

УДК. 655.28+004.925.5

Х. Б. Предко

Українська академія друкарства

М. В. Шовгенюк

ІФКС НАН України

КАНОНІЧНЕ ПОДАННЯ КОЛЬОРОВИХ ПРОСТОРІВ ДЛЯ ВИДАВНИЧИХ СИСТЕМ

Описано основні властивості кольорових просторів з ахроматичною та двома хроматичними координатами кольору. Проведено порівняльний аналіз ортогональних кольорових просторів HSI та $I_1I_2I_3$. Обґрунтовано, що єдиною канонічною формою подання кольорів для видавничих систем є новий кольоровий простір ICaS.

Кольорові простори, канонічне подання, видавничі системи

Відомо більше десятка кольорових просторів, які різняться застосуванням, графічним поданням і характеризуються певними матрицями переходу до RGB-простору і навпаки. Проте не існує єдиної універсальної моделі подання кольору для всіх практичних потреб людини, оскільки розроблені простори орієнтуються на вирішення конкретних завдань. У видавничо-поліграфічній системі на стадії аналізу та опрацювання кольорових зображень використовується декілька RGB-просторів, проте на стадії синтезу зображення на друкарському відбитку в основу закладена субтрактивна модель кольору СМУК. Однозначного переходу від адитивної (RGB) системи кольорів видавничого оригіналу до субтрактивної (СМУ) моделі синтезу кольорів тріадними фарбами не існує. У зв'язку з тим необхідність створення єдиного кольорового простору у видавничих системах виникла вже давно. У даній роботі на основі дослідження властивостей відомих кольорових просторів обґрунтовується можливість єдиного канонічного подання ортогональних кольорових просторів, що дозволяє більш ефективно вирішувати ряд технологічних питань з отримання кольорових зображень у видавничих системах.

Спільним недоліком систем RGB і СМУ є їх апаратна залежність, тобто при роботі з кольором ураховують характеристики устаткування, використовуваного для його отримання. Розроблено принципово інший тип колірних систем, в яких для характеристики яскравості кольору вводиться ахроматична координата кольору, а колірність описується двома хроматичними координатами. Прикладом таких систем є CIELAB, ортогональна модель HSI та подібні їй системи HSV (HSB), телевізійні кольорові простори YUV і YIQ, кольоровий простір YCrCb та його аналог Photo YCC, які сьогодні вибрані за стандарт для цифрових зображень.

Міжнародна комісія з освітлення (CIE) розробила декілька кольорових просторів, які більш точно відтворюють фізіологічні особливості сприйняття кольору людиною. Кольоровий простір CIELAB є міжнародним стандартом, в

якому колір характеризується апаратно незалежними координатами, що зручно при користуванні в комп'ютерних програмах. У цьому просторі будь-який колір описується світлотою L^* (Luminance) і двома хроматичними компонентами: параметром a^* , який змінюється в діапазоні від зеленого ($a^* < 0$) до червоного ($a^* > 0$) кольору, і параметром b^* , змінюваному в діапазоні від синього ($b^* < 0$) до жовтого ($b^* > 0$) кольору.

У моделі HSV усі кольори визначаються трьома координатами: кольоровим тоном (Hue), насиченістю (Saturation) й інтенсивністю (значенням) (Value). Цю модель ще позначають HSB, де остання літера в назві означає яскравість (Brightness). Система HSV натомість дуже зручна для управління кольором на інтуїтивному рівні, оскільки дозволяє незалежно змінювати кожен параметр кольору, у той же час зміна навіть одного з параметрів RGB спричиняє набагато складніші зміни у колірному складі.

У кольорових просторах HSI (HLS, HSL) колір також задається значеннями трьох координат. У моделі HSI використовуються тон (Hue), насиченість (Saturation) й інтенсивність (Intensity), у моделі HLS — тон (Hue), насиченість (Saturation) і світлота (Lightness). Перехід з RGB до простору HSI здійснюється за формулами [5]:

$$\begin{aligned} \theta &= \cos^{-1} \left[\frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}} \right]; \\ H &= \begin{cases} \theta & \text{для } G \geq B, \\ 2\pi - \theta & \text{для } G < B, \end{cases} \\ S &= 1 - \frac{3}{R+G+B} \min(R, G, B), \\ I &= \frac{R+G+B}{3}. \end{aligned} \quad (1)$$

У роботі Каррона і Ламберга [8] для опису кольорового простору HSI запропоновано простіше матричне рівняння:

$$\begin{bmatrix} Y \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & -\sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $Y = I$ ахроматична компонента; C_1 і C_2 — хроматичні координати кольору. Тоді на основі формул (1, 2)

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2}; \\ H &= \begin{cases} \arccos(C_2/S), & \text{для } C_1 \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(C_2/S), & \text{для } C_1 < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

Існують два варіанти геометричної інтерпретації простору — конусоїдальний та циліндричний. Конусоїдальний (рис. 1) більш точний з практичної точки зору, оскільки при малих значеннях яскравості кольорів, як і в людському оці, зменшується розрізнення ступенів насиченості й тону. При малих значеннях насиченості та яскравості також виникають суттєві помилки під час переведення HSI у RGB та більш точний з практичної точки зору, оскільки при малих значеннях яскравості кольорів, як і в людському оці, зменшується розрізнення ступенів насиченості та тону. Також при малих значеннях насиченості та яскравості виникають суттєві помилки під час переведення HSI у RGB та навпаки. HSI простір може розглядатися як просто деформований HSV витягуванням білої точки над чистими кольорами та чорної точки — нижче них на рівні відстані.

На основі кольорового простору HSI розроблено алгоритми цифрової обробки кольорових зображень. Найбільш поширений метод кольорової сегментації зображення [7, 13], який дозволяє проводити селективну цифрову обробку виділених фрагментів зображення. У поліграфії кольоровий простір HSI практично не використовується, через те що в такому поданні досить складно враховувати кольорові характеристики реальних тріадних фарб.

На рис. 1 наведено об'ємне подання кольорового простору HSI у вигляді подвійної шестикутної піраміди.

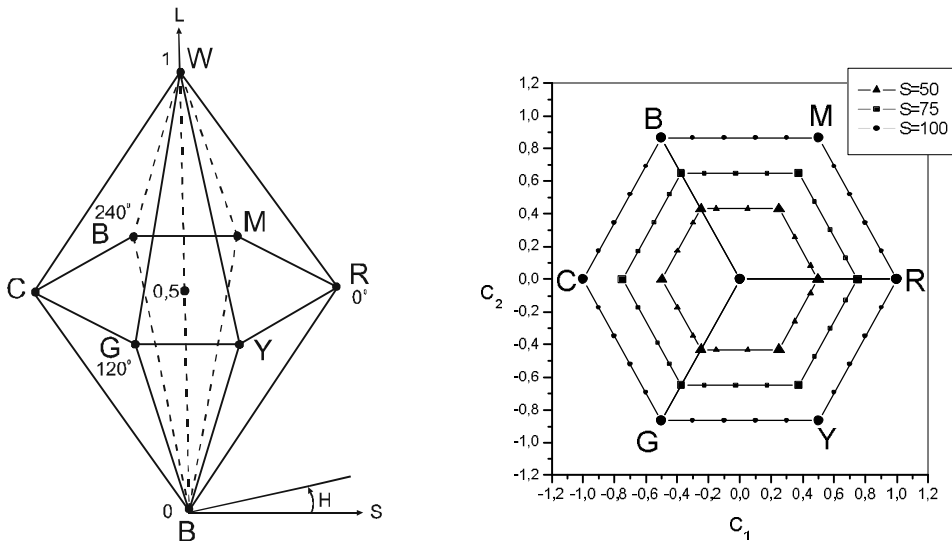


Рис. 1. Кольоровий простір HSI (зліва) і його хроматична діаграма C_1C_2 (справа) для різних рівнів насиченості (S) кольорів

Нами досліджено хроматичну діаграму простору HSI (рис. 1, справа) за геометричною формою. Для цього координати кольору з HSB перераховували в RGB у програмі Adobe Photoshop CS4 для кольорів з кроком за кольоровим тоном у 2 одиниці для насиченостей 100, 75 та 50 (при максимальній яскравості кольору 100).

Досі перехід з простору HSI до простору RGB і навпаки був складним та здійснювався за громіздкими формулами (1–3). Із застосуванням запропонованої канонічної матриці прямий і зворотний перехід з одного простору в інший значно спрощується. Замість наведених формул використовується тільки одна матриця (21). Отримана хроматична діаграма має форму правильного шестикутника, площа якого зменшується зі зниженням насиченості. Кольори, які різняться за кольоровим тоном, розміщені на сторонах шестикутника, а не по колу, як зазначається в літературних джерелах, наприклад [5, 9].

У роботі Охта та інших [11] на основі досліджень та колориметричного аналізу зображень у різних кольорових просторах запропоновано кольоровий простір $I_1I_2I_3$. Цей простір є лінійним перетворенням RGB-простору, який описується системою рівнянь

$$I_1 = \frac{1}{3}(R + G + B); \quad I_2 = \frac{1}{2}(R - B); \quad I_3 = \frac{1}{4}(2G - R - B). \quad (4)$$

За означенням (4) хроматичні координати I_2 і I_3 кольору дуже близькі до хроматичних координат іншого кольорового простору YES, запропонованого фірмою XEROX [10]

$$\begin{bmatrix} Y \\ E \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,253 & 0,684 & 0,063 \\ 0,5 & -0,5 & 0 \\ 0,25 & 0,25 & -0,5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (5)$$

У літературі [5, 9] описано багато інших кольорових просторів, кожен з яких характеризується різними матрицями переходу до хроматичної і двох хроматичних координат кольору. Враховуючи, що різні кольорові простори побудовані за різними принципами, виявити суттєві переваги одного простору над іншим є складним завданням. Проте практично всі відомі кольорові простори мають ряд спільних властивостей, які дозволяють провести порівняльний аналіз.

Використовуючи методи векторного аналізу та матричної алгебри [3, 4], опишемо загальні властивості кольорових просторів, побудованих за принципом кількісної оцінки кольорів на основі ахроматичної (I) та двох хроматичних складових, які позначимо C_1 та C_2 .

Запишемо перехід від базового простору RGB до нового кольорового IC_1C_2 у загальному вигляді:

$$\begin{bmatrix} I \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Подані таким чином елементи m_{ij} матриці переходу M є координатами нових базисних векторів I, C_1, C_2 кольору відносно старої системи векторів R, G, B . Виникає питання щодо мінімальної кількості незалежних елементів m_{ij} матриці, потрібної для побудови кольорового простору.

У новому просторі IC_1C_2 координата I повинна характеризувати ахроматичну складову довільно вибраного кольору (R_r, G_r, B_r) , а дві хроматичні координати (C_1, C_2) на площині, яку називатимемо хроматичною діаграмою кольорів, мають однозначно і повністю описувати кольорові характеристики — насиченість (S) і кольоровий тон (H) кольору (R_r, G_r, B_r) .

У базовому просторі RGB умова ахроматичного кольору записується як

$$R_i = G_i = B_i \quad (7)$$

Якщо на основі матриці (6) подати ахроматичну компоненту кольору I у формі розкладу, то для виконання умови (7) елементи першого рядка матриці переходу M повинні задовольняти аналогічні умови

$$m_{11} = m_{12} = m_{13} = m_0 \quad (8)$$

Для правильної побудови хроматичної діаграми C_1C_2 ахроматична вісь I обов'язково повинна перетинати площину хроматичних осей у точці початку координат: $C_1=0, C_2=0$. Тоді всі ахроматичні кольори характеризуватимуться однією ахроматичною координатою I і, відповідно, завжди нульовими значеннями хроматичних координат C_1 і C_2 .

На хроматичній діаграмі C_1C_2 насиченість (S) кольору буде характеризуватися довжиною радіальної прямої, на якій знаходиться вибраний колір (C_1, C_2) . Чим більша величина S , тим чистіший і насиченіший колір на хроматичній діаграмі C_1C_2 . Тоді кольоровий тон (H) характеризуватиметься кутом повороту (θ) радіальної прямої. У такому разі формули (3) будуть справедливими для всіх кольорових просторів.

Хроматична діаграма C_1C_2 характеризується фундаментальною властивістю симетрії. Якщо на діаграмі (рис. 2) задано довільно вибраний базовий колір 1, якому властиві хроматичні координати (C_1, C_2) , то для нього завжди реально існує симетричний (відносно центру координат) доповнюючий колір 2, що характеризується координатами $(-C_1, -C_2)$.

Відповідно до моделей адитивного і субтрактивного синтезу кольорів основний колір 1 і доповнюючий 2 у сумі утворюють білий колір, що можна записати векторним рівнянням

$$\begin{bmatrix} R_2 \\ G_2 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_1 \\ G_1 \\ B_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Якщо підставити координати кольорів 1 і 2 в матричне рівняння (6), то для виконання умови симетричного положення кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2 для елементів другого і третього рядків матриці переходу M повинні виконуватися рівності

$$\begin{aligned} m_{21} + m_{22} + m_{23} &= 0, \\ m_{31} + m_{32} + m_{33} &= 0. \end{aligned} \quad (10)$$

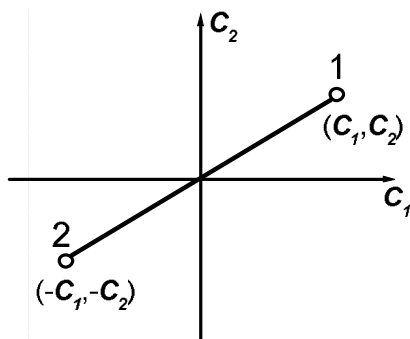


Рис. 2. Положення основного (1) і доповнюючого (2) кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2

Тоді з урахуванням (8) і (10) для побудови нового кольорового простору IC_1C_2 матричне рівняння (6) спрощується до вигляду

$$\begin{bmatrix} I \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Запишемо визначник матриці (11) у формі розкладу за елементами першого рядка

$$D_M = m_0(D_1 - D_2 + D_3), \quad (12)$$

де

$$D_1 = \begin{vmatrix} m_{22} & m_{23} \\ m_{32} & m_{33} \end{vmatrix}, \quad D_2 = \begin{vmatrix} -(m_{22} + m_{23}) & m_{23} \\ -(m_{32} + m_{33}) & m_{33} \end{vmatrix}, \quad D_3 = \begin{vmatrix} -(m_{22} + m_{23}) & m_{22} \\ -(m_{32} + m_{33}) & m_{32} \end{vmatrix} \quad (13)$$

визначники матриць 2×2 , складені з елементів матриці (11) хроматичних координат C_1 і C_2 . Можна довести, що величина визначників постійна: $D_1 = D_3$; $D_2 = -D_1$. Тоді визначник матриці переходу M

$$D_M = 3m_0 \begin{bmatrix} m_{22} & m_{23} \\ m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = 3m_0 D_1 \quad (14)$$

здається відповідно числовими значеннями чотирьох елементів — $m_{22}, m_{23}, m_{32}, m_{33}$, які характеризують положення хроматичних осей C_1 і C_2 .

Отримані формули (9–14) є математичним формулюванням принципу симетричного положення кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2 і характеризують фундаментальну властивість практично всіх відомих нині кольорових просторів з ахроматичною I і двома хроматичними C_1 і C_2 координатами.

Використання принципу симетрії положення кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2 дозволяє встановити взаємозв'язок між площиною хроматичних осей C_1 і C_2 і напрямком ахроматичної вісі I .

Нехай напрями хроматичних осей задаються векторами C_1 і C_2 у декартовій системі координат простору RGB. Тоді згідно з рівнянням (11) елементи другого і третього рядків матриці (14) будуть відповідати координатам векторів C_1 і C_2 у напрямі червоного (R) кольору, який задається одиничним вектором e_R , у напрямі зеленого (G) — вектором e_G і, відповідно, у напрямі синього (B) — вектором e_B . Тоді вектор нормалі n до площини векторів C_1 і C_2 визначається векторним добутком [7]:

$$n = C_1 \times C_2 = \begin{vmatrix} m_{22} & m_{23} \\ m_{32} & m_{33} \end{vmatrix} e_R + \begin{vmatrix} m_{23} & -(m_{22} + m_{23}) \\ m_{33} & -(m_{32} + m_{33}) \end{vmatrix} e_G + \begin{vmatrix} -(m_{22} + m_{23}) & m_{22} \\ -(m_{32} + m_{33}) & m_{32} \end{vmatrix} e_B. \quad (15)$$

Таким чином, ми приходимо до визначників (13) матриці переходу M , які характеризують у даному випадку координати і напрям вектора нормалі n (рис. 3). Оскільки визначники (13) рівні між собою, то вектор нормалі n завжди має напрям головної діагоналі одиничних векторів e_R , e_G і e_B базових кольорів і збігається з напрямом вектора I ахроматичної осі.

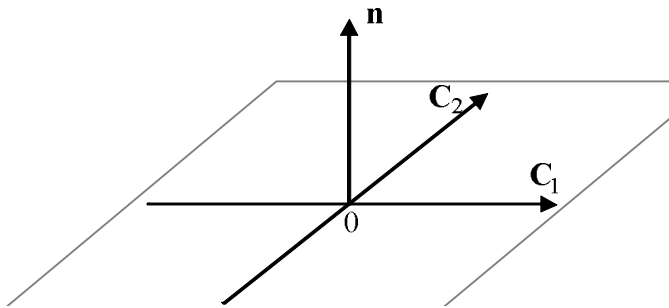


Рис. 3. Напрям вектора нормалі n до площини векторів C_1 і C_2 хроматичної діаграми

Звідси впливає, що новий кольоровий простір IC_1C_2 у загальному вигляді можна подати векторним рівнянням

$$I = k(C_1 \times C_2), \quad (16)$$

де k — коефіцієнт пропорційності, який визначається умовою нормування вектора I ахроматичної осі.

Важливою характеристикою будь-якого кольорового простору є виконання умови ортогональності хроматичних векторів C_1 і C_2 . Ця умова визначається величиною скалярного добутку векторів C_1 і C_2 [3, 4]:

$$(C_1 \times C_2) = |C_1||C_2|\cos\varphi \quad (17)$$

де φ — кут між векторами. Величини

$$|C_1| = \sqrt{2(m_{22}^2 + m_{22}m_{23} + m_{23}^2)}; \quad |C_2| = \sqrt{2(m_{32}^2 + m_{32}m_{33} + m_{33}^2)} \quad (18)$$

характеризують довжину (норму) хроматичних векторів C_1 і C_2 .

На основі (17) умова ортогональності хроматичних векторів кольору

$$(C_1 \times C_2) = m_{22}(2m_{32} + m_{33}) + m_{33}(m_{32} + 2m_{33}) = 0. \quad (19)$$

Ця умова виконується лише для малої групи кольорових просторів, які називають ортогональними кольоровими просторами. У свою чергу ортогональні простори діляться на дві підгрупи: простори з рівними довжинами хроматичних векторів $|C_1|=|C_2|$ та простори з різними хроматичними векторами $|C_1| \neq |C_2|$.

Для групи ортогональних кольорових просторів у результаті нормування отримуємо базу канонічну ортогональну матрицю даного простору

$$N \times M_{ICC} = \begin{bmatrix} 1/|I| & 0 & 0 \\ 0 & 1/|C_1| & 0 \\ 0 & 0 & 1/|C_2| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 & m_0 & m_0 \\ -(m_{22} + m_{23}) & m_{22} & m_{23} \\ -(m_{32} + m_{33}) & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} = M_{ICC}^{(can)}. \quad (20)$$

Дослідимо властивості відомих ортогональних просторів. Кольоровий простір HSI згідно з означенням (2) є прикладом простору з рівними хроматичними векторами: $|C_1| = \sqrt{6}/2$, $|C_2| = \sqrt{6}/2$. Відповідно, довжина ахроматичного вектора $|I| = \sqrt{3}/3$. Використовуючи формулу (20), кольоровий простір HSI описуємо канонічною ортогональною матрицею

$$M_{HSI}^{(can)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 0 & -\sqrt{6}/2 & \sqrt{6}/2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Канонічна матриця (21) особлива тим, що вона однозначно і просто встановлює прямий і обернений перехід від кольорового простору HSI (IC_1C_2) до RGB і навпаки:

$$\begin{bmatrix} I \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{2} & -1/\sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \\ 0 & -\sqrt{6}/2 & \sqrt{6}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & \sqrt{2} & 0 \\ 1 & -1/\sqrt{2} & -\sqrt{6}/2 \\ 1 & -1/\sqrt{2} & \sqrt{6}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Покажемо, що положення основних кольорів R, G, B у просторі HSI (рис. 4) в значній мірі залишається умовним. Теоретично можливо побудувати групу кольорових просторів, властивості яких аналогічні до простору HSI.

З урахуванням властивості радіальної симетрії кольорового простору HSI положення червоного R (1; 0; 0) кольору може бути в довільній точці на одиничному колі. Для цього використаємо матрицю повороту хроматичної діаграми C_1C_2 відносно вектора нормалі n (рис. 3)

$$T_\varphi = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Тоді добуток матриці повороту T_φ і матриці простору HSI (21) буде давати матрицю M_{new} , яка описуватиме аналогічний кольоровий простір. Для прикладу виберемо кут $\varphi = -45^\circ$:

$$M_{new} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/\sqrt{2} & \sqrt{2}(\sqrt{3}-1)/4 & -\sqrt{2}(\sqrt{3}+1)/4 \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{2}(\sqrt{3}+1)/4 & -\sqrt{2}(\sqrt{3}-1)/4 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Як показано на рис. 5, порівняно з базовим простором HSI взаємне розміщення основних R, G, B і доповнюючих C, M, Y кольорів, розраховане за новою матрицею (23), залишилося незмінним. Важливо відзначити, що на новій хроматичній діаграмі C_1, C_2 насиченість (S') довільно вибраного кольору

$$S' = \sqrt{C_1'^2 + C_2'^2} = 1/3 \sqrt{6R^2 - 6RG - 6RB + 6G^2 - 6GB + 6B^2} \quad (25)$$

описується тією ж формулою, що і в базовому просторі HSI.

Якщо вектори однакові за довжиною і пронормовані, то на такій діаграмі діє правило їх додавання. Нехай маємо вектори $A(R; 0; 0)$ і $F(0; G; 0)$, додавши їх, отримуємо вектор S (рис. 4).

Якщо діаграму повернути на кут, наприклад -45° (рис. 5), вектор S , який є результатом додавання векторів A і F , залишається незмінним — інваріантом. При повороті хроматичної діаграми змінюється лише відлік кутів θ' кольорового тону (H), а властивості кольорового простору не змінюються.

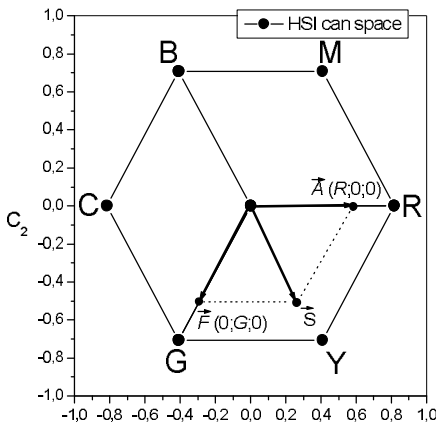


Рис. 4. Базовий простір HSI

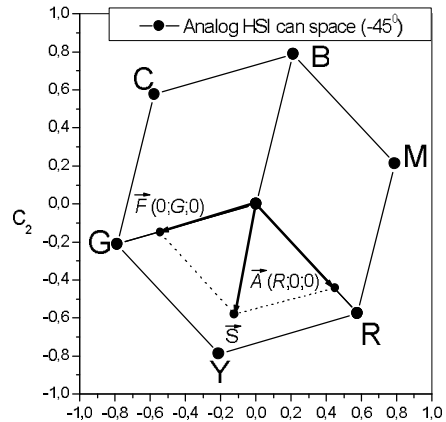


Рис. 5. Простір, утворений у результаті повороту HSI на $\varphi = -45$

Отримані результати свідчать, що положення основних кольорів на хроматичній діаграмі C_1, C_2 простору HSI вибрано за аналогією Міжнародної системи CIE LAB. Разом з тим, можна побудувати велику групу кольорових просторів, які матимуть властивості простору HSI.

Тепер розглянемо ортогональний кольоровий простір $I_1I_2I_3$ з різними довжинами хроматичних векторів. У роботі [12] кольоровий простір $I_1I_2I_3$ задається матрицею

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/2 & 0 & -1/2 \\ -1/4 & 1/2 & -1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \quad (26)$$

На відміну від HSI у цьому просторі хроматичні осі I_2 і I_3 мають різні довжини: $|I_2|=1/\sqrt{2}$; $|I_3|=\sqrt{6}/4$. Довжина ахроматичної осі складає $I_1=\sqrt{3}/3$. Із структури матриці (26) видно, що величина визначника $D_1=1/4$.

На рис. 6 наведена хроматична діаграма простору $I_1I_2I_3$. Основні R, G, B кольори розміщуються на еліптичній траєкторії. Зелений (G) колір, як видно з матриці (26), знаходиться на вертикальній хроматичній осі I_3 на відстані 1/2, тоді як червоний (R) і синій (B) розміщені симетрично на більшій відстані — $\sqrt{5}/4$.

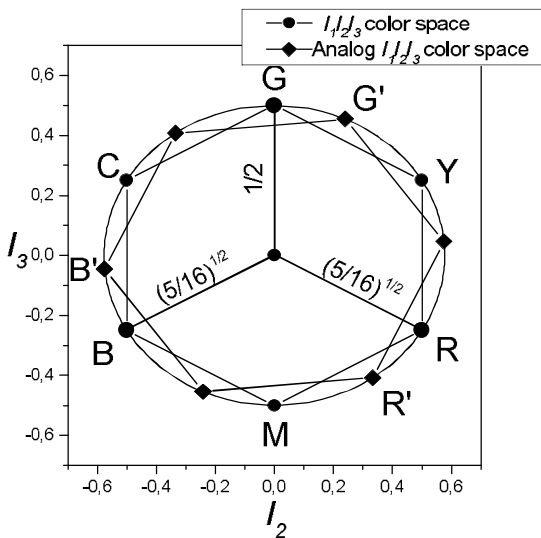


Рис. 6. Розміщення основних R, G, B і доповнюючих C, M, Y кольорів на хроматичній діаграмі I_2I_3 кольорового простору $I_1I_2I_3$ та аналогічного простору, який описується матрицею (29)

Покажемо, що існує множина аналогічних кольорових просторів, для яких хроматичні діаграми повністю збігаються з хроматичною діаграмою I_2I_3 .

Запишемо базові умови побудови кольорового простору $I_1I_2I_3$ у вигляді системи рівнянь:

$$(I_2 \times I_3) = 0; \quad |I_2| = \frac{1}{\sqrt{2}}; \quad D_1 = \frac{1}{4}. \quad (27)$$

Розв'язок такої системи має у загальному такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 m_{22} &= -\frac{1}{2}m_{23} \pm \frac{1}{2}\sqrt{1-3m_{23}^2}; \\
 m_{32} &= -\frac{3}{4}m_{23} \pm \frac{1}{4}\sqrt{1-3m_{23}^2}; \\
 m_{33} &= \pm \frac{1}{2}\sqrt{1-3m_{23}^2}.
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

Таким чином, для довільного дійсного значення елемента m_{23} , що задовольняє умову $-1/\sqrt{3} \leq m_{23} \leq 1/\sqrt{3}$, можна розрахувати значення трьох елементів m_{33}, m_{32}, m_{22} . У результаті отримаємо множину матриць $M_I^{(i)}$, які будуть описувати нові кольорові простори:

Проаналізуємо частковий випадок $m_{23} = -1/3$. На основі формули (27) отримуємо матрицю нового кольорового простору

$$M_I^{(i)} = \begin{bmatrix} 1/3 & 1/3 & 1/3 \\ 1/6 - 1/\sqrt{6} & 1/6 + 1/\sqrt{6} & -1/3 \\ -1/4 - 1/2\sqrt{6} & 1/4 - 1/2\sqrt{6} & 1/\sqrt{6} \end{bmatrix}.
 \tag{29}$$

У новому кольоровому просторі (рис. 6) основні R, G, B і доповнюючі C, M, Y кольори знаходяться на тій же еліптичній траєкторії, лише змінюється положення кольорів — зміщується вправо по траєкторії. При цьому порушується симетрія положення основних R, G, B кольорів, внаслідок чого кути між R, G, B стають відмінними від 120° . З цієї причини формула розрахунку насиченості кольорів у просторі $I_1I_2I_3$

$$S_{I_1I_2I_3} = 1/4\sqrt{5R^2 - 4RG - 6RB + 4G^2 - 4GB + 5B^2}
 \tag{30}$$

відрізняється від аналогічної формули кольорового простору HSI.

На підставі формули (20) отримуємо канонічну матрицю простору $I_1I_2I_3$.

$$M_{I_1I_2I_3}^{(can)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \sqrt{6}/2 & 0 & -\sqrt{6}/2 \\ -1/\sqrt{2} & \sqrt{2} & -1/\sqrt{2} \end{bmatrix}.
 \tag{31}$$

Доведено, що при використанні матриць P_{ij} перестановок рядків/стовпців матриці (31) отримуємо

$$P_{23} \times M_{I_1I_2I_3}^{(can)} \times P_{12} \times P_{23} = M_{HSI}^{(can)}.
 \tag{32}$$

Таким чином, доходимо до важливого висновку: у канонічному поданні кольорові простори $I_1I_2I_3$ і HIS описуються тією ж матрицею. Відповідно, перехід від кольорового простору $I_1I_2I_3$ до RGB-простору і навпаки здійснюється за формулами (22). У такому випадку для класу ортогональних кольорових просторів можна отримати єдиний канонічний кольоровий простір.

Очевидно, що для виконання умови (10) симетричного знаходження кольорів на хроматичній діаграмі C_1C_2 при єдиному значенні $m_0 = 1/\sqrt{3}$ елементи першого рядка матриці переходу M і першого стовпця оберненої матриці M^{-1}

стають однаковими і рівними $1/\sqrt{3}$. Це значення доцільно вибрати за нормуючий множник канонічної матриці M нового кольорового простору.

Для визначення елементів симетричної матриці M нового ортогонального простору IC_1C_2 необхідно розв'язати систему рівнянь

$$(C_1 \times C_2) = 0; \quad m_{21} = 1; \quad m_{31} = 1. \tag{33}$$

Така система рівнянь має єдиний дійсний розв'язок:

$$m_{22} = m_{33} = \frac{\sqrt{3}-1}{2} = H_1 = 0,366;$$

$$m_{23} = m_{32} = -\frac{\sqrt{3}+1}{2} = H_2 = -1,3. \tag{34}$$

У результаті отримуємо матрицю канонічного подання ортогонального кольорового простору:

$$\begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & H_1 & H_2 \\ 1 & H_2 & H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}. \tag{35}$$

Раніше автором [11] уперше було показано, що матриця (35) є матрицею дискретного перетворення Хартлі [1, 2] розмірності 3×3 , яку можна вибрати за означення нового кольорового простору $ICaS$.

Як показано на рис. 7, на хроматичній CaS -діаграмі основні R, G, B і доповнюючі C, M, Y кольори розміщені строго по траєкторії кола.

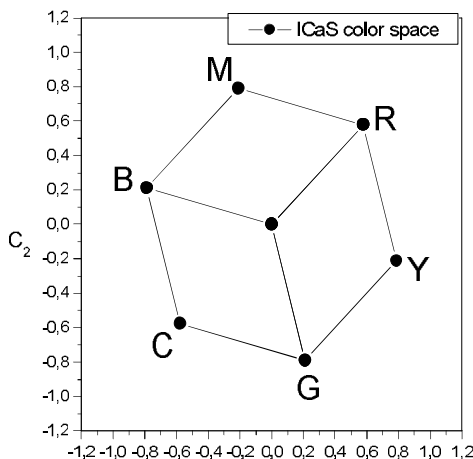


Рис. 7. Розміщення основних R, G, B і доповнюючих C, M, Y кольорів на хроматичній CaS -діаграмі кольорового простору $IcaS$

Матриця Хартлі (35) характеризується фундаментальною властивістю: $H = H^{-1} \rightarrow H \times H^{-1} = I$ — одинична матриця. Таким чином, при канонічному

поданні ортогонального кольорового простору пряме й обернене перетворення описується однією і тією ж симетричною матрицею Хартлі і набуває універсального вигляду:

$$\begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & H_1 & H_2 \\ 1 & H_2 & H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & H_1 & H_2 \\ 1 & H_2 & H_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ C \\ S \end{bmatrix}. \quad (36)$$

На хроматичній діаграмі шестикутник основних кольорів системи RGB-CMY простору ICaS можна отримати, повернувши шестикутники канонізованих HSI^{can} та I₁I₂I₃^{can} просторів на певний кут (рис. 8), який визначається за матрицею (23). Для простору HSI^{can} цей кут становить 45°, а для простору I₁I₂I₃^{can} — 75°. Таким чином, довільний ортогональний кольоровий простір завжди зводиться до канонічної форми нового кольорового простору ICaS.

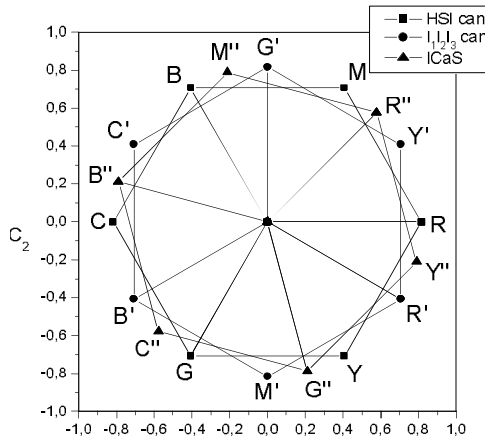


Рис. 8. Хроматична діаграма ортогональних кольорових просторів, побудованих за канонічними матрицями

У результаті проведених досліджень встановлено:

1. Відомі кольорові простори, побудовані за принципом характеристики кольору ахроматичною та двома хроматичними координатами, мають спільні властивості, які описуються методами векторного аналізу кольору.

2. Властивості ортогональних кольорових просторів повністю описуються базовою канонічною матрицею. Розраховано канонічні матриці для кольорового простору HSI (з рівними довжинами хроматичних осей) та простору I₁I₂I₃ (з різними довжинами осей). На хроматичній діаграмі ортогонального кольорового простору основні R, G, B і доповнюючі C, M, Y кольори знаходяться на вершинах правильного шестикутника. Доведено, що можна отримати багато матриць, які будуть описувати властивості кольорових просторів HSI та I₁I₂I₃.

3. Обґрунтовано єдину форму канонічного подання кольорів на хроматичній діаграмі на основі нового кольорового простору ICaS. Описано простий метод розрахунку канонічної матриці Хартлі. Показано, що в результаті пово-

роту хроматичних діаграм відомі кольорові простори HSI та $I_1I_2I_3$ однозначно зводяться до простору ICaS.

4. Знайдено канонічну матрицю для нового простору, яка за властивостями є досконалішою та базується на функціях Хартлі. На її основі побудовано простір ICaS та його хроматичну діаграму.

5. Запропонований для роботи з кольором у видавничо-поліграфічних системах кольоровий простір ICaS є універсальним, володіє всіма властивостями відомих ортогональних кольорових просторів. Наявність єдиної симетричної матриці спрощує та прискорює перехід з одного простору в інший. Використання канонічного подання кольорів на CaS-діаграмі дозволяє ефективно вирішувати технологічні питання аналізу та синтезу кольорового зображення в поліграфії.

1. Фисенко В. Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений: учеб. пособие / В. Т. Фисенко, Т. Ю. Фисенко. — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. — 192 с. 2. Carron T., Lambert P., Color Edge Detector Using Jointly Hue, Saturation and Intensity // International Conference on Image Processing '94, 1994. — P. 977–981. 3. Cheng H. D., Jiang X. H., Sun Y., Wang J. Li. Color Image Segmentation: Advances & Prospects. — Dept. of Computer Science Utah State University, Logan, UT 84322-4205. — 43 s. 4. Zhang C., Wang P. A New Method of Color Image Segmentation Based on Intensity and Hue Clustering // Electrical and Electronic Engineering — Image Processing. 2000. Vol. 3, P. 613–616. 5. Color and Shading: <http://graphics.cs.msu.ru/courses/cg01b/ch6.pdf>. 6. Ohta Y. I., Kanade T., Sakai T. Color information for region segmentation // Computer Graphics and Image Processing. 1980. Vol. 13, P. 222–241. 7. Xerox Color Encoding Standards // Tech. Rep., Xerox Systems Institute, Sunnyvale, CA, 1989. 8. Костарчук В. М. Курс вищої алгебри / В. М. Костарчук, Б. І. Хацет. — К.: Вища школа, 1969. — 540 с. 9. Речкалов В. Г. Векторная и тензорная алгебра для будущих физиков и техников / Речкалов В. Г. — Челябинск: ИИУМЦ «Образование», 2008. — 140 с. 10. Ohta Y. I., Kanade T., Sakai T. Color information for region segmentation // Computer Graphics and Image Processing. 1980. Vol. 13, P. 222–241. 11. Шовгенюк М. В. Новий кольоровий простір ICaS на основі перетворення Хартлі / Шовгенюк М. В. (Препринт ІФКС НАН України, 2009). 12. Брейсуэлл Р. Преобразование Хартли. Теория и приложения / Брейсуэлл Р. — М.: Мир, 1990. 13. Злобин С. Л. Двумерное быстрое преобразование Хартли в цифровой обработке изображений: докл. VI междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и её применение». — М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2004. — Т. 2. — С. 114–116.

КАНОНИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЦВЕТОВЫХ ПРОСТРАНСТВ ДЛЯ ИЗДАТЕЛЬСКИХ СИСТЕМ

Описаны основные свойства цветковых пространств с ахроматической и двумя хроматическими координатами цвета. Проведен сравнительный анализ ортогональных цветковых пространств HSI и $I_1I_2I_3$. Обосновано, что единственной канонической формой представления цветов для издательских систем является новое цветковое пространство ICaS.

CANONICAL PRESENTATION OF COLOUR SPACES FOR PUBLISHING SYSTEMS

Basic properties of colour spaces are defined by achromatic and by two chromatic coordinates of color. The comparative analysis of the ortogonal colour spaces is conducted for HSI and $I_1I_2I_3$. It was grounded that the only canonical form of presentation of colors for publishing systems is the new colour space ICaS.

Стаття надійшла 20.07.09