БИОФИЗИКА

Том XX, вып. 2 1975

ОБ УЗНАВАНИИ ОКРАСКИ И ОБЪЕМНОЙ ФОРМЫ ПРЕДМЕТОВ

И. С. ЛОСЕВ, В. В. МАКСИМОВ, П. П. НИКОЛАЕВ

Институт проблем передачи информации АН СССР, Москва

Рассмотрена задача узнавания окраски объемных предметов, освещенных одновременно ярким точечным и более слабым диффузным источниками (спектры которых произвольны и заранее не известны). Описана математическая модель, в которой процесс узнавания окраски сопряжен с определением ориентации элементов поверхности по отношению к точечному источнику. Этот побочный выход модели позволяет во многих случаях по монокулярному «сетчаточному» изображению вычислить также и объемную форму предметов внешнего мира, попадающих в поле зрения.

Одной из основных задач зрительной системы является узнавание предметов в условиях меняющегося по пространству и во времени освещения. Характеристики отраженного предметами света нельзя непосредственно использовать для узнавания, так как они зависят от освещения и меняются вместе с ним. Поэтому зрительная система должна из картины на сетчатке извлекать информацию об инвариантных признаках предмета: его окраске (отражательной способности поверхности) и форме. Обычно считается [1, 2], что для определения окрасок достаточно найти спектр источника освещения, после чего ввести соответствующую «поправку на освещение». Однако это верно лишь для случая плоской аппликации, где характер освещения постоянен для всего поля зрения [3]. В случае же объемной картины отраженный свет зависит не только от падающего излучения и окраски поверхности, но и еще по крайней мере от одного неизвестного и меняющегося от точки к точке параметра. Таким параметром при освещении точечным источником будет ориентация участка поверхности по отношению к источнику, а для случая диффузного источника — «степень затененности» данного участка поверхности (апертура источника) [4].

Постановка задачи

Описание внешнего мира. 1°. В поле зрения попадают разнообразно окрашенные, совершенно матовые поверхности произвольной формы.

2°. Между однородно окрашенными участками поверхностей не существует плавных переходов окраски — допустимы только резкие границы.

3°. Имеется два источника освещения: далекий точечный, дающий видимую тень, и диффузный источник, освещающий всю картину в поле зрения, причем для частей предметов, освещенных точечным источником, вклад последнего значительно превышает вклад диффузного источника.

4°. Рефлексы (вторичные отражения) пренебрежимо малы по сравнению с однократно отраженными излучениями как на свету, так и в тени.

Цветовые особенности мира и модели. 5°. Модель имеет два цветовых канала — *красный* (R) и *зеленый* (G). Соответственно вместо функций от длины волны λ, будем рассматривать двумерные векторы интенсивностей (*спектры*) отраженного света (F^R, F^G), окраски поверхностей (Φ^R, Φ^G), а также интенсивностей точечного (S_p^R, S_p^G) и диффузного (S_d^R, S_d^G) источников.

6°. Спектры точечного и диффузного источников, а также окраски соседних окрашенных участков поверхности линейно независимы.

Системы цветовых координат. В предположениях п. 1°—5° для объектов на свету выполняется соотношение

$$F^\lambda = S_p^\lambda \Phi^\lambda \cdot \cos\varepsilon, \tag{1}$$

где $\lambda = R$, G, а ε — угол между нормалью к поверхности и направлением на точечный источник.

Как и прежде [4], будем использовать логарифмический масштаб. Логарифмы интенсивностей излучений и окрасок будем обозначать соответствующими строчными буквами. Вместо системы координат, связанной с отдельными каналами R и G, нам часто будет удобно пользоваться координатами, которые мы здесь будем называть *цветностью* — излучений (f^C и s^C) и окрасок (φ^C), *яркостью* излучений (f^L и s^L) и *светлотой* окрасок (φ^L), выражающимися через соответствующие поканальные компоненты векторов следующим образом

$$f^C = f^R - f^G; \quad s^C = s^R - s^G; \quad \varphi^C = \varphi^R - \varphi^G;$$
$$f^L = f^R + f^G; \quad s^L = s^R + s^G; \quad \varphi^L = \varphi^R + \varphi^G.$$

В этих координатах соотношение (1) примет вид:

$$\begin{aligned} f^C &= s_p^C + \varphi^C, \\ f^L &= s_p^L + \varphi^L + 2\log\cos\varepsilon. \end{aligned} \tag{2}$$

Цель алгоритма узнавания окраски. На растре (сетчатке) создается двухцветное изображение $f^\lambda(x, y)$, являющееся входом алгоритма. На основе этой двумерной проекции предметов внешнего мира для каждой точки (x, y) растра алгоритм должен построить гипотезы о цветности $\varphi^C(x, y)$ и светлоте $\varphi^L(x, y)$ окраски поверхности, проектирующейся в данную точку.

Алгоритм узнавания окраски и ориентации

Классификация границ и способы их выделения. Будем различать следующие четыре типа границ на растре: 1) *границы между окрасками*, т. е. границы между двумя соседними (на растре) окрашенными участками; 2) *границы между светом и тенью*; 3) *границы между предметами* (когда один предмет в поле зрения заслоняет другой); 4) *изломы* одной поверхности.

Полагаем, что границы типа 3 всегда совпадают с некоторыми границами между окрасками (с границами типа 1). Любые другие сочетания типов границ не обязательны, но возможны.

В пределах однородно окрашенных и освещенных одним и тем же источником участков поверхности (назовем их *районами*) в силу п. 2°—4° имеем:

$$f^C(x, y) = f_i^C = \text{const},$$

где i — номер района.

Эта особенность позволяет выделять границы между окрасками вместе с границами света и тени. Каждой такой границе можно, поставить в соответствие постоянный вдоль границы *скачок цветности*

$$b_{ij}^C = f_i^C - f_j^C.$$

Участки границы света и тени, не совпадающие с границами между окрасками, обладают тем свойством, выделяющим их среди прочих границ, что скачок цветности b_{ij}^C (где i — район, освещенный точечным источником, а j — смежный с ним район, освещенный диффузным источником) на такой границе зависит только от спектральных характеристик источников и не зависит от окраски участка поверхности, пересекаемого этой границей

$$b_{ij}^C = B^C = f_i^C - f_j^C = s_p^C - s_d^C.$$

Таким образом, если граница света и тени проходит по пестро раскрашенной поверхности, имеется возможность выделить ее из других границ.

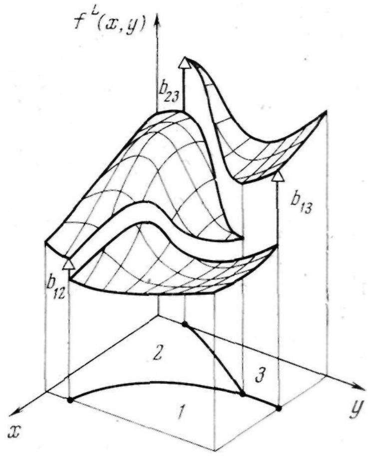

Рис. 1. Пример распределения по растру (x, y) яркости излучения f^L, отраженного от разноокрашенной гладкой поверхности. Участок растра включает районы *1, 2* и *3*; величины скачков b_{12}, b_{13} и b_{23} постоянны вдоль границы между любой парой районов. Прибавив к значениям яркости f^L константу b_{13} в точках района *1* и константу b_{23} — в точках района *2*, получим всюду гладкую функцию для этого участка растра

Яркость отраженного света на проходящих по гладкой поверхности границах между окрасками претерпевает скачок (рис. 1). Причем величина этого скачка определяется только различиями в окраске смежных участков

$$b_{ij}^L = f_i^L - f_j^L = \varphi_i^L - \varphi_j^L$$

и постоянна вдоль этой границы.

Границы, на которых возможны скачки условий освещения, — это (помимо границ света и тени) границы между предметами и изломы поверхности. Границы обоих этих типов можно выделить на основании того признака, что в мире с криволинейными поверхностями, как правило, не соблюдается постоянство скачка яркости вдоль границ [4].

Этапы алгоритма. 1. Выделить границы между районами.

2. Выделить границу света и тени, не совпавшую с границами между окрасками.

3. К теневым районам применить алгоритм, описанный в [4], и вычислить окраски (φ^C, φ^L) и спектр диффузного источника ($\tilde{s}_d^C$, $\tilde{s}_d^L$). Тем самым станут известны и окраски приграничных световых районов — они совпадают с окрасками смежных с ними теневых.

4. По известной цветности диффузного источника $\tilde{s}_d^C$ и скачку цветности B^C на границе света и тени найти цветность точечного источника

$$\tilde{s}_p^C = \tilde{s}_d^C + B^C.$$

5. Определить цветности всех окрасок в световой области

$$\tilde{\varphi}_i^C = f_i^C - \tilde{s}_p^C.$$

6. Отыскать среди границ между районами световой области те, на которых происходит скачок освещения. Эти границы разделят световую область на несколько *связных частей*.

7. Выделить среди этих частей примыкающие к границе света и тени (выделенные части назовем *пограничным поясом окрасок*).

8. По известным светлотам окрасок районов световой области, граничащих с тенью, и известным скачкам яркости b_{ij}^L на границах между районами связной части вычислить светлоты всех других окрасок пограничного пояса.

9. По найденным в пограничном поясе окраскам определить спектр точечного источника и ориентации поверхностей. Для этого строим разность $f^L(x, y) - \tilde{\varphi}_i^L$ (все изменения которой определяются только изменениями ориентации поверхности). Далее полагаем, что в пограничном поясе имеется хотя бы один участок поверхности, нормальный к направлению на источник, где $\log\cos\varepsilon = 0$ (см. (2)) и эта разность принимает максимальное значение. Величина этого максимума и определяет яркость точечного источника $\tilde{s}_p^L$.

10. Для каждой из связных частей по известному спектру источника $(\tilde{s}_p^C, \tilde{s}_p^L)$ найти окраски и ориентации поверхностей. Так как скачок яркости на внутренних границах связной части определяется только разницей в окрасках, то «сшивая» функцию $f^L(x, y)$ (см. рис. 1) на границах, можно выделить (с точностью до константы) плавно меняющуюся составляющую этой функции, и найти точку (x_α, y_α), в которой она принимает максимальное значение. Полагая, что эта точка соответствует участку поверхности, нормальному к направлению на источник, получим гипотезу о светлоте окраски в этом месте:

$$\tilde{\varphi}_\alpha^L = f^L(x_\alpha, y_\alpha) - \tilde{s}_p^L,$$

где α — номер района с точкой (x_α, y_α).

Далее строим гипотезу о светлоте каждого из остальных районов данной связной части. Для района i выбираем некоторую последовательность граничащих друг с другом районов $\alpha, \beta, \gamma, \ldots, \omega, i$ и полагаем

$$\tilde{\varphi}_i^L = \tilde{\varphi}_\alpha^L + b_{\alpha\beta}^L + b_{\beta\gamma}^L + \ldots + b_{\omega i}^L.$$

Об узнавании объемной формы предметов

В результате работы алгоритма для каждой поверхности предмета на свету получена картина ориентаций $\varepsilon(x, y)$ — см. соотношение (2):

$$2\log\cos\tilde{\varepsilon} = f^L(x, y) - \tilde{\varphi}^L(x, y) - \tilde{s}_p^L.$$

Кроме того, для каждой связной части известна *сингулярная точка*, в которой поверхность нормальна (или предполагается нормальной) к направлению на источник. Если известно и направление освещения в пространстве*, то форма этой поверхности может быть описана нелинейным дифференциальным уравнением в частных производных первого порядка. Оно приобретает совсем простой вид, когда направление освещения совпадает с направлением взгляда (рис. 2)

$$\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2 = \operatorname{tg}^2\varepsilon. \qquad (3)$$

Задача узнавания объемной формы гладких матовых поверхностей (с заранее известной отражательной способностью) по распределению на них светотени, исследованная Хорном [6], приводит к тем же диффе-

---

* Положение источника относительно неизменно во внешнем мире, а поэтому может быть известно зрительной системе заранее. Возможны также признаки, позволяющие вычислить его по самому изображению. Наконец, известно, что у человека и животных существуют априорные представления о положении источника — как правило, изображение интерпретируется так, как если бы свет светил сверху [5].

ренциальным уравнениям формы. Хорн, в частности, показал, что информация о том, какие точки изображения являются сингулярными, может использоваться в качестве начальных условий для решения этого уравнения (во всех других точках направление нормали к поверхности не может быть локально определено). Кроме того, требуется еще знать, выпукла или вогнута поверхность в области этой точки[**]. Заметим, что решение уравнения формы при этих начальных условиях позволяет найти лишь форму каждой из поверхностей внутри связной части, но не взаимное расположение (глубину) предметов в пространстве.

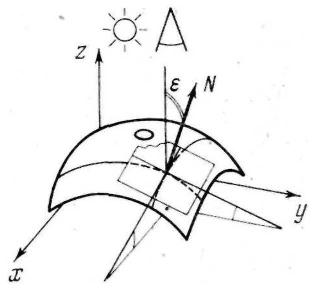

Рис. 2. К выводу дифференциального уравнения формы (3). Угол ε между нормалью *N* к поверхности *z*(*x*, *y*) и осью *z* определяется через частные производные по направлениям *x* и *y*. Углы, тангенсам которых эти производные численно равны, показаны на рисунке. Кружком выделена область сингулярной точки, в которой ε = 0

Таким образом, использование описанного выше алгоритма при не известной заранее окраске поверхностей позволяет свести задачу определения формы предметов к теоретически разрешимому случаю.

Обсуждение

Насколько разобранные здесь алгоритмы могут служить адекватными моделями зрительной системы животных и человека?

Широкий класс естественных условий удовлетворяет ограничениям, наложенным на модель. Днем диффузный свет голубого неба сильно отличается по относительному спектральному составу от солнечного света. Вклад его в общую освещенность составляет примерно 10—20% [8], но обычно много больше вклада рефлексов. Поэтому можно ожидать, что зрительная система, приспособленная к решению задач в таких условиях освещения, делает это сходным (с моделью) образом.

За сходство алгоритмов модели и зрительной системы говорит то, что условия, облегчающие работу зрения, помогают и модели. Так, наличие тени в поле зрения помогает верному узнаванию окраски [9]; наличие четких (даже специально подчеркнутых) контуров на изображении существенно для правильного узнавания окрасок изображенных предметов [10]. И обратно, задачи, трудные или недоступные для модели, часто трудны для животных и человека. Плавные переходы окраски на плоской поверхности (например, цветной фотографии) создают кажущуюся объемность картины. Наоборот, у многих животных плавное посветление окраски от спины, обычно лучше освещенной, к животу (так называемая «скрадывающая противотень») приводит к искажению восприятия истинной формы животных — «превращает их в плоские» [11]. Пятнистая («расчленяющая») раскраска затрудняет (замедляет) узнавание. Именно такие окраски были отобраны в эволюции в качестве покровительственных для того, чтобы обманывать зрительную систему других животных [12].

[**] Эти сведения не всегда могут быть получены прямо из изображения. Тогда зрительная система, по-видимому, пытается построить оба решения. Если это возможно, человеку иногда помогает выбрать одно из них прошлый опыт, или же возникает иллюзия типа «опрокидывающейся лестницы» [7].

Некоторые операции внутри зрительной системы сходны с операциями модели: логарифмирование (уже в рецепторах [13]); вычитание возбуждения одного цветового канала из другого [4, 14]; подчеркивание (выделение) контуров [15]. Аналог нелокальных вычислительных процедур внутри модели мы видим в так называемом феномене заполнения пустого поля [16]. Попытки моделирования этого феномена используют процедуру, по сути дела, эквивалентную интегрированию некоторого дифференциального уравнения при заданных начальных условиях [17, 18].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Katz D.,* Der Aufbau der Farbenwelt, Leipzig, 1930.
2. *Нюберг Н. Д., Бонгард М. М., Николаев П. П.,* Биофизика, *16*, 285, 1971.
3. *Нюберг Н. Д., Николаев П. П., Бонгард М. М.,* Биофизика, *16*, 1052, 1971.
4. *Максимов В. В., Николаев П. П.,* Биофизика, *19*, 151, 1974.
5. *Грегори Р. Л.,* Глаз и мозг, «Прогресс», М., 1970.
6. *Horn B. K. P.,* Shape from shading: a method for finding the shape of a smooth opaque object from one view, MIT A. I. Project: MAC TR-79, 1970.
7. *Грегори Р. Л.,* Разумный глаз, «Мир», М., 1972.
8. *Миннарт М.,* Свет и цвет в природе, Физматгиз, М., 1958.
9. *MacLeod R. B.,* J. Exptl Psychol., *27*, 1, 1940.
10. *Нюберг Н. Д.,* Проблемы физиологической оптики, *8*, 128, 1953.
11. *Thayer A. H.,* Auk, *13*, 124, 1896.
12. *Комт X.,* Приспособительная окраска животных, ИЛ, М., 1950.
13. *Hartline H. K.,* J. Cell. and Compar. Physiol., *5*, 229, 1934.
14. *Daw N. W.,* Physiol. Rev., *53*, 571, 1973.
15. *Ratliff F.,* Sci. Amer., 90, 1972.
16. *Ярбус А. Л.,* Роль движений глаз в процессе зрения, «Наука», М., 1965.
17. *Бонгард М. М., Голубцов К. В.,* Биофизика, *15*, 361, 1970.
18. *Gerrits H. J. H., Vendrlk A. J. H.,* Exptl Brain Res., *11*, 411, 1970.

Поступила в редакцию
9.IX.1974

ON THE RECOGNITION OF COLORATION AND SHAPE OF VOLUME OBJECTS

I. S. LOSEV,- V. V. MAXIMOVi P. P. NIKOLAEV

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

The problem of recognition of coloration of volume objects, illuminated simultaneously with bright point and weak diffuse sources (having arbitrary and previously unknown spectra) is considered. A mathematical model, in which a process of recognition of coloration is *accompanied* by determining orientations of surface elements relatively the point source is described. The information on orientation allows in many cases to calculate the volume shape of objects of the external world from their monocular «retinal» image.