Спектральные модели цветовой константности: правила отбора

П. П. Николаев, С. М. Карпенко, Д. П. Николаев

В работе рассматриваются общие принципы построения спектральных моделей, пригодных для использования в алгоритмах константной оценки окрасок. В частности, обсуждается роль физически осмысленных координатных систем в спектральном пространстве. Исследуется вопрос единственности решения в задаче цветовой константности. Также в работе вводится новое семейство гибридных спектральных моделей.

Введение

В настоящее время развитие теории технического зрения идет в направлении построения общей модели когнитивного визуального процесса и разработки алгоритмов автономного решения различных некорректных задач распознавания зрительных образов. В частности, продолжаются попытки построения алгоритмов быстрого и релевантного поиска объектов в базах данных изображений и в видеорядах. При этом специфика двумерной регистрации исходно трехмерного образа (при которой теряется большая часть геометрической информации) делает предпочтительным цветовой (а не пространственный) анализ изображения. Задача инвариантного цветового анализа в техническом зрения фактически состоит в повторении феномена, известного для биологических систем зрения под названием «цветовая константность». Про зрение человека-трихромата (и большинства животных) твердо установлена его способность различать тела не по их колориметрическому признаку (собственно — «цвету»), а по тому, что является объективным их признаком — по окраске, которая с цветом отраженных телом излучений при цветном его освещении не коррелирует. Поэтому не удивительно, что современные алгоритмы технического зрения зачастую используют те же цветовые инварианты и опираются на тот же набор априорных ограничений, что и зрительная система человека [1, 2].

Однако на этом пути есть существенные препятствия. Естественный зрительный интеллект пока может быть исследован практически только через феноменологические свои проявления. Поэтому прямой «бионический» подход пока значимых результатов не дал. В области искусственного зрительного интеллекта также еще не предложены сколько-нибудь полные схемы когнитивного анализа изображений. Следствием недостаточности знаний о работе мозга и оказываются современные постановки в области автоматического объектного распознавания с присущими им упрощениями. При разработке подобных схем цветового анализа, именно в поиске «еще относительно простого из уже феноменологически содержательного», авторами было предложено опереться на линейную теорию формирования спектрального стимула [3], выводящую достаточно широкий круг физических явлений в наблюдаемой сцене на уровень формально разрешимых задач. При этом объектный анализ изображения становится возможным разделить на этапы цветовой сегментации и константной оценки окраски. В такой постановке блок цветовой сегментации выполняет функции предобработки, задавая карту границ разноокрашенных объектов для последующих более сложных вычислений, связанных с формированием поправки на цвет освещения этих объектов в регистрируемой сенсором сцене. Линейные свойства кластера, проецирующие в цветовое пространство (ЦП) сенсора спектральные свойства объекта, лежат в основе детектирования объекта на этапе его цветовой сегментации. Они же, как показано рядом авторских работ [1, 2, 4–7], дают материал для формирования так называемых «ключей константности», как априорных признаков цветности освещения сцены. Ахроматические, глянцевые или складчатые объекты — с их особой геометрией представительства в ЦП — позволяют при их правильной идентификации строить правдоподобные гипотезы о цветности источников освещения. Причем в алгоритмах технического зрения имеется возможность опереться на точные законы аффинной геометрии ЦП, которые для биологических систем выполняются только в особых, колориметрических, условиях (что связано с наличием многочисленных механизмов адаптации).

После того, как изображение разбито на сегменты, соответствующие однородно окрашенным объектам сцены, наступает черед собственно алгоритмов цветовой константности (ЦК). Большинство из предлагаемых схем ЦК явно или неявно содержат следующие этапы:

1) выдвигается априорная гипотеза о свойствах сцены либо ее объектов;
2) исходя из этого конкретного предположения, рассматривается некоторое логическое следствие, позволяющее оценить параметры освещения;
3) вычисляется оценка параметров освещения; в итоге чего —
4) вычисляется оценка окрасок объектов.

Рассмотрим модель цветного изображения трехмерного объекта:

$$\vec{a}(x,y) = \int_0^{\infty} \Phi(\lambda, x, y) \cdot S(\lambda, x, y) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda, \tag{1}$$

где $\vec{a}$ — регистрируемое изображение, Φ — карта окрасок в координатах изображения, S — карта освещенности, а $\vec{\chi}(\lambda)$ — вектор функций чувствительности сенсора. Задача ЦК — задача оценки окраски — состоит в оценке Φ по $\vec{a}$ при известном $\vec{\chi}$. Грубо говоря, в каждой точке нужно восстановить функцию по трем числам. Если задача цветовой сегментации успешно решена, то уравнение (1) резко упрощается. В случае унихроматического объекта, освещенного одним доминирующим источником света, например, уравнение приобретает следующий вид [8]:

$$\vec{a}(x,y) = g(x,y) \cdot \int_0^{\infty} \Phi(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \vec{\chi}(\lambda) d\lambda, \tag{2}$$

где g — неизвестная функция, зависящая от геометрии сцены.

Такое упрощение, однако, недостаточно для оценки Φ. Дополнительно требуется, как минимум, зафиксировать трехмерное пространство спектров для Φ и S — спектральную модель. Как показано ранее [9], качество оценки окраски в алгоритмах ЦК варьируется в зависимости от выбранной спектральной модели. Этот эффект будет обсужден ниже. Заметим также, что введение спектральной модели позволяет строить оценку реакции одного сенсора по реакции другого, даже когда их цветовые пространства независимы.

1. Классические цветовые модели

Большинство исследователей, занимающихся проблемой ЦК, используют в своих работах линейные спектральные модели (ЛСМ) [10–12].

В ЛСМ пространство спектральных функций ограничивается некоторым трехмерным линейным подпространством:

$$\begin{aligned} &\Phi(\lambda) \in \{F(\lambda, \vec{p})\}, \\ &S(\lambda) \in \{F(\lambda, \vec{p})\}, \\ &F(\lambda, \vec{p}) = p_1 \cdot B_1(\lambda) + p_2 \cdot B_2(\lambda) + p_3 \cdot B_3(\lambda). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\vec{p}$ — вектор параметров модели, а $B_i(\lambda)$ — базисные функции.

Среди множества линейных моделей следует отметить несколько наиболее интересных: так называемую спектрозональную модель (СЗМ), в которой базисом являются функции-ступеньки [13, 14]:

$$\begin{aligned} &\forall\, \lambda\ B_i(\lambda) \in \{0, 1\}, \\ &(B_i(\lambda) \cdot B_j(\lambda)) = 0 \Leftrightarrow i \neq j; \end{aligned} \quad (4)$$

модель Илмаза [10], использующую гармонический базис:

$$\begin{aligned} &B_1(\lambda) = 1, \\ &B_2(\lambda) = \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\Delta\lambda}\right), \\ &B_3(\lambda) = \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{\Delta\lambda}\right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\Delta\lambda$ — параметр модели, соответствующий видимому диапазону; и модель Ли [15], где в качестве базисных выступают функции чувствительности сенсора:

$$\vec{B}(\lambda) = \vec{\chi}(\lambda). \quad (6)$$

Впрочем, несмотря на большое разнообразие используемых ЛСМ, все они обладают существенным недостатком: не могут адекватно аппроксимировать спектры излучений и окрасок высокой насыщенности (т. е. узкополосные, обладающие «чистыми» цветами) [12]. Это достаточно очевидный факт, если учесть, что узкополосные спектры, различающиеся сдвигом по оси длин волн (и, как следствие, чьи цвета различаются тоном), линейно независимы.

Кроме линейных, известна еще одна группа моделей — мультипликативно замкнутые спектральные модели (МЗСМ). В них, в том числе, удается избежать упомянутой выше проблемы цветопередачи. В общем виде МЗСМ выглядят следующим образом:

$$F(\lambda, \vec{p}) = \exp\left\{p_1 \cdot B_1(\lambda) + p_2 \cdot B_2(\lambda) + p_3 \cdot B_3(\lambda)\right\}. \quad (7)$$

Наиболее известной среди МЗСМ является гауссовская спектральная модель (ГСМ) [9, 16–18]. В ней используется полиномиальный базис, позволяющий описывать всевозможные гауссианы:

$$\begin{aligned} B_1(\lambda) &= 1, \\ B_2(\lambda) &= \lambda, \\ B_3(\lambda) &= \lambda^2. \end{aligned} \tag{8}$$

Одним из важных достоинств гауссовской модели является аналитическая интегрируемость интеграла реакций (1) (при распространении пределов интегрирования на всю ось), что существенно упрощает построение алгоритмов ЦК. Кроме того, недавно нами была предложена еще одна МЗСМ, названная бесселевской [5]. Ее мультипликативный базис совпадает с аддитивным базисом линейной модели Илмаза [10]. Основным достоинством бесселевской спектральной модели (БСМ) является почти полное покрытие цветового конуса, а также наличие естественной для человека интерпретации параметров модели (яркость/светлота, насыщенность, цветовой тон).

Вопрос выбора спектральной модели ЦК не так прост, как кажется на первый взгляд. Проблема состоит в том, что на сегодняшний момент не существует стандартного набора алгоритмов ЦК, эффективность работы которого можно было бы сравнить для различных спектральных моделей. Более того, существуют алгоритмы ЦК, эксплуатирующие внутренние свойства какой-нибудь одной из моделей. В следующих параграфах мы рассмотрим общие требования к спектральным моделям, что должно обеспечить в дальнейшем теоретическую базу для сравнительного анализа различных спектральных моделей.

2. Элементы цветовой метрики в спектральном пространстве

Прежде чем достигнуть сенсора, спектральный стимул $F(\lambda)$ претерпевает в сцене ряд трансформаций. Понимание физических процессов, ответственных за это, позволяет ввести естественную координатную сетку непосредственно в спектральном пространстве. В свою очередь, расположение подпространства, высекаемого спектральной моделью, относительно этой сетки позволяет предсказывать свойства модели.

Самым очевидным соображением в рамках этой идеи является то, что амплитуда спектрального стимула

$$\|F(\lambda)\| = \int\limits_{\Omega} F(\lambda) d\lambda,$$

где Ω — видимая область спектра, существенно зависит от взаимного расположения источника света, отражающей поверхности и сенсора. При этом (для унихроматических окрасок) относительный спектральный состав

$$f(\lambda) = \frac{F(\lambda)}{||F(\lambda)||}$$

стимула остается неизменным [8]]. С другой стороны, не существует естественных механизмов вариации окраски Φ, приводящих к подобным изменениям. Таким образом, координата *яркость*

$$l = ||F(\lambda)||$$

несет в спектральном пространстве ясный физический смысл: чисто яркостные изменения стимула указывают на изменение геометрии сцены при неизменной окраске.

Изменение концентрации красителя на поверхности, в свою очередь, приводит (согласно модели Шефера и закону Бугера—Ламберта—Бера), к степенной модификации окраски

$$\Phi'(\lambda) = \Phi^{\alpha}(\lambda).$$

К таким же изменениям видимой окраски приводит и наличие на объекте складок [5, 19]. Для описания этих процессов подойдет параметр *насыщенность* вида

$$s = ||\ln f(\lambda)||.$$

Наконец, заметим, что в природе существует не так уж много красителей. Большинство из них объединено в группы, сходные по химическому составу. При этом во многих группах (например, среди кадмиевых пигментов) спектры поглощения отличаются сдвигом максимума поглощения по длине волны. Это позволяет считать *цветовой тон*

$$h = \frac{||\lambda \cdot F(\lambda)||}{||F(\lambda)||}$$

еще одной естественной цветовой координатой спектрального пространства.

Таким образом, желательными свойствами для спектральных моделей ЦК являются: замкнутость относительно умножения спектра на число, возведения в степень и сдвига по параметру. При выполнении этих условий точность спектральной аппроксимации не будет падать при изменении геометрии сцены, естественных вариациях окраски и использовании различных пигментов одной группы.

3. Естественные требования к спектральным моделям

Подытожим теперь основные требования, предъявляемые к спектральным моделям, в порядке убывания значимости:

1. Спектр-стимул $F(\lambda)$ однозначно восстановим по реакциям $\vec{a}$.
2. Умножение спектра $F(\lambda)$ на число не выводит за пределы модели (учет рассеяния света).
3. Произведение спектров, принадлежащих модели, принадлежит модели (учет отражений).
4. Возведение спектра $F(\lambda)$ в степень не выводит за пределы модели (учет вариаций концентрации красителя, учет отражений в складках).
5. Сумма спектров, принадлежащих модели, принадлежит модели (возможность описания сцен с двумя доминирующими источниками света, использование дихроматической модели блика).
6. Сдвиг спектра по оси длин волн не выводит за пределы модели (моделирование семейств красителей).
7. Модель хорошо аппроксимирует распределение Планка (моделирование естественных источников света).
8. Константный спектр удовлетворяет модели (возможность описания ахроматических поверхностей).
9. Дельта-функции в видимом диапазоне удовлетворяют модели (возможность описания насыщенных окрасок).
10. Спектр-стимул $F(\lambda)$ аналитически выразим через реакции $\vec{a}$.

Заметим, что требование 9 выполняется для МЗСМ (удовлетворяющих треб. 1–3), имеющих один экстремум в видимом диапазоне [16]. Кроме того, очевидно, что выполнение треб. 3 влечет за собой выполнение треб. 4, и, следовательно, треб. 8; а треб. 1, 2 и 5 (линейность) — выполнение треб. 10. К сожалению, треб. 1, 2, 5 и 9 — несовместны.

Согласно приведенному списку, лидерами по количеству выполненных требований являются ГСМ (1–4, 6–10) и СЗМ (1–5, 8, 10). Выполнение требования 1 для ГСМ и других моделей будет рассмотрено в следующем параграфе.

4. Вырождения спектральных моделей

Рассмотрим подробнее требование единственности восстановления спектра $F(\lambda)$ по реакции $\vec{a}$. В простейшем случае это означает однозначную разрешимость следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = \int\limits_{\Omega} F(\vec{p}, \lambda) \cdot \chi_1(\lambda) d\lambda, \\ a_2 = \int\limits_{\Omega} F(\vec{p}, \lambda) \cdot \chi_2(\lambda) d\lambda, \\ a_3 = \int\limits_{\Omega} F(\vec{p}, \lambda) \cdot \chi_3(\lambda) d\lambda \end{cases} \tag{9}$$

относительно вектора параметров $\vec{p}$. В случае СЗМ, например, где (9) есть просто система линейных уравнений, требование однозначной разрешимости сводится, очевидно, к отсутствию линейной зависимости между $\chi_i(\lambda)$. Это требование — в качестве необходимого — сохраняет силу и для других моделей, в которых решается система (9). Однако для нелинейных моделей оно уже не является достаточным.

Пример. Рассмотрим ГСМ такую, что:

$$\chi_1(\lambda) = e^{-(\lambda-1)^2}, \quad \chi_2(\lambda) = e^{-4\cdot(\lambda-1/8)^2}, \quad \chi_3(\lambda) = e^{-9\cdot(\lambda-1/18)^2}. \tag{10}$$

Функциональный определитель в этом случае нигде не обращается в 0. Тем не менее, рассмотрим в качестве стимулов дельта-функции, сосредоточенные в точках $\lambda = \pm 1/2$. Как легко проверить, реакции будут пропорциональны. Таким образом, при определенном виде спектров чувствительности сенсора ГСМ способна «перепутать» даже спектрально чистые цвета. Ни о какой константности оценки окраски в этом случае, очевидно, речь идти не может. Как будет показано ниже, подобные вырождения характерны для МЗСМ.

Будем рассматривать модели, включающие в себя дельта-последовательности (выше мы уже рассматривали это свойство как желательное). Учтем также естественное условие

$$F(\vec{p}, \lambda) = e^{p_1} \cdot \Phi(\mathrm{p}_2, \mathrm{p}_3, \lambda)$$

— умножение спектра на число не выводит за пределы модели. Тогда образ пространства параметров — это конус K^3. Итак, нас интересуют критерии однозначной разрешимости уравнений (9) относительно параметров в случае гладких отображений $G : \mathrm{Re}^3 \to K^3$ вида

$$G_i(\vec{p}) = \int\limits_{\Omega} e^{p_1} \cdot \Phi(\mathrm{p}_2, \mathrm{p}_3, \lambda) \cdot \chi_i(\lambda) d\lambda.$$

В первую очередь нас интересуют такие вырождения, при которых однозначное решение о вектор-стимуле невозможно в целой области реакций. Такого рода вырождение может возникнуть по следующим двум причинам:

а) При стремлении $\vec{\mathrm{p}}$ к бесконечности $G_i(\vec{p})$ стремится к некоторой поверхности. У этой поверхности могут быть самопересечения.

б) В конечной области $\mathrm{p}_2, \mathrm{p}_3$ у отображения есть особенность типа складки.

При этом существует стандартная процедура, позволяющая проверять спектральную модель на наличие обоих источников неоднозначности:

а) Если при стремлении параметров к бесконечности мы получаем дельта-последовательности, то условие однозначности на спектральном локусе легко проверяется, а именно: метамеризм модельных стимулов существует, если и только если выписанная ниже система (11) имеет ненулевые решения $(\alpha, \lambda_1, \lambda_2)$ такие, что $\lambda_1 \neq \lambda_2$:

$$\begin{cases} \chi_1(\lambda_1) = \alpha \cdot \chi_1(\lambda_2) \\ \chi_2(\lambda_1) = \alpha \cdot \chi_2(\lambda_2) \\ \chi_3(\lambda_1) = \alpha \cdot \chi_3(\lambda_2) \end{cases} . \tag{11}$$

б) В особых точках отображения якобиан обращается в 0. Если якобиан принимает значения разных знаков, то особая точка типа складки существует.

Впрочем, единственность решения иногда удается показать и прямыми методами.

Проанализируем в качестве демонстрации ГСМ на наличие самопересечений спектрального локуса. Система (11) для ГСМ имеет следующий вид:

$$\begin{cases} p_{31}\lambda_1^2 + p_{21}\lambda_1 + p_{11} = \alpha + p_{31}\lambda_2^2 + p_{21}\lambda_2 + p_{11} \\ p_{32}\lambda_1^2 + p_{22}\lambda_1 + p_{12} = \alpha + p_{32}\lambda_2^2 + p_{22}\lambda_2 + p_{12} \\ p_{33}\lambda_1^2 + p_{23}\lambda_1 + p_{13} = \alpha + p_{33}\lambda_2^2 + p_{23}\lambda_2 + p_{13} \end{cases} . \tag{12}$$

Запишем полученную систему относительно неизвестных
$u = (\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_1 + \lambda_2), \quad v = \lambda_1 - \lambda_2, \quad \alpha:$

$$\begin{cases} p_{31}u + p_{21}v - \alpha = 0 \\ p_{32}u + p_{22}v - \alpha = 0 \\ p_{33}u + p_{23}v - \alpha = 0 \end{cases} . \tag{13}$$

Отсюда следует, что «плохи» те ГС модели, в которых одновременно:

а) определитель системы (13) равен 0,

б) существуют ненулевые решения, такие, что $v \neq 0$.

Условие а) определяет 5-мерную гиперповерхность плохих ГСМ в 6-мерном пространстве свободных параметров модели $\vec{p}_1, \vec{p}_2$, а условие б) вырезает из этой поверхности 4-мерную гиперплоскость равноселективных ГСМ — они не «плохи» на спектральном локусе.

Впрочем, ранее уже было показано, что система (9) для ГСМ с равноселективными спектрами чувствительности имеет единственное решение, причем решение выразимо в элементарных функциях [6, 17] (см. также приложение). С другой стороны, известно, что кривые чувствительности колбочек человека хорошо аппроксимируются линейной комбинацией равноселективных гауссиан [20]. Это позволяет по-прежнему считать ГСМ одной из самых удачных спектральных моделей [1].

5. Гибридные спектральные модели

Все предыдущие выкладки в данной работе основывались на предположении, что все спектры, участвующие в формировании интеграла реакций, принадлежат одной фиксированной спектральной модели. Несмотря на кажущуюся очевидность, это требование вовсе не обязательно. Более того, авторами уже была рассмотрена гибридная спектральная модель, то есть модель, в которой $\Phi(\lambda)$ и $S(\lambda)$ принадлежат разным базовым моделям [21]. Необходимость рассмотрения гибридных моделей — следствие двух фактов: несовместимости требований 1–10, сформулированных выше для единой модели, и различной физической природы спектров отражения и испускания. Действительно, если рассматривать мир источников света, то требования 3 и 4 теряют смысл (задачи ЦК не имеют ничего общего с нелинейной оптикой), равно как и требование 10 — при монохроматическом освещении, очевидно, задача ЦК неразрешима. Требование 6 для моделей спектров излучения также неактуально. Таким образом, наилучшим выбором модели для $S(\lambda)$ будет ЛСМ, хорошо аппроксимирующая планковские спектры. С другой стороны, на модель $\Phi(\lambda)$ не распространяется требование 7, кроме того, требование 2 не является обязательным. Но главное, для $\Phi(\lambda)$ не требуется аддитивная замкнутость, так как линейная нейтральная диэлектрическая модель блика может быть адекватно заменена моделью вариации насыщенности окраски под разными углами наблюдения (разумеется, если выполнены требования мультипликативной замкнутости). С учетом этого, хорошим выбором для модели окраски будет ГСМ или БСМ.

В заключение отметим, что требование 1 к спектральным моделям, требование восстановимости спектра по реакциям, для гибридных моделей усложняется: Спектр освещения $S(\lambda)$ должен быть однозначно восстановим по реакциям $\vec{a}$ и известной $\Phi(\lambda)$, а $\Phi(\lambda)$ — известным $\vec{a}$ и $S(\lambda)$. Это требование может сузить список допустимых гибридных моделей.

---

[1] Следует заметить, что даже в случае равноселективной ГСМ вырождение все же встречается [22], но это вырождение тривиально — оно соответствует спектральному локусу. См. Приложение.

Заключение

Феномен ЦК имеет вековую историю экспериментального изучения в психофизике. Более трех десятилетий он моделируется в качестве метода объектного распознавания в техническом зрении. Штурм проблемы, относящейся к классу некорректных (интерпретационных, неоднозначных) задач, ведется по нескольким направлениям. Перспективными считаются ныне решения, либо эксплуатирующие обстоятельства изобилия в наблюдаемой сцене объектов с широкой вариативностью цветовых характеристик отражения (модельные предложения, объединяемые идеей алгоритма Gamut), либо нацеленные на поиск «ключей» ЦК (когда сцена не «богата» объектами) и надежных признаков их детекции. Так в инженерной практике реализации схем ЦК два эти альтернативные по сути подхода стимулировали теоретическое исследование проблемы в направлении «физического анализа сцен». Принципиальная невозможность существования «единого универсального ключа» ЦК породила ситуацию разнородности приемов обработки изображения, делающих тот или иной ключ основным в иерархии ключей «вспомогательных», что, в свою очередь, сильно усложняет предварительный анализ картины на этапе детекции самих ключевых признаков. А разнообразие спектральных характеристик зрительного процесса (требующих корректного вовлечения в процедуру ЦК для описания объектов и источников освещения) привело к созданию множества разнородных спектральных моделей (СМ). Отсутствие критериев их сравнения и некого единого к ним подхода очевидным образом тормозят прогресс в этой востребованной области интеллектуальных технологий. В силу причин подобного рода представляются целесообразными попытки авторского коллектива восполнить теоретический пробел в плане структуризации проблемы ЦК: предложены критерии адекватности той или иной СМ, ее корректности и ресурса возможностей, т. е. предпринята фактически первая детальная попытка *теоретически* обосновать выбор СМ для гетерархических процедур ЦК.

Еще одним следствием целенаправленного подхода в выборе оптимальных ансамблей параметров, обеспечивающего для СМ минимум потерь при переходе из спектрального пространства, является учет физической разнородности таковых. При моделировании феномена ЦК в трихроматическом зрении двупараметрическая цветность является более просто оцениваемой диадой характеристик (достаточной для вычисления цветности освещения по цветностям стимулов в наборе) в сравнении с третьей цветовой компонентой — *яркостью* источника или *светлотой* тел (оценка которой для 3D сцен требует полной 3D реконструкции геометрии объектов и источников освещения), то весьма целесообразно по примеру человеческого трихроматического зрения «стандартизовать» компоненты этой диады — *тон* и *насыщенность* — для любой спектральной модели ЦК через некое их формальное определение. Тогда связи параметров в наборе будут формулироваться через общность по тону либо по насыщенности, а это, в свою очередь, сможет облегчить построение необходимого признака набора (на языке свойств стимулов на поле цветности) в данной СМ.

В дальнейшем мы надеемся продолжить сравнительное исследование спектральных моделей цветовой константности, сосредоточившись в основном на описанном в этой статье классе гибридных моделей.

Литература

1. *Николаев П. П.* Модели константного зрительного восприятия // Интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1987, С. 300–350.
2. *Николаев П. П.* Трихроматическая модель константности восприятия окраски объектов // Биофизика, 1989. Т. 34. № 2. С. 287–294.
3. *Николаев П. П.* Монокулярное цветоразличение объемных предметов в разных условиях освещения // Биофизика, 1988. Т. 33. № 1. С. 140–144.
4. *Николаев Д. П.*, *Николаев П. П.* Гауссовская спектральная модель и ее особенности в задаче цветовой константности // Искусственные интеллектуальные системы и Интеллектуальные САПР: Труды международной конференции IEEE AIS'03 и CAD–2003. М.: Физматлит, 2003. С. 321–327.
5. *Николаев Д. П.*, *Николаев П. П.* Спектральные модели и алгоритмы цветовой константности // Интеллектуальные системы и Интеллектуальные САПР: Труды международной конференции IEEE AIS'07 и CAD–2007. М.: Физматлит, 2007. Т. 2 С. 117–125.
6. *Николаев П. П.* О новых методах оценки цветности освещения в алгоритмах цветовой константности // Сенсорные системы, 2007. Т. 21. № 1, С. 29–44.
7. *Nikolaev D. P.*, *Nikolayev P. P.* On Spectral Models and Colour Constancy Clues // 21^{st} European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2007. Prague, Czech Republic. P. 318–323.
8. *Nikolaev D. P.*, *Nikolayev P. P.* Linear color segmentation and its implementation. Color Vision and Image Understanding. V. 94, 2004. P. 115–139.
9. *Nikolaev D. P.*, *Nikolayev P. P.* Comparative analysis of Gaussian and linear spectral models for Colour constancy // 19^{th} European Conference on Modelling and Simulation, ECMS 2005. Riga, Latvia. P. 300–305.
10. *Yilmaz H.* The theory of colour vision // Biological Prototypes and Synthetic Systems / Eds. E. Bernard and M. Kare. N.-Y., Plenum Press. 1962. V. 1. P. 126–143.
11. *Brill M.* A device performing illuminant-invariant assessment of chromatic relations // J. Theor. Biology. 1978. V. 71. № 3. P. 473–478.
12. *Maloney E.* Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small number of parameters // J. Opt. Soc. Amer. 1986. V. 3. № 10. PP. 1673–1683.
13. *Land E. H.*, *McCann J. J.* Lightness and retinex theory // J. Opt. Soc. Amer., A. 1971. V. 61, P. 1–11.

14. *Нюберг Н. Д., Николаев П. П., Бонгард М. М.* 2. О константности восприятия окраски // Биофизика. 1971. Т. 16. № 6. С. 1052–1063.
15. *Lee S. D., Kim C. Y., Seo Y. S.* Linear model of surface and scanner characterization method // In Proceedings of Device-Independent Colour Imaging II. SPIE. 1995. P. 84–93.
16. *Weinberg J. W.* The Geometry of Colors // General Relativity and Gravitation. V. 7. No. 1. 1976. P. 135–169.
17. *Николаев П. П.* Модель константности цветовосприятия для случая непрерывных спектральных функций // Биофизика. 1985. Т. 30. № 1. С. 112–117.
18. *Nikolaev P., Nikolayev P., Bozhkova P.* Efficiency comparison of analytical Gaussian and linear spectral models in the same colour constancy framework // International Journal of Simulation Systems, Science & Technology (Special Issue on: Vision & Visualization). 2006. V. 7. № 3. P. 21–36.
19. *Николаев П. П.* Гауссовская модель и процедуры цветовой константности для сцен двойного освещения. II. Роль интеррефлексов // Сенсорные системы. 2007. Т. 21. № 4. С. 316–330.
20. *Николаев П. П., Николаев Д. П.* Сравнительный анализ гауссовской и линейных спектральных моделей в задаче оценки окраски // Искусственные интеллектуальные системы и Интеллектуальные САПР. Труды международной конференции IEEE AIS'04 и CAD–2004. М.: Изд-во Физматлит. 2004. Т. 2. С. 323–328.
21. *Николаев П. П., Николаев Д. П.* О гибридных спектральных моделях в алгоритмах цветовой константности // Искусственные интеллектуальные системы и Интеллектуальные САПР. Труды международной конференции IEEE AIS'08 и CAD–2008. М.: Физматлит, 2008. Т. 2. С. 299-307.
22. *Николаев П. П.* Гауссовская модель и процедуры цветовой константности для сцен двойного освещения. I. Цветность и светлота // Сенсорные системы. 2007. Т. 21. № 3 С. 195–214.

Приложение

В этом приложении мы приводим решение задачи восстановления стимула по реакции в случае ГСМ с равноселективным сенсором, и показываем отсутствие вырождений внутри пространстве реакций.

Нас интересуют конкретизация системы (9) в случае гауссовской модели с кривыми спектральной чувствительности вида $\chi_i = e^{-(p_0\cdot\lambda^2+q_i\cdot\lambda+r_i)}$, и спектр-стимулом $e^{-(p\cdot\lambda^2+q\cdot\lambda+r)}$:

$$\begin{cases} \int\limits_{\Omega} e^{-(p_0+p)\cdot\lambda^2-(q_1+q)\cdot\lambda-(r_1+r)} d\lambda = a_1, \\ \int\limits_{\Omega} e^{-(p_0+p)\cdot\lambda^2-(q_2+q)\cdot\lambda-(r_2+r)} d\lambda = a_2, \\ \int\limits_{\Omega} e^{-(p_0+p)\cdot\lambda^2-(q_3+q)\cdot\lambda-(r_3+r)} d\lambda = a_3. \end{cases}$$

В приближении неограниченного видимого диапазона запишем значение табличных интегралов:

$$\sqrt{\frac{\pi}{(p_0+p)}} \cdot \exp\left\{\frac{(q_i+q)^2}{4\cdot(p_0+p)} - (r_i+r)\right\} = a_i,$$

где $i = 1, 2, 3$.

Вынеся второй член из-под знака экспоненты в правую часть, поделив первые два равенства на (ненулевое) третье и прологарифмировав полученные (положительные) функции, имеем систему:

$$\beta_i = \frac{q_i^2 - q_3^2 + 2\cdot q\cdot(q_i - q_3)}{4\cdot(p_0+p)}, \quad \text{где} \quad i = 1, 2, \quad \text{а} \quad \beta_i = r_i - r_3 + \ln\frac{a_i}{a_3}.$$

После перехода к переменным

$$u = q + \frac{q_1+q_2}{2}, \quad v = p + p_0$$

система принимает вид:

$$(q_i - q_3)\cdot u - 2\cdot\beta_i\cdot v = 0,$$

где $i = 1, 2$.

Если определитель этой системы не равен 0, то задача решена. С другой стороны, при

$$\beta_2\cdot(q_1-q_3) + \beta_1\cdot(q_3-q_2) = 0$$

возникает вырождение: реакции (β_1, β_2) не соответствует ни один гауссовский спектр (p, q).

Легко видеть, что указанное вырождение соответствует границе цветового конуса. Для спектрального локуса имеем:

$$\alpha_1(\lambda) = \exp(-\rho_0\cdot\lambda^2 - \mathrm{q_i}\cdot\lambda - \mathrm{r_i}),$$

где $i = 1, 2, 3$. В координатах (β_1, β_2) имеем:

$$\beta_i(\lambda) = (q_3 - q_i)\cdot\lambda,$$

что исчерпывает всю область вырождения.