БИОФИЗИКА

Том XIX, вып. 1 1974

ЦВЕТОВАЯ ОППОНЕНТНОСТЬ И КОНСТАНТНОСТЬ ЦВЕТОВОСПРИЯТИЯ

В. В. МАКСИМОВ, П. П. НИКОЛАЕВ

Институт проблем передачи информации АН СССР, Москва

Описана математическая модель узнавания окраски объемных предметов, освещенных диффузным светом, в условиях, когда ни спектр источника, ни степень затенения одних предметов другими заранее не известны. Операторы, осуществляющие необходимые по ходу решения преобразования поля входных возбуждений, оказались во многом аналогичными известным из электрофизиологии зрения «цветовым оппонентным клеткам». Такие клетки широко распространены в разных отделах зрительного анализатора, но их роль в алгоритмах зрения была совершенно не ясна.

Отраженный предметами свет зависит не только от окраски предметов, но и от освещения. Поэтому для того, чтобы по спектральному составу света, приходящего от предмета, можно было определить окраску его поверхности, зрительная система должна уметь выяснить характер этого освещения и ввести соответствующую «поправку на освещение» [1]. Такая способность зрительной системы правильно узнавать окраску предметов в разнообразных условиях освещения называется *константностью цветовосприятия* [2]. Без этого узнавание предметов в условиях меняющегося спектра падающего на предмет излучения практически невозможно. Отсюда кажется очевидным, что просто цветное зрение (способность зрительной системы к цветоразличению) без механизмов константности бесполезно для животных. Действительно, в поведенческих опытах было показано, что животные, имеющие цветное зрение (такие, как пчелы [3], рыбы [4], птицы [5] и обезьяны [6]), способны к константному восприятию окраски.

Итак, можно заключить, что основная цель всей обработки и кодирования сигнала о цвете в зрительной системе — это осуществление константности цветовосприятия. Но если это так, то и изучение физиологических механизмов обработки и кодирования сигнала о цвете не может быть достаточно продуктивным без ясного понимания цели этой обработки-. В особенности это относится к абстрактным, модельным построениям о путях и способах обработки сигнала о цвете.

Электрофизиологические исследования выявили два основных механизма обработки сигналов, общих для различных уровней зрительного анализатора. Первый связан с пространственным взаимодействием сигналов и выражается в так называемой концентрической организации рецептивных полей, когда стимуляция периферии вызывает в клетке реакцию, противоположную ее реакции на стимуляцию центра поля. Другой механизм носит название *цветовой оппонентности* и выражается в том, что раздражение некоторого участка рецептивного поля клетки стимулами разного спектрального состава (возбуждающими разные светочувствительные приемники) вызывает противоположные реакции клетки. Было показано, что способы обработки сигналов различными клетками представляют собой комбинации этих двух механизмов [7].

До сих пор каких-либо единых и четких представлений о функциональной роли цветовой оппонентности в обработке сигналов нет [8].

Оппонентное взаимодействие сигналов приемников неоднократно тем или иным способом вводилось в модели цветного зрения (см., например, [9—12]). К сожалению, за исключением давних работ Геринга во всех этих моделях, как правило, полностью игнорируются *цели* обработки сигналов в зрительной системе. Геринг, обсуждая особенности своей «оппонентной теории цветного зрения», специально объясняет, каким образом эта теория обеспечивает «приблизительную цветовую константность» [13]. Однако именно свойство цветовой оппонентности в этой теории никак не связано с организацией константности.

В настоящей работе описана математическая модель узнавания окраски объемных предметов в условиях освещения, близких к естественным. Модель строилась как инженерная система, предназначенная для выполнения некоторой функции, без учета сведений из физиологии. Тем не менее для организации этой функции в нее пришлось ввести оппонентное взаимодействие сигналов, идущих по разным цветовым каналам, близкое к тому, что известно из физиологии зрительной системы. Анализ работы этой модели, а также попытки создания других алгоритмов узнавания окраски (работающих в более разнообразных условиях освещения) привели к убеждению, что эти аналогии отнюдь не случайны и что цветовая оппонентность является необходимым элементом механизмов константности цветовосприятия.

Узнавание окраски объемных предметов при диффузном освещении

1. Постановка задачи

Задача узнавания окраски в условиях, когда спектральный состав освещения заранее не известен и сам источник не попадает в поле зрения, рассматривалось в работе [14] для случая плоской цветной аппликации, когда характер освещения не меняется от точки к точке. Последнее ограничение позволяет (по самым ярким местам в поле зрения) выработать единую для всего поля зрения гипотезу об источнике и, введя поправку на освещение, построить суждение об окрасках.

В более общем случае объемной ситуации каждая точка поверхности предмета может находиться в разных условиях освещения. От точки к точке может меняться как мощность падающего излучения, так и его относительный спектральный состав. Изменения относительного спектрального состава освещения в случае единственного источника возможны только из-за взаимных рефлексов. Если этот источник диффузный (пасмурное небо) и предметы в поле зрения не слишком скучены, вклад рефлексов в суммарное освещение везде будет незначительным, поэтому им можно пренебречь. С другой стороны, окружающие предметы частично заслоняют источник и тем самым уменьшают мощность падающего излучения. Величину телесного угла, под которым из некоторой точки поверхности виден источник, будем здесь называть *апертурой диффузного источника* в данной точке. Тогда абсолютный спектральный состав отраженного света $F(\lambda)$, приходящего от некоторой точки поверхности, зависит от окраски (спектрального коэффициента отражения) поверхности в этой точке $\Phi(\lambda)$, $0 \le \Phi(\lambda) \le 1$, спектра источника $S(\lambda)$ и апертуры K, $0 \le K \le 2\pi$ этого источника в этой точке:

$$F(\lambda)=KS(\lambda)\Phi(\lambda) \qquad (1)$$

Если для всех поверхностей в поле зрения взаимное затенение пренебрежимо мало ($K \approx 2\pi$), то ситуация не отличается от случая плоской цветной аппликации. Здесь мы рассмотрим случай, когда взаимным затенением пренебречь нельзя.

Итак, решается задача узнавания окрасок объемных предметов при ограничениях на условия освещения, описанных в предыдущем абзаце. Сформулируем теперь ограничения на раскраски предметов «внешнего мира» и цветовые особенности предлагаемой модели.

1. В поле зрения модели попадают только разнообразно раскрашенные матовые поверхности произвольной формы. Между однородно окрашенными участками поверхностей не существует плавных переходов окраски — допустимы только резкие границы*.

2. Для простоты полагаем цветное зрение *дихроматическим.* Модель имеет два цветовых канала, будем называть их «красным» и «зеленым». Соответственно будем рассматривать интенсивности отраженного света (F^R, F^G) и источника (S^R, S^G), а также окраска предметов (Φ^R, Φ^G) отдельно для красной (R) и зеленой (G) областей спектра.

2. Путь решения. Сведение задачи к случаю цветной аппликации

Рассмотрим, какие особенности описанной ситуации могут быть использованы для правильного узнавания окрасок. Если бы удалось каким-то образом выяснить апертуру источника в каждой точке поверхности и ввести на нее поправку, то задача свелась бы к разрешимому случаю цветной аппликации [14] с постоянным по всему полю зрения освещением. Этому может помочь следующее обстоятельство. В пределах участков однородной окраски все изменения отраженного света F определяются только изменениями коэффициента K. При диффузном источнике отсутствуют четкие тени от предметов и коэффициент K на достаточно гладких участках поверхности от точки к точке меняется плавно — в том числе и на границах между окрасками. Таким образом, принимая за причину возникающего на этих границах скачка F только различия в окрасках (но не в K) и «сшивая» значения K на них, можно получить, с точностью до постоянного множителя, изменения апертуры источника на всей поверхности предмета.

К сожалению, всюду плавные изменения освещения имеют место только на поверхности предметов «внешнего мира». Изображение на сетчатке является двумерной проекцией этого трехмерного мира. Здесь возможны скачки характера освещения на границе между двумя по-разному освещенными предметами, когда один предмет в поле зрения заслоняет другой. На таких границах уже нельзя отделить вклад в F изменения окрасок от скачка в апертуре источника. Поэтому при сведении задачи к случаю цветной аппликации следует отличать границы между окрасками на поверхности одного предмета от границ между предметами и исключить последние из рассмотрения. Сделать это позволяет следующая особенность. Изменения освещения (а следовательно, и отраженного света F) вдоль такой границы по одну ее сторону (на поверхности одного предмета) и по другую (на поверхности другого предмета), как правило, будут непропорциональны. Это может служить признаком границы между предметами.

Аналогичные скачки в апертуре источника в некоторых случаях возможны даже и на поверхности одного предмета, когда эта поверхность претерпевает резкий излом и ее грани оказываются в разных условиях освещения. Легко видеть, что описанный выше признак позволяет выделять наряду с границами между предметами также и границы между окрасками на поверхности одного предмета, совпадающие с изломами поверхности.

---

* Такие границы мы будем впредь для краткости называть *границами между окрасками.*

3. Алгоритм узнавания окраски

Для упрощения описания алгоритма использован логарифмический масштаб. После замены всех логарифмов на соответствующие строчные буквы формула (1) принимает вид:

$$f^{\lambda} = k + s^{\lambda} + \varphi^{\lambda},$$

где λ — индекс цветового канала (*R*, *G*).

На вход алгоритма подается плоское цветное изображение $f^{\lambda}(x, y)$, являющееся двумерной проекцией некоторой объемной ситуации (см. рисунок, *а* и *б*). На выходе алгоритм должен сформировать гипотезы об окрасках $\varphi^{\lambda}(x, y)$ поверхностей, проектирующихся на это изображение (см. рисунок, *д* и *е*).

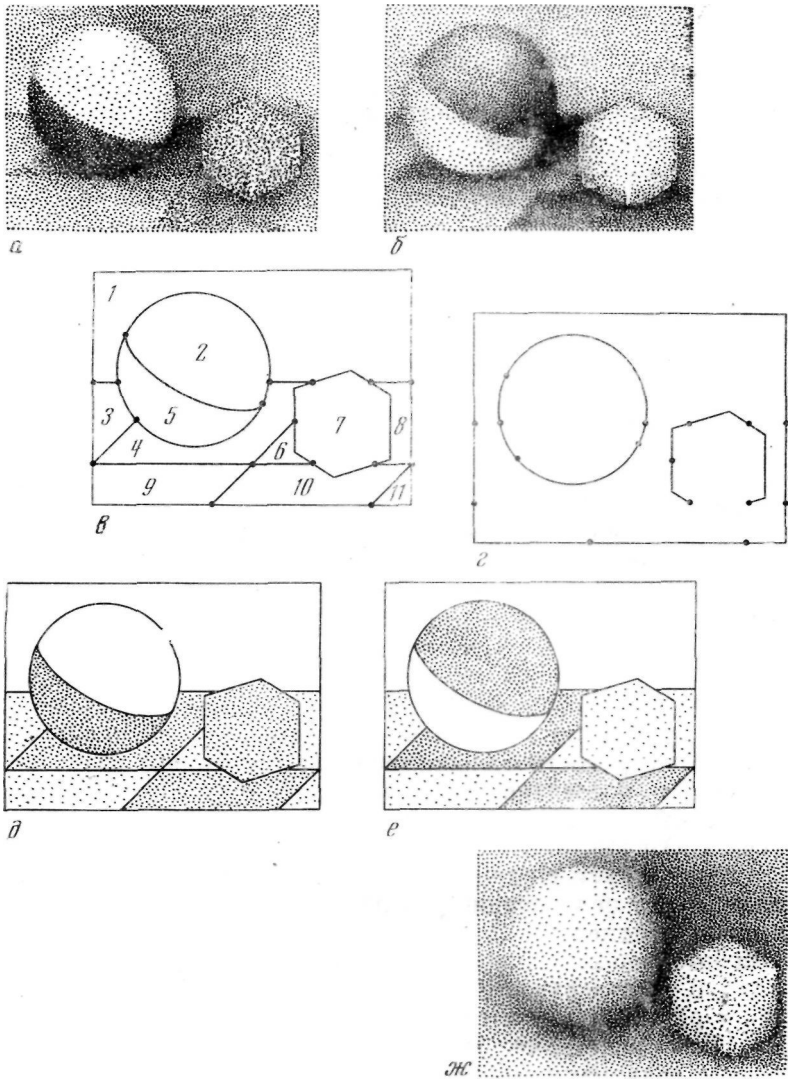

Иллюстрация работы алгоритма узнавания окраски объемных предметов при диффузном освещении

Входное изображение: *а* — для «красного» и б — для «зеленого» цветовых каналов; последовательные этапы обработки входного изображения: *в* — одиннадцать районов однородной окраски и границы между ними, *г* — границы между предметами; гипотезы об окраске предметов на выходе алгоритма: *д* — «красная» и *е* — «зеленая» компоненты; *ж* — гипотеза о распределении характера освещения (апертуры диффузного источника) на поверхности предметов

Этапы алгоритма.

1. Для каждой из точек растра (x, y) вычислим разность между возбуждениями «красного» и «зеленого» каналов:

$$a(x, y) = f^R(x, y) - f^G(x, y).$$

Связные участки растра, в которых эта разность постоянна, $a(x, y) = a_i$, будем называть *районами* однородной окраски. Районы и *границы между районами* (см. рисунок *в)* являются основными объектами следующих этапов алгоритма.

2. В каждой точке каждой из границ между районами подсчитывается изменение (скачок) $f^\lambda(x, y)$ в направлении, нормальном к этой границе. Те границы, вдоль которых этот скачок практически не меняется, будем называть *границами между окрасками.* Каждой такой границе ставим в соответствие числа b^λ_{ij} (где i и j — номера районов и $b^\lambda_{ij} = -b^\lambda_{ji}$), равные скачку $f^\lambda(x, y)$ (по каждому из цветовых каналов) при переходе через эту границу. Остальные границы, вдоль которых этот скачок претерпевает сильные изменения хотя бы по одному цветовому каналу, будем называть *границами между предметами* (см. рисунок *г).*

Границы между предметами могут разбивать растр на несколько *связных областей.* В дальнейших этапах алгоритма эти связные области разбираются порознь.

3. Каждому из районов связной области припишем некоторые числа c_i^λ согласно следующей процедуре: а) для некоторого произвольного района α полагаем $c_\alpha^\lambda = 0$; б) для района i выбираем некоторую последовательность граничащих друг с другом районов $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \ldots, \omega, i$ и полагаем

$$c_i^\lambda = b^\lambda_{\alpha\beta} + b^\lambda_{\beta\gamma} + b^\lambda_{\gamma\delta} + \ldots + b^\lambda_{\omega i}.$$

Можно показать, что если на предыдущем этапе были правильно выделены все границы между предметами, то c_i^λ не будет зависеть от пути $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \ldots, \omega, i$. Наоборот, неоднозначность в присвоении c_i^λ говорит о том, что часть границ между предметами, на которых условия освещения изменяются скачком, осталось невыделенной. Это в некоторых случаях позволяет ввести соответствующие поправки.

4. Для данной связной области вычислим максимальное по районам значение c_i^λ. Каждому району припишем гипотетическую окраску

$$\varphi_i^\lambda = c_i^\lambda - \max_i \{c_i^\lambda\}.$$

Последний этап алгоритма аналогичен «алгоритму аппликации» [14]. Так же как и «алгоритм аппликации», описанный здесь алгоритм дает возможность правильно узнавать окраски всех поверхностей, проектирующихся в данную связную область растра, только в случае, если там найдутся «яркие» окраски, отражающие практически весь падающий свет, отдельно для каждой из областей спектра. Следует отметить, что в случае, когда последнее условие не выполняется, гипотезы об относительном спектральном составе освещения для разных связных областей изображения, вообще говоря, будут разными. Это несоответствие может служить не только индикатором того, что окраски определены неверно, но позволяет выработать единую для всех связных областей гипотезу об источнике и тем самым ввести некоторую коррекцию в суждения об окрасках.

Обсуждение

Для узнавания окраски в случае плоской цветной аппликации достаточно рассматривать цветовые каналы независимо [14]. Усложнение

задачи до объемной ситуации приводит к тому, что уже первый этап алгоритма использует операцию цветовой оппонентности. Необходимость в этом очевидна. В случае плоской цветной аппликации условия освещения везде одинаковы и поэтому нет нужды в сопоставлении сигналов обязательно от одной и той же точки растра. В объемной же ситуации условия освещения, в частности апертура источника, меняются от точки к точке, и единственный способ учесть этот фактор состоит в совместной обработке всех сигналов, приходящих от одной и той же точки. Поскольку апертура источника в любой точке одинакова для каждого из цветовых каналов (и входит в виде аддитивной добавки), то уже простое вычитание возбуждения одного цветового канала из возбуждения другого позволяет избавиться от вклада характера освещения.

Можно показать, что использование операции цветовой оппонентности в алгоритме узнавания окраски полезно не только в частном случае диффузного освещения. При точечном источнике условия освещения в каждой точке будут определяться расстоянием до источника и ориентацией поверхности в этой точке относительно направления на источник. Обе эти характеристики также не зависят от цветового канала и от них можно избавиться таким же вычитанием возбуждения одного цветового канала из возбуждения другого.

Второй вопрос, возникающий в связи с оппонентным взаимодействием сигналов, касается формы представления выходной информации в системе, осуществляющей константное восприятие окраски. Казалось бы, система координат, в которой представляются выходы — окраски предметов в поле зрения, может быть произвольной и в основном должна определяться тем, как дальше в зрительной системе будут использоваться эти сигналы. Это могут быть как значения коэффициента отражения в каждой области спектра (в данном случае две координаты φ^{R} и φ^{G} — см. рисунок *д* и *е*) или координаты *светлоты* $\psi_1^{\sim}$ и *цветности* $\psi_2^{\sim}$ (которые можно выразить через φ^{R} и φ^{G}, например, так: $\psi_1^{\sim} = \varphi^{R}+\varphi^{G}$, $\psi_2^{\sim} = \varphi^{R}-\varphi^{G}$), так и любая другая система координат. Однако можно показать, что система координат светлоты и цветности обладает некоторыми преимуществами по сравнению с другими. Проявляются эти преимущества в случаях, когда алгоритм не способен правильно узнать окраски. Действительно, правильное узнавание окраски предметов возможно не во всех зрительных ситуациях. Даже если в поле зрения присутствует полный набор «ярких» окрасок, позволяющий выработать верную гипотезу об источнике освещения, ошибки в узнавании окраски, по крайней мере для некоторой части окрашенных поверхностей в поле зрения, могут возникнуть 1) в результате неверного выделения границ между предметами; 2) из-за резких изменений апертуры источника, возникающих в месте излома поверхности на границе между двумя окрасками; 3) из-за присутствия в поле зрения двух граничащих линейно-зависимых окрасок (для таких окрасок $\varphi_i^{\lambda}=\varphi_j^{\lambda}+\mathrm{const}$ и ситуация неотличима от однородно окрашенной, но по-разному освещенной поверхности, поэтому описанный здесь алгоритм не позволяет выделить границу между ними) и т. п. Легко убедиться, что во всех этих случаях ошибки будут одинаковыми как по «красному» (φ^{R}), так и по «зеленому» (φ^{G}) цветовым каналам. Но это значит, что разность $\varphi^{R}-\varphi^{G}$, т. е. *цветность* каждой из окрасок, будет определена безошибочно, а ошибки возможны только вдоль оси светлоты. Иными словами, можно сказать, что диапазон зрительных ситуаций, в которых возможно верное узнавание цветности, заметно шире, чем диапазон *точного* узнавания окрасок (и цветности, и светлоты). Поэтому естественно выходы системы кодировать в этих координатах. При этом даже в случае, когда точное узнавание окрасок невозможно, последующие этажи зрительной системы смогут использовать сведения о цветности окраски предметов внешнего мира для узнавания этих предметов.

Аналогичную ситуацию можно себе представить и в случае освещения удаленным точечным источником. Если известен спектральный состав излучения источника, то ошибки в определении ориентации поверхности по отношению к этому источнику могут приводить к неверному узнаванию только светлоты окрасок, в то время как цветность будет определена безошибочно.

Таким образом, оппонентное взаимодействие сигналов, идущих по разным цветовым каналам, является не только необходимым этапом первичной обработки сигналов, служащим для организации константного восприятия окраски, но также и наиболее удобным способом кодирования этой окраски.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гельмгольц Г. Л. Ф. О зрении, СПб, 1896.
2. Katz D., Der Aufbau der Farbenwelt, Leipzig, 1930.
3. Мазохин-ПоршняковГ. А., Природа, № 6, 58, 1965.
4. Дементман А. М., Карась А. Я., Максимов В. В., Орлов О. Ю., Ж. высш. нервн. деят-сти, **22**, 772, 1972.
5. Katz D., Revesz G., Z. angew. Psychol., **18**, 307, 1921.
6. Kohler W., Z. angew. Psychol., **77**, 148, 1916.
7. De Va1ois R. L., Cold Spring Harbor Sympos. Quant. Biol., **30**, 567, 1965.
8. Орлов О. Ю., Физиология сенсорных систем, ч. I. Физиология зрения, «Наука», Л., 246, 1971.
9. Svaetichin G., Acta Phys. Scand., **39**, Suppl. 134, 93, 1956.
10. Hurvich L. M., Jameson D., Psychol. Rev., **64**, 384, 1957.
11. Hassenstein B., Kybernetik, **4**, 209, 1968.
12. Вайткявичус Г. Г., Соколов Е. Н., Фомин С. В., Биофизика, **14**, 1080, 1969.
13. Hering E., Grundzuge der Lehre vom Lichtsinn, Berlin, 1920.
14. Нюберг Н. Д., Николаев П. П., Бонгард М. М., Биофизика, **16**, 1052, 1971.

Поступила в редакцию
18. VI. 1973

COLOUR OPPONENCY AND COLOUR CONSTANCY

V. V. MAXIMOV, P. P. NIKOLAEV

Institute of the Problems of Information Transmission, Ac. Sci. USSR, Moscow

A mathematical model for recognition of coloration of volume objects illuminated with diffuse light under conditions when neither a source spectrum, nor an extent of shading some objects by others are previously known, is described. The operators, bringing about transformations of an input field necessary in the course of solution, were found to be analogous in many respects to the well-known from electrophysiology of vision «colour opponent cells». Such cells are widely spread in different visual centers, but their role in the algorythms of vision was quite obscure.