

Сравнительный анализ моделей цветового восприятия для реалистической визуализации в программах глобального освещения

В.П. Будак¹, И.Р. Галлямов¹, Д.А. Киселёв¹

¹ Национальный Исследовательский Университет “МЭИ”, Красноказарменная 14, Москва, 111250, Россия

Аннотация

В данной работе представлен анализ трёх актуальных моделей цветового восприятия CIECAM97, CIECAM02 и модель Беляевой-Матвеева, а затем сравнение их визуальной составляющей. Представлено определение модели Беляевой-Матвеева, CIECAM02 и CIECAM97, объяснена математическая сторона модели Беляевой-Матвеева и описаны основные моменты построения алгоритма для её реализации. Алгоритм написан на языке программирования Matlab, который включает в себя плагин для обработки синтетических изображений - Image Processing Toolbox. Реализация алгоритмов модели Беляевой-Матвеева, CIECAM02 и CIECAM97 предусматривают переход к новым условиям наблюдения: от заданных начальных условий создания синтетического изображения с первичными значениями яркости и цветности объекта и фона до просмотра изображения на экране монитора. При сравнении одно и то же начальное изображение проходит три алгоритма исследуемых моделей цветового восприятия и, по итогу, имеем возможность сравнить полученные изображения при одних условиях наблюдения. По этим результатам можно судить, какая из моделей имеет самое малое отклонение в точности передачи цветов и ощущений.

Ключевые слова

Виртуальная реальность, Модель цветового восприятия, Равноконтрастные цветовые модели, CIECAM97, CIECAM02.

Comparative Analysis of Color Perception Models for Realistic Visualization in Global Illumination Programs

V.P. Budak¹, I.R. Galliamov¹, D.A. Kiselev¹

¹ National Research University “MPEI”, Krasnokazarmennaya 14, Moscow, 111250, Russia

Abstract

This paper presents an analysis of three current color perception models CIECAM97, CIECAM02 and the Belyaeva-Matveev model and then compares their visual component. The definition of the Belyaeva-Matveev, CIECAM02 and CIECAM97 models is presented, the mathematical aspect of the Belyaeva-Matveev model is explained and the main points of the construction of an algorithm for its realization are described. The algorithm is written in Matlab programming language, which includes a plug-in for synthetic image processing - Image Processing Toolbox. Implementation of the algorithms of the Belyaeva-Matveev, CIECAM02 and CIECAM97 models involves the transition to new observation conditions: from the given initial conditions of creating a synthetic image with the primary values of brightness and color of the object and the background to viewing the image on the monitor screen. In the comparison one and the same initial image passes three algorithms of the investigated models of color perception and, as a result, we can compare the obtained images under the same observation conditions. According to these results we can judge which of the models has the smallest deviation in the accuracy of color and sensation transfer.

ГрафиКон 2023: 33-я Международная конференция по компьютерной графике и машинному зрению, 19-21 сентября 2023 г., Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, г. Москва, Россия

EMAIL: dan010300@gmail.com (Д.А. Киселёв); ilgiz.2000@bk.ru (И.Р. Галлямов); budakvp@gmail.com (В.П. Будак)

ORCID: 0000-0002-5946-8949 (Д.А. Киселёв); 0000-0002-4595-7944 (И.Р. Галлямов); 0000-0003-4750-0160 (В.П. Будак)



© 2023 Copyright for this paper by its authors.

Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Keywords

Virtual Reality, Color Appearance Model, Uniform color system, CIECAM97, CIECAM02.

1. Введение

С появлением синтетических изображений поднялся вопрос, насколько качественно и натурально передаётся цвет запечатлённой картины на дисплее монитора. С развитием виртуальной реальности проблема перехода из одного условия наблюдения в другое ставит новые условия для разработки модели, максимально приближенной к точному описанию решению этого перехода [1]. Модель цветового восприятия - это некая модель, выдающая предикторы по меньшей мере относительного цветового ощущения, то есть: светлоту, насыщенность и цветовой тон [3].

Таким образом следует проанализировать наиболее актуальные на данный момент модели цветового восприятия и сравнить их. В современном мире существует множество математических моделей восприятия цвета зрительным аппаратом человека, такие как модель Беляевой-Матвеева, CIECAM02 и CIECAM97. Какая модель показывает лучший результат? Какая из них имеет самую малую погрешность?

Данная статья также посвящена реализации модели равноконтрастной системы Беляевой-Матвеева на языке программирования. Эта работа представляет собой результат исследований в области обработки и анализа данных, основанных на инновационном подходе, разработанном Н. М. Беляевой и А. Б. Матвеевым.

2. Методы

В данной работе были изучены и проанализированы алгоритмы сравнения двух моделей цветового восприятия CIECAM97s и CIECAM02, подробно описанные в статье «Сравнительный анализ моделей цветового восприятия для реалистического отображения синтетических изображений» в журнале «Светотехника» [1]. Данная статья охватывает лишь сравнение двух наиболее актуальных моделей и главной задачей сравнить их с разработанной на кафедре «Светотехники» НИУ «МЭИ» в 1964 году моделью Беляевой-Матвеева. Модель не была изучена и перенесена на языке программирования и точно неизвестно, как она покажет себя в работе и какие результаты показывает, по сему была произведена реализация модели Беляевой-Матвеева на языке программирования Matlab. В заключительном этапе на основе экспертной оценки путём предоставления наблюдателям сопоставления синтетических изображений, прошедших через выбранные модели, с оригиналом этого изображения, подготовлено сравнение моделей и выявление наиболее оптимальной из них.

2.1. Модель Беляевой-Матвеева

Диссертация, в которой описана модель цветового восприятия была написана в отделении строительной светотехники в Научно-исследовательском институте строительной физики (НИИСФ) в 1972 году аспирантом Н. М. Беляевой и её научным руководителем к.т.н., доцентом А. Б. Матвеевым и имеет название «Построение равноконтрастной системы для определения цветовых соотношений в архитектурных интерьерах» [2]. Целью работы является построение равноконтрастной системы цветовых ощущений для определения цветовых соотношений поверхностей архитектурного интерьера в реальных условиях их наблюдения. [2].

Основные принципы модели Беляевой-Матвеева основаны на концепции контурного анализатора (в модели система представлена сетью элементарных звеньев, каждое из которых имеет свою передаточную функцию, эти звенья соединяются в каскадном порядке, образуя контур, в свою очередь контурный анализатор позволяет оценить влияние каждого элемента на поведение системы и анализировать ее свойства и характеристики) и нелинейных функций передачи в зрительной системе. Модель представляет собой систему дифференциальных

уравнений, описывающих взаимодействие между различными элементами обработки цветовой информации в зрительной системе.

Модель включает в себя следующие ключевые компоненты:

- Концепция контурного анализатора - модель предполагает, что цветовая информация обрабатывается с помощью контурных анализаторов, которые определяют контрастность и цветность в изображении.
- Функции передачи - в модели используется нелинейная функция передачи, которая отображает контрастность входного сигнала на контрастность выходного сигнала. Эта функция имитирует нелинейное поведение нервных клеток в зрительной системе.
- Взаимодействие между элементами - модель учитывает взаимодействие между различными элементами обработки цветовой информации, такими как контурные анализаторы и функции передачи. Это позволяет учесть зависимость контрастности от окружающих условий.

2.1.1. Особенности реализации

Входными данными модели Беляевой-Матвеева являются:

- синтетическое изображение;
- относительные трехстимульные значения образца в исходных условиях — RGB;
- относительные координаты цвета фона в физиологической системе КЗС;
- относительные координаты цвета объекта в физиологической системе КЗС;
- относительная яркость фона в исходных условиях — Lf.
- постоянные, характеризующие чувствительность рецепторов и нелинейность зависимостей.

Выбор основных цветов, ограниченный лишь условием линейной независимости между ними, позволяет иметь неограниченно большое количество колориметрических систем. Одной из таких систем является основная физиологическая система КЗС. В этой системе координаты цвета К, З и С — уровни возбуждения трех приемников глаза в единичных значениях КЗС — компонентов цвета. Особенность физиологической системы заключается в том, что в отличие от всех других систем в ней любой цвет не только выражается суммой трех основных, но и определяется уровнем и соотношением реакций трех цветоощущающих рецепторов глаза. Основная трудность построения данной системы заключается в невозможности точного измерения спектральной чувствительности каждого из трех цветоощущающих рецепторов [1].

Благодаря математической равноконтрастной модели Беляевой-Матвеева можно определить корреляты восприятия объекта по сравнению с фоном.

- Загрузка и предварительная обработка данных: начиная с загрузки необходимых данных или наборов данных для анализа контрастности цветового восприятия. Предварительно обработанные данные приводятся к стандартным размерам или преобразовываются в необходимые цветовые пространства.
- Решение дифференциальных уравнений: использование численных методов, доступные в MATLAB, для решения системы дифференциальных уравнений, описывающих модель Беляевой-Матвеева. Это может потребовать использования методов численного интегрирования, таких как метод Рунге-Кутты или метод конечных разностей.
- Визуализация результатов: после решения дифференциальных уравнений и получения выходных данных модели, используя функции визуализации MATLAB для отображения результатов.

Математическое представление:

При реализации в языке программирования MATLAB на вход поступает картинка в формате JPEG, данные цвета которой расположены в системе RGB, с которыми производится работа с использованием преобразования системы RGB в систему XYZ с помощью матрицы перехода.

$$m_0 = \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0.318 & 0.754 & -0.072 \\ -0.463 & 1.374 & 0.089 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

Для того, чтобы начать работать с моделью, необходимо знать такие значения, как координаты цвета объекта m'_0 и координаты цвета фона m'_ϕ в физиологической системе КЗС.

$$m'_0 = \begin{pmatrix} K \\ Z \\ C \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$m'_\phi = \begin{pmatrix} K_\phi \\ Z_\phi \\ C_\phi \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где K – координата цвета объекта по системе КЗС, Z – координата цвета объекта по системе КЗС, C – координата цвета объекта по системе КЗС, K_ϕ – координата цвета фона по системе КЗС, Z_ϕ – координата цвета фона по системе КЗС, C_ϕ – координата цвета фона по системе КЗС.

Среди исходных данных мы также имеем некоторые постоянные, характеризующие чувствительность рецепторов и нелинейность зависимости:

$$A_m = \begin{pmatrix} 1.8 \\ 1.55 \\ 0.837 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\alpha_m = \begin{pmatrix} 0.093 \\ 0.093 \\ 0.465 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$$t_m = \begin{pmatrix} 0.013 \\ 0.013 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$C_m = \begin{pmatrix} 1.62 \\ 1.62 \\ 0.55 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

Цветовые ощущения определяются следующим образом:

$$\vartheta_m = \frac{A_m \cdot m'_0}{\alpha_m \cdot m'_0 + m'_{ад}} + C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p, \quad (8)$$

$$m'_{ад} = \left[t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot m'_0 + \left(1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}\right) \cdot m'_\phi \right] \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^n, \quad (9)$$

где L_0 – яркость объекта изображения в кд/м², L_ϕ – яркость фона изображения в кд/м².

Следует иметь в виду, что присутствуют условия для некоторых переменных n и p :

- при $L_0 \geq L_\phi$ $n = 0.9$, $p = 0.6$.
- при $L_0 < L_\phi$ $n = 0.7$, $p = 1.0$.

Из (7) при условии сохранения ϑ_m получим

$$1 = A_m \cdot m'_0 / m'_{ад} - \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p \right] \cdot \alpha_m \cdot m'_0 / m'_{ад}, \quad (10)$$

Откуда

$$\frac{m'_0}{m'_{ад}} = \frac{1}{A_m - \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p \right] \cdot \alpha_m}, \quad (11)$$

Полученное отношение $m'_0/m'_{ад}$ подставим в (8), что приведёт к выражению

$$\left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^{-n} - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot \frac{m'_0}{m'_{ад}} = \left(1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}\right) \cdot m'_\phi / m'_{ад}, \quad (12)$$

Предполагаем, что m'_ϕ остается неизменным, что позволяет вычислить из (11) новые координаты адаптации

$$m'_{ад} = \frac{1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}}{\left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^{-n} - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot \frac{m'_0}{m'_{ад}}}, \quad (13)$$

Поскольку из (9) известно отношение $m'_0/m'_{ад}$, то из него и (11) определяется m'_0 при изменении яркости объекта, но сохранении ϑ_m .

Выше была изложена прямая модель. Далее будет представлена обратная модель:

Из (7)

$$m'_0 = \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p\right]} \cdot m'_{ад}, \quad (14)$$

Из (12) получим

$$m'_{ад} = \left[t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot m'_0 + \left(1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}\right) \cdot m'_\phi \right] \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^n, \quad (15)$$

что приведет

$$m'_0 = \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p\right]} \cdot \left[t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \cdot m'_0 + \left(1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}\right) \cdot m'_\phi \right] \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^n, \quad (16)$$

или

$$\begin{aligned} & \left\{ 1 - \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p\right]} \cdot t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi} \right\} \cdot m'_0 = \\ & = \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^p\right]} \cdot \left(1 - t_m \cdot \frac{L_0}{L_\phi}\right) \cdot m'_\phi \cdot \left(\frac{L_0}{L_\phi}\right)^n, \end{aligned} \quad (17)$$

Для простоты записи $\omega = \frac{L_0}{L_\phi}$, что приведет к выражению

$$\begin{aligned} & \left(1 - \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \omega^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \omega^p\right]} \cdot \omega \cdot t_m\right) \cdot m'_0 = \\ & = \frac{\vartheta_m - C_m \cdot \omega^p}{A_m - \alpha_m \cdot \left[\vartheta_m - C_m \cdot \omega^p\right]} \cdot (1 - t_m \cdot \omega) \cdot \omega^n \cdot m'_\phi, \end{aligned} \quad (18)$$

2.2. CAM 02

Комитету было предложено большое число потенциальных усовершенствований СЕСАМ97s, которые от имени ТС801 были сведены Фершильдом (2001) в единую публикацию. Предложения, которые были учтены и в конечном счете включены в СЕСАМ02 следующие [4]:

— линеаризация расчета смены хроматической адаптации с целью упрощения модели и облегчения ее аналитической инверсии (Финлейсон и Дрю, 1999; Финлейсон и Зюструнк, 2000; Ли и колл., 2000);

- исправление ошибок в системе учета эффектов окружения (Ли и колл., 1999; Ли и колл., 2000; Морони, 2002);
- коррекция шкалы светлоты по условному идеально черному стимулу (Ли и колл., 1999; Ли и колл., 2000; Морони, 2002);
- коррекция шкалы насыщенности в отношении околонейтральных (низконасыщенных) цветов (Вибль и Фершильд, 2000; Ньюман и Пиротта, 2000);
- внедрение непрерывной переменной, отвечающей за компенсацию эффектов окружения (Фершильд, 1995, 1996);
- модификация функции нелинейной компрессии для облегчения и улучшения расчета коррелятов чистоты цвета (Хант и колл., 2003).

После тщательного анализа всех предложенных исправлений TC801 свел их в единый набор новых уравнений и позиционировал новую модель (Морони и колл., 2002; CIE, 2004).

Как напоминание о том, что в психофизике цветового восприятия и его моделировании еще многое предстоит изучить, в названии модели значится год ее создания.

Короче говоря, CIECAM02 проста по структуре, легка в инверсии и в отношении большинства доступных данных столь же (если не более) удачна, чем CIECAM97s. То есть, CIECAM02 по всем параметрам и во всех ситуациях полностью заменяет собой CIECAM97s.

Исходное изображение и результат работы модели, взятой из статьи «Сравнительный анализ моделей цветового восприятия для реалистического отображения синтетических изображений» в журнале «Светотехника» [2] представлены на рисунке 1 и рисунке 2.



Рисунок 1 – Исходное изображение корпуса «Е»

Модель цветового восприятия CIECAM97s (CIECAM - изначально расшифровывалось как "Комитет по международному освещению") является системой для описания и предсказания восприятия цвета человеком. Она была разработана Международной комиссией освещения (CIE) в 1997 году и представляет собой модификацию предыдущей модели CIECAM97 [4].

Цель модели CIECAM97s заключается в предоставлении количественных мер цветового восприятия, которые согласуются с восприятием людей при различных условиях освещения, а также учитывают факторы окружающей среды и индивидуальные особенности наблюдателя.

2.3. CAM 97s

Основные компоненты модели CIECAM97s включают:

- Освещение: Модель учитывает спектральное распределение освещения и его интенсивность, что позволяет учесть влияние освещения на восприятие цвета.

- **Объект:** описывает свойства объекта, такие как его спектральное отражение и яркость. Спектральные характеристики объекта влияют на цветовое восприятие.
- **Обзор:** учитывает факторы среды, такие как уровень освещенности заднего плана, контрастность и адаптация глаза к окружающим условиям. Эти факторы оказывают влияние на восприятие цвета.
- **Оценка яркости:** модель CIECAM97s предоставляет методы для оценки яркости и контрастности цветовых образов. Яркость определяется относительной светимостью объекта по отношению к фону и может быть выражена численно.



Рисунок 2 - Преобразованное изображение посредством модели CIECAM 02

Оценка цветового восприятия: модель позволяет оценить восприятие цвета с учетом яркости, насыщенности и оттенка. Она учитывает адаптацию глаза к освещению и включает параметры, такие как "яркость", "цветность" и "оттенок", которые могут быть выражены численно.

Модель CIECAM97s является расчетным инструментом, который позволяет получать количественные значения, связанные с восприятием цвета. Она широко используется в области цветоведения, дизайна и графики, а также при разработке цветовых моделей для устройств отображения, чтобы достичь более точного и соответствующего человеческому восприятию отображения цвета. Исходное изображение и результат работы модели, взятой из статьи Сравнительный анализ моделей цветового восприятия для реалистического отображения синтетических изображений» в журнале «Светотехника» [2] представлены на рисунке 3 и рисунке 4.



Рисунок 3 – Исходное изображение корпуса «Е»



Рисунок 4 – Преобразованное изображение посредством модели CIECAM 97

3. Результаты

Взяв для образца простое изображение цветного круга на цветном фоне (разные по цветности) и обработав данное изображение в реализованных моделях цветового восприятия получаем следующие результаты – рисунок 5.

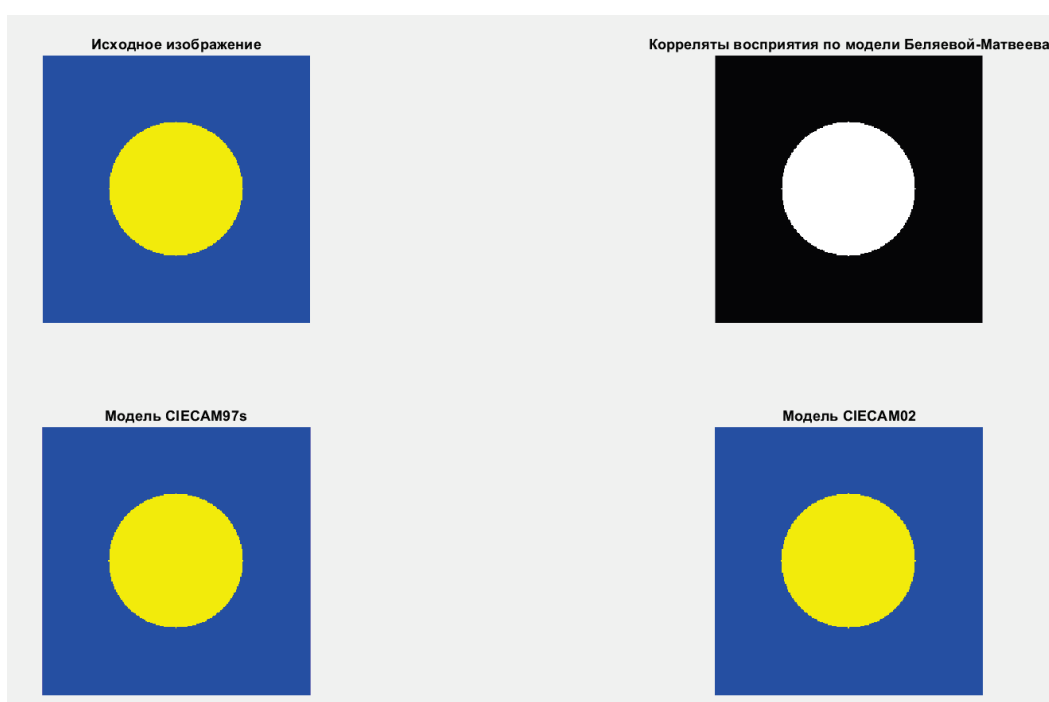


Рисунок 5- Визуальное отображение алгоритмов обработки синтетического изображения моделей Беляевой-Матвеева, CIECAM97s и CIECAM02

4. Заключение

В будущем планируется провести эксперимент с рядом наблюдателей для получения экспертных оценок и составления шкалы восприятия получившихся изображений.

Алгоритм модели Беляевой-Матвеева не идеален и требует пересмотра и доработки. Модель не позволяет решать обратную задачу, поскольку во всех выражениях входит отношение

яркости объекта к яркости фона. Она создавалась для оценки расстояния, отличия синтезируемой картинки от реальной.

В будущем планируется оптимизировать систему и определить новые коэффициенты, используемые в обработке входных данных. Это позволит наладить быстроедействие алгоритма и получать более точные результаты для дальнейшего интегрирования в виртуальную реальность.

5. СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Основная физиологическая система КЗС [Электронный ресурс] – URL: https://vuzlit.com/709347/osnovnaya_fiziologicheskaya_sistema (дата обращения 15.08.2023).
- [2] V. Budak, I. Galliamov, D. Kiselev, Comparative analysis of color appearance models for realistic display of synthetic images, *Light & Engineering* 2023. №2. С.76-80.
- [3] Н. М. Беляева Построение равноконтрастной системы для определения цветовых соотношений в архитектурных интерьерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.07. М.: НИИСФ, 1972. 279 с.
- [4] Фершильд М.Д. Модели цветового восприятия: пер. с англ.: Издательство, 2004. 439 с.