

## Использование модели репродукции микроорганизмов для восстановления цвета в изображении

Д.В. ТИМОШЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

В статье рассматривается модификация алгоритма колоризации, основанного на модели репродукции микроорганизмов. Предлагаются возможные варианты развития и применения данного подхода.

У статті розглядається модифікація алгоритму колоризації, що ґрунтується на моделі репродукції мікроорганізмів. Пропонуються можливі варіанти розвитку та використання даного підходу.

In article modification of colorization algorithm based on model of a reproduction of micro-organisms is described. Possible variants of development and application of the given approach are offered.

**Введение.** Применение биологических моделей хорошо себя зарекомендовало в самых разных отраслях инженерно-научной деятельности. Такие модели стали обычными инструментами для описания сложных технологических и социальных процессов. В данной работе представлен подход к восстановлению цвета в изображении с применением модели репродукции микроорганизмов.

Необходимость в восстановлении цветовых компонент черно-белого изображения чаще всего возникает при реставрации старых фотографий и фильмов, но также может иметь свое применение для кодирования цветовой информации в изображении. В связи с этим можно выделить восстановление цвета без информации об оригинальных цветовых слоях – только по данным эксперта, и восстановление цвета при наличии необходимой информации на этапе кодирования.

Идея автоматического восстановления цвета состоит в маркировании экспертом (или алгоритмом) некоторых пикселов изображения заданным цветом и транслировании этих цветов на все изображение по определенному закону, например, использующему изменения люминесцентной составляющей. Среди лидеров методов колоризации (процесс преобразования изображения в градациях серого в полноцветное изображение) следует отметить Hebrew University (Израиль) [1], Legend Films (США) [2], TimeBrush Studios (Австралия). Не останавливаясь на всех библиографических ссылках, заметим, что в основу предложенного подхода колоризации положена идея распространения цвета в виде размножающихся популяций бактерий, предложенная в работе В. Вежневца и В.Конюшина [3]. Модифицированное отражение этой идеи в данном варианте позволило сделать колоризацию более естественной и логичной.

**Колоризация по маркировочным пикселям.** Так как изображение в градациях серого представляет собой значения яркостей, то для воспроизведения цвета естественно использовать цветовую модель YUV [4], состоящую из собственно люминесцентной составляющей, теплых и холодных оттенков цветовой гаммы. Поэтому будем отсылаться к изображению в градациях серого, как к люминесцентной составляющей изображения  $Y = \{y_{i,j}\}$  с размерами  $W \times H$ . Таким образом, задача колоризации состоит в восстановлении цветовых компонент  $U = \{u_{i,j}\}$  и  $V = \{v_{i,j}\}$  по информации о цвете маркированных точек.

Исходя из идеи распространения цвета в изображении как моделирования процесса размножения

бактерий, маркированные пикселы будут представлять собой родительские особи, порождающие соответствующую популяцию.

Популяцией будем называть такое множество пикселов, которые имеют одинаковый закон распределения цвета.

Разобьем процесс колоризации на 3 этапа:

1. Построение области репродукции каждой популяции.

2. Формирование цвета каждой популяции.

3. Формирование итогового общего цвета (то есть компонент  $U = \{u_{i,j}\}$  и  $V = \{v_{i,j}\}$ ) исходя из цвета каждой популяции с учетом возможных цветовых мутаций.

Перейдем к описанию алгоритма.

Пусть экспертом (или алгоритмом) отмечены  $N$  точек  $K$  цветами. Таким образом, на изображении будут представлены  $k$  популяций ( $\Pi^k, k = 1, 2, \dots, K$ ) с первоначальной численностью бактерий  $n_k$  каждая ( $\sum_{k=1}^K n_k = N$ ).

Все популяции  $\Pi^k$  развиваются независимо друг от друга на матрице яркости изображения. Это обеспечивает независимость от очередности достижения каждой ячейки  $(i, j)$  представителями разных популяций, что является одной из отличительных особенностей предложенного подхода. В этом случае сложные цветовые сочетания отображаются корректно, например, многоцветный градиент.

Каждая точка  $(i, j)$  популяции  $\Pi^k$  обладает жизнестойкостью  $p^k_{i,j} > 0$ , характеризующей претензии особей этой популяции на ячейку матрицы яркости  $y_{i,j}$  ( $p^k_{i,j}$  может принимать значения от 0 до 1). Для всех точек  $(i, j) \notin \Pi^k$   $p^k_{i,j} = 0$ .

Таким образом, каждой популяции поставлена в соответствие матрица жизнестойкости  $P^k = \{p^k_{i,j}\}$  с размерами  $W \times H$  и матрицы с такими же линейными размерами  $U^k = \{u^k_{i,j}\}$  и  $V^k = \{v^k_{i,j}\}$ , характеризующие цветовые компоненты.

Базисом популяции  $B^k$  будем называть множество точек  $(i, j)$ , представляющие собой маркировочные пикселы. Полагаем, что жизнестойкость маркировочных пикселов, как гарантировано окрашенных в задан-

ный цвет, должна соответствовать максимальному значению  $p^k_{i,j} = 1$ ,  $(i, j) \in B^k$ . Каждому базису популяции  $B^k$  соответствуют маркировочные цветовые компоненты  $u^k_{i,j}$ ,  $v^k_{i,j}$ ,  $(i, j) \in B^k$ . На вопросе их формирования из цветных экспертных точек остановимся позже.

Окрестностью точки  $(i, j)$  будем называть  $D_{i,j} = \{(v, \mu) \mid \max(|i-v|, |j-\mu|) = 1\}$ .

Процесс распространения популяции выражается в присоединении новых клеток и формировании их жизнестойкости исходя из жизнестойкостей соседних с ней клеток. Изначально нам известна информация только о базисных клетках. Поэтому процесс захвата новых клеток и расчета их жизнестойкостей начинается с точек, лежащих в окрестности базисных.

Пусть есть некая популяция  $\Pi^k$  с построенными жизнестойкостями. Популяция имеет возможность размножиться из точки  $(i, j) \in \Pi^k$  в точку  $(v, \mu) \in D_{i,j}$ , если и у бактерии в точке  $(i, j)$  будет достаточная жизнестойкость для преодоления расстояния  $|y_{i,j} - y_{v,\mu}|$ . То есть

$$p^k_{i,j} \cdot e^{-\lambda|y_{i,j} - y_{v,\mu}|} > p^k_{v,\mu}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  - заданная положительная величина, регулирующая скорость вымирания популяции.

Если выполнено условие (1), то популяция  $\Pi^k$  занимает клетку  $(v, \mu)$  и формирует в ней особь с жизнестойкостью

$$p^k_{v,\mu} = p^k_{i,j} \cdot e^{-\lambda|y_{i,j} - y_{v,\mu}|}. \quad (2)$$

При этом типична ситуация выполнения условия (1) для  $(i, j), (v, \mu) \in \Pi^k$ . В этом случае клетка  $(v, \mu)$  повторно не занимается, а только пересчитывается жизнестойкость в этой ячейке согласно формуле (2).

### 1. Построение области распространения и влияния бактерий каждой популяции

Будем считать, что максимальная по жизнестойкости популяция базиса  $B^k$  отражает зону распространения базового цвета. То есть среди всех вариантов популяций из базиса  $B^k$  найдем такую популяцию  $\Pi^k$ , для которой

$$\sum_{(i,j) \in \Pi^k} p^k_{i,j} \rightarrow \max.$$

Построение максимальной по жизнестойкости популяции будем проводить итерационно.

Пусть изначально популяция  $\Pi^k = B^k$ .

**А.** Каждую точку  $(v, \mu) \notin \Pi^k$  проверяем на возможность присоединения к популяции. То есть если  $\exists (i, j) \in D_{v,\mu}, (i, j) \in \Pi^k$ , что выполняется условие (1), то по (2) строим  $p^k_{v,\mu}$ ,  $(v, \mu) \in \Pi^k$ . Как только никакая точка не может быть присоединена к популяции, то переходим к процессу пересчета жизнестойкости внутри популяций, то есть к пункту В.

**В.** Проверяем каждую точку  $(v, \mu) \in \Pi^k$  на предмет увеличения ее жизнестойкости. Если  $\exists (i, j) \in D_{v,\mu}$ ,  $(i, j) \in \Pi^k$ , что выполняется условие (1), то по (2) пересчитываем  $p^k_{v,\mu}$ . Когда ни в одной точке популяции

нельзя увеличить жизнестойкость, то, считая полученную популяцию исходной, переходим к присоединению новых точек в популяцию и т.д. – то есть к пункту А.

Описанная процедура продолжается до тех пор, пока на некоторой итерации популяция не претерпит никаких изменений. То есть при шаге А ни одна новая клетка не будет присоединена к популяции и при шаге В ни одна клетка в популяции не будет пересчитана.

После того, как популяция стабилизировалась, из нее удаляются самые слабые особи, то есть те, у которых

$$p^k_{i,j} < \varepsilon.$$

Итогом данного этапа являются популяции  $\Pi^k$ ,  $k=1,2,\dots,K$  с их матрицами жизнестойкостей  $P^k$ .

На следующем этапе каждая популяция получает закон распределения цвета.

### 2. Формирование цвета каждой популяции

Основным носителем цвета популяции является ее базис. В начале этого этапа цвет есть только у него. Таким образом, при наличии зоны распространения популяции  $\Pi^k$ , необходимо согласно  $u^k_{i,j}$ ,  $v^k_{i,j}$ ,

$(i, j) \in B^k$  сформировать  $u^k_{i,j}$ ,  $v^k_{i,j}$ ,  $(i, j) \in \Pi^k$ .

Пусть  $\tilde{\Pi}^k$  – популяция, обладающая информацией о цвете на всей своей территории. Очевидно, что на начальном этапе  $\tilde{\Pi}^k = B^k$ . Будем присоединять точки к популяции  $\tilde{\Pi}^k$  в порядке уменьшения их жизнестойкости и формировать их цвет по определенному правилу, используя информацию о цвете и жизнестойкости соседних цветных клеток. Таким образом, имеет место следующий алгоритм.

**А.** Определяем очередного претендента на получение цвета. Первоначально такими претендентами являются бесцветные клетки популяции  $\Pi^k$  с максимальной среди бесцветных клеток жизнестойкостью. То есть

$$\tilde{p}^k_{v,\mu} = \max_{(i,j) \in \Pi^k} p^k_{i,j}. \quad (3)$$

Не трудно заметить, что из всех  $\tilde{p}^k_{v,\mu}$ , удовлетворяющих (3), всегда существуют хотя бы одна такая  $\tilde{p}^k_{v^*,\mu^*}$ , где в окрестности  $(v^*, \mu^*)$  есть уже окрашенная точка.

То есть  $\exists (v^*, \mu^*)$ , что  $\tilde{p}^k_{v^*,\mu^*} = \max_{(i,j) \in \tilde{\Pi}^k} p^k_{i,j}$  и  $\exists (i, j) \in D^k_{v^*,\mu^*}$ , для которой  $(i, j) \in \tilde{\Pi}^k$ .

Эта точка есть окончательный претендент на получение цвета.

**В.** Формируем цвет в точке  $(v, \mu) = (v^*, \mu^*)$ , используя информацию о цвете соседних с ней окрашенных клеток. Таким образом, цветовые компоненты в точке находятся по следующим формулам:

$$u^k_{v,\mu} = \frac{\sum p^k_{i,j} \cdot u^k_{i,j} \mid (i, j) \in D^k_{v,\mu}, (i, j) \in \tilde{\Pi}^k}{\sum p^k_{i,j} \mid (i, j) \in D^k_{v,\mu}, (i, j) \in \tilde{\Pi}^k},$$

$$v^k_{v,\mu} = \frac{\sum p^k_{i,j} \cdot v^k_{i,j} \mid (i, j) \in D^k_{v,\mu}, (i, j) \in \tilde{\Pi}^k}{\sum p^k_{i,j} \mid (i, j) \in D^k_{v,\mu}, (i, j) \in \tilde{\Pi}^k}. \quad (4)$$

После получения цвета точка  $(v, \mu)$  присоединяется к популяции  $\tilde{\Pi}^k$ . Если выполняется условие  $\Pi^k \setminus \tilde{\Pi}^k \neq \emptyset$ , то снова переходим к пункту А.

Таким образом, каждая популяция заполняет свои соответствующие матрицы  $U^k, V^k$ .

### 3. Формирование итогового общего цвета

Для получения финальных цветовых матриц  $U$  и  $V$  совместим матрицы  $U^k, V^k$ . Нередки ситуации, когда на одну и ту же ячейку  $(i, j)$  претендует несколько популяций. В этом случае, можно отдать клетку  $(i, j)$  популяции с большей жизнестойкостью в данной ячейке. Но тогда итоговое цветное изображение будет иметь резкие цветовые контуры. Особенно это будет заметно в местах предположительного плавного цветового перехода, что делает невозможным формирование, например, многоцветного градиента. Поэтому будем формировать итоговый цвет в  $(i, j)$  с учетом всех претензий на эту ячейку.

$$u_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^K p^k_{i,j} \cdot u^k_{i,j}}{\sum_{k=1}^K p^k_{i,j}}; v_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^K p^k_{i,j} \cdot v^k_{i,j}}{\sum_{k=1}^K p^k_{i,j}}. \quad (5)$$

Таким образом, в конце этого этапа получаем полноцветное изображение.

При данном подходе к колоризации на текущий момент остался неосвещенным вопрос о формировании первоначальных базовых цветовых компонент в точках  $(i, j): (i, j) \in B^k$ .

**Установка цветовых компонент базовых клеток.** Пусть определенным цветом  $(r^k, g^k, b^k)$  на изображении маркированы пиксели. Один из вариантов формирования базовых цветовых компонент – это их прямое снятие с маркировочного цвета. То есть

$$u^k_{i,j} = u^k, v^k_{i,j} = v^k, (i, j): (i, j) \in B^k,$$

где  $u^k, v^k$  – значения при переходе вектора  $(r^k, g^k, b^k)$  из  $RGB$  в  $YUV$ .

Для формирования  $u^k_{i,j}, v^k_{i,j} (i, j): (i, j) \in B^k$ , чувствительных к люминесцентной составляющей в базовых точках, предложен способ получения цветовых компонент для каждой популяции, использующий, как считается, самую логичную для восприятия человеком систему передачи цвета  $HSB$  [4] ( $H$  – длина волны,  $S$  – насыщенность,  $B$  – яркость).

Будем считать, что маркированные точки несут в себе только информацию о длине волны. Тогда цвет базисных клеток, зависящий от яркости, может быть найден, например, так

$$h^k_{i,j} = h^k, b^k_{i,j} = \frac{y_{i,j}}{y_{\max}}, s^k_{i,j} = \frac{y_{\max} - y_{i,j}}{y_{\max}}, \quad (6)$$

$$(i, j): (i, j) \in B^k,$$

где  $h^k_{i,j}, s^k_{i,j}, b^k_{i,j}$  – цвет базовых точек в системе  $HSB$ ,  $h^k$  – длина волны, полученная из маркировочного цвета  $(r^k, g^k, b^k)$ ,  $y_{\max}$  – максимально возможное значение  $Y$  для заданной системы перехода из  $RGB$  в  $YUV$ .

Осуществляя переход из  $h^k_{i,j}, s^k_{i,j}, b^k_{i,j}$  к  $y^k_{i,j}, u^k_{i,j}, v^k_{i,j}$ ,  $(i, j): (i, j) \in B^k$ , получаем значения цветовых плоскостей, зависящих от изменения люминесцентной составляющей.

Используя предложенный способ получения цветовых компонент, учитывающих яркость, можно сформулировать разновидность колоризации популяции бактерии без внутренних мутаций. В этом случае каждой точке популяции присваивается цвет согласно правилу:

$$h^k_{i,j} = h^k, b^k_{i,j} = \frac{y_{i,j}}{y_{\max}}, s^k_{i,j} = \frac{y_{\max} - y_{i,j}}{y_{\max}},$$

$$(i, j): (i, j) \in \Pi^k.$$

Заметим, что при колоризации по данному закону необходимо учитывать сохранение  $y_{i,j}$  и проводить нормировку яркости.

Так же можно предложить альтернативы закону для зависимости цвета от яркости (6), которые используют дополнительную управляющую информацию. Само по себе описание зависимости цвета от яркости в программных продуктах по колоризации часто оперирует шаблонами законов по экспертным данным. То есть при колоризации явно указывается, что маркированные точки – маркировка травы, одежды, человеческой кожи и т.д., каждому из этих типов соответствует собственный закон распределения цвета, в зависимости от яркости. При отсутствии дополнительной информации в большинстве случаев закон (6) удачно отражает цвет при восстановлении цветов в старых фотографиях и фильмах – цвета выглядят естественно, придавая гармоничный цветовой тон люминесцентной составляющей.

### Модификации и обобщения алгоритма колоризации

**Правило построения жизнестойкости.** В описанном выше алгоритме задача колоризации была рассмотрена только с точки зрения зависимости распространения цвета от яркости. На данный момент правило, по которому новая клетка присоединялась к популяции (1) учитывает изменение яркости, но не учитывает, например, структуру данных.

Для того чтобы охватить более общий случай, можно записать формулу получения жизнестойкости (2) в следующем виде:

$$p^k_{v,\mu} = p^k_{i,j} \cdot \sqrt[T]{\prod_t d_t((i, j), (v, \mu))},$$

$$(i, j) \in \Pi^k, (v, \mu) \in D_{i,j},$$

где  $T$  – количество критериев для определения сходства точек,  $d_t((i, j), (v, \mu))$  определяет степень «похожести» точки  $(i, j)$  с точкой  $(v, \mu)$  по  $t$ -му признаку.

В рассмотренном нами варианте  $T=1$ ,  $d_1 = e^{-\lambda|y_{i,j} - y_{v,\mu}|}$ .

Таким образом можно изменить правило расчета жизнестойкости, а вся оставшаяся логика алгоритма формирования полноцветного изображения по маркировочным пикселям остается прежней.

**Колоризация видеопоследовательности.** На сегодняшний день интерес к колоризации выражается именно в ее применении к видео. Рассматривая фильм как последовательность фреймов, можно колоризовать каждый фрейм с помощью алгоритмов для колоризации

изображений. Но у этого подхода есть два существенных недостатка:

1. Высокая трудоемкость.

2. Появление визуального эффекта «мигания» цвета по времени при просмотре колоризованного фильма. Обуславливается тем, что при пофреймовой колоризации у двух соседних по времени кадров нет преемственности цветов. Так как в каждом фрейме цвета восстанавливаются независимо.

Таким образом, при разработке алгоритмов колоризации видео, необходимо изначально закладывать преемственность цветов по временной шкале. Для организации такого рода временной связи можно использовать модель репродукции микроорганизмов, при которой позволит популяции разрастаться не только в плоскости фрейма, но и вдоль временной линии фильма.

Не представляет особой сложности теоретически распространить описанный выше алгоритм колоризации изображений на случай видеопоследовательности (то есть 3-х мерный случай). Достаточно двумерные данные заменить на трехмерные. Но вместе с простотой теоретического обобщения двухмерного случая на трехмерный появляются большие сложности при организации процесса колоризации видеопоследовательности в режиме реального времени. Поэтому на базе существующей модели репродукции микроорганизмов была разработана псевдотрехмерная колоризация.

Основной идеей псевдотрехмерной колоризации является послонная колоризация фильма, которая выражает себя в ограничении роста популяций по временной линии. На практике наиболее подходящей показала себя однонаправленная колоризация при ограничении области репродукции популяции 3-мя фреймами (слоями) по времени. То есть вдоль каждого фрейма бактерии могут распространяться, пока достаточно жизнестойкости, а вдоль времени насильно останавливается рост популяций. При этом полученные цвета фиксируются, а последний из колоризованных фреймов становится базисом для развития следующих популяций. Затем, основываясь на его цветовой информации, строятся следующие популяции и т. д.

При таком подходе можно выделить такие этапы колоризации видеопоследовательности:

- разбиение фильма на сцены;
- расстановка маркировочных точек на некоторых фреймах. В идеале – на первом и последнем фрейме сцены.
- формирование трехмерных популяций по маркировочным точкам
- формирование итогового цвета каждого фрейма с учетом мутаций.

Помимо скорости и качества в колоризации (особенно в отношении видео) важное место занимает интерактивность алгоритма и эксперта.

Чаще всего при маркировании экспертом пикселей с первого раза получить желаемый результат не удается. Требуются дополнительные маркировки. Обычно добавление новых точек после того, как цветовые матрицы уже построены, приводит к полному пересчету всего алгоритма. В предложенном подходе сохраняется интерактивность эксперта и алгоритма колоризации. При добавлении новых маркировок просто выращиваются новые популяции, независимо от остальных. На последнем этапе согласно правилу мутаций

(5) формируется результат. При этом в пересчете уже существующих популяций необходимости нет.

Таким образом, алгоритм колоризации, основывающийся на предложенном подходе к восстановлению цвета в изображениях, может быть успешно применен для колоризации видеоряда.

**Применение колоризации к сжатию изображений.** Колоризация может быть использована для улучшения сжатия полноцветных изображений. В этом случае постановка задачи выглядит следующим образом.

Пусть задано полноцветное изображение. В каких местах необходимо поставить маркировочные пиксели и с каким цветом, чтобы при заданном алгоритме восстановления цвета получить исходное (или близкое к нему) полноцветное изображение.

Естественно задача в такой постановке имеет наибольший смысл в таких изображениях, где количество областей с уникальными цветами не велико. Например, она может быть применена к обработке векторного слоя «деловая графика» в формате сжатия растровых электронных документов [5]. Примерами таких изображений могут служить такие элементы как диаграммы.

В ближайших планах автора исследование вопроса применения описанного алгоритма колоризации к сжатию элементов «деловой графики».

## Выводы

1. Предложена модификация алгоритма колоризации изображения, основанного на модели репродукции микроорганизмов. Основные отличия этого алгоритма: независимая репродукция популяций с формированием соответствующего закона распределения цвета, правило мутации бактерий и использование мутаций в системе HSB.

2. Описанный подход позволяет делать колоризацию как существенно трехмерную, так и псевдотрехмерную для организации процесса колоризации видеоряда в режиме реального времени.

3. Данный алгоритм колоризации изображений может быть применен к сжатию цветовых плоскостей в полноцветном изображении. Это позволит при сжатии цвета естественным образом использовать закодированную информацию о яркостной составляющей изображения.

Описанный подход был апробирован для колоризации изображений и видеопоследовательности. По результатам исследований был создан программный продукт.

Выражаю благодарность научному руководителю профессору Лигуну А.А. за постановку задачи и профессору Шумейко А.А. за полезное обсуждение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Levin A., Lischinski D., Weiss Y. Colorization using optimization // ACM Transactions on Graphics (TOG), ACM SIGGRAPH 2004 Papers SIGGRAPH .–3–2004.
2. Marcle W. The development and application of colorization // SMPTE Journal,– 1984 . – P. 632–635
3. Vezhnevets V., Konouchin V. Interactive Image Colorization and Recoloring Based on Coupled Map Lattices // Novosibirsk Akademgorodok. – Graphicon-2006. – 2006

4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1070 С.
5. Лигун А.О., Шумейко О.О., Тимошенко Д.В. ALL-Document – технологія нового покоління для збереження, передачі та відображення електронних документів // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля .– №9 (103) Частина 1 .– 2006 .– С. 83-85