

Porównanie modeli przestrzeni barw CIE CAM i CIE LAB w celu lepszej automatyzacji optycznej kontroli jakości

Streszczenie. Jednym z elementów systemu kontroli jakości w branżach takich jak meblarska czy też motoryzacyjna jest proces porównywania kolorów czyli określenie różnic pomiędzy kolorami referencyjnymi oraz rzeczywistymi. W ocenie różnic w kolorach pomagają odpowiednie przestrzenie barw – w tym przypadku posłużono się dwoma przestrzeniami barw CIE CAM oraz CIE LAB. Porównując kolory za pomocą tych modeli różnice w trzech komponentach składających się na daną przestrzeń (jasność, nasycenie i odcień), można wykorzystać do określenia postrzeganej różnicy w wyglądzie kolorów.

Abstract. One of the elements of the quality control system in industries such as furniture or automotive is the color comparison process, i.e. determining the differences between reference and real colors. Determining appropriate color spaces helps in assessing color differences - in this case, two color spaces were used: CIE CAM and CIE LAB. By comparing colors using these models, differences in the three components that make up a given space (lightness, saturation, and hue) can be used to determine the perceived difference in color appearance (**Comparison of CIE CAM and CIE LAB color space models for better automation of optical quality control**).

Słowa kluczowe: Fotografia obliczeniowa, różnica kolorów, kontrola jakości, przestrzenie barw.

Keywords: Computational photography, color difference, quality control, color spaces.

Wprowadzenie

Tematem pracy jest porównanie przestrzeni barw CIE LAB oraz CIE CAM. Do analizy kontroli jakości wykorzystywanych jest wiele metod deterministycznych i uczenia maszynowego [1-10]. Podczas badań zostanie wykorzystany próg ledwie zauważalnej różnicy (*Just Noticeable Difference* – *JND*)[12], który jest miarą najmniejszej dostrzegalnej różnicy kolorów między dwoma bodźcami, poniżej której są one nie do odróżnienia. Warto zaznaczyć, że przestrzeń barw CIE CAM posiada przedstawiony próg dla różnic kolorów o nazwie ΔE_{CAM} [12]. Dla tej przestrzeni barw *JND* zależy od kąta odcienia, nasycenia i jasności koloru.

Intencją użycia ΔE (dE) jest opisanie odległości między dwoma kolorami. Różnica tylko zauważalna dE wynosi zwykle 2.3. Innymi słowy, jeśli dwa kolory mają dE mniejsze niż 2.3, jest to różnica między nimi jest niedostrzegalna (Tabela 1)[13].

Tabela 1. Postrzeganie kolorów w zależności od wartości ΔE .

Delta E	Postrzeganie koloru.
[0,1.0]	Nie wyczuwalny przez ludzkie oczy.
(1,2.3]	Subtelne różnice podczas dłuższej obserwacji
(2.3,10]	Wyczuwalne przy pierwszym spojrzeniu.
(10,49]	Kolory są bardziej podobne niż przeciwne.
(49,100]	Kolory są dokładnie odwrotne

Jednak ze względów związanych z psychofizyką przyjmuje się, że granicą rozróżniania kolorów dla człowieka jest wartość 2.3 [14]. W przypadku wielu modalności sensorycznych, w szerokim zakresie wielkości bodźca wystarczająco daleko od górnych i dolnych granic percepcji, *just-noticeable-difference* (*JND*) jest stałą proporcją referencyjnego poziomu sensorycznego. Zatem stosunek *JND* do odniesienia jest w przybliżeniu stały. Mierząc go za pomocą jednostek fizycznych określany jest wzorem [15]:

$$(1) \quad \frac{\Delta I}{I} = k,$$

gdzie I jest pierwotną intensywnością danej stymulacji, ΔI jest dodatkiem do niego wymaganym do postrzegania zmiany (*JND*), a k jest stałą.

Atrybuty koloru

Ustalenie odpowiednich przestrzeni kolorystycznych wymaga zmian w postrzeganiu tych przestrzeni i ich trójchromatycznych komponentów X, Y, Z stymulujących ludzkie receptory wzrokowe. Zostały one wykonane przez Międzynarodową Komisję ds. Oświetlenia (CIE, Commission Internationale de l'Éclairage)[16], o obliczając bodziec odniesienia, to jest: L^*, u^*, v^* lub L^*, a^*, b^* [17]. Pomysł polegał na stworzeniu liniowej przestrzeni kolorów, w której odległość między punktami definiującymi poszczególne kolory byłaby proporcjonalna do różnicy percepcyjnej między nimi (percepcyjne przestrzenie barw) oraz przedstawienie kolorów za pomocą współrzędnych opisujących jeden z ich kluczowych atrybutów: jasność, nasycenie i odcień.

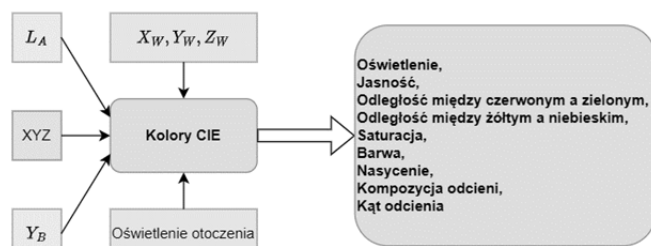
Na postrzeganie kolorów wpływa wiele różnych czynników. Mogą do takich czynników należeć właściwości fizyczne obserwowanego obiektu, w szczególności jego właściwości absorpcyjne. Dodatkowo wpływ może mieć skład spektralny źródła światła i charakterystyka środowiska, przez które przechodzi. Warto również wziąć pod uwagę odczucia obserwatora oraz stan jego ośrodków nerwowych. Ważnym aspektem jest również odległość obiektu od obserwatora oraz innych obiektów. Można więc wywnioskować, że zaobserwowana różnica w kolorze (różnica percepcyjna) jest różnicą psychofizyczną dostrzegalną przez obserwatora, wyznaczoną przez rzeczywistą obserwację dwóch próbek[18]. Zatem obliczona różnica w kolorze zależy od modelu kolorystycznego. Ponieważ bodziec barwny może być reprezentowany jako punkt w przestrzeni, różnica barwy ΔE między dwoma bodźcami jest obliczana jako odległość między punktami reprezentującymi te bodźce[19].

CIE CAM (CIE Color Appearance Model) to model kolorów, który opisuje, jak ludzie postrzegają kolory w różnych warunkach oświetlenia. Brane są pod uwagę różne czynniki wpływające na wygląd kolorów, w tym właściwości spektralne źródła światła, właściwości otaczającego środowiska oraz cechy układu wzrokowego człowieka. W pracy użyto modelu CIECAM02.

Model CIE CAM składa się z trzech podstawowych elementów: jasności (*lightness*), nasycenia (*chroma*) i odcienia (*hue*)[14]. Pierwszy z wymienionych elementów reprezentuje postrzeganą jasność koloru, drugi postrzegane

nasylenie lub intensywność koloru, natomiast trzeci reprezentuje postrzeganą kategorię kolorów, taką jak czerwony, zielony lub niebieski.

Matematyczny model CIE CAM można wykorzystać do obliczenia trzech składowych wyglądu kolorów w oparciu o rozkład widmowy źródła światła i właściwości środowiska oglądania. Dodatkowo także jest możliwość określenia wszystkich dziewięciu elementów (Rys. 1)[14], [19].



Rys. 1. Diagram modelu kolorów CIE.

Rysunek 1 przedstawia parametry widzenia, które definiują jakie warunki wpływają na postrzegane wyglądu kolorów, które są przewidywane przez model. X_W, Y_W, Z_W są wartościami trójbodźcowymi bieli odniesienia pod badanym źródłem światła; L_A określa luminancję pola adaptacyjnego; Y_B określa współczynnik luminancji tła. Parametry wyjściowe z modelu obejmują oświetlenie, jasność, odległość między kolorem czerwonym a kolorem zielonym, odległość koloru żółtego od koloru niebieskiego, saturację, barwę, nasylenie, kompozycję odcieni i kąt odcienia.

Różnice w przestrzeniach barw LAB i CAM

CIE CAM i CIE LAB to modele kolorów opracowane przez Międzynarodową Komisję ds. Oświetlenia (CIE) w celu opisywania i komunikowania kolorów. CIE CAM to bardziej zaawansowany model, który ma na celu opisanie wyglądu kolorów postrzeganego przez ludzkich obserwatorów, z uwzględnieniem takich czynników, jak adaptacja jasności i adaptacja chromatyczna. CIE CAM jest szczególnie przydatny w zastosowaniach, w których ważny jest wygląd kolorów, takich jak projektowanie produktów lub ocena dopasowania kolorów[12].

Z drugiej strony CIE LAB to prostszy model, który opisuje kolor za pomocą trzech wartości: L^* dla jasności, a^* dla osi czerwono-zielonej i b^* dla osi żółto-niebieskiej. W przeciwieństwie do CIE CAM, CIE LAB nie bierze pod uwagę wyglądu kolorów i zakłada, że postrzeganie kolorów jest jednolite w całej przestrzeni kolorów. CIE LAB jest szeroko stosowany w kolorymetrii, ponieważ zapewnia prosty sposób opisywania różnic kolorów i przestrzeni kolorów[19].

Można więc stwierdzić, że CIE CAM to bardziej zaawansowany model opisujący wygląd kolorów postrzegany przez ludzi, podczas gdy CIE LAB to prostszy model, który jest szeroko stosowany w kolorymetrii. Wybór między tymi modelami zależy od konkretnego zastosowania i poziomu szczegółowości wymaganego w opisie koloru.

Przestrzeń barw CIE CAM

Na początku należy przedstawić czym jest jednolita przestrzeń kolorów. Jest to przestrzeń kolorów, w której równoważne różnice liczbowe reprezentują równoważne różnice wizualne, niezależnie od położenia w przestrzeni kolorów. Większość przestrzeni kolorów, choć nie idealnie jednolitych, określa się jako jednolite przestrzenie kolorów, ponieważ są one bardziej jednolite w porównaniu z diagramem chromatyczności[16].

CIELAB i CIELUV są przestrzeniami stosunkowo jednolitymi percepcyjnie i zostały wykorzystane jako

przestrzenie dla euklidesowych miar różnicy kolorów. Wersja CIELAB jest znana jako CIE76[14]. Jednak później odkryto niejednorodność tych przestrzeni, co doprowadziło do powstania bardziej złożonych formuł. Tak jak wspomniano wcześniej CIECAM definiuje zestaw parametrów opisujących wygląd koloru w trzech aspektach jasności, nasylenia i odcienia. CIE CAM opiera się na założeniu, że postrzeganie kolorów zależy od trzech czynników: spektralnego rozkładu źródła światła, współczynnika odbicia widmowego obiektu i stanu adaptacji kolorów obserwatora. Model uwzględnia wpływ warunków na postrzeganie barw, takich jak oświetlenie, wielkość pola widzenia i otoczenia. Należy również pamiętać w jaki sposób oblicza się jasność, nasylenie i odcień koloru, w zależności od konkretnych warunków i zastosowanego oświetlenia[16]:

$$(2) \quad L = \frac{Y}{Y_{1/100}},$$

gdzie: Y to luminancja koloru, Y_W to luminancja bieli wzorcowej, natomiast k to stała związana z określonymi warunkami.

$$(3) \quad C = (a^2 + b^2)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{F}{F+L} \right),$$

gdzie a i b to współrzędne koloru w przestrzeni kolorów CIE LAB, a F to współczynnik zależny od określonego kąta odcienia koloru[15].

$$(4) \quad H = \text{atan2}(b, a),$$

gdzie a i b to współrzędne koloru w przestrzeni kolorów CIE LAB[14].

Rozkład widmowy źródła światła odnosi się do sposobu w jaki światło emitowane przez źródło jest rozprowadzane na różnych długościach fal lub kolorach światła. Ten rozkład widmowy może mieć znaczący wpływ na sposób postrzegania kolorów przez ludzi i jest ważnym czynnikiem w tym modelu. Różne źródła światła mają różne rozkłady widmowe, co może wpływać na postrzegany wygląd kolorów obiektów oświetlanych przez te źródła. Model CIE CAM uwzględnia rozkład widmowy źródła światła podczas obliczania postrzeganego wyglądu koloru obiektu. Odbyma się to za pomocą funkcji ważenia widmowego, która waży różne kolory światła zgodnie z ich postrzeganym wpływem na wygląd kolorów. Aby dokładnie zastosować model CIE CAM, ważne jest zmierzenie i scharakteryzowanie rozkładu widmowego używanego źródła światła. Można to zrobić za pomocą spektrometru lub innego spektralnego urządzenia pomiarowego, które może dostarczyć informacji o natężeniu światła przy różnych długościach fal. Informacje te można następnie wykorzystać do obliczenia odpowiedniej funkcji ważenia widmowego do wykorzystania w obliczeniach CIE CAM[15].

Zastosowane metody

Ze względu na naturę percepcji kolorów przez człowieka, wizualna percepcja kolorów jest inna. Ogólnie rzecz biorąc, ludzkie oczy są bardziej wrażliwe na zmiany intensywności koloru niż na jasność. Oznacza to, że to samo dE między dwoma żółtymi i dwoma zielonymi kolorami będzie prawdopodobnie wyglądało inaczej. W związku z tym istnieją równania pozwalające na określenie różnic między kolorami.

Pierwszą z nich jest $CIEL^* a^* b^*$ i ΔE_{AB} , które zostały wprowadzone przez Międzynarodową Komisję Oświetleniową (CIE) w 1976 roku. Biorąc pod uwagę dwa kolory w przestrzeni kolorów $CIEL^* a^* b^*$, (L_1, a_1, b_1) i (L_2, a_2, b_2) , wzór ΔE_{AB} definiuje się jako[18]:

$$(5) \quad \Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2}$$

Gdzie: L_1 – wartość CIE L^* koloru odniesienia; a_1 – wartość CIE a^* koloru odniesienia; b_1 – wartość CIE b^* koloru odniesienia; L_2 – wartość CIE L^* koloru próbki; a_2 – wartość CIE a^* koloru próbki; b_2 – wartość CIE b^* koloru próbki
 ΔE_{AB} zawiera przydatne informacje o odległości liniowej między dwoma kolorami.

Natomiast dla CIE CAM kolejnym jest obliczenie formuła różnicy kolorów ΔE_{CAM} , która może być wykorzystana do obliczenia JND między dwoma kolorami[18]:

$$(6) \quad \Delta E_{CAM} = \sqrt{((\Delta L/k_L * S_L)^2 + (\Delta C/(k_C * S_C + [1 * 10]^{-12}))^2 + (\Delta H/(k_H * S_H + [1 * 10]^{-12}))^2 + R_T * (\Delta C/(k_C * S_C + [1 * 10]^{-12})) * (\Delta H/(k_H * S_H + [1 * 10]^{-12})))}$$

gdzie ΔL , ΔC i ΔH to różnice odpowiednio w jasności, nasyceniu i kącie odcienia między dwoma porównywanymi kolorami. Natomiast k_L , k_C i k_H to stałe zależne od warunków panujących podczas obserwacji podane w specyfikacji CIE CAM. Dodatkowo S_L , S_C i S_H to współczynniki, które odpowiadają za nieliniowość ludzkiego układu wzrokowego w postrzeganiu odpowiednio jasności, barwy i odcienia. Można je obliczyć w następujący sposób[18]:

$$(7) \quad S_L = 1 + \left(0.015 * \frac{(L_{bar} - 50)^2}{\sqrt{20 + (L_{bar} - 50)^2}} \right)$$

$$(8) \quad S_C = 1 + 0.045 * C_{bar}$$

$$(9) \quad S_H = 1 + 0.015 * C_{bar} * T$$

W powyższych równaniach L_{bar} i C_{bar} to średnie wartości jasności i nasycenia dwóch porównywanych kolorów, a T jest miarą różnicy katowej między odcieniami tych kolorów.

Przykład użycia

W badaniach zastosowano prototyp urządzenia, którego schemat oraz rzeczywisty wygląd przedstawiono na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Schemat urządzenia.

Przedstawione rozwiązanie umożliwia oświetlenie obiektu podczas robienia zdjęć. Posiada ono także wbudowaną kartę kolorów. Jest ona zastosowana z dwóch powodów, po pierwsze w celu badania rozkładu histogramu kolorów. Po drugie umożliwia zbieranie danych, które w przyszłości posłużą do budowy modelu głębokiego uczenia związanego z oceną podobieństwa kolorów.

Wyniki porównań poszczególnych kolorów w zależności od zastosowanych modeli kolorów prezentują się w tabeli 2.

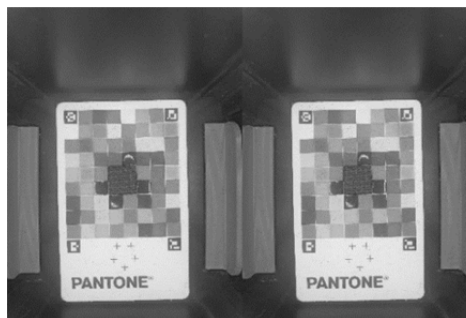


Rys. 3. Rzeczywisty wygląd urządzenia pomiarowego.

Tabela 2. Porównanie barw Delta E i Delta cam E.

Kolor 1	Kolor 2	ΔE	ΔE_{CAM}
Czarny	Czarny	1.0	0.0
Jasno szary	Niebieski	13.6	3.0
Czarny	Écru	45.8	89.2
Szary	Pomarańczowy	12.7	35.2
Zielony	Fioletowy	60.2	91.3
Écru	Biały	11.9	3.1
Niebieski	Szary	8.1	4.5
Bordowy	Brązowy	23.4	8.7

W pierwszym przypadku dla tego samego obiektu JND zostało określone na 1.0 – więc barwy są identyczne. Zakłada się że JND kolorów w zakresie od 0.0 do 2.3 oznacza, że to ten sam kolor (Rys. 4). Jednak stosując CIE CAM uzyskany wynik to 0.0. Można wywnioskować, że badamy ten sam przedmiot. Wstępne badania dają nadzieję, że zastosowanie przestrzeni barw CAM pozwoli lepiej określić czy kolory są identyczne czy różne. Można także zauważyć, że korzystając z ΔE_{CAM} otrzymuje się lepiej odzwierciedlone różnice w kolorach. Oczywiście na podstawie obliczeń wykonanych dla przestrzeni barw CIE LAB także wykazano, które barwy są identyczne, a które są różne. Natomiast w przestrzeni barw CIA CAM te różnice są lepiej przedstawione numerycznie.



Rys. 4. Przykład wykonania pomiaru.

Podsumowanie

W prezentowanym artykule porównano przestrzenie barw CIE LAB oraz CIE CAM. Podczas badań zostanie wykorzystany próg ledwie zauważalnej różnicy. Zaprojektowano również urządzenie do oświetlenia obiektu podczas robienia zdjęć, które posiada ono także wbudowaną kartę kolorów. Pozwala na badania rozkładu histogramu kolorów i umożliwia zbieranie danych. Efektem prac było określenie różnic pomiędzy kolorami referencyjnymi oraz rzeczywistymi. Porównując kolory za pomocą przedstawionych modeli można wykorzystać przedstawione rozwiązanie do określenia postrzeganej różnicy w wyglądzie kolorów.

Autorzy: mgr inż. Michał Maj, WSEI University, Netrix S.A., R&D Centre, Lublin, Poland, E-mail: michal.maj@netrix.com.pl; Damian Pliszczyk, M.Sc. Eng., R&D Netrix S.A. e-mail: damian.pliszczyk@netrix.com.pl; Tomasz Cieplak, D.Eng. Lublin University of Technology, e-mail: t.cieplak@pollub.pl; dr inż. Łukasz Maciura, Netrix S.A, R&D Centre, Lublin, Poland, E-mail: lukasz.maciura@netrix.com.pl;

LITERATURA

- [1] Gnaś, D., Adamkiewicz, P., Indoor localization system using UWB, *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12 (2022), No. 1, 15-19.
- [2] Goćławski, J., Sekulska-Nalewajko, J., Korzeniewska, E., Prediction of textile pilling resistance using optical coherence tomography, *Scientific Reports*, 12 (2022), No. 1, 18341.
- [3] Goćławski, J., Korzeniewska, E., Sekulska-Nalewajko, J., Kiełbasa, P., Dróżdż, T., Method of Biomass Discrimination for Fast Assessment of Calorific Value, *Energies*, 15 (2022), No. 7, 2514.
- [4] Kłosowski G, Rymarczyk T, Niderla K, Kulisz M, Skowron Ł, Soleimani M., Using an LSTM network to monitor industrial reactors using electrical capacitance and impedance tomography – a hybrid approach. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 25 (2023), No. 1, 11.
- [5] Kłosowski G., Rymarczyk T., Kania K., Świć A., Cieplak T., Maintenance of industrial reactors supported by deep learning driven ultrasound tomography, *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*; 22 (2020), No 1, 138–147.
- [6] Kłosowski G., Rymarczyk T., Niderla K., Rzemieniak M., Dmowski A., Maj M., Comparison of Machine Learning Methods for Image Reconstruction Using the LSTM Classifier in Industrial Electrical Tomography, *Energies* 2021, 14 (2021), No. 21, 7269.
- [7] Rymarczyk T., Kłosowski G., Hoła A., Sikora J., Tchórzewski P., Skowron Ł., Optimising the Use of Machine Learning Algorithms in Electrical Tomography of Building Walls: Pixel Oriented Ensemble Approach, *Measurement*, 188 (2022), 110581.
- [8] Koulountzios P., Rymarczyk T., Soleimani M., A triple-modality ultrasound computed tomography based on full-waveform data for industrial processes, *IEEE Sensors Journal*, 21 (2021), No. 18, 20896-20909.
- [9] Koulountzios P., Aghajanian S., Rymarczyk T., Koiranen T., Soleimani M., An Ultrasound Tomography Method for Monitoring CO2 Capture Process Involving Stirring and CaCO3 Precipitation, *Sensors*, 21 (2021), No. 21, 6995.
- [10] Styła, M., Adamkiewicz, P., Optimisation of commercial building management processes using user behaviour analysis systems supported by computational intelligence and RTI, *Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Środowiska*, 12 (2022), No 1, 28-35.
- [11] Jiang Q., Liu Z., Wang S., Shao F., Lin W., Toward Top-Down Just Noticeable Difference Estimation of Natural Images, *IEEE Transactions on Image Processing*, 31 (2022), 3697–3712.
- [12] Hellwig L. Fairchild M. D., Brightness, lightness, colorfulness, and chroma in CIECAM02 and CAM16, *Color Res Appl*, 47 (2022), No. 5.
- [13] Jiang Q., Liu Z., Wang S., Shao F., and Lin W., Toward Top-Down Just Noticeable Difference Estimation of Natural Images,” *IEEE Transactions on Image Processing*, 31 (2022), 3697–3712.
- [14] Fernandez-Maloigne C., Ed., *Advanced Color Image Processing and Analysis*. New York, NY: Springer New York, 2013.
- [15] Alman D. H., *Industrial color difference evaluation*, *Color Research and Application* (1993), No. 18.
- [16] Zausznica A., *Nauka o barwie*, I. Warszawa: PWN, 2012.
- [17] Maj M., Automation of optical quality control in the example of the furniture industry, *Przegląd elektrotechniczny*, 1 (2023), No. 1, 247–250.
- [18] Hecht E., *Optics (Fifth Edition)*. PWN, 2015.
- [19] Backhaus W. G. K., Kliegl R., Werner J. S., Eds., *Color Vision*. DE GRUYTER, 1998.