi przez producenta być może należy szukać w samej metodzie pomiarowej. Układ był bardzo prosty i pozbawiony oczywistych problemów. Niemniej jednak, w retrospekcji, można wymienić kilka szczegółów, które powinienem był sprawdzić:

- Czy żarówka, służąca do kalibracji spektroskopu, rzeczywiście miała temperaturę barwową 2700 K i czy jej widmo emisyjne było dokładnie widmem ciała doskonale czarnego? Być może zwykła żarówka nie jest odpowiednia do kalibracji.
- Jaki wpływ ma czas włączenia źródła? Widmo emisyjne jarzeniówek widocznie zmieniało się w chwilach po włączeniu, więc pomiary wykonywałem po ustabilizowaniu się odczytu. Nie czekałem jednak zbyt długo. Być może powinienem był, dla pewności nawet w przypadku pozostałych źródeł.
- Jak wyniki zależą od spektrometru? Niestety, do dyspozycji miałem tylko jeden model, o rozdzielczości ok. 3,600 punktów i zakresie 350–1100 nm. Urządzenie o węższym zakresie (bardziej zbliżonym do przedziału widzialnych długości fal) czy większej rozdzielczości dokładniej zmierzyłoby wąskie szczyty w widmach lamp jarzeniowych.
- Jak wyniki zależą od ustawień spektrometru? Zmiana czasu naświetlania oraz regulacja jasności padającego na detektor światła ma wpływ na szum, a więc też na wyniki. Jak duży jest to wpływ można było sprawdzić wykonując serię pomiarów i badając wariacje w CCT, R_a , itd.

Dodatek A

Spis wzorów

A.1 Iluminanty serii D

Model światła dziennego przyjęty przez komisję CIE jest wynikiem prac Deane Judda i jego współpracowników. Zespołowi udało się sprowadzić skomplikowane rozkłady spektralne światła, zmierzone w różnych porach dnia i warunkach pogodowych do stosunkowo prostego matematycznego opisu.

Przede wszystkim, zauważyli, że barwa światła dziennego jest bardzo zbliżona do barwy CDC, pomimo, że mocno zmienia się w trakcie dnia. Temperatura barwowa okazała się być jedynym parametrem modelu, który na jej podstawie dobiera współczynniki do kombinacji liniowej jedynie trzech podstawowych rozkładów.

Algorytm obliczania rozkładu spektralnego iluminantów serii D dla temperatury barwowej T według [1] jest przedstawiony poniżej.

1. Wyznaczenie współrzędnej x barwy rozkładu na podstawie żądanej temperatury barwowej T .

Jeżeli $4000 \text{ K} \leq T \leq 7000 \text{ K}$, wtedy:

$$x = \frac{-4,607 \cdot 10^9}{T^3} + \frac{2,9678 \cdot 10^6}{T^2} + \frac{0,09911 \cdot 10^3}{T} + 0,244063 \quad (\text{A.1})$$

Jeżeli $7000 \text{ K} < T < 25\,000 \text{ K}$, wtedy:

$$x = \frac{-2,0064 \cdot 10^9}{T^3} + \frac{1,9018 \cdot 10^6}{T^2} + \frac{0,24748 \cdot 10^3}{T} + 0,23704 \quad (\text{A.2})$$

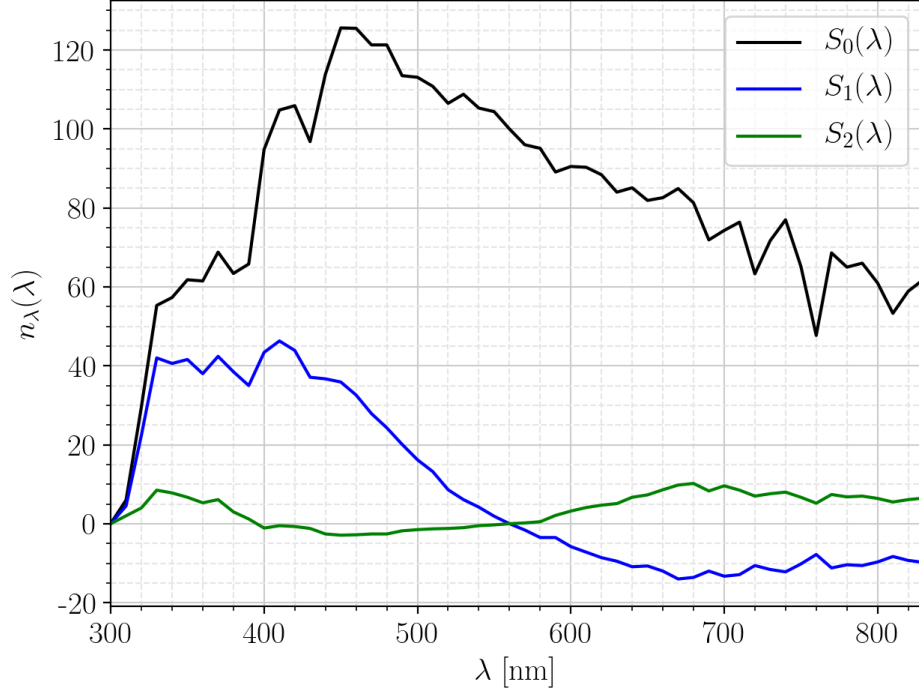
W przeciwnym razie, rozkład jest niezdefiniowany.

2. Obliczenie odpowiadającej współrzędnej y .

$$y = -3x^2 + 2,87x - 0,275 \quad (\text{A.3})$$

3. Obliczenie współczynników M_1 i M_2 z zaokrągleniem do trzech miejsc po przecinku.

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{-1,703x + 5,9114 - 1,315}{0,2562x - 0,7341y + 0,0241} \\ M_2 &= \frac{-31,4424x + 30,0717y + 0,03}{0,2562x - 0,7341y + 0,0241} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$



Rys. A.1. Funkcje bazowe S_0 , S_1 , S_2

4. Wyznaczenie rozkładu spektralnego iluminantu D.

$$n(\lambda) = S_0(\lambda) + M_1 S_1(\lambda) + M_2 S_2(\lambda) \quad (\text{A.5})$$

gdzie S_0 , S_1 , S_2 to funkcje bazowe, których wykresy zostały przedstawione na rys. A.1.

A.2 Przejścia pomiędzy przestrzeniami barw

Poniższe wzory matematyczne zostały opracowane na podstawie [1] i [2]. Informacje na temat przestrzeni sRGB bazują na [9].

A.2.1 CIE 1931 $(X, Y, Z) \leftrightarrow (x, y, Y)$

Dla $X + Y + Z \neq 0$:

Dla $y \neq 0$:

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ Y &= Y \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

$$\begin{aligned} X &= \frac{Y}{y} x \\ Y &= Y \\ Z &= \frac{Y}{y} (1 - x - y) \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

A.2.2 CIE 1931 $(X, Y, Z) \leftrightarrow$ CIE 1960 (U, V, W)

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{3}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{3}{2} & -3 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

A.2.3 CIE 1960 $(U, V, W) \leftrightarrow (u, v, Y)$

Dla $U + V + W \neq 0$:

Dla $v \neq 0$:

$$\begin{aligned} u &= \frac{U}{U + V + W} \\ v &= \frac{V}{U + V + W} \\ Y &= V \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

$$\begin{aligned} U &= \frac{Y}{v}u \\ V &= Y \\ W &= \frac{Y}{v}(1 - u - v) \end{aligned} \quad (\text{A.11})$$

A.2.4 CIE 1931 $(X, Y, Z) \rightarrow$ CIE 1960 (u, v, Y)

Dla $X + Y + Z \neq 0$:

$$\begin{aligned} u &= \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \\ v &= \frac{6Y}{X + 15Y + 3Z} \\ Y &= Y \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

A.2.5 CIE 1960 $(u, v, Y) \leftrightarrow$ CIE 1964 (U^*, V^*, W^*)

$$\begin{aligned} U^* &= 13W^*(u - u_n) \\ V^* &= 13W^*(v - v_n) \\ W^* &= 25\sqrt[3]{Y} - 17 \end{aligned} \quad (\text{A.13})$$

$$\begin{aligned} u &= \frac{U^*}{13W^*} + u_n \\ v &= \frac{V^*}{13W^*} + v_n \\ Y &= \left(\frac{W^* + 17}{25} \right)^3 \end{aligned} \quad (\text{A.14})$$

A.2.6 CIE 1931 $(X, Y, Z) \leftrightarrow$ sRGB

$$\begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,240479 & -1,537150 & -0,498535 \\ -0,969256 & 1,875992 & 0,041556 \\ 0,055648 & -0,204043 & 1,057331 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (\text{A.15})$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,308596 & -0,650554 & 2,006610 \\ -1,031719 & 0,5533051 & 24,063914 \\ 17,970098 & -4,900928 & 0,945778 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_L \\ G_L \\ B_L \end{bmatrix} \quad (\text{A.16})$$

Pośrednie, liniowe współrzędne (z przypisem dolnym L) zamienia się na końcowe w poniższy sposób.

$$V = \begin{cases} 12,92V_L & : 0 \leq V_L \leq 0,0031308 \\ 1,055V_L^{\left(\frac{1}{2,4}\right)} - 0,055 & : 0,0031308 \leq V_L \leq 1 \end{cases} \quad (\text{A.17})$$

$$V_L = \begin{cases} \frac{V}{12,92} & : 0 \leq V \leq 0,04044994 \\ \left(\frac{200V+11}{211} \right)^{2,4} & : 0,04044994 \leq V \leq 1 \end{cases} \quad (\text{A.18})$$

gdzie za V należy wstawić jedną ze współrzędnych R , G , B , a V_L odpowiadającą liniową współrzędną.

A.3 Transformacja von Kriesa do wyznaczania R_a

Poniższe wzory zostały napisane na podstawie kodu w załączniku do [4].

Niech (c_r, d_r) będą współrzędnymi chromatycznymi źródła odniesienia, (c_t, d_t) źródła badanego, a (c_s, d_s) próbki po oświetleniu przez źródło badane. Współrzędne te otrzymuje się z odpowiadających współrzędnych w przestrzeni CIE 1960 (u, v, Y) ,

$$\begin{aligned} c &= \frac{4 - u - 10v}{v} \\ d &= \frac{1,708v - 1,481u + 0,404}{v} \end{aligned} \tag{A.19}$$

Współrzędne próbki z uwzględnieniem adaptacji chromatycznej są dane wzorami

$$\begin{aligned} u_{\text{CAT}} &= \frac{10,872 + 0,404 \frac{c_r}{c_t} c_s - 4 \frac{d_r}{d_t} d_s}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_t} c_s - \frac{d_r}{d_t} d_s} \\ v_{\text{CAT}} &= \frac{5,52}{16,518 + 1,481 \frac{c_r}{c_t} c_s - \frac{d_r}{d_t} d_s} \end{aligned} \tag{A.20}$$

Spis rysunków

1	Nowoczesna biała dioda w postaci COB (chip-on-board).	3
1.1	Przybliżone barwy źródeł monochromatycznych o różnych długościach fali (tzw. barwy tęczy).	5
1.2	Wykresy rozkładów Plancka dla różnych temperatur.	6
1.3	Przybliżone barwy CDC o różnych temperaturach, unormowane do jednokowej jasności.	6
1.4	Rozkłady spektralne kilku iluminantów D: D_{50} (5000 K), D_{55} (5500 K), D_{65} (6500 K), D_{75} (7500 K).	7
1.5	Dlaczego cytryny wyglądają dziwnie tylko na ostatnim zdjęciu (prawy dolny róg)? Ilustracja na podstawie [7].	9
1.6	Czułości spektralne czopków ($\bar{l}$, $\bar{m}$, $\bar{s}$) oraz funkcje dopasowywania barw obserwatora 2° ($\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$) i 10° ($\bar{x}_{10}$, $\bar{y}_{10}$, $\bar{z}_{10}$).	11
1.7	Diagram chromatyczności w przestrzeni CIE 1931 (x, y, Y) dla $Y = Y_n$. . .	12
1.9	Diagram chromatyczności w przestrzeni CIE 1960 (u, v, Y) dla $Y = Y_n$. . .	15
1.10	Zbliżenie na rys. 1.9, przedstawiające dokładniej linię barw CDC.	16
2.1	Opakowanie lampy LED z wyraźnie zaznaczoną wysoką wartością CRI (CIE R_a).	17
2.2	Czternaście próbek testowych do obliczania współczynnika R_a , oświetlonych wzorcem D_{65} i przedstawionych w układzie CIE 1964.	19
2.3	Ilustracja idei współczynników R_i – błędy w oddawaniu barw czternastu próbek testowych na przykładzie lampy LA.	19
2.4	Powierzchnie gam dwóch zmierzonych jarzeńówek oraz odpowiadających im źródeł standardowych; należy zwrócić uwagę, że niskie temperatury barwowe mają tendencję do zmniejszania tych powierzchni.	20
3.1	Jedno ze zmierzonych źródeł światła: komercyjna, łatwo dostępna jarzeńówka firmy OSRAM (JA65).	25
3.2	Spektrometr Ocean Optics USB4000-VIS-NIR.	26
3.3	Układ pomiarowy przy włączonym świetle i monitorze komputerowym. Widoczna ława optyczna ze źródłem kalibracyjnym (z lewej) i spektrometrem (z prawej). Za ławą komputer z uruchomionym programem SpectraSuite. . .	26
A.1	Funkcje bazowe S_0 , S_1 , S_2	33

Bibliografia

- [1] J. Schanda, *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Wiley, 2007.
- [2] A. R. Noboru Ohta, *Colorimetry: Fundamentals and Applications (The Wiley-IS&T Series in Imaging Science and Technology)*. 1 ed., 2006.
- [3] M. S. Rea and J. P. Freyssinier-Nova, “Color rendering: A tale of two metrics,” *Color Research & Application*, vol. 33, no. 3, pp. 192–202, 2008.
- [4] R. W. Mark Rea, Lei Deng, “Light sources and color,” *Lighting Research Center*, 2004.
- [5] M. P. Royer, “Comparing measures of gamut area,” *LEUKOS*, vol. 15, pp. 29–53, Oct. 2018.
- [6] K. Houser, M. Mossman, K. Smet, and L. Whitehead, “Tutorial: Color rendering and its applications in lighting,” *LEUKOS*, vol. 12, no. 1-2, pp. 7–26, 2016.
- [7] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fruit_basket_alessi.JPG. Do-step: 27 listopada 2019.
- [8] IEC, “Multimedia systems and equipment - colour measurement and management - part 2-1: Colour management - default rgb colour space - srgb,” Standard IEC 61966-2-1:1999, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH, 1999.
- [9] C. Poynton, *Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2 ed., 2012.
- [10] D. L. MacAdam, “Visual sensitivities to color differences in daylight*,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 32, pp. 247–274, May 1942.
- [11] G. Wyszecki, “Proposal for a new color-difference formula,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 53, pp. 1318–1319, Nov 1963.
- [12] P. R. Boyce, *Human Factors in Lighting*. CRC Press, Apr. 2014.
- [13] W. Davis and Y. Ohno, “Toward an improved color rendering metric,” in *Fifth International Conference on Solid State Lighting* (I. T. Ferguson, J. C. Carrano, T. Taguchi, and I. E. Ashdown, eds.), SPIE, Aug. 2005.
- [14] R. P. Institute, “Full-spectrum lighting sources,” *Lighting Research Center*, 2003.
- [15] S. Robson and S. Kimes, *6. Examining the Effects of Full-Spectrum Lighting in a Restaurant*, pp. 127–143. 06 2019.

- [16] <http://plotdigitizer.sourceforge.net/>. Dostęp: 13 grudnia 2019.
- [17] C. van Trigt, “Color rendering, a reassessment,” *Color Research & Application*, vol. 24, no. 3, pp. 197–206, 1999.