

Е. И. Чернов, О. Л. Головков
(Рязань)

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦВЕТА ОБЪЕКТОВ С ОБЪЕМНЫМ ДИФФУЗНЫМ РАССЕЯНИЕМ

Рассмотрены алгоритмы идентификации цвета объектов с объемным диффузным рассеянием (в стоматологии), преимущественно зубов, в соответствии с широко применяемыми цветовыми расцветками (цветовыми шкалами).

Данная работа посвящена алгоритмам определения цвета объектов с объемным диффузным рассеянием (преимущественно зубов) и стоматологических материалов, которые позволили с помощью разработанного нами прибора идентифицировать цвет зубов в соответствии с эталонными цветовыми расцветками (шкалами), применяемыми в стоматологии.

Рассмотрим вначале разработанный нами принцип регистрации исходных оптических характеристик объекта, на основании которых определяется его цвет [1, 2].

На исследуемый участок объекта (зуба, элемента цветовой шкалы) перпендикулярно к его поверхности устанавливается приемный световод измерительной головки прибора и подается оптическое излучение коаксиально относительно этого световода. Излучение в измерительной головке формируется таким образом, чтобы углы падения световых пучков, проходящих через круг, лежащий в плоскости входного окна световода, с центром, совпадающим с геометрическим центром входного окна световода, не превышали угол 25° (определен экспериментально) к плоскости этого круга. Оптическая схема, реализованная в приборе, оказывается максимально приближенной к оптической схеме регистрации исследуемого объекта глазом человека в естественных условиях. Как показали экспериментальные исследования, это обеспечивает практически полное совпадение результатов определения цвета, получаемых с помощью прибора и визуально с привлечением опытных стоматологов.

Источниками излучения в приборе служат суперъяркие светодиоды, формирующие исходные базовые цвета (голубой, зеленый, красный), с максимумами излучения на длинах волн: 475, 526 и 626 нм. На выходе приемного световода регистрируются излучения, по амплитудным значениям которых определяется цвет исследуемого участка зуба.

Перед каждым измерением осуществляется калибровка прибора. Для этого приемный световод измерительной головки устанавливается на калибровочный элемент, в качестве которого применяется стеклянная пластина, на

обратную сторону которой нанесен белый герметик. На выходе фотоприемника измерительной головки для каждого из базовых цветов формируются сигналы в виде напряжений:

$$U_{0г} \quad г \quad 0г \quad г; \quad U_{0з} \quad з \quad 0з \quad з; \quad U_{0к} \quad к \quad 0к \quad к, \quad (1)$$

где $U_{0г}, U_{0з}, U_{0к}$ – соответствующие трем базовым цветам (г – голубому, з – зеленому, к – красному) выходные напряжения фотоприемника измерительной головки прибора; $г, з, к$ – коэффициенты преобразования «свет–напряжение» фотоприемника; $0г, 0з, 0к$ – оптические характеристики калибровочного элемента; $г, з, к$ – величины световых потоков на выходе осветителя измерительной головки.

После калибровки прибора осуществляется регистрация оптических характеристик исследуемого участка зуба пациента или элементов эталонных расцветок. Напряжения на выходе фотоприемника ($U_{г}, U_{з}, U_{к}$) при этом также описываются выражением (1), но только вместо оптических характеристик калибровочного элемента учитываются оптические характеристики исследуемого участка зуба ($г, з, к$) или элемента эталонной расцветки. В разработанных нами алгоритмах по определению цвета объектов в соответствии с эталонными цветовыми расцветками используются триады исходных параметров в виде

$$X_{г} \quad U_{г}/U_{0г}; \quad X_{з} \quad U_{з}/U_{0з}; \quad X_{к} \quad U_{к}/U_{0к}. \quad (2)$$

В основу работы прибора было заложено три типа эталонных расцветок: Vitapan Classical Shade Guide, Vitapan 3D-Master, Chromascope. Кроме того, прибор позволяет записывать и другие типы стоматологических расцветок. Рассмотрим работу созданных алгоритмов для первого типа расцветок. Расцветка Vitapan Classical Shade Guide состоит из четырех групп оттенков:

$A1; A2; A3; A3,5; A4$ – красновато-коричневые;

$B1; B2; B3; B4$ – красновато-желтые;

$C1; C2; C3; C4$ – серые;

$D2; D3; D4$ – красновато-серые.

Для этой расцветки триады исходных параметров, записанные в памяти компьютера, представим в виде (для элемента $A1$) $X_{A1г}, X_{A1з}, X_{A1к}$.

Чтобы определить элемент расцветки, наиболее близкий по цвету к исследуемому участку зуба, вычисляются значения функции F (которая получена с использованием метода наименьших квадратов) для каждого элемента цветовой раскраски (в рассматриваемом случае 16 значений функций). Для элемента $A1$ имеем

$$F_{A1} \quad k_{г} \left| (X_{г}/X_{A1г})^2 - 1 \right| \left| (X_{з}/X_{A1з})^2 - 1 \right| \left| k_{к} \left| (X_{к}/X_{A1к})^2 - 1 \right| \right|, \quad (3)$$

где $k_{г}, k_{к}$ – коэффициенты, определенные с учетом усредненной кривой видности глаза [3]: $k_{г} = 0,14, k_{к} = 0,4$.

За меру цвета принимается такой элемент расцветки, для которого значение функции F оказывается минимальным.

Многочисленные экспериментальные исследования прибора, в том числе клинические испытания, проведенные в Центральном научно-исследовательском институте стоматологии, в стоматологическом комплексе Московского государственного медико-стоматологического университета и в стома-

тологической поликлинике МЗ РФ, выявили безошибочную работу прибора как с искусственными, так и с естественными зубами в трех зонах исследования зубов (шейка, центральная часть, режущий край). Прибор практически заменил несколько типов основных цветовых расцветок, широко применяемых в стоматологии, и сделал при этом процесс определения цвета автоматическим. Однако, как оказалось, это удовлетворило далеко не всех практикующих стоматологов. Специалистам, занимающимся высокохудожественной реставрацией зубов, недостаточно элементов в цветовых расцветках, поскольку палитра реальных цветовых оттенков значительно богаче применяемых стоматологических расцветок. Для решения этой проблемы авторы разработали еще два алгоритма, которые позволили увеличить количество «оценок» цвета (элементов разложения по цвету).

По рекомендации опытных стоматологов стали отдельно определять те элементы цветовых расцветок, которые наиболее близки к исследуемому участку зуба по светлоте, а также элементы, которые наиболее близки по обобщенному показателю, связанному с цветовым тоном и насыщенностью. По светлоте элементы групп A, B, C, D не совпадали друг с другом. Таким образом, все элементы расцветки Vitapan Classical Shade Guide образуют по светлоте неравномерную шкалу из 16 элементов.

Яркость L определяли как [4]

$$L = k_{\Gamma} X_{\Gamma} + X_3 + k_{\kappa} X_{\kappa}. \quad (4)$$

При этом выражение (3) преобразуется к виду (для элемента $A1$)

$$F_{A1} = \left| \frac{L}{L_{A1}} - 1 \right|. \quad (5)$$

Цветовой тон H и насыщенность C определяли с использованием цветового пространства CIELab [4] и параметров светодиодов (длин волн, соответствующих максимумам их излучения):

$$H = \arctg \left\{ \frac{X_{\kappa} - X_{\Gamma}}{[1,4X_3 + X_{\Gamma} + X_{\kappa}]} \right\}, \quad (6)$$

$$C = \left[(X_3)^2 + (X_{\kappa})^2 + (X_{\Gamma})^2 + 1,4X_3(X_{\kappa} - X_{\Gamma}) + 2X_{\kappa}X_{\Gamma} \right]^{1/2}. \quad (7)$$

С учетом H и C выражение (3) преобразуется к виду (для элемента $A1$)

$$F_{A1} = \left| \frac{H}{H_{A1}} - 1 \right| + \left| \frac{C}{C_{A1}} - 1 \right|. \quad (8)$$

Применение двух последних алгоритмов, основанных на выражениях (4)–(8), позволяет стоматологу более «тонко» определять цветовые оттенки при художественной реставрации зубов. Однако точно оценить возможное количество регистрируемых сочетаний «светлота–цветовой тон–насыщенность цвета» сложно, так как не все сочетания оказываются реализуемыми на практике. Так, при светлоте зуба, соответствующей элементу $A1$ (самый яркий элемент шкалы), его насыщенность не может соответствовать, например, элементу $B4$ (самому темному элементу шкалы). В природе таких зубов не существует. Но тем не менее можно сделать грубую оценку количества ре-

гистрируемых оттенков. Для светлых элементов ($A1; A2; B1; B2; C1; C2; D2$) возможно 49 сочетаний из этой группы элементов. Для темных элементов ($A3; A3,5; A4; B3; B4; C3; C4; D3; D4$) таких сочетаний оказывается 81. Таким образом, общее количество сочетаний получается 130. Следует еще раз отметить, что не все сочетания могут существовать на практике, однако их гораздо больше по сравнению с 16 оттенками для Vitapan Classical Shade Guide, 20 – для Chromascope и 26 – для Vitapan 3D-Master.

Результаты исследований были использованы при разработке анализатора цвета зубов «Спектродент».

ВЫВОДЫ

1. Применение алгоритма, основанного на выражении (3), в программном обеспечении прибора для определения цвета зубов позволило стоматологам быстро (около 1 с) и практически безошибочно определять цвет зубов и представлять результат исследования в виде ссылки на один из элементов стоматологических цветовых расцветок: Vitapan Classical Shade Guide, Vitapan 3D-Master, Chromascope.

2. Применение алгоритмов, основанных на выражениях (4)–(8), позволило почти на порядок увеличить количество «оценок» цвета (элементов разложения по цвету), что особенно важно при художественной реставрации зубов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. РФ 2207528. Способ определения цвета объектов и устройство для его осуществления /Е. И. Чернов, О. Л. Головков, В. К. Леонтьев, В. В. Садовский. Оpubл. 2003, Бюл. № 18.
2. Чернов Е. И., Головков О. Л., Хлуденева Л. А. Об одном из способов определения цвета объектов с диффузно рассеивающей свет неоднородной внутренней средой // Информатика и прикладная математика: Межвуз. сб. науч. тр. Рязань: Изд-во РГПУ, 2003. С. 65.
3. Гуревич М. М. Фотометрия. Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. Синяк М. А. Спектрофотометр: взгляд изнутри // Publish. 2002. № 2.

Рязанский государственный
педагогический университет,
E-mail: mohova@rspu.ryazan.ru

Поступила в редакцию
14 декабря 2004 г.