

УДК 533.6.072(045)

В. М. Синєглазов, д-р техн. наук, проф.,
Н. В. Апенько, асп.

СИНТЕЗ ЗОБРАЖЕННЯ СВІТЛОВИХ ЕФЕКТІВ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЯСКРАВОСТІ

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iesy@nau.edu.ua

Розглянуто задачу синтезу джерел світла, яка часто виникає в системі візуалізації (вогні міста, аеродрому і т. ін.). Показано максимально можливе збереження і достовірне передавання тонів і кольорів зображення. Побудова ефективних алгоритмів коригування яскравості, що позбавлені недоліків, властивих стандартним алгоритмам, і як наслідок можливість за їх допомогою синтезувати світлові ефекти і є основним завданням цієї роботи.

Ключові слова: яскравість, світловий ефект, кольорова модель.

Постановка проблеми. Підготовка космонавтів, пілотів, операторів складних систем на реально діючих установках потребує значних державних витрат. Альтернативою цьому є створення авіатренажерів та авіасимуляторів, які максимально наближені до існуючих літальних апаратів. Однією з найважливіших складових в тренажерних комплексах є система візуалізації сцен, яка синтезує зображення. В системі візуалізації часто потрібно синтезувати джерела світла – вогні міста, аеродрому і т. ін.. Зберегти якомога більш правильну і достовірну передачу тонів і кольорів зображення – складне завдання. Перетворення яскравості має велике значення для оброблення зображень під час створення візуалізації. З його допомогою користувач може виправляти помилки експозиції, виділяти темні або світлі ділянки зображення під час створення сцен та полігонів.

У праці [1] уведено *колориметричне визначення* яскравості не як (вимірну) фізичну величину, а як деяку характеристику зорового сприйняття. Вочевидь, що таке визначення неприйнятне для цифрового оброблення зображень. Для *фотометричного визначення* яскравості світловий потік (luminous flux P_v) вводиться у фотометрію як скалярний добуток функції спектрального розподілу енергії (radiant power) $P_e(\lambda)$ на функцію $V(\lambda)$ (spectral luminous efficiency function):

$$P_v = K_m \int_{830\text{nm}}^{360\text{nm}} P_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda,$$

де K_m – певна константа [2].

Яскравість (luminance) вимірюють так само з точністю до заміни функції спектрального розподілу енергії на функцію світності (radiance):

$$L_e = \frac{d^2 P_e}{dA_1 \cos \varepsilon_1 d\omega_1},$$

де dA_1 – елемент поверхні джерела випромінювання; $d\omega_1$ – елемент сферичного кута поверхні джерела; ε_1 – кут між нормальними до поверхонь джерела і приймача.

Варто відзначити, що при визначенні яскравості збігається значення Y координати в колірній координатній системі $CIE\ XYZ\ 1931$ [1; 3]. На відміну від колориметричного визначення яскравості [1] фотометрична яскравість є вимірною фізичною величиною.

Для становлення *кольорового зображення* під час створення сцени в тренажерах яскравість була вибрана в колірній координатній системі YUV [4]. Відзначимо особливо, що *кольорове зображення* не збігається з фотометричним, оскільки колірна координатна система

YUV не лінійна, тобто сумі стимулів [1; 5] в YUV не відповідає сумі їх координат на відміну, наприклад, від лінійної колірної координатної системи $CIE\ XYZ\ 1931$. Одним з різновидів YUV є широко використовувана в сучасному програмному забезпеченні кольорова модель $YCbCr$. Наприклад, в $JPEG$ стискуванні застосовують таку координатну систему [6]:

$$\begin{pmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,299 & 0,587 & 0,114 \\ -0,168736 & -0,331264 & 0,5 \\ 0,5 & -0,418688 & -0,081312 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 128 \\ 128 \end{pmatrix},$$

де R, G, B – $sRGB$ координати.

Для зразків основних кольорів з однаковою яскравістю відповідно до стандарту $YCbCr$ порівняно з фотометричним визначенням яскравості синій колір виглядає набагато яскравішим від дотичних. Крім того, сірий і жовті кольори істотно темніші за інші.

Ще однією широко використовуваною величиною є *світлота* L – канал у колірній координатній системі $CIE\ Lab$ (і в інших їй подібних колірних координатних системах, наприклад, $PCS\ Lab$ [7], Hunter Lab та ін.). Проте, як відомо (наприклад, [1], 3.3.9 *CIE Uniform Color Spaces and Color-Difference Formulae*), світлота L є не що інше, як деяка функція (корінь кубічний) від Y координати в XYZ ($CIE\ XYZ\ 1964$ для стандарту $CIE\ Lab$, $PCS\ XYZ$ для стандарту $PCS\ Lab$ та ін.). Таким чином, таке визначення яскравості успадковує всі недоліки фотометричного стандарту CIE (1924 р.)

Відповідно до федерального стандарту США *Federal Standard 1037C* яскравість є не вимірюваною величиною [8]. Таким чином, наведене визначення, як і колориметрична величина, не може використовуватися ні для вимірювання загалом, ні для вимірювання яскравості зокрема. У різних RGB просторах для розрахунку яскравості часто застосовують формулу $\frac{1}{3}(R + G + B)$. Очевидно, що таке визначення яскравості не відповідає цілком особливостям людського зору та дозволяє достовірніше створювати програми, які відображають візуалізацію в тренажерних комплексах.

Таким чином, цей напрям досліджень є актуальним у розробленні систем візуалізації тренажерних комплексів літальних апаратів для синтезу зображень світлових ефектів. Побудова ж ефективних алгоритмів коригування яскравості, що позбавлені недоліків, властивих стандартним алгоритмам, і як наслідок синтез світлових ефектів і є основним завданням цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості застосування та функціонування систем візуалізації висвітлюються в працях [5]. Питання, пов'язані як з теоретичними, так і практичними аспектами розроблення алгоритмів коригування яскравості, потрібних для синтезу зображень світлових ефектів в системах візуалізації тренажерних комплексів літальних апаратів, розглядаються в працях [9].

Існує велика кількість визначень яскравості, але лише чотири з них – фотометричне, телевізійне, світлота та різні RGB простори – можуть бути використані для побудови алгоритмів зміни яскравості для синтезу зображень світлових ефектів під час розроблення тренажерів. Порівнюючи їх, можна констатувати, що фотометричне визначення яскравості, якнайповніше відповідає особливостям людського сприйняття. Визначаючи яскравість як довжину колірного вектора в лінійному (векторному) колірному просторі, можна будувати ефективні алгоритми коригування яскравості, уникаючи недоліків, властивих стандартним алгоритмам візуалізації, і за їх допомогою синтезувати світлові ефекти.

В зв'язку з цим метою цієї роботи є розроблення способу синтезу зображення світлових ефектів на основі методів перетворення яскравості.

Огляд методів

1. Методи зміни яскравості зображення. Можливість зміни яскравості зображень – перетворення яскравості – дуже важлива в візуалізації сцен тренажерів. Регулюючи яскравість, користувач може вирівнювати яскравість окремих примітивів під час монтажу віньєток і панорам, затінювати, або навпаки, виявляти деталі в тінях та ін.

Розглянемо існуючі методики змінювання яскравості, що спираються на наведені вище визначення.

У побутовому кольоровому зображенні сцени приймачі яскравості кожного елемента зображення задаються формулою $Y = Y_0 + kY_{xy}$, де базовий рівень сигналу яскравості Y_0 встановлюють за допомогою елемента регулювання «яскравість»; Y_{xy} – отримуваний сигнал, а множник k задають регулюванням «контрасту». Рівень яскравості Y при візуалізації тренажерів з фізичного погляду пропорційний різниці потенціалів на контактах світності кінескопа. Нелінійність характеристики світності кінескопа від вхідної напруги робить сигнал Y нелінійним (гамма-коригованим) [9].

У разі використання YUV системи YC_bCr додаванню (відніманню) в Y каналі з деякою константою відповідає додавання (віднімання) тієї ж константи у всіх трьох каналах R , G , B колірної координатної системи $IEC/4WD$ 61966-2-1 $sRGB$.

Стандартний алгоритм RGB. Це один з найпоширеніших і часто використовуваних алгоритмів. Він застосовується в приладах, що випромінюють світло, таких, наприклад, як монітори, прожектори, фільтри й інші подібні пристрої.

У сучасних графічних редакторах операція зміни яскравості зводиться до вибілювання (збільшенням яскравості). Алгоритм RGB зміни яскравості використовується, наприклад, в таких відомих пакетах, як Adobe® Photoshop®, Corel PHOTO-PAINT® та ін. При роботі із графічним редактором можна вибирати кольори, покладаючись не тільки на той, що ми бачимо, але при необхідності вказувати й цифрове значення, тим самим, контролюючи процес роботи.

Триплет (R, G, B) зі зміною яскравості з параметром K перетвориться в $(R + K, G + K, B + K)$. При цьому порушуються співвідношення між червоним, зеленим і синім каналами, що призводить до зміни колірного тону при відображенні сцени в тренажерах. Отже, цей алгоритм не можна використовувати в програмних продуктах, призначених для точного оброблення систем візуалізації.

При збільшенні яскравості, зменшується яскравість для всіх основних кольорів (червоний, зелений, синій, блакитний, пурпурний і жовтий) автоматично, що призводить до створення кольору, що виходить за межі колірного охоплення RGB простору (табл. 1). Даний алгоритм при збільшенні яскравості окремих складових буде збільшувати і яскравість результуючих кольорів: якщо змішати всі три кольори з максимальною інтенсивністю, то результатом буде білі кольори; навпроти, при відсутності всіх квітів виходить чорний.

Відзначимо тут ще декілька недоліків такого алгоритму. По-перше, це перетворення дуже залежить від робочого RGB простору. Насправді, триплети $(10, 10, 10)$ в колірних координатних системах $sRGB$ і, наприклад, $WideGamut RGB$ мають різні координати в одній і тій же колірній координатній системі (наприклад, $CIE XYZ$). Проте виробники програмного забезпечення не приділяють цьому факту належної уваги, а, отже і не удосконалюють візуалізацію зображень тренажерних комплексів.

По-друге, таке перетворення стає незворотним у разі виходу за межі колірного охоплення робочого RGB простору. Наприклад, послідовно застосувавши цей алгоритм з параметрами 20 і $+20$ до RGB триплету $(70, 10, 70)$, отримаємо RGB триплет $(70, 20, 70)$.

По-третє, всі відомі широко використовувані простори RGB не є лінійними (для перетворення колірних координат у цих просторах застосовують гамму-коригування [9]). Складання координат в нелінійному просторі позбавлене якого б то не було фізичного сенсу.

Таблиця 1

sRGB значення триплетів

Колір	Дійсний колір			Яскравість + 26			Яскравість + 52			Яскравість + 78			Яскравість + 104		
Сірий	48	48	48	74	74	74	100	100	100	126	126	126	152	152	152
Червоний	144	0	0	170	26	26	196	52	52	222	78	78	248	104	104
Зелений	0	144	0	26	170	26	52	196	52	78	222	78	104	248	104
Синій	0	0	144	26	26	170	52	52	196	78	78	222	104	104	248
Блакитний	0	72	72	26	98	98	52	124	124	78	150	150	104	176	176
Пурпуровий	72	0	72	98	26	98	124	52	124	150	78	150	176	104	176
Жовтий	72	72	0	98	98	26	124	124	52	150	150	78	176	176	104

Редагування Lab каналу L (світлота). У деяких сучасних графічних пакетах для створення тренажерів є можливість вибирати колірну координатну систему Lab як робочий колірний простір. При цьому перетворення яскравості зводиться до додавання/віднімання значення каналу L з деякою (що задається користувачем) константою, що є алгоритм – $L' = L + K$. Такий алгоритм може спричинити істотну зміну колірного тону залежно від зміни значення світлості (табл. 2). Цей недолік, що обмежує використання Lab у заданні точного коригування цифрових зображень, є недоліком колірної координатної системи CIE Lab (і подібних до неї координатних систем). Річ у тім, що система Lab за побудовою нелінійна – якщо безперервно збільшувати інтенсивність деякого випромінювання, не змінюючи його спектру, то в лінійній колірній системі координат отримаємо промінь, а в CIE Lab деяку криву, що описується системою трансцендентних рівнянь. Таким чином, інваріантність координат a і b не викликає інваріантності колірного тону й інтенсивності [1; 5].

Таблиця 2

sRGB значення триплетів

Колір	Дійсний колір			Яскравість +26			Яскравість +52			Яскравість +78			Яскравість +104		
Сірий	48	48	48	57	57	57	66	66	66	75	75	75	84	84	84
Червоний	102	0	0	112	25	11	124	28	20	135	39	29	146	50	38
Зелений	0	58	0	10	68	10	26	77	20	33	86	29	46	96	38
Синій	0	0	185	30	15	195	55	26	208	67	37	221	81	49	231
Блакитний	0	55	55	12	64	64	24	73	73	34	82	82	43	91	90
Пурпуровий	90	0	90	99	17	99	111	27	109	121	38	119	132	49	129
Жовтий	50	50	0	59	58	10	68	67	19	77	76	28	87	86	37

Як і у випадку стандартного алгоритму RGB, дані для зменшення яскравості не наведено, оскільки в разі чистих кольорів (червоного, зеленого, блакитного, ціаністого, рожевого і жовтого) зменшення яскравості автоматично означає вихід за межі колірного охоплення IEC/4WD 61966-2-1 sRGB простору.

Незважаючи на те, що L канал Lab є монотонною функцією фотометричної яскравості (Y координата XYZ), це перетворення не еквівалентне зміненню Y координати в колірній

координатній системі XYZ . Це твердження нескладно перевірити самостійно, звернувшись до формул розрахунку колірних координат між XYZ і Lab [1].

Обидва розглянуті алгоритми коригування яскравості для створення візуалізації мають такі недоліки:

– якщо змінюється яскравість, хроматичні координати (колірний тон і насиченість) змінюються для будь-яких кольорів, окрім сірого;

– у разі зміни яскравості можливий вихід за межі колірного охоплення робочого RGB простору навіть в разі зменшення яскравості. Цей недолік властивий методиці оброблення і зберігання інформації про світло в деякому RGB просторі, ніж конкретному алгоритму.

2. Синтез світлових ефектів на основі перетворення яскравості. При визначенні яскравості як довжини *колірного вектора* в лінійному (векторному) колірному просторі [5] можна будувати ефективні алгоритми коригування яскравості, що позбавлені недоліків, властивих стандартним алгоритмам, і як наслідок за їх допомогою синтезувати світлові ефекти в системах візуалізації тренажерних комплексів.

Для колірного вектора з CIE XYZ 1931 [8 – 9] координатами (X , Y , Z) яскравість B може бути обчислена за формулою

$$B^2 = \begin{pmatrix} X & Y & Z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 3,6118 & -2,5956 & -0,5019 \\ -2,5956 & 3,1693 & 0,2817 \\ -0,5019 & 0,2817 & 0,7869 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}.$$

Алгоритм зміни яскравості в лінійних координатних системах зводиться до множення довжини колірного вектора на деяке (невід’ємне) число, або, що те ж саме, до множення *всіх* колірних координат на одне й те ж (невід’ємне) число [4].

Цей алгоритм позбавлений основних недоліків алгоритмів, розглянутих вище. Насправді, як видно з табл. 3, зміна яскравості не призводить до зміни хроматичних координат (напрямку колірного вектора). Отже, зменшення яскравості ніколи не призводить до виходу за межі колірного охоплення адитивного колірного простору в разі використання системи візуалізації тренажерних комплексів.

Таблиця 3

sRGB значення триплетів

Колір	Дійсний колір			Яскравість +26			Яскравість +52			Яскравість +78			Яскравість +104		
Сірий	87	87	87	103	103	103	121	121	121	142	142	142	166	166	166
Червоний	137	0	0	160	0	0	187	0	0	218	0	0	254	0	0
Зелений	0	110	0	0	129	0	0	151	0	0	177	0	0	206	0
Синій	0	0	114	0	0	134	0	0	157	0	0	184	0	0	214
Блакитний	0	80	80	0	94	94	0	111	111	0	130	130	0	153	153
Пурпуровий	94	0	94	111	0	111	130	0	130	152	0	152	178	0	178
Жовтий	90	90	0	106	106	0	125	125	0	147	147	0	172	172	0

У цій роботі запропонований алгоритм переходу між колірними системами RGB (32 біт) і XYZ для стандартного спостерігача під кутом 2° і джерела світла $D65$ (середньоденне світло) можна записати таким чином:

Крок 1. Нормування

$\text{var_R} = (R / 255)$, $\text{var_G} = (G / 255)$, $\text{var_B} = (B / 255)$

Крок 2. Перетворення

Якщо $(\text{var_R} > 0.04045)$ $\text{var_R} = ((\text{var_R} + 0.055) / 1.055)^{2.4}$
 інакше $\text{var_R} = \text{var_R} / 12,92$
 Якщо $(\text{var_G} > 0.04045)$ $\text{var_G} = ((\text{var_G} + 0.055) / 1,055)^{2.4}$
 інакше $\text{var_G} = \text{var_G} / 12,92$
 Якщо $(\text{var_B} > 0.04045)$ $\text{var_B} = ((\text{var_B} + 0.055) / 1,055)^{2.4}$
 інакше $\text{var_B} = \text{var_B} / 12,92$

Крок 3. Нормування

$\text{var_R} = \text{var_R} * 100$ $\text{var_G} = \text{var_G} * 100$ $\text{var_B} = \text{var_B} * 100$

Крок 4. Перетворення

$X = \text{var_R} * 0,4124 + \text{var_G} * 0,3576 + \text{var_B} * 0,1805$

$Y = \text{var_R} * 0,2126 + \text{var_G} * 0,7152 + \text{var_B} * 0,0722$

$Z = \text{var_R} * 0,0193 + \text{var_G} * 0,1192 + \text{var_B} * 0,9505$

Недоліком алгоритму візуалізації можна вважати численні операції множення і ділення. Розглянемо можливість спростити алгоритм, ґрунтуючись на властивості лінійності операцій і таких припущеннях.

1. На кроці 2 перевіряється умова $\text{var} > 0,04045$. Цю умову можна замінити $\{R, G, B\} > 10$, оскільки $10/255 \approx 0,0392$, а $11/255 \approx 0,04314$.

2. За умови, що вектор має діапазон $\{R, G, B\} = \{0 \dots 10, 0 \dots 10, 0 \dots 10\}$, всі операції за алгоритмом будуть лінійними.

3. Експериментальним шляхом знаходять коефіцієнт нормування 32,946.

Таким чином, отримано такий алгоритм:

Якщо $\{R, G, B\} = \{0 \dots 10, 0 \dots 10, 0 \dots 10\}$, тоді

$$X = (R \cdot 0,4124 + G \cdot 0,3576 + B \cdot 0,1805) / 32,946;$$

$$Y = (R \cdot 0,2126 + G \cdot 0,7152 + B \cdot 0,0722) / 32,946; \quad (1)$$

$$Z = (R \cdot 0,0193 + G \cdot 0,1192 + B \cdot 0,9505) / 32,946,$$

інакше розрахунки потрібно виконувати за першим алгоритмом.

Як видно з виразів (1) за умови, що діапазон вектора $\{R, G, B\} = \{0 \dots 10, 0 \dots 10, 0 \dots 10\}$, значно зменшується обчислювальна складність алгоритму.

Для змінювання яскравості потрібно використовувати вираз

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{pmatrix} = 2^{EV} \cdot \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix},$$

де EV – параметр експокоригування.

Для оберненого перетворення можна використати вираз

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = 255 \begin{pmatrix} \Gamma(X_1) \\ \Gamma(Y_1) \\ \Gamma(Z_1) \end{pmatrix}, \quad \text{де } \Gamma(x) = \begin{cases} 12,92x, & 0 \leq x \leq 0,0031308; \\ 1,055x^{1/2,4}, & 0,0031308 < x \leq 1. \end{cases}$$

Дві операції ділення і одна множення в першому алгоритмі замінено однією операцією ділення в другому алгоритмі, що відповідає зменшенню обчислювальної складності на 33,3 %.

Висновки. Для визначення яскравості як довжини колірному вектора в лінійному (векторному) колірному просторі можна будувати ефективні алгоритми коригування яскравості, що позбавлені недоліків, властивих стандартним алгоритмам, і як наслідок за їх допомогою синтезувати світлові ефекти тренажерних комплексів.

Запропоновано для синтезу зображень світлових ефектів використовувати алгоритм, відповідно до якого зміна яскравості не зумовлює зміни хроматичних координат (напрямку колірного вектора). Отже, зменшення яскравості ніколи не призведе до виходу за межі колірного охоплення адитивного колірний простору (наприклад, будь-якого *RGB* простору), що сприятиме найбільш зручному використанню системи візуалізації тренажерних комплексів.

Запропоновано алгоритм переходу між кольоровими моделями *RGB* (32 біт) та *XYZ*, який на відміну від традиційного має обчислювальну складність, меншу на 33,3 %.

Список літератури

1. *Wyszecki G., Stiles W. S. Color Science. Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae / Second Edition / John Wiley & Sons. – 2000. – 245 p.*
2. *Caïm Color & Vision Research Laboratory, Institute of Ophtalmology, UCL. <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/>*
3. *Caïm библиотеки Википедия, <http://en.wikipedia.org/wiki/YUV>.*
4. *Юстова Е. Н. Цветовые измерения (Колориметрия) / Е. Н. Юстова – СПб.: Изд-во С.-Петербургского ун-та, 2000 – С. 376 – 379.*
5. *Caïm библиотеки Википедия, <http://en.wikipedia.org/wiki/YCbCr>.*
6. *Zimmerman W. B. J. Image technology colour management – Architecture, profile format, and data structures, International Color Consortium®. <http://www.color.org>*
7. *Sergey Bezryadin, Pavel Bourov, Color Coordinate System for Accurate Color Image Editing Software / The International Conference Printing Technology SPb'06 proceedings / St. Petersburg State University of Technology and Design – 2006. – 145 – 148 p.*
8. *Sergey Bezryadin, Pavel Bourov, Local Criterion of Quality of Color Difference Formula / The International Conference Printing Technology SPb'06 proceedings / St. Petersburg State University of Technology and Design – 2006. – P. 140 – 144.*
9. *Мешков В. В. Основы светотехники: учеб. пособие для вузов. Ч.2. Физиологическая оптика и колориметрия / В. В. Мешков, А. Б. Матвеев – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 432 с.*

В. М. Синеглазов, Н. В. Апенко

Синтез изображения световых эффектов на основе методов превращения яркости

Рассмотрено задачу синтеза источников света, которая часто возникает в системе визуализации (огни города, аэродрома и др.). Показано максимально возможное сохранение и достоверную передачу тонов и цветов изображения. Построение эффективных алгоритмов корректирования яркости, которые лишены недостатков, свойственных стандартным алгоритмам, и как следствие возможность с их помощью синтезировать световые эффекты и является основной задачей этой работы.

V. M. Sineglazov, N. V. Apen'ko

Synthesis of image of high lights on basis of methods of transformation of brightness

The task of synthesis of sources of light is considered, which in the system of visualization often arises up such as fires of city, air field et al. A maintenance in a maximally possible degree and reliable transmission of tones and colors of image is rotined. Effective algorithms are built editing of brightness, which are deprived failings, incident to the standard algorithms, and as a result possibility with their help to synthesize high lights and is a basic task, that decides in work.