

УДК 681.513:519.7

Н. Е. Кулишова

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ КРАСОК С ПОМОЩЬЮ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНОЙ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

1. Введение

Синтез многокрасочной полиграфической печати использует три базовые краски: голубую, пурпурную и желтую (ГПЖ, в англоязычной литературе — СМУ). При наложении на бумагу они последовательно или одновременно поглощают из внешнего освещения соответственно красную, зеленую и синюю спектральные составляющие. При этом базовые краски составляют линейную комбинацию. Количество каждой базовой краски определяется в ходе цветоделения изображения и влияет на формируемый цвет оттиска.

Подобный принцип позволяет получать на оттисках большинство цветов из всех доступных для восприятия человека, определение этого базового набора является основной проблемой при синтезе цвета. Реальный полиграфический синтез цвета использует не три, а четыре базовые составляющие — к желтой, пурпурной и голубой добавляют черную краску, количество которой линейно связано с количеством трех остальных. Этот факт противоречит линейной теории цветовоспроизведения [1] и является основным источником различий между теоретически прогнозируемыми и реальными цветами автотипного синтеза.

Процедура цветоделения является ключевой при печати, так как результат цветоделения — готовый оттиск — можно получить лишь после создания фотоформ, печатных форм и проведения печати всеми красками. Дефекты цветоделения приводят к неустраняемому браку печатной продукции и, следовательно, к существенным дополнительным затратам.

Важной и актуальной является задача определения количества базовых красок для каждого цвета с учетом нелинейной зависимости спектральных характеристик печатных красок от длины волны излучения и от относительной запечатываемой площади растровой ячейки S . В общем случае спектральные характеристики не имеют аналитического выражения, их получают экспериментально путем измерений и восстанавливают в виде совокупности численных значений. Интерполяция двумерных спектральных характеристик красок является первым этапом решения оптимизационной задачи разложения заданных цветов на базовые составляющие полиграфического синтеза.

2. Постановка задачи

Пусть видимый человеком диапазон излучения разбит на N интервалов. Интенсивность излучения в зависимости от длины его волны — спектр $I(\lambda)$ — можно представить N -мерным вектором I . Фотоны

этого светового потока, падающие на некоторую поверхность, частично поглощаются молекулами этой поверхности (рис. 1), частично отражаются. Отношение отраженного потока к падающему световому потоку, в зависимости от длины волны излучения, характеризуется спектральным коэффициентом отражения поверхности $\rho(\lambda)$. В видимом диапазоне излучения его можно представить N -мерным вектором r .

Таким образом, спектр излучения, отраженного объектом со спектральным коэффициентом отражения r под действием освещения I , можно выразить в виде Lr , где L — диагональная матрица ($N \times N$), образованная элементами вектора I . Для описания цвета используем стандартное цветовое пространство CIEXYZ, определяемое кривыми сложения, которые заданы матрицей A ($N \times 3$) [2], столбцы которой содержат значения стандартных кривых сложения x , следовательно, цветовые CIEXYZ координаты спектра Lr могут быть записаны в виде выражения

$$t = A^T Lr. \quad (1)$$

Пусть имеется некоторое цифровое цветное изображение. Этому изображению соответствует трехмерный массив $I(M_x \times M_y \times 3)$, где M_x — количество пикселей в изображении вдоль одной границы, M_y — количество пикселей вдоль другой границы, 3 — количество координат цвета t каждого из пикселей изображения. Таким образом, информация о цветовом содержании изображения представлена совокупностью CIEXYZ координат t_T .

Пусть необходимо создать точную копию данного изображения с помощью офсетной печати. Цветовые CIEXYZ координаты i -го пиксела в офсетном оттиске определяются выражением:

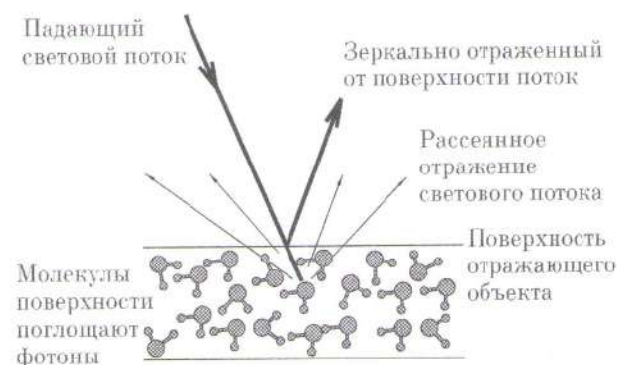


Рис. 1. Ощущение цвета возникает в результате восприятия отраженного светового потока, окрашенного в результирующий цвет вычитанием спектральных составляющих освещения

$$t_{\text{офсет}} = A^T L_1 r_i. \quad (2)$$

Здесь L_1 — матрица, описывающая освещение при наблюдении оттиска; r_i — спектральный коэффициент отражения поверхности оттиска на участке, соответствующем i -му пикселу исходного файла.

В соответствии с линейной теорией цветовоспроизведения, спектральный коэффициент отражения определяется как

$$r_{i \text{ отт}} = b_1 r_C + b_2 r_M + b_3 r_Y, \quad (3)$$

где r_C, r_M, r_Y — спектральные характеристики голубой (*cyan*), пурпурной (*magenta*) и желтой (*yellow*) красок синтеза. Они удерживаются в достаточно узких пределах допусков и считаются стабильными.

Кроме этих трех красок, в печати используется еще и черная (*black*). Технология ввода этой составляющей основана на положении, что ее количество соответствует некоторой линейной комбинации трех базовых цветов [3–7]. Следовательно, формируемый спектр оттиска:

$$r_{i \text{ отт}} = b_1 r_C + b_2 r_M + b_3 r_Y + b_4 r_K, \quad (4)$$

где индекс K соответствует черной краске синтеза, при этом

$$b_4 = \alpha(b_1 + b_2 + b_3). \quad (5)$$

Такая модель предполагает, что краски прозрачны, а функции поглощения красителей не перекрываются и имеют прямоугольную форму. На практике эта теория не обеспечивает приемлемого качества восстановления цвета и не учитывает взаимодействие красок и подложки. Реальные краски не полностью прозрачны, их спектральные характеристики не имеют аналитической записи и в реальности являются линейно зависимыми если не во всем диапазоне видимого спектра, то в отдельных его интервалах.

Полиграфический синтез использует автотипный принцип формирования изображения с помощью растровой точки переменной площади, коэффициент отражения оттиска зависит от запечатываемой площади растровой ячейки S и меняется с изменением длины волны видимого спектра λ . Значения спектрального коэффициента отражения известны лишь в узловых точках, образованных конечными множествами значений переменных S и λ .

Таким образом, формирование офсетного оттиска сводится к определению значений относительных площадей растровых точек основных цветов S_C, S_M, S_Y, S_K , которые могут быть получены в результате решения оптимизационной задачи:

$$S_j = \arg \left(\min_{\lambda} \sum_{j=1}^{M_p} \|t_{T_j} - A^T L_1 r_i(S_i, \lambda)\|^2 \right). \quad (6)$$

где i — номер пиксела или соответствующей ему растровой ячейки оттиска; M_p — количество пикселов в изображении.

Получение искомого решения затруднено, поскольку целевая функция (6) не может быть выражена аналитически, так как спектральный коэффициент отражения $r_i(S_i, \lambda)$ задан табличным способом. Следовательно, поиск решения задачи оптимизации непосредственно связан с интерполяцией поверхности $r_i(S_i, \lambda)$, при этом интерполирующую функцию можно использовать для аналитической записи целевой функции (6).

3. Радиально-базисная искусственная нейронная сеть

Для решения задачи многомерной интерполяции предлагается использовать радиально-базисную искусственную нейронную сеть [8], архитектура которой показана на рис. 2.

Исходной информацией для обучения радиально-базисной сети является набор значений функции двух переменных $f(x)$, заданной в N узлах решетки $f(1), f(2), \dots, f(N)$. Результатом обучения является восстановление отображения $F: R^2 \rightarrow R^1$, удовлетворяющее условиям интерполяции:

$$F(x(k)) = f(k), \quad k = 1, 2, \dots, N. \quad (7)$$

Выход радиально-базисной сети в данном случае будет вычисляться в соответствии с выражением:

$$F(x) = \sum_{k=1}^N w_k \Phi_k(\|x - c_k\|, \sigma_k) = \sum_{k=1}^N w_k \Phi_k(\|x - x(k)\|, \sigma_k), \quad (8)$$

где $\Phi(\bullet)$ — радиально-базисная функция, центрами c_k которой приняты узлы интерполяции $x(k)$; $\sigma_k > 0$ — параметр ширины, определяющий локальную область входного пространства, на которую «реагирует» данная функция. Чаще всего $\Phi(\bullet)$ — это гауссиан вида

$$\begin{aligned} \Phi_k(\|x - c_k\|, \sigma_k) &= e^{-\frac{\|x - c_k\|^2}{\sigma_k^2}} = \\ &= \exp\left(-\sigma_k^{-2} \|x - c_k\|^2\right). \end{aligned} \quad (9)$$

где σ_k выбирается из эмпирических соображений. Для определения синаптических весов w_k необходимо решить систему линейных уравнений

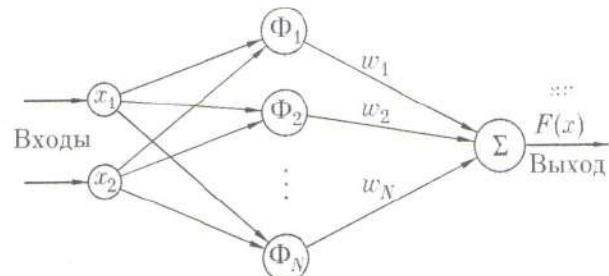


Рис. 2. Архитектура радиально-базисной искусственной нейронной сети

$$\begin{pmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \dots & \Phi_{1N} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & & \Phi_{2N} \\ \vdots & & & \\ \Phi_{N1} & \Phi_{N2} & & \Phi_{NN} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f(1) \\ f(2) \\ \vdots \\ f(N) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где $\Phi_{kj}(\|x(j)-x(k)\|, \sigma_k)$, $k=1, \dots, N$; $j=1, \dots, N$. Введя в рассмотрение векторы $f=(f(1), f(2), \dots, f(N))^T$, $w=(w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ и $(N \times N)$ матрицу $\Phi=\{\Phi_{kj}\}-(N \times N)$, можно записать систему (8) в матричной форме:

$$\Phi w = f, \quad (11)$$

откуда

$$w = \Phi^+ f, \quad (12)$$

где Φ^+ — матрица, псевдообратная по Муру—Пенроузу к Φ . Таким образом, при использовании радиально-базисной нейронной сети в соответствии с (8) получаем значения функции $F(x)$, интерполирующей неизвестную функцию $f(x)$ в заданных узлах.

4. Экспериментальное исследование

Для исследования интерполирующих свойств радиально-базисной искусственной нейронной сети в задаче интерполяции спектральных коэффициентов отражения красок использованы результаты спектрофотометрических измерений коэффициента отражения полиграфической тестовой шкалы. Эта шкала содержит четыре ряда полей, отпечатанных четырьмя красками синтеза, каждое из полей запечатано растровыми точками разных размеров — от 1 до 100 % заполнения относительной площади ячейки. Полям соответствуют следующие значения относительной запечатанной площади: 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 92%, 94%, 96%, 98%, 100%. Измерения проводятся прибором автоматически в видимом диапазоне излучений, что соответствует длинам волн от 380 до

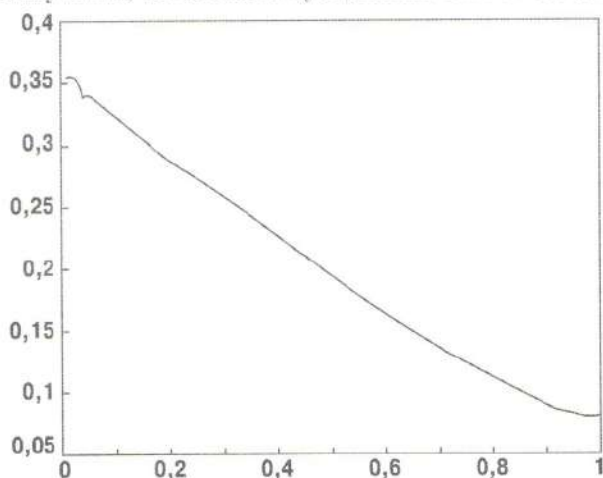


Рис. 3. Интерполяция коэффициента отражения голубой краски в зависимости от относительной площади растровой точки (сплошная линия — исходная функция, пунктирная линия — результат интерполяции) при $\lambda = 380$ нм

730 нм. Этот диапазон разбит на интервалы по 10 нм. Таким образом, решетка интерполяции является прямоугольной, но неравномерной по одной из осей.

Проведена одномерная и двумерная интерполяция коэффициента отражения с помощью радиально-базисной сети. В качестве примера рассмотрены коэффициенты отражения полей шкалы в интервале длин волн 380...390 нм. В качестве радиально-базисной функции был выбран гауссиан (9) с $\sigma = 0,8$. На рис. 3–6 показаны результаты интерполяции коэффициента отражения для разных красок синтеза в узловых точках. Для удобства восприятия результаты отображены в виде одномерных срезов двумерных функций при фиксированных значениях длины волны $\lambda = 380$ нм.

Точность интерполяции в узловых точках решетки оценивалась с помощью среднеквадратичного отклонения. Результаты приведены в таблице.

Точность интерполяции коэффициента отражения красок синтеза

Краска	Точность интерполяции (среднеквадратичное отклонение в узловых точках)
Голубая	$3,67 \cdot 10^{-15}$
Пурпурная	$3,09 \cdot 10^{-15}$
Желтая	$3,35 \cdot 10^{-15}$
Черная	$3,46 \cdot 10^{-15}$

5. Заключение

Научная новизна данной работы заключается в применении радиально-базисной искусственной нейронной сети для интерполяции двумерной функции спектрального коэффициента отражения при решении насущной задачи подготовки цветных изображений к полиграфической печати — цветоделения. Практическое значение имеет высокая точность

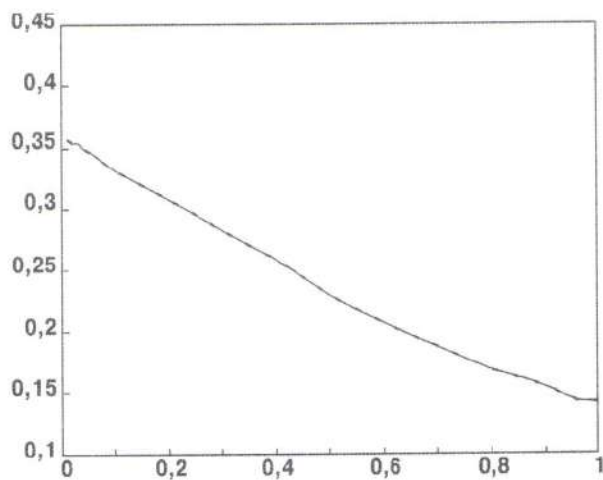


Рис. 4. Интерполяция коэффициента отражения пурпурной краски в зависимости от относительной площади растровой точки (сплошная линия — исходная функция, пунктирная линия — результат интерполяции) при $\lambda = 380$ нм

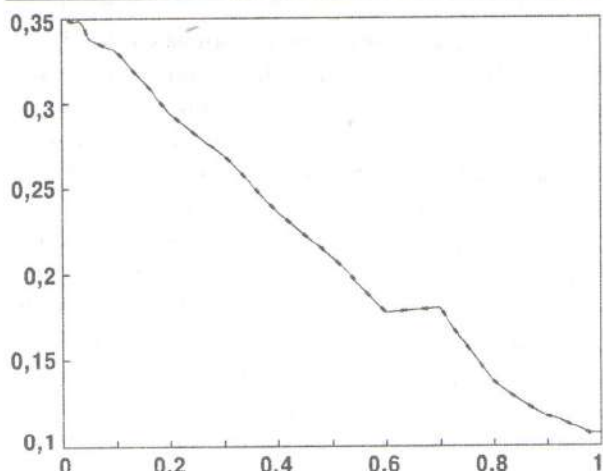


Рис. 5. Интерполяция коэффициента отражения желтой краски в зависимости от относительной площади растровой точки (сплошная линия — исходная функция, пунктирная линия — результат интерполяции) при $\lambda = 380$ нм

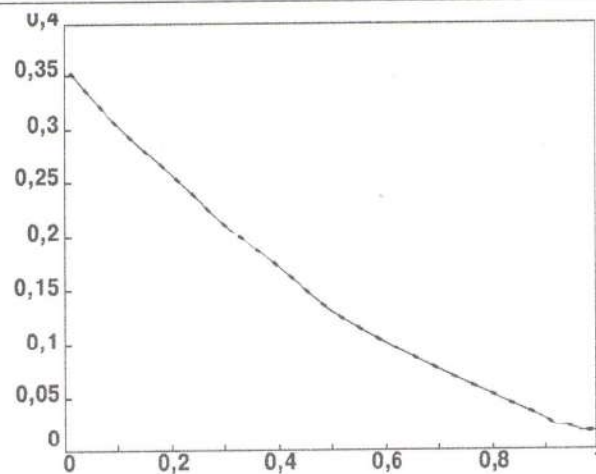


Рис. 6. Интерполяция коэффициента отражения черной краски в зависимости от относительной площади растровой точки (сплошная линия — исходная функция, пунктирная линия — результат интерполяции) при $\lambda = 380$ нм

интерполяции в узловых точках функции, что позволяет в дальнейшем проводить поиск решения задачи оптимизации количества базовых красок синтеза.

Список литературы: 1. Шашлов Б. А. Цвет и цветовоспроизведение.— М.: Книга, 1986.— 208 с. 2. Sharma G. Digital Color Imaging Handbook.— Boca Raton, FL: CRC, 2003. 3. Барановський І., Шаблій І. Про сучасні технології кольороподілу і кастрування // Палітра друку.— 1995.— № 4.— С. 52–53. 4. Барановський І., Шаблій І. Методи виготовлення кольороподілених растрових зображень // Палітра друку.— 1994.— № 1.— С. 19. 5. Berns R. S.,

Billmeyer F. W., Sacher R. S. Methods for generating spectral reflectance functions leading to color-constant properties // Col. Res. Appl.—1985.— Vol. 10.— P. 73–83. 6. Heuberger K. J., Jing Z. M., Persiev S. Color transformations and lookup tables // Proc. TAGA/ISCC.— 1992.— Vol. 2.— P. 863–881. 7. ISO 13655, Graphic technology — Spectral measurements and colorimetric computation for graphic art images. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 7. Cichocki A., Unbehauen R. Neural Networks for Optimization and Signal Processing.— Stuttgart: Teubner, 1993.— 526 p.

Поступила в редакцію 26.08.2006