

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦВЕТОВОГО ПРОСТРАНСТВА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 519.7:007.52+53.083.721

## **БАБКОВА Надежда Викторовна**

ассистент кафедры интеллектуальных компьютерных систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

**Научные интересы:** обработка изображений, математическое моделирование, интеллектуальные системы принятия решений реального времени.

## **ШАРОНОВА Наталья Валериевна**

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой интеллектуальных компьютерных систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

**Научные интересы:** математическое моделирование, искусственный интеллект, интеллектуальные компьютерные системы.

## **ШКАПО Сергей Владимирович**

соискатель кафедры интеллектуальных компьютерных систем Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

**Научные интересы:** математическое моделирование, искусственный интеллект, интеллектуальные корпоративные системы

## **ВВЕДЕНИЕ**

Для последнего десятилетия характерны быстрое развитие технологий и методов компьютерной обработки цифровых изображений, а также появление скоростной цифровой фотоаппаратуры. Современные фото-матрицы обладают большой разрешающей способностью, высоким квантовым выходом и расширенным динамическим диапазоном. Современные скоростные фотокамеры позволяют осуществлять съемку с частотой более 10000 кадров/с. Это открывает новые возможности использования оптических методов для высокоточных измерений при проведении различных физических экспериментов.

Многие физические явления и величины, их характеризующие, являются по своей сути оптически наблюдаемыми. В случае если исследуется механическое движение тела или системы тел, координаты могут быть непосредственно наблюдаемы в оптическом диапазоне. Традиционно при исследовании излучения при высокотемпературном процессе использовались пиро-

метры. После внедрения в физический эксперимент компьютеров и цифровых фотокамер данный подход обрел вторую жизнь.

Методы цифровой обработки изображений находят применение в задачах анализа данных астрономических наблюдений, таких как реконструкция полей скорости солнечной плазмы, распознавание формы галактик и др.

Перспективным представляется направление, связанное с исследованием предварительно визуализированных скалярных физических полей: поля температуры, поля концентрации и других. Стоит отметить, что данные методы позволяют получать не только качественную, но и количественную картину исследуемого физического процесса [1]. Для количественных измерений требуется провести предварительную калибровку, т.е. выявить зависимость между значением измеряемой физической величины и какой-либо оптической характеристикой (яркостью, цветовым оттенком, насыщенностью цвета) пикселей изображения визуализированного поля.

Как видим, оптические методы находят всё более широкое применение в различных физических экспериментах. Автоматизация данных исследований невозможна без использования цифровой фотосъемки в качестве средства измерения (или других методов позволяющих на выходе получить двумерное изображение), а методов цифровой обработки изображений — в качестве средства анализа результатов. Данный подход позволяет существенно снизить ресурсоемкость физического эксперимента, а также обеспечивает бесконтактное или псевдо бесконтактное измерение физических величин.

Несмотря на успешное применение оптических методов в эксперименте, многие из них позволяют получать лишь качественную картину исследуемого явления, поскольку результаты обрабатываются относительно простыми цифровыми методами.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является сравнение результатов обработки цифровых изображений высокотемпературного процесса в различных координатах цветового пространства.

### 1. Математическая модель цветового пространства CIECAM02.

Важным свойством зрительной системы является способность адаптироваться к различным освещениям. Благодаря этому обеспечивается цветопостоянство объектов окружающего мира, благодаря этому одно и то же яблоко будет одинаково зеленым и при лампе накаливания, и при дневном свете. В глаз человеку приходит свет источника, отраженный от поверхности. В спектре источника может преобладать тот или иной тон. Самая последняя модель цветового пространства, одобренная CIE это CIECAM02. Модель включает в себя преобразование хроматической адаптации, а также позволяет вычислить 6 атрибутов цвета: яркость, светлоту, цветность (colorfulness), хроматическую насыщенность (chroma), насыщенность (saturation) и оттенок. Тон имеет аналогичный смысл с тоном в HSV и HSL (однако внутри модели используется промежуточное двухкомпонентное представление цвета), яркость в некоторой степени связана с восприятием отражающей способности объектов, светлота с белесостью цвета,

цветность мера отличия цветного тона от серого цвета, прочие параметры выражаются через эти базовые [2].

Однако даже настолько «продвинутой» модели цветового пространства как CIECAM02 недостаточно для решения некоторых задач фотореалистичного синтеза и получения новых знаний с помощью обработки цифровых изображений. Их ограниченность возникает из самого принципа сведения сложного физического спектра к некоторым базисным значениям. По данным атрибутам модели цветового пространства на настоящее время не представляется возможным однозначно восстановить исходный спектр

### 2. Определение координат цвета в колориметрической системе.

Линейная теория цветового зрения указывает способ кодирования цветов, который в настоящее время широко используется на практике [3]. Этим способом каждый цвет формально представляют в виде вектора трехмерного колориметрического пространства. Координаты цвета линейно зависят от спектра, вызвавшего его световое излучение.

Если рассматривать излучение поверхности высокотемпературного объекта, координаты цвета  $u_1, u_2, u_3$ , соответствующего световому излучению  $b(\lambda)$ , можно представить в виде:

$$u_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b(\lambda) K_i(\lambda) d\lambda \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $b(\lambda)$  - зависимость плотности энергии  $b$  светового излучения от длины волны  $\lambda$  электромагнитных колебаний;

$K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$  - некоторые весовые функции, характеризующие чувствительность глаза к лучам с различной длиной волны (после исследований Максвелла, получивших название функций спектральной чувствительности зрения, и в настоящее время их значения определяют [3] с весьма высокой точностью);  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  - минимальная и максимальная длины волн световых излучений, видимых глазом.

В настоящее время существует несколько систем цветовых координат. Например, в технике наибольшее применение получила система NTSC, где  $u = u(R, G, B)$ . В линейной теории зрения пользуются системой цветовых координат, предложенной Международной комис-

сий по освещению (МКО),  $u = u(X, Y, Z)$  [4].

Пересчет координат  $R, G, B$  цвета из компьютерной системы NTSC в координаты цвета  $X, Y, Z$  системы МКО (подробно расписанный в [3]) описывается системой:

$$\begin{cases} X = 2.0303R + 0.2958G + 1.75B; \\ Y = R + G + B; \\ Z = 0.1127G + 9.75B. \end{cases}$$

Для определения вида связи цветовой информации изображения и длиной волны (температурой) излучения с поверхности нагретого тела применяется метод компараторной идентификации с использованием трехмерной модели цветового зрения человека. Данный метод, получившие еще одно название – метод сравнения, является одним из перспективных направлений совершенствования методов интеллектуальной идентификации в концептуальном и прикладном аспектах [3]. Суть его заключается в изучении выходной информации как сравнительной реакции неизвестного преобразователя на пары подаваемых сигналов, т.е. при компараторной идентификации вид оператора преобразований данных определяется при исследовании областей постоянства этого оператора.

Если реальной системе сопоставить некоторый оператор, который описывает процесс ее функционирования, то на первый план выступает задача идентификации структуры этого оператора и его параметров. Довольно хорошо разработанная теория идентификации направлена на решение именно этого класса задач. В классическом понимании физическая постановка задачи идентификации неизвестного объекта выглядит следующим образом [5]: есть некоторый «черный ящик», т.е. объект или система, закономерности поведения которого мы хотим математически описать.

Теория психофизических процессов ставит своей задачей разработку математического описания зависимости ощущений от физических процессов, которые действуют на рецепторы человека. Формально компараторная идентификация может быть описана предикатом  $E(x_1, x_2)$  вида [5]

$$E(x_1, x_2) = D(F[x_1], F[x_2]), \quad (1)$$

где  $x_1, x_2$  – элементы множества входных сигналов  $B$ ;

$y_1 = F[x_1], y_2 = F[x_2]$  – элементы множества выходящих сигналов  $B$ ;

$D$  – стандартный предикат равенства, заданный на декартовом квадрате множества  $B$ .

Для описания цветового восприятия предикат  $E$  принимает следующий вид:

$$E(b', b'') = D(f(b'(\lambda)), f(b''(\lambda))).$$

Здесь сигналы

$$f(b'(\lambda)) = u', f(b''(\lambda)) = u'', \quad (2)$$

где

$$u' = (u'_i), u'' = (u''_i), i=1, 2, 3 - \quad (3)$$

трехмерные векторы с проекциями  $u'_1, u'_2, u'_3$  и  $u''_1, u''_2, u''_3$ , которые определяются по формулам

$$u'_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b'(\lambda) K_i(\lambda) d\lambda$$

$$u''_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} b''(\lambda) K_{i1}(\lambda) d\lambda \quad i = 1, 2, 3.$$

Формулы (1) и (2) математически описывают вид функций  $u' = f(b'(\lambda)), u'' = f(b''(\lambda))$ .

$D$  – предикат равенства, обусловленный таким образом:

$$D(u', u'') = \begin{cases} 1, & \text{для } u' = u'', \\ 0, & \text{для } u' \neq u''. \end{cases} \quad u' = (u'_i)$$

Данное описание представления предиката  $E$  легко интерпретируется в психофизических терминах. Сигналы  $u'$  и  $u''$  можно понимать как цвета полей сравнения, субъективно воспринимаемые наблюдателем. Функция  $f$  – характеристическая функция эквивалентности – характеризует собой преобразование объективного светового излучения  $b(\lambda)$  в субъективный цвет  $u$ , осуществляемое зрительной системой человека. Предикат  $D$  будем интерпретировать как операцию сравнения цветов, осуществляемую сознанием наблюдателя.

Рассмотрим трехмерную модель цветового зрения человека [3]. Зная значения функций спектральной чувствительности зрения  $K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$ , которые представлены в табличном виде в [3, 4], можно восстановить величину длины волны светового излучения.

Учитывая, что функции спектральной чувствительности зрения и излучение - числа, можно определить  $K_1(\lambda), K_2(\lambda), K_3(\lambda)$ :

$$K_i = \frac{u_i}{b(\lambda_2 - \lambda_1)}, i = 1, 2, 3.$$

По цифровому изображению высокотемпературного процесса определим координаты цвета  $R, G, B$  в компьютерной системе цветовых координат. С помощью формул перехода определим координаты цвета  $u_1, u_2, u_3$  в системе МКО. Для определения величины светового излучения  $b$  используем метод компараторной идентификации.

### 3. Контрастирование и линеаризация яркости цифрового изображения

Цветовые характеристики несут информацию об отражательных свойствах объекта. Различие отражательной способности объекта в разных участках спектрального диапазона обеспечивает возможность извлечения важной физической и биологической информации об объекте. Ведь именно по цвету можно оценить, например, физические параметры космических тел, человеческого организма, состояние сельскохозяйственных растений и многое другое.

Теория цветового зрения и сегодня находится в незавершенной стадии развития. Проблема состоит в том, что многочисленные модели описывают цветовое зрение, но не являются теорией цветового зрения [6], поскольку ни одной из них не удастся строго ответить на все вопросы об установленных фактах, относящихся к психофизическому и физиологическому аспектам цветового зрения.

В рамках трехкомпонентной теории цвета набор основных цветов можно выбрать многими способами, этим объясняется большое количество координатных систем, предложенных для количественного описания цвета. Описание этих координатных систем приводится как в фундаментальных исследованиях по цвету, так и в научно-технических статьях при описании различных алгоритмов обработки. Методы анализа цветных изображений зависят от цветового координатного пространства [3], выбор цветового координатного пространства определяет эффективность метода.

Для высокотемпературных тепловых процессов характерно наличие чрезмерно яркой области и более

темной среды, которая окружает процесс. При получении цифрового изображения такого контрастного процесса появляются различные шумы. Выделим диапазон яркости и проведем линейное контрастирование.

Все нагретые частицы исследуемого высокотемпературного процесса в конденсированной фазе имеют непрерывный спектр собственного теплового излучения. Для того, чтобы устранить регистрируемое нетепловое (неконвективное) излучение, необходимо осуществить усреднение значения яркости пикселей на исследуемом цифровом изображении. Пусть частица круглая, радиуса  $r$  (размер определим как  $N \times M$  пикселей). Полное излучение частицы за время экспозиции (накопления) можно охарактеризовать суммарной яркостью пикселей

$$b_{\Omega}(\lambda) = \frac{2}{\pi r^2} \int_0^l b(x, y) dx dy,$$

где  $l$  – диагональ выделенного фрагмента изображения размером  $N \times M$  пикселей.

При рассмотрении цифрового изображения высокотемпературного изображения, квадрат, описывающий частицу, имеет размеры  $(2r) \times (2r)$ . Поэтому суммарная яркость излучения в дискретном представлении будет

$$b(\lambda_{ij}) = \frac{l}{2r} \cdot \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i,j=0}^{n,m} b_{\Omega}(\lambda)$$

где  $n$  – число пикселей вдоль оси  $X$ ,

$m$  – число пикселей вдоль оси  $Y$ .

Если суммарная яркость пикселей выделенного фрагмента цифрового изображения процесса не превосходит 255, то по диаграмме яркостной температуры можно определить относительную температуру изучаемого процесса. Нужно учитывать, что яркость светящегося объекта меньше на короткой экспозиции, чем яркость этого же объекта на больших экспозициях.

### 4. Результаты сравнения

В качестве тестового примера было выбрано цифровое изображение свечения вольфрамовой нити накала. Определялся коэффициент теплопроводности  $\lambda$  в малой зоне распределения избыточной температуры на поверхности твердого тела – вольфрамовой нити накала осветительной лампы.



Рис. 1 – Лампочка накаливания (вольфрамовая нить)  
 а) исходное изображение  
 б) зональное распределение избыточной температуры

Для рис. 1 на изображении поверхности нити накала, при обработке изображения с помощью координат цвета  $X, Y, Z$  зафиксировано значение температуры  $T = 1380 \text{ K}$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda = 160,2 \text{ Вт/(м·К)}$ . При использовании математической

модели цветового пространства CIECAM02 для определения координат цвета, были получены следующие значения: температура  $T = 1400 \text{ K}$  и коэффициента теплопроводности  $\lambda = 162,3 \text{ Вт/(м·К)}$ . Табличное значение коэффициента теплопроводности вольфрама равняется:  $\lambda_{\text{табл}} = 159 \text{ Вт/(м·К)}$ .

### ВЫВОДЫ

Привлечение современных средств регистрации изображений, методов цифровой обработки изображений, распознавания образов позволяет осуществлять высокоточное количественное исследование оптически наблюдаемых или специально визуализированных физических процессов. Обработка больших массивов данных, полученных в ходе экспериментов, может быть в значительной степени автоматизирована. Это позволяет исследователю экономить время, затрачиваемое на проведение анализа и интерпретацию данных, а также на идентификацию изучаемых процессов на основе моделей, построенных для их описания. Полученные с помощью двух разных моделей результаты являются соизмеримыми и позволяют использовать для определения тепловых параметров высокотемпературных процессов ту из моделей, которая является более открытой и доступной для широкого числа пользователей. Кроме того, полученные с помощью использования предложенного подхода массивы данных могут служить базами знаний для дальнейших исследований.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Vavilov V.P. Teplovye metody nerazrushajushhego kontrolja: Spravochnik –M.: «Mashinostroenie». – 1991. – 240s.
2. Fairchild, Mark D.; Luo, M. R.; Hunt, R. W. G. (August 2000). "A Revision of CIECAM97s for Practical Applications". *Color Research & Applications* (Wiley Interscience) 25 (4): 260–266. doi:10.1002/1520-6378(200008)25:4<260::AID-COL6>3.0.CO;2-9
3. Bondarenko M. F. Mozgopodobnye struktury: Spravochnoe posobie. / M. F. Bondarenko, Ju. P. Shabanov-Kushnarenko. Tom pervyj. Pod redakciej akad. NAN Ukrainy I.V. Sergienko. – K.: Naukova dumka, 2011. – 460 s.
4. Smirnov A.D. Matematicheskie modeli teorii peredachi izobrazhenij –M.: «Svjaz'». – 1979. – 96 s.
5. Kanishheva O. V. Lingvotekhnologii identifikacii znaniij v informacionnykh sistemakh / O. V. Kanishheva, N. V. Sharonova. – LAP Lambert Academic Publishing, ISBN: 978-3-659-50003-9, 2013 – 172 c.
6. Gonsales R., Vuds R. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij: Per. s angl./ Pod red. Chochia P.A. M.: Tekhnosfera, 2005. 1072 c.