

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЛАСТИ НА ФРАГМЕНТЕ RGB ИЗОБРАЖЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ

М.А. Недзьведь¹, А.А. Недзьведь²

¹ Белорусский Государственный Университет, биологический факультет, п-т. Независимости, д. 4, г. Минск, Беларусь, maksimnedzved@gmail.com

² Белорусский Государственный Университет, ФПМИ, п-т. Независимости, д. 4, г. Минск, Беларусь, artiom.nedzved@gmail.com

Анализ биологических объектов часто требует проведения спектрального анализа их изображений. Получение спектра на основе данных RGB изображения представляет собой достаточно сложную задачу. Поэтому в данной работе предлагается подход на основе использования деконволюции цвета, позволяющий получить более точные результаты.

Ключевые слова: спектральный анализ; цвет; конволюция цвета.

DETERMINATION OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF A REGION ON A FRAGMENT OF RGB IMAGES FOR ASSESSMENT OF PLANT DEVELOPMENT

М.А. Nedzved¹, А.А. Nedzved²

¹ Belarusian State University, Faculty of Biology, pr. Nezavisimosti 4, Minsk, Belarus, maksimnedzved@gmail.com

² Belarusian State University, FAMCS, pr. Nezavisimosti 4, Minsk, Belarus, artiom.nedzved@gmail.com

Often analysis of biological objects requires spectral analysis for reseach. Definition a spectrum from RGB image data is very complicate task. Therefore, in this paper, we propose an approach based on the using of color deconvolution, which makes it possible to obtain more accurate results.

Keywords: spectral analysis; color; color convolution.

Введение

Цвет биологического объекта формируется за счёт двух механизмов. Одна из них – структурная окраска (явление иридисценции), когда окраска задаётся структурой поверхностей, на которые падает свет. Это явление характерно как для животных, такие примеры встречаются почти в каждом таксоне, так и для растений. Так, современные исследования находят как минимум один вид растений со структурной окраской в каждом семействе. Достаточно указать на листья бегонии, цвет которой

задаётся особой формой хлоропластов, или сизый цвет хвои голубой ели, цвет которой объясняется наноструктурой воскового налёта.

Тем не менее, для физиологии растений гораздо важнее другой механизм окраски – химический, или биохимический. Он связан со способностью молекул характерным для неё способом поглощать и отражать свет в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. В биологии эти молекулы называются пигментами. У растений пигменты имеют непосредственное физиологическое значение: участие в фотохимических и других метаболических процессах – зелёные хлорофиллы и желтые, оранжевые и красные каротиноиды, защита от излучений и участие в опылении энтомофильных растений (опылении насекомыми) – желтые, синие или фиолетовые флавоноиды.

Так же надо учитывать, что синтез пигментов у растений это сложный, многоступенчатый энергозатратный процесс, в котором задействованы многоферментные комплексы. В полной мере осуществлять его может только здоровое растение.

Таким образом, получая информацию о цвете растительного объекта (оптимально использовать верхнюю сторону листовой пластины), мы получаем информацию о концентрации пигмента, что нам может говорить о физиологическом состоянии анализируемого объекта (организма, или реже, анализируемого органа). При этом важно отметить, что у здорового листа содержание пигментов колеблется незначительно, так как процессы отмирания и образования новых пигментов идут с примерно равной скоростью. Так что у растения в нормальном физиологическом состоянии окраска листьев будет иметь определённое нормальное значение.

Цель данной работы – определение значений спектральных характеристик цвета в полихроматических условиях для изображений, полученных обычными цифровыми камерами.

1. Проблема преобразований цветовых систем в спектр

Цветные изображения окрашенных биологических образцов формируются на основе заполнения областей разными красителями с разной концентрацией. Цвет формируется путем разложения значений абсорбции смесей красителей на значения абсорбции отдельных пятен, в данном случае простое разложение по координатам цветовых систем. Такое разложение не позволяет получить линейную зависимость между концентрацией красителя и абсорбцией, которая соответствует линии спектра в монохроматических условиях. Большинство диагностических задач в биологии ориентированы на полихроматические условия, для которых невозможно получить точные значения спектра.

Существует бесконечное количество спектров, соответствующих одному и тому же цвету RGB. Такие спектры называются метамерами. С математической точки зрения любая функция спектрального распределения, дающая заданные значения RGB, является решением обратной задачи. Однако требование физической корректности накладывает ряд ограничений, например, спектры источника света с отрицательными значениями не имеют смысла. При наличии априорной информации об исходном спектре на результат могут быть наложены некоторые дополнительные ограничения, такие как непрерывность или гладкость.

Известно несколько решений такой задачи. Они основаны на представлении спектра в виде кусочно-постоянных функций с постоянным шагом по длине волны. В статье [1] спектр восстанавливается как линейная комбинация трех базовых функций, соответствующих излучающему люминофору. Коэффициенты получаются из исходного цвета RGB путем решения системы линейных уравнений. В [2] предлагается взять такую же линейную комбинацию указанных автором функций: постоянной, синуса и косинуса. Аналогично получаются коэффициенты. Эти два подхода позволяют получать спектры, которые дают точно исходный цвет RGB после свертки с начальными кривыми отклика. Недостатком этих подходов является то, что они не учитывают реальный физический смысл результирующего спектра. И результатом может быть спектр, имеющий отрицательное значение. Автор [3] ввел дополнительные ограничения на гладкость спектра для лучшего согласования результирующих спектров отражения для известных материалов. С использованием этого ограничения был построен набор базовых функций, и результирующий спектр рассматривается как их линейная комбинация. Проблема этого метода заключается в невозможности восстановить спектр для некоторых цветов, соответствующих реально существующему спектру. В [4] спектрограмма строится как нормированная сумма допустимых частных решений, соответствующих набору случайно выбранных троек длин волн. Таким образом, авторы получили репрезентативный спектр, в котором все видимые длины волн соответствуют ненулевой интенсивности. Автор также предоставляет методы получения правильного спектра излучения и отражения. Однако этот метод требует очень много времени. Общая проблема существующих методов корректного построения спектра состоит в том, что ограничения корректности имеют определенную форму и заложены внутри самого метода. Также эти методы довольно сложны в реализации. Другой проблемой методов преобразования цвета RGB в

спектр является стабильность. В реалистичной визуализации они используются для построения спектрального изображения из обычного цветного изображения. Затем это спектральное изображение накладывается на объект в виде текстуры или используется как площадной источник света. Если одинаковые цвета соседних пикселей на изображении будут преобразованы в очень разные спектры, это приведет к образованию шума на конечном изображении. Поэтому стабильность цвета является еще одним требованием метода. Неформально это можно выразить так: для любых двух одинаковых цветов их спектры также должны быть подобны. Стабильность большинства вышеперечисленных методов не исследована, а некоторые из методик ею не обладают. Например, итерационный метод [5] неустойчив из-за использования случайных начальных приближений.

2. Цветовые системы и спектр

В модели физического формирования сигнала спектрального поглощения света окраска биологических образцов вызвана смесью разных красителей. Путем суммирования вкладов спектрального пропускания области, спектральной чувствительности сенсора и спектральных характеристик широкополосного (в системе CIE D65) или узкополосного (RGB) освещения получают немонахроматические сигналы сенсора. В данном случае, использование представление в RGB формате не является эффективным, так как затрудняет представление цвета в виде спектра. Тем не менее, существует система хуз [6] определяющая хроматическую плоскость в координатах x, y . Самым простым способом определения спектральных характеристик является использование хроматической диаграммы МКО (CIE 1931) которая лежит в плоскости данных координат. Волны спектра соответствуют углу на кривой диаграммы. Пространство RGB необходимо преобразовать в хуз.

$$x = 0,3935 R + 0,3653 G + 0,1916 B$$

$$y = 0,2124 R + 0,0711 G + 0,0866 B$$

$$z = 0,0187 R + 0,1119 G + 0,9582 B$$

Используя соответствия на хроматической диаграмме CIE 1931 (рис.1), можно получить длину волны от 380 до 780 нм с шагом в 5 нм, используя специальный массив, в котором длина волны определяется по координатам X, Y :

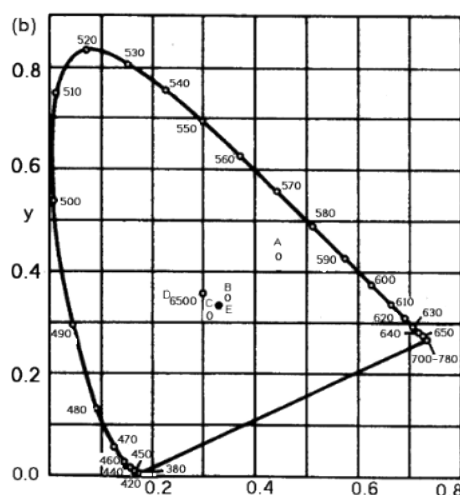


Рисунок 1 – Хроматическая диаграмма CIE 1931

$\{0.1741, 0.0050\}$, $\{0.1740, 0.0050\}$, $\{0.1738, 0.0049\}$, $\{0.1736, 0.0049\}$,
 $\{0.1733, 0.0048\}$, $\{0.1730, 0.0048\}$, $\{0.1726, 0.0048\}$, $\{0.1721, 0.0048\}$,
 $\{0.1714, 0.0051\}$, $\{0.1703, 0.0058\}$, $\{0.1689, 0.0069\}$, $\{0.1669, 0.0086\}$,
 $\{0.1644, 0.0109\}$, $\{0.1611, 0.0138\}$, $\{0.1566, 0.0177\}$, $\{0.1510, 0.0227\}$,
 $\{0.1440, 0.0297\}$, $\{0.1355, 0.0399\}$, $\{0.1241, 0.0578\}$, $\{0.1096, 0.0868\}$,
 $\{0.0913, 0.1327\}$, $\{0.0687, 0.2007\}$, $\{0.0454, 0.2950\}$, $\{0.0235, 0.4127\}$,
 $\{0.0082, 0.5384\}$, $\{0.0039, 0.6548\}$, $\{0.0139, 0.7502\}$, $\{0.0389, 0.8120\}$,
 $\{0.0743, 0.8338\}$, $\{0.1142, 0.8262\}$, $\{0.1547, 0.8059\}$, $\{0.1929, 0.7816\}$,
 $\{0.2296, 0.7543\}$, $\{0.2658, 0.7243\}$, $\{0.3016, 0.6923\}$, $\{0.3373, 0.6589\}$,
 $\{0.3731, 0.6245\}$, $\{0.4087, 0.5896\}$, $\{0.4441, 0.5547\}$, $\{0.4788, 0.5202\}$,
 $\{0.5125, 0.4866\}$, $\{0.5448, 0.4544\}$, $\{0.5752, 0.4242\}$, $\{0.6029, 0.3965\}$,
 $\{0.6270, 0.3725\}$, $\{0.6482, 0.3514\}$, $\{0.6658, 0.3340\}$, $\{0.6801, 0.3197\}$,
 $\{0.6915, 0.3083\}$, $\{0.7006, 0.2993\}$, $\{0.7079, 0.2920\}$, $\{0.7140, 0.2859\}$,
 $\{0.7190, 0.2809\}$, $\{0.7230, 0.2770\}$, $\{0.7260, 0.2740\}$, $\{0.7283, 0.2717\}$,
 $\{0.7300, 0.2700\}$, $\{0.7311, 0.2689\}$, $\{0.7320, 0.2680\}$, $\{0.7327, 0.2673\}$,
 $\{0.7334, 0.2666\}$, $\{0.7340, 0.2660\}$, $\{0.7344, 0.2656\}$, $\{0.7346, 0.2654\}$,
 $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$,
 $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$,
 $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$, $\{0.7347, 0.2653\}$,
 $\{0.7347, 0.2653\}$

Следует отметить, что все описанные способы вычисления характеристик цвета можно использовать только при качественно откалиброванных и отъюстированных системах ввода изображения, так как даже незначительные ошибки при вводе приводят к неправильным результатам. И даже при качественной калибровке вероятность ошибки декомпозиции спектра слишком высока.

3. Применение деконволюции цвета для коррекции формирования спектра

Цветовая деконволюция – это метод преобразования цветных изображений нескольких окрашенных биологических образцов в изображения, представляющие концентрации красителей на основе разложения значений цветовых координат для смесей красителей. Метод предполагает линейную зависимость между концентрацией красителя и абсорбцией, которая действительна только в монохроматических условиях, т.е. в условиях, при которых формируется спектральная линия. Это свойство соответствует математической модели для расчета немнохроматических значений поглощения. Нелинейные характеристики формирования поглощения приводят к значительным ошибкам деконволюции. Такую модель можно использовать для количественной оценки компонентов системы.

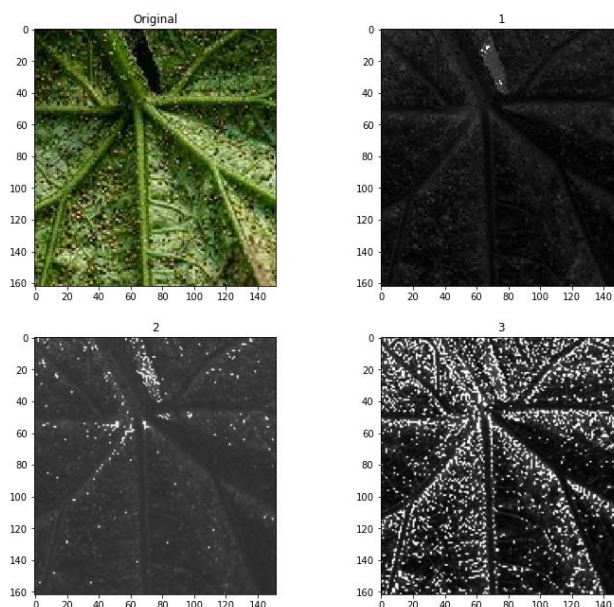


Рисунок 2 – Изображение в системе ортогональных векторов, включающей ось с длиной волны 550 нм (зеленый – первая компонента)

Для реализации деконволюции цвета использовался алгоритм Ruifrok-Johnston [8], реализованный в пакете deconvolution (<https://github.com/grfrederic/deconvolution>). Алгоритм использует базис трех векторов в трехмерном пространстве. Для выделенной спектральной линии используется только одна ось, поэтому для получения остальных осей используется метод Грама-Шмидта, как способ ортогонализации системы линейно-независимых векторов, как на рис2.

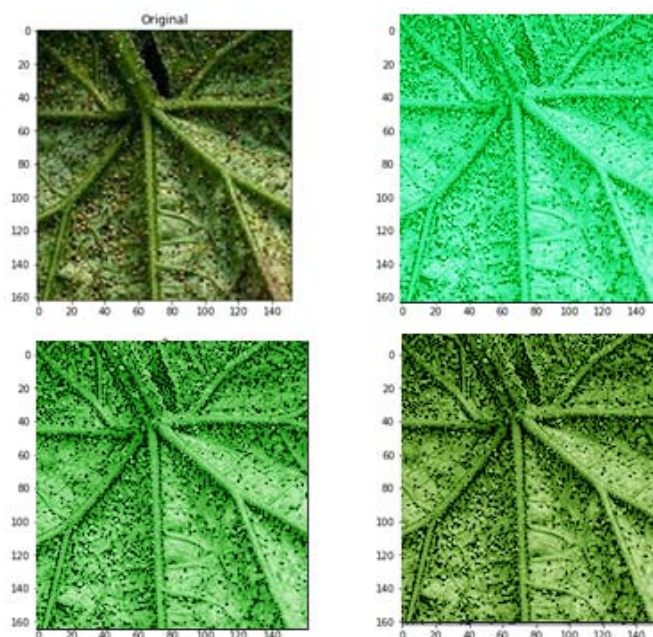


Рисунок 3 – Изображения для зеленых компонент спектральных линий с длиной волны 550нм, 555нм, 560нм.

Таким образом можно построить набор изображений, в которых будет отражаться спектральная составляющая, как на рис.3.

Заключение

Предложенный метод позволяет построить набор изображений, отображающий компоненты заданных спектральных линий, что позволяет сместить исследование в сторону спектрального анализа. Однако использование данного метода требует серьезной калибровки как условий съемки изображения, так и собственно спектра. Важно отметить, что этот подход не учитывает влияние ошибок, связанных с подготовкой образцов и визуализацией. Таким образом, полученные результаты описывают эффекты, вызванные исключительно методологической ошибкой линейной деконволюции нелинейных сигналов поглощения. Для дальнейшей оптимизации необходимо использовать методы машинного

обучения, которые позволят автоматически определить методику калибровки спектра отталкиваясь от особенностей исследуемого биологического объекта.

Библиографические ссылки

1. Glassner A.S. How to derive a spectrum from an RGB triplet // IEEE Computer Graphics and Applications, July 1989. Vol. 9, №.4. P. 95–99.
2. Glassner A.S. Principles of Digital Image Synthesis // San Francisco: Morgan-Kaufman, 1995. P.104–105.
3. Smits B. An RGB-to-spectrum conversion for reflectances // Journal of Graphics tools. 1999. Vol. 4. № 4. P.11–22.
4. Zhdanov D.D., Potemin I.S. Spectrum construction from RGB triplet in spectral simulation tasks // The Conference Proceedings of Graphicon-2010, St. Petersburg, 2010. P. 144–147.
5. Valiev I.V., Voloboy A.G., Denisov Ye.Yu., Ershov S.V., Pozdnyakov S.G. Transformation of XYZ triplet into spectrum for surface properties // The Conference Proceedings of Graphicon-2015, Moscow-Protvino, 2015. P. 209-213.
6. Lobanov I.V. Spectral representations and hardware accelerated ray tracing in jewel rendering //The Conference Theses of Lomonosov-2014. Moscow, 2014.
7. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. М. : Мир, 1982. Кн.1 312 с.
8. Ruifrok AC, Johnston DA. Quantification of histological staining by color deconvolution // Anal Quant Cytol Histol. 2001. № 23(4). P. 291–299.