

Теорема 3. Пусть для обучающей выборки $[A', B']$ сформированы КРП R_q ($q = 1, 2, \dots, r$), которым соответствуют гипотезы H_q , и пусть гипотеза H_q определяет набор чисел $t_{qi}^{(A)}, t_{qj}^{(B)}$, $i = 1, 2, \dots, t_q^{(A)}$; $j = 1, 2, \dots, t_q^{(B)}$. Тогда оптимальному КРП R_q (в смысле максимума апостериорной вероятности восстановления неизвестного разбиения $[A, B]$ обучающей выборки $[A', B']$) соответствует гипотеза H_q , доводящая до максимума значение условной вероятности $P_q([A', B'])$ того, что разбиение $[\tilde{A}_q, \tilde{B}_q]$, соответствующее КРП R_q , порождает обучающую выборку $[A', B']$

$$P_q([A', B']) = \frac{|A' \cup B'|!}{\prod_i t_{qi}^{(A)}! \prod_j t_{qj}^{(B)}!} \prod_{i=1}^{t_q^{(A)}} (\tilde{p}_{qi}^{(A)})^{t_{qi}^{(A)}} \prod_{j=1}^{t_q^{(B)}} (\tilde{p}_{qj}^{(B)})^{t_{qj}^{(B)}}$$

где \tilde{p} — оценка условной вероятности p по обучающей выборке.

Лучшей оценкой \tilde{p} в (*) общем случае будет

$$\tilde{p} = \frac{t_{qi}^{(u)}}{|A' \cup B'|}.$$

Если все числа $t_{qi}^{(A)}, t_{qj}^{(B)}$, $i = 1, 2, \dots, t_q^{(A)}$; $j = 1, 2, \dots, t_q^{(B)}$ не слишком малы (для прикладных задач такой не слишком малой величины можно считать число ≥ 2), то вместо максимизации (*) возможно сведение до минимума величины

$$F(H_q) = \left(2\pi^{t_q^{(A)} + t_q^{(B)}} \prod_{i=1}^{t_q^{(A)}} t_{qi}^{(A)} \prod_{j=1}^{t_q^{(B)}} t_{qj}^{(B)} \right),$$

что приводит к тем же результатам.

Если условные вероятности p_{qi} зависят лишь от мощности множеств T_{qi} и пропорциональны им, то оценки \tilde{p} в (1) заменяются условными вероятностями

$$P_{qi}^{(u)} = \frac{|T_{qi}^{(u)}|}{|E|}, \quad u = A, B.$$

Итак, алгоритм построения оптимального КРП состоит из двух частей: алгоритма построения набора КРП и алгоритма выбора оптимального КРП из набора КРП в соответствии с теоремой 3.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЦВЕТОВЫХ ОТТЕНКОВ

*Е. П. Пулятин, В. В. Баранник, Г. М. Пулятина,
И. В. Шульгин*

Свойство распознавания цвета — одно из существенных свойств зрительного анализатора, играющее важную роль в приспособлении человека к окружающей природе. Разработка математической модели процесса распознавания цвета и ее реализация с помощью специализированных приборов имеет большое значение в технике.

В качестве рецепторной части устройства для распознавания цветов могут быть использованы объективные фотоэлектрические колориметры, содержащие светочувствительные элементы и систему коррекции спектральных характеристик согласно трем кривым сложения цветов. Объективные колориметры ставят в соответствие каждому излучению на входе три уровня напряжения на выходе и однозначно характеризуют цвет входного излучения [1].

Ассоциирующее устройство, или блок анализа, может выполнять функции выделения различных характеристик цвета, в частности, светлоты и цветности, включая цветовой тон и насыщенность. Кроме того, ассоциирующее устройство осуществляет преобразование сигналов к виду, удобному для декодирования, и сравнение с эталонами.

Эффекторное устройство — исполнительное устройство, служащее для подачи сигнала о появлении излучения определенного цвета в цепи управления. Наиболее сложным является ассоциирующее устройство, как раз и рассматриваемое в настоящей работе.

Описания устройств для распознавания цвета в литературе несомненно сложны.

Так, в [2, 3, 5] для распознавания одного цветового оттенка предлагается использовать отдельную ассоциирующую схему, что приводит к неоправданному увеличению сложности оборудования при одновременном распознавании свыше ста оттенков. В [3] устройство для распознавания цветов построено фактически на базе универсальной вычислительной машины с двумя типами запоминающих устройств, причем одно из них — долговременное, требующее дополнительной схемы регенерации.

Вначале рассмотрим теоретические предпосылки конструирования устройств для распознавания цвета. В общем случае задача автоматического опознавания цвета сводится к установлению близости в определенном смысле между исследуемым цветом и эталонами. Минимальное расстояние определяет принадлежность исследуемого цвета к соответствующему классу, характеризуемому тем эталоном, для которого установлен минимум расстояния.

В общем случае цвет, различаемый глазом человека, не характеризуется одной точкой в трехмерном пространстве. Это связано с наличием порога нечувствительности, причем эти пороги различны по светлоте, цветовому фону и насыщенности [6]. Определение порога носит статистический характер. Кроме того, человек правильно распознает цвет при некоторых изменениях фона — например, потемнении или посветлении, при различных оптических шумах и т. д. Это свидетельствует о том, что распознавание цвета — статистический процесс.

Будем называть изображением цвета тройку чисел (напряжений) на входе датчика, однозначно характеризующих цвет входного излучения. Введем также понятие обобщенного образа цвета, понимая под этим множество изображений цвета одного класса, т. е. таких изображений, которые получаются в результате искажений k -го эталона:

$$F_k(x_1, x_2, x_3) = U_j(x_1, x_2, x_3) + r_{kl}(U_j) \quad (1)$$

$(j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, q),$

U_j — изображение цвета;

n — количество распознаваемых по цвету входных излучений;

F_k — k -й эталон цвета;

m — количество распознаваемых цветов (эталонов);

$r_{kl}(U_j)$ — случайная функция искажений k -го эталона; причем при распознавании цвета можно полагать, что для различных эталонов $r_{kl}(U_j)$ не пересекаются;

q — число изображений цвета, образующих обобщенный образ x_1, x_2, x_3 — числа (напряжения), характеризующие цвет излучения.

Для того, чтобы отнести некоторое изображение $U_j(x_i)$, $i = 1, 2, 3$ к одному из m -обобщенных образов цвета, необходимо вычислить вероятности гипотез о том, что данное изображение появилось в результате искажений того или иного эталона, и выбрать максимальную из них [1].

Вероятности гипотез $P(U_j)(k)$ являются апостериорными вероятностями о принадлежности j -го изображения k -му эталону. Пользуясь байесовой схемой, можно записать для $P(U_j)(k)$

$$P(U_j)(k) = \frac{P_k(U_j) P(k)}{P(U_j)},$$

где $P_k(U_j)$ — условная плотность вероятности появления изображения U_j в результате искажения k -го эталона (функция правдоподобия);

$P(k)$ — безусловная (априорная) вероятность k -го эталона;

$P(U_j)$ — безусловная плотность вероятности появления данного изображения.

Критерий распознавания, основанный на вероятностях гипотез, на более совершенен, однако реализация его технически затруднена.

Исследуем метод гипотез в его геометрической интерпретации. Для выяснения вопроса о принадлежности изображения цвета к определенному обобщенному образу достаточно вычислить расстояния между той или иной исследуемого изображения и всеми эталонами, пользуясь, например, простейшей формулой

$$d_k = |U_j - F_k| = \sum_{i=1}^3 |x_{ij} - x_{ik}|$$

$$(j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m),$$

где U_j — изображение цвета, подлежащее распознаванию;

F_k — k -й эталонный образ цвета, определяемый функцией искажения $r_{kl}(U_j)$;

x_{ij} — i -я компонента j -го изображения цвета);

x_{ik} — i -я компонента k -го эталона.

Тогда некоторое изображение цвета будет отнесено к k -му эталону, если для него

$$d_k \leq d_n,$$

где d_n — пороговое расстояние, определяемое функцией искажений. Функция искажений r_k может быть задана заранее, если сформулированы определенные требования к точности, либо определена экспериментально из опытов с цветовыми порогами зрения человека.

Алгоритм распознавания, заданный соотношениями (3) и (4), используется в работах [2—4]. Область решений при этом будет иметь вид куба в трехмерном пространстве для расстояния в форме (3) либо вид шара для расстояния по Эвклиду. Ясно, что при конструировании устройств для распознавания цвета должны быть максимально использованы функциональные особенности цветового зрения человека.

В частности, известно различие порогов нечувствительности зрительной системы человека по трем каналам, что особенно характерно для таких характеристик цвета, как светлота, цветовой тон, насыщенность [8]. Отсюда вытекает необходимость индивидуальной регулировки d_n для каждой характеристики цвета.

Процесс распознавания при этом состоит в проверке неравенства

$$d_{ki} = |x_{ij} - x_{ik}| \leq d_{ni} \quad (5)$$

по всем трем характеристикам цвета и установлении пересечений минимальных значений d_{ki} , удовлетворяющих (5), которые в общем случае могут быть переменными, но должны принадлежать к значениям функции искажений r_k k -го эталона из соотношения (1). Каждому излучению, имеющему изображение цвета U_j с компонентами цвета x_{ij} ($i = 1, 2, 3$), можно поставить в соответствие матрицу расстояний d_{ki}

$$(d_{ki}) = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21} \dots d_{m1} \\ d_{21}d_{22} \dots d_{m2} \\ d_{31}d_{32} \dots d_{m3} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Для распознавания цвета достаточно зафиксировать лишь номер k_i по трем строкам матрицы (6), для которого имеет место (5). Проще всего с технической точки зрения определить k_i путем счета эталонов. Если для счета применять обычный двоичный счетчик, то задача установления пересечений найденных минимальных расстояний

$$\prod_{i=1}^3 d_{ki} = \min d_{k1} \wedge \min d_{k2} \wedge \min d_{k3} \quad (7)$$

легко может быть решена путем применения дешифраторов по каждому каналу и схем совпадения.

Формулы (3) — (7) использованы в качестве определяющих алгоритмов при разработке прибора для распознавания цветовых оттенков, предназначенного для измерения готовности различных изделий по цвету, сортировки деталей по цвету и т. д.

Работа прибора включает следующие этапы:

а) измерение цвета объекта и получение количественной и качественной оценки изображения;

б) определение кратчайшего расстояния между данным изображением и эталонами цвета по трем каналам;

в) дешифрация полученной информации, т. е. решение задачи о принадлежности данного изображения определенному обобщенному образу цвета.

Устройство состоит из следующих блоков: датчика (фотоэлектрического колориметра), блока анализатора и блока дешифрации.

Блок-схема прибора показана на рис. 1.

Сигналы с датчика Φ в виде трех напряжений, соответствующих трем компонентам цвета, поступают на коммутатор каналов, позволяющий производить последовательную обработку информации. Управление коммутатором производится с помощью блока управления БУ.

Сигнал с коммутатора каналов поступает на схему вычитания по модулю, осуществляющую операцию определения расстояния по (4). Блок управления последовательно подает сигналы (уровни напряжения), соответствующие эталонам цветов, из блока эталонных напряжений.

С выхода схемы вычитания по модулю сигнал поступает на три пороговых элемента, значение порогов которых соответствует заданным порогам нечувствительности по каждой компоненте цвета.

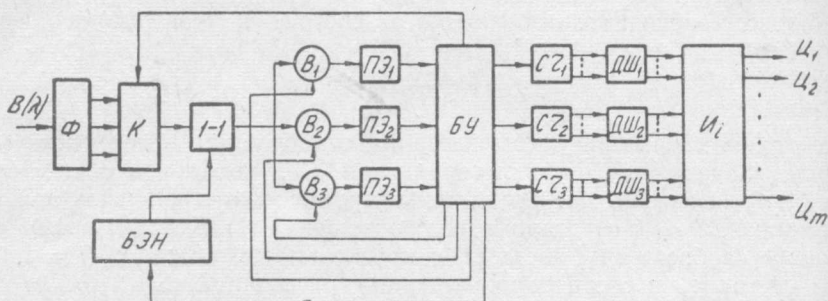


Рис. 1. Функциональная схема устройства для распознавания цветов: Φ — фотоколориметр; K — коммутатор каналов; $1-1$ — схема вычитания по модулю; V_1, V_2, V_3 — вентили; $ПЭ_1, ПЭ_2, ПЭ_3$ — пороговые элементы; $БЭН$ — блок эталонных напряжений; $сч_1, сч_2, сч_3$ — счетчики импульсов; $ДШ_1, ДШ_2, ДШ_3$ — дешифраторы; $И$ — набор схем совпадений; $БУ$ — блок управления.

Блок управления в соответствии с состоянием коммутатора каналов посылает в соответствующий счетчик импульсы, количество которых равно количеству эталонных напряжений, поданных на схему вычитания по модулю. Таким образом, счетчик ведет счет эталонов, расстояние до которых измерялось. Счет прекращается в момент появления на выходе

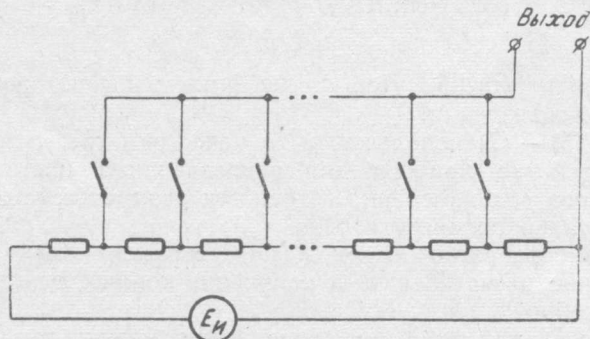


Рис. 2. К построению блока эталонных напряжений.

порогового элемента, соответствующего данному каналу, сигнала о том, что расстояние между компонентой цвета испытуемого излучения и компонентой цвета эталонного образца, с которым ведется сравнение в данный момент, меньше заданного порога нечувствительности. При этом в счетчике запоминается номер эталона, расстояние до которого меньше заданного.

Затем блок управления производит переключение каналов, и аналогичный счет эталонов ведется по второму, а затем и третьему каналам. Если какой-либо пороговый элемент не срабатывает после перечисления всех эталонов, блок управления сигнализирует о том, что данный испытуемый образец не соответствует ни одному из имеющихся эталонов.

После окончания счета эталонов по третьему каналу в каждом счетчике будет записан порядковый номер соответствующего эталона.

Каждый дешифратор ставит в соответствие данному номеру эталона в счетчике возбуждение определенной шины на выходе. Набор схем совпадений, каждая из которых объединяет по одной шине от каждого дешифратора, позволяет получить на выходе возбуждение шины, соответствующей обобщенному образу цвета, к которому отнесено исследуемое изображение цвета.

Блок эталонных напряжений БЭН (рис. 2) представляет собой делитель, питающийся от стабильного источника постоянного напряжения $E_{\text{н}}$ трех наборов ключевых схем, управляемых сигналами на выходных шинах дешифраторов. Число одновременно распознаваемых цветовых оттенков определяется числом эталонов.

Рассмотрим подробнее работу блока управления, функциональная схема которого представлена на рис. 3. При подаче сигнала *Пуск* триггер *T* переходит в состояние *O* и запускает схему формирования импульса установки нуля *Сх. „0“*, которая приводит в действие генератор импульсов *ГИ* и вызывает нулевое состояние счетчиков $C_{ч1}$, $C_{ч2}$, $C_{ч3}$, пересчетной схемы с тремя состояниями *ПС* и ключевых схем блока эталонных напряжений.

Пересчетная схема *ПС* обеспечивает работу прибора по первому каналу (переключает коммутатор каналов в соответствующее положение и подает запирающий сигнал на счетчики $C_{ч2}$ и $C_{ч3}$). Импульсы с *ГИ* начинают поступать в счетчик $C_{ч1}$. Сигналы с выхода дешифратора $DШ_1$ поступают в блок эталонных напряжений БЭН и обеспечивают последовательное включение ключевых схем. После срабатывания порогового элемента $ПЭ_1$ пересчетная схема *ПС* переходит во второе состояние, и в блоке эталонных напряжений включается второй набор ключевых схем. Прибор начинает работать аналогичным образом по второму каналу. После срабатывания порогового элемента $ПЭ_3$ триггер *T* переходит в состояние *1*, включается индикатор получения результата и срываются колебания генератора импульсов *ГИ*.

В случае, если какой-либо пороговый элемент не срабатывает, сигнал с последней шины соответствующего дешифратора включит индикатор отказа.

Известно, что порог нечувствительности зрения зависит от уровня интенсивности входного излучения. Это приводит к необходимости регулировки порога срабатывания $ПЭ$.

Наилучший способ регулировки состоит в нелинейном (например, логарифмическом) изменении сигналов с фотодатчика Φ .

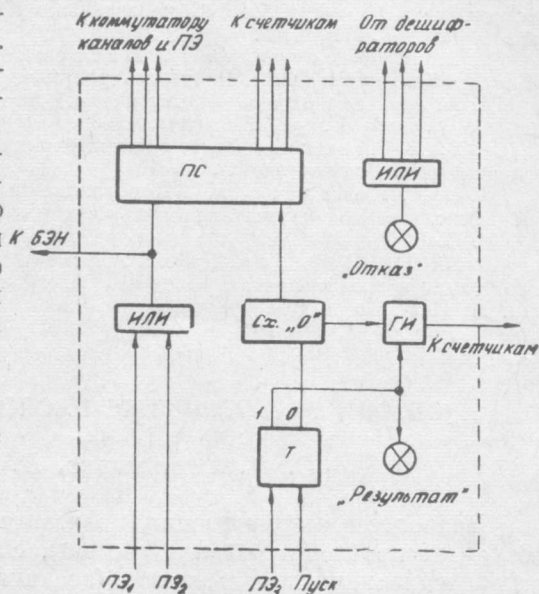


Рис. 3. Функциональная схема блока управления:

ПС — пересчетная схема; *Сх. „0“* — блок формирования импульса 0; *ГИ* — генератор импульсов; *T* — триггер.

Для осуществления возможности классификации оттенков цвета по светлоте, цветовому тону и насыщенности сигналы с выхода датчика цвета Φ необходимо подвергать преобразованиям, аналогичным алгоритму цветового зрения человека [9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Шкловер, Р. С. Иоффе. Фотоэлектрический колориметр с непосредственным отсчетом цвета КНО-3. «Светотехника», 1957. № 10.
2. C. I. Joung. Apparatus for indicating presence of predetermined colour sample. Пат. США, № 3210557 от 5/X 1965.
3. И. Я. Березная, Г. Я. Буслович, Г. Я. Пудков. Измерение готовности изделия по цвету. Сб. «Вычислительная техника и вопросы программирования» вып. 4, Изд-во ЛГУ, 1965.
4. В. А. Фесечко, А. Н. Петренко. Устройства распознавания цветного объекта. «Изв. вузов СССР. Радиоэлектроника», 1967, № 7.
5. А. И. Петренко. Автоматический ввод графиков в электронные вычислительные машины. Изд-во «Энергия», 1968.
6. В. В. Мешков. Основы светотехники, ч. II. Физиологическая оптика колориметрия. Госэнергоиздат, 1961.
7. В. А. Ковалевский. Корреляционный метод распознавания изображений. «Ж. вычислительной математики и математической физики», т. 1, 1962, № 4.
8. С. В. Кравков. Глаз и его работа. Изд-во АН СССР, 1950.
9. Ю. П. Шабанов - Кушнаренко. Математическая модель переработки информации в органе зрения человека. Сб. «Моделирование в биологии и медицине» вып. II. Изд-во «Наукова думка», Киев, 1966.

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

С. Н. Терентьев, В. М. Куценко

В процессе автоматизации производственной деятельности человека возникает проблема создания системы, способной реагировать на некоторые ограниченным числом решений (реакций) исполнительных органов на множество изменений характеристик внешней среды. Как человек, так и автомат принимают решение на основе отождествления совокупности конкретных значений характеристик объектов или явлений с некоторым классом, в который объединяются объекты или явления, имеющие общие свойства. Отождествление производится на основе анализа совокупности характеристик. Принятое решение однозначно определяет реакцию системы на данную входную ситуацию.

Такие классы объектов или явлений называют образами, а общую проблему — проблемой распознавания образов*.

Одно из направлений изучения и моделирования высшей нервной деятельности человека (в том числе и распознавания образов) — изучение характеристик живых организмов в целом и разработка методов построения новых технических распознающих систем, способных воспроизводить функции биологических систем, с последующей их реализацией.

Рассмотрим построение одного алгоритма распознавания образов на основе статистической теории распознавания.

Пусть поставлена задача распознавания двух классов объектов одной физической природы с качественно одинаковыми признаками. Такая цель может быть задана и в проблеме обнаружения сигнала сложной формы на фоне помех. Различие между классами — лишь в разных распределениях вероятностей значений признаков.

* Вопросы статистической теории распознавания. Изд-во «Сов. радио», 1967.